



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KONSOLIDASYON SÜRESİNCE
KİL YAPISINDAKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI**

**İnş. Müh. Birkan YÜKSEL
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı**

**Danışman
Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU**

Ocak 2007

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KONSOLIDASYON SÜRESİNCE
KİL YAPISINDAKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI**

**İnş. Müh. Birkan YÜKSEL
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı**

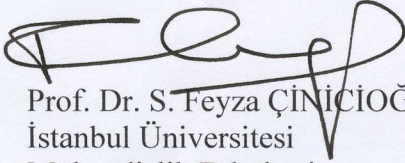
**Danışman
Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU**

Ocak 2007

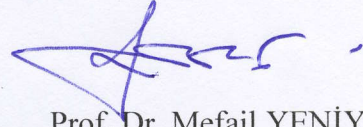
İSTANBUL

Bu çalışma 08/02/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

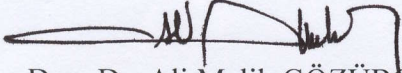
Tez Jürisi



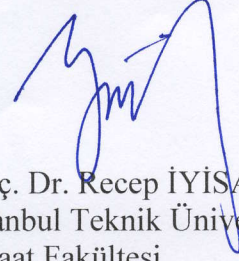
Prof. Dr. S. Feyza ÇINICIOĞLU (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Mefail YENİYOL
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Ali Malik GÖZÜBOL
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Recep İYİSAN
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



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

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliđinin T-806/27122005 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, tez çalışması boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, sürekli yardım eden ve yol gösteren, değerli fikirlerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım süresince maddi ve manevi destek veren ve yoğun çalışmalarımı anlayışla karşılayan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Boğaziçi Üniversitesi AR-GE Merkez Laboratuvarı ve İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarında sağlanan olanaklardan ve gösterdikleri ilgiden dolayı tüm laboratuvar çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Yük. Müh. Cihan ÖSER ve Tek. Oğuz FIRİDİN'e teşekkür ederim.

Dr. İnş. Yük. Müh. Orkun Zeki AKKOL ve İnş. Müh. Bilgehan KOZANOĞLU başta olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

OCAK 2007

Birkan YÜKSEL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	V
TABLO LİSTESİ	X
SEMBOL LİSTESİ	XI
ÖZET.....	XII
SUMMARY	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. KİLLERİN OLUŞUMU VE ÖZELİKLERİ.....	3
2.2. JEOLÖJİK SÜREÇ VE KİL SEDİMANLARININ OLUŞUMU	3
2.3. KİL MİNERALLERİ	5
2.4. KİL MİNERALLERİNİN OLUŞUMU	5
2.4.1. Silika Tabakaları	8
2.4.2. Silika Zincirleri	8
2.4.3. Sekiz Köşeli Tabakalar	8
2.4.4. İzomorf Yer Değiştirme	9
2.5. KİL MİNERALLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	9
2.6. KİL MİNERALLERİNİN TANINMASI	12
2.7. KİL TÜRLERİNİN OLUŞMASINDAKİ ETKENLER	14
2.8. KİL-SU SİSTEMİ.....	15
2.8.1. Kil Danesinin Özellikleri	15
2.8.2. Çiftli Tabakanın Oluşumu	16
2.8.3. Daneler Arasındaki Kuvvetler.....	18
2.9. KİLDE DOKU VE YAPI	19
2.10. KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE BİLEŞİMİ.....	26
2.11. KİLLERİN BİLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ	27

2.12.	KONSOLİDASYON VE KONSOLİDASYON OTURMALARI.....	31
2.13.	OTURMANIN BİLEŞENLERİ.....	31
2.14.	ZEMİNLERİN SIKIŞABİLİRLİĞİ.....	33
2.15.	KONSOLİDASYON OTURMASI VE ZAMANA BAĞLI İKİNCİL OTURMALAR	34
2.16.	BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON; REOLOJİK MODEL	34
2.17.	İKİNCİL KONSOLİDASYON.....	35
2.18.	JEOLJİK GEÇMİŞİN SIKIŞABİLİRLİĞE ETKİSİ.....	36
2.18.1.	Normal Konsolide Killer.....	36
2.18.2.	Aşırı Konsolide Killer	37
2.18.3.	Aşırı Konsolidasyonun Nedenleri	38
2.18.4.	Yaşlanmanın Aşırı Konsolidasyona Etkisi.....	38
2.18.5.	Konsolide Olmamış Killer	39
2.19.	BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON TEORİSİ.....	39
2.20.	KONSOLİDASYON PROBLEMLERİNİN BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON TEORİSİYLE ANALİZİ.....	40
2.21.	BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON TEORİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ.....	40
2.22.	SIKIŞMA KARAKTERİSTİKLERİNİN REOLOJİK YÖNTEMLE BELİRLENMESİ.....	42
2.22.1.	Elastisite, Viskozite ve Plastisite.....	42
2.23.	KONSOLİDASYON DENEYİ.....	43
2.23.1.	Sıkışabilirliğin Ödometre'de Ölçümü.....	46
2.23.2.	Ödometre Deneyinde Karşılaşılan Sorunlar	47
3.	YÖNTEM VE MALZEME	49
3.1.	GİRİŞ.....	49
3.2.	MALZEME	50
3.2.1.	Kaolen Kilinin Mühendislik Özellikleri.....	50
3.2.1.1.	İndeks Özellikleri.....	50
3.2.1.2.	Kimyasal Analiz.....	51
3.3.	DENEY DÜZENİ, DENEY PROGRAMI VE DENEYLERİN YAPILIŞI	53
3.3.1.	Konsolidasyon Deneyleri	53
3.4.	ELEKTRON MİKROSKOBU ANALİZLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ.....	56
3.4.1.	Elektron Mikroskobu Analizi.....	57
3.4.2.	ESEM Analizleri	58
4.	BULGULAR	62

4.1.	KONSOLİDASYON DENEYLERİ.....	62
4.2.	ESEM ANALİZLERİ.....	70
4.2.1.	Örselenmemiş Numune Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri	71
4.2.2.	20 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri.....	73
4.2.3.	50 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri.....	76
4.2.4.	100 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri.....	80
4.2.5.	200 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri.....	84
4.2.6.	400 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri	87
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	92
	KAYNAKLAR	95
	EK A	98
	ÖZGEÇMİŞ.....	130

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Jeolojik Süreç	4
Şekil 2.2	Kaya oluşum süreci	4
Şekil 2.3	(a) Tek silika tetrahedronu. (b) Silika levhası veya tetrahedralin izometrik görünümü. (c) Silika levhasının şematik temsili (d) Silika levhasının tepeden görünümü.	6
Şekil 2.4	(a) Tek alüminyum (veya magnezyum) oktahedronu. (b) Oktahedral levhasının izometrik görünümü (c) Oktahedral veya alüminyum (veya magnezyum) levhasının şematik temsili. (d) Oktahedral levhasının tepeden görünümü	7
Şekil 2.5	Georgia'dan iyi kristallenmiş bir kaolinitin taramalı elektron mikrografı.	10
Şekil 2.6	Wyoming'den bir sodyum montmorillonitin taramalı elektron mikrografı.....	10
Şekil 2.7	Fithian (Illinois)'den bir illitin taramalı elektron mikrografı.	10
Şekil 2.8	Casagrande'nin plastite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları	13
Şekil 2.9	Kil yüzeyinin su ve değişebilir katyonlarla ilişkisi	16
Şekil 2.10	Çiftli tabakanın oluşması ve konumu.....	17
Şekil 2.11	Yassı Plaklar Arasında Enerji Eğrileri	19
Şekil 2.12	Kil Yapısı	20
Şekil 2.13	Cassagrande'nin ilk Doku Modeli	20
Şekil 2.14	Bir kil süspansiyonundaki dane oryantasyonu modelleri.....	21
Şekil 2.15	Dane grubunun şematik gösterilişi.....	23
Şekil 2.16	Tucson Siltli Kilinin Tüm Mikrofabrik Yapısı	23
Şekil 2.17	Örselenmemiş Zeminin Fabrik Yapısının SEM ile Görünüşü.	24
Şekil 2.18	Örselenmemiş Zeminin Fabrik Yapısının SEM ile Görünüşü (Devam).	25
Şekil 2.19	Zeminin Bileşim Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Genel Yaklaşım	29
Şekil 2.20	Yük altındaki bir zemindeki konsolidasyon-zaman ilişkisi	33
Şekil 2.21	Bir boyutlu konsolidasyon; reolojik modeli.....	34
Şekil 2.22	Konsolidasyon sırasında meydana gelen yük transferi	35
Şekil 2.23	Kohezyonlu zeminlerin yük altında toplam oturması	36
Şekil 2.24	Aşırı konsolide bir kilin sıkışma eğrisi	37
Şekil 2.25	Sıkışma bileşenleri	43
Şekil 2.26	Ödometre tipleri a) yüzen halkalı b) sabit halkalı.....	47
Şekil 3.1	AR-GE laboratuvarında yapılan XRD analizi.....	52
Şekil 3.2	Deney düzeni.....	53
Şekil 3.3	Konsolidasyon deneyi yapılmış numunelerin ESEM analizleri için hazırlanması	58
Şekil 3.4	Numunenin ESEM analizleri için hazırlanması	59
Şekil 3.5	Philips XL 30 ESEM-FEG marka ESEM aleti	60

Şekil 4.1	Konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait boşluk oranı-zaman grafiği	63
Şekil 4.2	Konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait boşluk oranı-basınç grafiği.....	63
Şekil 4.3	A1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	64
Şekil 4.4	A2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	65
Şekil 4.5	A3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	66
Şekil 4.6	A4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	67
Şekil 4.7	A5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	68
Şekil 4.8	Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 1 dakika süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği.....	69
Şekil 4.9	A grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği.....	70
Şekil 4.10	Örselenmemiş ve yüklenmemiş numune	72
Şekil 4.11	Örselenmemiş ve yüklenmemiş numune	72
Şekil 4.12	20 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A1).....	73
Şekil 4.13	20 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A2)	74
Şekil 4.14	20 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A3)	75
Şekil 4.15	20 kPa gerilme seviyesinde 72saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A4).....	75
Şekil 4.16	20 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No: A5)	76
Şekil 4.17	50 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: B1).....	77
Şekil 4.18	50 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:B2)	77
Şekil 4.19	50 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: B3)	78
Şekil 4.20	50 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:B4)	79
Şekil 4.21	50 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:B5)	80
Şekil 4.22	100 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: C1).....	80
Şekil 4.23	100 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:C2)	81

Şekil 4.24	100 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: C3)	82
Şekil 4.25	100 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:C4)	83
Şekil 4.26	100 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:C5)	83
Şekil 4.27	200 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: D1)	84
Şekil 4.28	200 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:D2).....	85
Şekil 4.29	200 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:D3).....	85
Şekil 4.30	200 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:D4).....	86
Şekil 4.31	200 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:D5)	87
Şekil 4.32	400 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: E1)	88
Şekil 4.33	400 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:E2)	88
Şekil 4.34	400 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:E3)	89
Şekil 4.35	400 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:E4)	90
Şekil 4.36	400 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:E5).....	90
Şekil A.1	B1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	101
Şekil A.2	B2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	102
Şekil A.3	B3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	103
Şekil A.4	B4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	104
Şekil A.5	B5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	105
Şekil A.6	C1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	106
Şekil A.7	C2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	107

Şekil A.8	C3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	108
Şekil A.9	C4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	109
Şekil A.10	C5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	110
Şekil A.11	D1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	111
Şekil A.12	D2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	112
Şekil A.13	D3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	113
Şekil A.14	D4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	114
Şekil A.15	D5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	115
Şekil A.16	E1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	116
Şekil A.17	E2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	117
Şekil A.18	E3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	118
Şekil A.19	E4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	119
Şekil A.20	E5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)	120
Şekil A.21	Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 15 dakika süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği.....	121
Şekil A.22	Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 24 saat süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği.....	122
Şekil A.23	Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 72 saat süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği.....	123

Şekil A.24	Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasından sonra boşaltma uygulanmış numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği.....	124
Şekil A.25	B grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği.....	125
Şekil A.26	C grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği.....	126
Şekil A.27	D grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği.....	127
Şekil A.28	E grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği	129

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Killerin sınıflandırılması	11
Tablo 2.2	Zeminin fabrik yapısının belirlenmesinde kullanılan teknikler	30
Tablo 2.3	Bir boyutlu konsolidasyon teorilerinin temel denklemleri	40
Tablo 3.1	Zeminin indeks özellikleri.....	50
Tablo 3.2	Deneylerde kullanılan numunenin içeriği	51
Tablo 3.4	Kale Maden tarafından yapılan kimyasal analiz sonuçları	51
Tablo 3.5	Konsolidasyon deneylerinde kullanılan yük kademeleri ve bekleme süreleri.....	55
Tablo 4.1	Konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait özet bilgiler	62
Tablo 4.2	A grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri.....	70
Tablo A.1	B grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri.....	125
Tablo A.2	C grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri.....	126
Tablo A.3	D grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri.....	127
Tablo A.4	E grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri	128

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
a_v	: Sıkışabilirlik katsayısı
Cr	: Tekrar kabarma indisi
C_v	: Konsolidasyon katsayısı
de^{ir}	: Geri dönemeyen sıkışma
de^r	: Geri dönebilen sıkışma
e	: Birim elektron yükü (4.8×10^{-10} esu)
E_i	: 0
I_L	: Likidite indisi
Ip	: Plastite indisi
K	: Boltzmann değişmezi
k	: Permeabilite katsayısı
K₀	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
LIR	: Yük artım oranı
m_v	: Hacimsel değişim katsayısı
n_{io}	: Manyetik alandaki iyon tipi, sayısı
S_c	: Konsolidasyon oturması (zamana bağlı)
S_i	: Ani oturma veya distorsiyon oturması
S_s	: İkincil sıkışma (zamana bağlı)
S_t	: Toplam oturma
T	: Sıcaklık (Kelvin)
t	: Sıcaklık
w₀	: Başlangıç su muhtevası
w_n	: Doğal su muhtevası
w_s	: Deney sonu su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_p	: Plastik limit
γ₀	: Deney başı birim hacim ağırlığı
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ_s	: Deney sonu birim hacim ağırlığı
δ	: Sıkışma
Δμ_w	: Boşluk suyu basıncı değişimi
Δσ	: Toplam gerilme değişimi
μ	: Boşluk suyu basıncı
v_i	: İyon değerliği
ó	: Efektif gerilme
σ	: Toplam basınç
ψ	: Elektrik potansiyeli

ÖZET

KONSOLIDASYON SÜRESİNCE KİL YAPISINDAKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

Kil zemin davranışı geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma konularındandır. Killerin mühendislik davranışını tanımlamanın klasik yolu gerilme-deformasyon ilişkisinin araştırılmasıdır. Günümüze kadar süregelen yöntemler genellikle gerilme hesabından deformasyon elde etmeye dayanan yani gerilme esaslı yöntemlerdir. Ancak bilimsel birikimin incelenmesi, gerilme deformasyon dönüşümünün üzerinde etkili olan çok sayıda etken olduğunu ve bu etkenleri ayırıştırabilmek için de mikro davranışın tanımlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tez çalışması kapsamında 25 adet konsolidasyon deneyi yapılmış ve konsolidasyon deneyleri boyunca 175 adet gerilme seviyesinde 1 dakika ile 72 saat arasında değişen sürelerde beklenerek kil zeminin konsolidasyon davranışı sonucunda oluşan fabrik yapısı araştırılmıştır. Konsolidasyon deneyleri sonucunda oluşan fabrik yapı ESEM (taramalı elektron mikroskopu) analizleri vasıtasıyla alınan fotoğraflarla açıklanmıştır. Diğer yandan laboratuvarda yapılan deneylerden elde edilen veriler sunulmuştur.

Birinci bölümde konu ile ilgili giriş yapıldıktan sonra ikinci bölümde, killerin oluşumu ve özellikleri detaylı olarak incelenmiş, kil mineralleri ile kil zeminin yapısı, kil türlerinin oluşması ve oluşma etkenleri, killerin sınıflandırılması verilerek killerin mühendislik özellikleri ve bileşiminin tayini için yapılan başlıca deneyler sunulmuştur.

Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem üçüncü bölümde açıklanmıştır. Deneylerde kullanılan kil zeminin mühendislik özellikleri, deney düzeni, deney programı ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır. Ayrıca ESEM analizleri için numune hazırlama yöntemi ve kriterleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

Dördüncü bölüm, deneysel çalışmaların sonuçlarının verildiği ve yorumlandığı bölümdür. Tezin bu kısmında sırasıyla yapılan 25 adet uzun ve kısa süreli konsolidasyon deneylerinden hareketle deney sonuçları araştırılmış ayrıca kil zeminin fabrik yapısındaki değişiklikler ESEM analizleri sırasında alınan fotoğraflarla incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Son bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve ESEM analizleri ile ilgili genel sonuçlar verilmiştir. Laboratuvar deneyleri ve ESEM analizleri sonuçlarından hareketle elde edilen genel sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

ESEM analizlerinde, konsolidasyon deneylerinde basınç ve bekleme süresinin artmasına bağlı olarak kil zeminin yapısında değişiklikler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Uygulanan basınç miktarı arttıkça zemin içindeki boşluk oranının azaldığı, kil dane ve

minerallerinin bir yönelme yaptıkları; yani basıncın uygulandığı yöne dik olacak şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Uygulanan gerilme zemin içerisindeki kemerlenmeler nedeniyle numunenin her noktasına temas etmemiş ve her yerde yönelmeye rastlanılmamıştır. Aynı şekilde basınç altındaki bekleme süresinin artması da kil danelerinin ve minerallerinin dizilimini basıncın uygulandığı yöne dik olacak şekilde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Basınç miktarının artmasıyla birlikte zemin yapısında meydana gelen elastik şekil değiştirmelerin yerini plastik şekil değiştirmelerin aldığı gözlemlenmiştir.

SUMMARY

RESEARCH OF THE CHANGE IN THE CLAY STRUCTURES DURING CONSOLIDATION

Behaviour of the clayey materials is one of the important research subjects of Geotechnical Engineering. Classical way of defining engineering behaviour of the clays is based on the research of stress-deformation relations. Methods used up to now are usually based on calculating the deformations resulted from the stresses, namely stress based methods. However careful scientific studies show that there are some other factors that are effective on the stress deformation transformation and behaviours in micro levels are needed to be defined to analyze these effects.

In this thesis, twenty-five laboratory consolidation tests have been carried out. During these consolidation tests, which are applied at 175 different stress levels and observed at the durations varying between 1 minute and 72 hours, fabric structure of the clays ground formed after the consolidation behaviour is researched. Fabric structure formed after the consolidation tests are explained with the photographs taken by using the ESEM analysis. In addition to these test results from the laboratory studies are presented.

Chapter 1 is the introduction. Chapter 2 is a literature survey on formation of clayey sediments, fabric and structure of clayey soils, aging and delayed compression of sediments and classification of clays. Also the methods and techniques that may be employed for determination of soil composition are presented.

Methodology of this experimental study is explained in Chapter 3. In this Chapter, the geology and soil profile of kaolin are presented. Also engineering properties of the clay that was used in this experimental study and test methods are presented in detail.

Chapter 4 deals with the results of laboratory tests and evaluation of these tests. In this chapter compression behavior of clay is defined by performing total twenty-five conventional and long term consolidation tests. Also, fabric study of undisturbed and unloaded clay and changes in fabric due to compression, under different consolidation pressure levels are investigated by means of ESEM analysis.

In the last chapter, conclusions of the research work obtained by experimental studies and ESEM analysis are presented.

The conclusions based on laboratory tests and ESEM analyses are summarized in the following paragraphs.

By the ESEM analysis it is observed that there are changes occurring in the structure of the clay ground depending on the pressure and consolidation time. As the application time of the pressure increases, it is observed that void ratio in the ground decreases and clay particles and minerals are aligned, namely changed their position as aligning vertically to the surface of the pressure. Because of the arc-formed structures, applied stresses are not transmitted everywhere in the samples. So that alignment is not observed everywhere. At the same time it is observed that as the duration time of the samples under stress increases, alignment vertical to the stress surface increases. Also it is observed that as the amount of stress increases, change in the structure of the clay shifts from elastic type of deformation to plastic type of deformation.

1. GİRİŞ

Tüm zeminler sıkışabilir ve üzerlerine uygulanan efektif gerilmedeki değişikliklere bağlı olarak hacim değişikliği yaparlar. Drenaj engellenmediği takdirde büyük miktarda oturmalar oluşur. Bir yüzyıldan daha uzun bir süredir inşaat mühendislerinin karşılaştığı ve ilgilendiği oturma problemleri, 1923'te Terzaghi'nin –birçok kişi tarafından modern zemin mekaniğinin başlangıcı olarak kabul edilen- “Konsolidasyon Teorisini” tanıtmaya kadar rasyonel bir yaklaşımla çözülemiyordu.

Zeminlerin, sıkışması ve hacim değişimi sırasında yapılarında bazı değişiklikler meydana gelir. Sıkışmalar sonucunda zeminlerin fabrik yapılarında yeniden bir yapılanma gerçekleşirken, danelerin dizilimleri değişebilir ve şekil değişiklikleri meydana gelebilir. Oluşabilecek bu şekil değişiklikleri sıkışmanın süresine ve sıkışmaya neden olan gerilmelere bağlı olarak kalıcı (plastik veya viskoz) veya elastik şekil değiştirmeler şeklinde meydana gelebilir. Ancak bu etkenleri ayrıştırabilmek için de mikro davranışın tanımlanması gerekmektedir.

Tanesel zeminin mikroskopik açıdan incelenmesi zemin davranışı hakkında makroskopik boyuttaki mevcut anlayışı geliştirmeyi sağlayabilir. Zeminin davranış biçimlerini ifade eden 1) sıkışma ve sıkışabilirlik 2) anizotropi 3) akma 4) krip 5) çevrimsel sıvılaşma 6) kesme ve kırılma gibi özelliklerin temel mekanizmasının anlaşılmasında mikro davranışın incelenmesi önemli katkılar getirebilir (Çinicioğlu 2006).

Bu çalışmada çok ince taneli bir zemin olan kilin katı tane-boşluk-su ilişkilerinin konsolidasyon sürecinden nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Bunun için sabit su muhtevasında elle yoğrularak hazırlanan numuneler değişik gerilmeler kullanılarak sırasıyla 1 dakika, 15 dakika, 24 saat, 72 saat süreyle konsolidasyon deneylerine tabi tutulduktan sonra deney aletinden çıkarılarak, taramalı elektron mikroskopu (ESEM) analizleriyle zemin yapısı takip edilmiştir. ESEM analizlerinde konsolidasyon sürecinin

yapı kazanımı üzerinde etkisi literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Killerin oluşumu ve özellikleri detaylı olarak incelenmiş, kil mineralleri ile kil zeminin yapısı, kil türlerinin oluşması ve oluşma etkenleri, killerin sınıflandırılması verilerek killerin mühendislik özellikleri ve bileşiminin tayini için yapılan başlıca deneyler ikinci bölümde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde deneysel çalışmalarda izlenen yöntem açıklanmıştır. Kullanılan kil zeminin mühendislik özellikleri, deney düzeni, deney programı ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır ve ESEM analizleri için numune hazırlama yöntemi ve kriterleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

Dördüncü bölüm, deneysel çalışmaların sonuçlarının verildiği ve yorumlandığı bölümdür. Bu bölümde sırasıyla yapılan 25 adet uzun ve kısa süreli konsolidasyon deneylerinden hareketle deney sonuçları araştırılmış ayrıca kil zeminin fabrik yapısındaki değişiklikler ESEM analizleri sırasında alınan fotoğraflarla incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Son bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve ESEM analizleri ile ilgili genel sonuçlar verilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KİLLERİN OLUŞUMU VE ÖZELİKLERİ

Killer, çok yumuşak killerden organik killere, az sıkışabilir killerden sıkışabilirliği çok fazla olan killere kadar çok geniş bir kapsamda değerlendirilebilir.

Kil minerallerinden ve ultra mikroskopik boyutlarda plaka şekilli danelerden oluşan, ancak agregasyona uğradığında boyutları mikron mertebesine varan killer, mühendislik uygulamalarında genel olarak dane boyutu $2\ \mu\text{m}$ ' den (0.002) daha küçük danelere sahip ince daneli zeminler olarak kabul edilir. Serbest basınç dayanımı 25 kPa'dan daha küçük kıvamdaki killer “çok yumuşak”, serbest basınç dayanımı 25 – 50 kPa arasında olan killer “yumuşak killer” olarak sınıflandırılabilir (Terzaghi ve Peck, 1967).

Killer, aynı boyuttaki diğer zeminlerden farklı olarak, su ile karıştırıldığında çamur oluştururlar. Hamur halinde şekil verilebilecek kadar plastiteye sahipken, pişirildiğinde büyük dayanım artışları gösteren bir katıya dönüşürler. Islatıldığında genellikle hacim artışı gösterir; kurutulduğunda ise hacmi azalır ve çoğunlukla çatlarlar.

2.2. JEOLJİK SÜREÇ VE KİL SEDİMANLARININ OLUŞUMU

Jeolojik süreç boyunca, dünya yüzeyinde hiç bitmeyen dört oluşum ardışık bir şekilde devam etmektedir. (Şekil 2.1) Açılma, kara kütlelerinin yırtılma süreciyken; aşınma, kaya veya zemin kütlelerinin yerinde kimyasal olarak veya mekanik zorlayıcı etkilerle kırılması ve aşınması; taşınma da, aşınma sonucu çeşitli birimlerin bir yerden bir yere, genellikle yüksek alanlardan daha düşük yükselteli alanlara taşınmasıdır. Çökelme ise, sedimanların daha önceki yerlerinden başka yerlere taşınması sonucu birikmesidir. Sediman oluşumu birikmiş sedimanların sıkışarak yine kayaya veya başka bir birime dönüşmesidir. Kabuk hareketleri, faylanma gibi ani hareketlerin (tektonik hareketler), tabaka tabanlarının (epirojenik hareketler) yavaş çökmesi ve yüklenmemiş alanların

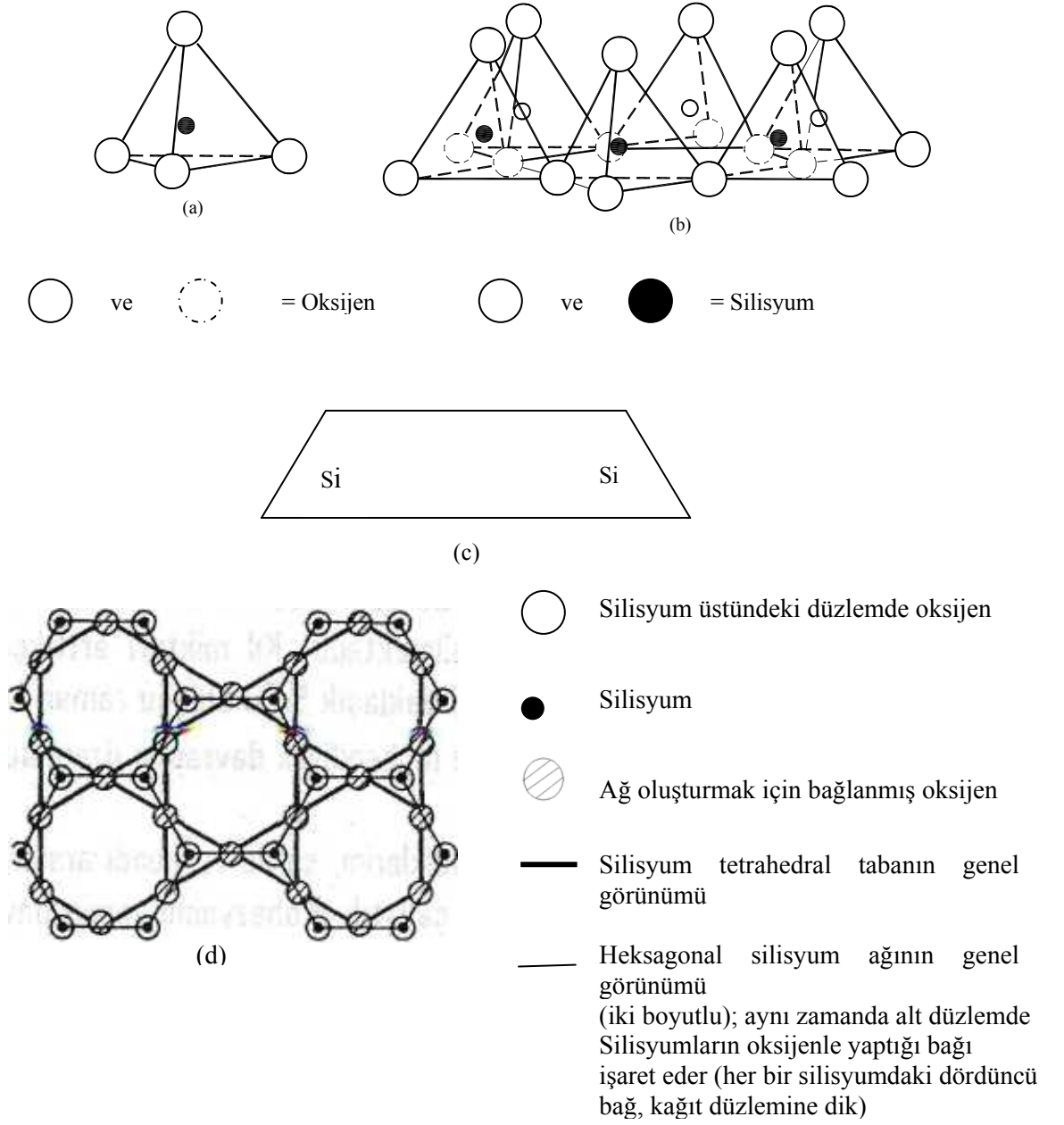
minerallerinin bir araya gelmesi sırasında herhangi bir değişime uğramadan ilk özelliklerini korumasıdır. Diğer bir orjin olasılığı ise, daha önce şekillenmiş kil minerallerinin çevresel, jeokimyasal etkilerine göre değişim geçirmesidir. Üç tip değişimden söz edilebilir: 1) degradasyon, kil mineral kafesindeki iyonların gitmesi 2) agradasyon kil mineral kafesine iyonların eklenmesi, 3) sedimanların yeniden form alması veya otojenez yani mevcut depolanma çevresindeki kil minerallerinin arazide kristalize olmaları gibi seyrek görülen bir orjin mekanizmasıdır. (Brenner ve diğ., 1981)

2.3. KİL MİNERALLERİ

Kil mineralleri, bazı kaya yapıcı minerallerin kimyasal ayrışmaları sonucunda oluşan çok küçük, kristalsi maddelerdir. Kimyasal anlamda sulu alüminosilikatlar ile diğer metalik iyonlardan oluşmuşlardır. Tüm kil mineralleri çok küçük boyda (çapları 1 µm'den küçük) olup sadece elektron mikroskopu ile görülebilirler. Münferit kristaller küçük katmanlardan oluşmaktadır. X ışını kırınım (XRD) çalışmaları bu kristallerin, atomik yapısının tekrarlanan çok sayıda kristal levhalarından meydana geldiğini göstermiştir. Aslında, tetrahedral veya silika ile oktahedral alümina olmak üzere sadece iki çeşit kristal levhası bulunmaktadır. Bu levhaların değişik bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla değişik kil mineralleri oluşmaktadır.

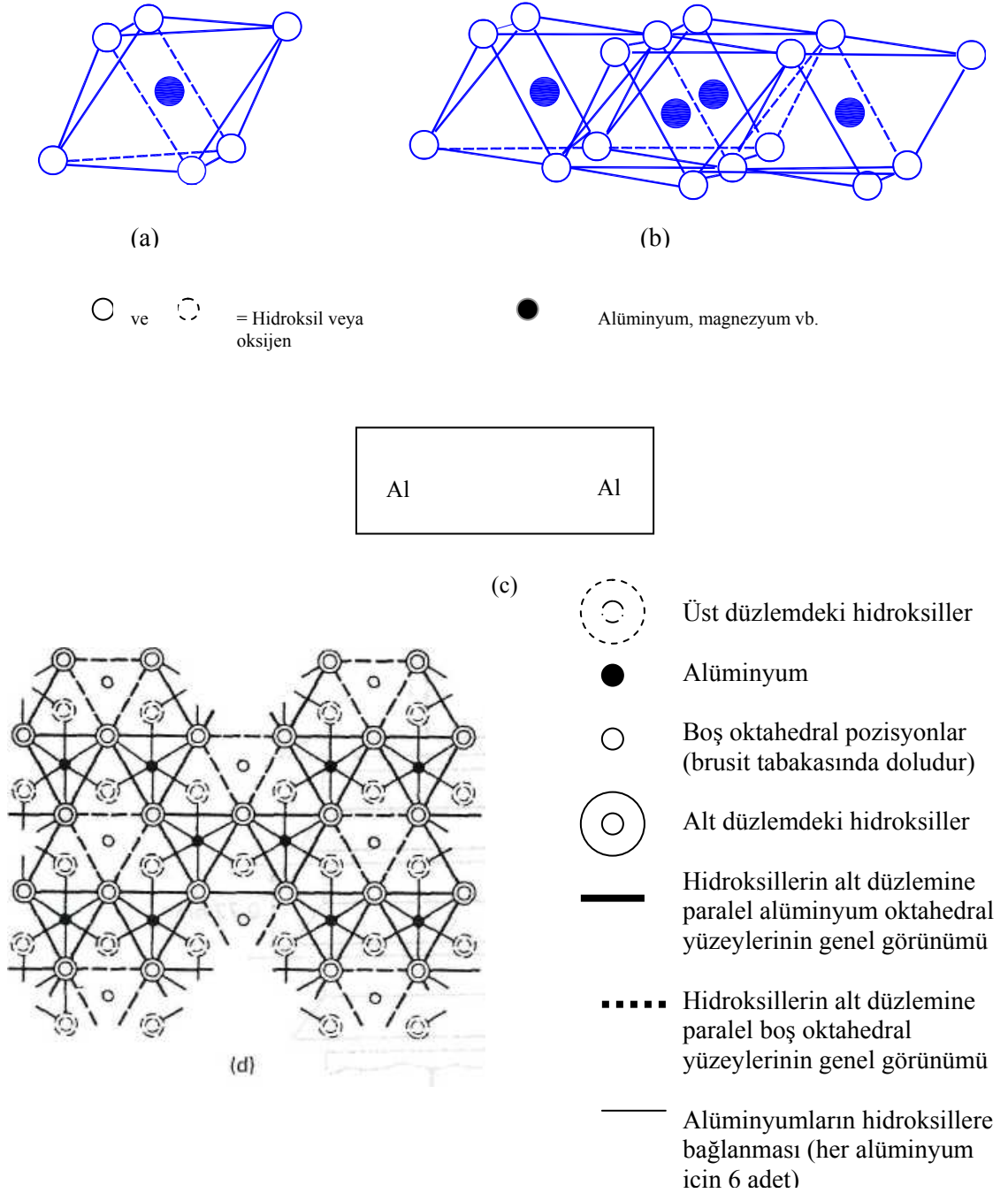
2.4. KİL MİNERALLERİNİN OLUŞUMU

Kil mineralleri, kayaları oluşturan birincil minerallerin ayrışmasıyla oluşurlar. Bu nedenle de ikincil silikatlar olarak adlandırılırlar. Killerin oluşumu yıpranan ana kayaktan kopup taşınan parçaların bir başka ortamda çökmesi ya da ana kayacın ayrışma ürününün yanı başında kalması sonucudur. Birincil minerallerin ayrışma yeteneği belirli bir sıraya göre değişir. Genel bulgu, yüksek silisyum / alüminyum oranına sahip minerallerin Si^{++++} iyonunu kaybeden minerallere oranla daha dayanıklı olduğudur. Ayrıca Na plajiyoklazin (albit), K-Feldispata oranla daha kolay ayrışmaktadır.



Şekil 2.3 (a) Tek silika tetrahedronu (Grim, 1953). (b) Silika levhası veya tetrahedralin izometrik görünümü (Grim, 1953). (c) Silika levhasının şematik temsili (Lambe, 1958). (d) Silika levhasının tepeden görünümü (Warshaw ve Roy 1961).

Birincil mineralin türü (ana kayaç), içinde bulunduğu ortamın iyon içeriği, sıcaklık ve pH, kil minerallerinin oluşumunda önemli etkileri vardır. Bu minerallerin karakteristikleri hidrotermal koşullarda çok farklı gerçekleşir. Yakın jeolojik geçmişte volkanik faaliyetlerin yoğun olduğu yörelerde kil minerallerinin özelliklerinde meydana gelen karmaşıklığa bu etkenler sebep olmuş olabilir.



Şekil 2.4 (a) Tek alüminyum (veya magnezyum) oktahedronu (Grim; 1953). (b) Oktahedral levhasının izometrik görünümü (Grim, 1953). (c) Oktahedral veya alüminyum (veya magnezyum) levhasının şematik temsili (Lambe, 1958). (d) Oktahedral levhasının tepeden görünümü (Warshaw ve Roy, 1961)

Killer, tabakalı veya filo- silikatlar grubuna dahildir. Aynı grupta gösterilen mikalar, klorit, serpantin, pirofillit gibi mineraller de çoğunlukla kil minerali olarak gösterilse de, bunlar gerçek kil minerali değildir. Filosilikatların yapısı iki ana yapı elemanının çeşitli biçimlerde bir araya gelmesiyle oluşur. Birinci yapı bloğu silikon iyonunun dört yandan oksijen atomlarına bağlanarak oluşturduğu silika dört ayaklısı

(tetrahedron); ikinci kristal bloğu ise sekiz yandan oksijen ve hidroksil iyonlarıyla koordine alüminyum ve magnezyum iyonunun meydana getirdiği sekiz köşelidir (oktahedron). Bu yapı bloklarının ayrıntısı Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

2.4.1. Silika Tabakaları

Kil minerallerinin çoğunluğunda silika dört ayaklıları yan yana gelerek bir tabakalı yapı oluştururlar. Her tabakanın üç oksijeni diğerleriyle bağlanarak taban düzleminde uçları aynı yöne bakan altıgen bir ağ meydana getirir. Bu yapı sınırsız olarak tekrarlanabilir ve $(\text{Si}^4\text{O}^{10})^{4-}$ biçiminde belirir. Elektriksel denge dört oksijenin yerinin hidroksil tarafından alınması veya pozitif yüklü bir başka tabakayla bir araya gelmesiyle sağlanabilir. Oksijenler arası uzaklık 2.55 Å, silikon iyonu için boşluk 0.55 Å ve tüm tabaka kalınlığı da 4.63 Å dir (A. Önalp, 2002).

2.4.2. Silika Zincirleri

Silika dört ayaklıları $(\text{Si}^4\text{O}^{11})^{6-}$ nadir durumlarda bant (çift zincir) biçiminde bulunurlar. Elektriksel denge sağlanırken alüminyum ve/veya magnezyum iyonları bu bantları birleştirme görevi yaparlar.

2.4.3. Sekiz Köşeli Tabakalar

Bu yapı bloğunda magnezyum veya alüminyum iyonu sekizgen bir koordinasyonla (Şekil 2.4) oksijen ve hidroksillerle bağlıdır. Bazı durumlarda Al^{+++} ve Mg^{++} yerine iki değerlikli demir, mangan, nikel; üç değerlikli demir, krom veya dört değerlikli titan iyonları bulunur.

Eğer katyon üç değerlikli ise, mevcut boşlukların sadece üçte ikisi doldurulur ve yapı 'dioktahedral' olarak anılır. Alüminyum iyonu kafes içinde bulunduğunda $\text{Al}^2(\text{OH})^6$ birleşimi söz konusudur ve kilde "gibsit" tabakası (G) olarak adlandırılan özel yapı meydana gelir. Kristal kafesi içindeki katyon iki değerlikli ise tüm katyon boşlukları doldurulur ve trioktahedral yapı belirir. Bu üç değerlikli katyonun magnezyum olması halinde bileşim $\text{Mg}^3(\text{OH})^6$ ’dır ve magnezyum sekiz köşelisi "brusit" tabakası adını alır (B). Oktahedral levhalar alüminyum, magnezyum, demir veya diğer atomları kuşatan altı oksijen veya hidroksilden oluşan oktahedral birimlerinin birleşiminden

oluşmaktadır. Tek oktahedron Şekil 2.4a' da; oktahedronların birleşerek bir levha yapısını oluşturması ise Şekil 2.4b' de görülmektedir.

2.4.4. İzomorf Yer Değiştirme

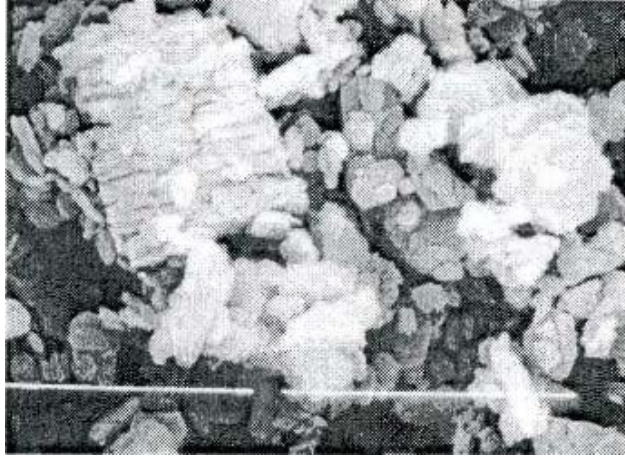
Bu özellik kil minerallerinin davranışını büyük ölçüde belirlemektedir. İdeal gibsit tabakasında katyonlar için açık bulunan boşlukların sadece üçte ikisi alüminyum tarafından doldurulmakta, brunit tabakasında ise bu işlev magnezyum tarafından yerine getirilmektedir. Oysa doğadaki killerde dört ayaklı ve sekiz köşeli yapılarda silikonun yeri alüminyum, alüminyumun yeri magnezyum, magnezyumun yeri ise iki değerlikli demir iyonunca alınmış durumdadır. Oktahedral veya tetrahedral yerin normalde bulunan katyondan bir başkası tarafından alınması olayına 'izomorf yer değiştirme' denilmektedir. Ancak burada kullanılan 'yer değiştirme' terimi yapıyı tam yansıtmamaktadır. Gerçekte, yabancı katyonlar sadece boş olan yerleri alırlar. Kaolinit dışında tüm kil mineralleri izomorf yer değiştirme sonucu kristal kenarlarında net negatif yük taşımakta, bu da nötrlüğün sağlanması için yabancı katyonların kenarlara bağlanması sonucunu getirmektedir (A. Önalp, 2002).

2.5. KİL MİNERALLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

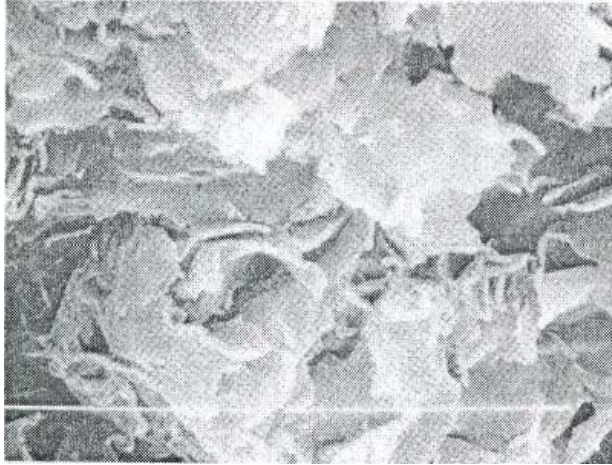
Kil mineralleri çözültiden kristalleşmeyle; kayalar başta olmak üzere silikat içeren birincil minerallerin ayrışmasıyla; yine bu minerallerin hidrotermal ortamda değişimiyle; diagenetik ve yeniden yapılanmasıyla, hatta laboratuvar koşullarında oluşabilir. Bu minerallerin kristal yapısı çok karmaşık olduğundan bir sınıflandırma sistemi belirlenememiştir. Killeri sınıflandırılırken esas alınan özellikler:

- 1) hücre veya tabakanın kalınlığı;
- 2) tabakanın di- veya tri-oktahedral özelliği ve iyon içeriği;
- 3) tabakaların dizilişi ve diziliş düzeni;

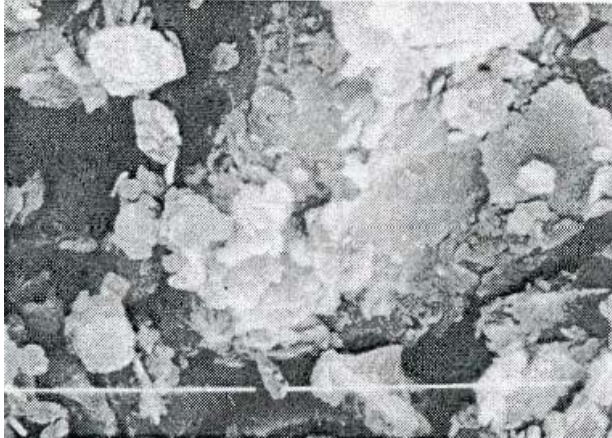
olabilir. Bu özelliklerden tabakaların dizilişi ve diziliş düzeni üçüncüsü killeri benzer mühendislik özelliklerine göre ayırdığından Tablo 2.1'de verilen özellikler bazı küçük değişikliklerle kabul görür.



Şekil 2.5 Georgia'dan iyi kristallenmiş bir kaolinitin taramalı elektron mikrosafı.
(Beyaz çizginin uzunluęu 5µm) (fotoęraf R. D. Holtz)



Şekil 2.6 Wyoming'den bir sodyum montmorillonitin taramalı elektron mikrosafı.
(Beyaz çizginin uzunluęu 5µm) (fotoęraf R. D. Holtz)



Şekil 2.7 Fithian (Illinois)'den bir illitin taramalı elektron mikrosafı.
(Beyaz çizginin uzunluęu 5µm) (fotoęraf R. D. Holtz)

Tablo 2.1 Killerin sınıflandırılması

TABAKA YAPISI	GRUP VE BİRİM YÜK x	ALT GRUP	KİLİN TÜRÜ
1:1	KAOLİNİT	Kaolinit	Kaolinit, dickit, lizardit
	SERPANTİNİT	Serpantin	Halloysit
	$x \approx 0$		
2:1	PROFİLLİT – TALK $x \approx 0$	Profillitler	Profillit
		Talkler	Talker
		Dioktahedral Simektit	Montmorillonit
	SİMEKTİT $x \approx 0.2 - 0.6$	Trioktahedral simektit	Beidellit
			Saponit
			Hektorit
2:1	VERMİKÜLİT $x \approx 0.6 - 0.9$	Dioktahedral vermikülit	dioktahedral vermikülit
		Trioktahedral vermikülit	Trioktahedral vermikülit
		Dioktahedral mika	Muskovit
	MİKA $x \approx 1$	Trioktahedral mika	Biyotit
	GEVREK MİKA $x \approx 2$	Dioktahedral gevrek mika	Margarit
		Trioktahedral gevrek mika	klitonit
2:1:1	KLORİT $x = \text{değişken}$	Dioktahedral klorit	Donbasit
		Di/tri-oktahedral klorit	Sudoit
		Trioktahedral klorit	Klinoklor

Killi zeminlerde yapılan araştırmalar sonucu beş çeşit kil minerali ile karşılaşılmuştur (Mitchell, 1976). Bunlar:

a) Kaolin: Kaolin mineralleri 1:1 silika alümina minerali olarak adlandırılırlar. Boyutları $0.05 \sim 1\mu\text{m}$ arasında değişip, 6 kenarlıdır. Elektrolit muhtevası ve pH'ı düşük ve iyonların silika formasyonuna eğilim gösterdiği durumlarda, silika seyrek, alümina ise boldur ve bu durumda kaolin mineralleri oluşur.

b) Halloysit: 1:1 silika, alümina mineralidir ve kaolinden düz şekli ile ayrılırlar. Halloysit, feldspatın H_2SO_4 ile yıkanması sonucu piritin alterasyonu ile meydana gelir.

c) Montmorillonit (Simektit): Montmorillonit minerali, iki tetrahedral tabaka ile bir oktahedral tabakadan oluşmaktadır. Tabakalar arasında H_2O absorbe edildiğinden şişmeye yatkındır ve doğal su muhtevası çok değişebilir. Genelde daneler eşit boyutlu pul şeklindedir ve $10\ \mu m$ ' ye kadar çıkabilir. Yüksek pH ve elektrolit muhtevası Na^+ ve K^+ 'a nazaran daha yüksek Mg^{+2} ve Ca^{+2} ihtiva eder. Yıkanmanın zayıf olduğu kurak ve yarı kurak alanlarda simektitler yağıştan daha fazla buharlaşmanın olduğu iklim koşullarında oluşmuşlardır.

d) İllit (Hidro mika): 2:1 illit kil minerali birçok killi zeminde bolca bulunmaktadır. Muskovit mikasına benzer bir yapısı vardır ve "hidro mika" olarak adlandırılırlar. Pul şeklindeki danelerin boyutları $10\ \mu m$ 'ye kadar çıkabilir.

e) Klorit: 2:1:1 minerali olarak adlandırılır simektitin alterasyonu, yeterli Mg^{+2} kristalli brunit tabakasının ara su tabakasıyla yer değiştirmesine sebep olur. Klorit tabakası düşük orta seviyedeki metamorfik kayaların formudur ve kayadan türeyen birçok zeminin ana mineralidir. Genellikle şişmeye karşı hassastırlar, ancak montmorillonitten daha az aktiftirler, boyutu $1\ \mu m$ 'ye kadar çıkabilir.

Birçok zeminde genelde birden fazla kil minerali bulunmaktadır. Mineralojik kompozisyon esas olarak zemin danelerinin karakteristiklerini, boyutunu, şeklini ve yüzeyini etkilemektedir. Sıvı fazlı içsel etkileşimli bu özellikler aktiviteyi, plastiteyi, şişmeyi, mukavemeti ve hidrolik iletkenlik davranışını etkilemektedir.

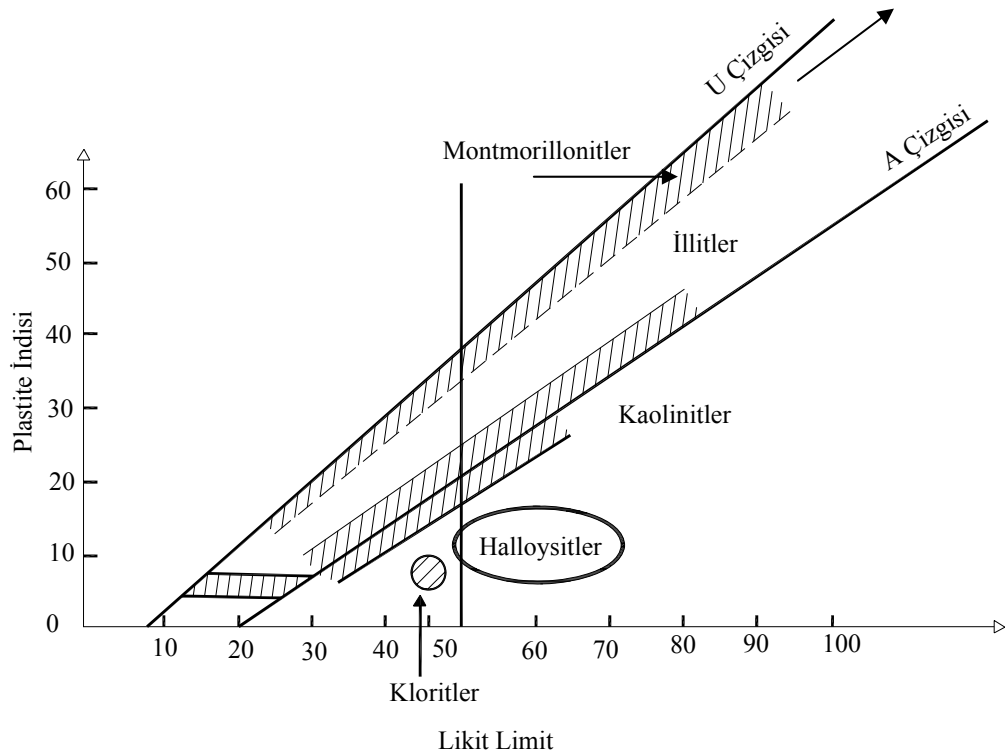
2.6. KİL MİNERALLERİNİN TANINMASI

Kil mineralleri çok küçük olduklarından jeolojide kullanılan optik mineraloji teknikleri ile teşhisleri imkansız olup, bunların tanınmasında başka yöntemlere başvurulmaktadır. Kristal yapısı düzenli ve tekrarlı malzemeler X ışınını kırarlar. Farklı kristal yapısına sahip minerallerin X ışını kırınım (X-ray diffraction; XRD) paternleri de farklıdır ve bu mineraller ilk olarak paternler sayesinde tanınabilmektedir. Kil minerallerinin karışımından oluşan zeminler, organik madde içeren zeminler, kilden başka mineral içeren zeminler ve karışık tabakalı kil minerali içeren zeminlerde bu açıdan birtakım sorunlar bulunmaktadır.

Genellikle ayrıntılı bir nicel analiz imkansızdır. Bu konuda söylenebilecek tek şey, zeminde hangi minerallerin kabaca hangi oranlarda bulunduğudır.

Kil minerallerinin teşhisinde kullanılan bir diğer teknik de diferansiyel termal analizdir (DTA). Bileşimi bilinmeyen bir zemin örneği bir asal kontrol maddesi ile birlikte etüv içerisinde birkaç yüz dereceye kadar ısıtılır ve kil minerallerinin özel yapılarından dolayı bu ısılarda belirli değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler belirli mineraller için belirli ısılarda meydana gelir ve bu değişikliklere ait kayıtlar bilinen mineraller ile karşılaştırılabilir.

Taramalı (scanning) ve yaymalı (transmission) elektron mikroskopisi de bir zemindeki kil minerallerinin tanınmasında kullanılmaktadır. Bu süreç kolay ve/veya nicel değildir.



Şekil 2.8 Casagrande'nin plastite kartında yaygın kil minerallerinin lokasyonları (Casagrande, 1932; geliştirilmiş veriler Mitchell; 1976)

Kil minerallerinin tanınmasında kullanılan diğer bir teknik ise; Prof. Casagrande tarafından önerilen Atterberg limitlerinin kullanılmasıdır. Montmorillonit, kristal boylarının çok küçük ve plastisite indisinin yüksek olmasından dolayı ileri derecede aktiftir. Casagrande plastite kartının kullanımı için; PI – LL diyagramında numunenin yerini tespit etmek ve

lokasyonunu bilinen minerallerinki ile karşılaştırmak gerekmektedir. Numune plastisite diyagramında A hattının çok üstünde ve U hattına yakın bir yere düşmesi; numune içerisinde montmorillonit gibi çok miktarda aktif mineral bulunduğunu işaret eder. Zemin sınıfı CL çıksa dahi (mesela kumlu kil gibi) U hattına yakın yere düşüyorsa, zeminin kil bileşeni egemen olarak montmorillonitten oluşmaktadır. Yine illit türünde ki killerde bu alana düşerler. Nispeten inaktif olan kaolinitler A hattının hemen altına düşerler. Teknik olarak kil olsalar da ML – MH malzemeleri gibi davranırlar.

2.7. KİL TÜRLERİNİN OLUŞMASINDAKİ ETKENLER

Geoteknikte kil tüm zeminin geçirimliliği, şişme-büzülme davranışı, sıkışabilirlik ve kayma direnci gibi önemli özelliklerini doğrudan etkilediğinden tanımlama önem taşır. Kayacın kile dönüşmesi ve kilin karakterini kazanmasında ortamın sıcaklığı, yağış ve nemlilik, yeraltı suyunun düzeyleri, drenaj koşulları, pH ve tuzluluk, bitki ve bakterilerce salınan asit ve bazlar, arazinin eğimi ve anakayacın türü rol oynar. Ancak anakayacın türü kilin türüne sanıldığı kadar da etki yapmamaktadır. Bir başka deyişle aynı kayaktan türemiş killer farklı çevre koşullarında değişik kil gruplarına dahil olabilirler. Yapılan araştırmalar ayrışabilirliğin bazikliğe, yani silikanın diğer katyonların oranına bağlı olduğu bulgusunu getirmiştir. Hidrojenin yerini alabileceği katyonlar fazlaştıkça ayrışma yeteneği artmaktadır. Reaksiyon serisinde kor kayaçlarda ilk oluşan mineralin ortamda bazıları kullandığı görüşü hakimdir. Ancak kil mineralinin türü ana kayaktan çok çevre koşullarınca belirlenir. Ama mevcut iklim koşullarının da yanıltıcı olabileceği unutulmamalıdır. Bugün soğuk ve kuru olan bir bölgede geçmişte ılıman hatta tropik koşulların hakim olmuş olabilmesi mümkündür. Böylece bugünkü koşulların gerektirdiği tip killerin görülememe olasılığı unutulmamalıdır.

Kilin oluşmasında ortamdaki suyun etkisi büyüktür. Bu sonuçlarla, oluşma sürecinde genel kurallar şöyle sıralanabilir:

- 1) Alkali metaller silikayı çökeltir (floklanma, yumaklanma),
- 2) K^+ , Na^+ , Li^+ gibi alkali metaller silikayı dağıtır,
- 3) Düşük pH sistemi floklandırır,
- 4) Yüksek elektrolit içeriği sistemi floklandırır,
- 5) Alümina yüklü çözeltiler silikalılara oranla, daha kolay floküle olur,

6) Yeraltı suyu hareketi veya yüzeyden enfiltrasyon dağınık (disperse) fazı daha kolay sistem dışına alır.

