

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAMSUN ÇARŞAMBA MAVİ KİLİNİN ZAMANA BAĞLI
SIKIŞMA DAVRANIŞI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Gökhan ÇEVİKBİLEN
(501992329)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Mayıs 2007

Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Temmuz 2007

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kutay Özaydın (Y.T.Ü.)

Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM (Y.T.Ü.)

Prof. Dr. Mete İNCECİK (İ.T.Ü.)

Doç. Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü.)

TEMMUZ 2007

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması kapsamında, Samsun-Çarşamba Deltası'nda yer alan Samsun-Çarşamba Uluslararası Havaalanı'nın inşaatı sırasında iyileştirilen yumuşak mavi renkli bir kil tabakasının zamana bağlı sıkışma davranışını laboratuvar koşullarında inceledim. Yumuşak killerin sıkışması sırasında sıklıkla rastlanmayan üçüncül sıkışma davranışını sergileyen Samsun-Çarşamba mavi kilinin bu davranışına etki eden ana etmeni belirlemeye çalıştım. Sunduğum bulgular ışığında proje ömrüne bağlı olarak üçüncül sıkışmaların mertebesinin çok önemli mertebelere erişebileceği gerçeğine dikkat çekmek istedim. Hali hazırda karmaşık yapısı ile gizemini koruyan yumuşak killerin sıkışma davranışının anlaşılmasına bu eserin katkıda bulunabileceği ve ileriki araştırmalar için yön gösterici olabileceği inancını taşıyorum.

Bu çalışma sırasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Ahmet Sağlamer'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam esnasında değerli yorum ve katkılarıyla beni destekleyip şevklendiren tez izleme komite üyelerim Doç. Dr. Recep İyisan ve Prof. Dr. Kutay Özaydın'a şükranlarımı sunarım. Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerindeki katkılarından dolayı Atilla Yılmaz'a, kimyasal analizler sırasındaki yardımlarından ötürü Prof. Dr. Niyazi Bıçak'a ve Mustafa Gazi'ye teşekkürlerimi sunarım.

Sekiz senelik bu tempolu ve yorucu dönemimde her türlü destekleri ve katkılarıyla sıkıntımı paylaşan arkadaşlarım; Mustafa Hatipoğlu, Gül Polat Tatar, Yalçın Tatar, Ahmet Öztürk, Aykut Şenol, Bülent Hatipoğlu, Seda Yolsal ve Aslıhan Şapaş'a, Bölüm Sekreterimiz Gülçin Güley'e, Anabilim Dalı sekreterlerimiz; Şükriye Ağaçeken ve Tülay Özeken'e teşekkürlerimi sunarım. Doktora deneylerim sırasında gerekli sabrı ve desteği gösterdikleri için tüm laboratuvar çalışanlarımız adına laboratuvar şefimiz İsmail Cantekin'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca, doktoram sırasında araştırma görevliliğim süresince üzerimde emeği olan diğer tüm Anabilim Dalı Öğretim Üyelerimize teşekkürlerimi sunarım.

Doktoram sırasında aynı evi paylaştığım dert ortaklarımdan çocukluk arkadaşım Alper Yeşilçubuk ile bana torna kullanmayı göstererek deney aletlerinde değişiklik yapmamı sağlayan ve her türlü bilgisayar sorunumda bir an olsun yardımını esirgemeyen Esat Pehlivan'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmem için maddi ve manevi hiç bir fedakârlıktan kaçınmayan ve bu yoğun tempolu çalışmalarında bana her türlü anlayışı gösteren başta annem, babam ve ablam olmak üzere tüm aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

TEMMUZ 2007

GÖKHAN ÇEVİKBİLEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	4
1.2 Kapsam	5
2. İNCE DANELİ ZEMİNLERDE BİRİNCİL KONSOLİDASYON	9
2.1 Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi	11
2.2 Klasik Konsolidasyon Deneyi ve Elde Edilen Parametreler	15
2.2.1 Oturma-Zaman İlişkisi	16
2.2.2 Nihai Konsolidasyon Oturması	23
2.2.3 Önkonsolidasyon Basıncı	27
2.3 Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deneyi	28
3. İNCE DANELİ VE ORGANİK ZEMİNLERDE İKİNCİL KONSOLİDASYON	37
3.1 Arazi Koşullarının Laboratuvar Ortamında Modellenmesi	41
3.2 İkincil Sıkışmanın Belirlenmesi	46
3.3 İkincil Sıkışma Sonrası Tekrar Sıkışma Davranışı	54
3.4 Organik İçerik ve İkincil Sıkışma	61
4. MALZEME VE YÖNTEM	68
4.1 Giriş	68
4.2 Malzeme	68
4.3 Deney Numunelerinin Hazırlanma Yöntemleri	70
4.3.1 Organik İçeriği Yakılmış Numuneler	70
4.3.2 Kil Yüzdeleri Değiştirilen Numuneler	74
4.3.3 Rowe Hücresinde Hazırlanan Numuneler	76

4.4 Kullanılan Konsolidasyon Sistemleri	79
4.4.1 Klasik Konsolidasyon Deney Düzenekleri	79
4.4.2 Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deney Düzenekleri	80
4.4.3 Modifiye Edilmiş Klasik Konsolidasyon Deney Düzenegi	82
5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI	83
5.1 Örselenmenin Etkisi	86
5.1.1 Örselenmenin Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	89
5.1.2 Örselenmenin Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	94
5.2 Organik Malzeme İçeriğinin Etkisi	102
5.2.1 Organik İçeriğin Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	104
5.2.2 Organik İçeriğin Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	108
5.2.3 Organik İçeriğin Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	117
5.3 Kil İçeriğin Etkisi	123
5.3.1 Kilin Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	125
5.3.2 Kilin Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	128
5.3.3 Kilin Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	132
5.4 Numune Boyutunun Etkisi	136
5.4.1 Numune Boyutunun Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	139
5.4.2 Numune Boyutunun Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi	144
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149
KAYNAKLAR	158
ÖZGEÇMİŞ	168

KISALTMALAR

ABC	: Arazi bakir çizgisi
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
ASTM	: Amerikan standartnamesi
CHG	: Sabit hidrolik gradyenli konsolidasyon deneyi
CPR	: Sabit boşluk suyu basıncı oranlı konsolidasyon deneyi
EOP	: Birincil konsolidasyon sonu
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spektroskopisi
LOI	: Yakma kaybı deneyi
LVDT	: Düşey deformasyon aleti
OC	: Organik içerik
RHH	: Rowe hücresinde hazırlanmış
SDHK	: Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon
SEM	: Yüzey elektron mikroskobu
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi
YAO	: Yük artırma oranı
YAS	: Yük artırma süresi
YK	: Yakma kaybı deneyi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Şekil 6'daki Durumlara için $U-T_v$ ilişkisi (Das, 1985).....	19
Tablo 2.2 : Bazı kil türlerinin konsolidasyon katsayıları	20
Tablo 2.3 : C_c İçin Önerilen Çeşitli Ampirik Bağlıntılar (Brenner ve Brand, 1981).....	26
Tablo 2.4 : SDHK deneyi için önerilen deformasyon hızları (Head, 1986)	31
Tablo 2.5 : Çeşitli sıkışma koşulları için deformasyon hızları (Leroueil 1994)	35
Tablo 3.1 : Zeminlerin ikincil sıkışma özelliklerine göre sınıflandırılması (Mesri, 1973)	47
Tablo 3.2 : Çeşitli zeminler için C_α/C_c değerleri	52
Tablo 3.3 : Geoteknik Malzemelerin C_α/C_c değerleri (Mesri ve Vardhanabhuti, 2005).....	53
Tablo 4.1 : Deneylerde kullanılan zeminin endeks özellikleri	69
Tablo 4.2 : Mavi kil zemindeki organik malzeme yüzdesi	71
Tablo 4.3 : Yakma sonrası numunelerin endeks özellikleri	74
Tablo 4.4 : Farklı kil yüzdelerindeki numunelerin endeks özellikleri	75
Tablo 5.1 : Çalışma kapsamında yapılan Konsolidasyon deneyleri.....	84
Tablo 5.2 : Örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneylerinden belirlenen parametreler	92
Tablo 5.3 : Örselenmemiş, yoğrulmuş numunelerde yapılan krip deneylerinin süreleri	96
Tablo 5.4 : Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde yapılan krip deneylerinin sonuçları	97
Tablo 5.5 : Organik içeriği yakılmış numunelerin deney adetleri.....	103
Tablo 5.6 : İkinci grup deneylerde krip deneylerinde bekleme süreleri.....	108
Tablo 5.7 : Yakma öncesinde ve yakma sonrasında RHH numunelerin krip deneyi sonuçları.....	113
Tablo 5.8 : Yakma öncesinde ve sonrasında hazırlanmış RHH numunelerde yapılan SDHK deneylerinde seçilen deformasyon hızları	118
Tablo 5.9 : Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerde uygulanan deney programı.....	124
Tablo 5.10 : Kil boyutunda dane yüzdeleri farklı olan numunelerde yapılan krip deneylerinin sonuçları	130
Tablo 5.11 : Kil yüzdesi farklı numunelerin SDHK deney hızları.....	133
Tablo 5.12 : Farklı boyutlardaki numunelerle yapılan konsolidasyon deneylerinin programı	138
Tablo 5.13 : Farklı yüksekliklerdeki 5 cm çaplı numunelerde yapılan klasik konsolidasyon deneylerinin sonuçları	140
Tablo 5.14 : Krip deneylerinde gerilme seviyeleri ve deney süreleri	145
Tablo 5.15 : Krip deneylerinden belirlenen konsolidasyon katsayıları.....	147
Tablo 5.16 : Uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçları	148

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Bir kil tabakasında konsolidasyon olgusu	10
Şekil 2.2	: Bir boyutlu konsolidasyon a) Terzaghi modeli b) Gerilme-zaman eğrisi	11
Şekil 2.3	: Bir kil tabakasında konsolidasyon olgusu	12
Şekil 2.4	: Klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen a) ε_v -log t b) ε_v -log σ'_v eğrisi	16
Şekil 2.5	: Bir boyutlu konsolidasyon başlangıçta düzgün yayılı boşluk suyu basıncı dağılımı için fazla boşluk suyu basıncı eğrileri	18
Şekil 2.6	: Konsolidasyon basıncının tabaka kalınlığı boyunca dağılışı biçimleri	18
Şekil 2.7	: Dört farklı başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı için U-T _v ilişkisi (Leroueil ve Marques, 1996)	19
Şekil 2.8	: Casagrande logaritma zaman yöntemiyle c_v hesabı	21
Şekil 2.9	: Taylor karekök zaman yöntemiyle c_v hesabı	22
Şekil 2.10	: $c_v - w_L$ arasındaki ilişki (NAVFAC 1982)	23
Şekil 2.11	: Zemin modeli kullanılarak zemin sıkışmasının temsili. (a) Yükleme öncesi, (b) Yükleme sonrası	24
Şekil 2.12	: Önkonsolidasyon basıncını belirleme yöntemleri (Casagrande vd., 1944, Pacheco Silvia 1970, Sridharan vd., 1991, Şenol, 1997, Tavenas., 1979)	28
Şekil 2.13	: Geliştirilen konsolidasyon deney tipleri (Head, 1986)	29
Şekil 3.1	: e-log t arasındaki ilişki	37
Şekil 3.2	: Hipotez A ve Hipotez B'ye göre boşluk oranı-logaritma zaman eğrileri (Ladd ve diğ., 1977)	42
Şekil 3.3	: Hipotez A ve Hipotez B'ye göre e-log σ'_v değişimleri (Ladd ve diğ., 1977)	43
Şekil 3.4	: Sıkışma indisi-logaritma konsolidasyon basıncı	49
Şekil 3.5	: İkincil sıkışma katsayısı-sıkışma indisi (Mesri ve Godlewski, 1977)	49
Şekil 3.6	: İkincil konsolidasyon esnasında e-log σ'_v - log t ilişkisi (Mesri ve Godlewski 1977)	50
Şekil 3.7	: e-log σ'_v eğri ailesi ilişkisi (Mesri ve Godlewski, 1977)	51
Şekil 3.8	: İkincil sıkışma YAO ilişkisi (Mesri ve Goodlewski, 1979)	54
Şekil 3.9	: e-log σ'_v ilişkisi (a) krip etkisi (b) deformasyon hızının etkisi (Ladd, 1985)	56
Şekil 3.10	: Yaşlanma etkisinde e-log σ'_v ilişkisi	58
Şekil 3.11	: Yaşlanma (ageing) ve yıkanma (leaching) etkisinde e-log σ'_v ilişkisi	59
Şekil 3.12	: Yaşlanma etkisinde e-log σ'_v ilişkisi (Hueckel vd., 2001)	60
Şekil 3.13	: Turba zeminlerde tipik sıkışma davranışı (Edil ve Dhowian, 1979)	63

Şekil 3.14 : Samsun-Çarşamba mavi kili krip deneyi oturma-logaritma zaman ilişkisi (Yılmaz, 2000).....	64
Şekil 3.15 : Samsun-Çarşamba mavi kili B1 nolu deneyde 100 kPa gerilmesinde ikincil ve üçüncül sıkışma katsayılarının bulunması.....	65
Şekil 3.16 : 100 kPa gerilme altında organik içeriğin sıkışma adımları (Yılmaz, 2000).....	66
Şekil 4.1 : Samsun Çarşamba bölgesinin jeolojik haritası.....	69
Şekil 4.2 : Çeşitli sıcaklıklarda yakılmış numunelerin FTIR analiz sonuçları	72
Şekil 4.3 : Kuru ve ıslak yakılmış Samsun-Çarşamba mavi kil numunelerinin granülometri eğrileri.....	74
Şekil 4.4 : Samsun-Çarşamba mavi kilinden elde edilen farklı dane çapı dağılımlı numunelerin granülometri eğrileri	76
Şekil 4.5 : Rowe Hücresi a) şematik gösterim b) genel görünüm	77
Şekil 4.6 : ROWE hücresi a) $\sigma_{vc}=10$ kPa gerilmesi b) $\sigma_{vc}=25$ kPa gerilmesi	78
Şekil 4.7 : Wykeham-Farrance marka klasik konsolidasyon düzeneği	79
Şekil 4.8 : Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinde kullanılan düzenek a) deney hücresi b) genel görünüm	80
Şekil 4.9 : Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi şematik gösterim	81
Şekil 4.10 : Farklı kalınlıklı numuneler için kullanılan konsolidasyon deney düzeneği a) şematik gösterim b) genel görünüm	82
Şekil 5.1 : Deformasyon mekanizması	86
Şekil 5.2 : Boşluk oranı düşey gerilme ilişkisi üzerinde örselenmenin etkisi a)Laurenian kili b) Boston kili (Casagrande,1932).....	87
Şekil 5.3 : Zemin yapı tipleri a) topaklaşmış (flocculated) b) dağınmık (dispersed) (Lambe Whitman, 1969)	88
Şekil 5.4 : Yoğrulma esnasında yük transferinin mekanik gösterimi (Lambe Whitman, 1969).....	89
Şekil 5.5 : Örselenmenin e-log σ'_v üzerindeki etkisi a) Terzaghi Peck 1967, b) Schmertman 1955	90
Şekil 5.6 : Örselenmemiş yoğrulmuş numunelerin e-log σ'_v eğrisi.....	92
Şekil 5.7 : Örselenmemiş yoğrulmuş numunelerin c_v-w_L ilişkisi.....	93
Şekil 5.8 : 100 kPa gerilmesinde kripe gidilen yoğrulmuş numunenin uzun süreli konsolidasyon deneyine ait a) ϵ_v -log σ'_v b) ϵ_v -log σ'_v eğrileri.....	94
Şekil 5.9 : a) Örselenmemiş ve b) Yoğrulmuş numunelerin krip deneylerine ait ϵ_v -log σ'_v eğrileri	95
Şekil 5.10 : Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde yapılan krip deneylerine ait a) C_c -log σ'_v b) $C_{\alpha\epsilon}$ -log σ'_v c) $C_{\alpha\epsilon}$ - C_c d) $C_{\alpha\epsilon t}$ -log σ'_v ilişkisi	98
Şekil 5.11 : Örselenmemiş numunelerin ϵ_v -log σ'_v eğrisine bir örnek (Yılmaz, 2000).....	100
Şekil 5.12 : Örselenmiş numunelerin ϵ_v -log σ'_v eğrisi	101
Şekil 5.13 : Brezilya Juturnaiba organik kilinin sınıflandırma özellikleri üzerinde organik içeriğin etkisi (Coutinho ve Lacerda, 1987).....	102
Şekil 5.14 : Brezilya Juturnaiba organik kilinin sıkışabilirlik özellikleri üzerinde organik içeriğin etkisi (Coutinho ve Lacerda, 1987).....	104
Şekil 5.15 : Yakma öncesinde, ıslak ve kuru yakma sonrası RHH numunelerinde yapılan klasik konsolidasyon deneylerine ait a) ϵ_v -log t b) ϵ_v -log σ'_v eğrileri	105
Şekil 5.16 : Yakma öncesi, ıslak ve kuru yakma sonrası RHH numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) C_c -log σ'_v b) M_c - σ'_v c) c_v -log σ'_v d) k_v -log σ'_v eğrileri	106

Şekil 5.17 : Yakma öncesi, ıslak ve kuru yakma sonrası c_v - w_L ilişkisi.....	107
Şekil 5.18 : Yakma öncesi RHH numunelerin a) krip deneylerine ait ϵ_v -log t ilişkisi b) uzun süreli konsolidasyon deneyine ait ϵ_v -log σ'_v ilişkisi....	109
Şekil 5.19 : Islak yakılarak hazırlanmış RHH numunelerin krip deneyi.....	110
Şekil 5.20 : Kuru yakılarak hazırlanan RHH numunelerin a) krip deneylerine ait ϵ_v -log t ilişkisi b) uzun süreli konsolidasyon deneyine ait ϵ_v -log σ'_v ilişkisi	112
Şekil 5.21 : Organik içeriği değiştirilen numunelerin a) 25 kPa, b) 50 kPa ve c) 100 kPa gerilmesindeki krip deneyleriyle belirlenen ϵ_v -log t ilişkileri.....	113
Şekil 5.22 : Organik içeriği değiştirilmiş numunelerin a) C_c - log σ'_v b) C_α - log σ'_v c) C_α - C_c d) $C_{\alpha\epsilon t}$ - log σ'_v ilişkileri	115
Şekil 5.23 : Yakılmış ve RHH numunelerin ϵ_v -log t ilişkisine organik içeriğin etkisinin incelendiği 50 kPa'dan 100 kPa yükleme kademesine ait krip deneyi.....	116
Şekil 5.24 : SDHK deneyi a) EOP ϵ_v -log t b) σ'_p - ϵ_v ilişkisi (Leroueil ve diğ. 1985).....	117
Şekil 5.25 : a) Yakma öncesi b) Islak yakma ve c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen u/σ'_v - log σ'_v grafikleri	119
Şekil 5.26 : a) Yakma öncesi b) Islak ve c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen ϵ_v - log σ'_v grafikleri.....	120
Şekil 5.27 : a) Yakma öncesi b) Islak ve c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen M_c - log σ'_v grafikleri ...	121
Şekil 5.28 : a) Yakma öncesi b) Islak yakma sonrası c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyine ait c_v - log σ'_v grafikleri.....	122
Şekil 5.29 : Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen ϵ_v -log t ve ϵ_v -log σ'_v eğrileri	126
Şekil 5.30 : Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) C_c -log σ'_v b) M_c - σ'_v c) c_v -log σ'_v d) k_v -log σ'_v eğrileri	127
Şekil 5.31 : %5kil+%95silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt için c_v - w_L ilişkisi	128
Şekil 5.32 : Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı Samsun Çarşamba mavi kil numunelerinde yapılan krip deneylerinde elde edilen ϵ_v -log t ilişkileri.....	129
Şekil 5.33 : Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı Samsun Çarşamba mavi kil numunelerinde yapılan krip deneylerinde elde edilen ϵ_v -log t ilişkileri.....	131
Şekil 5.34 : Kil yüzdesi farklı numunelerin SDHK deneylerine ait ϵ_v -t ilişkileri ...	133
Şekil 5.35 : a) %5 kil+%95 silt, b) %50 kil+%50 silt c) %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde yapılan SDHK deneylerinde elde edilen ϵ_v -log σ_v ilişkileri.....	134
Şekil 5.36 : a) %5 kil+%95 silt, b) %50 kil+%50 silt c) %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde yapılan SDHK deneylerinden elde edilen M_c - σ_v ilişkileri.....	135

Şekil 5.37 : a) %5 kil+%95 silt, b) %50 kil+%50 silt c) %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde yapılan SDHK deneylerinde belirlenen $c_v - \log \sigma'_v$ ilişkileri.....	136
Şekil 5.38 : Farklı boylarda 5 cm çaplı numunelerin $\epsilon_v - \log t$ ve $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri	139
Şekil 5.39 : Farklı yükseklikli numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) $C_c - \log \sigma'_v$ b) $M_c - \sigma'_v$ c) $c_v - \log \sigma'_v$ d) $k_v - \log \sigma'_v$ eğrileri	141
Şekil 5.40 : Farklı çaplarda 2 cm yükseklikli numunelerin $\epsilon_v - \log t$ ve $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri	142
Şekil 5.41 : Farklı çaplarda 2 cm yüksekliğindeki numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) $C_c - \log \sigma'_v$ b) $M_c - \sigma'_v$ c) $c_v - \log \sigma'_v$ d) $k_v - \log \sigma'_v$ eğrileri	143
Şekil 5.42 : Farklı boyutlardaki numunelerin uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri.....	146
Şekil 5.43 : Farklı boyuttaki numuneler ile 100 kPa gerilme seviyesinde yapılan krip deneylerinin sonuçları	147

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
C_{α}	: İkincil sıkışma katsayısı
$C_{\alpha e}$	: İkincil sıkışma oranı
$C_{\alpha t}$	: Üçüncül sıkışma katsayısı
$C_{\alpha e t}$	: Üçüncül sıkışma oranı
S_{α}	: İkincil sıkışma miktarı
σ'_p	: Efektif önkonsolidasyon basıncı
C_r	: Tekrar sıkışma indisi
C_c	: Sıkışma indisi
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
t_s	: İkincil sıkışma sonu zamanı
M_c	: Sıkışma modülü
k_v	: geçirgenlik katsayısını
ϵ_v	: Düşey deformasyon
w_L	: Likit limit
w_p	: Plastik limit
I_p	: Plastisite indisi
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
H	: Numune kalınlığı
D	: Numune çapı
u	: Boşluk suyu basıncı
V	: Zemin elemanının hacmi
e	: Boşluk oranı
a_v	: Sıkışma sayısı
m_v	: Hacımsal sıkışma katsayısı
U	: Konsolidasyon yüzdesi
T_v	: Zaman faktörü
S_c	: Konsolidasyon oturması
$\dot{\epsilon}_p$	: SDHK deneyi deformasyon hızı
S_{α}	: İkincil sıkışma miktarı

SAMSUN ÇARŞAMBA MAVİ KİLİNİN ZAMANA BAĞLI SIKIŞMA DAVRANIŞI

ÖZET

Türkiye’de insan nüfusunun ve büyük kentlere olan göçün artmasına bağlı olarak yerleşim problemi belediyeleri geoteknik açıdan istenmeyen yerleri kullanıma açmaya zorlamaktadır. Bunun da ötesinde havaalanları gibi yapılar için büyük arazilere duyulan ihtiyaç, kalın alüvyon tabakaları ile kaplı ovalar kullanıdirmektedir. Genellikle bu tip zemin birikimlerinde bulunan yumuşak killerde, yüksek yeraltı suyu, düşük taşıma kapasitesi ve yüksek sıkışabilirliğe neden olmaktadır.

Bu tip yumuşak killerde görülen problemlere Türkiye’de’ki bir örnek de Karadeniz bölgesinde Samsun Çarşamba deltasında inşa edilen Uluslararası Samsun Çarşamba Havaalanı’ndaki oturma problemidir. Havaalanı’nın inşaatı sırasındaki arazi incelemeleri, Samsun Çarşamba mavi kili olarak adlandırılan yumuşak mavi kil tabakasını içeren uçuş pisti kesiminde oturma probleminin oluşacağını ortaya koymuştur. Pist bölgesinin başında 20 000 m²’lik bir alanda görülen kil tabakasının önyükleme ile iyileştirilmesine karar verilmiştir. Bir yıllık önyükleme dönemi sırasındaki oturma gözlemleri üçüncül sıkışmaların sadece organik zeminlerde ve turbalarda değil yumuşak killerde de oluşabileceğini göstermiştir.

Samsun-Çarşamba mavi kilinin üçüncül sıkışma davranışının nedenlerini belirlemek amacıyla, aynı sahadan alınan tüp ve kalıp numuneler üzerinde bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Samsun-Çarşamba mavi kilinin zamana bağlı sıkışma davranışına örselenmenin, organik içeriğin, dane çapı dağılımının ve numune boyutunun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla örselenmemiş, yoğrulmuş ve Rowe konsolidasyon hücresinde hazırlanmış (RHH) numuneler üzerinde 15 adet klasik konsolidasyon deneyi, 30 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon (SDHK) deneyi ve 26 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi olmak üzere toplam 71 adet konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir.

Samsun-Çarşamba mavi kilindeki mineralojik araştırmalar, kil boyutundaki minerallerin %40-50 dolayında Ca-montmorillonit, %30 dolayında kalsit+kuvars ve %10 dolayında da kaolinden oluştuğunu göstermiştir. Numuneler, üzerinde yapılan deneylerden zemin endeks özellikleri; kıvam limitleri $w_L=\%73$, $w_P=\%29$, dane birim hacim ağırlığı $\gamma_s=27,6 \text{ kN/m}^3$ ve doğal su muhtevası $w_n=\%65$ olarak bulunmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne göre numuneler yüksek plastisiteli CH grubu kil sınıfına girmektedir.

Bir zeminin ikincil sıkışmalarının, sabit efektif gerilme ($d\sigma'_v/dt=0$) altında devam etmesinin en bilinen nedeni dane çatısının çökmesidir. Bu çalışmada, zeminde çatının bozulmasının sıkışma davranışına etkisini incelemek amacıyla örselenmemiş ve iyice yoğrulmuş numuneler kullanılmıştır. Klasik konsolidasyon deneylerinin $e-\log \sigma'_v$ grafikleri, yoğrulma ile başlangıç boşluk oranının (e_0) düştüğünü, sıkışma eğrisinin aşağı doğru ötelendiğini, önkonsolidasyon basıncı (σ'_p) değerinin belirsizleştiğini, tekrar sıkışma indisinin (C_r) artarken sıkışma indisinin (C_c) azaldığını göstermiştir. Buna ek olarak, klasik konsolidasyon deneylerinde $e-\log t$ eğrilerinden belirlenen konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri örselenmemiş numunelerde önkonsolidasyon basıncı civarında %60 oranında azalırken, yoğrulmuş numunelerde bu düşüş gözlenmemiştir. Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde 70 günden 234 güne kadar değişen sürelerde 25 kPa'dan 400 kPa'a kadar çeşitli gerilme seviyelerindeki krip deneylerini içeren toplam 7 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Yoğrulmuş numunedeki dağınık yapı örselenmemiş numunelerin topaklaşmış yapısına göre suyun geçişine karşı daha çok direnç gösterdiğinden, yoğrulma birincil konsolidasyon süresini (t_p) artırmıştır. Bununla birlikte yoğrulma, ikincil sıkışmaların tamamlanma veya üçüncül sıkışmaların başlama süresini (t_s) kısaltmıştır. Krip deneylerinde örselenme ile ikincil sıkışma katsayısı (C_α) ve C_α/C_c oranının bir miktar artış gösterdiği ancak bu artışın ihmal edilebilir mertebede olduğu görülmüştür. Örselenmemiş numunede üçüncül sıkışma oranı ($C_{\alpha et}$), efektif gerilme artışı ile azalarak artarken, yoğrulmuş numunede düşük gerilme seviyelerinde daha büyük bulunan $C_{\alpha et}$ değeri giderek azalmıştır. Samsun-Çarşamba mavi kili'nin krip sonrası sıkışma davranışını incelemek için krip deneyi sonrasında küçük yük artımları ile numuneler tekrar yüklenmiş, ancak örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerin $\epsilon_v-\log \sigma'_v$ eğrilerinde yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde görünür bir etki bulunamamıştır.

Çalışmada, Samsun-Çarşamba mavi kilinin %8 olarak belirlenen organik içeriğinin, çatısının bozulmasının kilin üçüncül sıkışma davranışına etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla, organik içerikli ve organik içeriksiz olarak Rowe hücresinde tekrar hazırlanan kil numuneleri üzerinde klasik konsolidasyon deneyleri, uzun süreli konsolidasyon deneyleri ve sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Organik içeriği yakmak için ıslak ve kuru yakma yöntemleri tercih edilmiştir. Islak yakma yöntemi organik içeriği %15'lik H_2O_2 çözeltisi ile kimyasal olarak çürütürken, kuru yakma yöntemi organik içeriği $450^{\circ}C$ 'de etüvde yakılarak yok edilmektedir. Her iki işlem de zeminin plastisitesini düşürmüştür. 25 kPa gerilme seviyesinde RHH numunelerden yakma sonrasında hazırlananlarda boşluk oranı daha küçük bulunmuştur. Klasik konsolidasyon deneyleri sonucunda C_c değerinin ıslak yakılan numunede ortalama %10, kuru yakılında ise ortalama %55 azaldığı bulunmuştur. Sıkışma modülü (M_c) değerinde ıslak yakılında önemli bir değişiklik gözlenmezken, kuru yakılan numunede ortalama %40'luk bir artış belirlenmiştir. Organik içeriğin yakılması c_v katsayısını ıslak yakılında %78, kuru yakılında ise %17 azaltmıştır. Organik içeriğin yakılması düşey geçirgenlik katsayısını (k_v) düşürmüştür. Bunun ötesinde, organik içerikli ve organik içeriğinden arındırılan numunelerin 11 adet uzun süreli konsolidasyon deneylerinde 25 kPa~800 kPa aralığında çeşitli gerilme seviyelerinde 85 günden 603 güne kadar süren krip deneyleri yapılmıştır. Deneylerde organik içeriği yakılan numunelerde t_p sürelerinin ve t_s sürelerinin uzadığı, yani ikincil ve üçüncül sıkışmaların başlamasının geciktiği görülmüştür. Islak yakılan numunede C_{α} değeri %14 artarken, kuru yakılında ortalama % 20 azalmıştır. Ancak, C_{α}/C_c oranları her iki numunede de artmıştır. Yakma öncesinde RHH numunede $C_{\alpha et}=0,0346$ olan ortalama üçüncül sıkışma oranını, ıslak yakma ile %47, kuru yakma ile %38 azaltmıştır. Krip deneyi sonrasında tekrar sıkışma davranışının da incelendiği uzun süreli konsolidasyon deneylerinde yakma öncesinde yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde herhangi bir bulguya rastlanmazken, ıslak yakılmış ve kuru yakılmış numunelerde yaşlanma etkileri gözlenmiştir. Bunlara ilave olarak, $0,011\sim0,074$ dakika⁻¹ aralığındaki deformasyon hızlarında 13 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon (SDHK) deneyi yapılmıştır. SDHK deneyleriyle belirlenen $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerinin klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen birincil konsolidasyon sonu EOP $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileriyle uyum içerisinde oldukları ve her iki deney sistemiyle belirlenen

M_c modüllerinin birebir örtüştüğü görülmüştür. SDHK deneylerinde c_v değerleri klasik konsolidasyon deneyindekilere göre ıslak yakılanda 1,5~2,0 kat, kuru yakılanda ise 10 ile 20 kat daha büyük çıkmıştır.

Samsun-Çarşamba mavi kilinin üçüncül sıkışma davranışını kil boyutlu minerallerin kontrol ettiği düşünülmüştür. Bu nedenle kil boyutlu minerallerin etkisini incelemek amacıyla ıslak analiz (hidrometre) yöntemine göre silt ve kil boyutundaki daneler birbirinden ayrılmaya çalışılmıştır. Orijinalinde %50 silt + %50 kil boyutunda dane içeren numuneden %5 kil + %95 silt, ve %82 kil + %18 silt boyutunda dane içeren numuneler elde edilmiştir. Kil boyutunda danelerin artmasına bağlı olarak kıvam limitleri de artış göstermiştir. Böylece, orijinalinde CH grubu olan zemin sınıfı %5 kil+%95 silt olan numunede CL, %82 kil +%18 silt olan numunede CH olarak belirlenmiştir. Kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile C_c değerinin arttığı, M_c , c_v ve k_v değerlerinin düştüğü görülmüştür. Kil boyutundaki minerallerin Samsun Çarşamba mavi kilinin krip davranışına etkisini incelemek maksadıyla 100 kPa gerilme seviyesinde 347 günlük krip deneylerini içeren uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kil boyutundaki dane yüzdesinin artmasıyla t_p süresi 4,5 dakikadan 146 dakikaya uzarken, t_s süresi 17 günden 26 güne çıkmıştır. Ayrıca, kil boyutunda dane yüzdesinin fazla olduğu numunede C_α değerinin de fazla olmasına karşın, C_α/C_c oranı 0,0315 den 0,0274'e düşmüştür. Ancak, belirlenen $C_{\alpha et}$ değerinin $C_{\alpha e}$ değerine göre %5 kil+%95 silt içeren numunede yaklaşık 7 kat artarken, kil boyutundaki dane yüzdesinin artmasıyla artış miktarının %82 kil+%18 silt olan numunede 11 kata yükseldiği görülmüştür. Ayrıca, %0,005~0,105 dakika⁻¹ aralığında değişen deformasyon hızlarında 14 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon (SDHK) deneyi yapılmıştır. SDHK deneyleriyle belirlenen $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerin klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen EOP $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileriyle uyumludur. Her iki konsolidasyon deney sistemiyle belirlenen $M_c - \log \sigma'_v$ eğrileri arasındaki benzerliğin kil yüzdesinin fazla olduğu numunede daha fazla olduğu görülmüştür. SDHK deneylerinde c_v değerleri klasik konsolidasyon deneyindekilere göre genellikle daha büyük bulunmuştur.

Numune boyutu ile konsolidasyon parametrelerindeki değişimi incelemek amacıyla 7 farklı boyutta Samsun-Çarşamba mavi kili numunelerinde klasik konsolidasyon deneyleri ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. 5 cm çapında 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm ve 10 cm yüksekliğinde ve 2 cm yüksekliğinde 7 cm ve 10 cm

aplı RHH numuneler kullanılmıştır. Klasik konsolidasyon deneylerinin ϵ_v -log σ'_v grafiklerinde birincil konsolidasyon sonu eğrilerinin birebir örtüştükleri ve C_c sıkışma indisi ve M_c değerlerinin değişmedikleri anlaşılmıştır. Ayrıca, klasik konsolidasyon deneylerinin ϵ_v -log t grafiklerinden numune yüksekliğinin artmasıyla t_p süresinin drenaj boyunun karesiyle doğru orantılı olarak arttığı ve c_v ve k_v değerlerinin numune boyutundan etkilenmedikleri belirlenmiştir. 100 kPa gerilmesinde 327 günlük krip deneylerini içeren uzun süreli konsolidasyon deneylerinde H/D oranı 0,4~2,0 arasında değişen 4 farklı numune boyutunda RHH numunelerle çalışılmıştır. Krip deneylerinde numune boyutunun değişiminin ikincil sıkışma katsayısı C_{α} değerini etkilemediği, üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha et}$ değerinin H/D oranının artmasıyla düştüğü görülmüştür. Aynı H/D oranına sahip numunelerde, numune yüksekliği fazla olanda belirlenen $C_{\alpha et}$ değerinin düşük kaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında Samsun-arşamba mavi kili numuneleri üzerinde yapılan araştırma sonuçları, kilin üçüncül sıkışma davranışının dane yapısı ve organik içerik ve kil boyutundaki danelerin sıkışmasının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Homojen bir zemin yapısı olana kadar yoğurmak üçüncül sıkışma oranını %30 oranında azaltmıştır. %8 oranındaki organik içeriği yakmak üçüncül sıkışma oranını yaklaşık %40 oranında azaltmıştır. Kilin kil boyutundaki daneleri %77 oranında azaltmak üçüncül sıkışma oranını %60 oranında azaltmıştır. Birincil ve ikincil sıkışma miktarları için numune yüksekliğinin çok önemli olmadığı görülse de laboratuvardaki üçüncül sıkışma davranışının araziye temsil edebilmesi için ileriki araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Çünkü, uzun süreli konsolidasyon deneyleri sırasında numunelerdeki değişimlerin numune boyutuna göre farklılık gösterebildiği bulunmuştur.

TIME DEPENDENT COMPRESSION BEHAVIOUR OF SAMSUN CARSAMBA BLUE CLAY

SUMMARY

In Turkey, housing problem due to rapid increase of human population and immigration to big cities enforces the municipalities to allow the sites having unfavorable geotechnical soils for settlement. Moreover, the requirement for large areas makes the lowlands with thick alluvial soil deposits be used for the structures like airports. Generally, high ground water causes low bearing capacity and high compressibility in soft clays in these types of soil deposits.

One of the examples of these types of problems encountered on soft clays in Turkey is the settlement problem at Samsun Carsamba International Airport that has been constructed on Samsun Carsamba plain of Black Sea region. During the construction stage of the airport the site explorations illustrated that the settlement problems would occur in the soil profile at the runway sections containing a soft blue clay layer named as Samsun-Carsamba Blue clay. The layer encountered under 20 000 m² area at the beginning of the runway was decided to improve by pre-loading. The settlement observations during the one year preloading period showed that tertiary compression would also occur not only in organic soils and peat, but also in soft clays.

To determine the reasons for tertiary compression behavior of Samsun-Carsamba Blue clay on the virgin compression part, a series of parametric studies were conducted on the Shelby and mold samples recovered from the same region. In these studies, the effect of disturbance, organic content, grain size distribution and sample dimensions on time dependent compression behavior of Samsun-Carsamba Blue Clay was investigated. For that purpose, on undisturbed, remolded and reconstituted samples prepared at Rowe cell totally 71 consolidation tests; 15 conventional consolidation tests, 30 constant rate of loading (CRS) tests, 26 long-term consolidation tests were conducted.

The mineralogical investigations on Samsun- Carsamba Blue Clay illustrated that clay grain size minerals consist of 40-50% Ca-montmorillonite, 30% calcite + quartz and 10% kaolin. The tests performed on the clay samples illustrated that consistency limits; $w_L=73\%$, $w_P=29\%$ specific unit weight $\gamma_s=27,6 \text{ kN/m}^3$, and natural water content $w_n=65\%$. According to the Unified Soil Classification System the clay has been classified as high plasticity clay CH.

The most common reason for the soil to continue secondary compressions under constant effective stress is the collapse of the grain structure. To investigate the effect of disturbance on the structure of the clay, undisturbed and remolded samples were used. The $e\text{-log } \sigma'_v$ graph of conventional consolidation tests illustrated that remolding decreased initial void ratio, shifted the compression curves downward, made the precompression pressure uncertain, increased recompression index (C_r) and decreased compression index (C_c). Furthermore, $e\text{-log } t$ graph of conventional consolidation tests showed that remolding decreased consolidation coefficient (c_v) values. Although around preconsolidation pressure c_v values decreased 60% for undisturbed samples, this reduction is not observed on remolded samples. On undisturbed and remolded samples, at various stress levels ranging from 25 kPa to 400 kPa creep tests which lasted 70 to 234 days were performed during 7 long-term consolidation tests. As the dispersed structure at remolded sample illustrated more resistance towards flowing than the folliculated structure at undisturbed sample, remolding increased the primary consolidation time (t_p). Furthermore remolding has decreased the time for secondary compression (t_s) or the initial time of tertiary compression. During the creep tests although the secondary compression coefficient (C_α) and C_α/C_c ratio have slightly increased, it was observed that these increments were negligible. For undisturbed samples as the effective stress of the creep tests was increased, tertiary compression ratio ($C_{\alpha\epsilon t}$) gradually increased. However for remolded samples the greater $C_{\alpha\epsilon t}$ values at lower stress levels decreased. To investigate the post compression behavior of Samsun-Carsamba Blue Clay the samples were gradually loaded after creep tests, but no apparent ageing, leaching or cementing effects were observed on $\epsilon_v\text{-log } \sigma'_v$ graphs of undisturbed and remolded samples.

In this study, the disturbance on the structure of organic content of Samsun-Carsamba Blue clay determined as 8% effect on tertiary compression behavior was

investigated. For that reason on the clay samples with and without organic content reconstituted at a Rowe cell, conventional consolidation tests, long-term consolidation tests and constant rate of consolidation (CRS) tests were performed. To ignite the organic content of the clay, wet and dry combustion techniques were preferred. While wet combustion technique decompose the organic content chemically by using 15% hydrogen peroxide (H_2O_2) solution, dry combustion technique ignites the organic content at 450°C oven. Two of the processes decreased the plasticity of the soil. After combustion the initial void ratio of reconstituted samples prepared at a Rowe cell under 25 kPa stress level was decreased. The conventional consolidation tests illustrated that C_c were reduced approximately 10% by wet combustion and 55% by dry combustion. While the constrained modulus (M_c) does not change at all for wet combusted samples, 40% increments were observed for dry combusted ones. Ignition of the organic content reduced the c_v values 78% for wet combusted, 17% for dry combusted. The combustion of the organic content decreased the vertical permeability coefficient (k_v). Moreover on the samples with and without organic content, 11 long term consolidation tests lasted 85~603 days included one creep test were performed at various stress levels ranging between 25 kPa and 800 kPa. In the tests it was observed that the time for t_p and t_s extended which meant that the beginnings of secondary and tertiary compression stages were delayed. While C_{α} values increased 14% for wet combusted samples, for dry combusted ones it decreased by 20%, but C_{α}/C_c ratios increased for both of them. The average value of tertiary compression ratio $C_{\alpha et}=0,0346$ of reconstituted sample before combustion was decreased by wet combustion 47% and by dry combustion 38%. Although the long-term consolidation tests including the post compression stage after creep tests illustrated no evidence of ageing, leaching or cementing processes on reconstituted samples before combustion, on wet combusted and dry combusted reconstituted samples ageing effects were observed. Furthermore 13 CRS tests were performed at the strain rates ranging between % 0,011~0,074 minute⁻¹. It was observed that $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ curves obtained from CRS tests were in harmony with end of primary consolidation EOP $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ curves determined from conventional consolidation tests and both M_c modulus of the tests are similar. However, c_v values of CRS tests for wet and dry combusted reconstituted samples were 1,5~2,0 times and 10~20 times greater than c_v values of conventional consolidation tests.

It was also thought that the clay size particles controlled the tertiary compression behavior of the Samsun-Carsamba Blue clay. For that reason, clay size particles and silt size particles were separated by wet sieve analysis procedures. The samples with %5 clay+ %95 silt and %82 clay + %18 silt grain size distribution were obtained from the original sample with %50 silt + %50 clay grain size distribution. Due to the increment of clay grain size particles the consistency limits increased. So originally CH type soil was changed to CL for the sample with %5 clay+ %95 silt and CH for the sample with %82 clay + %18 silt. The conventional consolidation tests illustrated that as the content of clay grain size increased; C_c value increased, M_c , c_v and k_v values decreased. Furthermore the creep tests lasted 347 days at 100 kPa stress level during the long-term consolidation tests showed that according to the clay content, t_p values extended proportionally from 4,5 minute to 146 minute and t_s values also increased from 17 days to 26 days. Although the clay size grains raised C_α values, the ratio of C_α/C_c decreased. Furthermore, it was seen that 7 times increase of $C_{\alpha\epsilon t}$ values compared with $C_{\alpha\epsilon}$ values for the sample with %5 clay+ %95 silt, raised to 11 times for the sample with %82 clay + %18 silt. In addition 14 CRS tests were performed at various strain rates ranging from %0,005 to 0,105 minute^{-1} . $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ graphs determined by CRS tests and conventional consolidation tests are similar. The similarity of $M_c - \log \sigma'_v$ graphs obtained from these two type consolidation tests increased at the samples with more clay size particles content. In general c_v values of CRS tests are higher than the c_v values of conventional consolidation tests.

Finally, to investigate the deviation of the consolidation parameters of Samsun-Carsamba Blue clay with the sample dimensions, on sample with 7 different dimensions conventional consolidation and long-term consolidation tests were conducted. 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm and 10 cm high reconstituted samples within 5 cm diameter and 2 cm high reconstituted samples within 7 cm and 10 cm diameter were used. The $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ graph of conventional consolidation tests illustrated that the end of primary compression curves were almost similar, and C_c and M_c values did not change. Furthermore, the $\epsilon_v - \log t$ graph of conventional consolidation tests As the height of the sample increased, t_p values also increased directly proportional with the square of the drainage height of sample so, c_v and k_v values of the samples were not affected from sample dimensions. Long-term consolidation tests including creep tests lasted 327 days at 100 kPa stress level on reconstituted samples which

had 4 different height over diameter ratios (H/D) ranging from 0,4 to 2,0 were performed. In these creep tests, it was observed that although variation of sample dimension did not changed the secondary compression coefficient, tertiary compression $C_{\alpha\epsilon t}$ values decreased as the H/D ratios increased. And also it was seen that the samples with the same H/D ratio, $C_{\alpha\epsilon t}$ values were smaller in the taller sample.

Consequently, the observations performed on Samsun-Carsamba blue clay samples in the scope of this thesis illustrates that the tertiary compression behavior of the clay is a function of grain structure, and the compression of organic content and clay size particles. Remolding to have homogenous soil structure causes 30% reduction on tertiary compression ratio. Ignition of organic content determined as 8% decreases the tertiary compression ratio approximately 40%. 77% reduction in the clay size particles content of the clay decreases the tertiary compression ratio 60%. It was also shown that although the height of the sample is not important for primary and secondary compressions, further investigations is needed to simulate the in-situ tertiary compression behavior in the laboratory. It was seen that during the long-term tests the alterations of the samples may vary depending on the sample size.

1. GİRİŞ

Geoteknik Mühendisliği açısından zeminler dane, hava ve sudan oluşan heterojen yapılardır. Çakıl ve kum boyutundan, silt ve kil boyutuna kadar çok çeşitlilik gösteren daneler, doğada genellikle farklı oranlarda karışmış halde bulunurlar. Daneler arasında kalan boşluklarda bulunan havanın yerini suyun kaplama miktarına göre zeminler, tam doygun veya kısmi doygun olarak iki farklı durum için incelenmektedir. Çevre koşullarına, jeolojik geçmişine ve zamana bağlı olarak özellikleri büyük değişiklikler gösteren zeminler, anizotrop inşaat malzemeleridir. Böyle bir malzemenin mühendislik davranışını tanımlayan sabit malzeme katsayılarının belirlenmesi ve genel analitik modellerin kurulması pek mümkün olmamaktadır. İnceleme konusu olan her bölgede, karşılaşılan her zemin türüne ait özelliklerin deneysel olarak saptanması ve bu deneyler yapılırken arazi koşullarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle, deneysel yöntemler zemin mekaniğinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Projenin özelliklerine göre, yapı ömrü boyunca çeşitli yüklemelere maruz kalacak zeminlerin, viskoz elastoplastik davranışını belirleyebilmek için arazi koşullarında veya arazi koşullarının göz önüne alındığı laboratuvar ortamlarında örselenmemiş zemin numunelerinin üzerinde yapılacak deneysel çalışmalarla zeminin mühendislik parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Zeminin herhangi bir yükleme durumuna göre davranışını önceden tahmin etmek için çeşitli araştırmacılarca önerilen zeminlerin mühendislik özellikleri ile zemin endeks özellikleri arasındaki bağıntılar da bulunmaktadır. Ancak, bu bağıntıların istatistikî çalışmaların sonucu çıkarıldığı ve incelenen bölgedeki zemin türünü kapsadığı unutulmamalıdır.

Geoteknik mühendisliği açısından yapılacak herhangi bir yapı türünün inşa edileceği zeminle etkileşiminde dikkat edilmesi gereken iki önemli konu vardır. Bunlardan birincisi, zeminin taşıma gücünün istenen güvenlik değerleri içerisinde kalıp kalmadığı, ikincisi ise yükleme nedeniyle yapı ömrü boyunca oluşacak toplam ve farklı oturma miktarlarının yapı türüne bağlı olarak belirlenen oturma sınır

değerlerini aşıp aşmadığının kontrolüdür. Bu tez çalışmasında, zeminlerin sıkışabilirliği üzerinde durulacaktır.

Suya doymuş zeminler herhangi bir yüklemeye maruz kaldıkları zaman sıkışmaktadır. Zemin yapısında oluşan bir gerilme artışını ilk olarak alan boşluk suyu basınçları, ortamın geçirgenlik özelliklerine bağlı olarak zamanla sönümlenmekte ve söz konusu gerilme artışı daneler tarafından taşınmaktadır. Çakıl ve kum gibi kaba daneli zeminlerin geçirgenlik özellikleri çok yüksek olduğundan bu tür zeminlerde oluşan fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi birkaç dakika gibi kısa bir sürede sona ererken, killi zeminlerde bu süre aylar hatta yıllar boyunca devam edebilmektedir.

Herhangi bir yapı yükü altında suya doymuş bir kil zeminde oluşacak fazla boşluk suyu basıncının zamanla sönümlenerek zeminin sıkışmasına *konsolidasyon*, bunun sonucu olarak yapıda meydana gelecek düşey deformasyona da “*konsolidasyon oturması*” adı verilmektedir. Belirli bir zaman diliminde aynı yapı yükü altında konsolidasyon oturma miktarları bölgeden bölgeye farklı olmaktadır. Bunun nedeni, killerin farklı bileşimli minerallerden oluşması, su tutma kapasitelerinin ve bulunduğu ortama bağlı olarak dane çatısının farklılık göstermesidir.

Kil mineralojisine bakıldığında yapraksı ve pulcuklar halinde bulunan killerin hidro alüminyum silikatlardan oluştuğu bilinmektedir. Hidro alüminyum silikatlar ise magnezyum (Mg), potasyum (K), kalsiyum (Ca), sodyum (Na) ve demir (Fe) iyonları içermektedir (Mitchell 1993). Killer, mineralojisine göre Kaolin, Montmorillonit (Smektit), İllit (Hidro mika), Klorit olarak 4 esas gruba ayrılırlar (Holtz ve Kovacs, 1981). Sonuç olarak, kilin mineralojik yapısı konsolidasyon özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Suya doymuş kil minerali numunelerinin sıkışması büyükten küçüğe doğru smektit, illit ve kaolin şeklindedir (Mitchell 1993). Ancak doğada birçok zemin türünde birden fazla kil minerali bulunmaktadır. Bu mineralojik kompozisyonlar, zemin danelerinin şeklini, boyutunu ve yüzeyini etkilediği gibi, daneler arasındaki boşluklarındaki suyla etkileşime girmeleri durumunda aktivite, plastisite, şişme ve hidrolik iletkenlik ve mukavemet davranış karakteristiğinde belirleyici rol alabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Samsun-Çarşamba mavi kili incelendiğinde kil boyutlu minerallerin %40-50 dolayında Ca-montmorillonit, %30 dolayında kalsit+kuvars ve %10 dolayında da kaolin içerdiği görülmektedir (Yılmaz, 2000).

Killer, danelerinin istiflenme şekillerine göre de farklılık göstermektedir. Yapraksı ve pulcuklar şeklinde olan kil daneleri gelişigüzel dağıldığı zaman dağınık yapı (disperse), yüzey yüzeye sıralandığı zaman ise toplu bir yapı (aggregate) oluşmaktadır. Ayrıca toplu yapıdaki kil danelerinin kenar-kenar veya kenar-yüzey şeklinde dizildiğinde topak yapı ortaya çıkarken, yapıda herhangi bir dizilimin bulunmaması durumunda topak olmayan yapı olarak adlandırılmakta ve toplam 4 gruba ayrılmaktadırlar (Mitchell, 1976). Bu şekilde dane istiflenmesi farklılık gösteren killerin, herhangi bir ek gerilme altında fazla boşluk suyunu kaybetmesiyle taşıyıcı olan dane çatısının sıkışma miktarlarında da farklılık görüleceği açıktır. Sabit efektif gerilme altında da sıkışmaya devam eden dane çatısı bozularak ikincil oturmalara neden olmaktadır. Özellikle organik içerikli zeminlerin sıkışmasının önemli bir kısmını oluşturan ikincil sıkışmalar, normal konsolide ve kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu tamamlamamış yumuşak killer için de büyük mertebelere ulaşabilmektedir. Bu nedenle, pratikte çoğu zaman ihmal edilen bu ikincil sıkışma miktarlarının bu tip zeminlerle çalışılırken yapı ömrü de göz önünde tutularak oturma hesaplarına katılması gerekmektedir.

Yük uygulanmasının başında konsolidasyon hızının fazla olmasından dolayı, zamana bağlı olan sıkışma davranışı zamanın logaritması cinsinden incelenebilir. Buna göre çizilecek düşey deformasyon (ϵ_v) - logaritma zaman ($\log t$) grafiği incelendiğinde birincil konsolidasyon ile ikincil sıkışmalar arasındaki ayrım, birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından sıkışma hızında ani bir düşüşle kendini göstermektedir. İkincil sıkışmalar sırasında ise sıkışmalar logaritma zamanla azalabileceği gibi, sabit kalabilmekte veya artabilmektedir. Organik zeminlerin ϵ_v - $\log t$ grafiğine bakıldığında, birincil konsolidasyon sonrasında ikincil sıkışmalar esnasında zamanla eğrinin eğiminde doğrusal olmayan bir artış görülmektedir (Edil ve den Haan 1994, Hanson 1996). Bu davranış “*üçüncül sıkışma*” veya “*gecikmiş ikincil sıkışma*” olarak adlandırılmaktadır. Edil ve Dhowian (1979), üçüncül sıkışmayı birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından $\epsilon_v - \log t$ grafiğinin teğetsel eğimindeki bir artışla karakterize etmişlerdir. Sonraki araştırmalar ise bu üçüncül sıkışma davranışının sadece organik zeminlere has olmadığını, yumuşak killerde de görülebileceğini gerçeğini gözler önüne sermektedir (Yılmaz, 2000). Bu çalışma kapsamında da yumuşak bir kil olan Samsun-Çarşamba mavi kilinden alınan numuneler kullanılarak, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının zamana bağlı olarak

değişimi deneysel olarak incelenmekte ve bu davranışa etki eden parametreler araştırılmaktadır.

1.1 Amaç

Samsun Çarşamba Havaalanı inşaatı sırasında, uçuş pistinin km 0+000~km 0+500 arasında yer alan mavi renkli yumuşak kil zeminin önyükleme ile iyileştirilmesi sırasında meydana gelen ikincil sıkışmaların artarak devam ettiği bilinmektedir. Bu konuyla ilgili olarak bugüne kadar yapılan çeşitli bilimsel çalışmalar bulunmaktadır (Şendir, 2001; Çevikbilen, 1999; Yılmaz, 2004; Yılmaz, 2000).

Bu kapsamda yapılan çalışmalar kısaca aşağıda özetlenmektedir. Havaalanında km 0+000~km 0+500 boyunca önyükleme sahasına paralel bir alanda açılan 3 adet sondaj ve 7 adet muayene çukuru ile 10 m kalınlığındaki mavi kil tabakasından alınan örselenmemiş tüp ve kalıp numuneleri kullanılmıştır. Bu numuneler İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilerek nem odasında saklanarak, laboratuvar koşullarında klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiş, zeminin birincil ve ikincil sıkışma davranışı incelenmiştir (Çevikbilen, 1999; Yılmaz, 2000).

Bu çalışmalar sırasında, arazide gözlenen birincil konsolidasyon sonrası zamanla artan oturmalara laboratuvarda yapılan uzun süren krip deneylerinde de rastlanılmıştır. Bunun üzerine çalışmalar, bölgede açılan ek muayene çukuru ile aynı tabakadan alınan kalıp numuneler üzerinde devam ettirilmiştir. Infrared, X-Ray, DTA-TG analizleri yapılan numunelerin kimyasal yapısı belirlenmiştir. Hazırlanan bir program çerçevesinde daha uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılarak, dane çatısının çökmesi olarak adlandırılan ikincil ve üçüncül sıkışmalar incelenmiştir. Sıkışmaların dane çatısında yapmış olduğu değişimi göstermek amacıyla laboratuvar koşullarında uzun süreli konsolidasyon deneyleri sırasında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışları esnasında alınarak kurutulan numuneler üzerinde çekilen SEM fotoğrafları bulunmaktadır. Sonuç itibarıyla, üçüncül sıkışma davranışı, ikincil sıkışma sırasında daneler arasındaki kemerlenmenin yükün uygulanma süresine bağlı olarak azalması ve sonuçta organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılarak (bozularak) yeniden zeminin oluşan bu yeni boşlukları dolduracak şekilde sıkışmaya başlaması olarak açıklanmaktadır. Ayrıca tüm konsolidasyon süreci boyunca kil zemin içerisindeki daneler ile organik malzemelerin davranışları karşılaştırıldığında,

üçüncül sıkışmaların esas olarak zemin içindeki organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılması sebebiyle olduğu görüşüne ulaşılmaktadır (Yılmaz, 2000).

Bölgede yapılan incelemelerde çoğunluğunu bitki yapraklarının oluşturduğu turba tabakalarına yer yer rastlanılmaktadır. İnceleme konusu sahada ise bu tabakalara rastlanmazken, Samsun-Çarşamba mavi kil tabakasından alınan numuneler içerisinde görülen koyu kahverengi organik içeriğin aynı kökenli olduğu düşünülmektedir. Ancak tümü ince daneli olan zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'na göre organik zemin sınıfına girmeyerek yakma kaybına (LOI) göre organik içerik ağırlıkça %8,25 mertebesinde sınırlı kalmaktadır. Ayrıca Samsun-Çarşamba mavi kil numunesinde 200 nolu elek üstünde kalan organik içerik ancak %1,5 düzeyindedir. Yılmaz'ın (2000) çalışmasında 25 kPa değerinden 400 kPa'a kadar 5 farklı konsolidasyon basıncı altında gerçekleştirdiği tüm kripi deneylerinde de gözlemlediği kilin üçüncül sıkışma davranışının önemli bir nedeni olarak kil içerisindeki organik malzemeleri göstermiştir. Ancak çok az miktarda ve küçük boyutlarda olan organik içeriğin Samsun-Çarşamba mavi kili'nin sıkışma davranışında belirleyici olması düşündürücüdür. Konu ile ilgili olarak hazırlanan bu tez çalışmasında da söz konusu zeminin üçüncül sıkışma davranışının sebeplerini araştırmak için üçüncül sıkışmalar üzerinde etkisi olabileceği düşünülen diğer parametreler araştırma konusu edilmektedir. Bu amaçla, üçüncül sıkışmalarla ilgili nedenselliğe yönelik olarak dane çatısının çökmesi, organik içerik, dane çapı dağılımının etkisi ve numune boyutunun etkisi incelenmiştir.

1.2 Kapsam

Bu çalışma kapsamında örselenmemiş, örselenmiş, organik içeriği yakılmış ve kil boyutundaki dane yüzdesi değiştirilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneyleri ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri ile sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri yer almaktadır. Bunun yanı sıra farklı boyutta numunelerle çalışılarak numune boyutunun etkisi ve farklı drenaj boyları için sıkışma davranışının değişimi de araştırılmaktadır.

Yoğrulmak suretiyle dane çatısı değiştirilen numunelerle çalışılarak elde edilen sonuçlar örselenmemiş numune sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Bu kapsamda yapılan 4 adet klasik konsolidasyon deneyi, farklı gerilmeler altında süreleri 70 ile 234 gün arasında değişen kripi deneylerini içeren 8 adet uzun süreli konsolidasyon

deneyi bulunmaktadır. Bu deneyler sonucunda yoğrularak dane çatısı yapay olarak bozulmaya çalışılan numunelerin yanı sıra kurutulup öğütülmüş ve Rowe hücresinde tekrar hazırlanmış numunelerde de benzer krip davranışının olduğu gözlenmiştir.

Organik zemin sınıfına girmeyen inceleme konusu zeminde, üçüncül sıkışmaların numunelerin içerisinde az miktarda bulunan organik içerikten kaynaklanabileceği yönünde bulgular bulunmaktadır (Yılmaz, 2000). Yakma kaybı deneylerinden organik içeriği %8,25 olarak belirlenen numunelerin organik içeriğinin yok edilmesi amacıyla ıslak yakma ve kuru yakma diye anılan iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ıslak yakma, hidrojen peroksit ile numune içerisindeki organik içeriğin okside edildiği yöntemdir. Kuru yakma yöntemi ise yüksek sıcaklıkta numunenin yakılması esasına dayanmaktadır. Kuru yakma ile kilin kimyasının değişmemesi için farklı sıcaklıklarda yakılan numunelerin Fourier Transform Infrared Spektroskopi analizleri yapılarak doğru sıcaklık bulunmaya çalışılmıştır. İki yöntemle de yakılan numuneler Rowe hücresinde tekrar sedimente edilerek Rowe hücresinde hazırlanmış (RHH) deney numuneleri elde edilmiştir. Yakılma öncesi ve yakılma sonrasında RHH numuneler üzerinde toplam 3 adet klasik konsolidasyon deneyi, süreleri 90 ile 610 gün arasında değişen 11 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi ve hızları $0,011 \text{ dak}^{-1}$ ile $0,105 \text{ dak}^{-1}$ aralığında değişen 13 adet Sabit Deformasyon Hızlı konsolidasyon deneyi olmak üzere toplam 27 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

Üçüncül sıkışma davranışına kil boyutundaki malzeme içeriğinin neden olabileceği düşüncesiyle numune içerisindeki kil ve silt boyutundaki dane yüzdeleri farklı numunelerin davranışı incelenmiştir. Araziden alınan numunelerin başlangıçta %50 silt+%50 kil içerdiği tespit edilmiştir. Zeminin dane çapı dağılımını belirlemekte kullanılan ıslak analiz deney prosedürüyle silt ve kil boyutundaki daneleri ayırmak tamamen başırlanamamakla birlikte bu çalışma kapsamında %85 kil+%15 silt ve %95 silt+%5kil boyutunda dane içerikli yeni numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerden hazırlanan RHH deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen 4 adet klasik konsolidasyon deneyi, yaklaşık 1 yıl süren 3 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi ve hızları $0,011 \text{ dak}^{-1}$ ile $0,105 \text{ dak}^{-1}$ arasında değişen 14 adet Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon (SDHK)deneyi olmak üzere toplam 21 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında kil boyutundaki dane yüzdesinin artmasıyla sıkışma miktarının arttığı, ikincil

sıkışmaların başlama süresinin ise geciktiği belirlenmiştir. Üçüncül sıkışmalar ise her üç numunede de varlığını korumuştur.

Laboratuvarda tanımlanan üçüncül sıkışma davranışının arazideki oluşum süresinin ve mertebesinin belirlenmesi amacıyla numune boyutunun ve drenaj boyunun etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 3 adet klasik konsolidasyon aletinde bir dizi değişiklik yapılarak, farklı numune boylarında deney yapılabilir hale getirilmiştir. Bu maksatla, 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm yükseklikte ve 5 cm çapında; 2 cm yükseklikte ve 7 cm, 10 cm çapında ve 4 cm yükseklik, 10 cm çapında hazırlanan paslanmaz çelik ringler kullanılmıştır. RHH numunelerin yükseklik/çap oranları farklı ringler içerisine alınmasıyla elde edilen deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen 7 adet klasik konsolidasyon deneyi ve 327 günlük 4 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi bulunmaktadır. Sonuç olarak; numuneler drenaj boyunun uzamasıyla birincil konsolidasyon süreleri uzarken, deneyler numune boyutundan bağımsız olarak aynı sıkışma-efektif gerilme eğrilerini vermektedir. İkincil sıkışma miktarları da aynı olan numunelerde üçüncül sıkışmalar da benzer zamanlarda oluşmaya başlamaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci ve üçüncü bölümünde, konuyla ilgili önceki çalışmalar hakkında kısa bir bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde ise tez çalışması sırasında kullanılan deney düzenekleri tanıtılarak, zemin endeks özellikleri ve deneylerde kullanılan numunelerin hazırlama yöntemleri anlatılmaktadır.

Klasik uzun süreli ve Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon (SDHK) deneylerinin sonuçlarının yer aldığı beşinci bölüm 5 ana başlık altında toplanmıştır. İlk olarak numune hazırlama koşulunun söz konusu numunenin sıkışma davranışına olan etkisi incelenmektedir. Bu kısımda yoğrulmuş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçları birlikte verilmektedir. İkinci kısımda, numune içerisinde yer alan organik içeriğin etkisini incelemek amacıyla yakılarak RHH numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçları yer almaktadır. Üçüncü kısımda, kil yüzdesi farklılaştırılan numuneler üzerinde tamamlanan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçları ile kil yüzdesinin sıkışma davranışına etkisi konu edilmiştir. Dördüncü kısımda, laboratuvarda belirlenen sıkışma miktarlarının arazideki ile kıyaslanabilmesi amacıyla farklı numune boyutlarında gerçekleştirilen klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri anlatılmaktadır.

Samsun-Çarşamba mavi kilinin sıkışma davranışına etkidiği düşünölen parametreler ile sabit gerilme altında ve sabit deformasyon hızında gerçekleştirilen konsolidasyon deneylerinin sonuçlarının genel değeriendirmeleri ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmaları bölüm içlerinde verilmektedir.

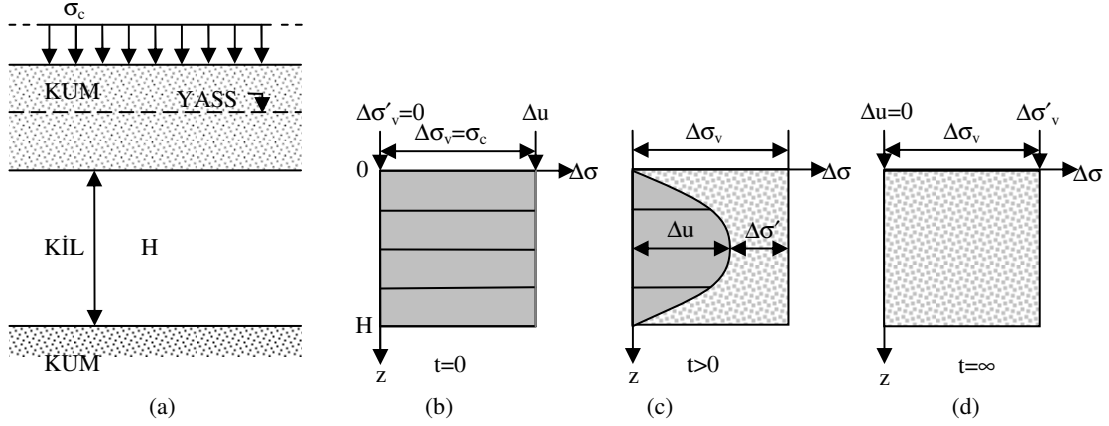
Sonuç ve önerilerin yer aldığı altıncı bölümde ise, bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular özetlenerek tartışılmış, ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. İNCE DANELİ ZEMİNLERDE BİRİNCİL KONSOLİDASYON

Zemin Mekaniği'nin kurucularından Karl Terzaghi Haliç'in yumuşak siltli kil zeminine oturtulmuş eski İstanbul yapılarındaki toplam ve farklı oturma, gözlemleri sonucunda killerin sıkışmasında en önemli etkeni araştırmıştır. Yapı yükleri altında zemin tabakalarında oluşan gerilme artışlarına bağlı olarak oturma miktarlarındaki farklılıkları tespit etmiştir. Suyu doymuş zeminlerde danelerin sıkışmasını ihmal ederek daneler arasındaki boşluklarda bulunan suyun zemine uygulanan düşey gerilmeyi taşıdığı ve böylece fazla boşluk suyu basıncının oluştuğuna karar vermiştir. Ayrıca, zemin tabakalarının geçirimsizliklerinin farklı olması sebebiyle oluşan bu fazla boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi de farklı süreler alacaktır. Bu durumda zemin içinde bölgeden bölgeye farklılık gösteren fazla boşluk suyu basıncının yaratacağı hidrolik yük farkı, yüksek basınçtan alçak basınç tarafına doğru bir su akışı meydana getirmektedir. Bunun sonucunda zamanla sistemden çıkacak su hacminin boşluk hacminde bir azalmaya ve bu azalmanın da oturmaya neden olduğu söylenebilir.

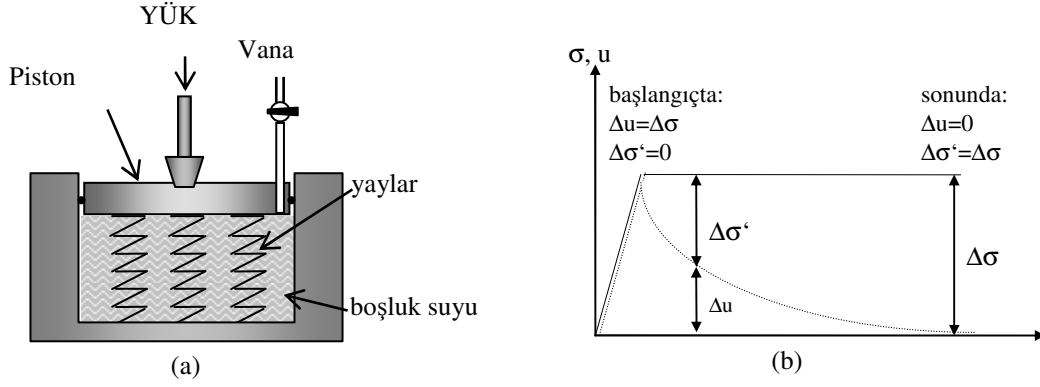
Terzaghi 1943 yılında yayınladığı çalışmasında, konsolidasyon olgusunu suyun yerini havanın almaması koşuluyla doymuş bir zeminin su muhtevastaki değişim olarak tanımlamaktadır. Konsolidasyon kavramını anlamak için yeraltı su seviyesinin altında H kalınlığında bir kil tabakasını çok geçirgen iki kum tabakası arasında düşünelim (Şekil 2.1a). Eğer zemin yüzeyine büyük bir alana σ_c sürşarj gerilmesi uygulanırsa kil tabakasında boşluk suyu basıncı artacaktır. Sonsuz yayılı bir yük için derinlikle düşey gerilme artışının zemin yüzeyine uygulanan sürşarj gerilmesine eşit olacağı açıktır. Yük uygulanmasının hemen ardından kil tabakasında tüm derinlikler için toplam gerilme artışına eşit bir boşluk suyu basıncı oluşacaktır ($\Delta u = \Delta \sigma$) (Şekil 2.1b). Bu durumda toplam gerilmeden boşluk suyu basıncının çıkartılması ile bulunan efektif gerilmedeki artış ise kil içerisindeki tüm derinliklerde sıfır $\Delta \sigma' = 0$ olacaktır. Yani $t=0$ anında kil içerisindeki gerilme artışı tümüyle boşluk suyu basıncı tarafından karşılanmaktadır. Sürşarj yükü uygulanmasından belli bir zaman sonra $t>0$ kil tabakası içerisindeki boşluklardan çok geçirgen olan kum tabakalarına doğru bir

akış olması ile fazla boşluk suyu basıncı azalacaktır. Bu durumda $\Delta u < \Delta \sigma_v$ olacağından $\Delta \sigma' > 0$ olur (Şekil 2.1c). Teorik olarak kilin tüm derinliklerindeki fazla boşluk suyu basıncı kademeli olarak drenajla $t=\infty$ anında tümüyle sönmüş olacaktır. O zaman $\Delta u=0$ ve $\Delta \sigma'=\Delta \sigma$ olacaktır (Şekil 2.1d).



