İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAMSUN ÇARŞAMBA MAVİ KİLİNİN İKİNCİL VE ÜÇÜNCÜL SIKIŞMA DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Elif YILMAZ
(501942031)

100766 100766

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Mayıs 2000
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Eylül 2000

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet SAĞLAMER

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Mete İNCECİK (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)

Prof.Dr. Gökhan BAYKAL (B.Ü.)

T.C. YÜK... DOKÜ...

EYLÜL 2000

ÖNSÖZ

Doktora çalışmasını yöneten, tez çalışması boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, sürekli yardım eden ve yol gösteren, değerli fikirlerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarım süresince maddi ve manevi destek veren ve yoğun çalışmalarımı anlayışla karşılayan anneme ve babama sonsuz şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmaların hemen hemen her safhasında gönüllü yardımlarıyla her zaman yanımda olan Yük. Müh. Gökhan ÇEVİKBİLEN'e teşekkürü borç bilirim. Tez çalışması sırasında önerileriyle doktora çalışmalarıma yardımcı olan Prof. Dr. Gökhan BAYKAL'a ve İ.T.Ü. Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerine ve laboratuvar çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Fen-Edebiyat Fakültesi laboratuvarında İnfra-red çekimini sağlayan, ilgi ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Nurfer GÜNGÖR'e ve Kimya-Metalürji Fakültesi UYG-AR Merkezi laboratuvarında sağlanan olanaklardan ve gösterdikleri ilgiden dolayı Prof. Dr. Okan ADDEMİR'e ve Prof. Dr. Adnan TEKİN'e, SEM fotoğraflarının çekiminde yardımcı olan Nevzat ATAĞ'a teşekkür ederim. Ayrıca, X-Ray ve TG analizlerinde görüşlerinden ve yardımlarından yararlandığım Doç. Dr. Erdem DEMİRKESEN, Doç. Dr. Fahri ESENLİ, Prof. Dr. Sadriye KÜÇÜKBAYRAK'a ve DTA analizi ile karbon kaplamalarında yardımcı olan Nurten DİNÇER'e ve kimyasal içerik analizlerini yapan Sayın İnci KOL' teşekkür ederim.

Eylül 2000

ELİF YILMAZ

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xv
SUMMARY xx

1. GİRİŞ 1

2. KİLLERİN OLUŞUMU VE ÖZELLİKLERİ 2
2.1. Jeolojik Süreç ve Kil Sedimanların Oluşumu 3
2.2. Yumuşak Killerin Depolandığı Ortamlar 5
2.2.1. Kıtasal Ortam 6
2.2.2. Kıtasal ve Denizel Ortam 7
2.2.3. Denizel Ortam 8
2.3. Kil Mineralleri ve Killi Zeminlerin Yapısı 8
2.4. Yaşlı ve Gecikmiş Çökellerin Sıkışması 15
2.5. Yumuşak Kil Çökellerin Fiziksel ve Kimyasal Alterasyonu 19
2.5.1. Kuruma ve Kabuk Tabakasının Oluşması 19
2.5.2. Parçalanma 20
2.5.3. Kimyasal Aşınma 20
2.5.4. Yıkanma 20
2.5.5. Çimentolanma 22
2.6. Yumuşak Killerin Sınıflandırılması 22
2.7. Killerin Mühendislik Özellikleri ve Bileşimi 23
2.8. Killerin Bileşiminin Belirlenmesi 25
2.8.1. X-Ray, DTA ve Elektron Mikroskopu Analizleri İçin Numune Hazırlama Yöntemleri 28
2.8.2. X-Ray Difraksiyon Analizi 30
2.8.3. DTA Analizi 30
2.8.4. Elektron Mikroskopu Analizi 30
2.8.5. Infrared Spektroskopisi 31

3. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR 32
3.1. Zeminlerin Konsolidasyon ve Oturma Davranışıyla İlgili Çalışmaların Tarihsel Gelişimi 32
3.2. Konsolidasyon Oturması 34

3.3. Konsolidasyon Problemlerinin Bir Boyutlu, İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Teorileriyle Analizi 36
3.4. Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisinin Geliştirilmesi 38
3.5. Konsolidasyon Deneyi 39
3.6. Önkonsolidasyon Basıncı ve Önkonsolidasyon Basıncı Mekanizması 42
3.7. İkincil Sıkışma 44
3.7.1. İkincil Sıkışma Mekanizması 46
3.7.2. İkincil Sıkışma Mekanizmasını Etkileyen Faktörler 50
3.7.3. İkincil Sıkışma Davranışı 58
3.7.3.1. Hipotez A 61
3.7.3.2. Hipotez B 65
3.7.3.3. Hipotez A ve Hipotez B'nin Karşılaştırılması 68
3.7.4.İkincil Sıkışma Sürecinde Oluşan Üçüncül Sıkışmalar 71
3.8. Konsolidasyon Davranışının Analitik Yöntemle İncelenmesi 74
3.8.1. Sıkışma Karakteristiklerinin Reolojik Yöntemlerle Belirlenmesi 74
3.8.1.1. Elastisite, Viskozite ve Plastisite 74
3.8.1.2. Elasto-Viskoz İskeletin Adımsal Sıkışması 76
3.8.1.3. Reoloji Modellerine Dayanan Bünyesel İlişkiler 76
3.8.2. Bjerrum Modeli ve Bjerrum Modelinin Geliştirilmesi Üzerine Yapılan Çalışmalar 77

4. YÖNTEM 79
4.1. Giriş 79
4.2. Malzeme 80
4.2.1. Samsun-Çarşamba Havaalanı Sahasının Jeolojisi 80
4.2.2. Zemin Profili 81
4.2.3. Samsun-Çarşamba Havaalanı Sahasında Yapılan Zemin Araştırmaları 82
4.2.4. Samsun-Çarşamba Mavi Kilinin Mühendislik Özellikleri 84
4.2.4.1. İndeks Özellikleri 84
4.2.4.2. Kimyasal İçerik Analizi 87
4.2.4.3. DTA Analizi 88
4.2.4.4. TG Analizi 90
4.2.4.5. X-Ray Analizi 91
4.2.4.6. Infra-Red Analizi 94
4.3. Deney Düzeni, Deney Programı ve Deneylerin Yapılışı 96
4.3.1. Konsolidasyon Deneyleri 96
4.3.2. SEM Analizleri 100
4.3.3. Arazi Yükleme Deneyleri 104

5. DENEYSEL SONUÇLAR 106
5.1. Konsolidasyon Deneyleri 107
5.1.1. Klasik Konsolidasyon Deneyleri 107

5.1.2. Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri 121
5.1.3. Uzun Süreli Yüklemenin Etkisi 124
5.1.4. İkincil Konsolidasyon Süresince İkincil Sıkışma Parametrelerinin Değişimi 129
5.1.5. İkincil Sıkışma Peryodu Boyunca Oluşan Üçüncül Sıkışmalar 145
5.1.6. İkincil Sıkışma Oranı İle Konsolidasyon Basıncı Arasındaki İlişki 154
5.2. Arazi Gözlemleri İle Deneysel Çalışmalar Arasındaki İlişki 163
5.2.1. Test Dolgusunda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışmaların Laboratuvar Deneyleriyle Karşılaştırılması 169
5.2.2. Pist Dolgusunda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışmaların Laboratuvar Deneyleriyle Karşılaştırılması 177
5.3. SEM Analizleri 181
5.3.1. Örselenmemiş NUmune Üzerinde Yapılan SEM Analizleri 182
5.3.2. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Sıkışmaya Terkedilen Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri 185
5.3.3. 100 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Sıkışmaya Terkedilen Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri 190
5.3.4. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Sıkışmaya Terkedilen Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri 194
5.3.5. SEM Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 200

6. GENEL SONUÇLAR **204**

KAYNAKLAR **209**

EKLER **217**

ÖZGEÇMİŞ **265**

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
β	: Sıkışma derecesi
c_1, c_2, c_3, c_x, c_y, c_z	: sabitler
C_α	: İkincil sıkışma katsayısı
$C_{\alpha\varepsilon}$, ε_α	: İkincil sıkışma oranı
$C_{\alpha p}$	: Modifiye ikincil sıkışma oranı
$C_{\alpha t}$	: Üçüncül sıkışma katsayısı
$C_{\alpha\varepsilon t}$	: Üçüncül sıkışma oranı
C_c	: Sıkışma katsayısı
C_r	: Tekrar kabarma indisi
C_s	: Boşaltma indisi
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
CG	: Sabit hidrolik eğimli konsolidasyon deneyi
CPR	: Sabit boşluk basıncı oranlı konsolidasyon deneyi
CRL	: Sabit yükleme hızlı konsolidasyon deneyi
CRS	: Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon deneyi
de^e	: Elastik sıkışma
de^{ir}	: Geri dönemeyen sıkışma
de^v	: Sabit gerilme altında geri dönemeyen viskoz sıkışma
Δe	: Boşluk oranındaki değişim
Δε, $\Delta\varepsilon_s$	: Düşey deformasyondaki değişim
ΔH	: Düşey şekil değiştirme
ΔH/H	: Düşey deformasyondaki değişim
E	: Deformasyon modülü
e	: Boşluk oranı
e_0	: Başlangıç boşluk oranı
e_p	: Birincil konsolidasyonun tamamlanmasını takiben $10t_p$ zamanına denk gelen boşluk oranı
e_s	: Deney sonu boşluk oranı
$\dot{e}$	: Boşluk oranı değişim hızı
ε_v	: Düşey şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}_v$	: Düşey şekil değiştirme hızı
H, H_0	: Sıkışabilir tabaka kalınlığı
H_d	: Drenaj yüksekliği
I_C	: Kıvam indisi
I_L	: Likidite indisi
I_p	: Plastisite indisi
k	: Permeabilite
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı

LIR	: Yük artım oranı
m	: Sing-Mitchell modülü
M_c	: Deformasyon Modülü
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
ν	: Poisson oranı
γ	: Yoğunluk
γ_0	: Deney başı birim hacim ağırlığı
γ_s	: Deney sonu hacim ağırlığı
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
p'	: Efektif gerilme
p'_0	: Efektif örtü yükü
p'_c	: Önkonsolidasyon basıncı
p'_{cq}	: Görünür önkonsolidasyon basıncı
S_α	: İkincil oturma miktarı
$S_{\alpha t}$	: Üçüncül oturma miktarı
s_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
σ'	: Efektif gerilme
σ'_c	: Kritik gerilme
σ'_p	: Efektif gerilme
σ'_v	: Efektif örtü yükü
σ'_{v0}	: Günümüz örtü yükü
σ'_{vc}	: Kritik basınç veya önkonsolidasyon basıncı
t	: Sıcaklık
t	: Zaman
t_t	: İkincil sıkışmanın tamamlandığı süre
t_p, t_{100}	: Birincil konsolidasyonun tamamlandığı süre
U	: Konsolidasyon yüzdesi
u, u_e	: Aşırı boşluk suyu basıncı
w	: Su muhtevası
w	: Su muhtevası
w_0	: Başlangıç su muhtevası
w_n	: Doğal su muhtevası
w_L	: Likit Limit
w_p	: Plastik Limit
w_s	: Deney sonu su muhtevası

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1.	: Jeolojik Süreç.....	3
Şekil 2.2.	: Kaya Oluşum Süreci.....	4
Şekil 2.3.	: Yumuşak Killerin Depolandığı Çevreler.....	7
Şekil 2.4.	: Bir Kil Süspansiyonundaki Dane Oryantasyonu Modelleri...	11
Şekil 2.5.	: Dane Grubunun Şematik Gösterilişi.....	12
Şekil 2.6.	: Örselenmemiş Zeminin Fabrik Yapısının SEM ile Görünüşü	13
Şekil 2.7.	: Tucson Siltli Kilinin Tüm Mikrofabrik Yapısı	15
Şekil 2.8.	: Genç ve Yaşlı Normal Konsolide Killerin Jeolojik Geçmişi ve Sıkışabilirliği	17
Şekil 2.9.	: Yakın Buzul ve Buzulöncesi Normal Konsolide Killerde Gözlemlenen Tipik $(s_u/\sigma'_{v0})_{veyn}$ ve $(\sigma'_{vc}/\sigma'_{v0})$ Değerleri	17
Şekil 2.10.	: Aşırı Konsolide Killerin Jeolojik Geçmişi ve Sıkışabilirliği ...	18
Şekil 2.11.	: Yıkanma Sebebiyle Deniz Kilinin Kayma Mukavemeti ve Sıkışabilirliğindeki Değişiklik	21
Şekil 2.12.	: Zeminin Bileşim Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Genel Yaklaşım	26
Şekil 3.1.	: İkincil Konsolidasyonla İlgili Hipotez A ve Hipotez.....	35
Şekil 3.2.	: Yük Artım Oranının Örselenmemiş Mexico City Kilinin Oturma-Zaman Davranışına Etkisi	47
Şekil 3.3.	: İkincil Sıkışma Eğrileri Tipleri	48
Şekil 3.4.	: w_n C $_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki.....	50
Şekil 3.5.	: 12 Hafta Süreyle İkincil Sıkışmaya Terkedilen Yoğrulmuş Kildeki p_{cq} Oluşması.....	52
Şekil 3.6.	: Gerilme ve $C_c$ile C $_\alpha$ Arasındaki İlişki (a) Mexico City Kili (b) Leda Kili (c) New Haven Organik Silti	62
Şekil 3.7.	: Herhangi (e, σ'_v,t) İçin İkincil Sıkışma Süresince C_α ve C_c Hesaplanışı.....	65
Şekil 3.8.	: σ'_p Dolayındaki Konsolidasyon Basınçlarında C_c ve $C_{c(ortalama)}$ Arasındaki Belirgin Değişim.....	65
Şekil 3.9.	: 82 Günlük Yükleme Sonrası Saguenay Fjord Sedimanı Yapısına İkincil Konsolidasyonun Etkisi.....	69
Şekil 3.10.	: a) Konsolidasyonun Hipotez A ile Hipotez B İle Modellenmesi (b) Büyük Boyutlu Konsolidasyon Aletiyle Farklı Kalınlıktaki Deneylerin Sonuçları.....	70
Şekil 3.11	: Ödometre ve Üç Eksenli Krip Deneyi (ε_v -log (t) Grafiğinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Fazların Belirlenmesi.....	72
Şekil 3.12.	: Ödometre ve Üç Eksenli Krip Deneyi log ((ε_v)-log (t) Grafiğinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Fazların Belirlenmesi..	73
Şekil 3.13.	: Sıkışma Bileşenleri.....	75

Şekil 3.14. : Tipik Bünye İlişkileri..... 77
Şekil 3.15. : Bjerrum Modeli (a) Bir Zemin Tabakasındaki Konsolidasyon Prosesi (b) Birincil ve İkincil Sıkışma, Birincil ve İkincil Kısım ile Kendiliğinden ve Gecikmiş Sıkışma Arasındaki Farklılıklar 77
Şekil 3.16. : Gerilme İzi..... 78
Şekil 4.1. : Samsun Civarının Jeolojik Haritası..... 81
Şekil 4.2. : Samsun-Çarşamba Havaalanı Uçuş Pisti KM 0+000 ~ KM 0+500 Arası Zemin Profili 83
Şekil 4.3. : Samsun-Çarşamba Havaalanı Uçuş Pisti Yanındaki Sondaj Kuyuları ve Araştırma Çukurlarının Vaziyet Planı (Şematik) 83
Şekil 4.4. : Araziden Çelik Silindirik Borularla Numune Alınması..... 84
Şekil 4.5. : Çelik Silindirik Borularla Alınan Örselenmemiş Numunelerin Hazırlanışı..... 84
Şekil 4.6. : Zeminin İndeks Özelliklerinin Derinlikle Değişimi 86
Şekil 4.7. : DTA Analizi..... 89
Şekil 4.8. : TG Analizi..... 91
Şekil 4.9. : (a) Kimya-Metalürji Fakültesi X-Ray Laboratuvarında Yapılan X-Ray Analizi (b) Maden Fakültesi X-Ray Laboratuvarında Yapılan X-Ray Analizi..... 92
Şekil 4.10. : İnfrared Analizi..... 95
Şekil 4.11. : İnfrared Analizi..... 95
Şekil 4.12. : Deney Düzeni 97
Şekil 4.13. : Karbon Kaplama İşlemi İçin Numune Hazırlanması Adımları 101
Şekil 4.14. : (a) Çelik Silindirik Kalıplardan Örselenmemiş Numune Çıkarılışı (b) Karbon Kaplama İçin Hazırlanmış Numuneler..... 102
Şekil 4.16. : (a) Altın Kaplama Yapılan Ünite (b) Karbon Kaplama Yapılan Ünite..... 102
Şekil 4.16. : JEOL JSM-840 Scanning Microscope Marka SEM Aletinin Ana Ünitesinin Numune Alma Bölümüne İncelenecek Numunenin Yerleştirilişi..... 103
Şekil 4.17. : JEOL JSM-840 Scanning Microscope Marka SEM Aleti..... 104
Şekil 5.1. : Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri.. 109
Şekil 5.2. : C01 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 109
Şekil 5.3. : C01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log(t) Grafikleri..... 110
Şekil 5.4. : C01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-$\sqrt{t}$ Grafikleri..... 110
Şekil 5.5. : C01 Nolu Deneyde 25 kPa Gerilme Seviyesine Ait e-log(t) Grafiği..... 111
Şekil 5.6. : C01 Nolu Deney İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki..... 113
Şekil 5.7. : Klasik Konsolidasyon Deneyleri İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki..... 118
Şekil 5.8. : Tüm Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri..... 123

Şekil 5.9. : A1 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 126
Şekil 5.10. : A1 Nolu Deneyde 25 kPa Seviyesinde İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 135
Şekil 5.11. : A1 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 136
Şekil 5.12. : A1 Nolu Deney İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki..... 138
Şekil 5.13. : Tüm Klasik ve Uzun süreli Konsolidasyon Deneyleri İçin İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki..... 141
Şekil 5.14. : Doğal Su Muhtevası İle İkincil Sıkışma Oranı Arasındaki İlişki..... 144
Şekil 5.15. : Tüm Deneyler ve İkincil Sıkışma Fazı İçin $C_{\alpha\varepsilon}$ /p'-p'/p'$_c$ Bağıntısı Elde Edilmesi..... 147
Şekil 5.16. : Tüm Deneyler ve İkincil Sıkışma Fazı İçin $C_{\alpha\varepsilon}$*p'-p'$_c$/p' Grafiğinden Elde Edilmesi..... 148
Şekil 5.17. : $C_{\alpha\varepsilon}$ - p'$_c$/p' Bağıntısının Derinlikle Değişmesi..... 149
Şekil 5.18. : $C_{\alpha\varepsilon}$ - p'$_c$/p' Bağıntısının Boşluk Oranıyla Değişmesi..... 151
Şekil 5.19. : C01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması..... 152
Şekil 5.20. : Üçüncül Sıkışma Yapan Deneylere Ait ΔH-log (t) Grafikleri... 156
Şekil 5.21. : Üçüncül Sıkışma Yapan Deneylere Ait ΔH-$\sqrt{t}$ Grafikleri..... 156
Şekil 5.22. : B1 Nolu Deneyde 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil ve Üçüncül Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 157
Şekil 5.23. : B1 Nolu Deneyde 100 kPa Gerilme Seviyesinde log $\dot{e}$ -log t Eğrisi..... 159
Şekil 5.24. : Üçüncül Konsolidasyona Gidilen Deneylere Ait e-log (t) Grafikleri..... 161
Şekil 5.25. : B1, B2, B3 D7, D8 ve D9 Nolu Deneylere Ait log $\overset{0}{e}$ - log t Diyagramları 162
Şekil 5.26. : Test Dolgusunun 12 Ay Süreyle Oturma-Zaman Davranışı.... 166
Şekil 5.27. : Test Dolgusunun 12 Ay Süreyle Oturma-log (Zaman) Davranışı..... 167
Şekil 5.28. : Test Dolgusunun 12 Ay Süreyle Oturma-karekök (Zaman) Davranışı..... 168
Şekil 5.29. : Pist Dolgusunun 6 Ay Süreyle Oturma-Zaman Davranışı..... 170
Şekil 5.30. : Pist Dolgusunun 6 Ay Süreyle Oturma-log (Zaman) Davranışı 171
Şekil 5.31. : Pist Dolgusunun 6 Ay Süreyle Oturma-karekök (Zaman) Davranışı..... 172
Şekil 5.32. : Test Dolgusunda 1, 5 ve 10 Nolu Plakalarda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışma Davranışının Grafiksel Olarak Gösterimi..... 175
Şekil 5.33. : Pist Dolgusunda 3, 6 ve 9 Nolu Plakalarda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışma Davranışının Grafiksel Olarak Gösterimi 179

Şekil 5.34. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 183
Şekil 5.35. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 183
Şekil 5.36. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 184
Şekil 5.37. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 184
Şekil 5.38. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 185
Şekil 5.39. : 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune 186
Şekil 5.40. : 25 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune 186
Şekil 5.41. : 25 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune 188
Şekil 5.42. : 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune 188
Şekil 5.43. : 25 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune 189
Şekil 5.44. : 25 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune 189
Şekil 5.45. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 191
Şekil 5.46. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune 191
Şekil 5.47. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune..... 192
Şekil 5.48. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 192
Şekil 5.49. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune. 193
Şekil 5.50. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune..... 193
Şekil 5.51. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 196
Şekil 5.52. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune 196
Şekil 5.53. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune..... 197
Şekil 5.54. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 198
Şekil 5.55. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune. 198
Şekil 5.56. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune..... 199
Şekil 5.57. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune..... 199
Şekil 5.58. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Sürecinde Kemerlenme Etkisinin Kalkmasıyla Melnikovitlerin Bozulması..... 201
Şekil 5.59. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Sıkışma Sürecinde Kemerlenme Etkisinin Kalkmasıyla Melnikovitlerin Bozulması..... 201
Şekil 5.60. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Sürecinde Kemerlenme Etkisinin Tümüle Kalkması Sonucu Melnikovitlerin Dağılması..... 202
Şekil A.1 : Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri..... 218
Şekil B.1. : A01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 219
Şekil B.2. : A02 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği 220

Şekil B.3. : A03 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği veΔH-karekök (t) Grafiği..... 221
Şekil B.4. : B01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 222
Şekil B.5. : D01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 223
Şekil B.6. : A1 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 224
Şekil B.7. : A2 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 225
Şekil B.8. : A3 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 226
Şekil B.9. : B1 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 227
Şekil B.10. : B2 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 228
Şekil B.11. : B3 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 229
Şekil B.12. : C1 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 230
Şekil B.13. : C2 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 231
Şekil B.14. : C3 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 232
Şekil B.15. : D1 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 233
Şekil B.16. : D2 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 234
Şekil B.17. : D3 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 235
Şekil B.18. : D4 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 236
Şekil B.19. : D5 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 237
Şekil B.20. : D6 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 238
Şekil B.21. : D7 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 239
Şekil B.22. : D8 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 240
Şekil B.23. : D9 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği ve ΔH-karekök (t) Grafiği..... 241
Şekil C.1. : A2 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 242
Şekil C.2. : A3 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 243
Şekil C.3. : B1 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 244
Şekil C.4. : B2 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 245
Şekil C.5. : C1 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 246
Şekil C.6. : C2 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 247
Şekil C.7. : C3 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi..... 248

Şekil C.8. : A2 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 249
Şekil C.9. : A3 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 250
Şekil C.10. : B1 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 251
Şekil C.11. : B2 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı 252
Şekil C.12. : B3 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı 253
Şekil C.13. : C1 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı 254
Şekil C.14. : C2 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı 255
Şekil C.15. : C3 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı..... 256
Şekil D.1. : A01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması..... 257
Şekil D.2. : A02 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması..... 258
Şekil D.3. : A03 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması..... 259
Şekil D.4. : B01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması..... 260
Şekil D.5. : D01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması..... 261
Şekil E.1. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 262
Şekil E.2. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 262
Şekil E.3. : Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune..... 263
Şekil E.4. : 25 Pa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 263
Şekil E.5. : 100 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 264
Şekil E.6. : 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune..... 264

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Deniz Killerinin Geoteknik Özelliklerine Çökelme Sonrası Değişiklerin Etkisi	23
Tablo 2.2.	Yumuşak Killerin Sınıflandırılması	23
Tablo 2.3.	Zeminin Fabrik Yapısının Belirlenmesinde Kullanılan Teknikler	27
Tablo 3.1.	Bir- İki- ve Üç-Boyutlu Konsolidasyon Teorilerinin Temel Denklemleri	37
Tablo 3.2.	Geostatik Gerilmeler	43
Tablo 3.3.	İkincil Sıkışmaya Göre Zeminlerin Sınıflaması	46
Tablo 3.4.	Çeşitli Zeminler İçin C_α/C_c Oranları.....	63
Tablo 4.1.	Zeminin İndeks Özellikleri.....	85
Tablo 4.2.	Deneylerde Kullanılan Numunelerin İçerikleri.....	85
Tablo 4.3.	Kimyasal İçerik Analizi Sonuçları.....	87
Tablo 4.4.	DTA Analizi Pikleri.....	88
Tablo 4.5.	TG Analizi.....	90
Tablo 4.6.	Klasik Konsolidasyon Deneyleri.....	98
Tablo 4.7.	Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Uygulanan Bekleme Süreleri.....	99
Tablo 5.1.	Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait Özet Veriler.....	108
Tablo 5.2.	C01 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki İkincil Sıkışma Parametreleri.....	112
Tablo 5.3	Tüm Klasik Konsolidasyon Deneyleri İçin Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki İkincil Sıkışma Parametreleri.....	115
Tablo 5.4	Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerine Ait Özet Veriler.....	122
Tablo 5.5	İkincil Sıkışma Nedeniyle Oluşan Görünür Önkonsolidasyon Basıncı.....	128
Tablo 5.6	Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri İçin Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki İkincil Sıkışma Parametreleri.....	132
Tablo 5.7	B1 Nolu Deneyde 100 kPa Gerilme Seviyesindeki İkincil ve Üçüncül Sıkışma Parametreleri.....	158
Tablo 5.8	Tüm Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri İçin Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki Üçüncül Sıkışma Parametreleri.....	163
Tablo 5.9	Test Dolgusundan Elde Edilen Veriler.....	165
Tablo 5.10	Test Dolgusundaki Plakalara Ait İkincil ve Üçüncül Sıkışma Oranları.....	174
Tablo 5.11	Pist Dolgusundaki Plakalara Ait İkincil ve Üçüncül Sıkışma Oranları.....	180

SAMSUN ÇARŞAMBA MAVİ KİLİNİN İKİNCİL VE ÜÇÜNCÜL SIKIŞMA DAVRANIŞI

ÖZET

Yumuşak killer üzerine oturan yapılarda hesaplanan ani ve konsolidasyon oturmalarının bitmesine rağmen oturmaların devam etmesi, yapılarda istenmeyen önemli miktarlarda ve boyutlarda hasarlar oluşması Buisman'ın 1936'da ikincil konsolidasyon veya ikincil sıkışma üzerine yaptığı çalışmalara kadar üzerinde düşünülmemiş, çalışılmamış ve sebepleri araştırılmamış konulardı. Uzun bir süredir zeminlerde, sabit bir efektif gerilme altında oturmaların devam ettiği bilinmektedir. Suya doygun bir zeminde çoğu zaman konsolidasyonun bitimine doğru oturmaların zamanla artan bir şekilde devam ettiği ve klasik Terzaghi Konsolidasyon Teorisinin öngördüğü şekilde asimptotik olmadığı farkedilmiş ve bu davranış, çoğu araştırmacı tarafından "ikincil konsolidasyon", "ikincil sıkışma" veya "krip" olarak adlandırılmıştır. Terzaghi'nin Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi, killerde boşluksuyu basıncını ve sıkışma hızını tahmin etmek için pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hacim değişimi, birincil sıkışma (birincil konsolidasyon) olarak adlandırılan hidrodinamik etki sonucu oluşur, diğer hacim değişimi ise ikincil sıkışma sonucu meydana gelir (Mesri, 1973). İkincil sıkışma yıllarca araştırıldığı halde, halen bu tip oturmanın hızının ve büyüklüğünün hesaplanması için güvenilir bir metot bulunmamaktadır. Bu yüzden, pratikte ikincil sıkışma tahmini, amprik yöntemlerle dayanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında 24 adet konsolidasyon deneyi yapılmış ve farklı derinliklerdeki yumuşak kil zemin için toplam 80 adet gerilme seviyesinde 1 hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde beklenerek yumuşak kil zeminin uzun süreli konsolidasyon davranışı araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametrelerinin sabit efektif gerilme altında zamanla değişimi ile

birbirleriyle ilişkisi irdelenmiştir. Uzun süreli yüklemenin zemin davranışına etkisi araştırılmış ve ikincil sıkışma peryodu boyunca oluşan üçüncül sıkışma olayı, deneysel sonuçlar ve SEM analizleri vasıtasıyla alınan fotoğraflarla açıklanmıştır. Diğer yandan laboratuvarda yapılan deneylerden elde edilen datalar ile arazide 6-12 ay müddetle yapılan uzun süreli oturma gözlemleri sonuçları karşılaştırılmıştır.

1. Bölümde konu ile ilgili giriş yapıldıktan sonra 2. Bölümde, killerin oluşumu ve özellikleri detaylı olarak incelenmiş, yumuşak killerin depolandığı ortamlar ve kil mineralleri ile kil zeminlerin yapısı, yaşlı ve gecikmiş kil çökellerin sıkışması, yumuşak kil çökellerin fiziksel ve kimyasal alterasyonla oluşması ile yumuşak killerin sınıflandırılması verilerek killerin mühendislik özellikleri ve bileşiminin tayini için yapılan başlıca deneyler tanıtılmıştır.

3. Bölümde konu ile ilgili literatürde yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, ikincil sıkışmayı açıklamak için günümüze değin çeşitli araştırmacılar tarafından öne sürülen Hipotez A ve Hipotez B yaklaşımı, ikincil sıkışma mekanizmasını etkileyen faktörler, ikincil sıkışma mekanizması ve ikincil sıkışma peryodu boyunca oluşan üçüncül sıkışma olgusu detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda izlenen yöntem, Bölüm 4'te açıklanmıştır. Bu bölümde, deneylerde kullanılan yumuşak mavi kil zeminin alındığı Samsun-Çarşamba Havaalanının jeolojisi, zemin profili, sahada yapılan zemin araştırmaları anlatıldıktan sonra deneyde kullanılan kil zeminin mühendislik özellikleri, deney düzeni, deney programı ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır. Ayrıca, SEM analizleri için numune hazırlama yöntemi ve kriterleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

5. Bölüm, deneysel çalışmaların sonuçlarının verildiği ve yorumlandığı bölümdür. Tezin bu kısmında sırasıyla, yapılan 24 adet klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinden hareketle yumuşak mavi kil zemin için belirlenen ikincil sıkışma davranışı ve ikincil sıkışma peryodu boyunca oluşan üçüncül sıkışmalar, uzun süreli yüklemenin etkisi, arazide 6-12 ay süreyle yapılan test ve pist dolguları içinde tesisi edilen oturma plakaları vasıtasıyla yapılan uzun süreli arazi oturma kayıtları ile labratuvar deney sonuçları arasındaki ilişki araştırılıp sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, yumuşak mavi kil zeminde üç farklı gerilme seviyesinde, yüklenmemiş ve birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmalara maruz almış zeminin fabrik

yapısındaki değişimler SEM analizleri sırasında alınan fotoğraflarla incelenmiş ve üçüncül sıkışma sırasında zeminin fabrik yapısındaki değişimler araştırılarak üçüncül sıkışmaya neden olan mekanizmaya açıklık getirilmeye çalışılmıştır.

Son bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, arazi deneyleri ve SEM analizleri ile ilgili genel sonuçlar verilmiştir. Arazi ve laboratuvar deneylerinden ve SEM analizi sonuçlarından hareketle elde edilen genel sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

1. Samsun-Çarşamba Havaalanı sahasından alınan kil zemin, kritik basınçtan küçük gerilmelerde düşük ikincil sıkışabilirlik, kritik basınç aralığında orta-yüksek derecede ikincil sıkışabilirlik davranışı göstermekte olup kritik basınçtan sonra orta derecede ikincil sıkışabilirlik davranışı göstermektedir.

2. İkincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ veya $C_{\alpha p}$) ile sıkışma indisi (C_c) arasında tekil bir ilişki vardır ve bu tekil ilişki herhangi zaman, efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir.

3. Deneylerde kullanılan kil zemin için, ikincil sıkışma katsayısı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_\alpha / C_c = 0.02\sim0.06$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_\alpha / C_c = 0.034$ alınabilecektir. Benzer şekilde, ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_{\alpha\varepsilon} / C_c = 0.006\sim0.018$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha\varepsilon} / C_c = 0.012$ seçilebilecektir. Modifiye ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki ise $C_{\alpha p} / C_c = 0.006\sim0.021$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha p} / C_c = 0.014$ alınabilecektir.

4. Deneysel çalışma kapsamında yapılan 24 adet konsolidasyon deneyleri datasından hareketle ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasında dört tip korelasyon bulunmuştur. Verilen dört tip korelasyondan hareketle, Çarşamba Deltasındaki yumuşak mavi kil zemine ait ikincil sıkışma oranlarını efektif gerilmeye bağlı olarak kestirmek veya grafikten okuyarak efektif gerilme artışı sonrasında oluşabilecek ikincil sıkışma hakkında yaklaşık bir fikir edinmek mümkün olmaktadır.

5. Önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir fark olmamasına karşın önkonsolidasyon basıncından küçük

gerilmelerde ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir farklılaşma ve derinlik artıkça ikincil sıkışma oranının artması şeklinde bir davranış görülmektedir

6. Yumuşak mavi kil zeminde, uzun süreli ikincil sıkışmaya terkedilen gerilme (p) sonrasında yumuşak zemin, $p_{cq}/p = 1.13\sim1.33$ oranında gerilme artışına kadar bir dayanım göstermekte ve dolayısıyla daha az birincil ve ikincil sıkışma yapmaktadır (p_{cq}, görünür önkonsolidasyon basıncıdır). Ancak $p_{cq}/p = 1.13\sim1.33$ oranından daha yüksek gerilmelerde yumuşak kil zeminin davranışı tekrar EOP e-log p' eğrisine ulaşmakta ve beklenilen miktarda birincil konsolidasyon sıkışması ve ani sıkışma yapmaktadır.

7. Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucu, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinden alınan ve ağırlıkça %1.5-2 oranında organik lifler içeren yumuşak mavi kil zeminde gözlenen olağandışı davranış üçüncül sıkışma hipotezinin bir göstergesidir.