2.8. KİL-SU SİSTEMİ

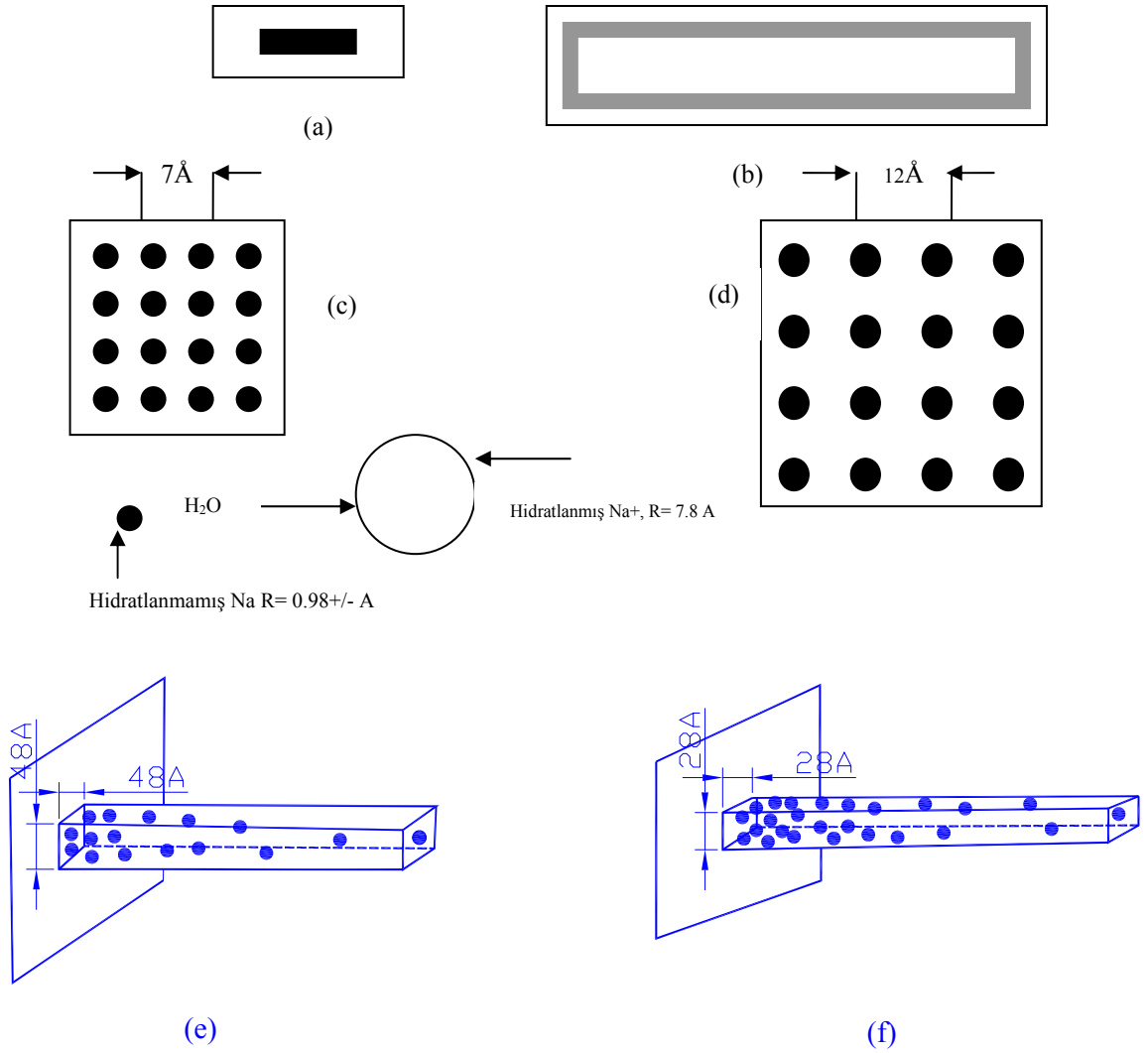
Aralarındaki uzaklığa bağlı olarak, iki cisim arasında karşılıklı itme ve çekme kuvvetlerinin varlığı fiziğin temel kavramlarından biridir. Bu kuvvetler elektron bulutlarının karışması ile beliren Born itme kuvveti; maddenin maddeye çekişini gösteren Van der Waals kuvveti olarak özetlenebilir. Aynı kurallar doğal olarak diğer için de geçerlidir. Ancak diğerlerin yüzey alanı boyutu ve kütesine oranla öylesine büyüktür ki insanın günlük yaşamında cisimler arasında varlığını fark edemediği bu kuvvetler kil boyutuna inildiğinde, özellikle kilin su ortamında bulunması durumunda, dengeyi tümüyle etkileyebilmektedir. Su içinde bulunan ve özgül ağırlığı suyunun üç katına varan kil ve kolloidlerin uzun süre dibe çökmeden yüzebilmeleri bu özelliğin basit bir göstergesidir (Brown devinimi).

2.8.1. Kil Danesinin Özellikleri

Küçük pulsu lif veya boru şekilli, kristal kenarlarında negatif, yüzünde ise pozitif net elektrik yükü taşıdığından: mıknatısa benzetilebilir. Katyonların izomorf yer değiştirmesi, hidroksil iyonlarının yüzeyden ayrılması, kristal kafesinde katyonların eksikliği, yüzeye bağlanmış anyonlar ve dane çevresindeki organik malzemeler bu yükün kaynağını oluşturur.

Şekil 2.9a ve b de boyutu $10 \times 1000 \text{Å}$ olan sodyum montmorillonit ile $1000 \times 10000 \text{Å}$ olan sodyum kaolinit daneleri saf suda hidratlandıktan sonra şematik olarak gösterilmektedir. Bu danelerin elektriksel dengesizliğini gidermek için montmorillonite 14000 kaolinitte 4,000,000 değişik tür tek değerlikli iyon kuru kil pulcuğu yüzeyinde tutulmaktadır (c,d). Kil yüzeyinin suya isteğine ek olarak, yüzeyine tutunan sodyum katyonu hidratlandığında sistem ek su tutma yeteneği kazanmaktadır (e). Ana katyon kalsiyum olduğunda ise aynı özellik gözlenmez. Yer değiştirebilir katyonların üç boyutta konumu ise

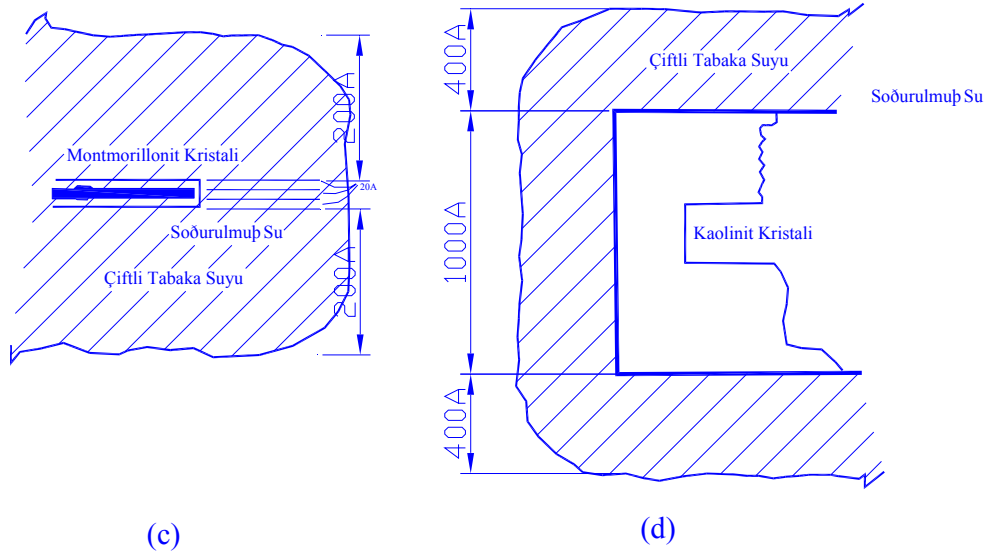
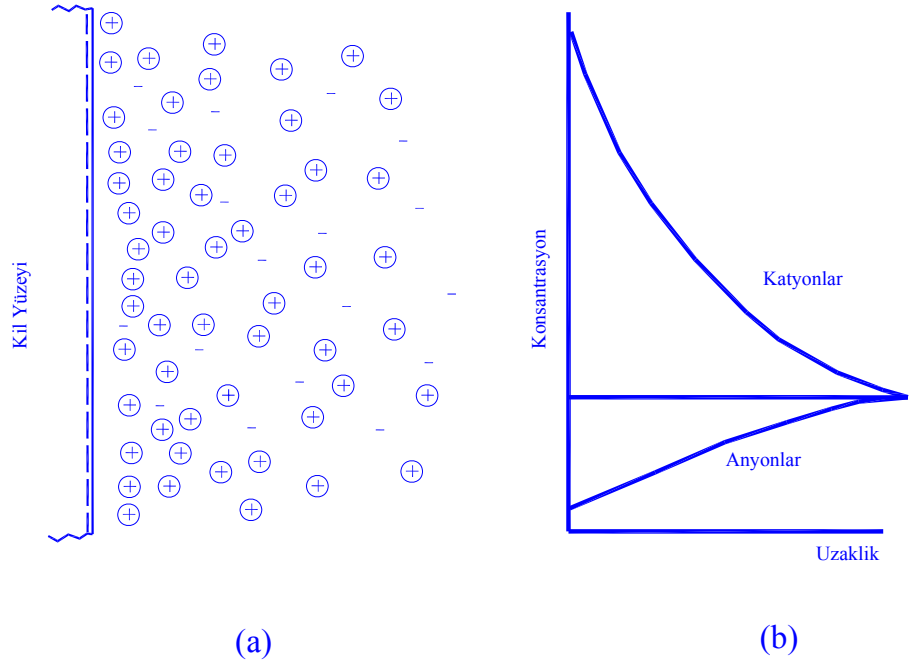
Şekil 2.9f, g'de gösterilmektedir. Bu şekilden farklı mineraller çevresinde hidratlanmış anyonların yaklaşık aralıkları çiftli tabakaya yönelik olarak görülebilir (A. Önalp, 2002).



Şekil 2.9 Kil yüzeyinin su ve değişebilir katyonlarla ilişkisi (Önalp A, 2002)

2.8.2. Çiftli Tabakanın Oluşumu

Kil danesi suyla karşılaştığında, yani su molekülleri kil yüzeyine yapışık katyonlara bağlandığında (hidratlanma), bunlar yeni dengeyi sağlamak için yüzeyden ve birbirlerinden ayrılma eğilimi gösterirler. Böylece arı suya giren bir kil zerresinin yüzeyindeki katyonlar sıvı içine doğru genişlererek “çiftli tabaka” olarak anılan bölgeyi oluştururlar. Bunun sonucunda Şekil 2.10a’daki tabaka oluşur.



Şekil 2.10 Çiftli tabakanın oluşması ve konumu (Önalp A., 2002)

Dane yüzeyine yakın iyonların konsantrasyonu Boltzmann ifadesiyle verilmiştir:

$$\eta_{io} = \exp\left(\frac{E_{io} - E_i}{kT}\right) \quad (2.1)$$

Bir manyetik alandaki iyonlar için potansiyel enerji ise

$$E_i = v_{ie} \times \psi \quad (2.2)$$

olarak ifade edilmiştir.

Kilde negatif değer taşıyan ‘elektrik potansiyeli’ ψ , birim yükü sonsuzdan söz konusu noktaya getirmek için yapılması gereken “iş” olarak tarif edilmiştir. Buradan çiftli tabaka kalınlığı da bir kil danesinin net yükünü karşılamak için yüzeyde tutulması gereken su-iyon kalınlığı; ya da elektrik potansiyelinin etkin olduğu uzaklık olarak tarif edilebilir.

Şekil 2.10c ve d’de yüzeye soğurulmuş suyun ve bunun çevresinde oluşan çiftli tabakanın kaolinit ve montmorillonitte konumu basit bir çizimle gösterilmektedir.

2.8.3. Daneler Arasındaki Kuvvetler

Şekil 2.11’de elektrolit içindeki bir kil danesinin çevresinde, uzaklıkla değişen net itme-çekme eğrileri görülmektedir. Eğer iki kil danesi arasında net kuvvet çekme ise daneler birbirine yaklaşır ve yapışırlar. Bu olaya yumaklanma (floklanma) denir. Net kuvvet itme ise, daneler birbirinden uzaklaşır; buna da dağılma (dispersiyon) denilmektedir. İtici kuvvetler büyük ölçüde sistemin özelliklerine bağlı iken, yani çiftli tabakadan etkilenirken, çekme kuvvetleri maddenin özünden kaynaklandığından önemli değişim göstermezler. Yumaklanma, artan

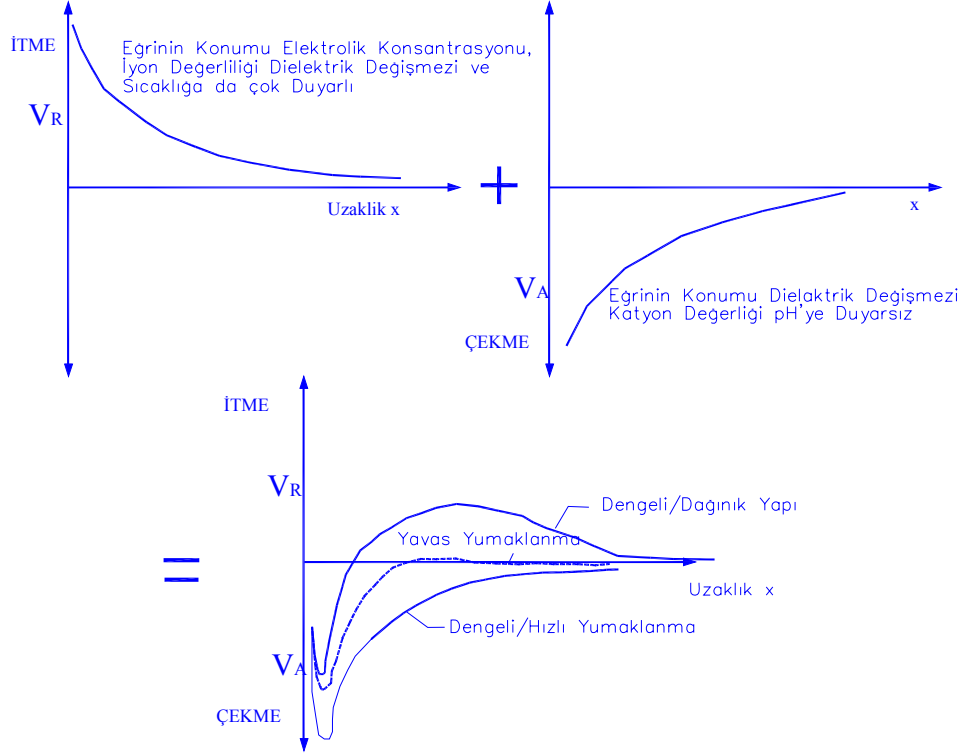
- a) Elektrolit konsantrasyonu,
- b) İyon değerliği,
- c) Sıcaklığa

ve azalan

- d) dielektrik katsayısı,
- e) hidratlanan iyon çapı,
- f) pH değeri,
- g) Yüzeye soğurulmuş (adzorbe) iyonlara

bağlıdır. Dağınık bir su-kil sistemi dengesi olmayan bir karışımken floklanma, sistemin bir anlamda dengeye geldiğini gösterir. Konuyu açıklayan Gouy- Chapman ve Collis

George-Bozeman teorileri çiftli tabakaların kalınlıklarını hesaplayarak sonuca gitmektedir.



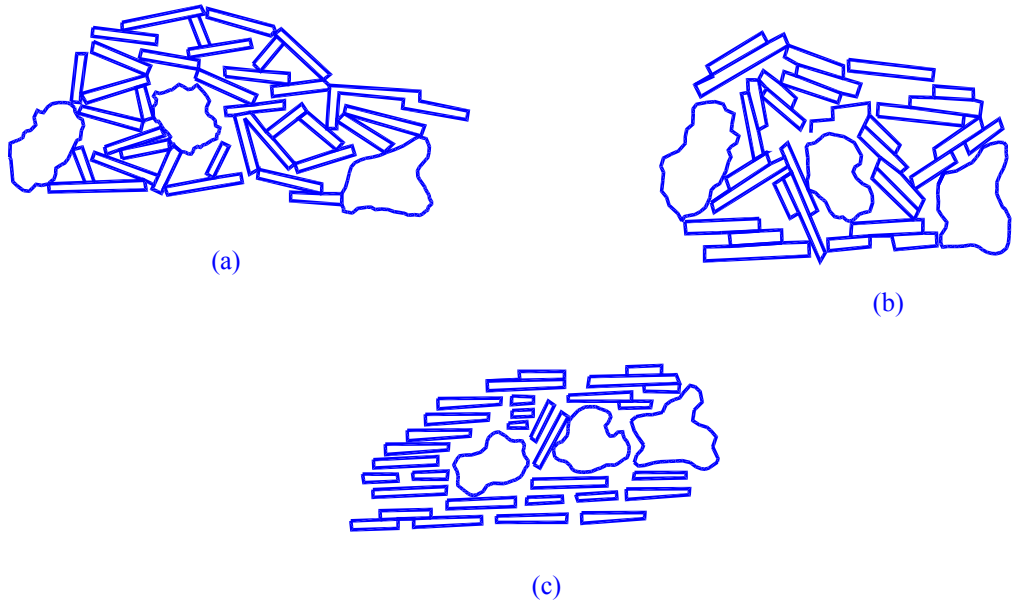
Şekil 2.11 Yassı Plaklar Arasında Enerji Eğrileri(Önalp A., 2002)

Su-kil sistemleri değişken karakterde olduğundan, zemin özelliklerinde çevre/ortam koşullarının değişmesi durumunda önemli değişimler olabilir.

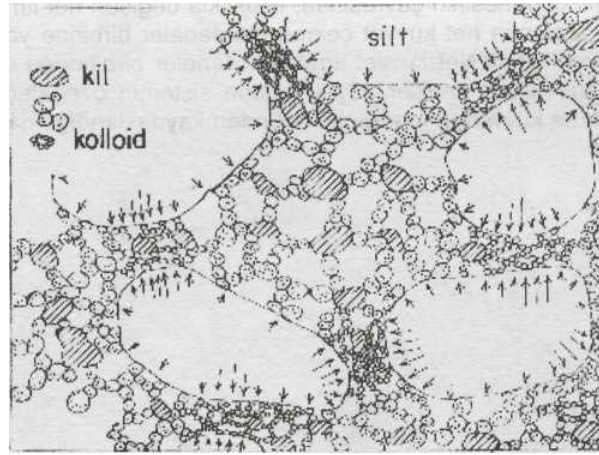
2.9. KİLDE DOKU VE YAPI

Cassagrande, kil içeren zeminlerde özel bir yapı olduğunu ve bu yapının ortamın birçok özelliğine bağlı olarak değişebileceğini belirtmiştir.

Tarihsel gelişimi gösterme amacıyla Şekil 2.13'te bir kilin tuzlu (a) tatlı suda (b) çökmesi ve yoğrulduktan sonra (c) aldığı yapı gösterilmiştir. Bu modelde kil plakaları silt daneleri çevresinde çiftli tabakanın genişliğine göre dizilmektedir.

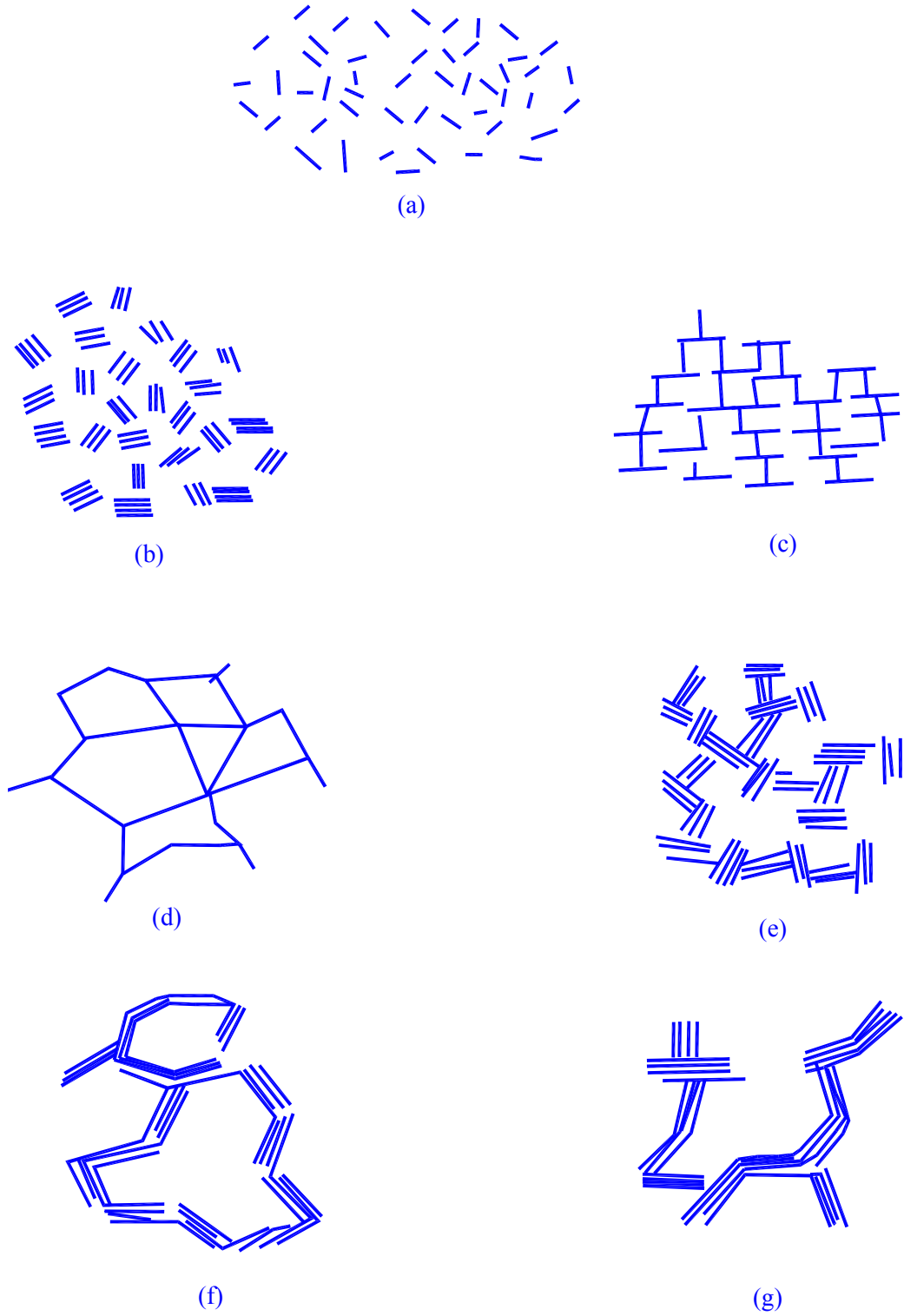


Şekil 2.12 Kil Yapısı (Lambe, 1958)



Şekil 2.13 Cassagrande'nin ilk Doku Modeli (Cassagrande, 1932)

“Fabrik” terimi, zemin içindeki boşluk, dane grupları ve danelerin dağılımını ifade etmektedir. “Yapı” terimi ise çoğu zaman fabrik terimi yerine kullanılan ancak fabrik + bileşim + içsel yüklerin toplam etkisini içeren bir ifadedir. “Mikrofabrik”, optik mikroskoplar yardımıyla incelenen fabrik anlamında kullanılmaktadır. “Makrofabrik” ise çıplak gözle veya basit lensler yardımıyla tabakalanma, fissürleşme, boşluklar ve büyük boyutlu heterojenlik gibi stabilite, oturma veya sızma analizlerinde kullanılan nitelikleri ifade etmek için kullanılmaktadır. Floküle ve ayrık yapı aynı anda olabilmektedir. Birçok çökeltide, tekil danelerin olması seyrek rastlanan bir durumdur, genelde kil plakaları topak yapı şeklinde değişik fabrik formunda bir araya gelmektedir.



Şekil 2.14. Bir kil süspansiyonundaki dane oryantasyonu modelleri (van Olphen, 1963) (a) Ayırık ve floküle olmayan yapı. (b) Topak fakat floküle olmayan yapı. (c) Dane kenarı diğer danenin yüzüne gelecek şekilde floküle fakat ayırık yapı. (d) Dane kenarı diğer danenin kenarına gelecek şekilde floküle fakat ayırık yapı. (e) Dane kenarı diğer danenin yüzüne gelecek şekilde floküle ve topak yapı. (f) Dane kenarı diğer danenin kenarına gelecek şekilde floküle ve topak yapı. (g) Dane kenarı diğer danenin kenarına ve dane kenarı diğer danenin yüzüne gelecek şekilde ve topak yapı. (van Olphen, 1963)

Bir kilde karşılaşılan dane oryantasyonu aşağıdaki gibi gruplandırılabilir (Mitchell, 1976).

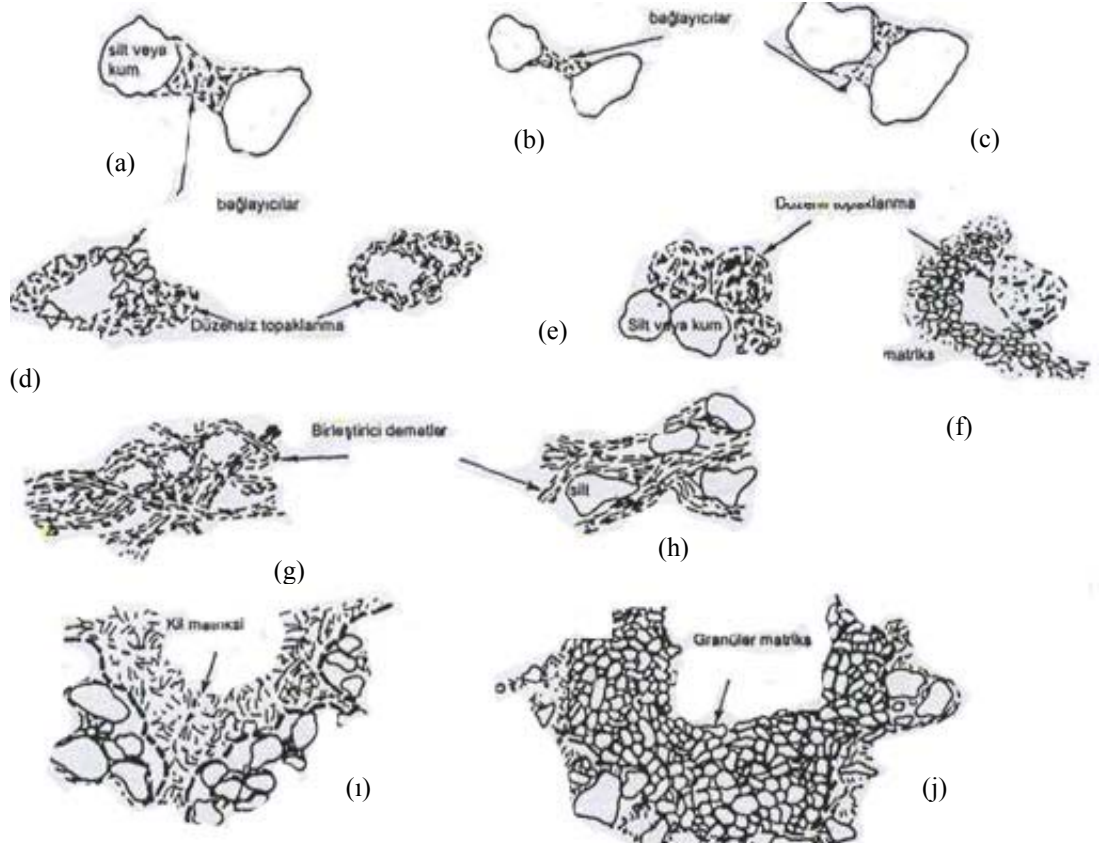
- 1) Ayrık yapı: Kil daneleri yüz yüze oryante olmamıştır.
- 2) Topak yapı: Kil daneleri yüz yüze oryante olmuştur.
- 3) Floküle yapı: Topak yapıdaki kil daneleri, danelerin kenarları diğer danelerin kenarlarına veya yüzlerine gelecek şekilde dizilmiştir.
- 4) Floküle olmayan yapı: Kil daneleri arasında herhangi bir dizilim yoktur.

Çökeller, rezidüel zeminler, kompaksiyonla sıkıştırılmış killerdeki dane oryantasyonu birçok formda olsa da Şekil 2.14'te gösterilen çeşitli tipler aslında üç ana grupta tanımlanabilir.

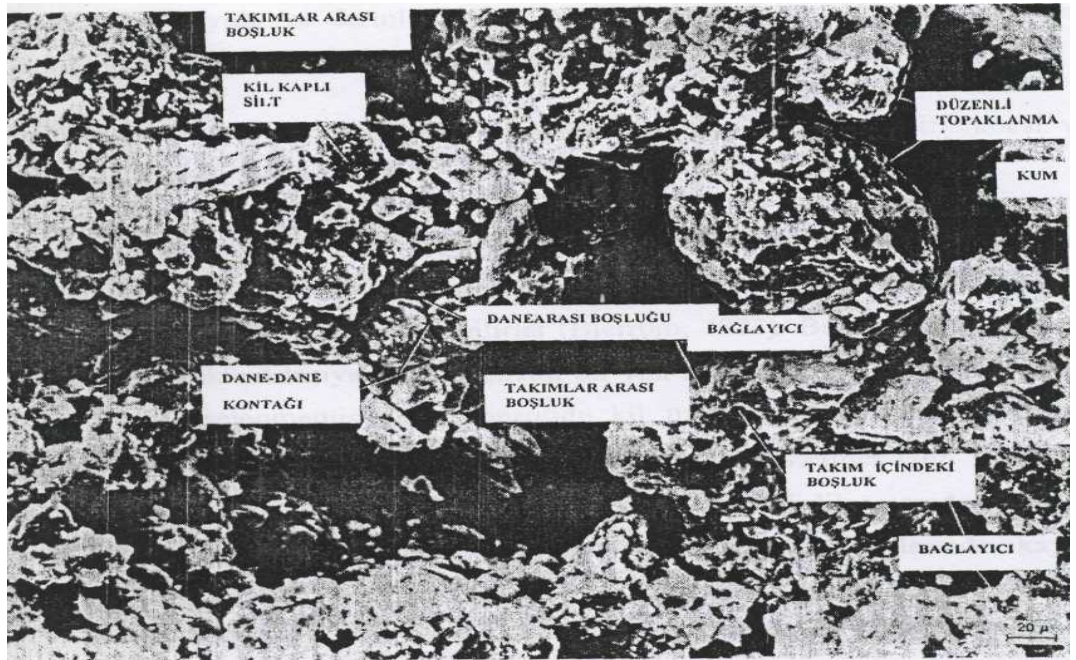
- 1) Basit dane düzeni: Danelerin birbirine tesiri tekil kil, silt ve kum danelerinin birbirine tesiri şeklinde tekil formdadır.
- 2) Dane grubu: Dane organizasyonundaki birimler arasında tanımlanabilir fiziksel sınırlar ve belirli mekanik bir fonksiyon vardır. Basit dane düzeni ile basit dane grubunun formu şeklindedir. (Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17 ve Şekil 2.18)
- 3) Daneler arasında bulunan boşlukların oluşturduğu alan.

Mühendislik açısından "fabrik" ve "yapı" ile mühendislik (fiziksel) özellikler arasında birçok ilişki vardır. Bu ilişkiler aşağıda özetlenmiştir (Mitchell, 1976).

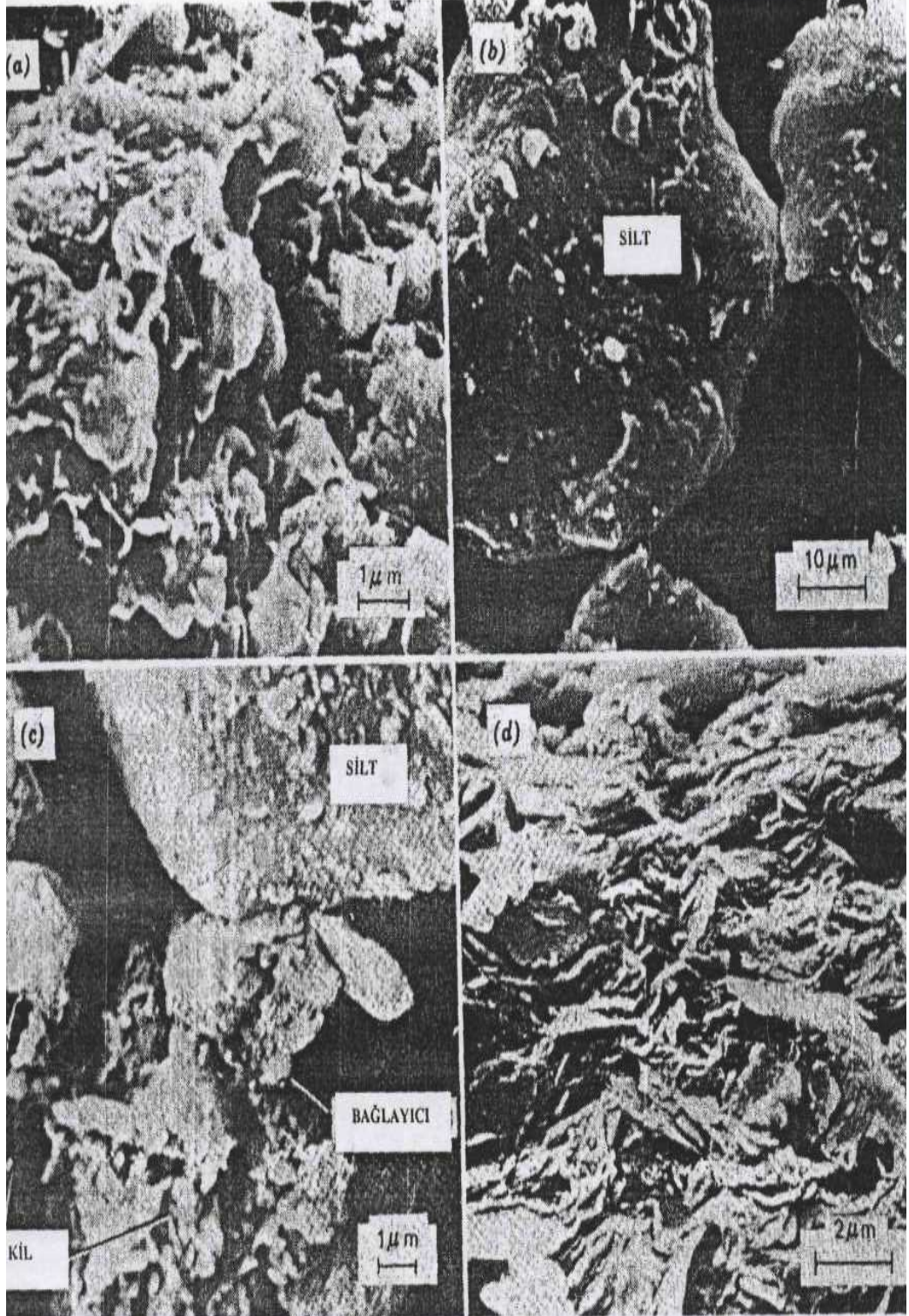
- 1) Belirli bir konsolidasyon basıncı altında floküle yapı, floküle olmayan yapıdan daha az yoğundur.
- 2) Aynı boşluk oranında, floküle yapıdaki gelişigüzel dizilmiş daneler ve dane grupları, floküle olmayan yapıdan daha rijittir.
- 3) Önkonsolidasyon basıncından daha büyük basınçta, basınçtaki küçük bir artışla floküle yapıdaki danelerin yeniden dizilimi, floküle olmayan yapıdan daha fazladır.



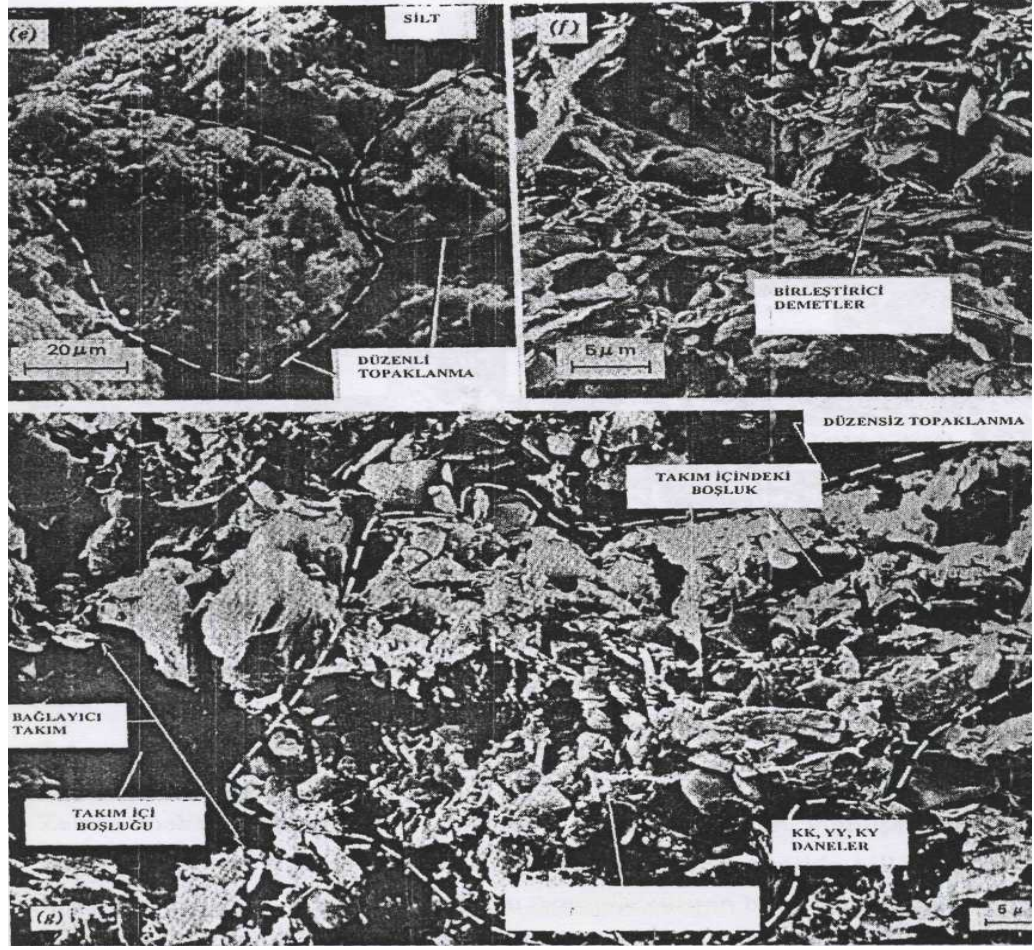
Şekil 2.15. Dane grubunun şematik gösterilişi (Collins, McGown, 1974). (a)Bağlayıcılar. (b) Bağlayıcılar. (c) Bağlayıcılar. (d) Bağlayıcı grubuyla düzensiz topaklanma. (e) Floküle yapıdaki düzensiz topaklanma. (f) Dane matriksi ile içsel etkileşimli düzenli topaklanma. (g) Birbirine dokunan kil demetleri. (h) Silt karışmasıyla birbirine dokunan kil demetleri. (i) Kil dane matriksi. (j) Granüler dane matriksi.



Şekil 2.16. Tucson Siltli Kilinin Tüm Mikrofabrik Yapısı (Collins, McGown, 1974).



Şekil 2.17. Örselenmemiş Zeminin Fabrik Yapısının SEM ile Görünüşü (a) İsrail, Lydda Kilinin Dane Sistemi (tatlı su alüvyonel çökeli). (b) İngiltere, Ford Siltli Los Zeminin Dane-Dane Kontaklı (rüzgar kökenli çökeli). (c) İzlanda, Breidmerkur Siltli Buzul Kilinin Bağlayıcı Grubu (buzul kalıntısı çökeli). (d) İngiltere, Immingham Siltli Kilinin Dane Matrisi Grubu (haliç çökeli). (e) İsrail, Holon Siltli Kilinin Düzenli Topak Yapı Grubu (tatlı su alüvyonel çökeli). (f) İskoçya, Hurlford Organik Siltli Kilindeki Birbirine Dokunan Demetler Grubu (tatlı su göl çökeli). (g) Norveç, Sundland Siltli Kilindeki Düzensiz Topak Yapı Grubu (deniz çökeli). (Collins, McGown, 1974).



Şekil 2.18. Örselenmemiş Zeminin Fabrik Yapısının SEM ile Görünüşü (Devam)

- 4) Genelde, kayma şekil değiştirmesi plaka şekilli daneleri ve dane gruplarını onların uzun eksen ve kayma doğrultusu boyunca oryante etmektedir.
- 5) Floküle olmayan yapı ve/veya yoğrulmuş zemindeki ortalama boşluk çapı ve boşluk boyutu aralığı, floküle yapı ve/veya örselenmemiş, zeminlerdekinden daha küçüktür.
- 6) Anizotropik konsolidasyon gerilmeleri, plaka şekilli dane ve dane gruplarını kendi uzun eksenleri ve büyük asal düzlem boyunca düzenlemeye eğilimlidir.
- 7) Bir formasyonun bir zaman için denge yapısı, daha sonraki bir tarihtekiyle aynı olmak zorunda değildir.
- 8) Gerilmeler genelde tüm dane ve dane grupları arasında eşit dağılmaz. Fabrik elemanlarının kemerlenmesi sonucu bazı dane ve dane grupları gerilme almazlar.
- 9) Yapıdaki bir değişim nedeniyle, drenajın engellendiği suya doymun bir zemin, genişlemeye ve dilatasyona başlarsa, negatif boşluksuyu basıncı oluşur ve efektif gerilme artar.

10) Yapıdaki bir değişim nedeniyle, drenajın engellendiği suya doymuş bir zemin, sıkışmaya başlarsa, pozitif boşluksuyu basıncı oluşur ve efektif gerilme azalır.

2.10. KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE BİLEŞİMİ

Kil zeminin mühendislik özelliklerini etkileyen iki faktör bulunmaktadır. Bunlar:

a) Bileşim Faktörleri; Herhangi bir özelliğin potansiyel aralığına göre ve örselenmemiş numuneler üzerinde çalışılarak belirlenir. Bunlar; mineral tipi, her bir mineralin zemin içindeki miktarı, adsorbe katyonların tipi, danelerin şekil ve büyüklüklerinin dağılımı, boşluk sıvısının niteliğidir.

b) Çevresel Faktörler; Herhangi bir özelliğin gerçek değerini belirlenir. Bu faktörleri belirleyebilmek için örselenmemiş numuneler veya arazide yapılan doğrudan ölçmeler gerekir. Bu faktörler; su muhtevası-w, birim hacim ağırlığı- γ , çevre basıncı, sıcaklık-t, zemin yapısı, zemin içindeki sudur.

Genel olarak bir zemindeki kil miktarı arttıkça daha yüksek plastisite ve daha fazla şişme – büzülme potansiyeli, daha düşük permeabilite, daha yüksek kohezyon ve sıkışabilirlik, daha düşük kayma mukavemeti açısı oluşmaktadır. Aynı grup killerde dahi dane boyutu, kristallik derecesi, adsorbe katyon tipi, su içindeki serbest elektrolitin tipi ve miktarı gibi faktörler killerin mühendislik özellikleri üzerinde etkilidir. Genel olarak bu faktörlerin etkisi: kaolin < hidro mika (illit) < simektit sırasıyla azalmaktadır (Mitchell, 1976). Bileşim faktörlerinin etkisi kadar çevresel faktörler de farklı tipteki minerallerde farklı mühendislik özelliklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu faktörler aşağıda sıralanmıştır.

1. Atterberg Limitleri,
2. Dane Boyutu ve Şekli,
3. Hacim Değişimi Karakteristikleri,
4. Permeabilite,
5. Organik Malzeme Etkisi,
6. Aktivite,

7. Değişebilir Katyonlar ve pH,
8. Viskoelastik Davranış.

2.11. KİLLERİN BİLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ

Herhangi bir zeminin özellikleri doğrudan zeminin fabrik yapısına, dane düzenine, çevre faktörlerine, mineralojik ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Ancak günümüz bilgileri ışığında basit sistemler hariç tutulmak koşuluyla bu faktörler cinsinden zeminin kantitatif özelliklerini yorumlamak güçtür. Günümüzde, önemli kil ve kil olmayan minerallerin fiziksel karakteristikleri belirlenebilmekte ve organik malzeme miktarı, demir oksit, silikon, alüminyum vb. bileşenlerin etkisi yorumlanabilmektedir. Kil ve kil olmayan minerallerin kalitatif tanımlaması X-ray analizi yöntemiyle belirlenebilmekte ve basit kimyasal daneler ile organik malzeme miktarı ve diğer bileşenleri belirlenebilmektedir. Mikroskoplar ise kil olmayan fraksiyonları tanımlamak için kullanılabilmektedir. Zemin bileşiminin belirlenmesinde ve zemin danelerinin araştırılmasında kullanılan yöntemler ve teknikler: 1) Dane dağılımı ve danelerin sınıflandırılması, 2) Mineralojik analizler öncesi ön davranış incelemesi, 3) Serbest oksijen, hidroksit, amorf bileşenler ve organik malzemelerin belirlenmesi için kimyasal analizler, 4) Silt ve kum danelerinin petrografik mikroskopla analizi, 5) Kil fazının elektron mikroskopuyla araştırılması, 6) Kristalli minerallerin X-ray analizi ile tanımlanması, 7) Bileşenlerin termal analizlerle belirlenmesi, 8) Özgül yüzeyin belirlenmesi, 9) Katyon değişim kapasitesi, değişebilir katyonlar, pH ve çözülebilir tuz için kimyasal analizler ve 10) Boyalı deneyler.

Şekil 2.19'da bir zeminin bileşiminin belirlenmesinde kullanılan genel yaklaşım ve Tablo 2.2'de zeminin fabrik yapısının belirlenmesinde kullanılan teknikler gösterilmektedir.

Dane Dağılımı Analizi: Dane boyutu ve dane dağılımı analizi çoğunlukla 74 μm ' den büyük daneler için elek, ince daneler için hidrometre deneyi ile belirlenmektedir. Boyutları 2 mm ~ 0.2 μm arası daneler Stoke Kanununa göre çöker. 0.2 μm 'den küçük danelerin ise Brownian Devinimiyle süspansiyonda sonsuz sürede asılı kaldığı kabul edilmektedir. Dane boyutunun belirlenmesinde optik veya elektron mikroskopları da bazı durumlarda kullanılmaktadır.

Boşluk Sıvısı Elektroliti; boşluk sıvısının elektriksel iletkenliğinden, çözünebilir tuzların konsantrasyonu kimyasal veya fotogrametrik tekniklerle belirlenebilmektedir.

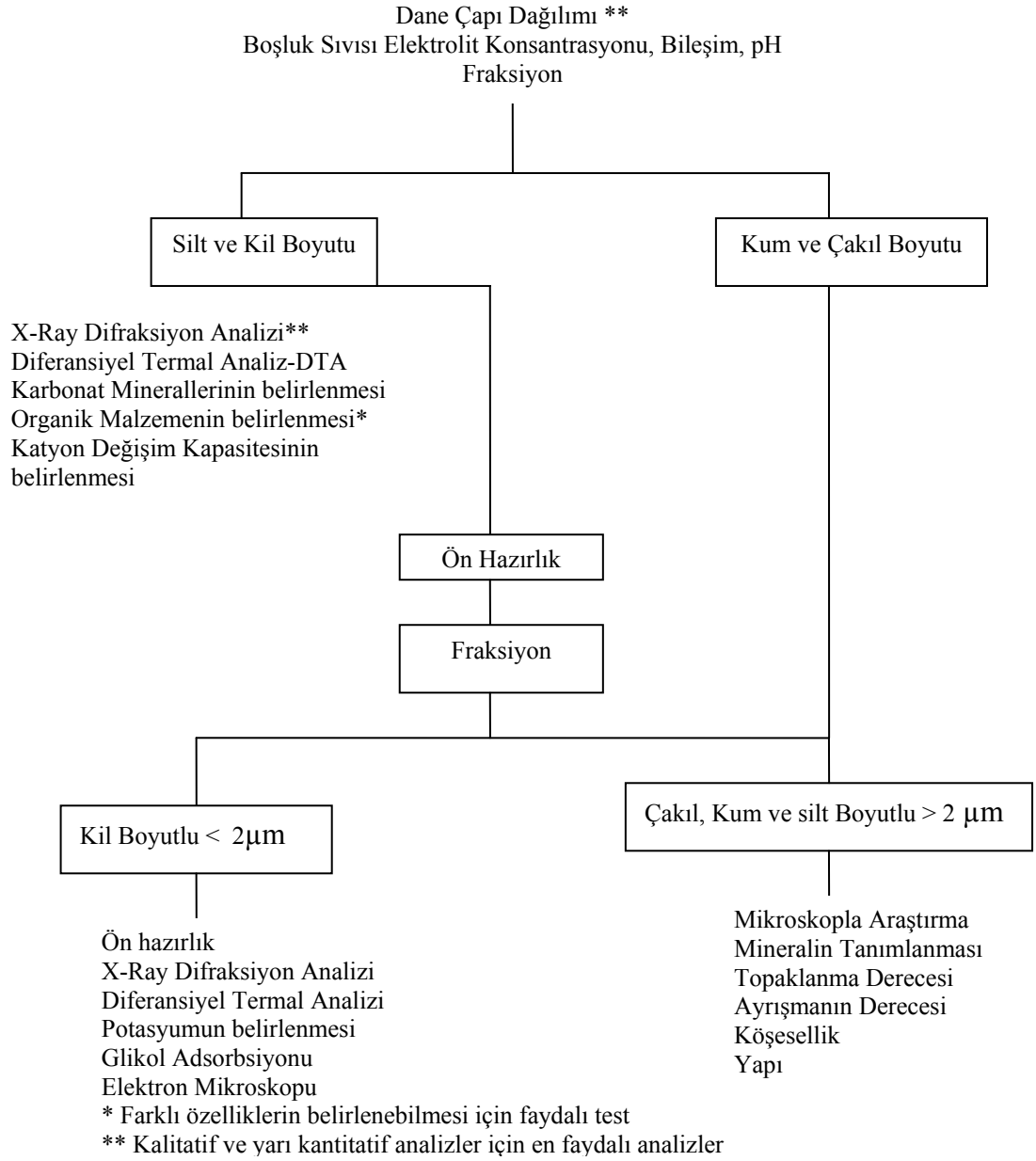
Karbonatlar; kalsit (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), marn ve kabuklar formundaki karbonatlar birçok zemin içinde bulunmaktadır. Zemin, HCl ile sulandırılıp köpürtülerek karbonatlardan kolaylıkla arındırılabilir. Ancak, iyi kristallenmiş karbonat minerallerinin kantitatif analizi DTA analizi ile yapılabilir.

pH; pH metre veya özel indikatörlerle zeminin asitliği veya alkaliliği pH cinsinden belirlenebilmektedir. pH derecesi, solüsyondaki nötr tuzun konsantrasyonunun ve çözülmüş CO_2 miktarının artmasıyla azalmaktadır.

Serbest Demiroksitler: Serbest demiroksitler, daneler etrafında ayrı daneler veya daneler arasında çimentolayan madde olarak bulunmaktadır. Demiroksitin miktarının artması zeminin dağılmasını ve diğer analizlerin yapılmasını zorlaştırabilir.

Organik Malzeme: Zemin, %15 oranında hidrojenperoksit solüsyonu ile karıştırıldığında organik malzemelerden arındırılabilir. Organik malzemelerin zemin danelerinde agregasyon etkisi olduğundan bu malzemeler diğer analizleri olumsuz etkileyebilmekte ve bu nedenle, tercihen zemin içindeki miktarlarının belirlenmesi önem arz etmektedir.

Kasyon Değişim Kapasitesi: Kasyon değişim kapasitesi, zemindeki aşırı çözünebilir tuzların serbest bırakılmasından sonra belirlenmektedir. Kasyon kompleksinin kompozisyonu ise kimyasal analizlerle belirlenmektedir.



Şekil 2.19. Zeminin Bileşim Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Genel Yaklaşım
(Mitchell, 1976)

Potasyum: Kil boyutundaki fraksiyonlarda yaygın olarak bulunan illit mineralleri, yapısında potasyum içerdiği için; zemin içindeki potasyumun belirlenmesi gerekmektedir.

Glisol Adsorbsiyonu: Farklı kil minerallerinin farklı özgül yüzeyleri vardır. Adsorbe edilen etil glisol veya gliserol miktarıyla kil minerallerinin cinsi belirlenebilmektedir.

Tablo 2.2 Zeminin fabrik yapısının belirlenmesinde kullanılan teknikler (Mitchell, 1976)

Yöntem	Yöntemin Dayandığı Temel	Gözlem Ölçeği ve Ayırt Edebildiği Özellikler
Optik Mikroskop	İnce kesitler veya yüzey kırığının doğrudan incelenmesi	Tekil silt boyutlu daneler, kil dane grupları, killerin oryantasyonu, milimetre veya daha büyük ölçekte homojenlik, büyük boşluklar kayma zonları
Elektron Mikroskop	İnce kesitler veya yüzey kırığının zemin numunesi boyunca gözlemlenmesi (SEM)	Büyütmenin üst limiti yaklaşık 300 kat Yaklaşık 100Å boyutunda çözünürlük; dane, dane grupları ve boşluk uzayının doğrudan gözlemlenmesi; Mikrofabrik detayları
X-Ray Analizi	Paralel kil plakaları grubu gelişigüzel oryante olmuş plakalardan daha güçlü difraksiyon üretir	Birkaç mm ² alanında ve birkaç mm kalınlığında oryantasyon; tek minerallerde çok iyi sonuç
Boşluk Boyutu Dağılımı	(1) nemli olmayan sıvının (civa) güçle içeri girmesi (2) kapiler yoğunlaşma	Boşluklar ~0.01 ile > 10µm (2) maksimum 0.1 µm
Akustik Hız	Tekil yerleşim hızı etkiler	Anizotropi; floküle ve floküle olmayan yapı; numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabriği ölçer
Dielektrik Yayılmı ve Elektriksel İletkenlik	Dielektrik sabitinin varyasyonu ve frekansa göre iletkenlik	Anizotropi; numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabriği ölçer
Termal İletkenlik	Dane oryantasyonu termal iletkenliği etkiler	Anizotropi; numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabriği ölçer
Manyetik Yatkinlık	Numune oryantasyonundaki değişikliklerle manyetik yatkinlığın değişiminin manyetik alana oranı	Numune boyutuna eşit bir hacimde Mikrofabrik, anizotropi; bazı durumlarda makrofabrik
Mekanik Özellikler		
Mukavemet		
Modüler		
Permeabilite		
Sıkışabilirlik		
Büzülme ve Şişme		

2.12. KONSOLİDASYON VE KONSOLİDASYON OTURMALARI

Yükleme veya gerilmeye maruz kalan malzemeler şekil değiştirirler. Bazı malzemelerde bu deformasyonların meydana gelmesi kısa sürerken bazı malzemelerde ise bu süreç çok daha uzun zaman almaktadır. Kil zeminler bu tarz malzemelere örnek olarak gösterilebilirler.

Gerilme-birim deformasyon ilişkisinin en basit türü elastik malzemelerdeki şeklidir. Gerilme-birim deformasyon ilişkisinde zamanı bir faktör olarak içeren malzemeler viskoelastik malzemelerdir. Zeminler mekanik davranış açısından viskoz özellik göstermekle birlikte zeminde elastik davranış çok dar bir deformasyon aralığında oluşur. Zeminlerin doğrusal olmayan malzemeler olması sebebiyle visko-elastite teorisi değil elastik viskoplastik davranış özellikleri zemin için uygun tanımlamayı içerir. Zeminler gerilmeye maruz kaldığında şekil değişikliğine uğrar ve elastik davranış bölgesi geçildikten sonra gerilmenin kalkması durumunda deformasyonların önemli bir kısmı geri dönmeyecektir ve kalıcı deformasyon olarak zemin dokusunda değişime sebep olacaktır. Deformasyonlar şekil değişikliği veya hacim değişikliği ya da her ikisinin birleşmesiyle meydana gelir.

2.13. OTURMANIN BİLEŞENLERİ

Bir zemin ortamı bir yapı veya dolgu ile yüklemeye maruz kaldığı zaman deformasyonlar oluşur. Yüzeyde yüklemekten kaynaklanan hacim azalmasının yapı üzerinde düşey yöndeki etkisi oturma şeklindedir. Artan yükleme durumunda hareketin yönü aşağı veya yük azalması halinde yukarı (şişme) olabilir.

Mühendislik yapılarının temel tasarımında oturmanın hızı da oturma miktarı kadar önemlidir. Özellikle aşırı oturmalar, oturmanın hızlı olduğu durumlarda ve oturma hızlı olmasa bile farklı oturmalar yapısal ve/veya yapısal olmayan hasarlara yol açabilir. Yüklemeye maruz kalan bir zemindeki toplam oturmanın üç bileşeni vardır. Bu bileşenler:

$$S_t = S_i + S_c + S_s \quad (2.3)$$

şeklindedir.

Zeminlerde toplam oturma iki şekilde gerçekleşir.

- 1) Ani oturma
- 2) Konsolidasyon oturması

Ani oturma; hızlıca gerçekleşen oturma şeklidir. Yükleme yapıldıktan saatler veya günler sonra oturma gerçekleşir. Konsolidasyon oturması ise; zamana bağlı oturmadır ve doymuş veya yarı doymuş silt veya killerde gerçekleşir. Bu tür zeminlerin permeabilitesi düşük olduğundan oturma yavaş gerçekleşir. Konsolidasyon oturmasının tamamlanması yıllarca sürebilir.

Konsolidasyon oturması birincil ve ikincil konsolidasyon olmak üzere ikiye ayrılır. Birincil konsolidasyon ikincil konsolidasyona göre daha büyüktür ve daha hızlı gerçekleşir. İkincil konsolidasyon sonucunda ise zeminde plastik şekil değiştirme ve karmaşık kimyasal yapılar oluşur.