Şekil 2.1: Bir kil tabakasında konsolidasyon olgusu

Terzaghi ödometre adını verdiği deney aletinde ring içerisine yerleştirdiği örselenmemiş zemin numunesini, numune üzerine kademeli olarak ölü yük koymak suretiyle düşey yönde sıkıştırmış, zamanla oluşan sıkışma miktarlarını da not etmiştir. Terzaghi kurduğu reolojik modelinde, konsolidasyonu temsil edebilmek için zemini çelik bir yaya benzeterek, yayları sürtünmesiz bir pistonla bağlı ve silindirin içerisini de su ile dolu kabul etmiştir (Şekil 2.2). Zeminin hidrolik iletkenliğini temsil etmesi için de sisteme bir vana ilave etmiştir. Buna göre modelde, zemine etkiyecek ek gerilmeler düşey yönde bir piston aracılığıyla sisteme iletilmektedir. Yük uygulandığı anda vana kapalıyken su sıkışmaz olarak kabul edildiğinde yay sıkışmayarak sabit kalmaktadır. Bu yük artımı, toplam gerilmede $\Delta \sigma$ artışına neden olacağından, boşluk suyu basıncında bu gerilme artışına eşit bir artış meydana gelmektedir ($\Delta \sigma = \Delta u$). Fazla boşluk suyu basıncı, vananın açılmasıyla fazla suyun dışarı akmasına neden olacağından, yük artımsal olarak yaya aktarılmaya başlanmaktadır. Tüm yük yay tarafından taşınmaya başladığı ana kadar yay sıkışmaktadır. Sonunda efektif gerilmedeki artış, toplam gerilmedeki artışa eşit olmakta ve fazla boşluk suyu basıncı sıfıra inmektedir. Sıkışma oranı, vananın açık kalma süresine bağlı olmaktadır.



Şekil 2.2: Bir boyutlu konsolidasyon a) Terzaghi modeli b) Gerilme-zaman eğrisi

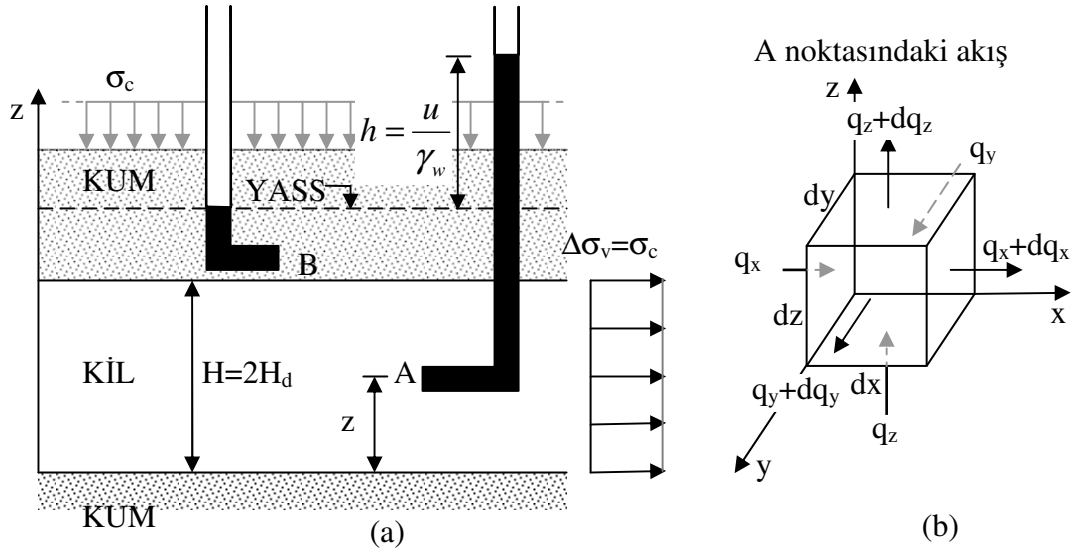
2.1 Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi

Bir boyutlu konsolidasyonun zamana bağlı hızı için teori ilk kez Terzaghi tarafından ortaya atılmıştır. Matematiksel denklemlerin türetilmesinde kullanılan kabuller aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kil tabakası homojendir.
- Kil tabakası suya doygundur ($S=100\%$).
- Zemin tabakasının sıkışması sadece boşluklarda bulunan suyun dışarı sızmasına bağlı olarak oluşan hacim değişiminden kaynaklanmaktadır.
- Darcy kanunu geçerlidir ($V=k \times i$)
- Zeminde Şekil değiştirme sadece yükün uygulandığı doğrultuda olur.
- Konsolidasyon sırasında konsolidasyon katsayısı (c_v) sabittir.
- Geçirgenlik (k_v) her yük kademesinde sabittir.
- Zamana bağlılık geçirgenliğe bağlıdır.
- Toplam ve efektif gerilmeler herhangi bir yatay düzlemde her noktada aynıdır.

Bu kabuller altında Şekil 2.3a'da gösterildiği gibi H kalınlığındaki bir kil tabakasının çok geçirgen iki kum tabakası arasında yer aldığını düşünelim. Zemin yüzeyine sonsuz yayılı bir yük uygulanması durumunda, zemine etkiyecek olan σ_c konsolidasyon basıncı, suya doygun kil tabakasında da $\Delta\sigma_v$ kadarlık bir düşey basınç artışına sebep olacaktır. Bu anda ($t=0$) kil tabakasında herhangi bir A noktasında da boşluk suyu basıncı (u) kadar artacaktır. Aynı şekilde boşluksuyu basıncındaki bu

artış kum tabakasında da oluşsa da ortamın geçirimsizliğine bağlı olarak çok kısa süreler içerisinde sönümleneceğinden pratik olarak boşluk suyu basıncı artışının oluşmadığı kabul edilebilir. Bu durumda, Şekil 2.3a'dan görülebileceği gibi kum tabakası içerisinde herhangi bir B noktası ile kil içerisindeki A noktasının arasında piyezometrik bir yük farkı oluşacaktır. Bunun sonucunda basıncın fazla olduğu ortamdan az olduğu ortama doğru bir su akışı meydana gelecektir.



Şekil 2.3: Bir kil tabakasında konsolidasyon olgusu

Laplace'ın süreklilik denkleminde dayanan akım ağı kavramı, bir zemin kütlesi içerisinde verilen bir nokta için sabit rejimli akışı tariflemektedir. Akımı süreklilik denkleminde üretmek için Şekil 2.3b'deki gibi A noktasında $V=dx.dy.dz$ hacminde bir birim zemin prizması düşünelim. Süreklilik denkleminde göre prizmaya giren ve çıkan su miktarları eşit olmalıdır.

$$\frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} = 0 \quad (2.1)$$

Şekil 2.3a'da gösterilen gibi zemin yüzeyine etkiyecek yükün sonsuz yayılı olduğu bir boyutlu konsolidasyonun geçerli olduğu bir durumda ise zemin kütlesi içerisinde su giriş çıkışı sadece düşey doğrultuda olmaktadır. Zemin prizma elemanına x, y ve z doğrultusunda Darcy kanuna göre hesaplanan q_x , q_y ve q_z giren debiler ile q_x+dq_x ve q_y+dq_y ve q_z+dq_z çıkan debilerden akımın sadece z doğrultusunda olması durumunda

q_x , q_y ile q_x+dq_x ve q_y+dq_y sıfır olacaktır. Böylece zemin elemanına giren ve çıkan akımın hızı sırasıyla

$$q_z = v_z \times A_z = k_z \times i_z \times dx \times dy = k_z \times \frac{\partial h}{\partial z} \times dx \times dy \quad (2.2)$$

$$q_z + dq_z = k_z \times (i_z + di_z) \times A_z = k_z \times \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dz \right) \times dx \times dy \quad (2.3)$$

olacaktır. Bağıntılarda v suyun akış hızını, k ortamın geçirgenliğini, i hidrolik eğimi, h ise piyezometrik kot farkını göstermektedir. Bir boyutlu konsolidasyon teorisi uyarınca zemin tabakasının sıkışması sadece boşluklarda bulunan suyun dışarı sızmasına bağlı olarak oluşan hacim değişiminden kaynaklandığı kabulüne göre, zemin elemanın hacmindeki değişimin hızı,

$$(q_z + dq_z) - q_z = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.4)$$

olacaktır. 2.2 ve 2.3 bağıntılarının 2.4 eşitliğinin sağ tarafına yerleştirilmesiyle

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dx \cdot dy \cdot dz = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.5)$$

elde edilmektedir. Ayrıca Bernoulli denkleminin A ve B noktaları arasında yazılması durumunda, suyun kil içerisindeki ilerleme hızının çok düşük olması sebebiyle ve bağıntıda hızın karesinin alınmasıyla ifade daha da küçüleceğinden, bağıntıdaki suyun hız bileşeninin ihmal edilmesi yanlış olmamaktadır. Bu durumda iki nokta arasındaki piyozometrik kot farkı, γ_w suyun birim hacim ağırlığı olmak üzere

$$h = \frac{u}{\gamma_w} \quad (2.6)$$

olup 2.5 bağıntısında yerine konulacak olursa;

$$\frac{k}{\gamma_w} \times \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{dx \cdot dy \cdot dz} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.7)$$

konsolidasyon esnasında hacim değişim hızı V_v boşluk hacminin değişim hızına eşit olacağından

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t} \quad (2.8)$$

olmaktadır. Zemin elemanında boşlukların hacmi V_v yerine

$$V_v = e.V_s \quad (2.9)$$

yazılacak olursa, dane hacmi V_s zemin elemanında sabit olacağından boşluk oranı e 'ye bağlı olarak 2.8 eşitliği

$$\frac{\partial V}{\partial t} = V_s \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{V}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{dx.dy.dz}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.10)$$

halini alır. Bu eşitlik 2.7 bağıntısında yerine konulursa

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.11)$$

olacaktır. Efektif gerilmenin artışına bağlı olarak boşluk oranındaki değişim ∂e , ile aralarında doğru orantılı bir ilişki olduğu kabul edilirse

$$\partial e = -a_v \partial(\Delta \sigma') \quad (2.12)$$

olmaktadır. Burada (a_v) sıkışma sayısı olarak tanımlanır. Ayrıca efektif gerilmenin artışı, fazla boşluk suyu basıncı, ∂u değerinin azalmasına bağlı olmaktadır. Böylece,

$$\partial e = -a_v \partial u \quad (2.13)$$

2.13 eşitliği 2.11 eşitliğinde yerine konulursa:

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.14)$$

olmak üzere hacımsal sıkışma katsayısı, m_v

$$m_v = \frac{a_v}{1+e} \quad (2.15)$$

veya

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.16)$$

olmaktadır. Eşitlikteki c_v konsolidasyon katsayısı olup

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2.17)$$

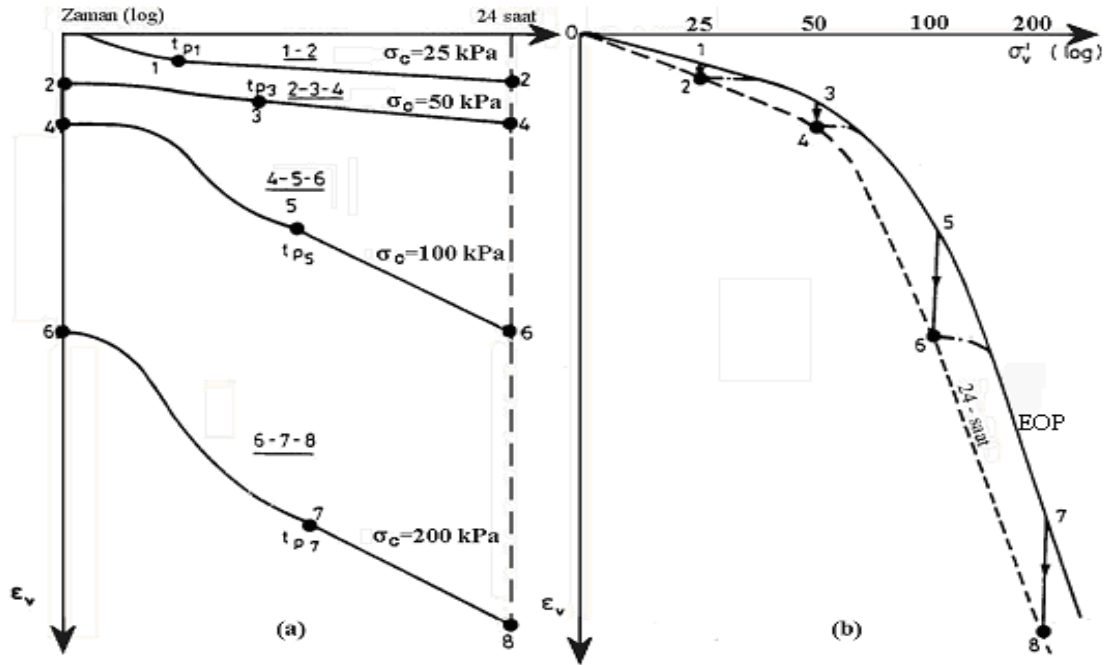
bulunmaktadır.

2.2 Klasik Konsolidasyon Deneyi ve Elde Edilen Parametreler

Terzaghi tarafından geliştirilen ödometre deney aletinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneyi standartlaşarak (ASTM D2435) günümüzde belirli bir zaman diliminde arazideki konsolidasyon oturmalarını tahmin etmek amacıyla yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Deneyde yüksekliğin çapa oranı $H/D < 0,4$ olacak şekilde hazırlanmış ringler içerisine yerleştirilen suya doymun ince daneli örselenmemiş bir zemin numunesi Şekil 2.2'deki gibi tek eksende sabit bir düşey gerilme altında kademeli olarak sıkıştırılmaktadır. Her kademede yük bekleme süresi (çoğunlukla $YBS=24$ saat) boyunca numunenin zamana bağlı sıkışma miktarları ölçülmektedir. Her yükleme kademesinde numune, üzerindeki σ_1 gerilme değerine belirlenen yük artırma oranında ($YAO = \Delta\sigma / \sigma_1 = 1$) yük eklemek ($\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$) suretiyle kademeli olarak sıkıştırılmaktadır. Deneyde genellikle yükleme kademeleri 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ve 800 kPa olarak uygulanmaktadır. Daha sonra boşaltma kademelerine geçilerek, her boşaltma kademesinde birer gün beklemek koşuluyla 800 kPa'dan 400 kPa, 200 kPa, 100 kPa, 50 kPa ve 25 kPa gerilmesine düşülmektedir. Bu deney sonucunda bir mühendislik yapısı nedeniyle zeminde meydana gelebilecek nihai oturma miktarını ve ilgilenilen zaman dilimi (yapı ömrü) içerisinde yapıda oluşabilecek toplam oturmanın yüzdesini belirlemek için gerekli parametreler elde edilmektedir.

Bir konsolidasyon deneyine örnek olarak deneyden elde edilen ϵ_v -logt ve ϵ_v -log σ'_v eğrileri Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Aynı şekilde 200 kPa gerilme seviyesine kadar yüklenen bir zemin numunesinin her yükleme kademesi için zamana bağlı sıkışma yüzdesinin değişimi de göstermiştir. Her yükleme kademesi için Şekil 2.4a'da gösterildiği gibi çizilen ϵ_v -logt eğrileri, birincil konsolidasyon sıkışma evrelerini (0-1, 2-3, 4-5, 6-7) içerdiği gibi, yük artırım süresine bağlı olarak ikincil sıkışma evrelerini de (1-2,3-4, 5-6, 7-8) içerebilmektedir. Eşitlik 2.12'de gösterildiği gibi efektif gerilmenin artışına bağlı olarak boşluk oranındaki değişim, kohezyonlu zemin tabakasının konsolidasyon oturmasını belirlemektedir. Bu nedenle yapıdan dolayı konsolidasyon oturması yapacak tabakanın maruz kalacağı ek gerilmenin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla kohezyonlu tabakada önceki ortalama jeolojik düşey gerilme ile yapı sonrasında çıkılacak yeni gerilme seviyesinin belirlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı klasik konsolidasyon deneyinde çeşitli gerilme

seviyelerinde belirlenen sıkışma yüzdelerinin efektif gerilme artışı ile değişimi Şekil 2.4b'deki gibidir. Şekil 2.4b'de verilen ϵ_v - $\log \sigma'_v$ grafiğinde her yükleme kademesinde 24 saat bekleme sonunda numunede oluşacak düşey deformasyonlar kümülatif olarak işaretlenmiştir. Ancak bu eğrinin ikincil sıkışmaları da içerdiği düşünülecek olursa Birincil Konsolidasyon Sonu olarak adlandırılan EOP eğrisi ϵ_v - $\log t$ eğrisinde birincil konsolidasyon sonundaki noktalar (1,3,5 ve 7) dikkate alınarak çizilmelidir. Düşük ikincil sıkışma özelliği gösteren zeminlerde iki eğri arasındaki fark az olurken, yüksek ikincil sıkışma potansiyeli olan zeminlerde fark büyük olmakta ve 24 saate göre çizilen sıkışma eğrisi EOP eğrisinin daha aşağısında kalarak genellikle daha büyük oturmaları tariflemektedir.



Şekil 2.4: Klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen a) ϵ_v - $\log t$ b) ϵ_v - $\log \sigma'_v$ eğrisi

2.2.1 Oturma-Zaman İlişkisi

Herhangi bir yapı yükünden dolayı suya doymun zeminlere etkiyecek ek gerilmeler neticesinde daneler arasındaki boşluklardaki suyun basıncının artacağı ve bu artan su basıncına da fazla boşluk suyu basıncı denildiği önceki bölümlerde ifade edilmiştir. Bu fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi zeminin hidrolik iletkenliğine bağlı olarak zaman almaktadır. Başlangıçta hızlı olan su çıkışı fazla boşluk suyu basıncının

giderek sönümlenmesi ile yavaşlamakta, fazla boşluk suyu basıncının tamamen sönümlenmesi ile pratik anlamda sona ermektedir. Konsolidasyon olarak tanımlanan bu süreç boyunca Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine göre herhangi bir t anındaki oturma (ΔH_t), konsolidasyon yüzdesi U yardımıyla nihai konsolidasyon oturma (ΔH_∞) değerinden

$$\Delta H_t = U \cdot \Delta H_\infty = U \cdot m_v \cdot \Delta \sigma' \cdot H \quad (2.18)$$

bulunabilir. Bağlıtıda yer alan U konsolidasyon yüzdesi, H konsolide olacak tabaka kalınlığı ve u_0 başlangıçtaki fazla boşluk suyu basıncı u_e ise t anındaki fazla boşluk suyu basıncı olmak üzere

$$U = \frac{1}{H} \int_0^H U_z dz = \frac{1}{H} \int_0^H \left(1 - \frac{u_e}{u_0} \right) dz \quad (2.19)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Değişik drenaj sınır koşullarına ve konsolidasyon basıncının tabaka kalınlığı boyunca dağılışı biçimine bağlı olarak U konsolidasyon yüzdesi fazla boşluk suyu basıncının sönümlenme miktarına eşit olup, T_v , zaman faktörü ile arasındaki ilişki

$$U(\%) = f(T_v) \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Boyutsuz bir büyüklük olan zaman faktörü T_v , başlangıçtan itibaren geçen süre t ile konsolidasyon katsayısı c_v ve drenaj yolunun uzunluğu olan H_d 'ye bağlı olup,

$$T_v = \frac{c_v \times t}{H_d^2} \quad (2.21)$$

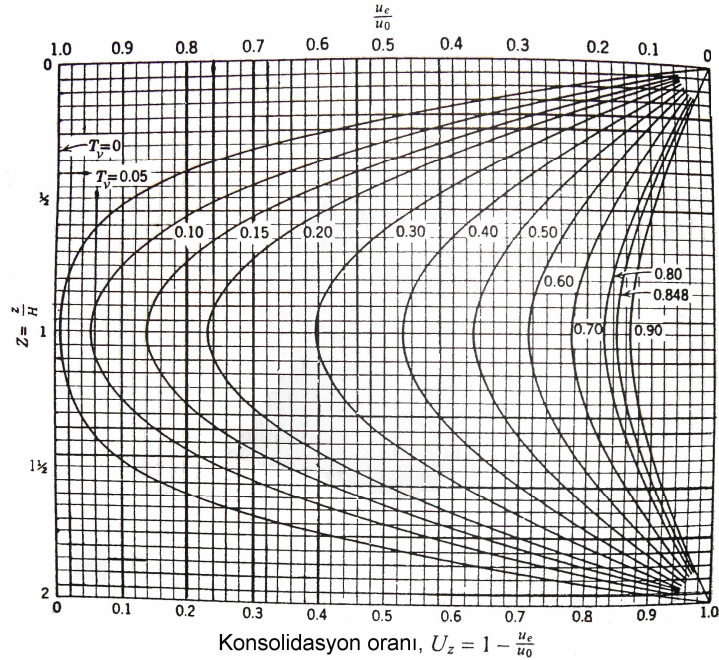
şeklinde tanımlanmaktadır. Drenaj boyu uzunluğu tabakanın her iki yüzü de geçirimli ise $H_d=H/2$; tabakanın sadece bir yüzü geçirimli ise, $H_d=H$ olarak alınmaktadır. Konsolidasyon yüzdesi derinlikle değişeceği için çift yönlü drenaj koşulunda z derinliğindeki bir noktadaki konsolidasyon değeri;

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{(2m+1) \cdot \pi / 2} \cdot \left(\sin \frac{(2m+1) \cdot \pi / 2 \cdot z}{H} \right) \times e^{-[(2m+1) \cdot \pi / 2]^2 \cdot T_v} \quad (2.22)$$

bağıntısından bulunabilir. İncelenen tabaka için ortalama bir değer;

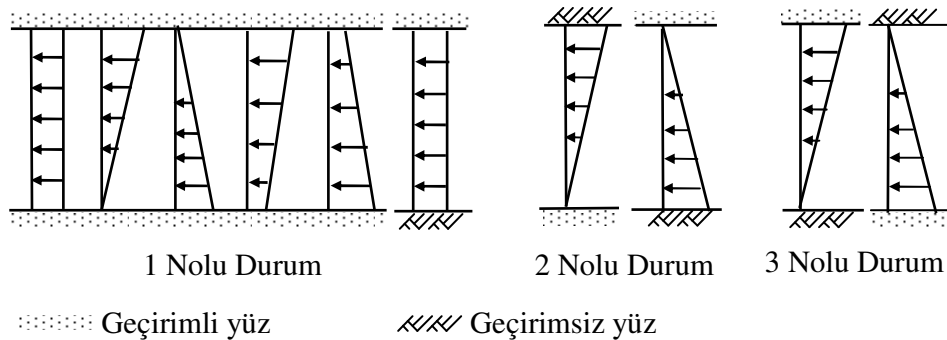
$$U_0 = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{[(2m+1) \cdot \pi / 2]^2} e^{-[(2m+1) \cdot \pi / 2]^2 T_v} \quad (2.23)$$

bağıntısından elde olunabilir. Elde edilecek $U-T_v$ ilişkisinin derinlikle değişimi Şekil 2.5’de gösterilmiştir. İstenilen bir T_v değeri için konsolidasyon yüzdesini sabit bir başlangıç fazla boşluk suyu basıncı için hesaplamak amacıyla boşluk basıncı eğrisinin solunda kalan alanın toplam alana bölünmesi ile bulunabilir.



Şekil 2.5: Bir boyutlu konsolidasyonda başlangıçtan itibaren düzgün yayılı fazla boşluk suyu basıncının zamanla dağılımı gösteren boşluk suyu basıncı eğrileri

Söz konusu $U-T_v$ ilişkisi tüm arazi drenaj koşullarını ve konsolidasyon basıncının tabaka kalınlığı boyunca yayılış biçimini temsil etmemektedir. Şekil 2.6’da konsolidasyon oturması aranan tabakanın arazideki drenaj koşulları ve konsolidasyon basıncının tabaka kalınlığı boyunca yaklaşık dağılış biçimleri gösterilerek, ilgili koşullar için çeşitli bağıntılarla elde edilen $U-T_v$ değerleri Tablo 2.1’de özetlenmektedir.

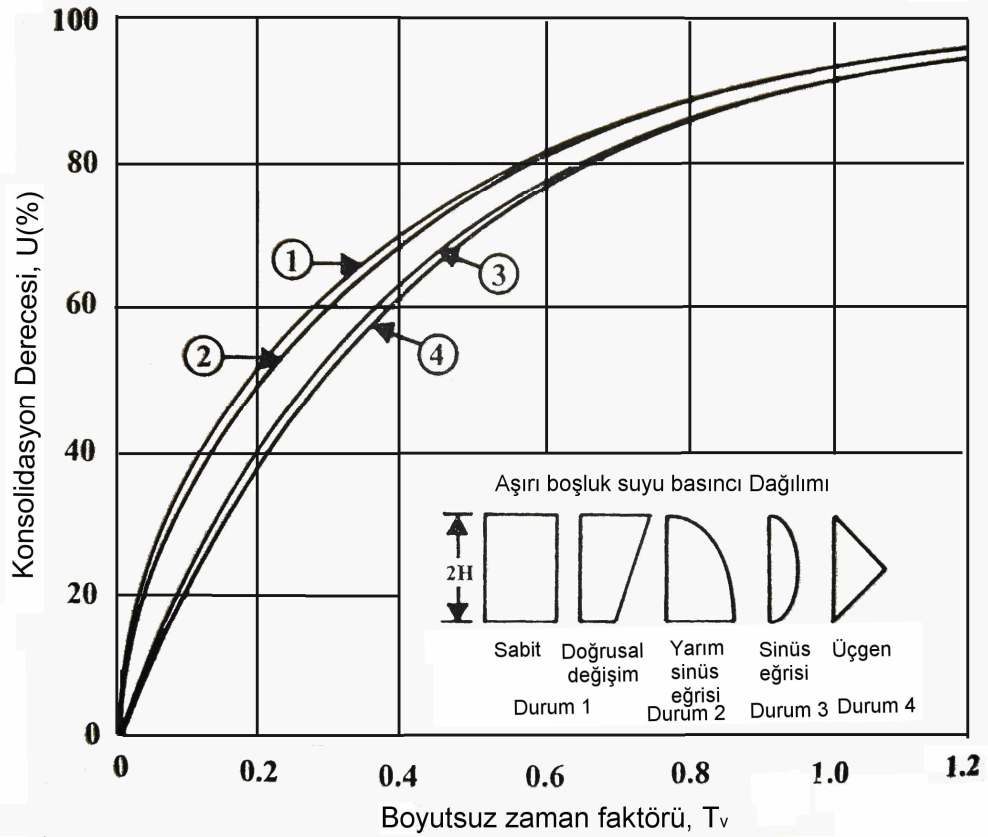


Şekil 2.6: Konsolidasyon basıncının tabaka kalınlığı boyunca dağılış biçimleri

Tablo 2.1: Şekil 6'daki Durumlara için U-T_v İlişkisi (Das, 1985)

U (%)	1 nolu durum için T _v	2 nolu durum için T _v	3 nolu durum için T _v
10	0,008	0,047	0,003
20	0,031	0,100	0,009
30	0,071	0,158	0,024
40	0,126	0,221	0,048
50	0,197	0,294	0,092
60	0,287	0,383	0,160
70	0,403	0,500	0,271
80	0,567	0,865	0,440
90	0,848	0,940	0,720
100	∞	∞	∞

Sabit, doğrusal, yarı sinüsodal, sinüsodial ve üçgen olmak üzere dört farklı fazla boşluk suyu basıncı dağılımı durumları için U-T_v ilişkisinin değişimini inceleyen Leroueil ve Marques, 1996'da yaptıkları bir takım değişikliklerle U-T_v ilişkisinin grafiğini Şekil 2.7'deki hale getirmişlerdir.

**Şekil 2.7:** Dört farklı başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı için U-T_v ilişkisi (Leroueil ve Marques, 1996)

Sıkışabilirlik ve hidrolik iletkenlik, zemin kompozisyonunun bir fonksiyonu olduğundan c_v konsolidasyon katsayısı da bu kompozisyonla ilişkilidir. Çünkü c_v hidrolik iletkenlikle doğru, sıkışma katsayısı a_v ile ters orantılıdır. Saf killer üzerine yapılan çeşitli çalışmalarda bulunan konsolidasyon katsayıları Tablo 2.2’de verilmektedir. Sonuç olarak, saf killerden oluşan doğal killerin sıkışma indisi ve sıkışma katsayısı değerleri incelendiğinde, kil fazının sıkışma ve konsolidasyon davranışını yönettiği ve kil olmayan malzemelerin içeride göreceli olarak bir dolgu malzemesi gibi pasif rol aldıkları söylenebilir (Mitchell, 1993).

Tablo 2.2: Bazı kil türlerinin konsolidasyon katsayıları

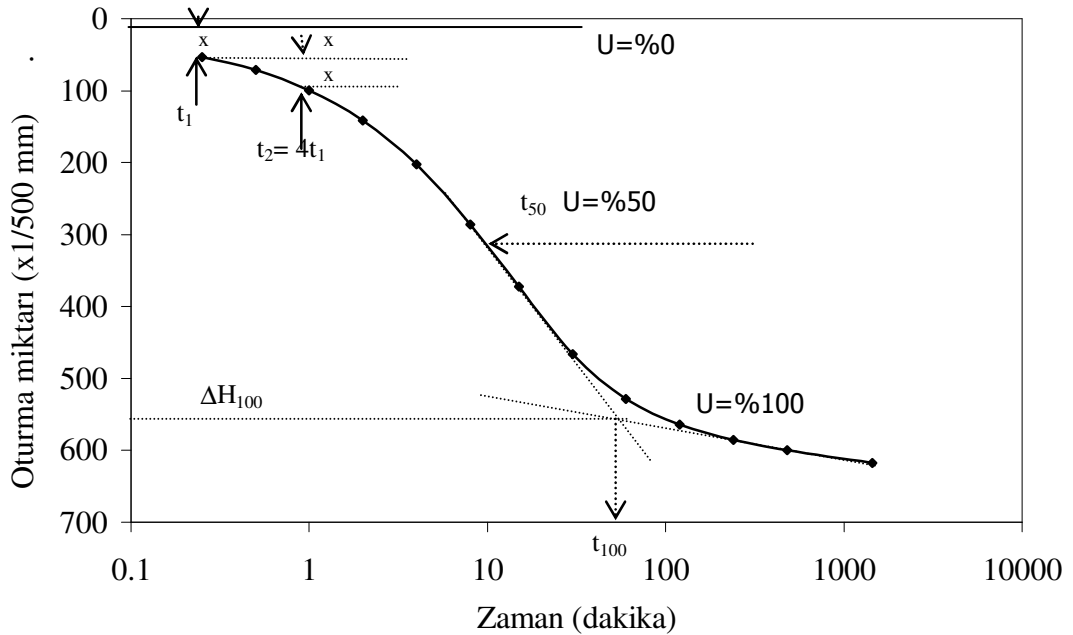
Kil Türü	Konsolidasyon katsayısı c_v (m^2/s)	Kaynak
Montmorillonit	$0,06 \times 10^{-8} \sim 0,30 \times 10^{-8}$	Cornell, 1950
İllit	$0,3 \times 10^{-8}$ ile $2,4 \times 10^{-8}$	Cornell, 1950
Kaolin	12×10^{-8} ile 90×10^{-8}	Cornell, 1950
Montmorillonit	$1,0 \times 10^{-8}$	Kondner ve Vendrell, 1964
Hallosit	378×10^{-8}	Kondner ve Vendrell, 1964

Konsolidasyon katsayısı c_v değeri (2.17) bağıntısından elde edilebileceği gibi **Şekil 2.7**’deki eğriler kullanılarak bir boyutlu konsolidasyon deneyinden, geri analiz yaparak da bulunabilir. Konsolidasyon katsayısı c_v değerinin bulunması için Casagrande (1936), Taylor (1948), Lun ile Parkin (1985) ve Sridharan ve diğ. (1991) tarafından geliştirilen yöntemlerden Casagrande logaritma zaman ve Taylor’un karekök zaman metotları çoğunlukla tercih edilen iki grafik yöntemidir.

Casagrande (1936) metodu, konsolidasyon deneyinin herhangi bir yükleme kademesi için logaritma zamana karşı zemin numunesinin düşey deformasyonları **Şekil 2.8**’deki gibi çizildiğinde, eğrinin baş tarafının parabol formunda olduğunu kabul eder. Buna göre yöntem, sıfır deformasyona karşı gelen düzeltilmiş noktanın belirlenmesi için, birincil konsolidasyon aşamasının başlarında seçilen bir t anı için eğride karşılık gelen deformasyon ile $4t$ süreye denk gelen deformasyon arasındaki fark ölçülür. t zamanına eğri üzerinde karşılık gelen noktanın deformasyon değeri bu

fark kadar azaltılmak suretiyle teorik sıfır konsolidasyon noktası belirlenmiş olur. Birincil konsolidasyon eğrisinin orta kısmındaki doğrusal kısmını ile ikincil sıkışmanın doğrusal olan kısmının kesişimi %100 konsolidasyon noktasını verir. %50 konsolidasyon değerine karşı gelen süre t_{50} değeri %0 ve %100 konsolidasyon noktalarının ortasından elde edilmektedir. $U=50$ için $T_v=0,197$ Şekil 2.7’den elde edilebilir. Konsolidasyon deneyi esnasında çift taraftan drenaja izin verildiyse H_d drenaj boyu H numune kalınlığının yarısı alınacağından c_v katsayısı aşağıdaki gibi bulunur:

$$c_v = 0.197 \cdot \frac{H_d^2}{t_{50}} = 0.197 \cdot \frac{(H/2)^2}{t_{50}} \quad (2.24)$$

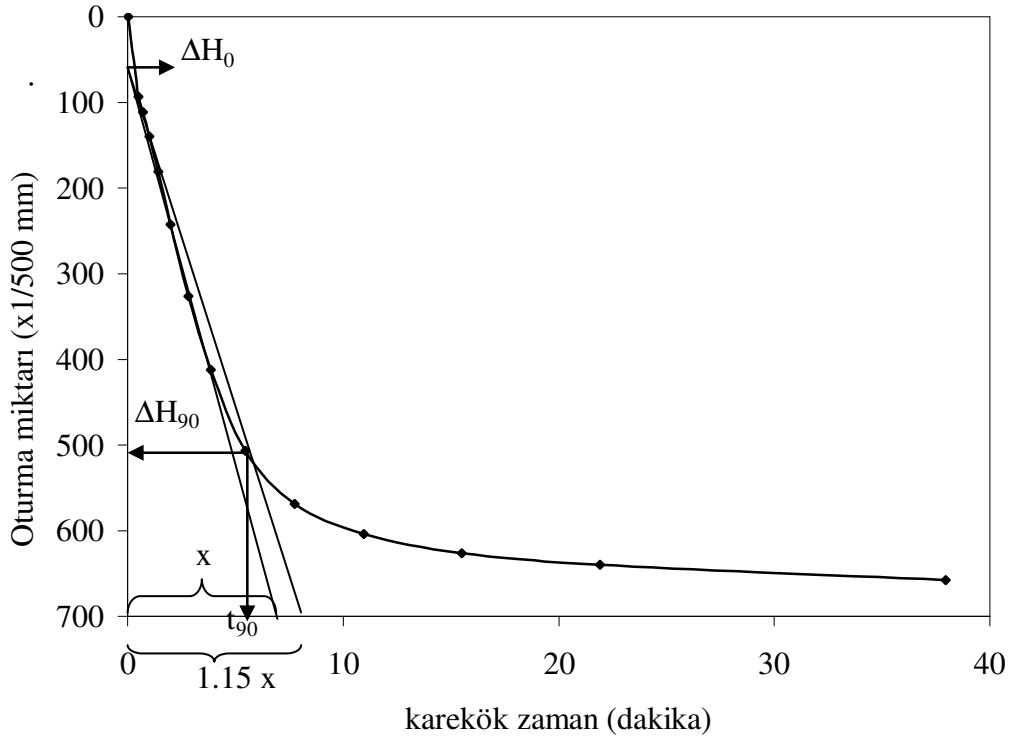


Şekil 2.8: Casagrande logaritma zaman yöntemiyle c_v hesabı

Taylor (1948) 'un geliştirdiği yöntemde, konsolidasyon deneyinin herhangi bir yükleme kademesi için karekök zamana karşı zemin numunesinin deformasyonları Şekil 2.9'deki gibi çizilir. Deneyde ani sıkışmadan kaynaklanan düşey deformasyonları en aza indirmek için kullanılan düzeltilmiş sıfır konsolidasyon değeri, eğrinin baş tarafındaki doğrusal kısmın geriye doğru uzatılması ile doğrunun oturma eksenini kestirildiği noktadan belirlenir. Bu nokta başlangıç kabul edilmek suretiyle, çizilen ilk doğrunun herhangi bir t anı için oturma eksenine olan yatay uzaklığının 1,15 kat artırılması ile elde edilen bir noktadan geçirilerek ikinci bir

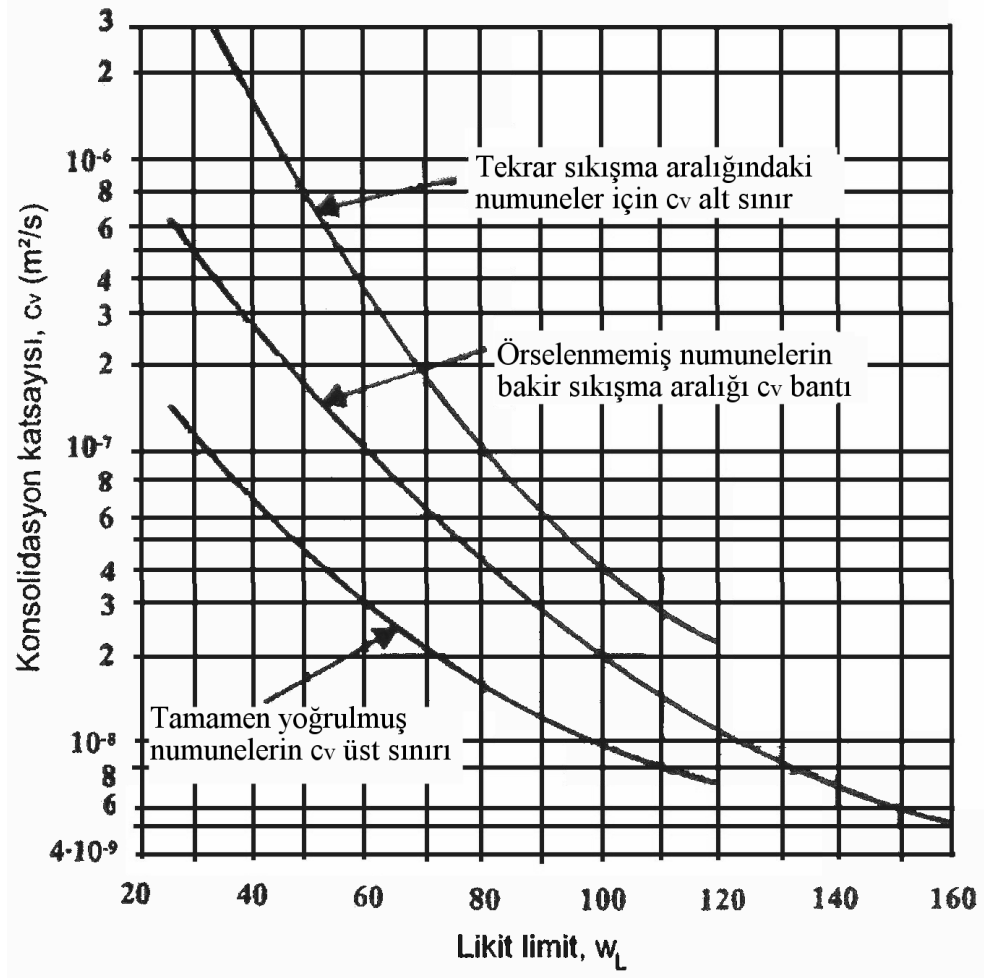
doğru çizilir. Bu ikinci doğrunun konsolidasyon eğrisini kestiği nokta %90 konsolidasyon yüzdesine karşı gelen oturmayı vermektedir. Buna göre $U=90$ için $T_v=0,848$ Şekil 2.7'den elde edilirse c_v konsolidasyon katsayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$c_v = 0.848 \cdot \frac{H_d^2}{t_{90}} = 0.848 \cdot \frac{(H/2)^2}{t_{90}} \quad (2.25)$$



Şekil 2.9: Taylor karekök zaman yöntemiyle c_v hesabı

Boşluk suyunun drenaj hızını kontrol eden zemin özellikleri (2.16) bağıntısında tanımlandığı üzere c_v konsolidasyon katsayısından bulunmaktadır. Likit limit ile c_v arasındaki ilişki birçok araştırmacı tarafından örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deneylerle araştırılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen bulguların bir özeti Şekil 2.10'da verilmiştir. Buna göre, aynı likit limit değerine sahip örselenmiş numunelerin c_v konsolidasyon katsayısı değerlerinin örselenmemiş numunelerden elde edilenlerden daha düşük değerler aldığı bilinmektedir. Ayrıca, Şekil 2.10'da tekrar sıkışma kısmında yer alan numunelerin bakir kısımda kalan numunelere oranla daha büyük c_v katsayıları aldığı da görülmektedir.



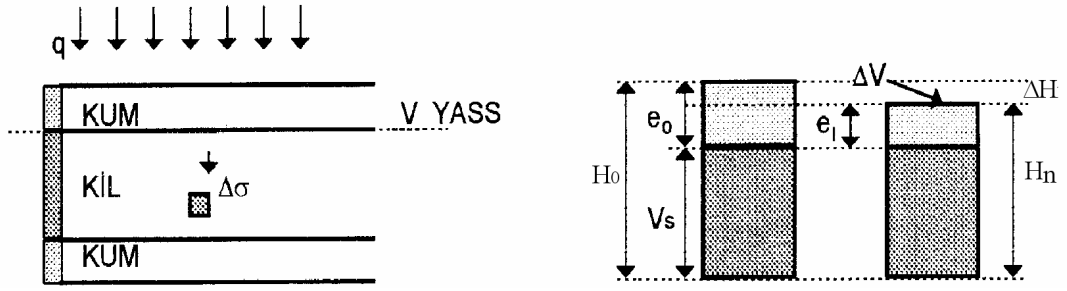
Şekil 2.10: $c_v - w_L$ arasındaki ilişki (NAVFAC 1982)

2.2.2 Nihai Konsolidasyon Oturması

Konsolidasyon sırasında, danelerin sıkışmayacağı kabulüne göre hacimde meydana gelecek olan azalma, zemin boşluklarından dışarı çıkan suyun hacmine eşit olmaktadır. Hacimdeki bu değişim, boşluk oranındaki değişim cinsinden ifade edilebilir. Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisine göre, yanal boy değişimi olmayacağı kabulüyle, numune kesit alanı değil, sadece kalınlığı değişecektir. Efektif gerilmedeki bir artıştan ($\Delta\sigma'$) kaynaklanan ΔV hacimdeki değişim, ya ΔH kalınlıktaki değişim veya Δe boşluk oranındaki değişim cinsinden ifade edilmektedir. Buna göre;

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.26)$$

bağıntısı yazılabilir.



Şekil 2.11: Zemin modeli kullanılarak zemin sıkışmasının temsili.
(a) Yükleme öncesi, (b) Yükleme sonrası

Efektif gerilmedeki birim artıştan kaynaklanan birim hacimdeki değişim miktarına hacımsal sıkışma katsayısı m_v denilmekte ve

$$m_v = \frac{\Delta V / V}{\Delta \sigma'} \quad (2.27)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Bir boyutlu konsolidasyonda; yanal yer değiştirmenin de engellendiği kabulüne göre yatay düzlemde alan sabit kalacağından ortalama hacımsal sıkışma katsayısı;

$$m_v = \frac{\Delta H / H}{\Delta \sigma'} = \frac{\Delta e / (1 + e)}{\Delta \sigma'} = \frac{a_v}{1 + e} \quad (2.28)$$

halini alır. Formüldeki a_v sıkışma sayısı, birim gerilme artışına karşılık gelen boşluk oranındaki değişim olup;

$$a_v = \frac{e_1 - e}{\Delta \sigma'} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \quad (2.29)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Grafik olarak a_v , $e - \sigma'$ eğrisinin eğimini vermektedir. Ödometre deneyinde her konsolidasyon basıncı için m_v hacımsal sıkışma katsayısı ve a_v sıkışma sayısı ayrı ayrı hesaplanmaktadır. H kalınlığındaki zemin tabakasının ortasında meydana gelecek efektif gerilme değerindeki artışa karşılık gelecek ödometre deneyindeki yük kademesi için belirlenecek m_v değeri kullanılarak konsolidasyon oturması aşağıdaki bağıntı ile bulunur:

$$S_c = \Delta H = m_v \times \Delta \sigma'_v \times H \quad (2.30)$$

Daha kesin bir hesap için sıkışabilir tabaka $H_1, H_2, \dots, H_n$ kalınlığında parçalara ayrılmakta ve her parçadaki ortalama basınç artışı için hacımsal sıkışma katsayıları m_v olmak suretiyle toplam konsolidasyon sıkışması;

$$S_c = \Delta H = \sum_1^n m_{vn} \times \Delta \sigma'_n \times H_n \quad (2.31)$$

biçiminde zemin tabakalarının oturmalarının toplamı şeklinde bulunmaktadır. Gerilmeye göre değişen sıkışabilirlik, sıkışma modülü

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon_v} = \frac{1}{m_v} \quad (2.32)$$

şeklinde de tanımlanmaktadır.

Konsolidasyon oturması, zeminin başlangıç durumunu gösteren boşluk oranı ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır (Nishida 1956; Hough 1957; Sowers 1970). Kil zeminler için klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen e - $\log \sigma'_v$ grafiğinin eğiminden bulunan “ C_c sıkışma indisi” adlı diğer bir parametre aşağıdaki formülle belirlenir:

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma')} = \frac{e_0 - e_1}{\log(\sigma'_1/\sigma'_0)} \quad (2.33)$$

Bağıntıdaki e_0 ve e_1 sırasıyla yükleme öncesi ve sonrasındaki boşluk oranı, σ'_0 ve σ'_1 ise efektif gerilme değerleridir. Verilen bir $\Delta \sigma'$ efektif gerilmedeki değişimi için boşluk oranı:

$$e_1 = e_0 - C_c \cdot \log(\sigma'_1/\sigma'_0) \quad (2.34)$$

bağıntısıyla bulunmaktadır. Bir zemin için oturma hesaplarında, efektif gerilme aralığı normal eğrinin doğrusal kısmının sınırları içerisinde kaldığı sürece C_c sıkışma indisi sabit alınabilir. Buna göre, normal konsolide killeri için konsolidasyon oturması;

$$S_c = \Delta H = C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}) \quad (2.35)$$

formülünden hesaplanabilir. Saf kil numuneleri üzerinde yapılan çalışmalarda C_c sıkışma indisi değerinin kaolin için 0,19 ile 0,28, illit için 0,5 ile 1,10 ve montmorillonit için 1,0 ile 2,6 aralığında değiştiği gözlenmiştir (Mitchell, 1993).

DeneySEL veriler ve istatistiksel yöntemler kullanılarak C_c sıkışma indisi, kullanılarak likit limit w_L ile ilişkilendirilmiştir (Skempton 1944, Terzaghi ve Peck 1948,

Cozzolino 1961). C_c sıkışma indisi için verilen amprik bağıntıların bir özeti Tablo 2.3’de verilmektedir.

Tablo 2.3: C_c İçin Önerilen Çeşitli Amprik Bağıntılar (Brenner ve Brand, 1981)

Amprik bağıntı	Geçerli olduğu zemin türü	Kaynak
$C_c = 0,007(w_L-7)$	Yoğrulmuş Killer	Skempton (1944)
$C_c = 1,15 (e_0-0,35)$	Tüm Killer	Nishida (1956)
$C_c = 0,256+0,43(e_0-0,84)$	Brezilya Kili	Cozzolino (1961)
$C_c = 0,0046(w_L-9)$	Brezilya Kili	Cozzolino (1961)
$C_c = 0,009 (w_L-10)$	Normal Konsolide Killer	Terzaghi & Peck (1967)
$C_c = 0,21+0,008 w_L$	Yumuşak Bangkok Kili	Adikari (1977)
$C_c = 0,22+0,29 e_0$	Yumuşak Bangkok Kili	Adikari (1977)
$C_c = 0,20+0,008 w_n$	Yumuşak Bangkok Kili	Adikari (1977)
$C_c = 0,20+0,008w_L+0,009e_0$	Yumuşak Bangkok Kili	Adikari (1977)
$C_c = 0,575e_0 -0,241$	Fransız Kili	Vidalie (1977)
$C_c = 0,0147w_n-0,213$	Fransız Kili	Vidalie (1977)

Mikasa (1964), C_c zeminin mekanik bir indeks özelliği olduğundan zeminin tipi ve mekanik yapısını bir arada temsil etmesi gerekliliğini savunmuştur. Çalışmada, C_c değerinin örselenmiş killer için yoğrulmaya ve dane çatısının çökmesine bağlı olarak oldukça düştüğü belirtilmektedir. Fujikawa ve Takayama (1980) zemin tipini ve bulunduğu ortamı temsil etmek için sırasıyla w_L ve e_0 parametrelerini kullanmış, yoğrulmuş killerin sıkışma indisini incelemek için zemin yapısını ihmal etmişlerdir. Koumoto ve Park (1998a, 1998b), C_c parametresini başlangıç su muhtevası w_0 yerine, plastik limit durumundaki su muhtevası w_p boşluk oranı da e_p olmak üzere (w_p-w_0) ve (e_0-e_p) ile ilişkilendirmeyi önermiş, zemin cinsi ve bulunduğ ortamını sırasıyla I_p plastisite indisi ve I_L likidite indisi ile temsil etmiştir. Koumoto ve Park (2004), sonraki çalışmalarında zeminlerin konsolide olduklarında toplam zemin hacminin boşluk hacmi ile birlikte değiştiği gerekçesiyle zemin cinsinden etkilenmediği için önerdikleri bağıntılarında poroziteyi kullanmayı tercih etmişlerdir.

Zeminlerde boşluk oranı $0 < e < \infty$ aralığında değer alabilirken e_0 'ın $(1+e_0)$ ile normalize edilmiş değeri olan porozite n_0 değerinin sadece $0 < n < 1$ aralığında değişeceğini vurgulayan araştırmacılar, yoğrulmuş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda C_c ile n_0 arasında:

$$C_c = \frac{n_0}{371.747 - 4.275n_0} \quad (2.36)$$

bağıntısını vermiştir (Kommoto ve Park, 1998).

Aşırı konsolide killere üzerinde yapılan çalışmalar C_c sıkışma indisi parametresinin bu tür zeminlerin oturma hesabı için çok konservatif tarafta kaldığını göstermiştir. Aşırı konsolide killere, bulundukları tabakanın üzerindeki örtü yükünden daha fazla bir yüke geçmişte maruz kalan killerdir. Bu tür zeminlerin önkonsolidasyon basıncı σ'_p olarak tariflenen geçmişte maruz kaldıkları maksimum yüke kadar sıkışabilirlikleri düşük olmakta, önkonsolidasyon basıncından daha fazla yüke maruz kalmaya başladıkları andan itibaren sıkışabilirlikleri artmaktadır. Bu nedenle, oturma hesabında $e - \log \sigma'_v$ eğrisinin önkonsolidasyon basıncına kadar olan kısmı için belirlenen eğimi olarak tanımlanan tekrar sıkışma indisi C_r kullanılırken, eğrinin normal konsolide kısmı için C_c indisi kullanılmaktadır. Bu durumda, kil tabakasının nihai konsolidasyon oturması:

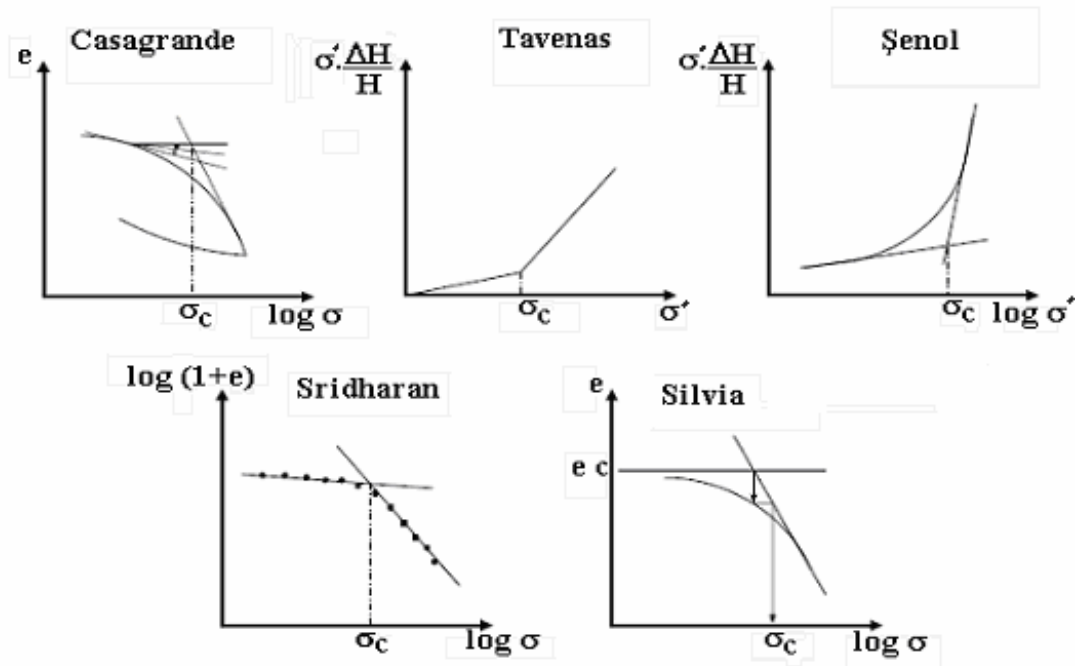
$$S_c = \Delta H_c = C_r \frac{H_0}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}\right) + C_c \frac{H_0}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_p}\right) \quad (2.37)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. (2.42) bağıntısında, H_0 sıkışan kil tabakasının başlangıçtaki kalınlığı, e_0 başlangıç boşluk oranı, σ'_{v0} jeolojik efektif gerilme, σ'_p önkonsolidasyon basıncı, σ'_{vc} nihai konsolidasyon basıncı değeridir.

2.2.3 Önkonsolidasyon Basıncı

Aşırı konsolide killerde basınç azalması zamanla erozyon, heyelan, buzul erimesi, vb. doğa olayları sonucunda meydana gelebileceği gibi, kazı gibi insan faktörü sonucunda da oluşabilmektedir. Önkonsolidasyon basıncının jeolojik örtü yüküne oranı şeklinde tanımlanan aşırı konsolidasyon oranı ($AKO = \sigma'_c / \sigma'_{v0}$) ile bir zeminin normal konsolide ($AKO=0,8\sim 1,2$) veya aşırı konsolide ($AKO>1,2$) olduğunu saptamak mümkün olmaktadır. Gerilme artışı neticesinde sıkışacak bir kil tabakasında, gerilme artışının aşırı konsolide veya normal konsolide kısımda

kalmasına göre zeminin sıkışma davranışı değişiklik gösterecektir. Bu nedenle, arazide tekrar sıkışma durumu ile arazi bakır sıkışma durumu arasında sınır teşkil eden önkonsolidasyon basıncının, konsolidasyon deneylerinden belirlenmesi geoteknik mühendisliğinde önemlidir. Önkonsolidasyon basıncının belirlenmesi için literatürde mevcut birçok yöntem olmakla birlikte Butterfield (1979), Casagrande ve diğ. (1944), Silvia (1970), Janbu (1982), Schmertmann (1953), Sridharan (1991), Şenol (1997), Tavenas (1979) yöntemleri en bilinenleridir. Klasik zemin mekaniği bakış açısı ile zeminin konsolidasyon davranışını en iyi yorumlayan metotlar Casagrande, Silvia, Sridharan, Şenol ve Tavenas yöntemleridir.

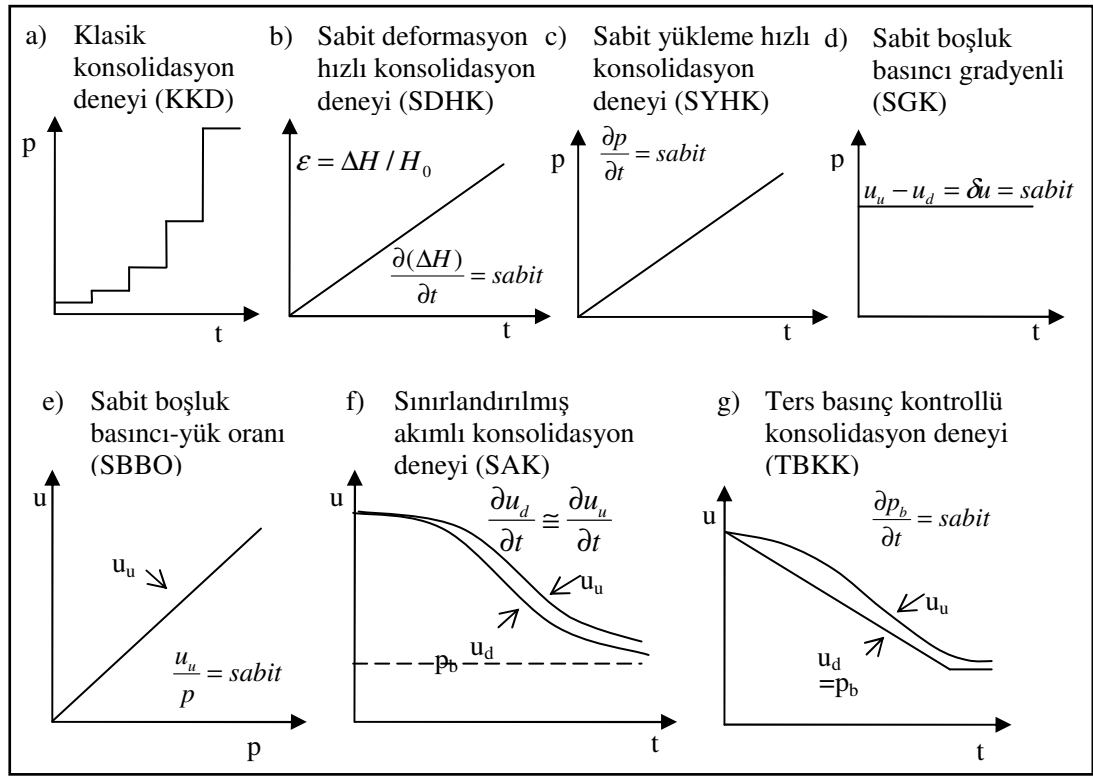


Şekil 2.12: Önkonsolidasyon basıncını belirleme yöntemleri (Casagrande vd., 1944, Pacheco Silvia 1970, Sridharan vd., 1991, Şenol, 1997, Tavenas., 1979)

2.3 Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deneyi

Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisinden yola çıkılarak geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan klasik konsolidasyon deneyi, beraberinde bir takım eksikleri de barındırmaktadır. Şekil 2.13a'da gösterildiği üzere klasik konsolidasyon deneyinde, sadece belirli gerilme seviyeleri için sıkışma miktarlarının belirlenebilmesi, her yükleme kademesinde 24 saat gibi uzun bir bekleme süresinin olması ve birincil konsolidasyon sonrasında ikincil sıkışmaları da içerebilmesi, araştırmacıları alternatif bir boyutlu konsolidasyon deney tipleri geliştirmeye yöneltmiştir. İlk olarak geliştirilen deney, ikincil sıkışmalar olmaksızın ε_v - $\log \sigma'_v$

grafiğinde sürekli bir Birincil Konsolidasyon Sonu eğrisi elde etmek amacıyla düşey deformasyon hızının deney boyunca sabit tutulduğu sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyidir (Şekil 2.13b). Daha sonra bu deney tiplerine; uygulanan gerilmenin sabit bir hızla artırıldığı sabit yükleme hızlı konsolidasyon deneyi (Şekil 2.13c), numunenin üst ve alt başlıkları arasındaki boşluk suyu basıncının sabit tutulduğu ($u_{\text{drenajsız}} - u_{\text{drenajlı}} = \text{sabit}$) sabit boşluk suyu basıncı gradyanlı konsolidasyon deneyi (Şekil 2.13d), numunenin drenaja kapalı tarafında oluşan boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye oranının sabit kalacak şekilde ($u_u / \sigma_v = \text{sabit}$) yükün uygulandığı sabit boşluk suyu-yük oranlı konsolidasyon deneyi (Şekil 2.13e) gibi deney tipleri de eklenmiştir.



Şekil 2.13: Geliştirilen konsolidasyon deney tipleri (Head, 1986)

Smith ve Wahles (1969); Wissa, Christian, Davis ve Heiberg (1971); ve Gorman, Hopkins, Deen ve Drnevich (1978) tarafından geliştirilen sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi, sürekli konsolidasyon deneyleri arasında standartlaşan ilk deney metodudur (ASTM D4186). SDHK deney metodu, kontrollü deformasyonlu yükleme uygulanan, yanal olarak sınırlanmış ve eksenel drenajlı olan zeminlerin konsolidasyon büyüklüğünü ve hızını belirlemeyi içermektedir. Zeminin konsolidasyon oturmasının büyüklüğü ve hızı ile ilgili bilgi, zemin ve zemin destekli

yapıların tasarımında önem taşımaktadır. Bu metodun sonuçları bir boyutlu konsolidasyon oturmaları ile hızlarının tahmininde veya analizinde kullanılabilir. Bu metod kumlar ve diğer kaba daneli zeminler gibi yüksek geçirgenlikli zeminler veya yarı doygun zeminler için uygun değildir.

Bu metod, bir boyutlu konsolidasyon teorisindeki gibi zeminin suya doygun ve homojen olması, danelerinin ve suyun sıkışabilirliğinin ihmal edilebilirliği gibi bir takım kabulleri içermektedir. Ayrıca, zemin geçirgenliğinin, zeminin sıkışabilirliğine oranının sabit alındığı deneyde, yüklemenin kısa zaman aralıkları için deformasyon ile logaritma gerilme ilişkisi doğrusal kabul edilmektedir. Zemin boşluk suyu akışının sadece düşey yönde olduğu düşünülen metotta, geçirimli ortam boyunca akım için Darcy Kuralı uygulanmaktadır. Drenaja sadece üst başlıktan izin verilen numunede fazla boşluk suyu basıncının numune boyunca dağılımı paraboliktir.

Deney boyunca sabit bir sıkışma deformasyon hızı üretebilmek için ring içerisine yerleştirilen suya doygun bir zemin numunesi üzerine sürekli arttırılmak suretiyle uygulanan yük kaydedilir. Ayrıca, numunenin sadece üst yüzeyinden drenaja izin verilerek, drenajsız olan alt yüzeyde oluşan fazla boşluk suyu basıncı değeri ölçülür. Deneyde yüksekliği maksimum dane çapının 10 katından az olmayan numunelerle çalışılmaktadır. Numune çapının numune kalınlığına oranı minimum 2,5 olup, minimum çap 50 mm ve minimum kalınlık 20 mm olmaktadır. Numuneler iç yüzeyi oldukça parlatılmış veya düşük sürtünmeli bir malzeme ile kaplanmış paslanmaz çelik ringin içerisine yerleştirilir. Ring kalınlığı, numunenin kabul edilen hidrostatik gerilme koşullarında, ringin çapındaki değişim en büyük yük uygulandığında %0,03'ü aşmamalıdır. Numunelerin üst ve alt kısmına yerleştirilen poroz taşlar silikon karbid, alüminyum oksit, metal veya zeminle veya zemin rutubeti ile etkileşmeyecek uygun orta yoğunlukta bir malzeme olabilir. Yumuşak ince daneli zeminler için, ince gözenekli poroz taş kullanılabilir. Poroz taşlar için kesin bir kriter oluşturulmamış olmakla birlikte, zeminin, gözeneklerine girmeyecek kadar ince, ama numuneden suyun akışını etkilemeyecek kadar da yeterli geçirgenlikte olması istenmektedir. Taşların tıkanmasını önlemek amacıyla numuneyle temas eden yüzeylerine poroz kâğıt da yerleştirilmektedir.

SDHK hücresine monte edilen ring içerisindeki numune üzerine düşey ekseninde yük uygulanarak numune istenilen maksimum gerilme değerine kadar sıkıştırılmaktadır. Deney başında suya doygunluğu sağlanmak amacıyla numune içerisine ve SDHK

hücresi içerisine ters basınç uygulanmaktadır. Bu sayede su içerisinde bulunan hava kabarcıklarının hacimleri küçülecek ve alt başlık ile üst başlık arasında çok düşük bir basınç farkı ile yaratılacak akış ile havası alınmış su zemin boşluklarını dolduracaktır.

Deney esnasında üstten drenajına izin verilen numunenin drenaj tarafında ölçülen sabit boşluk suyu basıncı değeri, ters basınç değerine eşit olurken drenajına izin verilmeyen alt başlıktaki boşluk suyu basıncı değeri zeminin sıkışması ile giderek artacaktır. Üst başlık ile alt başlıktan ölçülen boşluk suyu basıncı arasındaki fark fazla boşluk suyu basıncı, u_b değeridir. Deney süresince her an uygulanan düşey gerilmenin %3 ile 30'u arasında fazla boşluk suyu basıncı değerinin mutlak değerine neden olacak bir deformasyon hızı seçilmesi istenmektedir. Bunu başarmak için maksimum %20 değeri hedeflenebilir. Deformasyon hızının seçimi için likit limit değerine karşı önerilen deformasyon hızları Tablo 2.4'te verilmiştir. Fazla boşluk suyu basıncı kademeli yükleme deneyleri ile uyumlu sonuçlar elde etmek amacıyla %30 değerinden düşük değerlerde sınırlandırılmalıdır (ASTM D2435).

Tablo 2.4: SDHK deneyi için önerilen deformasyon hızları (Head, 1986)

Likit limit aralığı (%)	Deformasyon hızı (% dakika ⁻¹)
<40	0,04
40-60	0,01
60-80	0,004
80-100	0,001
100-120	0,0004
120-140	0,0001

Deneyde eksenel yük, fazla boşluk suyu basıncı, düşey deformasyon ve geçen zaman değerleri, ilk bir saatlik süre için 1'er dakikalık aralıklarla, sonraki 1 saatlik süre için 5 dakikalık aralıklarla, daha sonrası için 15 dakikalık zaman aralıklarıyla kaydedilir. Gerilme-deformasyon eğrilerini tanımlamak için yeteri kadar okuma alınır. Öyle ki deney parametrelerinde önemli değişimler olduğunda daha sık okumalar gerekebilmektedir. Sürekli kayıt veya çizim veya her ikisi birden gerekli veriyi elde etmek için kullanılabilir. İstenilen gerilme veya deformasyon elde edilinceye kadar

yüklemeye devam edilir. İstenen düşey yükleme tamamlandığı zaman fazla boşluk suyu basıncının sabit eksenel yükde veya sabit deformasyonda sönümlenmesi için izin verilir ve eksenel yükleme, deformasyon ve fazla boşluk basıncı izlenebilir.

Deney esnasında herhangi bir anda ikincil sıkışmalar değerlendirilebilir. İkincil sıkışma verilerini elde etmek için önceden seçilen bir düşey yükte kontrol edilen deformasyon, eksenel yükleme kesilerek mevcut eksenel yük sabit tutulmalıdır. Bu andan itibaren 0,1, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 ve 30 dakika ve 1, 2, 4, 8 saat ve vb. zaman aralıklarında deformasyon ve geçen zaman ile eksenel yük ve fazla boşluk suyu basıncı değerleri, en azından logaritma zamana karşı deformasyonların karakteristik doğrusal ikincil kısmının eğimi görünür oluncaya kadar devam ettirilmelidir. Eğer ileriki bir düşey yükleme gerekiyorsa, önceki sabit deformasyon hızında, kontrollü deformasyonlu eksenel yüklemeye dönülerek ve eksenel yük, fazla boşluk suyu basıncı, deformasyon ve geçen süre önceden bahsedildiği gibi 1, 5 ve 15 dakikalık zaman aralıklarında kaydedilir. Gerektiğinde, bu paragraftaki yöntem sonraki daha büyük gerilme seviyelerinde de tekrarlanabilir. Ancak, sabit yük altında ikincil sıkışma verilerini elde etmek için deformasyon kontrollü deneyin kesilmesi boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisini etkileyebilir. Bu etkileri belirlemek için yeni araştırmalara ihtiyaç vardır.

Tekrar yükleme veya boşaltma karakteristikleri gerektiği zaman, numuneden sabit bir deformasyon hızında düşey gerilme boşaltılarak, pozitif bir toplam düşey gerilme oluşturulur. Bazı araştırmacılar, boşaltma deformasyon hızlarının yükleme deformasyon hızlarının onda birinde bulunması durumunda, numunenin pozitif toplam düşey gerilmede kalması ve tabanda boşluk suyu basıncının uygun değerlerde tutulması için yeterli olacağını bulmuşlardır. Fazla boşluk suyu basıncı negatif olacağından, numunenin tabanındaki basıncı atmosferik basınçtan daha büyük tutmak için ters basınçlar yeteri kadar yüksek veya deformasyon oranları yeteri kadar düşük olmalıdır. Eğer tekrar yükleme kısmındaki konsolidasyon katsayısı isteniliyorsa numunenin tabanında doygunluk için gereken ters basınçtan daha büyük bir basınç bulunması için ters basınçlar yeteri kadar yüksek veya deformasyon hızları yeteri kadar düşük olmalıdır. Eksenel yük, fazla boşluk suyu basıncı, deformasyon ve geçen zaman 1, 5 ve 15 dakika zaman aralıkları ile önceki paragraflarda anlatıldığı gibi kaydedilmelidir. Tekrar yükleme bittiği zaman sabit eksenel yükte veya sabit deformasyonda fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesine izin verilmelidir. Bir

alternatif yükleme, boşaltma ve tekrar yükleme prosedüründe, inşaat sırasındaki gerilme değişimlerini yansıtmak veya gerilme-deformasyon eğrisinin bazı kısımlarını daha iyi tanımlamak için uygulanabilir.

Başlangıç boşluk oranı, su muhtevası, birim hacim ağırlığı ve doygunluk derecesi hesaplamalarında, toplam numunenin kuru ağırlığı esas alınmaktadır. Numune hacmi, kullanılan ringin iç hacminden hesaplanır. Danelerin hacmi, numunenin kuru ağırlığı danenin özgül ağırlığına bölünerek bulunmaktadır. Boşlukların hacimleri numune hacmi ile danelerin hacimleri arasındaki fark olarak kabul edilmektedir. Boşluk oranını e (veya alternatif olarak düşey deformasyon, ε), σ_v toplam düşey gerilme, ve σ'_v ortalama efektif düşey gerilme değerleri, kaydedilen her veri çifti için hesaplanmaktadır. Deney esnasında herhangi bir andaki boşluk oranı için

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_s} \quad (2.38)$$

formülü kullanılmaktadır. Formüldeki; e_0 başlangıç boşluk oranı, ΔH sıkışma, H_s dane yüksekliğidir. Düşey eksenel deformasyonların hesaplanması

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2.39)$$

bağıntısı ile olur. Formülde H_0 numunenin ilk yüksekliğidir. Uygulanan eksenel gerilme

$$\sigma_v = \frac{P}{A} \quad (2.40)$$

bağıntısından bulunur. Bağıntıda P uygulanan eksenel yükü, A ise numunenin kesit alanını göstermektedir. Ortalama efektif düşey gerilme

$$\sigma'_v = \left(\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2 \right)^{1/3} \quad (2.41)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Formülde u_b numunenin tabanında ölçülen fazla boşluk suyu basıncıdır. Numunenin tabanında ölçülen fazla boşluk suyu basıncı 3 kPa'ı aşıyorsa kaydedilen iki set okuma arasındaki aralık için c_v konsolidasyon katsayısı

$$c_v = - \frac{H^2 \log \left[\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right]}{2\Delta t \log \left[1 - \frac{u_b}{\sigma_v} \right]} \quad (2.42)$$

ile bulunabilir. Formüldeki σ_{v1} , t_1 anında uygulanan eksenel gerilme, σ_{v2} , t_2 anında uygulanan eksenel gerilme olmak üzere, Δt , t_1 ile t_2 arasında geçen zamanı göstermektedir. H , u_b ve σ_v parametreleri de sırasıyla t_1 ile t_2 arasındaki ortalama numune yüksekliği, fazla boşluk suyu basıncı, uygulanan toplam gerilme değerleridir. Ortalamalar iki değer toplamının yarısından elde edilmektedir. Eğer deney esnasında herhangi bir anda deformasyon hızları değiştirilirse, bu zamanlarda hesaplanan c_v değerinin doğru olmayabileceği unutulmamalıdır. c_v değerini iki okuma arasındaki σ'_v nin ortalama değerine karşı kaydedip c_v değerlerini sürekli okumalar arasından hesaplamak en iyisidir. Eğer düşey efektif gerilme değerleri sürekli okumalar arasında gözle görülür şekilde değişmiyorsa zaman aralığı artırılabilir.