8. İkincil konsolidasyonu takiben e-log t diyagramında, sıkışmaların tekrar hızlandığı dönüm noktasından itibaren oluşan sıkışma davranışı "Üçüncül Sıkışma" olarak tanımlanmaktadır. Üçüncül sıkışma olarak adlandırılan olayın varlığı, logaritmik eksende boşluk oranı değişim hızı zamana karşı çizilerek belli olmaktadır. $\log \overset{0}{e}$ - log t eğrisinde eğimin sabit olduğu bölüm ikincil konsolidasyonu, eğimin değiştiği yer ise üçüncül sıkışmayı göstermektedir.

9. Arazide belirlenen konsolidasyon katsayıları (c_v) laboratuvarda belirlenen katsayılara göre 100 kat daha büyük olmasına karşılık, arazi için belirlenen ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$, laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarına nazaran bir-dört kat daha fazladır ve pratik olarak laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranları arazideki değerlerle aynı kabul edilebilecektir. Gerek test ve gerekse pist dolgusunda yapılan uzun süreli oturma gözlemlerinden elde edilen data ile laboratuvarda yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyleri sonuçları üstüste düşmektedir.

10. SEM analizlerinde, başlangıçta floküle ve topak bir yapı sergileyen zeminin fabrik yapısının önkonsolidasyon basıncından küçük ve yakın gerilmelerde (25

ve 100 kPa) korunduğu, önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ise (400 kPa) fabrikteki floküle yapının nispeten bozularak floküle olmayan yapıya dönüştüğü görülmektedir. İkincil sıkışma süresince ise, önkonsolidasyon basıncından küçük ve yakın gerilmelerde (25 ve 100 kPa) zeminin dane yapısı bozulmaya başladığı ve özellikle organik malzemelerin hücre çatısının kısmen bozulduğu, önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde (400 kPa) ise fabrik yapının bozulduğu, floküle ve topak yapının değişerek floküle olmayan yoğun topak yapı oluştuğu görülmüştür.

11. Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler ile SEM analizlerinden hareketle, üçüncül sıkışmaların esas olarak zemin içindeki organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılması sebebiyle oluştuğu görüşüne ulaşılmıştır.

SECONDARY AND TERTIARY COMPRESSION BEHAVIOUR OF SAMSUN CARSAMBA BLUE CLAY

SUMMARY

Often large settlements of structures and embankments resting on soft clay greater than the predicted settlement values could not be explained until Buisman's work (1936) on secondary consolidation. Laboratory experiments and field observations have shown that after the excess pore pressures have dissipated, settlements continue and additional settlements take place under constant effective stress. This additional settlement has been defined as "secondary compression", "secondary consolidation" or "creep" by several researchers. Terzaghi's theory of one-dimensional consolidation is widely used in engineering practice to forecast the rate of compression and pore-water pressure dissipation in clays.

The volume changes that take place in response to the hydrodynamic effect are called primary compression (consolidation) while the remaining volume changes are termed secondary compression. Although, secondary compression has been extensively investigated by empirical and experimental means in the field and laboratory, there is no reliable method about magnitude and rate of secondary compression. Yet, the prediction of magnitude of secondary compression has been investigated by empirical methods.

In this thesis, twenty-four laboratory consolidation tests have been carried out. Long-term consolidation behaviour of undisturbed soft blue clay specimens that were taken from different depths of Samsun Carsamba Airport site has been investigated by conducting long-term tests at a total number of eighty consolidation pressure levels. Under constant effective stress, the relationship between compression index (C_c) and secondary compression parameters (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ and $C_{\alpha p}$) and variations of these parameters with time have been studied. The effect of long-term sustained loading on soil behaviour has been examined. Tertiary compression that occurs after secondary

compression period has been investigated by means of experimental tests and photographs taken by SEM (scanning electron microscope). Also, laboratory test results and long-term field settlement records have been compared.

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

Chapter 3 is a literature survey on experimental and theoretical studies on two extreme cases of secondary compression mechanisms. Factors influencing mechanisms of secondary compression and tertiary compression are also given in this Chapter.

Methodology of this experimental study is explained in Chapter 4. In this Chapter, the geology and soil profile of Samsun Carsamba Airport site, from which the soft blue clay is taken, and site investigations are presented. Also, engineering properties of soft clay that have been used in this experimental study, test methods are presented in detail.

Chapter 5 deals with the results of laboratory tests and evaluation of these tests. In this Chapter, secondary and tertiary compression behaviour of soft blue clay is defined by performing total twenty-four conventional and long-term consolidation tests. The effect of long-term sustained loading on soil behaviour, relationship between laboratory test results and field settlements data which were observed by means of settlement plates placed in the test fill and granular pre-loading that were placed on a certain section of the runway for a period of 6 to 12 months are compared. Also, fabric study of undisturbed and unloaded soft blue clay and changes in fabric due to primary, secondary and tertiary compressions, under three different consolidation pressure levels are investigated by means of SEM analysis.

In the last Chapter, conclusions of the research work obtained by the experimental and field studies and SEM analysis are presented. The conclusions based on field and laboratory tests and SEM analysis are summarised in the following paragraphs.

1. Soft blue clay taken from Samsun Carsamba Airport site exhibits low secondary compressibility for consolidation pressures less than the critical pressure. For consolidation pressures around the critical pressure, soft clay shows low to medium secondary compressibility whereas for consolidation pressures greater than the critical pressure, the soil exhibits medium secondary compressibility.

2. A unique relationship exists between secondary compression parameters (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ and $C_{\alpha p}$) and compression index (C_c). The relation holds true at any time, effective stress and void ratio during the secondary compression.

3. For the soft clay investigated, the relationship between coefficient of secondary compression (C_α) and compression index (C_c) is in the range of 0.02~0.06, and could be taken as $C_\alpha/C_c = 0.034$. Similarly, the relationship between secondary compression ratio ($C_{\alpha\varepsilon}$) and compression index (C_c) is in the range of 0.006~0.018 and could be taken as $C_\alpha/C_c = 0.012$. Also, the relationship between modified secondary compression ratio ($C_{\alpha p}$) and the compression index (C_c) is in the range of 0.006~0.021, and could be assumed $C_\alpha/C_c = 0.014$ approximately.

4. Four correlations are found between secondary compression ratio and consolidation pressure by means of a total twenty-four consolidation tests. By using these four correlations, the secondary compression ratio at any effective stress or secondary compression of soft blue clay after any effective stress increase can be predicted.

5. For the stresses greater than the preconsolidation pressure, the secondary compression ratio is practically the same, whereas in the range of stress less than the preconsolidation pressure, the secondary compression ratio varies with increasing effective stress and increasing depth. There is no big difference between the secondary compression parameters for consolidation pressures greater than preconsolidation pressure.

6. After long periods of secondary compression at a certain consolidation pressure level (p), the soft blue clay behaves as an over consolidated-cohesive soil until the effective stress reaches a value of p_{cq} = 1.13~1.33p (where p_{cq} is quasi-preconsolidation pressure). Thus, soft clay makes less initial settlement and

secondary settlement. Thereafter, the behaviour of soft clay merges with EOP e-log p' curves and behaves as a normally consolidated clay.

7. As a result of experimental data, the soft blue clay containing organic content of 1.5 - 2% in weight, exhibits extraordinary settlement behaviour proves the hypothesis of tertiary compression.

8. Tertiary compression is defined as the increasing rate of settlements observed in e-log t curve at secondary compression phase. This can be visually observed by plotting the log time-log rate of void ratio diagram. Tertiary compression starts with a decrease of slope m (m is a parameter of Sing-Mitchell equation) in a plot of $\log^{0}e - \log t$ diagram, after a relatively constant stretch at m≈1 that corresponds secondary compression.

9. Although primary consolidation index (c_v) in the field is 100 times greater than (c_v) values predicted in the laboratory, the observed in-situ secondary and tertiary compression ratios are approximately 1 to 4 times greater than the ones determined in the laboratory. In-situ settlement observations are in good agreement with laboratory test results.

10. SEM analysis shows that, undisturbed and unloaded soil fabric is flocculated and aggregated at the beginning. For pressures (25 and 100 kPa) less than preconsolidation pressure, the fabric is nearly the same as unloaded fabric of the specimen. Flocculated structure tends to deflocculate for pressures (ie. 400 kPa) greater than the preconsolidation pressure. During secondary compression phase, the fabric of the soft clay starts to change and the frames of organic matter deteriorate partly for pressures (25 and 100 kPa) less than the preconsolidation pressure. Also, the flocculated and aggregated fabric changes to totally deflocculated and dense aggregated fabric for pressures (400 kPa) greater than the preconsolidation pressure.

11. As a result of experimental data and SEM analysis, it is concluded that tertiary compression emerges because of breaking down the frame of organic matters during the long-term compression.

1. GİRİŞ

Tüm zeminler sıkışabilir ve üzerlerine uygulanan efektif gerilmedeki değişikliklere bağlı olarak hacim değişikliği yaparlar. Drenaj engellenmediği takdirde büyük miktarda oturmalar oluşur. Ancak, mühendislik açısından oturmaların büyüklüğünün önemi, yapı tipine göre oturmaların tolere edilebilir sınırlar içinde kalıp kalmadığıdır. Bir yüzyıldan daha uzun bir süredir inşaat mühendislerinin karşılaştığı ve ilgilendiği oturma problemleri, 1923 'te Terzaghi 'nin –birçok kişi tarafından modern zemin mekaniğinin başlangıcı olarak kabul edilen- "Konsolidasyon Teorisini" tanıtmasına kadar rasyonel bir yaklaşımla çözülemiyordu. Suya doygun bir zeminde, çoğu zaman konsolidasyonun bitimine doğru oturmaların zamanla devam ettiği ve klasik Terzaghi Konsolidasyon Teorisinin öngördüğü şekilde asimptotik olmadığı farkedilmiş ve bu davranış, çoğu araştırmacı tarafından "ikincil konsolidasyon", "ikincil sıkışma" veya "krip" olarak adlandırılmıştır. Terzaghi'nin bir boyutlu klasik konsolidasyon teorisi, yalnızca hidrodinamik etkilerle birincil konsolidasyonu veya sıkışmayı dikkate almasına rağmen pratikte oturmalar, aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesinden sonra da sabit efektif gerilme altında devam etmektedir (Mesri, 1973). Sabit efektif gerilme altında oluşan hacim değişimi "ikincil sıkışma" olarak adlandırılmaktadır. 1940'lardan bu yana araştırmalar ikincil sıkışma üzerine yoğunlaştırılmıştır.

Bu çalışmada, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pisti sahasından alınan yumuşak mavi kil zemin üzerinde yapılan 24 adet klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen oturma-zaman datasından hareketle sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametrelerinin sabit efektif gerilme altında zamanla değişimi ve birbirleriyle ilişkisi incelenmiştir. Uzun süreli yüklemenin zemin davranışına etkisi araştırılmış ve ikincil sıkışma sürecinde oluşan üçüncül sıkışma olayı, deneysel sonuçlar ve SEM analizleriyle alınan fotoğraflarla açıklanmıştır. Diğer yandan, laboratuvarda yapılan deneylerden elde edilen data ile arazide 6-12 ay müddetle yapılan uzun süreli oturma gözlemlerinin sonuçları karşılaştırılıp, yorumlanmıştır.

2. KİLLERİN OLUŞUMU VE ÖZELLİKLERİ

Zeminler katı, sıvı ve gaz fazlarından oluşur. Çok yumuşak kıvamlı kilden organik killere, az sıkışabilir kilden çok sıkı kuma çok yumuşak kayalara kadar geniş bir anlam içerir. Zeminin mühendislik özellikleri, birbirine içsel etkiyen veya sıklıkla birbirleriyle ilgili faktörlerin etkilerinin bileşimine, kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Mühendislik jeolojisi, zeminlerin (veya kayaların) jeolojik geçmişine bağlı olarak malzeme davranışını ve bunların birbirlerine nicel bağımlılığını açıklamaya çalışmaktadır. Dünyada, tüm zeminler değişken sıkılıklarda veya kıvamlarda ve değişken su muhtevalarında oluşur. Belirli bir sahada, birçok zemin türü ve kompozisyonu bazen birkaç metre içinde dahi değişken olabilmektedir. Bu nedenle geoteknik mühendisi, karşısına çıkan zemini sınıflandırmada ve yapacağı öngörüler ile tahminlerde uygun mühendislik parametrelerini seçme arayışı içindedir.

Kil minerallerinden oluşan ve ultramikroskopik boyutlarda plaka şekilli partiküllerden oluşan, ancak agregasyona uğradığında boyutları mikron mertebelerine varan killer, mühendislik uygulamalarında genel olarak dane boyutu 2 μm'den (0,002 mm) daha küçük danelere sahip ince daneli zeminler olarak kabul edilir. Killerin kıvamı, serbest basınç dayanımı q_u veya drenajsız kayma mukavemeti $s_u = q_u /2$ vasıtasıyla tanımlanmaktadır. Terzaghi ve Peck (1967), serbest basınç dayanımı 25 kPa'dan daha küçük kıvamdaki killeri "çok yumuşak" ve serbest basınç dayanımı 25-50 kPa arasında olan kıvamdaki killeri "yumuşak" killer olarak sınıflandırmışlardır. Genel olarak, serbest basınç dayanımı 50 kPa'dan daha küçük kıvamdaki killer yumuşak kıvamlı killer olarak tanımlanmaktadır.

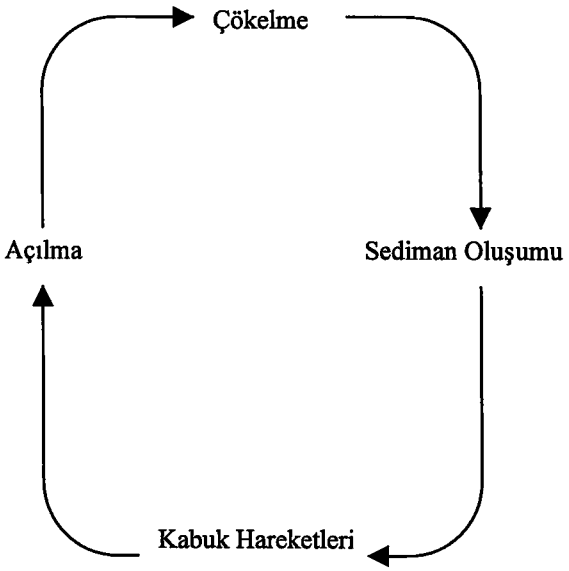
Yumuşak killerle dünyanın her tarafında karşılaşılmasına rağmen literatürde, esas olarak bu tür yumuşak killerin İskandinavya ülkelerinde özellikle İsveç ve Norveç'te ve akıcı killerin ise doğu Kanada'da olduğu bilinmektedir (Brenner ve diğ., 1981). Bu bölgelerde, yumuşak kil tabakalarının varlığı özel mühendislik problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuş sonuçta, bu problemlerin çözümü için yapılan

çalışmalar günümüz geoteknik mühendisliğinin gelişimine büyük katkılarda bulunmuştur.

2.1 Jeolojik Süreç ve Kil Sedimanlarının Oluşumu

Mühendislik problemlerinde sert kilden yumuşak kil zemine, sıkı kumdan kayaya, siltten organik zemine kadar hemen hemen sınırsız bir yelpazede zeminlerin çeşitli varyasyonları incelenmekte ve mühendislik jeolojisinde, zeminlerin (veya kayaların) jeolojik geçmişine bağlı olarak malzeme davranışı ve bunların birbirlerine nicel bağımlılığı açıklanmaya çalışılmaktadır.

Jeolojik süreç boyunca Dünya yüzeyinde hiç bitmeyen dört oluşum sürekli ardışık bir şekilde devam etmektedir (Şekil 2.1). *Açılma(Denudation)*, kara kütlesinin yırtılması sürecidir. Bu süreçte *Aşınma(Weathering),* oluşmuş kaya veya zemin kütlesinin yerinde kimyasal olarak veya mekanik zorlayıcı etkilerle kırılması ve aşınmasıdır. *Taşınma(Transportation),* aşınma sonucu çeşitli birimlerin bir yerden diğer bir yere, genellikle yüksek alanlardan daha düşük yükseltili alanlara taşınmasıdır. *Çökelme(Deposition),* sedimanların daha önceki yerlerinden daha başka yere taşınması sonucu birikmesidir. *Sediman Oluşumu (Sediment Formation)*, birikmiş

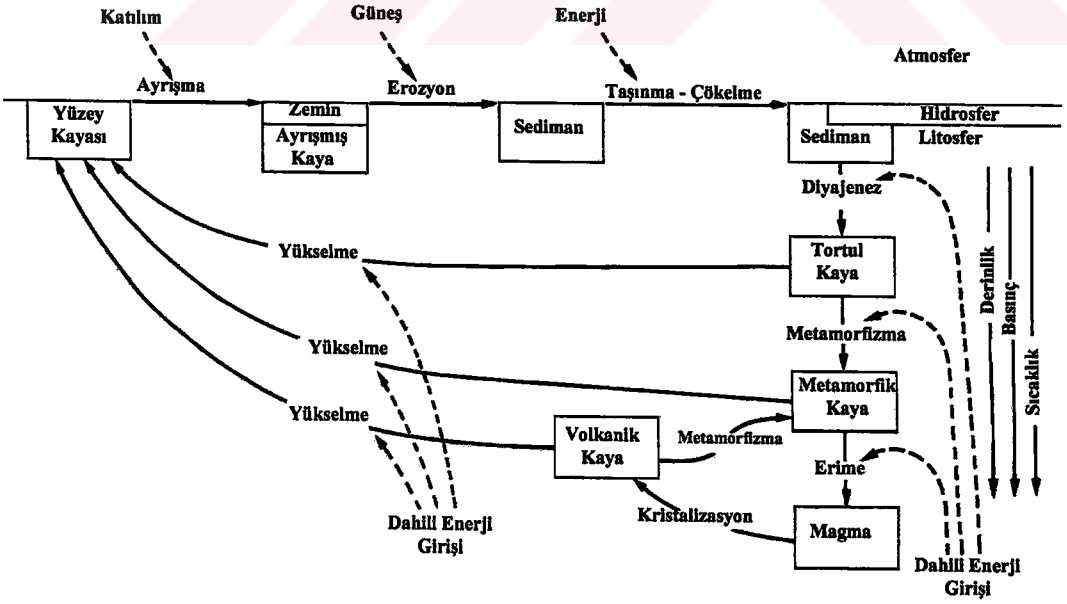


Şekil 2.1. Jeolojik Süreç

sedimanların sıkışarak kompozisyonunun yine kayaya veya başka bir birime dönüşümüdür. *Kabuk Hareketleri(Crustal Movement),* faylanma gibi ani hareketlerin (tektonik hareketler) ve tabaka basenlerinin (epirojenik hareketler) yavaş çökmesi ile yüklenmemiş alanların giderek yükselmesi nedeniyle olan hareketleridir. Şekil 2.2, bu birbirine bağımlı oluşumu şematik olarak ifade etmektedir (Mitchell, 1976).

Doğada Şekil 2.2'de gösterilen sirkülasyonlardan birden fazlası aynı anda kendiliğinden süregelmektedir. Örnek olarak; dağlık kesimlerde aşınma ve erozyon devam ederken tabakalanma, sediman oluşumu ve bölgesel çökme (kabuk hareketleri) kendiliğinden devam etmektedir.

Kil mineralleri, esas olarak kayaların aşınması sonucu meydana gelen Mg, K, Ca ve Fe-iyonları içeren hidro aliminyum silikatlardır. Killer, diğer silikat minerallerinin kimyasal olarak bozulması sonucu oluşmaktadırlar. Kil minerallerinin miktarı ve tipi, iklim, ana malzeme, drenaj şekli (topoğrafya) ve bitki örtüsünün fonksiyonlarına bağlıdır. İklim en önemli faktördür. Aşınmış malzemenin taşınması şeklindeki malzemeler, dane formunda veya kayalardan sızan suların yıkanma ürünü (leaching) olan iyonların formu şeklinde oluşmaktadır. Bir sedimandaki kil danelerinin üç tip orjini vardır. En yaygın olan orjin *kalıtımsal(inheritance)* olanıdır. Yani daha önce



Şekil 2.2. Kaya Oluşum Süreci

şekillenmiş kil minerallerinin toplanması sırasında herhangibir değişime uğramadan ilk özelliklerini korumasıdır. Diğer bir orjin olasılığı, daha önce şekillenmiş kil minerallerinin çevresel jeokimyasal etkilere göre *değişim(transformation)* geçirmesidir. İki tip değişimden söz edilebilir: (1)*degradasyon(degradation),* kil mineral kafesindeki iyonların gitmesi, (2)*agradasyon(aggradation),* kil mineral kafesine iyonların eklenmesi. Üçüncü orjin mekanizması ise, sedimanların yeniden form alması veya (3)*otojenez(authigenesis)* yani mevcut depolanma çevresindeki iyonlardan yeni kil minerallerinin arazide kristalize olmaları gibi seyrek görülen bir orjin mekanizmasıdır (Brenner ve diğ., 1981).

Belli bir çevrede depolanmanın ardından kil sedimanları çevredeki sıcaklık ve basınç koşullarına bağlı olarak çeşitli diyajenetik değişikliklere uğramaktadır. Yumuşak killer gibi genç sedimanlar büyük örtü yükü, konsolidasyon, dehidrasyon ve danelerin çimentolanması, denizin çekilmesi veya izostatik yükselme(uplift) nedeniyle denizaltında(subaerial) bir miktar diyajeneze uğramaktadır. Sıcaklıktaki ve basınçtaki ekstra bir artım, kil minerallerinin bozulması, mika ve feldspat gibi yeni kil minerallerinin metamorfizma sonucu oluşmasına sebep olmaktadır. Tektonizma ve volkanik aktivite, metamorfizma geçirmiş malzemeyi ilk önce gerileyen diyajenezle ve ardından açık kayanın aşınmasıyla yüzeye çıkarmakta ve ardından kil minarellerinin yeniden oluşumu başlamaktadır.

2.2 Yumuşak Killerin Depolandığı Ortamlar

Taneli, parçalanabilir sedimanların en incesi olan killer esas olarak kimyasal yolla ayrışmış olan kayaların suda çözülmeyen, erimeyen, ayrışma, bozulma ürünü olarak meydana gelen pul şeklinde, çok ince kristalli ve amorf malzemelerdir. Birçok kil, aynı zamanda kuvars, feldspat ve mika (kaya unu) gibi kil minerali olmayan daneleri de içermektedir. Bu mineraller, taşınma süreci sırasında ezilme ve yıpranma sonucu ortaya çıkan ince taneler olarak nitelenebilmektedir.

Sedimanlar suyla, hava akımıyla veya buzullarla hareket ederler. Zemin ve kaya molozları, akımlar, okyanus akıntıları, dalgalar, rüzgar, yeraltı suyu, yerçekimi ve buzul etkileriyle aşınma zonundan sürekli taşınmakta ve taşınma sırasında ayrışma

ve bozulma sonucu kaya ortamdaki birincil özelliklerini mekanik nedenlerle kalıcı olarak yitirmektedirler. Suda çözünmeyen, erimeyen malzemeler taşınma süreci boyunca hayli uzun süre killi çökelleri oluşturmadan taşınabilmektedir. Suyla taşınan tüm partiküller su içinde asılı kaldıktan sonra çökelmeye başlarlar. Akımlar, yönsüz veya çok yönlü, üniform veya üniform olmayan, düzgün veya çalkantılı ortamda akıntı yönündeki değişikliğe bağlı olarak çökelirler. Laminer ortamda, küçük partiküllerin çökelme hızı çaplarının karesi ile orantılıdır, ancak büyük partiküllerin çökelme hızı türbülanslı akım koşullarında çaplarının karekökü ile orantılıdır (Christoulos ve diğ., 1987). Akımdaki çökelme hızının gittikçe azalması sonucu suyun taşıma kapasitesi azalır ve iri malzemeler önce, ince malzemeler en sonra çökelir. Farklı tipteki sedimanlar farklı çevre ortamlarında oluşmakta ve şu şekilde karakterize edilmektedirler:

a) Depolanma ortamı (tatlı su, deniz suyu veya hava vs.)

b) Taşınma biçimi (dalga, nehir, rüzgar vs.)

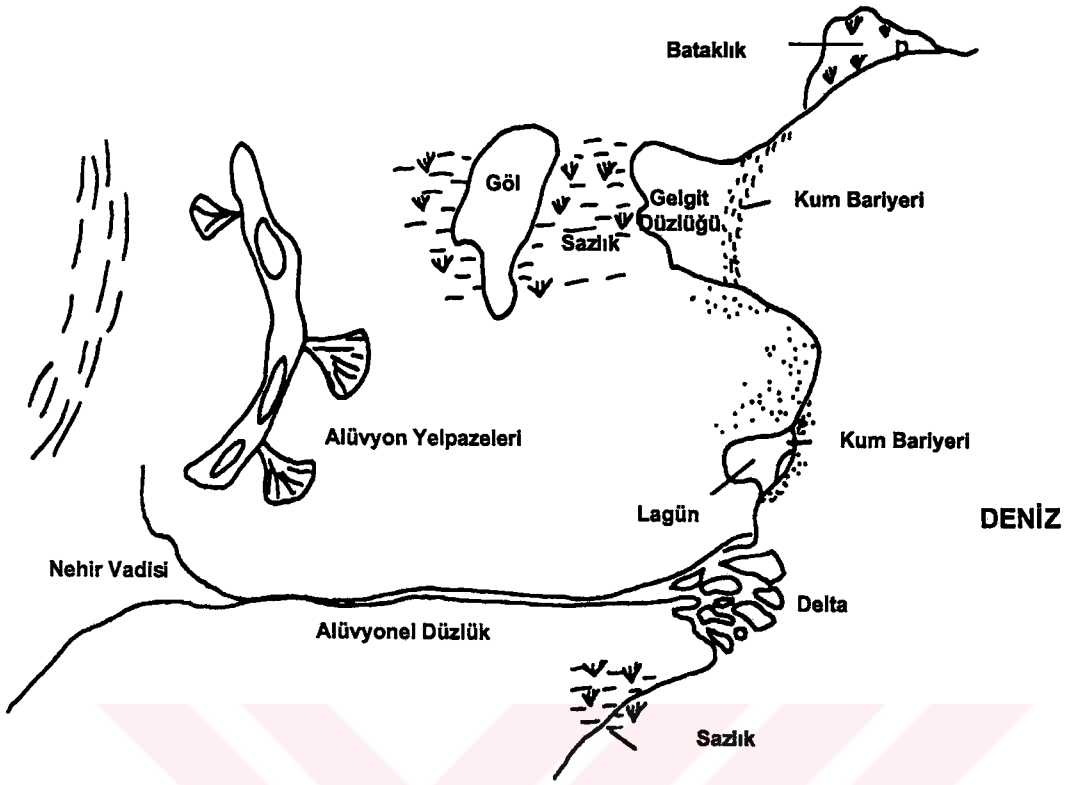
c) Depolandığı yer (kıyı, sel yatağı, göl, deniz vs.)

Yumuşak killerin depolandığı çevreler, sedimanların fiziksel ve mekanik özellikleri ile doğrudan alakalıdır ve bu çevreler şematik olarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Aşağıdaki paragraflarda yumuşak killerin depolandığı ortamlar kısaca açıklanmıştır.

2.2.1 Kıtasal Ortam

a) Karasal Ortam : Nehirler akıntı sonucu alüvyonları depolarlar. Alüvyonların kalınlığı ve kapladığı alan büyükse buna alüvyon düzlüğü denir. Her ne kadar alüvyonlar genelde iri malzemelerden oluşurlarsa da sel düzlüğünde genelde daha çok kil boyutundaki malzemeler çökelir. Önce iri malzemeler ardından ince malzemeler çökelmektedir.

b) Bataklık Ortam : Yüksek su muhtevası olan ve organik malzeme içeren yumuşak killer ve çamurlar, bataklık ve sazlık yerlerde gel-git dalgalarına ve deltalara yakın alanlarda çökelirler.



Şekil 2.3. Yumuşak Killerin Depolandığı Çevreler (Christoulos ve diğ., 1987)

c) Gölsel Ortam : Killer ve çamurlar gölsel ortamda, yüksek miktarda kil mineralleri ve karbonlu organik malzeme içererek çökelirler ve depolanırlar. Kavkı ve deniz kabukları nedeniyle bu tür zeminler düşük özgül ağırlık, yüksek plastisite ve yüksek kayma mukavemeti açısına sahiptir.

2.2.2 Kıtasal ve Denizel Ortam

a) Deltasal Ortam : Nehirin denize kavuştuğu yerde, nehir ağzında depolanan sedimanlar deltasal çökellerdir. İri malzemeler nehir ağzına çok yakın, ince daneli malzemeler ise kıyıdan uzağa depolanırlar. Deltasal sedimanlar sığlık ortamlarda ve hatta kıta sahanlığında depolanırlar. Büyük deltalar, çok karmaşık sediman yapısı göstermesine rağmen genel olarak üst, orta ve alt tabaka yapısı olarak gruplandırılabilirler. Yumuşak killer, deltanın su altında kalan bölümünde denize doğru olan kısmında oluşurlar. Yumuşak killer, sıklıkla ince laminalı, çatlaklı ve yüksek plastisitelidirler. Büyük deltalarda, hem karasal hem denizel ortamda farklı tuzluluklarda (tatlı veya tuzlu su) depolama alanları bulunmaktadır.

b) Lagüner Ortam : Lagünler ada, kayalık veya kum bariyerler nedeniyle denizle bağlantısı kesilmiş sığ sulardır. Killer, lagünlerin derin kısımlarında ve genelde lagünlerin orta kesimlerinde depolanmaktadır.

c) Gel-Git Sığlığı Ortamı : Gel-git sığlığı, kıyı yakınındaki gel-git dalgalarının alçalması veya yükselmesi sonucu su ile kaplanmış veya kaplanmamış kara alanlarıdır. Günümüzün yumuşak deniz killeri, genelde tropik ve astropik alanlarda gel-git sığlıklarında oluşmuştur.

d) Haliç Ortam : Haliç ortamdaki sedimanlar, akıma ve denize bağlı olarak kil, silt veya kum boyutunda olabilmektedir.

2.2.3 Denizel Ortam

Yumuşak killerin sedimentasyonu esas olarak büyük kıta düzlüğü ile deltaların kombinasyonuna bağlıdır. Deniz killeri genelde açıktan koyuya gri renkli, tatlı sudan tuzlu deniz suyuna kadar ortamlarda çökelen sedimanlardır. Buzul kökenli yerlerdeki killi deniz sedimanları esas olarak kıta kabuğu hareketleri veya Kuvaterner zamanındaki deniz seviyesi değişimi sırasında oluşmuşlardır. Son 20 000 yıldaki kıta buzullarının erimesi sonucu deniz seviyesinin yükselmesi ve kıyı çizgisinin kıta içine doğru ilerlemesi, deniz killerini sadece deniz sınırları içinde değil, kıta içindeki vadi tabanlarında da düşünmeyi gerektirmektedir.

2.3 Kil Mineralleri ve Killi Zeminlerin Yapısı

Kil mineralleri, kaya kökenli minerallerin kimyasal olarak aşınması sonucu oluşan birincil mineraller grubunun bir üyesi olup çok küçük boyutlu partiküllerden ibaret, kristalli minerallerdir. Kil mineralleri esas olarak hidro aliminyum silikatlardır ve Mg, K, Ca, Na ve Fe-iyonları içerirler. Pul şeklinde olan veya çok küçük plakalı kil mineralleri, atomik yapıyı tekrarlayan birçok kristal yaprağından oluşurlar. Farklı tabaka yapıları içindeki farklı metalik iyonlar farklı kil minerallerini oluşturur. Ne tüm kil mineralleri 2 μm'den küçüktür ne de tüm 2 μm'den küçük danelerin hepsi kil mineralidir. Kil boyutlu daneler ve kil mineralleri farklı şeylerdir. Killi zeminlerde karşılaşılan kil mineralleri aşağıda açıklanmıştır (Mitchell, 1976):

a) *Kaolin :* Kaolin mineralleri, 1:1 silika:alümina minerali olarak adlandırılırlar. Kaolinlerin boyutları 0.05 ~ 1 μm arasında değişir ve 6 kenarlıdır. Elektrolit muhtevası ve pH'ı düşük ve iyonların silika formasyonuna eğilim gösterdiği durumlarda, silika seyrek, alümina ise boldur ve bu durumda kaolin mineralleri oluşur.

b) *Halloysit :* 1:1 silika:alümina mineralidir ve kaolinden düz şekli ile ayrılmaktadır. Halloysit, feldspatın H_2SO_4 ile yıkanması sonucu piritin alterasyonuyla meydana gelmiştir.

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

d) *İllit (Hidro Mika) :* 2:1 illit kil minerali, birçok killi zeminde bolca bulunur. Muskovit mikasına benzer bir yapısı vardır ve "hidro mika" olarak adlandırılır. Pul şeklindeki partiküllerin boyutları 10 μm'ye kadar çıkabilir.

e) *Klorit :* 2:1:1 minerali olarak adlandırılır. Simektitin alterasyonu, yeterli Mg^{+2} kristalli brusit tabakasının ara su tabakasıyla yerdeğiştirmesine sebep olur. Klorit tabakası düşük-orta seviyedeki metamorfik kayaların kaya formudur ve kayadan türeyen birçok zeminin ana mineralidir. Genellikle şişmeye karşı hassastırlar, ancak montmorillonitten daha az aktiftirler, boyutu 1 μm'ye kadar çıkabilir.

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

"Fabrik" terimi, zemin içindeki boşluk, dane grupları ve danelerin dağılımını ifade etmektedir. "Yapı" terimi ise çoğu zaman fabrik terimi yerine kullanılan ancak

fabrik+bileşim+içsel yüklerin toplam etkisini içeren bir ifadedir. "Mikrofabrik", optik mikroskoplar yardımıyla incelenen fabrik anlamında kullanılmaktadır. "Makrofabrik" ise çıplak gözle veya basit lensler yardımıyla tabakalanma, fissürlenme, boşluklar ve büyük boyutlu heterojenlik gibi stabilite, oturma veya sızma analizlerinde kullanılan nitelikleri ifade etmek için kullanılmaktadır. Floküle ve ayrık yapı aynı anda olabilmektedir. Birçok çökelde, tekil partiküllerin olması seyrek rastlanan bir durumdur, genelde kil plakaları topak yapı şeklinde değişik fabrik formunda bir araya gelmektedir. Bir kilde karşılaşılan dane oryantasyonu aşağıdaki gibi gruplandırılabilir (Mitchell, 1976):

1) Ayrık Yapı (Disperse) : Kil daneleri yüz yüze oryante olmamıştır.

2) Topak yapı (Aggregated) : Kil daneleri yüz yüze oryante olmuştur.

3) Floküle Yapı (Flocculated) : Topak yapıdaki kil daneleri, danelerin kenarları diğer danelerin kenarlarına veya yüzlerine gelecek şekilde dizilmiştir.