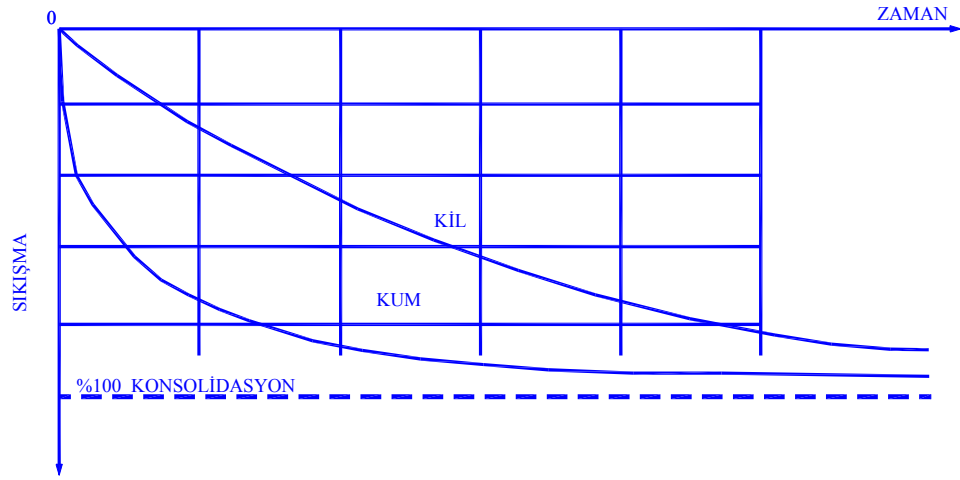
Uygulamada karşılaşılan pek çok durumda kumlardaki sıkışma henüz inşaat devam ederken meydana gelir ve oturmaların çoğu inşaat bitene kadar gerçekleşmiş olur. Ancak, bu hızlı işlem nedeniyle dolaylı olarak iri taneli malzemede çok küçük toplam oturmalar bile özellikle çabuk oturmaya duyarlı yapılarda zararlı olabilmektedir. İri taneli zeminlerdeki oturma aslında elastik olmamakla birlikte zaman etkisini hesaba katmamak için 2.3 eşitliğindeki S_c ve S_s ihmal edilerek hesaplanabilmektedir. Ancak kil gibi ince daneli malzemelerde bu durum söz konusu değildir. Zeminin oturması, zamana bağlıdır ve zeminin permeabilite katsayısına bağlı olarak çok uzun zaman alabilir.

İlave boşluk suyu basıncı değeri zemin dokusunun tanelerin birbirine değmesinden kaynaklanan mukavemetini (gerilmesini) aşarsa kısmi göçme oluşur ve ilerleyerek genel göçmeye yol açabilir. Göçme olmasa bile ilave boşluk suyu basınçları zemin içindeki efektif gerilmeyi azaltacak yönde etki eder (Çinicioğlu, 2005).

2.14. ZEMİNLERİN SIKIŞABİLİRLİĞİ

Oturma; zemin sıkışmasının bir sonucudur ve bu sıkışmayı aşağıdaki faktörler etkilemektedir.

- 1) Zemin içindeki boşluklardan hava veya suyun kaçması
- 2) Zemin danelerinin sıkışması
- 3) Boşluklardaki su ve havanın sıkışması



Şekil 2.20 Yük altındaki bir zemindeki konsolidasyon-zaman ilişkisi (Cernica, 1995)

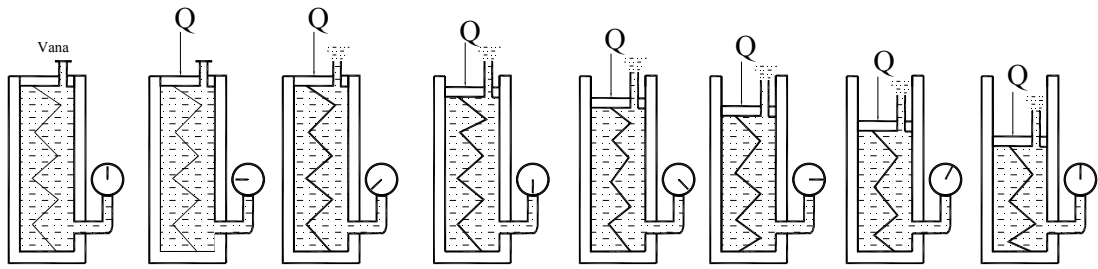
Klasik konsolidasyon teorisine göre sıkışabilir zeminlerin çoğunun yeraltı su seviyesinin altında ve tamamen suya doygun olduğu kabul edilir. Bundan dolayı boşluk suyunun sıkışabilirliği ihmal edilir. Zemin danelerinin de sıkışması küçük olduğundan ihmal edilebilir. Yüklenmiş zeminlerde hacmin azalmasına en çok katkı sağlayan faktör zemin içindeki hava ve suyun atılmasıdır. Su gözeneklerden atılırken zemin daneleri daha stabil ve daha sıkı bir konuma gelerek hacimde azalma doğal olarak da oturma meydana gelmesine yol açar. Bu işlemin gerçekleşme hızı, zeminin permeabilitesine bağlıdır. Kohezyonsuz zeminlerde sıkışma genellikle çabuk gerçekleşirken, kil silt gibi kohezyonlu zeminlerde ise daha uzun sürede gerçekleşir. Killerdeki toplam oturmanın kohezyonsuz zeminlere göre daha uzun süre alması Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Zemin danelerinin yeni pozisyonlarını kazanması ve sıkışmanın gerçekleşmesinin ne kadar hızlı olacağı (zemin yapısının bir fonksiyonu olan) danelerin rijitliğine bağlıdır.

2.15. KONSOLİDASYON OTURMASI VE ZAMANA BAĞLI İKİNCİL OTURMALAR

Zemin yüklendiğinde, zemin içinde bulunan su ve zemin danelerinin çok az miktarda sıkışacağından hacimde çok küçük değişimlere neden olur. Ancak hacim değişiminin büyük miktarı boşluklarda bulunan hava ve suyun ortamdan kaçmasıyla gerçekleşir. Bu hacim değişiminin hızını ise zeminin permeabilitesi belirler. Killerin permeabilitesi düşük olduğundan dolayı konsolidasyon hızları düşüktür. Zeminin permeabilitesinin düşüklüğü konsolidasyon hızını etkilediği gibi aynı zamanda konsolidasyon süresini uzatmaktadır. Permeabilitesi düşük zeminlerin konsolidasyonları aylarca yıllarca sürebilir. Bu oturmadaki gecikme hidrolik gecikme diye adlandırılır. Yük altındaki kil daneleri etrafını saran çift tabaka su yük nedeniyle deforme olur. Kil danesi etrafında bulunan çift tabaka su kesme kuvveti nedeniyle uzaklaşarak danenin deforme olmasına neden olur. Bu durum doğal viskozdur ve deformasyonun hızı uygulanan yükün şiddetine bağlıdır. Geoteknikte bu gecikme viskoz gecikme diye adlandırılır (Dunn ve Diğerleri, 1980).

Konsolidasyon teorisine göre her iki gecikme türü de konsolidasyonu etkilemektedir.

2.16. BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON; REOLOJİK MODEL



Şekil 2.21 Bir boyutlu konsolidasyon; reolojik modeli (Cernica, 1995)

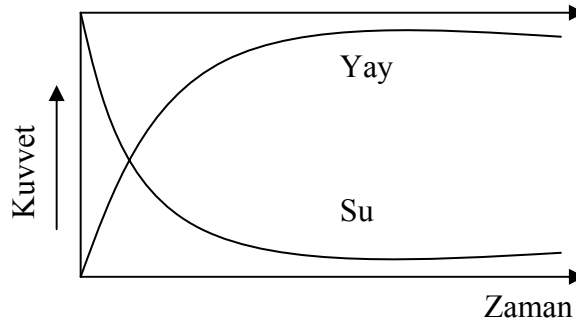
Killerin konsolidasyonu yay mantığı ile kolayca açıklanır. Bu sistemde yay zemine karşılık gelirken, su gözeneklerde bulunan suyu, vana ise zeminin geçirgenliğini anlatmak için kullanılır. Silindire yerleştirilen basınç kompaktörü ile zemin içinde belirli bir seviyedeki hidrostatik basınç ölçülür. Piston üzerine yük yüklenerek yükün basıncı suya aktarılır. Boşluk suyu basıncı başlangıçtaki hidrostatik basınçtan büyük olduğu için aşırı hidrostatik basınç olarak adlandırılır. Killerde olduğu gibi düşük

permeabiliteli zemin şartlarını oluşturmak için vana açılır ve silindir içindeki suyun dışarı çıkışına izin verilir. Suyun dışarı çıkışı sırasında hidrostatik basınç azalır ve bu basınç farkı suya aktarılır. Yay üzerine etkiyen basıncın artmasına bağlı olarak yay denge konumuna gelinceye kadar sıkışır. Denge konumuna geldiğinde yayın sıkışması ile birlikte suyun dışarı çıkışı da durur. Arazide ve laboratuvarında zeminlerin yüklenmesi durumunda kabaca nasıl davranacakları en kolay yolla bu şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.4)$$

ifadesi ile zemin daneleri üzerine etkiyen basınçlar ifade edilebilir.

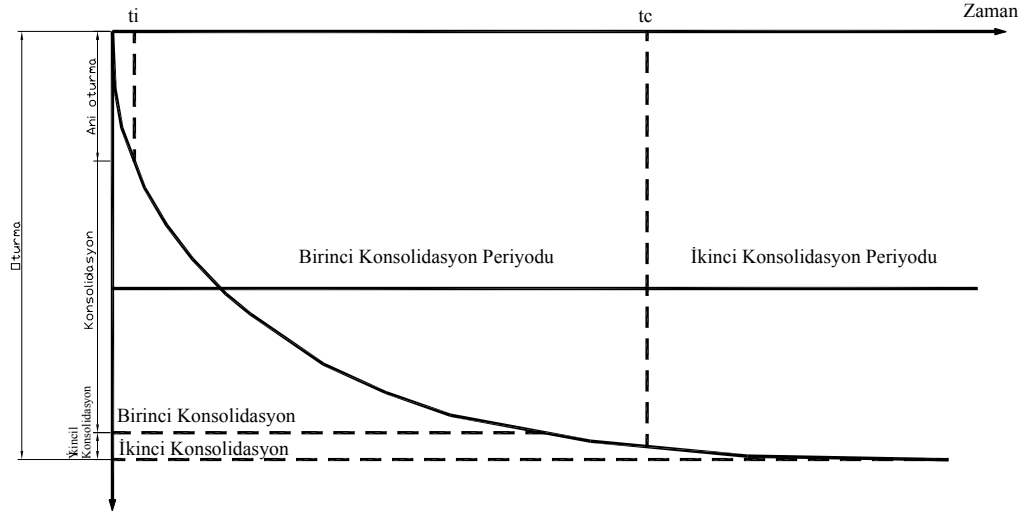
Yay analojisi ile ifade edilmeye çalışılan konsolidasyon, birincil konsolidasyon olarak adlandırılırken; bazı durumlarda kil zeminlerde aşırı hidrostatik basınç artmaya devam ederek konsolidasyonun devam etmesine olanak sağlar. Bu şekilde meydana gelen konsolidasyona da ikincil konsolidasyon adı verilir.



Şekil 2.22 Konsolidasyon sırasında meydana gelen yük transferi (Lambe ve Whitman, 1969)

2.17. İKİNCİL KONSOLİDASYON

Konsolidasyon oturması ilave boşluk suyu basıncının azalması ve buna bağlı efektif gerilme artışı ile zaman içerisinde oluşmakta ve ilave basınç etkisi boşluk suyundan tanelere nakledilince yani ilave boşluk suyu basınçları sönümlenip bu basınç zemin tarafından efektif gerilme artışı olarak algılanınca durmaktadır. İkincil sıkışma ise konsolidasyon ile başlayan sıkışmanın sabit efektif gerilme altında bir devamı şeklinde oluşmakta ve sünme (krip) benzeri bir davranış sunmaktadır. İkincil sıkışma hızı, konsolidasyon hızından çok daha yavaştır (Koç ve Kayalar, 2002).



Şekil 2.23 Kohezyonlu zeminlerin yük altında toplam oturması (Cernica, 1995)

2.18. JEOLJİK GEÇMİŞİN SIKIŞABİLİRLİĞE ETKİSİ

Zeminler jeolojik oluşumlardır. Bu nedenle özelliklerinin jeolojik olaylardan etkilenmesi beklenir. Buna en canlı örnek fiziksel ve mineralojik yapıları farksız olan iki kilin çok farklı sıkışabilirlik gösterebilmeleridir. Öte yandan, killer de diğer malzemeler gibi zaman içinde özelliklerini değiştirirler. Bu olaya 'yaşlanma' denmektedir.

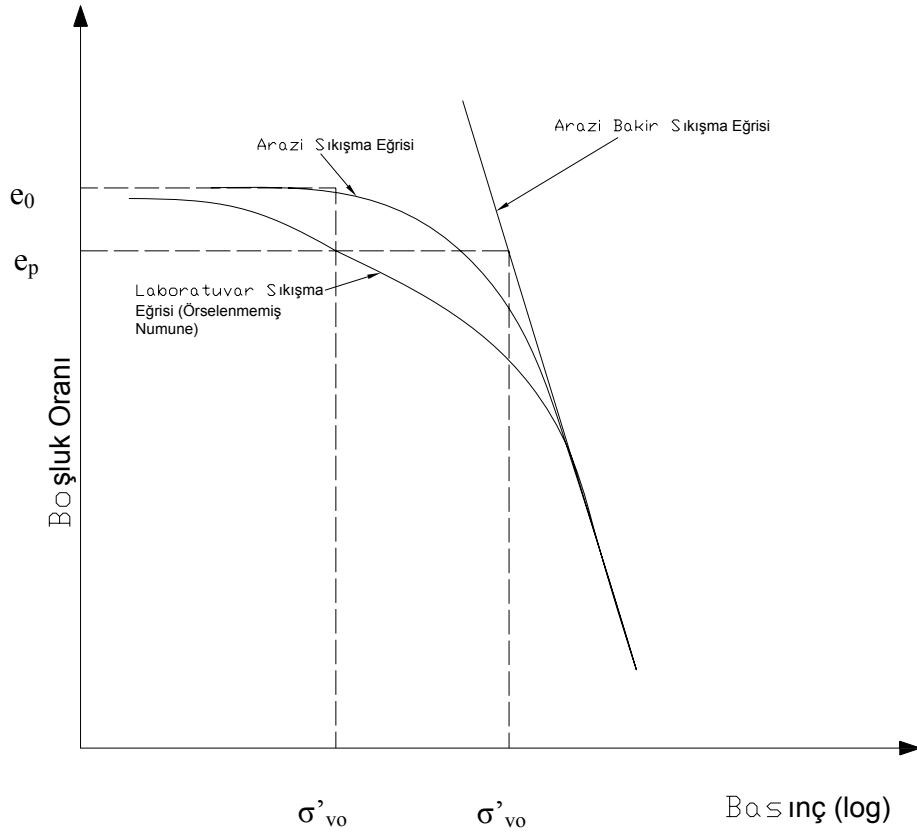
2.18.1. Normal Konsolide Killer

Oluşumundan bu yana bugün almakta olduğu efektif gerilmeden (σ_0) fazla gerilme almamış killere "normal konsolide kil" denir. Eğer beklendiği gibi çökme sonrası özkütlesinin etkisi altında beliren ilave boşluk suyu basınçları tamamen sönümlenmişse bu tür killer için "tamamen konsolide olmuş" terimi de eşanlamlı olarak kullanılmaktadır. Normal konsolide killerin doğal su muhtevası çoğunlukla likit limit dolayında bulunur. Bir başka ifade ile sıvılık indisi $I_L \sim 1$ dolayındadır.

Normal konsolide killer, günlük dilde 'balçık' olarak anılan çökellerdir. Su muhtevasının yüksekliğinin doğal sonucu yüksek boşluk oranı gösteren killere "yumuşak kil" de denmektedir. Yumuşak killerin yapıları ve davranışları çökeldikleri ortamın özelliklerine, yaşlanma çimentolanma ve aldıkları yıkanma etkilerine bağlıdır.

2.18.2. Aşırı Konsolide Killer

'Aşırı Konsolide Olmuş' veya 'Önceden Yüklenmiş' killer oluşumu sırasında veya daha sonra, bugün almakta olduğu gerilmeden daha yüksek gerilmeler almış killerdir. Bunun sonucu katı veya sert kıvam kazanmışlardır. Türkiye’de karşılaşılan killerin önemli bölümü aşağıda sıralanan nedenlerden biri veya birkaçı sonucu aşırı konsolide olmuşlardır. Önceden konsolide kil, ön konsolidasyon basıncına ulaşılan kadar alacağı yükler altında normal konsolide kile göre çok daha düşük sıkışmalar gösterecektir. Ancak aşırı konsolide kil üzerine uygulanan yük kilin geçmişte karşılaştığı en büyük basıncı tanımlayan ön konsolidasyon basıncı değerine ulaşıncaya kadar zemin artık normal konsolide hale gelir ve gerilme sıkışma ilişkisi değişir. Bunun sonucu olarak bu gerilme değerinden itibaren uygulanan ilave gerilme artışları daha büyük sıkışma artışlarına sebep olacaktır.



Şekil 2.24 Aşırı konsolide bir kilin sıkışma eğrisi (Özaydın, 2001)

2.18.3. Aşırı Konsolidasyonun Nedenleri

Aşırı konsolidasyonu oluşturan birkaç önemli neden vardır. Bunlar ortamda toplam basınç veya boşluk suyu basınçlarında meydana gelen değişimler sonucu efektif gerilmenin düşmesini sağlayan doğal ve yapay olaylardır. Bu olaylar şöyle sıralanabilir:

- 1) Üstteki katmanların aşınma, faylanma ile ortadan kalkması; eskiden mevcut olup şimdi bulunmayan yapıların etkisi veya şimdi kalkmış buzul yükleri etkisiyle toplam gerilme değişimleri ($\Delta\sigma$)
- 2) Yeraltı su seviyesindeki değişimler, artezyen basınçları; yüzeyden kuruma; bitki kökleri etkisi ile su kaybı; kılcallık nedeniyle boşluk suyu basıncında değişimler (Δu_w)
- 3) Yaşlanma sonucu kil yapısında değişme;
- 4) Ortam sıcaklığı, pH'si, tuzluluk gibi çevresel koşullarında değişim;
- 5) Ayrışma-yıpranma, çökelme, çimentolama, iyon değişimi gibi kimyasal değişiklikler.

Tüm bu nedenlerle killere, hatta kumların, ön yükleme gerilmesi ya da aşırı konsolidasyon basıncının gerçek değerinin bulunması önem taşımaktadır.

2.18.4. Yaşlanmanın Aşırı Konsolidasyona Etkisi

Araştırmalar, yaşlanmanın ikincil konsolidasyon olayı sonucu etkin olduğunu göstermektedir. Kil oluşumundan sonra dengeye gelip bir başka aşamada, örneğin aşınma (erozyon) etkisi ile denge gerilmesi 10000 yıl boyunca σ_i iken bugünkü σ_0 'a düşmüşse bu kil aşırı konsolide olmuş sayılmaktadır. Buradan çıkarılacak sonuç kilin ön konsolidasyon basıncının sadece basit katman kaybı değil, yaşlanmadan da önemli ölçüde etkilendiğidir. Daha da anlamlısı, yumuşak killerde de sıkışmaların bakir eğri boyunca hesaplanması sırasında yaşlanmadan kaynaklanan ön konsolidasyon etkisinin ihmal edilemeyecek düzeylere çıkmış olabileceğidir. Bu nedenle kilin jeolojik yaşı ihmal edilemez.

2.18.5. Konsolide Olmamış Killer

Uygulamada karşılaşılabilecek en problemlı zeminler, oluşumundan bu yana dengeye gelmemiş, bir başka deyişle özkütlesi altında dahi konsolidasyonunu tamamlamamış olan killerdir. Bu yeni çökelmiş (yaşı 100 -103 yıl) veya yapay depolanmış ortamlarda boşluk suyu basınçları henüz sönmemiş olduğundan ek gerilme aldıklarında göçme riski veya oluşan ilave boşluk suyu basıncı $\Delta\mu$, hidrostatik değerlerin çok üstüne çıkacağından ciddi oturma problemleri belirlemektedir. Bu grupta yer alan insan yapısı hidrolik dolgular ve hafriyat atıkları da temel ortama tehlikeli özellikler taşırlar. Türkiye’de bu killere en canlı örnek Haliç’ in kıyılarıdır.

Konsolide olmamış kilin sıkışması gerilme artışının getirdiği ve kilin sürmekte olan konsolidasyondan gelen bileşenlerin toplamı olarak hesaplanmalıdır.

2.19. BİR BOYUTLU KONSOLIDASYON TEORİSİ

Genel konsolidasyon teorisi, üç boyuttaki basınç ve gerilme durumlarını kapsamaktadır. Ancak bu durum, zeminlerin homojen, elastik ve ideal bir yapıda olmaması nedeniyle uygulanması oldukça zor ve karışık olduğundan dolayı zeminler için bir boyutlu konsolidasyon teorisinin kullanılmasının uygulamaya ait çözümler için yeterli olduğu düşünülmektedir.

Terzaghi, killerin sıkışmasında en önemli etkenin oluşan boşluk suyu basınçlarının zamanla dışarı atılması nedeniyle boşluk hacminde azalma olduğunu fark etmiş ve bunun üzerine “ Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi” ni geliştirmiştir. Bu teoride tüm killerin doygun olduğu kabulü yapılır. Böylelikle sıkışmanın boşluklardaki havadan kaynaklanmaması oturma hesapları için kolaylık sağlar. Ancak günümüz zemin mekaniğinde önemli yer tutan doygun olmayan zeminlerin mekaniği bakımından klasik teorisinin kabullerinin büyük bir kısmı geçersizdir. Terzaghi killerin konsolidasyonu için klasik teoriyi oluştururken ve açıklarken bazı kabullerde bulunmuştur. Bu kabuller:

- 1) Zemin homojendir.
- 2) Zemin doygundur.
- 3) Zemin daneleri ve su sıkışmaz.

- 4) Sıkışma ve suyun hareketi tek yönde (düşey) gerçekleşir.
- 5) Gerilmeler küçüktür.
- 6) Darcy kanunu bütün hidrolik eğimlerde geçerlidir.
- 7) Permeabilite katsayısı ve konsolidasyon katsayısı sabit kalmaktadır.
- 8) Efektif gerilme ile boşluk oranı arasında zamandan bağımsız bir ilişki mevcuttur.

Bir boyutlu konsolidasyon teorisinde; kilin içindeki herhangi bir eleman düşey yönde sıkışırken sınır koşulları nedeniyle yanal deformasyon ihmal edilir. Sistem doygun olduğundan dolayı da hacim değişimi sadece boşluk hacmindeki azalmadan dolayı gerçekleşir (Craig, 1974).

2.20. KONSOLİDASYON PROBLEMLERİNİN BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON TEORİSİYLE ANALİZİ

Konsolidasyon oturmasının hızı, zeminden suyun dışarı çıkması hızıyla veya efektif gerilmenin değişimiyle ilgilidir. Oturma hızını tahmin etmek için, permeabilite ve boşluk oranı ile zemin iskeletindeki gerilme-birim şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi, zemin içindeki su akımını Darcy Kanunu gibi tanımlayan bir model gereklidir. Oturma analizini, oturma miktarı ve oturma hızı olmak üzere ikiye ayırarak incelemek yapay ve gerçekçi olmayan bir yaklaşımdır. Ancak, bir boyutlu konsolidasyon analizlerinde yalnızca düşey yöndeki şekil değiştirmeler dikkate alınmak zorundadır. Gerçekte ise oturma miktarı ve hızı birbiriyle bağlantılı iki bileşendir ve tam olarak üç boyutlu konsolidasyon teorisiyle incelenebilir.

Tablo 2.3 Bir boyutlu konsolidasyon teorilerinin temel denklemleri (Murray, 1978)

Terzaghi-Rendulic Psüdo Konsolidasyon teorisi	Biot Teorisi	Konsolidasyon Katsayısı
$\frac{\partial \mu_e}{\partial t} = c_1 \frac{\partial^2 \mu_e}{\partial z^2}$	$\frac{\partial \mu_e}{\partial t} = c_1 \frac{\partial^2 \mu_e}{\partial z^2}$	$c_1 = \frac{kE(1-\nu)}{\gamma_w(1+\nu)(1-2\nu)}$

2.21. BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON TEORİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisinde yaptığı kabullerin birçoğu gerçek koşullarda geçersiz olup pratik uygulamalar için tatmin edici değildir. Gerçek

yüklemeler zamana bağımlıdır. Zeminler homojen olmaktan uzak heterojen bir yapıya sahiptir ve nonlinear bir davranış sergilerler. Ayrıca birim şekil değiştirmeleri çoğunlukla çok büyüktür. Tüm bu gerçeklere rağmen orjinal Terzaghi Konsolidasyon Teorisinin yaygın olarak kullanılmasının nedeni kullanım kolaylığıdır. Ancak Terzaghi Teorisi'nin de gerçek koşullarla uyuşmayan tarafları bulunmaktadır (Ladd, 1985). Bunlar:

- 1) Oturmalar nihai değere yaklaşmamaktadır. Diğer bir deyişle ikincil sıkışma ihmal edilmiştir.
- 2) İkincil sıkışmanın birincil konsolidasyon oturmasına oranı, yük artım oranının azalmasıyla ve maksimum drenaj mesafesinin artmasıyla artmaktadır.
- 3) Orta düzlemdeki boşluk suyu basıncı sönmeme hızı, yük artım oranının konsolidasyonun ilk kademelerinde azalmasıyla artmaktadır.
- 4) Yük uygulama süresinin uzatılması, ikincil sıkışma / birincil konsolidasyon oturması oranının artmasına ve orta düzlemdeki boşluk suyu basıncının başlangıçta hızlı bir şekilde sönmemesine sebep olmaktadır.

Bir boyutlu orjinal Terzaghi Konsolidasyon Teorisi, çeşitli değişiklikler yapılarak çeşitli bilim adamları ve mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde kullanılan ve konsolidasyon teorisinin çeşitli kabulleri üzerine yapılan iyileştirme çalışmalarıyla geliştirilen bir boyutlu konsolidasyon teorileri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Ladd, 1985).

- 1) Akım ve deformasyon koşullarında yapılan iyileştirmeler: Bir boyutlu, iki boyutlu (düzlemsel şekil değiştirme) ve üç boyutlu konsolidasyon teorileri.
- 2) Yükleme koşullarında yapılan iyileştirmeler: Sabit yükleme, kademeli yükleme ve rasgele yükleme.
- 3) Zemin profilinde yapılan kabuller: Homojen ve heterojen, izotropik veya anizotropik, tek veya çok tabakalı.
- 4) Zemin iskeletinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde yapılan iyileştirmeler: Sünmeyi kapsayacak veya kapsamayacak şekilde gerilme veya şekil değiştirme cinsinden formüle edilen lineer veya nonlinear yöntemler.

- 5) Konsolidasyonla ilgili zemin parametrelerinin varyasyonları (permeabilite, konsolidasyon katsayısı, sıkışma indisi, boşluk oranı, efektif gerilme)
- 6) Konsolide olan tabakadaki deformasyon büyüklüğünün, tabakanın başlangıç kalınlığıyla karşılaştırılması: Sonlu şekil değiştirme teorileri.
- 7) Boşluk sıvısının sıkışabilirliği: Sıvıyı sıkışabilir veya sıkışmaz kabul eden yaklaşımlar.
- 8) Analitik kapalı- form çözümleri veya sonlu elemanlar veya sonlu farklar gibi nümerik çözüm yöntemleri.

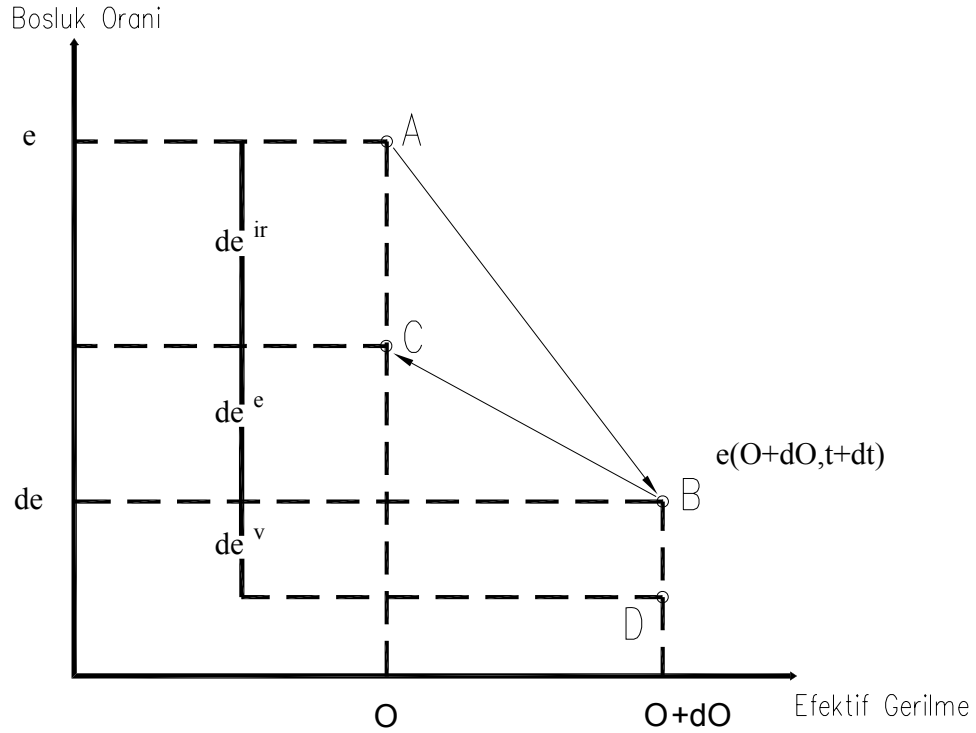
2.22. SIKIŞMA KARAKTERİSTİKLERİNİN REOLOJİK YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

2.22.1. Elastisite, Viskozite ve Plastisite

Reolojide elastik, plastik ve viskoz sıkışma birbirinden farklı davranışları ifade etmektedir. Elastik davranış, gerilmedeki bir değişim çevrimi için zeminde meydana gelen sıkışmanın geri dönebilir olmasını ifade etmektedir. Viskoz davranış, sabit gerilme altında zamanla dereceli olarak meydana gelen şekil değiştirmenin geri dönüşümsüz olması veya hiçbir şekil değiştirme oluşturmada zamanla dereceli olarak meydana gelen ve geri dönmeyen gerilme değişimidir. Plastik davranış ise kritik gerilmeyi aşan bir gerilmede şekil değiştirmelerin geri dönülmez olmasıdır. Elastisite ve plastisite zamandan bağımsız, vizkosite ise zamana bağımlı davranıştır.

Elastik sıkışmada, dokuda çok az değişiklik oluşmaktadır ve bağlarda bozulma meydana gelmemektedir. Viskoz sıkışmada, bitişik daneler arasında geri dönülemeyen kayma hareketleri meydana gelmekte ve bu hareket mevcut bağları bozarak yeni bağlar oluşturmaktadır. Bu mekanizma plastik sıkışma için de benzer şekildedir, ancak viskoz sıkışmada danelerin kayma hareketi zaman alıcıdır ve dokuda dereceli olarak değişiklikler yapmaktadır. Halbuki plastik davranışta yenilme gerilmesinde fabrikte ani bir değişiklik olmaktadır. (Imai, 1985) (Şekil 2.25) AB ile gösterilen proses, geri dönebilen sıkışma de^r , ile geri dönemeyen sıkışma de^{ir} bileşenlerini kapsamaktadır. İki bileşen deneysel olarak birbirinden geri dönen gerilmeyi B'den C'ye taşımasıyla ayırt edilir. Ancak AB prosesi boyunca viskoz ve plastik sıkışma arasındaki fark

belirlenemez. Çünkü zamandan bağımsız plastik bileşen zamana bağımlı konsolidasyon deneyi ile ölçülmektedir.



Şekil 2.25 Sıkışma bileşenleri (Imai, 1995)

Plastik bileşen oluşursa AB zamandan bağımsızdır ve anımsız meydana gelmektedir. Viskoz davranış oluştuğunda AB prosesi, elastik sıkışma ile viskoz sıkışmanın toplamı ve zaman alıcı bir prosestir. BD ikincil sıkışma prosesinde, yalnız viskoz sıkışma meydana gelmektedir.

2.23. KONSOLIDASYON DENEYİ

1970'lere kadar konsolidasyon deneyiyle ilgili pek az değişim olmuştur. Mühendislerin geleneksel kademeli yükleme deneyinde bazı problemlerle karşılaşması ve elektronik ölçüm ve kontrol ünitelerinin gelişmesi, pratikliği, yeni deney metotlarının gelişmesine sebep olmuştur. Geliştirilen ilk yöntemler hidrolik eğim kontrollü (Lowe, 1969), sabit yükleme hızlı (Aboshi ve diğ. 1970), sabit deformasyon hızlı deneyleridir (Smith ve Walls, 1969). Klasik kademeli konsolidasyon deneyinin çözüm getiremediği problemler aşağıda belirtilmiştir:

- 1) Kademeli yüklemede bir deneyin sonuçlanması için uzun süre (her bir gerilme seviyesinde 24 saat bekleme) gerekmektedir.

- 2) Kademeli yükleme deneyi, yalnızca gerilme-sıkışma eğrisi üzerinde belirli noktaları vermektedir. Yük artım oranının (LIR) azaltılması yoluyla daha fazla veri elde etme girişimleri eğrilerin yorumlanmasında hatalara yol açabilmektedir.
- 3) Numune boyunca efektif gerilmenin değişimi yanlış değerlendirmeye sebep olabilmektedir.
- 4) Laboratuvar koşullarındaki hidrolik eğim arazideki değerden kat kat yüksektir.
- 5) Geri basınç ile suya doygunluğun sağlanması özellikle konsolidasyon hızı için önemli bir faktördür.

Geliştirilen yeni deney teknikleri ile sürekli sıkışma eğrisi elde edilebilmekte ve sıkışabilirlik ve konsolidasyon katsayısının çok daha doğru olarak bulunması mümkün olmaktadır. Diğer taraftan, çok daha karmaşık gelişmiş aletlere ve sürekli okumaların alınması için otomatik veri kayıt sistemine gereksinim vardır. Kademeli yükleme deneyleri, standart ödometre deneylerinde uygulandığı gibi rutin deneylerde çokca kullanılmaktadır. Sürekli yükleme deneyleri ile bazı dezavantajlar ortadan kaldırılabilenekte veya azaltılmaktadır. Bunlar:

- Alet terk edilerek ve iş kazancı artırılarak; deneyin tamamlanması için gereken süre azaltılabilmektedir.
- Deneyde kullanılacak yük artım oranı ve yükte bekleme süresi operatör tarafından seçilebilir. Böylelikle yüksek geçirgenliği olan zeminler çok daha çabuk test edilebilmektedir. Örneğin Londra kili için 48 saat gerekirken Kaolin için bu süre yaklaşık 2 saate kadar düşmektedir.
- Yükleme programı, otomatiğe bağlanarak iş gücü kazancı sağlanmaktadır.
- Sürekli gerilme-şekil değiştirme-zaman eğrileri sayesinde daha iyi ve güvenilir veri toplanmaktadır.

Sürekli yükleme deneyleri için temel olarak Rowe hücresi, Oxford Üniversitesi hücresi gibi hidrolik sıkışma hücreleri veya Bristol hücresi gibi ödometre tipi hücrelere uyarlanan mekanik yükleme düzeni gerekmektedir. Bilgisayarla izleme ve kontrol esasen tüm deney tipleri için gerekmektedir. Bu deneyler, birçok noktadan oluşan sürekli bir $e-\sigma'$ veya $e-\log \sigma'$ eğrisi ürettiği için yüksek kalitede veri güvenilirliği vermektedir. Bu tür deneylerin dezavantajı, alete bağlanan cihazların

karmaşık ve pahalı olması, uzman operatör gerektirmeleri ve seçilen şekil değiştirme hızının deneyin yorumunu ve zamanın etkisini anlamayı zorlaştırıp karmaşık hale getirmesidir. Sürekli yükleme deneylerinin başlıca tipleri aşağıda anlatılmıştır.

Sabit Hidrolik Eğimli Deneyler: Sabit hidrolik eğimli deneylerde, numunenin geçirimsiz olan tabanında boşluk basıncını sabit bir değerde tutabilmek amacıyla yükleme oranı kontrol edilmektedir. Boşluk oranı çıkış yüzünde ters basınca eşit olmakta ve böylelikle, sabit tutulunca numune kalınlığına karşı boşluk basıncı artımı da sabit olmaktadır. Deneyde, klasik ödometre boyutundaki numune ile çalışılır. Standart ödometreden farkları ise; ringin permeametre deneyindeki gibi taban plakasına yapıştırılmış olması, tabandaki boşluk suyu basıncının transdüser yardımıyla ölçülmesi ve numunenin ters basınç uygulanan bir ünite içinde yer almasıdır. Sabit hidrolik eğimli deneylerde, numune boyunca mümkün olduğunca gerilme koşulları sabit tutulur. Test boyunca sıkışma hızının uniform olması sağlanır ve deney farklı düşük sıkışma hızlarında tekrarlanarak arazideki gerçek düşük sıkışma hızlarına benzer veri elde edilir ve ekstrapolasyon yapılabilir.

Sabit Deformasyon Hızlı Deneyler: Sabit deformasyon hızlı deney aletleri 1950'lerin sonlarında hassas zeminlerde daha fazla veri ölçebilmek amacıyla geliştirilmiştir (Hamilton ve Crawford, 1959). Sabit deformasyon hızlı deneyler esas olarak sabit hidrolik eğimli deney aletine benzer. Mekanik vida adımlı hücre kullanılarak numunede düşey yer değiştirme oranı sabit tutulmaktadır. Zamana karşı uygulanan gerilme, numune kalınlığı ve boşluk basıncı sürekli olarak izlenmektedir.

Sabit Yükleme Hızlı Deneyler: Hidrolik bir hücre kullanılarak uygulanan gerilme sabit bir hızda artırılmakta; yani $\delta s'/\delta t = \text{sabit}$ olmaktadır. Deney, saatte 6~300 kN/m² yükleme hızları kullanılarak 3 ~ 72 gün arasında tamamlanabilmektedir. En iyi yükleme hızı üç eksenli deney ile belirlenmelidir.

Sabit Boşluk Basıncı Oranı Deneyi: Taban boşluk basıncının uygulanan gerilmeye oranı sabit bir değerde tutulmaktadır. Bu deney prosedürü Janbu tarafından sürekli yükleme deneyi olarak anlatılmıştır (Ladd, 1985).

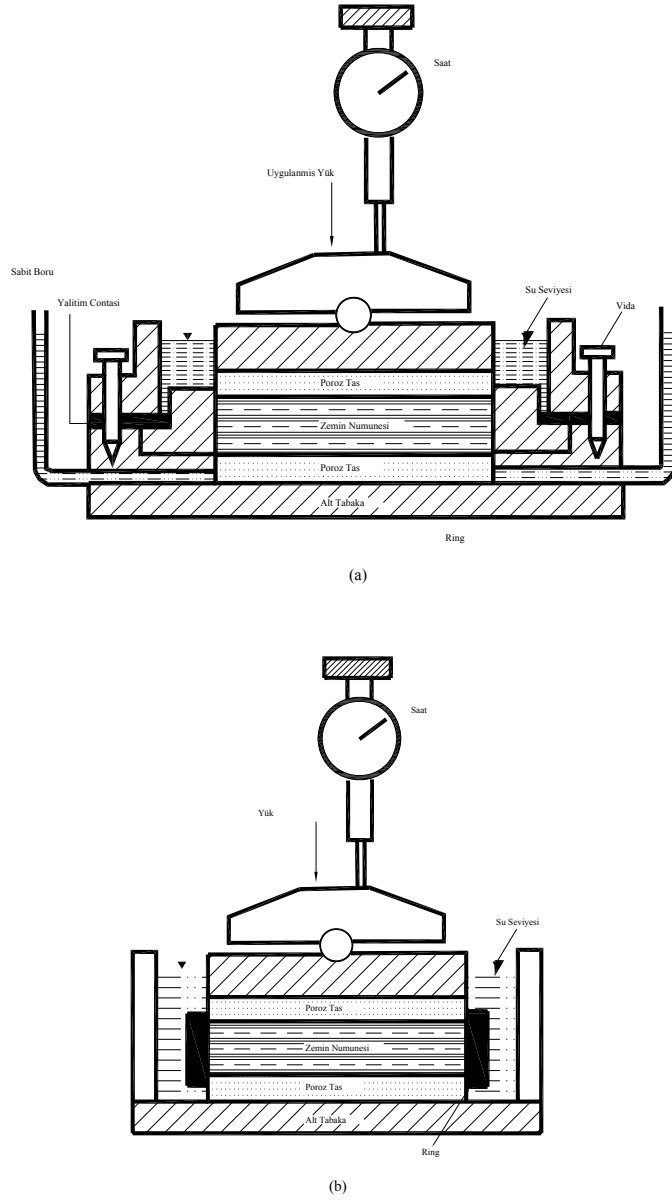
2.23.1. Sıkışabilirliğin Ödometre'de Ölçümü

Ödometre zeminin sıkışma miktarı ve hızını bulan bir ölçüm aletidir. İlk kez 1920'lerde Terzaghi tarafından tasarlanmış olup günümüzde çok az bir değişiklikle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alette sıkışabilirliği ölçülecek zeminden sondajla olabildiğince örselenmeden alınmış numuneye; yapılmış kabullere uygun koşullar sağlanmaktadır. Sondaj tipinden çıkartılan numune şişme veya göçmesine meydan verilmeden çelik konsolidasyon halkasına yerleştirilir ve deney sonuna kadar su altında tutulur. Yükleme standart sıra ve sürelerde yapılırken numunenin gösterdiği sıkışmalar zamana bağlı olarak en az 0.002mm duyarlılıkta mikrometre saati veya transdülserle otomatik olarak izlenir. Şekil 2.26'de kullanılan iki tip ödometre gösterilmektedir "yüzen halkalı ödometre" de geçirimli tabakayı temsil eden gözenekli taşlar numune yüklendikçe üst ve alttan halkanın içine girebilmektedirler. "Sabit halkalı ödometre" de ise sıkışma sadece üstteki gözenekli taşın hareketi ile sağlanmaktadır.

Ödometrede çelik halka yanal deformasyonu önlediğinden sıkışmanın arazideki durumu yansıtan K_0 koşullarında gerçekleştiği kabul edilmektedir. Ancak burada belirtilen en önemli sorun çap/yükseklik oranı 4 dolayında tutulan numunenin halkayla olan yanal sürtünmesidir. Bunu önlemek amacıyla halka teflonla kaplanabilirse de sürtünme etkisi tümüyle giderilememektedir. Yüzen halkalı ödometrenin bu etkiyi minimuma indirdiği kanısı yaygındır.

Numune ödometreye yerleştirildikten sonra şişmesi varsa, yükleme plakasına uygulanan mekanik veya hidrolik yüklerle önlenir ve su içinde dengeye ulaşmasına izin verilir. Sonra 25 kPa'dan başlayarak 24 saat aralıklı ve 2 katlık gerilme artışlarıyla 3200 kPa' a kadar yüklenir Bu sırada zamana karşı boy kısaltmaları kaydedilmektedir. Yüklemenin aşamalı olarak yapılması nedeniyle ödometre deneyi "basamaklı yükleme" tip olarak da (linear incremental loading = LIR) nitelendirilmektedir.

Yükleme sırasında genellikle bir veya fazla boşaltma-yeniden yükleme işlemi yapılarak C_r ' nin de bulunması sağlanır. Boşaltma, erişilen son basınç kademesinin $1/8$ ' i veya daha azına yapılmalıdır. Sonuçta her gerilme aralığı $\Delta\sigma$ için zaman (t)-sıkışma (δ) okumaları elde edilerek δ -log t veya δ - $\sqrt{t}$ grafikleri çizilir ve hesaplamaya geçilir.



Şekil 2.26 Ödometre tipleri a) yüzen halkalı b) sabit halkalı

2.23.2. Ödometre Deneyinde Karşılaşılan Sorunlar

Yukarıda da ele alındığı gibi deneyin en olumsuz yanı numunenin konsolidasyon halkası ile beliren kenar sürtünmesi sonucu burada oluşan kesme gerilmesinin bir boyutlu olması istenen uniform birim boy kısalmasını önlemesi böylece üst yüzeye uygulanan gerilmenin tümünün numunenin altına ulaşmamasıdır. Bunun yanında deneyde şu güçlükler de belirmektedir:

a) Araziden numune alınması sırasında oluşan örselenmeler sonucu sıkışabilirliğin gerçek değerinden yüksek belirlenmesi:

- b) Yükleme aralığının 24 saat süreyle kısıtlanması
- c) Deney başlamadan önce her zaman %100 doygunluğa getirilememesi bunun sonucu ölçülen ancak gerçekte olmayan sıkışmalar
- d) Çelik başlığın numuneye tam değmemesi sonucu başlangıçta ölçülen aşırı sıkışmalar

3. YÖNTEM VE MALZEME

3.1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında kaolen zemin üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri ve bu deneyler sonucunda elde edilen numunelerdeki sıkışmaya bağlı kil yapısındaki değişimin taramalı elektro mikroskop (ESEM) ile incelenmesi konu edilmiştir. Bu konsolidasyon deneylerinde değişik yükleme kademeleri ve her yükleme kademesinde değişik bekleme süreleri uygulanmıştır. Deneyler İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik laboratuvarında bulunan konsolidasyon aletlerinde yapılmıştır. Numuneler sabit su muhtevasında hazırlanmıştır.

Kaolen zeminin zemin özelliklerini belirlemek amacıyla kıvam, hidrometre analizleri; kimyasal ve mineralojik yapısını belirlemek içinse kantitatif analiz yapılmıştır. Yapıdaki değişimi incelemek içinse taramalı elektron mikroskopuyla (ESEM) görüntü alınmıştır. Deneysel çalışma sırasında sabit su muhtevasında (%26) elle yoğrularak hazırlanmış numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sırasında numuneler pasta kreması koymaya yarayan aparat yardımıyla konsolidasyon ringinin içine yerleştirilmiştir. Deney sırasında bu aparatın kullanılmasının sebebi numunenin ring içine yerleştirilirken özel bir yapı kazanmamasını sağlamaktır. Bu deneyler sırasında numuneler 20, 50, 100, 200 ve 400 kPa gerilme seviyelerine kadar yüklenmiştir. Her numune için gerilme seviyeleri 0'dan başlanılarak maksimum gerilme seviyesine kadar yüklenmiştir. Her numune yüklendiği gerilme seviyesinde farklı bekleme sürelerinde konsolide edilmiştir. Konsolidasyon deneylerinde sırasında numuneler ara gerilme seviyelerinde 24 saat süreyle konsolide edilirken son gerilme seviyesinde 1 dakika, 15 dakika, 24 saat ve 72 saat olmak üzere her numune için farklı sürelerde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bunlara ek olarak boşaltma uygulanmış konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde de numuneler her gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolide edilirken, boşaltma gerilmelerinde bekleme süresi 2 saat olarak uygulanmıştır. Ayrıca elde edilen konsolidasyona tabi

tutulmuş numunelerden özel olarak hazırlanmış çelik kalıplarla küçük numuneler alınarak Boğaziçi Üniversitesi ARGE laboratuvarında taramalı elektron mikroskopu (ESEM) altında incelenmiş ve değişik yükleme kademeleri ve değişik bekleme süreleri altında kil zeminin fabrik yapısında meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Aşağıdaki paragraflarda bu çalışmada kullanılan kaolen zeminin özellikleri, izlenen deney programı, deney düzeni ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır.

3.2. MALZEME

Bu tez çalışmasında yapılan konsolidasyon deneyleri ve ESEM analizlerinde, Kale Maden şirketinin Balıkesir Arpatarla Kaolen Ocağı'ndan getirtilmiş kaolen kili kullanılmıştır. Ocak Balıkesir ili Sındırgı ilçesinin Güney Doğu'sunda olup, Sındırgı'ya 40 km., Balıkesir Stok Sahasına 120 km. mesafede bulunmaktadır. Analizler sabit su muhtevasında (%26) hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışma sırasında numunelerde %26 su muhtevası kullanılmasının nedeni; daha düşük su muhtevalarına göre pasta kreması aparatının içinden daha kolay bir şekilde numunenin akmasının sağlanmış olması ve daha yüksek su muhtevası oranlarına göre taşıma gücünün daha fazla olması sebebiyle tercih edilmiştir. Bu tercih birçok deneme sonucundan tespit edilmiştir.

3.2.1. Kaolen Kilinin Mühendislik Özellikleri

3.2.1.1. İndeks Özellikleri

Kaolen kilinin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla kıvam limitleri, hidrometre, su muhtevası analizleri yapılmıştır. Yapılan indeks deneylerine göre; kaolen kilinin doğal su muhtevası, kıvam limiti, dane birim hacim ağırlıkları, kıvam ve likitlik indeksleri Tablo 3.1'de, elek ve hidrometre analizinden belirlenen dane dağılımı ve aktiviteleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Zeminin indeks özellikleri

Numune	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	I_L	γ_s (KN/m ³)	w_n (%)
Kaolen 119	22.93	10.93	12.01	0.30	27.3	14.54

Tablo 3.2 Deneylerde kullanılan numunenin içeriği

Numune	Silt (%)	Kil (%)	Aktivite A (%)
Kaolen 119	59	41	0.29

Tablo 3.1’de görülebileceği gibi bu tez çalışmasında kullanılan zemin numunesi birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre düşük plastiteli inorganik kil olup, Cassagrande kartında A hattının üzerinde bulunmaktadır. Numunenin aktivitesi $A < 1$ olup zeminin pasif olduğu gözlenmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan deneylerde kullanılan Kaolen kilinin bileşim özelliklerinin tayini için İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarında ve Boğaziçi Üniversitesi AR-GE merkez laboratuvarında kimyasal içerik analizi yapılmıştır.

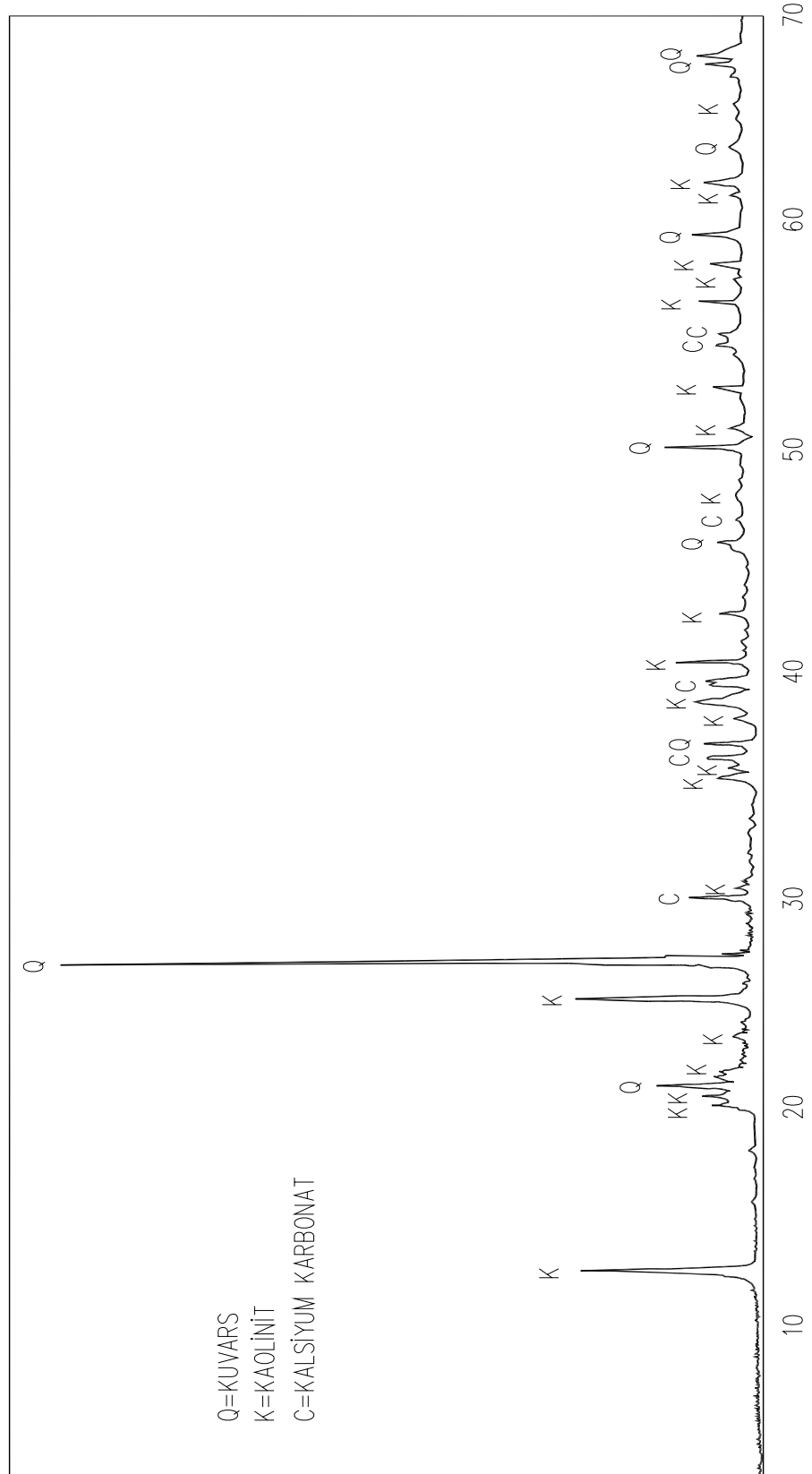
3.2.1.2. Kimyasal Analiz

Bu tez kapsamında kaolen kilinin kimyasal özelliklerini belirleyebilmek için Kale Maden şirketinin yapmış olduğu kimyasal analizden yararlanılmıştır. Kale Maden şirketinin laboratuvarlarında yaptığı kimyasal içerik analizi sonuçları Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3 Kale Maden tarafından yapılan kimyasal analiz sonuçları

Hammaddeler	Birim	Kaolen119	
K.Z.	%	9.33	
SiO ₂	%	62.80	
Al ₂ O ₃	%	26.90	Min 25
TiO ₂	%	0.31	Max 0.5
Fe ₂ O ₃	%	0.30	Max 0.5
CaO	%	0.30	
MgO	%	0.15	
Na ₂ O	%	0.01	
K ₂ O	%	0.19	
Na ₂ O+K ₂ O	%	0.20	Max 0.6
SO ₄	%	0.75	Max 1.0

Kimyasal içerik analizleri sonucunda malzemenin kimyasal içeriği belirlenebilmiştir. Ayrıca kaolen kilinin mineral içeriğini belirleyebilmek için Boğaziçi Üniversitesi AR-GE merkez laboratuvarında XRD analizleri yapılmıştır. Analize göre doğal



Şekil 3.1 AR-GE laboratuvarında yapılan XRD analizi

numunede önemli miktarda kaolinit, kuvars ve bir miktarda kalsit (CaCO_3) bulunduğu belirtilmiştir. XRD analizi $3-70^\circ(2\theta)$ açılarında yapılmış ve elde edilen grafik Şekil 3.1’de verilmiştir. Gösterilen grafikte deneye tutulan numunenin ağırlıklı olarak kaolinit minerali içerdiği görülmektedir.

3.3. DENEY DÜZENİ, DENEY PROGRAMI ve DENEYLERİN YAPILIŞI

3.3.1. Konsolidasyon Deneyleri

Bu çalışmada ring çapı 5 cm, ring alanı 19.63 cm^2 ve ring yüksekliği 2 cm olan klasik sabit ringli ELE marka konsolidasyon deney aletleri ile çalışılmıştır. 3 adet konsolidasyon deney aleti Şekil 3.2’de gösterildiği üzere masalara sabitlenerek konsolidasyon deneyleri boyunca titreşim veya başka dış etkenlerden mümkün olduğunca etkilenmemeleri sağlanmıştır.



Şekil 3.2 Deney düzeni

Bu tez kapsamında kil numuneleri üzerinde 20 kPa ile 400 kPa basınç seviyeleri arasında değişen değerlerde her biri birbirinden ayrı olmak üzere 25 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Bu deneylerde değişik bekleme süreleri kullanılmıştır. 1 dakika, 15 dakika, 24 saat ve 72 saat deneylerde kullanılan bekleme süreleridir. Her bekleme süresi birbirinden bağımsız olarak kullanılmış ve bekleme süresi dolunca deney sonlandırılmıştır. Örneğin 50 kPa basınç seviyesine kadar yüklenecek kil numunesi için

5 ayrı deney yapılmıştır. Bu deneylerde uygulanan basınç değerleri değişmezken maksimum basınç altında ki bekleme süreleri değiştirilmiştir. Birinci deney grubunda numune sırasıyla 2,5 kPa, 5kPa, 10 kPa, 20 kPa ve 50 kPa basınç seviyelerinde yüklenmiştir. 2,5 kPa basınç seviyesinde numune 1 saat süreyle konsolide edildikten sonra, 5-10-20 kPa basınç seviyelerinde bekleme süresi 24 saattir. Ara basınç kademelerinde bekleme süresi her deney için aynı şekilde uygulanmıştır. Numune 50 kPa basınç seviyesinde yüklendiğinde ise maksimum basınç seviyesi bekleme seviyeleri değişik tutulmuş ve birinci deney için 1 dakika, ikinci deney için 15 dakika, üçüncü deney için 24 saat ve dördüncü deney için 72 saat süreyle 50 kPa basınç seviyesinde konsolide edilerek deneylere son verilmiştir. Ayrıca beşinci deney grubunda numuneler maksimum basınç kademesine kadar yüklenmiş ve sonra basınç kademeleri düşülerek numune boşaltılmaya başlanmıştır. Numune yüklenirken uygulanan bekleme süreleri diğer grup deneylerin bekleme süreleri ile aynıdır. Yani 2,5 kPa basınç seviyesinde 1 saat konsolide edilirken numune diğer ara basınç kademelerinde 24 saat konsolide edilmiştir. Numune maksimum basınç kademesinde ise 24 saat süreyle konsolide edilmiştir. Boşaltma uygulanırken her basınç kademesi için bekleme süresi 2 saat olarak uygulanmıştır. Numune üzerindeki yükler her kademede 2 saat süreyle beklenerek sırayla boşaltılmıştır.