Bir SDHK deney raporunda, zeminin örselenmemiş, yoğrulmuş, sıkıştırılmış veya hazırlanmış olmasına göre numunenin tanımlanması ve sınıflaması yer almalıdır. Başlangıç su muhtevası, başlangıç ıslak birim hacim ağırlığı, başlangıç doygunluk derecesi, eğer boşluk oranı hesaplaması yapılmışsa, hesaplamalardaki danenin özgül birim hacim ağırlığı, deney durumuna (ters basınç değeri, sabit yüksekliği korumak için gerekli temas basıncı veya ters basınç esnasında şişme veya konsolidasyon, yükleme ve boşaltma esnasındaki deformasyon hız veya hızlarına) yer verilmelidir. Deney sonucunda boşluk oranı - logaritmik ortalama düşey efektif gerilme veya eksenel deformasyona - logaritmik ortalama düşey efektif gerilme grafikleri, konsolidasyon katsayısı - logaritmik ortalama efektif düşey gerilme, boşluk basıncı - logaritmik ortalama efektif düşey gerilme, boşluk basıncı oranı - logaritmik ortalama düşey efektif gerilme bağıntıları elde edilir. İkincil sıkışma verilerinin elde edildiği deneyler için deformasyona karşı logaritma zaman bağıntısı çizilebilir. Anlatılan prosedürlerden ayrılan özel yükleme kademelerini içeren bölümler de raporda yer almalıdır.

Arazideki deformasyon hızları, zamanla ve yüklü alanın altındaki derinlikle ve yüklü alandan radyal uzaklıkla çok değişmektedir. Arazi deformasyon hızlarının kesin olarak belirlenememesi ve tahmin edilememesi nedeniyle laboratuvar deneyindeki

deformasyon hızları ile arazi deformasyon hızlarının ilişkilendirilmesi mantıklı olmamaktadır. Bununla birlikte, arazi boşluk basıncı oranları ile (u_b/σ_v), laboratuvar boşluk basınçları arasında bir ilişkilendirme anlamlı olabilmektedir. Bu konuda yeni araştırmalara ihtiyaç vardır. Konsolidasyon deneyi sonuçlarının deformasyon hızı ile bağımlı olduğu anlaşılmaktadır. Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi arazideki deformasyon hızı ile deformasyon yüzdesinin değişme problemini göstermemekle beraber, deformasyon hızının etkilerini anlamak için bir ortam sağlamaktadır. Arazideki deformasyon hızlarının, laboratuvardaki 24 saatlik klasik konsolidasyon deneyinden veya tipik bir Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon (SDHK) deneyinden elde edilenden çoğunlukla bir miktar daha yavaş olduğunu savunan Leroueil (1994), arazi ile laboratuvar deformasyon hızlarının bir kıyaslamasını Tablo 2.5'teki gibi vermiştir. Laboratuvar deneyleri, büyük deformasyon hızları nedeniyle zeminin sıkışma karakteristiklerinin belirlenmesini etkilemektedir. Uygulanan deformasyon hızı ile önkonsolidasyon gerilmesinin belirlenmesinin etkilendiği görülmektedir. Tipik bir SDHK deneyinden σ'_p belirlenmesi, arazi sıkışma davranışları ile uyumlu klasik konsolidasyon deneylerindeki önkonsolidasyon gerilmesini aşan tahminler üretmektedir. Leroueil (1994), tipik bir SDHK deneyinden, klasik bir konsolidasyon deneyinden elde edilenden yaklaşık %25 daha büyük önkonsolidasyon basıncı elde edildiğini belirtmektedir. Bir önkonsolidasyon basıncı tahmininin araziye daha iyi temsil etmesi için SDHK deney verilerine bir düzeltme uygulanabilir. Deformasyon hızına ve sıcaklığa dayanan deformasyondaki bir değişim $\Delta \epsilon_v$, SDHK deney verisinden çıkartılarak hesaplanmaktadır (Leroueil 1994).

Tablo 2.5: Çeşitli sıkışma koşulları için deformasyon hızları (Leroueil 1994)

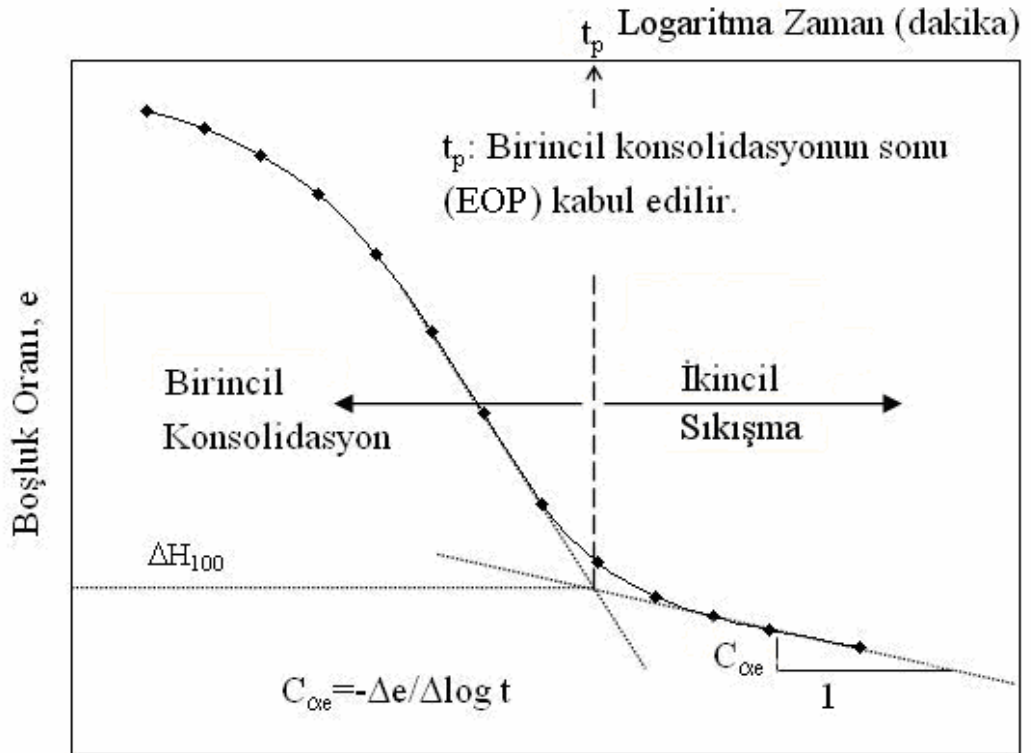
Zemin sıkışma koşulu	Deformasyon Hızı
Klasik 24 saatlik konsolidasyon deneyi	$5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
SDHK deneyi	$1 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
Arazi	$5 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

Önkonsolidasyon basıncının SDHK deneylerinden doğru olarak bulunabilmesi için literatürde önerilenlerden daha düşük deformasyon hızlarında deney yapılmasını öneren Mesri (1994), deney süresince neredeyse sıfır fazla boşluk suyu basıncı

oluşturacak EOP eğrisinin deformasyon hızı için $\dot{\epsilon}_p$ denen bir deformasyon hızından söz etmektedir. Mesri çalıştığı numuneler için $\dot{\epsilon}_p$ değerinin $2,5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ olduğunu bulmuştur. Sallfors (2003), yumuşak ve yüksek plastik killerde laboratuvarında birçok klasik konsolidasyon ve SDHK deneyinin yanı sıra arazi deneyleri de yaparak, Mesri (1994) tarafından önerilen EOP deformasyon hızı ile oldukça uyumlu, deformasyon hızının önkonsolidasyon basıncı üzerindeki etkisini en aza indiren bir alt limit hızın $2 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ olduğunu bulmuştur. Bu önerilen hızlar tipik olarak %40 deformasyonda sonlandırılan 20 ile 30 gün bekleme süreli deneylere denk gelmektedir. Sallfors (1975), yeteri kadar yavaş deformasyonlarda SDHK deneyi yapılması durumunda arazideki sonuçların elde edilebileceğini belirtmiştir.

3. İNCE DANELİ VE ORGANİK ZEMİNLERDE İKİNCİL KONSOLİDASYON

Yumuşak kil zemine oturan mühendislik yapılarında, tasarım aşamasında toplam oturma tahmin edilmesi için birincil konsolidasyon oturması ile ani oturma tahmininin hesaba katılmasının genelde yeterli olmadığı bilinmektedir. Konsolidasyon oturmalarının önceden tahmin edilmesine imkân veren Terzaghi'nin geliştirdiği bir boyutlu konsolidasyon teorisi önceki bölümlerde de değinildiği gibi bir dizi basitleştirilmiş kabullere dayanmaktadır. Teori, birincil konsolidasyona hidrodinamik etkiler sonucu oluşan hacim değişimlerinin neden olduğunu savunmaktadır. Ayrıca, bir kil tabakasında fazla boşluk suyu basıncı tamamıyla sönmüldüğü zaman konsolidasyonun bittiğini kabul etmektedir. Gerek arazide, gerekse laboratuvar ortamında yapılan gözlemler birincil konsolidasyonda fazla boşluk suyu basıncının sönmülmesinin ardından, oturmaların durmadığını ve genellikle sabit efektif gerilme altında Şekil 3.1'de verildiği gibi devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.1: e-log t arasındaki ilişki

Suya doygun bir zeminin bir boyutlu sıkışması efektif düşey gerilme artışı esnasında oluşan birincil sıkışma ile sabit efektif gerilme altında devam eden ikincil sıkışmadan oluşmaktadır. Bir zeminin yapısındaki değişiklik, efektif düşey gerilmedeki artışla başlar ve yeni dış koşullar altında içsel denge kurulana kadar zamanla devam eder. Konsolidasyonun herhangi bir anında efektif düşey gerilme artışı sonucu zeminin sıkışması, sıkışabilirlik parametresi $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ ile ve zamanla devam eden sıkışma ise $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ ile ifade edilmektedir. Birincil konsolidasyon başladığı anda hem $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$, hem de $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ sıkışmaya katılırken, $d\sigma'_v / dt = 0$ olduğunda, ikincil konsolidasyon esnasında sadece $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ sıkışmaya katılmaktadır. Laboratuvardaki ödometre deneylerindeki ile karşılaştırıldığında, arazide birincil konsolidasyonun çok daha uzun sürmesine rağmen arazi ve laboratuvar gözlemleri ve analizleri birincil konsolidasyon süresinden bağımsız bir EOP sıkışması önermektedir. Çünkü, her zemin için $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ ve $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ parametreleri sabit olmamakla birlikte, her ikisi de drenaj sınır koşullarından etkilendikleri için birbiriyle ilişkili olup, sıkışmanın toplam hızına dayanmaktadır.

Karl Terzaghi'den sonra konsolidasyon teorisinde değişiklik yapmak için ilk girişim Donald Taylor ve Wilfred Merchant (1940) tarafından yapılmıştır. Taylor, (1942) değiştirilmiş konsolidasyon teorisi için gereksinimi şu şekilde özetlemektedir:

1. Laboratuvar deneylerinde numune davranışı ile Terzaghi teorisi arasındaki en önemli fark, deneylerde ikincil sıkışmanın oluşması
2. Klasik konsolidasyon verileriyle fazla bir kanıt bulunamamasına karşılık iddia edilen birincil sıkışma esnasında oluşan farklılıklar

Efektif gerilme ile boşluk oranı arasında tekil bir ilişki olduğunu kabul eden Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine ek olarak Taylor ve Merchant (1940) konsolidasyon işlemi sırasında bir zemin elemanının boşluk oranının, efektif gerilme ile zamanın bir fonksiyonu olarak değiştiğini belirtmişlerdir.

$$e = f(\sigma'_v, t) \quad (3.1)$$

Böylece boşluk oranının değişim hızı cinsinden sıkışma hızı

$$\frac{de}{dt} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right)_t \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} \quad (3.2)$$

şeklini almaktadır. Burada $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$, efektif düşey gerilmede meydana gelecek bir artışa karşı herhangi bir zamanda zemin yapısındaki sıkışabilirliği, $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ ise geçen zamana karşılık herhangi bir efektif gerilmede zemin yapısındaki sıkışabilirliği ifade etmektedir. Bu yüzden sıkışma hızının ilk kısmı olan $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t d\sigma'_v / dt$ efektif düşey gerilmedeki artış hızı $d\sigma'_v / dt$ ile üretilirken, sıkışma hızının ikinci kısmı $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ zamanla devam etmektedir. Efektif düşey gerilme artışı sonucunda, içsel dengeye ulaşmak için bir danenin tekrar konumlanmasını ve dane içi kuvvetlerin değişmesini gerektirmektedir.

Toplam sıkışmayı elde etmek için geçen bir zaman aralığında (3.2) bağıntısının integrali alınacak olursa bağıntı aşağıdaki hali alır:

$$\int_0^t de = \int_0^t \left[\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right) \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} \right] dt \quad (3.3)$$

Alternatif olarak (3.3) bağıntısı şu şekilde de yazılabilir:

$$\int_0^t de = \int_0^{t_p} \left[\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right) \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} \right] dt + \int_{t_p}^t \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} dt \quad (3.4)$$

(3.3) ve (3.4) bağıntılarının karşılaştırılması t_p sonrasında $d\sigma'_v / dt = 0$ olmasını içermektedir. Diğer bir ifadeyle, t_p efektif düşey gerilmenin arttığı konsolidasyon sürecini temsil etmektedir. t_p sonrasında ise efektif gerilme sabit kalmaktadır. Efektif düşey gerilmenin arttığı sıradaki konsolidasyon süreci “birincil konsolidasyon” birincil konsolidasyon sırasında oluşan toplam sıkışma miktarı ise “birincil sıkışma” olarak adlandırılmaktadır. Birincil konsolidasyon aşamasının ardından sonsuz zaman diliminde devam eden kısma “ikincil konsolidasyon” ve ikincil konsolidasyon sırasındaki toplam sıkışma miktarına ise “ikincil sıkışma” denilmektedir.

(3.4) nolu eşitliğin sağ tarafındaki ilk integral birincil sıkışma ve ikinci integral ise ikincil sıkışmadır. (3.4) nolu eşitliğin de gösterdiği üzere, birincil konsolidasyon

esnasında hem $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$, hem de $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ birincil sıkışmaya katılmaktadır. (3.4) nolu eşitliğin sağ taraftaki ikinci integral $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ ifadesi sıfır olmadığı sürece ikincil sıkışmalar sonsuza kadar devam edecektir. Bununla birlikte $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$, ve $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ ifadelerinin sabit zemin özellikleri olmadığını anlamak çok önemlidir. Özellikle, $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ ve $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ birincil ve ikincil konsolidasyon aşamalarında sabit kalmamakta ve birincil konsolidasyon ile ikincil konsolidasyon esnasında $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ değerleri aynı kalmak zorunda değildir.

Taylor'un (1942) birinci gözlemi (3.3) nolu eşitliğin sağ tarafındaki ikinci integrali işaret ederken, ikinci gözlemi, $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ değerinin sabit olacağı ve $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ değerinin sıfır olduğunu kabul eden Terzaghi konsolidasyon teorisine zıt olarak eşitliğin sağ tarafındaki birinci integralin açığa çıkmasını sağlamıştır.

Birincil konsolidasyon sırasında $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ ve $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ bileşenlerini belirlemek hâlihazırda mümkün olmadığı için (3.3) bağıntısı toplam sıkışmayı ve birlikte oturmayı hesaplamak için nadiren kullanılmıştır. Toplam bir boyutlu sıkışma (3.4) bağıntısındaki gibi birincil sıkışma ve ikincil sıkışma olarak ayrılmıştır. (3.4) bağıntısındaki sağ taraftaki ilk integralden ziyade çoğu zaman bir ödometre deneyi kullanılarak birincil sıkışma doğrudan bulunmuştur. Bu nedenle

$$\int_0^{t_p} \left[\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right) \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} \right] dt = [\Delta e]_p \quad (3.5)$$

Burada $[\Delta e]_p$ 20 mm kalınlığındaki örselenmemiş numunelerin birincil konsolidasyon sonu (EOP) e - σ'_v ilişkisinden bulunmaktadır.

t_p sonrasında ($d\sigma'_v / dt = 0$), bir boyutlu sıkışmanın ikinci bileşeni $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ ile oluşacak ikincil sıkışmaların süresi bilinmemektedir. Bu konuda, Cox (1936) tarafından 7 yıllık bir zaman dilimi için oturma-logaritma zaman ilişkisinin fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesinin ardından doğrusal olarak değiştiğini gösteren eğriler verilmiştir. Ama bu tip gözlemler her zemin türü için geçerli olmamaktadır. Gibson ve Lo (1961), laboratuvarındaki sıkışmanın yaklaşık bir aydan sonra durma eğiliminde olduğunu söylemiştir. Lo, laboratuvar deneylerinde zamanla

S_α ile gösterilen ikincil sıkışmada bir azalma görüldüğünü belirtirken, Bjerrum gecikmiş oturma-logaritma zaman bağıntısının düz bir doğru çizmediği ancak oturma hızının düştüğü sonucuna varmıştır. Edil ve Mochtar (1984), 7 günden 10 güne kadar yükleme süreleri için Gibson ve Lo'nun teorileri ile laboratuvar eğrileri arasında makul bir eğri uyumu oluşabileceğini belirtmektedir. Olson (1998) ise, kısa dönemli laboratuvar verisi kullanılarak arazideki zamanın hesaplanması durumunda birçok belirsizlik olduğuna dikkat çekmektedir.

Araştırmacılarca, laboratuvar ortamında, deney süresi birkaç yılı aşacak deneyler yapılmıştır. Laboratuvar sıcaklığında bakteri üremesi, yükleme koşullarındaki değişim veya zemin numunesindeki fiziko-kimyasal değişimlerin ürettiği çimentolaşma gibi faktörler nedeniyle bu uzun dönem laboratuvar deneylerinin verilerine şüphe ile bakmak gerekmektedir. Zemin numunesi ile uzun dönemli içsel etkileşime maruz kalan konsolidasyon ringi arasında ring sürtünmesinin artması veya sıcaklık değişimiyle konsolidasyon ring çapının değişmesi nedeniyle yanal basınçtaki değişim, laboratuvar yükleme koşullarının değişmesine sebep olmaktadır.

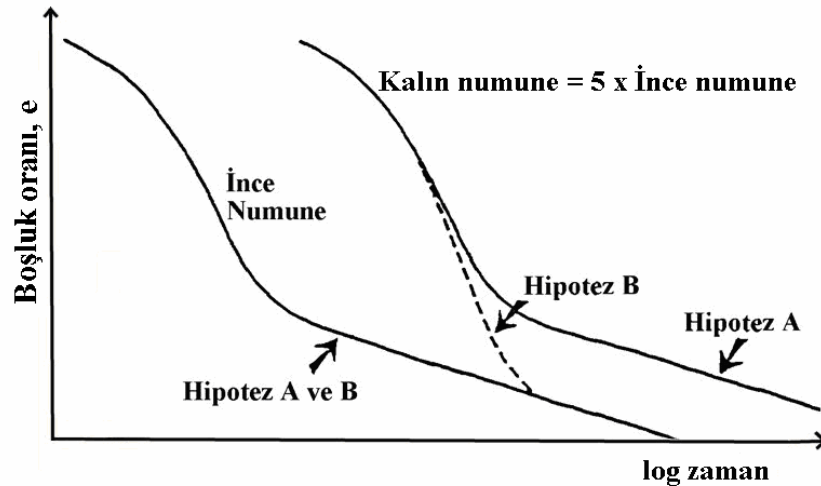
İnşaat sonrası yapıların uzun dönemli oturma kayıtları literatürde fazla bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra, laboratuvar numunesinde çoğu uzun dönem oturma verilerinde K_0 koşullarının kaybolması ile arazi koşullarının temsili mümkün olmamaktadır. Laboratuvar ve arazi sonuçlarını temel alan çoğu araştırmacı ikincil sıkışmanın, logaritma zamanın doğrusal bir fonksiyonu olduğu görüşünde birleşirken, diğer bir kısmı bunu kabul etmemektedir. Son zamanlarda Mesri ve Vardhanabhuti (2005) tarafından yapılan bir çalışma ise, doğal zeminler için arazide ve laboratuvarda gözlenen bir boyutlu konsolidasyon ölçümlerinde, belirli bir zaman dilimi için ikincil sıkışmalar esnasında $\Delta H / \Delta \log t$ değerinin sabit kalabileceği, azalabileceği veya artabileceği göstermektedir (Mesri ve Godlewski 1977, 1979; Mesri 1987, 2001; Mesri ve Castro 1987).

3.1 Arazi Koşullarının Laboratuvar Ortamında Modellenmesi

Arazide, özellikle konsolide olacak zemin tabakası kalın olduğunda drenaj yüzeylerine yakın tabaka bölümlerinde oluşan fazla boşluk suyu basıncının sönmüş olması ve bu kısımların ikincil sıkışmalara giderken, tabaka ortasındaki kısımlarda halen birincil konsolidasyonun devam etmesi mümkündür. Bu nedenle,

tabaka kalınlığı arttıkça ikincil sıkışmayı birincil konsolidasyondan ayırmak zorlaşmaktadır. Yüzey oturmasını ise bu iki tip oturmanın toplamı oluşturacağından son yüzey oturma miktarını belirlemek güçleşecektir. Bu durumda, ana soru ince bir laboratuvar zemin numunesinin $[\Delta e]_p$ değerinin arazideki kalın zemin tabakasının oturma analizinde aynen kullanılıp kullanılamayacağıdır. Bu soru ilk defa açıkça Leonards (1962) tarafından ortaya konmuştur. Bir basınç artışı uygulandığında oluşan fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi laboratuvarda dakikalar veya saatler içerisinde gerçekleşirken, arazide yıllar veya yüzyıllar alabilmektedir. Burada sorulması gereken fazla boşluk suyu basıncı sönümlendiğinde arazide kil tabakasının laboratuvar deneyindekinden daha fazla sıkışıp sıkışmadığıdır.

Ladd ve diğ. (1977) ikincil sıkışma mekanizması üzerinde tabaka kalınlığının etkisini incelemek amacıyla farklı boyutlarda numuneler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda Hipotez A ve Hipotez B adlı iki hipotez ortaya koymuştur. Hipotez A danelerin kayması, tekrardan konumlanması, emilen su filminin örselenmesi ve çift tabaka kalınlığının değişmesi gibi fiziksel mekanizmalar etkisiyle oluşan ikincil sıkışmaların fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesinin (birincil konsolidasyonun tamamlanmasının) ardından oluştuğunu savunmaktayken, Hipotez B kripin birincil konsolidasyon esnasında da oluştuğunu savunmaktadır.



Şekil 3.2: Hipotez A ve Hipotez B'ye göre boşluk oranı-logaritma zaman eğrileri (Ladd ve diğ.,1977)

Aynı zamanda Hipotez A numune kalınlığının, yani drenaj boyunun ve boşluk suyu basıncı dağılımının Birincil Konsolidasyon Sonu (EOP) konsolidasyon eğrisine etkisi

Mesri ve arkadaşlarının çalışmaları, numune boyutundan ve birincil konsolidasyonun süresinden bağımsız olduğunu savundukları tekil birincil konsolidasyon sonu EOP oturmalarını önerdiği için Ladd ve diğ. (1977)'nin Model A hipotezini destekler niteliktedir (Mesri 1973, Mesri ve Rokhsar 1974, Mesri 1975, Mesri ve diğ. 1975, Mesri ve Godlewski 1977, Mesri ve Choi 1985, Mesri ve Castro 1987). Ancak Mesri (2001), t_p sürecinde $(d\sigma'_v/dt \neq 0)$, $(\partial e/\partial \sigma'_v)_t$ ile $(\partial e/\partial t)_{\sigma'_v}$ 'nin ayrı düşünülmemeyeceğini, yani birincil konsolidasyon sırasında kripin de oluşacağını belirtmiştir. Mesri ve Choi (1985) boşluk oranına karşı efektif gerilme eksen takımında çizilecek EOP eğrisinin tekilliğini araştırmak amacıyla ince ve kalın numuneler üzerinde bir tek basınç artışının yanlış bir sonuca götürebileceğine dikkat çekmektedir. Çünkü, σ'_{vj} gerilmesinden σ'_{vj+1} gerilmesine çıkılan bir basınç artışı altında ince ve kalın numunelerin davranışlarını karşılaştırmak için yapılan çalışmalarda, eğer numunelerin σ'_{vj} altında keyfi sürelerde ikincil sıkışmasına izin verilmişse, σ'_{vj} gerilmesinden σ'_{vj+1} gerilmesine çıkılırken iki numunenin sıkışma zaman eğrilerinin doğrudan karşılaştırılamayacağını belirtmiştir. Mesri ve Choi (1985), σ'_{vj} altında aynı zaman dilimi için konsolidasyona bırakılan ince ve kalın numunelerden ince numunenin kalın numuneden daha fazla ikincil sıkışma yapacağını göstermiştir. Bu durumda, σ'_{vj} gerilmesinden σ'_{vj+1} gerilmesine çıkıldığında ince numune daha az birincil konsolidasyon sıkışması sergilemiştir. Mesri ve Choi (1985), σ'_{vj} gerilmesinde iki numunenin aynı olmadığını $e - \log \sigma'_v$ grafiği çizilmeden anlaşılamayacağını belirtmiştir. Ayrıca maksimum drenaj boyu farklı numuneler için aynı sıkışma oranında, $(\partial e/\partial \sigma'_v)_t$ ve özellikle $(\partial e/\partial t)_{\sigma'_v}$ ifadelerinin de farklı değerler alacağını ve böylece birincil konsolidasyon sürelerinin de farklı olacağını belirtmiştir. En büyük $(\partial e/\partial \sigma'_v)_t$ ve $(\partial e/\partial t)_{\sigma'_v}$ ifadelerinin, drenaj boyu en küçük tabakalara karşılık geleceği ve böylece t_p 'nin de en küçük olacağını söylemiştir. Böylece laboratuvardaki ile karşılaştırıldığında arazide çok daha uzun bir süre için birincil konsolidasyona $(\partial e/\partial t)_{\sigma'_v}$ ifadesinin katkısı bulunmasına karşın, laboratuvardaki $(\partial e/\partial t)_{\sigma'_v}$ 'nin büyük değerleri ile karşılaştırıldığında arazide bu ifadenin daha küçük değerde olmasından dolayı,

birincil konsolidasyonun süresinden bağımsız olarak bir tek EOP boşluk oranı efektif düşey gerilme ilişkisi elde edilebilir.

Leroueil (1995), laboratuvar deneylerinden arazideki davranışı tahmin etmek için zemin örselenmesi, sıcaklık ve yapısal olgular cinsinden boşluk oranı (e) - efektif gerilme eksen takımında çizilen EOP eğrisinin tekilliğini araştırmıştır. Gözlemlediği arazi oturmalarının alt sınırı Hipotez A'nın kabul ettiği ile üst sınırı Hipotez B'nin belirlediği EOP e -log σ'_v eğrilerinin arasında kaldığını belirtmiştir. Arazi koşullarında oturma hesabına viskoz etkinin katılıp katılmaması arasında büyük farklılık olması durumunda mühendisin numunedeki örselenme ve oluşabilecek yapısal değişiklikler vb. etkenleri göz önüne alarak en uygun yaklaşımı seçmesi gerektiğini vurgulamıştır. Leroueil (1995), düşük sıkışabilirliğe sahip killerde ($C_c/(1+e) < 0,25$, $\Delta e_s < \%2,5$) yük artırım süresinin $YAS=24$ saat olduğu klasik konsolidasyon deney verilerinden elde edilecek EOP eğrilerinin kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, konsolidasyonu hızlandırmak için düşey drenlerin kullanılması durumunda Δe_s çok küçüleceğinden viskoz etkinin ihmal edilebileceğini belirtmiştir. Ancak, yüksek sıkışabilirliğe sahip killerde ($C_c/(1+e) > 0,25$) veya yüksek dolgularda viskoz etkinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Bazı arazi oturma gözlemlerinde ikincil sıkışmaların logaritma zamanla doğrusal olarak değiştiği gösterilirken (Buisman, 1936; Thompson ve Polmer, 1951; Bjerrum 1967; Simons, 1957) bazen da gerilme-Şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal olmadığının gösterildiğine dikkat çeken Olson (1998), konsolidasyon esnasında hidrolik iletkenlikteki azalma ile ikincil etkilerin karıştırıldığını ileri sürmüştür. Uzun süreli oturma gözlemlerini içeren bu çalışmaların çoğunun büyük kesme gerilmelerine bağlı olarak alt zeminin yanal yer değiştirmesine bağlı oturmaları da içermesinin muhtemel olduğunu vurgulamıştır. Bu nedenle Olson (1998), geniş zaman aralıklarında tanımlı laboratuvar boşluk oranları kullanılarak arazi konsolidasyon davranışını hesaplamayı önermiştir. Laboratuvar da, ekonomik nedenlerle çoğu yüklerin sadece bir gün kalabileceğini, ama arazi efektif gerilmesinin gerilme aralığında bir yükün, gerilme-Şekil değiştirme eğrisinin kalanı için yaklaşık düzeltmelere izin vermek üzere bir hafta bırakılabileceğini vurgulamıştır. Çoğu arazi oturma kayıtlarının birincil konsolidasyonun sonu civarında kesildiğini ve bu sorunu aydınlatmak için uzun dönem arazi kayıtlarına gereksinim olduğunu belirtmiştir.

3.2 İkincil Sıkışmanın Belirlenmesi

Oturma analizlerinde ikincil sıkışmaları da içeren çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Ancak ikincil sıkışma hızının ve büyüklüğünün hesaplanması için halen tam güvenilir bir metot bulunmamaktadır. Bu yüzden, pratikte ikincil sıkışmaların tahmini, ampirik yöntemlere dayanmaktadır. İkincil sıkışmalara deneysel yaklaşan Buisman (1936), Koppejan (1948) ve Zeeveart (1975) arazi ve laboratuvar oturma-zaman gözlemleriyle aralarındaki ilişkiyi pratik olarak formüle etmeye çalışmışlardır. Diğer taraftan Taylor ve Merchant (1940), Barden (1968), ve Sekiguchi (1976) kohezyonlu zeminlerin reolojik özelliklerini dikkate alarak nümerik metotlarla ikincil sıkışmaları açıklamaya çalışmışlardır. İkincil etkileri açıklamak için sayısal, fiziksel ve matematiksel modeller geliştirilmişse de bu modeller, laboratuvar verilerine uydurulamayan eğri uyarlama parametreleri içermektedir (Terzaghi ve Frohlich, 1936; Gibson ve Lo, 1961; Schiffmann, 1964; Barden, 1965 ve de Josselen de Jong 1968 ve diğerleri).

Günümüzde ikincil sıkışmalar nedeniyle sıkışma eğrisinin nasıl etkileneceğinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Farklı zemin koşullarında ve zemin oluşumlarında ikincil sıkışmaların büyüklüğünü tanımlayan parametrelerin karakteri ve büyüklüğü ile ilgili çok az şey bilinmektedir. İkincil sıkışmaları anlatmak için farklı araştırmacılar farklı parametreler kullanmışlardır. Ortak olarak kabul gören bir ikincil sıkışma parametresi, 1970'lere kadar gözükmemektedir.

İkincil sıkışma davranışı; ikincil etkiler, ikincil büyüklükler, ikincil oran, ikincil zaman faktörü, ikincil yüzde ve ikincil sıkışma katsayısı cinsinden analiz edilmeye çalışılmıştır. 1970'lerin başlarında, ikincil sıkışma büyüklüğünü anlatmak için sıkça ortaya atılan ve deney koşullarından en az etkilenen parametre olarak görünen ikincil sıkışma katsayısı kullanılmaya başlanmıştır. Mesri (1973) birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından e-log t eğrisinin düz kısmında bir logaritma zaman çevrimine karşılık gelen eğim olarak tanımladığı C_α ikincil sıkışma katsayısını

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (3.6)$$

bağıntısı ile vermiştir. Deneysel verilere dayandırdığı çalışmasında, ikincil sıkışmaları, düşey deformasyon cinsinden ikincil sıkışma oranı ($C_{\alpha\epsilon}$),

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta \log t} \quad (3.7)$$

ile de göstermiştir. (3.6) ve (3.7) bağıntıları birlikte düşünülerek ikincil sıkışma oranı

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{C_\alpha}{(1 + e_0)} \quad (3.8)$$

şeklinde de tanımlanmıştır. Ancak bağıntıdaki arazi boşluk oranı (e_0) yerine; C_α 'nın ölçüldüğü yük kademesinde birincil konsolidasyonun tamamlandığı andaki boşluk oranı (e_p), veya C_α 'nın ölçüldüğü gerilme kademesi başındaki boşluk oranı (e_i), de kullanılabilir. Buna göre, H_0 kalınlığındaki bir kil tabakasının ikincil oturması,

$$S_\alpha = \Delta H_\alpha = C_{\alpha\epsilon} H_0 \log \left(\frac{t}{t_p} \right) \quad (3.9)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bağıntıda, t_p fazla boşluk suyunun sönümlenmesi için gereken süredir. Mesri (1973) $C_{\alpha\epsilon}$ değerlerinin % 0,1~10,0 aralığında kaldığına dikkat çekerek zeminlerin ikincil sıkışabilirliklerini temel alan bir sınıflama önermiştir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1: Zeminlerin ikincil sıkışma özelliklerine göre sınıflandırılması (Mesri, 1973)

İkincil sıkışma oranı, $C_{\alpha\epsilon}$, (%)	İkincil sıkışabilirlik
<0,2	Çok düşük
0,4	Düşük
0,8	Orta
1,6	Yüksek
3,2	Çok yüksek
>6,4	Aşırı yüksek

İkincil sıkışma katsayısının (C_α) bulunması ile ilgili çeşitli eleştiriler de literatürde bulunmaktadır. Sridharan ve Sreepado Rao (1982) (3.6) ve (3.7) bağıntılarının standart bir Casagrande tipi sıkışma-zaman eğrisi kabul ettiği, diğer sıkışma eğrileri

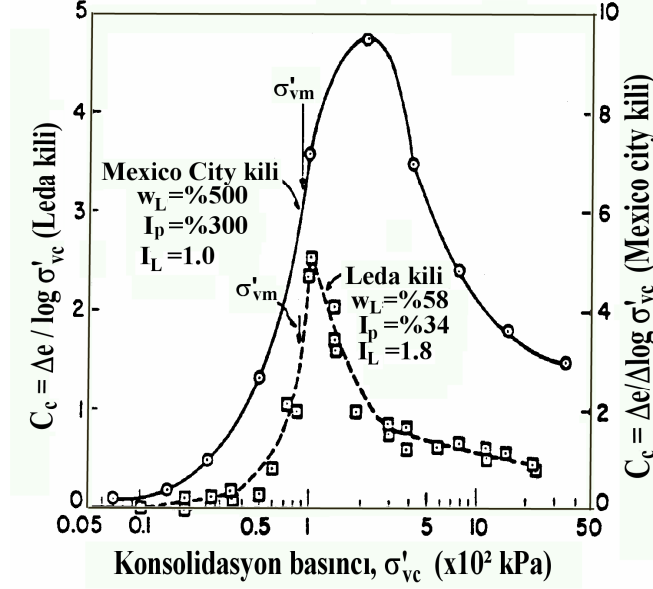
için ikincil sıkışma katsayısını tanımlamanın veya birincil sıkışmanın sonunun belirlenmesinin imkânı olmadığını ileri sürmüştür. Hipotez B'yi savunan Sridharan (1991), bağıntılarda numune kalınlığı hesaba alınmadığı için eksiklikler bulunduğunu da belirtmiştir.

Yin (1999) zamanla sabit C_α değerini, zamanın sonsuza gitmesi durumunda oturmaların da sonsuza gideceği anlamını taşıması nedeniyle göz ardı etmiştir. Tüm gözlediği durumlarda C_α değerinin zamanla azaldığını belirten Yin (1999) hiperbolik bir fonksiyonla ikincil sıkışmayı tariflemek için bir ikincil sıkışma sonu boşluk oranı önermiştir. Handy (2002) savunduğu birinci dereceden hız denklemleri için bir bitiş koşulu koymak amacıyla ikincil sıkışmaların açıkça bir sona varmasını tercih ederken, Li (2003) zamanla sabit bir C_α ikincil sıkışma katsayısının kabul edilemez olduğunu çünkü bunun sonsuza kadar devam eden bir sıkışma anlamına geleceğini belirtmiştir.

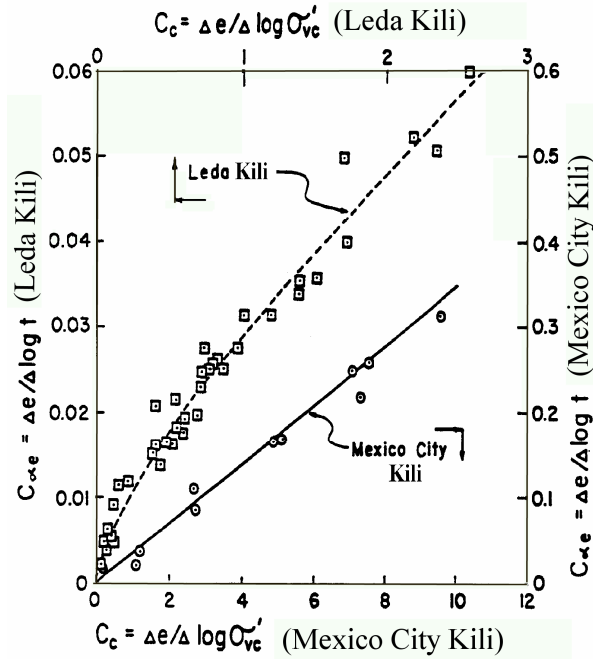
İkincil oturma (S_α) ve logaritma zaman arasında doğrusal bir ilişki kabul eden Buisman (1936) ile uyum içerisinde Walker ve Raymond (1968), Walker (1969) ve Ladd (1973), C_α veya $C_\alpha / (1 + e_o)$ kullanmış, Walker ve Raymond (1968) ve Walker (1969) farklı konsolidasyon basınçları için C_α 'ya karşı C_c 'yi çizmişlerdir. Ladd (1973) $C_\alpha / (1 + e_o)$ 'ra karşı bakir eğrinin $C_c / (1 + e_o)$ değerini çizmiştir. Ladd (1973) C_α değerinin, tekrar sıkışma esnasında önkonsolidasyon basıncını geçene kadar yavaşça artarken, normal konsolide kısımda ise sıkışma indisi (C_c) değerine bağlı olarak artış gösterdiğine dikkat çekmiştir. Ladd (1973) normal konsolide kısımda $C_c / (1 + e_o)$ değeri sabit olan zeminler için $C_\alpha / (1 + e_o)$ değerinin sabit kaldığı veya biraz azaldığını, gerilme artışı ile $C_c / (1 + e_o)$ değerinde bir azalma göze çarpan zeminler için ise $C_\alpha / (1 + e_o)$ değerinin de aynı şekilde azaldığını belirtmiştir. Böylelikle, Walker ve Raymond (1968), Walker (1969) ve Ladd (1973) ikincil sıkışma esnasında sabit bir C_α veya $C_\alpha / (1 + e_o)$ kabul ederek C_α ve C_c veya $C_\alpha / (1 + e_o)$ ve $C_c / (1 + e_o)$ arasında bir korelasyon vermişlerdir.

Mesri ve Godlewski (1977) Meksika ve Leda Killeri üzerinde Illinois Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmalarında, her iki zemin için de sıkışma indisi C_c ile C_α arasında tekil bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Şekil 3.4'de, birincil konsolidasyonun sonuna karşılık gelen (EOP) e-log σ_v' eğrisinin eğiminden

buldukları C_c değerlerini göstermişlerdir. C_α değerini ise her konsolidasyon gerilmesinde birincil konsolidasyondan ikincil sıkısmaya geçtikten sonra ilk logaritma zaman döngüsünden hesaplamışlardır. Sonuç olarak, Şekil 3.5'ten de görüleceği üzere iki farklı yapıdaki kil için hem aşırı konsolide, hem de normal konsolide kısımda aynı tekil C_α - C_c ilişkisinin uygulanabildiğini göstermişlerdir.

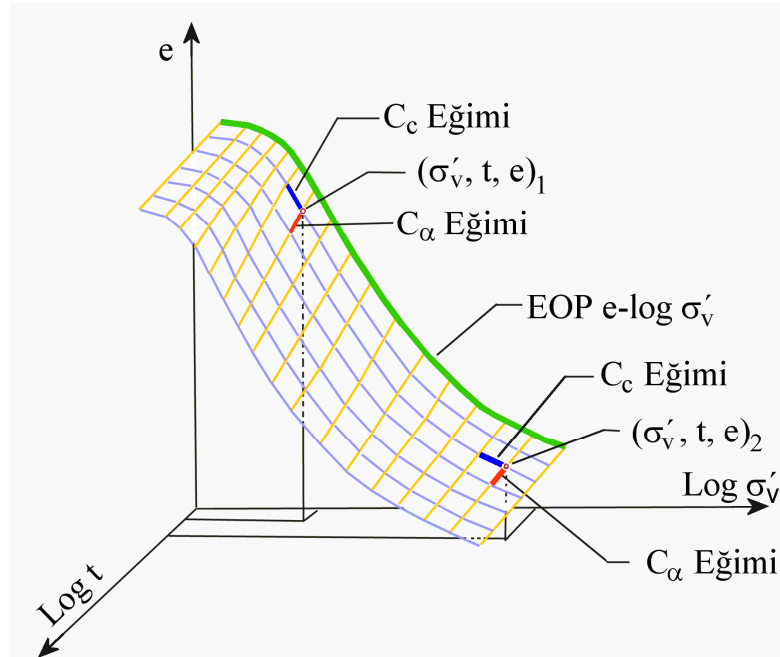


Şekil 3.4: Sıkışma indisi-logaritma konsolidasyon basıncı



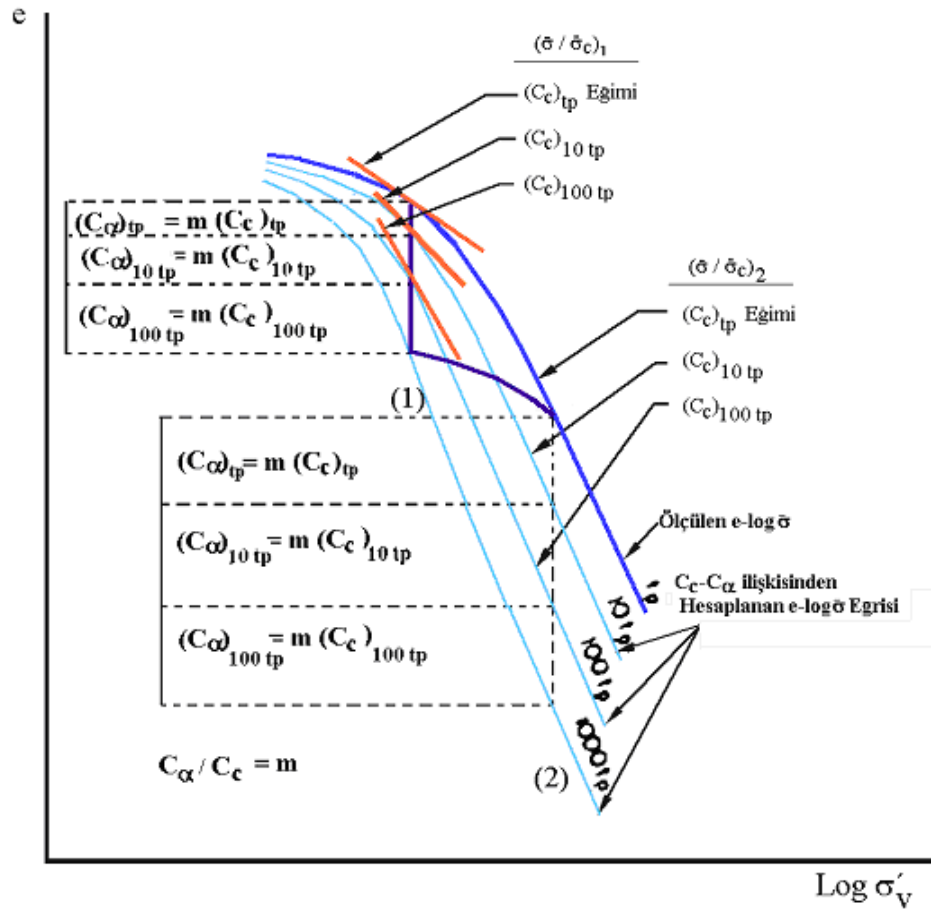
Şekil 3.5: İkincil sıkışma katsayısı-sıkışma indisi (Mesri ve Godlewski, 1977)

Sonuç olarak; zamanla C_α değerin büyüklüğü ve davranışı doğrudan konsolidasyon basıncı σ'_v ile C_c ifadesinin büyüklüğüne ve davranışına bağlanmıştır. Şekil 3.6'da gösterilen $e - \log \sigma'_v - \log t$ uzayında birincil sıkışmalar sonrasındaki sıkışmalar gösterilmiştir. Şekilde, uzun süreli konsolidasyon deneylerinde çeşitli gerilme kademelerindeki ikincil sıkışmalar sırasında oluşan $e - \log t$ değişimleri turuncu renkle gösterilmiştir. Krip deneylerinde birincil konsolidasyonun tamamlandığı (t_p) anlardaki $e - \log t$ eğri noktalarının birleştirilmesi ile yeşil renkle gösterilen (EOP) $e - \log \sigma'_v$ eğrisi elde edilir. $e - \log t$ eğrisinde t_p süresinin 10, 100 ve 1000 gibi çeşitli katlarına karşılık gelen noktaların birleştirilmesi durumunda ise mavi renkle gösterilen $e - \log \sigma'_v$ eğrileri oluşur. Bu eğriler tarafından $e - \log \sigma'_v - \log t$ uzayında tanımlanan yüzeyin oluşturulması için birçok uzun süreli krip deneyine ihtiyaç duyulmasına karşın, bu yüzey sabit C_α/C_c yasasına göre de bulunabilir. Bunun için, ikincil sıkışma sırasında herhangi bir (t) anındaki C_α ve C_c çifti için sırasıyla, bu noktadan geçen $e - \log t$ ve $e - \log \sigma'_v$ eğrilerindeki eğimleri kullanılmaktadır. Bu sıkışma yasasına göre sabit bir C_α/C_c için e 'ye karşı $\log \sigma'_v$ ve $\log t$ grafikleri Şekil 3.6'daki gibi türetilir. Bunun için Mesri ve Godlewski (1977) her gerilme seviyesinde uzun süreli krip deneyine ihtiyaç olmaksızın $e - \log \sigma'_v$ eğrilerinin sabit C_α/C_c yasasına göre belirlenebileceğini anlatmıştır.



Şekil 3.6: İkincil konsolidasyon esnasında $e - \log \sigma'_v - \log t$ ilişkisi (Mesri ve Godlewski 1977)

Meksika ve Leda killerinin çeşitli σ_v'/σ_{vc}' oranlarında zamana karşı C_α 'yı değerlendiren ve sabit bir C_α/C_c değeri kabul eden Mesri ve Godlewski (1977) daha sonra C_α 'nın $\sigma_v' < \sigma_{vc}'$ için zamanla artarken, $\sigma_v' > \sigma_{vc}'$ için zamanla bir miktar azaldığını göstermiştir. Bjerrum'un zaman çizgilerini yeniden değerlendiren Mesri ve Godlewski, C_α 'nın zamanla değişmekte olduğunu, aksi takdirde Şekil 3.7'de gösterdikleri gibi zaman çizgilerinin birbirine eşit mesafelerde olamayacağını belirtmişlerdir. C_α 'nın zamanla değişimini önceden bilmenin mümkün olduğunu savundukları prosedürleri Şekil 3.7'de anlatılmaktadır. Buna göre, öncelikle bir $t=t_p$ süresine karşılık gelen EOP e-log σ_v' eğrisi elde edilir. Şekil 3.5'de gösterildiği gibi zemin için ya sabit bir C_α/C_c değeri belirlenir veya kabul edilir. Şekil 3.7'de verilen Δe_1 için sabit bir C_α/C_c ilişkisi kullanarak ve C_α 'nın t_p 'den $10 t_p$ ye kadar sabit kaldığı kabul edilerek her bir gerilmeye $t=10 t_p$ 'ye karşılık gelen eğri çizilebilir. Benzer bir yolla, e-log σ_v' eğrisi $100 t_p$ için $10 t_p$ eğrisinden oluşturulabilir. Bu şekilde oluşturulan eğri ailesi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: e-log σ_v' eğri ailesi ilişkisi (Mesri ve Godlewski, 1977)

Mesri ve Godlewski (1977) Şekil 3.5’de gözlemledikleri ikincil sıkışmalar boyunca tekrar sıkışmadan normal sıkışma kısmına kadar tüm konsolidasyon basınçları için Mesri ve Vardhanabhuti (2005) çok geniş çeşitlilikte doğal zemin için arazide ve laboratuvarında gözlenen bir boyutlu konsolidasyon ölçümlerinin büyük bir çoğunluğu, ikincil sıkışmalar esnasında $\Delta H / \Delta \log t$ değerinin belirli bir zaman dilimi için sabit kalabileceği, azalabileceği veya artabileceğini göstermektedir (Mesri ve Godlewski 1977, 1979; Mesri 1987, Mesri ve diğ. 1997, 2001; Mesri ve Castro 1987). Buna göre, zemin cinsine bağlı olarak C_α/C_c değerinin sabit bir değer alacağını söyleyerek çeşitli zemin türleri için çeşitli araştırmacılarca belirlenen C_α/C_c değerleri Tablo 3.2’deki gibi özetlenmiştir. Mesri ve Vardhanabhuti (2005) tüm bu veriler ışığında geoteknik malzemeler için Tablo 3.3’deki C_α/C_c değerlerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Tablo 3.2: Çeşitli zeminler için C_α/C_c değerleri

Zemin	C_α/C_c	Referans
Whangamarino kili	0,03-0,04	Newland ve Allely, 1960
Norfolk organik silti	0,05	Barber, 1961
Kalkerli organik silt	0,035-0,06	Wahls, 1962
Amorf ve lifli turba	0,035-0,083	Lea ve Brawner, 1963
Kanada muskeg	0,09-0,10	Adams, 1965
Leda kili	0,04-0,06	Walker ve Raymond, 1969
Turba	0,075-0,085	Weber, 1969
Post-glacial organik kil	0,05-0,07	Chang, 1969
Yumuşak mavi kil	0,026	Crawford ve Sutherland, 1971
Organik killer ve siltler	0,04-0,06	Ladd, 1971
Hassas Portland kili	0,025-0,055	Ladd, 1971
Turba	0,05-0,08	Samson ve La Rochelle, 1972
San Fransisko körfez çamuru	0,04-0,06	Su ve Prysock, 1974
New Liskeard varved kili	0,03-0,06	Quigley ve Ogunbadejo, 1972
Siltli kil, C	0,032	Samson ve Garneau, 1973
Nearshore killeri ve siltleri	0,055-0,075	Brown ve Rashid, 1975
Lifli turbalar	0,06-0,085	Bery ve vickers, 1975
Meksika kili	0,03-0,035	Mesri, Rokhsar ve Bohor, 1975
Hudson nehir silti	0,03-0,06	Mesri ve Godlewski, 1977
Leda kili	0,025-0,04	Mesri ve Godlewski, 1977
New Haven organik kili-silti	0,04-0,075	Mesri ve Godlewski, 1977
Berthville kili	0,045	Mesri ve Castro, 1987
Tar kumu	0,035	Mesri ve Castro, 1987

Tablo 3.2 (devamı): Çeşitli zeminler için C_α/C_c değerleri

Zemin	C_α/C_c	Referans
Berpaw şeyli	0,029	Mesri ve Castro, 1987
Oil sand fine tails	0,085	Suthaker ve Don Scott, 1995
Fine tails-kum karışımı	0,019	Suthaker ve Don Scott, 1995
Olga B&C, Kanada	0,033	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Rupert 7, Kanada	0,03	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Vasby, İsveç	0,06	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Glocester, Kanada	0,031	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Ellingstrud, Norveç	0,044	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Ska-Edeby, İsveç	0,05	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Changi, Singapur	0,035	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
ChepLapKok, Hong Kong	0,030-0,065	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
LaGrande, Kanada	0,054	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Bangkok, Tayland	0,05	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Samsun Çarşamba mavi kili	0,027-0,034	Çevikbilen, 1999

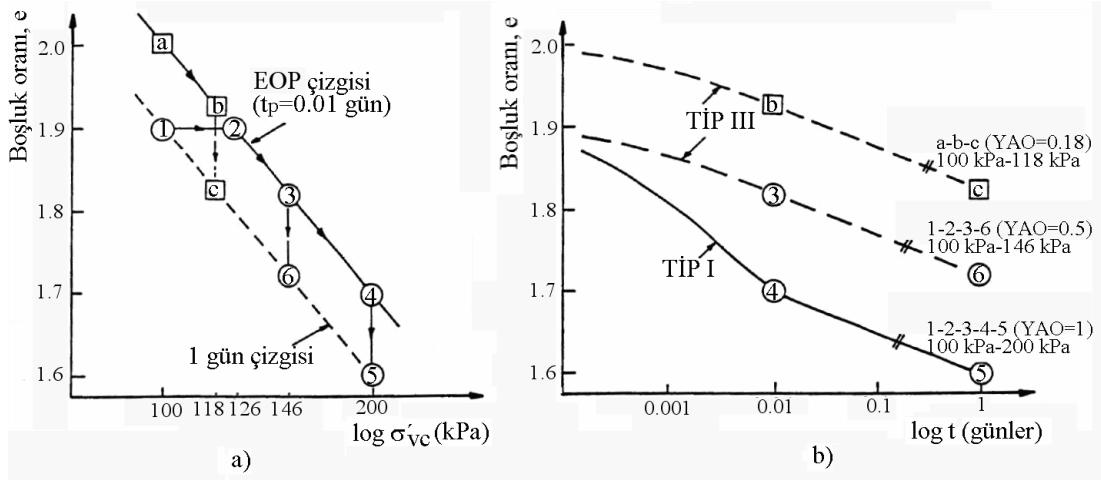
Tablo 3.3: Geoteknik Malzemelerin C_α/C_c değerleri (Mesri ve Vardhanabhuti, 2005)

Malzeme	C_α/C_c
Kaya dolgusu içeren daneli zeminler	0,02±0,01
Şeyl ve çamurtaşı	0,03±0,01
Organik olmayan killler ve siltler	0,04±0,01
Organik killler ve siltler	0,05±0,01
Lifli ve şekilsiz turbalar	0,06±0,01

Buraya kadar olan bölümde, C_α/C_c oranının birçok normal konsolide zeminler için yaklaşık tekil bir değer olduğu kabul edilmiştir. Sridharan ve Prakash (1998) ise çalıştıkları killerde bu yönde bariz bir eğilim bulamamışlardır. Bunun sürpriz olmadığını çünkü C_c ve $C_{\alpha e}$ 'nu kontrol eden ana mekanizmaların farklı olduğunu vurgulamışlardır. Birincil konsolidasyona karşılık gelen C_c ifadesinin yalnızca fazla boşluk suyu basıncının sönmülmesini içerirken, $C_{\alpha e}$ sabit efektif gerilme etkisinde birçok karmaşık işleme bağlı olduğundan C_c ile $C_{\alpha e}$ arasında bariz herhangi bir ilişki çıkmasının gerekmediğini belirtmişlerdir. e -log σ eğrisinden tahmin edilen C_c ifadesinin ikincil sıkışmaları içerse de durumun çok farklı olmayacağını savunmuşlardır.

3.3 İkincil Sıkışma Sonrası Tekrar Sıkışma Davranışı

Herhangi bir σ'_{vc} gerilmesi altında ikincil sıkışma sonrasında ek bir σ'_{vf} gerilmesine maruz kalacak zeminin sıkışma davranışı, arazide kendi yüküyle konsolide olmaya devam eden çökellerin sıkışma davranışını modelleyebileceği gibi önyüklemeye maruz kalmış bir zeminin tekrar sıkıştırılması durumuna da karşılık gelebilir. Zeminlerin ikincil sıkışma sonrası sıkışma davranışını incelemek için öncelikle σ'_{vc} gerilmesi altında oluşan ikincil sıkışmanın miktarını ve yeni yüklemelerin mertebesini incelemek doğru olacaktır. Bu konuda, σ'_{vc} gerilmesi altında farklı sürelerde konsolidasyonuna izin verilen ve konsolidasyon sonrasında da farklı yük artırma oranları (YAO) ile çalışan Mesri ve Goodlewski (1979) C_α - σ'_v arasındaki ilişkiyi ve bu ilişkinin YAO ile değişimini araştırmışlardır. Şekil 3.8'de, ödometre deneyinden elde edilen $C_c=1,0$, $C_\alpha/C_c=0,05$ ve $t_p=0,01$ gün olarak belirlenmiş normal yüklenmiş bir kil bir zeminin $\sigma'_{vc} = 100kPa$ gerilmesinden sonra 3 farklı YAO ile yüklenmesi durumunda elde edilen e - $\log t$ ve e - $\log \sigma'_v$ eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 3.8: İkincil sıkışma YAO ilişkisi (Mesri ve Goodlewski, 1979)

Söz konusu numunenin önkonsolidasyon basıncı $\sigma'_p = 126kPa$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre, numune $\sigma'_{vc} = 100kPa$ gerilmesinde bir gün bekletilmesinin ardından $YAO=1$ ile $\sigma'_{vc} = 100kPa$ 'dan $\sigma'_{vf} = 200kPa$ değerine yükseltilmesi durumunda e - $\log \sigma'_{vc}$ gerilme izi Nokta 1'den Nokta 2'ye tekrar sıkışmış, sonra EOP çizgisi boyunca 2, 3 ve 4'ü takip ederek konsolide olmuş ve son olarak Nokta 4'den Nokta 5'e ikincil sıkışmaya gitmiştir. Bu sırada e - $\log t$ eğrisinin değişimi ise

Şekil 3.8b’de verilen Tip I’deki gibi olmaktadır (Leonards ve Altsdhaeffl, 1964). Yani, $YAO = 1$ olması durumunda birincil konsolidasyon eğrisi Terzaghi’nin teorisine uymakta ve ikincil sıkışma eğimi $C_\alpha = 0,05$ olmaktadır.

$\sigma'_{vc} = 100kPa$ gerilmesi altında sadece birincil konsolidasyonuna izin verilmesinin ardından numunenin $YAO = 0.18$ olacak şekilde $\sigma'_{vf} = 118kPa < \sigma'_p$ değerine yüklenmesi durumunda ise $e - \log \sigma'_{vc}$ gerilme izi Şekil 3.8a’da a-b-c çizgisiyle verildiği gibidir. Boşluk oranının zamanla değişimi ise Şekil 3.8b’de Tip III ile verilmiş olup birincil sıkışma ile ikincil sıkışma aşamalarını birbirinden ayırmak oldukça zor olmaktadır. Mesri (1978), küçük YAO ’nın $e - \log t$ grafiğinde kırksız Tip III eğrisini vermesini, $(de/d \log t)_{maksimum}$ değerinin $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ değerine eşit veya daha küçük olduğu zaman, ikincil sıkışma hızının, birincil konsolidasyondaki $e - \log t$ eğrisinin en büyük eğimine eşit veya ondan büyük olduğunu, bu nedenle de birincil sıkışmanın sonu ve ikincil sıkışmanın başlangıcı arasında bir kırılmanın gözlenemediğini belirtmiştir.

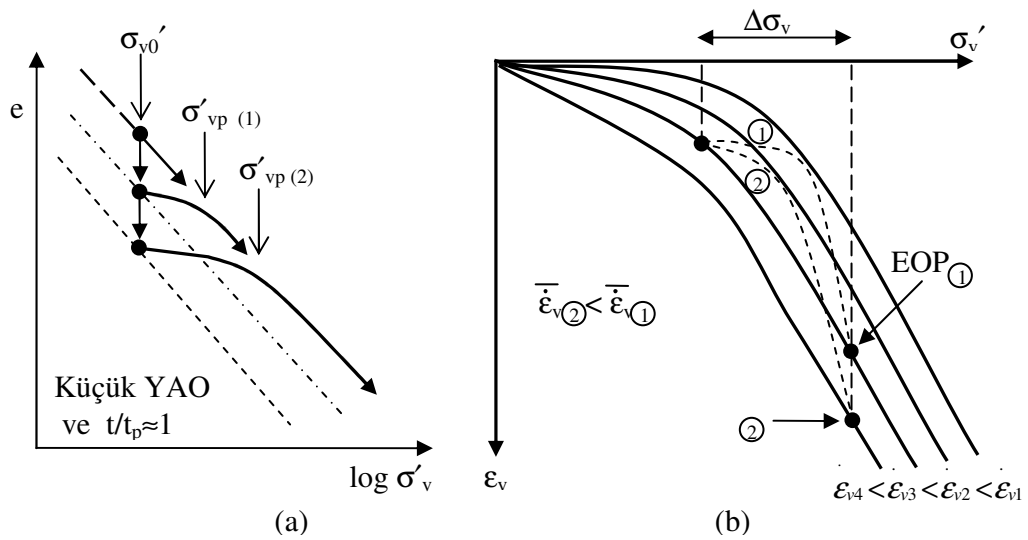
Aynı şekilde $YAO = 0.5$ için $\sigma'_{vc} = 100kPa$ gerilmesi altında 1 gün beklenilmesinden sonra $\sigma'_{vf} = 146kPa$ değerine yüklenen numunenin $e - \log \sigma'_{vc}$ gerilme izi de 1-2-3-6 şeklinde olacaktır. $\sigma'_{vc} = 100kPa$ değerinden $\sigma'_p = 126kPa$ değerine kadar önceki ikincil sıkışmalar nedeniyle, boşluk oranındaki değişim çok küçük ve ihmal edilebilir mertebede kalırken $\sigma'_p = 126kPa$ değerinden $\sigma'_{vf} = 146kPa$ değerine kadar önce EOP eğrisini takip etmesinin ardından 3-6 arasında ikincil sıkışmaya gidecektir. Bu numunenin $e - \log t$ grafiği de Şekil 3.8b’de Tip III olarak gösterilmiştir.

Sonuç olarak; üç yük artırma oranında da aynı ikincil sıkışma hızına sahip olunduğu, sürekli $C_c = 1,0$ olan aynı bakir EOP çizgisine erişildiği ve C_α / C_c değerinin sabit olduğu unutulmamalıdır. Bu tez kapsamında yapılan deneyler esnasında klasik konsolidasyon deneylerinde yük artırma oranı ($YAO = 1$), yük artırım süresi (YAS) genellikle 24 saat alınmış, numune boyu uzatıldığı zaman bu süre de uzatılmıştır. Uzun süreli konsolidasyon deneyleri esnasında ise krip öncesindeki yükleme kademelerinde $YAO = 1$ olarak alınmış bu kademelerde klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen t_p süreleri için birincil konsolidasyona izin verilmiştir. Krip sonrası EOP eğrisine birleşim şeklinin incelendiği deneylerde ileriki gerilme kademelerinde $YAO < 1$ olarak alınmıştır. Deneylerde boşluk suyu basıncı takip

edilemediği için bu yükleme kademelerinde e - $\log t$ eğrisinden birincil konsolidasyon sonunun belirlenmesi mümkün olamayacağı için önceden belirlenen t_p sürelerinde yük artımına gidilmiştir.

Yukarıda verilen örnekte, normal konsolide bir kilin ödometre deney sonuçlarındaki ikincil sıkışma sürelerinin kısa olduğu ve bu süresinin uzaması durumunda gerilme izinin değişimi de incelenmek durumundadır. Bunun nedeni, zeminin oluşma evresinde, binlerce yılı aşkın sürede, bir veya daha fazla ikincil konsolidasyon döngüsünün ardından boşluk oranındaki azalmanın sonucu olarak zemin yapısı çok daha kararlı bir hal almakta ve normal konsolide olan zeminde tekrar yüklendiğinde jeolojik yükten daha fazla bir önkonsolidasyon basıncı oluşmaktadır. Bu olguyu mekanik aşırı konsolidasyon işlemiyle karıştırmamak için “kritik basınc” (Bjerrum, 1967) ve “görünür önkonsolidasyon basıncı” (Leonard ve Ramiah, 1959) gibi tanımlar kullanılmıştır.

Yüksek bakir sıkışabilirliğe sahip, özellikle C_α değerinin yüksek olduğu normal yüklenmiş killerin, σ'_{v0} gerilmesi altında uzun süre kripe maruz kalmaları durumunda boşluk oranları azalmaktadır (Şekil 3.9a). Krip sonrasında, yalnızca birincil konsolidasyona izin verilen küçük Yük Artırma Oranları (YAO) ile tekrar yüklenmeleri durumunda, görünür bir önkonsolidasyon basıncının (σ'_{vp}) oluştuğu bilinmektedir. σ'_{v0} gerilmesi altındaki krip süresinin uzaması ile bu görünür önkonsolidasyon basıncı değerinin artacağı anlaşılmaktadır ($\sigma'_{v0} < \sigma'_{vp(1)} < \sigma'_{vp(2)}$).



Şekil 3.9: e - $\log \sigma'_v$ ilişkisi (a) krip etkisi (b) deformasyon hızının etkisi (Ladd, 1985)

Benzer şekilde, daha büyük deformasyon hızlarının kısa süre kripi izin verdiği için Şekil 3.9b'deki gibi daha büyük önkonsolidasyon basıncı ürettiği bilinmektedir (Bjerrum,1967; Yin ve Graham, 1989). Birçok çalışmada σ_{vp}' bir referans basıncı olarak kullanılmasına rağmen, σ_p' tekil bir zemin parametresi değildir. Çünkü Şekil 3.9a'dan da görüleceği üzere ikincil sıkışma oranı üzerinde tüm doğal zemin çökellerinin maruz kaldığı uzun süreli yüklemenin etkisi, önyükleme etkisiyle benzeşmektedir. Önceki gerilme artışı esnasında gerçekleşen ikincil sıkışmanın süresinin uzamasıyla, numunede gelişen dayanım ve sıkışma direncinin artacağı çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur (Leonard ve Ramiah, 1959; Bjerrum, 1967; Allam ve Sridharan, 1979; vb). İkincil sıkışma esnasında doğan dane-kasyon-dane zincirleri ve Van der Waals bağlarının kohezyon bileşeninde yapısal değişimler oluşurken sıkışma direncinin de artacağı düşünülmektedir. Böylece sabit gerilme altında bekleme süresinin uzatılması ile ek gerilmelere karşı daha yüksek dayanım sergileyen numune, herhangi bir zaman aralığında daha az ani ve birincil sıkışmalar gösterecektir. Yapılan laboratuvar araştırmalarından, σ_p' değerinin tekil olmadığı, yaşlanmaya ve deformasyon hızlarına da bağlı olduğu bilinmektedir (Crawford, 1986). Ladd (1985) Aşırı Konsolidasyon Oranı AKO=1 olan killer için ikincil sıkışmaya bağlı olarak oluşan görünür önkonsolidasyon basıncı σ_p' değerinin

$$\log(\sigma'_{vp} / \sigma'_{v0}) = \frac{C_\alpha}{C_c} \log(t/t_p) \quad (3.10)$$

bağıntısı ile tahmin edilebileceğini ileri sürmüştür.

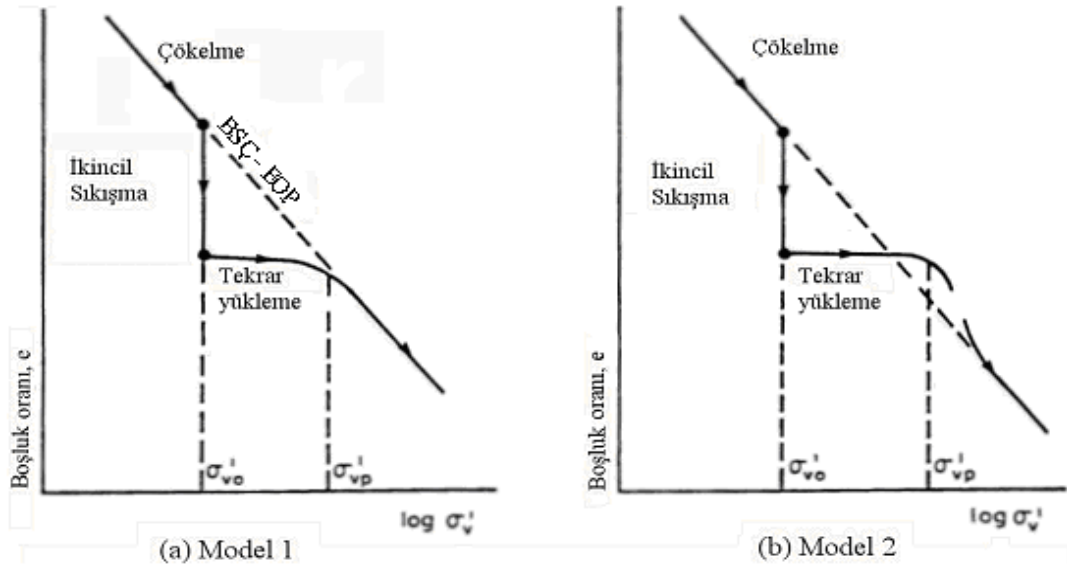
Murakami (1988), görünür önkonsolidasyona kripi deformasyonlarının neden olduğunu, görünür önkonsolidasyon basıncının sadece efektif gerilmenin önkonsolidasyon basıncından büyük olması durumunda oluştuğunu ($\sigma' > \sigma_{vp}'$) önermişlerdir. Ancak boşaltma tekrar yükleme aralığında hiç sünmenin olmadığı kabulünün birçok laboratuvar gözlemleriyle çeliştiği görülmektedir. Nitekim Bjerrum (1967) ve Yin ve Graham (1989) ve diğerleri önkonsolidasyon basıncı değerinden daha düşük gerilmelerde de sünme deformasyonlarının var olduğunu, ancak bu deformasyonların $\sigma' > \sigma_{vp}'$ olduğu normal konsolidasyon aralığında benzer zamanlarda ölçülenlerden daha düşük kaldığını göstermişlerdir.