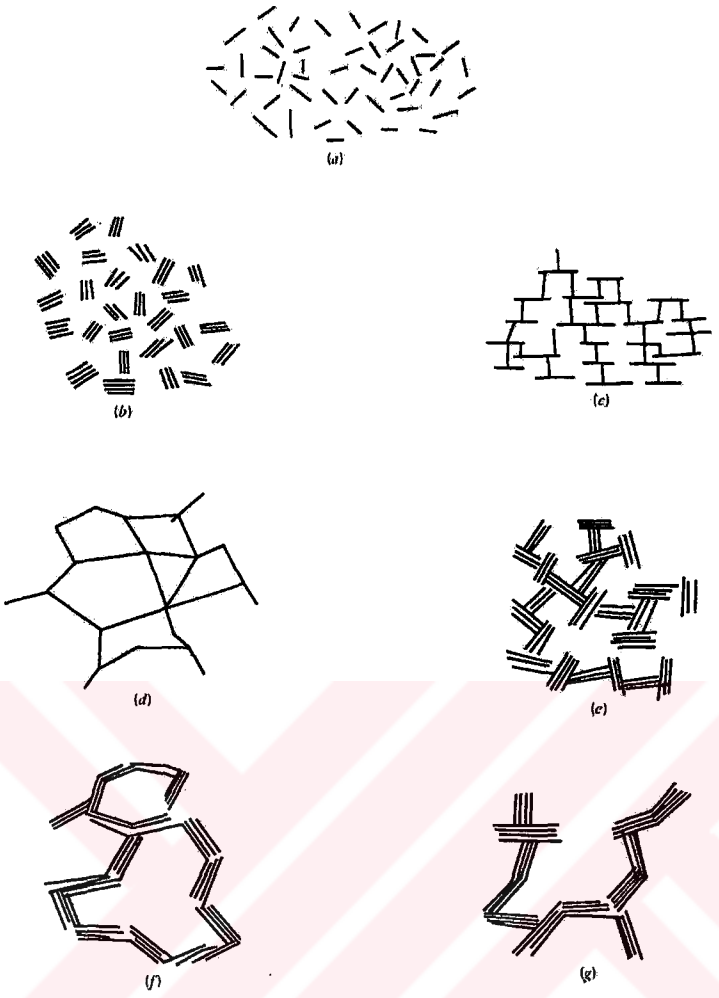
4) Floküle Olmayan Yapı (Deflocculated) : Kil daneleri arasında herhangibir dizilim yoktur.

Çökeller, rezidüel zeminler, kompaksiyonla sıkıştırılmış killerdeki dane oryantasyonu birçok formda olabilir ama esas olarak Şekil 2.4'tekine benzer formda ve farklı su muhtevalarındadır. Zeminlerdeki dane oryantasyonunda üç ana grup söz konusudur:

1) Basit dane düzeni : Danelerin birbirine tesiri tekil kil, silt ve kum danelerinin birbirine tesiri şeklinde tekil formdadır.

2) Dane grubu : Dane organizasyonundaki birimler arasında tanımlanabilir fiziksel sınırlar ve belirli mekanik bir fonksiyon vardır ve basit dane düzeni ile basit dane grubunun formu şeklindedir (Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).

3) Boşluk alanı.

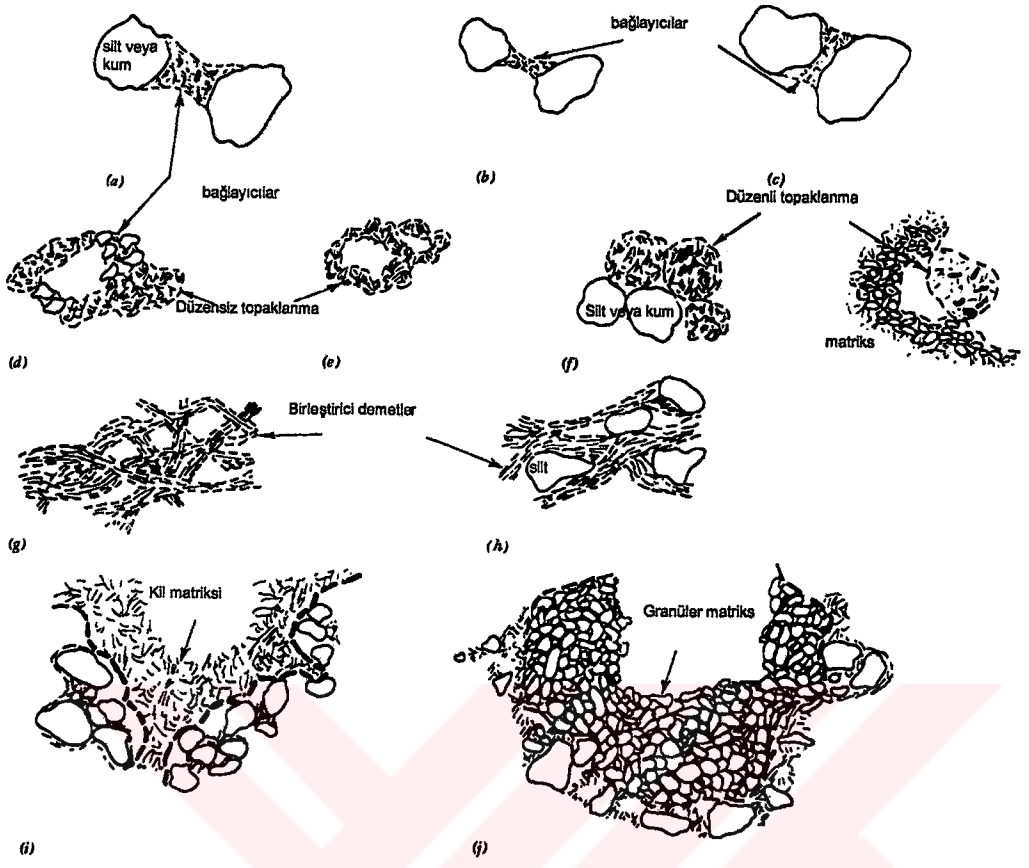


Şekil 2.4. Bir Kil Süspansiyonundaki Dane Oryantasyonu Modelleri (van Olphen, 1963) (a) Ayrık ve Floküle Olmayan Yapı. (b) Topak Fakat Floküle Olmayan Yapı. (c) Dane Kenarı Diğer Danenin Yüzüne Gelecek Şekilde Floküle Fakat Ayrık Yapı. (d) Dane Kenarı Diğer Danenin Kenarına Gelecek Şekilde Floküle Fakat Ayrık Yapı. (e)Dane Kenarı Diğer Danenin Yüzüne Gelecek Şekilde Floküle ve Topak Yapı. (f) Dane Kenarı Diğer Danenin Kenarına Gelecek Şekilde Floküle ve Topak Yapı. (g) Dane Kenarı Diğer Danenin Kenarına ve Dane Kenarı Diğer Danenin Yüzüne Gelecek Şekilde ve Topak Yapı.

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

1) Belirli bir konsolidasyon basıncı altında floküle yapı, floküle olmayan yapıdan daha az yoğundur.

2) Aynı boşluk oranında, floküle yapıdaki gelişigüzel dizilmiş daneler ve dane grupları, floküle olmayan yapıdan daha rijittir.



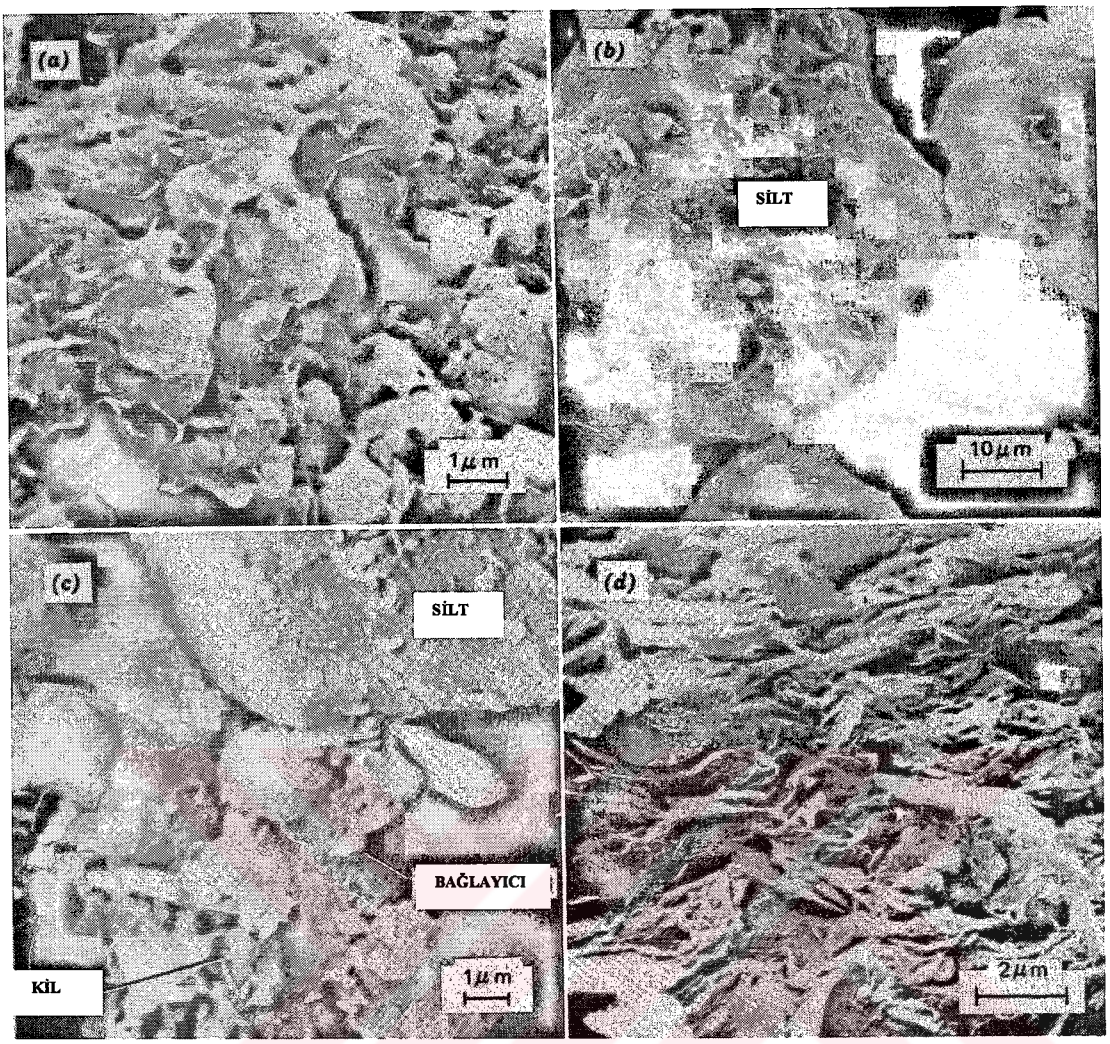
Şekil 2.5. Dane Grubunun Şematik Gösterilişi (Collins, McGown, 1974). (a) Bağlayıcılar. (b) Bağlayıcılar. (c) Bağlayıcılar. (d) Bağlayıcı Grubuyla Düzensiz Topaklanma. (e) Floküle Yapıdaki Düzensiz Topaklanma. (f) Dane Matriksi ile İçsel Etkileşimli Düzenli Topaklanma. (g) Birbirine Dokunan Kil Demetleri. (h) Silt Karışmasıyla Birbirine Dokunan Kil Demetleri. (i) Kil Dane Matriksi. (j) Granüler Dane Matriksi.

3) Önkonsolidasyon basıncından daha büyük basınçta, basınçtaki küçük bir artışla floküle yapıdaki danelerin yeniden dizilimi, floküle olmayan yapıdan daha fazladır.

4) Genelde, kayma şekil değiştirmesi plaka şekilli partikülleri ve partikül gruplarını onların uzun ekseni ve kayma doğrultusu boyunca oryante etmektedir.

5) Floküle olmayan yapı ve/veya yoğrulmuş zemindeki ortalama boşluk çapı ve boşluk boyutu aralığı, floküle yapı ve/veya örselenmemiş zeminlerdekinden daha küçüktür.

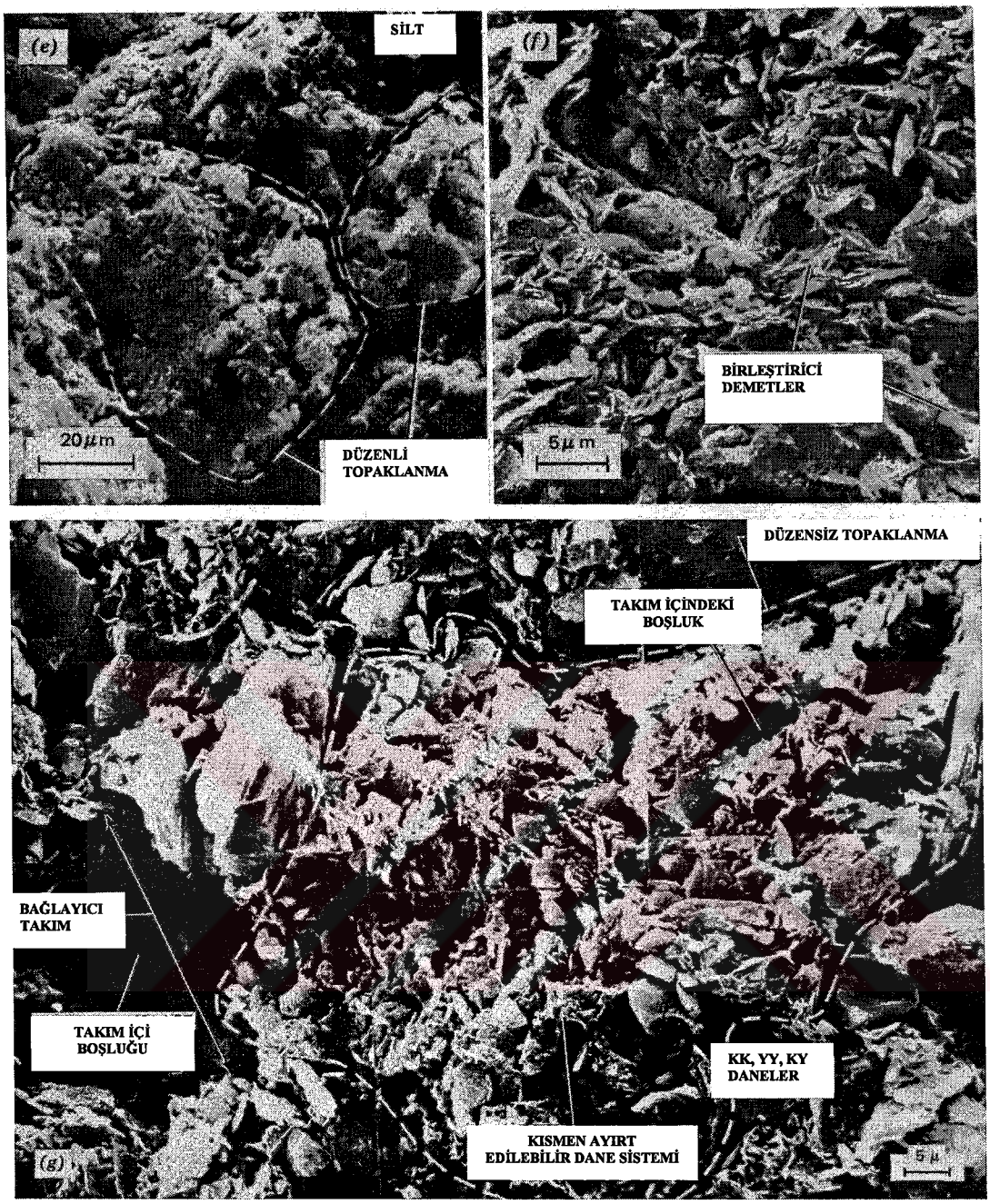
6) Anizotropik konsolidasyon gerilmeleri, plaka şekilli dane ve dane gruplarını kendi uzun eksenleri ve büyük asal düzlem boyunca düzenlemeye eğilimlidir.



Şekil 2.6. Örselenmemiş Zeminin Fabrik Yapısının SEM ile Görünüşü (Collins, McGown, 1974). (a) İsrail, Lydda Kilinin Dane Sistemi(tatlısu alüvyonel çökeli). (b) İngiltere, Ford Siltli Lös Zeminin Dane-Dane Kontağı(rüzgar kökenli çökel). (c) İzlanda, Breidmerkur Siltli Buzul Kilinin Bağlayıcı Grubu(buzul kalıntısı çökeli). (d) İngiltere, Immingham Siltli Kilinin Dane Matrisi Grubu(haliç çökeli). (e) İsrail, Holon Siltli Kilinin Düzenli Topak Yapı Grubu(tatlısu alüvyonel çökeli). (f) İskoçya, Hurlford Organik Siltli Kilindeki Birbirine Dokunan Demetler Grubu(tatlısu göl çökeli). (g) Norveç, Sundland Siltli Kilindeki Düzensiz Topak Yapı Grubu(deniz çökeli).

7) Bir formasyonun bir zaman için denge yapısı, daha sonraki bir tarihtekiyle aynı olmak zorunda değildir.

8) Gerilmeler genelde tüm dane ve dane grupları arasında eşit dağılmaz. Fabrik elemanlarının kemerlenmesi sonucu bazı dane ve dane grupları gerilme almazlar.

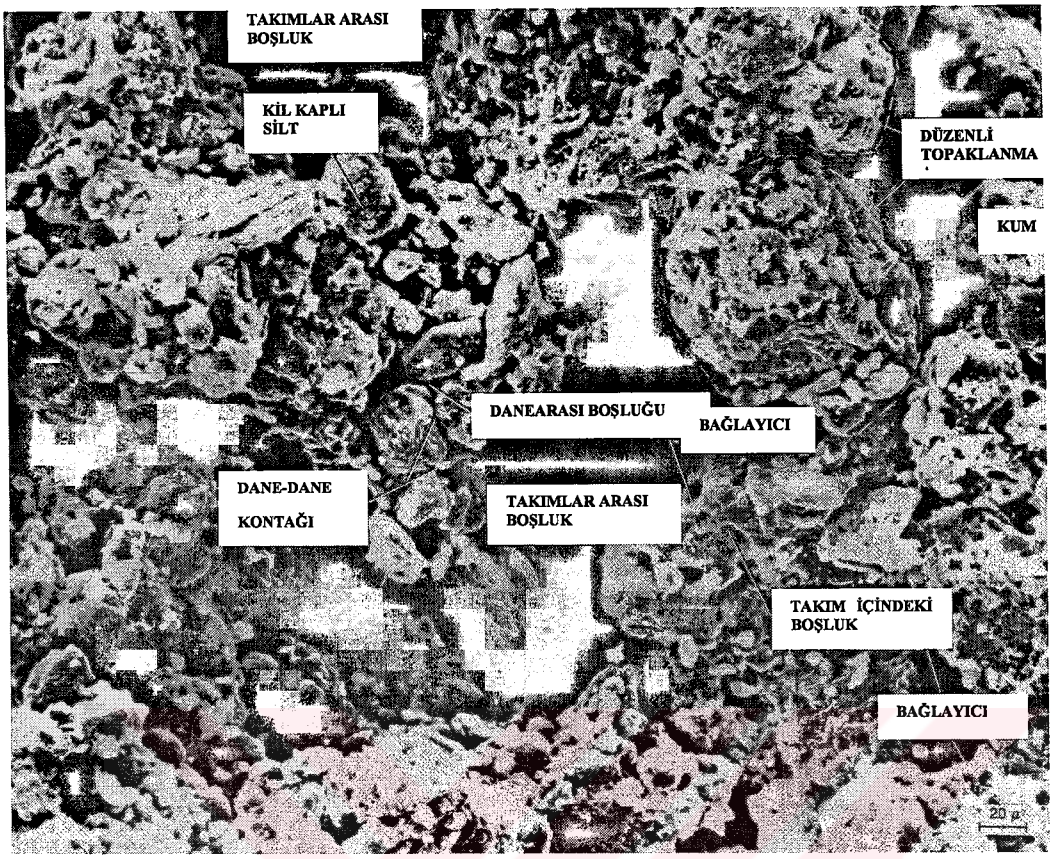


Şekil 2.6. Devam

9) Yapıdaki bir değişim nedeniyle, drenajın engellendiği suya doygun bir zemin, genişlemeye ve dilatasyona başlarsa, negatif boşluksuyu basıncı oluşur ve efektif gerilme artar.

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

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜ



Şekil 2.7. Tucson Siltli Kilinin Tüm Mikrofabrik Yapısı (Collins, McGown, 1974).

2.4 Yaşlı ve Gecikmiş Çökellerin Sıkışması

Zemin mekaniğinin gelişimi sürecinde başlangıçta, tüm yumuşak killer "normal konsolide killer" olarak sınıflandırılmakta ve "aşırı konsolide killerden" bu şekilde ayırt edilmekteydi. Son 40 yılda konu üzerinde çalışan bilim adamları, yumuşak kilin birçok varyasyonu olduğunu farketmişler ve yumuşak killeri sınıflandırmak için yoğun çaba harcamışlardır. Günümüzde yumuşak killeri belirlemek ve sınıflandırmak için gereken temel bilgiler aşağıda verilmiştir (Mitchell, 1976). Ancak, yumuşak killerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için aşağıdakileri kapsayan detaylı bir çalışma gerekmektedir.

1) Çökelin jeolojik geçmişi

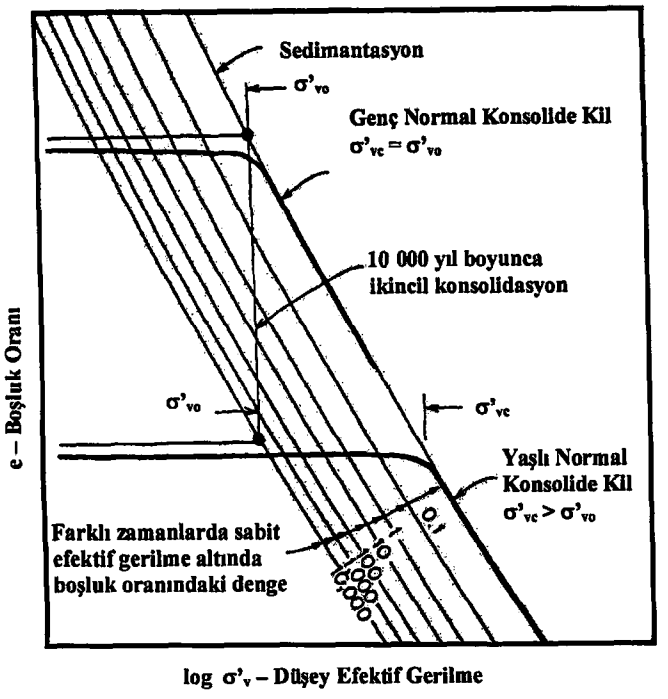
2) Çökelin su muhtevası, Atterberg limitleri ve organik malzeme miktarı

3) Kilin fabrik yapısının nemli ve kısmen kurumuş haliyle incelenmesi

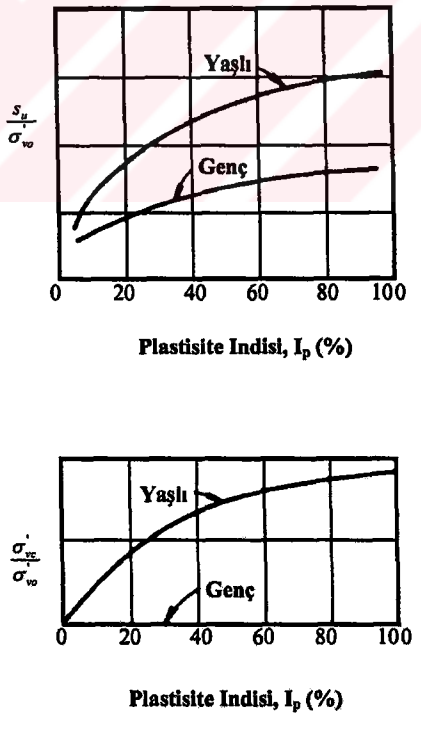
4) Arazide çok sayıda ve derinlikte arazi veyn deneyleri ile istifin mukavemet-derinlik ilişkisinin değişiminin belirlenmesi ve hassaslığı

5) Laboratuvarda e-log σ'_v eğrisinin konsolidasyon deneyleriyle belirlenmesi ve önkonsolidasyon basıncı

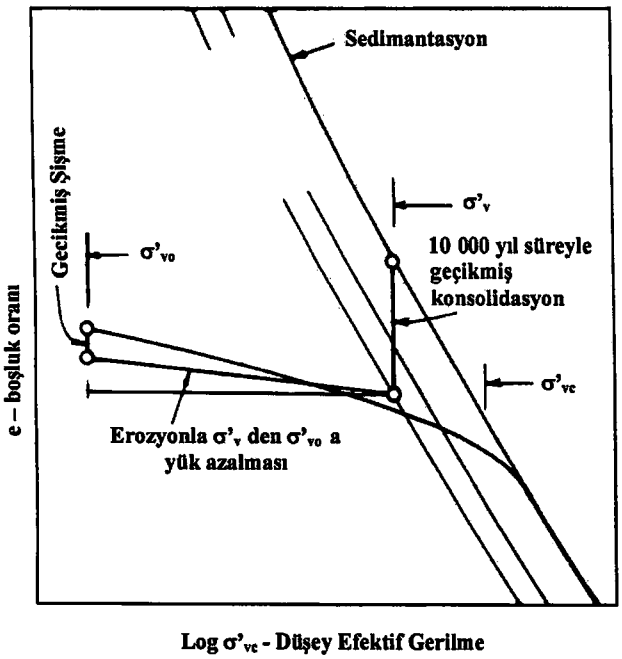
Yakın zamanda çökelmiş ve kendi ağırlığı altında dengeye gelmiş fakat hiçbir belirgin ikincil veya gecikmiş konsolidasyona uğramamış killer "genç normal konsolide killer" olarak sınıflandırılabilirler (Bjerrum, 1973). Bu tür killer, yalnızca üzerindeki örtü yükünü taşıyabilen ve ekstra bir yük altında büyük oturmalar yapan killerdir. Eğer örselenmemiş genç konsolide kil üzerinde konsolidasyon deneyi yapılırsa, e-log σ'_v eğrisi Şekil 2. 8'deki gibi bir eğrilik göstermektedir. Bir dolgu yükü altında yeni konsolide olmuş bir kil tabakası da sıkışabilirlik açısından genç bir çökeldir. Genç normal konsolide killerde yapılan veyn deneylerinde kayma mukavemeti, efektif örtü yükü arttıkça lineer olarak artmaktadır. (s_u/σ'_{v0}) değeri, kilin plastisitesine bağlı olan karakteristik bir değerdir. Veyn deneyiyle belirlenen (s_u/σ'_{v0}) değeri plastisite indisine göre çizilirse Şekil 2.9'daki gibi bir eğri elde edilmektedir. Eğer genç normal konsolide bir kil sabit efektif gerilme altında yüzlerce veya binlerce yıl terkedilirse, kil oturmaya devam eder. İkincil veya gecikmiş konsolidasyon sonucu daneler yapısal olarak yeniden dizilir ve daha stabil bir yapıya kavuşarak mukavemeti artar, sıkışabilirliği azalır. Zamanla kildeki gecikmiş konsolidasyon daha fazla sıkışmaya karşı direnç gösterir. Örselenmemiş bir yaşlı normal konsolide kil numunesi konsolidasyon testine tabi tutulursa, e-log σ'_v eğrisi Şekil 2. 8'deki gibi bir eğrilik gösterir. Homojen bir kil çökelinde σ'_{vc}/σ'_v oranı derinlikle sabittir ve aynı yaştaki bir kil çökelinin σ'_{vc}/σ'_v oranı, kilin oluşan örtü yükü altında kaldığı ikincil sıkışma miktarına kadar artabilir. İkincil konsolidasyon, kilin plastisitesi arttıkça arttığı için σ'_{vc}/σ'_v oranı plastisite indisi arttıkça artar. Yaşlı normal konsolide kil içinde yapılan veyn deneylerinde efektif örtü yükü arttıkça mukavemetin lineer olarak arttığı tespit edilmiştir. Yaşlı normal konsolide killerde, (s_u/σ'_{v0}) değeri genç normal konsolide killerden daha yüksektir. Pratikte Şekil 2.8'de verilen diyagramı bir kil çökeli için belirlemek zordur. Laboratuvarda ödometre testinde bir günlük yükleme adımlarıyla e-log σ'_v diyagramı belirlenir ve daha sonra



Şekil 2.8. Genç ve Yaşlı Normal Konsolide Killerin Jeolojik Geçmişi ve Sıkışabilirliği (Bjerrum, 1973)



Şekil 2.9. Yakın Buzul ve Buzulöncesi Normal Konsolide Killerde Gözlemlenen Tipik $(s_u/\sigma'_{v0})_{veyn}$ ve $(\sigma'_{vc}/\sigma'_{v0})$ Değerleri (Bjerrum, 1973)



Şekil 2.10. Aşırı Konsolide Killerin Jeolojik Geçmişi ve Sıkışabilirliği (Bjerrum, 1973)

ona paralel ikinci eğri için çökelin yaşına karşılık gelen nokta belirlenir. Örneğin, çökel 10 000 yaşındaysa bir günlük yükleme adımlarıyla çizilen e-log σ'_v diyagramına 6 log çevrimi kadar paralel eğriler çizilir. Gecikmiş sıkışmanın ilk % 50'sinin 1 yıl, % 80'inin 100 yıl içinde oluştuğu kabul edilir (Bjerrum, 1973). Laboratuvarda yapılan çalışmalar (Berre ve Iversen, 1972; Rizkakallah ve diğ., 1977) Bjerrum'un bu önerisinin geçerli olduğunu göstermektedir.

Bazı kil çökelleri, yüzeydeki erozyon vb. etkilerle bugün üzerlerinde bulunan örtü yükünden daha büyük bir yüklemeye maruz kalmışlardır. Bu tür killere "aşırı konsolide killer" denmektedir. Şekil 2.10 aşırı konsolide killerin ekstra bir yükle karşılaştıklarında nasıl davrandığını göstermektedir. Kil, efektif örtü (σ'_{v0}) yükü altında konsolide olur ve yaşlanır. Ardından erozyon nedeniyle örtü yükü günümüz σ'_v örtü yüküne kadar azalır. Bu tür bir kil, aşırı konsolide kildir ve aşırı konsolidasyon oranı σ'_{v0} / σ'_v dır. Bu tür bir kil ekstra bir yüklemeyle karşılaştığında σ'_{vc} değerine kadar (bu basınç geçmişte maruz kaldığı σ'_v en büyük örtü yükünden daha fazladır) hafif bir eğim gösterir ve belirgin bir hacim değişimi yapmaz. Aşırı konsolide killerde σ'_{vc} değerinin iki etkisi vardır :

(1) Aşırı konsolidasyon etkisi derinlikle sabittir ve kilin özelliklerinden bağımsızdır. σ'_{v0} - σ'_{v} arası bir yükte belirgin bir hacim değişimi olmaz.

(2) σ'_{vc} değeri, geçmişte maruz kaldığı maksimum gerilmenin miktarına ve kilin plastisitesine bağlıdır.

2.5 Yumuşak Kil Çökellerin Fiziksel ve Kimyasal Alterasyonu

Killi sedimanların çökelmesinin hemen ardından, kimyasal ve minerolojik değişimler sedimanları etkilemeye başlar. Kayalardaki kil mineralleri, kafesteki iyonlarla değiş tokuşa başlarlar ve montmorillonitin illite dönüşmesi gibi tümüyle değişim geçirirler (Greensmith, 1978). Simektit grubu mineralleri daha mobildir ve çoğunlukla kabuk döküntülerinde kalsit ile yerdeğiştirirler.

Süspansiyondaki yakın zamanda çökelmiş sedimanlarda su, hacimce katı malzemenin % 10-30 kadardır ve porozite % 70-90 mertebelerindedir. Sedimanlarda önemli miktarda organik malzeme bulunursa başlangıç porozitesi % 90'ı geçebilir. Genelde floküle yapıdaki sedimanların başlangıç poroziteleri ayrık yapıdaki sedimanlarınkinden daha büyük olmaktadır.

2.5.1 Kuruma ve Kabuk Tabakasının Oluşması

Yumuşak kil sedimanı havayla temas ettiğinde üst yüzeyi kurumaya başlar. Su daha derin bölgelere kapilarite ile hareket eder ve boşluksuyu basıncı negatife dönüşür. Sonuç olarak efektif gerilme artar. Çökelin üst kesimindeki sıkışabilir sedimanlarda boşluk oranında belirgin bir azalma olur. Bu nedenle üst tabakalar *kuruma kabuğu* karakteristiği sergiler ve çoğunlukla don etkisiyle çok fazla fissürlenme gösterir ve su muhtevası neredeyse plastik limit değerine azalabilir (Christoulos ve diğ, 1987). Kabuk tabakası genelde 1-3 m arasında olmasına rağmen İsveç gibi bazı ülkelerde 6-8 m 'ye ulaşmaktadır.

2.5.2 Parçalanma (Jointing)

Yumuşak killerde çatlaklar ve fissürler iki mekanizma nedeniyle oluşmaktadır. Eğer kuruma nedeniyle büzülme veya hacim azalması oluşursa, çatlaklara "çamur çatlağı" denmektedir. Bazı normal konsolide killer özellikle taşkın düzlüğündeki killer, çatlaklar ve fissürler nedeniyle zayıflamaktadır (Terzaghi, 1955). Diğer çatlak veya fissür oluşumu mekanizması ise kollodial etki (su seviyesinin düşürülmesi, yaşlanma sırasında jellerin büzülmesi) nedeniyle meydana gelir. Bu olay "pıhtılaşma-syneresis" olarak adlandırılır ve su altındaki doğal kil sedimanlarında meydana gelmektedir (Skempton ve Northey, 1952; Eide, 1968).