Farklı maksimum basınç seviyeleri için konsolidasyon deneyleri aynı şekilde '0'dan başlanılarak yapılmıştır. 20-50-100-200 ve 400 kPa maksimum basınç kademelerinde, her bir maksimum basınç kademesinde 5 (farklı bekleme süreleri nedeniyle) adet olmak üzere toplam 25 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ara ve maksimum basınç kademeleri ve her basınç kademesine ait bekleme süreleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında, 175 adet gerilme seviyesinde yükleme-boşaltma adımları tekrarlanmış ve konsolidasyon süresince kil yapısında meydana gelecek değişimler araştırılmıştır.

Tablo 3.4 Konsolidasyon deneylerinde kullanılan yük kademeleri ve bekleme süreleri

Deney No	Numuneye Uygulanan maksimum Basınç Kademesi (kPa)	Numuneye Uygulanan Başlangıç ve Ara Basınç Kademesi (kPa)	Başlangıç Basınç Kademesinde Bekleme Süresi	Ara Basınç Kademesinde Bekleme Süresi	Maksimum Basınç Kademesinde Bekleme Süresi	Boşaltma Kademesinde Bekleme Süresi
A1	20	2.5,5,10	1 saat	24 saat	1 dakika	
A2	20	2.5,5,10	1 saat	24 saat	15 dakika	
A3	20	2.5,5,10	1 saat	24 saat	24 saat	
A4	20	2.5,5,10	1 saat	24 saat	72 saat	
A5	20	2.5,5,10	1 saat	24 saat	24 saat	2 saat
B1	50	2.5,5,10,20	1 saat	24 saat	1 dakika	
B2	50	2.5,5,10,20	1 saat	24 saat	15 dakika	
B3	50	2.5,5,10,20	1 saat	24 saat	24 saat	
B4	50	2.5,5,10,20	1 saat	24 saat	72 saat	
B5	50	2.5,5,10,20	1 saat	24 saat	24 saat	2 saat
C1	100	2.5,5,10,20,50	1 saat	24 saat	1 dakika	
C2	100	2.5,5,10,20,50	1 saat	24 saat	15 dakika	
C3	100	2.5,5,10,20,50	1 saat	24 saat	24 saat	
C4	100	2.5,5,10,20,50	1 saat	24 saat	72 saat	
C5	100	2.5,5,10,20,50	1 saat	24 saat	24 saat	2 saat
D1	200	2.5,5,10,20,50,100	1 saat	24 saat	1 dakika	
D2	200	2.5,5,10,20,50,100	1 saat	24 saat	15 dakika	
D3	200	2.5,5,10,20,50,100	1 saat	24 saat	24 saat	
D4	200	2.5,5,10,20,50,100	1 saat	24 saat	72 saat	
D5	200	2.5,5,10,20,50,100	1 saat	24 saat	24 saat	2 saat
E1	400	2.5,5,10,20,50,100,200	1 saat	24 saat	1 dakika	
E2	400	2.5,5,10,20,50,100,200	1 saat	24 saat	15 dakika	
E3	400	2.5,5,10,20,50,100,200	1 saat	24 saat	24 saat	
E4	400	2.5,5,10,20,50,100,200	1 saat	24 saat	72 saat	
E5	400	2.5,5,10,20,50,100,200	1 saat	24 saat	24 saat	2 saat

3.4. ELEKTRON MİKROSKOBU ANALİZLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ

Deneylerde çoğu zaman boşluk sıvısının yok edilmesi veya başka bir maddeyle yer değiştirilmesi gerekmektedir. Zeminin fabrik yapısını bozmadan bunu gerçekleştirmek zordur. Aşağıda, fabrik yapısının belirlenmesi için yapılan deneylerdeki numune hazırlama teknikleri anlatılmaktadır.

Boşluk Sıvısının Yok Edilmesi: Katı killer ve kısmen suya doymuş zeminlerde havada kurutma yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, yüksek su muhtevası olan yumuşak zeminlerde etüvde kurutma, dane fabriğini (en az 24 saat sürdüğü ve daneler yeniden dizildiği için) havada kurutmaya nazaran daha az örsellemektedir. Bununla birlikte etüvde kurutma sırasında oluşan gerilmeler bazı danelerde kırılmaya sonuçlanabilmektedir. 1 cm çap, 0.5 cm kalınlıktaki küçük numunelerde sıvı nitrojen veya likit nitrojenli propen soğutma ile hızlı dondurma yöntemi de tercih edilen bir yöntemdir. Kritik nokta kurutmasında ise numunenin basıncı ve sıcaklığı kritik nokta üzerine (su için kritik nokta :+374 °C ve 217.7 atm) yükseltilmektedir. Kritik nokta aralığında sıvı ve gaz fazları birbirinden ayırt edilemediğinden bu sayede numune hazırlanabilmektedir. Ancak, bu yöntem kısmen suya doymuş ve genişleyen zeminlerde şişmeye sebep olabilmektedir. Gerek dondurma ve gerekse kritik dondurma tekniği, havada ve etüvde kurutmaya nazaran numuneyi daha az örselediği halde daha zor ve zaman alıcı yöntemlerdir.

Boşluk Sıvısının Yer değiştirilmesi: İnce kesitin gerekli olduğu optik mikroskop için veya kuruma büzülmesinin minimum olmasının istendiği fakat malzeme içindeki boşluk suyunun önemli olmadığı durumlarda boşluk sıvısının yer değiştirilmesine gerek duyulabilmektedir. Bu amaçla, birçok reçine ve plastik özellikle Carbowax6000 kullanılmaktadır. Suyun Carbowax ile değiştirilmesi birkaç günde gerçekleştirilmekte ve ardından Carbowax ile doyurulmuş numune erimiş mumdan arındırılmakta ve soğumaya bırakılmaktadır. İnce kesitler, zımpara kağıdı veya aşındırıcı pudralar kullanılıp öğütülerek de hazırlanabilmektedir. Nemli kaolinin fabrik yapısında

Carbowax kullanımının hiçbir etkisinin olmadığını yapılan çalışmalar göstermektedir (Mitchell, 1976).

Yüzeyin Hazırlanması: Analiz için seçilen yüzeyin, zeminin orjinal fabrik yapısını yansıtması için özen gösterilmelidir. Öğütülmüş veya havada kurutulmuş ve Carbowax kullanılmış numunelerde yüzeyi kesme esnasında yüzeydeki daneler yeniden dizilime geçmekte ve sonucu bir miktar etkilemektedirler. Yapışkan bantlarla kurutulmuş numunenin yüzeyinin soyulması, orjinal yapısının bozulmaması için sıkça kullanılan ve uygun bir yöntemdir. Alternatif olarak, reçine solüsyonuyla kaplanan yüzeyde sertleşme sonrası reçine sıyrılmakta ve örselenmiş kesim açığa çıkarılmaktadır (Mitchell, 1976).

SEM analizlerinde nemli numuneler doğrudan kullanılamaz ve numunedeki boşluk sıvısının vakumla emilmesi gerekir. SEM numunesi hazırlamada, zemin yüzeyinin altın filmiyle kaplanarak suyun vakumla emilmesi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. SEM için numune hazırlanmasında en büyük zorluk, orjinal zemin yüzeyinin örselenmemiş fabrik yapısını yansıtan ultra ince kesitleri hazırlamaktır. Orjinal zeminin boşluk oranı ve su muhtevası yükseldikçe örselenme miktarının arttığı yapılan çalışmalardan bilinmektedir.

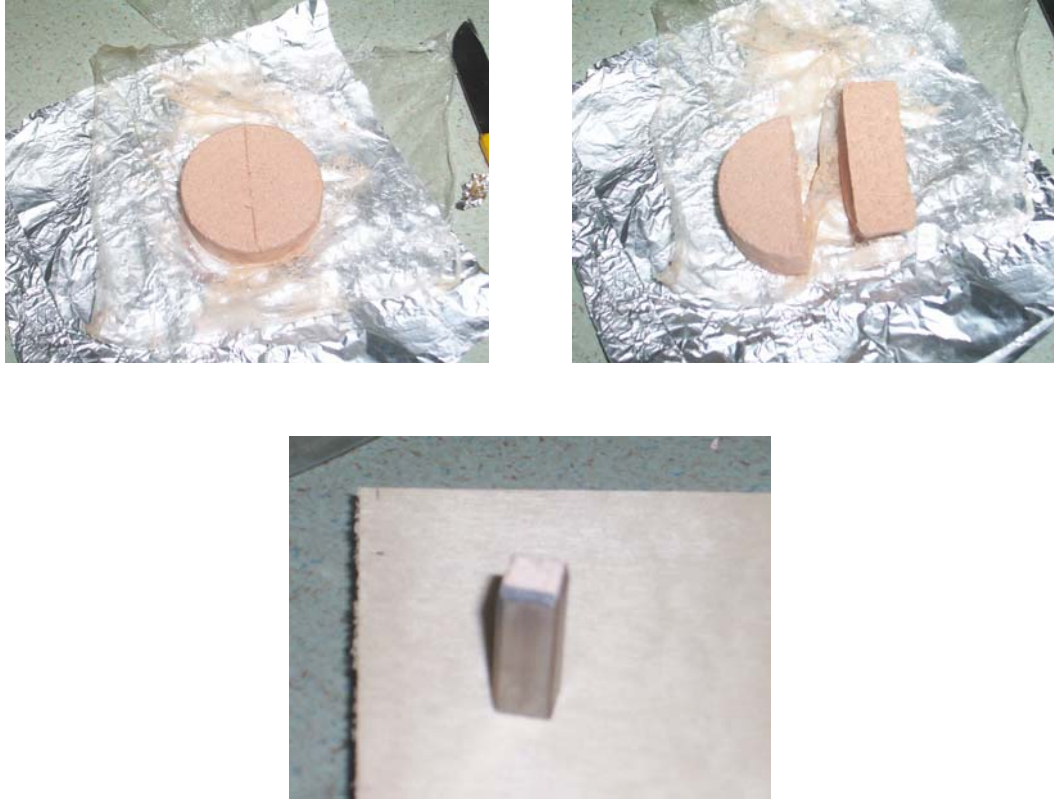
Genişleyen kil mineralleri içeren zeminlerde tabaka arası suyun dışarı atılması sorun yaratabilmekte, mikrofabrike değişikliğe veya aşırı büzülmeye sebep olabilmektedir. Numune hazırlama yöntemi; su muhtevası, mukavemeti ve örselenmesi vb. nitelikler düşünülerek seçilmelidir.

3.4.1. Elektron Mikroskobu Analizi

Modern elektron mikroskobuyla 100 Å'den daha küçük boyutları görerek küçük kil danelerini dahi inceleyebilmek mümkündür. Elektron ışını genelde çalışılacak malzemenin yapısının yüzeyinin bir nüshasına odaklanmaktadır. Bazı elektronlar numuneden saçılmakta ve numunenin farklı bölgeleri bu saçılmanın miktarına bağlı olarak açık veya koyu renk olarak gözükmektedir. Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope – SEM) nispeten yeni bir gelişme olup bu alette ikincil

elektronlar üç boyutlu imaj şeklinde gözükken numunenin yüzeyinden dışarı çıkmaktadır. SEM aletinin ışık mikroskobuna nazaran büyütmesi 20 ~ 150000 kez, derinlik incelemesi 300 kez daha büyüktür. Bu sayede zemindeki kil daneleri ve çatlak yüzeyleri doğrudan görülebilmektedir. Bu nedenle, SEM kullanım alanı günden güne artmaktadır.

3.4.2. ESEM Analizleri



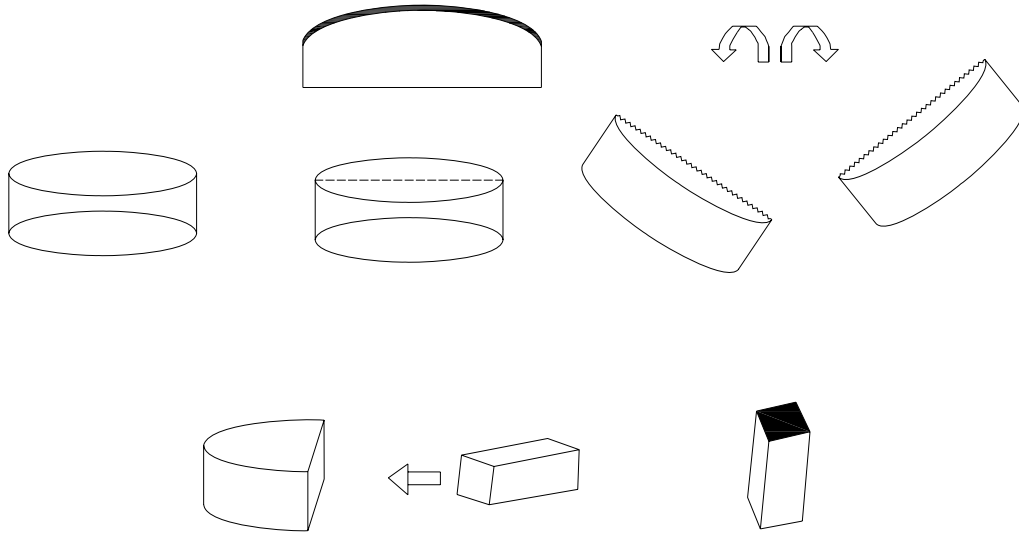
Şekil 3.3 Konsolidasyon deneyi yapılmış numunelerin ESEM analizleri için hazırlanması

DeneySEL çalışmanın bu bölümünde kil zeminin farklı yükler altında konsolidasyon süresince fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler çevresel taramalı elektron mikroskopu (ESEM) altında incelenerek araştırılmıştır. Bu çalışma sırasında SEM analizleri yerine ESEM analizleri kullanılmasının sebebi belli bir su muhtevasına sahip olan numunenin su muhtevası kaybının azaltılması sebebi ile ve ESEM analizleri sırasında numuneyi herhangi bir madde ile kaplama gereksiniminin olmamasından dolayı tercih edilmiştir. ESEM analizlerinde numunenin üst yüzeyi alet içinde bir vakuma maruz kalırken su muhtevası kaybını en aza indirmek için aynı zamanda su buharı verilmektedir. ESEM analizlerinde, konsolidasyon aletinde basınç uygulanan yüzeye dik yüzey incelenmiştir. Bu sayede konsolidasyon süreci boyunca zeminin fabrik

yapısındaki değişiklikleri, danelerin yük uygulandıkça bir dizilime geçip geçmediğini görmek mümkün olmuştur.

ESEM analizlerinde öncelikle hiçbir gerilmeye maruz kalmamış numune üzerinde ESEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra kil zemin 20 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa gerilmelerinde konsolidasyona terkedilmiş ve bu konsolidasyon basınçları altında zamanla kil zeminin fabrik yapısındaki değişiklikler taramalı elektron mikroskopla incelenmiştir.

ESEM analizleri için numune hazırlanması bu aşamada başlı başına aşılması gerekli en önemli sorun olmuştur. Zeminin fabrik yapısını bozmadan bunu gerçekleştirmek oldukça zordur. Bunun için ilk etapta birkaç deneme çalışması yapılmış zemin fabrik yapısının bozulmaması için en uygun yöntem belirlenmiştir. Paslanmaz çelik ringden çıkarılan numuneler ESEM analizlerinin yapılacağı zamana kadar su muhtevalarını kaybetmemeleri için streç film ve alüminyum folyo ile sarılarak desikatörde bekletilmiştir. ESEM analizleri için numuneler sarıldıkları streç film ve alüminyum folyodan zarar vermeden çıkarılmıştır.



Şekil 3.4 Numunenin ESEM analizleri için hazırlanması

ESEM aletinin numune yerleştirme bölümüne sığabilmesi ve zorunlu olan boyunun kısaltılması işleminin rahatlıkla yapılabilmesi için bıçak ile numunenin alt ve üst yüzeyinde zayıf bölge oluşturulmuş ve kenarlarından tutularak numune kırılmıştır.

Böylece, numunenin dış zorlanma olmadan en zayıf yerden kırılması sağlanmıştır. Şekil 3.4’de numunenin ESEM analizleri için hazır hale gelmesine kadar geçen süre gösterilmiştir. Daha sonra önceden özel olarak hazırlanmış olan boyutları $1 \times 1 \text{ cm}^2$ kesit alanına sahip çelik kalıplarla her numuneden analiz için örnek çıkarılmıştır. Şekil 3.3’de bu kalıplar ve numune gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Philips XL 30 ESEM-FEG marka ESEM aleti

ESEM aletinde elektron ışını genelde çalışılacak malzemenin yüzeyine odaklanırken bazı elektronlar numuneden saçılmakta ve numunenin farklı bölgeleri saçılmanın miktarına bağlı olarak açık veya koyu renk olarak görülmektedir. Numunenin yüzeyindeki pürüzlülük de bu renk değişimine neden olmaktadır. İkincil elektronlar ise üç boyutlu görüntü şeklinde gözükürken numunenin yüzeyinde dışarı çıkmaktadır. Numuneler Boğaziçi Üniversitesi Teknolojiler AR-GE Merkez Laboratuvarında Philips XL 30 ESEM-FEG marka taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiştir. Analize başlanmadan evvel numuneler de havanın neminden etkilenme riskini ortadan kaldırmak için vakum uygulanmıştır. Daha sonra yoğun bir elektron ışınına tutulan numunelerin görüntüsü bilgisayar ve monitör yardımıyla alınmıştır. Analiz sırasında 500 ile 32000 arasında değişen oranlarda büyütme yapılmıştır. 8000’den büyük büyütmelerde kil minerallerini açıkça görmek mümkün olmuştur. Analizler sırasında numunenin odaklanılan bir bölümü için elektron ışınlarının yansımaları, sıçramaları veya yayılmasından hareketle numunenin içindeki elementleri belirlemek mümkündür. Bu ESEM analizlerinde zaman zaman

yapılan bu tür kontroller İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı ve Kale Maden şirketinin yaptırdığı ve detayları Bölüm üç (3.2.1.2)'de verilen kimyasal içerik analizleri ile benzerlik göstermiştir.

4. BULGULAR

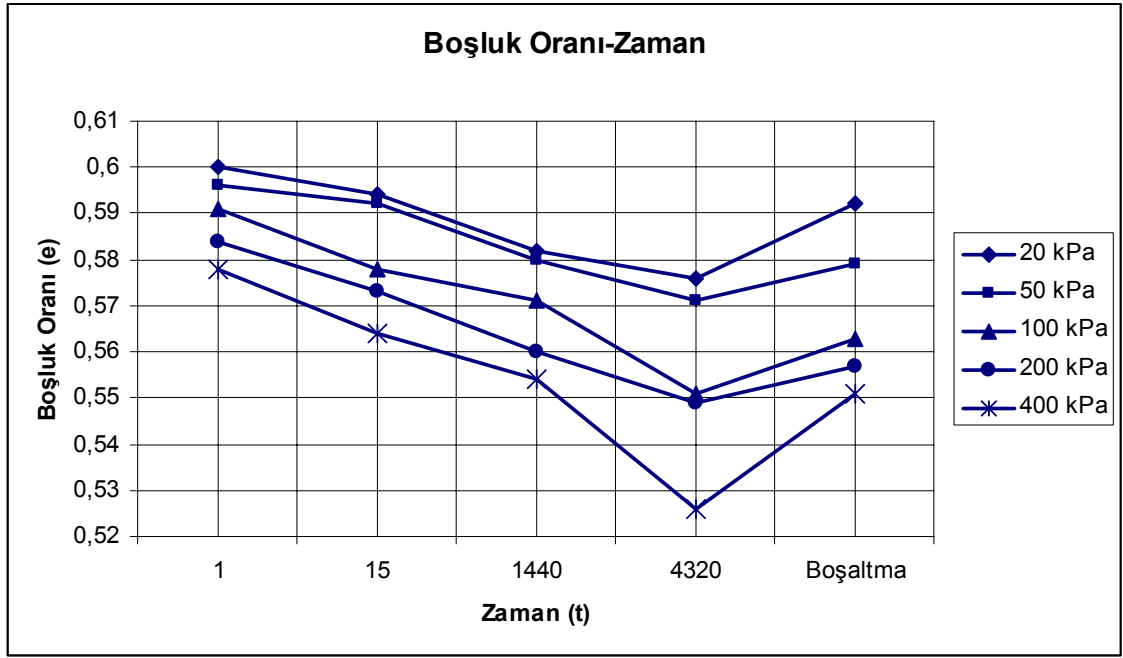
4.1. KONSOLIDASYON DENEYLERİ

Kil zemin numuneleri üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan 25 adet konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait özet bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

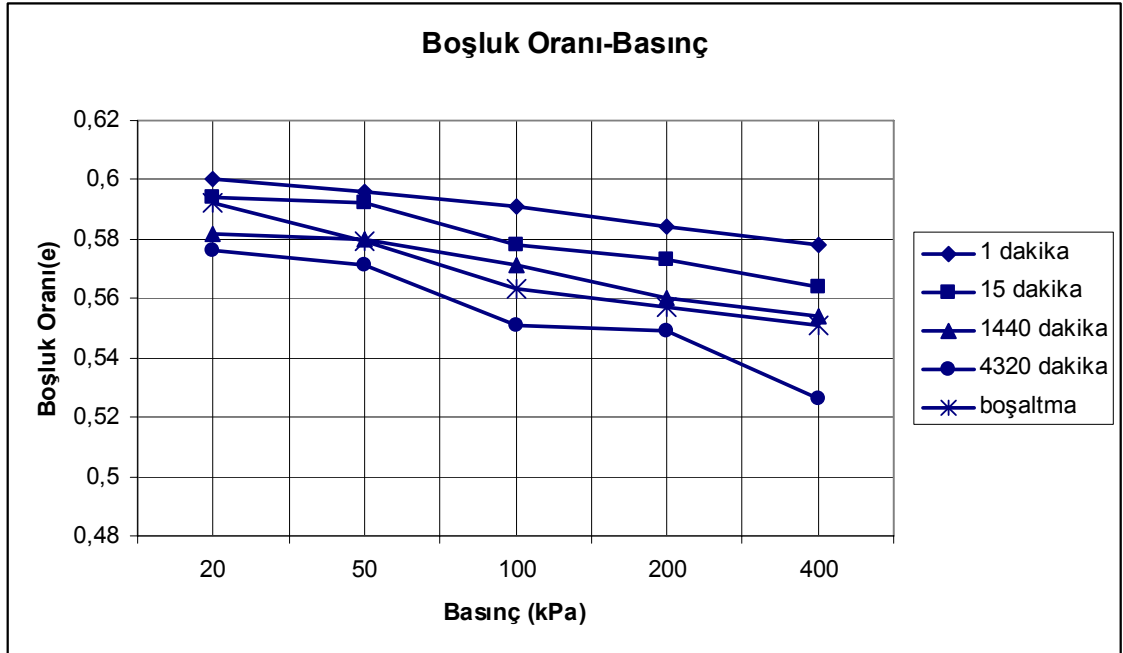
Tablo 4.1 Konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait özet bilgiler

Deney No	Başlangıç Su Muhtevası % w_0	Deney Sonu Su Muhtevası % w_n	Tabii Birim Hacim Ağırlığı γ_n (KN/m ³)	Başlangıç Boşluk Oranı e_0	Deney Sonu Boşluk Oranı e_s
A1	25,40	22,22	18,36	0,663	0,600
A2	25,12	21,99	18,36	0,702	0,594
A3	24,96	21,55	18,15	0,639	0,582
A4	25,24	21,32	18,25	0,683	0,576
A5	25,10	21,93	18,34	0,682	0,592
B1	25,00	22,09	18,24	0,672	0,596
B2	25,21	21,94	18,16	0,742	0,592
B3	24,96	21,49	18,28	0,648	0,580
B4	25,51	21,16	18,05	0,700	0,571
B5	25,10	21,43	18,34	0,658	0,579
C1	25,42	21,89	17,97	0,714	0,591
C2	25,42	21,39	18,15	0,668	0,578
C3	25,91	21,15	18,32	0,701	0,571
C4	25,40	20,42	18,25	0,729	0,551
C5	25,08	20,87	18,23	0,753	0,563
D1	25,81	21,62	18,29	0,722	0,584
D2	25,81	21,20	18,32	0,711	0,573
D3	24,92	20,75	18,15	0,711	0,560
D4	25,93	20,35	18,25	0,678	0,549
D5	25,08	20,63	18,45	0,743	0,557
E1	24,90	21,40	18,17	0,773	0,578
E2	25,51	20,89	18,25	0,711	0,564
E3	25,98	20,53	18,21	0,735	0,554
E4	25,21	19,49	18,26	0,736	0,526
E5	25,54	20,79	18,28	0,676	0,551

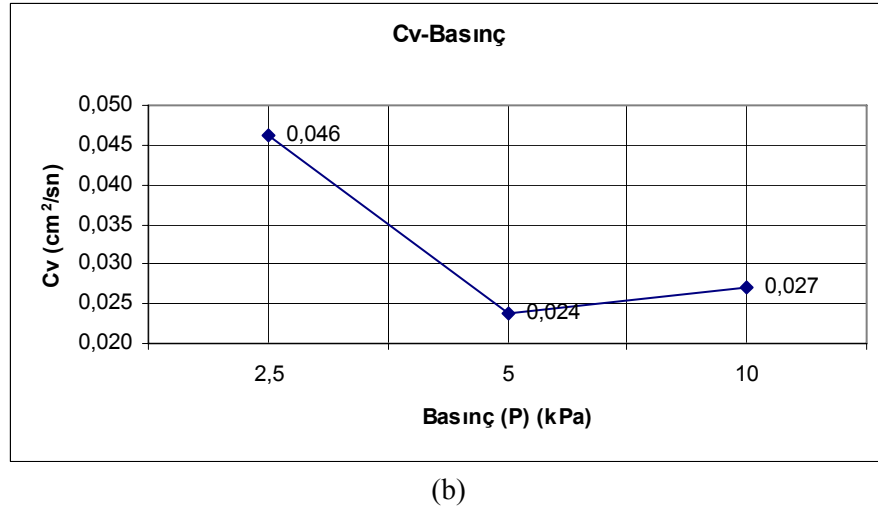
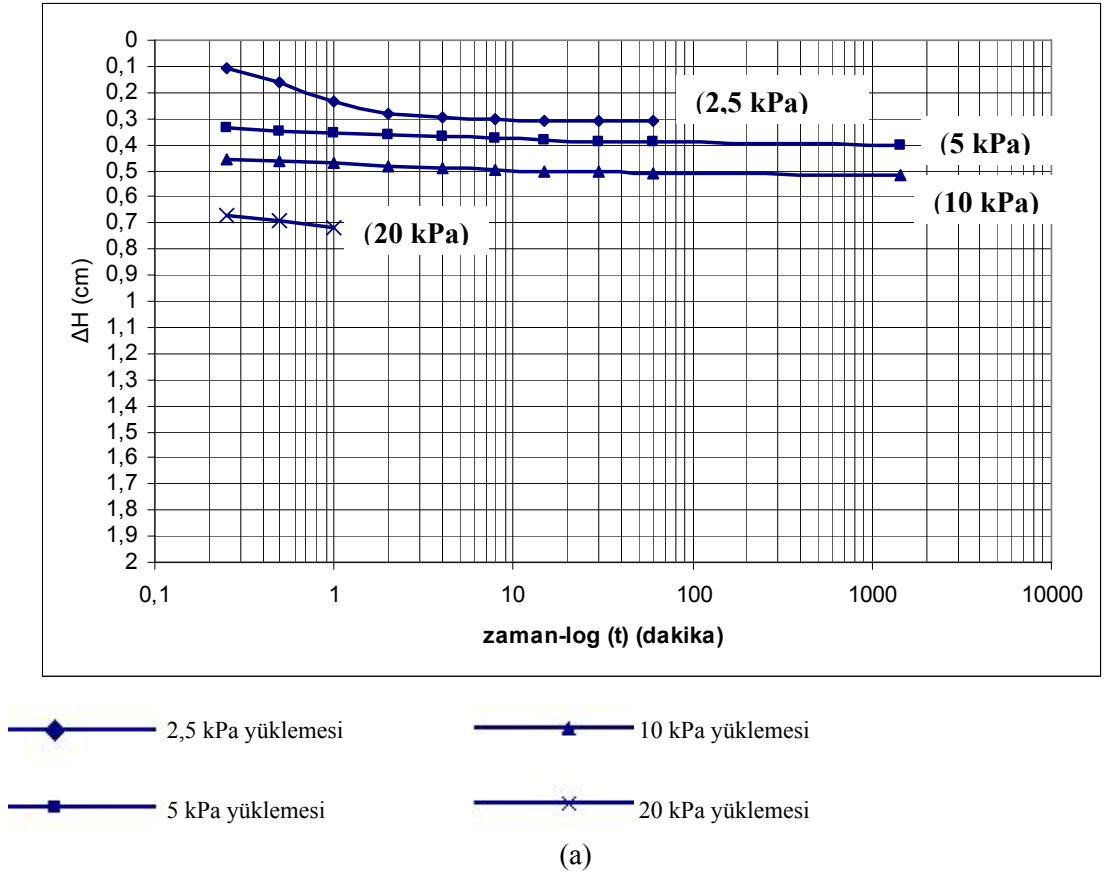
Deneyler sonucunda elde edilen zaman –sıkışma eğrileri ve C_v değerlerinin basınç kademesi ile değişimi Şekil 4.3’den Şekil 4.8’e kadar verilmektedir.



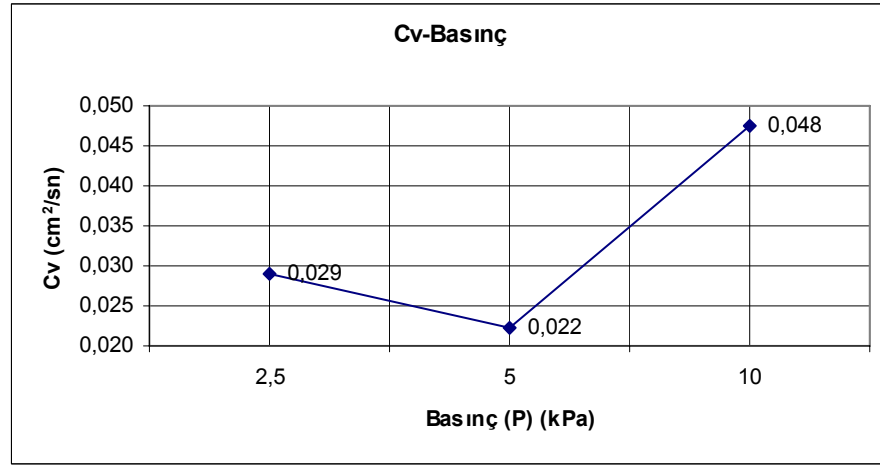
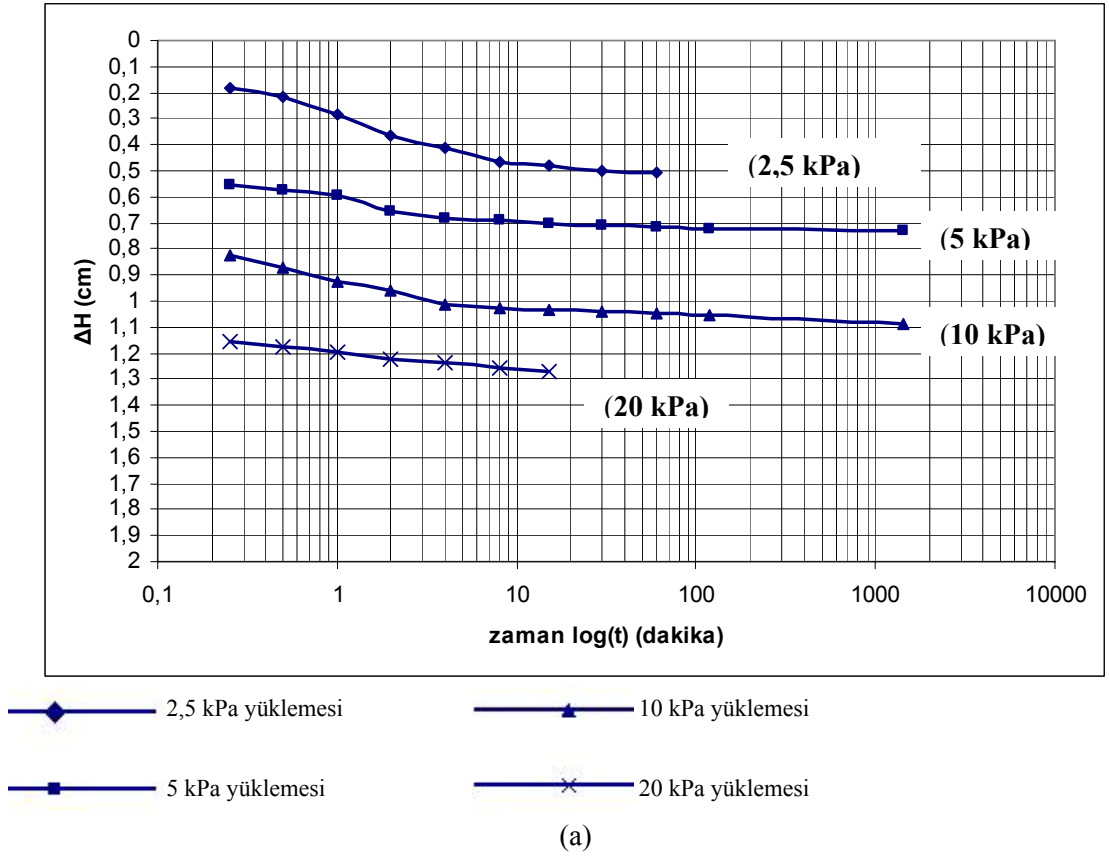
Şekil 4.1 Konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait boşluk oranı-zaman grafiği



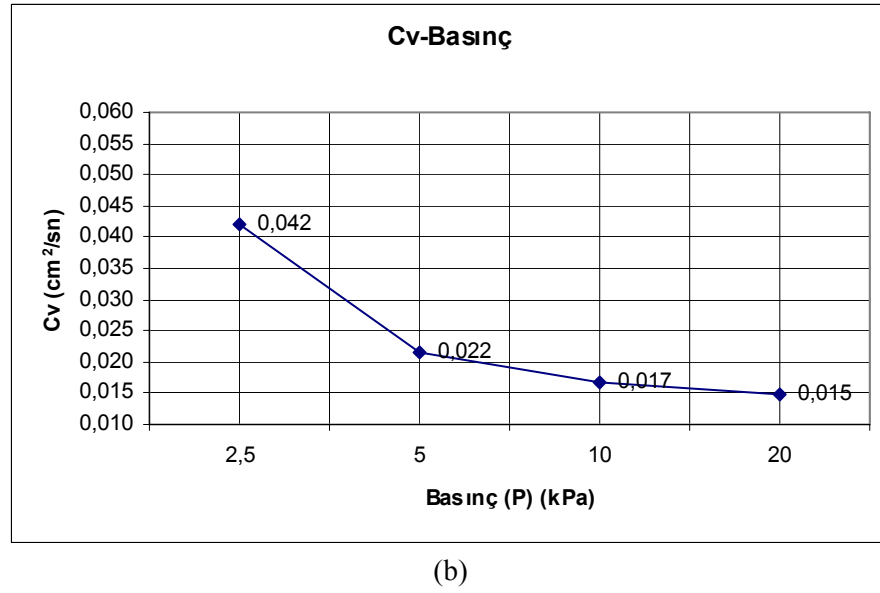
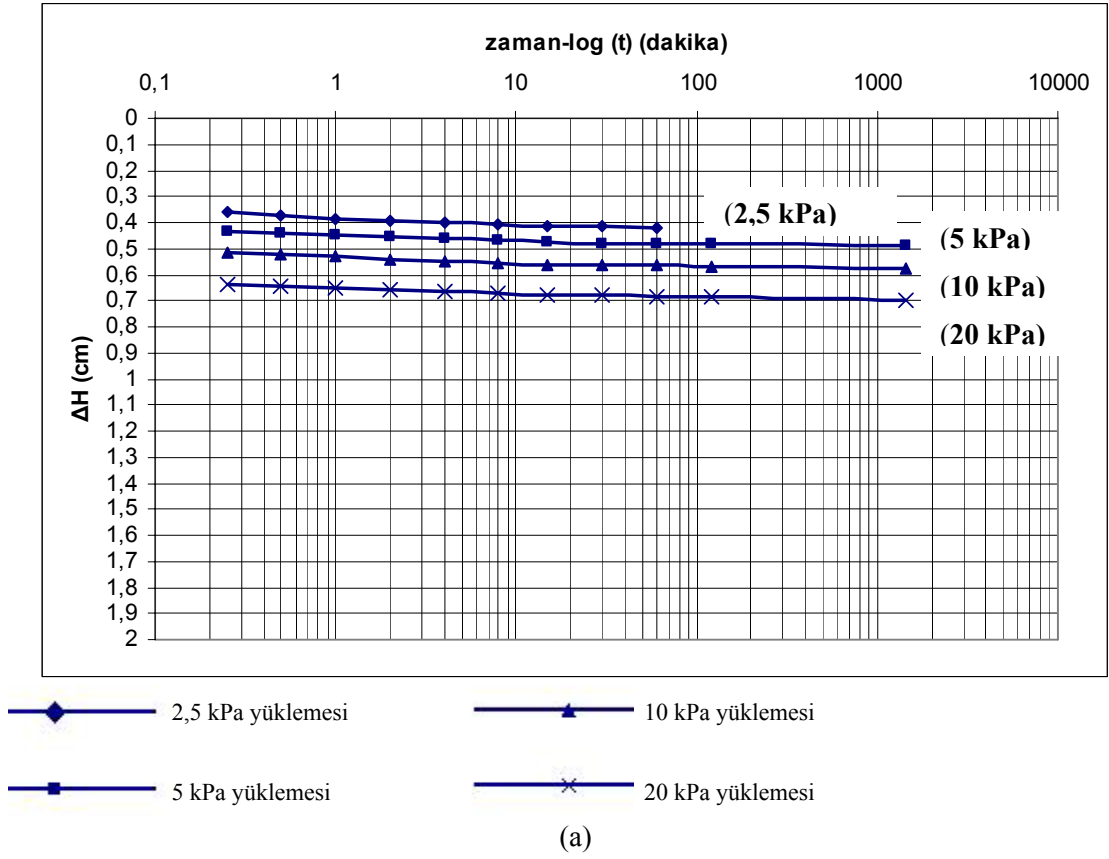
Şekil 4.2 Konsolidasyon deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine ait boşluk oranı-basınç grafiği



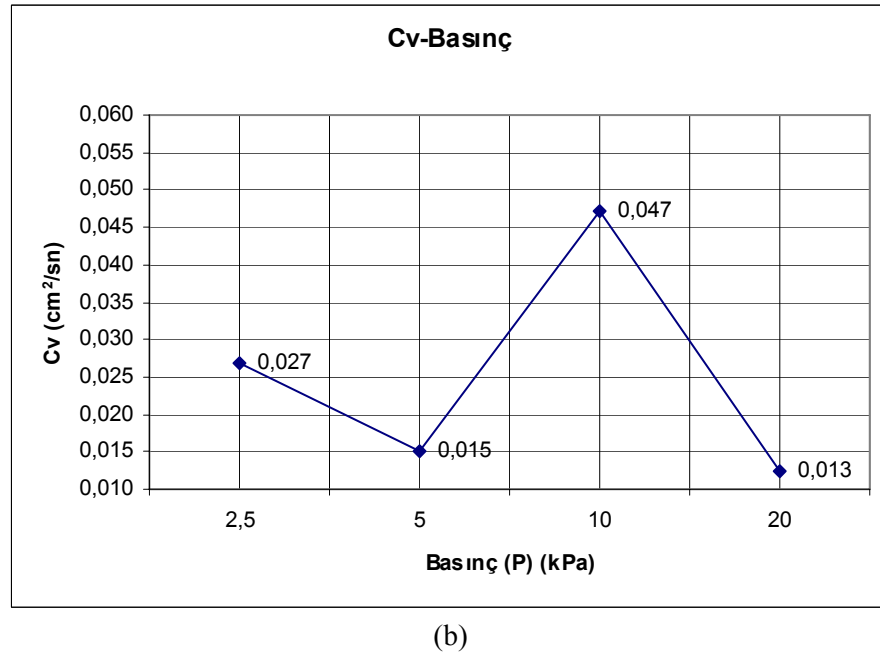
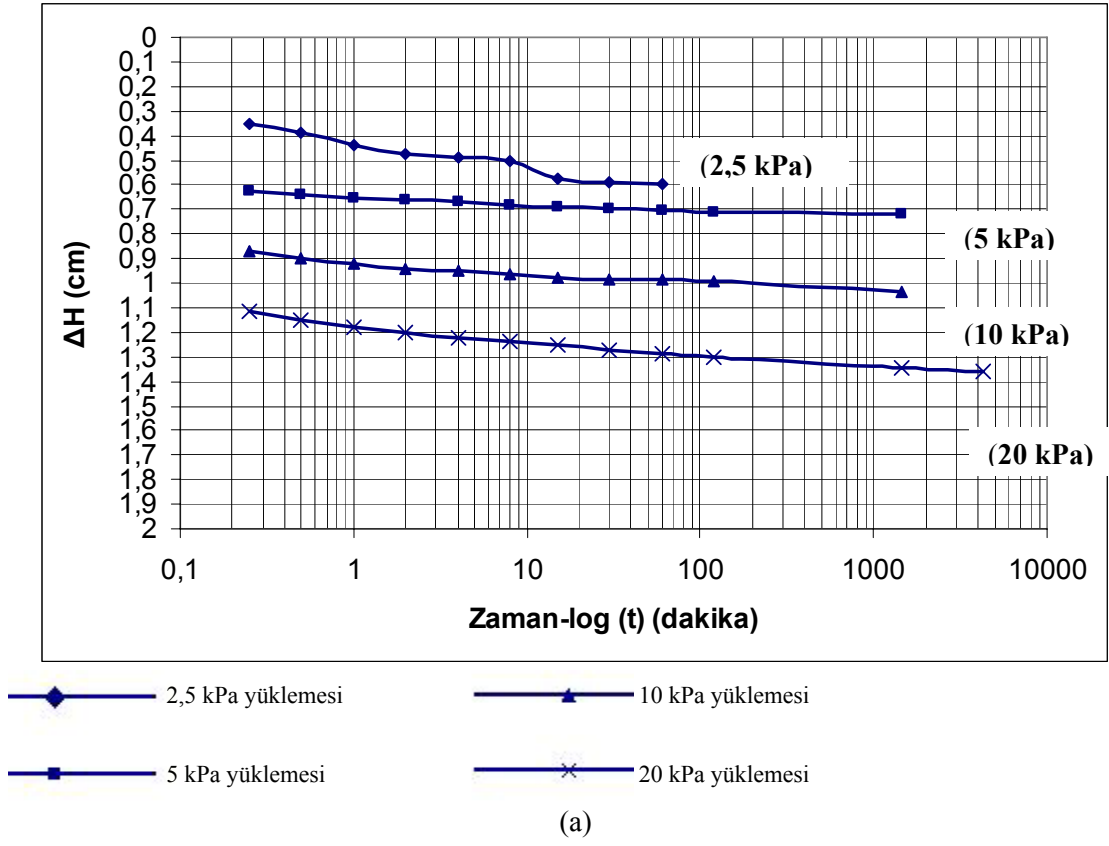
Şekil 4.3 A1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



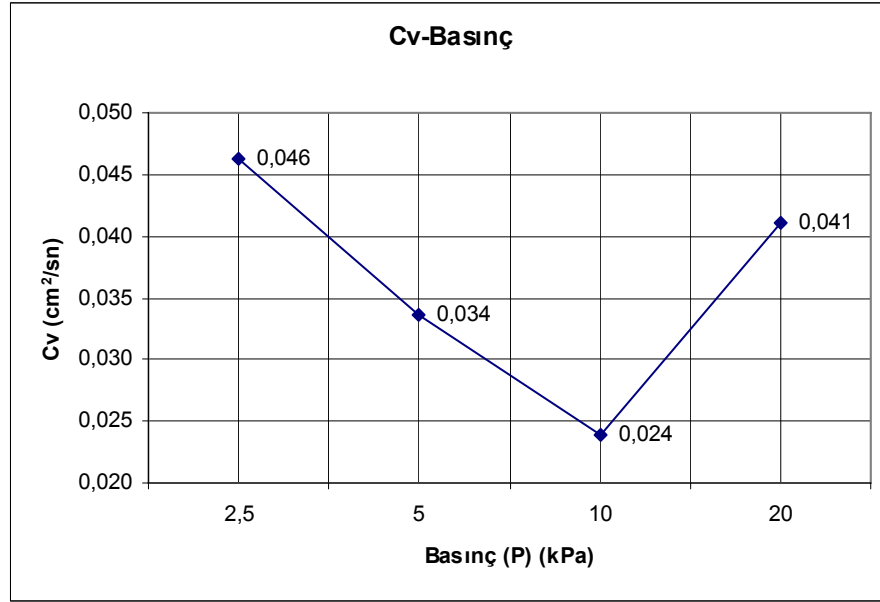
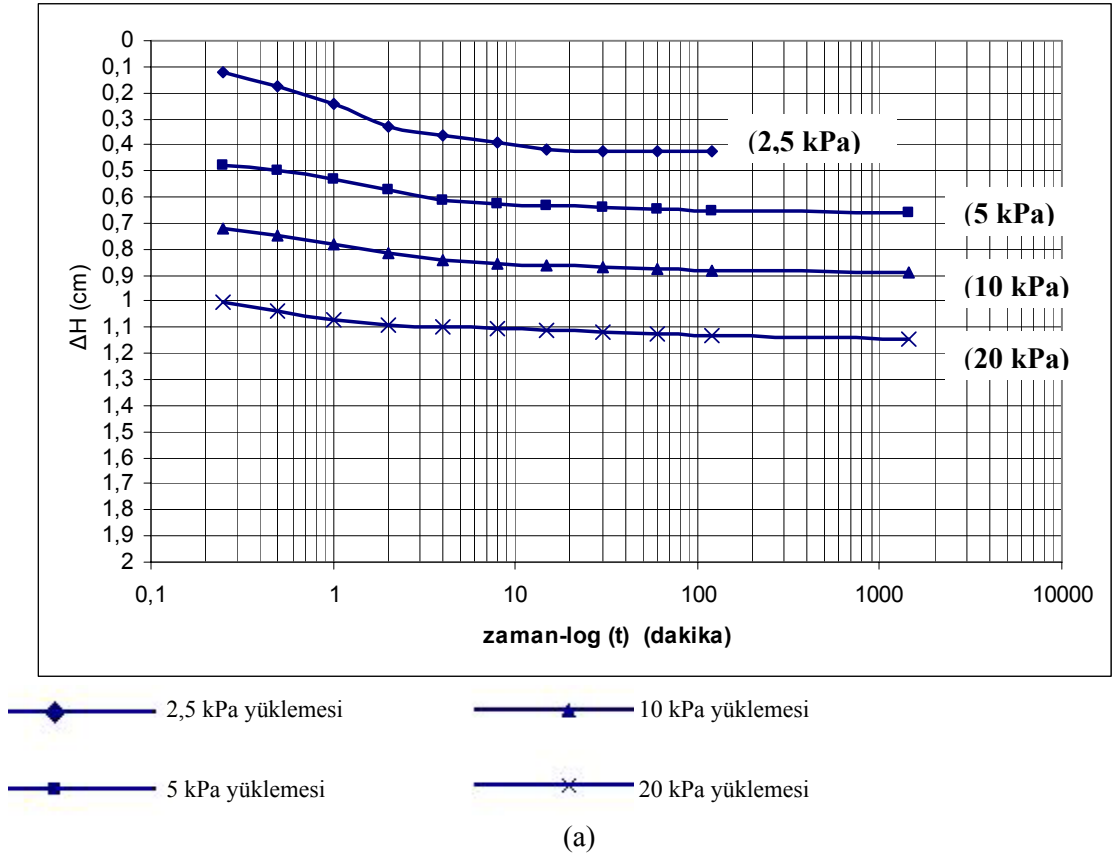
Şekil 4.4 A2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



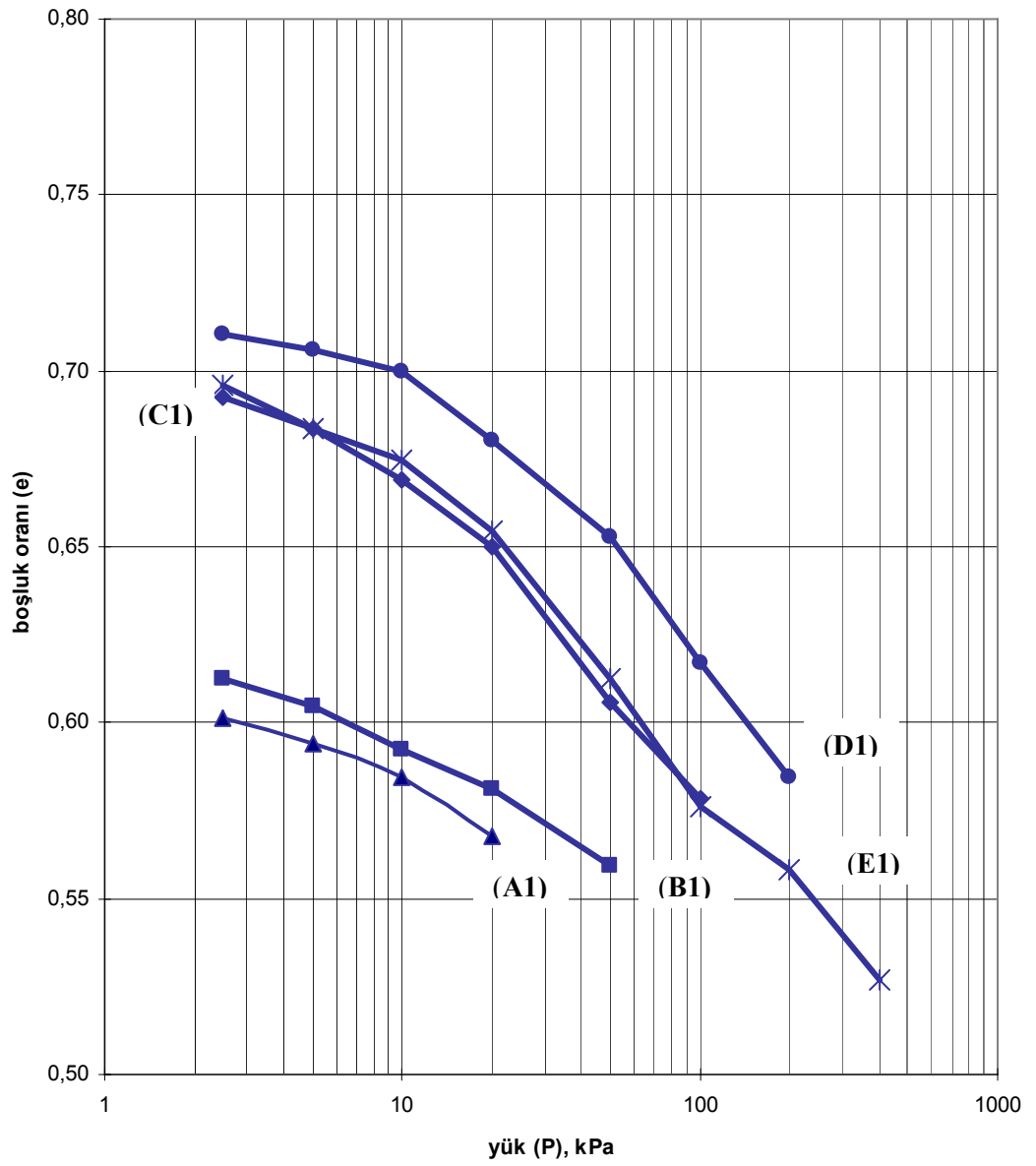
Şekil 4.5 A3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



Şekil 4.6 A4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



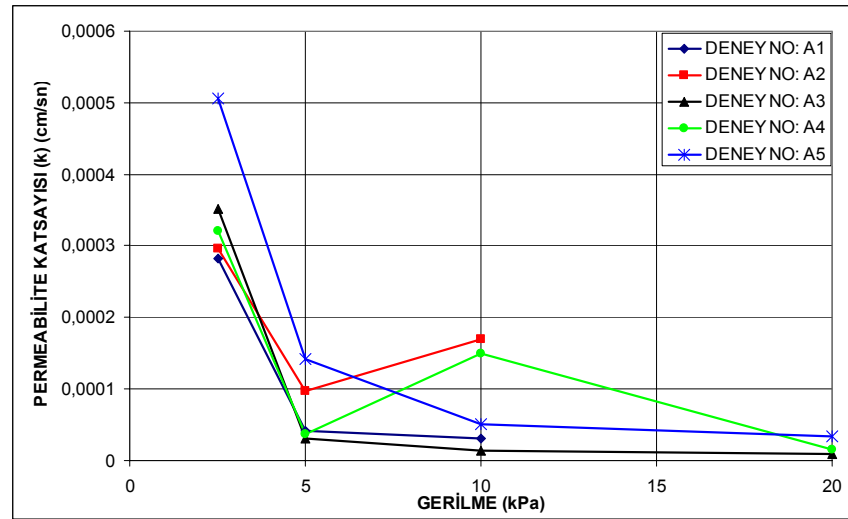
Şekil 4.7 A5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



Şekil 4.8 Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 1 dakika süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği

Tablo 4.2 A grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri

Deney No	Cv	γ_w	$1+e_0$	Δe	ΔP	a_v	m_v	k
A1 (2,5 kPa)	0,046292	1	1,663	0,025374	2,5	0,01015	0,006103	0,000283
A1 (5 kPa)	0,023788	1	1,663	0,007401	2,5	0,00296	0,00178	4,23E-05
A1 (10 kPa)	0,027037	1	1,663	0,009515	5	0,001903	0,001144	3,09E-05
A2 (2,5 kPa)	0,029031	1	1,702	0,043398	2,5	0,017359	0,010199	0,000296
A2 (5 kPa)	0,022220	1	1,702	0,018721	2,5	0,007488	0,0044	9,78E-05
A2 (10 kPa)	0,047572	1	1,702	0,030464	5	0,006093	0,00358	0,00017
A3 (2,5 kPa)	0,042000	1	1,639	0,034251	2,5	0,0137	0,008359	0,000351
A3 (5 kPa)	0,021685	1	1,639	0,005818	2,5	0,002327	0,00142	3,08E-05
A3 (10 kPa)	0,016794	1	1,639	0,006883	5	0,001377	0,00084	1,41E-05
A3 (20 kPa)	0,014737	1	1,639	0,010079	10	0,001008	0,000615	9,06E-06
A4 (2,5 kPa)	0,026865	1	1,683	0,050311	2,5	0,020125	0,011958	0,000321
A4 (5 kPa)	0,015153	1	1,683	0,010264	2,5	0,004106	0,002439	3,7E-05
A4 (10 kPa)	0,047249	1	1,683	0,026586	5	0,005317	0,003159	0,000149
A4 (20 kPa)	0,012533	1	1,683	0,019855	10	0,001986	0,00118	1,48E-05
A5 (2,5 kPa)	0,046246	1	1,682	0,04599	2,5	0,018396	0,010937	0,000506
A5 (5 kPa)	0,033606	1	1,682	0,01774	2,5	0,007096	0,004219	0,000142
A5 (10 kPa)	0,023817	1	1,682	0,01774	5	0,003548	0,002109	5,02E-05
A5 (20 kPa)	0,041077	1	1,682	0,013704	10	0,00137	0,000815	3,35E-05



Şekil 4.9 A grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği

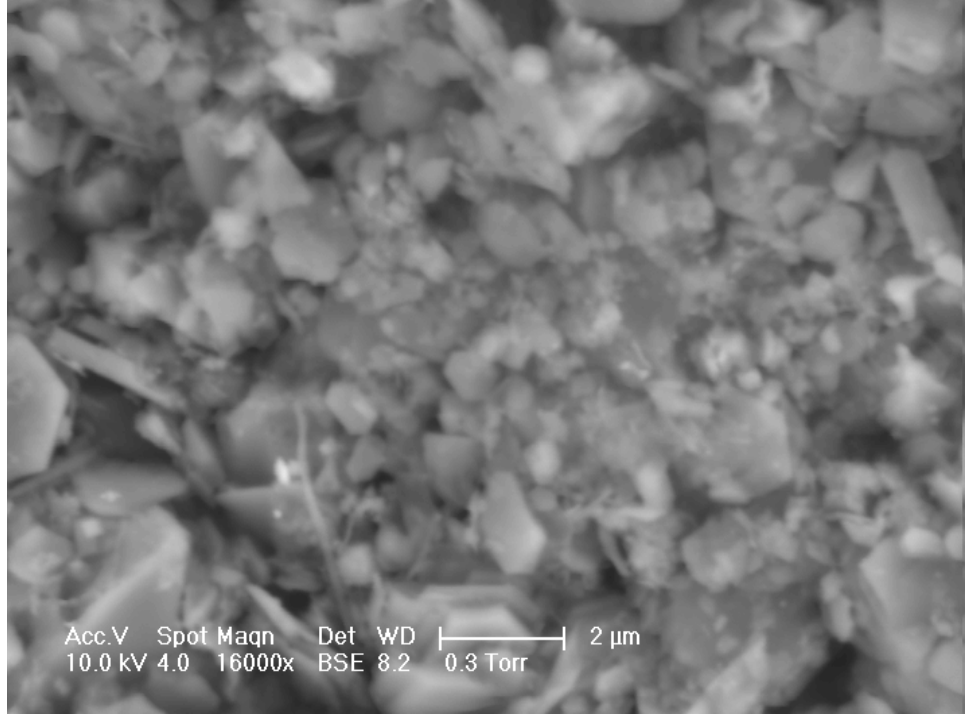
4.2. ESEM ANALİZLERİ

Deneyssel çalışmanın bu bölümünde, laboratuvarında hazırlanan kil numunesinin doğal hali ile konsolidasyon süresince fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler taramalı elektron mikroskopu (ESEM) altında incelenerek araştırılmıştır. ESEM analizlerinde, konsolidasyon gerilmesinin uygulandığı yüzeye dik yüzey incelenmiştir. Bu sayede konsolidasyon süresi boyunca zeminin fabrik yapısındaki değişiklikleri, danelerin yük uygulandıkça nasıl bir dizilime geçtiğini görmek mümkün olmuştur.