Mesri ve Choi (1979) ikincil sıkışmadan kaynaklanan önkonsolidasyon basıncı için buldukları ilişkiyi Mesri ve Choi (1984) ile sadeleştirilmiş ve Mesri ve Castro (1987) ve Mesri (1987) tarafından yapılan ölçümlerle karşılaştırılmışlardır. Sonuç olarak, Mesri ve meslektaşları tekrar sıkışma kısmını da hesaba alacak şekilde, ikinci sıkışmalardan kaynaklanan yaşlanma sonucunda oluşan aşırı konsolidasyon oranını

$$OCR = \frac{\sigma'_{vp}}{\sigma'_{v0}} = \left(\frac{t}{t_p} \right)^{(C_\alpha/C_c)/(1-C_r/C_c)} \quad (3.11)$$

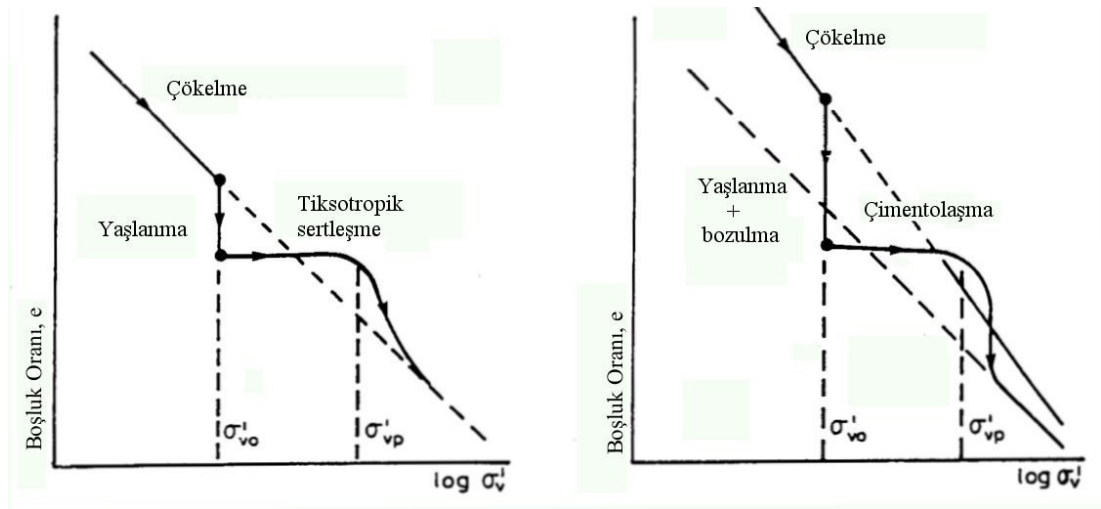
bağıntısı ile hesaplamayı önermişlerdir. Bağıntıda, σ'_{vp} ikincil sıkışmadan kaynaklanan önkonsolidasyon basıncı, σ'_{v0} ikincil sıkışmanın olduğu konsolidasyon basıncı, t birincil konsolidasyonun başlamasından itibaren zeminin yaşını, t_p birincil konsolidasyonun tamamlanması için gereken süreyi, C_c , C_r ve C_α sırasıyla sıkışma, tekrar sıkışma indisleri ile ikincil sıkışma katsayısını göstermektedir.

İkincil sıkışma sonrasında tekrar yüklenecek olan bir zemin Bjerrum (1967) nin tarif ettiği Şekil 3.10a'da gösterilen Model 1'deki gibi davranacak ve Bakir Sıkışma Çizgisi (BSC) ni kesmeden bu eğri ile birleşecektir. Eğer, ikincil sıkışmadan sonraki tekrar sıkışma eğrisi Şekil 3.10b'de gösterilen Model 2'deki gibi BSC'siyle birleşmeden onu geçiyorsa yaşlanma etkisinin varlığından söz etmek gerekecektir.



Şekil 3.10: Yaşlanma etkisinde e - $\log \sigma'_v$ ilişkisi

Yaşlanma zeminlerde uzun bir zaman diliminde görülmektedir. Klasik kaynaklarda yaşlanma (Lambe ve Whitman, 1969; Mitchell, 1993) sabit bir dış yük altında ikincil sıkışmalar sonucunda zeminin çeşitli mekanik özelliklerindeki değişim için tanımlanmaktadır. İkincil sıkışmalar esnasında zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişim için “yaşlanma sertleşmesi”, “tikotropik sertleşme” Şekil 3.11, “gecikmiş sıkışma” ve “yapılanma” gibi alternatif terimler kullanılmaktadır (Leonard ve Altschaeffl, 1964; Schmertman, 1964; 1991; Bjerrum, 1972; 1973; Ellstein, 1991; Perret vd., 1995; Leroueil vd., 1996). Geleneksel olarak killerle ilişkilendirilen yaşlanmanın kumlarda, kumtaşlarında ve killi kumlarda da olduğu bilinmektedir (De Waal 1986; Mesri ve diğ. 1990; Schmertmann, 1991). Yaşlanma evresine bir de boşluk suyunun tuzluluğunun azalması veya zemin içyapısının aşınmasından kaynaklanan bozulmalar da eklenirse, çimentolaşma denilen BSC’ni aşan sıkışma eğrisi her ne kadar bir dayanım artışını ifade etse de sonraki yüklemelere karşı daha duraysız bir dane dizilimine işaret etmektedir (Şekil 3.11).

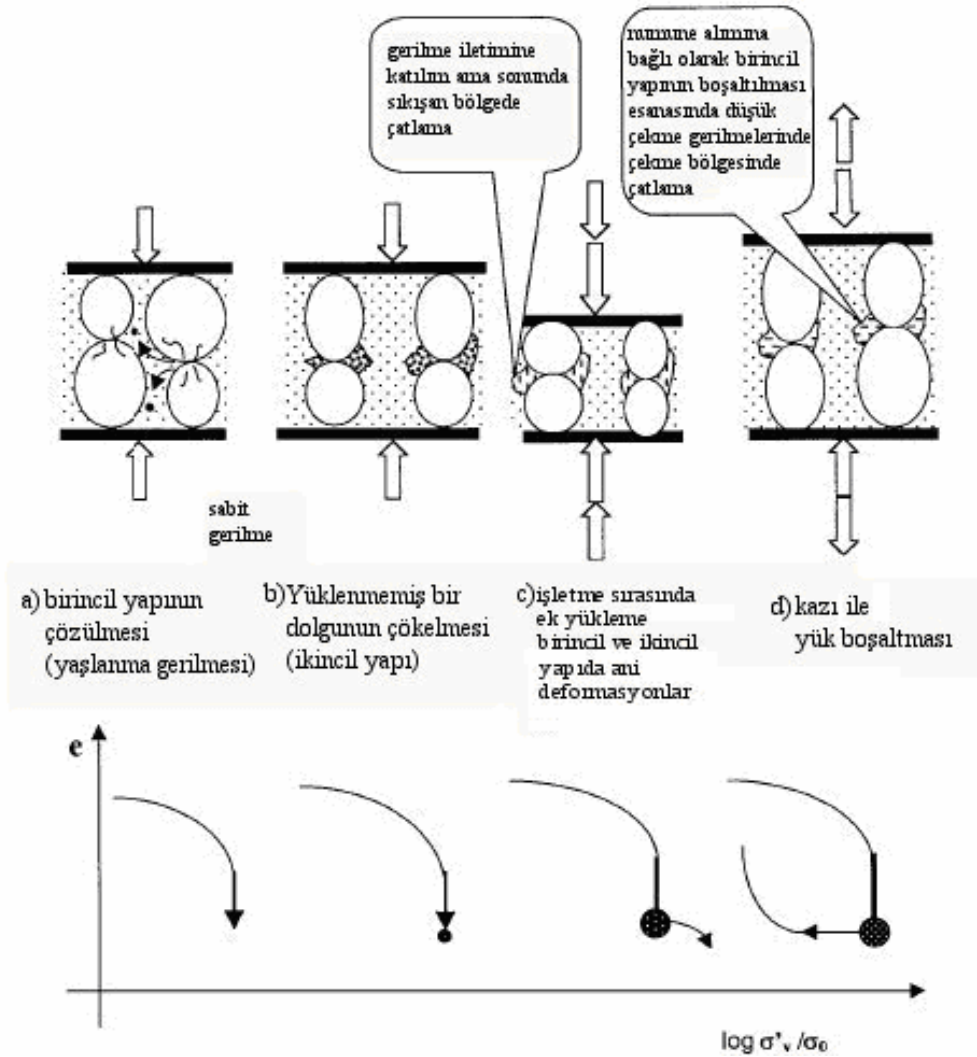


Şekil 3.11: Yaşlanma ve yıkanma etkisinde e -log σ'_v ilişkisi

Yaşlanmaya bağlı olarak malzeme dayanımının artmasına iştirak eden bileşenlerin olası etkileşimini daha iyi anlamak amacıyla Denisov ve Reltov'in (1961) boşluk suyunda bölgesel bozulma ve çökme hipotezlerini geliştiren Mitchell ve Solymar (1984), deneylerinde ikincil bir yapı ile yaşlanan çökellerin bir modelini incelemişlerdir. Benzer şekilde, yaşlanmayla ilgili birçok yeni senaryolar da

önerilmiştir. Lessard ve Mitchell (1985) yapısal dizilimin oluşumu ile “daha iyi birleşim” veya “soğuk kaynak” adını verdikleri temasların, pratik olarak bir ikincil, paralel yapıyı doğurduğunu ileri sürmüşlerdir.

Hueckel ve diğ. (2001) normal konsolide zeminlerin sıkışabilirliklerini belirlerken ikincil sıkışma veya yaşlanma sırasında, dayanımda ve önkonsolidasyon basıncında oluşan böyle gözle görünür bir artışın ihmal edilemeyeceğini belirtmiştir. Hueckel ve diğ. (2001) kumlu kil ve killi kumlar üzerinde yaptıkları deneylerde yaşlanma sonucunda zemindeki ana değişkenleri ve değişim miktarlarını bulmayı amaçlamışlardır. Gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerinde yaşlanmanın etkisinin dört ana karakterini belirleyerek yaşlanmayı iki bileşenli bir modelle açıklamaya çalışmışlardır. Geliştirdikleri modelde başlangıçta birincil yapı sadece danelerden oluşmaktadır (Şekil 3.12a).



Şekil 3.12: Yaşlanma etkisinde e - $\log \sigma'_v$ ilişkisi (Hueckel vd., 2001)

Hueckel ve diğ. (1999) sabit bir arazi gerilmesinde sıkışma deformasyonlarının, kimyasal yumuşamaya bağlı olarak temas noktalarında gerilen mineralin bozulması sırasında birincil yapının geri dönülmez deformasyon sınırını aşılabilirdiğini belirtmiştir. Daha sonrasında silikanın veya diğer minerallerin bozulma işlemi sırasında Şekil 3.12b'deki gibi ikincil bir yapının oluştuğu, bu sırada oluşan çökeltmenin de sadece temas noktası yakınındaki yerle sınırlı kalmayabileceği vurgulanmıştır. Yükleme artırılana kadar bozulma ve çökeltme sırasıyla oluşursa, ikincil malzeme yapısı gerilmeksiz ve deformasyonsuz kalacaktır. Yükleme artırıldığında ise birincil ve ikincil yapılarda gelen ek gerilmeler altında Şekil 3.12c'deki gibi çökeltde ani oturmaların gözlenmesi mümkündür. Çökeltten numune alınması durumunda ise, yük boşaltması işlemi sistemde bir ferahlamaya neden olacaktır (Şekil 3.12d). Bunun sonucu, ikincil yapıda çekme gerilmeleri ve sıkıştırılmış birincil yapıda da bir boşaltma oluşacaktır. İkincil yapıda çok düşük çekme dayanımı olması ve çatlama noktasının dışında gevrek bir malzeme gibi davranması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında gerek örselenmemiş ve örselenmiş, gerekse Rowe Hücresinde tekrar hazırlanmış numunelerin uzun süreli konsolidasyon deneyleri sırasında krip sonrasındaki sıkışma davranışı da incelenmiştir. Bu amaçla tekrar yüklenen zemin numunelerinin klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen Birincil Konsolidasyon Sonu (EOP) ile birleşim şekline göre zeminin herhangi bir çimentolanma, yaşlanma veya yıkanma özelliği sergileyip sergilemediği araştırılmıştır. Buna ilave olarak zemin numunelerinin ikincil sıkışma davranışına etkisi olduğu düşünülen diğer faktörler mercek altına alınmıştır.

3.4 Organik İçerik ve İkincil Sıkışma

Ladd (1972) tarafından düzenlenen veriler kilin hassaslığına ve organik içeriğine de bağlı olarak C_c sıkışma indisi ile C_α arasında yakın bir ilişki olduğunu göstermiştir. Mesri ve Godlewski (1977) birçok doğal zemin üzerinde yaptıkları kademeli yüklemeli ödometre ve krip deney sonuçlarını değerlendirerek, sabit C_α/C_c oranının turba, organik silt ve oldukça hassas killerde de geçerli olduğunu savunmuşlardır. Mesri ve Vardhanabhuti (2005) C_α/C_c oranının organik plastik killer için

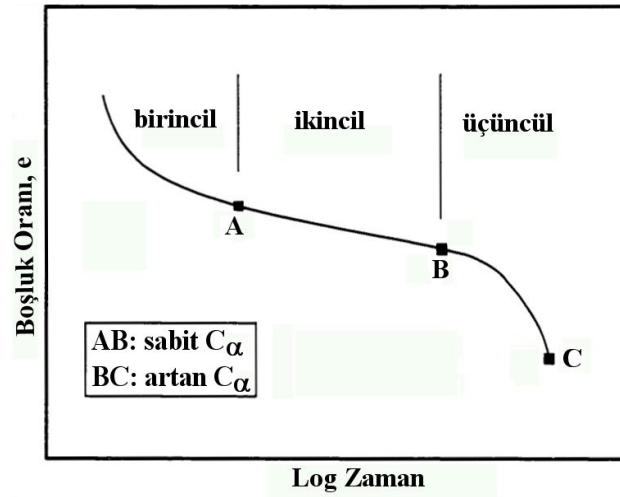
$$C_\alpha / C_c = 0.05 \pm 0.01 \quad (3.12)$$

lifli ve şekilsiz turbalar için ise

$$C_{\alpha}/C_c = 0.06 \pm 0.01 \quad (3.13)$$

değerini alacağını belirtmiştir.

Sabit C_{α}/C_c ilişkisi zamana bağlı sıkışma (ikincil sıkışma indeksi, C_{α}) ve gerilmenin neden olduğu sıkışma (birincil konsolidasyon için sıkışma indeksi, C_c) arasında bir bağlantı sağlamaktadır. Mesri (1985) zeminler için C_{α}/C_c kavramını kullanarak ikincil oturma tahmini için bir metot geliştirmiştir. Turbalar için Fox ve diğ. (1992) sabit bir C_{α}/C_c kavramını incelemiştir. Ancak Middleton turbası üzerinde yapılan deneyler, C_{α}/C_c için elde edilen değerlerin daha önceden verilenden daha büyük bir aralıkta kaldığını göstermektedir. Turbalar için C_{α}/C_c değeri, turba numunelerdeki değişkenlik ve turbalarda üçüncül sıkışmaların varlığına bağlı olarak büyük bir aralıkta bulunmaktadır. Üçüncül sıkışmalar esnasında artan C_{α} değeriyle C_{α}/C_c oranı çok büyümekte ve bir konsolidasyon deneyi sırasında ne kadar üçüncül sıkışma gerçekleştiğine bağlı olarak büyük bir aralıkta değer almaktadır. Turba zeminlerde yük artırma oranı (YAO) C_{α}/C_c ilişkinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Middleton turbası için küçük yük artışları üçüncül etkilerin çok artmasına neden olmakta bunun sonucunda da C_{α} değeri büyümektedir. Üçüncül sıkışmaların killerde olmayışı inorganik killer için C_{α}/C_c kavramının başarısını açıklayabilir. Ancak, son yıllarda yapılan araştırmalarda, Şekil 3.13'deki gibi turba zeminlerin yanı sıra bazı organik içerikli yumuşak kil zeminlerde de aynı efektif gerilme altında ikincil sıkışma parametrelerinin zamanla arttığı, şekil değiştirme hızının zamanla azaldığı ve hatta üçüncül sıkışma olarak nitelendirilen davranışın gözlemlendiği belirtilmiştir (Edil ve Dhowian, 1979; denHaan ve Edil, 1994b; denHaan, 1994c, denHaan, 1994d, denHaan, 1995; Fox ve Edil, 1994).

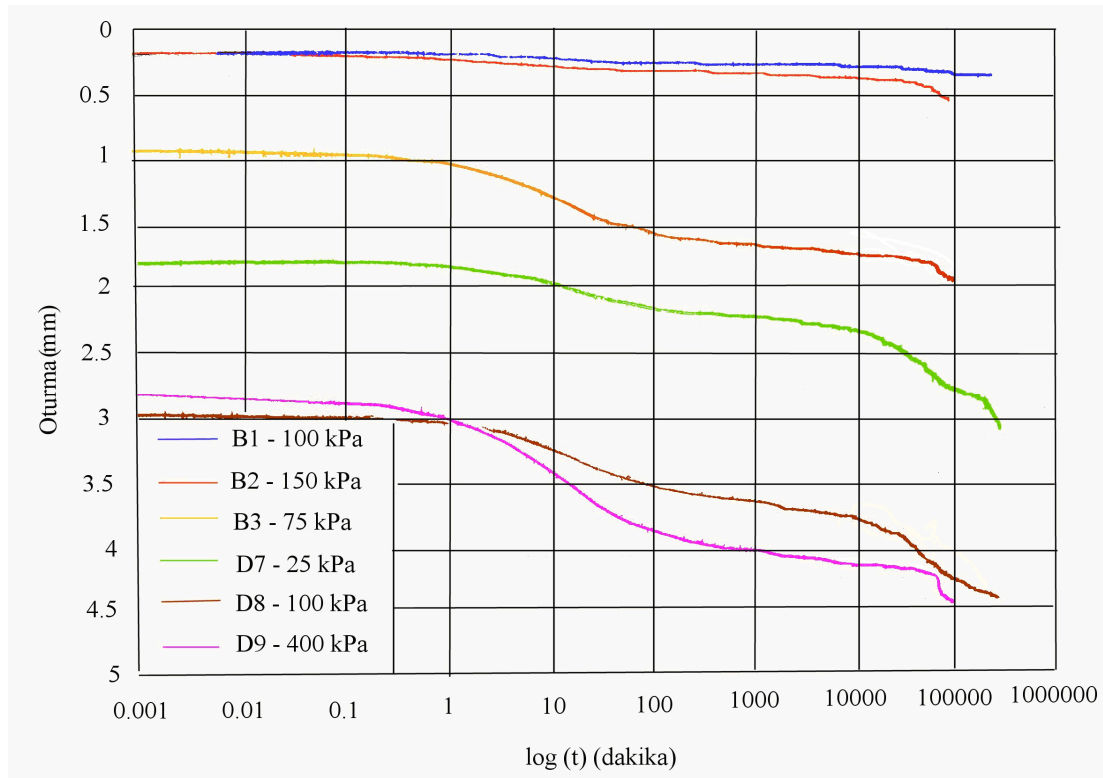


Şekil 3.13: Turba zeminlerde tipik sıkışma davranışı (Edil ve Dhowian, 1979)

Mesri ve diğerlerinin (1997) Middleton turbası üzerinde yaptıkları birçok deney sonucundan ikincil sıkışmaların ilk logaritma zaman çevriminden elde ettikleri $C_\alpha / C_c = 0.052$ değerini sorgulayan Fox ve diğ. (1999), boşluk suyu basıncının ölçülmediği deneylerde birincil konsolidasyonun tamamlanma süresinin yanlış belirlenebileceğine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca, Fox ve diğ. (1999) eleştiri yazısında, biyolojik çözünme dolayısıyla C_α değerinin etkilendiğini düşünmektedirler. Bu etkiyi ortaya koymak amacıyla, deney öncesinde numune içerisindeki bakteriyel faaliyetleri ve mantar oluşumlarını öldürmek için, Skipper ve diğ. (1996) ve Trevors (1996) tarafından önerilen 9 saat süreyi aşkın bir süre için 2 Mrad gama radyasyonuna tabi tuttıkları Middleton turba numunesiyle çalışmışlardır. Deney sırasında hava ile temaslarını da kestikleri numuneler üzerinde 148 günlük uzun süreli konsolidasyon deneyleri yaparak C_α / C_c ilişkisini aramışlardır. Sonuç olarak; radyasyona tabi tutulan numunenin uzun süreli deneylerinde ikincil sıkışma hızının azalabileceğini ve esasen ikincil sıkışmaların logaritma zamanla doğrusal değiştiğini ve C_α / C_c ilişkisinin geçerli olduğunu göstermişlerdir. Böylece radyasyona tabi tuttıkları ve tutmadıkları numuneleri karşılaştırarak laboratuvarında uzun süreli ikincil sıkışma üzerinde numune içerisindeki organik içeriğin biyolojik çözünmesinin önemli etkisi olabileceğini göstermişlerdir. Ancak radyasyona tabi tutmanın numune üzerindeki diğer etkilerini ihmal ettikleri çalışmalarında, bu konuda ileriki araştırmalara gereksinim olduğuna dikkat çekmişlerdir. Mühendislik zaman ölçeğinde biyolojik çözünmenin ihmal edilebilir olduğunu düşünen Fox ve diğ. (1999), alt tabakalardaki çoğu zaman doygun olan bu tip zeminler için elde ettikleri bu bulguların, turba ve killer üzerinde

laboratuvardaki uzun süreli krip deney sonuçlarının geçerliliğini sorgular nitelikte olabileceğine dikkat çekmişlerdir.

Nitekim denizel orijinli Samsun-Çarşamba mavi kili üzerinde gerçekleştirilen krip deneyleri de ikincil sıkışmaların zamanla sabit kalmadığı ve oluşan üçüncül sıkışmaların organik zemin sınıfına girmeyen bazı zeminlerde de oluşabileceğini göstermiştir (Yılmaz, 2000). Yüksek plastisiteli Samsun-Çarşamba mavi kilinde, kil minerallerinin çoğunluğunu Ca-Montmorillonit cinsi mineraller ve bir miktar kaolin oluşturmaktadır. Sodyum esaslı montmorillonit minerallerinden biri olan Meksika kiline göre Samsun-Çarşamba mavi kilinin doğal su muhtevası, likit limit değeri ve ikincil sıkışma miktarı daha düşüktür. Samsun kilinin ikincil sıkışma davranışı illit esaslı Norveç Plastik kili ve Leda kiliyle benzerlik göstermektedir (Jonas, 1964; Horn ve Lambe, 1964; Crawford, 1965; Bjerrum, 1967). Yılmaz (2000) 70 günden 6,5 aya kadar değişen sürelerde gerçekleştirdiği krip deneylerini, 25 kPa, 75 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 400 kPa gerilme etkisinde yapılmıştır. Şekil 3.14'den de görüleceği üzere, birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından ikincil sıkışmaları bir logaritma zaman çevriminden daha fazla süre ile sabit kalmakta, daha sonra artmakta ve üçüncül sıkışmalar oluşmaktadır.



Şekil 3.14: Samsun-Çarşamba mavi kili krip deneyi oturma-logaritma zaman ilişkisi (Yılmaz, 2000)

Sıkışma eğrisinin sabit efektif gerilme altında ikincil sıkışmalarının zamanla doğrusal değişen birinci kısmının eğiminin artarak daha dik eğimli ikinci bir kısım oluşturduğu görülmektedir. Bu kısımda oluşan sıkışmalar “üçüncül sıkışmalar” olarak ilk kez Wisconsin turbası ve Portage turbası üzerinde yaptıkları çalışmalarla Edil ve Dhowian (1979); Dhowian ve Edil (1980) tarafından adlandırılmıştır (Şekil 3.15). Üçüncül sıkışmanın başladığı t_t zamanı, ikincil sıkışmalar süresince e - $\log t$ grafiğinde sıkışmaların sabit bir eğimle devam ettiği doğrusal kısım ile eğimin artış göstermesinden sonraki kısımdaki doğrusal kesimden çizilecek doğruların kesiştirilmesiyle bulunmaktadır (Edil ve Dhowian, 1979).

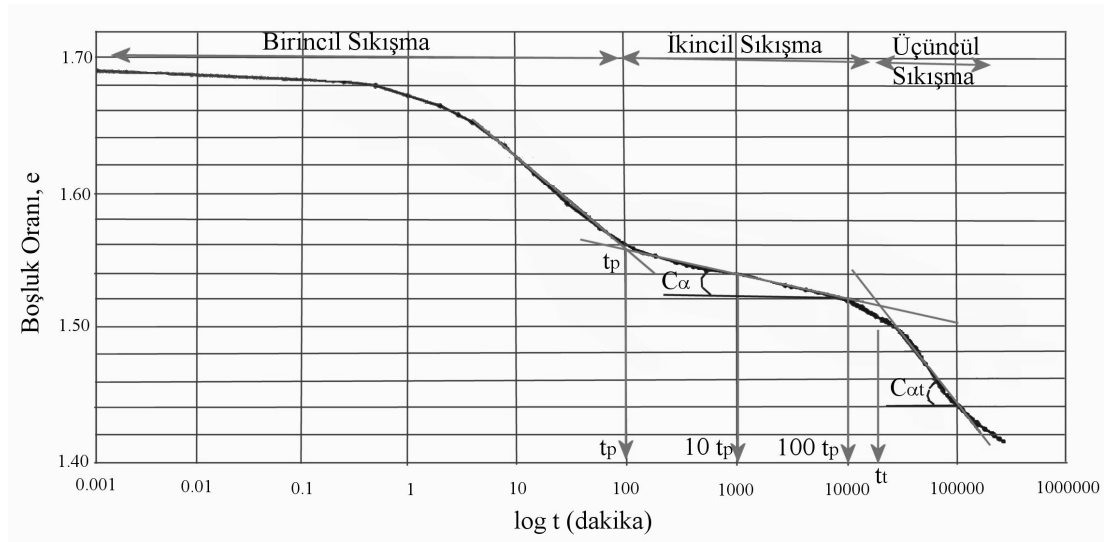
Üçüncül sıkışma miktarlarının hesabında kullanılmak üzere üçüncül sıkışma kısmında eğrinin eğimi üçüncül sıkışma katsayısı

$$C_{\alpha} = \Delta e / \Delta \log t \quad (3.14)$$

olarak kabul edilmiştir. İkincil sıkışma oranı bağıntısındakine benzer bir ifadeyle üçüncül sıkışma oranı da

$$C_{\alpha} = C_{\alpha} / (1 + e_0) \quad (3.15)$$

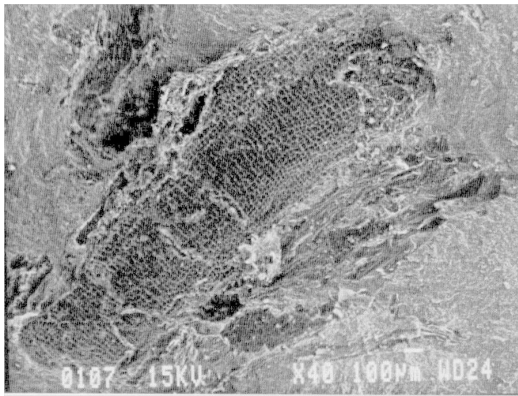
şeklinde tanımlanmıştır.



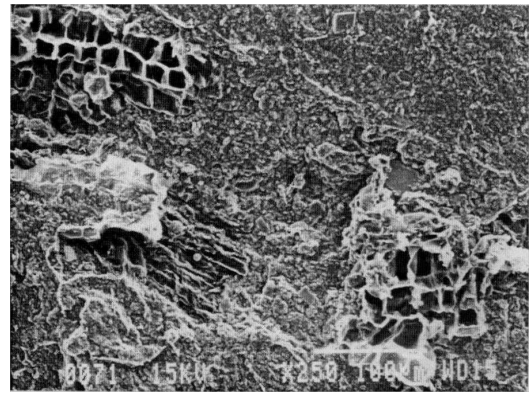
Şekil 3.15: Samsun-Çarşamba mavi kili B1 nolu deneyde 100 kPa gerilmesinde ikincil ve üçüncül sıkışma katsayılarının bulunması

Çevikbilen (2003) tarafından organik içeriği yakma kaybı deneyinden %8,25 olarak belirlenen Samsun-Çarşamba mavi kilinin yosun içeriği üzerinde konsolidasyonun

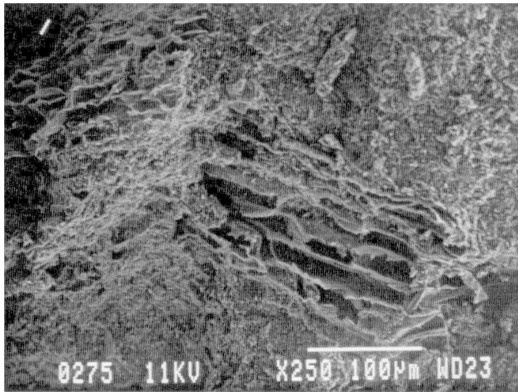
çeşitli evrelerinde alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen elektron mikroskop fotoğrafları Şekil 3.16'daki gibidir (Yılmaz, 2000). 100 kPa konsolidasyon basıncı altında bir boyutlu olarak sıkıştırılan zemin numunesinin içerisindeki dikdörtgen olarak gözüken petek doku yosun parçalarının hücre çeperlerini göstermektedir. Hücre çeperlerinde deformasyonlar birincil konsolidasyon sonuna kadar pek gözükmemeyle birlikte, ikincil sıkışmalar esnasında hücre çeperinde deformasyonlar bariz bir hal alarak, üçüncül sıkışmalar esnasında ise hücre çeperlerinin dağılmaya başladığı görülmektedir.



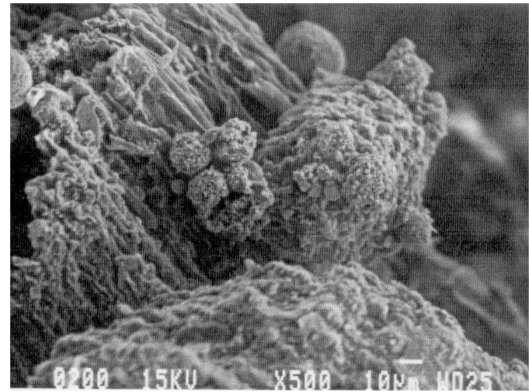
a) konsolidasyon öncesi



b) birincil konsolidasyon sonrası



c) ikincil sıkışmalar sonrası



d) üçüncül sıkışmalar sırasında

Şekil 3.16: 100 kPa gerilme altında organik içeriğin sıkışma adımları (Yılmaz, 2000)

Bu çalışma kapsamında organik içeriğin ortamdaki uzaklaştırılması amacıyla Samsun-Çarşamba mavi kil numuneleri iki farklı yöntemle yakılmıştır. Yakılma sonrasında numuneler tekrar Rowe hücresinde hazırlanarak konsolidasyon deneylerinde kullanılacak deney numuneleri elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde

klasik konsolidasyon deneyi, uzun süreli konsolidasyon deneyi ve sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilerek birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışındaki değişimler değerlendirilmiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1 Giriş

Samsun-Çarşamba mavi kilinin birincil konsolidasyon, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışına etki eden parametrelerin araştırıldığı bu tez çalışması kapsamında bu bölümde bölgenin genel jeolojisi tanıtılarak, İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneylerde kullanılan deney aletleri ile deney numunelerin hazırlanma yöntemleri anlatılmaktadır.

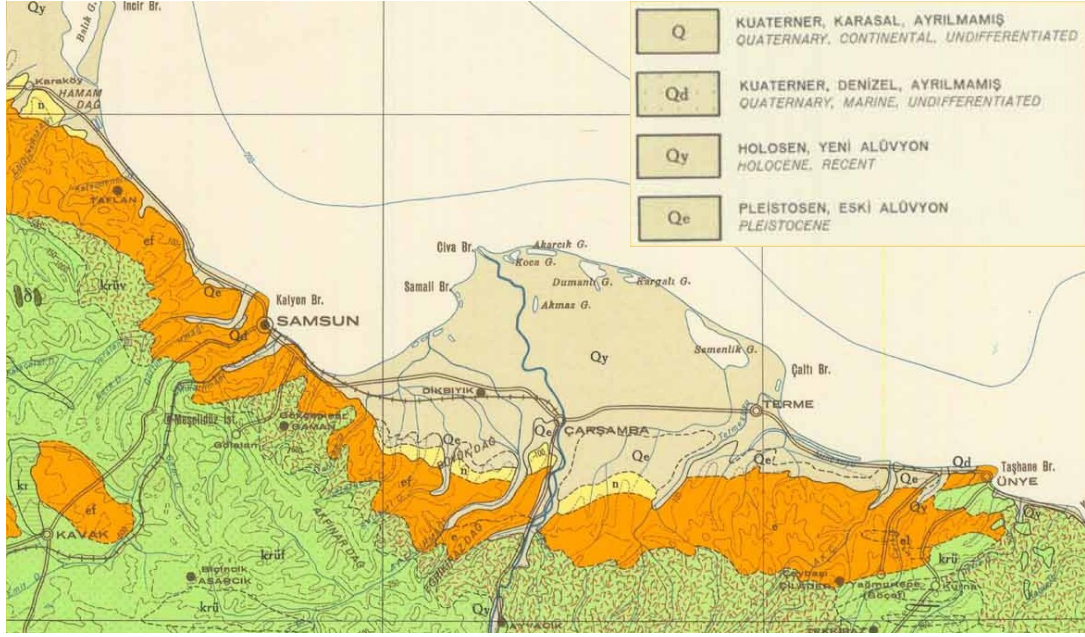
Bu kapsamda ilk olarak Samsun Çarşamba Havaalanı inşaatının yapıldığı bölgede yapılan sondaj ve açılan muayene kuyularından alınan malzeme özellikleri verilerek bölgenin genel jeolojisi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra, birincil konsolidasyon ile ikincil ve üçüncül sıkışmaya etki eden parametrelerin araştırılması amacıyla içeriği değiştirilen numunelerin hazırlanma yöntemleri konu edilmiştir. Bu kapsamda, numune içerisindeki organik içeriği yakmak için kullanılan ıslak ve kuru yakma yöntemleri üzerinde durularak yakma sonrası zemin numunelerindeki değişim, endeks özellikleri cinsinden ifade edilmektedir. Buna ek olarak numune içerisindeki kil-silt yüzdesinin değiştirilmesi amacıyla kullanılan ıslak analiz yöntemi ve bu yolla elde edilen numunelerdeki değişim yine zemin endeks özellikleri ile gösterilmektedir. Çeşitli yöntemlerle elde edilen bütün bu numunelerin Rowe konsolidasyon hücresinde tekrar hazırlanması bir örnekle anlatılmıştır.

Bu bölümde son olarak, tekrar hazırlanmış numunelerin birincil konsolidasyon, ikincil ve üçüncül sıkışma özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan klasik konsolidasyon deneyi, sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi ve farklı numune boyutları için değiştirilmiş klasik konsolidasyon deneyi düzeneklerinin tanıtılmasına yer verilmiştir.

4.2 Malzeme

Bu tez çalışması kapsamında, Samsun Çarşamba Havaalanı pistinin KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki kesiminde yapılan sondajlardan alınan örselenmemiş

numuneler ile araştırma çukurlarından alınan blok numuneleri kullanılmıştır. Numunelerin alındığı bölgenin genel jeolojisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. 1996’da Samsun-Çarşamba Havaalanı ile ilgili hazırlanan geoteknik değerlendirme raporunda Samsun-Çarşamba Havaalanının inşa edileceği bölgenin Kuvarterner alüvyonları ile temsil edildiği, Yeşilırmak, Terme Çayı ve Abdal Deresi ile yan derelerin taşıdığı malzemenin deniz içinde Neojen çukurluklarda birikmesi sonucunda Çarşamba Delta düzlüğünün oluştuğu belirtilmiştir (Sağlam, 1996).



Şekil 4.1: Samsun Çarşamba bölgesinin jeolojik haritası

Bölgeden alınan numuneler üzerinde yapılan endeks deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. (Yılmaz, 2000; Çevikbilen, 1999)

Tablo 4.1: Deneylerde kullanılan zeminin endeks özellikleri

Sondaj No	Derinlik (m)	w _n (%)	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	I _c (%)	I _L (%)	γ _s (kN/m ³)	Zemin Sınıfı
S1	9,50	66	75	28	47	19	81	27,6	CH
S1	7,50	64	72	29	43	19	81,4	28,0	CH
S3	4,50	65	67	29	38	6	94	27,2	CH

Yılmaz (2000) tez çalışmasında, söz konusu numuneler üzerinde yaptığı X-Ray, DTA ve Infrared gibi bir dizi kimyasal içerik ve element analizleri sonuçlarına dayanarak mavi kil zemindeki kil boyutlu daneciklerin, çoğunlukla montmorillonit minerali içerdiğini belirlenmiştir. Yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle bu mineraller Ca-montmorillonit olarak tanımlanmıştır.

4.3 Deney Numunelerinin Hazırlanma Yöntemleri

Tez çalışması kapsamında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışına etkisi olduğu düşünülen bazı parametreleri araştırmak amacıyla farklı işlemlerden geçirilmiş numuneler kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle organik içeriğin sıkışma davranışına etkisini araştırmak maksadıyla ıslak ve kuru yakma teknikleri ile organik içeriği yok edilmeye çalışılan numunelerin hazırlanma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Daha sonra, kil boyutundaki danelerin sıkışma davranışına etkisini araştırmak amacıyla dane çapı dağılımı değiştirilen numunelerden bahsedilmektedir. Son olarak, orijinal numune ile çeşitli işlemlerle farklılaştırılan numunelerin karşılaştırılabilmesi amacıyla tüm numunelerin ROWE hücresi kullanılarak tekrar hazırlanmış numune haline getirilme yöntemine yer verilmiştir.

4.3.1 Organik İçeriği Yakılmış Numuneler

Deneylerde kullanılan Samsun-Çarşamba mavi kili numunelerinin elek takımından elenmesi esnasında #200 elek üzerinde sadece çoğunluğu koyu kahverengi yosun parçacıklarından oluşan organik malzemeler kalmıştır. Numunelerdeki bu organik madde miktarı Tablo 4.2’de gösterildiği gibi ağırlıkça %2’yi geçmemektedir. Ancak, #200 elek altına geçen organik malzemeler olduğu da gözlemlenmiştir. Bu bakımdan, numunelerinin etüvde kurutularak yapılan likit limit deneyleri ile havada kurutularak yapılan likit limit deneyleri arasındaki fark kontrol edilmiştir. Söz konusu fark %25’ten az olması sebebiyle zemin, organik zemin sınıfına girmemektedir.

Kullanılan numunelerde kuru yakma kaybına da bakılmış ve yakma kaybının %8,25 olduğu belirlenmiştir. Ancak, Bölüm 3’te de değinildiği üzere Samsun-Çarşamba mavi kili numuneleri üzerinde Yılmaz (2000) tarafından yapılan çalışmada konsolidasyonun çeşitli evrelerinde alınan numuneler üzerinde yapılan SEM analizleri sonucunda numune içerisindeki organik malzemelerin hücre çatısının

çöküşüne dikkat çekilerek bunun numunenin sıkışma davranışına etkisi olabileceği vurgulanmıştır. Bu tez çalışmasında da, organik içeriğin etkisini açıkça ortaya koyabilmek amacıyla Samsun-Çarşamba mavi kili numuneleri organik malzeme tayini için en çok tercih edilen yöntemlerden ıslak yakma ve kuru yakma yöntemleri ile organik içeriğinden arındırılmaya çalışılmıştır. Bu bölümde bu amaçla numuneye uygulanan işlemler konu edilmektedir.

Tablo 4.2: Mavi kil zemindeki organik malzeme yüzdesi

Numune No	Derinlik(m)	#200 elek üstü Organik Madde (%)	W _L etüvde kurutulmuş (%)	W _L havada kurutulmuş (%)
S1	9,50	1,24	75	82
S3	4,50	1,20	67	74
S1G3	7,50	1,03	72	76
M3	5,10	1,27	62	68
M1G3	5,50	1,46	63	72

Kuru Yakılmış Numuneler:

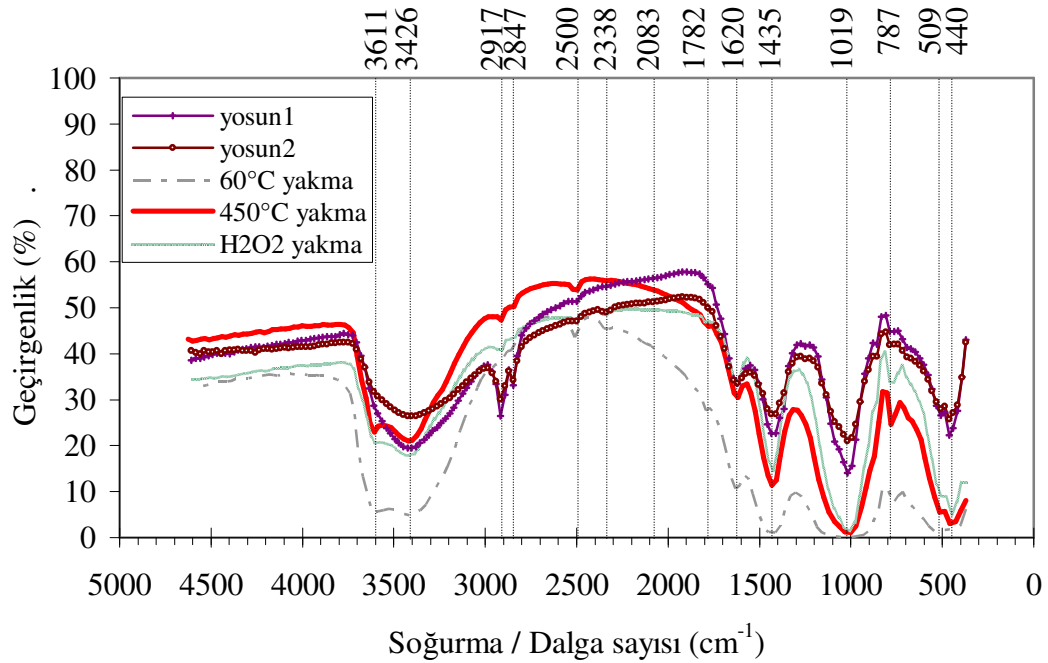
Kuru yakma, numuneyi yüksek derecedeki fırınlarda yakarak numuneden organik malzemeleri uzaklaştırma yöntemidir. 500–550°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kil içerisinde bağlı karbonların yanarak kilin kimyasının değişmeye başladığı bilinmektedir. Bu nedenle, yakma esnasında numunenin kimyasal içeriğinin zarar görmemesi amacıyla, sadece organik içeriği yakabilecek minimum sıcaklık derecesi bulunması önem arz etmektedir.

Bu amaçla, İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi Kimya Mühendisliği ve İTÜ Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü ile ortaklaşa bir çalışma yürütülmüştür. Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR) analizleri yapılan numunelerde, organik içeriğin yanma sıcaklığı belirlenmiştir.

Numunelerin Infrared analizleri için hazırlanması esnasında 60°C'de kurutulan numuneler toz haline getirilmiştir. Küçük porselen kaplara konulan numuneler 350°C, 400°C ve 450°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yakılmıştır. Yakma işlemleri numunelerin içine konulduğu fırınlarda 50°C/dakika hızında üç farklı

sıcaklık değerine çıkılarak, bu sıcaklıkta üç saat beklenerek gerçekleştirilmiştir. Etüvden çıkarılan numunelerin üzeri alüminyum folyo ile kapatılarak soğutulmuş ve kapalı küçük cam kaplara konulan numuneler nem almaması için desikatörde bekletilmiştir. Böylelikle 60°C, 350°C, 400°C ve 450°C de yakılmış numuneler elde edilmiştir.

İTÜ Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde bulunan FTIR cihazında yapılacak analizlerde kullanılmak üzere toz halindeki numuneler, 10 MPa gerilmede sıkıştırılarak ince bir tablet haline getirilmiştir. Hazırlanan bu tablet numunelerin üzerine çeşitli dalga boylarında ışık düşürülmesi sonucunda, malzemenin geçirgenliğine bağlı olarak element analizi yapılmıştır. Deney sonunda elde edilen dalga boylarına karşı geçirgenlik grafikleri incelendiğinde, 2917–2847 aralığında gözlenen numune içerisindeki organik malzeme (#200 elek üstü) pikinin, numunenin 450°C'de yakılmasının ardından çok azaldığı görülmüştür (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Çeşitli sıcaklıklarda yakılmış numunelerin FTIR analiz sonuçları

Böylece prosedür, 450°C'de yakılmasına karar verilen 4,5 kilo toz halindeki numunelerde, miktarın fazlalığı göz önüne alınarak, önceden belirlenen 3 saatlik etüvde bekletme işleminin süresinin artırılmasıyla 10 saat olarak uygulanmıştır. İşlem sırasında 4,5 kilogram toz numunenin 50 g kadarı porselen kap içerisinde

tutulmak suretiyle, yakma öncesi ve sonrası ağırlıkları hassas terazide ölçülen numunenin yakma kaybı (YK)

$$YK = \frac{(W_{ilk} - W_{son})}{W_{ilk} - W_{dara}} = \frac{(50.9291 - 49.1701)}{50.9291 - 29.6201} = \%8.25 \quad (4.1)$$

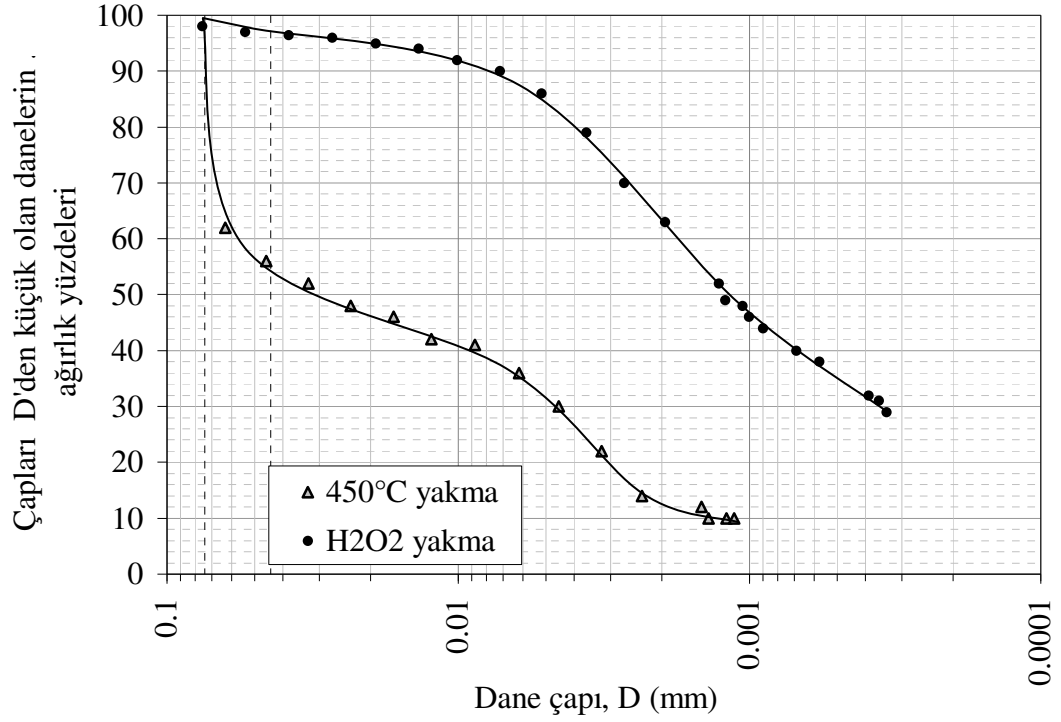
olarak belirlenmiştir.

Islak Yakılmış Numuneler :

Islak yakma, numunedeki organik malzemeyi kimyasal malzemelerle okside etmek anlamına gelmektedir. Kimyasal reaksiyonların istenildiği gibi gelişebilmesi için numune su ile yıkanarak içerisindeki tuzlardan arındırılmıştır. Bu işlem için bol su katılarak hazırlanan karışımda birkaç hafta zeminin çökmesi beklenmiştir. Üstten, berraklaşan su çekilerek, numunenin tuz konsantrasyonu azaltılmıştır. Karışıma yeniden su ilave edilerek aynı işlemler tekrarlanmak suretiyle numune birkaç kez yıkanmıştır.

Literatürde, organik malzemenin çözünmesi için önerilen birçok kimyasal solüsyon bulunmaktadır. Geoteknik mühendisliği açısından genellikle organik malzeme miktarının tayini için kullanılan %15’lik hidrojen peroksidin (H_2O_2) organik malzemeleri okside edilebildiği bilinmektedir (Mitchell, 1993). Bu tez çalışmasında da, piyasada hazırlatılan %15’lik hidrojen peroksit solüsyonu kullanılmıştır. Emaye kaplı bir kova içerisindeki 40# elekten elenmiş toz halindeki zemin numunesine solüsyon yavaşça eklenmiştir. Zemin numunesi içerisindeki organik içerik kimyasal solüsyonla reaksiyona girerek köpürmüştür. Oksidasyon işleminin ardından zemini kimyasal malzemelerden arındırmak amacıyla oluşan karışımın 5,7 olan pH değeri nötr olana kadar su ile yıkanması gerekmiştir. Bu işlem için karışıma su katılarak solüsyon seyreltilerek birkaç hafta zeminin çökmesi beklenmiştir. Üstten, berraklaşan su çekilerek, karışıma tekrardan su ilave edilip karıştırılmıştır. Zeminin kimyasallardan yeterince arınıp arınmadığını kontrol edilebilmek amacıyla, her su katılışında pH değerinin nötr duruma gelip gelmediğine bakılmıştır.

İki farklı yakma yöntemi ile elde edilen numunelerin granülometri eğrileri Şekil 4.3’te gösterilmiş, endeks özellikleri Tablo 4.3’de özetlenmiştir. Ayrıca H_2O_2 ile yakılarak elde edilen malzemenin FTIR analizi sonucunda 2917–2847 aralığında gözlenen organik malzeme pikindeki azalış Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Kuru ve ıslak yakılmış Samsun-Çarşamba mavi kil numunelerinin granülometri eğrileri

Tablo 4.3: Yakma sonrası numunelerin endeks özellikleri

Numune Adı	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	Dane Boyutu		γ_s (kN/m^3)	Zemin Cinsi
				Silt (%)	Kil (%)		
Islak Yakılmış	74	27,3	46,7	37	63	24,8	CH
Kuru Yakılmış	51	33,5	17,5	87	13	25,8	MH

4.3.2 Kil Yüzdeleri Değiştirilen Numuneler

Bu grup deneylerde kullanılmak üzere kalıplardan çıkartılan numuneler öncelikle yosun liflerinden oluşan organik içeriğinden ($YK=\%8,5$) arındırılmak amacıyla suda bekletilmiştir. Numuneler, yosun parçalarının parçalanmaması için elle ovalanıp karıştırılmak suretiyle süspansiyon haline getirilmiştir. Bu karışım sadece sarımsak koşuluyla 2–3 kez ASTM elek takımından geçirilerek #200’lu elek altı ince daneli malzeme elde edilmiştir. Yapılan hidrometre analizine göre bu şekilde hazırlanan Samsun-Çarşamba mavi kili numuneleri %50 kil + %50 silt boyutundaki danelerden oluşmaktadır.

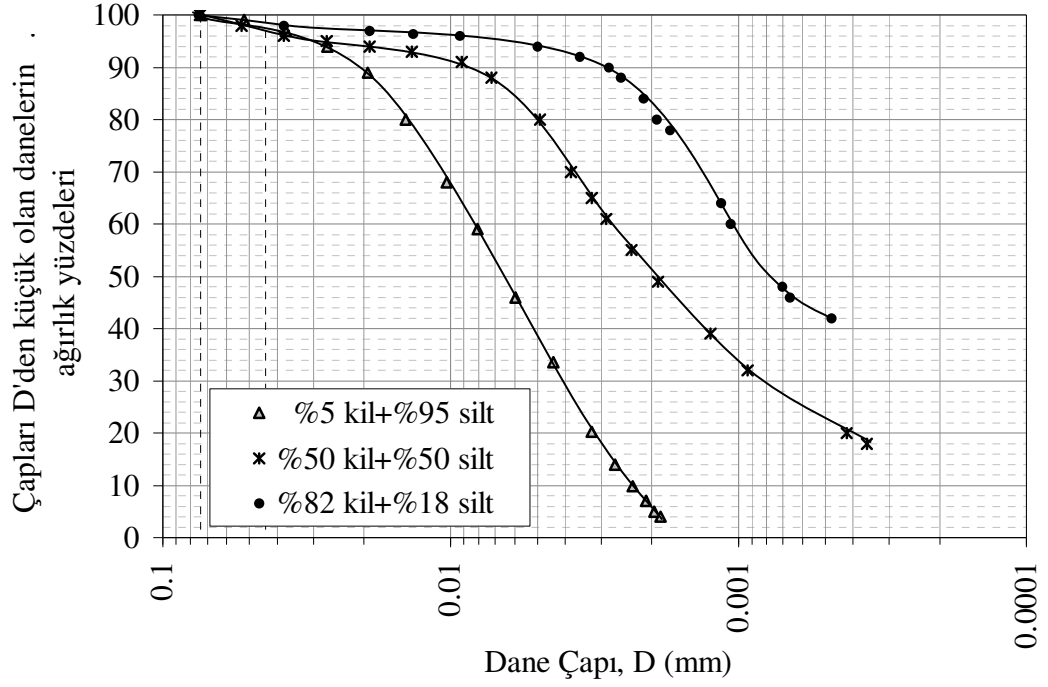
Silt ve kil boyutundaki malzeme oranlarını değiştirmek için hidrometre deneyinden yararlanılmıştır. Hazırlanan 5 kilo toz numune emaye kovalarda bir gün süreyle sodyum hegza meta fosfatlı suda bekletilmiştir. Hidrometre deneyindeki derişimi sağlayacak şekilde üzerine su ilave edilerek kovalarda hazırlanan süspansiyonlar karıştırılarak, çökelmeye bırakılmıştır. Deney esnasında her kova için ayrı ayrı anlık olarak çizilen granülometri eğrilerinden silt boyutundaki danelerin çökelediğinin gözleendiğii anda üstteki kil boyutundaki daneli süspansiyon hortumla ortamdan alınmıştır. Böylelikle silt ve kil boyutu birbirinden ayrılmaya çalışılmıştır.

Kimyasal içeriğinden arındırılmak üzere su ile karıştırılan süspansiyonlarda, çökelen malzemenin üstünde kalan kimyasal içerikli suyun ortamdan alınmasıyla numuneler yıkanmıştır. Ancak, bu işlemde çökelpmenin uzun sürmesinden dolayı Büyük Rowe hücresine konulan kimyasal içerikli süspansiyon alttan vakum uygulanması ile danelerin geçmesine izin vermemesi için uygun bir filtre kâğıdı kullanılarak süzölmüş, üstten tekrar su ilave edilmesi ile de durulanmıştır. Bu işlem çıkan suyun PH değeri nötr olana kadar birkaç kez tekrarlanmıştır.

Bu işlemin sonrasında dane boyutları arasında farklılık yaratıldığı düşünölen numunelerden alınan 50 gramlık örnekler üzerinde yapılan hidrometre sonuçları Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Buna göre, ayırma işlemi sırasında süspansiyonda hortumla alınan kısımda dane çapı dağılımı %82 kil+%18 silt, çökelen kısımda ise %5 kil+%95 silt olduğu görölmektedir. Sonuç olarak aynı kökenli numuneden, dane çapı dağılımları farklı 3 adet numune elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin kıvam limitleri ve özgül ağırlık değeri Tablo 4.4’te verilmiştir. Buna göre, silt boyutundaki malzemenin ana numuneye göre plastisitesi düşerken birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre kil sınıflaması değişmemiştir.

Tablo 4.4: Farklı kil yüzdelerindeki numunelerin endeks özellikleri

Numune Adı	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	Dane Boyutu		γ_s (kN/m ³)	Zemin Cinsi
				Silt (%)	Kil (%)		
%5 kil+%95 silt	44	25	19	95	5	24,6	CL
%50 kil+%50 silt	76	26	50	50	50	27,2	CH
%82 kil+%18 silt	102	44	60	18	82	27,7	CH

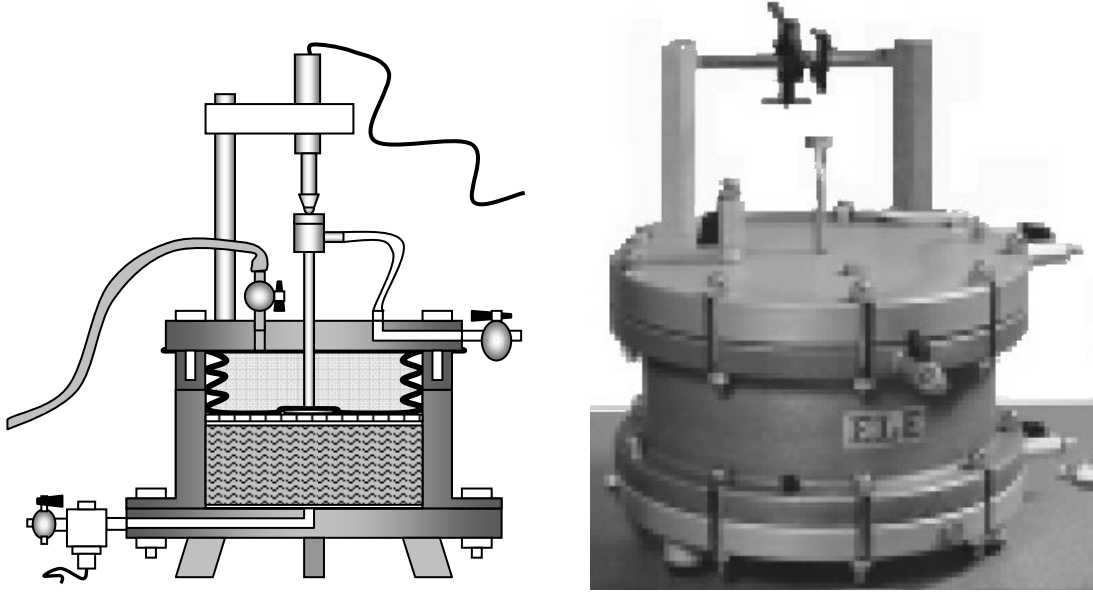


Şekil 4.4 : Samsun-Çarşamba mavi kilinden elde edilen farklı dane çapı dağılımlı numunelerin granülometri eğrileri

4.3.3 Rowe Hücresinde Hazırlanan Numuneler

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarının yorumlanması amacıyla parametrik çalışmalara ağırlık verilmiştir. Bu bakımdan birincil konsolidasyon ile ikincil ve üçüncül sıkışmalara etki eden parametrelerin incelendiği konsolidasyon deneyleri için önceki bölümlerde anlatıldığı üzere içeriği değiştirilen deney numuneleri 25 kPa düşey gerilme altında ROWE konsolidasyon hücresinde hazırlanmıştır.

Hazırlanacak numunenin boyuna bağlı olarak bir yaka parçası ile yüksekliği artırılan 25,4 cm çapında ve 20,5 cm yükseklikteki ELE marka büyük ROWE Hücresi ile 7,6 cm çapında 5,5 cm yükseklikteki ELE marka standart küçük ROWE Hücresi kullanılmıştır (Şekil 4.5). Hücrede, hava basıncı ile şişirilen bir belofram aracılığıyla aşağı doğru itilen sinterlenmiş pirinçten poroz taş, numunenin sıkışmasını sağlamaktadır. Numune hazırlama sürecini kısaltmak amacıyla drenaja alttan ve üstten izin verilmiştir. Numunenin istenilen basınçta konsolidasyonunun tamamlanıp tamamlanmadığının takip edilebilmesi amacıyla ELE marka 50 mm yer değiştirme ölçme kapasiteli düşey deformasyon aleti (LVDT) kullanılmıştır.



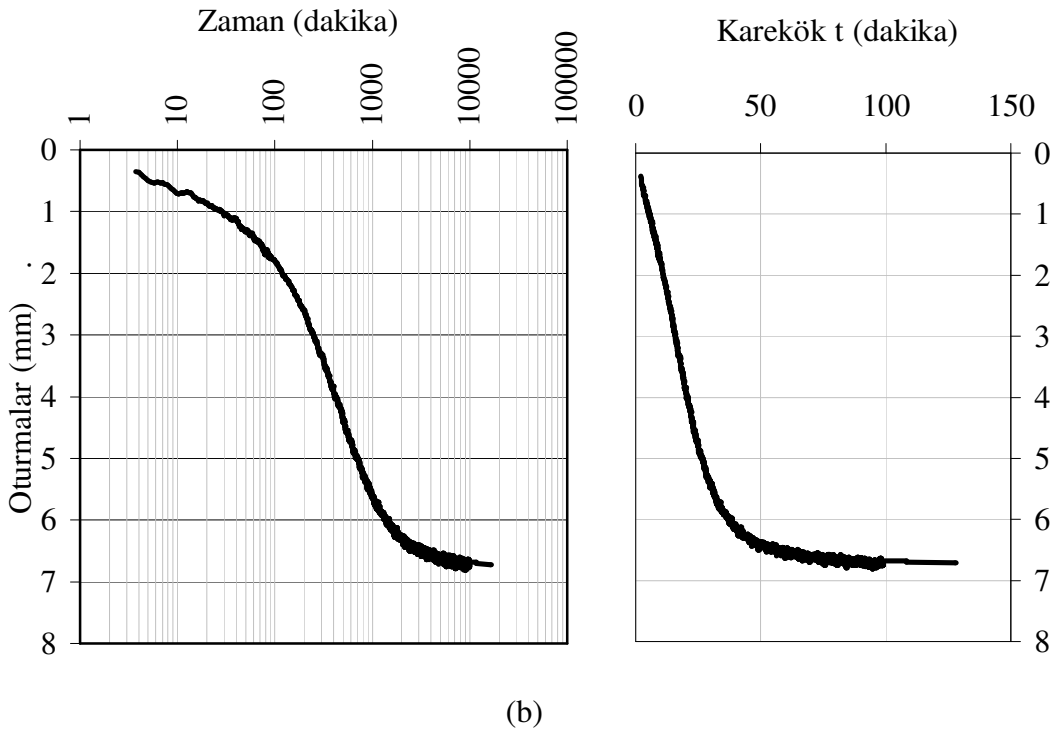
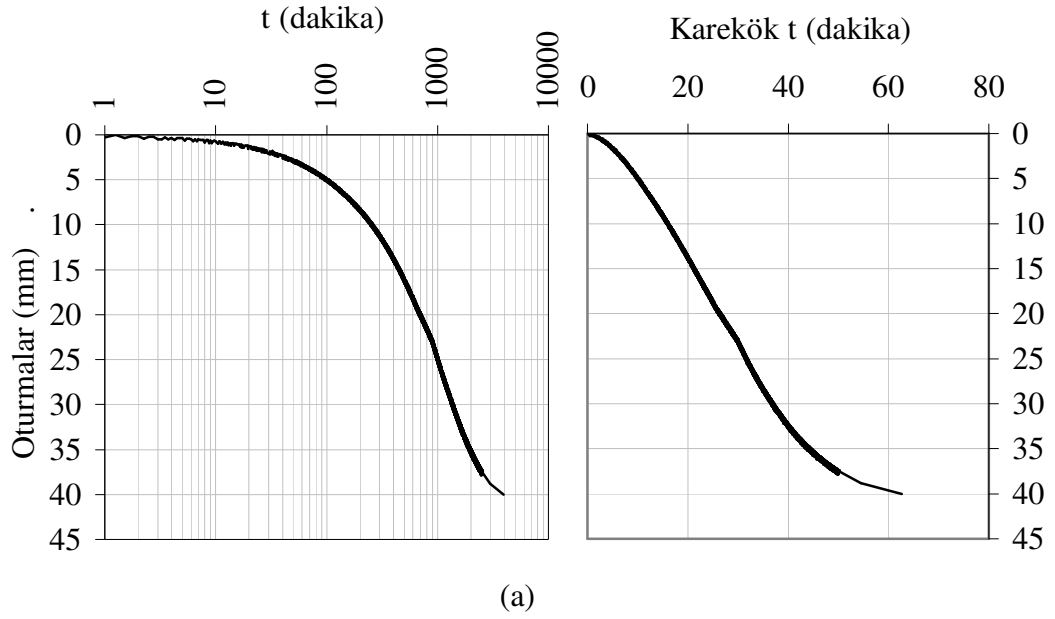
Şekil 4.5 : Rowe Hücresi a) şematik gösterim b) genel görünüm

%100 ince daneli olan zemin numuneleri, öncelikle kurutulup ASTM 40# elekten geçecek şekilde toz haline getirilmiştir. Rowe hücresinde hazırlanacak her tip numunenin kıvam limitleri önceden belirlenmiştir. Toz haline getirilen numunelere belirlenen likit limit değerlerinin iki katı kadar su ilave edilerek, oluşan karışım 20 dakika süreyle emaye kovalar içerisinde mikserle karıştırılmıştır. Hazırlanan süspansiyon Rowe Hücresinin içerisine dökülmüş ve hücre kapatılmıştır.

Konsolidasyon işlemi sırasında alttan ve üstten drenaja izin verilmek suretiyle su çıkışı gözlenmiştir. Numune içerisinde oluşacak fazla boşluk suyu basıncının sönmülmesi, pratik anlamda sistemden çıkan suyun durması anlamına geleceğinden, deney boyunca Rowe Hücresi'nden su çıkışı da takip edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, Samsun-Çarşamba mavi kilinin 3,00~3,50 m derinliklerde açılan muayene çukurlarından alınan numuneleri tercih edilmiştir. Klasik konsolidasyon deneylerinden normal konsolide olduğu anlaşılan kilin laboratuvar koşullarında da normal konsolide olarak davranması ve ön konsolidasyon basıncının konsolidasyon parametrelerini etkilememesi istenmiştir. Bu amaçla ROWE hücresinde hazırlanan numuneler arazideki konsolidasyon basıncı olan 25 kPa düşey gerilme değerinde konsolide edilmiştir. 25 kPa'lık konsolidasyon basıncına 10 kPa ve 25 kPa olmak üzere iki kademedeyi çıkmıştır. Her kademedeyi numunelerin konsolidasyonlarının tamamlanması için yaklaşık birer hafta

beklenilmiştir. Şekil 4.6’da Rowe Hücresinde hazırlanmış numunenin zamana bağlı sıkışma davranışı görülmektedir.



Şekil 4.6 : ROWE hücresi a) $\sigma_{vc}=10$ kPa gerilmesi b) $\sigma_{vc}=25$ kPa gerilmesi

Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından Rowe hücresinden çıkarılan ve ileriki bölümlerde Rowe Hücresinde Hazırlanmış (RHH) olarak adlandırılan bu numuneler, konsolidasyon deneyinin yapılacağı ringler içerisine alınacağı güne kadar, su

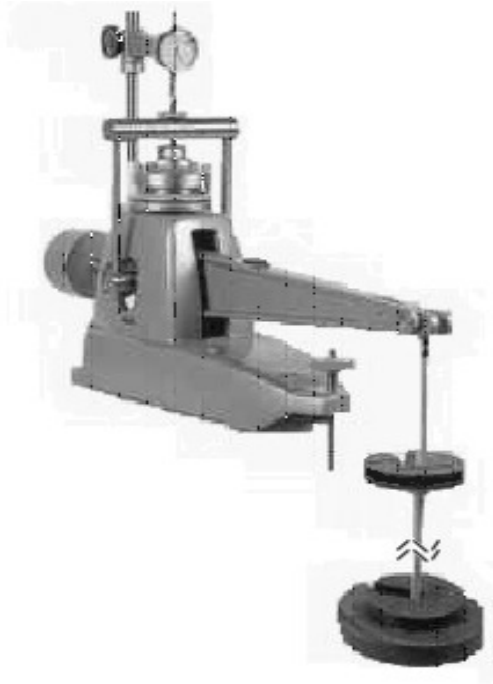
içeriğini değiştirmemesi için, plastik film ve alüminyum folyolara sarılarak desikatör içerisinde nem odasında saklanmıştır.

4.4 Kullanılan Konsolidasyon Sistemleri

Önceki bölümde anlatıldığı üzere birincil konsolidasyon ile ikincil ve üçüncül sıkışma davranışına etki eden parametrelerin araştırılması amacıyla içeriği çeşitli işlemlerle değiştirilen numunelerin Rowe Hücresinde tekrar hazırlanmasının ardından konsolidasyon özelliklerine bakılmıştır. Bu amaçla 3 tip konsolidasyon düzeneği kullanılmıştır. Bu bölümde, klasik konsolidasyon deney düzeneğinin yanı sıra Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon (SDHK) deney aleti ve üzerinde birtakım değişiklikler yapılan konsolidasyon deney düzenekleri tanıtılmaktadır.

4.4.1 Klasik Konsolidasyon Deney Düzenekleri

Klasik konsolidasyon ve uzun süreli krip deneyleri sırasında 5 cm, 7 cm ve 10 cm çaplı, 2 cm yükseklikli paslanmaz çelik ringlerin kullanılabildiği Wykeham Farrance ve ELE marka ödometre deney düzenekleri ile çalışılmıştır (Şekil 4.7). Zemin deformasyonları 1/500 mm hassasiyetlikteki mikrometre deformasyon saatleri ile veya ELE marka ADU veri toplama ünitesi kullanılmak suretiyle ELE marka 10 mm yer değiştirme kapasiteli düşey yer değiştirme ölçerler (LVDT) ile kaydedilmiştir.



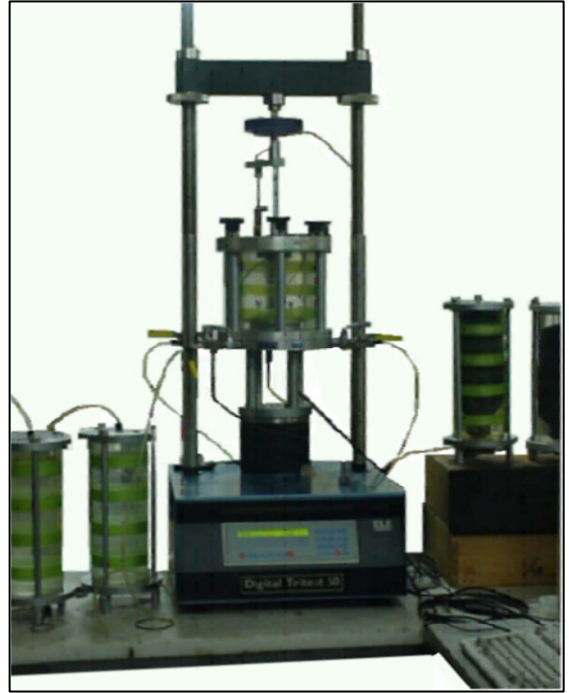
Şekil 4.7 : Wykeham-Farrance marka klasik konsolidasyon düzeneği

4.4.2 Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deney Düzenekleri

Sabit deformasyon deneyleri sırasında Şekil 4.8a’da gösterilen HW-24650 model Clarkson–Humboldt marka Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon deney hücresi ve Şekil 4.8b’de verilen ELE Digital Tritest 50 marka yükleme ünitesi kullanılmıştır. ELE Digital Tritest 50 üç eksenli yükleme çerçevesi, en büyük 50 kN basınç kuvveti üretebilmekte ve 0,00001 ile 9,99999 mm/dakika hız aralığında çalışmaktadır. Mikroişlemci kontrollü olan cihaz, digital step motor sistemi ile değişen hız kontrolüne de vites değiştirmeksizin imkân vermektedir. Deneylerde kullanılan HW-24650 model Clarkson – Humboldt marka Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon deney hücresi ELE Digital Tritest 50 yükleme ünitesine adapte edilebilmesi için yaptırılan bir yaka parçası ile küçük olan yükleme platformu genişletilerek hücrenin merkezlenmesi sağlanmıştır.