2.5.3 Kimyasal Aşınma

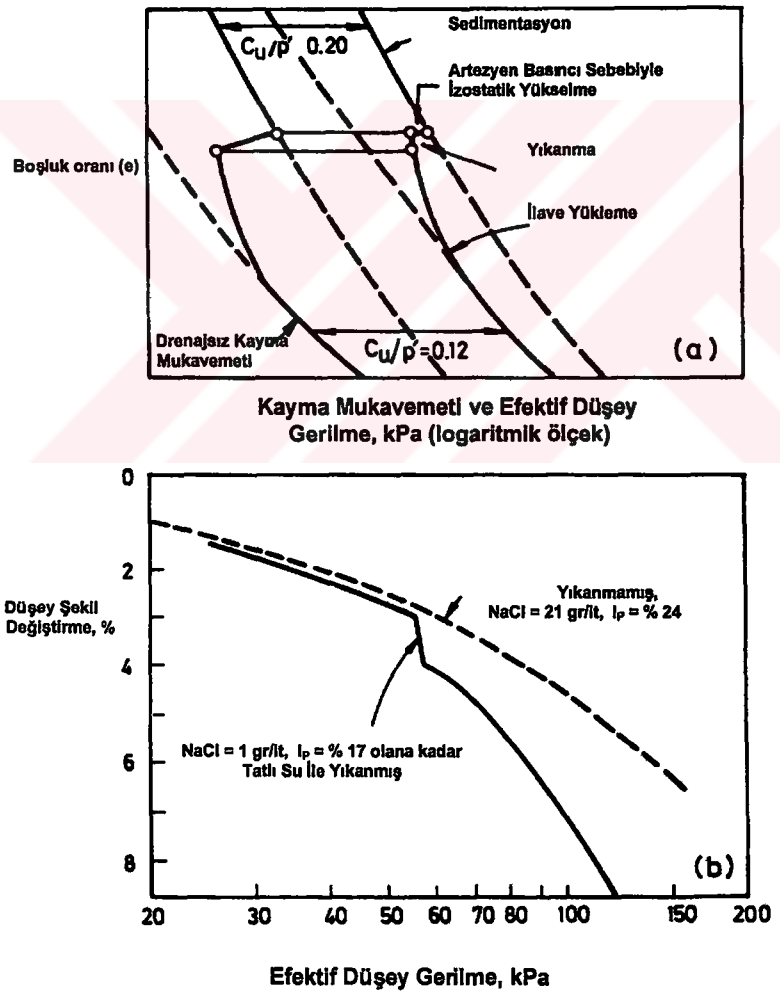
Aşınma, tüm zemin ve kaya çökellerini etkilemekte ve geoteknik özelliklerinde belirgin bir etki yaratmaktadır. Kabuk tabakasının altında aşınma zonu, yıkanma ile birlikte kimyasal aşınma sonucu meydana gelmektedir. Aşınma, çözünmüş oksijen içeren süzülen yağmur suyu nedeniyle oluşabilmektedir. Organik malzemelerin bozunması sonucu humik asidin oluşması kil minerallerinde önemli bir değişime yol açmaktadır (Bjerrum, 1967, 1969). Kimyasal aşınma yumuşak killerin plastisite, sıkışabilirlik ve mukavemet karakteristikleri üzerinde etkili olmaktadır.

Kimyasal aşınma, hem su altında hemde su üstünde oluşabilir, ancak su seviyesinin üzerindeki kil çökelinde aşınmanın miktarı daha fazla olmaktadır. Aşınma, artezyen yeraltı suyunun yıkanma ile birlikte aşağıdan yukarı doğru çıkmasıyla da oluşabilir. Aşınmanın sonucunu belirlemek için iki temel yaklaşım vardır. (1) Minerallerin bozulması ve (2) iyon değiş-tokuşu. Bu prosesin yönünü ve hızını kontrol eden çevresel değişkenler, asitlik derecesi (pH) ve redoks potansiyeli ile sıcaklıktır. Bu konu üzerindeki en detaylı çalışma Bjerrum tarafından 1954'te Norveç deniz kili (illit ve klorit) üzerinde yapılmıştır.

2.5.4 Yıkanma (Leaching)

Yıkanma, zemin profilindeki bir kesitten bir solüsyon içindeki malzemenin gitmesidir. Yıkanma, kolloidler arasında daneler arası kuvvetlerde değişikliklere

sebep olur ve akıcı killer (quick clays) oluşumunun esas sebebidir. Yıkanma yalnızca sıkışabilirliği artırmakla kalmaz aynı zamanda drenajsız kayma mukavemetini de düşürür. Yıkanmanın kritik basınç (σ'_{vc}) değerini azaltmak ve dolayısıyla yaşlı kili genç sedimana dönüştürme etkisi vardır. Doğal ve yapay çökelmiş killerde yıkanma üzerine yapılmış birçok deneysel çalışma vardır (Bjerrum, 1973; Torrance, 1974; Skempton, Northey, 1952). Şekil 2.11'de Norveç deniz kilindeki kayma mukavemeti ile sıkışabilirliğin yıkanma nedeniyle nasıl değiştiği gösterilmektedir (Bjerrum, 1967). Bu şekilde sedimentasyonun farklı seviyeleri, izostatik kuvvetlerle yukarı kalkma (suyun kaldırma kuvveti), yıkanma ve onu izleyen ilave yüklemeler görülmektedir.



Şekil 2. 11. Yıkanma Sebebiyle Deniz Kilinin Kayma Mukavemeti ve Sıkışabilirliğindeki Değişiklik (a) Genel Prensip (b) Norveç, Drammen Yalın Kili Üzerindeki Yıkanma Deney Sonuçları (Bjerrum, 1967)

2.5.5 Çimentolanma

Bjerrum (1967), çimentolanmış kili "kil danelerinin "efektif sürtünme" veya "efektif kohezyondan" farklı güçlü bir bağla birbirine bağlandığı kil" olarak tanımlamaktadır. Çimentolanmanın, çimentolayan malzeme olan serbest karbon, demiroksit, alümina ve organik malzeme içeren birçok zemin malzemesinin stabilitesi ve özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Kimyasal bileşimler arasında çimentolayan malzemeler olarak kalsiyumkarbonat ve amorf silikatlar sayılabilir. Günümüz birincil mineralleri ile sediman öncesi mineraller biraradırlar. Çimentolanma bu nedenle birincil daneler arasında gelişmektedir (Mitchell, 1976).

Çimantolanmanın esas etkisi hassaslık üzerindedir. Çimentolanma, örselenmemiş mukavemeti arttırmakla birlikte amorf malzemeler yeterince fazla olduğu takdirde yoğrulmuş mukavemeti de arttırmaktadır.

Yumuşak kil çökellerde, yukarıdaki paragraflarda anlatılan çökelme sonrası fiziksel ve kimyasal değişikliklerin etkisi aşağıda Tablo 2.1'de verilmiştir.

2.6 Yumuşak Killerin Sınıflandırılması

Önceki paragraflarda, kil çökellerin fiziksel ve kimyasal alterasyonu ile yumuşak kil çökellerin jeolojik geçmişinin aynı kilin günümüz geoteknik özelliklerine nasıl etkidiği ele alınmıştır. Yumuşak killeri sınıflandırırken geoteknik özelliklerinden hangilerinin kilin jeolojik geçmişi, hangilerinin ise geoteknik karakteristiği ile alakalı olduğunu bilmek gerekmektedir. Sınıflandırmada kullanılan geoteknik özellikler : (1) su muhtevası ve Atterberg limitleri, (2) veyn mukavemetinin ve önkonsolidasyon basıncının derinlikle değişimi, (3) e-log σ'_v eğrisinin değişimi ve (4) hassaslıktır. Yaşına ve jeolojik geçmişine göre yumuşak killer Tablo 2.2'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Birçok yumuşak kil genelde yaşlı ve genç normal konsolide kil arasında bir yerdedir (yıkanmış killer dahil). Yıkanma plastisite indisini azaltmakta, ancak aynı zamanda örselenmemiş mukavemeti de bir miktar azaltmaktadır.

Tablo 2.1. Deniz Killerinin Geoteknik Özelliklerine Çökelme Sonrası Değişikliklerin Etkisi (Brenner ve diğ., 1981)

Proses	Geoteknik Özellik								
	Su Muhtevası	Likit Limit	Plastik Limit	Likidite İndisi	Önkonsolidasyon Basıncı	Sıkışabilirlik	Drenajsız Mukavemet		Hassaslık
							Örselenmemiş	Yoğrulmuş	
Kuruma	-		±	-	+	-	+		
Kimyasal aşınma	±	+	+	-	+	-	+	+ veya –1	- veya +1
Yıkanma	±	-	-	+	-	+	-	-	+
Çimentolanma		+	+		+	-	+	+2	+

+ Artış ; -Azalış ; ±Az veya hiç değişim yok.

[1] Kil minerali tipine bağlıdır. [2] Amorf malzeme içeriğine bağlıdır.

Tablo 2.2. Yumuşak Killerin Sınıflandırılması (Bjerrum, 1972)

	Sınıflandırma	Su muhtevası	Kayma mukavemeti	Sıkışabilirlik
Üst seviyelerdeki ayrışmış kabuk	Don etkisiyle iyileştirilmiş, dışarıda kurumuş killer	$\omega_n \approx \omega_p$	Çok katı, fissürlü, açık çatlaklı	-
	Kurumuş killer	$\omega_n \approx \omega_p$	Çok katı, fissürlü	Düşük sıkışabilirlik
	Ayrışmış killer	$\omega_p < \omega_n < \omega_L$	Kayma mukavemeti derinlikle azalır	Düşük sıkışabilirlik, eğrisel e-log σ'_v
Ayrışmamış killer	Genç normal konsolide killer	$\omega_n \approx \omega_L$	s_u / σ'_v derinlikle sabittir	$\sigma'_{vc} \approx \sigma'_{v0}$
	Yaşlı normal konsolide killer	$\omega_n \approx \omega_L$	s_u / σ'_v derinlikle sabittir	$\sigma'_{vc} / \sigma'_{v0}$ derinlikle sabittir
	Genç normal konsolide akıcı killer	$\omega_L < \omega_n$	s_u / σ'_v derinlikle sabittir	$\sigma'_{vc} \approx \sigma'_{v0}$
	Yaşlı normal konsolide akıcı killer	$\omega_L < \omega_n$	s_u / σ'_v derinlikle sabittir	$\sigma'_{vc} / \sigma'_{v0}$ derinlikle sabittir

2.7 Killerin Mühendislik Özellikleri ve Bileşimi

Kil zeminin mühendislik özelliklerini etkileyen faktörleri iki ana başlıkta toplamak mümkündür.

a) Bileşim Faktörleri; Herhangibir özelliğin potansiyel aralığına göre tariflenmekte ve örselenmemiş numuneler üzerinde çalışılarak belirlenmektedir. Bunlar; mineral tipi, herbir mineralin zemin içindeki miktarı, adsorbe katyonların tipi, partiküllerin şekil ve büyüklüklerinin dağılımı, boşluk sıvısının niteliği.

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

Zemin özellikleriyle zemin bileşiminin birbiriyle ilişkisini araştırma iki yöntemle yapılabilir. İlk olarak doğal zeminler kullanılarak zeminin bileşimi ve mühendislik özellikleri belirlenir ve aralarındaki korelasyonlar bulunur. Diğer bir yaklaşım ise sentetik zeminlerle zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesidir.

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

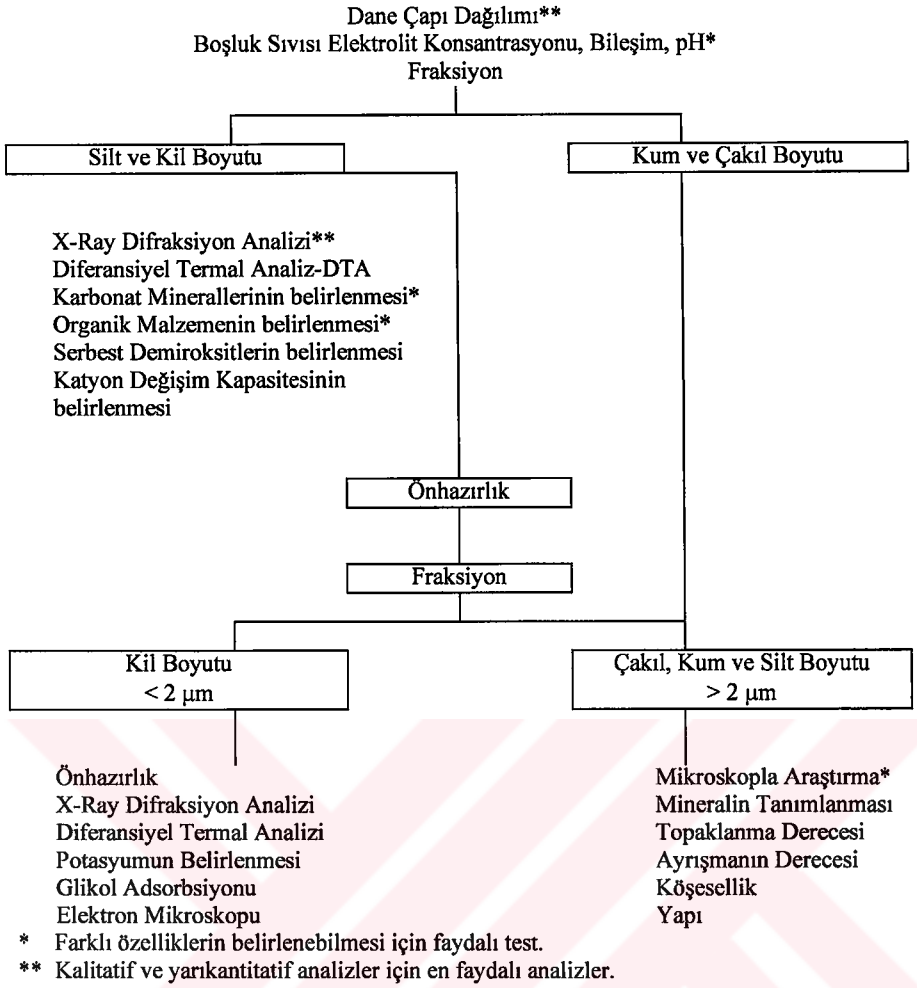
1. Atterberg Limitleri,
2. Dane Boyutu ve Şekli,
3. Hacim Değişimi Karakteristikleri,
4. Permeabilite,
5. Organik Malzeme Etkisi,
6. Aktivite,
7. Değişebilir Katyonlar ve pH,
8. Viskoelastik Davranış.

2.8 Killerin Bileşiminin Belirlenmesi

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

Şekil 2.12'de bir zeminin bileşiminin belirlenmesinde kullanılan genel yaklaşım ve Tablo 2.3'te zeminin fabrik yapısının belirlenmesinde kullanılan teknikler gösterilmektedir.

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



Şekil 2.12. Zeminin Bileşim Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Genel Yaklaşım (Mitchell, 1976)

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

Karbonatlar : Kalsit ($CaCO_3$), dolomit ($CaMg(CO_3)_2$), marn ve kabuklar formundaki karbonatlar birçok zemin içinde bulunmaktadır. Zemin, HCl ile sulandırılıp köpürtülerek karbonatlardan kolaylıkla arındırılabilmektedir. Ancak, iyi kristallenmiş karbonat minerallerinin kantitatif analizi DTA analizi ile yapılabilmektedir.

pH : pH metre veya özel indikatörlerle zeminin asitliği veya alkaliniliği pH cinsinden belirlenebilmektedir. pH derecesi, solüsyondaki nötr tuzun konsantrasyonunun ve çözünmüş CO_2 miktarının artmasıyla azalmaktadır.

Tablo 2.3. Zeminin Fabrik Yapısının Belirlenmesinde Kullanılan Teknikler (Mitchell, 1976)

Yöntem	Yöntemin Dayandığı Temel	Gözlem Ölçeği ve Ayırt Edebildiği Özellikler
Optik Mikroskop	İnce kesitler veya yüzey kırığının doğrudan gözlemlenmesi	Tekil silt boyutlu daneler, kil dane grupları, killerin oryantasyonu, milimetre veya daha büyük ölçekte homojenlik, büyük boşluklar, kayma zonları Büyütmenin üst limiti yaklaşık 300 kat
Elektron Mikroskop	İnce kesitler veya yüzey kırığının zemin numunesi boyunca gözlemlenmesi (SEM)	Yaklaşık 100Å boyutunda çözünürlük; dane, dane grupları ve boşluk uzayının doğrudan gözlemlenmesi; mikrofabrik detayları
X-Ray analizi	Paralel kil plakaları grubu gelişigüzel oryante olmuş plakalardan daha güçlü difraksiyon üretir	Birkaç mm² alanında ve birkaç mm kalınlığında oryantasyon; tek minerallerde çok iyi sonuç
Boşluk Boyutu Dağılımı	(1) nemli olamayan sıvının (civa) güçle içeri girmesi (2) kapiler yoğunlaşma	Boşluklar ~0.01 ile > 10μm (2) maksimum 0.1μm
Akustik Hız	Tekil yerleşim hızı etkiler	Anizotropi; floküle ve floküle olmayan yapı; numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabriği ölçer
Dielektrik Yayılımı ve Elektriksel İletkenlik	Dielektrik sabitinin varyasyonu ve frekansa göre iletkenlik	Anizotropi; numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabriği ölçer
Termal İletkenlik	Dane oryantasyonu termal iletkenliği etkiler	Anizotropi; numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabriği ölçer
Manyetik Yatkınlık	Numune oryantasyonundaki değişiklikle manyetik yatkınlığın değişiminin manyetik alana oranı	Numune boyutuna eşit bir hacimde mikrofabrik, anizotropi; bazı durumlarda makrofabrik
Mekanik Özellikler Mukavemet Modüller Permeabilite Sıkışabilirlik Büzülme ve Şişme		

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

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

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

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

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

X-Ray, DTA ve Elektron Mikroskopu Analizleri İçin Numune Hazırlama Yöntemleri

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

Boşluk Sıvısının Yok Edilmesi : Katı killer ve kısmen suya doygun zeminlerde havada kurutma yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, yüksek su muhtevası olan yumuşak zeminlerde etüvde kurutma, dane fabriğini (en az 24 saat sürdüğü ve daneler yeniden dizildiği için) havada kurutmaya nazaran daha az örselemektedir. Bununla birlikte etüvde kurutma sırasında oluşan gerilmeler bazı danelerde kırılmayla sonuçlanabilmektedir. 1 cm çap, 0.5 cm kalınlıktaki küçük numunelerde sıvı nitrojen veya likit nitrojenli propen soğutma ile hızlı dondurma yöntemi de tercih edilen bir yöntemdir. Kritik nokta kurutmasında ise numunenin basıncı ve sıcaklığı kritik nokta üzerine (su için kritik nokta :+374 °C ve 217.7 atm) yükseltilmektedir. Kritik nokta aralığında sıvı ve gaz fazları birbirinden ayırt

edilemediğinden bu sayede numune hazırlanabilmektedir. Ancak, bu yöntem kısmen suya doygun ve genişleyen zeminlerde şişmeye sebep olabilmektedir. Gerek dondurma ve gerekse kritik dondurma tekniği, havada ve etüvde kurutmaya nazaran numuneyi daha az örselediği halde daha zor ve zaman alıcı yöntemlerdir.

Boşluk Sıvısının Yerdeğiştirilmesi : İnce kesitin gerekli olduğu optik mikroskop için veya kuruma büzülmesinin minimum olmasının istendiği –fakat malzeme içindeki boşluk suyunun önemli olmadığı- durumlarda boşluk sıvısının yerdeğiştirilmesine gerek duyulabilmektedir. Bu amaçla, birçok reçine ve plastik, özellikle Carbowax6000 kullanılmaktadır. Suyun Carbowax ile değiştirilmesi birkaç günde gerçekleştirilmekte ve ardından, Carbowax ile doyurulmuş numune erimiş mumdan arındırılmakta ve soğumaya bırakılmaktadır. İnce kesitler, zımpara kağıdı veya aşındırıcı pudralar kullanılıp öğütülerek de hazırlanabilmektedir. Nemli kaolinin fabrik yapısında Carbowax kullanımının hiçbir etkisinin olmadığını yapılan çalışmalar göstermektedir (Mitchell, 1976).

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

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

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

2.8.1 X-Ray Difraksiyon Analizi

X-Ray Difraksiyon Analizi, ince daneli zemin mineralleri ve minerallerin kristal yapılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. X dalgaları, elektromanyetik spektrumdaki birçok dalgadan biridir ve dalga boyları 0.01Å ile 100Å arasında değişmektedir. Araştırılan malzemeye çarpan yüksek hızlı elektronların dalga hızları yardımıyla kil mineralleri belirlenebilmektedir. Zemin içindeki kil olmayan diğer mineraller de X-Ray Difraksiyon analizi ile belirlenebilmektedir (Mitchell, 1976). Farklı kil mineralleri, 7 Å, 10 Å ve 14 Å'daki bazal yansıtmaların sırasına göre karakterize edilmektedirler. Yöntemin bazı dezavantajları vardır. X-Ray Difraksiyon Analizi, tek mineralli killerin fabrik yapısının araştırılmasında daha iyi sonuçlar vermektedir.

2.8.2 DTA Analizi

Diferansiyel Termal Analizi (DTA), termal analizler içinde en sık kullanılan, deney numunesinin ve termal olarak tesirsiz (inert) cismin sabit hızda 1000 °C üzerine kadar ısıtılması ve numune ile tesirsiz cismin (inert substance) arasındaki sıcaklık farklarını ölçmeye dayanan bir analiz yöntemidir. Termogravimetrik Analiz de (su veya CO_2 kaybı nedeniyle oluşan ağırlık veya kazanılan oksijen) kullanılan diğer bir termal analiz yöntemidir.

2.8.3 Elektron Mikroskopu Analizi

Modern elektron mikroskoplarıyla 100 Å 'den daha küçük boyutları görerek küçük kil danelerini dahi inceleyebilmek mümkündür. Elektron ışını genelde çalışılacak malzemenin yapısının yüzeyinin bir nüshasına odaklanmaktadır. Bazı elektronlar numuneden saçılmakta ve numunenin farklı bölgeleri bu saçılmanın miktarına bağlı olarak açık veya koyu renk olarak gözükmektedir. Taramalı elektron mikroskopu

(Scanning Elektron Microscope-SEM) nispeten yeni bir gelişme olup bu alette ikincil elektronlar, üç boyutlu imaj şeklinde gözüken numunenin yüzeyinden dışarı çıkmaktadır. SEM aletinin ışık mikroskopuna nazaran büyütmesi 20 ~ 150 000 kez, derinlik incelemesi 300 kez daha büyüktür. Bu sayede, zemindeki kil daneleri ve çatlak yüzeyleri doğrudan görülebilmektedir. Bu nedenle, SEM kullanım alanı günden güne artmaktadır.

2.8.4 Infrared Spektroskopisi

İnfrared (titreşim) spektroskopisi, maddenin infrared ışınlarını absorplaması üzerine kurulmuştur. Homonükleer moleküller (N_2, O_2 ve Cl_2 gibi) moleküller hariç tüm moleküller infrared ışınlarını absorplamakta ve infrared spektrumu vermektedir. Her maddenin kendine özgü bir infrared spektrumu vardır. İnfrared ışınlarının dalga boyları 1000-300000 nm arasında olmasına rağmen infrared spektroskopisinde genellikle dalga boyları 2500-25000 nm arasında olan ışınlardan yararlanılmaktadır. Bu aralığa yakın kesime infrared bölgesi denmektedir (Güngör, 1999).

İnfrared cihazında ışın kaynağı olarak 1700-2000 °C'ye kadar ısıtılmış iyi bir siyah cisim özelliği sağlayan maddeler kullanılmaktadır. Toryumoksit, seryumoksit, zirkonyumoksit gibi nadir toprak oksitlerinin iyi bir bağlayıcıyla pişirilmesi sonucu elde edilen Nernst ve Glober çubukları bu amaçla sıklıkla tercih edilmektedir. İnfrared spektrumu kabaca 4 spektral bölgeden oluşmaktadır (Güngör, 1999).

3. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Elektroniğin ve bilgisayar olanaklarının son 25 yılda yüzyıla damgasını vurmasıyla sonlu elemanlar gibi nümerik teknikler, laboratuvarda ve arazide ilgili zemin parametrelerinin belirlenmesindeki gelişmeler, analitik teknikler ve probabilistik tekniklerin gelişimi, oturma davranışını anlamamızda büyük aşamalar kaydedilmesini sağlamıştır. Ancak tüm bu gelişmelere rağmen, oturma hızının tahmini rutin bir işlem olmaktan hala çok uzaktır. Günümüzde toplam veya nihai oturma miktarını %10-20 yanılma payıyla tahmin etmek mümkünse de, oturma-zaman hızını tahmin etme yöntemleri henüz yeterince gelişmemiştir. Bu nedenle, Terzaghi 'nin orjinal "Konsolidasyon Teorisini" geliştirerek bir boyutlu sıkışma modellerinde kullanmak pratik hayattaki mühendislerce günümüzde de en sık kullanılan yöntemdir.

3.1 Zeminlerin Konsolidasyon ve Oturma Davranışıyla İlgili Çalışmaların Tarihsel Gelişimi

Skempton (1960) makalesinde, konsolidasyonun farkında olan ve ilk denemeyi yapan mühendisin 1809 yılında Thomas Telford olduğunu belirtmiştir. Telford, 15 m kalınlıktaki kalın bir kil tabakası üzerine oturan Caledonian kanalındaki bir havuz inşaatında, temel seviyesinde ön yükleme yaparak 9 ay süreyle oturmasıyı izlemiş ve daha sonra havuzu inşa etmiştir. Skempton aynı makalesinde İngiliz jeolog Lyell'in 1871'de killerin yük altında suyun dışarı çıkması sonucu kompaksiyona uğrayan ve katılaşan bir malzeme olduğunu farkettiğini yazmaktadır. J. Frontard 1910'da, konsolidasyonu deneysel olarak ilk kez ispatlayan kişidir. Frontard, 50 mm kalınlıkta 350 mm çapında tabanı delikli metal bir kabı bir piston yardımıyla adım adım yükleyerek konsolidasyon olayını su muhtevası ve gerilme cinsinden çizerek incelemiş ve konsolidasyonun tümüyle bitmesi için yeterli bir süre beklenmesi gerektiğini ifade etmiştir (Flodin, Broms, 1981; Olson, 1998). 1914'te, Terzaghi'nin hocası Philipp Forchheimer (İTÜ'de uzun yıllar ders vermiştir), konsolidasyon hızı

ve gerekli süreyi analiz ederek teorik bir esasa oturtmuştur. Forchheimer, kilin sıkışmasının konsolidasyon süresince dışarı çıkan su hacmine eşit olduğunu varsaymış ve verilen oturmaya karşılık gelen zamanı hesaplayan bir formül geliştirmiştir.

20. yüzyıl başında genel olarak kuzey ülkelerinde, sıkışma etkisiyle killerden su çıkışının olamayacağı ve oturmaların krip (sünme) etkisiyle oluştuğuna inanılmaktaydı. Ancak 1918'de Âke Virgin adlı İsveçli bir topoğraf, arazideki röperleri kontrol ederken röperlerden bir kısmının –özellikle yumuşak kilin kalın olduğu kesimlere rastgelenlerin- oturduğunu ve bu oturmaların su muhtevasındaki bir azalmanın ve kil danelerinin birbirine daha yaklaşması sonucu olabileceğini ve oturmaların zamanla azaldığını ileri sürdü. Virgin tarafından gözlemlenen davranış İsveç Geoteknik Komisyonu sekreteri olan John Olsson'un laboratuvarda bir çeşit ödometre olan basit bir konsolidasyon aleti geliştirilmesine sebep oldu. Olsson, yumuşak kil numunesinin yüklendiğinde sıkıştığını, hacminin azaldığını ve suyun dışarı çıktığını gözlemlemiştir. Virgin ve Olsson'un çalışmaları, İsveç Geoteknik Komisyonunun oturma görülen bazı eski demiryolu dolgularını incelemesine sebep olmuş ve sonuç olarak oturmaların, dolguların ağırlığı altında su muhtevasının azalması sonucunda olduğuna kanaat getirilmiştir. 1919'da Terzaghi, İTÜ'de çalışırken konsolidasyon deneyi için bir alet geliştirmiş ve 1923'te ilk kez konsolidasyon hızı ve süresini, analitik ve en basit şekilde formüle etmiştir. Efektif gerilme kavramının formüle edilmesi, prensipte oldukça basit olmasına rağmen zeminlerin konsolidasyon ve kayma mukavemeti için hayati bir önem taşımaktadır. 1923'te Olsson, Oslo'da Holmenkollen metrosu civarındaki binaların oturma sebeplerini araştıran İsveç Geoteknik Komisyonuna davet edilmiş ve geliştirdiği konsolidasyon aletini tanıtmış, ancak killerdeki konsolidasyon oturmasının sebeplerini açıklaması rağbet görmemiş ve bu olayın yalnızca Norveç killeri için geçerli olduğu düşünülmüştür.

1924'te Terzaghi'nin Hollanda'da uluslararası bir konferansta (International Congress for Applied Mechanics, Delft) sunduğu konsolidasyon teorisi büyük bir kesim tarafından kabul görmüş ve ardından konsolidasyon teorisinin ve konsolidasyon davranışının sebeplerini ve sonuçlarını anlama ve araştırmada bir çok araştırmacı, mühendis çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bunlardan Rendulic, Buisman,

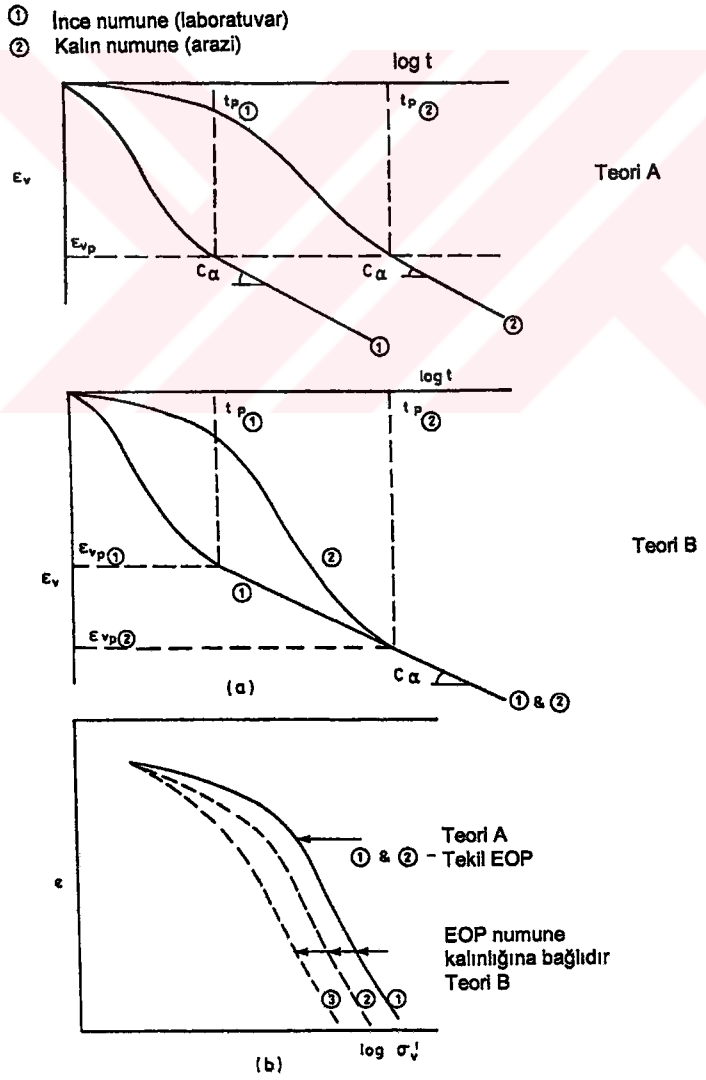
Florin, Casagrande, Taylor, Skempton, Biot, Peck ve Bjerrum'un katkıları tartışılmazdır.

3.2 Konsolidasyon Oturması

Heterojen bir yapıda olan zemin hava, su ve danelerden oluşmaktadır. Elastoplastik davranış gösteren zemine etkiyen gerilmelerde bir artış olduğunda, zemin sıkışmaya başlar ve zemin hacminde bir azalma meydana gelir. Zemine etkiyen gerilmenin düşey yönlü olması ve sonsuz yayılı bir yük altında yanal hacim değişimlerinin ihmal edilmesi durumunda, sadece düşey yönlü hacim değişimleri oluşmaktadır. Bu tip hacim değişimlerine konsolidasyon oturması veya sadece oturma denilmektedir. Oturmalar; ani oturma, konsolidasyon oturması ve ikincil oturma (sıkışma) olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Zemin tipi, gerilme tarihi, yükleme hızı, kil tabakasının kalınlığı ve drenaj koşulları gibi nedenlerle ani oturmalar, konsolidasyon oturmaları ve sekonder sıkışmaların birbirlerine göre önemi ve miktarı değişebilir.

Killerin konsolidasyon oturmasıyla ilgili çalışmalar özellikle ikincil konsolidasyon tanımı ve ikincil konsolidasyon mekanizması üzerinde farklılaşmaktadır. Lo (1961), laboratuvar koşullarında ölçülemeyen aşırı boşluksuyu basıncı nedeniyle sabit efektif gerilme altında oluşan oturmanın *ikincil konsolidasyon* olarak adlandırılmasının yanlış olduğunu ve *ikincil sıkışma etkisi* veya *ikincil etki* yerine *ikincil sıkışma* demenin daha doğru olduğunu savunmaktadır. İkincil sıkışma mekanizmasını reolojik, matematiksel, bünye denklemleri, deneysel veya arazi gözlemlerine dayalı olarak açıklamak için bilim adamları ve mühendisler yaklaşık 50 yıldır çalışmakta ve çeşitli öneriler getirmektedir. İkincil sıkışma mekanizması üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda iki ekstrem hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezler, ikincil sıkışmanın aşırı boşluksuyu basıncının sönümlendiği birincil konsolidasyon süresince oluşup oluşmadığı üzerinde yoğunlaşmaktadır (Ladd, 1985). Hipotez A, ikincil sıkışmanın birincil konsolidasyon bitiminden yani aşırı boşluksuyu basıncının sönümlenmesinden sonra oluştuğunu kabul etmekte ve hacim değişiminin deformasyon, danelerin birbiri üzerinde kayması ve yeniden dizilmesi, çift tabaka kalınlığının değişimi, adsorbe su filminin bozulması vb. etkiler nedeniyle efektif gerilmenin artması sonucu oluştuğunu öngörmektedir. Şekil 3.1'de gösterildiği üzere Hipotez A'da, numune kalınlığının yani drenaj boyunun ve bundan dolayı

boşluksuyu basıncı dağılımı için gerekli sürenin, birincil konsolidasyonun tamamlanmasına göre çizilen konsolidasyon eğrisine (EOP-end of primary) ve dolayısıyla σ'_p-ön konsolidasyon basıncına hiçbir etkisi olmadığı kabul edilmektedir. Hipotez B, bazı tip "yapısal viskozitenin" mesela; adsorbe su filmi nedeniyle oluştuğunu ve bu olayın boşluksuyu basıncı sönümlenmesi sırasında oluştuğunu ve bu nedenle, birincil konsolidasyonun bitiminde şekil değiştirmelerin arttığını savunmaktadır. Etkilerin belirlenmesi, özel reolojik modeller ile doğru giriş datalarının girilmesiyle belirlenmektedir. Şekil 3.1'de gösterilen model, Garlanger (1972) tarafından Bjerrum'un 1972'de önerdiği zemin modeli esas alınarak geliştirilen bir modeldir. Her iki hipotez ve bu iki hipotez arasında geliştirilen diğer hipotezler ilerleyen bölümlerde daha kapsamlı olarak incelenecektir.