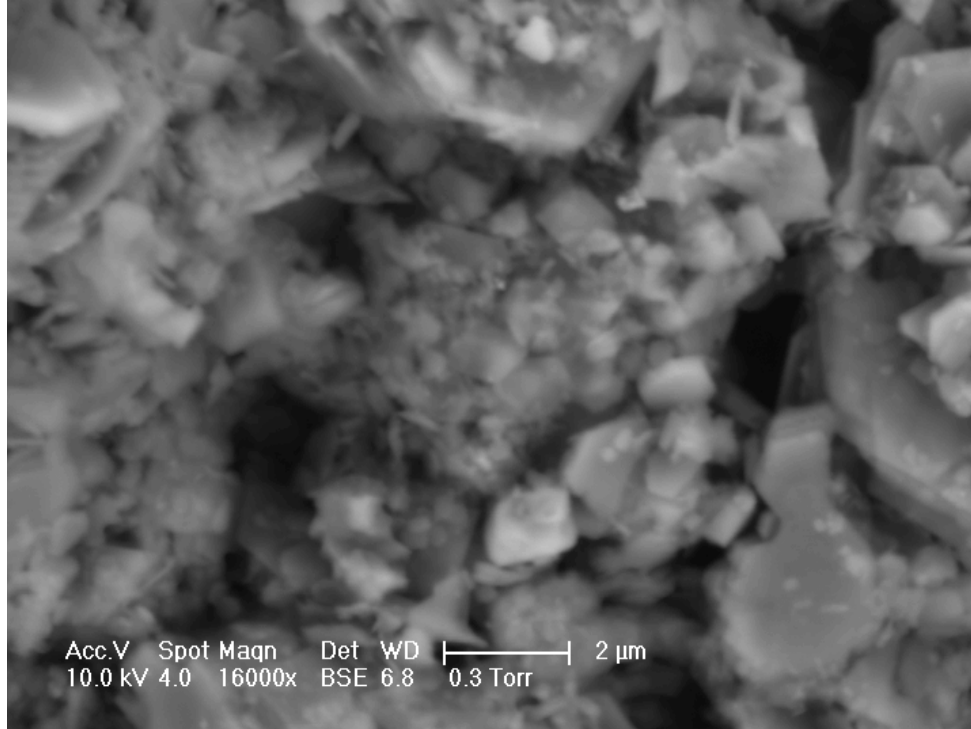
Kil zemin üzerinde yapılan ESEM analizlerinde öncelikle laboratuvarında hazırlanan örselenmemiş ve konsolidasyon deneyi uygulanmamış (e_0 boşluk oranına sahip) numune üzerinde ESEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra aynı şartlarda hazırlanmış kil zemin 20, 50, 100, 200, 400 kPa gerilmelerinde konsolidasyona tabi tutulmuş ve bu konsolidasyon basınçları altında kil zeminin fabrik yapısındaki değişiklikler taramalı elektron mikroskopu yardımıyla incelenmiştir. Bölüm 3 Tablo 3.5'te gösterildiği gibi tüm gerilmelerde analiz yapılmış ve her son gerilme için 1, 15 dakika ve 24, 72 saat süreyle konsolidasyona maruz bırakıldıktan sonra numune ödometreden çıkarılarak ESEM analizleri için hazırlanmıştır. Örneğin 400 kPa'a kadar konsolide edilen numunede 400 kPa'a çıkıldıktan 1 dakika sonra numune ödometreden çıkarılarak ESEM analizi yapılmıştır. Aynı seriden bir başka deneyde 15 dakika sonra diğerlerinde de 24 saat ve 72 saat sonra, bir grup deneyde de boşaltmadan 2 saat sonra ödometreden çıkarılarak ESEM analizi yapılmıştır.

4.2.1. Örselenmemiş Numune Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri

3. Bölüm (3.2.1.2) nolu alt başlıkta bu deney çalışmasında kullanılan kil malzemenin mühendislik özellikleri detaylarıyla incelenmiş; pasif aktiviteli, CL sınıfı düşük plastiteli killer ve siltli killer sınıfına girdiği belirtilmiştir. Kil zemin üzerinde yapılan kimyasal içerik, XRD ve EDAX analizlerinde malzemedeki minerallerin esas olarak kaolinit, kuvars ve kalsiyum karbonat olduğu belirlenmiştir. ESEM analizlerinde de kaolinit gözlemlenmiştir. ESEM analizleri sırasında hiçbir konsolidasyona tabi tutulmamış yeni hazırlanmış numuneden alınan görüntülerden bir kısmı Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Burada kil danelerinin çok çeşitli şekilde dizilim gösterdiği gözlenmiştir.



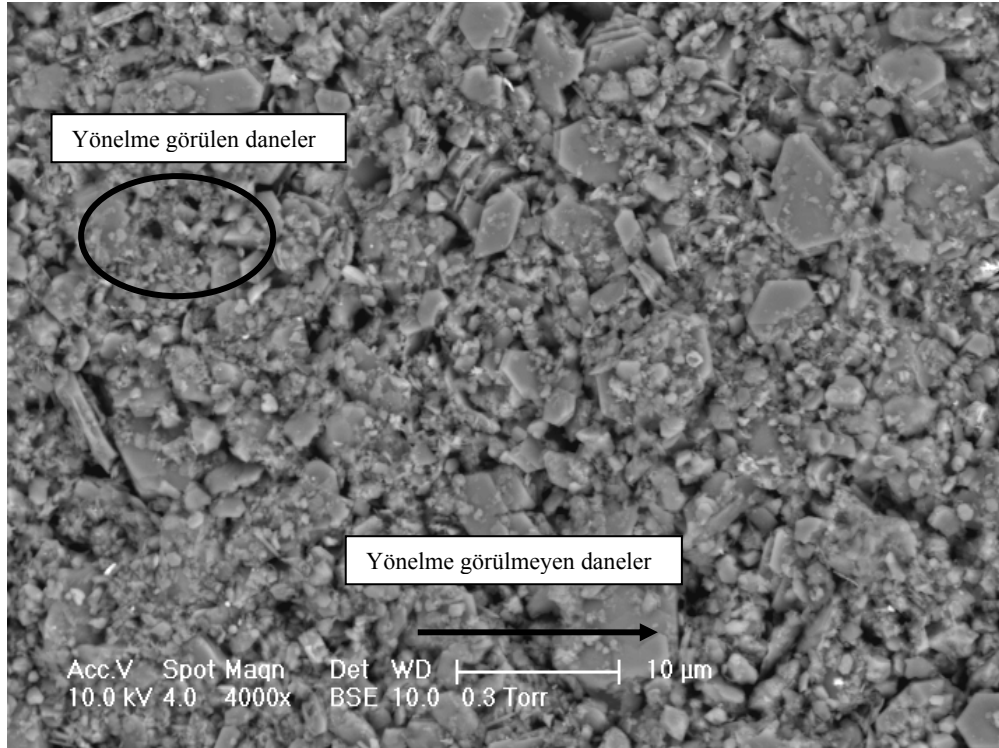
Şekil 4.10 Örselenmemiş ve yüklenmemiş numune



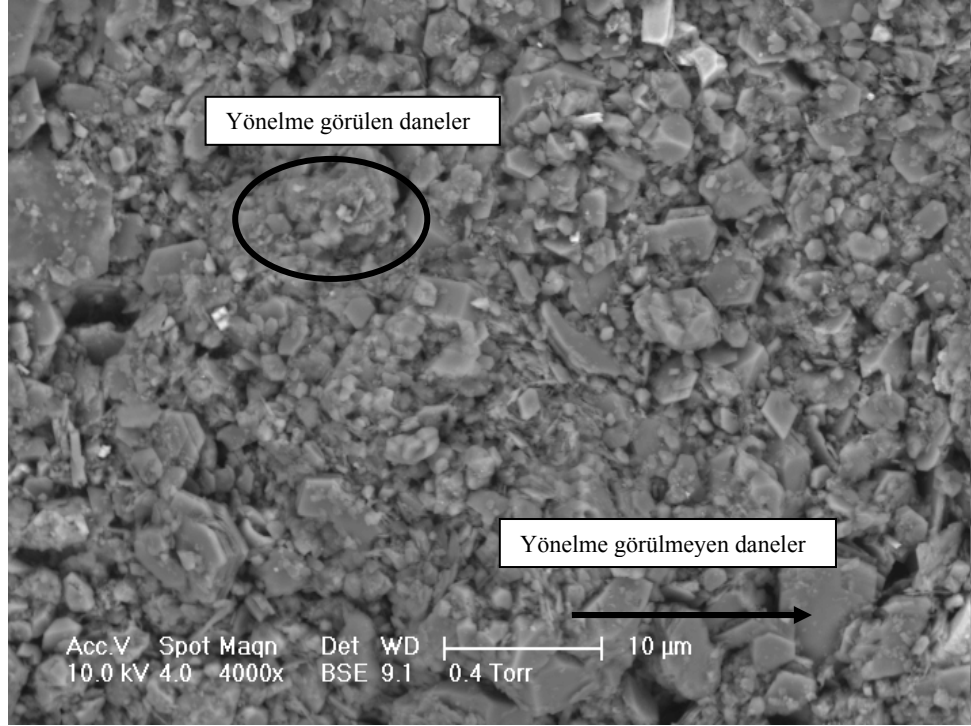
Şekil 4.11 Örselenmemiş ve yüklenmemiş numune

4.2.2. 20 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri

Örselenmemiş ve yüklenmemiş zemin numunesi üzerinde yapılan ESEM analizlerinden sonra, laboratuvarında hazırlanmış numuneler 20 kPa'a kadar konsolidasyon uygulandıktan sonra numune ödometreden çıkarılarak ESEM analizleri için hazırlanmış ve ESEM'de yapılan analizlerle konsolidasyon süreci boyunca daneler arasındaki dizilim, fabrik yapıdaki değişim, danelerde kırılma ve yapıda bozulma gibi etkilerin oluşup oluşmadığı gözlemlenmiş ve nedenleri sorgulanmıştır. ESEM analizlerinde yük uygulanan yüzeye dik kesitte çalışılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde numune 20 kPa gerilme altında ilk önce 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş ve 1 dakika sonra numune ödometreden çıkarılarak ESEM analizi için hazırlanmıştır. Numunenin 20 kPa gerilme altında 1 dakika süreyle konsolidasyonu sonucunda oluşturduğu yapı Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Aynı işlemler 15 dakika, 24 saat, 72 saat konsolidasyona maruz bırakılan ve boşaltma uygulanan numuneler içinde tekrar edilmiştir. Şekil 4.13'te 15 dakika süreyle, Şekil 4.14'te 24 saat süreyle, Şekil 4.15'te 72 saat süreyle konsolidasyona terkedilmiş numunenin yapısı, Şekil 4.16'da de boşaltma uygulanmış numunenin yapısı gösterilmiştir.

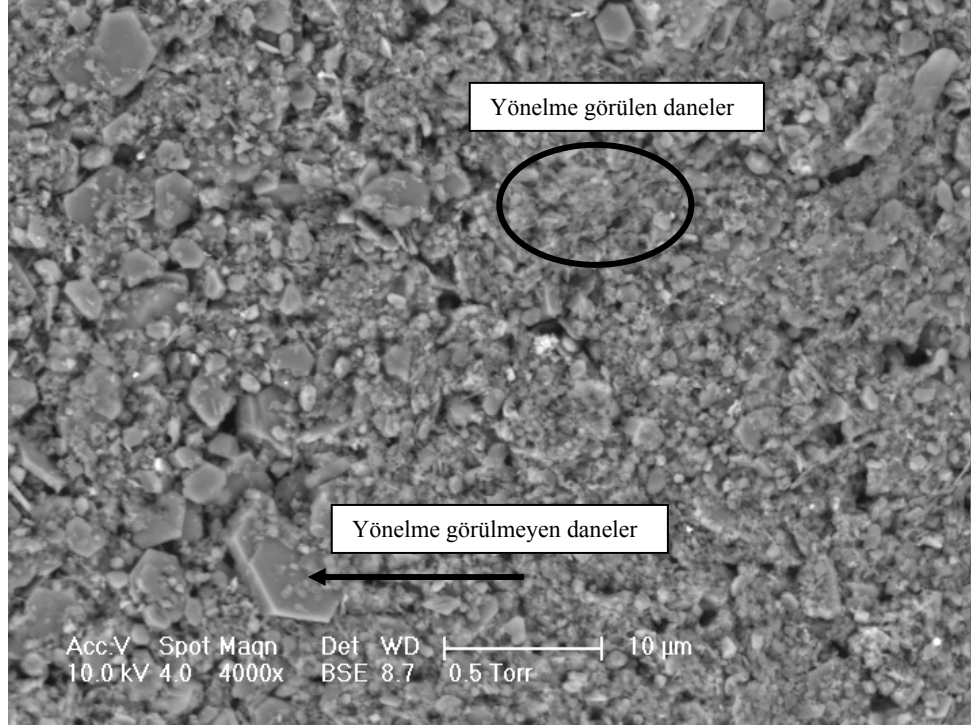


Şekil 4.12 20 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A1) ($C_v=0.027$, $m_v=0.001144$, $k=3.09E-05$, $e=0,600$)

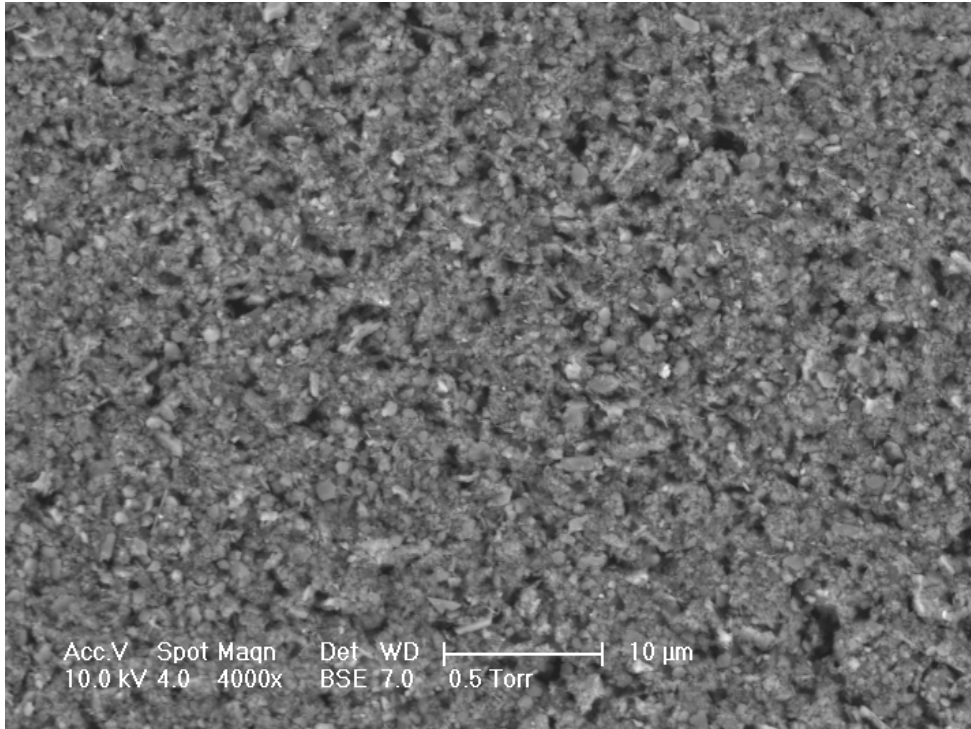


Şekil 4.13 20 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A2) ($C_v=0.047$, $m_v=0.00358$, $k=0.00017-05$, $e=0,594$)

20 kPa gerilme altında 1 dakika ve 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulan numunelerin fabrik yapısında ESEM görüntüleri sonucunda çok büyük bir fark olmadığı ancak gerilmenin uygulanma süresinin fazlalığı nedeniyle 15 dakika süreyle konsolidasyona maruz kalan numunenin bir miktar daha fazla sıkıştığı bu da boşlukların sıkışarak azaldığını göstermiştir. Ancak gerilme süresi arttıkça çok az sayıda olsa da danelerin yüke dik yönde dizilmeye başladığı görülmektedir. Şekil 4.13 ile Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 kıyaslandığında fabrik yapıdaki değişim daha net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Boşaltma uygulanan numunenin ESEM analizi görüntülerini incelediğimizde zeminin fabrik yapısında kararsız bir durumla karşılaşmaktayız. Yer yer yükün uygulandığı yöne dik bir şekilde danelerin dizilimi mevcut iken yer yer de yöne paralel dizilim gözlenmiştir. Bu durumda uygulanan basıncın çok düşük olması nedeniyle numunenin yer yer elastik şekil değiştirme yaptığını yükün boşaltılmasıyla birlikte minerallerin eski konumlarına dönmeye çalıştıkları gözlenmiştir.

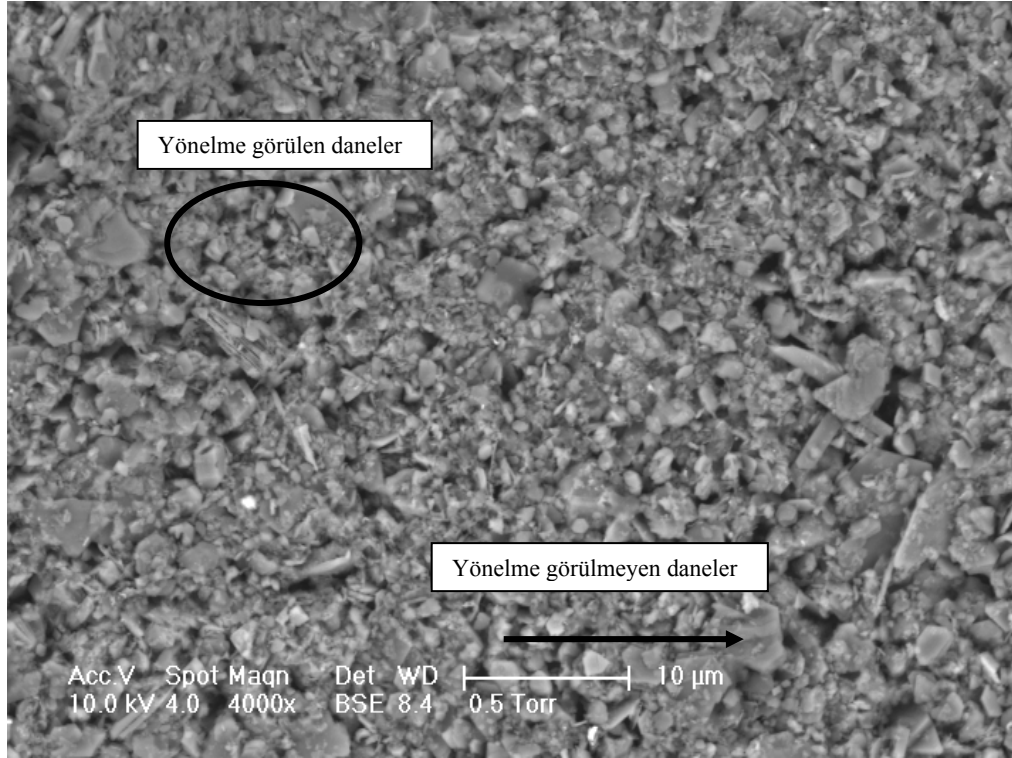


Şekil 4.14 20 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A3) ($C_v=0.0147$, $m_v=0.000615$, $k=9.06E-06$, $e=0,582$)



Şekil 4.15 20 kPa gerilme seviyesinde 72saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: A4) ($C_v=0.0125$, $m_v=0.00118$, $k=1.48E-05$, $e=0,576$)

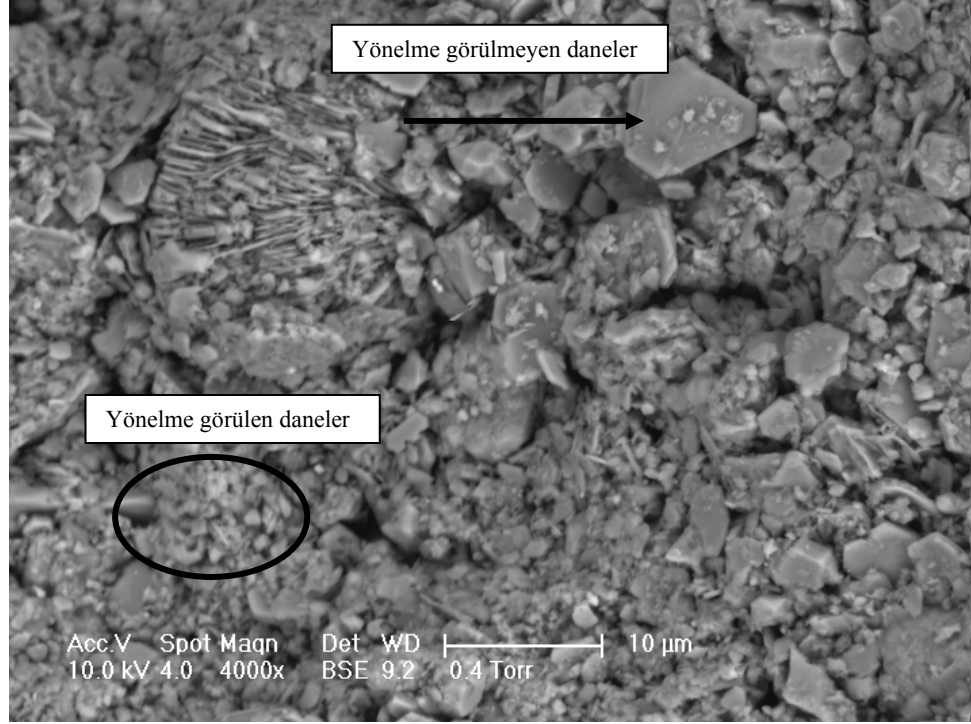
20 kPa gerilme altında alınan ESEM görüntüleri tümüyle incelendiğinde; uygulanan gerilmenin süresine bağlı olarak numunenin fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler gözlemlenmiştir. Buna göre konsolidasyon süresinin artmasıyla birlikte dane ve kil minerallerinin diziliminin yükün uygulandığı yöne dik gelecek şekilde değiştiği tespit edilmiştir.



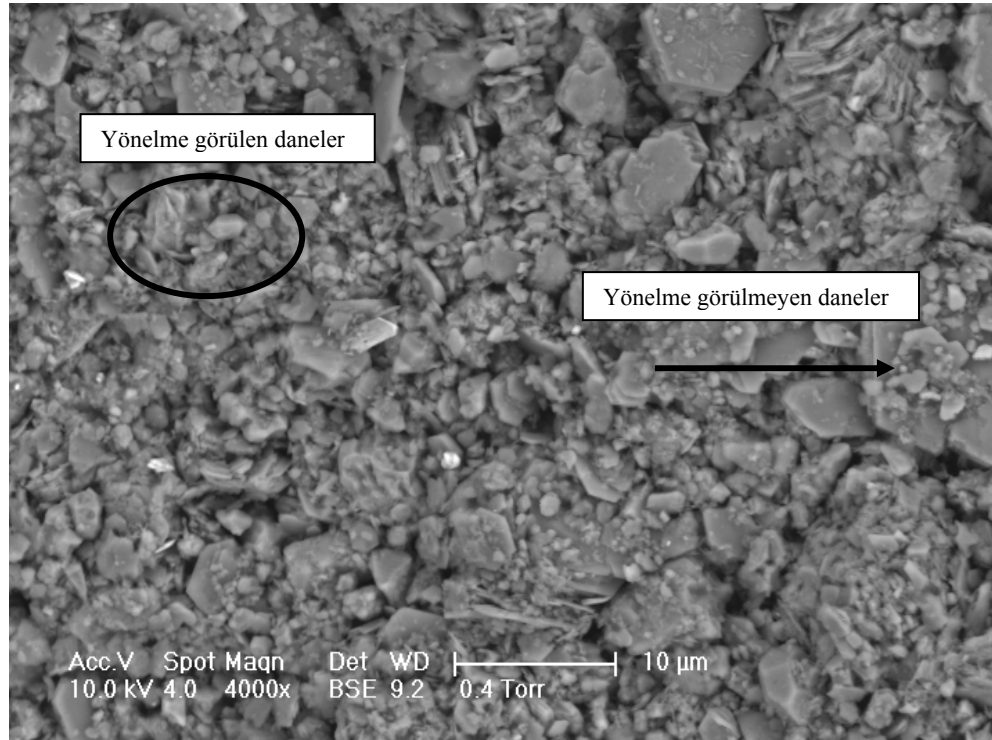
Şekil 4.16 20 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No: A5) ($C_v=0.041$, $m_v=0.000815$, $k=3.35E-05$, $e=0,592$)

4.2.3. 50 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri

Çalışmanın bu bölümünde, 50 kPa altında zeminin fabrik yapısındaki değişimler incelenmiştir. Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21’de, 50 kPa gerilme altında sırasıyla 1 dakika, 15 dakika, 24 saat, 72 saat ve boşaltma uygulanmış kil numunelerinden ESEM aleti vasıtasıyla elde edilmiş görüntüler sunulmuştur.



Şekil 4.17 50 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: B1) ($C_v=0.0178$, $m_v=0.00067$, $k=1.2E-05$, $e=0,596$)

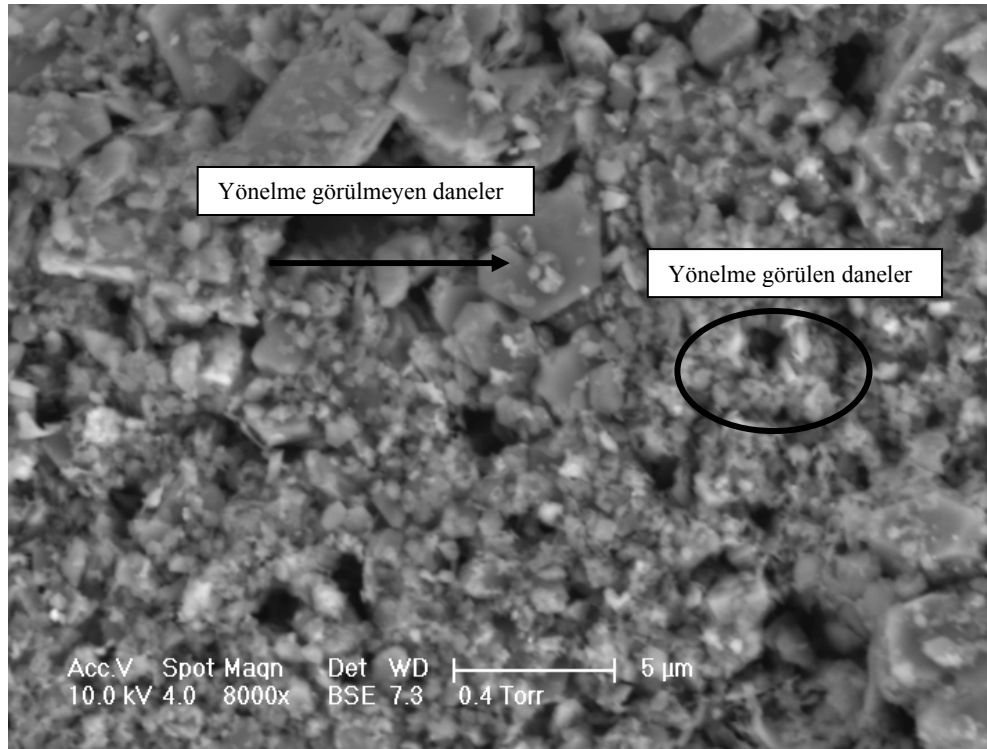


Şekil 4.18 50 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:B2) ($C_v=0.042$, $m_v=0.00163$, $k=6.96E-05$, $e=0,592$)

Şekil 4.17’de zemin numunesindeki fabrik yapı gösterilmiştir. Örselenmemiş ve hiçbir gerilmeye maruz bırakılmamış kil zemindeki fabrik yapıyı gösteren Şekil 4.11 ile Şekil

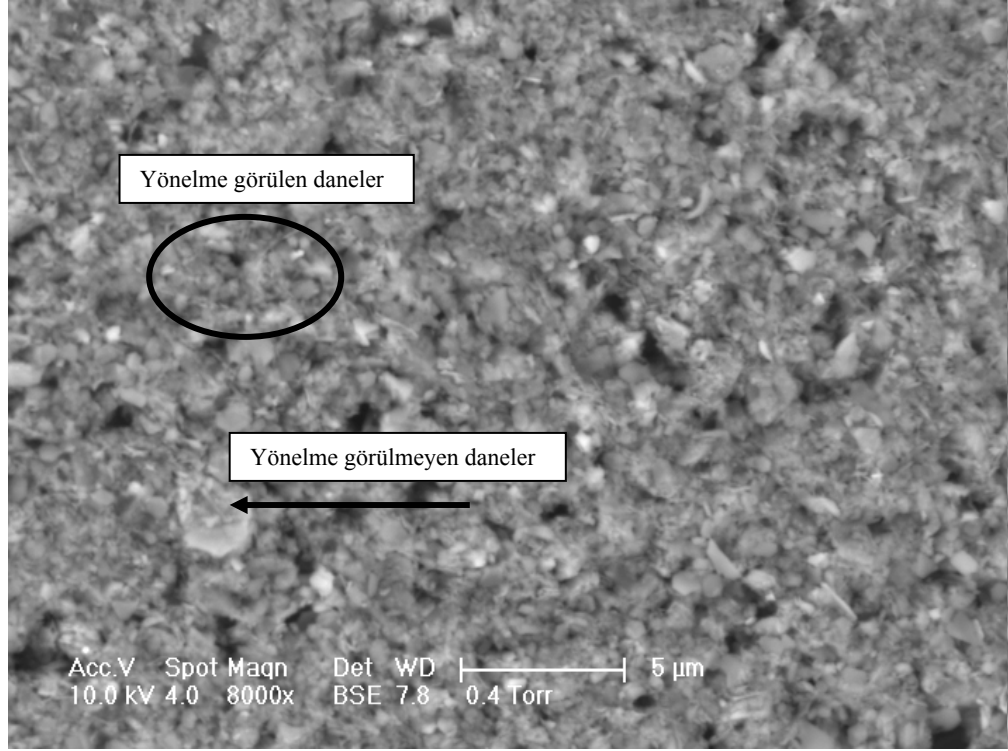
4.17 kıyaslandığında fabrik yapının hemen hemen aynı kaldığı ancak kil danelerinin diziliminde bir miktar farklılıkla karşılaşmıştır. Bazı kil danelerinin yükün uygulandığı yöne dik bir konuma geçtiği görülmüştür.

Şekil 4.18'de kil numunesinin 50 kPa yük altında 15 dakika süreyle konsolidasyona maruz kalmış kil numunesinin fabrik yapısı gösterilmiştir. Yük altında bekleme süresinin artmasıyla (24 saat) birlikte numunedeki kil danelerinin diziliminde değişiklik olduğu görülmüştür. Danelerin yükün uygulandığı yöne dik bir şekilde dizilime geçtiği belirlenmiştir.



Şekil 4.19 50 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: B3) ($C_v=0.0052$, $m_v=0.00054$, $k=2.85E-06$, $e=0,583$)

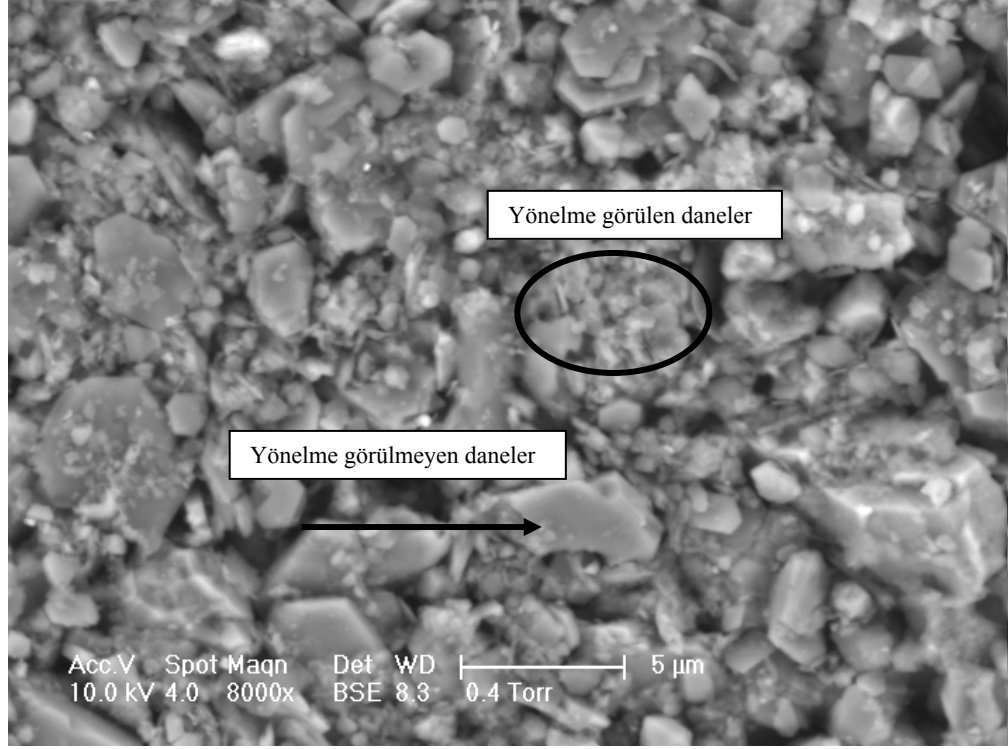
50 kPa yük altında bekleme süresinin 72 saate çıkmasıyla birlikte kil danelerinin diziliminde gözle görülür bir değişim olduğu ve tüm kil danelerinin ve kil minerallerinin yük uygulama yönüne dik bir dizilime geçtiği görülmektedir. (Şekil 4.20)



Şekil 4.20 50 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:B4) ($C_v=0.061$, $m_v=0.000807$, $k=4.99E-05$, $e=0,571$)

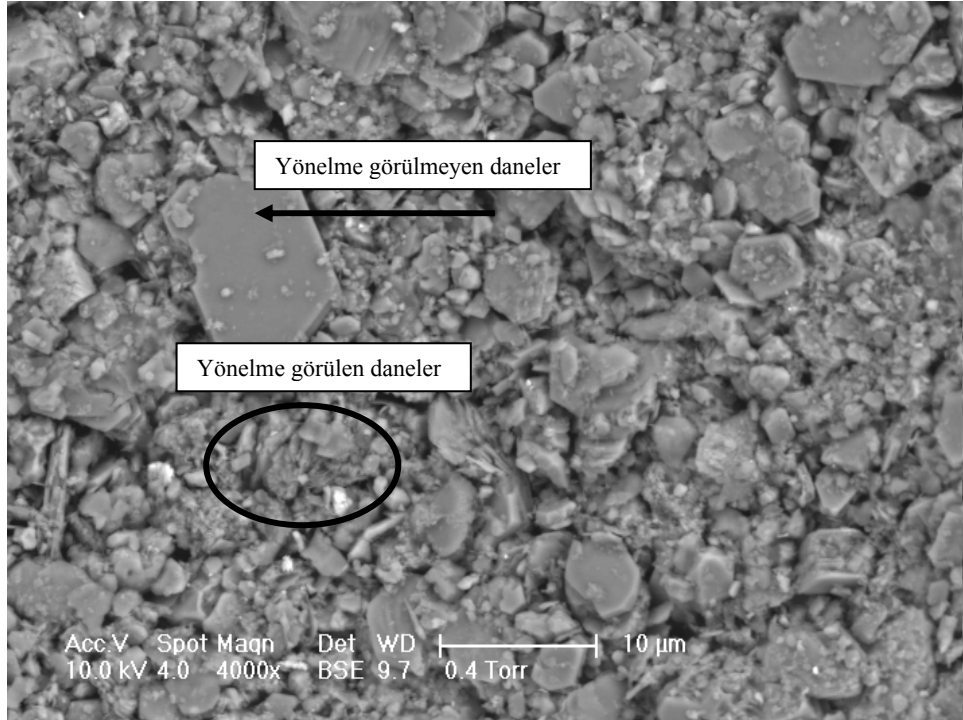
Şekil 4.21’de gösterilmiş olan 50 kPa yük altında boşaltma uygulanmış kil numunesinin ESEM görüntüleri incelendiğinde üzerinde yükün kaldırılmasıyla birlikte kil danelerinin ve minerallerinin dönmeye başladığı gözlenmiştir. Daneler arasında belirgin boşluklar gözlenmiştir.

50 kPa yük altında numuneler incelendiğinde yük altında bekleme süresi arttıkça numunedeki kil daneleri ve kil minerallerinin diziliminde belirgin değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Zaman arttıkça danelerin yükün uygulandığı yöne dik bir hal aldıkları, numune üzerindeki yükün boşaltılmasıyla birlikte bu sürecin tersine işlediği ve danelerin tekrar ilk durumdaki gibi (yükün uygulandığı yöne paralel) bir dizilime geçmeye başladığı görülmüştür. Basınç kademesinin düşüklüğü nedeniyle numunenin yapısında boşaltmaya bağlı olarak elastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.21 50 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:B5) ($C_v=0.042$, $m_v=0.000709$, $k=3.05E-05$, $e=0,579$)

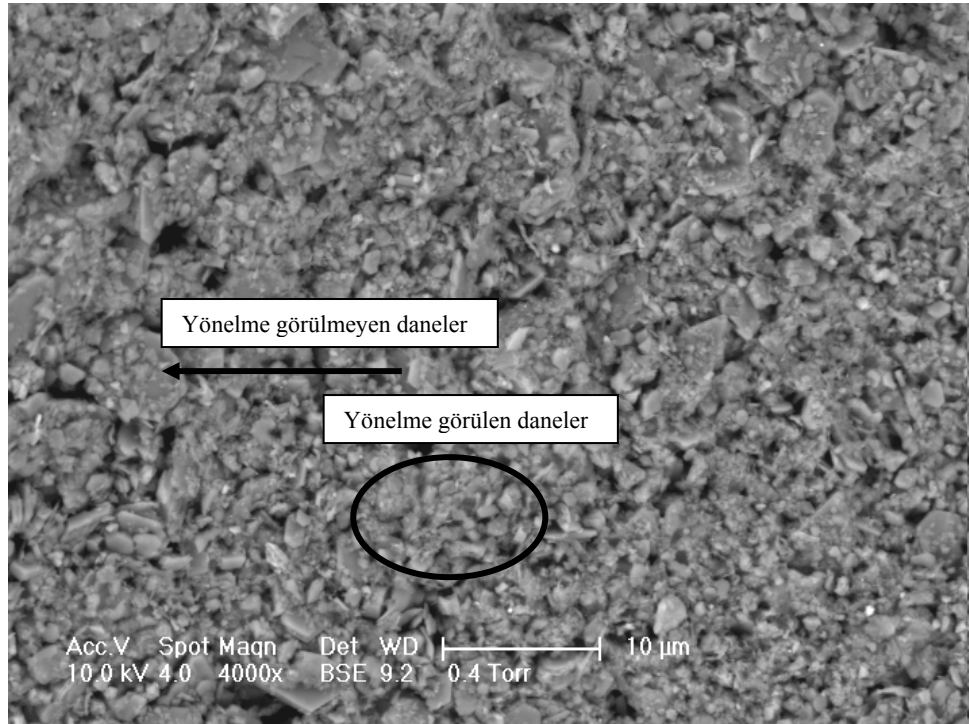
4.2.4. 100 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri



Şekil 4.22 100 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: C1) ($C_v=0.045$, $m_v=0.000855$, $k=3.84E-05$, $e=0,591$)

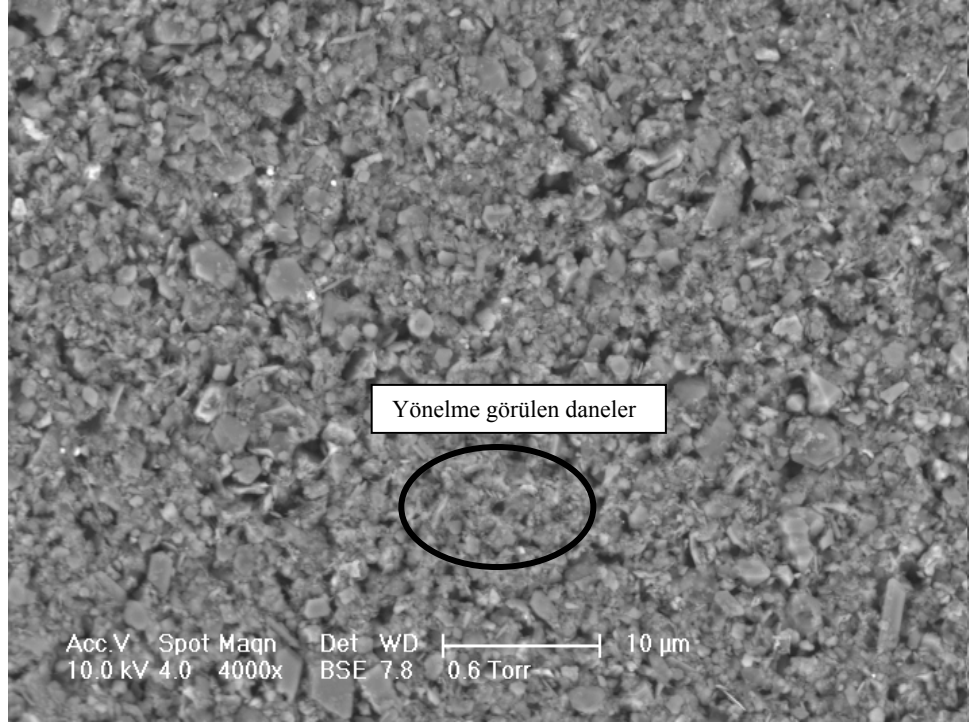
Çalışmanın bu bölümünde, 100 kPa gerilme altındaki kil numunelerinden ESEM aletiyle elde edilmiş görüntüler verilmiştir. 100 kPa yük altında zeminin fabrik yapısındaki ve danelerin dizilimindeki değişimler incelenmiştir.

Şekil 4.22’de 100 kPa yük altında 1 dakika süreyle konsolide edilmiş kil zeminin ESEM aletinden alınmış görüntüleri gösterilmiştir. Numunenin belli bölgelerindeki kil daneleri ve kil minerallerinin diziliminin farklı olduğu ve yükün uygulandığı yöne dik bir şekilde yerleştiği görülmüştür. 100 kPa yük altında kısa süreli konsolide edildiğinden dolayı daneler arasındaki boşlukların henüz kaybolmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.23 100 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:C2) ($C_v=0.0043$, $m_v=0.000588$, $k=2.58E-06$, $e=0,573$)

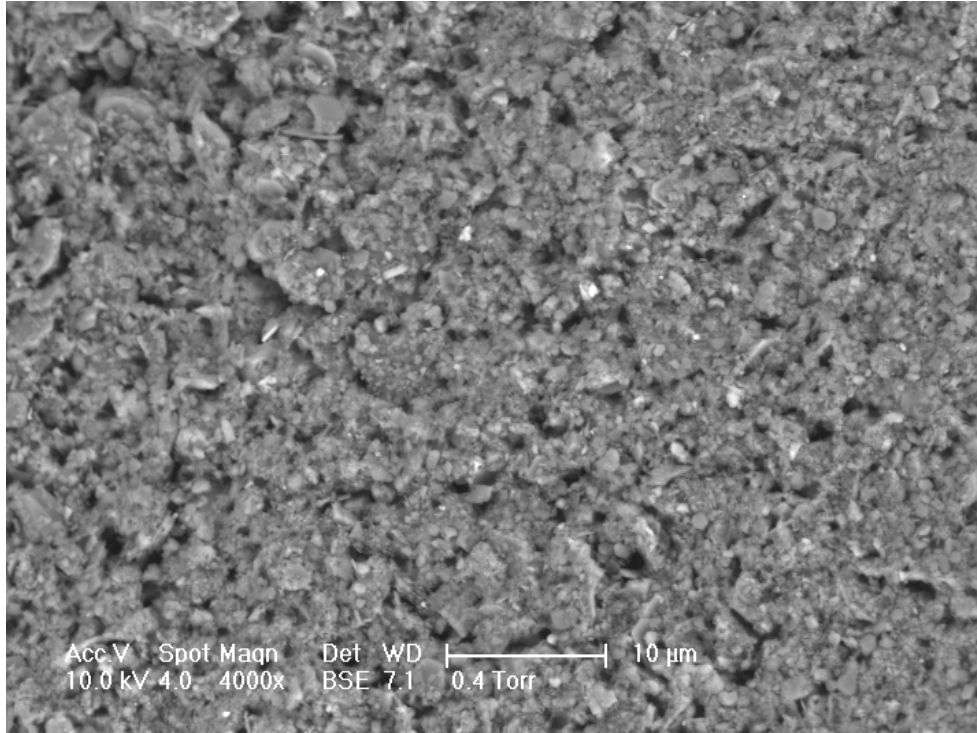
Şekil 4.23’te 100 kPa yük altında 15 dakika süreyle konsolide edilmiş kil numunesinin ESEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.22 ile Şekil 4.23 kıyaslandığında konsolidasyon süresinin artmasına bağlı olarak numunenin fabrik yapısında ve danelerin diziliminde farklılıklar olduğu gözlenmektedir. Daneler arasında bulunan boşluklar azalmıştır. Kil daneleri ve kil minerallerinin dizilimindeki hareketliliğin daha fazla olduğu böylelikle yükün uygulandığı yöne dik bir dizilime geçen dane sayısının arttığı gözükmektedir.



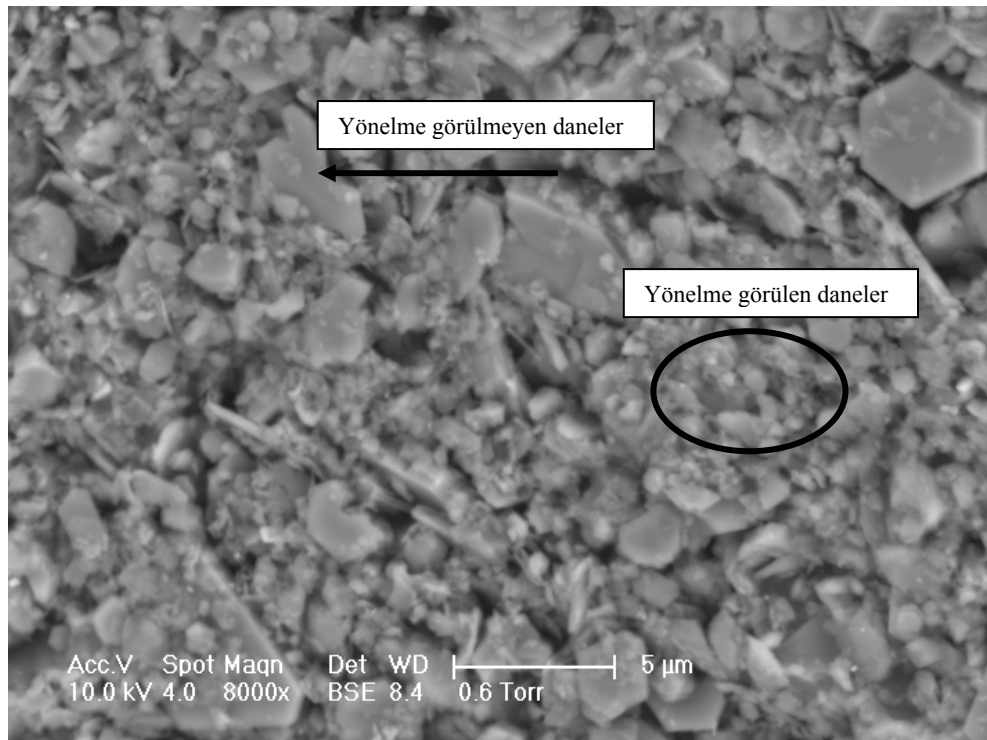
Şekil 4.24 100 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: C3) ($C_v=0.012$, $m_v=0.000355$, $k=4.32E-06$, $e=0,571$)

Kil numunesinin 100 kPa yük altında 24 saat süreyle konsolide edilmesiyle birlikte numune içindeki boşlukların 15 dakika süreyle konsolide edilmiş numunedeki boşluğa oranla oldukça azaldığı, kil danelerinin büyük kısmının dizilimin değişerek yükün uygulandığı yöne dik bir konum aldıkları görülmüştür. Şekil 4.24, Şekil 4.14 ve Şekil 4.19 ile kıyaslandığında 100 kPa yük altında konsolide edilmiş numunenin kil danelerindeki yükün uygulandığı yöne dik dizilimin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu da yükün artmasıyla birlikte konsolidasyon süresince daha fazla kil danesi ve mineralinin hareket ettiği izlenimini vermektedir.

100 kPa yük altında 72 saat süreyle konsolide edilmiş kil numunesinin ESEM görüntüleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Konsolidasyon süresinin artmasıyla birlikte numune içindeki boşlukların azaldığı, kil dane ve minerallerinin diziliminin yük uygulama yönüne dik bir duruma geçtiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.25 100 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:C4) ($C_v=0.010$, $m_v=0.000425$, $k=4.45E-06$, $e=0,551$)

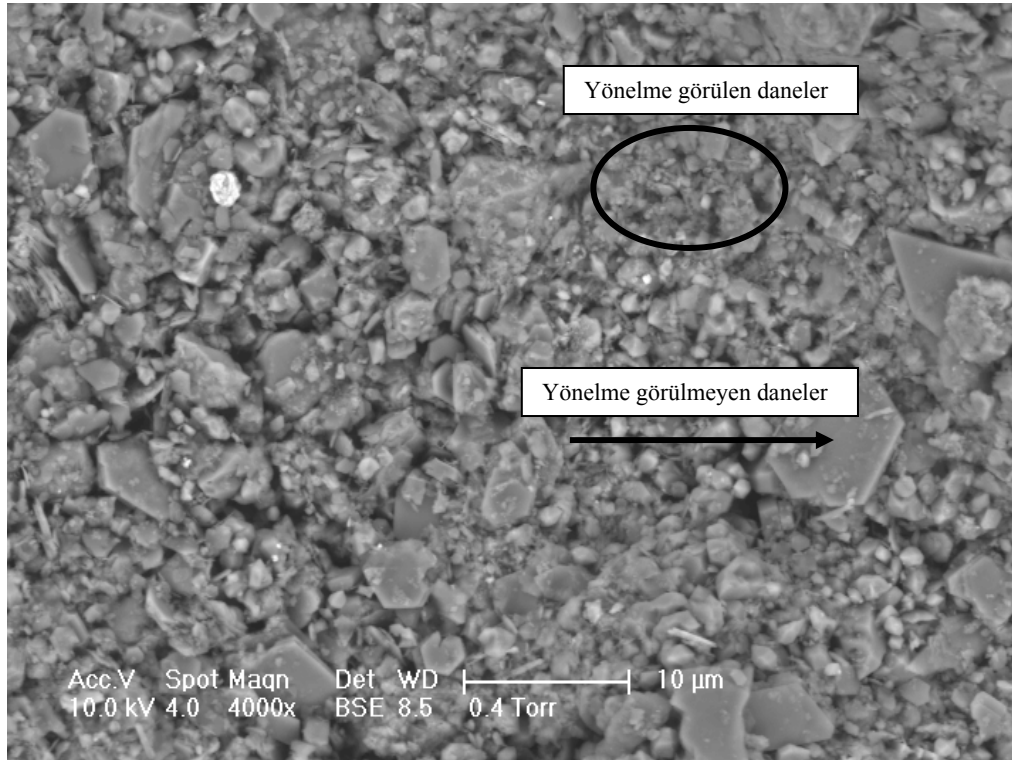


Şekil 4.26 100 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:C5) ($C_v=0.013$, $m_v=0.00044$, $k=6.02E-06$, $e=0,563$)

Şekil 4.26'da 100 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numuneye ait ESEM görüntüleri verilmiştir. Numune üzerinden yükün

boşaltılması nedeniyle yer yer daneler harekete geçerek ilk durumuna (Şekil 4.11) doğru bir hareketlilik içine girdiği, danelerin yük uygulama yönüne dik bir konumdan yük uygulama yönüne paralel bir konuma geçmeye başladığı gözlemlenmiştir. (elastik şekil değiştirme)

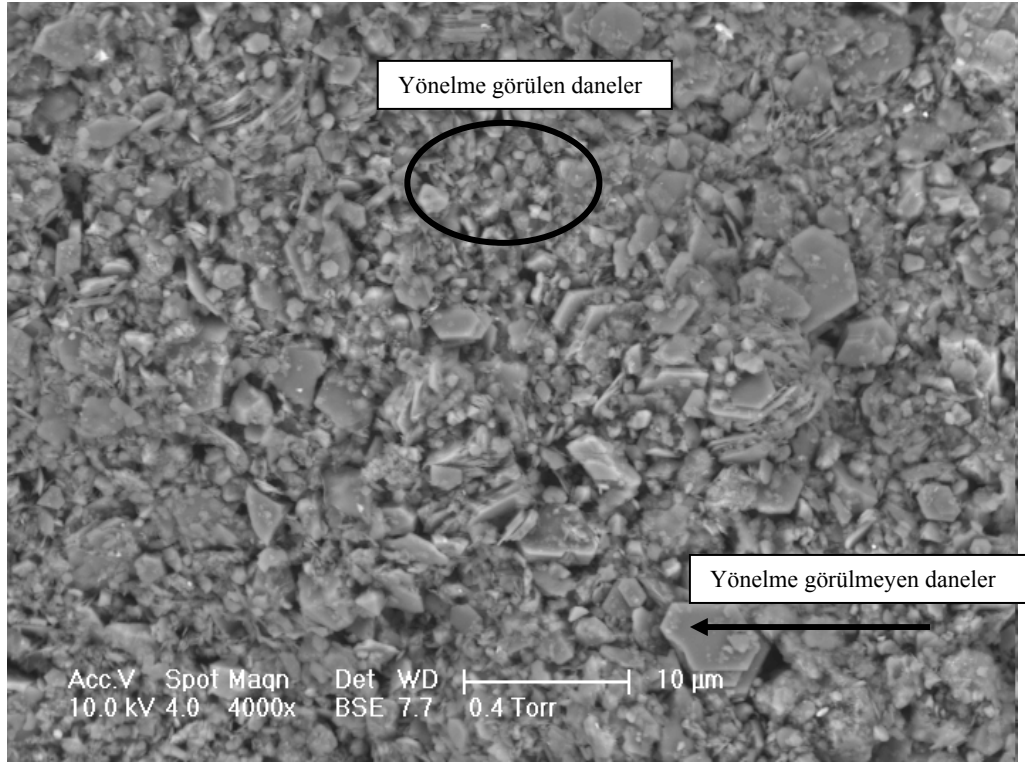
4.2.5. 200 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan ESEM Analizleri



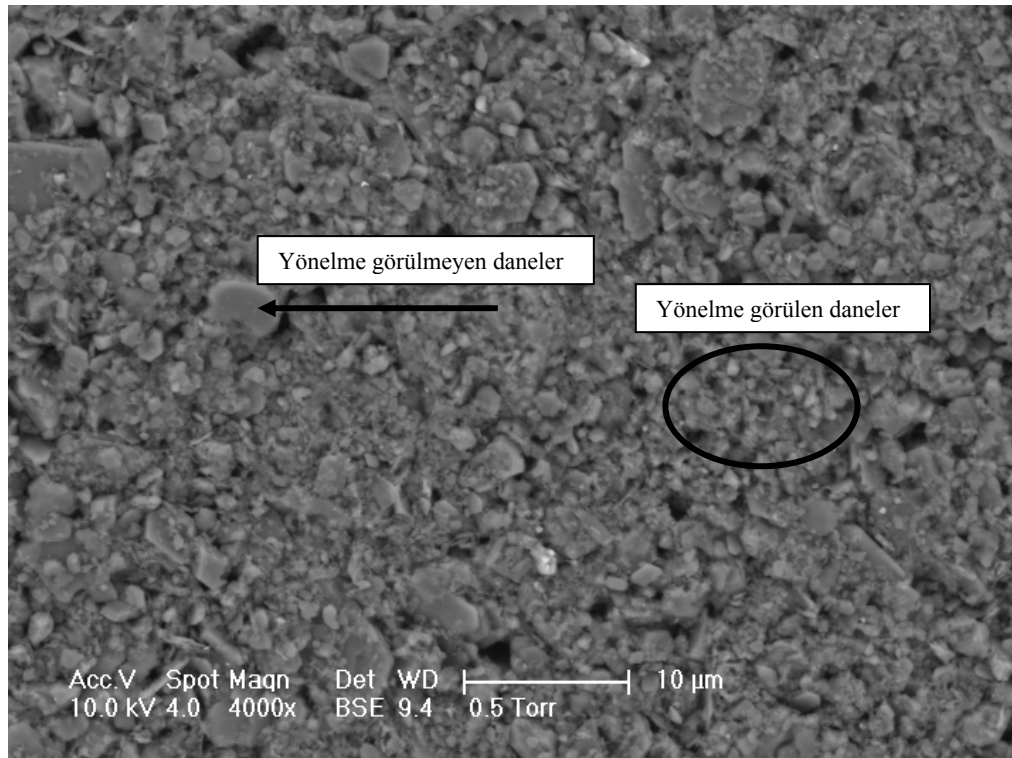
Şekil 4.27 200 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: D1) ($C_v=0.047$, $m_v=0.000416$, $k=1.98E-05$, $e=0,584$)

Çalışmanın bu bölümünde, 200 kPa gerilme altındaki kil numunelerinden ESEM aletiyle elde edilmiş görüntüler verilmiştir. 200 kPa yük altında zeminin fabrik yapısındaki ve danelerin dizilimindeki değişimler incelenmiştir.