(a)

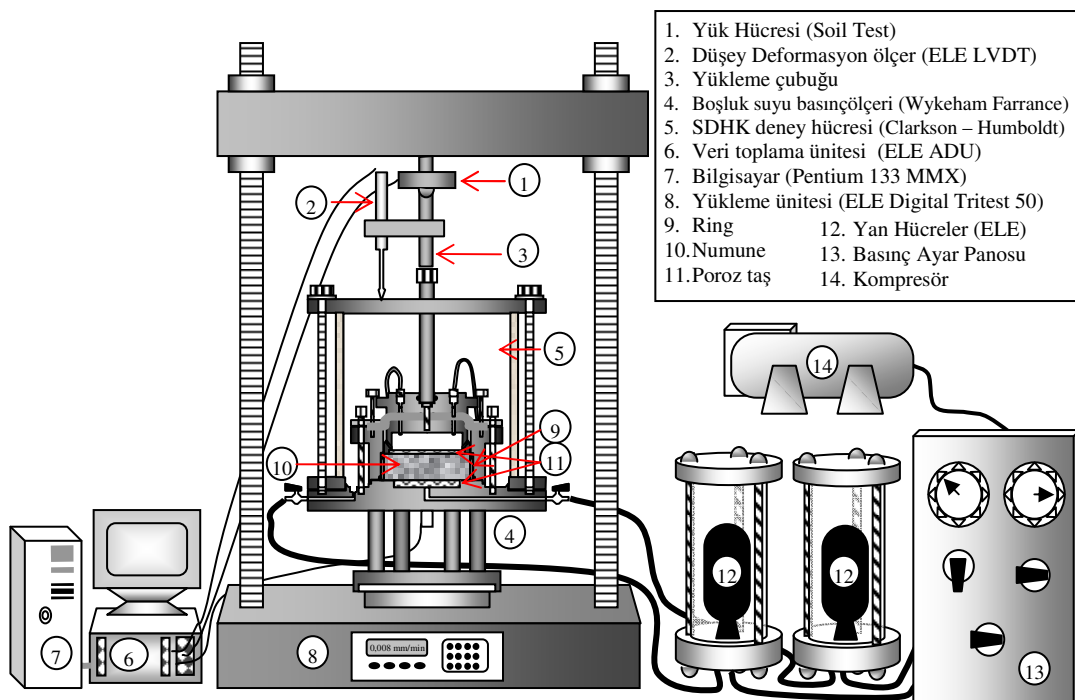


(b)

Şekil 4.8 : Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinde kullanılan düzenek
a) deney hücresi b) genel görünüm

Şematik gösterimi Şekil 4.9’da verilen düzenekteki hücreye 1700 kPa’a kadar basınç uygulanabilmektedir. Numunenin tabanından boşluk suyu basıncı değerleri 1000 kPa kapasiteli bir basınçölçerle ölçülmektedir. Ayrıca, hücre içerisine bağlı ikinci bir basınçölçerden de hücre basıncı gözlenmiştir. Gerek hücre basıncı gerekse ters basınç, kompresör tarafından üretilen hava basıncının bir regülâtör düzeneği

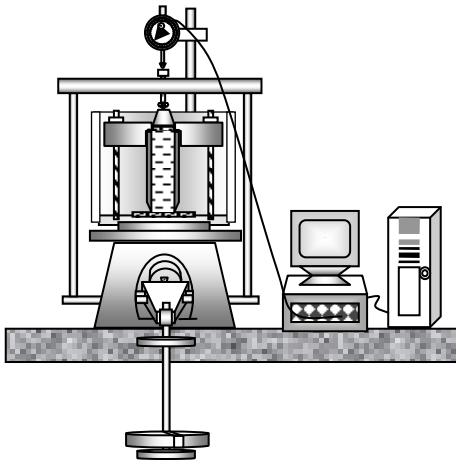
19 mm yükseklik ve 69 mm çapında paslanmaz çelik ring içerisine alınan numuneler hücre içerisine yerleştirilmesinin ardından hücre kapatılır. Düşey şaft, üst başlığa oturtulur. Yük hücresi, boşluk suyu basıncı ölçeri, hücre basıncı ölçeri ve düşey deformasyon ölçerler ayarlanarak sıfırlanır. Düşey şaftın, üst başlığa tam olarak oturduğundan emin olmak için alınan düşey gerilme değeri 5 kPa temas basıncı sağlanana kadar yükleme çerçevesi sıkıştırılır. Daha sonra hücre içerisi su ile doldurulur. Deney başında numunenin suya doygunluğunu sağlamak amacıyla hücre içerisine uygulanan basınçtan 20 kPa daha düşük bir basınç numunenin içerisine alt ve üst başlıktan uygulanır. Doygunluk kontrolünün ardından alt başlığın bağlı olduğu drenaj kanalı kapatılarak numune seçilen bir hızda sıkıştırmaya başlanır. Düşey gerilme değerinin 1000 kPa değerini aşmasıyla deneye son verilmektedir.



Şekil 4.9 : Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi şematik gösterim

4.4.3 Modifiye Edilmiş Klasik Konsolidasyon Deney Düzeneği

Bu tez çalışması kapsamında birincil konsolidasyon ile ikincil ve üçüncül sıkışmaların numune boyuyla değişimini incelemek amacıyla farklı boylarda iç yüzeyleri parlatılmış paslanmaz çelik ringler kullanılmıştır. Bu amaçla yükseklikleri 2, 4, 6, 8 ve 10 cm arasında değişen, 5 cm çaplı ringler özel olarak imal edilmiştir. Farklı yükseklikte ringlerle çalışabilmek için 3 adet Wykeham-Farrance marka konsolidasyon aletinde değişiklikler yapılmıştır. Öncelikle yük askısının boyunduruğu ve düşey deformasyon okumalarının alındığı mikrometrelerin bağlandığı çubuğun boyu uzatılmıştır. Konsolidasyon hücresinde de bazı değişiklikler yapılarak deneye uygun hale getirilmiştir. Numunenin kurumaması için su havuzunun kısa olan boyu yeniden imal edilen daha uzun boylu yeni bir havuz çeperiyle değiştirilmiştir. Üst başlık sabitleme vidası orijinalindeki gibi yine paslanmaz çelikten fakat daha uzun boylu olanlar ile değiştirilmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 4.10'da verilmiştir. Deneyler sırasında hem 1/500 mm hassasiyetteki mikrometreler hem de 50 mm yer değiştirme ölçme kapasiteli ELE marka düşey deplasman ölçerler yardımıyla zamana bağlı düşey deformasyon okumaları alınarak ELE marka ADU veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.10: Farklı kalınlıklı numuneler için kullanılan konsolidasyon deney düzeneği
a) şematik gösterim b) genel görünüm

5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

Çarşamba Deltası'nda yer alan Samsun Havaalanı İnşaatı sırasında pistin KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki kesiminde önyükleme yöntemi ile zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Bu sırada ikincil sıkışmaların zamanla artarak devam ettiği görülmüştür. Pistin önyükleme ile iyileştirilen kesimine komşu sahada açılan araştırma çukurları ve yapılan sondaj çalışmalarla zemin profili belirlenmiştir. En üstte karşılaşılan yarım metrelik koyu kahverengi katı kil tabakasının altında mavi renkli yumuşak bir kil tabakası bulunmakta ve bu tabakanın altında sıkı kum tabakasına girilmektedir. Kalınlığı 10 metreyi bulan ve deniz yönünde kalınlığı artan mavi renkli yumuşak kil tabakasının yüksek sıkışma özelliği, arazinin toplam oturma davranışında etkili olmaktadır. Samsun-Çarşamba mavi kili adı verilen bu yumuşak kil tabakasından alınan tüp ve kalıp numuneleri üzerinde yapılan endeks deneylerine göre kilin birleştirilmiş zemin sınıflama sisteminde yüksek plastisiteli kil CH grubuna girdiği, %100 ince dane içerdiği ve yakma kaybına göre organik madde miktarının %8 dolayında olduğu anlaşılmıştır. Kimyasal analizler kilin Ca-Montmorilonit olduğunu göstermiştir (Yılmaz 2000).

Bu bölümde, hazırlanan bir deney programı çerçevesinde, Samsun-Çarşamba mavi kilinden alınan numuneler üzerinde kilin zamana bağlı sıkışma davranışına organik madde içeriğinin, kil boyutundaki dane yüzdesinin, numune boyutunun ve deformasyon hızının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, detayları ile Bölüm 4'te anlatıldığı üzere organik içeriği veya granülometrisi değiştirilen numuneler ROWE hücresinde tekrar hazırlanmıştır. Tekrar hazırlanmış bu numuneler üzerinde klasik konsolidasyon deneyi, uzun süreli konsolidasyon deneyi ve sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi olmak üzere bir dizi deney yapılmıştır. Oluşturulan deney programı çerçevesinde yapılan deneyler Tablo 5.1'de özetlenmiştir. Bu bölümde, Samsun-Çarşamba mavi kili numuneleri üzerinde gerçekleştirilen 15 adet klasik konsolidasyon deneyi, 30 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi ile süresi 3 ay ile 1,5 yıl arasında değişen 26 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi olmak üzere toplam 71 adet konsolidasyon deneyine yer verilmiştir.

Tablo 5.1: Çalışma kapsamında yapılan Konsolidasyon deneyleri

İncelenen parametre	Numune tipi		Klasik konsolidasyon deneyi	Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi		Krip deneyi						
				Adedi	Deformasyon hızı % dakika ⁻¹	Adedi	Gerilmesi	Süresi (gün)				
Örselenme	Örselenmemiş	1	3	0,063 0,042 0,021	4	75 kPa	136					
						100kPa	191					
						150 kPa	190					
						400 kPa	70					
	Yoğrulmuş	1			4	25 kPa	234					
						100 kPa	234					
200 kPa						234						
400 kPa						73						
Organik Malzeme İçeriği	Yakılmamış RHH	1	7	0,105 0,063 0,053 0,042 0,021 0,011 0,005	5	25 kPa	85					
						100 kPa	83					
						200 kPa	82					
						400 kPa	81					
						800 kPa	603					
						Kuru Yakılmış	1	3	0,063 0,042 0,021	3	25 kPa	251
											100 kPa	250
	400 kPa	250										
	Islak Yakılmış	1	3	0,063 0,042 0,021	3	25 kPa	510					
						100 kPa	510					
						400 kPa	510					
	Kil Yüzdesi	%5 kil+%95 silt	1	6	0,105 0,084 0,063 0,042 0,032 0,021	1	100 kPa	347				
%50 killi		1	4	0,074 0,063 0,053 0,042	1	100 kPa	347					
%82 kil+%18 silt	1	4	0,042 0,021 0,011 0,005	1	100 kPa	347						
Numune Boyutu	D=5cm	H=2cm	1			1	100 kPa	327				
	D=5cm	H=4cm	1									
	D=5cm	H=6cm	1			1	100 kPa	327				
	D=5cm	H=8cm	1									
	D=5cm	H=10cm	1			1	100 kPa	327				
	D=7cm	H=2cm	1									
	D=10cm	H=2cm	1									
	D=10cm	H=4cm				1	100 kPa	327				

Birinci grup konsolidasyon deneylerinde, Samsun-Çarşamba mavi kilinde örselenme ile zeminin zamana bağlı sıkışma davranışındaki değişim incelenmiştir. Bu amaçla örselenmemiş ve yoğrularak örselenmiş numuneler üzerinde klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylece dane çatısı fiziksel olarak bozulmaya çalışılan numunelerin birincil ve ikincil konsolidasyon davranışlarındaki değişimleri incelenmiştir.

İkinci grup deneylerde, Samsun-Çarşamba mavi kilinin organik içeriğinin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, organik içeriği kuru ve ıslak yakma yöntemleri kullanılarak yakılan zemin numunelerinden Rowe hücrelerinde hazırlanmış (RHH) numuneler elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneyleri, uzun süreli konsolidasyon deneyleri ve Sabit Deformasyon Hızlı konsolidasyon deneylerinin sonuçları yakılmadan hazırlanan RHH numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Üçüncü grup deneylerde, orijinalinde %50 silt + %50 kil boyutunda dane içeren Samsun-Çarşamba mavi kilinin içerisindeki kil boyutundaki dane yüzdesinin, konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 4. Bölümde detaylarıyla anlatıldığı üzere farklı dane çapı dağılımında hazırlanan Samsun-Çarşamba mavi kil numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinin sonuçları verilmiştir.

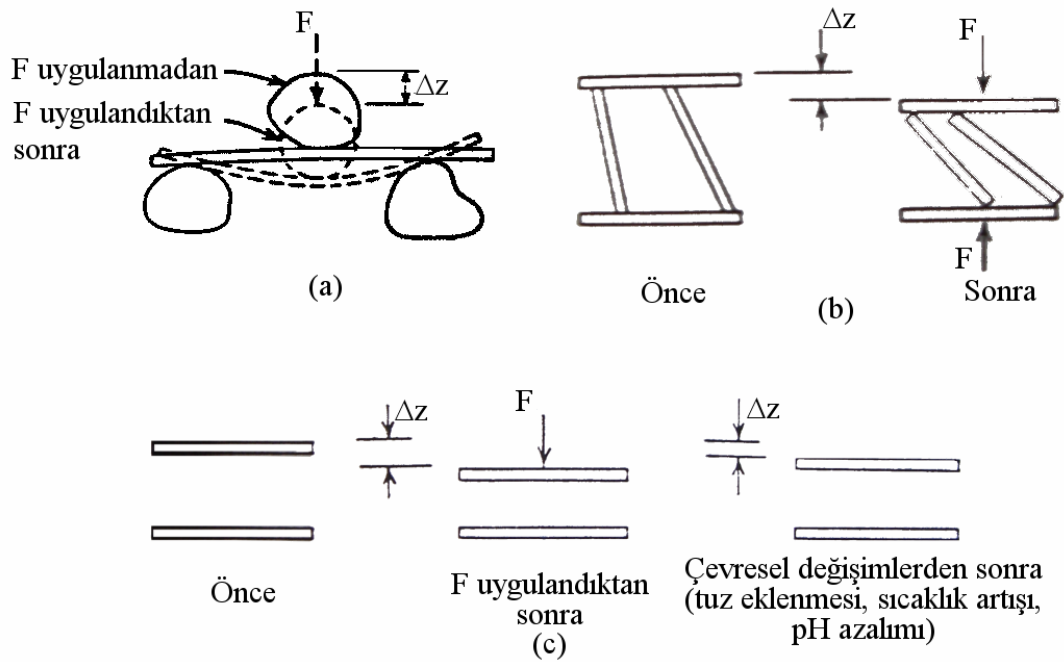
Dördüncü grupta, değişik çap ve kalınlıkta hazırlanan RHH numunelerle çalışılarak numune boyutunun ve drenaj boyunun Samsun-Çarşamba mavi kilinin sıkışma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ ilişkisi, değişik çap ve kalınlıklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deneylerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Farklı boylardaki numunelerde gerçekleştirilen uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, krip esnasında drenaj boyunun ikincil ve üçüncül sıkışmalar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

$\varepsilon_v - \log \sigma'_v - \log t$ ilişkisinin incelendiği tezde, her grupta sırasıyla klasik konsolidasyon, uzun süreli konsolidasyon ve sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri 3 ayrı başlık altında anlatılmaktadır. Klasik konsolidasyon deneylerinde $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ grafiğinde “Birincil Konsolidasyon Sonu” (EOP) eğrileri, konsolidasyon katsayısı ve sıkışma indisi gibi konsolidasyon parametrelerine yer verilmektedir.

Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, önceden belirlenen bir gerilme kademesinde gerçekleştirilen krip deneylerine yer verilmektedir. Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri başlığı altında da anlatılacağı üzere, hazırlanan deney numuneleri üzerinde farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinin sonuçları, klasik konsolidasyon deneylerinden bulunan parametrelerle karşılaştırılmaktadır.

5.1 Örselenmenin Etkisi

Bir zemin elemanının deformasyon geçmişi, zemin danelerinin deformasyonu ve elemanı oluşturan birçok danenin birbirine göre bağıl hareketi sonucu oluşmaktadır. İçerisinde kil daneleri bulunan zeminlere bakıldığında bu deformasyon mekanizmaları Şekil 5.1'deki formda olmaktadır.

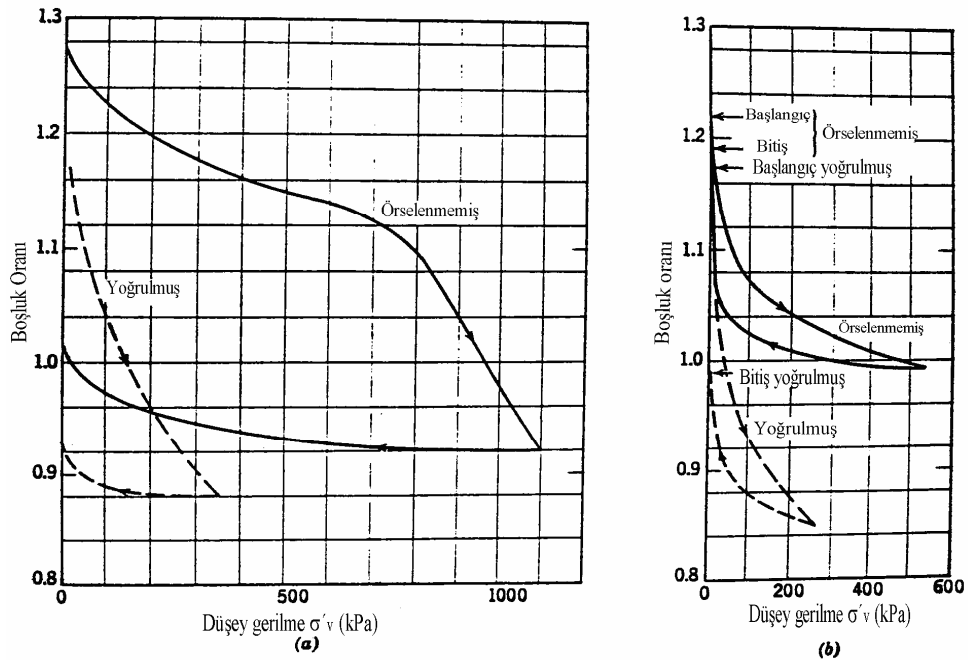


Şekil 5.1: Deformasyon mekanizması

Şekil 5.1a'daki gibi mika ve quartz danelerinin karışımından oluşan zeminin yüklenmesi durumunda, düzlemsel olan mika danelerin eğilmesi deformasyona katılacaktır. Eğer zemin içerisinde Şekil 5.1b'deki gibi kil daneleri bulunuyorsa kil daneleri düşey yük altında çok daha yoğun bir yapı oluşturabilmektedir. Bu deformasyon mekanizması, örselenmemiş doğal killerin deformasyonuna katkıda bulunan bileşenlerden birisidir. Araştırmalar, özellikle kayma yüzeyleri boyunca

danelerin paralel bir dizilime geldiklerini göstermektedir. Kil danelerinin yeniden yönlenmeleri sonucu oluşan çoğu deformasyon, uygulanan yükün kaldırılmasından sonra da geri kazanılamamaktadır. Saf killerde ise daneler arasındaki boşluklardaki aliterasyon deformasyonunun ana bileşenidir. Şekil 5.1c’de gösterildiği gibi saf killerde sadece yük uygulanmasıyla değil çevresel değişimlerle de daneler arasındaki boşluklar azalabilmektedir. Örneğin boşluk suyundaki tuzun artması veya boşluk sıvısının pH değerinin azalması da daneler arasındaki boşlukları azaltır. Danelerin yerleşiminde bir aliterasyon sonucunda oluşan deformasyonlar geri dönüşümlüdür.

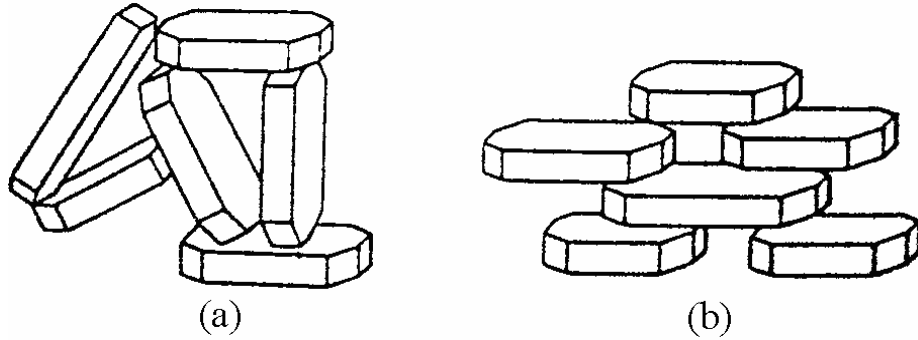
Doğal bir kil, oluşumu sırasındaki koşullara ve oluşumu sonrasındaki çevresel değişimlere bağlı olarak topak bir yapı geliştirmektedir. Deformasyonlar, bu yapıyı bozmaya ve danelerin yeniden yerleşmelerine zorlamaktadır. Bu yapının aşırı bozulmasını en iyi anlatan örnek yoğrulmuş ve örselenmemiş bir kilin davranışını karşılaştırmaktır. Çünkü fiziksel olarak zemini homojen olana kadar yoğurmak, daneleri komşu danelerle aynı dizilime girmeye ve daneler arasındaki bağları bozmaya zorlamaktadır. Şekil 5.2’deki çalışmadan da görüleceği üzere bir kilde doğal yapıyı yoğurarak bozmak özellikle düşük gerilme seviyelerinde sıkışabilirliği oldukça artırmaktadır.



Şekil 5.2: Boşluk oranı düşey gerilme ilişkisi üzerinde örselenmenin etkisi
a)Laurenian kili b) Boston kili (Casagrande,1932)

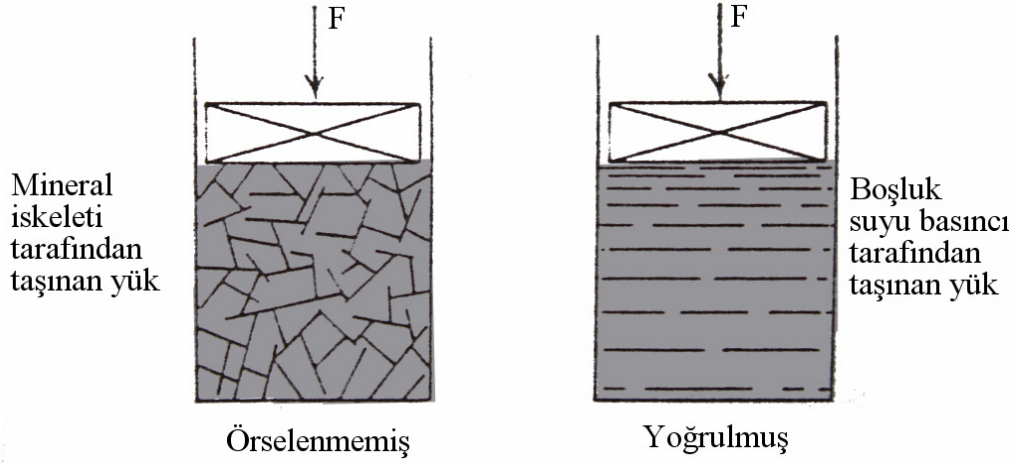
Genellikle, doğal zeminler 13,8 MPa'ın altında yüklere maruz kaldıklarında esas olarak danelerin bağıl hareketi ve yeniden yerleşimi sonucunda deformasyona uğramaktadır. Yoğrulmuş, oldukça yüksek plastisiteli killerde dane yerleşiminde aliterasyonun deformasyona önemli bir katkısı olmaktadır. Zemin danelerinin 13,8 MPa'dan yüksek gerilmelerde danelerin ufalanmasıyla oluşan deformasyon iri daneli zeminlerde görülmektedir (Lambe Whitman 1969).

Bir zemin elemanının mühendislik davranışı mevcut yapıya dayanmaktadır. Genellikle, topaklaşmış yapılı bir zemin elemanı, aynı zeminle, aynı boşluk oranına sahip dağınık hale getirilmiş bir yapıya göre daha yüksek dayanıma, daha düşük sıkışabilirliğe, daha yüksek geçirgenliğe sahiptir. Topaklaşmış durumda daha yüksek dayanım ve düşük sıkışabilirlik, daneler arası etkileşimden ve düzensiz dizilimdeki danelerin yer değiştirme zorluğundan kaynaklanmaktadır. Topaklaşmış durumdaki zeminde yüksek geçirgenlik, akış için daha büyük kanalların bulunmasının bir sonucudur. Aynı boşluk oranında topaklaşmış bir zemin elemanında, dağınık yapıdaki bir elemana göre akış için aynı toplam kesit alanı varken, topaklaşmış zeminde akış kanalları sayıca daha az ve boyutu daha büyüktür. Böylece dağınık yapıya göre topaklaşmış bir zemin yapısı boyunca akışa karşı daha az bir direnç oluşacaktır (Lambe, Whitman, 1969).



Şekil 5.3: Zemin yapı tipleri a) topaklaşmış b) dağınık (Lambe Whitman, 1969)

Ayrıca örselenme, numune drenajsız mukavemetini azaltırken sıkışabilirliği artırmakta ve ince daneli zeminlerin boşluk basıncı karakterini de değiştirmektedir. Yoğrulma esnasındaki oluşan fiziksel işlem Şekil 5.4'de verilmiştir.

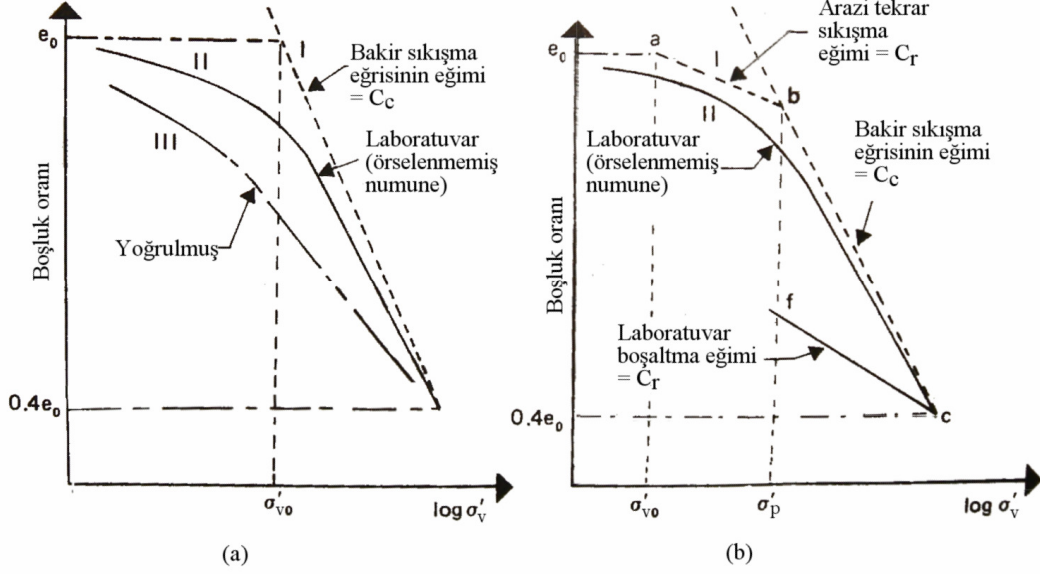


Şekil 5.4: Yoğrulma esnasında yük transferinin mekanik gösterimi (Lambe Whitman, 1969)

Sonuç olarak, dane çatısının zeminlerin mühendislik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri olduğu unutulmamalıdır. Bu bölümde Samsun Çarşamba mavi kilinin bir boyutlu sıkışma davranışına dane çatısının bozulmasının etkisi incelenmektedir. Bu grupta Samsun Çarşamba Deltası'nda 7,5 m ve 8 m derinlikten Shelby tüpleri ile alınan yumuşak, mavi renkli kil numuneleri kullanılmıştır. Örselenmemiş numunelerle çalışılmasının ardından, tüpten arta kalan numuneler spatula ile iyice karıştırılmak suretiyle, aynı su içeriğinde fakat farklı dane çatısında, yoğrulmuş numuneler elde edilmiştir. Böylece, örselenmenin numunelerin birincil konsolidasyon, ikincil sıkışma ve üçüncül sıkışma davranışları üzerindeki etkisi, bilinen konsolidasyon parametrelerinin değişimleri cinsinden sunulmuştur. Bu kapsamda, birinci grup deneylerde örselenmemiş ve örselenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneyleri ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri ayrı başlıklar altında özetlenmektedir.

5.1.1 Örselenmenin Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Araziden alınan zemin numuneleri bir miktar örselenmeyi içermektedir. Bu numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi yapıldığında $e-\log \sigma'_v$ eğrileri arazidekinden bir miktar farklı olmaktadır (Şekil 5.5).



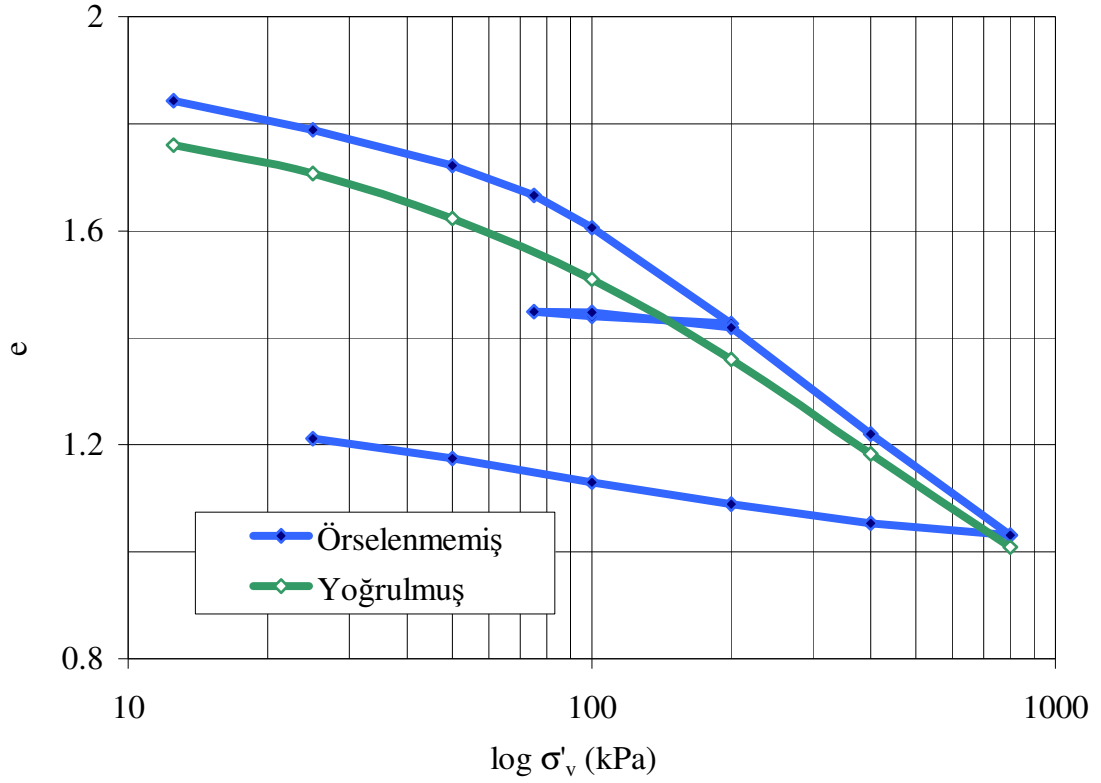
Şekil 5.5: Örselenmenin e -log σ'_v üzerindeki etkisi a) Terzaghi Peck 1967, b) Schmertman 1955

Şekil 5.5a'da I.Eğri, arazideki düşey efektif gerilme (σ'_{v0}) ve boşluk oranı (e_0) olan örselenmemiş normal konsolide bir kilin e -log σ'_v eğrisinin doğasını göstermektedir. Buna önceki bölümlerde de değinildiği üzere arazi bakir sıkışma eğrisi denilmektedir. Gereken özenin gösterilerek araziden alınan örselenmemiş bir numunenin üzerinde gerçekleştirilecek konsolidasyon deneyi sonucunda elde edilecek e -log σ'_v eğrisi II. Eğri gibi olmaktadır. Eğer numune tamamıyla yoğrulmuş ve konsolidometrede test edilmiş ise sonuçta oluşacak e -log σ'_v eğrisi III. Eğri gibidir. Arazi bakir eğrisi ile laboratuvar e -log σ'_v eğrilerinin yaklaşık $0,4 e_0$ gibi bir boşluk oranında çakıştığı vurgulanmaktadır (Terzaghi, Peck, 1967).

Arazide aşırı konsolide bir kilin doğadaki konsolidasyonu Şekil 5.5b'de verilmiştir. Kilin doğadaki hâlihazırdaki efektif gerilmesi (σ'_{v0}), boşluk oranı (e_0)'dır. Önkonsolidasyon basıncı (σ'_p) olan kilin bc parçası, bakir eğrisi üzerindeki kısımdır. Schmertmann (1953) arazideki tekrar sıkışma ab kısmının eğiminin laboratuvaradaki boşaltma kademesindeki cf kısmının eğimi ile yaklaşık aynı olduğunu bulmuştur. Laboratuvar boşaltma eğrisinin eğimi olarak gösterilen C_r 'nin yaklaşık C_c eğiminin beşte biri ile onda biri arasında kaldığını vurgulamıştır. Ayrıca, Schmertmann, aşırı konsolide killeri için örselenme miktarından bağımsız olarak laboratuvar ile arazi e -log σ'_v eğrilerinin yaklaşık $0,4 \times e_0$ gibi bir boşluk oranında çakıştıklarını kabul etmektedir.

Bu alt başlık altında örselenmemiş numuneler ile örselenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş klasik konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen parametrelerin değişimi ve önceki çalışmalarla uyumluluğu araştırılmıştır. Bu amaçla, sürekli örselenmemiş numunelerin alındığı S1 sondajı seçilmiştir. Söz konusu sahada, üstteki bitkisel zemin tabakasının altında birim hacim ağırlığı $\gamma_n = 18 \text{ kN/m}^3$ olan 1,5 m kalınlığındaki koyu kahverengi kil tabakası belirlenmiştir. Bu tabakanın altında birim hacim ağırlığı $\gamma_n = 15,6 \text{ kN/m}^3$ olan mavi kil tabakası olduğu ve yeraltı su seviyesinin de zemin yüzeyinden 0,5m ile 1,0m arasındaki derinliklerde mevsimsel olarak değiştiği bilinmektedir. Mavi renkli bu kil tabakası 13m derinlikte karşılaşılan çok sıkı ($N_{60}=38$) koyu gri renkli kum tabakası ile sınırlıdır. Buna göre, 7,5 m derinlikten alınan örselenmemiş tüp numuneleri üzerindeki düşey efektif gerilme $\sigma'_v = 50 \text{ kPa} \sim 55 \text{ kPa}$ arasında değişmektedir.

Klasik konsolidasyon deneylerinde, her bir yükleme kademesinde yük artırım süresi $YAS=24$ saat, kademeler arasındaki geçişlerde Yükleme Artırma Oranı $YAO=1$ alınarak, 12,5 kPa gerilmesinden 800 kPa gerilmesine kadar yükleme yapılmıştır. Deneyler esnasında çift taraftan drenaja izin verilmiştir. Deneylerde her yükleme kademesi için zamana bağlı sıkışma davranışı takip edilerek her gerilme kademesi için Casagrande yöntemine göre belirlenen birincil konsolidasyonun tamamlanma sürelerindeki boşluk oranlarına göre çizilen birincil konsolidasyon sıkışma eğrileri $e - \log \sigma'_v$ grafiğinde Şekil 5.6'de görüldüğü gibidir. Şekil 5.6'da verilen $e - \log \sigma'_v$ ilişkilerinde, Casagrande yöntemine göre belirlenen önkonsolidasyon basıncı değeri örselenmemiş numunede $\sigma'_p=85 \text{ kPa}$, yoğrulmuş numunede ise $\sigma'_p=75 \text{ kPa}$ olarak bulunmuştur. Önkonsolidasyon basıncı öncesindeki kısmın eğiminden hesaplanan tekrar sıkışma indisi değeri örselenmemiş numune için $C_r=0,198$, örselenmiş numune için $C_r=0,221$ 'dir. Önkonsolidasyon basıncı sonrasındaki kısmın eğiminden hesaplanan sıkışma indisi değeri ise örselenmemiş numunede $C_c=0,647$ iken örselenmiş numune de $C_c=0,545$ 'dir. Buna göre zemin yüksek sıkışabilirlikli zemin ($C_c>0,4$) sınıfında bulunmaktadır (Sower ve Sower, 1970). Ayrıca, örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde yapılan klasik konsolidasyon deneylerinde her basınç kademesi için hesaplanan konsolidasyon katsayısı (c_v) ile ikincil sıkışma oranı ($C_{\alpha e}$) değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.6: Örselenmemiş yoğrulmuş numunelerin e - $\log \sigma'_v$ eğrisi

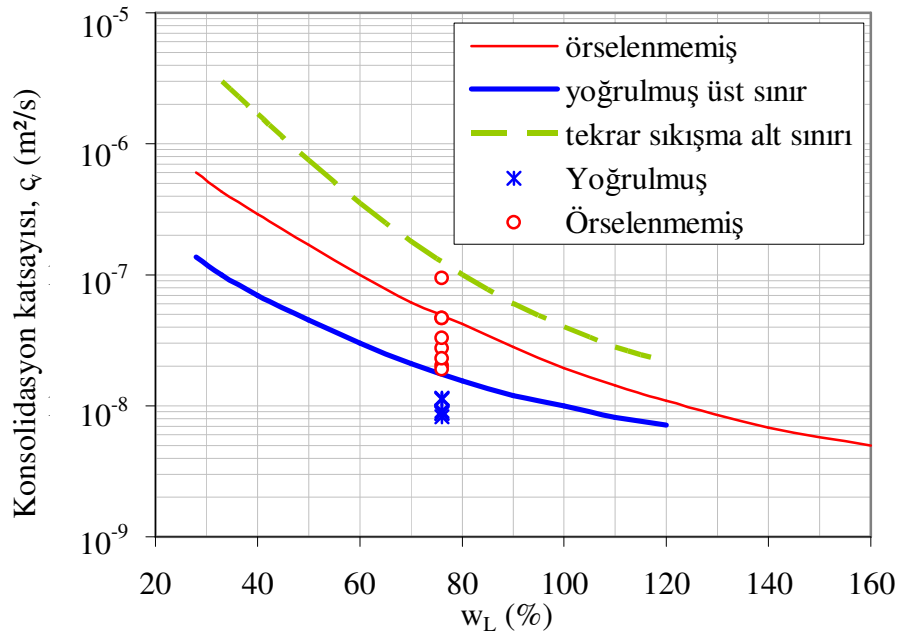
Tablo 5.2: Örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneylerinden belirlenen parametreler

Numune Tipi	Basınç Kademesi (kPa)	C_v (m^2/s) ($\cdot 10^{-8}$)	$C_{\alpha e}$
Örselenmemiş	12,5	9,42	0,00180
	25	4,67	0,00246
	50	4,65	0,00265
	75	2,76	0,00326
	100	2,02	0,00466
	200	1,90	0,00458
	400	3,29	0,00468
	800	2,29	0,00490
Yoğrulmuş	12,5	1,13	0,00276
	25	1,14	0,00352
	50	1,12	0,00455
	100	0,88	0,00518
	200	0,87	0,00508
	400	0,91	0,00514
	800	0,83	0,00512

Sonuç olarak, yoğrularak örselenmiş numunelere uygulanan herhangi basınç altında ulaşılan boşluk oranı, örselenmemiş zemine oranla daha düşük kalmıştır. Örselenme ile $e - \log \sigma'_v$ eğrisinde gözlenen önkonsolidasyon basıncındaki bariz kırıklık giderek

kaybolmuş ve görünen önkonsolidasyon basıncı değeri düşmüştür. Örselenme ile sıkışma indisi (C_c) değeri azalırken, tekrar sıkışma indisi (C_r) değeri artmıştır. Örselenme, hem bakir sıkışma hem de tekrar sıkışma için konsolidasyon katsayısını azaltmıştır.

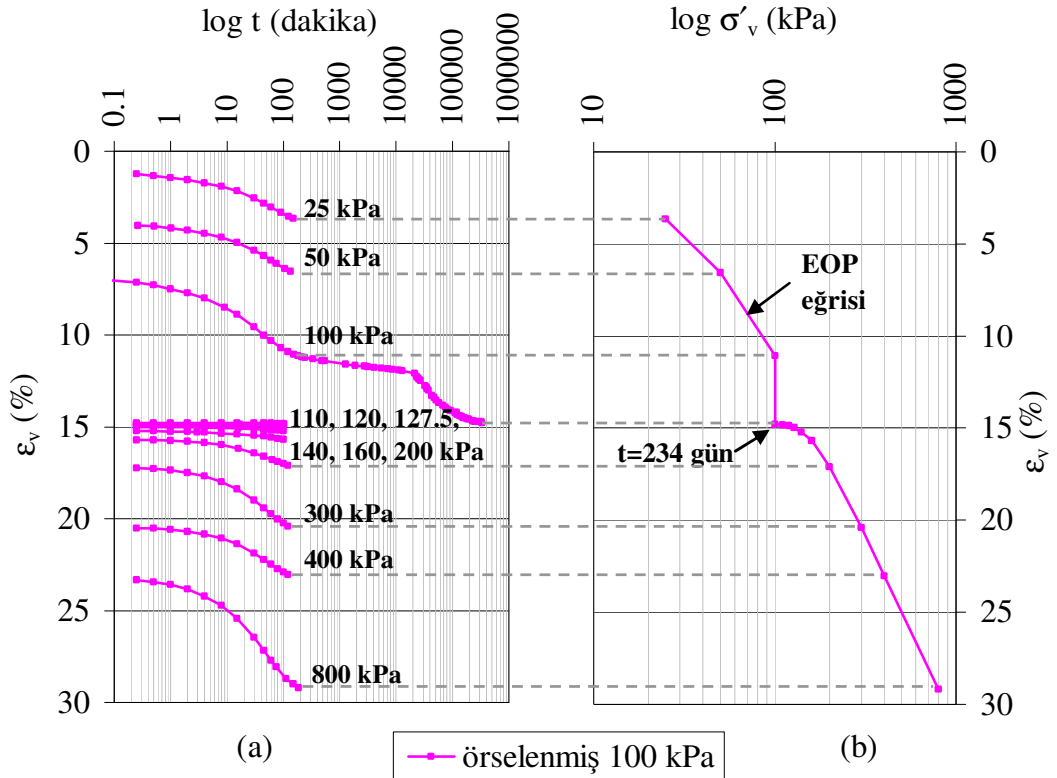
NAVFAC (1982), tarafından verilen Şekil 2.10'daki c_v - w_L ilişkisinden de görüleceği üzere aynı likit limit değerine sahip iki numunenin tekrar sıkışma kısmındaki c_v değeri en yüksek olurken bakir kısımdakinin daha düşüktür. Ayrıca, aynı grafikten tamamen yoğrulmuş bir numunenin c_v değerinin, aynı numunenin örselenmemiş bakir kısmında belirlenen c_v değerinden daha düşük olacağı da anlaşılmaktadır. Elde edilen verilerin NAVFAC tarafından önerilen c_v - w_L grafiği üzerindeki gösterimi Şekil 5.7'deki gibi olup bulunan sonuçların önerilen bant aralıklarında kaldığı görülmüştür. Bununla beraber, örselenmemiş numunede c_v değerinde önkonsolidasyon basıncındaki ani azalma örselenmiş numunede görülmemiştir. Lambe ve Whitman (1969) örselenmemiş kil zeminlerde topak yapının, aynı boşluk oranına sahip fakat yoğrulmuş olan kilin dağınık yapısına göre daha yüksek dayanıma, daha düşük sıkışabilirliğe, daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu söylemektedir. Bu durumda elde edilen sonuçlar tutarlı gözükmemektedir. Ayrıca, ikincil sıkışma oranlarında örselenme ile ufak bir artış gözlenmiştir. Bulunan bu sonuçlar literatürdeki bulgularla örtüşmektedir (Lade 2001).



Şekil 5.7: Örselenmemiş yoğrulmuş numunelerin c_v - w_L ilişkisi

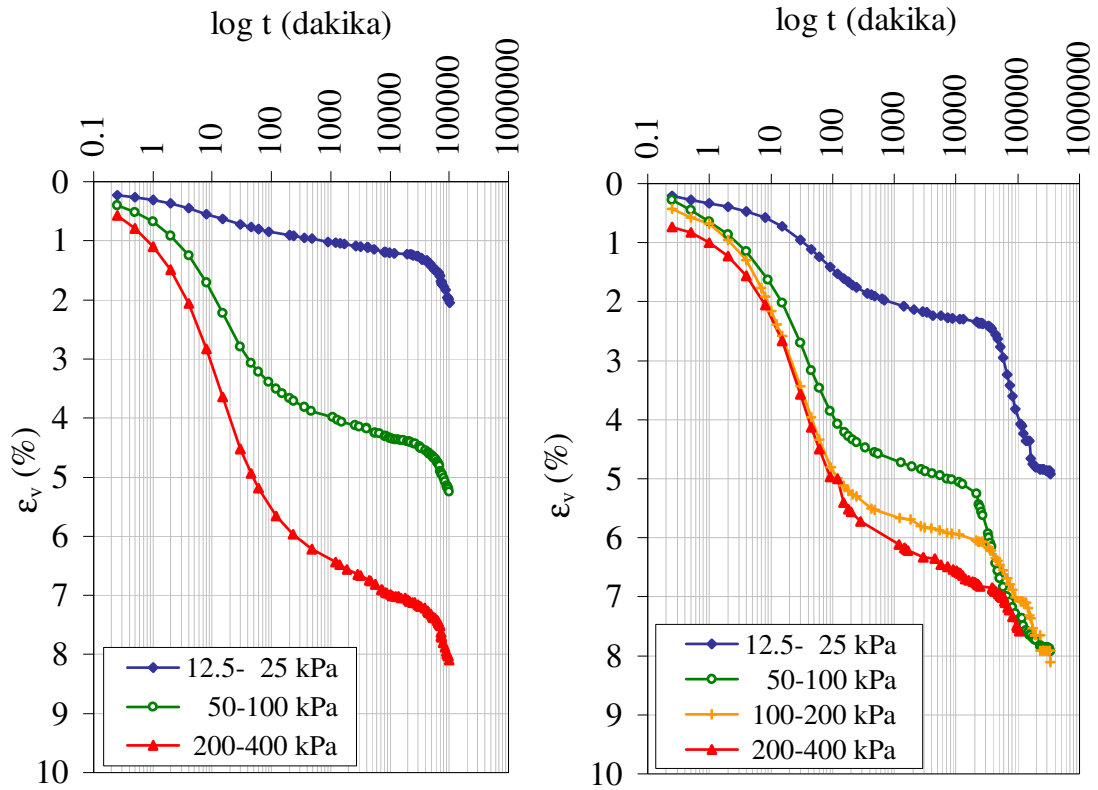
5.1.2 Örselenmenin Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Lade (2001) örselenmenin bakir sıkışma kısmında ikincil sıkışma katsayısını azalttığını belirtmiş ise de örselenmenin üçüncül sıkışma olarak da adlandırılan gecikmiş ikincil sıkışma davranışına etkisi tam olarak bilinmemektedir. Bu bölümde, üçüncül sıkışma davranışı sergilediği bilinen Samsun-Çarşamba mavi kili'nin yoğrulmak suretiyle dane çatısı fiziksel olarak değiştirilmiş ve yoğrulmanın ikincil ve üçüncül sıkışma davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde çift taraftan drenaja izin verilerek gerçekleştirilen toplam 7 adet uzun süreli konsolidasyon deneyleri anlatılmıştır. Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, bir düşey gerilme altında kripe gidilmiştir. Krip deneyleri örselenmemiş numunelerde 25 kPa, 100 kPa ve 400 kPa, gerilme seviyelerinde; örselenmiş numunelerde ise 25 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa gerilme seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Uzun süreli konsolidasyon deneylerine örnek olarak Şekil 5.8'de 100 kPa gerilmesinde 234 gün boyunca krip davranışının incelendiği yoğrulmuş numunenin ε_v - $\log \sigma'_v$ ve ε_v - $\log t$ eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.8: 100 kPa gerilmesinde kripe gidilen yoğrulmuş numunenin uzun süreli konsolidasyon deneyine ait a) ε_v - $\log \sigma'_v$ b) ε_v - $\log t$ eğrileri

Uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçlarının birbirleriyle kıyaslanabilmesi amacıyla Şekil 5.8'den de görülebileceği üzere, kripin incelendiği gerilme seviyelerine çıkılırken birim Yük Artırma Oranı (YAO=1) kullanılmıştır. Bu ara yükleme kademelerinde sadece birincil konsolidasyona izin verilerek ikincil sıkışmalar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, bu kademelerde bekleme süreleri klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen t_p sürelerine göre Yük Artırım Süresi YAS=150 dakika ~ 200 dakika aralığında sınırlı tutulmuş, Taylor yöntemine göre de gerekli kontroller yapılmak suretiyle bir sonraki yükleme kademesine geçilmiştir. Benzer şekilde, kripi sonrası yüklemeye devam edilen uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, Şekil 5.8'den de anlaşılacağı üzere YAO<1 alınmıştır. Bu bölümde konu edilen toplam 7 adet uzun süreli konsolidasyon deneyinde, kripiye gidilen düşey gerilmeler altında örselenmemiş numunelerin zamana bağlı sıkışma davranışları Şekil 5.9a'da ve yoğrulmuş numunelerinki ise Şekil 5.9b'de verilen $\varepsilon_v - \log t$ grafiklerinde toplu halde sunulmuştur.



Şekil 5.9: a) Örselenmemiş ve b) Yoğrulmuş numunelerin kripi deneylerine ait $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri

Şekil 5.9’de, tüm numuneler üzerinde yapılan krip deneylerinden elde edilen ε_v -log t eğrilerinde, birincil konsolidasyonun $t_p=60\sim160$ dakika aralığında tamamlanmasının ardından ikincil konsolidasyon kısmında yaklaşık 2 log çevrimi boyunca sabit olan sıkışma eğrisinin eğimi, dane çatısının tekrardan sıkışmaya başlamasıyla artmaya başlamıştır. Bu tez çalışması kapsamında, ikincil konsolidasyon sırasında ($d\sigma'/dt=0$), oluşan ikincil sıkışmaların birkaç log çevrimi boyunca $\partial(de/dt)/\partial t=0$ olan karakterini değiştirerek, zamanla arttığı kısımdaki sıkışmalar, “üçüncül sıkışma” olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.13). Tablo 5.3’te, krip davranışının incelendiği gerilme seviyelerindeki bekleme süreleri (t) ile bu deneylerden elde edilen birincil konsolidasyonun tamamlanma (t_p) süreleri ve ikincil sıkışmaların tamamlanma süreleri (t_s) verilmiştir.

Tablo 5.3: Örselenmemiş, yoğrulmuş numunelerde yapılan krip deneylerinin süreleri

Numune Tipi	Düşey Gerilme, σ'_v (kPa)	Deney süresi t (gün)	t_p (dakika)	t_s (gün)
Örselenmemiş	25	70	60	13,8
	100	69	90	20,8
	400	69	90	34,3
Yoğrulmuş	25	234	180	18,9
	100	234	150	13,8
	200	234	160	18,8
	400	73	150	26,8

Tablo 5.3’te verilen Casagrande yöntemine göre belirlenen birincil konsolidasyonun tamamlanma süreleri (t_p), örselenmemiş numunelerde yoğrulmuş numunelere göre tüm gerilmelerde daha kısa bulunmuştur. Nitekim bu sonuç klasik konsolidasyon deneyleri ile elde edilenlerle de örtüşmekte olup örselenmemiş numunenin topaklaşmış yapısının suyun geçişine karşı yoğrulmuş numunedeki dağınık yapıya göre daha az direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Lambe ve Whitman (1969) örselenmemiş topak yapıdaki zemin elemanının aynı boşluk oranında dağınık hale getirilmiş bir yapıya göre daha yüksek dayanıma ve daha düşük sıkışabilirliğe sahip olduğunu belirtmiştir. Bunun nedeni olarak, topak yapıda daneler arası etkileşim ve düzensiz dizilimdeki danelerin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençten kaynaklandığını ileri sürmüştür. Bu çalışmada da örselenmemiş numunelerde üçüncül sıkışmaların başlaması ya da başka bir deyişle

ikincil sıkışmaların tamamlanması için gereken süre (t_s), yoğrulmuş numunelerde belirlenenden biraz daha geç olmuştur.

Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde, farklı gerilme seviyelerinde yapılan kripi deneyleri sonucunda elde edilen sıkışma indisi (C_c), ikincil sıkışma katsayısı (C_α), ikincil sıkışma oranı ($C_{\alpha\epsilon}$) ve üçüncül sıkışma oranı ($C_{\alpha\epsilon t}$) Tablo 5.4’de özetlenmiştir. Genel eğilim, her iki numune için de C_c , $C_{\alpha\epsilon}$ ve C_α eğrilerinin efektif gerilme ile artışı yönündedir. $C_{\alpha\epsilon t}$ değeri efektif gerilme artışı ile örselenmemiş numunede artarken, yoğrulmuş numunede azalmaktadır.

Tablo 5.4: Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde yapılan kripi deneylerinin sonuçları

Numune Tipi	Gerilme Kademesi σ'_v (kPa)	C_c	$C_{\alpha\epsilon}$	C_α	$C_{\alpha\epsilon t}$
Örselenmemiş numune	25	0,076	0,0016	0,0044	0,0085
	100	0,368	0,0034	0,0096	0,0236
	400	0,527	0,0055	0,0154	0,0308
Yoğrulmuş numune	25	0,201	0,0020	0,0103	0,0381
	100	0,441	0,0047	0,0133	0,0369
	200	0,538	0,0049	0,0141	0,0223
	400	0,511	0,0060	0,0162	0,0212

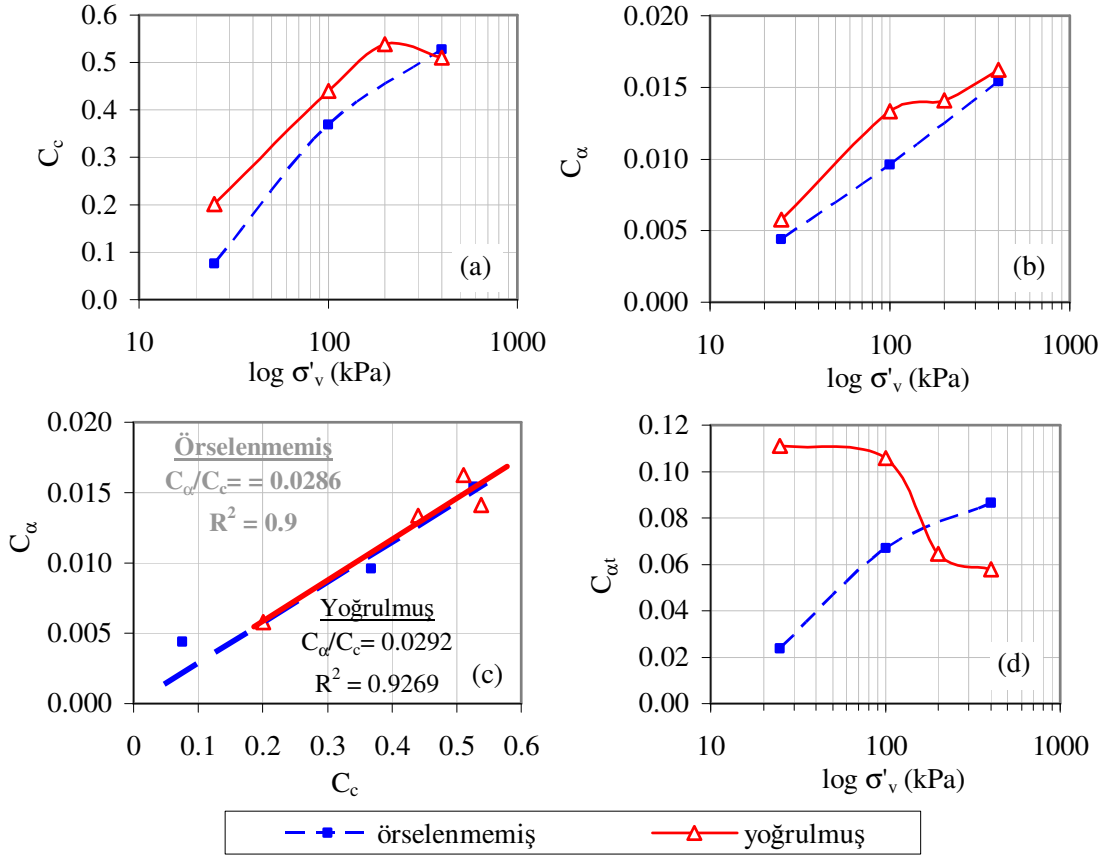
Üçüncü Bölümden de anlatıldığı üzere Mesai ve Godlewski (1977), her zemin için sıkışma indisi (C_c) ve ikincil sıkışma katsayısının (C_α) efektif gerilme arasında tekil bir ilişki olduğunu savunmaktadır. Bu hipotezi destekleyen birçok araştırmacı tarafından pek çok zemin türü için sabit C_α/C_c oranları verilmiştir. Bu grup deneylerde C_c ve C_α katsayılarının efektif gerilme ile değişimleri sırasıyla Şekil 5.10a ve Şekil 5.10b’de gösterilmiştir. Örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde 25 kPa ile 400 kPa arasında değişen düşey gerilme seviyelerinde yapılan kripi deneylerinden elde verilen C_α ile C_c arasında, Şekil 5.10c’den de görüleceği üzere regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayısı oldukça yüksek olan aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

$$\text{Örselenmemiş numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0286 \quad (R^2=0,90) \quad (5.1)$$

$$\text{Yoğrulmuş numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0292 \quad (R^2=0,93) \quad (5.2)$$

Sonuç olarak; örselenme ile tekil C_α / C_c oranında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Çevikbilen (1999) ve Yılmaz (2000), Samsun-Çarşamba mavi

kilinde farklı derinliklerden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen 25 adet krip deneyi sonucunda C_α / C_c oranının 0,034 ile 0,027 aralığında kaldığını ve $C_\alpha / C_c = 0,29$ seçilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu tez kapsamında yapılan çok sayıda deneyde elde edilen sonuç, daha önceki çalışmalarla üst üste düşmektedir.



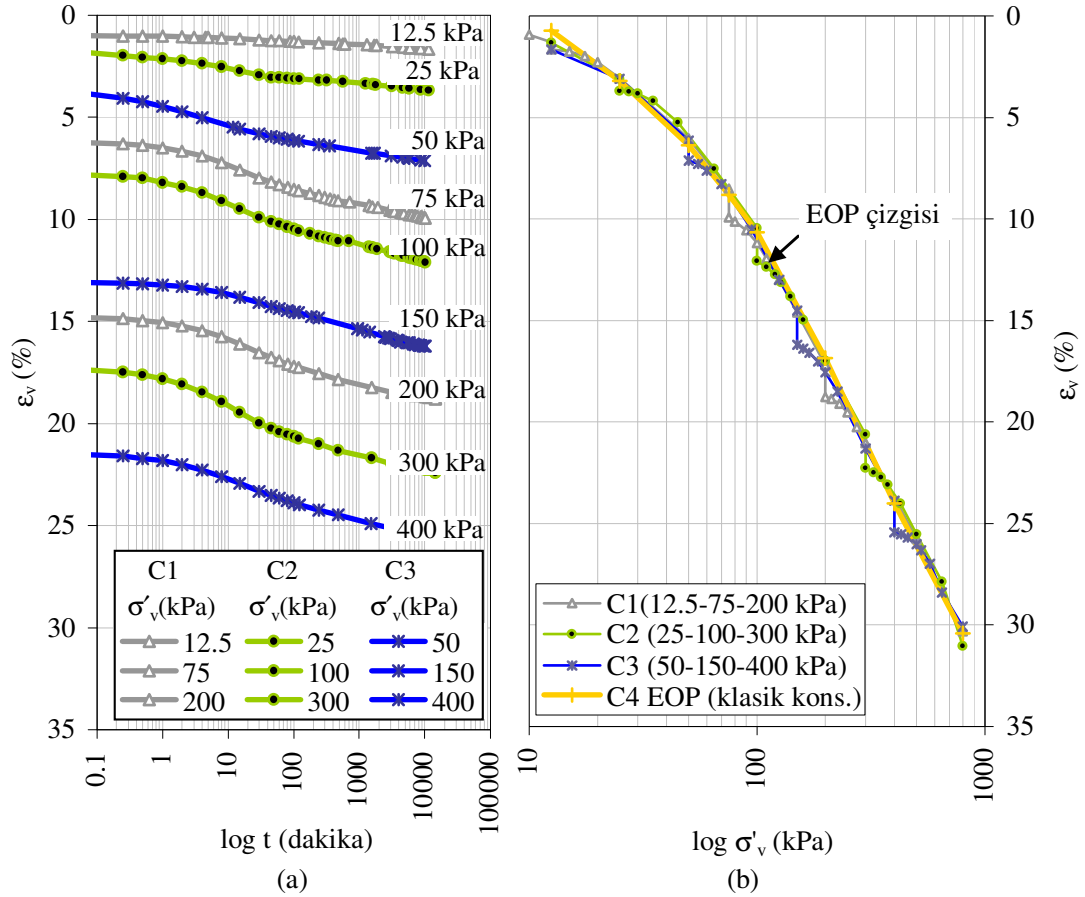
Şekil 5.10: Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde yapılan krip deneylerine ait a) C_α - $\log \sigma'_v$ b) $C_{\alpha\epsilon}$ - $\log \sigma'_v$ c) $C_{\alpha\epsilon}$ - C_c d) $C_{\alpha\epsilon}$ - $\log \sigma'_v$ ilişkisi

Lade (2001) örselenmenin bakir sıkışma kısmında ikincil sıkışma katsayısını azaltacağını vurgulamaktadır. Das (1985), Mesri'nin (1973) çalışmasına atıfta bulunarak killeri yoğurmanın yapıyı daha dağınık hale getirdiğini bunun da örselenmemiş numunelerle karşılaştırıldığında düşük konsolidasyon basınçlarında ikincil konsolidasyon katsayısında (C_α) bir azalma ile sonuçlandığını belirtmiştir. Ayrıca, C_α 'nın konsolidasyon basıncı ile bir maksimum değere ulaştığını, sonrasında azalarak normal konsolide numunelerle birleştiğini söylemiştir. Bu çalışmada ise yoğurarak dane çatısı dağınık hale getirilen numunelerde, C_α değeri düşük gerilmelerde %30 mertebesinde artarken, yüksek gerilmelerde yoğrulmuş numunenin

C_{α} değerleri örselenmemiş numuneden bulunan değerlere yaklaşmaktadır (Şekil 5.10b). Ancak, Şekil 5.10d’de verilen $C_{\alpha et} - \log \sigma'_v$ ilişkisi, efektif gerilmenin artması ile üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha et}$ değerinin örselenmemiş numune için azalarak arttığını, yoğrulmuş numunede ise azaldığını göstermiştir. Örselenmemiş numunede $C_{\alpha et}$ değerinin $C_{\alpha e}$ değerine oranı artarken, bu artış miktarı 5~7 kat aralığında sınırlı kalmıştır. Yoğrulmuş numunede ise $C_{\alpha et} / C_{\alpha e}$ oranı efektif gerilmenin artmasıyla 19’dan 4’e düşüş göstermiştir. Ayrıca örselenme, düşük gerilme seviyelerinde, $C_{\alpha et}$ değerini 4,5 kat artırırken, efektif gerilmenin artması ile bakir sıkışma kısmında örselenmemiş numunenin $C_{\alpha et}$ değerini %30 oranında azaltmıştır.

Üçüncü bölümde detayları ile anlatıldığı üzere, uzun süreli konsolidasyon deneylerinde kripi sonrasında ileriki yükleme durumlarında sıkışma davranışını modellemek amacıyla küçük yükleme adımlarıyla yüklemeye devam edilmiştir. Böylelikle $\epsilon - \log \sigma'_v$ eksen takımında çizilen konsolidasyon eğrilerinin, arazi bakir eğrisiyle birleşim şekline bakılmak suretiyle numunenin kripi sonrası yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde bir davranış gösterip göstermediği kontrol edilmiştir. Yılmaz (2000) örselenmemiş Samsun- Çarşamba mavi Kili üzerinde değişik gerilme seviyelerinde bir haftadan 6,5 aya kadar değişen sürelerde ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının incelendiği 25 adet kripi deneyi yapmıştır. Örnek olarak 4,5 m derinlikten alınan örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçları Şekil 5.11’de verilmiştir. $\epsilon - \log t$ eğrileri Şekil 5.11a’da verilen toplam 9 farklı gerilme seviyesinde bir hafta süre ile kripi gidilerek numunelerin değişen yük artım oranlarında tekrar yüklenmesi durumunda elde edilen $\epsilon - \log \sigma'_v$ eğrileri Şekil 5.11b’de gösterilmiştir. Şekil 5.11a’da kripi gerilmesi öncesinde $YAO=1$ ve kripi gerilmesi sonrasında $YAO<1$ olarak alınan ara yükleme kademelerine ait $\epsilon - \log t$ eğrileri gösterilmeyerek sadece kripi deneyine ait olanlara yer verilmiştir. Yılmaz (2000) benzer şekillerde farklı derinliklerden aldığı örselenmemiş numunelerin kripi sonrası sıkışma davranışın incelendiği uzun süreli konsolidasyon deneylerinde Şekil 5.11a’daki gibi herhangi bir çimentolanma veya yıkanma etkisine rastlamamıştır. Ancak, Yılmaz (2000) kripi sonrası davranışını incelediği tüm gerilme seviyelerinde de kripi deneylerini Şekil 5.11a’daki gibi ikincil sıkışmalar içerisinde kalacak şekilde sonlandırarak bir sonraki yüklemeye geçmiştir. Daha uzun süreli kripi bıraktığı numunelerde üçüncül sıkışma davranışının etkilerini mikro ölçekte değerlendirmek amacıyla SEM analizleri için üçüncül sıkışma

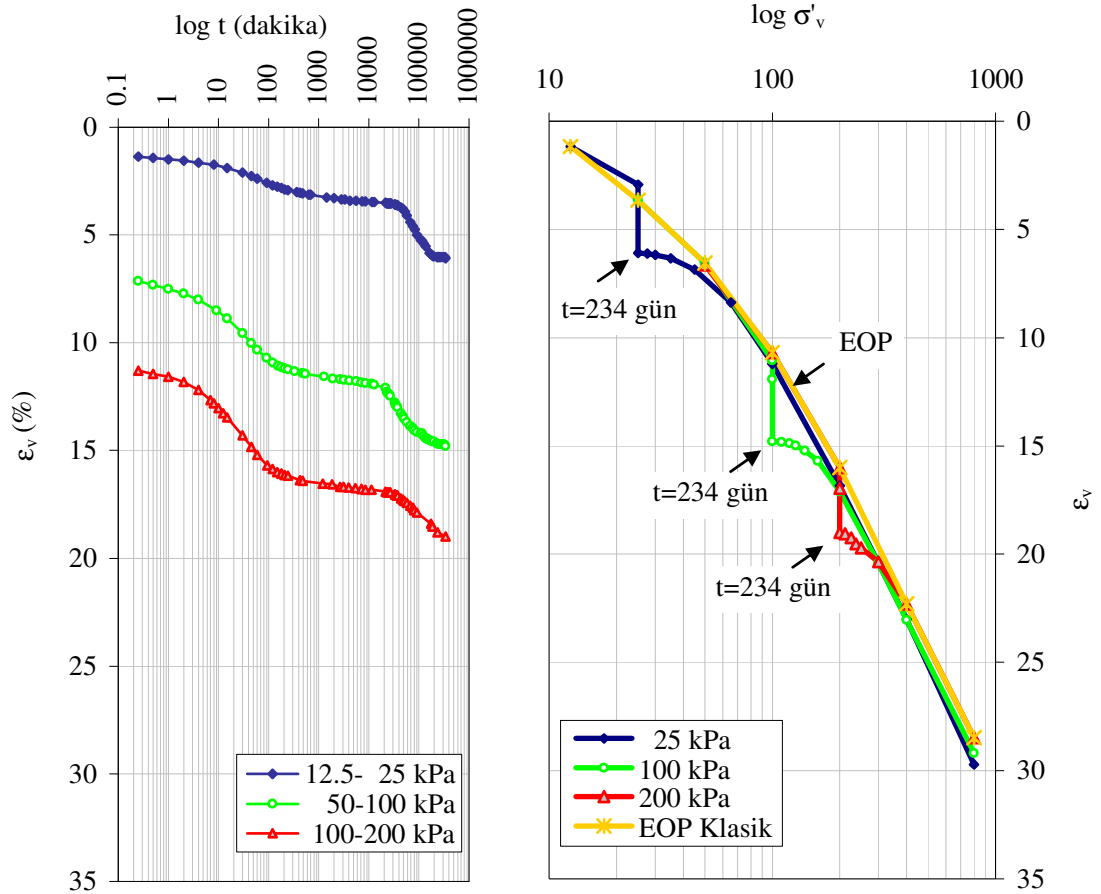
bölgesindeki numunelerin deneylerini sonlandırmıştır. Bu nedenle de üçüncül sıkışma sonrası ileriki yükleme kademelerindeki sıkışma davranışlarını çalışmasının kapsamı dışında tutmuştur.



Şekil 5.11: Örselenmemiş numunelerin ϵ_v - $\log \sigma'_v$ eğrisine bir örnek (Yılmaz, 2000)

Bu tez çalışması başladığı sırada eldeki mevcut numunelerin kurumaya başlaması ve sahadan yeni numune alınamaması sebebiyle örselenmemiş numunelerin üçüncül sıkışma sonrası davranışına bakılamazken, yoğrulmuş numunelerin üçüncül sıkışma sonrasında yüklenmeleri durumunda ortaya çıkan sıkışma davranışlarına yer verilmiştir (Şekil 5.12). Bu kapsamda, YAO=1 seçilerek yükleme kademeleri ile çıkılan 25 kPa, 100 kPa ve 200 kPa gerilme seviyelerinde yapılan 234 günlük kripi deneylerinin ardından küçük yük artırma oranlarıyla (YAO<1) 800 kPa gerilmesine kadar yüklenen yoğrulmuş numunelerde klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen birincil konsolidasyon sonu EOP eğrisiyle birleşim şekli incelenmiştir. Şekil 5.12a'da kripi gerilme öncesi ve sonrasındaki ara yükleme kademelerine ait ϵ -

log t eğrileri gösterilmeyerek sadece krip deneyine ait olanlara yer verilmiştir. Buna göre, yoğrulmuş numunenin üçüncül sıkışmaları sırasında tekrar yüklenmesi durumunda herhangi bir çimentolanma veya yıkanma ($\epsilon_v < \%1$) olgusuna da rastlanmamıştır.