Şekil 3.1. İkincil konsolidasyonla İlgili Hipotez A ve Hipotez B

3.3 Konsolidasyon Problemlerinin Bir Boyutlu, İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Teorileriyle Analizi

Konsolidasyon oturmasının miktarını tahmin etmek için düşey yöndeki birim şekil değiştirmelerin bilinmesi yeterlidir ve bir boyutlu birim şekil değiştirmelerin belirli bir teoriye dayandırılmasına gerek yoktur. Laboratuvarda belirlenen gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinden hareketle uygulanan belirli bir gerilme için boşluk oranındaki değişimi bilmek konsolidasyon oturmasını tahmin etmek için yeterlidir. Bununla birlikte, konsolidasyon oturmasının hızı, zeminden suyun dışarı çıkması hızıyla veya efektif gerilmenin değişimiyle ilgilidir. Oturma hızını tahmin etmek için, permeabilite ve boşluk oranı ile zemin iskeletindeki gerilme-birim şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi, zemin içindeki su akımını Darcy Kanunu gibi tanımlayan bir model gereklidir. Oturma analizini, oturma miktarı ve oturma hızı olmak üzere ikiye ayırarak incelemek yapay ve gerçekçi olmayan bir yaklaşımdır. Ancak, bir boyutlu konsolidasyon analizlerinde yalnızca düşey yöndeki şekil değiştirmeler dikkate alınmak zorundadır. Gerçekte ise oturma miktarı ve hızı birbiriyle ilgili iki bileşendir ve tam olarak üç boyutlu konsolidasyon teorisiyle incelenebilir.

Sıkışabilir zemin tabakasının kalınlığı, temel boyutlarına oranla nispeten daha azsa şekil değiştirmeler bir boyutludur ve ani oturma meydana gelmez. Sonuç olarak, bir boyutlu konsolidasyon teorileri doğru sonuç verir. İki boyutlu konsolidasyon olayına bir örnek olarak, şerit temel altındaki zemin tabakasının konsolide olmasıdır (Barnes, 1995). Ancak, derinde yer alan bir zemin tabakası üzerindeki bir kare veya dikdörtgen temel için olay üç boyutludur. Ani oturmayı dikkate almayan bir boyutlu konsolidasyon teorisi ile hesaplanan nihai oturma miktarı gerçek değerden daha düşüktür.

İki ve üç boyutlu konsolidasyon problemlerini çözmek için iki ana yaklaşım vardır (Balasubramaniam ve Brenner, 1981). İlk teori, Terzaghi'nin bir boyutlu difüzyon teorisinin Rendulic tarafından geliştirilmiş şekli olan ve genelde *Terzaghi-Rendulic Psüdo Konsolidasyon Teorisi* veya kısaca *Difüzyon Teorisi* olarak adlandırılan teoridir. Teori, toplam gerilmenin konsolidasyon süresince sabit kaldığını kabul eder. Bununla birlikte, konsolidasyon süresince boşluksuyu basıncı hızı drenaj sınırlarına olan uzaklığa bağlı olarak değişir ve bu nedenle Young Modülü-E ve Poisson Oranı-

ν drenajsız değerlerden drenajlı değerlere doğru değişir. Diferansiyel (farklı) şekil değiştirmeler oluşur. Teori, oturma miktarı ve oturmanın gelişimi arasında bir etkileşimi kapsamamakla birlikte aşırı boşluksuyu basıncının oturmanın gelişimi sırasında sönümlenmesini kabul etmektedir.

İkinci Teori ise Biot tarafından doğrudan Elastisite Teorisinden esinlenerek ortaya atılmıştır. Yaygın olarak *Biot Teorisi* olarak bilinir. Biot Teorisi, Difüzyon Teorisine nazaran matematiksel olarak çok daha karmaşıktır. Teori, oturma hızı ve miktarı arasındaki ilişkiyi ve konsolide olan tabakanın herhangibir noktasında aşırı boşluksuyu basıncı dağılımı ve toplam gerilmenin değişimi arasındaki devamlı etkileşimi sağlamaktadır. Orjinal Biot Teorisi önce homojen, izotropik, tam olarak suya doygun ortam için geliştirilmiştir. Uygulamada teori, sınırlı sayıda araştırmacı tarafından sınırlı sayıda problemde kullanılmıştır. Ancak, günümüzün etkili nümerik teknikleri ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) sayesinde kullanımının artacağı beklenmektedir. Tablo 3.1'de Terzaghi-Rendulic ve Biot Teorisinin temel konsolidasyon denklemleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Bir- İki- ve Üç-Boyutlu Konsolidasyon Teorilerinin Temel Denklemleri (Murray, 1978)

Teoride Dikkate Alınan Boyut	Terzaghi-Rendulic Psüdo Konsolidasyon Teorisi	Biot Teorisi	Konsolidasyon Katsayısı
1	$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_1 \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$	$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_1 \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$	$c_1 = \frac{kE(1-\upsilon)}{\gamma_\omega (1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$
2	$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_2 \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \right)$ *veya* $\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_x \frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + c_z \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$	$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_2 \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial (\sigma_x + \sigma_z)}{\partial t}$	$c_2 = \frac{kE}{2\gamma_\omega (1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$
3	$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_3 \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \right)$ *veya* $\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_x \frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + c_y \frac{\partial^2 u_e}{\partial y^2} + c_z \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$	$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_3 \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{\partial t}$	$c_3 = \frac{kE}{3\gamma_\omega (1-2\upsilon)}$

3.4 Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisinin Geliştirilmesi

Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisinde yaptığı kabullerin birçoğu gerçek koşullarda geçersiz olup pratik uygulamalar için tatmin edici değildir. Gerçek yüklemeler zamana bağımlıdır ve zeminler homojen olmaktan uzak heterojen bir yapıya sahiptir ve nonlineer bir davranış sergilerler. Ayrıca birim şekil değiştirmeleri çoğunlukla çok büyüktür. Tüm bu gerçeklere rağmen orjinal Terzaghi Konsolidasyon Teorisinin yaygın olarak kullanılmasının nedeni kullanım kolaylığıdır. Terzaghi Teorisinin gerçek koşullarla uyuşmayan tarafları uzun süredir bilinmektedir. Bu hususlar aşağıda sıralanmıştır:

(a) Oturmalar nihai değere yaklaşamamaktadır. Diğer bir deyişle, ikincil sıkışma ihmal edilmiştir.

(b) İkincil sıkışmanın birincil konsolidasyon oturmasına oranı, yük artım oranının (LIR) azalmasıyla ve maksimum drenaj mesafesinin artmasıyla artmaktadır.

(c) Orta düzlemdeki boşluksuyu basıncı sönümlenme hızı, yük artım oranının konsolidasyonun ilk kademelerinde azalmasıyla artmaktadır.

(d) Yük uygulama süresinin uzatılması, ikincil sıkışma / birincil konsolidasyon oturması oranının artmasına ve orta düzlemdeki boşluksuyu basıncının başlangıçta hızlı bir şekilde sönümlenmesine sebep olmaktadır.

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

1. Akım ve deformasyon koşullarında yapılan iyileştirmeler: Bir boyutlu, iki boyutlu (düzlemsel şekil değiştirme) ve üç boyutlu konsolidasyon teorileri.

2. Yükleme koşullarında yapılan iyileştirmeler: Sabit yükleme, kademeli yükleme ve rastgele yükleme.

3. Zemin profilinde yapılan kabuller: Homojen veya heterojen, izotropik veya anizotropik, tek veya çok tabakalı.

4. Zemin iskeletinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde yapılan iyileştirmeler: Sünmeyi kapsayacak veya kapsamayacak şekilde gerilme veya şekil değiştirme cinsinden formüle edilen lineer veya nonlineer yöntemler.

5. Konsolidasyonla ilgili zemin parametrelerinin varyasyonları (permeabilite, konsolidasyon katsayısı, sıkışma indisi, boşluk oranı, efektif gerilme).

6. Konsolide olan tabakadaki deformasyon büyüklüğünün, tabakanın başlangıç kalınlığıyla karşılaştırılması: Sonlu şekil değiştirme teorileri.

7. Boşluk sıvısının sıkışabilirliği: sıvıyı sıkışabilir veya sıkışmaz kabul eden yaklaşımlar.

8. Analitik kapalı-form çözümleri veya sonlu elemanlar (FEM) veya sonlu farklar (FD) gibi nümerik çözüm yöntemleri.

Bir boyutlu konsolidasyon teorisinin analitik yönden incelenmesi ve günümüze kadar geliştirilmiş belli başlı reolojik modeller bu tez kapsamında ilerideki bölümlerde daha kapsamlı ele alınmıştır.

3.5 Konsolidasyon Deneyi

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

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

2. Kademeli yükleme deneyi, yalnızca gerilme-sıkışma eğrisi üzerinde belirli noktaları vermektedir. Yük artım oranının (LIR) azaltılması yoluyla daha fazla data elde etme girişimleri eğrilerin yorumlanmasında hatalara yol açabilmektedir.

3. Numune boyunca efektif gerilmenin değişimi yanlış değerlendirmeye sebep olabilmektedir.

4. Laboratuvar koşullarındaki hidrolik gradyan arazideki değerden kat kat yüksektir.

5. Geri basınç ile suya doygunluğun sağlanması özellikle konsolidasyon hızı için önemli bir faktördür.

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

- Alet terk edilerek ve iş kazancı artırılarak; deneyin tamamlanması için gereken süre azaltılabilmektedir.

- Deneyde kullanılacak yük artım oranı ve yükte bekleme süresi operatör tarafından seçilebilir. Böylelikle yüksek geçirgenliği olan zeminler çok daha çabuk test edilebilmektedir. Örneğin Londra kili için 48 saat gerekirken Kaolin için bu süre yaklaşık 2 saate kadar düşmektedir.

- Yükleme programı, otomatiğe bağlanarak iş gücü kazancı sağlanmaktadır.

- Sürekli gerilme-şekil değiştirme-zaman eğrileri sayesinde daha iyi ve güvenilir veri toplanmaktadır.

Sürekli yükleme deneyleri için temel olarak Rowe hücresi, Oxford Üniversitesi hücresi gibi hidrolik sıkışma hücreleri veya Bristol hücresi gibi ödometre tipi hücrelere uyarlanan mekanik yükleme düzeni gerekmektedir. Bilgisayarla izleme ve kontrol esasen tüm deney tipleri için gerekmektedir. Bu deneyler, bir çok noktadan

oluşan sürekli bir e-σ′ veya e-log σ′ eğrisi ürettiği için yüksek kalitede veri güvenilirliği vermektedir. Bu tür deneylerin dezavantajı, alete bağlanan cihazların karmaşık ve pahalı olması, uzman operatör gerektirmeleri ve seçilen şekil değiştirme hızının deneyin yorumunu ve zamanın etkisini anlamayı zorlaştırıp karmaşık hale getirmesidir. Sürekli yükleme deneylerinin başlıca tipleri aşağıda anlatılmıştır.

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

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

Sabit Yükleme Hızlı (CRL) Deneyler : Hidrolik bir hücre kullanılarak uygulanan gerilme sabit bir hızda artırılmakta; yani $d\sigma'/dt$ = sabit olmaktadır. Deney, saatte 6~300 kN/m^2 yükleme hızları kullanılarak 3~72 gün arasında tamamlanabilmektedir. En iyi yükleme hızı üç eksenli deney ile belirlenmelidir.

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

3.6 Önkonsolidasyon Basıncı ve Önkonsolidasyon Basıncı Mekanizması

Casagrande σ'_p-önkonsolidasyon basıncını "zeminin maruz kaldığı en büyük örtü yükü" olarak tanımlamış ve önkonsolidasyon basıncını, laboratuvar ortamında örselenmemiş numune üzerinde klasik kademeli konsolidasyon deneyi yaparak çizdiği e-log(σ'_p) eğrisinden hesaplayan ampirik bir yöntem geliştirmiştir. Uzun dönemdeki konsolidasyon oturmalarını ve çoğu kısa dönem stabilite problemlerini tahmin edebilmek için önkonsolidasyon basıncının (σ'_p) tam olarak belirlenmesi çok önemlidir. Ancak örselenmemiş numuneler üzerinde, laboratuvarda yapılan deneylerdeki bazı değişkenler σ'_p'nin belirlenmesini etkilemektedir (Ladd, 1985). Bunlar;

1. Numunedeki örselenme etkisi (-ki numunedeki örselenme büyükse, çoğunlukla σ'_p ölçümü daha az değer vermektedir),

2. Bir boyutlu sıkışma eğrisinin ve ilgili zaman etkisinin belirlenmesinde kullanılan test ekipmanı ve uygulanan prosedür,

3. σ'_p değerini hesaplamada kullanılan ve yoruma açık teknikler,

4. Boşluk suyunun bileşimi ve sıcaklık etkisi gibi çevresel etkiler (10°C civarındaki bir artış bazı killerde σ'_p değerini daha düşük bulmaya yol açar).

Klasik kademeli ödometre deneyinde, genelde yük artım oranını LIR = $\Delta p/p$ = 1 alınmakta, her gerilme altında genelde bir gün beklenerek önkonsolidasyon basıncı, 24 saatlik bekleme süreleriyle çizilen sıkışma eğrisine göre belirlenmektedir. Ancak genelde birincil konsolidasyon 1 saat ve daha kısa sürede sonuçlandığı için 24 saatlik bekleme süresinde bir veya daha fazla ikincil sıkışma çevrimi oluşmaktadır. Bu nedenle, Ladd (1973), Mesri ve Choi (1985) ve ASTM D2435-80 konsolidasyon eğrisinin birincil konsolidasyonun tamamlanmasına kadar geçen süreye göre çizilmesini önermektedir. Klasik ödometre deneyi, oldukça uzun süre gerektirdiği ve sürekli sıkışma datası içermediği için CG, CRS ve diğer sürekli yükleme deneyleri geliştirilmiştir. Sürekli yüklemeli konsolidasyon deneyleri, sınır boşluksuyu basıncının kontrolünü veya ölçümünü gerektirmekte ve "birincil konsolidasyon süresince" deneyde oluşan aşırı boşluksuyu basıncını vermektedir. CG deneyleri

ayrıca σ'_p civarında, sıkışabilirlik ve permeabilite nedeniyle sıkışma eğrisini -dikkate alınacak şekilde etkileyen şekil değiştirme hızındaki değişimi de vermektedir. Belirli bir e-log(σ'_p) eğrisinden hareketle σ'_p hesaplanışında birçok yöntem geliştirilmiştir. Günümüzde hala en sık kullanılan yöntem Casagrande Yöntemidir.

Kil tabakalarında gözlemlenen önkonsolidasyon basıncına sebep olan mekanizma, birçok pratik etkinin sonucudur. Karbonatlaşma, silika veya iyon değişimi vb. etkiler sonucu oluşan doğal çimentolanma gibi fiziko-kimyasal etkilerin σ'_p değerini, genel olarak artırdığı kabul edilmektedir. Bu etkiler kısaca Tablo 3.2'de verilmiştir. Tablo 3.2'de tariflenen birçok mekanizma farklı σ'_p profili oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle, yapılan laboratuvar deneyleri sonucu belirlenen farklı σ'_p değerlerinin, numunenin hazırlanışı sırasındaki örselenme veya arazideki gerçek durum nedeniyle oluşup oluşmadığını anlamak ve yorumlamak oldukça güçtür.

Tablo 3.2. Geostatik Gerilmeler (Ladd, 1985)

Kategori	Tanım	Gerilme Geçmişi	Arazideki Gerilme Durumu	Sonuç
Mekanik bir boyutlu	Toplam düşey gerilmedeki değişiklikler (örtü yükü, buzullar vb.) Boşluksuyu basıncındaki değişiklikler (yeraltı suyu tablası, sızma koşulları vb.)	Sabit σ'_p-σ'_{v0} ile üniform (sızma hariç).	K_0 koşulları, fakat belirli bir aşırı konsolidasyon oranı için boşaltma-yeniden yüklemede bu değer dağişebilir.	Tanımlaması en kolay ve açık durum.
Kuruma (desiccation)	Buharlaşma, yeşillenme vb etkilerle kuruma Donma sebebiyle kuruma	Çoğunlukla yüksek eratik.	K_0 koşullarından şaşabilir(örneğin, izotropik kapiler gerilmeler).	Kurumuş kabuk yüzeyde birçok tabakada bulunur; ancak deltaik alanlarda derinlerde de bulunabilir.
Drenajlı Krip (yaşlanma)	Uzun süreli ikincil sıkışma	Sabit σ'_p/σ'_{v0} oranı ile üniform.	K_0 koşulları, fakat normal konsolidasyondaki değeri ile aynı olmak zorunda değil.	Leonards ve Altschaeffl, 1964 Bjerrum, 1967
Fiziko-kimyasal	karbonatlaşma, silika vb. sebeplerle doğal çimentolanma İyon değişimi, tiksotropi, aşınma vb. sebeplerle bağlarda değişimin neden olduğu diğer sebepler	Üniform değildir.	Elde yeterince veri yoktur.	Etkileri çok az anlaşılmış ve ispat edilememiştir.

3.7 İkincil Sıkışma

Terzaghi'nin Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisi, killerde boşluksuyu basıncını ve sıkışma hızını tahmin etmek için pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Terzaghi Teorisi, idealize edilmiş zemin sıkışmasını dikkate alan birçok basitleştirici varsayıma dayanır. Bu varsayımlardan en önemlisi, boşluk oranı ve efektif gerilme arasındaki lineer ilişkinin zamandan ve gerilme geçmişinden bağımsız olması ve permeabilite katsayısının konsolidasyon süresince sabit kabul edilmesidir. Uzun bir süredir zeminlerde birincil konsolidasyonun bitmesine rağmen, sabit bir efektif gerilme altında oturmaların devam ettiği bilinmektedir. Suya doygun bir zeminde çoğu zaman konsolidasyonun bitimine doğru oturmaların zamanla artan bir şekilde devam ettiği ve klasik Terzaghi Konsolidasyon Teorisinin öngördüğü şekilde asimptotik olmadığı farkedilmiş ve bu davranış, çoğu araştırmacı tarafından "ikincil konsolidasyon", "ikincil sıkışma" veya "krip" olarak tanımlanmıştır. Hacim değişimi, birincil sıkışma (birincil konsolidasyon) olarak adlandırılan hidrodinamik etki sonucu oluşur. İlave hacim değişimi ise ikincil sıkışma sonucu meydana gelir.Temellerin oturmasını hesaplamak için kullanılan mevcut yöntemler üç kategoride toplanabilir (Poulos ve diğ., 1976):

1. Ampirik yöntemler,
2. Konsolidasyon süresince kripi dikkate almayan viskoelastisite teorisi gibi yöntemler,
3. Viskoelastik zemin kütlesinin konsolidasyonunu dikkate alan teorik yöntemler.

İkincil sıkışmayı içeren oturma analizleri çeşitli yaklaşımlarla bulunmaktadır. İkincil sıkışma yıllarca araştırıldığı halde, halen bu oturmanın hızının ve büyüklüğünün hesaplanması için güvenilir bir yöntem bulunmamaktadır. Bu yüzden, pratikte ikincil sıkışma tahmini, ampirik yöntemlerle yapılmaktadır. İkincil sıkışmaya deneysel yaklaşan Buisman (1936), Koppejan (1948) ve Zeevaert (1975), arazi ve laboratuvar gözlemleriyle oturma-zaman arasındaki ilişkiyi pratik olarak belirlemeye çalışmışlardır. Diğer taraftan Taylor ve Merchant (1940); Barden (1965); Sekiguchi ve Toriihara, (1976) kohezyonlu zeminlerin reolojik özelliklerini dikkate alarak nümerik yöntemlerle ikincil sıkışmayı açıklamaya çalışmışlardır. İkincil etkileri

açıklamak için sayısal fizik ve matematiksel modeller de geliştirilmiştir (Terzaghi ve Frohlich, 1936; Gibson ve Lo, 1961; Schifmann, 1964; Barden, 1965). Ancak bu modeller, laboratuvar verilerine uydurulamayan eğri uyarlama parametreleri içermektedir.

Konsolidasyon problemi ampirik ve deneysel anlamda arazi ve laboratuvarda uzun süredir incelenmektedir. İncelemeler sonucunda ortaya çıkan en önemli bulgu, konsolidasyon probleminde ikincil etkiler denilen doğrudan ve dolaylı etkilerdir. İkincil sıkışmaların dolaylı etkilerinin sıkışma eğrisini nasıl etkileyeceği halen büyük önem taşımaktadır. İkincil sıkışmayı anlatmak için farklı araştırmacılar farklı parametreler kullanmışlardır. Ortak olarak kabul gören bir ikincil sıkışma parametresi 1970'lere kadar gözükmemiştir. İkincil sıkışma davranışı; ikincil etkiler, ikincil büyüklükler, ikincil oran, ikincil zaman faktörü, ikincil yüzde ve ikincil sıkışma katsayısı cinsinden analiz edilmektedir. İkincil sıkışma büyüklüğünü anlatmak için sıkça kullanılmakta olan ve deney koşullarından en az etkilenen parametre olarak görünen "ikincil sıkışma katsayısı" farklı şekilde tanımlanmaktadır (Mesri, 1973). İkincil sıkışma katsayısı (ikincil sıkışma indisi),

$$C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t \qquad (3.1)$$

eşitliğiyle tanımlanmaktadır. Eşitlikte, C_α birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından e-log t eğrisinin düz kısmında bir logaritma zaman çevrimine karşı gelen eğimdir. Ayrıca, düşey deformasyon cinsinden deneysel verilere dayanan ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$,

$$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta \log t} \qquad (3.2)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Buna göre; (3.1) ve (3.2) eşitlikleri birlikte düşünülürse iyileştirilmiş ikincil sıkışma oranı :

$$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{C_\alpha}{(1+e_0)} \qquad (3.3)$$

şeklinde tanımlanacaktır. Burada; C_α ikincil sıkışma indisi, e_0 ise arazideki başlangıç boşluk oranını göstermektedir.

Mesri (1973), Tablo 3.3'te gösterilen zeminlerin ikincil sıkışabilirliklerini esas alan bir sınıflama getirmiş ve ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ değerlerinin % 0.1-10 aralığında kaldığını göstermiştir.

Tablo 3.3 İkincil Sıkışmaya Göre Zeminlerin Sınıflaması (Mesri, 1973)

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

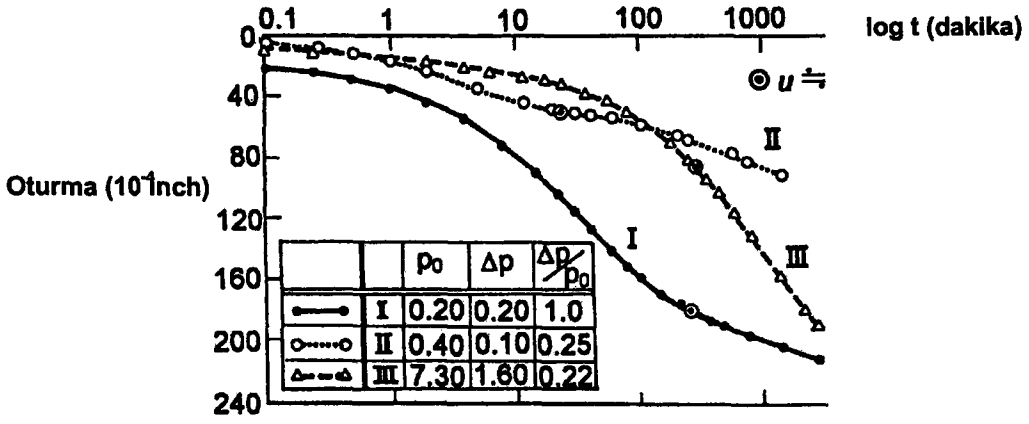
Bu bilgiler ışığı altında H_0 kalınlıktaki bir zemin tabakasının ikincil sıkışması,

$$S_\alpha = C_{\alpha\varepsilon} H_0 \log\left(\frac{t}{t_{100}}\right) \tag{3.4}$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Formüldeki t_{100}, birincil konsolidasyonun sona ermesi (aşırı boşluk suyunun sönümlenmesi) için gereken süredir.

3.7.1 İkincil Sıkışma Mekanizması

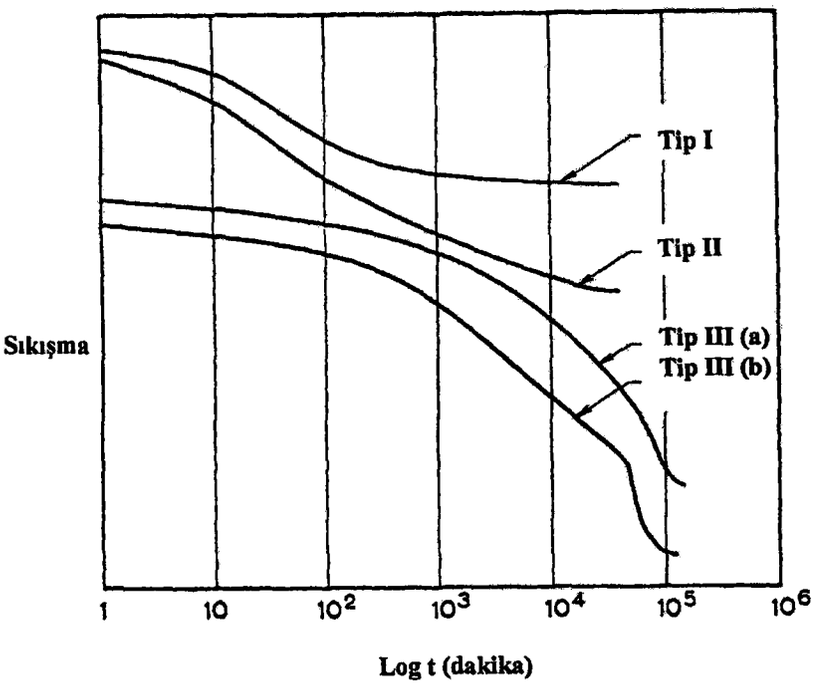
Zemin Mekaniğinde, üzerinde birbirinden farklı birçok görüşün olduğu nadir konulardan birisi de ikincil sıkışmadır. İkincil sıkışma mekanizmasını modellemek için birçok araştırmacı çalışmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalara dayanarak Leonards ve Ramiah (1959), yük artım oranının değişimine göre sıkışma-zaman eğrisinin değişimine dikkat çekmiş ve ardından Leonards ve Girault (1961) ikincil sıkışmanın oturma-zaman eğrisini, yük artım oranına göre Tip I, Tip II ve Tip III olarak üç gruba ayırmışlardır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Yük Artım Oranının Örselenmemiş Mexico City Kilinin Oturma-Zaman Davranışına Etkisi (Leonards ve Girault, 1961)

Leonards ve Girault (1961), yük artım oranına bağlı olarak oturma-zaman eğrisinin değiştiğini ve küçük yük artım oranlarında ikincil sıkışmanın birincil konsolidasyona oranının arttığı sonucuna varmışlardır. Araştırmacılara göre ikincil sıkışma, her ne kadar kil danelerindeki polar moleküllerin oryantasyonundan etkilense de viskoz mekanizma ile ilişkilendirilememektedir.

Lo (1961), ikincil sıkışmanın birincil konsolidasyon süresince oluştuğunu ve ikincil sıkışmanın sıcaklıktan çok etkilendiğini belirtmekte ve killerin konsolidasyon davranışını üç grupta toplamaktadır. Tip I davranışı gösteren killerde, ikincil sıkışma zamanla azalmakta, Tip II davranışı gösteren killerde ikincil sıkışma logaritmik ölçekte zamanın bir fonksiyonu olarak devam edip ardından hızla azalmakta, Tip III davranışı gösteren killerde ise sıkışma hızı zamanla önce hızla artmakta ve ardından dereceli olarak azalmakta ve sonuç olarak tüm killer bu üç tip davranıştan birini sergilemektedir (Şekil 3.3). Lo, Tip III olarak modellenen konsolidasyon davranışına çevresel faktörlerin etkidiğini ve sonuç olarak ikincil sıkışmanın oluştuğunu öne sürmüştür. Tip III davranışının kilin çökelmesinden sonra gelişen yapısal bir etkinin sonucu olduğunu ve gevşek olarak çökelen tabakadaki kil danelerinin pozisyonlarını, zaman ve örtü yardımıyla kimyasal bağlarla gelişen çimentolanmanın neticesiyle aldıklarını ve sonuç olarak bu gevşek yapının bir kritik gerilmede yapısal kırılma gösterme eğilimi taşıdığı ve böylece ikincil sıkışmanın oluştuğunu ifade etmiştir.



Şekil 3.3. İkincil Sıkışma Eğrileri Tipleri (Lo, 1961)

Wahls (1962) ikincil sıkışma mekanizmasını, sürtünme kuvvetlerinin kademeli olarak yeniden ayarlanması, adsorbe suyun plastik deformasyonu, kil bağlarının bozulması ve kayma gerilmeleriyle viskoz yapının yeniden şekillenmesi olarak açıklamaktadır.

Leonards ve Altschaeffl (1964), aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesinden zamana bağlı hacim değişiminin ortaya çıktığını ve danelerin kritik bir gerilme aşıldığında temas noktalarındaki bağların azalması, artması veya kopması sonucu danelerin kayması yada uzun bir süre uygulanan efektif gerilme sonucu krip birim şekil değiştirmesinin tüm temas noktalarında gelişmesi ve drenajın engellenmesi sonucu kayma mukavemetini düşüren aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesinin ikincil sıkışmayı oluşturduğunu ifade etmektedirler.

Suya doygun bir zeminde hacim değişimi sırasında oluşan mekanizma dört gruba ayrılabilir:

1) Plaka şekilli danelerin eğilmesi gibi elastik dane deformasyonu,

2) Yaklaşık sabit aralıklarla dizilmiş danelerin birbirlerine en yakın mesafelerinin değişmesi,

a) Yaygın olarak ayrılmış danelerin çift tabaka kalınlıklarının değişmesi,

b) Temas aralığının değişmesi (adsorbe suyun çıkarılması gibi)

3) Dane oryantasyonundaki değişim,

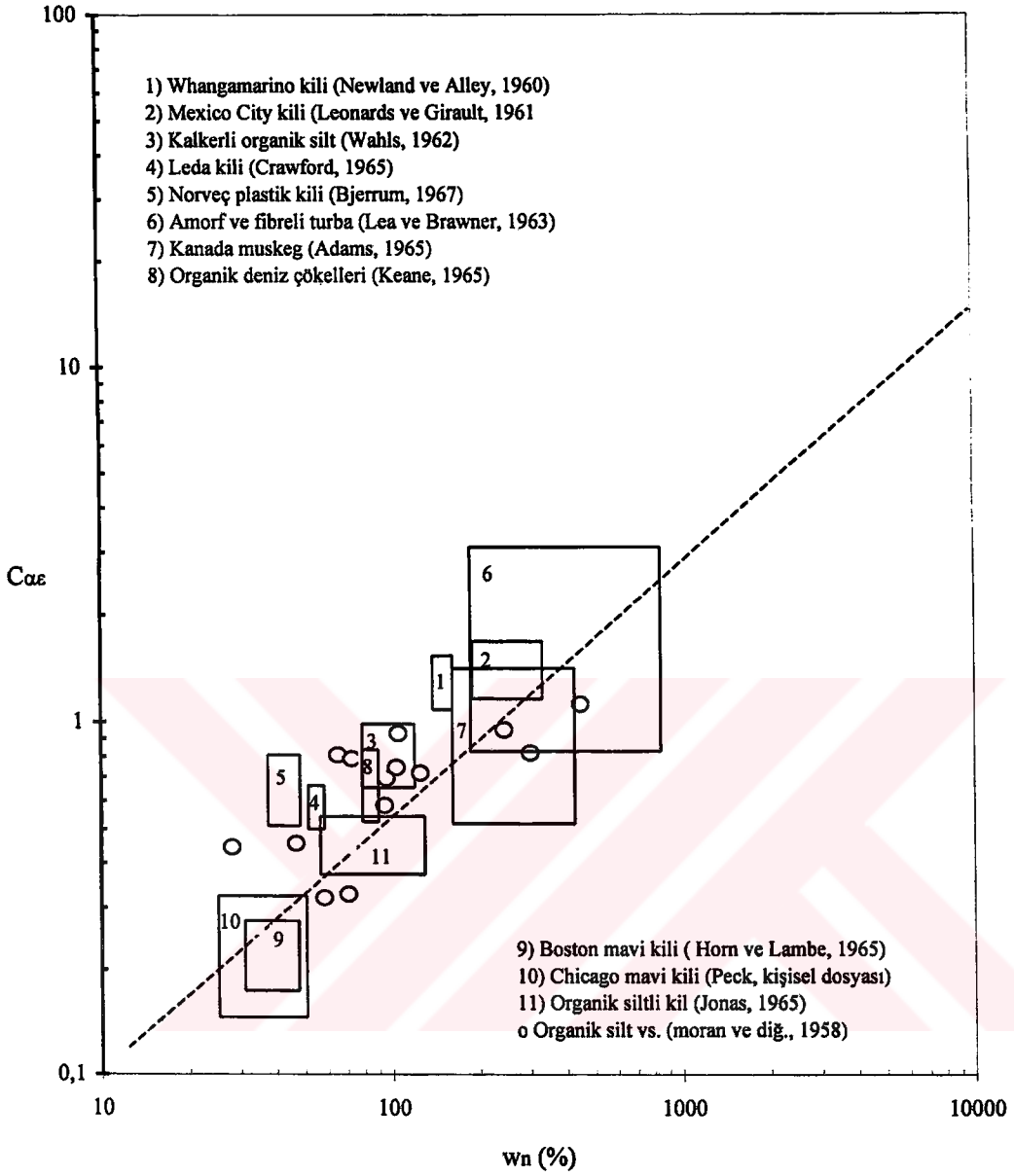
a) Yaygın olarak aralıklı danelerin daha paralel bir şekilde dizilmesi,

b) Dane temas noktalarında kayma,

4) Danelerin ezilmesi (yüksek gerilmelerde kum daneleri) veya danelerin agregasyonu (kil flokları).

(3) ve (4) nolu maddeler zeminlerde geri dönülemeyen plastik birim şekil değiştirmelere sebep olmaktadır. İkincil sıkışma, birincil sıkışmayla başlayan hacim değişiminin bir devamı olarak düşünülebilir. Mekanizma, tekil danelerin deformasyonu (kil danelerinin sıkışması veya fibreli turbalardaki organik fibrelerin sıkışması) ile tekil danelerin göreli hareketini (net pozitif veya negatif normal gerilmeler veya kayma mukavemeti bağını aşan kayma gerilmesi sonucu dane temas noktalarındaki kayma deplasmanı nedeniyle ortalama dane aralığındaki değişiklik) içermektedir. Yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminler genel olarak büyük oranda gecikmiş veya ikincil sıkışma davranışı sergilerler. Bu nedenle temas gerilmeleri yüksek normal konsolide killer, temas gerilmeleri düşük olan aşırı konsolide killerden daha fazla ikincil sıkışma davranışı sergilerler.