Şekil 4.27’de 200 kPa yük altında 1 dakika süreyle konsolide edilmiş kil zeminin ESEM aletinden alınmış görüntüleri verilmiştir. Numunenin belli bölgelerindeki kil daneleri ve kil minerallerinin diziliminin farklı olduğu ve yükün uygulandığı yöne dik bir şekilde yerleştiği görülmüştür. 200 kPa yük altında kısa süreli konsolide edildiğinden dolayı daneler arasında büyük boşluklar bulunmaktadır.



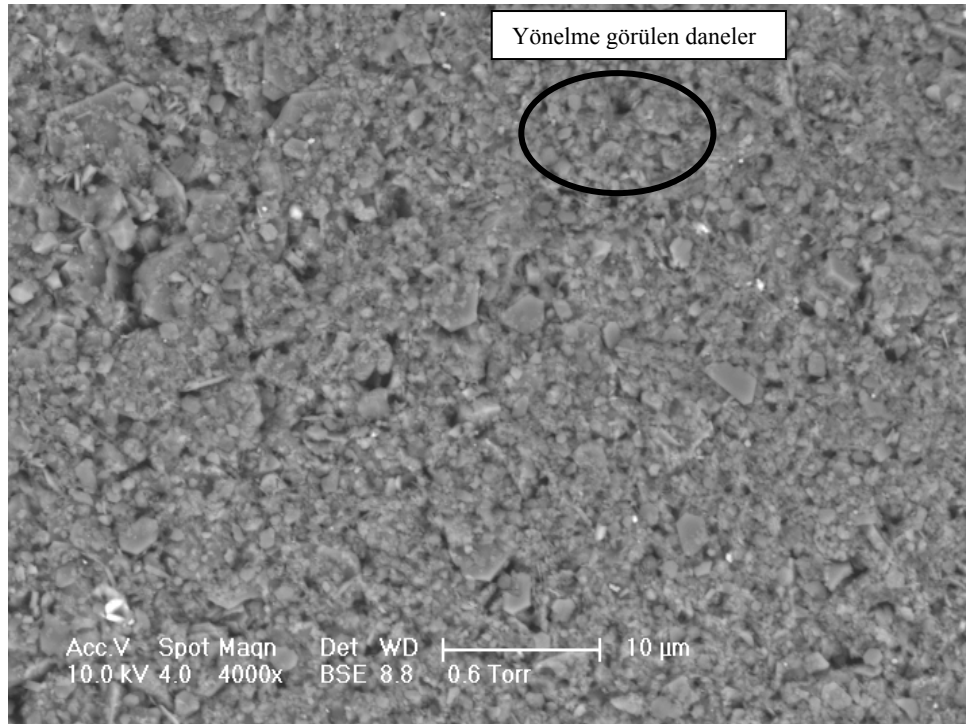
Şekil 4.28 200 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:D2) ($C_v=0.014$, $m_v=0.000405$, $k=5.85E-05$, $e=0,573$)



Şekil 4.29 200 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:D3) ($C_v=0.0077$, $m_v=0.000102$, $k=7.9E-07$, $e=0,560$)

Şekil 4.28’de 200 kPa yük altında 15 dakika süreyle konsolide edilmiş kil numunesinin ESEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.27 ile Şekil 4.28 kıyaslandığında konsolidasyon süresinin artmasına rağmen numunenin fabrik yapısında ve danelerin diziliminde farklılıklar olmadığı gözlenmektedir. İki numune arasındaki en belirgin fark daneler arasında bulunan boşlukların azalmış olmasıdır.

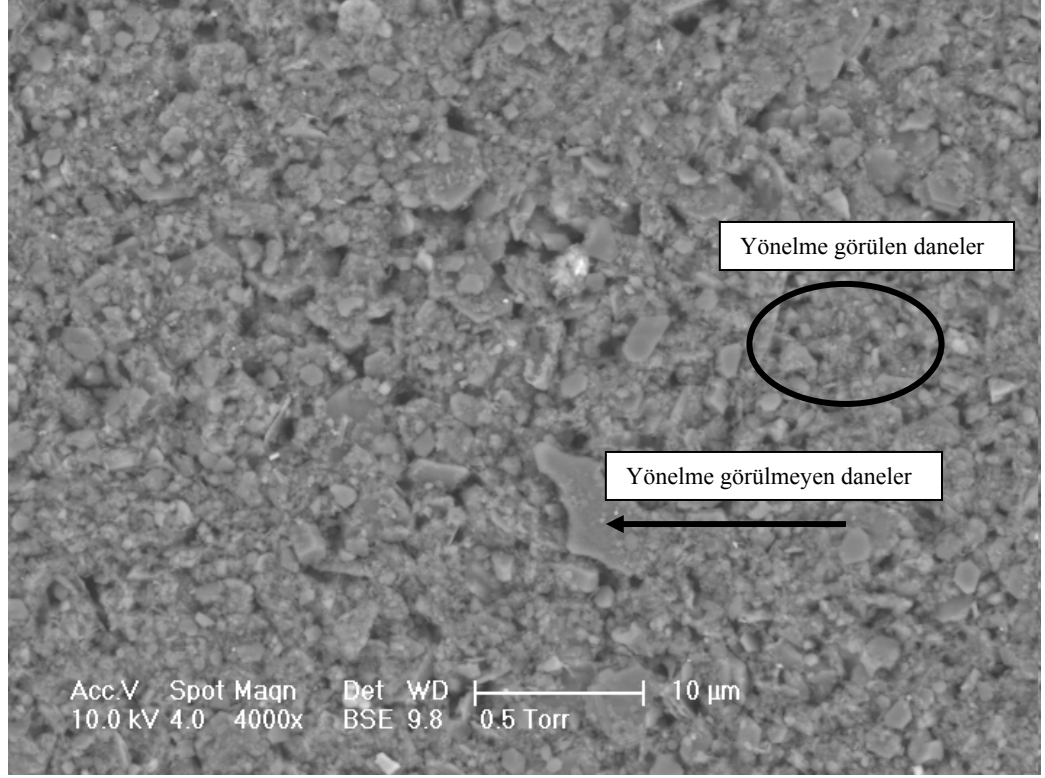
Kil numunesinin 200 kPa yük altında 24 saat süreyle konsolide edilmesiyle birlikte numune içindeki boşlukların 15 dakika süreyle konsolide edilmiş numunedeki boşluğa oranla oldukça azaldığı, kil danelerinin büyük kısmının dizilimin değişerek yükün uygulandığı yöne dik bir konum aldıkları görülmüştür. Şekil 4.29, Şekil 4.14, Şekil 4.19 ve Şekil 4.24 ile kıyaslandığında; 200 kPa yük altında konsolide edilmiş numunedeki yükün uygulandığı yöne dik dizilime geçmiş kil danelerinin daha düşük yüklerce konsolide edilmiş numunelerdeki yükün uygulandığı yöne dik dizilime geçmiş kil danelerine oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.30 200 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:D4) ($C_v=0.0034$, $m_v=0.000162$, $k=5.66E-07$, $e=0,549$)

200 kPa yük altında 72 saat süreyle konsolide edilmiş kil numunesinin ESEM görüntüleri Şekil 4.30’de verilmiştir. Konsolidasyon süresinin artmasıyla birlikte

numune içindeki boşlukların azaldığı, kil dane ve minerallerinin diziliminin yükün uygulama yönüne dik bir duruma geçtiği tespit edilmiştir.

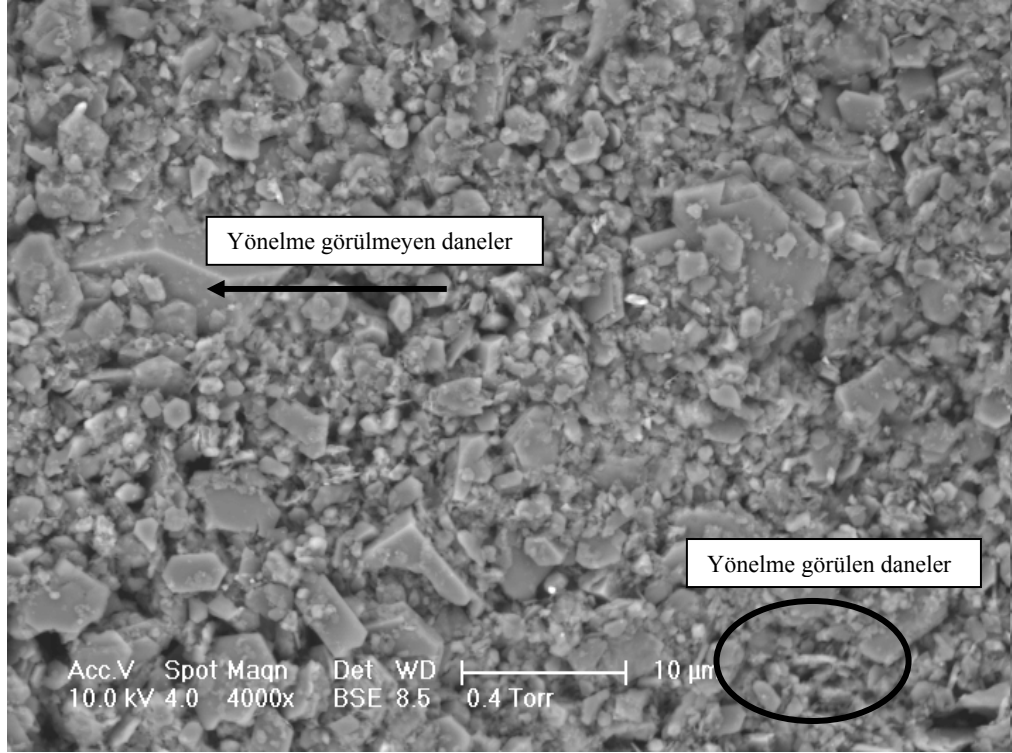


Şekil 4.31 200 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:D5) ($C_v=0.020$, $m_v=0.000200$, $k=4.08E-06$, $e=0,557$)

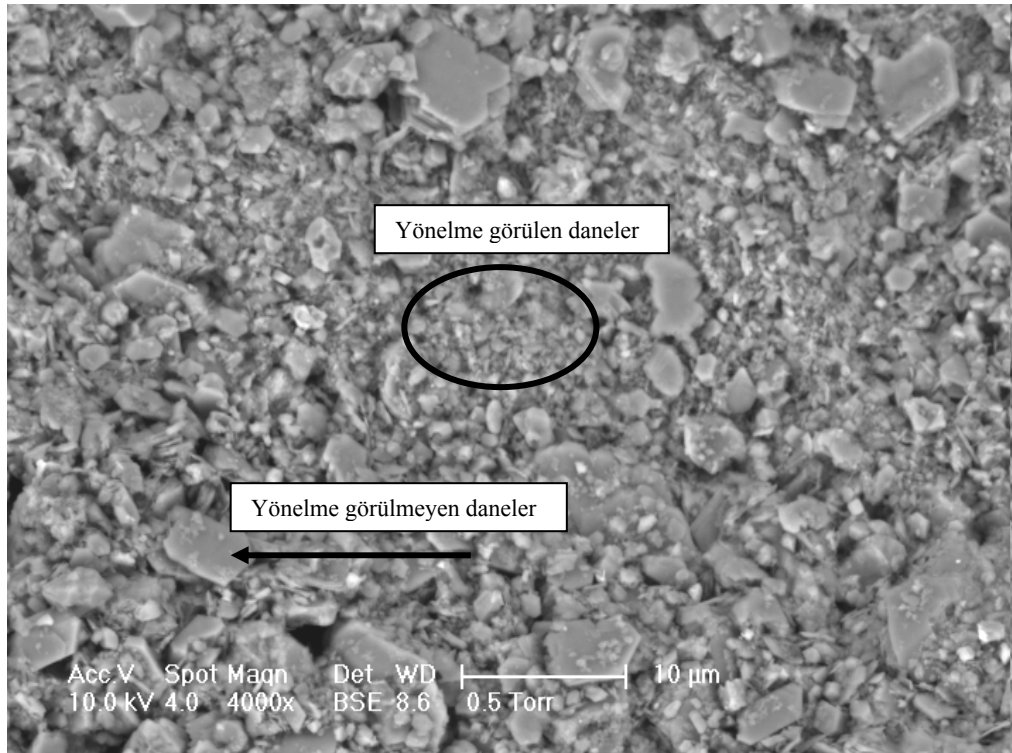
Şekil 4.31’de 200 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numuneye ait ESEM görüntüleri verilmiştir. Bazı yerlerde daneler yük uygulama yönüne dik bir konumdan yük uygulama yönüne paralel bir konuma geçmeye başlamıştır. Ancak dizilim daha az yük uygulanmış numunelerdeki kadar değişim göstermemiştir. Bu durum yapıda plastik şekil değiştirmelerin başladığını göstermiştir.

4.2.6. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Konsolidasyon Yapılan Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri

Çalışmanın bu bölümünde, 400 kPa gerilme altındaki kil numunelerinden SEM aletiyle elde edilmiş görüntüler verilmiştir. 400 kPa yük altında zeminin fabrik yapısındaki ve danelerin dizilimindeki değişimler incelenmiştir.



Şekil 4.32 400 kPa gerilme seviyesinde 1 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No: E1) ($C_v=0.019$, $m_v=0.000100$, $k=1.97E-06$, $e=0,578$)



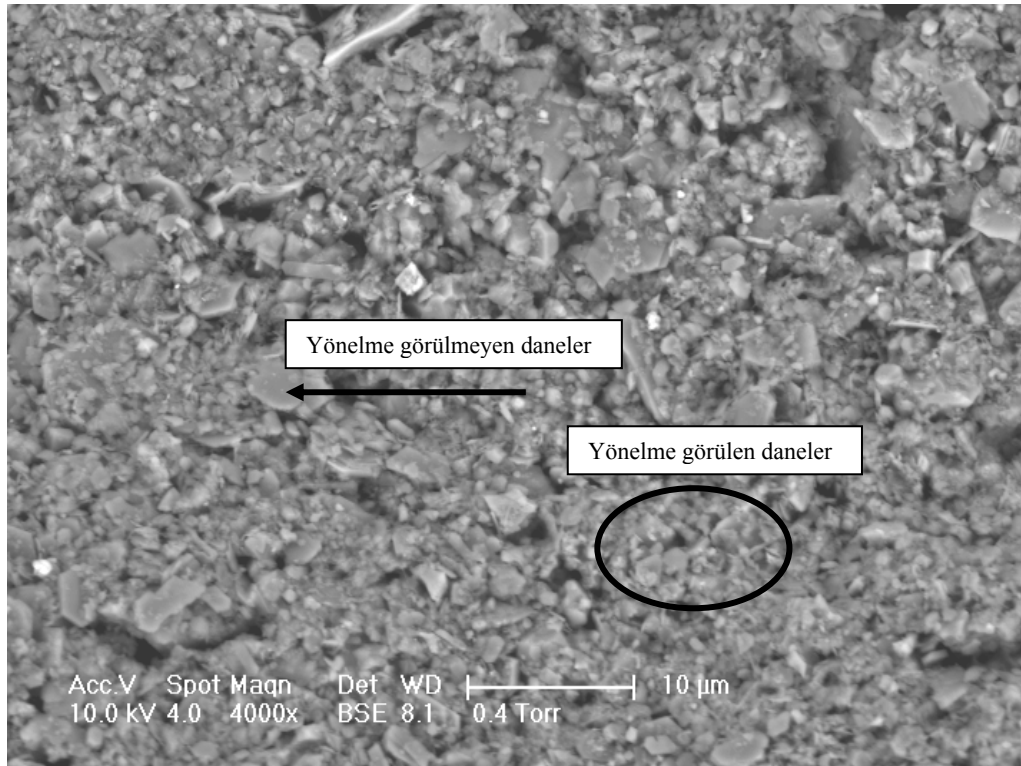
Şekil 4.33 400 kPa gerilme seviyesinde 15 dakika süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:E2) ($C_v=0.0083$, $m_v=9.1E-05$, $k=7.6E-07$, $e=0,564$)

Şekil 4.32’de 400 kPa yük altında 1 dakika süreyle konsolide edilmiş kil zeminin SEM aletinden alınmış görüntüleri verilmiştir. Numunenin belli bölgelerindeki kil daneleri ve

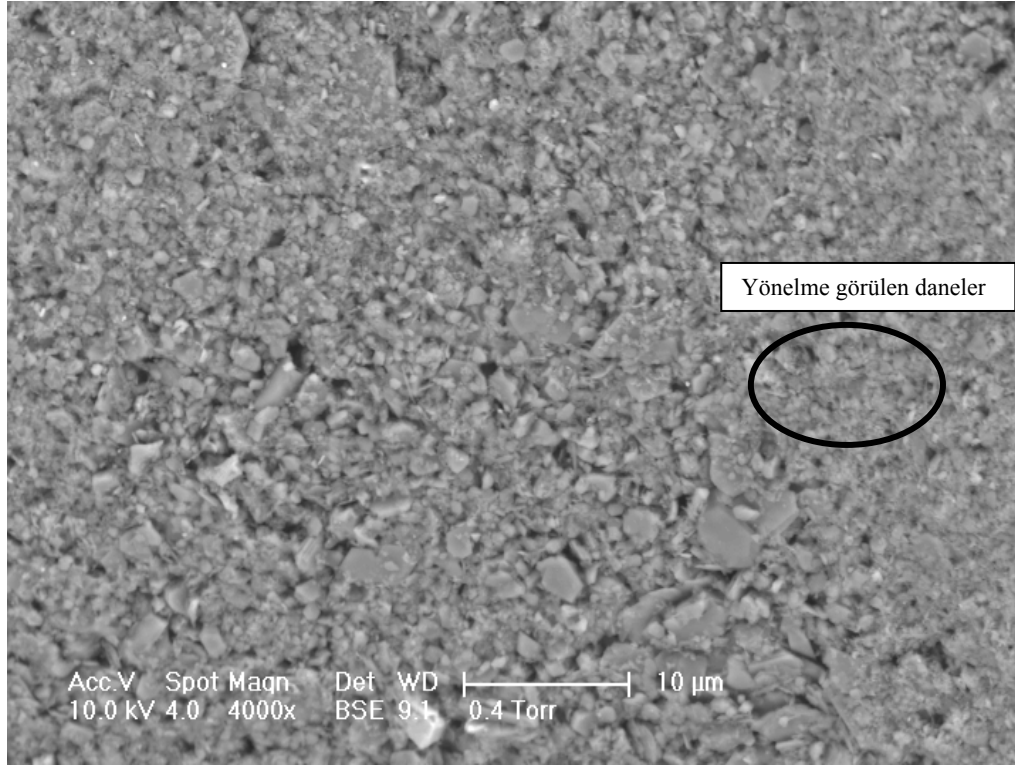
kil minerallerinin diziliminin farklı olduğu ve yükün uygulandığı yöne dik bir şekilde yerleştiği görülmüştür. 400 kPa yük altında kısa süreli konsolide edildiğinden dolayı daneler arasında büyük belirgin boşluklar bulunmaktadır.

Şekil 4.33'te 400 kPa yük altında 15 dakika süreyle konsolide edilmiş kil numunesinin ESEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.32 ile Şekil 4.33 kıyaslandığında konsolidasyon süresinin artmasına rağmen numunenin fabrik yapısında ve danelerin diziliminde farklılıklar olmadığı gözlenmektedir. İki numune arasındaki en belirgin fark daneler arasında bulunan boşlukların azalmış olmasıdır.

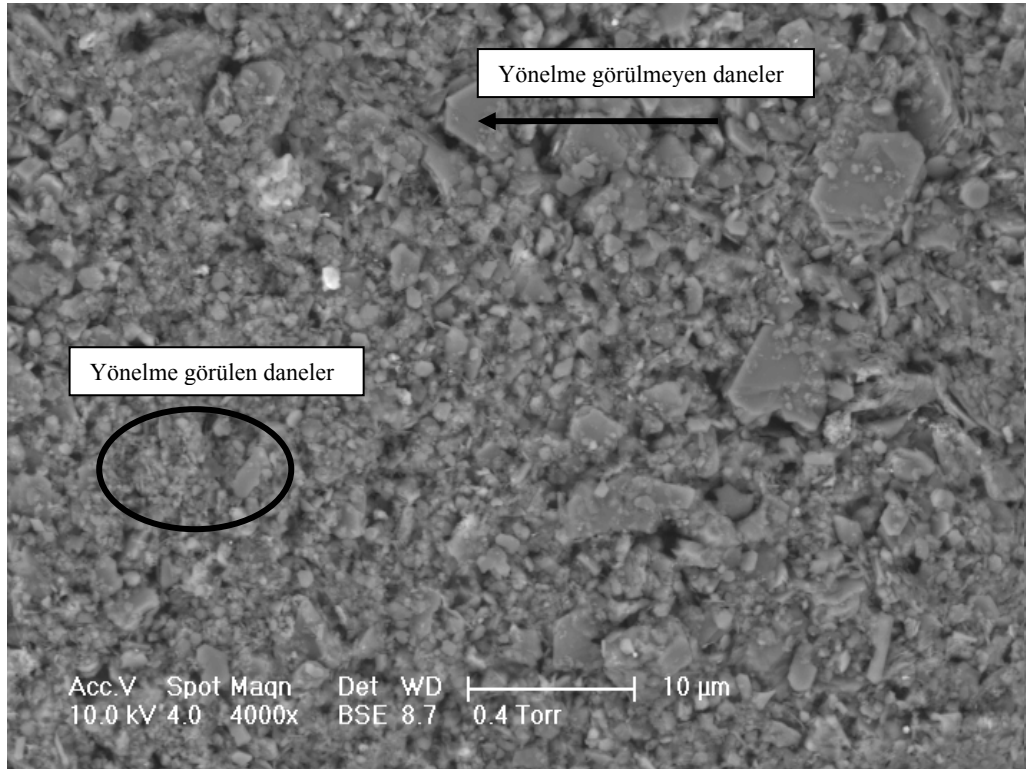
Kil numunesinin 400 kPa yük altında 24 saat süreyle konsolide edilmesiyle birlikte daneler arasındaki dizilimin, 15 dakika süreyle konsolide edilmiş numunedeki kil danelerinin dizilimine oranla büyük ölçüde değiştiği, yükün uygulandığı yöne dik bir konum aldıkları görülmüştür. Şekil 4.34 ile Şekil 4.29 kıyaslandığında; 400 kPa yük altında konsolide edilmiş numunedeki yükün uygulandığı yöne dik dizilime geçmiş kil danelerinin 200 kPa yük altında konsolide edilmiş numunedeki yükün uygulandığı yöne dik dizilime geçmiş kil danelerine oranla daha çok olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.34 400 kPa gerilme seviyesinde 24 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:E3) ($C_v=0.017$, $m_v=0.000107$, $k=1.9E-06$, $e=0,554$)



Şekil 4.35 400 kPa gerilme seviyesinde 72 saat süreyle konsolidasyona tabi tutulmuş numune (Deney No:E4) ($C_v=0.0074$, $m_v=0.000114$, $k=8.41E-07$, $e=0,526$)



Şekil 4.36 400 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numune (Deney No:E5) ($C_v=0.021$, $m_v=0.000123$, $k=2.59E-06$, $e=0,561$)

400 kPa yük altında 72 saat süreyle konsolide edilmiş kil numunesinin ESEM görüntüleri Şekil 4.35'te verilmiştir. Konsolidasyon süresinin artmasıyla birlikte numune içindeki boşlukların azaldığı, kil dane ve minerallerinin diziliminin yükün uygulama yönüne dik bir duruma geçtiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.36'da 400 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve daha sonra yükleri boşaltılmış numuneye ait ESEM görüntüleri verilmiştir. Bazı yerlerde daneler yük uygulama yönüne dik bir konumdan yük uygulama yönüne paralel bir konuma geçmeye başlamıştır. Ancak dizilim daha az yük uygulanmış numunelerdeki kadar değişim göstermemiştir. Bu durum yapıda plastik şekil değiştirmelerin başladığını göstermiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kil zemin davranışı geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma konularındandır. Killerin mühendislik davranışını tanımlamanın klasik yolu gerilme-deformasyon ilişkisinin araştırılmasıdır. Zemin mekaniğinin bir bilim dalı olarak gelişmesinin ilk evrelerinde gerilme deformasyon ilişkisi ağırlıklı olarak makro boyutta incelenmiştir. Bu yaklaşım uygulama bakımından yeterli seviyede sonuçlar vermekle birlikte zeminin gerçek davranış mekanizmasını yansıtmak ve anlamak bakımından yetersiz kalmaktadır ve makro davranışın mikro davranışla birlikte yorumlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında zeminin konsolidasyon süreci boyunca daneler boyuttaki değişimi görsel olarak ESEM fotoğrafları ile takip edilmeye çalışılmış ve bu mikro boyuttaki davranışın yanı sıra makro boyuttaki deformasyon oluşumu konsolidasyon hesapları ile takip edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında 25 adet konsolidasyon deneyi yapılmış ve toplam 175 adet gerilme seviyesinde 1 dakika ile 72 saat arasında değişen sürelerde beklenerek kil zeminin konsolidasyon davranışı ve konsolidasyon sırasında kil zeminin yapısında meydana gelen değişiklikler araştırılmıştır. Kısa ve uzun süreli yüklemenin zemin davranışına etkisi araştırılmış ve ESEM analizlerinden alınan fotoğraflarla açıklanmıştır. Laboratuvar deneylerinden ve ESEM analizi sonuçlarından hareketle elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Deneysel çalışma kapsamında, konsolidasyon süresince kil zeminin fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler taramalı elektro mikroskopu (ESEM) altında incelenerek araştırılmıştır. ESEM analizleri sonucunda numunelerin sabit gerilme altında bekleme süresi arttıkça boşluk oranında (e) azalma olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan ise bekleme süreleri esas alındığında gerilme arttıkça boşluk oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum konsolidasyon davranışı ve teorisi bakımından da beklenen bir sonuçtur.

- ESEM analizleri sonucunda numunelerin uygulanan maksimum gerilme altında konsolide olma süresine bağlı olarak kil dane ve minerallerinin bir yönelme davranışında bulunduğu ve yükün uygulandığı yöne dik bir şekilde dizilime geçtiği görülmüştür. Bu davranış Mitchell (1976) tarafından ifade edilen yönelme tanımına uygundur. “Anizotropik konsolidasyon gerilmeleri, plaka şekilli dane ve dane gruplarını kendi uzun eksenleri ve büyük asal düzlem boyunca düzenlemeye eğilimlidir.”
- Tüm kil dane ve mineralleri uygulanan gerilmeye rağmen yeni bir dizilime geçmeyip bazı daneler Şekil 4.13 ve Şekil 4.18’de görüldüğü gibi mevcut durumlarını korumuştur. Bu gözlemde aynı şekilde Mitchell (1976)’ın ifade ettiği “Gerilmeler genelde tüm dane ve dane grupları arasında eşit dağılmaz. Fabrik elemanlarının kemerlenmesi sonucu bazı dane ve dane grupları gerilme almazlar” bulgusuna uygun görünmektedir.
- Tüm kil dane ve minerallerinin yükün uygulandığı yöne dik konuma geçmesi için gereken süre uygulanan maksimum basınç kademesinin artmasıyla ters orantılı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Örneğin Şekil 4.15’te görüleceği gibi 20 kPa gerilme altında 72 saat süre ile konsolide edilmiş numunedeki kil danelerinin göstermiş olduğu dizilime, Şekil 4.24’te görüleceği gibi 100 kPa gerilme altında 24 saat süre ile konsolide edilmiş numunedeki kil danelerinin diziliminde karşılaşılmıştır.
- ESEM analizleri sonucunda incelenen numunelerin yapılarında elastik ve plastik şekil değiştirmelere rastlanmıştır. Uygulanan maksimum gerilme değerindeki artış yapı içerisinde meydana gelen şekil değiştirmeleri elastik şekil değiştirmeden plastik şekil değiştirmeye doğru yönlendirmiştir. Böylelikle yapı içerisinde yeni bağlar oluşmuş ve yeni bir dizilim meydana gelmiştir. Bu gözlem Imai (1985) tarafından da desteklenmektedir. Imai (1985)’e göre “Plastik sıkışma sırasında, bitişik daneler arasında geri dönülemeyen kayma hareketleri meydana gelmekte ve bu hareket mevcut bağları bozarak yeni bağlar oluşturmaktadır.”
- ESEM analizleri sonucunda, her yeni yüklemenin kil yapısındaki dizilimi değiştirdiği gözlemlenmiştir. Örneğin 50 kPa maksimum gerilme altında 24 saat

beklenilerek elde edilen görüntü ile 100 kPa'da 1 dakika beklenilerek elde edilen görüntüler arasında dizilim farkları mevcuttur. Keza 20 kPa–50 kPa, 100 kPa–200 kPa, 200 kPa–400 kPa geçişlerinde de aynı tip görüntü ile karşılaşılmıştır. Birbirlerini takip eden gerilme kademeleri olmalarına rağmen numuneye uygulanan her yeni gerilme kademesinde kil yapısında yeni bir dizilim oluşmuştur. Özetle; kil yapısı ve danelerin dizilimini, numuneye uygulanan gerilme ve bu gerilmenin etki etme süresi ayrı ayrı olarak etkilemektedir.

- Yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda her yükleme kademesine ait konsolidasyon katsayıları (C_v) bulunmuştur. Ancak konsolidasyon katsayısının kompozit bir parametre olarak hem gerilme artışından hem de fabrikteki değişimin sebep olduğu sıkışabilirlik özelliğinin değişmesinden etkilenmesi sebebi ile her deney grubunda farklılık göstermesi doğal bir sonuçtur. Genellikle konsolidasyon katsayıları (C_v) 2,5 kPa yüklemede yüksek bir değerdeyken, 5 kPa yüklemede altında azaldığı daha sonra tekrar bir yükselme eğiliminde olduğu gözlenmiştir.
- Konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsolidasyon katsayılarından yola çıkılarak permeabilite katsayıları (k) elde edilmiştir. Permeabilite katsayılarının da konsolidasyon katsayılarına benzer bir davranış sergilediği, ancak C_v 'deki kadar inişli çıkışlı bir davranışın olmadığı hatta k değerlerinin genel olarak konsolidasyonun gelişmesine paralel bir şekilde azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Birincil konsolidasyon süreci sırasında ikincil sıkışmanın da olduğu günümüz literatüründe net olarak tanımlanmış durumdadır. Nitekim bu araştırma çalışmasında yapılan deneyler de ikincil sıkışmanın sebep olabileceği etkileri doğrular nitelikte sonuçlar vermiştir.

Yukarıdaki görüşlerden hareketle permeabilite katsayısında ve konsolidasyon katsayısında oluşan bazı değişikliklerin ikincil konsolidasyon davranışı etkisinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bilindiği gibi ikincil konsolidasyon viskoz davranış olarak ta tanımlanır ve bu çalışmada karşılaşılan kemerlenme ve kemerlenmenin bozularak yönelmeye dönüşmesi gibi davranışlar viskoz davranışın göstergeleridir. Mikro boyutta dane diziliminin boşluk suyu basınçlarının mikro boyutta noktadan noktaya farklılık göstermesi ve iç su hareketlerinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

KAYNAKLAR

ABOSHI, H., YOSHIKUNI, H., MARUYAMA, S., 1970. Constant Loading Rate Consolidation Test, *Soils and Foundations*, Vol. 10, No. 1, 43-56.

ABOSHI H., 1995 Case Records of Log-Term Measurement of Consolidation Settlement and Their Predictions, in *Compression and consolidation of Clayey Soils*, pp 847-871, Eds. *Yoshikuni & Kusakabe*, Balkema, Rotterdam.

ÖNALP, AKIN, 2002, *Geoteknik Bilgisi 1*, Birsen Yayınevi.

BAYKAL, G., 2006 Kişisel görüşme

BRENNER, R. P., CHILINGARIAN, G. V., ROBERTSON J. O., 1981 Engineering Geology of Soft Clay, in *Soft Clay Engineering*, pp 159-238, Eds. Brand, E. W. & Brenner R.P., *Elsevier*, Amsterdam.

CASAGRANDE, A., 1932. Research on Atterberg Limits of Soils, *Public Roads*, vol. 13, no:8, pp 121-136.

CERNICA J. N., 1995, *Geotechnical Engineering, Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc. New York

COLLINS, K., MCGOWN, A., 1974. The form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils, *Geotechnique*, Vol. 24, No.2.

CRAIG R. F., (1974), *Soil Mechanics*, Van Nostrand Reinhold, Australia

ÇİNİCİOĞLU, S., F., 2005, *İMO İstanbul 19.02.2005, Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı*

ÇİNİCİOĞLU, S., F., 2006, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi Yedinci Ord. Prof. Dr. Hamdi PEYNİRCİOĞLU Konferansı Eylül 2006, Zemin Davranışı ve Zemin Yapıları için Deformasyon Esaslı Yaklaşım*

DUNN J. S., ANDERSON L.R., KIEFER F. W., *Fundamentals of Geotechnical Analysis*, John Wiley & Sons, Inc. New York

GRIM, RALFH E., 1953, *Clay Mineralogy*, New-York McGraw-Hill Book.

G. RAJASEKARAN, K. MURALI, R. SRİNIVASARAGHAVAN, Microfabric, chemical and mineralogical study of Indian marine clays *Ocean Engineering* 26 (1999) 463-483.

HAMILTON, J. J., CRAWFORD, C. B., 1959. Improved Determination of Preconsolidation Pressure of Sensitive Clay, *paper on Soils, Meetings STP 254, ASTM*, Philadelphia, 254-271.

HOLTZ, R., KOVACS W. D., 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, pp. 67-93, 247-366.

IMAI, G. (1995) Analytical Examinations of The Foundations to Formulate Consolidation Phenomena with Inherent Time-Dependence, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 891-935, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

KOÇ M., KAYALAR A. Ş., (2002), İzmir Zeminlerindeki Sekonder Sıkışma Değerlendirmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi 21-22 Ekim 2002*

LADD, C. C, 1985, Overview of Clay Behavior, Recent Developments in Measurement and Modelling of Clay Behavior for Foundation Design, *MIT Special Summer Course*, pp. 1-99, August 5-9, Cambridge, Massachusetts.

LAMBE T. W., 1958. The Structure of Compacted Clay, *JSMFD, ASCE*, vol 84 SM 2, Proc. No: 1964.

LAMBE T. W. AND WHITMAN R. V., (1969) *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc. New York

LOWE, J., JONAS, E., OBRICIAN, V., 1969. Controlled Gradient Consolidation Tests, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, Vol. 95, No. SMI, 77-97.

MITCHELL, J. K., 1976, *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

MURRAY, R. T., (1978), Developments in Two- and Three-Dimensional Consolidation Theory. in *Developments in Soil Mechanics-I*, Ed. C. R. Scott, pp. 103-147, Applied Science Publishers, London

SMITH, R. E., WAHLS, H. E., 1969. Consolidation Under Constant Rates of Strain, *Jour. Soil Mech. Found Div. ASCE*, Vol. 95, No. SM2, 519-539.

S. LEROUEIL, Compressibility of clays: fundamental and practical aspects, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* / July 1996, 122 (7), 534-543.

TERZAGHI, K., PECK, R. B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York 407 pp.

VAN OLPHEN, H., 1963, *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, Wiley Int., New York, 301 pp.

YENİYOL, M., 2006 Kişisel görüşme

YILMAZ E., 2000 *Samsun Çarşamba Mavi Kilinin İkincil ve Üçüncül Sıkışma Davranışı* Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

EKA

KONSOLIDASYON KATSAYISININ LOGARİTMA YÖNTEMİYLE BULUNMASI

Casagrande metodu olarak bilinen bu deneysel yöntemde amaç %50 konsolidasyonun tamamlandığı süre olan t_{50} 'yi sıkışma $-\log$ zaman eğrisi üzerinde çizimle bulmaktır. %100 konsolidasyon ile eğrinin doğru olarak belirmiş bölümüne çizilmiş teğetin kesiştiği nokta birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_{100} noktası olarak seçilmektedir. Bunun sağ tarafı ise ikincil konsolidasyon bölgesi olarak kabul edilir. Sıfır konsolidasyona karşılık gelen noktanın bulunması, çizimin yarı logaritmik oluşu nedeniyle daha zordur. Burada yararlanılan özellik zaman faktörünün %60 konsolidasyona kadar parabolik bir eğri olmasıdır. Bu nedenle $U=0$ noktasını bulmak için bir parabol çizilmektedir. Casagrande yöntemiyle C_v 'nin bulunması için izlenecek yol aşağıda belirtilmiştir.

- 1) Ödometre deneyinin herhangi bir noktası herhangi bir yük kademesi için numunenin sıkışması (ΔH) zamanın logaritmik apsis değerine karşı noktalanır ($\log t$),
- 2) Eğrinin doğruya en yakın olduğu bölgeye bir teğet, eğrinin yataya döndüğü sağ ayağına diğer bir teğet çizilir ve iki doğrunun kesiştiği birincil konsolidasyonun tamamlandığı R_{100} (t_p) noktası olarak işaretlenir.
- 3) %0 konsolidasyon noktası olan R_0 'ı bulmak için oranları 4 olan t_1 , t_2 noktaları seçilir, t_1 'in üstüne (R_1-R_2) kadar çıkılarak işaretlenir. Bu nokta R_0 'ın yerini verir. Bu yeri doğru olarak bulmak için t_1, t_2 noktaları için yeni denemeler yapılmalıdır.
- 4) $U=0$ ve $U=100$ 'e karşılık olan zamanlar bulunduktan sonra, $U=50$ 'nin yeri aralarındaki düşey uzaklık ikiye bölerek bulunur ve işaretlenir.
- 5) Bu yük kademesinde (σ) numune kalınlığı $2H=H_0-\Delta H_\sigma$ ile hesaplandıktan sonra konsolidasyon katsayısı %50'ye karşılık olan zaman faktörünü (T_v) kullanarak bulunur.

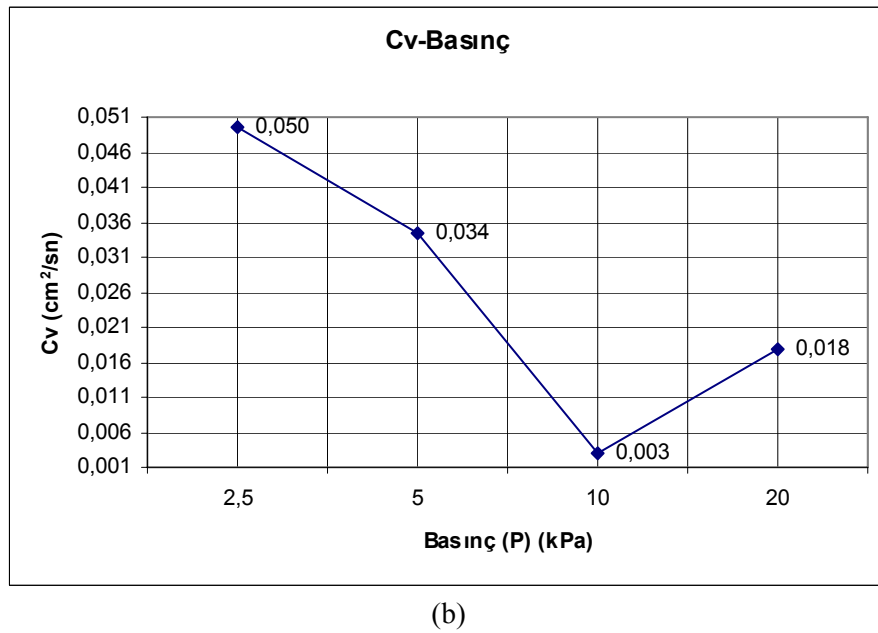
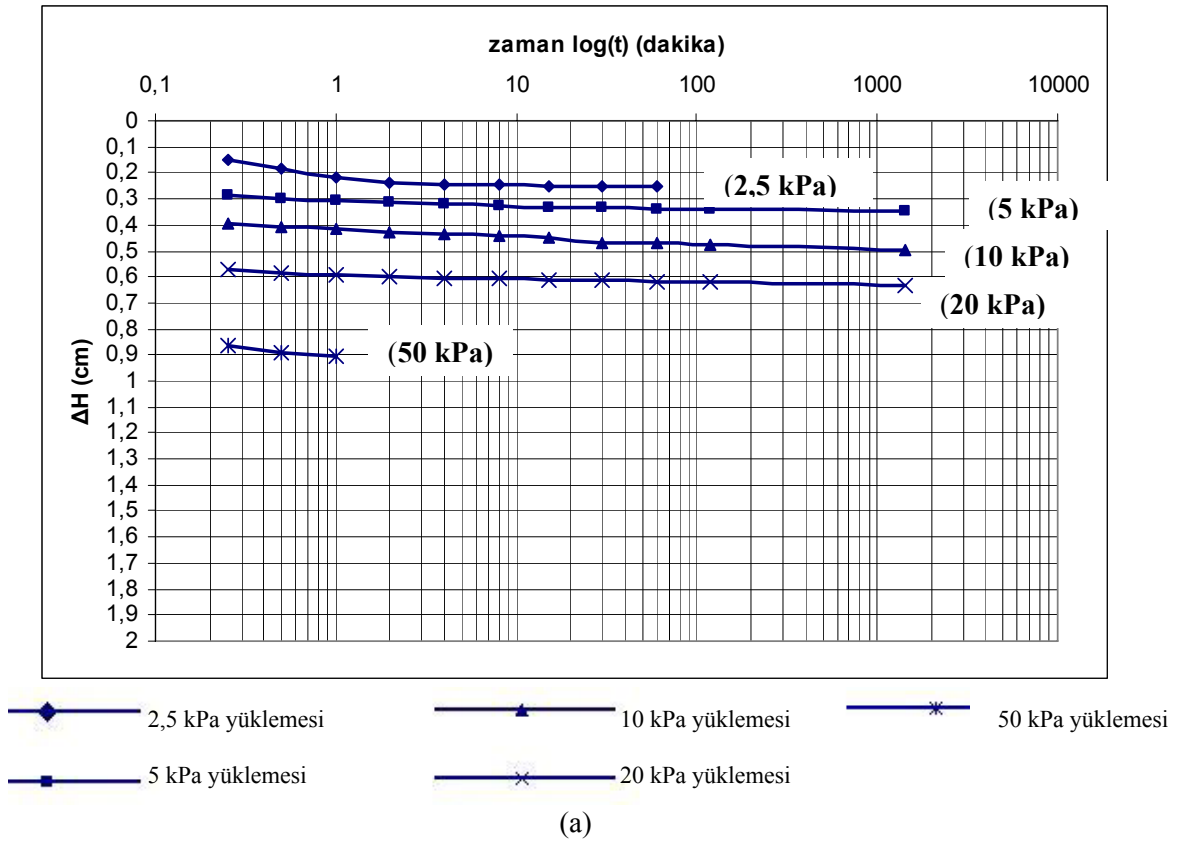
$$C_v = 0,197 \times \frac{(2H/2)^2}{t_{50}}$$

EkA-1

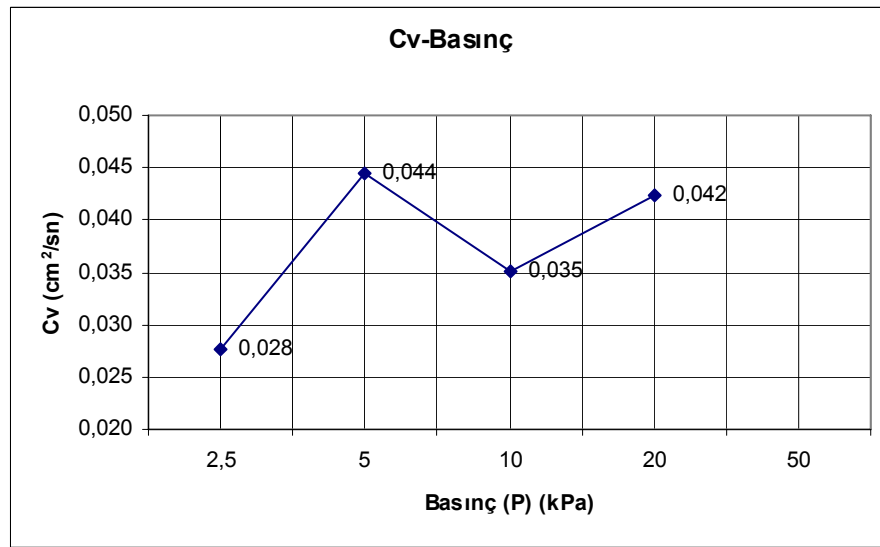
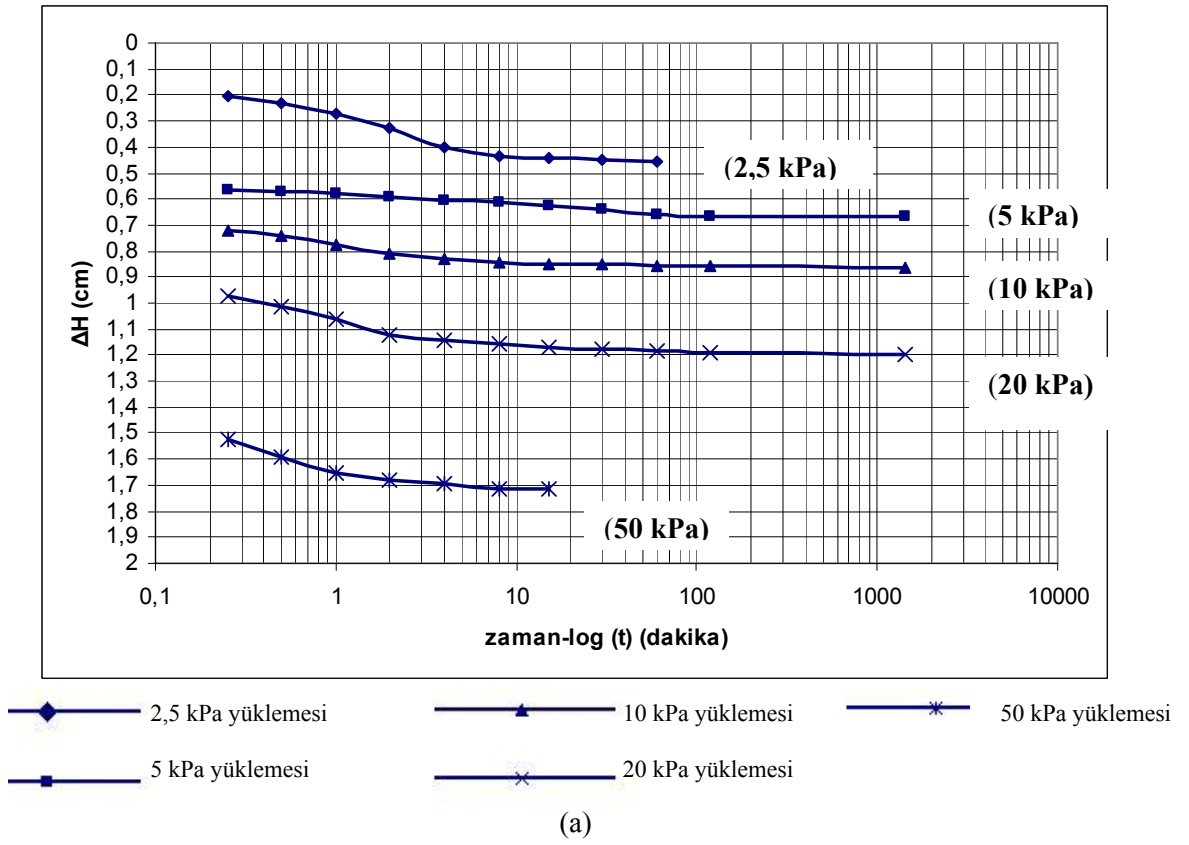
Bu yöntem kullanılarak deneyler sırasında uygulanan her gerilme anındaki konsolidasyon katsayısı değerleri bulunmuştur. Ayrıca elde edilen konsolidasyon katsayısı değerlerinde yararlanılarak EkA-2 denklemi kullanılarak deneylerdeki her gerilme anındaki permeabilite katsayıları bulunmuştur.

$$k = C_v \times \frac{(e_0 - e_1)}{\Delta \sigma \times (1 + e_0)} \times \gamma_w$$

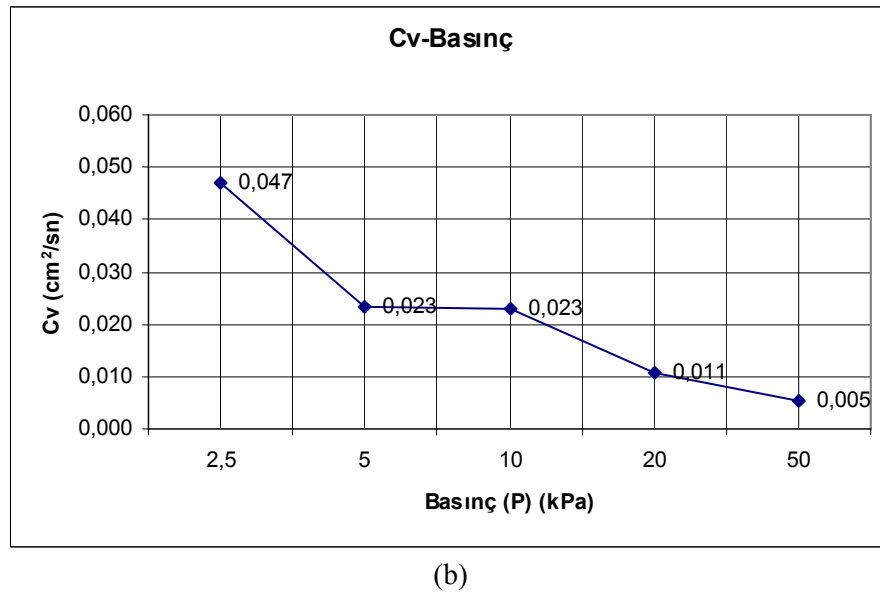
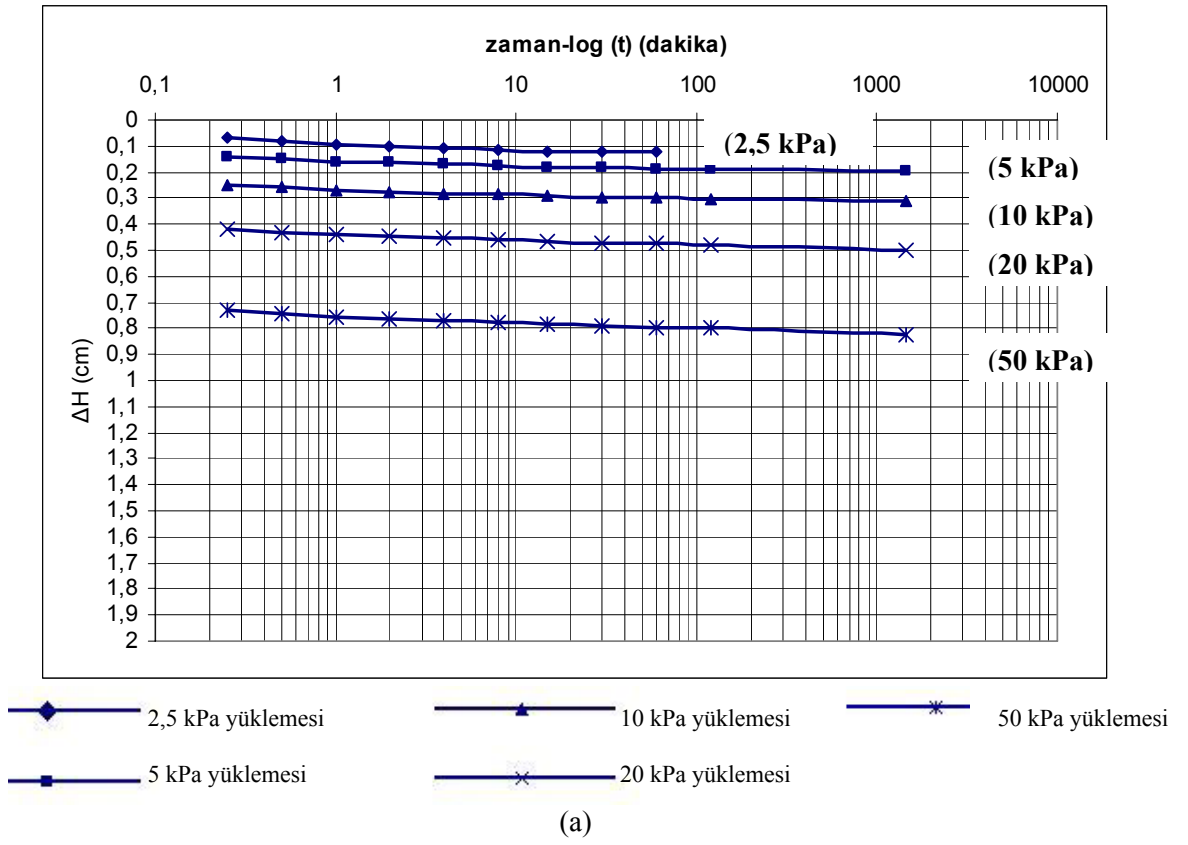
EkA-2



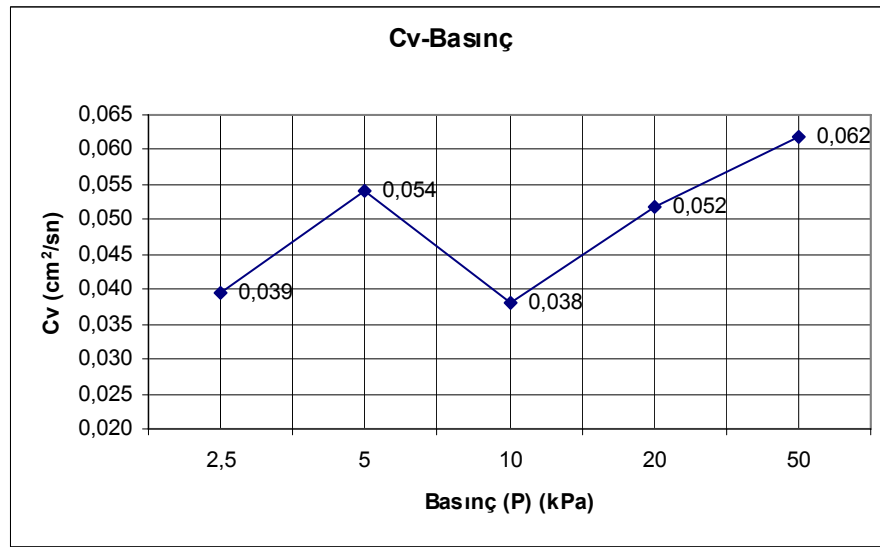
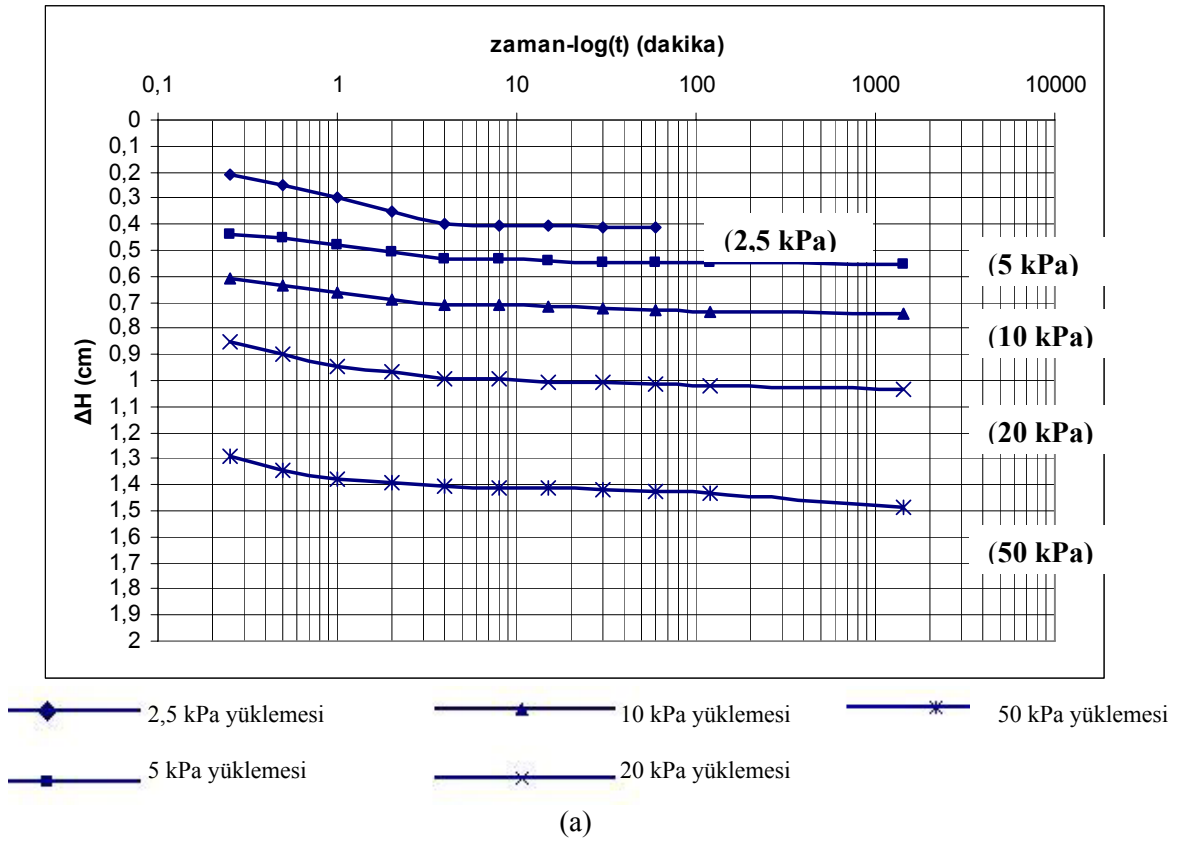
Şekil A.1 B1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