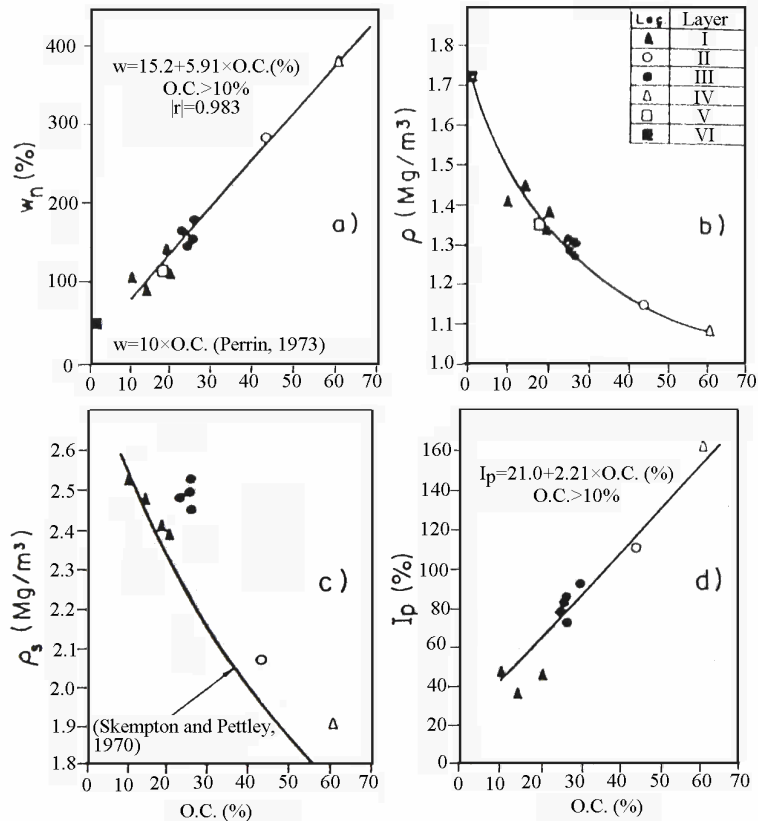


Şekil 5.12: Örselenmiş numunelerin ϵ_v -log σ'_v eğrisi

Tüm bu veriler ışığında, örselenmenin birincil konsolidasyonun tamamlanma (t_p) süresini uzattığı, c_v katsayısını düşürdüğü, önkonsolidasyon basıncını azaltarak belirsizleştirdiği, tekrar sıkışma indisini C_r artırdığı, sıkışma indisini C_c azalttığı, ikincil sıkışmanın tamamlanma süresini t_s kısalttığı, ikincil sıkışma katsayısını C_α %30 oranında artırdığı, üçüncül sıkışma katsayısını $C_{\alpha et}$ düşük gerilmelerde 4,5 kat artırırken, gerilmenin artmasıyla bu artışın kaybolduğu söylenebilir. Ayrıca örselenmemiş numunelerden belirlenen C_α/C_c oranı, örselenme ile değişmemiştir.

5.2 Organik Malzeme İçeriğinin Etkisi

Zeminlerde organik içerik; yapraklar, ince dallar, kökler gibi gözle görülebilecek kadar büyük ve 0,1 µm boyutuna kadar küçük çok geniş bir aralıktaki maddelerden oluşabilir. Organik içerik, biyolojik çürümenin ürünleri olan karbonhidratlar, proteinler (yağlar, reçineler), balmumları, hidrokarbonlar veya karbonlardan oluşan beş farklı gruptan birinde bulunabilir. Organik içeriğin çürümesi genellikle zemine koyu bir renk ve koku verir. Zemin ile organik içerik arasındaki reaksiyonlar ve etkileşimler nedeniyle zemindeki organik içerik konusu, hem kimyasal ve hem de fiziksel olarak oldukça karmaşıktır. Odell ve diğ. (1960) ince daneli zeminlerde organik karbon içeriğinde yüzde 1 veya 2 oranında oluşacak bir artışın kıvam limitleri üzerindeki etkisinin, zemindeki montmorillonit miktarında veya 2µm'dan daha küçük malzeme miktarında yüzde 10 veya 20'lik bir artışla eşdeğer etkiye olduğunu göstermişlerdir. Coutinho ve Lacerda (1987) Brezilya orijinli yumuşak bir kilin sınıflandırma özellikleri üzerinde organik malzeme içeriğinin etkisini Şekil 5.13'deki gibi vermişlerdir.



Şekil 5.13: Brezilya Juturnaiba organik kilinin sınıflandırma özellikleri üzerinde organik içeriğin etkisi (Coutinho ve Lacerda, 1987)

Yüksek su içeriklerinde çözünmüş organik içeriğin şişme davranışı gösterdiği bilinmekle birlikte, kuruma sırasında bu şişme özelliği yitirilerek zeminin Atterberg limitlerinde büyük bir azalma görülür. Nitekim Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi de (USCS), organik kil tanımını etüvde kurutulma sonrasında belirlenen likit limit değerinin, kurutma öncesinde belirlenen likit limit değerine oranı %75’den az olan kil zeminler için yapmıştır. Organik içerik zeminlerde yüksek plastisite, yüksek rötre, yüksek sıkışabilirlik, düşük hidrolik iletkenlik ve düşük dayanımına neden olabilmektedir (Oades, 1989). Organik içeriği yüksek olan zeminlerde genellikle kuruma ile plastisite ve sıkışabilirlik azalmaktadır (Mitchell, 2001).

Samsun-Çarşamba mavi kili USCS’e göre organik zemin sınıfına girmemesine karşın, yakma kaybına göre içeriğinde bulunan ağırlıkça %8 civarındaki organik malzemenin kilin zamana bağlı sıkışma davranışı üzerinde etkili olduğu ve üçüncül sıkışma davranışının da nedeni olduğu belirtilmiştir (Yılmaz 2000). Bu tez çalışması kapsamında, organik içeriğin Samsun-Çarşamba mavi kili’nin sıkışma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla organik içerikli ve organik içeriği yakılmış numunelerle çalışılmıştır. Numuneler “kuru yakma” ve “ıslak yakma” olarak adlandırılan iki farklı yöntemle organik içeriğinden arındırılmıştır. Dördüncü bölümde detayları ile anlatıldığı üzere kuru yakma, toz halindeki numunenin 450°C’deki etüvde 10 saat tutulması esasına dayanırken ıslak yakma, toz kil numunesinin %15’lik H₂O₂ çözeltisiyle kimyasal olarak organik içeriğinin çözünmesi işlemini kapsamaktadır. Organik içeriğinden arındırılan numuneler belirlenen likit limit değerinin 2 katı su içeriğinde karıştırılarak, Rowe hücresinde 25 kPa konsolidasyon basıncında konsolide edilmiştir. Böylece, konsolidasyon deneylerinde kullanılacak Rowe hücresinde hazırlanmış (RHH) numuneler elde edilmiştir. Bu üç tip numune üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri Tablo 5.5’te özetlendiği gibidir.

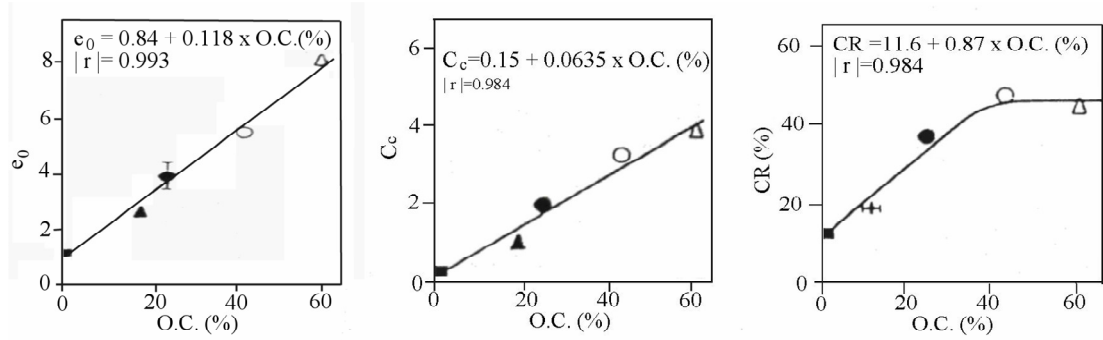
Tablo 5.5: Organik içeriği yakılmış numunelerin deney adetleri

Numune Tipi	Klasik konsolidasyon	Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon	Uzun süreli konsolidasyon deneyi
		Adedi	Adedi
Islak yakılmış	1	3	3
Kuru yakılmış	1	3	3
Yakılma öncesi RHH	1	7	5

Buna göre, bu alt başlık altında yapılan 3 klasik konsolidasyon deneyi, farklı hızlarda gerçekleştirilen 13 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon (SDHK) deneyi ve süreleri 3 aydan 1,5 seneye kadar değişen 11 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi olmak üzere toplam 27 adet konsolidasyon deneyi anlatılmaktadır.

5.2.1 Organik İçeriğin Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

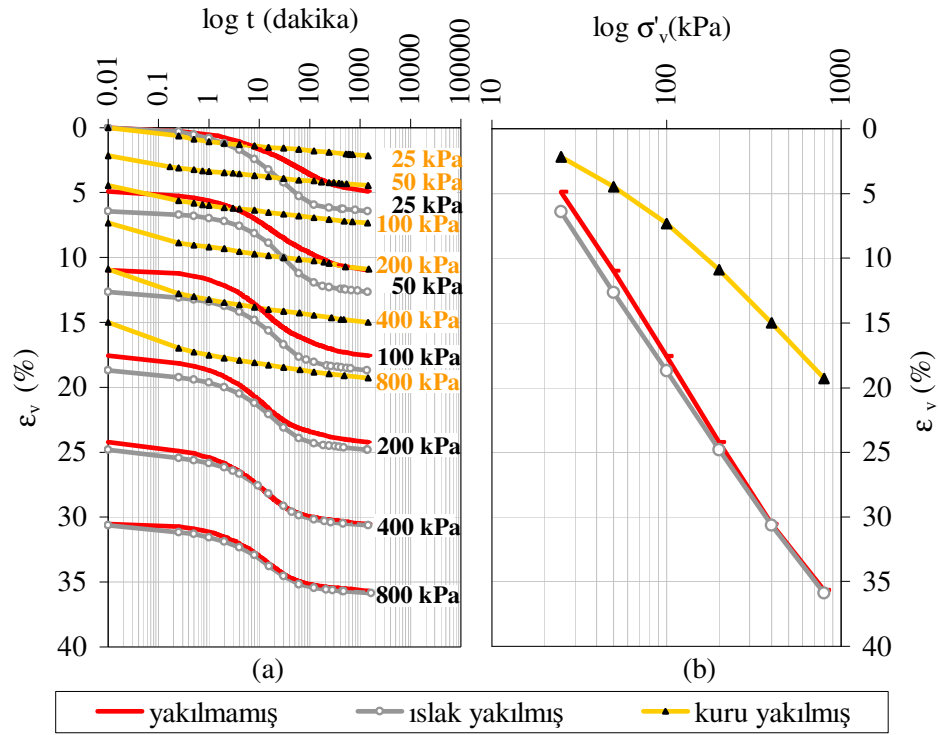
Şekil 5.13’de sınıflandırma özellikleri verilen kil için, içerisindeki yüksek organik içeriğin sonucu olarak sıkışabilirlikteki büyük artış Şekil 5.14’te gösterilmiştir. Şekil 5.14’teki CR değeri, $C_c/(1+e_0)$ değerinin yüzde cinsinden ifadesi olarak tanımlanan sıkışma oranıdır. Ayrıca, Şekil 5.14’te organik içeriğin artması ile başlangıç boşluk oranının (e_0) ve sıkışma indisinin (C_c) arttığı, CR(%) sıkışma oranının ise %40 organik içeriğe kadar artış göstererek daha büyük organik içerikte (O.C.) sabit kaldığı gösterilmiştir.



Şekil 5.14: Brezilya Juturnaiba organik kilinin sıkışabilirlik özellikleri üzerinde organik içeriğin etkisi (Coutinho ve Lacerda, 1987)

Bu alt başlıkta Samsun–Çarşamba mavi Kili’nin içeriğindeki organik malzemenin konsolidasyon özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, 25 kPa gerilme altında konsolide edilen RHH numuneler 5 cm çapında ve 2 cm yükseklikte paslanmaz çelik ringler içerisine alınmak suretiyle sabit düşey gerilme altında, tek eksenli kademeli olarak sıkıştırılmış ve bir boyutlu konsolidasyon özellikleri belirlenmiştir. Yakılma öncesinde RHH numunede 1,78 olan başlangıç boşluk oranının, ıslak yakma sonrasında 1,69 ve kuru yakma sonrasında ise 1,51’e düştüğü görülmüştür. Nitekim Şekil 5.14’te verildiği üzere Coutinho ve Lacerda (1987) çalışmalarında organik içeriğin azalması ile boşluk oranının azalacağını göstermişlerdir.

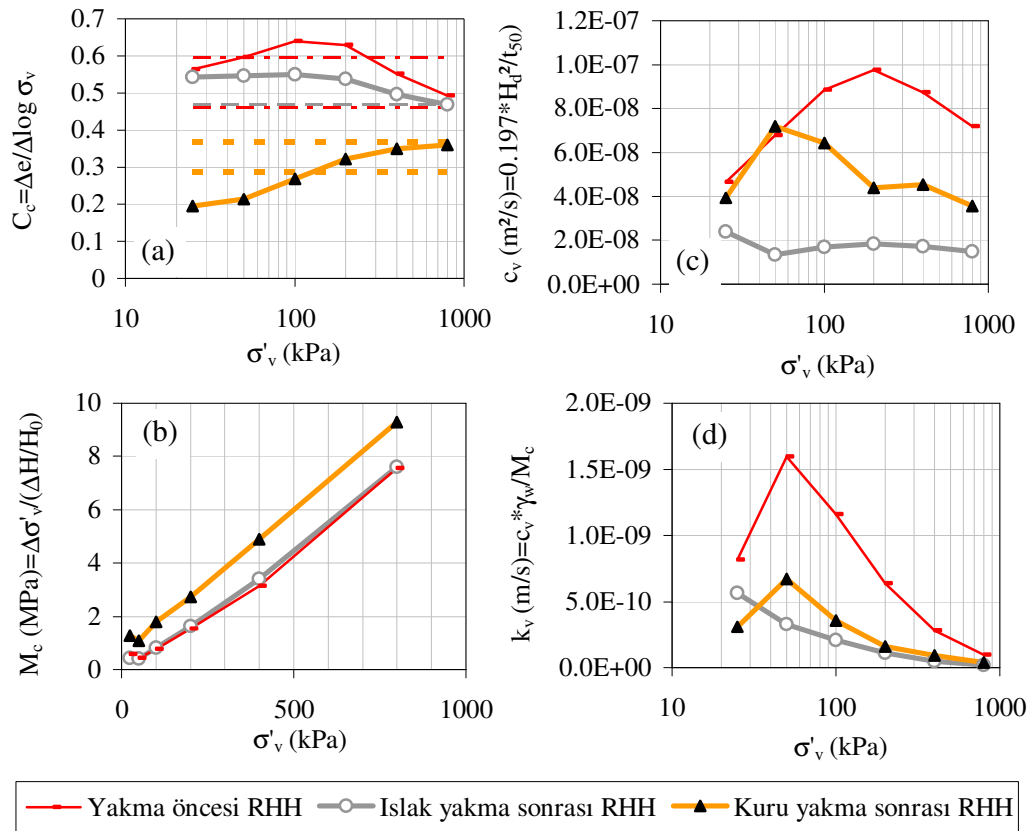
Yakma sonrası RHH numunelerin klasik konsolidasyon deneyleri sırasında çift taraftan su çıkışına izin verilirken, yakma öncesi RHH numunelerin klasik konsolidasyon deneyi sırasında, tabandan boşluk suyu basıncı okuması alınması sebebiyle drenaj tek taraftan sağlanmıştır. Deneyler esnasında numunelerin zamana bağlı sıkışma davranışları 1/500 hassasiyetli mikrometre okuma saati ile takip edilmiştir. Yük artırma oranının YAO=1 alındığı klasik konsolidasyon deneylerinde 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ve 800 kPa yükleme programı takip edilmiştir. Organik içeriğinden arındırılan numunelerin klasik konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen ϵ_v -log t eğrileri Şekil 5.15a'da ve ϵ_v -log σ'_v eğrileri Şekil 5.15b'de verilmiştir.



Şekil 5.15: Yakma öncesinde, ıslak ve kuru yakma sonrası RHH numunelerinde yapılan klasik konsolidasyon deneylerine ait a) ϵ_v -log t b) ϵ_v -log σ'_v eğrileri

Üç numunenin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma indisi (C_c), konsolidasyon katsayısı (c_v), sıkışma modülü (M_c), düşey geçirgenlik (k_v) değerleri ve bu değerlerin düşey efektif gerilme ile değişimleri Şekil 5.16'te verilmiştir. Buna göre, numune içerisindeki organik içeriğin ıslak yakma yöntemi ile yakılması C_c değerini ortalama %10, kuru yakma ise ortalama 2,2 kat azaltmıştır (Şekil 5.16a). Numunelerin yakma işlemi öncesinde ve sonrasında elde edilen C_c değerlerinin yakma işlemiyle değişen kıvam limitlerine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Nitekim

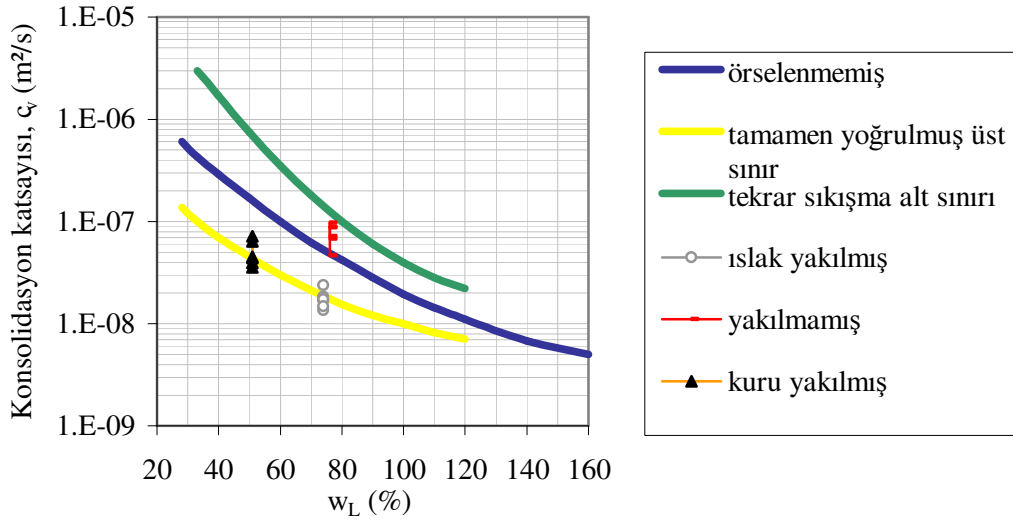
çeşitli araştırmacılarca kıvam limitleri ile sıkışma indisi arasında geliştirilen birçok bağıntı ikinci bölümde, Tablo 2.3'te verilmiştir. Buna göre, likit limit değerleri yakma öncesinde ortalama %76, ıslak yakma sonrasında %74 ve kuru yakma sonrasında ise %51 bulunan numunelerin C_c değerleri incelendiğinde, normal konsolide killeri için Terzaghi & Peck (1967) ile yoğrulmuş killeri için Skempton (1944) tarafından önerilen Tablo 2.3'teki bağıntılardan elde edilen değerlerin çoğunlukla arasında kalmıştır. Şekil 5.16b'de de görüldüğü üzere organik içeriğin ıslak yakma yöntemiyle uzaklaştırıldığı numunede M_c değerinde önemli bir değişiklik gözlenmezken, kuru yakılan numunede M_c değerinde ortalama 1,4 katlık bir artış belirlenmiştir.



Şekil 5.16: Yakma öncesi, ıslak ve kuru yakma sonrası RHH numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) C_c - $\log \sigma'_v$ b) M_c - σ'_v c) c_v - $\log \sigma'_v$ d) k_v - $\log \sigma'_v$ eğrileri

Numunelerin drenaj koşulları farklı olduğu için Şekil 5.15a'da verilen ϵ_v - $\log t$ eğrilerinden belirlenecek birincil konsolidasyon tamamlanma sürelerinin (t_p) karşılaştırılması yerine numunelerin konsolidasyon katsayılarını (c_v) değerlendirmek daha doğru olacaktır. Buna göre, Şekil 5.16c'de verilen c_v - konsolidasyon basıncı (σ'_v) ilişkisi incelendiğinde organik içeriğin yakılmasının c_v değerini ıslak yakılma

yönteminde ortalama 4,5 kat, kuru yakma yönteminde ise 1,2 kat azalttığı görülmüştür. Yakma işlemi sonrasında likit limit değerleri azalan numunelerin c_v değerlerini Şekil 2.10'da yerine koyarsak RHH numunelerin tamamının örselenmemiş numuneler için tanımlanan aralıkta kaldığı anlaşılr (Şekil 5.17). İkinci bölümde anlatıldığı üzere (2.17) bağıntısından belirlenecek düşey geçirgenlik katsayısı (v) değerlerinin değişiminin verildiği Şekil 5.16d'de her iki yöntemle organik içeriğin uzaklaştırmanın k_v 'yi düşürdüğü görülmektedir. Organik içerikli ve organik içeriksiz olarak değerlendirilen numunelerin k_v değerleri arasındaki farkın düşük konsolidasyon basınçlarında en büyük olurken, konsolidasyon basıncının artması ile bu farkın hızla azaldığı da görülmüştür. Ayrıca, k_v değerlerindeki bu azalma ıslak yakma yönteminde ortalama 3 kat, kuru yakma yönteminde ise 2 kat bulunmuştur.



Şekil 5.17: Yakma öncesi, ıslak ve kuru yakma sonrası c_v - w_L ilişkisi

Sonuç olarak; yakma kaybı ($YK=\%8$) olan Samsun-Çarşamba mavi kili numunelerinin organik içeriğinin yakılması ile başlangıç boşluk oranının azaldığı, kıvam limitlerinin düştüğü, konsolidasyon parametrelerinden C_c , c_v , k_v değerlerinin azaldığı ve M_c değerinin de arttığı anlaşılmıştır. Nitekim Mitchell ve Soga (2005), organik malzemenin zeminin katılığı ve dayanımı üzerindeki etkisinin çoğunlukla organik malzemenin çözünmüş olması veya donatı gibi davranan liflerden oluşmasına dayandığını savunmuşlardır. İlk zamanlarda organik malzemenin su içeriği ve plastisiteyi yükseltmesinin sonucu olarak drenajsız dayanımı, rijitliği ve sıkışma modüllerini düşürdüğü, sonraki zamanlarda liflerin donatı gibi davranarak dayanımı artırdığı belirtilmiştir.

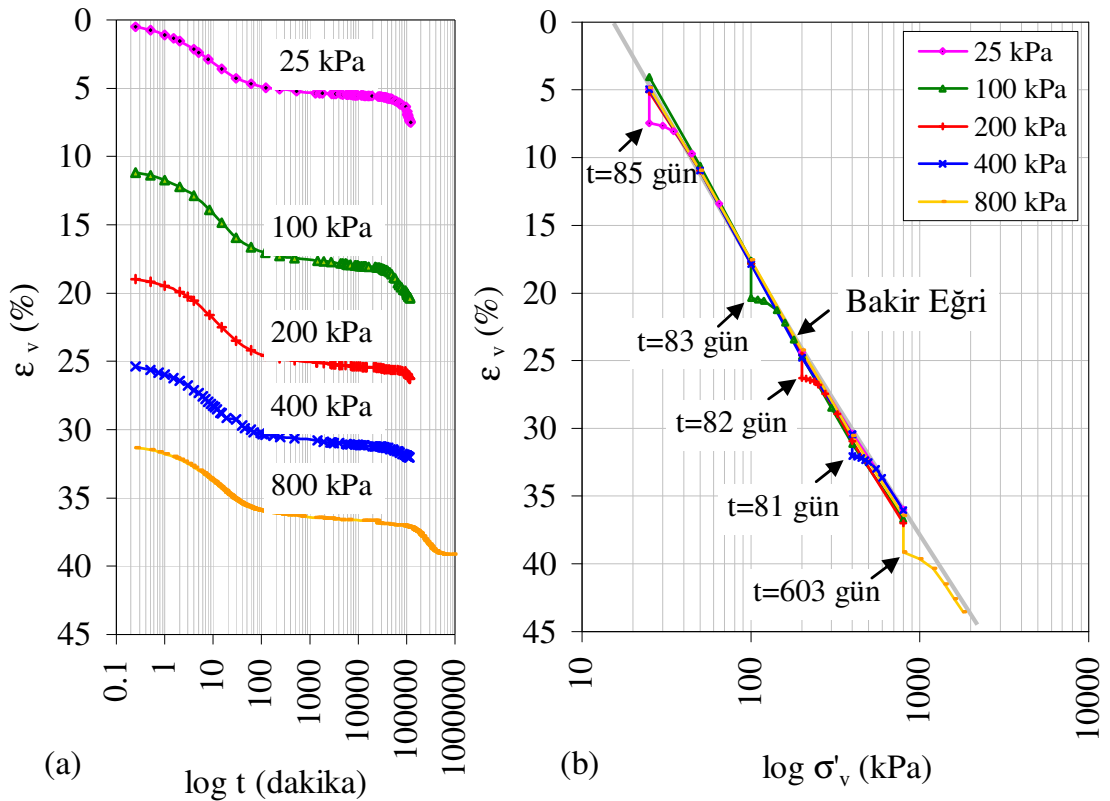
5.2.2 Organik İeriğın Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Zeminlerin sabit bir efektif gerilme altında yüklenmesiyle elde edilen ε_v -log t grafikleri incelendiğinde, zemin cinsine bağılı olarak oluşacak ikincil sıkışma davranışının, zamanla azalabileceğı, sabit kalabileceğı veya artabileceğı görülmüştür. Bazı zemin türlerinde başlangıçta sabit olarak devam eden ikincil sıkışmaların, belirli bir süre sonra artış göstererek üçüncül sıkışma davranışı sergiledikleri 3. Bölümde konu edilmiştir. Bu ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının özellikle turba ve organik zeminlerde önemli mertebelere ulaşabildiğı bilinmektedir (Edil ve Dhowian, 1979). Bu bakımdan mühendisin bu tip zeminlerle uğraşırken toplam oturma analizlerine yapı ömrünü de göz önüne alacak şekilde beklenen ikincil ve üçüncül sıkışma değerlerini de dâhil etmesi gerekmektedir. Ancak, son yıllarda yapılan çalışmalar birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre organik zemin sınıfına girmediğı halde yakma kaybına göre organik içeriğı LOI=%8 civarında bulunan Samsun-Çarşamba mavi kili gibi kökeninde Ca-Montmorilonit olan bazı zemin türlerinin de üçüncül sıkışma davranışları ortaya koyabildiklerini göstermiştir (Yılmaz, 2000). Bu çalışmaların devamı niteliğindeki bu tez kapsamında Samsun-Çarşamba mavi kili numunelerinin drenajlı kriپ davranışına organik içeriğın etkisini belirlemek amacıyla tamamı RHH numunelerde uzun süreli konsolidasyon deneyleri programlanmıştır. Bu kapsamda, organik içerikli ve organik içeriğinden arındırılan numunelerde Tablo 5.6'da verildiğı üzere 85 günden 603 güne kadar değışen sürelerde 25 kPa'dan, 800 kPa gerilme seviyesine kadar farklı gerilme seviyelerinde kriپ deneylerini içeren uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Tablo 5.6: İkinci grup deneylerde kriپ deneylerinde bekleme süreleri

Numune Tipi	Gerilme Değeri (kPa)	Bekleme süresi (gün)
Yakılma öncesinde RHH numune	25	85
	100	83
	200	82
	400	81
	800	603
Islak yakılmış RHH numune	25	510
	100	510
	400	510
Kuru yakılmış RHH numune	25	251
	100	250
	400	250

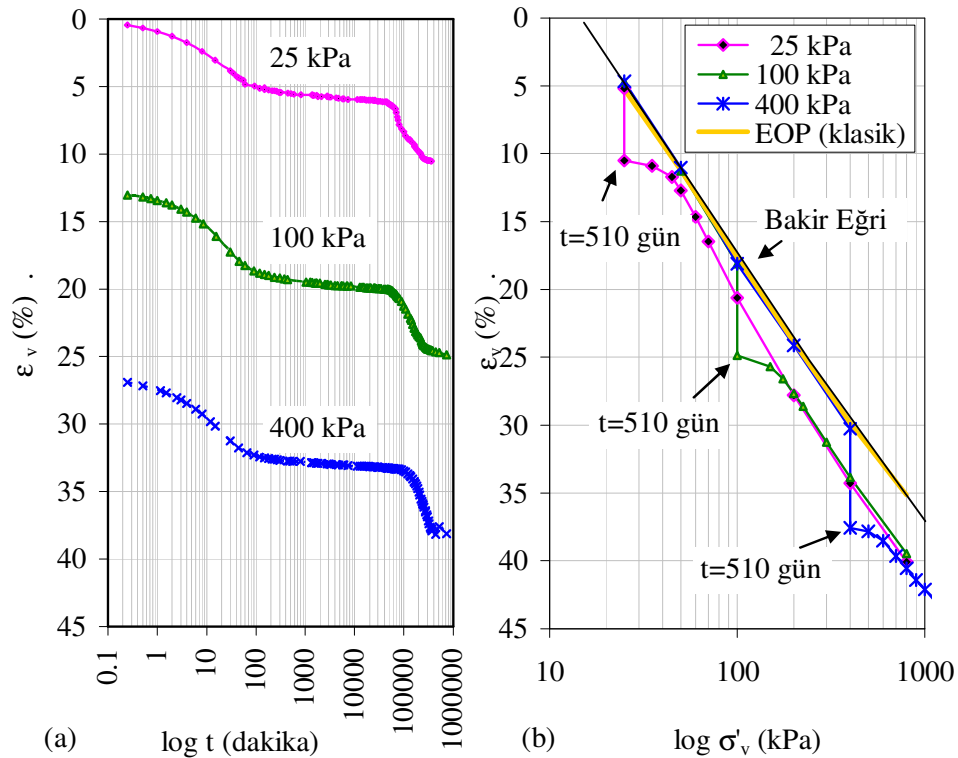
Her krip deneyi, deneyin yapıldığı gerilme seviyesi öncesindeki ve sonrasındaki yükleme kademeleriyle birlikte bir uzun süreli konsolidasyon deneyini oluşturmaktadır. Bu alt başlıkta sırasıyla yakılma öncesinde, ıslak yakma sonrasında ve kuru yakma sonrasında RHH numunelerin uzun süreli konsolidasyon davranışları incelenmiş ve birlikte yorumlanmıştır. Yakılma öncesinde, RHH numuneler üzerinde gerçekleştirilen 5 adet krip deneylerine ait ϵ_v -log t ilişkileri Şekil 5.18a'da, gösterilmiştir. Krip deneylerinin öncesindeki ve sonrasındaki yükleme kademelerine ait ϵ_v -log t eğrileri grafiğin karışmaması açısından gizlenirken, bu kademeleri de içeren uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait ϵ_v -log σ'_v ilişkileri Şekil 5.18b'de gösterilmiştir. Krip gerilme seviyelerinde Casagrande yöntemine göre belirlenen birincil konsolidasyonun tamamlanma süreleri $t_p = 50 \sim 80$ dakika aralığında değişirken, ikincil sıkışmaların tamamlanma süreleri $t_s = 50 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$ dakika = 34~68 gün olarak belirlenmiştir. Bu durumda, üçüncül sıkışmaların yaklaşık ikinci ayın içerisinde oluşmaya başladığı söylenebilir.



Şekil 5.18: Yakılma öncesi RHH numunelerin a) krip deneylerine ait ϵ_v -log t ilişkisi
b) uzun süreli konsolidasyon deneyine ait ϵ_v -log σ'_v ilişkisi

Şekil 5.18b’de verilen uzun süreli konsolidasyon deneyine ait ε_v -log σ'_v ilişkisi incelendiğinde, beş farklı gerilme seviyesinde gerçekleştirilen krip deneyi öncesinde sıkışma eğrilerinin klasik konsolidasyon deneyindeki birincil konsolidasyon sonundaki sıkışma miktarlarından belirlenen arazi bakir eğrisi ile çakıştığı görülmektedir. Krip deneyi sonrasındaki gerilme kademelerinde de sıkışma eğrisinin arazi bakir eğrisini aşmadığı ve bu eğriyle düzgün bir şekilde birleştiği görülmektedir. Bu bilgiler ışığında, numunede herhangi bir çimentolanma veya yıkanma olgusuna rastlanılmamıştır. Krip deneylerindeki yaklaşık 80 günlük bekleme süresi, 800 kPa gerilmesinde 603 güne kadar çıktığında da bu sonuç değişmemiştir.

Organik içeriğinin giderilmesi amacıyla ıslak yakma yönteminin tercih edildiği numuneler üzerinde üç adet uzun süreli konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, belirlenen bir gerilme seviyesinde 510 gün beklenerek krip deneyi yapılmıştır. 25 kPa, 100 kPa ve 400 kPa konsolidasyon basınçlarında gerçekleştirilen krip deneyleri öncesinde YAO=1 ve yük artırma süresi de klasik konsolidasyon deneyinden belirlendiği üzere YAS=150 dakika olarak uygulanmıştır. Şekil 5.19a’daki ε_v - log t grafiğinde, krip deneylerine ait zamana bağlı sıkışma davranışları verilmektedir.

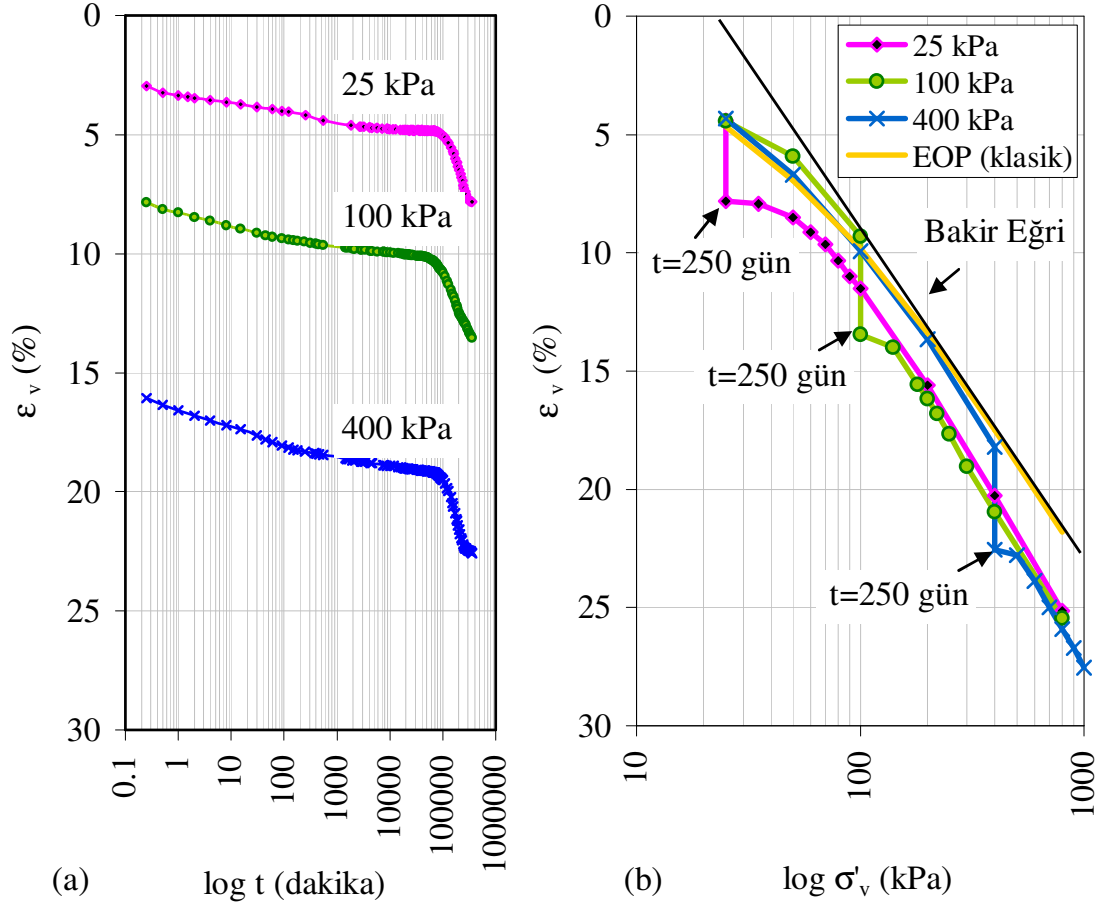


Şekil 5.19: Islak yakılarak hazırlanmış RHH numunelerin krip deneyi

Buna göre, kip gerilme seviyesinde birincil konsolidasyonun tamamlanma sürelerinin $t_p=80\sim110$ dakika, ikincil konsolidasyonun tamamlanarak üçüncül sıkışmanın başlangıcının ise $t_s=60000\sim105000$ dakika = 42~70 gün olduğu görülmektedir. Krip sonrasında sıkışma davranışını görmek amacıyla $YAO<1$ olarak alınmış ve yüklemeye devam edilmiştir. Şekil 5.19b’de 510 günlük krip deneyinden sonra tekrar yüklenen numunelerin, klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen birincil konsolidasyon sıkışma eğrisinin altında yeni bir sıkışma eğrisi takip ettiği görülmüştür. Krip sonrasındaki yüklemeler için numunenin sıkışabilirliğinin artma eğilimi gösterdiği söylenebilir.

450°C’de yakılarak organik içeriğinden arındırılmaya çalışılan numuneler üzerinde ise her birinde 25 kPa, 100 kPa ve 400 kPa gerilme seviyelerinden birinde 250 günlük krip deneyi bulunan 3 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda, kripe gidilecek gerilme öncesinde $YAO=1$ alındığı yükleme kademelerinde numunenin sadece birincil konsolidasyonuna izin vermek amacıyla $YAS=150$ dakika olarak uygulanmıştır. Belirlenen gerilme değerlerinde kripe terk edilen numunelerin zamanla sıkışma davranışı $\epsilon_v\text{-log } t$ grafiğinde Şekil 5.20a’da gösterildiği gibidir. İkincil sıkışmalar sırasında birkaç log çevrimi boyunca eğrilerin eğimi sabit bir oranda azalırken, 25 kPa’da yapılan krip deneyinde 54 gün, 100 kPa’da 42 gün ve 400 kPa’da 48 gün sonra eğrinin eğiminde ani bir artış başladığı ve üçüncül sıkışma sürecinin ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde krip gerilme seviyesi öncesindeki yükleme kademelerinden elde edilen EOP $\epsilon_v\text{-log } \sigma'_v$ eğrisinin klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen EOP $\epsilon_v\text{-log } \sigma'_v$ eğrisi ile çakıştığı görülmüştür (Şekil 5.20b). 250 günlük krip deneyi sonrasında tekrar yüklenmesi durumunda sıkışma davranışının incelendiği ileriki yükleme kademelerinde $YAO<1$ alınmıştır. Bu yükleme kademelerine ait EOP $\epsilon_v\text{-log } \sigma'_v$ eğrilerinin klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen EOP $\epsilon_v\text{-log } \sigma'_v$ bakir sıkışma eğrisinin altında yeni bir sıkışma eğrisi takip ettiği görülmüştür. Buna göre, ikincil sıkışma sırasında numunenin dane yapısının bozulduğu ve sıkışabilirliğinin artma eğilimi gösterdiği değerlendirilmesi yapılmıştır.

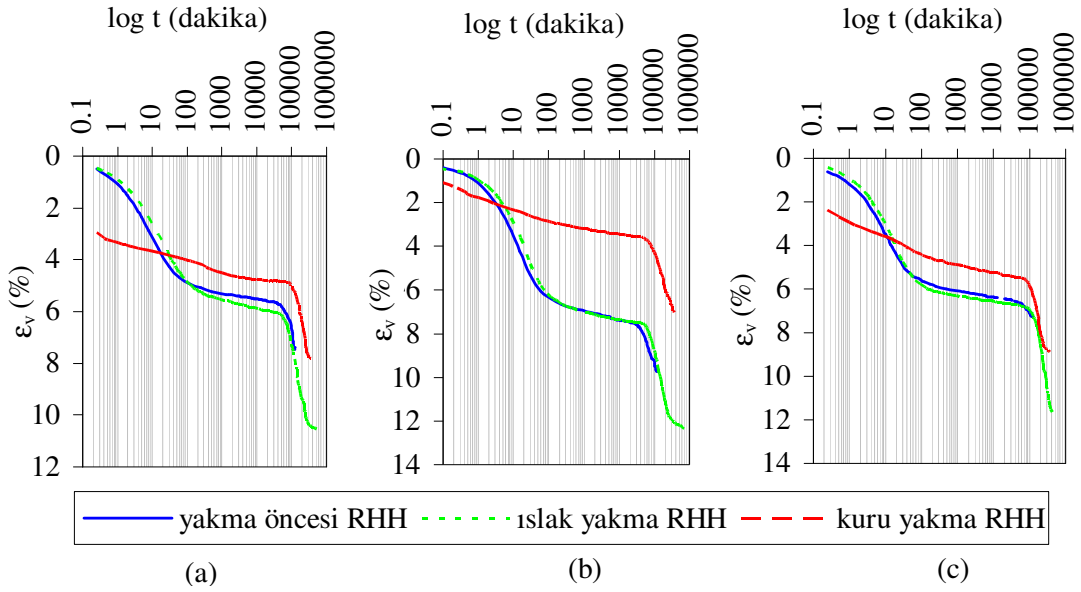


Şekil 5.20: Kuru yakılarak hazırlanan RHH numunelerin a) kripi deneylerine ait ϵ_v - $\log t$ ilişkisi b) uzun süreli konsolidasyon deneyine ait ϵ_v - $\log \sigma'_v$ ilişkisi

Yakılma öncesi RHH, ıslak yakma sonrası RHH ve kuru yakma sonrası RHH numunelerin uzun süreli konsolidasyon deneyleri esnasında kripi deneylerinden elde edilen birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma parametreleri Tablo 5.7'de özetlendiği gibidir. Buna göre yakma işlemiyle organik içeriğinden arındırılan numunenin C_c ve $C_{\alpha et}$ değerleri azalmış, kuru yakmada $C_{\alpha e}$ ve C_α azalırken ıslak yakmada bir miktar artış gözlenmiştir. Ayrıca, yakma öncesi ve yakma sonrası RHH numuneler üzerinde 25 kPa seviyesinde gerçekleştirilen kripi deneylerine ait ϵ_v - $\log t$ eğrileri Şekil 5.21a'da, 100 kPa'daki Şekil 5.21b'de ve 400 kPa'daki Şekil 5.21c'de verilmiştir. Buna göre, numunelerin t_s ikincil konsolidasyon sonu süreleri karşılaştırıldığında ıslak yakma ve kuru yakmanın üçüncül sıkışmaların başlamasını geciktirdiği görülmüştür.

Tablo 5.7: Yakma öncesinde ve yakma sonrasında RHH numunelerin krip deneyi sonuçları

Numune Tipi	Gerilme Kademesi (kPa)	C_c	$C_{\alpha\varepsilon}$	C_α	$C_{\alpha\varepsilon t}$
Yakma öncesi RHH numune	25	0,588	0,0031	0,0088	0,023
	100	0,675	0,0041	0,0119	0,045
	200	0,660	0,0038	0,0014	0,055
	400	0,592	0,0031	0,0091	0,024
	800	0,545	0,0035	0,0092	0,026
Islak yakılmış RHH numune	25	0,425	0,0039	0,010	0,016
	100	0,624	0,0051	0,015	0,026
	400	0,571	0,0030	0,008	0,010
Kuru yakılmış RHH numune	25	0,138	0,0019	0,005	0,013
	100	0,280	0,0031	0,008	0,028
	400	0,378	0,0038	0,010	0,017



Şekil 5.21: Organik içeriği değiştirilen numunelerin a) 25 kPa, b) 50 kPa ve c) 100 kPa gerilmesindeki krip deneyleriyle belirlenen ε_v -log t ilişkileri

Elde edilen bu sonuçların daha sağlıklı yorumlanması açısından tüm deneylerden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla, klasik konsolidasyon ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinde tüm yükleme kademelerine ait C_c değerleri Şekil 5.22a'da, bir log çevrimi boyunca sabit efektif gerilmenin yakalandığı yükleme kademelerinden elde edilen ikincil sıkışma katsayıları (C_α) Şekil 5.22b'de ve C_c/C_α oranları Şekil 5.22c'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.22d'de

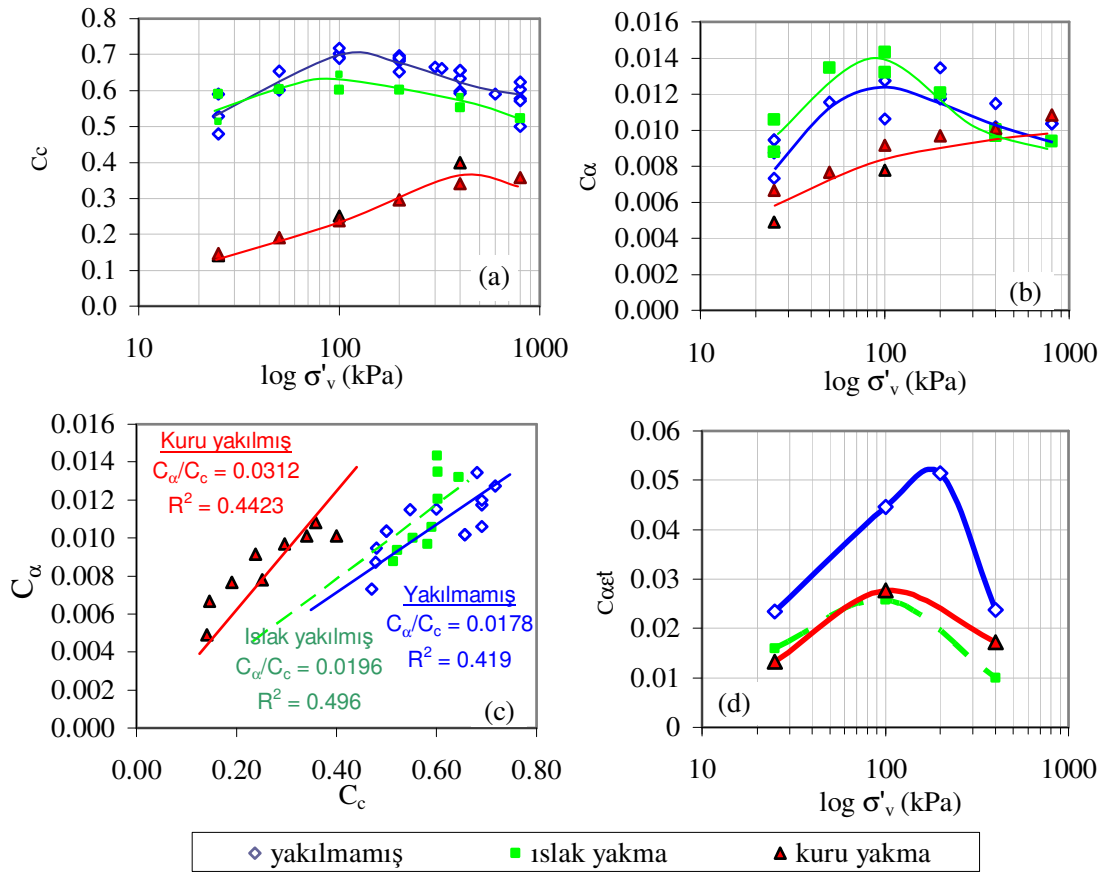
krip deneylerinden belirlenen üçüncül sıkışma oranlarının efektif gerilmenin logaritması ile değişimleri de gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 5.22a'dan yakma öncesi RHH numunede sıkışma indisi (C_c) değerlerinin yakma sonrasında düşüş gösterdiği ve yakma öncesi RHH numunede 100 kPa gerilme seviyesinde beliren pikin ıslak yakma eğrisinde de gözlenirken, kuru yakma eğrisinde hiç oluşmadığı ve bu numunede C_c 'nin efektif gerilme ile giderek arttığı belirlenmiştir. Şekil 5.22b'de ikincil sıkışma oranı (C_α) değerinin yakma öncesi numunede efektif gerilme artışıyla arttığı ve 50kPa~200kPa aralığında bir tepe yaptıktan sonra azaldığı görülmüştür. Islak yakmada ise benzer bir eğri oluşurken tepe noktasında bir miktar büyüme gözlenmiştir. Kuru yakılmış numunenin C_α değerinin ise efektif gerilmenin logaritması ile azalarak arttığı anlaşılmıştır. Her üç numunenin de ikincil sıkışabilirliklerinin 800 kPa gerilmesinde birbirine yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca, organik içerikli ve organik içeriği ıslak veya kuru yakma yöntemlerinden birisiyle yakılan numunelerde 25 kPa ile 800 kPa arasında değişen düşey gerilme seviyelerinde elde edilen ilişki Şekil 5.22c'de verilmiştir. Buna göre C_α ile C_c arasında yapılan regresyon analizi sonucunda aşağıda verilen korelasyonlar elde edilmiştir.

$$\text{Yakma öncesi numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0178 \quad (R^2=0,44) \quad (5.3)$$

$$\text{Islak yakılmış numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0196 \quad (R^2=0,50) \quad (5.4)$$

$$\text{Kuru yakılmış numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0312 \quad (R^2=0,42) \quad (5.5)$$

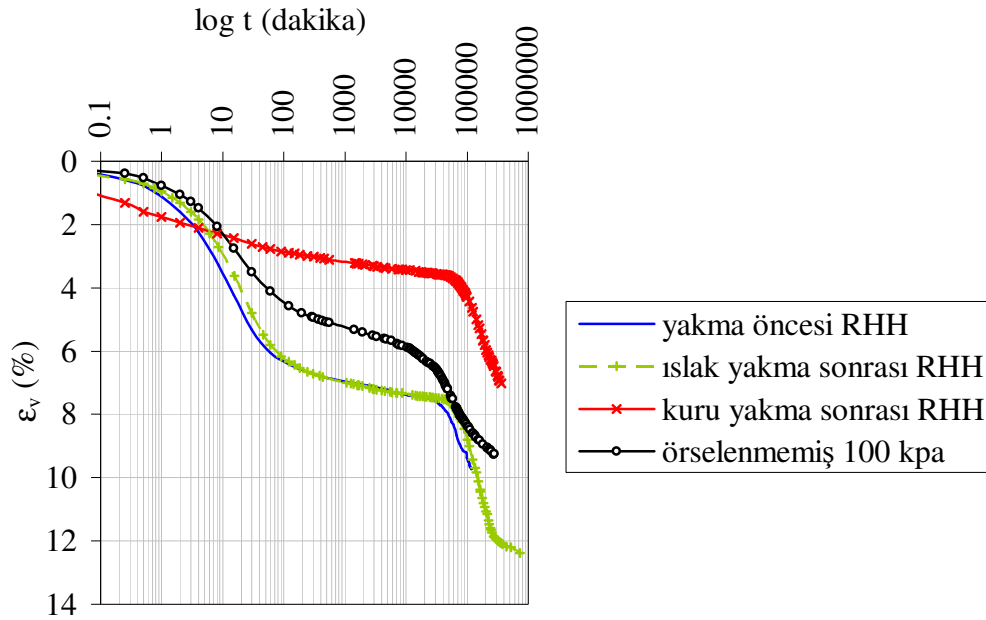
Organik içeriğin yakılması ile C_α/C_c oranlarında ıslak yakılan numunede %10'luk, kuru yakılan numunede de %75 oranında bir artış gözlenmiştir. Ancak, krip deneylerinden elde edilen sonuçlar ikincil sıkışma oranının zamanla arttığını ve üçüncül sıkışmaların oluştuğunu göstermektedir. Yakma öncesinde RHH numunelerinin üçüncül sıkışmaları sırasında elde edilen $C_{\alpha et}$ değerleri logaritma efektif gerilme ile artarak 100~200 kPa aralığında bir tepe yapmış ve daha büyük gerilmelerde azalmıştır (Şekil 5.22d). Organik içeriğin ıslak veya kuru olarak yakılan numunelerde ise benzer bir davranış gözlenirken $C_{\alpha et}$ değerlerinde ortalama %38'lik bir azalma gözlenmiştir. Bu sonuç, zemin içerisinde bulunan organik içeriğin üçüncül sıkışmalar üzerinde göz ardı edilemeyecek ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.22: Organik içeriği değiştirilmiş numunelerin a) C_c - $\log \sigma'_v$ b) C_α - $\log \sigma'_v$ c) C_α - C_c d) $C_{\alpha et}$ - $\log \sigma'_v$ ilişkileri

Ancak unutulmaması gereken, bu parametrik çalışma sırasında RHH numunelerle çalışıldığıdır. Bu amaçla yakma öncesi RHH numunelerin referans alınarak yapılan yorumların yanı sıra, 60°C'deki etüvde kurutulduktan sonra toz haline getirilmelerinin ardından likit limit değerinin iki katı su muhtevasında RHH bu numunelerin ikincil sıkışma katsayısının sıkışma indisine oranı 0,0178 iken örselenmemiş numunelerin C_α/C_c oranının 0,0286 olduğu görülmüştür. Bu durumda 40 # ASTM eleğinden geçecek şekilde organik içeriğin ufalanmasının da bu oranı küçülttüğü düşünülmektedir. Ayrıca, üçüncül sıkışmalar cinsinden numuneler karşılaştırılacak olursa, $C_{\alpha et}$ değerlerinin örselenmemiş numunede normal konsolide kısmı için 0,0236~0,0308 aralığında kaldığı ve ortalamasının 0,0272 civarında olduğu, RHH numunede ise 0,023~0,055 aralığında değerler aldığı ve ortalamasının 0,0346 olduğu bulunmuştur. Bu durumda, numunenin toz haline getirilmesi ile numunenin ikincil sıkışma esnasında yapamadığı sıkışma miktarını üçüncül sıkışmalar sırasında yaptığı söylenebilir. Nitekim örselenmemiş numunelerin ikincil

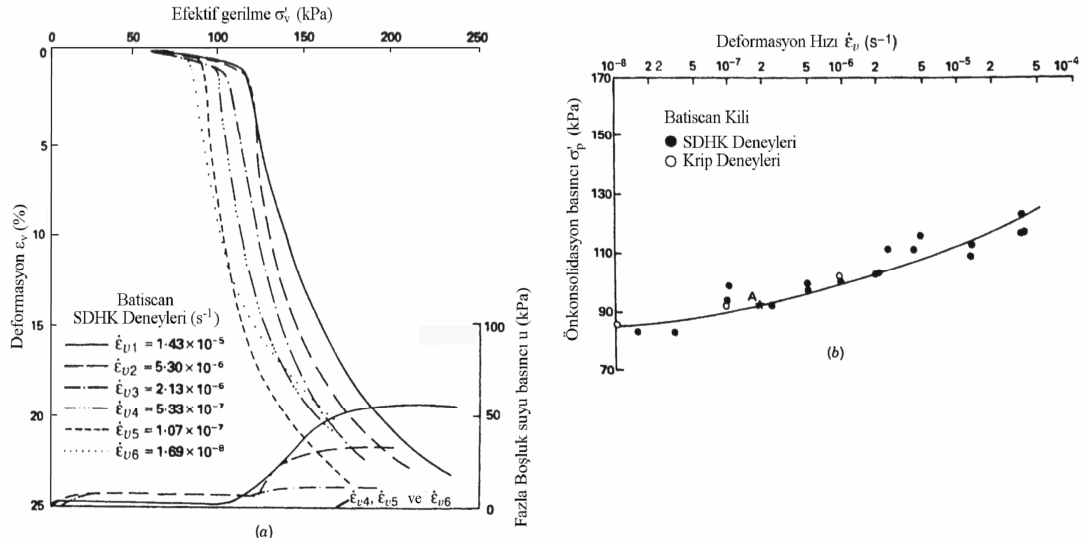
sıkışmaları $t_s=13\sim34$ gün arasında değişirken, RHH numunede bu süre $t_s= 34\sim68$ gün bulunmuştur. Bu nedenle, bu parametrik çalışma ile belirlenen üçüncül sıkışmaların başlama süresinin örselenmemiş numunede dolayısıyla da arazide çok daha erken oluşacağı düşünülmektedir. Şekil 5.23’de verilen örnekte, normal konsolide kısmında 50 kPa gerilmesinden 100 kPa gerilmesine yüklenen örselenmemiş Samsun Çarşamba mavi kili’nin kripi deneyinden elde edilen ϵ_v -log t ilişkisi, organik içerikli ve organik içeriğinden arındırılmış RHH numunelerin aynı yükleme kademesindeki kripi deney sonuçları birlikte görülmektedir. Buna göre, birincil konsolidasyon süresinin numunenin toz haline getirilerek çalışılması ile kısaldığı ancak bozulan örselenmemiş numunenin topaklanmış yapısının tamamen dağınık yapıya dönüşmesi ile birincil sıkışma miktarının arttığı görülmektedir. Organik içeriği ve topaklaşmış yapısı ilk defa bozulacak örselenmemiş numunenin dane yapısının ikincil sıkışma katsayısı en fazla olmuştur. Yakma kaybına göre %8 civarında organik içeriğin 200# elek üstünde ağırlıkça %1 oranını yosun parçacıklarının oluşturduğu örselenmemiş numunenin üçüncül sıkışması en önce başlarken bunu sırasıyla 60°C’de kurutulmasının ardından RHH numune, ıslak yakma sonrası ve kuru yakma sonrası RHH numuneleri takip etmiştir.



Şekil 5.23: Yakılmış ve RHH numunelerin ϵ_v -log t ilişkisine organik içeriğin etkisinin incelendiği 50 kPa’ dan 100 kPa yükleme kademesine ait kripi deneyi

5.2.3 Organik İeriğın Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Klasik konsolidasyon deneyine göre çok daha kısa sürelerde sonuç vermesi ve EOP $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerini sürekli tanımlayabilmesi açısından Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon (SDHK) deneyleri, diğerkonsolidasyon deneyleri içerisinde ilk standartlaşan konsolidasyon deneyi olmuştur. Ancak, SDHK deneyinde seçilen bir sabit bir deformasyon hızında sıkıştırılan numunede deney süresince oluşacak fazla boşluk suyu basıncının yeteri kadar sönümlenmesine izin verecek deformasyon hızının belirlenmesi problem olmaktadır. Leroueil ve diğ. (1985) SDHK deneyinden belirlenecek $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerinin ve bu eğrilerden belirlenecek önkonsolidasyon basıncının seçilen deformasyon hızına çok bağılı olduğunu göstermiştir (Şekil 5.25).



Şekil 5.24: SDHK deneyi a) EOP $\epsilon_v - \log t$ b) $\sigma'_p - \dot{\epsilon}_v$ ilişkisi (Leroueil ve diğ. 1985)

İkinci bölümde detayları ile anlatıldığı üzere, SDHK deneyinin, deney süresince herhangi bir anda oluşacak fazla boşluk suyu basıncının o anki düşey gerilme değerklerinin %3' ile %30'u arasında sınırlı kalacak şekilde seçilecek sabit bir deformasyon hızında yapılması gerekmektedir (ASTM D4186). Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon (SDHK) deneylerinde deformasyon hızının (r) artması ile $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerinin sağı doğru kaydığı bilinmektedir. Deformasyon hızının deney sırasında boşluk suyu basıncının gelişmesine izin vermeyecek mertebede çok küçük tutulması durumunda birincil konsolidasyona daha fazla krip etkisi gireceğinden oluşank düşey deformasyonlar artmakta ve eğri aşığı doğru genişlemektedir. Deneyde

deformasyon hızına bağlı olarak dikkate alınması gereken kripin etkisini belirlemek çok güçtür. ASTM D4186, ikincil sıkışmaların bulunması için incelenecek gerilme seviyesine seçilen bir deformasyon hızında çıkılmasını ve bu gerilme altında deformasyon kontrollü sistemin gerilme kontrollü sisteme çevrilerek sabit gerilme altında istenilen bir süre boyunca düşey deformasyonların kaydedilmesi ardından aynı deformasyon hızında numunenin tekrar yüklenmesini önermiştir. Ancak bu durumda ikincil sıkışmaların inceleyeceği deneyden belirlenecek EOP $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrisinin ve diğer konsolidasyon parametrelerinin değişebileceğine dikkat çekmiştir.

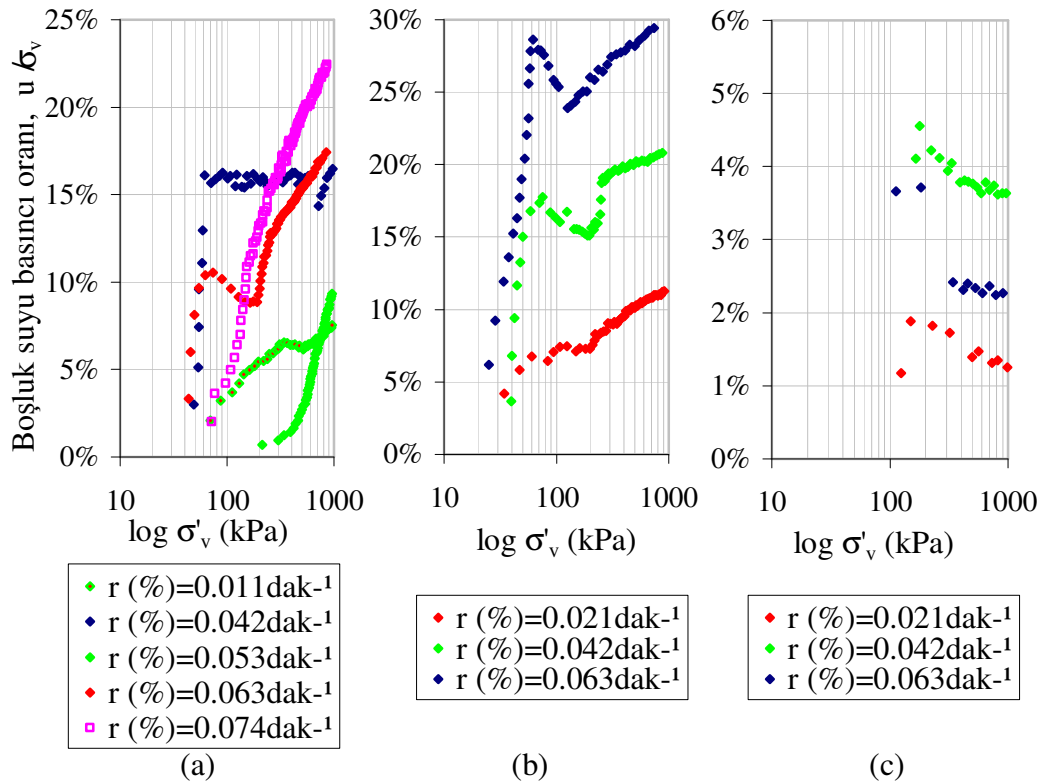
Bu çalışmada, SDHK deneyleri sırasında ikincil sıkışmalar inceleme konusu dışında tutularak numunelerin likit limit değerine göre seçilen hızlarda klasik konsolidasyon deneylerinden belirlenen EOP $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrisinin ve diğer konsolidasyon parametrelerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kapsamda klasik konsolidasyon eğrilerine organik içeriğin etkisini incelemek amacıyla yakılmadan ve ıslak veya kuru yakma yöntemiyle yakıldıktan sonra Rowe hücresinde hazırlanan kil numuneler üzerinde yapılan SDHK deneylerine yer verilecektir. Bu paragrafta, literatürde önerilen likit limit değerlerine bağlı olarak Tablo 5.8’de görüleceği üzere 0,074~0,011 %/dak⁻¹ aralığında seçilen deformasyon hızlarında gerçekleştirilen toplam 11 adet SDHK deneyi konu edilmiştir.

Tablo 5.8: Yakma öncesinde ve sonrasında hazırlanmış RHH numunelerde yapılan SDHK deneylerinde seçilen deformasyon hızları

Numune Tipi	Yakma öncesi RHH	Kuru yakma sonrası RHH	Islak yakma sonrası RHH
Deformasyon Hızı r (%) dakika ⁻¹	0,011		
	0,042	0,021	0,021
	0,053	0,042	0,042
	0,063	0,063	0,063
	0,074		

Deneylerde, Rowe hücresinde hazırlanarak 6,9 cm çapında ve 1,9 cm yüksekliğinde olan paslanmaz ringler içerisine yerleştirilen deney numuneleri kullanılmıştır. Deneylerde, zamana bağlı olarak düşey gerilme, boşluk suyu basıncı ve deformasyon okumaları alınmıştır. Böylelikle toplam ve efektif gerilme, fazla boşluk suyu basıncı ve sıkışma miktarlarının zamana göre değişimi elde edilmiştir. Hücre basıncı ve ters basınç değerleri için herhangi bir gerilme aralığı seçilmezken, aralarındaki fark

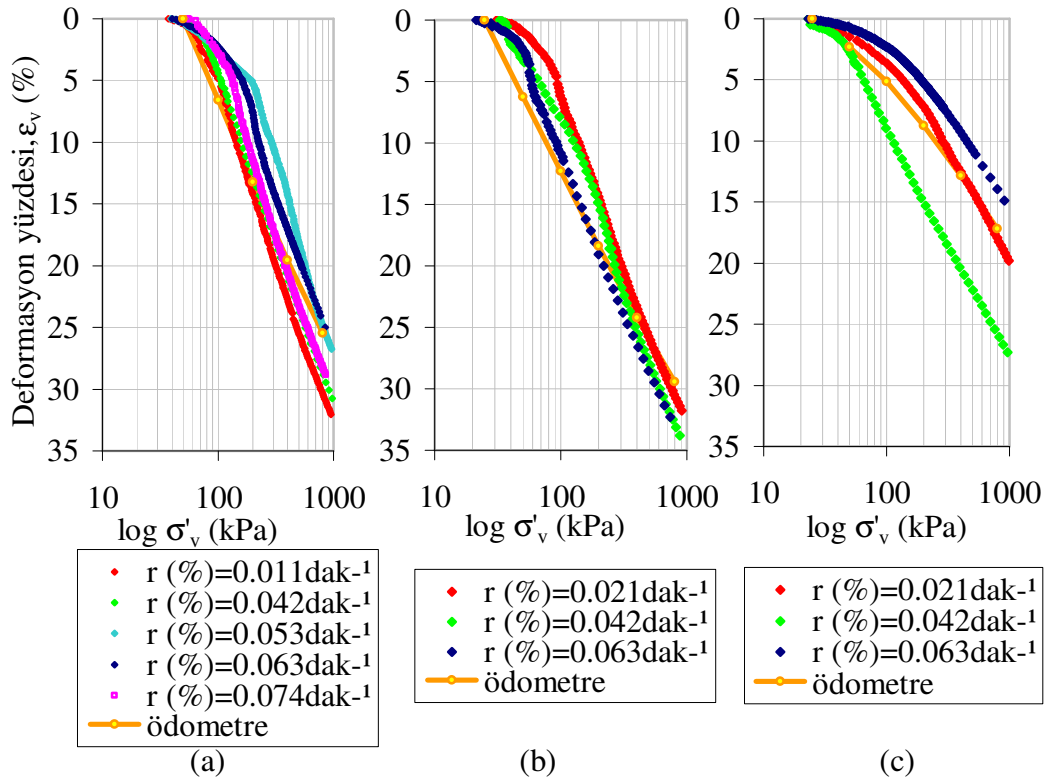
25 kPa değerinde sabit tutularak deney öncesinde çift taraftan ters basınçla numune suya doymun hale getirilmiştir. Doyurulan numunelerde, deney süresince sadece üstten drenaja izin verilmiş, fazla boşluk suyu basıncı alttan ölçülmüştür. Yapılan deneylerde, toplam gerilme 1000 kPa değerini aşmıyaya veya boşluk suyu basıncı oranı toplam gerilmenin %30'una ulaşmıyaya kadar, deformasyon uygulanmasına devam edilmiştir. Herhangi bir anda oluşan fazla boşluk suyu basıncının (u), düşey gerilmeye (σ_v) oranı şeklinde tariflenen boşluk suyu basıncı oranının (u/σ_v), deneylerde 1000 kPa efektif gerilme seviyesine kadar Şekil 5.26'da da verildiği üzere %30'u aşmaması, seçilen hızların kabul edilebilir sınır değerler içerisinde kaldığını göstermiştir.



Şekil 5.25: a) Yakma öncesi b) Islak yakma ve c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen $u/\sigma_v - \log \sigma'_v$ grafikleri

SDHK deneyinde doyumulma işlemi süresince numuneler hücre basıncı ile ters basınç arasındaki basınç farkı altında konsolide olmuştur. Bu nedenle, Şekil 5.26'da verildiği üzere her üç numune için de SDHK deneylerinin $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri, bu konsolidasyon basıncı değerine temas basıncının da eklenmesi ile bulunan deney

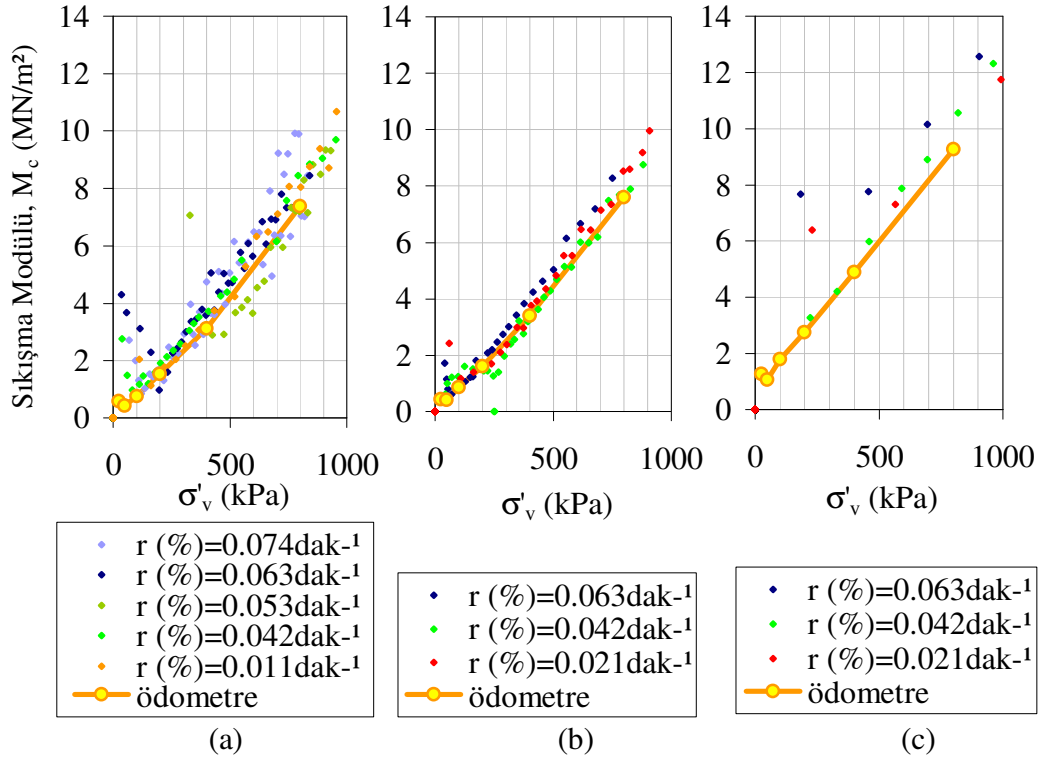
başındaki düşey gerilme değerinden başlatılmıştır. Bu eğrilerin klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen EOP $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri ile karşılaştırılması amacıyla klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen eğriler de bu basınçtan itibaren gösterilmiştir. Klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen EOP $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerinin, SDHK deneyinden elde edilenlere benzer olduğu ve çoğunlukla SDHK eğrilerinin alt sınırını oluşturduğu görülmüştür. Şekil 5.24’de verilen Leroueil ve diğerleri (1985) yaptıkları çalışmada, deformasyon hızları ile önkonsolidasyon basınçları arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için hızlar arasındaki farkı 1000 kata kadar arttırmışlardır. Hızlar arasındaki farkın en fazla 7 kata kadar arttırıldığı bu çalışma $\sigma'_p - \dot{\epsilon}_v$ arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için yeterli olmamakla birlikte, SDHK deneylerinden belirlenen σ'_p değerlerinin her üç numune de çoğunlukla klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen değerlerden büyük oldukları gözlenmiştir.