Minerolojik kompozisyon, organik malzeme miktarı, fabrik ile fizikokimyasal ortamın ikincil sıkışma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sodyum simektit en büyük, illit orta, kaolin ise en düşük ikincil sıkışma davranışı gösterirler. Organik malzemenin ikincil sıkışmaya çok büyük katkısı olmasına rağmen, bu etkileşim mekanizması henüz çok iyi anlaşılamamıştır. Farklı doğal zemin çökelleri için ikincil sıkışma katsayısı ile doğal su muhtevası arasındaki ilişki Şekil 3.4'te verilmiştir. Tablo 3.3'te ise ikincil sıkışmaya bağlı olarak zeminlerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.4. w_n-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki (Mesri, 1973)

3.7.2 İkincil Sıkışma Mekanizmasını Etkileyen Faktörler

Birçok faktör, literatürde ikincil sıkışmanın sebebi gösterilmektedir. Birincil konsolidasyon esnasında gelişen kesme gerilmelerinin sebep olduğu viskoz yapıdaki yeniden orijinlenmeler, yanal sınırlamalar altında danelerin yerdeğiştirmesi, bağların sünme zıplaması, dane yapısının viskoz akması olarak sıralanabilir. Yapılan çalışmalar ikincil sıkışma davranışının halen tam olarak anlaşılamamış çok karmaşık bir olgu olduğunu göstermektedir. Birçok faktörün ikincil sıkışma ve ikincil sıkışma katsayısına az veya çok etkisi bulunmaktadır.

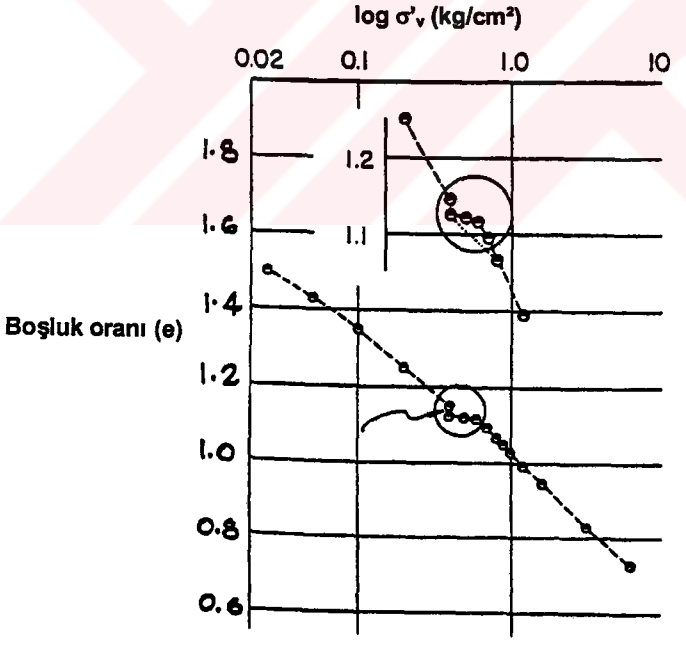
1) Konsolidasyon Basıncı : İkincil sıkışma ile konsolidasyon basıncı (efektif gerilme) arasındaki etkileşim fazla bilinmemektedir. Birçok araştırmacı ikincil sıkışmayı farklı terimlerle ifade ettiği, farklı deney aletleriyle farklı yükleme adımları ve yükleme süreleriyle ölçtüğü için sonuçları birbiriyle karşılaştırmak oldukça zordur. Diğer yandan, yoğrulmuş numunelerden yola çıkarak doğadaki zemini ifade etmeye çalışmak, aşırı konsolidasyonu veya bir önceki uzun yüklemeyi dikkate almamak, ikincil sıkışma davranışıyla konsolidasyon basıncı arasındaki ilişkiyi anlamayı güçleştirmektedir.

Mesri (1973), aşırı konsolidasyonun ve daha önceki ikincil konsolidasyonun ikincil sıkışma katsayısı üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtmektedir. Newland ve Alley (1960), Horn ve Lamb (1964) C_α'nın konsolidasyon basıncından bağımsız olduğunu savunmakta iken, Wahls (1962) ve Mesri (1973) C_α'nın konsolidasyon basıncıyla azaldığını bulmuştur. Ladd ve Preston (1965), C_α ile konsolidasyon basıncı arasındaki ilişkinin zemine göre değiştiğini savunurken, Haefeli ve Schaad (1948) aralarında ilişki olmadığını ileri sürmektedir.

Mesri (1977), çalışmalarında 0.5 σ'_c ile 1.5 σ'_c aralığındaki konsolidasyon basınçları için C_α değerinin artacağını bulmuştur. σ'_c kritik gerilmedir. Kritik gerilmeden küçük konsolidasyon gerilmeleri için zamanla C_α'nın arttığı, büyük konsolidasyon gerilmeleri için ise azaldığını belirtmiştir. C_c'nin σ' ile sabit kaldığı efektif gerilme aralığında kritik basınçtan daha büyük konsolidasyon basınçları için C_α'nın da zamanla sabit kalacağını göstermiştir.

2) Görünür Önkonsolidasyon Basıncı : 1950-1960 yıllarında Purdue Üniversitesinde yapılan deneysel çalışmalarda, normal konsolide killerin hacim değişikliğine başlamadan küçük fakat önemli bir basınç artımına dayanabildiği ve bu "p_{cq}-görünür önkonsolidasyon basıncının", kaliteli örselenmemiş numunelerin küçük yük artımlarıyla test edilmesiyle ilgili olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.5) (Leonards ve Girault, 1961; Leonards ve Ramiah, 1959). Görünür önkonsolidasyon basıncının üç etkisi vardır : (1) kritik birim şekil değiştirme seviyesinde çökelmeyle oluşmuş kil yapısı bozulur, (2) Numunenin zeminden alınması sırasında, killerin ikincil sıkışma tepkisini artıran yavaş sedimentasyon süresince gelişen rijit bağların kısmen tahrip olması sonucu kayma birim şekil değiştirmeleri oluşur, (3) konsolidasyon deneyinde

p_{cq} değerine ulaşılmadan önce ikincil sıkışmalar meydana gelir. Yapay olarak sedimente edilen killerde (numune almanın gerekmediği ve ikincil sıkışmaların oluşmasına meydan verilmediği) nihai gerilmeden önce düşük yükleme hızlarında p_{cq} değerinde bir azalma olmamaktadır. Bu nedenle arazideki p_{cq} değeri, kaliteli örselenmemiş numunelerin klasik konsolidasyon deneylerinde çok küçük yük adımlarıyla ve birincil konsolidasyonu geçmeyen bekleme sürelerinde test edilmesiyle elde edilebilmektedir. Aksi takdirde, tahmin edilen ve laboratuvarda ölçülen konsolidasyon oturmaları birbirinden farklılaşmaktadır. Leonards ve Deschamps (1995), uzun süreli ikincil sıkışmanın ardından p_c'den daha büyük p_{cq} değeri oluştuğunu, p_{cq}/p_c oranının genelde 1.1 ~ 1.4 oranında olduğunu ve plastik killerde daha yüksek p_{cq}/p_c oranı olduğunu belirtmektedir. p_0 ile p_{cq} arasındaki gerilme seviyelerinde sıkışabilirlik, normal konsolide kilin sıkışabilirliğinden daha azdır ve doğru oturma tahmini p_{cq}'nun çok iyi tanımlanmasına bağlıdır.



Şekil 3.5. 12 Hafta Süreyle İkincil Sıkışmaya Terkedilen Yoğrulmuş Kildeki p_{cq} Oluşması (Leonards ve Ramiah, 1959)

Çeşitli araştırmacılarca, ikincil sıkışma hızının bir önceki yükün uygulanma süresinden etkilendiği ve bu etkilenmenin önyüklemeye benzer bir etki olduğu belirtilmektedir. Kritik yük, kritik bağ, kuasi-önkonsolidasyon basıncı, görünür

önkonsolidasyon basıncı veya kritik gerilme olarak adlandırılan bir gerilmeden daha az bir gerilmede ikincil sıkışma katsayısı, bu değeri geçen bir gerilmedeki ikincil sıkışma katsayısından daha az olmaktadır (Mesri, 1973). İkincil sıkışma oranının önceki yüklemenin süresi tarafından etkilendiği yönünde genel bir kanı oluşmaktadır. İkincil sıkışma oranı üzerinde tüm doğal zemin çökellerinin maruz kaldığı uzun süreli yüklemenin etkisi, önyükleme etkisiyle benzeşmektedir. İkincil sıkışmada oluşan oturma, bekleme süresiyle artmaktadır. Sonuç olarak; ilave dış gerilmelere karşı daha yüksek direnç sergileyen daha uzun bekletimli numune herhangi bir zaman aralığında daha az ani ve birincil sıkışmalar göstermektedir. İleri yüklemelerde bu davranış basınç artımının artması ile açıkça görünür hale gelmektedir.

3) Yük Artım Oranı : İkincil sıkışma mekanizmasına yük artım oranının (LIR) etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve genel olarak düşük yük artım oranlarında daneler arasında limit sayıda temas noktalarında kayma oluştuğu ve sıkışmanın bu nedenle daha az olduğu ve konsolidasyon olgusunun daha az ivmelenmesi sonucu boşluk suyu basıncı sönümlenmesinin çok hızlı gelişmesi sonucu ikincil sıkışmanın daha fazla olduğu, tersine büyük yük artım oranlarında daha fazla sıkışma, daha yavaş boşluk suyu basıncı sönümlenmesi ve daha az ikincil sıkışma ve Tip I veya Tip II davranışı görüldüğü sonucuna varılmıştır. Laboratuvar ortamında $\Delta p / p_0 = 1.0$ yük artım oranıyla yapılan deneylerden hareketle hesaplanan ikincil sıkışmaların daha az ve ihmal edilebilir mertebelerde hesaplandığı, halbuki arazide ikincil sıkışmaların çok daha önemli miktarda olabileceği Lo (1961); Leonards ve Girault (1961); Ladd , Wahls (1962); Girault ve diğ. (1962); Leonards ve Altschaeffl (1964); Andersland (1973) ve Imai (1995) tarafından ifade edilmiştir.

4) Önsıkışma : Ön konsolidasyon basıncının ikincil sıkışmayı belirgin olarak azaltacağı ve bu azaltmanın derecesinin aşırı konsolidasyon oranının bir fonksiyonu olacağı yönünde genel bir kanı bulunmaktadır. Önkonsolidasyon basıncından daha az gerilme aralığında ikincil sıkışma katsayısı, tekrar sıkışma bölümündeki gerilmenin artmasıyla artmakta ve maksimum önkonsolidasyon basıncının hemen ötesinde bir gerilme seviyesinde bir maksimum değere ulaşmaktadır. Bundan sonra normal konsolide kilin değerleri ile birleşmektedir. Ön yüklemenin en etkili olduğu zemin oluşumları için ikincil sıkışma katsayısındaki azalma değeri ile çeşitli killer için aşırı

konsolidasyon oranı arasındaki ilişkiyi belirlemek yararlı olmaktadır. (Mesri, 1973; Ladd ve Preston, 1965; Barden 1969).

5) Zaman : İkincil etkilerin süresi bilinmemektedir. Laboratuvar deney ortamlarında, deney süresi birkaç yılı aşacak şekilde uzatılmışsa da, ikincil sıkışma katsayısı ve zaman arasındaki ilişki tam olarak kurulamamıştır. Zemin numunesindeki fiziko-kimyasal değişimlerin ürettiği çimentolaşma veya laboratuvar sıcaklığında bakteriyel üreme, yükleme koşullarındaki değişim gibi faktörler nedeniyle bazı uzun dönem laboratuvar deneylerinin değerleri yeterli hassaslıkta değildir. Laboratuvar yükleme koşulları zemin numunesi ve konsolidasyon ringi arasında ring sürtünmesinin artmasıyla sonuçlanan uzun dönemli içsel etkileşime maruz kalmakta veya sıcaklık değişimi konsolidasyon ring çapının değişimine bu da, yanal basınçtaki değişime sebep olmaktadır.

Yeterli sayıda uzun dönem arazi oturma kayıtları bulunmamaktadır. Ayrıca çoğu uzun dönemli arazi oturma kayıtları, çoğu arazi koşullarının K_0 koşullarından sapmasıyla geçerliliğini yitirmektedir. Laboratuvar ve arazi sonuçlarını esas alan çoğu araştırmacı, ikincil sıkışmanın zamanın logaritmasının doğrusal bir fonksiyonu olduğu görüşünü belirtirken, diğer bir kısmı bunu kabul etmemektedir. Lo (1961), laboratuvar deneylerinde zamanla S_α denilen ikincil sıkışmada bir azalma görüldüğünü belirtirken, Bjerrum gecikmiş oturma-log (t)'nin düz bir doğru çizmediği ancak bir miktar düştüğü sonucuna varmıştır.

6) Yoğrulma : Bir zeminin karıştırılması sonucu danelerin daha dağınık bir dokuda (yükleme etkisine benzer) konumlanmalarının, zemin kimyası ve bileşimiyle bağımlı olarak zemin yapısı üzerinde karmaşık bir etkisi vardır. Yoğurma genellikle ikincil sıkışma oranını düşürmektedir. Örselenmemiş numunelerde, yoğrulmuş zeminlerdekilerden daha fazla ikincil sıkışma oluşmaktadır. Yoğrulmuş bir numune yüklendikçe ikincil sıkışma katsayısı efektif gerilmenin artmasıyla büyümektedir.

7) Kayma Gerilmeleri : Kayma gerilmesi ikincil sıkışma oranını etkilemekle birlikte tam olarak kontrol etmemektedir. Taylor bir boyutlu sıkışmada oluşacak ikincil sıkışmanın, yapısal bozulmaların daha az olduğu üç boyutlu sıkışma durumundakinden daha büyük olacağı görüşünü belirtmiştir. Ladd ve Preston, kayma gerilmesi büyüklüğünün K_0 konsolidasyonuna karşı gelen değerden daha düşük

olması durumunda ikincil sıkışma oranı üzerinde az etkisi olacağı sonucuna varmışlardır. Mesri (1973) de bunun, bir çok arazi problemlerinde, K_0 koşulunu aşan kesme gerilmelerinin daha büyük gecikmiş sıkışmalara öncülük edeceğini belirtmektedir.

8) Efektif Gerilme Artış Hızı : İkincil sıkışma oranı üzerinde efektif gerilmenin uygulanma metodunun veya hızının etkisi halen karmaşıktır. Farklı drenaj sınır koşullu ve geçirgenlik katsayılı iki zemin numunesi üzerinde aynı metot ve yükleme hızı, karşılaştırma yapmayı güçleştirmektedir. Bazı araştırmacılar basamaklı yüklemenin zemin yapısını şoklayacağı ve çatlatacağı, keseceğine inanmaktadır. Ancak gerçekte zemin, drenaj tabakaları haricinde sonsuz geçirimli olmadığından efektif gerilme, basamaklı yükleme için bile ani olarak artmayacak ve geçirgenlik katsayısı ve diğer değişkenlerin olduğu kadar efektif gerilme artış büyüklüğünce de tanımlanan bir hızda artacaktır. Bu yüzden tam doygunluk zemin koşulunda, şok yükleme imkansız olarak gözükmektedir. Birçok araştırmacı ikincil sıkışma katsayısının basınç artışı ve basınç artış oranından bağımsız olduğu görüşünü benimsememiştir. Goldberg (1964), basınç artışının büyüklüğü ile artan ikincil sıkışma hızını içeren konsolidasyon verileri vermiştir. Yeterince yavaş sıkışmalarda birincil konsolidasyon esnasında sünme etkileri oluşacak ve birincil ile ikincil sıkışma arasındaki ayrım kaybolacaktır. Bu açıdan, Barden (1968) tarafından çeşitli gözlemler rapor edilmiş, Gibson ile Lo (1961) tarafından arazi problemlerine uygulaması detaylı olarak tartışılmıştır.

9) Arazi-Laboratuvar Deneyleri Arasındaki Farklılıklar : Arazide, özellikle konsolide olacak zemin tabakası oldukça kalın ise ikincil sıkışmayı birincil konsolidasyondan ayırmak zorlaşmaktadır. Drenaj yüzeylerine yakın tabaka bölümlerinde konsolidasyon tamamen tamamlanmış olabilir. Böylelikle ikincil sıkışmalara giderken tabaka ortasındaki kısımlarda halen birincil konsolidasyon devam etmektedir. İki tip oturma da toplam yüzey oturmasını oluşturmakta ve son yüzey oturma miktarını önceden kestirmek güçleşmektedir.

Bazı araştırmacılar, arazideki ikincil sıkışma oranının laboratuvardakinden çoğunlukla daha büyük olduğunu bulmuşken, diğer bir grup araştırmacı ise arazi ve laboratuvar ikincil sıkışma oranları arasında makul bir ilişki bulamamışlardır. Mesri (1973), düşük laboratuvar sonuçları için bir olası nedenin numune örselenmesi

olabileceğini vurgulamaktadır. Maalesef çoğu arazi oturma kayıtları birincil konsolidasyonun sonu civarında kesilmektedir. Bu sorunu aydınlatmak için uzun dönem arazi kayıtları şarttır (Olson, 1998).

10) Kenar Sürtünmesi : Konsolidasyon deneylerinde kenar sürtünmesinin konsolidasyon davranışına etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve kenar sürtünmesinin nasıl en aza indirileceği irdelenmiştir (Lo, 1961; Leonards ve Girault, 1961; Berre ve Iversen, 1972; Leonards ve Deschamps, 1995). Pirinç veya çelik ringlerin silikon yağı ile yağlanması, numunenin altına ve üstüne filtre kağıdı konularak doğrudan poroz taş üzerine oturtulmaması gibi önlemlerle kenar sürtünmesinin minimize edilebileceği ve konsolidasyon deneyinin sonucunu fazla etkilemeyeceği yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Genelde kenar sürtünmesi, efektif gerilmenin artmaya başlamasıyla efektif gerilmenin ikincil sıkışma süresince sabit kaldığı duruma kadar artar ve gerçekte ikincil sıkışma süresince kenar sürtünmesi sebebiyle gerçek efektif gerilme azalır. Ancak, kenar sürtünmesinin değişmesine fırsat verilmediği sürece sürtünme diğer adımları fazla etkilemez. Bununla birlikte, deneyden elde edilen data ile belirlenen zemin parametrelerinde kenar sürtünmesinin numuneye etkiyen efektif gerilmeyi bir miktar azalttığı muhakkaktır.

11) Vibrasyon ve Tekrarlı Yükleme : Lo (1961), konsolidasyon deneyi ve ikincil sıkışma sırasında vibrasyonun veya ani bir şokun oturma-zaman eğrisinde ani bir düşüşe sebep olduğunu ve sonucu olumsuz etkilediğini belirtmektedir.

Tekrarlı yüklemeye maruz kalan killerin davranışının aydınlatılması, sadece sismik kuvvetlere dayanıklı yapılar için değil tekrarlı veya aralıklı ortaya çıkan yüklemelere dayanmaya uygun olması gereken diğer tip inşaatlar için de önemlidir. Örneğin yol kaplamaları, depolama üniteleri ve açık deniz yapıları gibi. Kil numuneleri, tekrarlı yüklemeler altında statik yüklemelere göre daha fazla sıkışmaktadır. Bu iki yükleme durumunda da sıkışabilirlik veya oturmadaki fark, ikincil sıkışmaya bağlıdır. Numunelerin tekrarlı yüklemeler altında oturmasına toplam yükün büyüklüğü, yükleme çevriminin sayısı, yükleme periyodu, yük artım oranı, yükleme durumu ve numunenin yapay çimentolanması neden olmaktadır.

Tekrarlı yüklemenin neden olduğu şekil değiştirme, statik yüklemeninkinden daha büyüktür. Bu gerçek tekrarlı konsolidasyonda ikincil sıkışmanın baskın değerine atfedilebilir. Tekrarlı yükleme altında hesaplanan ikincil sıkışma katsayısı statik yükleme altında hesaplanandan daha büyük olmaktadır. İkincil sıkışmaların gözlenen şekil değiştirmesi, hesaplanan oturma ile yaklaşık olarak uymaktadır. Numune içindeki organik maddenin aşikar olarak zemini daha fazla sıkışabilir hale getirmesi kadar yapay çimentolanmanın da killerin oturmasında bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Tekrarlı yükleme altında oturmayı etkileyen faktörlerin, toplam yükün büyüklüğü, yükleme periyodu, yük artım oranı ve yükleme durumu olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece ikincil sıkışmanın şekil değiştirmesi organik madde içeriği, tekrarlanan yükün büyüklüğü, yük artım oranı ve yükleme periyoduna bağlı olarak artmaktadır (Fujiwara ve diğ., 1987).

12) K_0 : İkincil sıkışma süresince K_0 davranışı üzerinde yapılan az sayıda araştırmada ikincil sıkışmanın K_0'dan etkilenmediği görülmüştür. K_0, ikincil sıkışma sırasında, C_α'nın zamanla artması, azalması veya sabit kalmasına bakmaksızın artmaktadır.

13) Numune Kalınlığı : Çoğunlukla ikincil sıkışma katsayısının numune kalınlığından bağımsız olduğu görülmektedir. Bunun tek bir istisnası vardır : Çok ince laboratuvar numunelerinde yoğrulmanın etkisi ve numune sınırlarındaki efektif gerilmedeki ani değişim, numunenin tüm davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Bununla beraber, ikincil sıkışma oranı $\Delta e/\Delta t$, birincil zamanın hemen ardından ince numunede kalın numunedekine oranla daha büyük olmaktadır (Mesri, 1973).

Alttan ve üstten drenaja izin verilen 2H kalınlıklı bir numunenin konsolidasyonunun genelde aynı numunenin H kalınlığı ile, sadece üstten drenaja izin verileninkine eşit olmasını uygun bulmayan Sridharan (1988) bilhassa bir kil numunesinin kalınlığının artması ile daha şüpheli bir hal alacağını, ikincil parametrelerin de değişebileceğini düşünmektedir. Berre ve Iversen (1972) yaptığı deneysel çalışmalarda, drenaj boyu kısaldıkça görünür önkonsolidasyon basıncının daha büyük olduğunu ve bunun ana sebebinin, bir yük artımının hemen ardından efektif gerilmenin suyun kısa drenaj yolu sayesinde kısa sürede drene olması sonucu artmasına bağlamaktadır.

14) Sıcaklık : İkincil sıkışma oranında sıcaklığın etkisine gereğinden fazla önem verilmiştir. Örneğin Simons sıkışabilirliği, deney ısısındaki artış ile azalan temas noktasındaki sıkışabilirliği, bağ dayanımına bağlı olduğunu belirtmiştir. Haibagahi organik ve organik olmayan Paulding killerinin ikincil sıkışması üzerinde deney sıcaklığının etkisini araştırmıştır. İnorganik Paulding kilinde deney sıcaklığının tek etkisi serbest suyun viskozitesinin düşmesi ile birincil konsolidasyonun hızlanmasının gözlenmesidir (Mesri, 1973). Lo (1961), yaptığı deneysel çalışmada ikincil konsolidasyon üzerine sıcaklığın etkisinin çok büyük olduğunu ve sıcaklıktaki +3 °C'lik artışın eğrinin şeklini ve eğimini etkileyerek ikincil sıkışmayı doğrudan etkilediğini gözlemlemiştir. Ancak Lo, sıcaklık değişiminin ikincil sıkışma mekanizması üzerindeki fiziksel etkisini açıklayamamıştır. Diğer yandan Ladd (1985) sıcaklıktaki +10 °C'lik bir değişimin konsolidasyon deneyini etkilediğini belirtmektedir. Andersland (1973) ise kağıt hamuru ve kağıt değirmeni çamurunda yaptığı konsolidasyon deneylerinde sıcaklığın artmasıyla boşluk sıvısının viskozitesinin değiştiğini ve zemin veya sulu çamur bileşiminde genişlemeye sebep olduğunu gözlemiştir. Konsolidasyon katsayısı, sıcaklık arttıkça artmıştır. Sulu çamurun ısısı arttıkça ekstra sıkışma veya oturma, boşluk oranı dengeye gelene kadar artmıştır. Bu durum, bir gerilme artımındaki ikincil sıkışma ile anolog bir fiziksel durum olarak sunulmuştur.

3.7.3 İkincil Sıkışma Davranışı

İkincil sıkışma veya gecikmiş konsolidasyon (secondary compression or delayed compression), killi zeminlere taşıtılan temellerin oturma problemleriyle ilgili olarak sürekli mühendislerin karşısına çıkmaktadır. Terzaghi'nin bir boyutlu klasik konsolidasyon teorisi, yalnızca hidrodinamik etkilerle birincil konsolidasyonu veya sıkışmayı ele almasına rağmen pratikte oturmalar, aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesinden sonra da durmamakta, sabit efektif gerilme altında oturmalar devam etmektedir. Sabit efektif gerilme altında devam eden hacim değişimi "ikincil sıkışma" olarak tanımlanmaktadır. Birçok araştırmacı ikincil sıkışmayı (ikincil sıkışmayı kontrol eden parametreler kesin olarak belirlenememesine rağmen) ampirik, analitik, teorik veya deneysel olarak araştırmıştır.

Terzaghi teorisinin sınırları ve arazide gözlemlenen ve laboratuvar deneylerine dayanılarak hesaplanan oturmalar arasındaki farklar ikincil sıkışmanın varlığının ve

öneminin bir göstergesidir. Killi zeminlerin ikincil sıkışmaları genelde küçüktür ama toplam zemin sıkışmasında dikkate alınması gerekmektedir. Ancak, düşük gerilme adımlarında, organik malzeme içeren killerde ve kimyasal olarak kirlenen zeminlerde toplam oturmanın önemli bir kısmı ikincil sıkışma sonucudur. Bu nedenle, ikincil sıkışma ve ikincil sıkışmayı etkileyen faktörler önemlidir (Sridharan ve Rao, 1982).

Kil danelerinin net negatif yük taşıdıkları ve dane yüzeyindeki bu kuvvetlerin danelerin davranışını ve agregasyonu etkilediği bilinmektedir. İkincil sıkışma, kil plakaları etrafındaki kuvvetlerin hareketlerine bağlıdır. İkincil sıkışmayla ilgili yapılan ilk çalışmalarda saf kil süspansiyonların sıkışabilirliği, kil danelerindeki elektrik çift tabaka arasındaki etkileşim cinsinden incelenmiştir. Doğal kil zeminde bir yük altında sıkışma, zeminin ince daneli kısmındaki çift tabaka arasındaki fizikokimyasal etkileşim ile iri daneli kısımdaki kuvvetlerin mekanik etkileşimi nedeniyle oluşan deformasyonlar cinsinden açıklanmaya çalışılmış ancak, killi zeminlerin tiksotropi özellikleri ile ikincil zaman etkisi dikkate alınamamıştır. Newlad ve Allely (1960), ikincil konsolidasyon eğrisinin eğiminin numune kalınlığından, yük artım oranından ve bir önceki yüklemenin süresinden bağımsız olduğunu öne sürmüş, Wahls (1962) ise ikincil sıkışmanın, dane yapısının viskoz yenilme ile yeniden şekillenmesi ve bu oluşumun boşluk suyu basıncını ihmal edebilecek kadar yavaş meydana gelmesine bağlamıştır. Wahls, ikincil sıkışma davranışının basınç artımından ve yük artım oranından bağımsız olduğunu belirtmiştir. Leonards ve Girault (1961), ikincil sıkışmanın, kil danelerindeki polar moleküllerin oryantasyonuna bağlı diğer mekanizmalar veya viskoz sürüklenme ile açıklanmasını sorgulamış ve ikincil sıkışmanın yük artım oranından çok etkilendiğini belirtmiş, ancak mekanizmayı açıklayamamışlardır. Daha sonraki çalışmalarda, killerin mineral iskeleti ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Mesri (1973), adsorbe su, minerolojik kompozisyon, önsıkışma, uzun süreli yükleme ve efektif gerilme oranının (σ'_1/σ'_3) ikincil sıkışma davranışını etkileyen en önemli faktörler olduğunu yazmış ve hatta karbontetraklorit ve benzin ile doyurulmuş killerde dahi ikincil sıkışmanın olduğu sonucuna varmıştır.

Terzaghi (1923) ve Buisman (1936)'ın çalışmalarından bu yana çeşitli araştırmacılar henüz kalın kil tabakalarında birincil konsolidasyon süresince birincil ve ikincil sıkışmaların birlikte oluşup oluşmadığı konusunda fikir birliğine varamamışlardır.

Suklje, Barden ve Bjerrum her iki sıkışmanın birarada oluştuğunu düşünmesine rağmen Leonards, Ladd ve diğerleri ikincil sıkışmanın, birincil konsolidasyonun tamamlanmasından ve aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesinden sonra meydana geldiğini düşünmektedirler (Leroueil ve diğ., 1985).

Killerin bir boyutlu sıkışabilirliği ve yük artımı nedeniyle oluşan oturmalar dikkate alındığında mühendislik açısından iki ekstrem yaklaşım vardır. İlk yaklaşım, laboratuvarda 20 mm kalınlığında ince numuneler üzerinde yapılan kademeli yüklemeli konsolidasyon deneyinden elde edilen e-log σ'_v (EOP-end of primary-birincil konsolidasyonun tamamlandığı eğri) ile arazideki çok kalın kil tabakaları için oturma analizleri yapılabileceğini kabul etmektedir. Bu yaklaşım Leonards (1977); Mesri (1973); Mesri ve Rokhsar (1974); Mesri (1975); Mesri ve diğ. (1975); Mesri ve Godlewski (1977); Mesri ve Choi,(1985); Mesri ve Castro,(1987); Jamiolkowski ve diğ. (1995); Leonards ve Deschamps (1995) tarafından kabul görmektedir. İkinci yaklaşımda, killerin viskoz davranış gösterdiği ve tüm konsolidasyon süreci boyunca sıcaklık ile şekil değiştirme hızından etkilendiği kabul edilmekte ve bu yaklaşım Bjerrum (1967), Larsson (1986), Leroueil (1988, 1994) tarafından kabul görmektedir. İki yaklaşım da birbirine zıt olmasına rağmen her ikisi de deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu birbirine zıt iki yaklaşım, Ladd ve diğ. (1977), Jamiolkowski (1981)'nin makalelerinde Hipotez A ve Hipotez B olarak modellenmiştir.

Hipotez A, kripin yalnızca birincil konsolidasyonun tamamlanmasından ve aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesinden sonra ikincil sıkışmayla efektif gerilmedeki bir artışla (deformasyon, danelerin birbiri üzerinden kayması ve yeniden oryante olması, çift tabaka kalınlığının değişimi, adsorbe film tabakasının bozulması v.b. sebeplerle) hacim değişimine sebep olan aynı fiziksel mekanizmalarla oluştuğunu kabul etmektedir. Hipotez A'ya göre numune kalınlığı yani drenaj yüksekliğinin (H_d) ve boşluk suyu basıncı dağılımının, EOP eğrisine ve dolayısıyla σ'_p değerine bir etkisi olmamaktadır. Hipotez B, kripe bir çeşit yapısal viskozitenin (adsorbe film tabakasının viskozitesi nedeniyle) sebep olduğunu, ve bu olayın boşluk suyu basıncı sönümlenmesi sırasında meydana geldiğini ve sonuç olarak EOP konsolidasyonundaki şekil değişiminin arttığını kabul etmektedir. Kesin etki, özel reolojik modeller ve giriş parametrelerine bağlıdır.

Genelde oturma hesaplarında Hipotez A düşük limiti, Hipotez B ise yüksek limiti vermekte gerçekte arazideki oturmalar ise her iki yaklaşım arasında meydana gelmektedir.

3.7.3.1 Hipotez A

EOP kabulüne göre çizilen ve e-log σ'_v eğrisi olarak tanımlanan yaklaşımda bir düşey efektif gerilme altındaki EOP konsolidasyonundaki boşluk oranı tekildir ve birincil konsolidasyon süresinden bağımsızdır. Bu nedenle laboratuvardaki ince numunelerde yapılan deneyler, arazideki kalın tabakaları modelleyebilirler.

Mesri (1973), killerin ikincil sıkışma davranışını etkileyen faktörleri inceleyerek ikincil sıkışma katsayısı ile ilgili üç önemli bağıntı vermiştir.

$$S_a = \frac{\Delta s}{\Delta \log t} \tag{3.5}$$

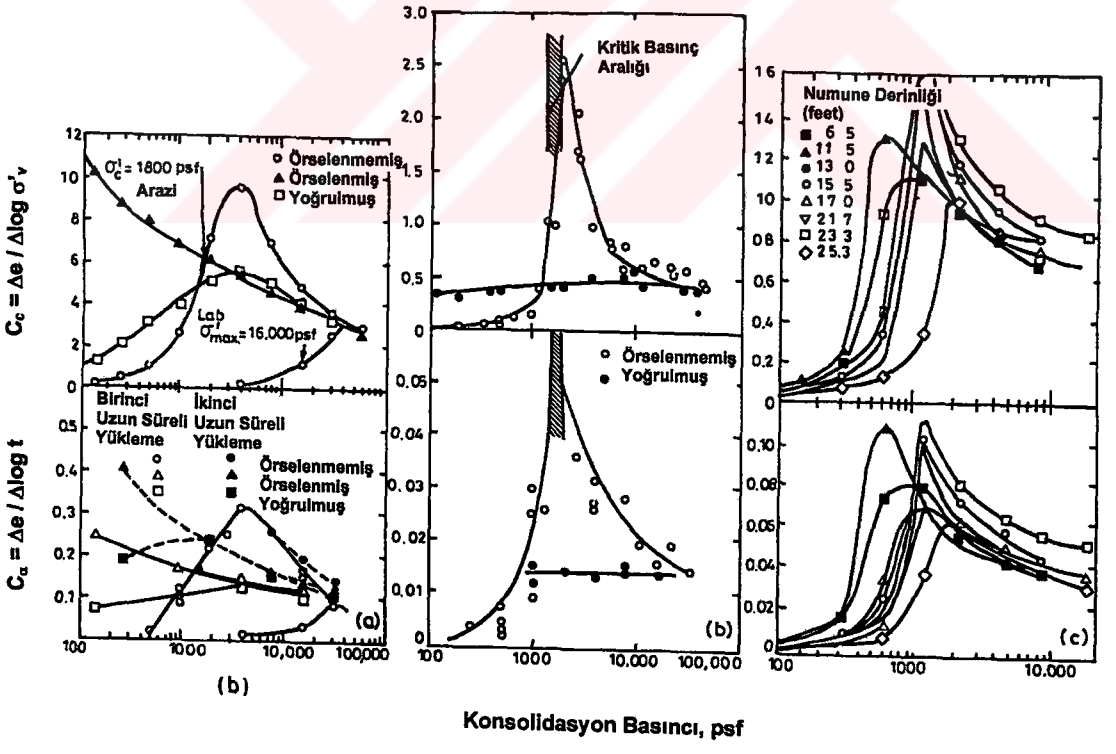
$$C_a = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \tag{3.6}$$

$$\varepsilon_a = \frac{C_a}{1+e} \tag{3.7}$$

Mesri ve Rokhsar (1973), Terzaghi teorisinin ikincil sıkışmayı dikkate almayan eksik yönünü irdeleyerek konsolidasyon denkleminin teorisini geliştirmek için yeni varsayımlar yapmışlar, önerdikleri teorik sonuçları inceleyerek diğer konsolidasyon teorileriyle karşılaştırmalarını vermişlerdir. Araştırmacılar, ikincil sıkışmanın aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmsinden etkilenmediği sonucuna varmışlardır.