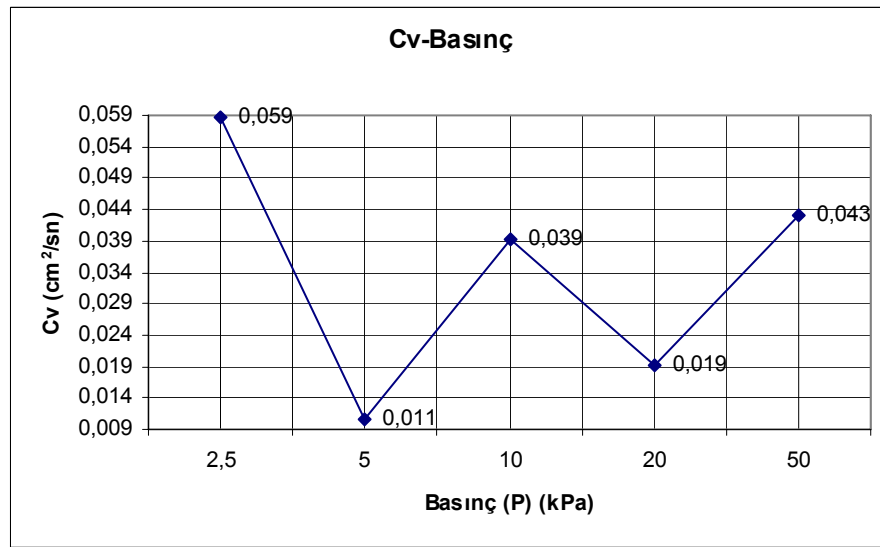
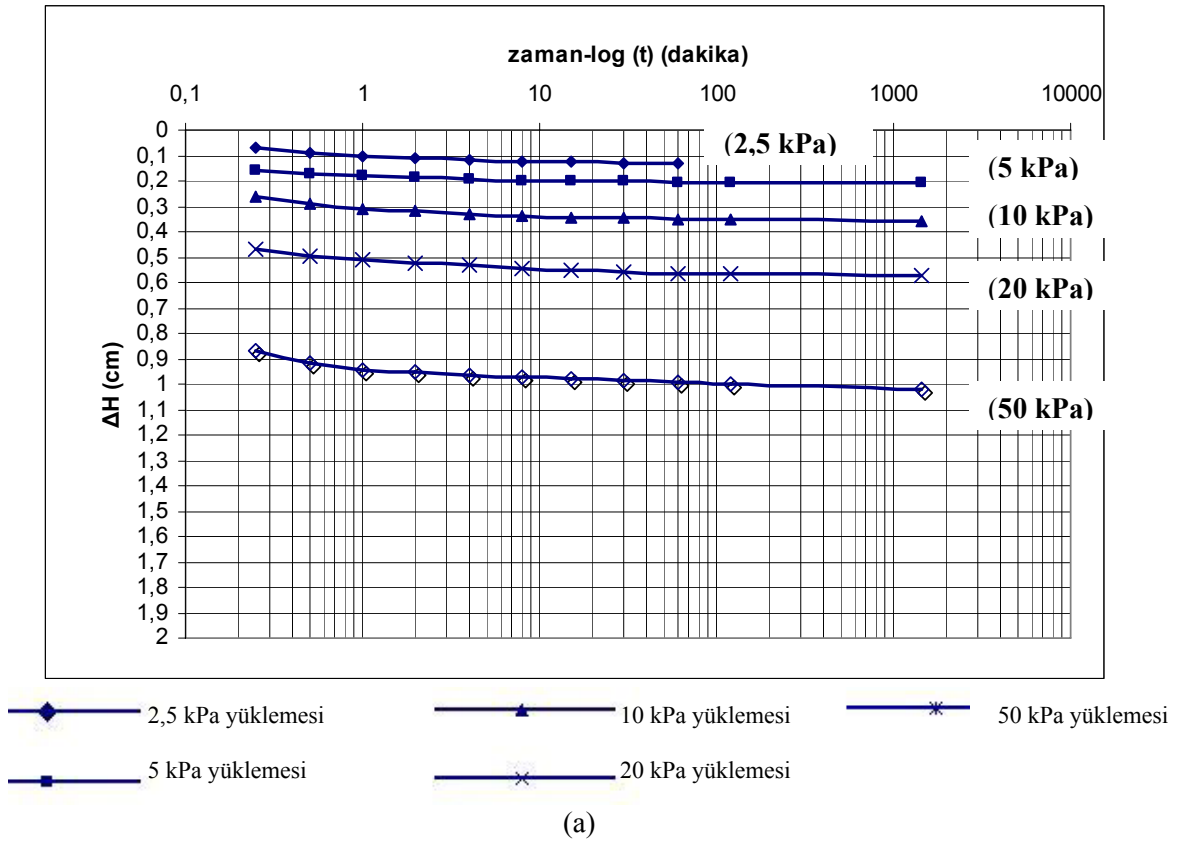
Şekil A.2 B2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



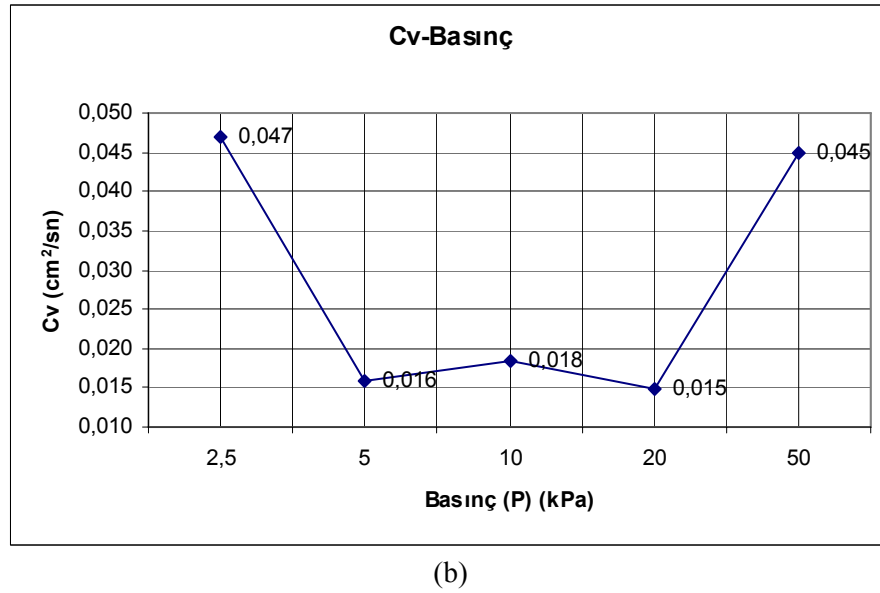
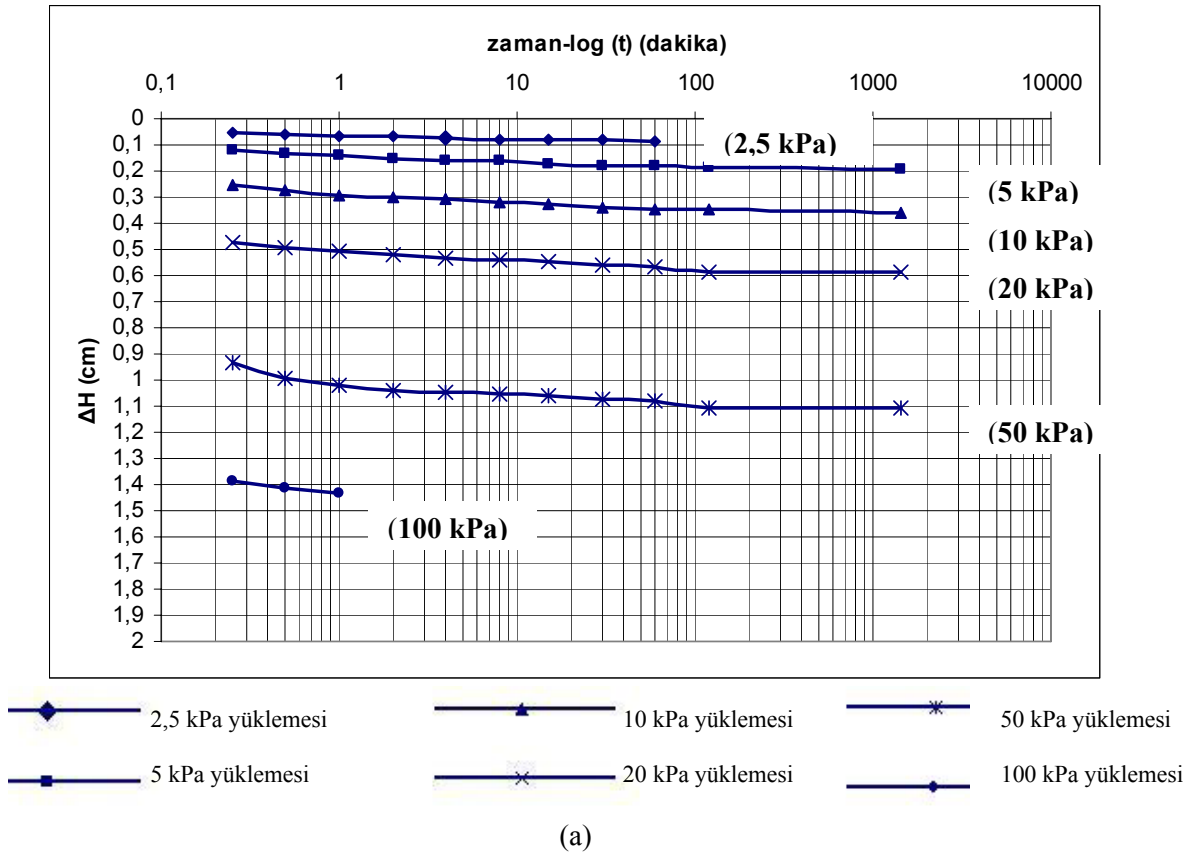
Şekil A.3 B3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



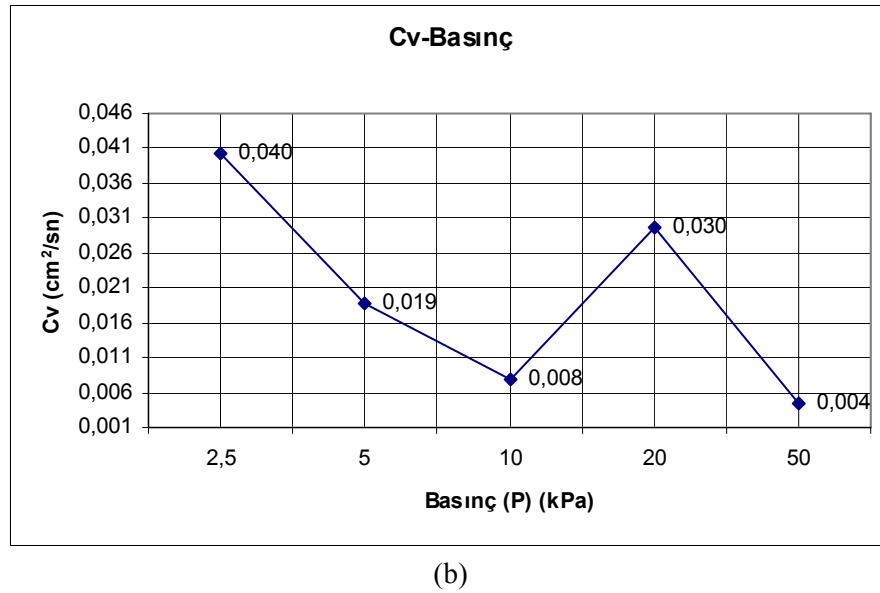
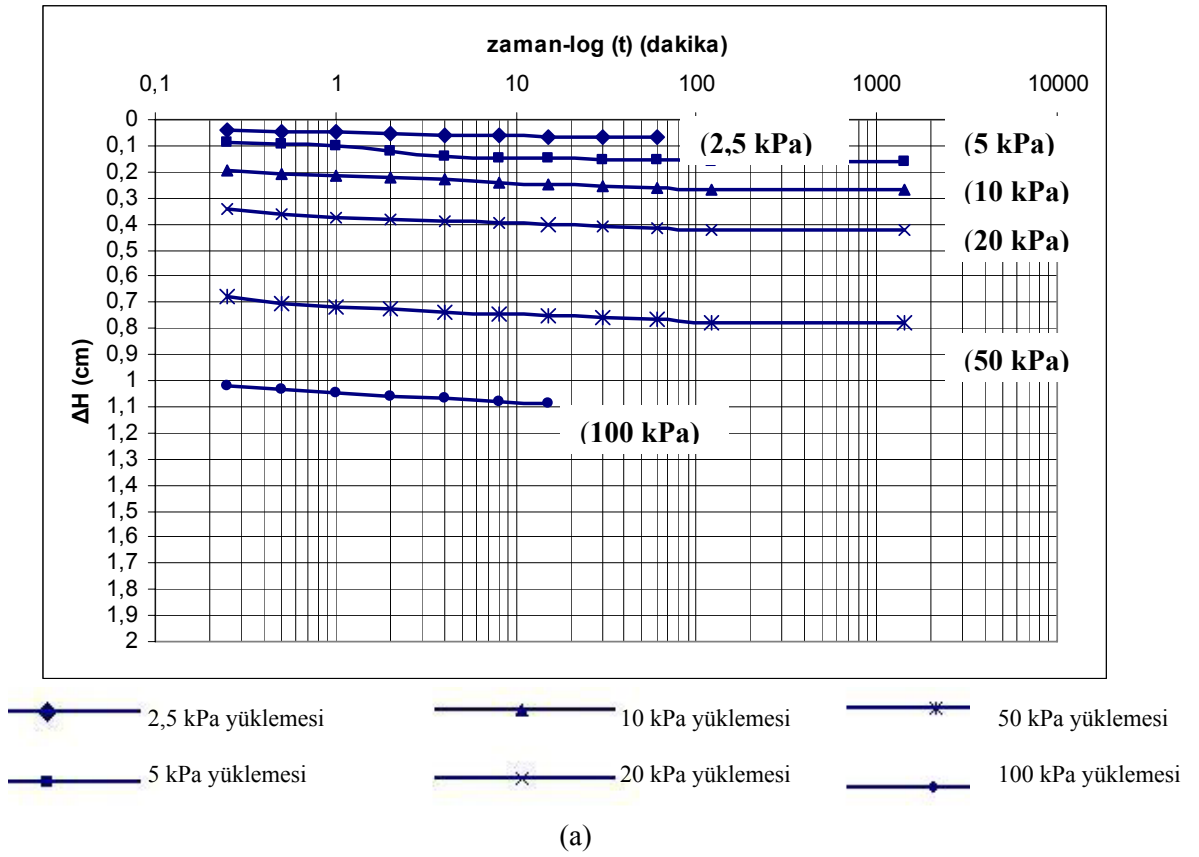
Şekil A.4 B4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



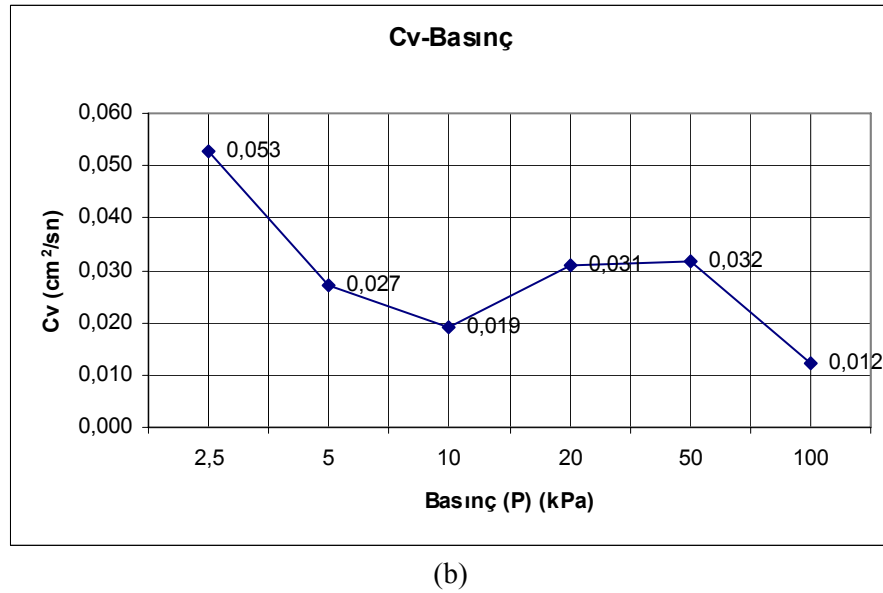
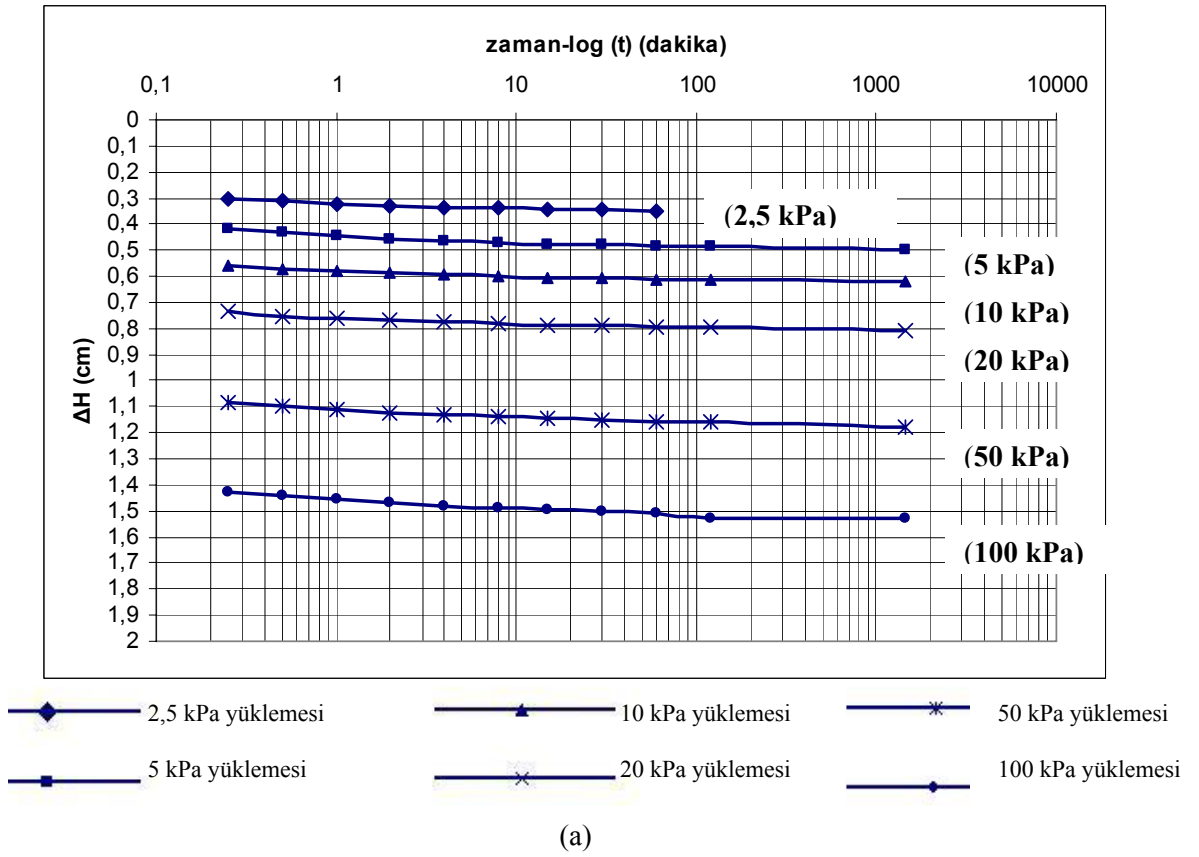
Şekil A.5 B5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



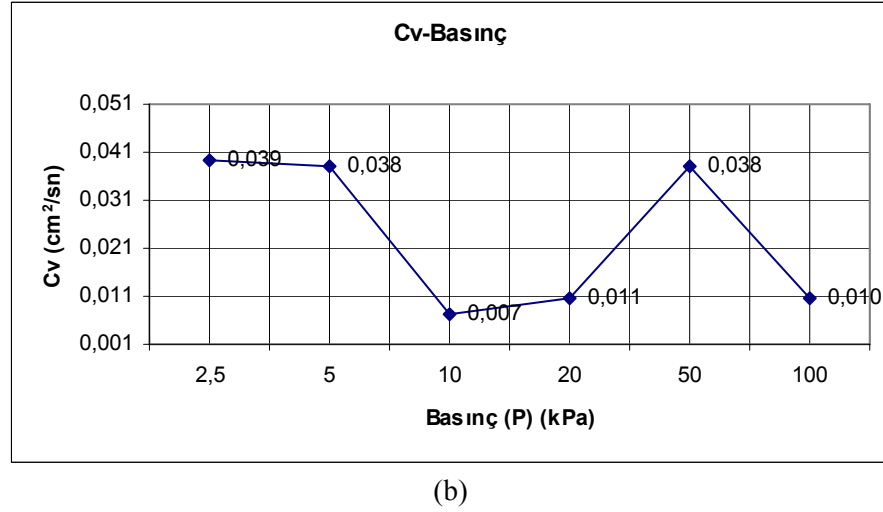
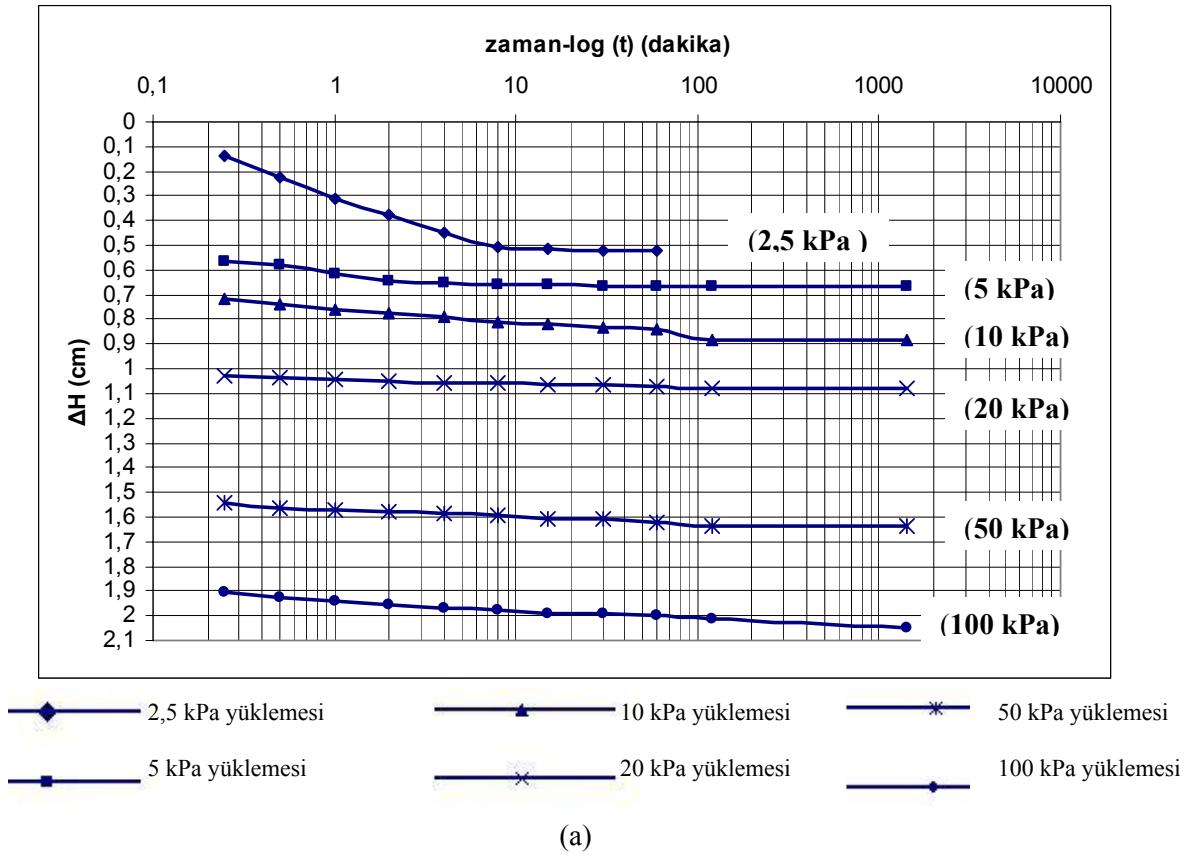
Şekil A.6 C1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



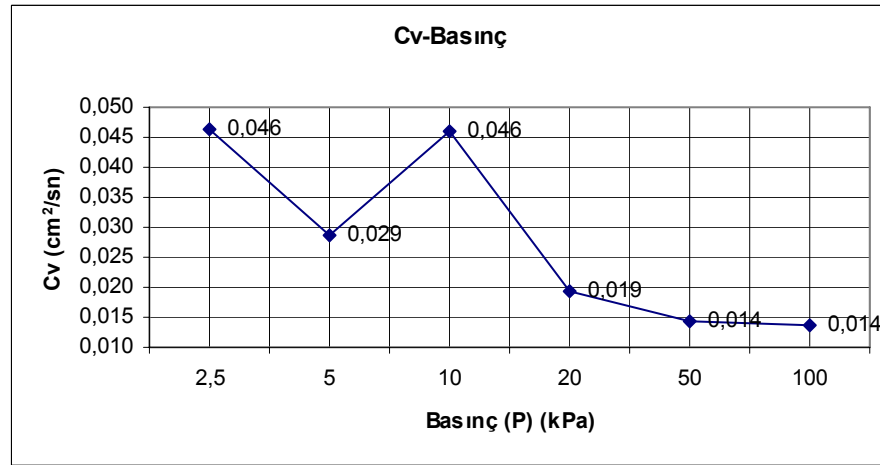
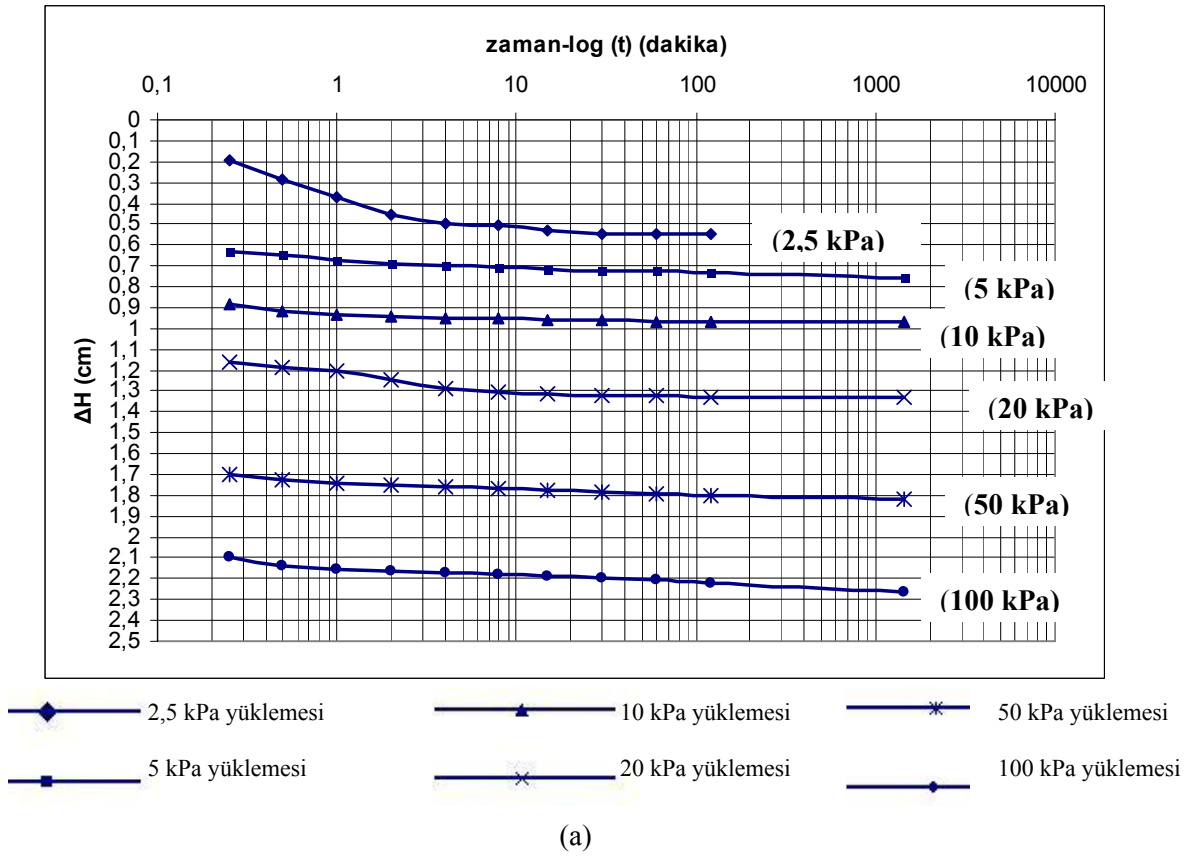
Şekil A.7 C2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



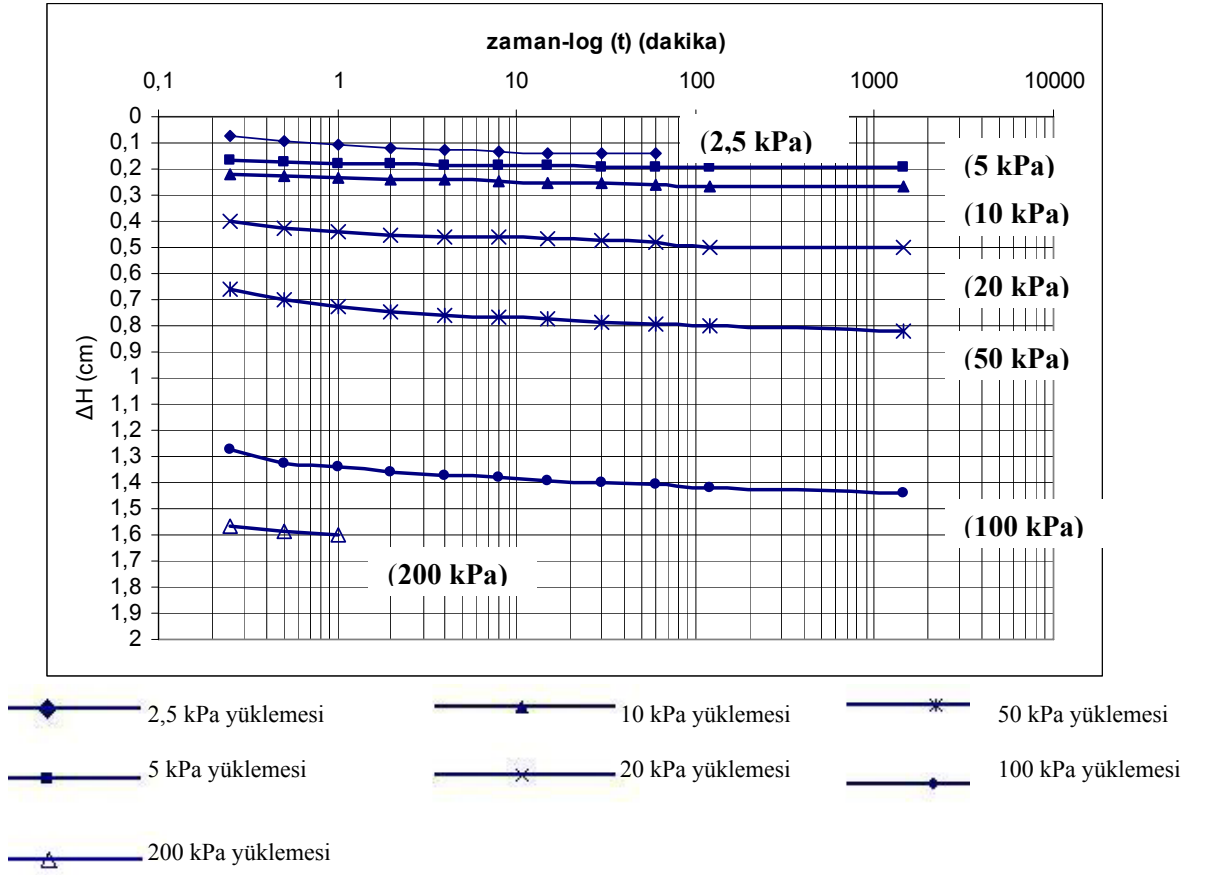
Şekil A.8 C3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



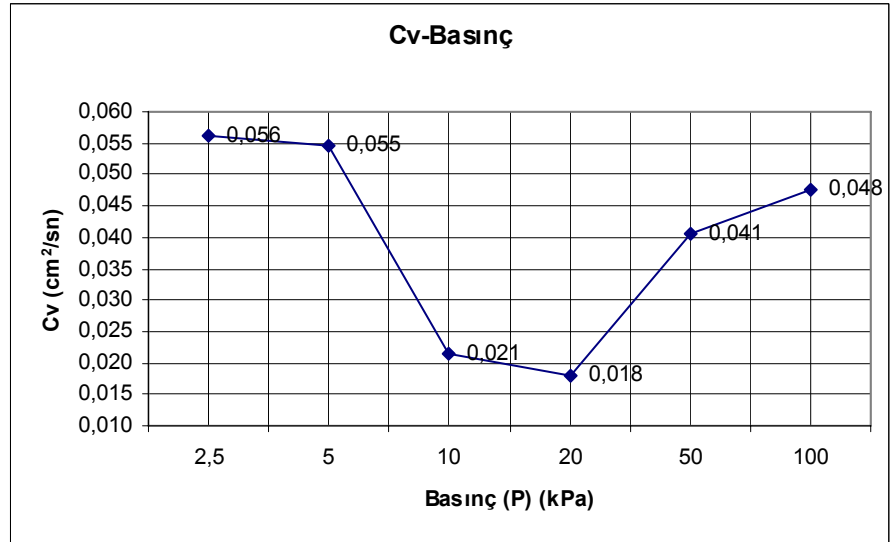
Şekil A.9 C4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



Şekil A.10 C5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)

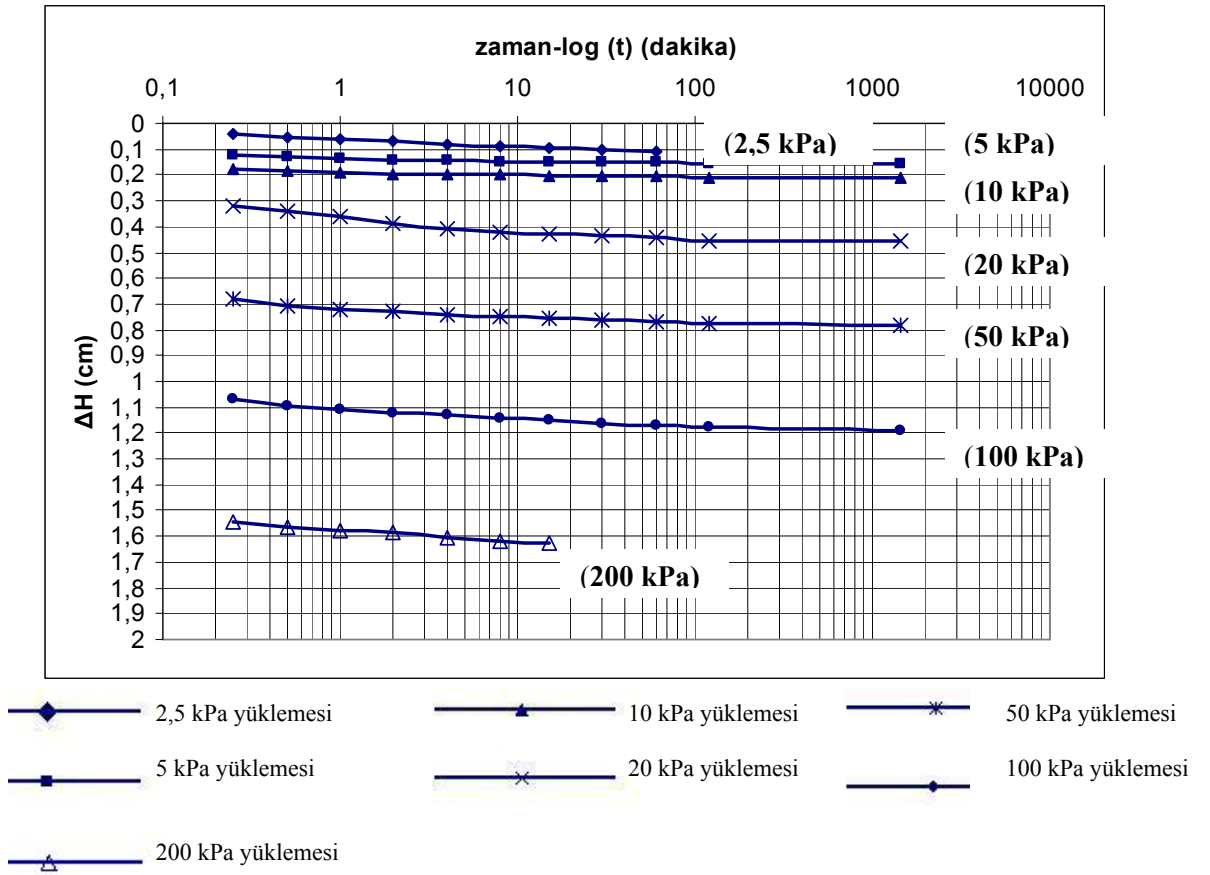


(a)

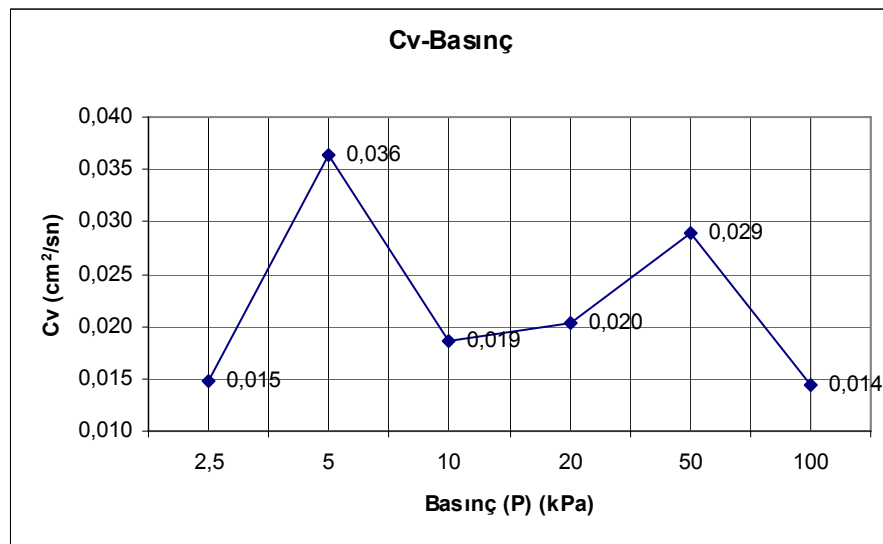


(b)

Şekil A.11 D1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)

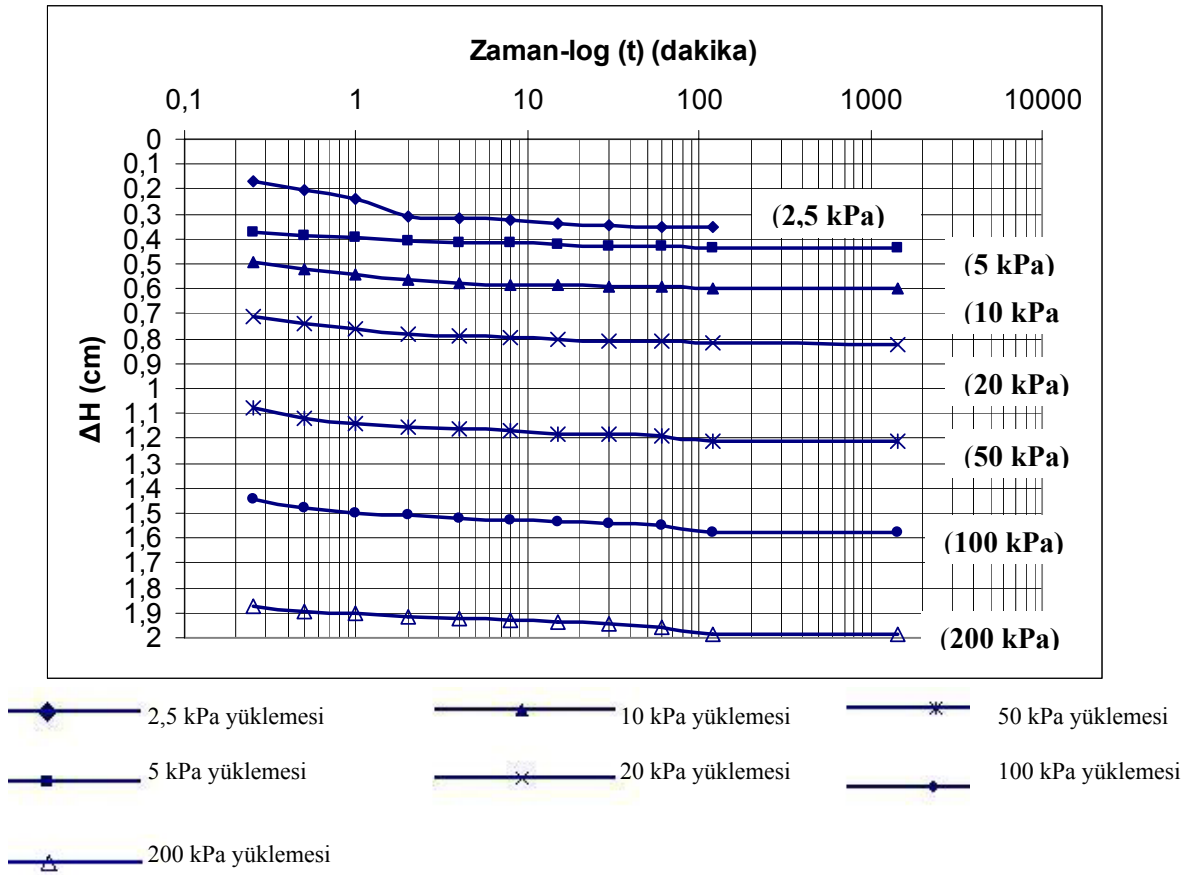


(a)

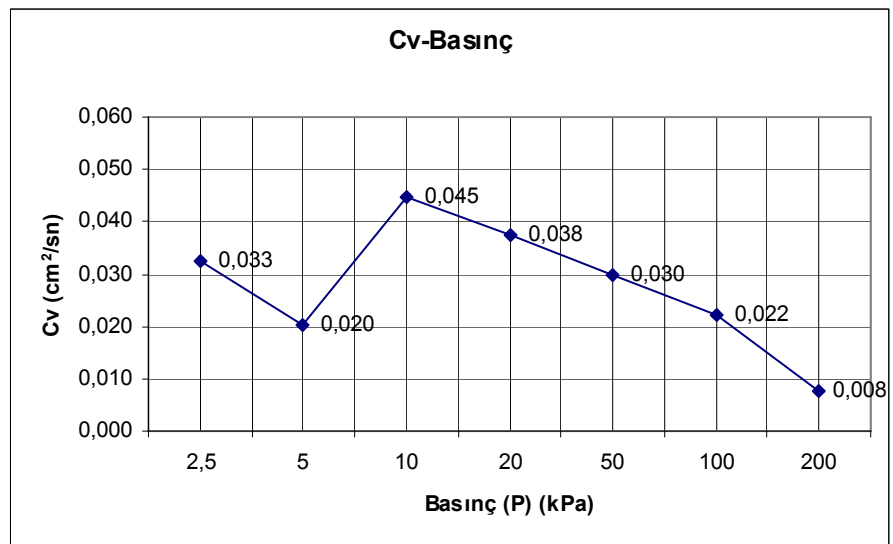


(b)

Şekil A.12 D2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)

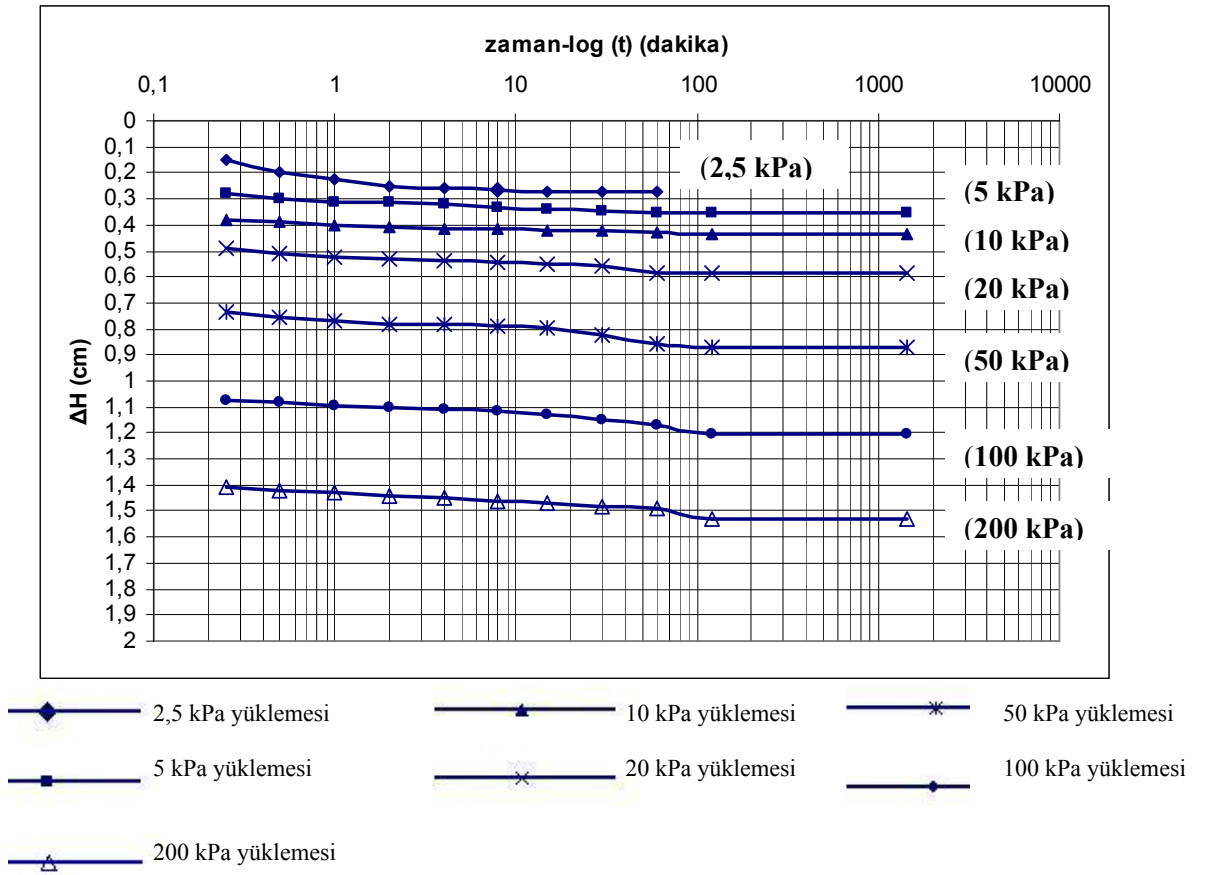


(a)

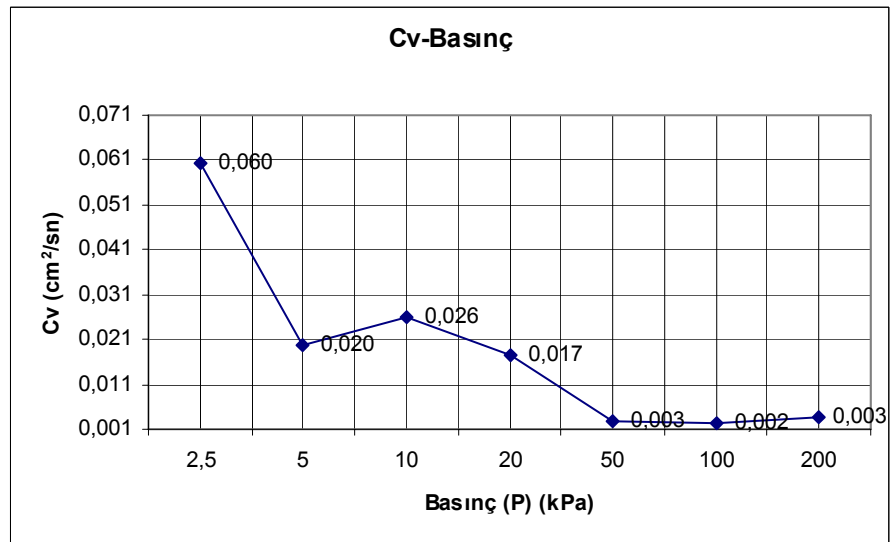


(b)

Şekil A.13 D3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)

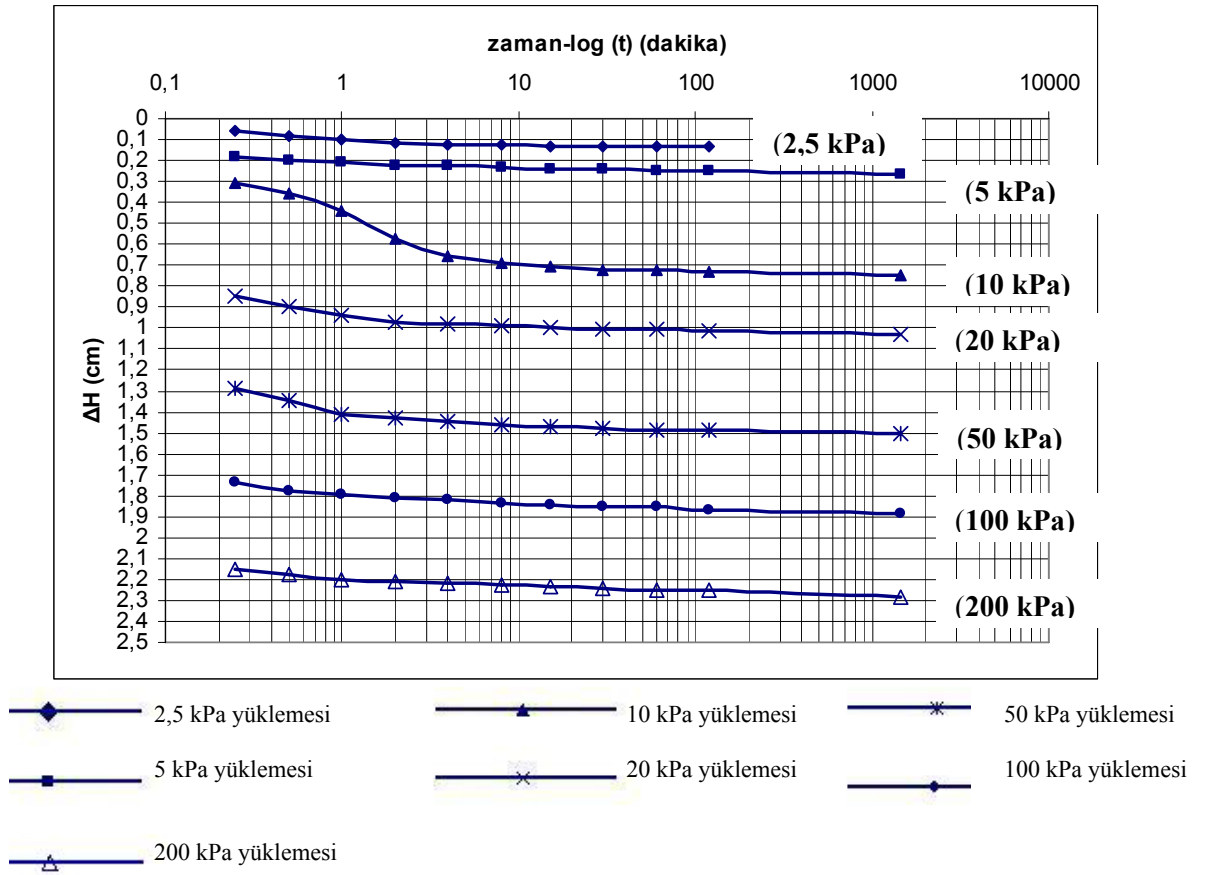


(a)

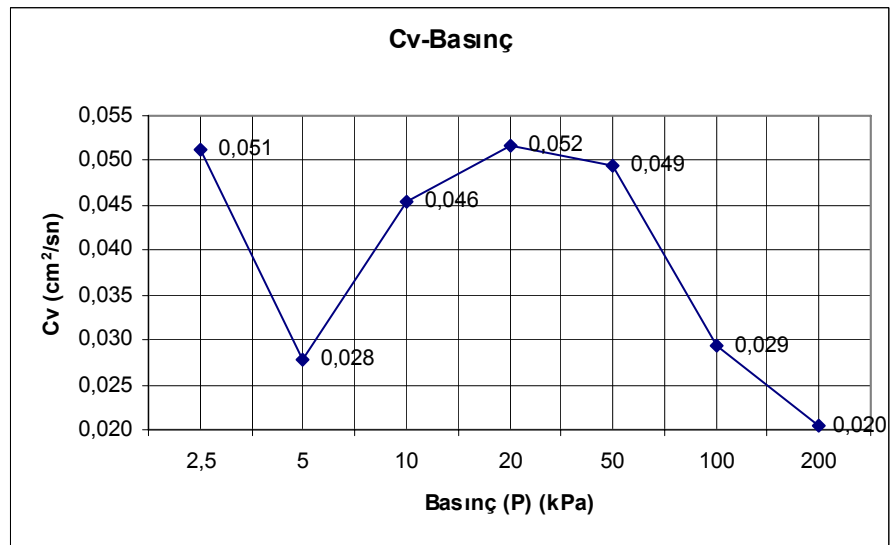


(b)

Şekil A.14 D4 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)

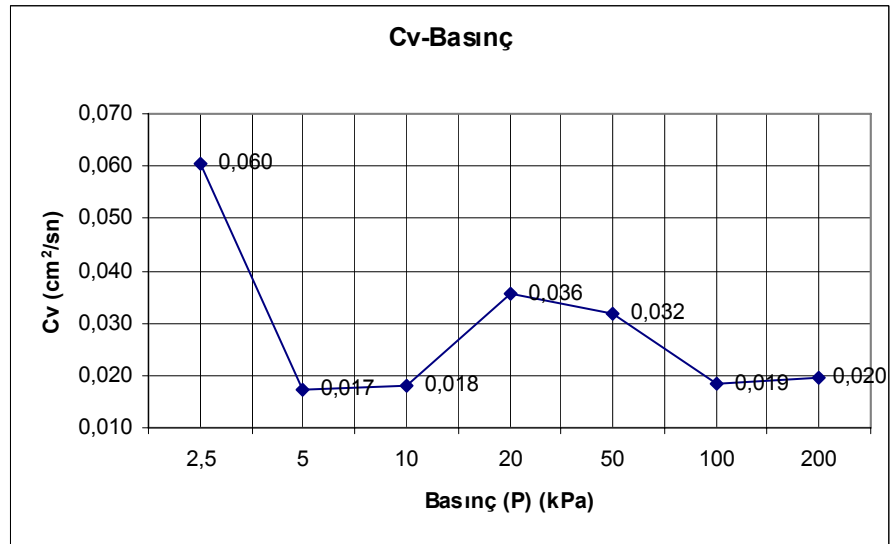
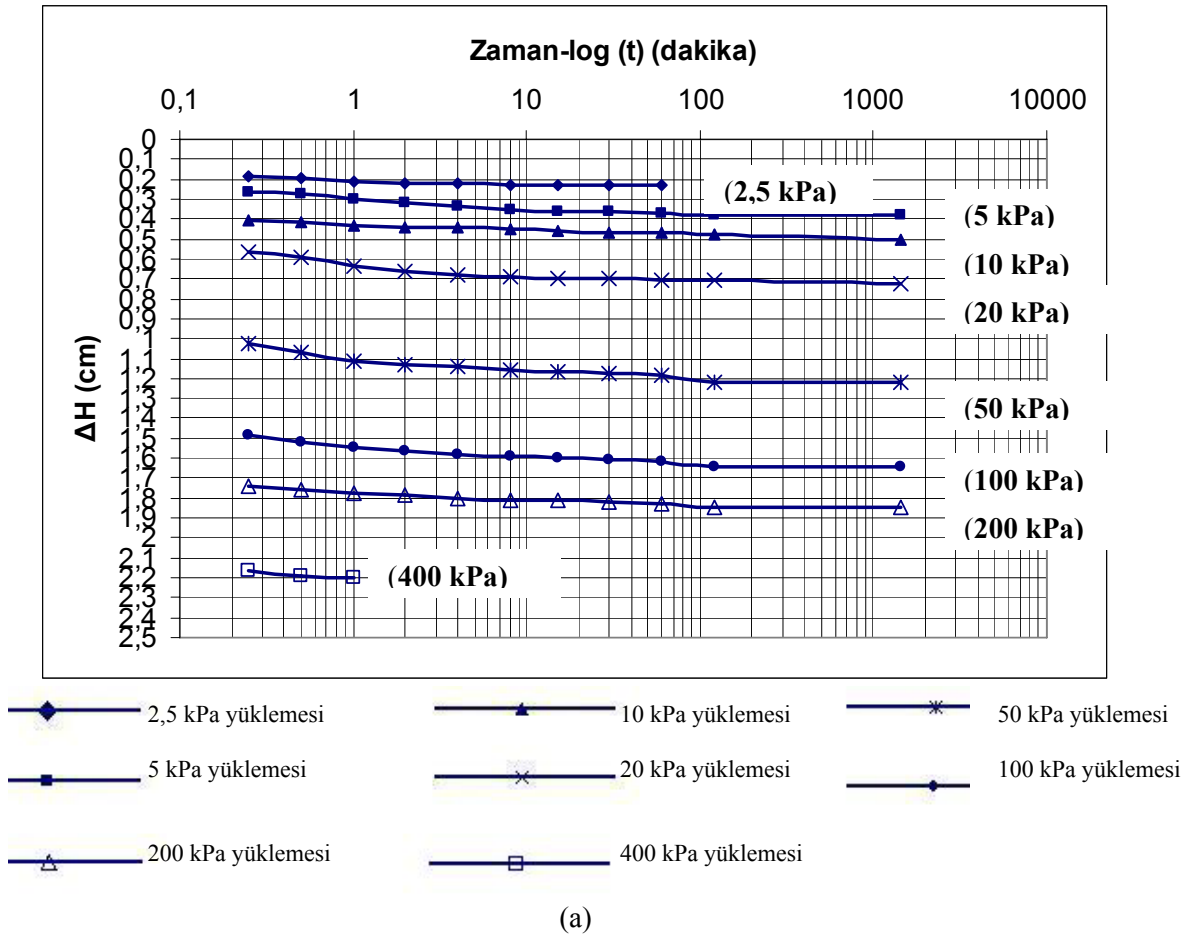