Şekil 5.26: a) Yakma öncesi b) Islak ve c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ grafikleri

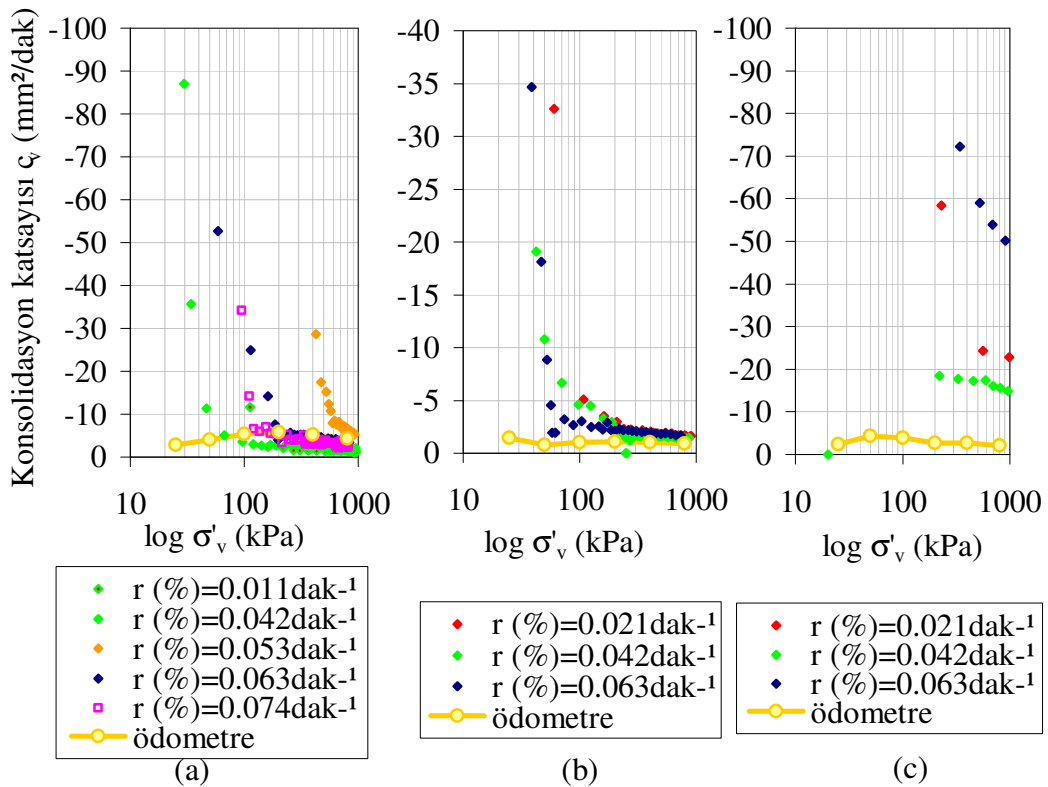
Bunların yanı sıra, Şekil 5.26a’da verilen yakma öncesi RHH numunenin sıkışabilirliği, Şekil 5.26b’den de görülebileceği gibi ıslak yakma sonrası bir miktar

artmıştır. Ancak, Şekil 5.26c’de verilen $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ grafiği, kuru yakma sonrasında RHH numunenin sıkışabilirliğinin yarıya kadar düştüğünü ortaya koymaktadır. Yakma öncesinde RHH, ıslak yakma veya kuru yakma sonrasında RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen sıkışma modüllerinin (M_c) düşey efektif gerilme ile değişimleri, bulunan sonuçların numunelerin klasik konsolidasyon deneyinde EOP $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrisinden belirlenen M_c değerleriyle örtüştüğünü göstermiştir (Şekil 5.27). Ayrıca, sıkışma modülünün efektif gerilme ile en çok kuru yakma sonrası RHH numunede arttığı gözlenirken, yakma öncesi ve ıslak yakma sonrası RHH numunelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Grafiklerde düzgün doğrusal artımın başladığı yer olarak tariflenen önkonsolidasyon basıncı değeri, ıslak yakma sonrası RHH numunelerde 40~50 kPa civarında iken, yakma öncesi numunelerde yaklaşık 100 kPa civarında gözlenmiş, kuru yakma sonrası RHH numuneler için kesin bir değer belirlenememiştir. Bunun nedeninin seçilen hızlarda yeterince boşluk suyu basıncı elde edilememesi yüzünden boşluk suyu basıncının değişiminin olduğu anlarda tanımlanan veri çiftlerinin azlığıdır.



Şekil 5.27: a) Yakma öncesi b) Islak ve c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyinden elde edilen $M_c - \log \sigma'_v$ grafikleri

Benzer şekilde, sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinde, konsolidasyon katsayısı değeri (c_v), boşluk suyu basıncı değişiminin 3 kPa değerinin üzerindeki her veri çifti için hesaplanmıştır. Genel olarak önkonsolidasyon basıncı öncesinde çok daha kısa sürelerde konsolidasyonun tamamlanmasından dolayı büyük değerler alan c_v değeri, önkonsolidasyon basıncı civarında ani bir düşüş göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan RHH numuneleri 25 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanmıştır. SDHK deneyi öncesinde numuneyi doyumak amacıyla uygulanan ters basınç ile hücre basıncı arasındaki basınç farkı ile temas basıncı toplamı olan deney başı düşey gerilme değerinin de 25 kPa civarında olması sebebiyle deneyin büyük bir bölümü normal konsolide kısımda gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle $c_v - \log \sigma'_v$ eğrilerinden önkonsolidasyon basıncı değerini bulmak mümkün olmamakla birlikte, artan düşey gerilme ile baş taraflarda görülen ani düşüşün azalarak devam ettiği görülmüştür (Şekil 5.28).



Şekil 5.28: a) Yakma öncesi b) Islak yakma sonrası c) Kuru yakma sonrası RHH numunelerin SDHK deneyine ait $c_v - \log \sigma'_v$ grafikleri

Klasik konsolidasyon deneyinde Casagrande yöntemine göre tanımlanan c_v değeriyle SDHK deneyinden ASTM D4186'ya göre hesaplanan c_v değerlerinin birlikte verildiği Şekil 5.28'de, her tip numunenin c_v -log σ'_v ilişkisi ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 5.28a'da gösterilen yakma öncesi RHH numunelere ait c_v değerleri ıslak yakma sonrasında ortalama %30 oranında düşüş gösterirken (Şekil 5.28b), kuru yakma sonrasında 3 ile 10 katlık bir artış gözlenmiştir (Şekil 5.28c). Yakma öncesinde SDHK deneyinden bulunan c_v değerleri ile klasik konsolidasyon deneyinden bulunanlar özellikle 200 kPa düşey gerilme sonrasında örtüşmüştür. Organik içeriğinden arındırılan numunelerin SDHK deneylerinden bulunan c_v değerleri, klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen c_v değerinden ıslak yakma sonrasında 1,5~2 kat, kuru yakma sonrasında ise 10 ile 20 kat daha büyüktür.

5.3 Kil İçeriğinin Etkisi

Mineralojik olarak yapraksı ve pulcuklar halinde bulunan killerin, magnezyum (Mg), potasyum (K), kalsiyum (Ca), sodyum (Na) ve demir (Fe) iyonları içeren hidro alüminyum silikatlardan oluştuğu bilinmektedir (Mitchell, 1993). Killer, mineralojisine göre kaolin, montmorillonit, illit ve klorit olarak 4 esas gruba ayrılmaktadır. Kilin mineralojik yapısı kilin su tutma kapasitesini belirlediğinden konsolidasyon özelliklerini de doğrudan etkilemektedir. Mitchell (1993) suya doymuş kil minerallerinin konsolidasyon sıkışma kapasitesini büyükten küçüğe doğru montmorillonit, illit ve kaolin şeklinde sıralamıştır. Doğada, çoğu zemin türünde birden fazla kil minerali bulunabildiğinden, oluşan bu mineralojik kompozisyonlar, zemin danelerinin şeklini, boyutunu ve yüzeyini etkilemekte ve daneler arasındaki boşluklardaki suyla etkileşime girmeleri durumunda zeminin aktivite, plastisite, şişme ve hidrolik iletkenlik ve dayanım davranış karakteristiğinde belirleyici rol alabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Samsun-Çarşamba mavi kili incelendiğinde kil boyutlu minerallerin %40-50 dolayında Ca-montmorillonit, %30 dolayında kalsit+kuvars ve %10 dolayında da kaolin içerdiği bilinmektedir (Yılmaz, 2000).

Bu grup deneylerde, Samsun-Çarşamba mavi kil numunesi içerisindeki kil boyutundaki dane yüzdesinin, numunenin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan 3 adet klasik ve 3 adet uzun süreli konsolidasyon deneylerinin yanı sıra 14 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon

deneyleri de yapılmıştır. Bu grup deneylerde uygulanan deney programı Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9: Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerde uygulanan deney programı

Numune Tipi	Klasik konsolidasyon deneyi	Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi		Uzun süreli konsolidasyon deneyi	
		Adedi	Deformasyon Hızı (%) dak^{-1}	Krip Gerilmesi, σ'_v (kPa)	Süresi (gün)
%5 kil, %95 silt	1	6	0,021 0,032 0,042 0,063 0,084 0,105	100	347
%50 kil, %50 silt	1	4	0,042 0,053 0,063 0,074	100	347
%82 kil, %18 silt	1	4	0,005 0,011 0,021 0,042	100	347

Üçüncü bölümde anlatıldığı üzere, %50 kil+%50 silt boyutunda dane içeren orijinal numunenin silt ve kil boyutundaki danelerini ıslak analiz yöntemine göre ayırma işleminin sonucunda %5 kil+%95 silt, %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren yeni numuneler elde edilmiştir. Söz konusu üç numunenin de 25 kPa konsolidasyon basıncında Rowe hücresinde konsolide edilmesiyle bu bölümde kullanılacak olan deney numuneleri hazırlanmıştır. 5.3.1 alt başlığında öncelikle 2 cm yükseklik ve 5 cm çaplı ringler içerisine alınan deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneyleri anlatılmıştır. İkinci olarak, krip deneylerinin gerçekleştirildiği uzun süreli konsolidasyon deneylerine yer verilmiştir. Son kısımda ise farklı hızlarda gerçekleştirilen sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinin sonuçları ile bu sonuçların klasik konsolidasyon deneyinden bulunanlarla karşılaştırılması sunulmuştur.

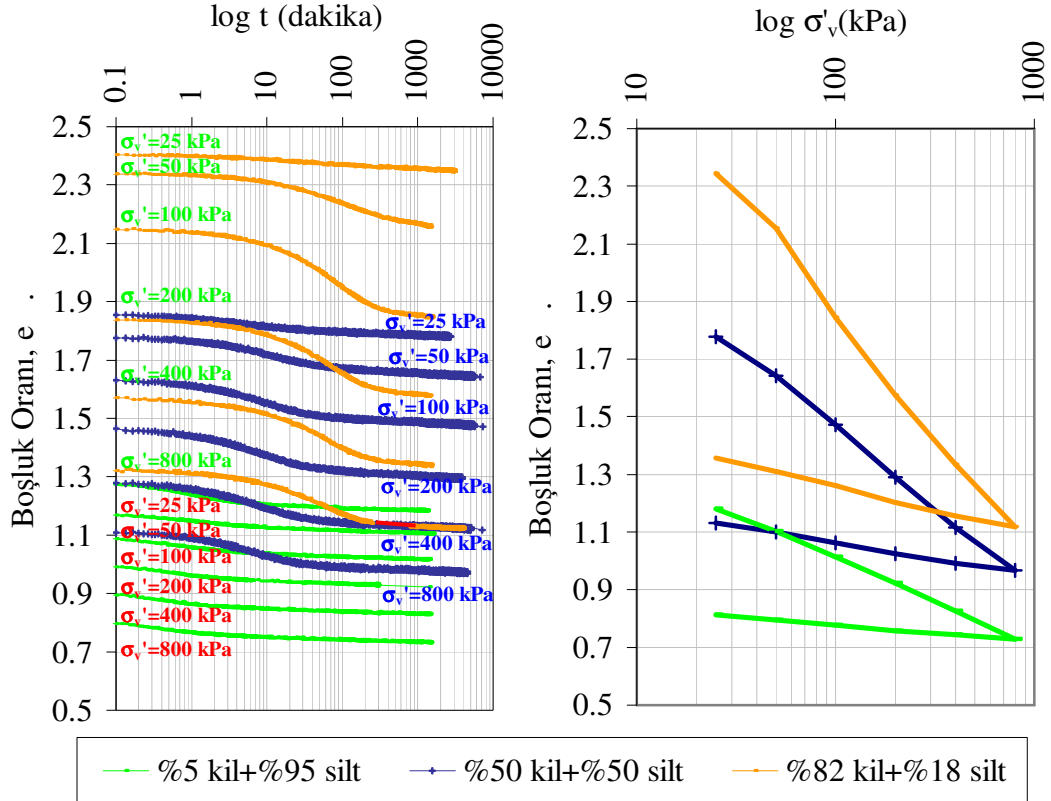
5.3.1 Kilin Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Kil mineralinin türüne göre konsolidasyon katsayıları (c_v) değişkenlik göstermektedir. Cornell (1950) c_v değerlerini çeşitli kil mineralleri için küçükten büyüğe doğru montmorillonit $0,06 \times 10^{-8} \sim 0,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, illit $0,3 \times 10^{-8}$ ile $2,4 \times 10^{-8}$ ve kaolin için 12×10^{-8} ile $90 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ olduğunu belirtmiştir. Kondner ve Vendrell (1964) ise yaptıkları çalışmada montmorillonit için c_v değerinin $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ve hallosit için $378 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, Mitchell (1993) saf kil numuneleri üzerinde yapılan çalışmalarda C_c sıkışma indisi değerinin kaolin için 0,19 ile 0,28, illit için 0,5 ile 1,10 ve montmorillonit için 1,0 ile 2,6 aralığında değiştiğini belirtmiştir.

Yılmaz (2000) tez çalışmasında, Samsun-Çarşamba mavi kili numuneleri üzerinde yaptığı X-Ray, DTA ve Infrared gibi bir dizi kimyasal içerik ve element analizleri sonuçlarına dayanarak mavi kil zemindeki kil boyutlu daneciklerin, çoğunlukla montmorillonit minerali içerdiğini belirlemiştir. Yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle bu mineralleri Ca-montmorillonit olarak tanımlamıştır. Samsun-Çarşamba mavi kilinin sıkışma davranışına kil boyutundaki dane yüzdesinin etkisini incelemeyi amaçlayan bu bölümde, bu başlık altında Samsun-Çarşamba mavi kilinden alınmış numuneler üzerinde ikinci bölümde anlatıldığı üzere kil dane boyutundaki malzeme yüzdeleri ıslak analiz yöntemiyle değiştirilerek elde edilen üç tip numune üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneylerine yer verilmiştir.

Elde edilen %5 kil+%95 silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt dane çapına sahip numuneler likit limit değerinin iki katı su içeriğinde Rowe Hücrelerinde 25 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanmıştır. Numuneler aynı konsolidasyon basıncında hazırlanmalarına karşın kil boyutundaki dane yüzdesinin artmasıyla artan likit limit değerine bağlı olarak daha yüksek su muhtevasında hazırlanan RHH numunelerin başlangıç boşluk oranı (e_0) da artmıştır. Klasik konsolidasyon deneylerinde, RHH numuneler üzerinde yük artırma oranı $YAO=1$ alınarak 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ve 800 kPa yükleme kademeleri takip edilmiştir. Her kademedeki bekleme süresi, numunede birincil konsolidasyonun tamamlanması için kil boyutundaki dane oranına bağlı olarak artırılmıştır. Konsolidasyon deneyleri esnasında çift taraftan su çıkışına izin verilmiştir. Samsun-Çarşamba mavi kilinden elde edilen 3 farklı dane çapı dağılımına sahip numuneler üzerinde yapılan klasik

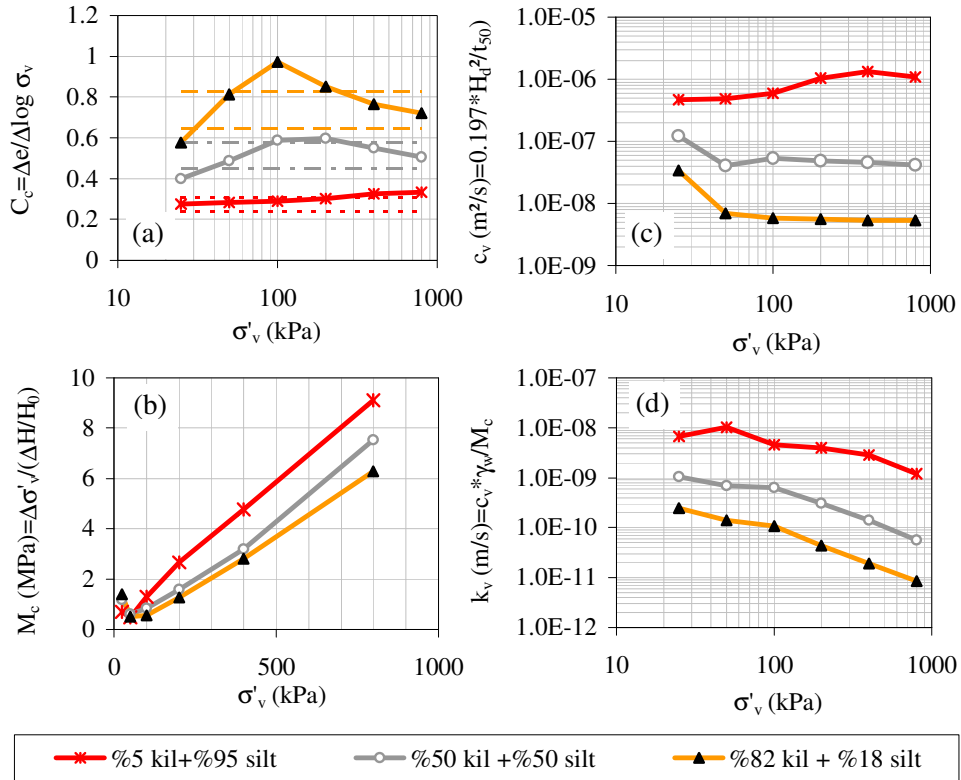
konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen $e-\log t$ eğrileri Şekil 5.29a'da ve $e-\log \sigma'_v$ eğrileri de Şekil 5.29b'de gösterilmiştir. Kil boyutundaki dane yüzdesi fazla olan numunenin sıkışma miktarı da fazla olmuş, boşluk oranındaki değişim de artmıştır. Sıkışma indisi ve tekrar sıkışma indislerinin de kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile arttığı görülmüştür.



Şekil 5.29: Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen $e_v-\log t$ ve $e_v-\log \sigma'_v$ eğrileri

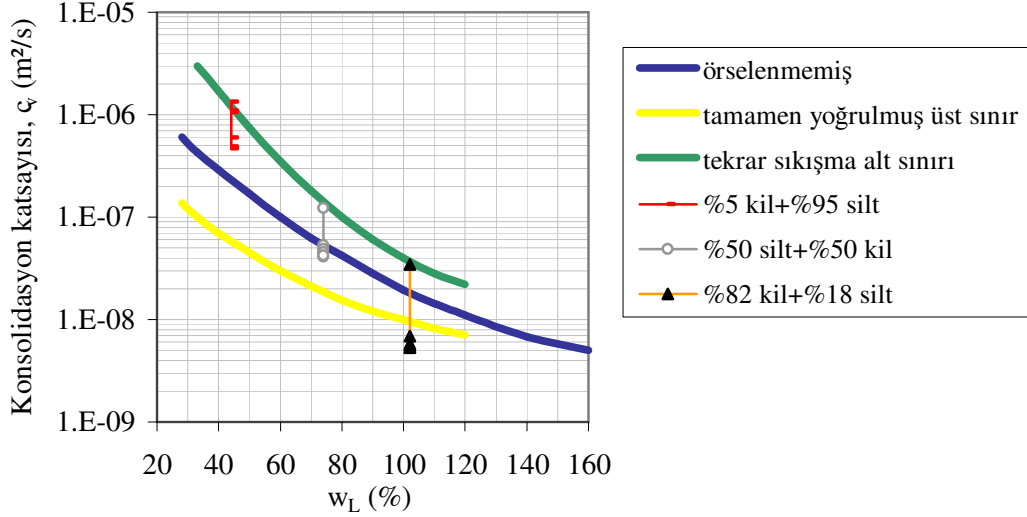
Şekil 5.30'da klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen konsolidasyon parametreleri verilmiştir. EOP $e-\log \sigma'_v$ eğrilerinin teğetlerinin eğimlerinden hesaplanan sıkışma indisi (C_c) değerlerinin efektif gerilme ile değişimi Şekil 5.30a'da gösterilmiştir. $C_c-\log \sigma'_v$ eğrilerinin kil boyutunda dane yüzdesi en fazladan en aza doğru yukarıdan aşağı doğru sıralandıkları görülmüştür. %5 kil+%95 silt numune için 0,30 olarak belirlenen ortalama C_c değeri, %50 kil+%50 silt için 0,55 ve %82 kil+%18 silt için 0,77 olarak bulunmuştur. Buna göre, kil boyutunda dane yüzdesinin artması ile artan C_c değerleri incelendiğinde, normal konsolide killer için Terzaghi & Peck (1967) (Şekil 5.30a'da üst bant) ile yoğrulmuş killer için Skempton (1944) tarafından önerilen (Şekil 5.30a'da alt bant) C_c değerlerinin Tablo 2.3'teki bağıntılardan elde edilen değerlerin çoğunlukla arasında kaldığı

görülmüştür. Her üç numuneye ait sıkışma modüllerinin (M_c) efektif gerilme ile değişimlerinin verildiği Şekil 5.30b’de, M_c - $\log \sigma'_v$ eğrilerinin 50 kPa gerilmesinden sonra doğrusala yakın bir eğri takip ettikleri görülmüştür. Literatürde eğrinin eğiminin negatiften pozitifte döndüğü dönüm noktasının önkonsolidasyon basıncı değerini verdiğini belirten Tavenas yöntemine göre önkonsolidasyon basıncının 25 kPa ile 50 kPa arasında değer almaktadır. Bu sonuç 25 kPa’da konsolide edilen RHH numuneleri için beklenen bir sonuçtur. Şekil 5.30c’de, Casagrande yöntemine göre belirlenen konsolidasyon katsayılarının (c_v) efektif gerilme ile değişimleri verilmiştir. Buna göre kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile c_v değerinin azalma gösterdiği gözlenmiştir. %5 kil+%95 silt için $8,39 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olan ortalama c_v değerinin, %50 kil+%50 silt için $5,87 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ve %5 kil+%95 silt için $1,06 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ bulunmuştur. Düşey geçirgenlik katsayısının efektif gerilme ile değişiminin verildiği Şekil 5.30d’de kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile geçirgenliğin düştüğü görülmüştür. Ayrıca gerilmenin artması ile azalan boşluk oranına bağlı olarak geçirgenlik azalmıştır. %5 kil+%95 silt için $4,90 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ olan ortalama k_v değeri %50 kil+%50 silt için $4,78 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ve %5 kil+%95 silt için $9,44 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ bulunmuştur.



Şekil 5.30: Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) C_c - $\log \sigma'_v$ b) M_c - σ'_v c) c_v - $\log \sigma'_v$ d) k_v - $\log \sigma'_v$ eğrileri

Kil boyutunda dane yüzdesinin artması ile ikinci bölümde anlatıldığı üzere artan likit limit (w_L) değerleri ile c_v arasında NAVFAC tarafından Şekil 2.10’da verilen ilişkide yerine konularak elde edilen Şekil 5.31’den Samsun-Çarşamba mavi kilinin farklı kil yüzdelerinde hazırlanmış numuneleri için belirlenen konsolidasyon katsayıları çoğunlukla örselenmemiş numuneler için tanımlı aralığa düşmektedir.



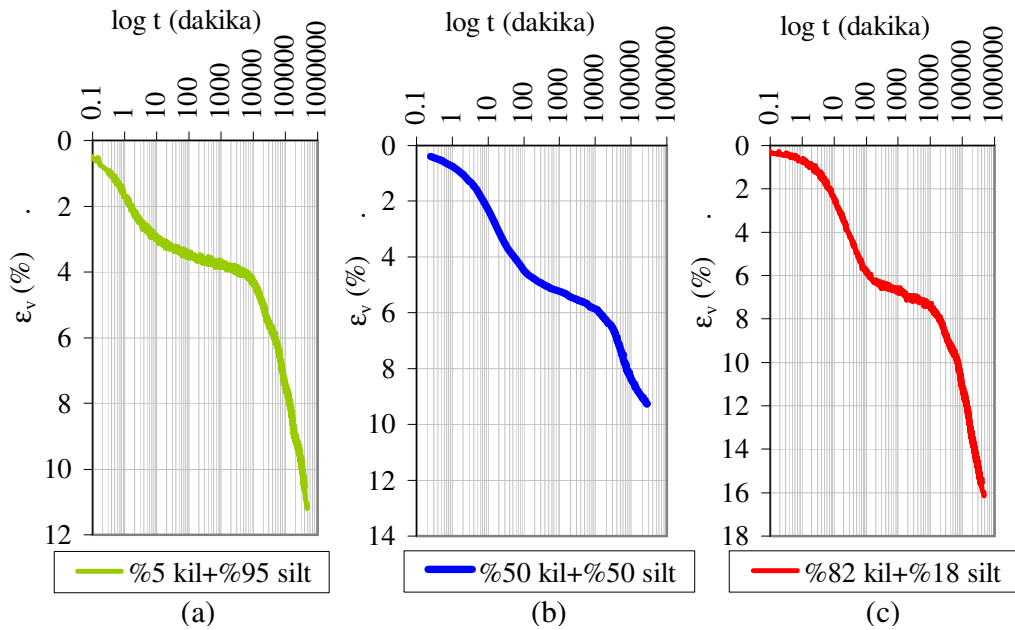
Şekil 5.31: %5kil+%95silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt için c_v - w_L ilişkisi

5.3.2 Kilin Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Denizel orijinli Samsun-Çarşamba mavi kili üzerinde gerçekleştirilen krip deneyleri ikincil sıkışmaların zamanla sabit kalmadığını ve oluşan üçüncül sıkışmaların organik zemin sınıfına girmeyen bazı zeminlerde de oluşabileceğini göstermiştir (Yılmaz, 2000). Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması’nda yüksek plastisiteli CH grubu kil sınıfına giren Samsun-Çarşamba mavi kilinin endeks özellikleri $w_L=76$, $w_p=26$, $\gamma_s=27,6 \text{ kN/m}^3$, ve $w_n=\%65$ civarındadır. Samsun-Çarşamba mavi kili’nin kil boyutlu minerallerinin %40-50 dolayında Ca-montmorillonit, %30 dolayında kalsit+kuvars ve %10 dolayında da kaolin içerdiği bilinmektedir. Sodyum esaslı montmorillonit mineralleri içeren Meksika kiline göre Samsun-Çarşamba mavi kilinin doğal su muhtevası, likit limit değeri ve ikincil sıkışma miktarı daha düşüktür. Samsun kilinin ikincil sıkışma davranışı illit esaslı Norveç Plastik kili ve Leda kiliyle benzerlik göstermektedir (Jonas, 1964; Horn ve Lambe, 1964; Crawford, 1965;

Bjerrum 1967). Yılmaz (2000), 70 günden 6,5 aya kadar değişen sürelerde gerçekleştirdiği krip deneylerinde, birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından ikincil sıkışmaların bir logaritma zaman çevriminden daha fazla süre ile sabit kaldığını, daha sonra artarak üçüncül sıkışmaların oluştuğunu göstermiştir (Şekil 3.14). Bu başlık altında üçüncül sıkışmaları kontrol eden danenin hangisinin olduğunu anlayabilmek amacıyla Samsun-Çarşamba mavi kilinin silt ve kil boyutundaki danelerini birbirinden ayırmak amacıyla ıslak analiz yöntemi kullanılmıştır. Üçüncü bölümde detaylarıyla anlatıldığı üzere elde edilen %5kil+%95silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt numuneleri üzerinde uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Uzun süreli konsolidasyon deneyleri sırasında krip deneyinin yapılacağı gerilme seviyesine $YAO=1$ seçilerek çıkılmıştır. Krip deneyleri 100 kPa gerilme kademesinde yapılmış ve her deneyde 347 gün beklenmiştir. Krip deneylerinden elde edilen ε_v -log t eğrileri Şekil 5.32’de gösterilmiştir. Krip deneylerinde birincil konsolidasyonun tamamlanması %5 kil + %95 silt içeriği olan numunede 4,5 dakika gibi çok kısa bir süre alırken, kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile fazla boşluk suyu basıncının sönmülmesi için daha uzun bir zaman gerektiğinden bu süre %50 kil + %50 silt içeren numunede 85 dakika, %82 kil + %18 silt içeren numunede ise 146 dakika bulunmuştur.



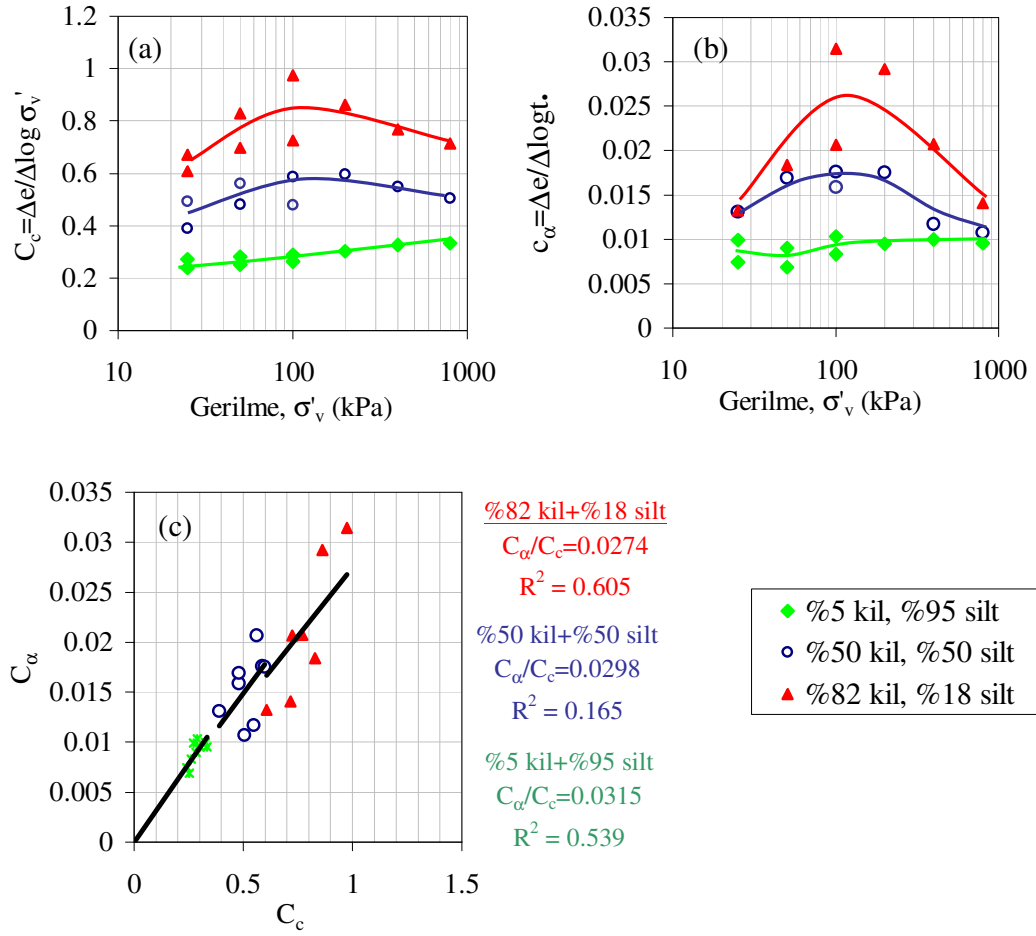
Şekil 5.32: Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı Samsun Çarşamba mavi kil numunelerinde yapılan krip deneylerinde elde edilen ε_v -log t ilişkileri

Sabit eğimli en uzun ikincil sıkışma evresi %5 kil + %95 silt içeren numunede gözlenirken, tüm numunelerde de ikincil sıkışmalar esnasında zamanla ε_v -log t grafiğinin eğiminin arttığı ve üçüncül sıkışmaların oluştuğu görülmektedir. ε_v -log t eğrisinin ikincil sıkışma sırasında bir log çevrimlik eğimi ikincil sıkışma oranı ($C_{\alpha\varepsilon}$) olarak tariflenirken, üçüncül sıkışma oranı ($C_{\alpha\varepsilon t}$) aynı eğrinin üçüncül sıkışma kısmındaki doğrusal kısmın eğiminden hesaplanmış bulunan sonuçlar Tablo 5.10'da verilmiştir. Kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha\varepsilon t}$ değerlerinde artış gözlenmiştir. Artan kil oranı ile $C_{\alpha\varepsilon t}$ değerindeki artış ise daha fazla olmuştur. Bu durumda, kil boyutundaki dane yüzdesinin ikincil sıkışmalara olan etkisinden çok daha fazla üçüncül sıkışmalar üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir.

Tablo 5.10: Kil boyutunda dane yüzdeleri farklı olan numunelerde yapılan krip deneylerinin sonuçları

Gerilme (kPa)	Numune Granülometrisi		$C_{\alpha\varepsilon}$	C_{α}	$C_{\alpha\varepsilon t}$
	Kil (%)	Silt (%)			
100	5	95	0,0036	0,0083	0,0256
	50	50	0,0055	0,0159	0,0377
	82	18	0,0061	0,0207	0,0659

Klasik konsolidasyon deneyleri ile uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma indisi C_c ile ikincil sıkışma katsayısı C_{α} değerleri birlikte değerlendirilerek kil yüzdesinin değişimi ile aralarındaki ilişkinin değişimi araştırılmıştır. Şekil 5.33a'da verilen C_c -log σ'_v eğrilerinde kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile C_c 'nin arttığı, efektif gerilmenin artması ile 100 kPa gerilmesine kadar artan C_c değerinin 100 kPa'da bir tepe yapıp azaldığı görülmüştür. C_{α} -log σ'_v eğrilerinin verildiği Şekil 5.33b'de kil boyutundaki dane yüzdesinin C_{α} 'nın arttığı ve efektif gerilmenin de yaklaşık 100 kPa gerilme seviyelerinde tepe yaptığı belirlenmiştir.



Şekil 5.33: Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı Samsun Çarşamba mavi kil numunelerinde yapılan krip deneylerinde elde edilen ε_v -log t ilişkileri

Ayrıca, %5 kil+%95 silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt içeren numunelerde 25 kPa ile 800 kPa arasında değişen düşey gerilme seviyelerinde elde edilen C_α ve C_c değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.22c’de verilmiştir. Buna göre, C_α ile C_c arasında regresyon analizi sonucunda elde edilen korelasyon katsayıları aşağıda verilmiştir.

$$\%5 \text{ kil} + \%95 \text{ silt numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0315 \quad (R^2=0,54) \quad (5.3)$$

$$\%50 \text{ kil} + \%50 \text{ silt numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0298 \quad (R^2=0,17) \quad (5.4)$$

$$\%82 \text{ kil} + \%18 \text{ silt numune için; } C_\alpha / C_c = 0.0274 \quad (R^2=0,60) \quad (5.5)$$

Sonuç olarak; Kil boyutundaki dane yüzdesinin artması birincil konsolidasyonun tamamlanma süresini (t_p) geciktirmiş, sıkışma indisi C_c değerini artırmıştır. Diğer taraftan, ikincil sıkışma oranının arttığı ancak 0,40~0,55 aralığında değişen $C_{\alpha e}$ (%) değeri dikkate alındığında Mesri (1973) tarafından Tablo 3.1’de verilen ikincil

sıkışma sınıflamasına göre, orta derecede ikincil sıkışabilirliğe sahip numunelerin, zemin sınıfının değişmediği görülmüştür. Aynı zamanda, artan kil boyutundaki dane yüzdesinin üçüncül sıkışma oranlarını yüksek bir oranda arttırdığı anlaşılmıştır. Gecikmiş ikincil sıkışma olarak da adlandırılan üçüncül sıkışma davranışı, Tablo 3.1'deki ikincil sıkışma sınıflamasına göre, %5 kil + %95 silt dane içerikli numunenin “yüksek”, %50 kil + %50 silt boyutlu numunenin “çok yüksek” ve %82 kil + %18 silt içeren numunenin ise “aşırı yüksek” ikincil sıkışabilirlikli zemin sınıfına girdiği görülmüştür. Bu durumda, kil boyutundaki dane yüzdesinin Samsun-Çarşamba mavi kili'nin gecikmiş ikincil sıkışma davranışını kontrol eden ana etmenlerden biri olduğu düşünülmektedir.

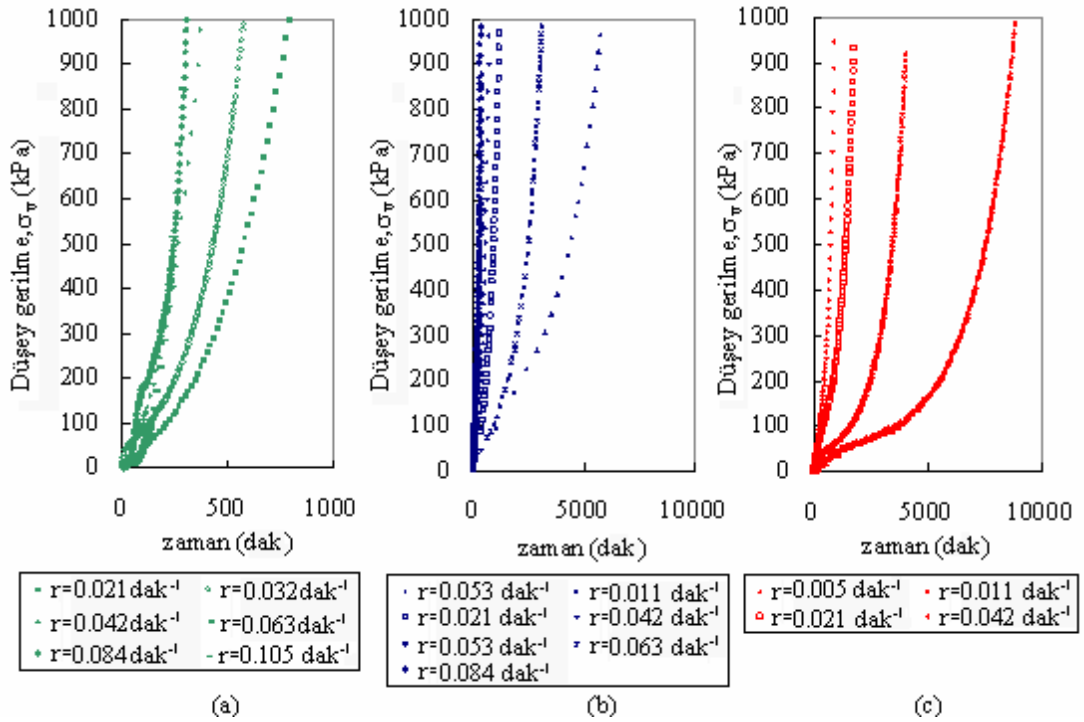
5.3.3 Kilin Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Zeminlerde kil yüzdesinin artması ile birincil konsolidasyon oturma miktarının arttığı, birincil konsolidasyonun tamamlanma süresinin (t_p) uzadığı, düşey geçirgenlik katsayısının (k_v) düştüğü ve sıkışma modülünün (M_c) büyüdüğü önceki başlıklar altında anlatılmıştır. Günümüzde birincil konsolidasyon sonu EOP ϵ_v -log σ'_v eğrileri ile birincil konsolidasyon parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılan klasik konsolidasyon deneyinden sonra standartlaşan ikinci konsolidasyon deneyi, Sabit Deformasyon Hızlı Konsolidasyon (SDHK) deneyidir. SDHK deneylerinde deneyde uygulanacak yapılacak sabit deformasyon hızının seçimi, deney boyunca zemin numunesinin birincil konsolidasyonuna izin verecek mertebede yavaş olması gerekmektedir. Numuneden numuneye farklılık gösteren bu deformasyon hızının kıyam limitlerinden hareketle belirlenmesi yönünde literatürde Tablo 2.4'de verildiği üzere çeşitli öneriler bulunmaktadır. Likit limitin artması ile konsolidasyon süresinin uzaması daha yavaş hızlarda deney yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu grup deneylerde kullanılan %5 kil+%95 silt, 50 % kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt içeren numunelerin likit limitleri sırasıyla %44, %76 ve %102 olarak belirlenmiştir. Buna göre, seçilen sabit deformasyon hızları da %0,005 dak^{-1} 'dan %0,105 dak^{-1} 'ya kadar geniş bir aralıkta değişmiştir. Kil boyutundaki dane yüzdesinin kilin birincil konsolidasyon davranışına etkisinin araştırıldığı bu alt başlık altında Tablo 5.11'de özetlendiği gibi toplam 16 adet SDHK deneyi gerçekleştirilmiştir. SDHK deneylerinden bulunan sonuçlar klasik konsolidasyon deneyinden elde edilenlerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

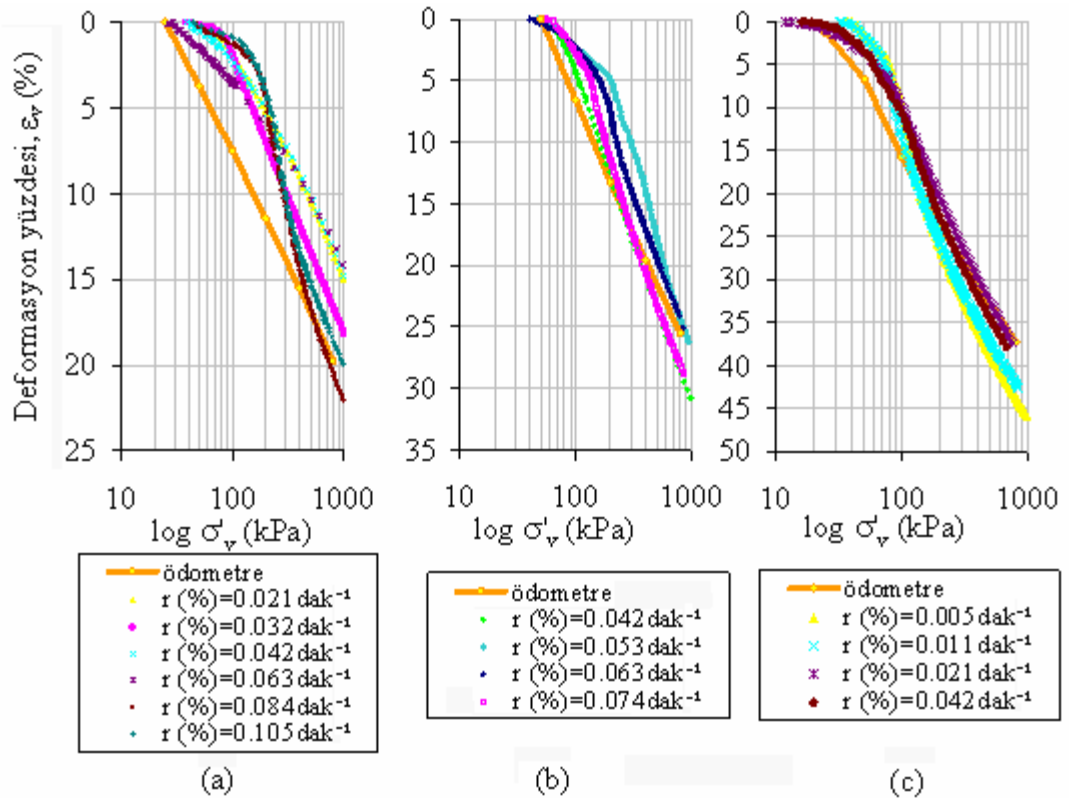
Tablo 5.11: Kil yüzdesi farklı numunelerin SDHK deney hızları

Numune Tipi	%5 kil+%95 silt	50 % kil+%50 silt	%82 kil+%18 silt
Deformasyon Hızları, % (dak ⁻¹)	0,021 0,032 0,042 0,063 0,084 0,105	0,042 0,053 0,063 0,074	0,005 0,011 0,021 0,042

Çeşitli hızlarda gerçekleştirilen SDHK deneylerinden elde edilen düşey gerilmenin zamanla değişimi %5 kil+%95 silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt içerikli dane içeren numuneler için sırasıyla Şekil 5.34a, Şekil 5.34b ve Şekil 5.34c’de gösterilmiştir. Şekil 5.34’den görüleceği üzere, deformasyon hızının artması ile eğrilerin eğimleri artmıştır. Aynı hızda gerçekleştirilen sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında, kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile 1000 kPa olarak belirlenen nihai düşey gerilme değerine ulaşma süresi artmıştır. Örneğin, $r=0,70 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan SDHK deneylerinde, deney süreleri %5 kil+%95 silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numuneler için sırasıyla 350 dakika, 698 dakika ve 911 dakika olmuştur.

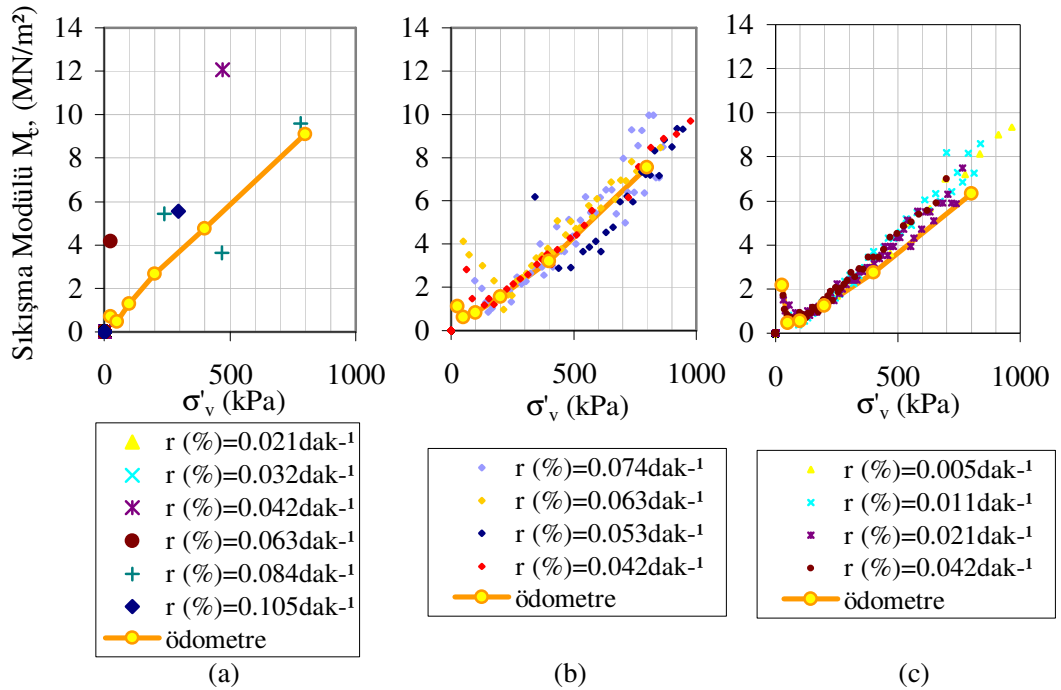
**Şekil 5.34:** Kil yüzdesi farklı numunelerin SDHK deneylerine ait ϵ_v -t ilişkileri

SDHK deneyleri sırasında fazla boşluk suyu basıncının değişimi de izlenip deneyin standartlara uygunluğu kontrol edilmiş, uygun olan SDHK deney sonuçlarından deformasyon yüzdesi - logaritma efektif gerilme ilişkisi belirlenmiştir. %5 kil+%95 silt, %50 kil+%50 silt ve %82 kil+%18 silt içeren numunelerin SDHK deneylerinden elde edilen ϵ_v -log σ'_v ilişkileri sırasıyla Şekil 5.35a, Şekil 5.35b ve Şekil 5.35c'de gösterilmiştir. Deneyler sırasında genel olarak deformasyon hızının artması ile sıkışma eğrisinin yukarıya doğru kaydığı gözlenmektedir. 1000 kPa gerilme seviyesinde sonlandırılan SDHK deneylerinde maksimum sıkışma yüzdesi %5 kil+%95 silt içeren numunede %15~22 aralığında kalırken, %50 kil+%50 silt içeren numunede %26~31 olmuş ve en fazla %82 kil+%18 silt içeren numunede %38~47 aralığında bulunmuştur. Klasik konsolidasyon deneylerine ait EOP ϵ_v -log σ'_v eğrileri Şekil 5.35'de sunulmuştur. SDHK deneyleri öncesinde numunelerin doygunluk esnasında maruz kaldıkları konsolidasyon basıncı altındaki sıkışma miktarları ϵ_v -log σ_v grafiğinde gösterilmediğinden ödometre deneyinden belirlenen birincil konsolidasyon sonu eğrileri de bu basınç değerinden itibaren çizilmiştir.



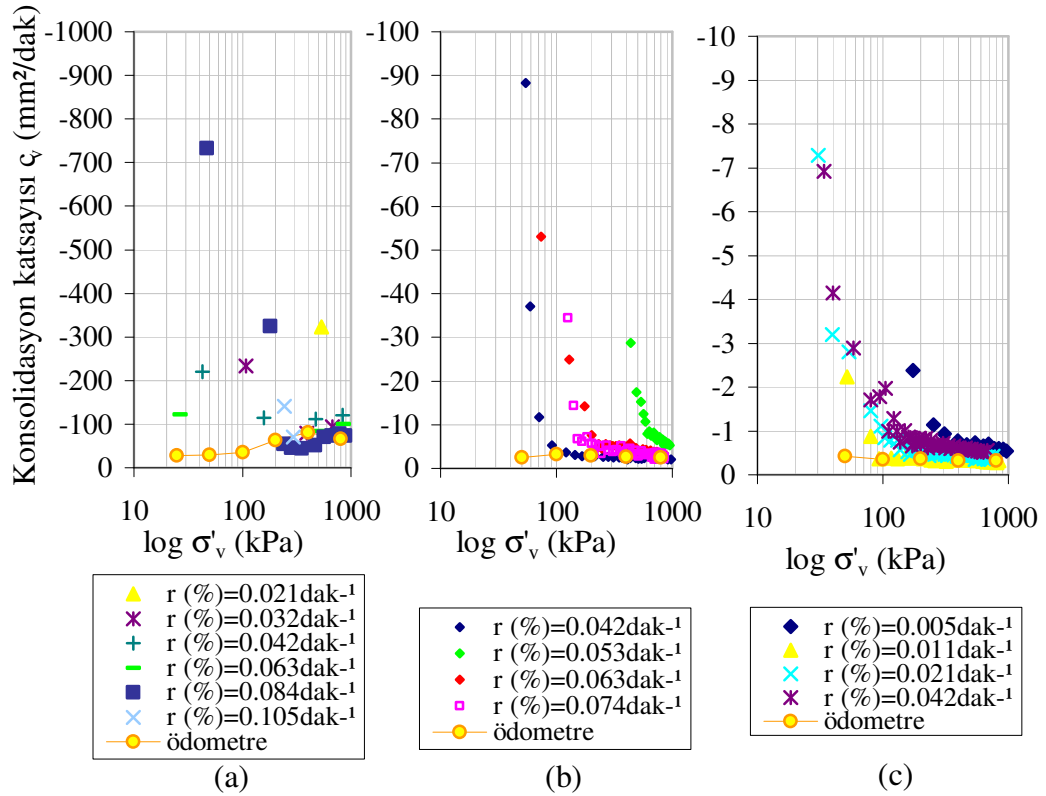
Şekil 5.35: a) %5 kil+%95 silt, b) %50 kil+%50 silt c) %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde yapılan SDHK deneylerinde elde edilen ϵ_v -log σ_v ilişkileri

Sabit Deformasyon hızlı konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma modülleri M_c Şekil 5.36'de verilmiştir. Şekil 5.36a'da gösterilen %5 kil+%95 silt içeren numunede seçilen hızların düşük olmasından dolayı deney boyunca fazla boşluk suyu basıncının gelişmemesi nedeniyle SDHK deneylerinden elde edilen veriler, ölçülebilen birkaç boşluk suyu basıncı değişiminin olduğu noktalardaki değerlerle sınırlı kalmıştır. Ancak, bulunan bu noktaların %5 kil+%95 silt dane boyutlu numunede ödometre deneyinden belirlenen M_c sıkışma modülünden daha büyük değerler aldığı söylenebilir. Şekil 5.36b'de %50 kil+%50 silt boyutunda dane içeren numunelerin SDHK deneylerinden elde edilen sıkışma modülü M_c değerlerinin, ödometre deneylerinden belirlenen değerlerle çoğunlukla örtüştüğü ve Şekil 5.36c'de verilen %82 kil+%18 silt için ise düşük gerilmelerde örtüşürken büyük gerilme seviyelerinde M_c 'nin yaklaşık %15 büyük çıktığı görülmüştür. $M_c - \sigma'_v$ eğrisinin eğiminin negatiften pozitifte geçtiği gerilme olarak tanımlanan önkonsolidasyon basıncı (σ'_p) değeri Şekil 5.36a'daki %5 kil+%95 silt boyutunda dane içeren numune için belirlenemezken, Şekil 5.36b'de %50 kil+%50 silt boyutunda dane içeren numunenin SDHK deneylerinde belirlenen σ'_p değeri, 100kPa~200kPa aralığında değişmiştir. %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde ise σ'_p değerlerinin 40kPa~100kPa arasında dar bir aralıkta kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.36: a) %5 kil+%95 silt, b) %50 kil+%50 silt c) %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde yapılan SDHK deneylerinden elde edilen $M_c - \sigma'_v$ ilişkileri

Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri sırasında belirlenen konsolidasyon katsayılarının efektif gerilmeyle değişimi Şekil 5.37’de gösterilmiştir. Şekil 5.37a’da, %5 kil+%95 silt dane boyutlu numunede c_v katsayısı en yüksek olurken Şekil 5.37b’de, %50 kil+%50 silt dane boyutlu numunedeki c_v değerleri 10 defa daha azdır. Şekil 5.37c’den görüldüğü gibi, %82 kil+%18 silt dane boyutlu numunede c_v değerleri 10 defa azalmaktadır. SDHK deneyinden belirlenen konsolidasyon katsayılarının her üç numunede de klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen değerlerin genellikle üzerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.37: a) %5 kil+%95 silt, b) %50 kil+%50 silt c) %82 kil+%18 silt boyutunda dane içeren numunelerde yapılan SDHK deneylerinde belirlenen $c_v - \log \sigma'_v$ ilişkileri

5.4 Numune Boyutunun Etkisi

Üçüncü bölümde ayrıntılarıyla anlatıldığı üzere arazi koşullarının laboratuvar ortamında ince bir numune ile modellenmesinin ne derece gerçekçi olduğu sorusuna ılık tutmak amacıyla numune boyutunun etkisi birçok araştırmacıya konu olmuştur. Arazide, özellikle konsolide olacak zemin tabakası kalın olduğunda drenaj yüzeylerine yakın zeminlerde oluşan fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmiş olması ve bu kısımların ikincil sıkışmalara giderken, tabaka ortasındaki kısımlarda

halen birincil konsolidasyonun devam etmesi mümkündür. Tabaka kalınlığı arttıkça ikincil sıkışmayı birincil konsolidasyondan ayırmak zorlaşmaktadır. Fazla boşluk suyu basıncı sönümlendiğinde arazide kil tabakasının laboratuvar deneyindekinden daha fazla sıkışıp sıkışmadığını inceleyen araştırmacılar farklı boylarda numuneleri tercih etmişlerdir. Tüm bu çalışmalar ikincil sıkışma mekanizmasına da ışık tutacak Hipotez A ve Hipotez B olarak adlandırılan iki hipotez altında toplanmıştır. Buna göre, Şekil 3.2’de verildiği gibi kalın numunenin, ince numunenin 5 katı olduğu numuneler üzerinde konsolidasyon deneyinin gerçekleştirilmesi durumunda Hipotez A, kalın numunenin birincil konsolidasyon sonu süresinin uzayacağını ancak, her iki numunenin boşluk oranı değişimlerinin aynı olacağını savunmaktadır. Hipotez B ise birincil konsolidasyon sonunda kalın numunenin t_p süresinin uzayacağını buna bağlı olarak da boşluk oranındaki değişimin daha fazla olacağını kabul etmektedir. Bunun sonucu olarak Şekil 3.3’te verildiği üzere Hipotez A kalınlık artsa da laboratuvar numunelerinin kalınlığının artmasıyla EOP $e\text{-log}\sigma'_v$ eğrilerinin aynı olacağını, Hipotez B ise kalınlığın artması ile her yükleme kademesinde tanımlanacak birincil konsolidasyon oturmasının artacağını ve EOP $e\text{-log}\sigma'_v$ eğrilerinin kalınlığın artması ile aşağıya doğru kayacağını kabul etmiştir. Bu durumda, Hipotez A laboratuvar verileriyle elde edilecek EOP $e\text{-log}\sigma'_v$ eğrilerinin araziye temsil edebileceğini Hipotez B ise temsil etmekte yetersiz kalacağını, çünkü bu eğrilerin numune kalınlığına bağımlı olduğunu savunmaktadır.

Leroueil (1995) arazi sıkışma gözlemlerinin genellikle Hipotezin A ve Hipotez B’nin belirlediği aralıkta kaldığını belirtmiştir. Numune boyutunun artması ile drenaj boyunun artacağı ve drenaj boyunun karesi ile doğru orantılı olan birincil konsolidasyonun tamamlanma süresinin de artacağı bilinmektedir. Her iki hipotezde de sabit efektif gerilme altında belirlenecek ikincil sıkışma parametrelerinin numune boyutundan etkilenmediği kabulüne önceki bölümlerde değinilmiştir. Ancak, üçüncül sıkışmaların numune boyundan nasıl etkilendiği halen araştırma konusudur. Bu bölümde, laboratuvar ortamında Samsun-Çarşamba mavi kili’nin bir boyutlu sıkışma davranışına numune boyutunun etkisini incelemek amacıyla farklı yükseklikte ve çaplardaki RHH numuneler üzerinde yapılan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen birincil, ikincil ve üçüncül konsolidasyon parametrelerindeki değişimler verilmiştir.

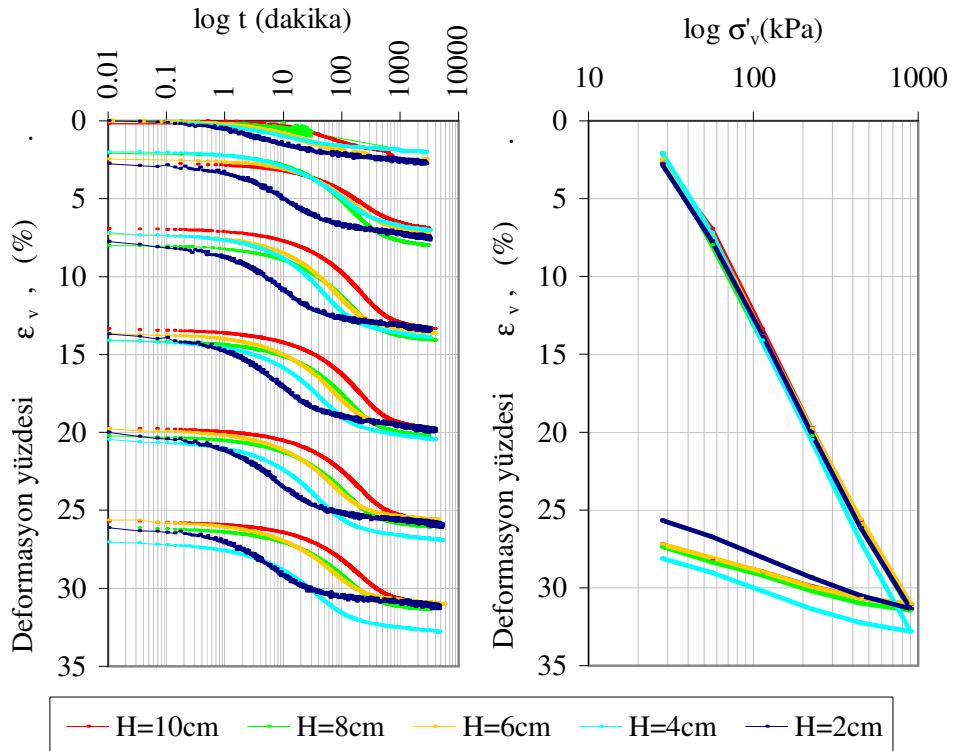
Bu kapsamda, 105°C'lik etüvde kurutulmalarının ardından likit limit değerinin 2 katı su muhtevasında karıştırılarak laboratuvar koşullarında Rowe Hücresinde hazırlanan (RHH) Samsun-Çarşamba mavi kil numuneleri kullanılmıştır. Deneylerde numune yüksekliğinin etkisini araştırmak amacıyla 5 cm çapında 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm ve 10 cm olmak üzere 5 farklı numune yüksekliğinde olan numunelerle çalışılmıştır. Ayrıca, 2 cm yükseklikli 5 cm, 7 cm ve 10 cm çaplı numunelerin de kullanıldığı deneylerin yanı sıra, 2 cm çap ve 5 cm yükseklikli numune ile aynı H/D oranına sahip 4 cm çap ve 10 cm yükseklikli numuneler de vardır. Deneylerde, dördüncü bölümde anlatıldığı üzere klasik konsolidasyon deney düzeneği üzerinde değişiklikler yapılarak hazırlanan çift taraftan drenaja açık 3 adet klasik konsolidasyon deney aleti kullanılmıştır (Şekil 4.10). Deneylerde ring ile zemin arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek amacıyla iç yüzeyleri iyice parlatılmış paslanmaz çelik ringler, iç yüzeyleri gres ile yağlanarak kullanılmıştır. Farklı çaplarda ve yüksekliklerde ringler kullanılarak 7 farklı ve iki aynı H/D oranında hazırlanan RHH numuneleri üzerinde gerçekleştirilen toplam 7 adet klasik konsolidasyon deneyi ile 100 kPa gerilme seviyesinde 327 günlük krip deneylerini içeren 4 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi yapılmıştır (Tablo 5.12).

Tablo 5.12: Farklı boyutlardaki numunelerle yapılan konsolidasyon deneylerinin programı

Deney Tipi	Numune Boyutu		
	H (cm)	D (cm)	H/D
Klasik konsolidasyon	10	5	2
	8	5	1,6
	6	5	1,2
	4	5	0,8
	2	5	0,4
	2	7	0,286
	2	10	0,2
Uzun süreli konsolidasyon	10	5	2
	6	5	1,2
	2	5	0,4
	4	10	0,4

5.4.1 Numune Boyutunun Klasik Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Laboratuvar ortamında ince bir numuneden belirlenecek konsolidasyon katsayısı c_v değerinin arazide temsil edebilmesi için (2.21) bağıntısında da verildiği gibi drenaj boyunun karesi ile zamanın doğru orantılı olarak değişmesi gerekmektedir. Bu bakımdan, numune boyunun artması ile drenaj boyu uzayacağından birincil konsolidasyonun tamamlanma süresi (t_p) artacaktır. Ayrıca numune boyunun artması ile fazla boşluk suyu basıncının dağılmasının daha uzun süre alması ve bu süre zarfında kalın numunede ince numuneye göre daha fazla birincil sıkışma oluşup oluşmayacağı iki farklı hipotezin doğmasına neden olmuştur. Bu alt başlığın ilk bölümünde drenaj boyunun birincil konsolidasyon üzerindeki etkisi incelenmiş, ikinci bölümde ise deneylerdeki ring ile çevre sürtünmesinin etkisini en aza indirmek amacıyla numune boyu sabit kalmak üzere daha büyük çaplı numunelerin kullanıldığı klasik konsolidasyon deneylerine yer verilmiştir. Drenaj boyunun etkisinin incelendiği ilk grup konsolidasyon deneylerinde 10 cm, 8 cm, 6 cm, 4 cm ve 2 cm yüksekliklerinde 5 cm çaplı iç yüzeyleri parlatılmış paslanmaz çelik ringler gres yağı ile yağlanarak kullanılmıştır. Yük artırma oranının bir ($YAO=1$) alındığı deneylerden elde edilen ϵ_v -log t ve ϵ_v -log σ'_v eğrileri Şekil 5.38’de gösterilmiştir.



Şekil 5.38: Farklı boylarda 5 cm çaplı numunelerin ϵ_v -log t ve ϵ_v -log σ'_v eğrileri

Şekil 5.38a'daki ϵ_v -log t eğrisinden Casagrande metoduna göre belirlenen t_p birincil konsolidasyonun tamamlanma süreleri ve c_v konsolidasyon katsayıları Tablo 5.13'te verilmiştir. Numune yüksekliklerinin artmasıyla birincil konsolidasyonun tamamlanması için gereken sürenin arttığı gösterilmiştir. Şekil 5.38b'de verilen ϵ_v -log σ'_v eğrileri, Şekil 5.38a'daki ϵ_v -log t eğrilerinden 25 kPa'dan 800 kPa gerilmesine kadar her yükleme kademesi sonundaki düşey deformasyon değerlerinden elde edilmiş olup, 800 kPa gerilme kademesinden sonraki boşaltma kademelerindeki geri dönüş eğrileri de gösterilmiştir.

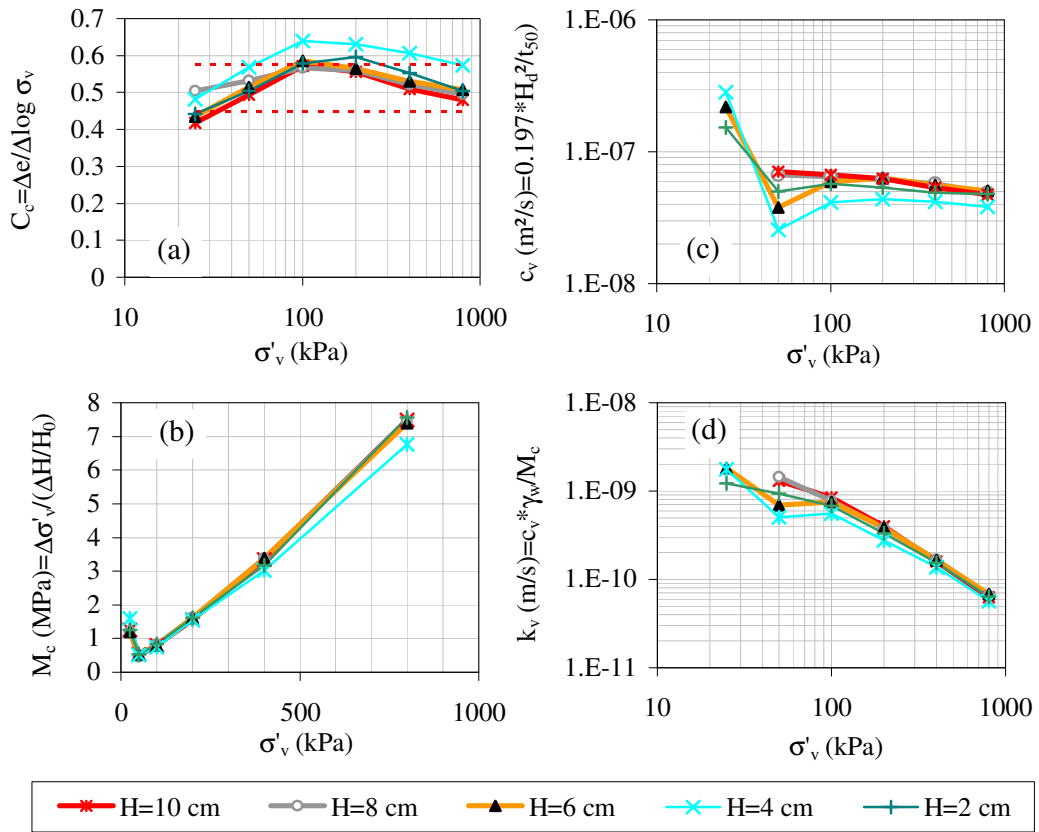
Tablo 5.13: Farklı yüksekliklerdeki 5 cm çaplı numunelerde yapılan klasik konsolidasyon deneylerinin sonuçları

Numune Boyu (cm)	Belirlenen parametreler	Gerilme Değeri σ'_v (kPa)					
		25	50	100	200	400	800
2	t_p (dak)	29,4	51	43,5	41	39,7	29,9
	t_{50} (dak)	2,1	6,0	4,7	4,3	4,0	3,5
	H_d (cm)	0,99	0,95	0,90	0,84	0,78	0,72
	c_v (cm ² /sn)	0,00153	0,0005	0,0006	0,0005	0,0005	0,00048
4	t_p (dak)	50	366,1	178,8	155,2	141,9	153
	t_{50} (dak)	4,6	47,1	25,8	20,9	18,6	17,1
	H_d (cm)	1,98	1,92	1,80	1,66	1,54	1,41
	c_v (cm ² /sn)	0,00283	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,00038
6	t_p (dak)	193	465	276	230	240	240
	t_{50} (dak)	13,3	71,5	40,3	32,8	31,8	30,5
	H_d (cm)	2,97	2,86	2,70	2,51	2,33	2,16
	c_v (cm ² /sn)	0,00218	0,0004	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005
8	t_p (dak)	-	465,5	446	390	410	400
	t_{50} (dak)	-	71,5	64,8	58,9	54,9	54,8
	H_d (cm)	-	3,81	3,57	3,33	3,09	2,86
	c_v (cm ² /sn)	-	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,00049
10	t_p (dak)	-	785	676	600	675	655
	t_{50} (dak)	-	105,7	100,1	92,0	92,0	90,1
	H_d (cm)	-	4,77	4,51	4,19	3,88	3,60
	c_v (cm ² /sn)	-	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005	0,00047

“--“ Elektrik kesintisi dolayısıyla dijital LVDT verisi alınamamış, kontrol amaçlı kullanılan mikrometre okuması kademe sonunda alınabilmektedir.

5 cm çaplı ve 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm ve 10 cm yükseklikli numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma indisi (C_c), konsolidasyon katsayısı (c_v), sıkışma modülü (M_c), düşey geçirgenlik (k_v) değerleri ve bu değerlerin düşey

efektif gerilme ile değişimleri Şekil 5.39'de verilmiştir. Şekil 5.39a'da verildiği üzere numunenin drenaj boyunun 5 kata kadar değiştirilmesi ile C_c değeri pratik anlamda değişmezken ortalama C_c değeri 0,53 olarak bulunmuştur. $H=4\text{cm}$ yükseklikli numunenin sıkışma indisi değerlerinde bir sapma gözlenirken sapmanın ortalama %9 oranında sınırlı kaldığı görülmüştür. C_c değerleri, Şekil 5.39a'da kesikli çizgiyle gösterilmiş olan normal konsolide killer için Terzaghi & Peck (1967) ile yoğrulmuş killer için Skempton (1944) tarafından önerilen Tablo 2.3'teki bağıntılardan elde edilen değerlerin çoğunlukla arasında kalmıştır. Şekil 5.16b'de görüldüğü üzere sıkışma modülü (M_c) değerinin 5 farklı yükseklikle çalışılan numunelerde önemli bir değişiklik göstermediği gözlenmiş, $H=4\text{ cm}$ yükseklikli numunede 800 kPa gerilmesinde yaklaşık %10'luk bir azalma belirlenmiştir. M_c değerlerinin aynı kaldığı kabul edilebilir.