Mesri ve Godlewski (1977), ilk kez bir zemin için tekil bir C_α/C_c oranı olduğu ve bu tekil ilişkinin tüm zemin, efektif gerilme ve boşluk oranı için geçerli olduğuna dikkat çekmişler ve üç doğal zemin çökeli üzerinde seri deneyler yapmışlardır (Şekil 3.6). Mesri ve Godlewski, sundukları datayla ikincil sıkışma sırasında C_c ile C_α arasındaki ilişkinin, ikincil sıkışma aralığındaki oturma eğrisinin şeklinde tahmin edilebileceğini ve tahminlerin arazi ve laboratuvar gözlemlerine dayandığını belirtmektedirler. Araştırmacıların gözlemlediği datanın ampirik analizine dayanan şartlı öngörüleri, efektif gerilmeyi ve zamanı dikkate alan sıkışabilirliği mikroskopik ölçekte

yaklaşması bakımından faydalıdır. Dış etkilerle efektif gerilmenin değişimi sırasında oluşan hacim değişimi mekanizmasıyla içsel etkileşim ve bunların yeniden dağılımı sırasında herhangibir farklılık olması için geçerli bir neden bulunmamaktadır. Deformasyon, oturma, agregasyon veya dispersiyon, adsorbe filminin bozulması, çift tabakaların genişlemesi veya büzülmesi gibi hacim değişimdeki tüm mekanizmalar efektif gerilmenin değişimi sırasında zamanla etkili olmaktadır. Hacim değişimindeki tüm mekanizmalar, viskoz veya viskoz olmayan bir zincir-reaksiyon prosesidir ve bu nedenle zamana bağımlıdır. Fabrikteki değişikliğin büyüklüğü ve efektif gerilmedeki bir artımla veya zamanın bir artımı sırasında, daneler arasındaki kuvvetler zaman ve efektif gerilmedeki bir önceki değişikliğin şiddetine bağımlı olmalıdır. Gerçek bir zemin kütlesinde efektif gerilmedeki değişiklikler daima zamana bağımlıdır. Efektif gerilmenin artımına karşılık oluşan her yapısal tepki, hem zamana bağımlı değişikliklere sebep olur hem de zamana bağımlı değişikliklerin sonucudur. Bu nedenle, zaman artımı veya efektif gerilmenin artımıyla meydana gelen değişikliklerin büyüklüğü içsel bağımlıdır(interdependent).



Şekil 3.6. Gerilme ve C_c ile C_α Arasındaki İlişki (a) Mexico City Kili (b) Leda Kili (c) New Haven Organik Silti (Mesri ve Godlewski, 1977)

Tablo 3.4. Çeşitli Zeminler İçin C_α/C_c Oranları (Mesri ve Godlewski, 1977; Suthaker ve Don Scott, 1995; Mesri, Shahien ve Feng, 1995)

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 fibreli turba	0.035-0.083	Lea ve Brawner, 1963
Kanada muskeg	0.09-0.10	Adams, 1965
Leda kili	0.03-0.055	Walker ve Raymond, 1968
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
Sanfransisko körfez çamuru	0.04-0.06	Su ve Prysock, 1972
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
Fibreli turbalar	0.06-0.085	Berry ve Vickers, 1975
Mexico City kili	0.03-0.035	Mesri, Rokhsar ve Bohor, 1975
Hudson River 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
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	0.030	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Vasby, İsveç	0.060	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Glocester, Kanada	0.031	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Ellingsrud, Norveç	0.044	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Skà-Edeby, İsveç	0.050	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Changi, Singapur	0.035	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
ChekLapKok, Hong Kong	0.030-0.065	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
LaGrande, Kanada	0.054	Mesri, Shahien ve Feng, 1995
Bangkok, Tayland	0.050	Mesri, Shahien ve Feng, 1995

Mesri ve Godlewski, üç doğal zemin çökeli üzerinde seri deneyler yapmışlardır. Tüm numuneler $\Delta p/p = 1.0$ olacak şekilde yüklenmiş ve Taylor yöntemine göre hesapladıkları birincil konsolidasyonun tamamlandığı sürede bir sonraki yükleme adımına geçmişler, ilk uzun süreli yüklemede 4-6 hafta bekleyerek ikincil sıkışmaları ölçmüşler, ardından yükü iki katına çıkararak tekrar 4-6 hafta beklemişlerdir. Araştırmacılar, düşük yük artım oranlarıyla çalışıldığında Δh-log t eğrisinde "birincil" ve "ikincil" kısımların birbirinden ayrılmasının zorlaştığını ve bunları birbirinden ayırmak için özel dikkat gerektiğini bildirmiş ve şu yargılara varmışlardır: a) Doğal her zemin için C_α ile C_c arasında tekil bir ilişki bulunmaktadır, b) Birçok zemin için C_α/C_c oranı 0.025-0.10 aralığındadır, c) C_α ile C_c arasındaki herhangi zaman, efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir, d) C_α, yük artım oranının bir fonksiyonu değildir, e) C_α, nihai efektif gerilmeden etkilenmektedir.

Mesri ve Choi (1985), drenaj yüksekliği 2.5~51 cm arasında değişen, değişken plastisiteli hassas üç doğal kil üzerinde yaptıkları deneylerde, deney sonunda EOP'ye göre tüm numunelerde boşluk oranının aynı olduğunu ve yumuşak killer için tekil bir EOP e-log σ'_v eğrisi bulunduğu sonucuna varmışlar ve ILLICON komputer metodolijisini (ki bu yöntemde, laboratuvar dataları doğrudan arazideki oturma analizi için kullanılmaktadır) sunmuşlardır.

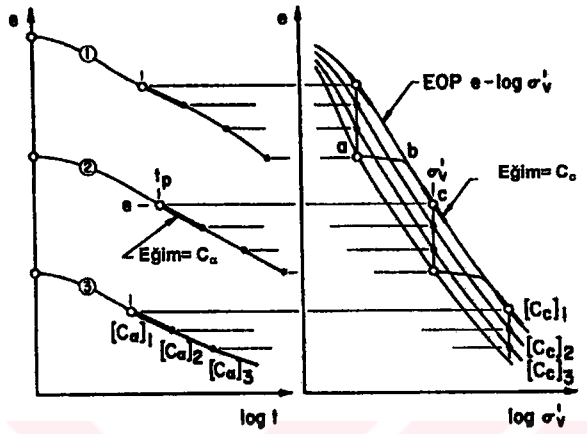
Hipotez A üzerinde Mesri ve Castro (1987), gerilme ve deformasyon kontrollu konsolidasyon deneyleriyle C_α/C_c kavramı üzerine detaylı araştırmalar yapmışlar ve ikincil sıkışma süresince zeminin K_0 davranışını incelemişlerdir (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8, (3.8), (3.9) ve (3.10) eşitlikleri). Konsolidasyon süresince C_c'nin sabit olmaması ve sürekli değişmesi nedeniyle $C_{c(ort)}$ kullanmanın doğru olmadığını ve sadece ikincil sıkışma sonucu için oluşan aşırı konsolidasyon oranının formülünü vermişler ve sonuç olarak ikincil sıkışmanın K_0 koşullarından etkilenmediğini belirtmişlerdir.

$$[C_\alpha]_1 > [C_\alpha]_2 > [C_\alpha]_3 \tag{3.8}$$

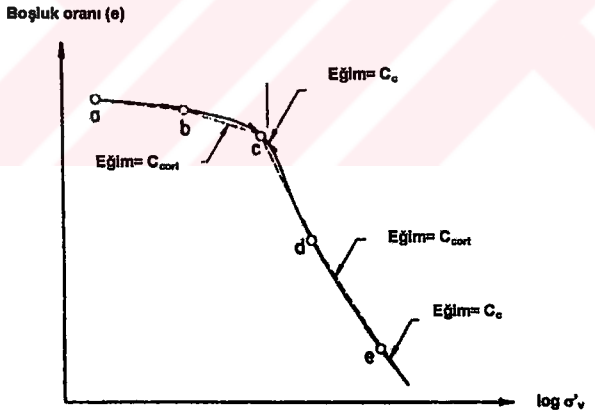
$$[C_c]_1 > [C_c]_2 > [C_c]_3 \tag{3.9}$$

$$\frac{[C_\alpha]_1}{[C_c]_1}=\frac{[C_\alpha]_2}{[C_c]_2}=\frac{[C_\alpha]_3}{[C_c]_3} \tag{3.10}$$

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



Şekil 3.7. Herhangi (e, σ'_v,t) İçin İkincil Sıkışma Süresince C_α ve C_c Hesaplanışı (Mesri ve Castro, 1987)



Şekil 3.8. σ'_p Dolayındaki Konsolidasyon Basınçlarında C_c ve $C_{c(ortalama)}$ Arasındaki Belirgin Değişim (Mesri ve Castro, 1987)

3.7.3.2 Hipotez B

Hipotez B yaklaşımında, killerin viskoz davranış gösterdiği ve bu nedenle tüm konsolidasyon prosesi boyunca şekil değiştirme hızı ve sıcaklıktan etkilendiği kabulü yapılmaktadır. Killerin ikincil sıkışma davranışını modelleyebilmek için yapılan

teorik, analitik, nümerik ve 25'den fazla reolojik model, aşağıdaki gibi dört reolojik gruba indirgenebilir:

$$R\left(\sigma_v^{'}, e\right) = 0 \tag{3.12}$$

$$R\left(\sigma_v^{'}, e, t\right) = 0 \tag{3.13}$$

$$R\left(\sigma_v^{'}, e, \dot{\sigma}_v^{'}, \dot{e}\right) = 0 \tag{3.14}$$

$$R\left(\sigma_v^{'}, e, \dot{e}\right) = 0 \tag{3.15}$$

$$\dot{\sigma}_v^{'} = {}^{\partial\sigma_v^{'}}\!/_{\partial t} \qquad\qquad \dot{e} = {}^{\partial e}\!/_{\partial t}$$

(3.12) nolu eşitlik klasik Terzaghi'nin Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisinin kabul ettiği lineer efektif gerilme-boşluk oranı ilişkisine karşılık gelmektedir. (3.13) nolu eşitlikle özetlenen reolojik modelde, boşluk oranının zaman ve efektif gerilmenin bir fonksiyonu olduğunu öngörülmektedir (Koppejan, 1948; Bjerrum, 1967 ve Hansen, 1969). Ancak, bu modelde de (özellikle uygulanan yükün zamanla değiştiği durumlarda) zamanın orjinini tam olarak kestirmek oldukça güçtür. (3.14) ve (3.15) nolu denklemlerle özetlenen reolojik modellerde, malzemenin davranışının güncel koşullara bağlı olduğu ve geçmişin bir fonksiyonu olmadığı öngörülmektedir. (3.14) eşitliğiyle verilen reolojik modelde, boşluk oranının değişim hızının efektif gerilme, boşluk oranı ve efektif gerilme değişim hızının bir fonksiyonu olduğu varsyılmaktadır (Gibson ve Lo, 1961). (3.15) nolu reolojik modellerde efektif gerilme, boşluk oranı, boşluk oranı değişim hızı arasında tekil bir ilişki olduğu ve e-σ'_v diyagramının $\dot{e} = {}^{\partial e}\!/_{\partial t}$ = sabit doğruları ile temsil edilebileceği kabul edilmektedir.

Yakın geçmişte çok daha karmaşık reolojik modeller de önerilmesine rağmen bu modellerin pek azı deneysel bulgulara veya laboratuvar çalışmalarına dayanmaktadır. Deneysel çalışmalarda, bir kısım araştırmacılar doğal killer (Crawford, 1964; Berre ve Iversen, 1972), bir kısım araştırmacılar ise laboratuvar konsolidometrede hazırlanmış killer (Smith and Wahls, 1969; Aboshi, 1973) üzerinde CRS aletiyle

deneyler yapmışlardır. Berre ve Iversen (1972), 0.74~17.7 inch arasında değişen numuneler üzerinde yaptıkları deneylerde, deney boyunca kenar sürtünmesi, boşluk suyu basıncı ve permeabiliteyi ölçerek drenaj yolunun sıkışma hızına ve boşluk suyu basıncı dağılımına etkisini incelemişler ve deney sonuçlarını Terzaghi, Gibson–Lo ve Barden'in modelleriyle karşılaştırarak killerin viskoz davranışına açıklık getirmeye çalışmıştır.

Graham, Crooks ve Bell (1983), hafif aşırı konsolide doğal killer üzerinde yaptıkları üç eksenli sıkışma, üç eksenli uzama, direkt basit kesme ve birçok diğer drenajlı deneylerle, killerin drenajsız mukavemeti ile önkonsolidasyon basıncının zamana bağlı olduğunu ve şekil değiştirme hızının, drenajsız kayma mukavemeti üzerine etkisinin zeminin plastisitesinden, deney tipinden ve laboratuvarda yeniden konsolide olması süresince gerilme geçmişinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, hafif aşırı konsolide doğal killerin belirgin bir zamana bağlı gerilme-şekil değiştirme karakteristiği sergilediklerini ve zemin cinsinden bağımsız olarak, drenajsız kayma mukavemeti ve önkonsolidasyon basıncının şekil değiştirme hızına katlarına bağlı olarak % 10-20 kadar değiştiğini belirlemişlerdir.

Leroueil ve diğ. (1985), dört tipteki ödometre aletleriyle (CRS, CGT, çok adımlı kademeli yükleme ve krip deneyleri) gerilme-şekil değiştirme-şekil değiştirme hızı ilişkisinin hassas doğal killer üzerine etkisini araştırmışlar ve killerin viskoz davranışı için tekil bir gerilme-şekil değiştirme-şekil değiştirme hızı ilişkisi olduğunu öngörmüşlerdir. Bu tekil ilişki (3.16) nolu denklemle gösterilmiş ve $\sigma'_v - \varepsilon_v - \dot{\varepsilon}_v$ ilişkisi (3.17) ve (3.18) nolu denklemlerle verilmiştir.

$$R(\sigma'_v, \varepsilon_v, \dot{\varepsilon}) \tag{3.16}$$

$$\sigma'_p = f(\dot{\varepsilon}_v) \tag{3.17}$$

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_p}(\dot{\varepsilon}_v) = g(\varepsilon_v) \tag{3.18}$$

Yin ve diğ. (1994a; 1994b), killerin konsolidasyon davranışını irdeleyen nonlineer, elastik, plastik veya elastoplastik modellerin zaman-bağımsız gerilme-şekil değiştirme modelleri içerdiğini ve şekil değiştirmelerinin daha sonra model içine

alındığını ve dolayısıyla yükleme sonrası artan boşluk suyu basıncının dikkate alınamadığını vurgulamışlar ve arazi gözlemlerine dayanarak drenajın henüz başlamadığı kesimde gevşemenin oluştuğunu ve bu durumun en iyi EVP modeli ile öngörülebildiği sonucuna varmışlardır.

3.7.3.3 Hipotez A ve Hipotez B 'nin Karşılaştırılması

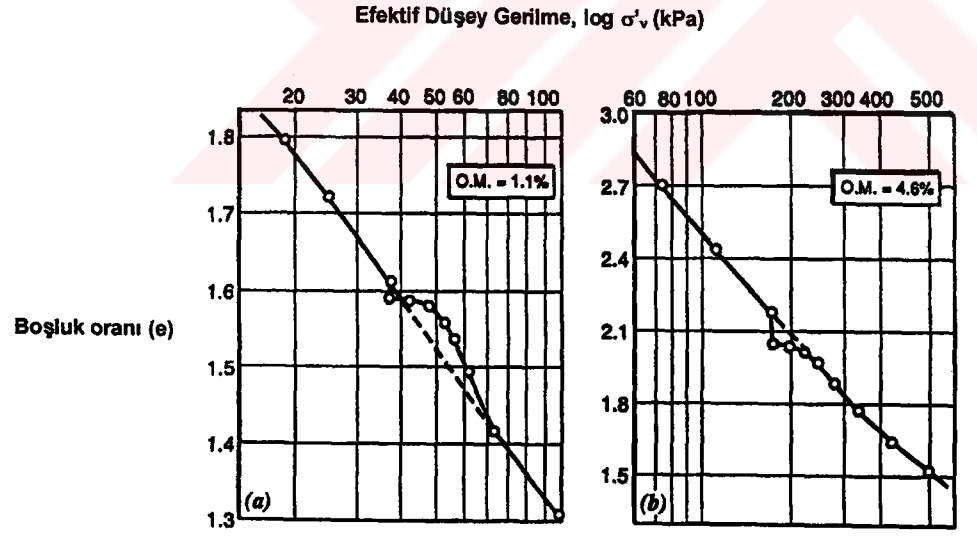
Daha önceki paragraflarda detayları verilen iki ekstrem yaklaşım temelde birbirinden farklı olmasına ve çoğu zaman farklı oturma değerleri hesaplamasına rağmen her iki yaklaşımın da dayandığı gerçekçi arazi ve laboratuvar deney bulguları mevcuttur. İki yaklaşım arasındaki farklılıklar, farklı kalınlıktaki farklı özellikteki numunelerin laboratuvar ortamında karşılaştırılmasından kaynaklanmaktadır. (a) Mesri ve Choi (1985)'nin işaret ettiği üzere, numune kalınlığının 20-500 mm arasında değiştiği deneylerde ince numunelerde örselenme miktarı oldukça yüksektir. (b) σ'_j gerilmesinden σ'_{j+1} gerilmesine çıkılırken gözlemlenen davranış esas olarak σ'_j yüklemesinin süresinden etkilenmektedir. (c) Boşluk oranı cinsinden farklılık gösteren numunelerde, boşluk oranındaki küçük bir farklılığın etkisi oldukça yüksektir.

Laboratuvar koşullarında ve arazide killerin davranışındaki farklılıklar, numune alma sırasında meydana gelen örselenmeyle açıklanmaktadır. Bu amaçla araziden farklı numune alma teknikleriyle alınan numuneler üzerinde yapılan deneysel araştırmalarda, %30 daha yüksek önkonsolidasyon basıncı ve daha az oturmalar hesaplanmıştır.

Aboshi (1973), Hiroşima körfez kili üzerinde yaptığı adımsal yüklemeli büyük boyutlu konsolidasyon deneylerinde 2, 4.8, 20, 40 ve 100 cm kalınlıklardaki normal konsolide kil numunelerde EOP konsolidasyonundaki şekil değiştirmelerin, kil tabakasının kalınlığının artmasıyla arttığını, ama bu artışın viskoz teoriyle öngörülen miktarlara ulaşmadığını belirlemiştir. Mesri ve Choi (1985), bu datayı yeniden değerlendirerek EOP şekil değiştirmesinin numune kalınlığından bağımsız olduğunu destekleyen bir bulgu olarak yorumlamışlardır. Ancak Tang ve Imai (1995) aynı datayı kullanarak, ince numunelerin 1 gün, kalın numunelerin ise 4 ay süreyle 19.6 kPa altında konsolide edildiğini ve gerilme-şekil değiştirme-şekil değiştirme

hızını modelleyen EVP viskoz modellerin gözlemlenen davranışla benzer sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

A ve B yaklaşımındaki farklılıkların bir diğer nedeni konsolidasyon sırasında daneler arasında doğan kuvvetler ile agregasyondur. Leonards ve Altschaeffl (1964)'ın yaptığı çalışmada ikincil konsolidasyon süresince, yoğrulmuş ve yapay olarak laboratuvarda hazırlanmış killerde, boşluk oranının azalmasıyla birlikte mukavemette ve önkonsolidasyon basıncında artış belirlenmiştir. Perret ve diğ. (1995), jeolojik yönden genç sedimanların diyajenezini inceleyerek killeri 200 mm çaplı hücrelerde yeniden sedimente ederek diyajenezin killerde bazı yapısal değişikliklere (danelerarası kuvvetlerin değişimi, agregasyon) yol açtığını vurgulamıştır. Bazı araştırmacılar ise çökelin depolanma hızının bu yapısal değişiklerin oluşmasında en önemli faktör olduğunu göstermiştir. Diğer yandan, organik malzeme miktarı ikincil konsolidasyon davranışını etkileyen bir başka önemli faktördür. Leroueil ve diğ. (1985) tarafından yapılan CRS deneylerinde 10^{-7} sn^{-1}'den daha büyük şekil değiştirme hızlarında viskoz etkinin belirgin olduğu vurgulanmıştır.



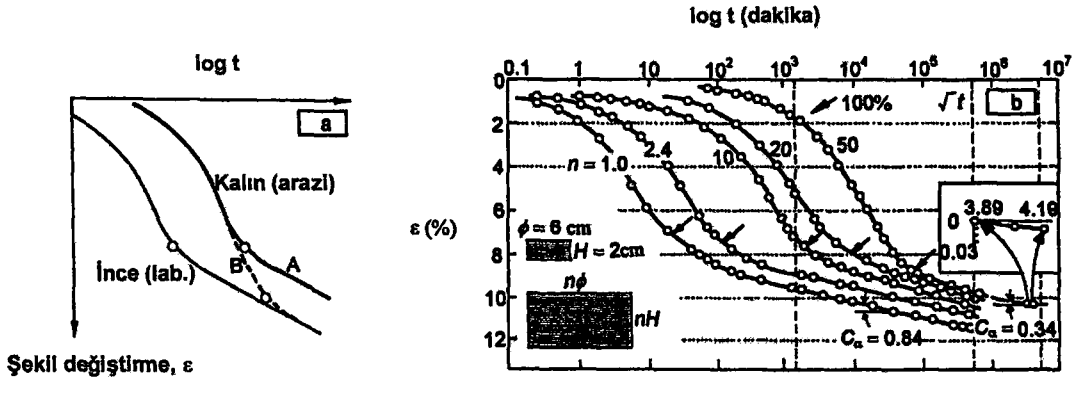
Şekil 3.9. 82 Günlük Yükleme Sonrası Saguenay Fjord Sedimanı Yapısına İkincil Konsolidasyonun Etkisi (Perret ve diğ., 1995)

Yapısal değişikliğe yol açan bir başka etki ise, laboratuvar ortamında 20°C'de çalışılması sonucu -arazide oluşmayan- bakterilerin üremesi ve kimyasal değişiklerin sonuçları etkilemesidir. Fazla yapısal değişiklik göstermeyen killerde oturma davranışı viskoz yaklaşıma (Hipotez B) yakındır. Ancak, zamanla veya düşük şekil

değiştirme hızlarında yapısal değişikliğe uğrayan killerde hesaplanan oturmalar EOP (Hipotez A)'ye yakın sonuçlar vermektedir.

Yapısal değişiklik zemini daha dayanımlı hale getirmekte ve laboratuvar ortamında büyük şekil değiştirme hızlarında viskoz modellerle hesaplanan oturmaların daha az hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu durum, EOP'ye göre hesaplanan boşluk oranının neden laboratuvarda hesaplanan ve arazide gözlemlenen oturma değerlerin üstüste düştüğünü açıklamaktadır. Ancak, yapısal değişiklik bir zeminden diğerine değişmekte, bazı killerde ise bu yapısal değişiklik ihmal edilebilir mertebelerde kalmaktadır. Bu koşullar altında gerçekte viskoz davranış gösteren killerin, Hipotez A ile EOP'ye göre hesaplanan boşluk oranının, numune kalınlığından bağımsız olarak yorumlanması süpriz olmamaktadır.

Aboshi (1973); Aboshi ve diğ. (1981) ve Aboshi (1995), tarafından sunulan çalışmalarda, gerçekte arazideki oturmaların ne Hipotez A, ne de Hipotez B'ye uymadığı, oturmaların her ikisi arasında oluştuğu deneysel olarak gösterilmektedir (Şekil 3.10). Aboshi, laboratuvarda ve arazide yapılan gözlemlere dayanarak (a) EOP'deki şekil değiştirmelerin tabaka kalınlığı arttıkça arttığını (muhtemelen birincil konsolidasyon süresince krip oturmalarının oluşması sebebiyle), aynı zamanda oturma hızının da bir miktar yükseldiğini (b) onlarca yıldan sonra zamanla ikincil konsolidasyonun 1/2~1/3 oranında azaldığını gözlemlemiş ve bu sonuçlara dayanarak konsolidasyon oturmalarının arazide Hipotez A ile Hipotez B arasında bir yerde oluşmasının bir göstergesi olduğunu vurgulamıştır.



Şekil 3.10. (a) Konsolidasyonun Hipotez A ile Hipotez B İle Modellenmesi (b) Büyük Boyutlu Konsolidasyon Aletiyle Farklı Kalınlıktaki Deneylerin Sonuçları (Aboshi ve diğ., 1981)

Genelde oturma hesaplarında Hipotez A düşük limiti, Hipotez B ise yüksek limiti vermekte gerçekte arazideki oturmalar ise her iki yaklaşım arasında meydana gelmektedir (Leroueil, 1995). Sonuç olarak, arazi koşulları altında zemin içinde gelişen yapısal değişiklikleri dikkate alan tek bir yaklaşım olmadığı gibi oturmalar her iki yaklaşımla da hesaplanabilmektedir. Ancak, her iki yaklaşımın arasındaki farklılıkların büyük olması durumunda mühendis, numunedeki örselenme, örselenme miktarı, oluşabilecek yapısal değişiklikler vs. faktörleri dikkate alarak kendince en uygun yaklaşımı seçmelidir. Pratik bir yaklaşım yöntemi Leroueil (1995) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.

1. Düşük sıkışabilirliğe sahip killerde ($C_c/1+e < 0.25$, $\Delta\varepsilon_s < \%\ 2.5$) 24 saatlik yükleme adımlarıyla yapılan klasik konsolidasyon deney datası EOP'ye göre çizilerek yorumlanabilmektedir.

2. Konsolidasyonu hızlandırmak için düşey drenlerin kullanıldığı durumlarda $\Delta\varepsilon_s$ oldukça küçüktür, dolayısıyla viskoz etki ihmal edilebilmektedir.

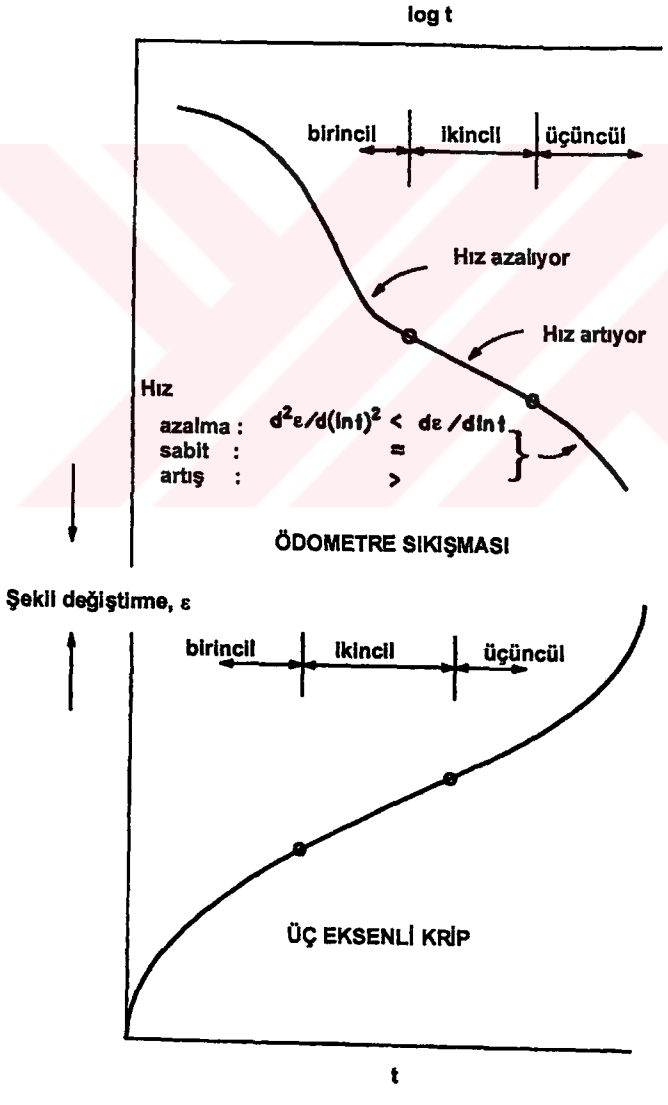
3. Yüksek sıkışabilirliğe sahip killerde ($C_c/1+e > 0.25$) veya önemli dolgularda viskoz etki dikkate alınmalıdır.

3.7.4 İkincil Sıkışma Sürecinde Oluşan Üçüncül Sıkışmalar

Literatürde, büyük oranda ikincil sıkışma yapan turbalarda ve bazı organik içerikli yumuşak kil zeminlerde -aynı efektif gerilme- altında ikincil sıkışma parametrelerinin zamanla arttığı, şekil değiştirme hızının zamanla azaldığı ve hatta turba zeminlerde karşılaşılan ve üçüncül sıkışma olarak nitelendirilen davranışı gösterdiği belirtilmektedir. Bu olgu, kimi araştırmacılar tarafından üçüncül sıkışma, kimi araştırmacılar tarafından ise laboratuvar ortamında uzun süreli deney yapma neticesinde ortaya çıkan kimyasal sebeplere (poroz kağıtın bozuşması, bakteriyal üreme v.b.) veya kilin kritik bir gerilme sonrası yapısının kırılmasına bağlanmıştır. Organik içeriğe sahip killerde görülen bu üçüncül sıkışma davranışı, tatmin edici teorik ve fiziksel açıklamalar gösterilemediği için araştırmacılar tarafından pek kabul görmemiştir.

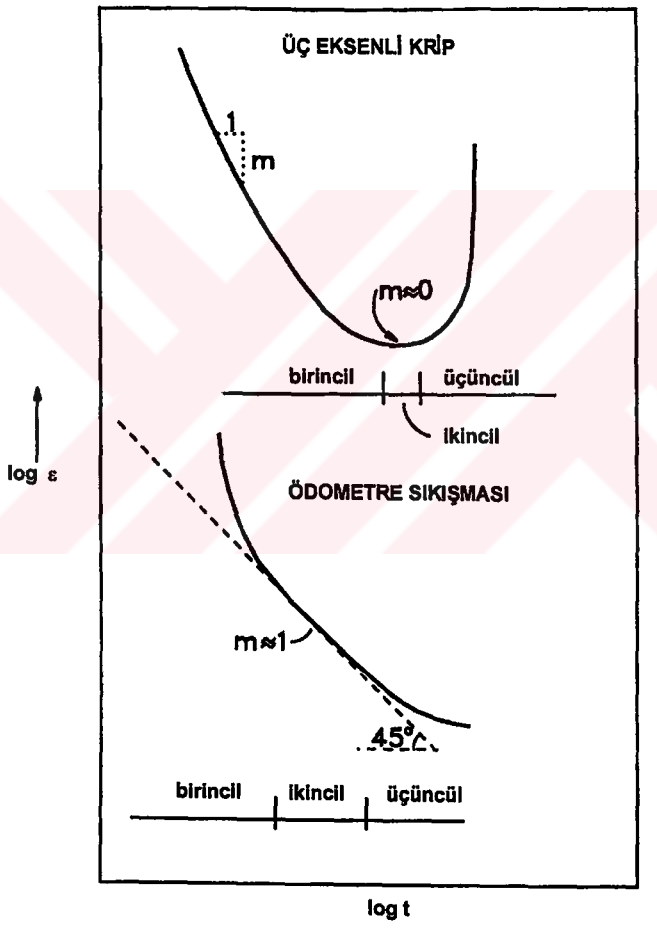
İkincil sıkışma peryodu boyunca e-log t eğrisinin eğiminin tekrar arttığı kısımı tarif için kullanılan "üçüncül sıkışma" terimi literatüre ilk kez, fibreli Wisconsin turbası

ve Portage turbası üzerinde yaptıkları çalışmalarla Edil ve Dhowian (1979); Dhowian ve Edil (1980) tarafından kazandırılmıştır. Araştırmacılar, dört tip turba zemin üzerinde yaptıkları uzun süreli konsolidasyon deneylerinde şekil değiştirme–log (zaman) eğrisinde, ikincil sıkışmaların başlayıp devam ettiği sürede e-log t eğrisi eğiminin tekrar arttığı ve şekil değiştirme hızının ivmelendiğini farketmişler ve bu olayı "üçüncül sıkışma" olarak adlandırıp konu üzerinde teorik çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır (denHaan ve El Amir, 1994a; denHaan ve Edil, 1994b; denHaan, 1994c; denHaan, 1994d; denHaan, 1995; Fox ve Edil, 1994, Edil ve Xiaadong, 1999; Edil, 1999).



Şekil 3.11. Ödometre ve Üç Eksenli Krip Deneyi ε_v-log (t) Grafiğinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Fazların Belirlenmesi

Ödometre deneyinde birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmanın, üç eksenli deneyde birincil, ikincil ve üçüncül kripin nasıl ayırt edileceği üzerinde mühendislerin kafası karışık olsa da, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de bu ayrım kesin ve net olarak görülmektedir. Konvansiyonel ödometre deneyi ile üç eksenli deney sonuçlarının tam logaritmik şekil değiştirme hızı-zaman eksenlerinde çizilmesi ve çizilen eğri üzerinde Sing-Mitchell denklemiyle verilen "m" parametresinin işaretlenmesiyle bu ayrımı yapabilmek mümkündür (den Haan, 1994d). Klasik e-log t eğrisinde ikincil sıkışma katsayısı (C_α), m = 1 durumuna karşılık gelmektedir. Üçüncül sıkışmanın başlangıcı, m değerinin az-çok 1.0 değerinden farklılaştığı kısımdır.



Şekil 3.12. Ödometre ve Üç Eksenli Krip Deneyi log (ε_v)-log (t) Grafiğinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Fazların Belirlenmesi

3.8 Konsolidasyon Davranışının Analitik Yöntemle İncelenmesi

Terzaghi 'nin Bir Boyutlu Konsolidasyon Teorisini yayınlamasından bu yana araştırmalar ikincil sıkışma üzerine yoğunlaştırılmıştır. İkincil konsolidasyon süreci boyunca ve birincil konsolidasyon süreci üzerinde viskozitenin etkisini açıklamakla beraber bu tür çalışmalarda iki sorun vardır. İlk yıllardaki bu iki sorun iki farklı yaklaşımla çözülmeye çalışılmıştır.