(a)

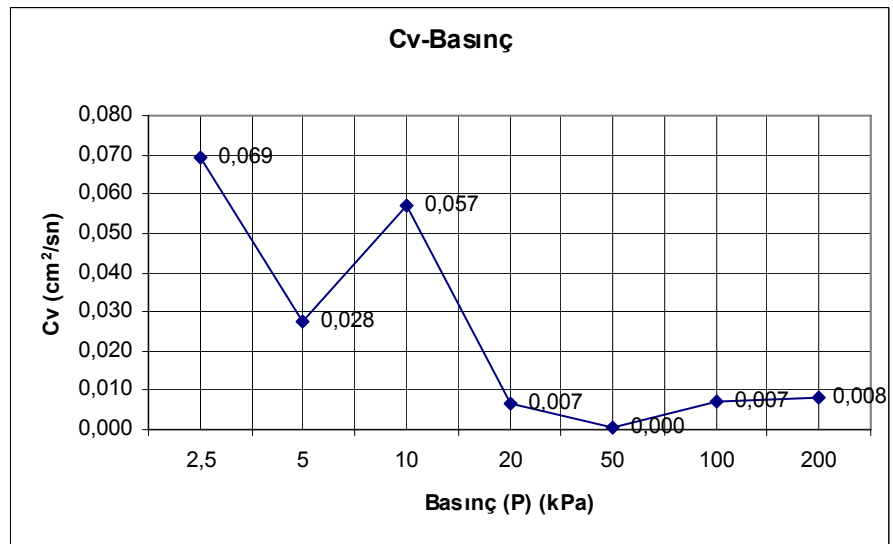
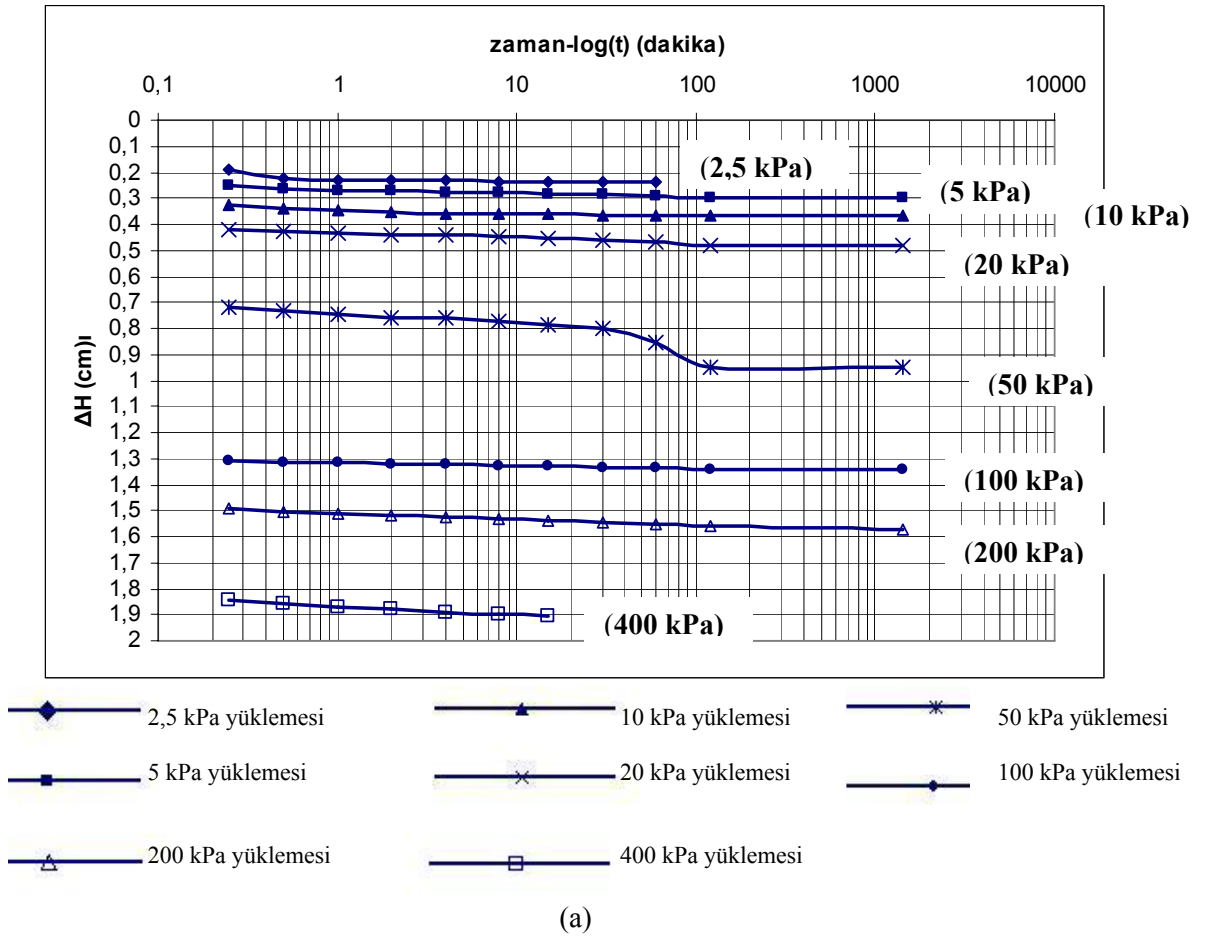


(b)

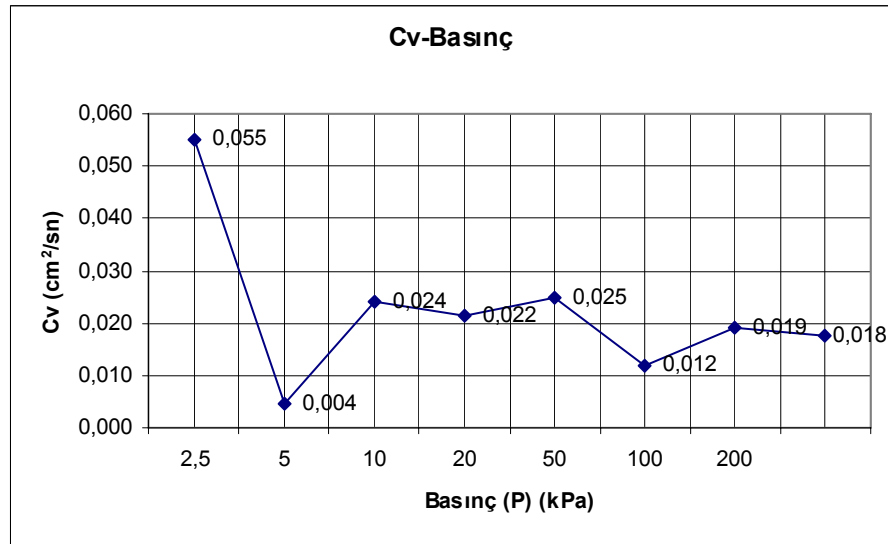
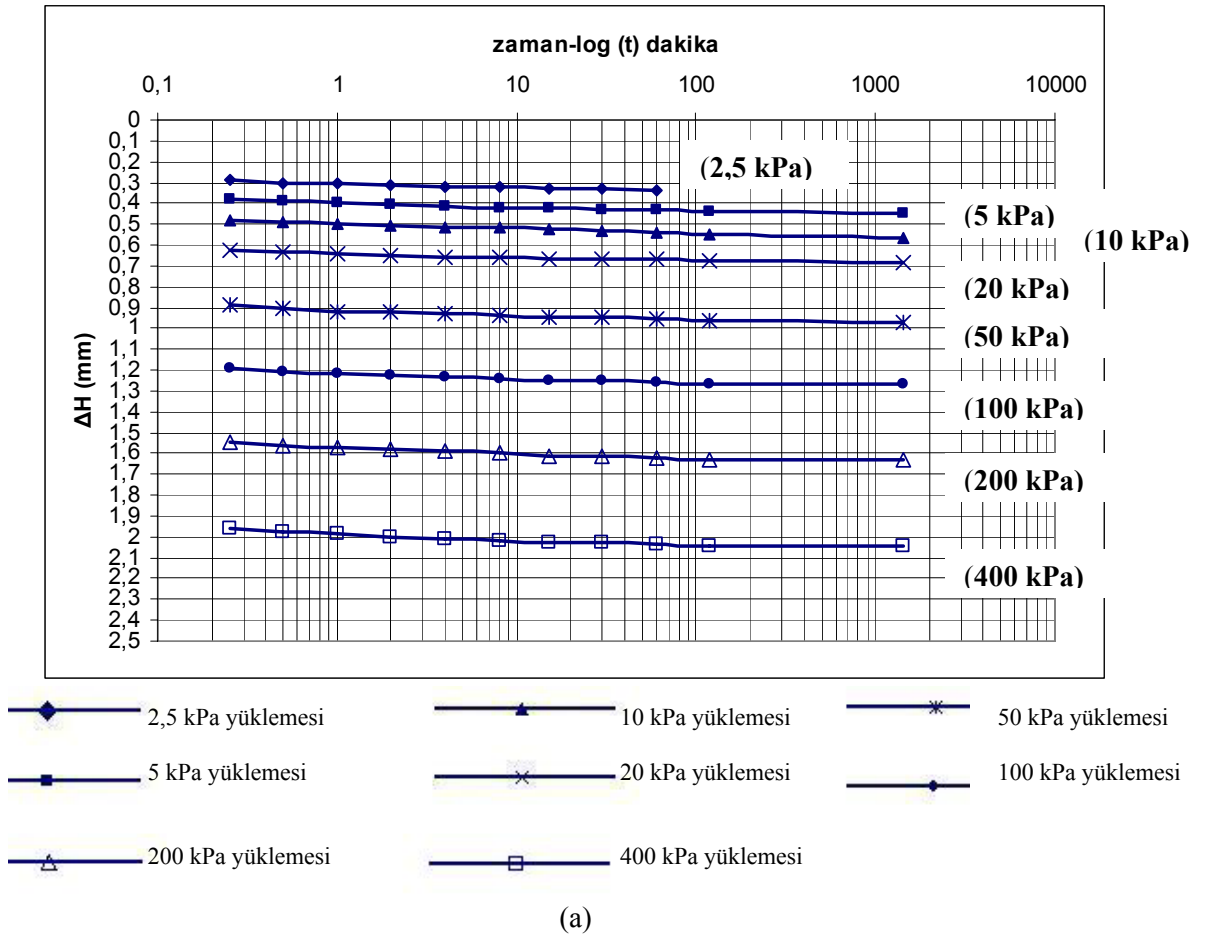
Şekil A.15 D5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



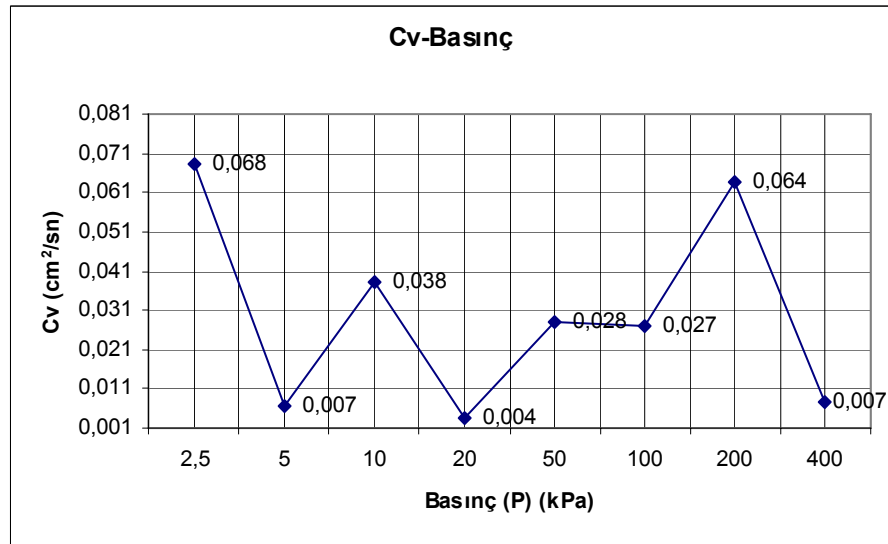
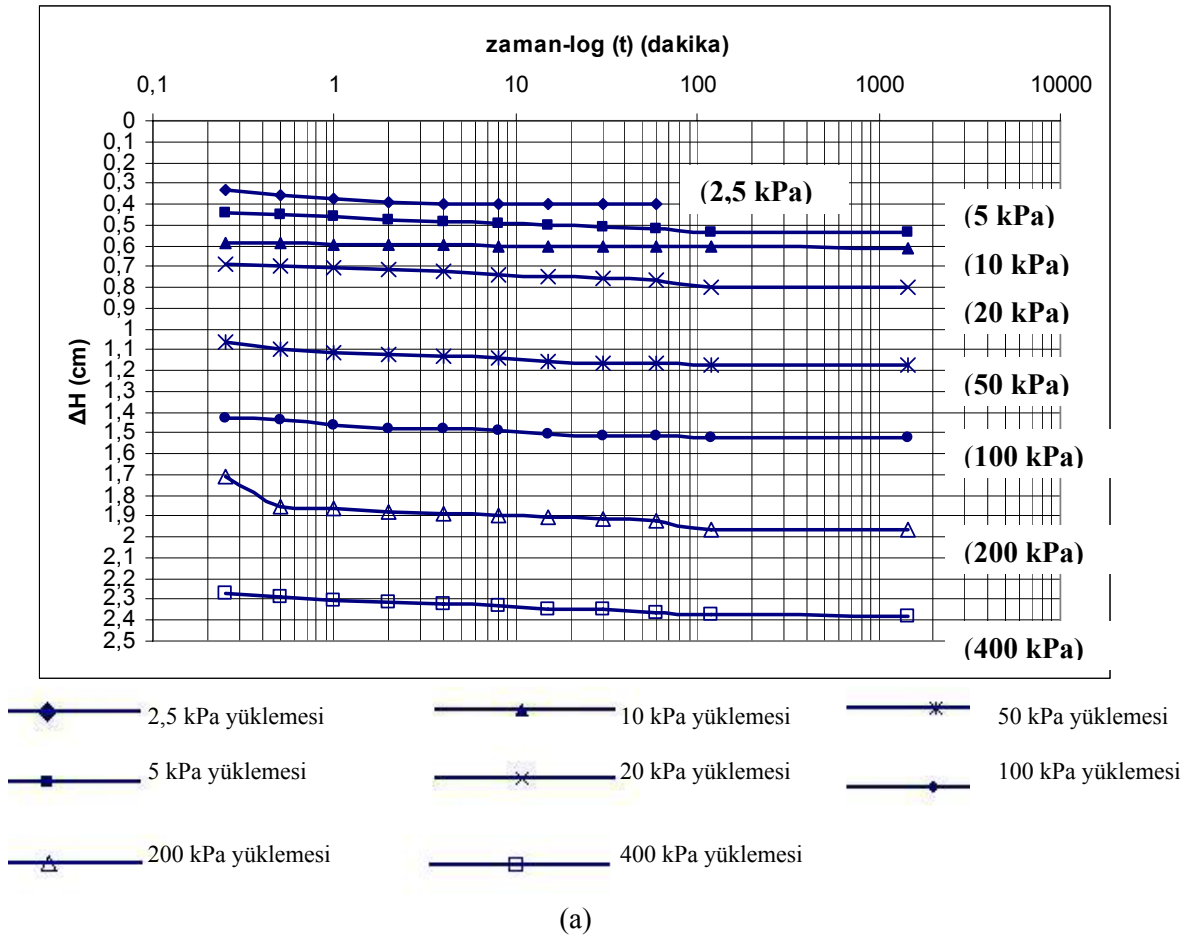
Şekil A.16 E1 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



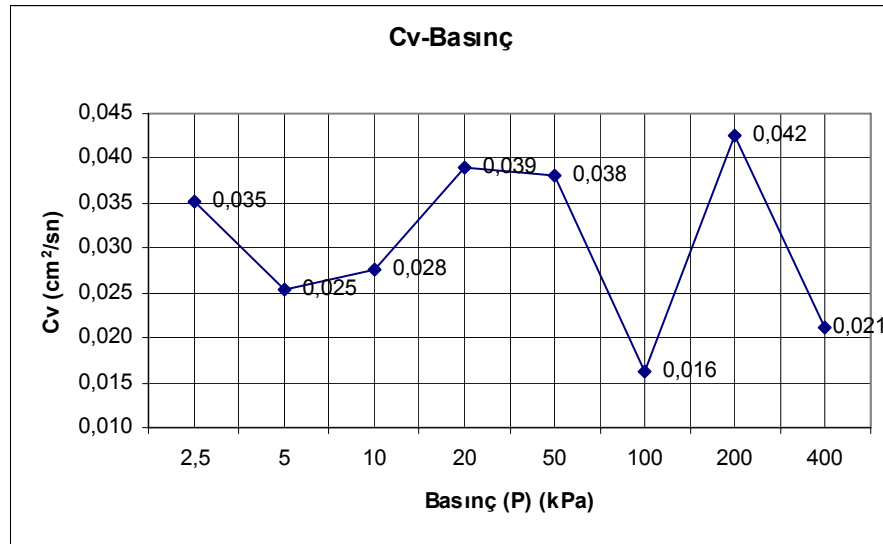
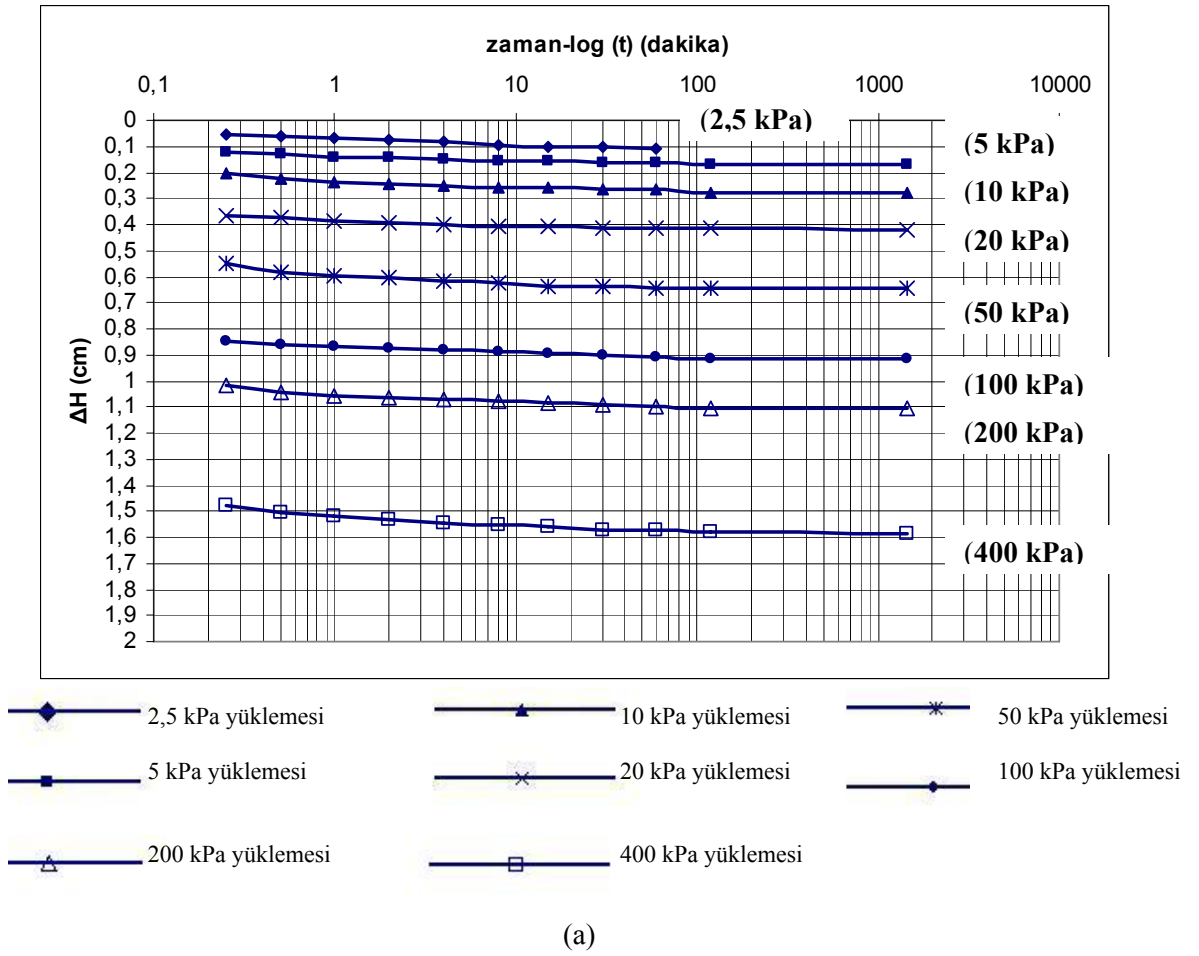
Şekil A.17 E2 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



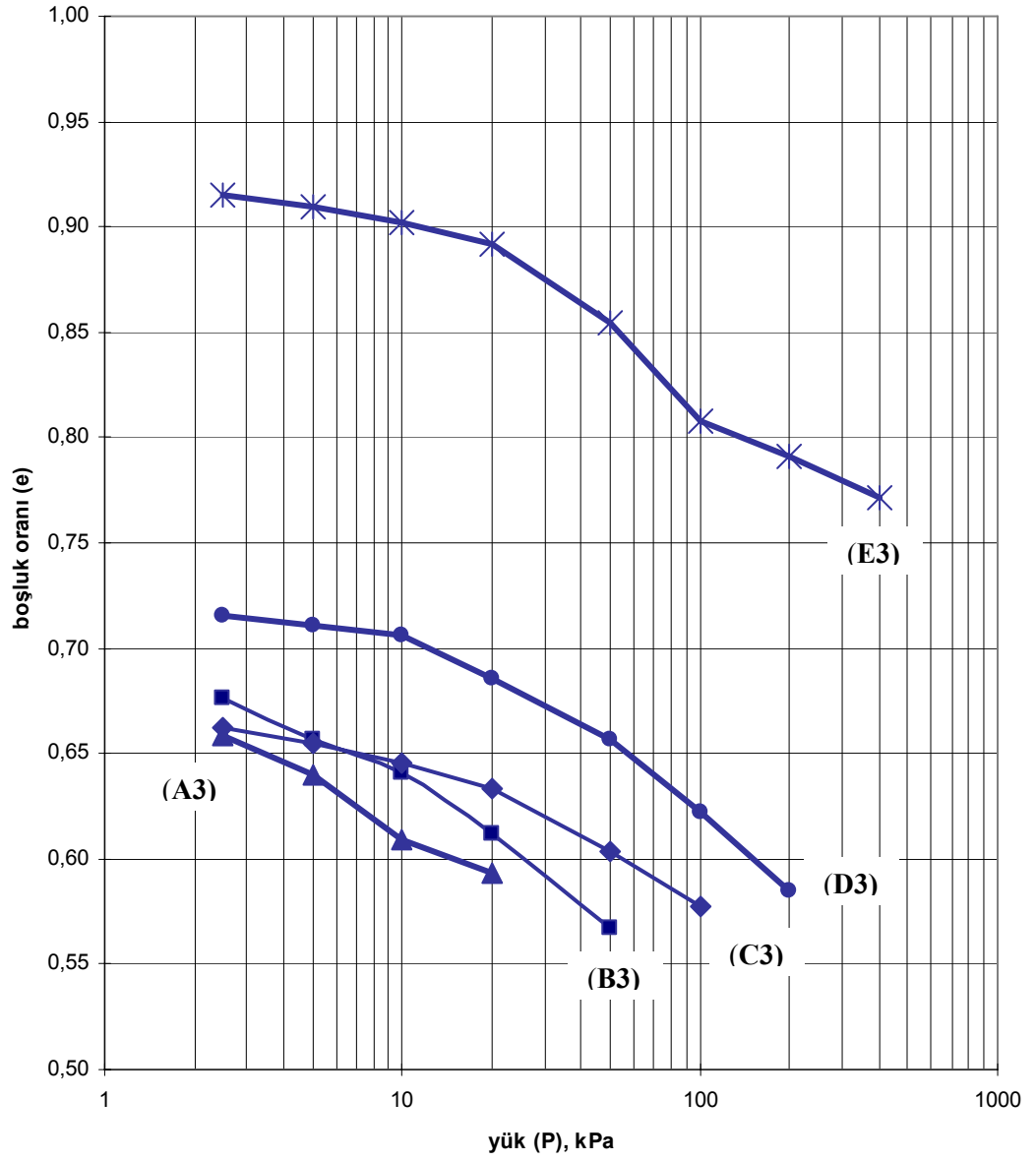
Şekil A.18 E3 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



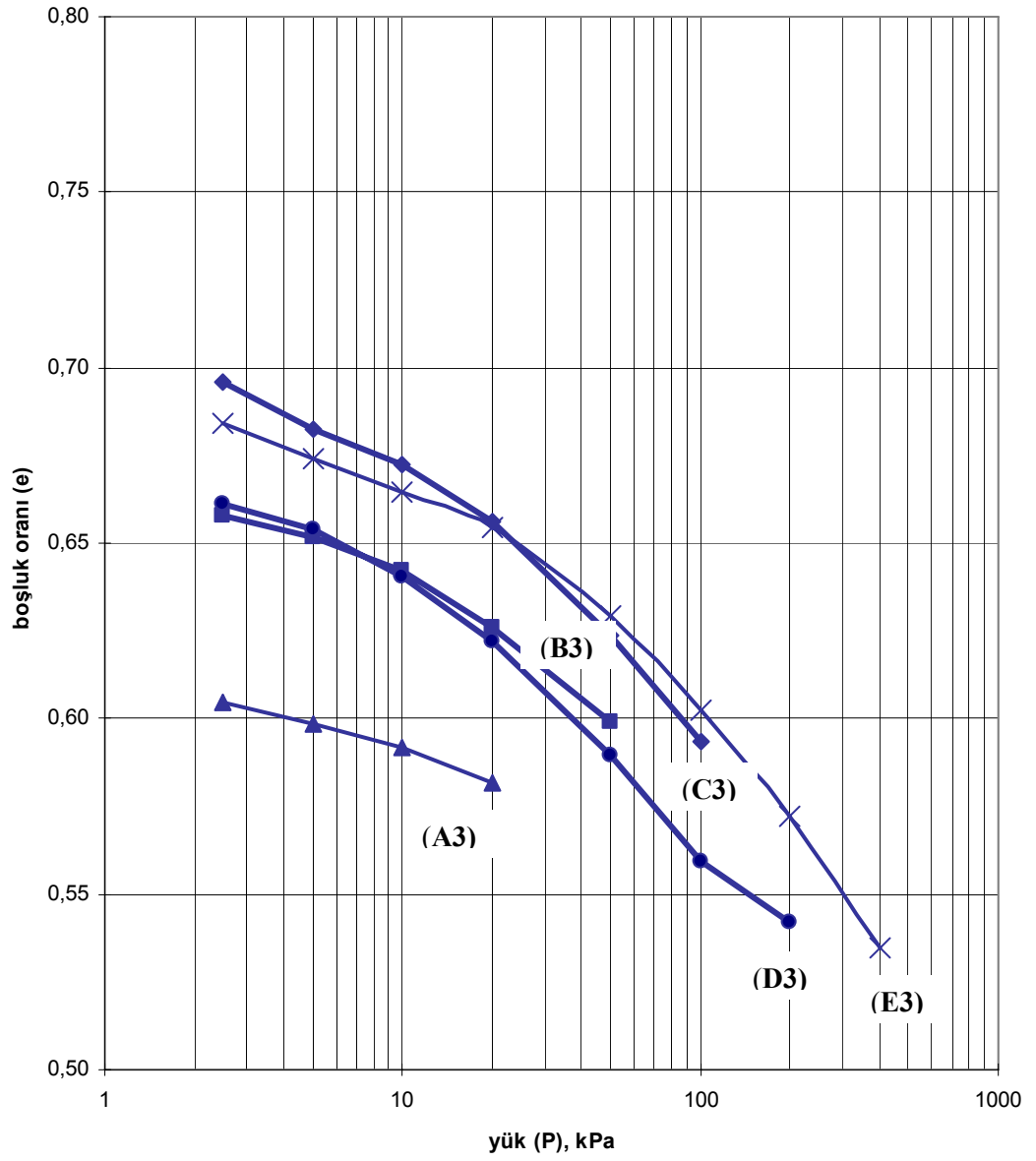
Şekil A.19 E4konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



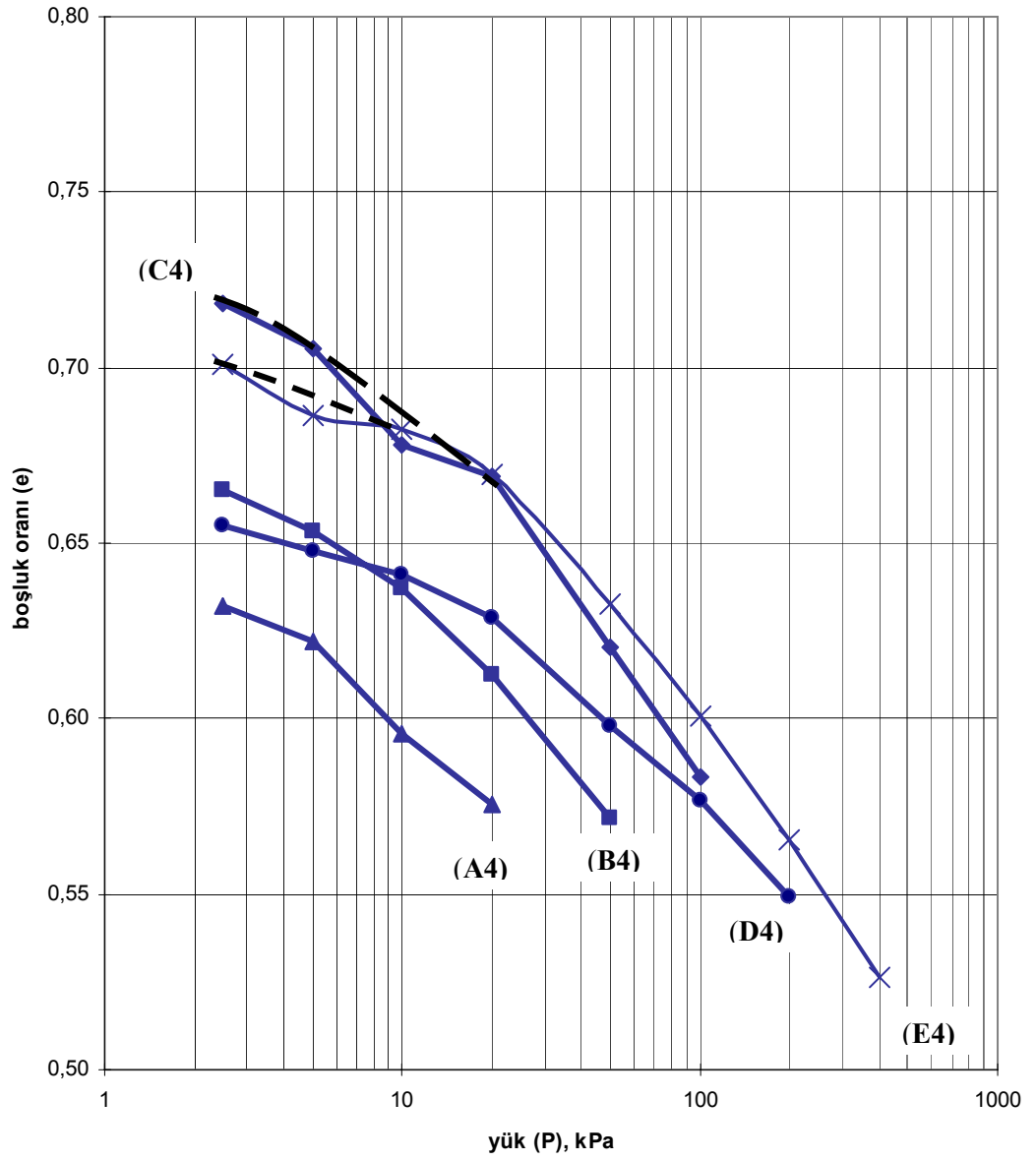
Şekil A.20 E5 konsolidasyon deneyine ait grafikler (a) Konsolidasyon deneyine ait tüm ΔH -log (t) grafikleri, (b) Konsolidasyon deneyine ait konsolidasyon katsayıları (C_v)



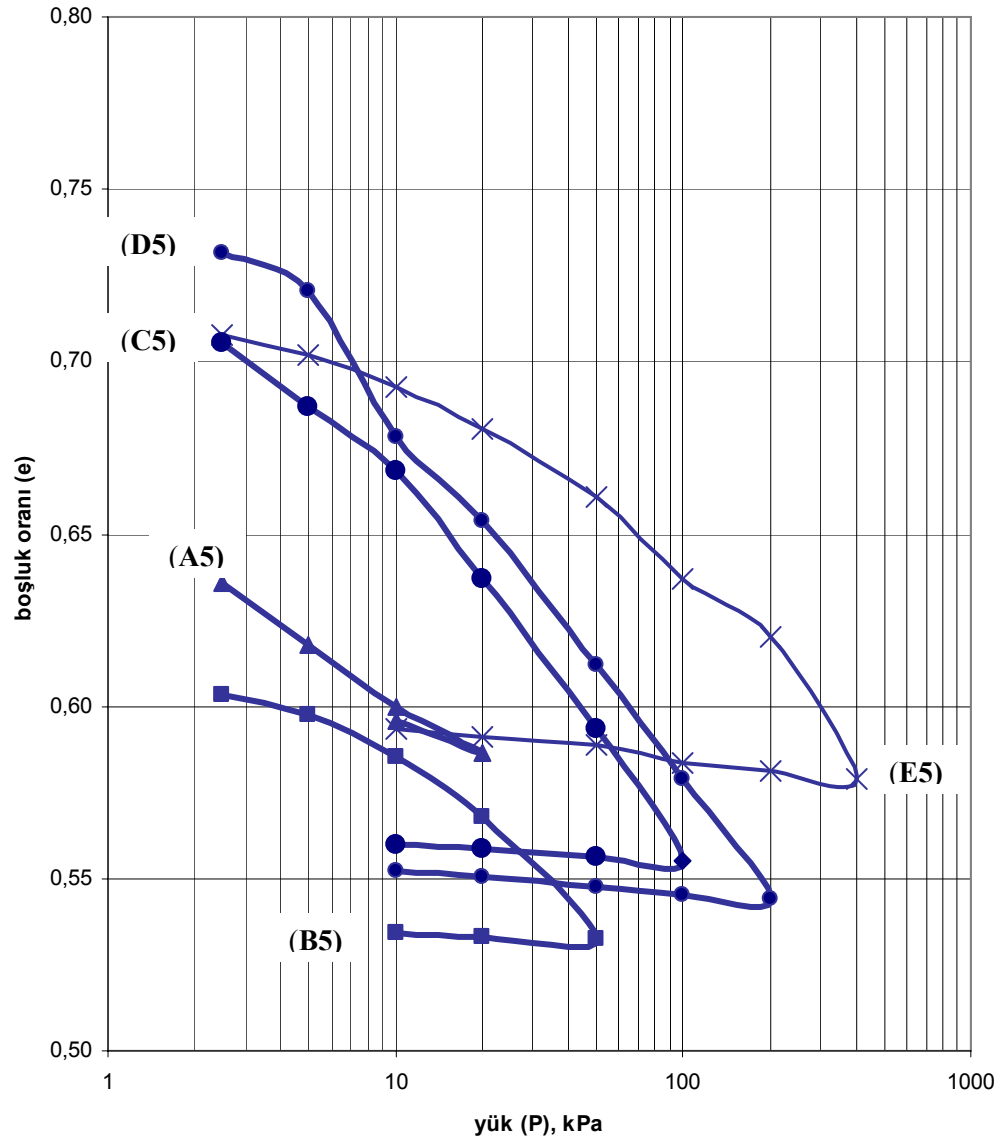
Şekil A.21 Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 15 dakika süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği



Şekil A.22 Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 24 saat süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği



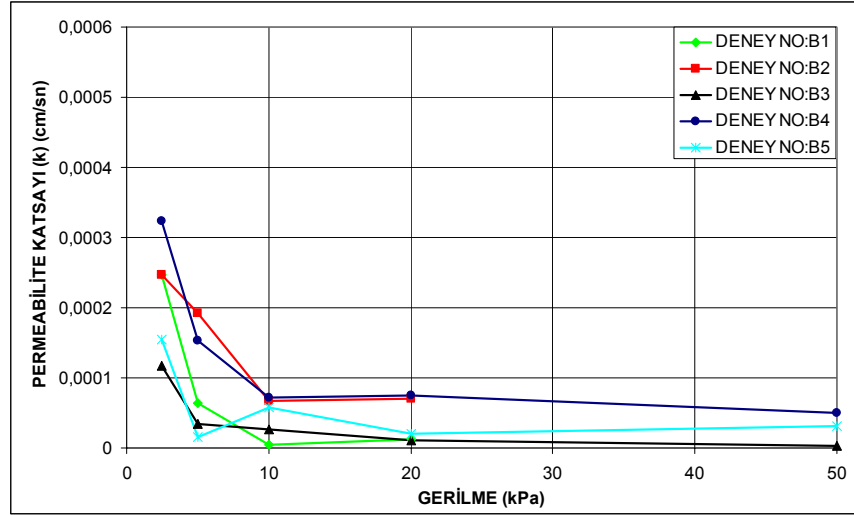
Şekil A.23 Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasında 72 saat süreyle bekletilmiş numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği



Şekil A.24 Maksimum yükleme aşamasına kadar konsolide edilmiş fakat maksimum yükleme aşamasından sonra boşaltma uygulanmış numunelere ait boşluk oranı-basınç “e-logp” grafiği

Tablo A.1 B grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri

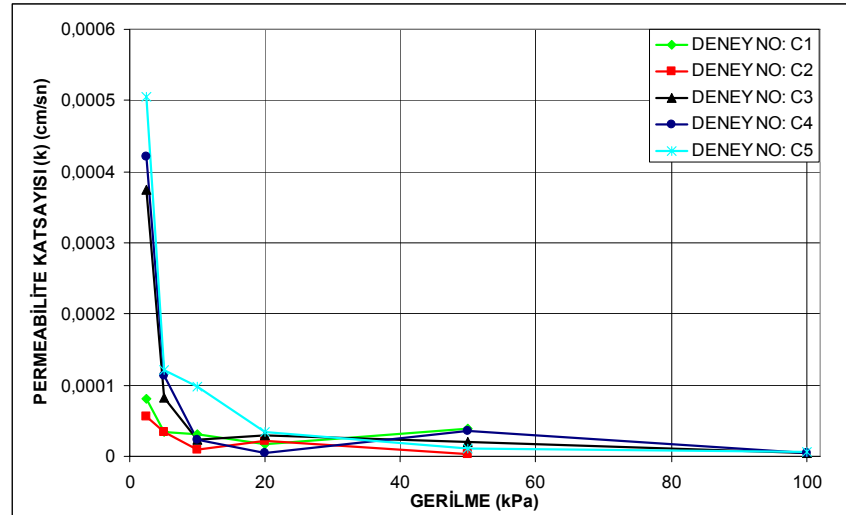
Deney No	Cv	γ_w	$1+e_0$	Δe	ΔP	a_v	m_v	k
B1 (2,5 kPa)	0,049699	1	1,672	0,020823	2,5	0,008329	0,004982	0,000248
B1 (5 kPa)	0,034387	1	1,672	0,007758	2,5	0,003103	0,001856	6,38E-05
B1 (10 kPa)	0,003015	1	1,672	0,012086	5	0,002417	0,001446	4,36E-06
B1 (20 kPa)	0,017803	1	1,672	0,011269	10	0,001127	0,000674	1,2E-05
B2 (2,5 kPa)	0,027579	1	1,742	0,038926	2,5	0,01557	0,008938	0,000247
B2 (5 kPa)	0,04444	1	1,742	0,018777	2,5	0,007511	0,004312	0,000192
B2 (10 kPa)	0,03504	1	1,742	0,016633	5	0,003327	0,00191	6,69E-05
B2 (20 kPa)	0,042446	1	1,742	0,028551	10	0,002855	0,001639	6,96E-05
B3 (2,5 kPa)	0,046879	1	1,648	0,010342	2,5	0,004137	0,00251	0,000118
B3 (5 kPa)	0,023263	1	1,648	0,006005	2,5	0,002402	0,001458	3,39E-05
B3 (10 kPa)	0,023006	1	1,648	0,009591	5	0,001918	0,001164	2,68E-05
B3 (20 kPa)	0,010842	1	1,648	0,016013	10	0,001601	0,000972	1,05E-05
B3 (50 kPa)	0,005242	1	1,648	0,026856	30	0,000895	0,000543	2,85E-06
B4 (2,5 kPa)	0,039419	1	1,7	0,034854	2,5	0,013942	0,008201	0,000323
B4 (5 kPa)	0,054184	1	1,7	0,011987	2,5	0,004795	0,00282	0,000153
B4 (10 kPa)	0,037934	1	1,7	0,016152	5	0,00323	0,0019	7,21E-05
B4 (20 kPa)	0,051772	1	1,7	0,024653	10	0,002465	0,00145	7,51E-05
B4 (50 kPa)	0,061801	1	1,7	0,041145	30	0,001372	0,000807	4,99E-05
B5 (2,5 kPa)	0,058599	1	1,658	0,010896	2,5	0,004358	0,002629	0,000154
B5 (5 kPa)	0,010703	1	1,658	0,005973	2,5	0,002389	0,001441	1,54E-05
B5 (10 kPa)	0,039319	1	1,658	0,012187	5	0,002437	0,00147	5,78E-05
B5 (20 kPa)	0,019227	1	1,658	0,017353	10	0,001735	0,001047	2,01E-05
B5 (50 kPa)	0,042985	1	1,658	0,035271	30	0,001176	0,000709	3,05E-05



Şekil A.25 B grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği

Tablo A.2 C grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri

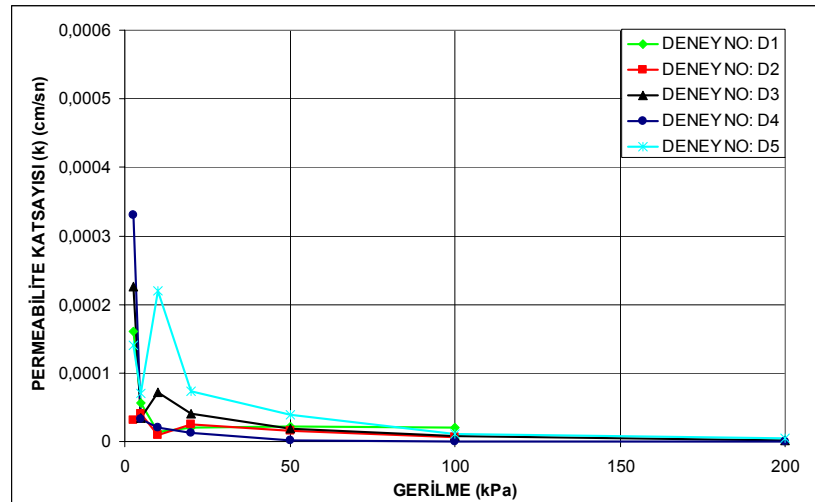
Deney No	Cv	γ_w	$1+e_0$	Δe	ΔP	a_v	m_v	k
C1 (2,5 kPa)	0,046997	1	1,714	0,007309	2,5	0,002924	0,001706	8,02E-05
C1 (5 kPa)	0,015973	1	1,714	0,009094	2,5	0,003638	0,002122	3,39E-05
C1 (10 kPa)	0,018358	1	1,714	0,014193	5	0,002839	0,001656	3,04E-05
C1 (20 kPa)	0,014951	1	1,714	0,019378	10	0,001938	0,001131	1,69E-05
C1 (50 kPa)	0,044916	1	1,714	0,04394	30	0,001465	0,000855	3,84E-05
C2 (2,5 kPa)	0,04034	1	1,668	0,005722	2,5	0,002289	0,001372	5,54E-05
C2 (5 kPa)	0,018695	1	1,668	0,007546	2,5	0,003018	0,00181	3,38E-05
C2 (10 kPa)	0,00792	1	1,668	0,009205	5	0,001841	0,001104	8,74E-06
C2 (20 kPa)	0,029686	1	1,668	0,012356	10	0,001236	0,000741	2,2E-05
C2 (50 kPa)	0,004383	1	1,668	0,029438	30	0,000981	0,000588	2,58E-06
C3 (2,5 kPa)	0,05286	1	1,701	0,030114	2,5	0,012046	0,007082	0,000374
C3 (5 kPa)	0,02712	1	1,701	0,013029	2,5	0,005212	0,003064	8,31E-05
C3 (10 kPa)	0,019097	1	1,701	0,010355	5	0,002071	0,001217	2,32E-05
C3 (20 kPa)	0,030886	1	1,701	0,016222	10	0,001622	0,000954	2,95E-05
C3 (50 kPa)	0,031633	1	1,701	0,032099	30	0,00107	0,000629	1,99E-05
C3 (100 kPa)	0,012176	1	1,701	0,030201	50	0,000604	0,000355	4,32E-06
C4 (2,5 kPa)	0,039419	1	1,729	0,046228	2,5	0,018491	0,010695	0,000422
C4 (5 kPa)	0,03815	1	1,729	0,012792	2,5	0,005117	0,002959	0,000113
C4 (10 kPa)	0,00727	1	1,729	0,027614	5	0,005523	0,003194	2,32E-05
C4 (20 kPa)	0,010643	1	1,729	0,008646	10	0,000865	0,0005	5,32E-06
C4 (50 kPa)	0,038237	1	1,729	0,049051	30	0,001635	0,000946	3,62E-05
C4 (100 kPa)	0,010491	1	1,729	0,0367	50	0,000734	0,000425	4,45E-06
C5 (2,5 kPa)	0,046199	1	1,753	0,047957	2,5	0,019183	0,010943	0,000506
C5 (5 kPa)	0,028789	1	1,753	0,018499	2,5	0,0074	0,004221	0,000122
C5 (10 kPa)	0,046118	1	1,753	0,018499	5	0,0037	0,002111	9,73E-05
C5 (20 kPa)	0,019236	1	1,753	0,031825	10	0,003182	0,001815	3,49E-05
C5 (50 kPa)	0,014229	1	1,753	0,042959	30	0,001432	0,000817	1,16E-05
C5 (100 kPa)	0,01368	1	1,753	0,038576	50	0,000772	0,00044	6,02E-06



Şekil A.26 C grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği

Tablo A.3 D grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri

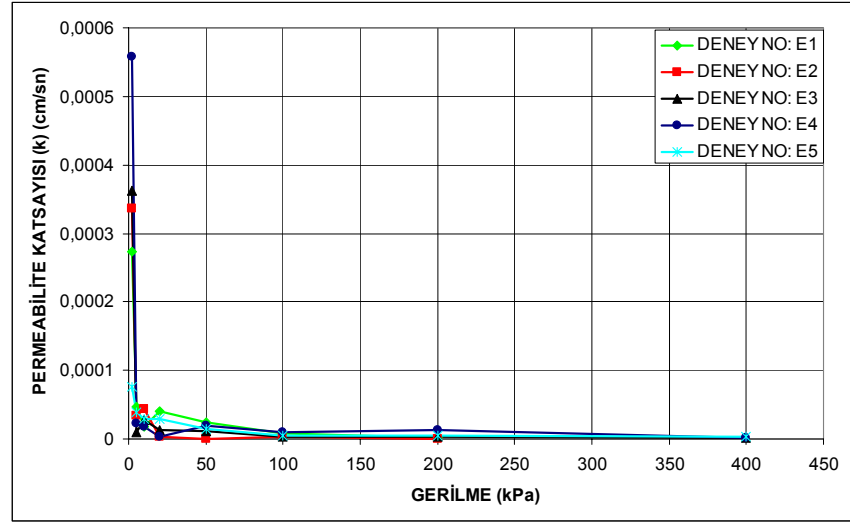
Deney No	Cv	γ_w	$1+e_0$	Δe	ΔP	a_v	m_v	k
D1 (2,5 kPa)	0,056204	1	1,722	0,012316	2,5	0,004926	0,002861	0,000161
D1 (5 kPa)	0,054671	1	1,722	0,004478	2,5	0,001791	0,00104	5,69E-05
D1 (10 kPa)	0,02131	1	1,722	0,005943	5	0,001189	0,00069	1,47E-05
D1 (20 kPa)	0,018074	1	1,722	0,01955	10	0,001955	0,001135	2,05E-05
D1 (50 kPa)	0,040591	1	1,722	0,027388	30	0,000913	0,00053	2,15E-05
D1 (100 kPa)	0,047539	1	1,722	0,035828	50	0,000717	0,000416	1,98E-05
D2 (2,5 kPa)	0,014826	1	1,711	0,008968	2,5	0,003587	0,002097	3,11E-05
D2 (5 kPa)	0,03635	1	1,711	0,004743	2,5	0,001897	0,001109	4,03E-05
D2 (10 kPa)	0,018551	1	1,711	0,00457	5	0,000914	0,000534	9,91E-06
D2 (20 kPa)	0,020237	1	1,711	0,020868	10	0,002087	0,00122	2,47E-05
D2 (50 kPa)	0,028973	1	1,711	0,028371	30	0,000946	0,000553	1,6E-05
D2 (100 kPa)	0,014447	1	1,711	0,034666	50	0,000693	0,000405	5,85E-06
D3 (2,5 kPa)	0,032608	1	1,711	0,029594	2,5	0,011838	0,006919	0,000226
D3 (5 kPa)	0,020181	1	1,711	0,007315	2,5	0,002926	0,00171	3,45E-05
D3 (10 kPa)	0,044794	1	1,711	0,013704	5	0,002741	0,001602	7,18E-05
D3 (20 kPa)	0,037539	1	1,711	0,018581	10	0,001858	0,001086	4,08E-05
D3 (50 kPa)	0,029694	1	1,711	0,032033	30	0,001068	0,000624	1,85E-05
D3 (100 kPa)	0,022066	1	1,711	0,030435	50	0,000609	0,000356	7,85E-06
D3 (200 kPa)	0,007728	1	1,711	0,017488	100	0,000175	0,000102	7,9E-07
D4 (2,5 kPa)	0,060473	1	1,678	0,022901	2,5	0,009161	0,005459	0,00033
D4 (5 kPa)	0,019632	1	1,678	0,007047	2,5	0,002819	0,00168	3,3E-05
D4 (10 kPa)	0,025945	1	1,678	0,006711	5	0,001342	0,0008	2,08E-05
D4 (20 kPa)	0,017345	1	1,678	0,012499	10	0,00125	0,000745	1,29E-05
D4 (50 kPa)	0,002908	1	1,678	0,030703	30	0,001023	0,00061	1,77E-06
D4 (100 kPa)	0,002405	1	1,678	0,021308	50	0,000426	0,000254	6,11E-07
D4 (200 kPa)	0,003482	1	1,678	0,027264	100	0,000273	0,000162	5,66E-07
D5 (2,5 kPa)	0,051136	1	1,743	0,011942	2,5	0,004777	0,00274	0,00014
D5 (5 kPa)	0,027775	1	1,743	0,010896	2,5	0,004358	0,0025	6,95E-05
D5 (10 kPa)	0,0455	1	1,743	0,042188	5	0,008438	0,004841	0,00022
D5 (20 kPa)	0,051761	1	1,743	0,024668	10	0,002467	0,001415	7,33E-05
D5 (50 kPa)	0,049335	1	1,743	0,041578	30	0,001386	0,000795	3,92E-05
D5 (100 kPa)	0,029397	1	1,743	0,032948	50	0,000659	0,000378	1,11E-05
D5 (200 kPa)	0,020428	1	1,743	0,034779	100	0,000348	0,0002	4,08E-06



Şekil A.27 D grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği

Tablo A.4 E grubu deneylere ait konsolidasyon parametreleri

Deney No	Cv	γ_w	$1+e_0$	Δe	ΔP	a_v	m_v	k
E1 (2,5 kPa)	0,060473	1	1,773	0,020078	2,5	0,008031	0,00453	0,000274
E1 (5 kPa)	0,017185	1	1,773	0,012184	2,5	0,004874	0,002749	4,72E-05
E1 (10 kPa)	0,018098	1	1,773	0,009009	5	0,001802	0,001016	1,84E-05
E1 (20 kPa)	0,035537	1	1,773	0,020249	10	0,002025	0,001142	4,06E-05
E1 (50 kPa)	0,031667	1	1,773	0,0417	30	0,00139	0,000784	2,48E-05
E1 (100 kPa)	0,01857	1	1,773	0,036723	50	0,000734	0,000414	7,69E-06
E1 (200 kPa)	0,019619	1	1,773	0,017761	100	0,000178	0,0001	1,97E-06
E2 (2,5 kPa)	0,069438	1	1,711	0,020684	2,5	0,008274	0,004836	0,000336
E2 (5 kPa)	0,027607	1	1,711	0,005279	2,5	0,002112	0,001234	3,41E-05
E2 (10 kPa)	0,057108	1	1,711	0,006577	5	0,001315	0,000769	4,39E-05
E2 (20 kPa)	0,00678	1	1,711	0,009001	10	0,0009	0,000526	3,57E-06
E2 (50 kPa)	0,00037	1	1,711	0,033493	30	0,001116	0,000653	2,42E-07
E2 (100 kPa)	0,007067	1	1,711	0,041282	50	0,000826	0,000483	3,41E-06
E2 (200 kPa)	0,008352	1	1,711	0,015578	100	0,000156	9,1E-05	7,6E-07
E3 (2,5 kPa)	0,055047	1	1,735	0,028602	2,5	0,011441	0,006594	0,000363
E3 (5 kPa)	0,004488	1	1,735	0,009934	2,5	0,003973	0,00229	1,03E-05
E3 (10 kPa)	0,02416	1	1,735	0,009848	5	0,00197	0,001135	2,74E-05
E3 (20 kPa)	0,021515	1	1,735	0,009934	10	0,000993	0,000573	1,23E-05
E3 (50 kPa)	0,025013	1	1,735	0,025091	30	0,000836	0,000482	1,21E-05
E3 (100 kPa)	0,012031	1	1,735	0,026804	50	0,000536	0,000309	3,72E-06
E3 (200 kPa)	0,01917	1	1,735	0,030486	100	0,000305	0,000176	3,37E-06
E3 (400 kPa)	0,0177	1	1,735	0,037165	200	0,000186	0,000107	1,9E-06
E4 (2,5 kPa)	0,068425	1	1,736	0,035418	2,5	0,014167	0,008161	0,000558
E4 (5 kPa)	0,006756	1	1,736	0,014237	2,5	0,005695	0,00328	2,22E-05
E4 (10 kPa)	0,038162	1	1,736	0,003906	5	0,000781	0,00045	1,72E-05
E4 (20 kPa)	0,003759	1	1,736	0,012935	10	0,001293	0,000745	2,8E-06
E4 (50 kPa)	0,028118	1	1,736	0,037154	30	0,001238	0,000713	2,01E-05
E4 (100 kPa)	0,027086	1	1,736	0,032033	50	0,000641	0,000369	1E-05
E4 (200 kPa)	0,0637	1	1,736	0,034811	100	0,000348	0,000201	1,28E-05
E4 (400 kPa)	0,007389	1	1,736	0,039498	200	0,000197	0,000114	8,41E-07
E5 (2,5 kPa)	0,035223	1	1,676	0,0091	2,5	0,00364	0,002172	7,65E-05
E5 (5 kPa)	0,025429	1	1,676	0,006267	2,5	0,002507	0,001496	3,8E-05
E5 (10 kPa)	0,027705	1	1,676	0,008757	5	0,001751	0,001045	2,9E-05
E5 (20 kPa)	0,039	1	1,676	0,012277	10	0,001228	0,000733	2,86E-05
E5 (50 kPa)	0,03817	1	1,676	0,01966	30	0,000655	0,000391	1,49E-05
E5 (100 kPa)	0,016213	1	1,676	0,023781	50	0,000476	0,000284	4,6E-06
E5 (200 kPa)	0,042446	1	1,676	0,01717	100	0,000172	0,000102	4,35E-06
E5 (400 kPa)	0,021061	1	1,676	0,041295	200	0,000206	0,000123	2,59E-06



Şekil A.28 E grubu deneylere ait permeabilite katsayısı-gerilme grafiği

ÖZGEÇMİŞ

07.11.1981 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Hacı Ali Paşa İlkokulu'nda, orta öğrenimini Rami Ortaokulu'nda ve lise öğrenimini Kabataş Erkek Lisesi'nde tamamladı. Aynı yıl kazandığı İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nünden 2003 yılında mezun oldu. Yine aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği programı yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Orient Research Müşavir Mühendisler şirketinde inşaat mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.