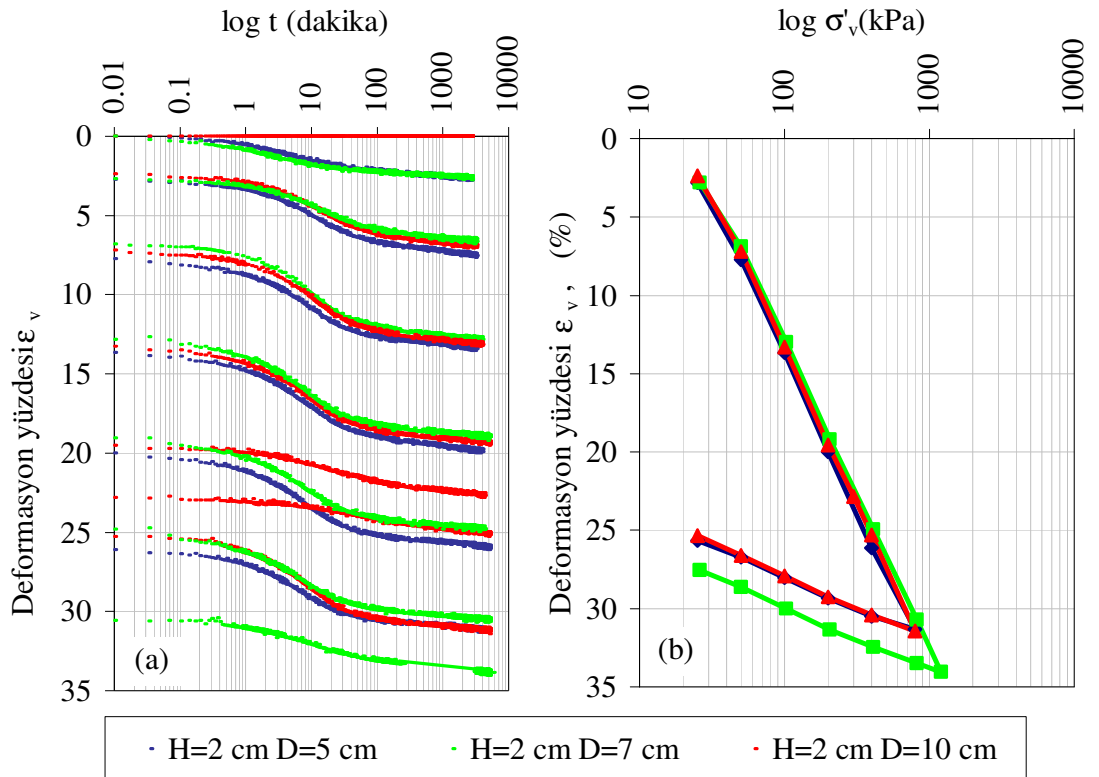


Şekil 5.39: Farklı yükseklikli numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) C_c - $\log \sigma'_v$ b) M_c - σ'_v c) c_v - $\log \sigma'_v$ d) k_v - $\log \sigma'_v$ eğrileri

Şekil 5.16c'de, c_v konsolidasyon basıncı değerinde genel olarak bir azalma eğilimi olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, Şekil 5.16d'de gerilmenin artması ile azalan

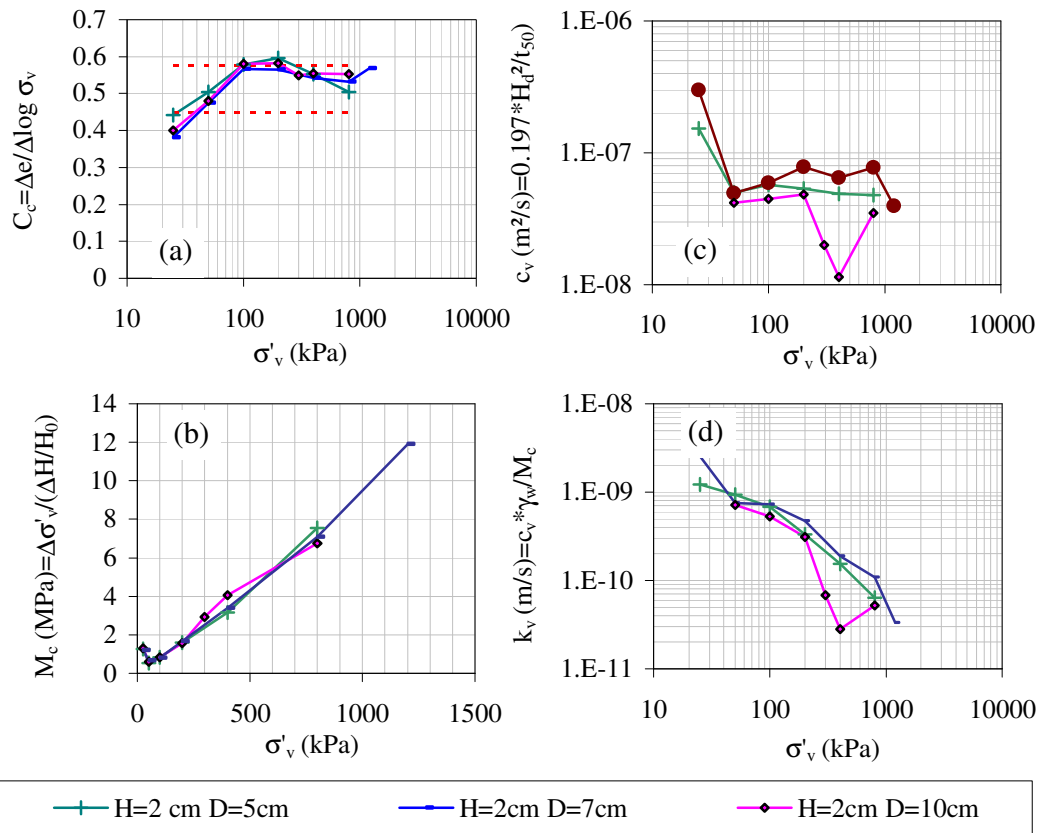
boşluk oranına da bağlı olarak düşey geçirgenlik katsayısının $1,8 \times 10^{-9}$ m/s değerinden $6,4 \times 10^{-11}$ m/s'ye düştüğü ve yükseklikleri farklı tüm numunelerin 100 kPa gerilmesinden sonra $\log k_v - \log \sigma'_v$ eğrilerinin örtüştükleri görülmüştür. Deneylerde kullanılan numunelerin Rowe Hücresinde hazırlandığı 25 kPa konsolidasyon basıncından ilk yükleme kademesi olan 25 kPa gerilme seviyesindeki birincil konsolidasyon ile ikincil sıkışma miktarlarının etkilenmesi kaçınılmazdır. Bu yüzden eğrilerde genellikle 50 kPa gerilmesinden sonra numunelerin konsolidasyon parametrelerinin efektif gerilme ile değişimleri daha uyumludur.

Bu grupta ikinci olarak numune çapının artırılmasının konsolidasyon deney sonuçlarına etkisinin incelendiği deneylerde 2 cm yüksekliğinde ve 5 cm 7 cm ve 10 cm çapındaki RHH numunelerle çalışılmıştır. Diğer tüm konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi bu grupta da paslanmaz çelik ringlerin kullanıldığı deneylerde iç yüzeyleri gres yağlanarak sürtünme etkisi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu gruptaki klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen $\epsilon_v - \log t$ ve $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri Şekil 5.40'da gösterilmiştir.



Şekil 5.40: Farklı çaplarda 2 cm yükseklikli numunelerin $\epsilon_v - \log t$ ve $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri

Deneylerde YAO=1 olarak uygulanırken H=2cm ve D=10cm olan numunelerde 200 kPa-400 kPa yükleme kademesi Şekil 5.40a'dan da görüleceği üzere 200 kPa-300 kPa ve 300 kPa-400 kPa olarak iki kademedede uygulanmış, ancak Şekil 5.40b'de verilen ε_v -log σ'_v eğrilerinin değişmediği görülmüştür. Farklı çaplarda numunelerin Şekil 5.40a'da verilen ε_v -log t eğrilerinden Casagrande yöntemine göre belirlenen EOP ε_v -log σ'_v eğrilerinin eğimi olarak hesaplanan C_c değerlerinin efektif gerilme ile değişimlerinin örtüştüğü görülmüştür (Şekil 5.41a). Belirlenen M_c değerlerinin σ'_v ile değişimlerinin verildiği Şekil 5.41b'de YAO<1 olan kademeler dışında eğrilerin birebir örtüştüğü söylenebilir.



Şekil 5.41: Farklı çaplarda 2 cm yüksekliğindeki numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen a) C_c -log σ'_v b) M_c - σ'_v c) c_v -log σ'_v d) k_v -log σ'_v eğrileri

Şekil 5.40a'dan Casagrande yöntemine göre ε_v -log t eğrilerinden belirlenen t_p birincil konsolidasyonun tamamlanma süreleri 40 ile 60 dakika aralığında değişmekte olup bulunan konsolidasyon katsayısı-efektif gerilme ilişkisi Şekil 5.41c'de, düşey geçirgenlik- efektif gerilme ilişkisi de Şekil 5.41d'de verilmiştir. Her iki grafikte de eğriler birbiriyle örtüşürken YAO<1 olduğu yükleme kademelerinde ε_v -log t

eğrilerinde S şeklinde bariz bir kırıklık belirlenemediğinden 200-300kPa kademesi için $t_p=145$ dakika ve 300-400 kPa için $t_p=291$ dakika olarak tahmin edilen değerlerde eğrilerde sapmalar gözlenmiştir. Deneyler sırasında boşluk suyu basıncı ölçümü alınamadığından küçük yük artımında oluşacak fazla boşluk suyu basıncının düşük olacağından t_p süresinin çok daha kısa olması gerekmektedir.

Sonuç olarak; 5 cm çaplı 2cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm ve 10 cm yükseklikli 5 farklı yükseklikli numune ile 2 cm yükseklikli 5 cm, 7 cm ve 10 cm çaplı 3 farklı çapta numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinde birincil konsolidasyon sürelerinden bağımsız olarak ortak bir EOP $\epsilon_v\text{-log}\sigma'_v$ eğrisinin oluştuğu görülmüştür. Bölümde $\epsilon_v\text{-log } t$ eğrilerinden Casagrande yöntemine göre belirlenen t_p süreleri ve oluşturulan EOP $\epsilon_v\text{-log}\sigma'_v$ eğrilerinden belirlenen birincil konsolidasyon parametrelerinden C_c , M_c , c_v ve k_v değerlerinin efektif gerilme ile değişimleri içerisinde genel bir uyum bulunmuş olup, Samsun-Çarşamba mavi kili numunelerinin kullanıldığı bu parametrik çalışmada, numune boyutundan C_c ve M_c parametrelerinin etkilenmediği düşünülmektedir. Ayrıca, 7 farklı H/D oranında çalışılan bu alt grupta zemin ile ring arasındaki sürtünmenin ihmal edildiği deneylerde sonuçların birbirleri ile uyumlu çıkması, iç yüzeyleri gres ile yağlanarak kullanılan çelik ringlerin bu çalışma için bu sürtünmenin ölçülememesine karşılık yanal sürtünmenin sınırlı kalmasını sağladığı belirlenmiştir.

5.4.2 Numune Boyutunun Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Gözlenen Davranış Üzerindeki Etkisi

Arazide özellikle tabaka kalınlığı fazla olan yumuşak killerin oturma miktarlarının, laboratuvarında ince numuneler üzerinde yapılan deneylerden bulunan sıkışma miktarlarıyla temsil etmesi konusunda ortaya atılan iki hipotez önceki bölümlerde verilmiştir. Bu hipotezlerden Hipotez A krip etkisinin birincil konsolidasyon sonrasında olduğunu savunurken Hipotez B kripin birincil konsolidasyon esnasında da oluşacağını savunmuştur. Bu nedenle, Hipotez B'yi savunanlar konsolidasyonu uzun süreler gerektiren kalın tabakalarda daha fazla kripin birincil oturmalara katılacağını bu yüzden de tabaka kalınlığının artması ile belirlenecek EOP $e\text{-log}\sigma'_v$ eğrilerinin aşağı doğru kayacağını belirtmiştir. Ancak Mesri (2001), bu yönde kuvvetli arazi bulgularının olmadığını kripin birincil konsolidasyona katıldığını ancak bunun tekil bir EOP $e\text{-log}\sigma'_v$ eğrisinin oluşmasına engel olmayacağını

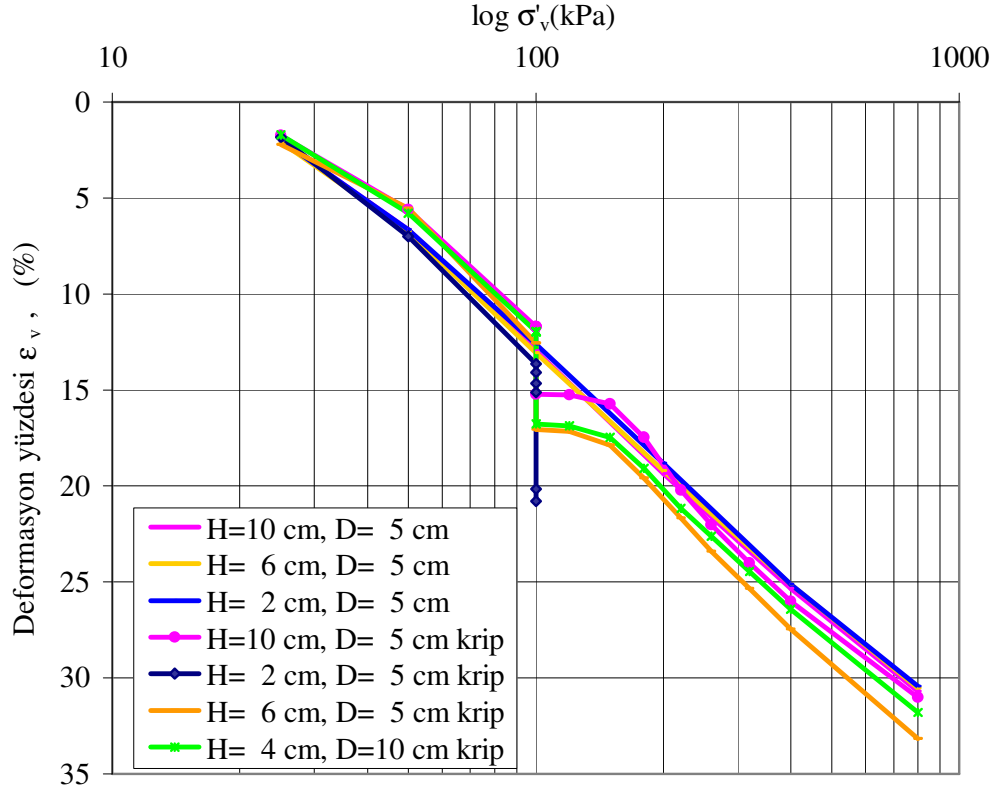
savunmuştur. Her iki hipotezin de ortak görüşü ince ve kalın numunelerin ikincil sıkışmaları esnasında oluşacak ikincil sıkışma katsayılarının aynı olacağı yönündedir. Bu çalışmada ikincil sıkışma katsayısı sabit olarak birkaç log çevrimi boyunca devam ederken bir süre sonra üçüncül sıkışmaların olduğu Samsun-Çarşamba mavi kilinde ince numunelerde tanımlanacak üçüncül sıkışma katsayılarının arazideki davranışı temsil edebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı çap ve yüksekliklerdeki ringler içerisine yerleştirilen RHH numuneler üzerinde uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bilindiği üzere, numune boyunun artması drenaj boyunu uzatacağından drenaj boyunun karesi ile doğru orantılı olan konsolidasyon süresi de çok uzayacaktır. Bu nedenle, farklı boyutlarda hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen uzun süreli konsolidasyon deneylerinde sadece bir düşey gerilmede kripe izin verilmiştir. 25 kPa gerilme seviyesinde Rowe hücresinde hazırlanan numunelerin önkonsolidasyon basıncından etkilenmemesi için krip gerilmesi 100 kPa olarak belirlenmiştir. Bu grupta yapılan deneyler Tablo 5.14'te gösterilmiştir.

Tablo 5.14: Krip deneylerinde gerilme seviyeleri ve deney süreleri

Numune Tipi	Gerilme Değeri (kPa)	Bekleme süresi (gün)
H=2cm, D=5cm	100	327
H=6cm, D=5cm	100	327
H=10cm, D=5cm	100	327
H=4cm, D=10cm	100	327

Dört farklı numune boyutundaki RHH numuneler üzerinde gerçekleştirilen uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen deformasyon yüzdesinin efektif düşey gerilme ile değişimi Şekil 5.42'de gösterilmiştir. Deneyler sırasında 100 kPa düşey gerilme seviyesine sadece birincil konsolidasyona izin verilmek suretiyle $YAO=1$ olacak şekilde çıkılarak 100 kPa gerilme seviyesinde uzun süreli krip deneyi yapılmıştır. Krip deneylerinde Tablo 5.14'te gösterildiği gibi 327 gün süre ile beklenilmiştir. Daha sonra, tekrar yüklenen 3 numuneye ait tekrar sıkışma eğrilerinden de görüleceği üzere belirlenen bir zaman diliminde birincil sıkışmalar ardından numuneler farklı miktarlarda ikincil + üçüncül sıkışma davranışı sergilemişlerdir. Bu durumda Şekil 5.42'de numunelerin klasik konsolidasyon

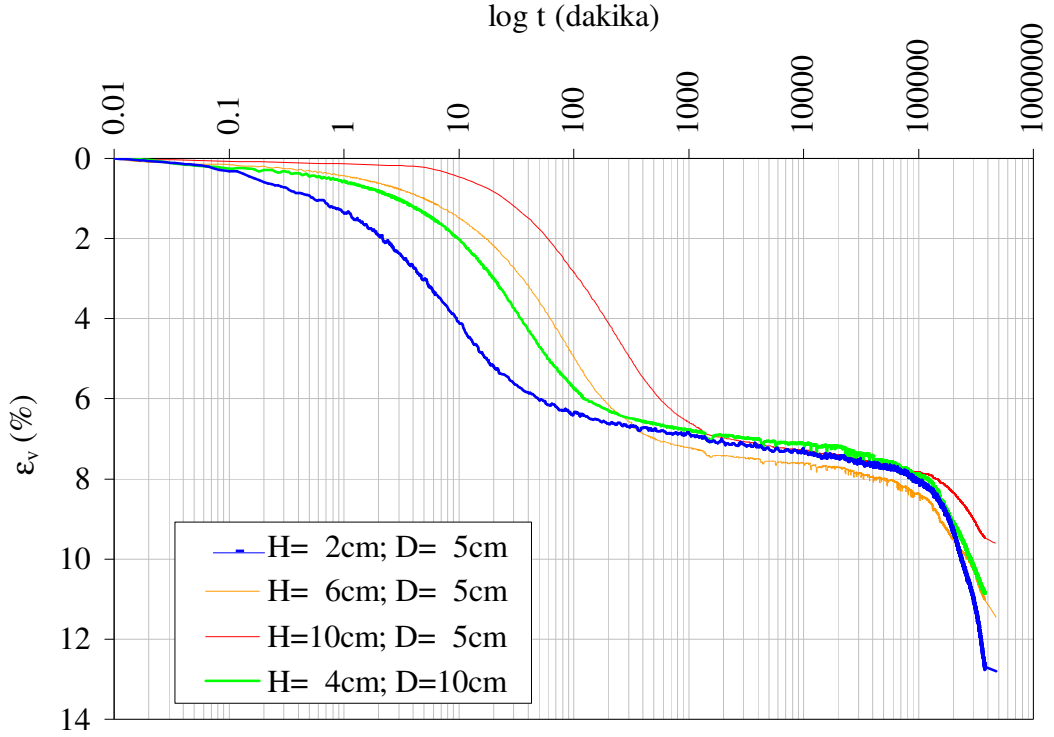
deneylerinden elde edilen tekil EOP $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileriyle birleşme şekilleri de farklı olmuştur.



Şekil 5.42: Farklı boyutlardaki numunelerin uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait $\varepsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileri

Üçüncü bölümde değinildiği üzere krip gerilmesinin önceki yükleme kademelerindeki bekleme sürelerinden etkilendikleri için bu yükleme kademelerinde numunelerin sadece birincil konsolidasyonuna izin verilmiştir. Şekil 3.8’de anlatıldığı üzere $\varepsilon_v - \log t$ eğrilerinin şeklini etkileyen yük artırma oranı (YAO) bir alınmak suretiyle birincil ve ikincil sıkışmaların deformasyon hızları arasında fark yaratılmak suretiyle S şekilli Tip-I sıkışma eğrileri elde edilmiştir. 50 kPa-100 kPa yükleme kademesine ait krip deneyleri sırasında elde edilen deformasyon yüzdesi-logaritma zaman eğrileri Şekil 5.43’de gösterilmiştir. Krip gerilme seviyesinde Casagrande ve Taylor yöntemlerine göre belirlenen birincil konsolidasyonun tamamlanma süreleri ile belirlenen konsolidasyon katsayıları Tablo 5.15’te verilmiştir. Numune yüksekliğinin artması ile birincil konsolidasyonun tamamlanma süresi (t_p) artarken, konsolidasyon katsayısı (c_v)

0,0005 cm²/sn ~0,0006 cm²/sn aralığında sınırlı kalmıştır. Bu sonuç klasik konsolidasyon deneylerinden bulunanlarla üst üste düşmektedir.



Şekil 5.43: Farklı boyuttaki numuneler ile 100 kPa gerilme seviyesinde yapılan krip deneylerinin sonuçları

Tablo 5.15: Krip deneylerinden belirlenen konsolidasyon katsayıları

Gerilme (kPa)			100	100	100	100
Yöntem	Numune Boyutu	D (cm)	5	5	5	10
		H (cm)	10	6	2	4
Casagrande	t_p (dak) = t_{100} (dak)		900	319	43,5	130
	t_{50} (dak)		124	42,2167	4,51667	21,117
	H_d (cm)		4,557	2,73227	0,89586	1,825
	c_v (cm ² /sn)		0,00055	0,00058	0,00058	0,00052
Taylor	t_{90} (dak)		461	196	19	90
	H_d (cm)		4,577	2,73921	0,89978	1,8294
	c_v (cm ² /sn)		0,00064	0,00054	0,00064	0,00053

Şekil 5.42'den belirlenen sıkışma indisi (C_c), değerleri ile Şekil 5.43'den hesaplanan ikincil sıkışma katsayısı (C_α) ve üçüncül sıkışma katsayısı ($C_{\alpha et}$) değerleri Tablo 5.16'da özetlenmiştir. Farklı H/D oranındaki numunelere ait Şekil 5.43'deki

ε_v -log t eğrilerinde ikincil sıkışmalar kısmındaki eğimden belirlenen C_α değerinin pratik anlamda aynı olması C_α değerinin numune boyutundan bağımsız olduğu görüşünü destekler niteliktedir. Deformasyon-logaritma zaman eğrilerinden hesaplanan ikincil ve üçüncül sıkışma parametreleri Tablo 5.16’da verilmektedir. Buna göre, Tablo 5.16’dan da görüleceği üzere ikincil sıkışma parametrelerinin numune boyutundan bağımsız olduğu anlaşılrken, üçüncül sıkışma parametrelerinin numune boyutundan etkilendiği anlaşılmaktadır. İnce numunenin yüksekliği 3 katına çıkarıldığında numunede belirlenen üçüncül sıkışma katsayısı ($C_{\alpha et}$) %55 azalırken, yükseklik 5 katına artırıldığında $C_{\alpha et}$ değeri, ince numunenin %44’üne düşerek düşüşün giderek azaldığı anlaşılmıştır. Bu durumda, aynı çaplı farklı yükseklikli numunelerde numune yüksekliğinin artması ile $C_{\alpha et}$ değerlerinin azaldığı ve bu nedenle ince numunenin arazideki üçüncül sıkışma davranışını modellemek için yüksekliği daha fazla olan numuneler üzerinde deneyler yapılmasına ihtiyaç vardır.

Tablo 5.16: Uzun süreli konsolidasyon deneylerinin sonuçları

Numune Tipi	Gerilme Kademesi (kPa)	C_c	$C_{\alpha \varepsilon}$	C_α	$C_{\alpha et}$
H=2cm, D=5cm	100	0,620	0,00478	0,0134	0,09351
H=6cm, D=5cm	100	0,646	0,00471	0,0132	0,05145
H=10cm, D=5cm	100	0,573	0,00464	0,0131	0,04157
H=4cm, D=10cm	100	0,578	0,00470	0,0133	0,06052

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde Samsun-Çarşamba mavi kili'nin zamana bağlı sıkışma davranışına etkisi olduğu düşünülen dört parametrenin deneysel incelenmesi sonucu elde edilen bulgular değerlendirilerek tartışılmaktadır. Örselenme, organik içerik, dane çapı dağılımı ve numune boyutu olarak belirlenen bu parametrelerin birincil konsolidasyon, ikincil sıkışma ve üçüncül sıkışma davranışına etkilerini araştırmak amacıyla örselenmemiş, yoğrulmuş ve Rowe konsolidasyon hücresinde hazırlanmış Samsun-Çarşamba mavi kil numuneleri üzerinde klasik konsolidasyon, uzun süreli konsolidasyon ve sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur:

1. Deneysel çalışmaların birinci bölümünde, Samsun Çarşamba mavi kilinin bir boyutlu sıkışma davranışına dane çatısının bozulmasının etkisi incelenmiştir. Deneylerde, Samsun Çarşamba Deltası'nda 7,5 m ve 8 m derinlikten Shelby tüpleri ile alınan örselenmemiş yumuşak, mavi renkli kil numuneleri ile örselenmemiş numunelerin spatula ile iyice karıştırılmasıyla, aynı su içeriğinde fakat farklı dane çatısında hazırlanan yoğrulmuş kil numuneleri kullanılmıştır. Deneylerde, örselenme ile klasik konsolidasyon deneyinde $e - \log \sigma'_v$ eğrisinde gözlenen önkonsolidasyon basıncındaki bariz kırıklık giderek kaybolmuş ve $e - \log \sigma'_v$ eğrilerinden, örselenmemiş numunede $\sigma'_p=85$ kPa olan önkonsolidasyon basıncı değeri, yoğrulmuş numunede $\sigma'_p=75$ kPa'ya düşmüştür. Örselenme ile örselenmemiş numunede $C_c=0,647$ olan sıkışma indisi değeri örselenmiş numune de $C_c=0,545$ 'ye azalırken, örselenmemiş numune için $C_r=0,198$ bulunan tekrar sıkışma indisi değeri örselenmiş numune için $C_r=0,221$ 'ye yükselmiştir. Örselenme ile σ'_p öncesinde $c_v=9,42 \times 10^{-8} \sim 4,65 \times 10^{-8}$ m²/s olan konsolidasyon katsayısı σ'_p sonrasında $c_{v \text{ ortalama}} = 2,45 \times 10^{-8}$ m²/s'ye düşerken, örselenmiş numunede c_v değeri için σ'_p civarında böyle bir ayırım gözlenmemiş, $c_{v \text{ ortalama}} = 0,93 \times 10^{-8}$ m²/s'ye düşmüştür. Buna göre, yüksek sıkışabilirlikli zemin ($C_c > 0,4$) sınıfına giren zeminin örselenme σ'_p değerini

belirsizleştirirken, C_c , c_v değerlerini düşürmüş, C_r değerini yükseltmiştir. Bilindiği üzere, doğal bir kil, oluşumu sırasındaki koşullara ve oluşumu sonrasındaki çevresel değişimlere bağlı olarak topak bir yapı geliştirmektedir. Deformasyonlar, bu yapıyı bozmaya ve daneleri yeniden yerleşmeye zorlamaktadır. Zemini homojen olana kadar yoğurmak daneleri, komşu danelerle aynı dizilime girmeye ve daneler arasındaki bağları bozmaya zorlamaktır. Bir kilde doğal yapıyı yoğurarak bozmak özellikle düşük gerilme seviyelerinde sıkışabilirliği oldukça artırmaktadır. Topaklaşmış yapılı bir zemin elemanı, aynı boşluk oranına sahip aynı zeminin yapısı dağınık hale getirilmişine göre daha yüksek dayanıma, daha düşük sıkışabilirliğe, daha yüksek geçirgenliğe sahiptir. Topaklaşmış durumda daha yüksek dayanım ve düşük sıkışabilirlik, daneler arası etkileşimden ve düzensiz dizilimdeki danelerin yer değiştirme zorluğundan kaynaklanmaktadır. Topaklaşmış durumdaki zeminde yüksek geçirgenlik, akış için daha büyük kanalların bulunmasının bir sonucudur. Aynı boşluk oranında topaklaşmış bir zemin elemanında, dağınık yapıdaki bir elemana göre akış için aynı toplam kesit alanı varken, topaklaşmış zeminde akış kanalları sayıca daha az ve boyutu daha büyüktür. Böylece dağınık yapıya göre topaklaşmış bir zemin yapısı boyunca akışa karşı daha az bir direnç oluşacaktır. Sonuç olarak, dane çatısının zeminlerin mühendislik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri olduğu açıktır.

2. Örselenmemiş ve örselenmiş numunelerde 70 günden 234 güne kadar değişen sürelerde 25 kPa'dan 400 kPa gerilmesine kadar çeşitli gerilme seviyelerinde toplam 7 adet krip deneyini içeren uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Birincil konsolidasyonun tamamlanma süresi, örselenmemiş numunede $t_p \text{ ortalama} = 80$ dakika bulunurken yoğrulmuş numunede $t_p \text{ ortalama} = 160$ dakika'ya uzamıştır. Bunun, örselenmemiş numunenin topaklaşmış yapısının suyun geçişine karşı yoğrulmuş numunedeki dağınık yapıya göre daha az direnç göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Örselenmemiş numunede σ'_p öncesindeki gerilme seviyesindeki krip deneyinde ikincil sıkışmaların tamamlanma ve üçüncül sıkışmaların başlama anı $t_s = 13,8$ gün olurken σ'_p sonrasında $t_s \text{ ortalama} = 27$ güne çıkmıştır. Örselenmiş numunede t_s değeri için σ'_p civarında böyle bir ayırım

gözlenmezken $t_{s \text{ ortalama}} = 19$ gün bulunmuştur. Örselenmemiş numunelerde normal konsolide kısımda t_s süresinin, yoğrulmuş numunelerdekilerden daha fazla olması, toprak yapıda daneler arası etkileşim ve düzensiz dizilimdeki danelerin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençten kaynaklandığı düşünülmektedir. Örselenmemiş toprak yapıdaki zemin elemanı, aynı boşluk oranında ayırık hale getirilmiş bir yapıya göre daha yüksek dayanıma ve daha düşük sıkışabilirliğe sahiptir. Krip deneylerinde elde edilen sıkışma indisi örselenmemiş numunede $C_c = 0,076 \sim 0,527$, örselenmiş numunede $C_c = 0,201 \sim 0,511$ aralığındayken, ikincil sıkışma katsayısı örselenmemiş numunede $C_{\alpha} = 0,0044 \sim 0,0154$, örselenmiş numunede $C_{\alpha} = 0,0103 \sim 0,0162$ aralığında bulunmuş olup bu değerlerin efektif gerilme ile arttığı gözlenmiştir. Mesri ve Godlewski (1977), tarafından ortaya atılan bir zemin türü için sabit bir C_{α}/C_c fikri bu çalışmada da incelenmiş ve örselenmemiş numunelerde $C_{\alpha}/C_c = 0,0286$ olarak belirlenen bu oranının yoğrulmuş numunede de önemli bir değişiklik göstermediği ve $C_{\alpha}/C_c = 0,0292$ olduğu görülmüştür. Üçüncül sıkışma oranı, efektif gerilme artışı ile örselenmemiş numunede σ'_p öncesinde $C_{\alpha et} = 0,0085$ ile sınırlı kalırken efektif gerilmenin artması ile $C_{\alpha et} = 0,0236 \sim 0,308$ aralığında azalarak artmıştır. Örselenmiş numunede ise σ'_p civarında böyle bir ayırım gözlenmezken $C_{\alpha et} = 0,0381 \sim 0,0212$ aralığında artan efektif gerilme ile azaldığı görülmüştür. Bu durumda, üçüncül sıkışma kısmı için belirlenen $C_{\alpha et}$ değerinin ikincil sıkışma kısmı için belirlenen $C_{\alpha e}$ değerine göre örselenmemiş numunede 5~7 kat aralığında artış gösterdiği, örselenmiş numunede bu artışın artan efektif gerilme ile 19 kattan 4 kata düştüğü bulunmuştur. Krip deneyi sonrasında küçük yük artımları ile tekrar yüklenen örselenmemiş ve örselenmiş numunelerde $\epsilon - \log \sigma'_v$ eğrilerinde Samsun- Çarşamba mavi Kili'nin krip sonrası sıkışma davranışında yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde önemli bir bulguya rastlanmamıştır.

3. Organik içerik, zeminlerde yüksek plastisite, yüksek rötre, yüksek sıkışabilirlik, düşük hidrolik iletkenlik ve düşük dayanıma neden olabilmektedir. Organik içeriği yüksek olan zeminlerde genellikle kuruma ile plastisite ve sıkışabilirlik azalmaktadır. Özellikle organik zeminler ile turba zeminlerde birincil konsolidasyon sonrası zamana bağlı ikincil sıkışma

davranışının arttığı görülmektedir. Üçüncü bölümde anlatıldığı üzere, Yılmaz (2000) çektiği SEM fotoğraflarıyla Samsun-Çarşamba mavi kilinin sergilediği üçüncül sıkışma davranışına zemin içerisindeki yosun parçacıklarının oluşturduğu organik içeriğin çatısının çökmesinin neden olabileceğine dikkat çekmiştir.

4. Organik içeriğin yakılması ile zeminin plastisitesinin azaldığı belirlenmiştir. Kıvam limitleri havada kurutulduklarında w_L ortalama=%76 olurken, 105°C'lik etüvde kurutulanlarda w_L ortalama=%68 değerine düşmüştür. Islak yakma sonrasında numunelerin kıvam limitleri w_L =%74, w_p =%27 ve I_p =%47 olurken dane çapı dağılımına göre %37 silt+%63 kil içerdiği bulunmuştur. Kuru yakma sonrasında kıvam limitleri w_L =%51, w_p =%33 ve I_p =%18 olarak belirlenen numunelerin %87 silt+%13 kil boyutunda dane içerdiği belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin sınıflamasına göre yüksek plastisiteli kil CH sınıfına giren Samsun-Çarşamba mavi kilinin zemin grubu ıslak yakma sonrasında da CH kalırken, kuru yakma sonrasında grubu MH sınıfına kaymıştır. RHH numunelerin yakma öncesinde 1,78 olan boşluk oranı, organik içeriğin yakılması ile azalarak ıslak yakma sonrasında 1,69 kuru yakma sonrasında 1,51 bulunmuştur. Bu sonuç organik içeriğin artmasıyla boşluk oranının artacağını gösteren Coutinho ve Lacerda (1987)'nin bulgularıyla örtüşmektedir.
5. Organik içerikli ve organik içeriği yakılmış numunelerde yapılan klasik konsolidasyon deneyleri sonucunda ıslak yakma yöntemi ile yakılması C_c değerini ortalama %10, kuru yakma yönteminin ise ortalama 2,2 kat azalttığı görülmüştür. Ancak, bu değişimin nedeninin yakma işlemiyle organik içeriğin arındırılması sırasında özellikle kuru yakılan numunelerde zeminin endeks özelliklerinin değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim yakılan ve yakılmayan numunelerin değişen C_c değerleri, Terzaghi & Peck (1967) tarafından normal konsolide killeri ile Skempton (1944) tarafından yoğrulmuş killeri için önerilen w_L - C_c bağıntılarıyla bulunan değerler arasında kalmaktadır. Artan efektif gerilme ile artan sıkışma modülü (M_c) değerinin organik içeriğin ıslak yakma yöntemiyle uzaklaştırıldığı numunede önemli bir değişiklik gözlenmezken, kuru yakılan numunede tüm gerilme seviyelerinde ortalama 1,4 katlık bir artış belirlenmiştir. Organik içeriğin yakılmasının c_v

değerini ıslak yakılma yönteminde 4,5 kat, kuru yakma yönteminde ise ortalama 1,2 kat azalttığı görülmüştür. Artan efektif gerilme ile k_v değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Benzer ilişki organik içeriği yakılmış numunelerde de görülmüş olup ıslak yakma yönteminde k_v değerinin ortalama 3 kat, kuru yakma yönteminde ise 2 kat daha düşük olduğu bulunmuştur.

6. Organik içeriğin etkisini incelemek amacıyla organik içerikli ve organik içeriğinden ıslak veya kuru yakma yöntemiyle arındırılan RHH numunelerde 25 kPa~800 kPa gerilme aralığında süresi 85 günden 603 güne kadar değişen krip deneylerini içeren 11 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Yakma öncesinde $t_p=50\sim80$ dakika aralığında değişirken, ıslak yakılan numunede $t_p=80\sim110$ dakikaya uzamış kuru yakılan numunede de $t_p=80\sim110$ dakika bulunmuştur. Yakma öncesi RHH numunede $t_s=34\sim68$ gün olan ikincil sıkışmaların tamamlanma süreleri ıslak yakma sonrasında $t_s=42\sim70$ güne çıkarken kuru yakılmış numunede $t_s=42\sim48$ gün bulunmuştur. Buna göre, numunelerin aynı gerilme altında yapılan krip deneyleri karşılaştırıldığında t_s sürelerinin uzadığı yani ıslak yakma ve kuru yakmanın üçüncül sıkışmaların başlamasını geciktirdiği açıkça görülmüştür. Yakma işlemiyle organik içeriğinden arındırılan numunenin C_c değeri düşmüştür. Yakma öncesinde RHH numunede artan efektif gerilme ile 100 kPa gerilmesine kadar artan ikincil sıkışma katsayısının daha sonra azaldığı, ikincil sıkışma katsayısının ortalama $C_\alpha=0,008$ olduğu görülmüştür. Islak yakılan numunede de benzer $c_\alpha\text{-log}\sigma'_v$ ilişkisi gözlenirken C_α değerinin %14 arttığı bulunmuştur. Kuru yakma ile $c_\alpha\text{-log}\sigma'_v$ eğrisinin azalarak arttığı görülmüş olup, C_α değerinin ortalama % 20 azaldığı belirlenmiştir. Yakma öncesi RHH numunede 0,0178 olan C_α/C_c değerleri yakma sonrasında artarak ıslak yakma sonrasında 0,0196 kuru yakma sonrasında 0,0312 olmuştur. Tüm numuneler için artan efektif gerilme ile 100 kPa civarına kadar artan $C_{\alpha et}$ değerlerinin daha sonra azalarak devam ettiği görülmüştür. Organik içeriğinin yakılması, yakma öncesinde ortalama $C_{\alpha et}=0,0346$ olan üçüncül sıkışma oranı değerini ıslak yakmada 1,9 kat kuru yakmada 1,6 kat azaltmıştır. Krip deneyi sonrasında sıkışma davranışının da incelendiği uzun süreli konsolidasyon deneylerinde düşük yük artımları ile tekrar yüklenen zeminde yakma

öncesinde krip sonrası sıkışma davranışında yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde herhangi bir bulguya rastlanmazken ıslak yakılmış ve kuru yakılmış numunelerde yaşlanma etkileri gözlenmiştir.

7. Deformasyon hızları $0,011 \sim 0,074$ dakika⁻¹ aralığında değişen 13 adet sabit deformasyon hızlı konsolidasyon (SDHK) deneyi yapılmıştır. Tüm numunelerde SDHK deneyleriyle belirlenen $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrilerin klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen EOP $\epsilon_v - \log \sigma'_v$ eğrileriyle uyum içerisinde oldukları ve her iki deney sistemiyle belirlenen M_c sıkışma modüllerinin birebir örtüştüğü görülmüştür. Yakma öncesinde RHH numunelere ait c_v değerleri ıslak yakma sonrasında ortalama %30 oranında düşüş gösterirken, kuru yakma sonrasında 3 ile 10 katlık bir artış gözlenmiştir. Yakma öncesinde SDHK deneyinden bulunan c_v değerleri ile klasik konsolidasyon deneyinden bulunanlar özellikle 200 kPa sonrasında örtüşmüştür. Organik içeriğinden arındırılan numunelerin SDHK deneylerinden bulunan c_v değerleri, klasik konsolidasyon deneyinden belirlenen değerin ıslak yakma sonrasında RHH numunelerde 1,5~2 kat, kuru yakma sonrasında RHH numunelerde ise 10 ile 20 kat daha büyük çıkmıştır.
8. Doğada çoğu zemin türünde birden fazla kil minerali bulunabildiğinden, oluşan bu mineralojik kompozisyonlar, zemin danelerinin şeklini, boyutunu ve yüzeyini etkilemekte ve daneler arasındaki boşluklardaki suyla etkileşime girmeleri durumunda zeminin aktivite, plastisite, şişme ve hidrolik iletkenlik ve mukavemet davranış karakteristiğinde belirleyici rol alabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan üçüncül sıkışma özelliği gösteren Samsun-Çarşamba mavi kilinin sıkışma davranışına kil boyutlu minerallerin yola açabileceği düşünülmüştür. Yılmaz (2000), Samsun-Çarşamba mavi kilinin %40-50 dolayında Ca-montmorillonit, %30 dolayında kalsit+kuvars ve %10 dolayında da kaolin içerdiğini belirtmiştir. Bu çalışma kapsamında da aynı bölgeden alınan mavi kil numuneleri ile çalışmıştır.
9. Samsun-Çarşamba mavi kilinin sıkışma davranışına kil boyutlu minerallerin etkisini ortaya koymak amacıyla ıslak analiz (hidrometre) yöntemine göre silt ve kil boyutundaki daneler birbirinden ayrılmaya çalışılmış ve orijinalinde %50 silt+%50 kil boyutunda dane barındıran numuneden %5kil+%95 silt ve %82 kil +%18 silt boyutunda dane içeren numuneler elde edilmiştir. %50

silt+%50 kil içeren endeks özellikleri $w_L=76$, $w_p=26$ $I_p=50$ $\gamma_s=27,2 \text{ kN/m}^3$ olarak belirlenen numunelerin ayrılma işlemi sonrasında %5kil+%95 silt olan numunede $w_L=44$, $w_p=25$, $I_p=19$, $\gamma_s=24,6 \text{ kN/m}^3$ ve %82 kil +%18 silt olan numunede $w_L=102$, $w_p=44$, $I_p=60$, $\gamma_s=27,7 \text{ kN/m}^3$ bulunmuştur. Birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre orijinalinde CH grubu olarak belirlenen zemin sınıfı %5 kil+%95 silt olan numunede CL olurken %82 kil +%18 silt olan numunede yine CH olarak kalmıştır. Konsolidasyon deneylerinde kullanılacak numuneler belirlenen likit limit değerlerinin iki katı su içeriğinde Rowe hücresinde tekrar konsolide edilerek hazırlanmıştır.

10. Kil boyutundaki dane yüzdesi farklı numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinden kil yüzdesinin artması ile %5 kil+%95 silt numune için 0,30 olarak belirlenen ortalama C_c değeri , %50 kil+%50 silt için 0,55 ve %82 kil+%18 silt için 0,77'ye yükselmiştir. Her üç numunede de σ'_p önkonsolidasyon değerinden sonra artan σ'_v ile M_c değerinin doğrusal olarak arttığı, kil boyutunda dane yüzdesi fazlalaştıkça doğrunun eğiminin de azaldığı görülmüştür. Bu da kil boyutundaki dane yüzdesi fazla olan numunenin sıkışması anlamını taşımaktadır. Ayrıca, kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile c_v değerinin artış gösterdiği gözlenmiştir. %5 kil+%95 silt için $8,39 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olan ortalama c_v değerinin %50 kil+%50 silt için $5,87 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ve %5 kil+%95 silt için $1,06 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ bulunmuştur. Buna bağlı olarak kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile ortalama düşey geçirgenlik katsayısı %5 kil+%95 siltte $4,90 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, %50 kil+%50 siltte $4,78 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ve %5 kil+%95 siltte $9,44 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 'ye düştüğü bulunmuştur.

11. Kil boyutundaki minerallerin Samsun Çarşamba mavi kilinin kripi davranışına etkisini incelemek amacıyla 100 kPa gerilme seviyesinde 347 günlük kripi deneylerini içeren uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde konsolidasyonun tamamlanması %5 kil + %95 silt olan numunede $t_p=4,5$ dakika gibi çok kısa bir süre alırken, kil boyutundaki dane yüzdesinin artması ile %50 silt + %50 kil içeren numunede $t_p=85$ dakika, %82 kil + %18 silt içeren numunede ise 146 dakika olmuştur. İkincil sıkışmaların tamamlanma süresi kil yüzdesinin artmasıyla gecikmiş %5 kil + %95 silt olan numunede $t_s=17$ gün olurken, %82 kil + %18 silt

içeren numunede $t_s=26$ gün bulunmuştur. Ayrıca, kil boyutunda dane yüzdesinin fazla olduğu numunelerde ikincil sıkışma katsayısı (C_α) değeri daha yüksek olmuştur. Efektif gerilmenin artması ile artan C_α değerinin %82 kil + %18 silt ve %50 kil+%50 silt içeren numunede 100 kPa'da bir tepe yapıp azaldığı ancak, %5 kil +%95 silt içeren numunede böyle bir azalmanın olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, %5 kil +%95 silt içeren numunede 0,0315 olan C_α/C_c oranı, %82 kil+%18 silt olan numunede 0,0274'e düşmüştür. Ancak, belirlenen üçüncül sıkışma oranının ($C_{\alpha et}$) ikincil sıkışma oranına ($C_{\alpha e}$) oranı %5 kil+%95 silt içeren numunede yaklaşık 7 katlık bir artışı gösterirken, %82 kil+%18 silt olan numunede bu artışın 11 kata yükseldiği bulunmuştur.

12. Numune boyutu ile konsolidasyon parametrelerindeki değişimi incelemek amacıyla 0,2~2 aralığında 7 farklı H/D oranında Samsun-Çarşamba mavi kili numunelerinde klasik konsolidasyon deneyleri ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. 5 cm çapında 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm ve 10 cm yüksekliğinde ve 2 cm yüksekliğinde 7 cm ve 10 cm çaplı ringlerin kullanıldığı deneylerde RHH numunelerle çalışılmıştır. Seçilen numune boyutlarında Casagrande yöntemine göre belirlenen EOP ϵ_v - $\log \sigma'_v$ eğrilerinin birbiribir örtüştükleri ve C_c sıkışma indisi değerlerinin değişmediği anlaşılmıştır. Numune yüksekliklerinin artmasıyla konsolidasyonun tamamlanma süresinin drenaj boyunun karesiyle doğru orantılı olarak arttığı ve konsolidasyon katsayısı (c_v) değerlerinin beklenildiği üzere çoğunlukla üst üste örtüştükleri ve artan efektif gerilme ile azaldıkları görülmüştür. Ayrıca numunelerin sıkışma modülü M_c - σ'_v eğrilerinin birbiriyle çakıştığı ve 50 kPa gerilme değerine kadar M_c düşerken daha sonraki gerilmelerde arttığı bulunmuştur. M_c ve c_v katsayısına bağlı olarak hesaplanan k_v değerinin ise artan efektif gerilme ile azaldığı ve k_v - σ'_v eğrilerinin seçilen H/D oranlarındaki numune boyutlarından etkilenmedikleri anlaşılmaktadır.
13. 100 kPa gerilmesinde 327 günlük krip deneylerini içeren uzun süreli konsolidasyon deneylerinde H/D oranı 0,4~2,0 arasında değişen 4 farklı numune boyutunda RHH numunelerle çalışılmıştır. Krip deneylerinde numune boyutunun değişimi ikincil sıkışma katsayısı C_α değerini

etkilemezken, üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\epsilon t}$ değerin H/D oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. Aynı H/D oranına sahip numunelerde de numune yüksekliği fazla olanda belirlenen $C_{\alpha\epsilon t}$ değerin düştüğü görülse de deneyler 327 güne kadar uzatılmasına karşılık üçüncül sıkışma oranının hesaplandığı bölgede bir log çevrimlik okuma alınamamıştır.

KAYNAKLAR

- Adams, J.**, 1965. The engineering behavior of a Canadian muskeg, *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, **1**, 3-7.
- Adikari, G.S.N.**, 1977. Statistical evaluation of strength and deformation characteristics of Bangkok clays, *M.Sc. Thesis*, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Allam, M.M. and Sridharan, A.**, 1979. The influence of aging on the shear strength behaviour of two fine-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, **16**, 391-397.
- ASTM D2435**, 1990. One dimensional consolidation properties of soils, *American Soil Testing Methods Standards*, Philadelphia, Pennsylvania.
- ASTM D4186**, 1998. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading, *American Soil Testing Methods Standards*, Philadelphia.
- Barber, E.S.**, 1961. Notes on secondary consolidation, *Proc. Highway Research Board*, **40**, 663-675.
- Barden, L.**, 1965. Consolidation of clay with non-linear viscosity, *Geotechnique*, **15**, 345-362.
- Barden, L.**, 1968. Primary and secondary consolidation of clay and peat, *Geotechnique*, **18**, 1-24.
- Barden, L.**, 1969. Time dependent deformation of normally consolidated clays and peats, *ASCE Soil Mechanics and Foundation*, **95**, 77-83.
- Berry, P.L. and Vickers, B.**, 1975. Consolidation of Fibrous peat, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **101**, 741-753.
- Bjerrum, L.**, 1967. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, **17**, 81-118.
- Bjerrum, L.**, 1972. Embankments on Soft ground, *Proc. ASCE Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University, **2**, 1-54.
- Bjerrum, L.**, 1973. Problems of soils mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others), *Proceedings. of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, **2**, 109-159.
- Brown, J.D. and Rashid, M.A.**, 1975. Influence of marine organic compounds on the engineering properties of a remoulded sediment, *Engineering Geology*, **9**, 141-154.

- Buisman, A.S.K.**, 1936. Results of long duration settlement tests, *Proceeding of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, **1**, 103-107.
- Butterfield, R.**, 1979. A natural compression law for soils: an advance on e-log p' *Geotechnique*, **29**, 469-480.
- Casagrande, L.**, 1932. Research on the Atterberg limits of soil, *Public Roads*, **13**, 121-130.
- Casagrande, A.**, 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance, Discussion D-34, *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, **3**, 60-64.
- Casagrande, A., and Carillo, N.**, 1944. Shear failure of anisotropic materials, *Proceedings of Boston Society of Civil Engineers*, **31**, 74-87.
- Chang, Y.C.E.**, 1969. Long-term consolidation beneath the test fills at Vasby, Sweden Diss. *University of Illinois*, Urbana, Illinois.
- Cornell, U.**, 1950. Final report, soil solidification research, Ithaca, New York.
- Coutinho, R.Q. and Lacerda, W.A.**, 1987. Characterization and consolidation of Juturnaiba organic clays, *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico, **1**, 17-24.
- Cozzolino, V.M.**, 1961. Statistical forecasting of compression index, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, **1**, 51-53.
- Crawford, C.B.**, 1965. The resistance on soil structure to consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, **2**, 90-97.
- Crawford, C.B. and Sutherland, J.G.**, 1971. The Empress Hotel, Victoria, British Columbia. Sixty-five years of foundation settlements, *Canadian Geotechnical Journal*, **8**, 77-93.
- Crawford, C.B.**, 1986. Evaluation and interpretation of soil consolidation tests, *ASTM Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, **STP 892**, Eds: R.N. Yong and F.C. Townsend, 71-103.
- Çevikbilen, G.**, 1999. Yumuşak Kil Zeminlerin İkincil Konsolidasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cevikbilen, G. and Saglam, A.**, 2003. Effects of Organic Content on Secondary and Tertiary Compression Behavior of a Soft Clay, *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice*. 17-19 September, The Netherlands, 403-409.
- Das, B.M.**, 1985. Principles of Geotechnical Engineering, 2nd Edition PWS Publishing Company, Boston, 21-23.
- deJosselin de Jong, G.**, 1968. Consolidation models consisting of an assembly of viscous elements or a cavity channel network, *Geotechnique*, London, England, **18**, 195-228.
- denHaan, E.J.**, 1994. Vertical compression of soils, *PhD Thesis*, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

- denHaan E.J. and Edil, T.B.**, 1994. Secondary and tertiary compression of peat, in *Advances in Understanding and Modelling The Behavior of Peat*, Eds denHaan, Termaat and Edil, Balkema, Rotterdam, 49-60.
- denHaan, E.J.**, 1995. Generalization of the stress strain and time measures of soil compression, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam, 513-518.
- Denisov, N.Y. and Reltov, B.F.**, 1961. The influence of certain processes on the strength of soil. *Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1**, 75-78.
- deWaal, J.A.**, 1986. On the rate type compactation behavior of sandstone reservoir rock., *PhD thesis*, Delft Technical University, Delft, The Netherlands.
- Dhowian, A.W. and Edil, T.B.**, 1980. Consolidation Behaviour of Peats, *Geotechnical Testing Journal*, **3**, 105-114.
- Edil T.B. and Dhowian, A.W.**, 1979. Analysis of long-term Compression of Peats, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **10**, 159-178.
- Edil, T.B. and denHaan E.J.**, 1994. Settlement of Peats and Organic soils, *ASCE Proceedings of Settlement'94*, College Station, Texas, June 24-27.
- Ellstein, A.**, 1991. Discussion of The mechanical aging of soils, by J. H. Schmertmann., *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 2012-2013.
- Fox, P.J., Edil, T.B. and Lan, L.T.**, 1992. C_α/C_c Concept Applied to Compression of Peat, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 1256-1263.
- Fox, P.J. and Edil, T.B.**, 1994. Micromechanics model for peat compression, *Proceedings of International Workshop on Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat*, Delft, Netherlands, 27-34.
- Fox P.J.**, 1999. Secondary compression of peat with or without surcharging, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, 160-164.
- Fujikawa, T. and Takayama, M.**, 1980. Compression index of Ariake marine clay-Geotechnical Properties of Ariake marine clay (2), *Trans. Japanese Society of Irrigation Drainage Reclamation Engineering*, **89**, 55-61.
- Gibson, R.E., and Lo, K.Y.**, 1961. A theory of consolidation of soils exhibiting secondary compression, in *Acta Polytechnica Scandinavica*, Civil Engineering and Building Construction Series, 10-296.
- Gorman, C.T., Hopkins, T.C., Deen, R.C. and Drnevich, V.P.**, 1978. Constant rate of strain and controlled gradient coconsolidation testing, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **1**, 3-15.
- Handy, R. L.**, 2002. First-order rate equations in geotechnical engineering, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**, 416-425.
- Hanson J. L.**, 1996. Thermal precompression of peat, *PhD Thesis*, University of Wisconsin, Madison, America.

- Head, K.H.**, 1986. Manual of Soil Laboratory Testing Volume 3: Effective Stress Tests, 1198-1199, BPCC Wheatons Ltd., Exeter.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D.**, 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 341-342.
- Horn, H.M. and Lambe, T.W.**, 1964. Settlement of buildings on the MIT Campus, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **90**, 181-196.
- Hough, B.K.**, 1957. Basic Soils Engineering, The Ronald Pres Company, New York, 114-115.
- Hueckel, T., Tao, F., Cassiani, G., and Pellegrino, A.**, 1999. Reactive plasticity for geological materials with a double structure evolving during aging, in *Constitutive laws for engineering materials*, Eds. Picu R. C. and Krempl E., 383-387, Troy, New York.
- Hueckel, T., Cassiani, G., Tao F., Pellegrino, A., and Fioravante, V.**, 2001. Aging of oil/gas-bearing sediments, their compressibility, and subsidence, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 926-938.
- Jamiolkowski, M. and Manassero, M.**, 1995. The role of in-situ testing in geotechnical engineering thoughts about the future, *Proceedings of the International Conference on Advances in Site Investigation Practice*, Thomas Telford Ltd., London, 929-951.
- Janbu, N.**, 1982. The resistance concept applied to deformation of soils, *Meddelelse 3 Bulletin*, Geotechnical division, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 191-195.
- Jonas, E.**, 1964. Subsurface stabilization of organic silt-clay by precompression, *ASCE Journal of Soil Mechanics Foundation Engineering*, **90**, 363-376.
- Kondner, R.L. and Vendrell, J.R.**, 1964. :Consolidation coefficients: Cohesive soil mixtures, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations*, **90**, 31-42.
- Koppejan, A.W.**, 1948. A Formula combining the Terzaghi load-compression relationship and the Buisman secular time effect, *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **3**, 32-37.
- Koumoto, T., and Park, J.H.**, 1998a. Compression index equation for remolded clays, *Trans. Japanese Society of Irrigation Drainage Reclamation Engineering*, **193**, 81-85.
- Koumoto, T., and Park, J.H.**, 1998b. Compression index equation for undisturbed clays, *Trans. Japanese Society of Irrigation Drainage Reclamation Engineering*, **193**, 59-63.
- Koumoto, T. and Park, J. H.**, 2004. New Compression Index Equation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**, 223-226.
- Ladd, C.C.**, 1971. Strength parameters and stress-strain behaviour of saturated clays, *Soils Publication*, **R71-23 278**, MIT, Cambridge, Massachusetts.

- Ladd, C.C.**, 1972. Test embankment on sensitive clay, *Proceedings of Special Conference on Earth and Earth-Supported Structures*, Lafayette, Ind., **1**, 101-128.
- Ladd, C.C.**, 1973. Settlement analysis for cohesive soils, *Research report, R71-2*, Department of Civil Engineering, MIT.
- Ladd, C.C., Foot, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G.**, 1977. Stress-deformation and strength characteristics, *Proceeding of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, **2**, 421-494.
- Ladd, C.C.**, 1985. Overview of Clay behavior, in *Recent Developments In Measurement and Modelling of Clay Behaviour for Foundation Design*, Special Summer Course, 1-99, Cambridge, Massachusetts.
- Lade, P.V.**, 2001. Modeling creep behavior of granular materials, *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 277-284.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.W.**, 1969. Soil Mechanics, Series in Soil Engineering, John Wiley & Sons Inc.
- Larsson, R.**, 1986. Consolidation of soft clays, *Swedish Geotechnical Institute*, Report no: 29, Linköping, Sweden.
- Lea, N.D. and Browner, C.O.**, 1963. Highway design and construction over peat deposits in the lower British Colombia, *Highway Research Record*, **7**, 1-32.
- Leonards, G.A. and Ramiah, B.K.**, 1959. Time effects in the consolidation of clays, *International Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing*, ASTM STP 254, 116-130.
- Leonards, G.A.**, 1962. Foundation Engineering, McGraw Hill Book Company Inc.
- Leonards, G.A. and Altschaeffl, A.G.**, 1964. Compressibility of clays, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation*, **90**, 133-155.
- Leonards, G.A.**, 1977, Panel Discussion, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **3**, 384-386.
- Leonards, G.A. and Deshamps, R.J.**, 1995. Origin and significance of the quasi-preconsolidation in clay soils, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, 341-347, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R.**, 1985. Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Geotechnique*, **35**, 159-180.
- Leroueil, S.**, 1994. Compressibility of clays: Fundamental and practical aspects, *ASCE Proceedings of Settlement'94*, College Station, Texas, June 1994, 24-27.
- Leroueil, S.**, 1995. Could it be that clays have no unique way of behaving during consolidation?, *Compression and consolidation of clayey soils*, 1039-1048, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

- Leroueil, S.**, 1996. Compressibility of clays: Fundamental and practical aspects, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **122**, 534-542,
- Leroueil, S. and Marques, M.E.S.**, 1996. Importance of Strain Rate and temperature effects in geotechnical engineering *Measuring and modelling time dependent soil behavior*, 1-59, Eds. T.C. Sheahan and V.N. Kaliakin, New York,
- Lessard, G., and Mitchell, J. K.**, 1985. The causes and effects of aging in quick clays, *Canadian Geotechnical Journal*, **22**, 335–346.
- Li, K. S.**, 2003. Discussion of first-order rate equations in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, 778–780.
- Lun, P.T.W. and Parkin A.K.**, 1985. Consolidation behaviour determined by the velocity method, *Canadian Geotechnical Journal* **22**: 158-165.
- Mesri, G.**, 1973. Coefficient of secondary compression, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, **99**, 123-137.
- Mesri, G. and Rokhsar, A.**, 1974. Theory of consolidation for clays, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering*, **100**, 889-904.
- Mesri, G.**, 1975. New design procedure for stability of soft clays, Discussion, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **101**, 409-412.
- Mesri, G., Rokhsar, A. and Bohor, B.F.**, 1975. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay, *Geotechnique*, **25**, 527-554.
- Mesri, G. and Godlewski, P.M.**, 1977. Time and Stress compressibility interrelationship, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering*, **103**, 417-430.
- Mesri, G. and Godlewski, P.M.**, 1979. Closure to time and stress compressibility interrelationship. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **105**, 106.
- Mesri, G. and Choi, Y.K.**, 1979. Discussion of Strain rate behaviour of Saint-Jean-Vianney clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, **16**, 831-834.
- Mesri, G. and Choi, Y.K.**, 1984. Discussion of Time effects on the stress strain behavior of natural soft clays, *Geotechnique*, London, **34**, 439-442.
- Mesri, G. and Choi, Y.K.**, 1985, Settlement analysis of embankments on soft clays, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **111**, 441-464.
- Mesri, G. and Choi Y.K.**, 1985, The Uniqueness of the end of primary (EOP) Void Ratio-Effective Stress Relationships, *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, 587-590.
- Mesri, G.**, 1987. Fourth law of soil mechanics: A law of compressibility, *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico, **2**, 179–187.

- Mesri, G. and Castro, A.,** 1987. C_c/C_c concept and K_0 during secondary compression, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **113**, 230–247.
- Mesri, G. Feng, T. and Benak J.M.,** 1990. Postdensification penetration resistance of clean sands, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **116**, 1095-1115.
- Mesri, G., Lo, D. O. K. and Feng, T. W.,** 1994. Settlement of embankments on soft clays, in *Settlement '94, Geotechnical Special Publication*, Texas, **40**, 8–56.
- Mesri, G., Feng, T.W. and Shahien M.,** 1995. Compressibility parameters during primary consolidation, *International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Hiroshima, Japan, 8-76.
- Mesri, G., Stark, T.D., Ajlouni, M.S. and Chen, C.S.,** 1997. Secondary compression of peat with or without surcharging, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**, 411–421.
- Mesri, G.,** 2001. Primary compression and secondary compression. *Proc. Soil Behavior and Soft Ground Construction: ASCE Geotechnical Special Publication*, **119**, 122–166, Reston.
- Mesri, G. and Vardhanabhuti, B.,** 2005. Secondary compression, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 398-401.
- Mitchell, J.K.,** 1976. Fundamentals of Soil Behavior, *Series in Soil Engineering*, John Wiley & Sons Inc. New York.
- Mitchell, J. K., and Solymar, Z. V.** 1984. Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **110**, 1559–1576.
- Mitchell, J.K.,** 1993. Fundamentals of Soil Behavior, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., 318-320, 334-402., 437, New York.
- Mitchell, J.K. and Soga, K.,** 2005. Fundamentals of Soil Behavior, 103-105, Third edition, John Wiley & Sons Inc. New York.
- Murakami, Y.,** 1988. Secondary compression in the stage of primary consolidation, *JGS Soils and Foundations*, **28(3)**, 169-174.
- NAVFAC,** 1982. Design Manual 7.1 - Soil Mechanics, Department of the US Navy, Naval Facilities Engineering Command, VA, 22332, 355.
- Newland, P.L. and Allely, B.H.,** 1960. A study of consolidation characteristics of clays, *Geotechnique*, **10**, 62-74.
- Nishida, Y.,** 1956. A brief note on compression index of soil, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **82**, 1027-1 -1027-14.
- Oades, J.M.,** 1989. An introduction to organic matter in mineral soils, in *Minerals in Soil Environments*, 89-159, Eds: J. B. Dixon and S. B. Weed, 2nd edition, Soil Science Society of America Book Series: 1, Madison, WI.

- Odell, R.T., Thornburn, T.H. and McKenzie, L.,** 1960. Relationship atterberg limits to some other properties of Illinois soils, *Proceedings of the Soil Science Society of America*, **24**, 297-300.
- Olson, R.E.,** 1998. Settlement of embankments on soft clays, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 278-288.
- Pacheco, Silva, F.,** 1970. A new graphical construction for determination of the pre-consolidation stress of a soil sample, *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, **2**, 225-232.
- Perret, D., Locat, J., and Leroueil, S.,** 1995. “Strength development with burial in fine grained sediments from the Saguenay Fjord, *Canadian Geotechnical Journal*, Quebec, Ottawa, **32**, 247-252.
- Quigley, R.M. and Ogunbadejo, T.A.,** 1972. Clay layer fabric and oedometer consolidation of a soft varved clay, *Canadian Geotechnical Journal*, **9**, 165-175.
- Rowe, P.W. and Barden, L.,** 1966. A new consolidation cell, *Geotechnique*, **16**, 162-170.
- Sağlam, A.,** 1996. Ulaştırma Bakanlığı DHL İnşaatı Genel Müdürlüğü Samsun Çarşamba Havaalanı Zemin ve Temel Mühendisliği Raporu, İ.T.Ü., İstanbul.
- Sallfors, G.,** 1975. Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays, *Ph.D. Thesis*, Chalmers University of Technology, Goteborg.
- Sallfors, G.,** 2003. Consistent answers from a soil sample, *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice*, The Netherlands, September 2003, 79-89.
- Samson, L. and La Rochelle, P.,** 1972. Design and performance of an expressway constructed over peat by preloading, *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, **9**, 447-466.
- Samson, L. and Garneau, R.,** 1973. Settlement performance of two embankments on deep compressible soils, *Canadian Geotechnical Journal*, **10**, 211-226.
- Schifmann, R.L. and Gibson, R.E.L.,** 1964. Consolidation of nonhomogeneous clay layers, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation*, **90**, 1-30.
- Schmertmann, J.M.,** 1953. The undisturbed consolidation behavior of clay, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **20**, 1201-1233.
- Schmertmann, J.H.,** 1991. The mechanical aging of soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **117**, 1288-1330.
- Sekiguchi, H. and Toriihara, M.,** 1976. Theory of one-dimensional consolidation of clays with consideration of their rheological properties, *JGS Soils and Foundations*, **116**, 27-44.
- Simons, N.,** 1957. Settlement studies on two structures in Norway, *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation*

- Engineering*, **1**, Butterworths Scientific Publications, London, England, 431-436.
- Skempton, A.W.**, 1944. Notes on the compressibility of clays, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, **100**, 119-135.
- Skipper, H.D., Wollum, A.G., Turco, R.F. and Wolf, D.C.**, 1996. Microbiological aspects of environmental fate studies of pesticides. *Weed Technology*, **10**, 174-190.
- Smith, R. E. and Wahls, H.E.**, 1969. Consolidation under constant rates of strain, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation*, **95**, 519-539.
- Sowers, G.B.**, 1970. Introductory Soil Mechanics and Foundations, 3. edition, Macmillan, Collier-Macmillan Limited, London.
- Sridharan, A. and Rao, A.S.**, 1982. Mechanisms controlling the secondary compression of clays, *Geotechnique*, **32**, 249-260.
- Sridharan, A., Abraham, B.M. and Jose, B.T.**, 1991. Improved technique for estimation of preconsolidation pressure, *Geotechnique*, **41**, 263-268.
- Sridharan, A.**, 1991. Engineering behavior of the fine grained soils – A fundemantal approach, *Indian Geotechnical Journal*, **21**, 1-136.
- Sridharan, A. and Prakash, K.**, 1998. Determination of coefficient of consolidation: A user friendly approach, *Ground Engineering*, An Emap Construct Publication, **31**, 30-32.
- Su, H.H. and Prysock, R.H.**, 1974. Settlement analysis of two highway embankments, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **10**, 485-488.
- Suthaker, N.N. and Don Scott, J.**, 1995. Creep behavior of oil sand fine tails, *Proceedings of Compression and Consolidation of Clayey Soils*, May 1995, Rotterdam, 465-472.
- Şendir, S.**, 2001. Yumuşak kil zemine oturan akaryakıt tankının temel problemi, *Bitirme Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Şenol, A.**, 1997. Zeminlerin ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tavenas, F.**, 1979. The behavior of embankments on clay foundations: State of the art, *Proceedings of the 32nd Canadian Geotechnical Conference*, Canadian Geotechnical Society.
- Taylor, D.W. and Merchant, W.**, 1940. A theory of clay consolidation accounting for secondary compression, *Journal of Mathematics and Physics*, **19**, 167-185.
- Taylor, D. W.**, 1942. Research on consolidation of clays, **RSN-82**, Department of civil engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Taylor, D. W.**, 1948. Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons Inc. New York.
- Terzaghi, K. and Fröhlich, O.K.**, 1936. Theorie der Setzung von Tonseichten, *Verlag Franz Deuticke*, Leipzig und Wein.
- Terzaghi K.**, 1943. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.

- Terzaghi, K. and Peck, R.B.,** 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B.** 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc. New York.
- Thompson, J.B. and Palmer, L.A.,** 1951. Report of consolidation tests with peat. *American Standard Testing Material*, **STP 126**, West Conshohocken.
- Trevors, J.T.,** 1996. Sterilization and inhibition of microbial activity in soil, *Journal of Microbiological Methods*, **26**, 53–59.
- Vidalie, J.F.,** 1977. Relations entre les proprietes physico-chimiques et les caracteristiques mecaniques des sols compressibles, *Lab. Ponts Chauss, Rapport de Recherche*, **RR-65**. France.
- Wahls, H.E.,** 1962. Analysis of primary and secondary consolidation, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations*, **88**, 207–231.
- Walker, L.K. and Raymond, G.P.,** 1968. The prediction of consolidation rates in a cemented clay, *Canadian Geotechnical Journal*, **5**, 192-216.
- Walker, L.K.,** 1969. Secondary Compression in the shear of clays, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, **95**, 167-188.
- Walker, L.K. ve Raymond G.P.,** 1969. Anisotropic Consolidation of Leda Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, **6**, 271-286.
- Weber, W.G.,** 1969. Performance of embankments constructed over peat, *ASCE Journal of the Geotechnical*, **1**, 53–76.
- Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H. and Heiberg, S.,** 1971. Consolidation testing at constant rate of strain, *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation*, **97**, 1393-1413.
- Yılmaz, E.,** 2000. Samsun-Çarşamba mavi kilinin ikincil ve üçüncül sıkışma davranışı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, A.,** 2004. Samsun-Çarşamba mavi kilinin sabit deformasyon hızlı konsolidasyon davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yin, J.H. and Graham, J.,** 1989. Viscous-elastic-plastic modelling of one-dimensional time-dependent behaviour of clays, *Canadian Geotechnical Journal*, **26**, 199-209.
- Yin, J. H.,** 1999. Non-linear creep of soils in oedometer tests. *Geotechnique*, **49**, 699–707.
- Zeeveart, L.,** 1983. Foundation engineering for difficult subsoil conditions, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Ankara’da doğdu. İlköğrenimini Kurtuluş İlkokulu’nda, orta ve lise öğrenimini Ankara Özel Yükseliş Koleji’nde başarıyla tamamladı. 1993 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 1997 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği Programı’nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 1999 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Mühendisliği Doktora Programı’na girdi. 2000 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Şu anda halen İTÜ’de halen doktora öğrenimini sürdürmektedir.

Yabancı Dilleri; çok iyi düzeyde İngilizce (Kolej+İTÜ’de 21 kredilik Lisans İngilizce Destekli Program), başlangıç seviyesinde Almanca (Kolej) bilmektedir.

Yaşantısının her evresinde sanatla iç içe olmuş, özellikle resim ve el sanatları dallarında çeşitli kuruluşlarca açılan yarışmalardan çok sayıda derece ve mansiyon ödülleri bulunmaktadır.