Bjerrum modeli üzerinde modifikasyonlar yapmak ve C_c, C_r ile C_α katsayıları kullanarak bünye denklemleri geliştirmek suretiyle birçok araştırma yapılmıştır. Diğer bir yaklaşım ise laboratuvar ortamında yapısal viskozitenin etkisini deneysel olarak izlemek olmuştur. Bu deneysel çalışmalar son yıllarda tüm konsolidasyon süresince viskozitenin etkisinin araştırılması ve viskozitenin etkisinin doğrudan izlenerek bünye denklemleriyle formüle edilerek analiz edilmesi yönüne kaymıştır.

Modern bilimde mühendislik öngörüleri birbirinden bağımsız, ama herbiri gerçeğe uygun ve bir diğerini güvenilirlik açısından destekleyen ve dengeleyen dört yöntemle yapılmaktadır (Imai, 1995). 1) Tüm mühendislik öngörüsünün temelini oluşturacak bünye denklemini seçmek, 2) Bünye denklemini çözecek malzeme sabitlerinin değerini belirlemek, 3) Arazideki başlangıç ve sınır koşullarına karar vermek, 4) Bünye denklemini nümerik olarak çözmek.

Bir malzemenin değişik mekanik davranışını açıklamak ve genelleştirilen bünye denklemini elde etmek için gerilme-şekil değiştirme-zaman ilişkisini tümüyle belirlemek ve malzemenin tekil davranışını temsil eden malzeme sabitlerinin nümerik değerlerinin deneylerle belirlenmesi gerekmektedir.

3.8.1 Sıkışma Karakteristiklerinin Reolojik Yöntemlerle Belirlenmesi

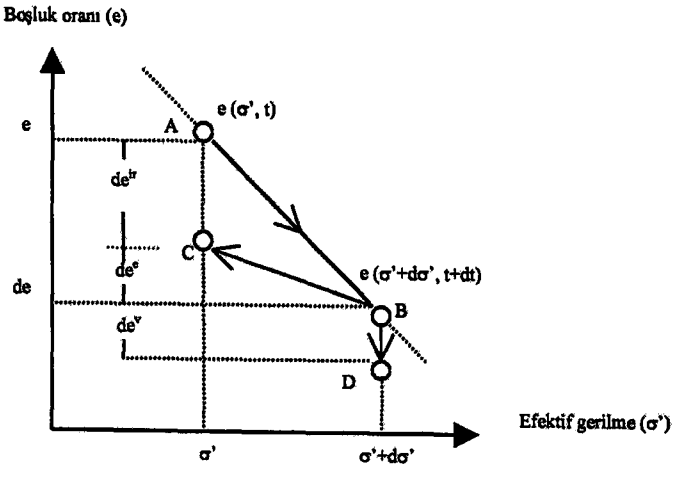
3.8.1.1 Elastisite, Viskozite ve Plastisite

Reolojide elastik, plastik ve viskoz sıkışma birbirinden farklı davranışları ifade etmektedir. Elastik davranış, gerilmedeki bir değişim çevrimi için zeminde meydana gelen sıkışmanın geri dönebilir olmasını ifade etmektedir. Viskoz davranış, sabit gerilme altında zamanla dereceli olarak meydana gelen şekil değiştirmenin geri dönüşümsüz olması veya hiçbir şekil değiştirme oluşturmadan zamanla dereceli

olarak meydana gelen ve geri dönemeyen gerilme değişimidir. Plastik davranış ise kritik gerilmeyi aşan bir gerilmede şekil değiştirmelerin geri dönülemez olmasıdır. Elastisite ve plastisite zamandan bağımsız, viskozite ise zamana bağımlı davranıştır.

Elastik sıkışmada, fabrikte çok az değişiklik oluşmaktadır ve bağlarda bozulma meydana gelmemektedir. Viskoz sıkışmada, bitişik daneler arasında geri dönülemeyen kayma hareketleri meydana gelmekte ve bu hareket mevcut bağları bozarak yeni bağlar oluşturmaktadır. Bu mekanizma plastik sıkışma için de benzer şekildedir, ancak viskoz sıkışmada danelerin kayma hareketi zaman-alıcıdır ve fabrikte dereceli olarak değişiklik yapmaktadır. Halbuki, plastik davranışta yenilme gerilmesinde fabrikte ani bir değişiklik olmaktadır (Imai, 1995).Şekil 3.13'te AB ile gösterilen proses, geri dönebilen sıkışma-de^{r}, ile geri dönemeyen sıkışma- de^{ir} bileşenlerini kapsamaktadır. İki bileşen deneysel olarak birbirinden geri dönen gerilmeyi B'den C'ye taşımasıyla ayırt edilebilmektedir. Ancak AB prosesi boyunca viskoz ve plastik sıkışma arasındaki fark belirlenememektedir. Çünkü, zamandan bağımsız plastik bileşen zamana bağımlı konsolidasyon deneyi ile ölçülmektedir.

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



Şekil 3.13. Sıkışma Bileşenleri (geri dönemeyen sıkışma- de^{ir}; AB boyunca dönebilen elastik sıkışma-de^{e}; sabit gerilme altında geri dönemeyen viskoz sıkışma-de^{v}) (Imai, 1995)

3.8.1.2 Elasto-Viskoz İskeletin Adımsal Sıkışması

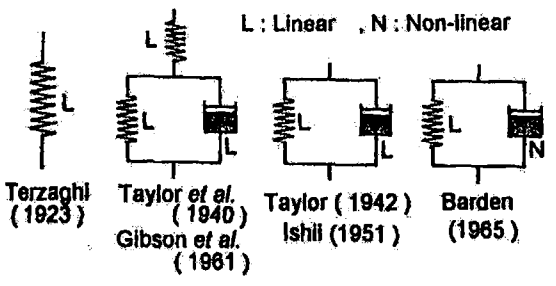
AB prosesi boyunca elastik ve viskoz sıkışma meydana geldiğine göre, geri dönüşümsüz adımsal sıkışma-de^{ir} , tümüyle viskoz- de^{v} ile geri dönüşümlü elastik-de^{e} sıkışmanın toplamına eşit olmaktadır. Viskoz sıkışma, sabit bir gerilme altında dt boyunca oluştuğu ve elastik sıkışma ise gerilmedeki bir değişim-$d\sigma'$ sonucu meydana geldiği için boşluk oranındaki toplam değişiklik, aşağıdaki gibi olacaktır. İlk terim elastik, ikinci terim ise viskoz davranışı ifade etmektedir. Eğer viskoz davranış oluşmuyorsa ikinci terim düşecektir ve bu durumda sıkışma zamandan bağımsızdır. BD prosesi boyunca ise hiçbir elastik sıkışma oluşmamaktadır. Çünkü, efektif gerilmede bir değişiklik oluşmadığı için (3.12) eşitliği geçersiz olmaktadır.

$$de = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'}\right)_t d\sigma' + \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\sigma'} dt \qquad (3.19)$$

3.8.1.3 Reoloji Modellerine Dayanan Bünyesel İlişkiler

Şekil 3.15'te gösterilen tipik bünye ilişkilerinde zemin iskeletinin sıkışabilirliği, elastisite, plastisite ve viskozite, yaylar, yağ potaları ve kayıcı mesnetlerle açıklanmaya çalışılmıştır. L=lineer, N=nonlineer davranışı ifade etmektedir. Lineer elastisite $de^{e} \propto d\sigma'$, lineer viskozite ise $(de^{v}/dt) \propto \sigma'$ anlamında kullanılmaktadır.

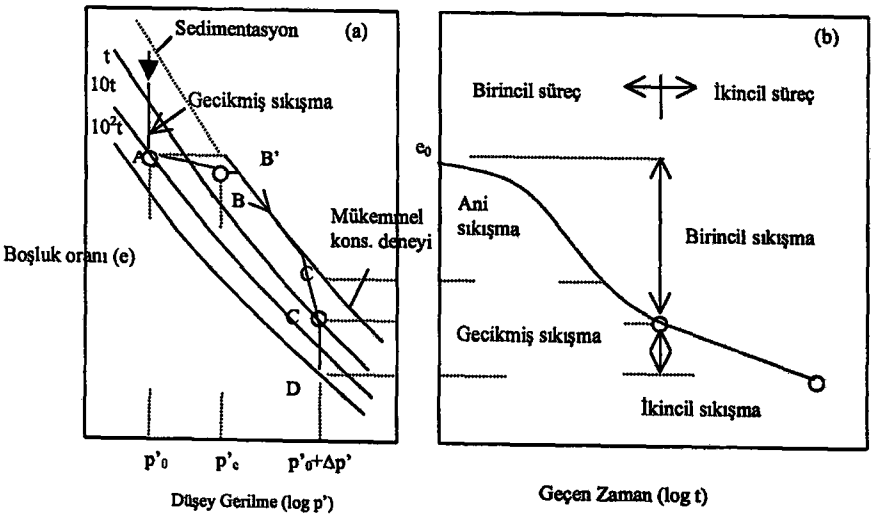
Terzaghi (1923), Şekil 3.14'te gösterildiği üzere AB prosesinde $de^{e} \propto d\sigma'$ lineer ilişkisini önermiştir. Ancak bu modelin tam elastik olduğu kabul edilirse, AB sıkışma ve BC boşaltma aşamasında tekil bir sıkışma modulü olmalıdır. Halbuki, bilindiği üzere günümüzde yüklemede C_c, boşaltmada C_s ve yeniden yüklemede C_r modülleri kullanılmaktadır. Bu yüzden Terzaghi modeli ne lineer elastik, ne de nonlineer elastik model olarak sınıflandırılamamaktadır. Bjerrum'un modeline kadar zeminin C_c, C_r ile C_α gibi sıkışma katsayılarını modellemeyi başaran reolojik modeller geliştirilememiştir. AB prosesi elastik ve plastik sıkışmaların toplamı gibi düşünülebilir. Ancak, pekleşmenin olması için geçerli neden yoktur ve elastoplastik modellerle AB'yi doğru yorumlamak imkansızdır çünkü bu modeller zamandan bağımsızdır. AB prosesi, elasto-viskoz modellerle ifade edilmeye çalışıldığında şekil değiştirme pekleşmesi viskozite ile kolayca açıklanabilmekte, birincil ile ikincil konsolidasyon boyunca zemin iskeletindeki farklılık ifade edilebilmektedir.



Şekil 3.14. Tipik Bünye İlişkileri (Imai, 1995)

3.8.2 Bjerrum Modeli ve Bjerrum Modelinin Geliştirilmesi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bjerrum (1967), aniden olan tekil sıkışma eğrisi (sedimentasyon eğrisi veya mükemmel konsolidasyon deney eğrisi) ile kil tabakasının sedimentasyondan sonra eş zamanlı paralel sıkışma eğrileri ile karakterize eden bir model geliştirmiştir. Bu model, genç ve yaşlı normal konsolide killeri ilk öngören ve dikkate alan modeldir (Şekil 3.15). Bjerrum, ikincil sıkışma sebebiyle oluşan görünür aşırı konsolidasyon olgusuna dikkat çekmiş, paralel eş zaman sıkışma eğrisinin varlığını ve dolayısıyla C_α'nın gerilme seviyesinden bağımsız olduğunu öngörmüştür. Model, C_c, C_r ile C_α sıkışma katsayıları gibi günümüz mühendislerinin aşina olduğu malzeme sabitlerini kullanarak konsolidasyon davranışını açıklamaya çalıştığından günümüz reolojik modellerinin çoğu Bjerrum modelinin geliştirilmesine dayanmaktadır.



Şekil 3.15. Bjerrum Modeli (a) Bir Zemin Tabakasındaki Konsolidasyon Prosesi (b) Birincil ve İkincil Sıkışma, Birincil ve İkincil Kısım ile Kendiliğinden ve Gecikmiş Sıkışma Arasındaki Farklılıklar (Imai, 1995)

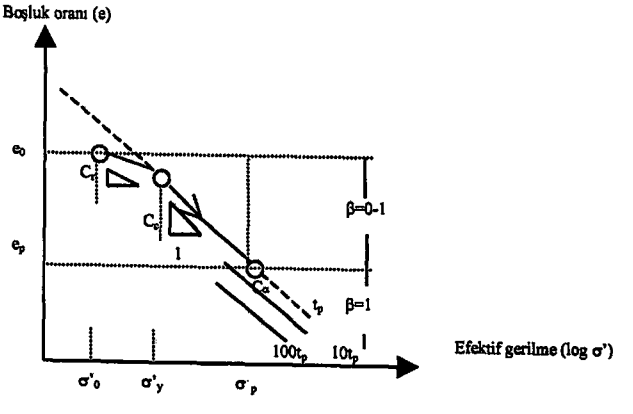
Garlanger (1972), Bjerrum modelini geliştirerek matematiksel bir baza oturtmuştur. Garlanger, kil tabakasındaki herhangibir noktanın AB'C'D yolunu izlediğini ve AB'=elastik davranış (C_r), B'C'=elasto-plastik davranış (C_c) ve C'D=viskoz davranış (C_α) sergilediğini göstermiştir. Ancak bu modelde AB'C' birincil konsolidasyon süresi boyunca viskozite dikkate alınmamaktadır. Mesri ve Rokhsar (1974), AB'C'D prosesi boyunca viskozitenin etkisini dikkate alan çalışmalar yapmışlar ve konsolidasyonun başlangıcından itibaren şu şekilde bir ilişki öngörmüşlerdir.

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\sigma'} = -\frac{0.434\beta C_\alpha}{t} \tag{3.20}$$

$$\beta = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_p} \tag{3.21}$$

(3.20) denklemi, (3.19) denkleminin ilk kısmına karşılık gelmektedir, yani final gerilmede-σ'_f ölçülen C_α zamanla sabit olarak kabul edilmektedir, β ise sıkışma derecesidir (Şekil 3.16). Şekil 3.16'daki gerilme izi Garlanger modeli ile üstüste düşmesine rağmen viskoz sıkışma, birincil konsolidasyon süresi ile β ve bilinen C_α'nın artmasıyla belirlenen hızdaki ikincil konsolidasyon adımında dikkate alınmaktadır. Bu açıdan bu model yeterince tatmin edici kabul edilmektedir.

Günümüzde yukarıdaki paragraflarda anlatılan modellerden daha karmaşıkları da önerilmesine rağmen hala yaygın olarak kabul gören tek bir reolojik model geliştirilememiştir. Sıkışabilirlik üzerine yapılan deneysel çalışmalar yaygın olarak kabul görmekte ve kullanılmaktadır.



Şekil 3.16. Gerilme İzi (Mesri ve Rokhsar, 1974)

4. YÖNTEM

4.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinin inşa edildiği sahada bulunan "yumuşak" kıvamlı mavi kil zeminden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyleri konu edilecektir. Bu deneylerle yumuşak mavi kilin ikincil sıkışma davranışı araştırılmıştır. Deneyler, uçuş pistinin KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki kesiminde yapılan üç adet sondaj ile çok sayıda araştırma çukurundan alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılmıştır. Sondajlardan Shelby tüpleriyle, araştırma çukurlarından ise silindirik, ince cidarlı çelik borularla alınan örselenmemiş kil numunelerinde, zeminin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla kıvam, elek, hidrometre, dane birim hacim ağırlığı deneyleri; zeminin kimyasal ve minerolojik içeriğini belirleyebilmek için DTA, TG, X-Ray, kimyasal içerik analizleri yapılmış; taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) örselenmemiş kil numunelerinden görüntü alınmış ve İ.T.Ü. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda, klasik konsolidasyon deneyleri ve sabit gerilme altında uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada, zemin yüzeyinden 9.50m, 7.50m, 4.50m ve 3.50m derinliklerden alınan farklı örtü yükleri altında konsolide olmuş genç normal konsolide kil zemin numuneleri üzerinde, farklı konsolidasyon basınçları altında 1 hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde uzun süreli yükleme yapılarak yumuşak kil zeminin ikincil sıkışma davranışı araştırılmıştır. Ayrıca, zemin yüzeyinden 3.5 m derinlikten alınan ve sabit gerilme altında uzun süreli konsolidasyona terkedilen kil numuneler özel yöntemlerle kesilip kurutularak taramalı elektron mikroskopu (SEM) altında incelenmiş birincil ve ikincil sıkışma süresince kil zeminin fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler araştırılmıştır. Aşağıdaki paragraflarda, bu çalışmada kullanılan yumuşak mavi kil zeminin özellikleri, izlenen deney programı, deney düzeni ve deneylerin yapılışı anlatıldıktan sonra deneylerden elde edilen sonuçlar irdelenenip yorumlanmıştır.

4.2 Malzeme

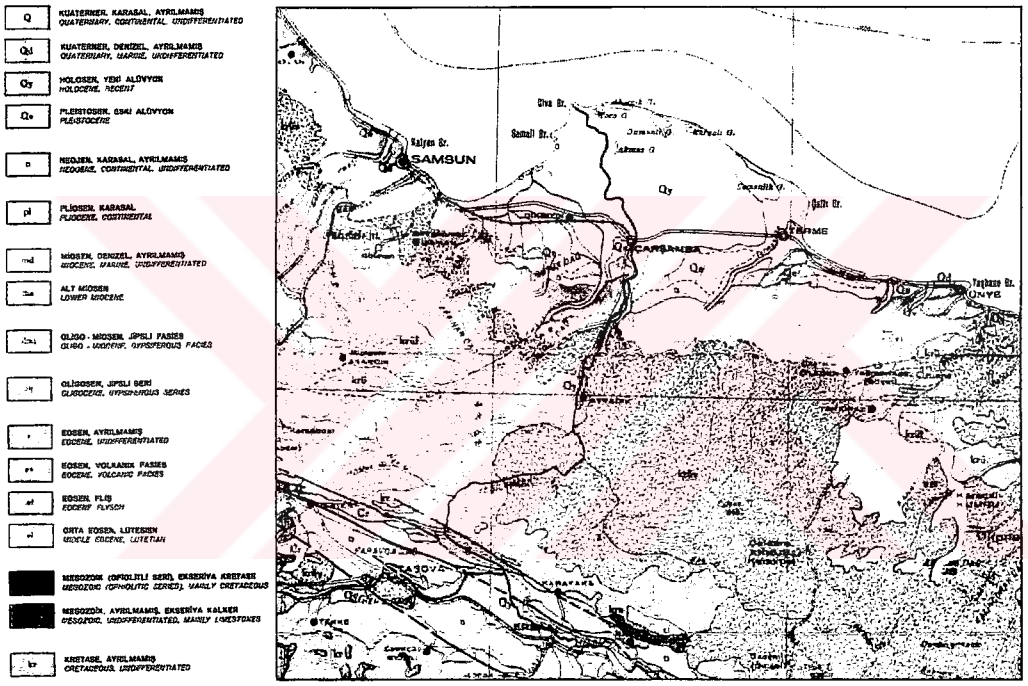
Bu tez çalışması kapsamında yapılan konsolidasyon deneyleri ve SEM analizlerinde kullanılan kil numuneler, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinin KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki kesiminde yapılan test dolgusu ve önyükleme dolgusunun yapıldığı sahaya yakın bir lokasyondan alınmıştır. Deneylerde kullanılacak kil zemini temin etmek üzere, Samsun Çarşamba Havaalanında 3 adet sondaj ve farklı tarihlerde 9 adet araştırma çukuru açtırılmış ve farklı derinliklerden örselenmemiş kil numuneler alınmıştır. Aşağıdaki paragraflarda, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinin KM 0+000 ile KM 0+500 arasında yapılan zemin araştırmaları ve tez çalışması kapsamında deneye tabi tutulan kil zeminin alındığı bölgenin genel jeolojisi anlatılmıştır.

4.2.1 Samsun-Çarşamba Havaalanı Sahasının Jeolojisi

MTA tarafından 1974'te Samsun ve civarında yapılan araştırmalarda, bölgenin 1/500 000'lik jeolojik haritası hazırlanmış ve jeolojik formasyonlarla ilgili detaylı açıklamaları içeren bir kitapçık hazırlanmıştır (Göksu, 1974). Araştırmaya göre, Karadeniz sahili boyunca Üst Kretaseye ait fliş fasiyesinin hakim olduğu filiş tabakaları içinde bolca volkanitlerin olduğu, andezit-bazalt lavları, tüf gibi birimler yanında asit lavların izlerinin de görüldüğü belirtilmiştir. Karadeniz sahil şeridinde kuzey yamaçlarda içinde volkanik malzeme içeren Eosen sedimentlerinin bulunduğu, Kızılırmak ve Yeşilırmak vadilerinin ağız kısımlarında konglomera, kumtaşı, kil ve marnlardan ibaret karasal fasiyeste Neojen çökellerin de bulunduğu belirtilmektedir. Ünye'nin batısında fosilli Kuvaterner depolarını örten kil, çakıl ve kumların eski alüvyonları oluşturduğu ve Yeşilırmağın meydana getirdiği büyük deltalarda ise eski ve yeni alüvyonlar bulunduğu belirtilmektedir (Göksu, 1974; Erkal, 1995). Şekil 4.1'de MTA'nın yayınladığı Samsun ve civarının 1/500 000'lik jeolojik haritası gösterilmiştir.

DSİ'nin Yeşilırmak Deltasında yaptığı çalışmalara göre, Çarşamba Ovasında alüvyon kalınlığı yer yer 110 m'ye ulaşmaktadır. Güneydeki sıradağlardan deniz kıyısına yaklaştıkça alüvyon kalınlığı artmakta, buna karşılık dane boyutu küçülmektedir.

1996'da Samsun-Çarşamba Havaalanı ile ilgili hazırlanan geoteknik değerlendirme raporunda Samsun-Çarşamba Havaalanının inşa edileceği alan ve çevresinin Kuvaterner alüvyonları ile temsil edildiği Yeşilırmak, Terme Çayı ve Abdal Deresi ile diğer yan derelerin taşıdığı malzemenin deniz içindeki neojen çukurluklarda birikmesi sonucu Çarşamba Deltası Ovasının oluştuğu belirtilmiştir. Düşey kesitte alüvyonun gömülü yataklar boyunca kum, çakıl gibi iri, taşkın sahalarında ise kil, silt ve ince kumlar gibi ince malzemelerden oluştuğu ve güneydeki ovada iri, kuzeydeki ovada ise ince elemanların akarsular tarafından taşınması sonucu biriktirildiği ifade edilmektedir (Sağlamer, 1996).



Şekil 4.1. Samsun Civarının Jeolojik Haritası

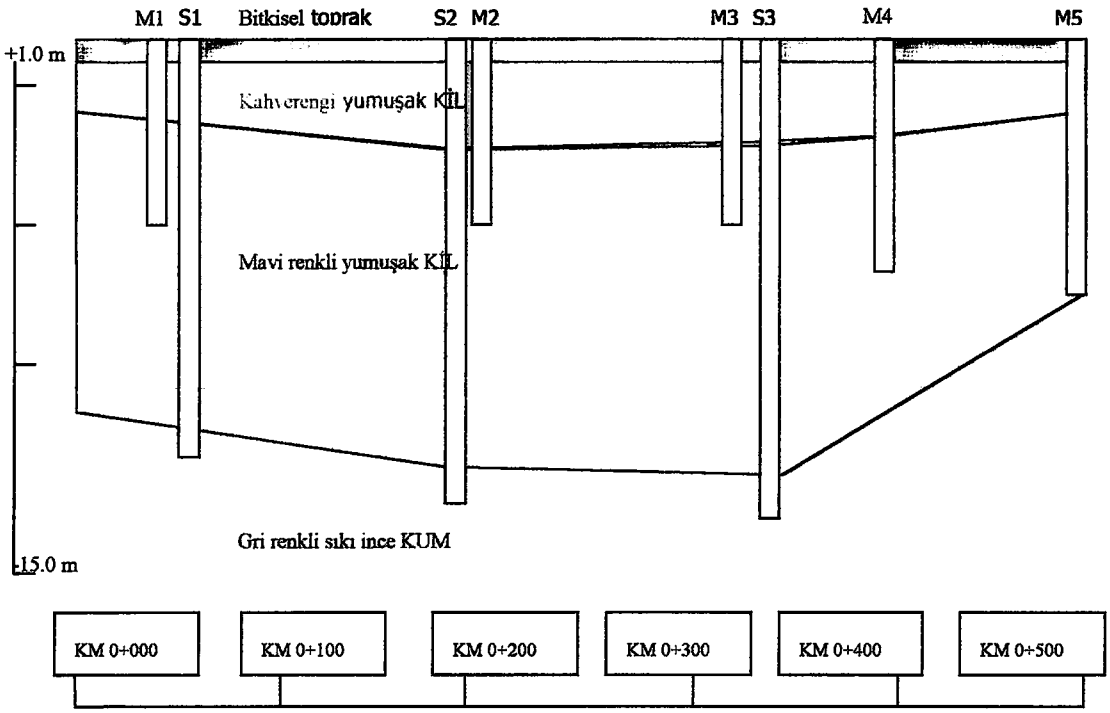
4.2.2 Zemin Profili

Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pisti KM 0+000 ile KM 0+500 arasında güncel arazi yüzeyi kotları +1.50m ile +2.00m arasında değişmektedir ve yeraltı su seviyesi yaklaşık zemin yüzeyindedir Zemin yüzeyinde bulunan bitkisel toprak tabakası genelde 0.50 m kalınlıktadır. Bitkisel toprak tabakasını takiben karşılaşılan kahverengi kil birimi ise çoğunlukla 2.00 m derinliğe kadar devam etmektedir. Bu kohezyonlu birimin yüzeye yakın olan seviyeleri çok katı-katı, derinlemesine katı-orta katı kıvamdadır. Araştırma çukurlarında yapılan tork vane ve cep penetrometresi deneyleriyle, kahverengi kilden alınan örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan

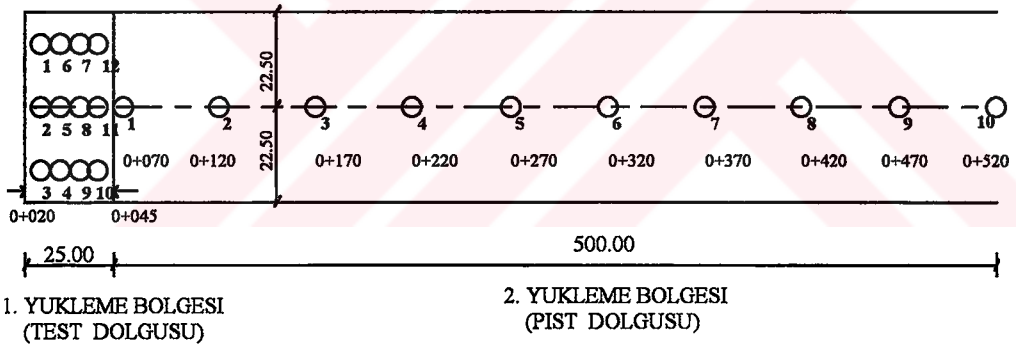
serbest basınç deneylerinde drenajsız kohezyon için s_u = 75-80 kPa değerleri belirlenmiştir. Havaalanı sahasında, kahverengi kil tabakası altında yumuşak kıvamda gri-mavi kil tabakasıyla karşılaşılmaktadır. Sahanın Karadenize yakın olan kesimlerinde oldukça kalın olan mavi kil tabakası, karayoluna doğru sığlaşmakta veya tümüyle kaybolmaktadır. Bu kohezyonlu birim genelde deniz yosunlarından oluşan turba tabakasıyla ardalanmalı bulunmaktadır. Yüksek plastisiteli olan gri-mavi kil tabakasında doğal su içerikleri genelde likit limit dolayındadır. Mavi kil ve turba tabakalarının altında siyah renkli sıkı kum istifi yer almaktadır.

Samsun Çarşamba Havaalanı Sahasında Yapılan Zemin Araştırmaları

Samsun-Çarşamba Havaalanı, Samsun-Çarşamba karayolunun 25. kilometresinde, karayolu ile Karadeniz arasında kalan geniş bir delta düzlüğünde, kalınlığı yaklaşık 100 m dolayında olan bir alüvyon istifi üzerinde inşa edilmektedir. Pistin deniz tarafındaki ilk 500 m'lik bölümünde karşılaşılan yumuşak kil ve turba zeminlerin, pistin geri kalan 2500 m'lik bölümünde bulunmadığı belirlenmiştir. Bu maksatla, yumuşak zeminin en kalın olduğu pist başında ve elverişsiz zemin koşullarının tespit edildiği ilk 500 m uzunluktaki pist bölgesinde sondajlar ve araştırma çukurları açılarak örselenmemiş numuneler alınmıştır. Deneylerde kullanılacak kil zemini temin etmek üzere, Samsun Çarşamba Havaalanında 24/6/1998~27/6/1998 tarihleri arasında, sırasıyla 13.5 m, 15.0 m ve 15.5 m boyda, KM 0+050, KM 0+200, KM 0+350'de 3 adet sondaj yapılmıştır. Sondajlar sırasında 9.6 cm çaplı tüp numune alıcılarla yumuşak mavi kil tabakasından örselenmemiş numuneler alınmıştır. Ayrıca üçü sondaj kuyuları yanında ve diğer ikisi de KM 0+400 ve KM 0+450'de olmak üzere toplam 5 adet araştırma çukurundan, farklı derinliklerden 20-30 cm çaplı çelik borularla blok numuneler alınmıştır (Şekil 4.4). 3 adet sondajdan ve açılan 5 adet araştırma çukurundan alınan blok numuneler üzerinde bu teze konu olan konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, yumuşak mavi kilin minerolojisini ve kimyasal içeriğini belirleyebilmek için yeni numuneler alınması gerekmiş ve bu amaçla Nisan 1999'da Samsun-Çarşamba Havaalanında 4 araştırma çukuru daha açılarak silindirik çelik borularla blok numuneler alınmıştır. Yumuşak kıvamlı mavi kil zemin, araştırma çukurlarından 20 cm çapında 25 cm yüksekliğinde çelik silindirik kalıplarla alınmıştır (Şekil 4.5). Alınan numunelerin su içeriğini değiştirmemesi için numune alıcıların alt ve üstleri parafinlenerek poşetlenmiş ve



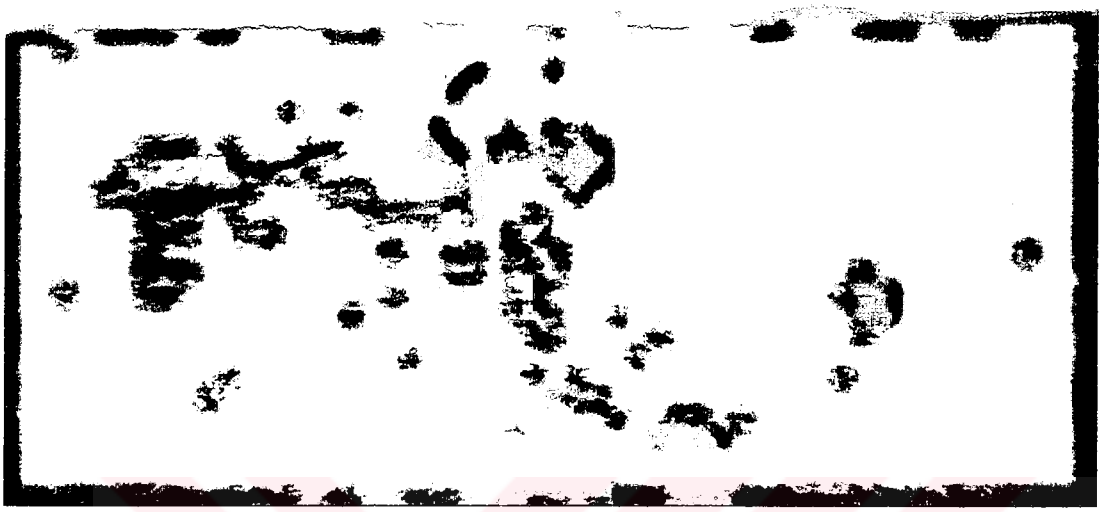
Şekil 4.2. Samsun-Çarşamba Havaalanı Uçuş Pisti KM 0+000 ~ KM 0+500 Arası Zemin Profili



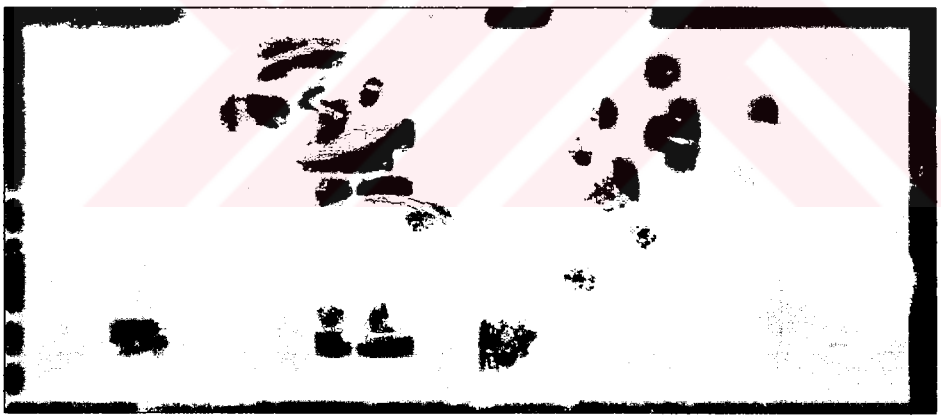


Şekil 4.3. Samsun-Çarşamba Havaalanı Uçuş Pisti Yanındaki Sondaj Kuyuları ve Araştırma Çukurlarının Vaziyet Planı (Şematik)

vakit geçirilmeden İTÜ Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarındaki nem odasına götürülmüştür. Numuneler deney anına kadar nem odasında saklanarak su muhtevasının değişmemesi sağlanmıştır.



Şekil 4.4. Araziden Çelik Silindirik Borularla Numune Alınması



Şekil 4.5. Çelik Silindirik Borularla Alınan Örselenmemiş Numunelerin Hazırlanışı

4.2.4 Samsun-Çarşamba Mavi Kilinin Mühendislik Özellikleri

4.2.4.1 İndeks Özellikleri

Samsun-Çarşamba mavi kilinin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla su muhtevası, kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlığı, elek ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Tüm deney gruplarında çalışılan farklı derinlikler için zeminin indeks özellikleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan indeks deneylerine göre, zemin

Tablo 4.1. Zeminin İndeks Özellikleri

Sondaj/Araştırma Çukur No	Derinlik (m)	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	I_C (%)	I_L (%)	γ_s (kN/m^3)	w_n (%)
S1	9.50	82	28.3	53.7	0.34	0.65	27.6	64-67
S1	7.50	72	29.4	42.7	0.19	0.81	28.0	64
S3	4.50	67	29.3	37.7	0.19	0.81	27.2	60-64
A1	3.50	63	27.8	35.2	0.09	0.91	27.4	60-63

Tablo 4.2. Deneylerde Kullanılan Numunelerin İçerikleri

Lokasyon	Derinlik (m)	Silt (%)	Kil (%)	Organik Madde (%)	Aktivite A (%)
S1	9.50	75.99	22.78	1.24	2.35
S1	7.50	75.09	23.88	1.03	1.78
S3	4.50	80.94	17.86	1.20	2.11
A1	3.50	60.9	37.6	1.46	0.94

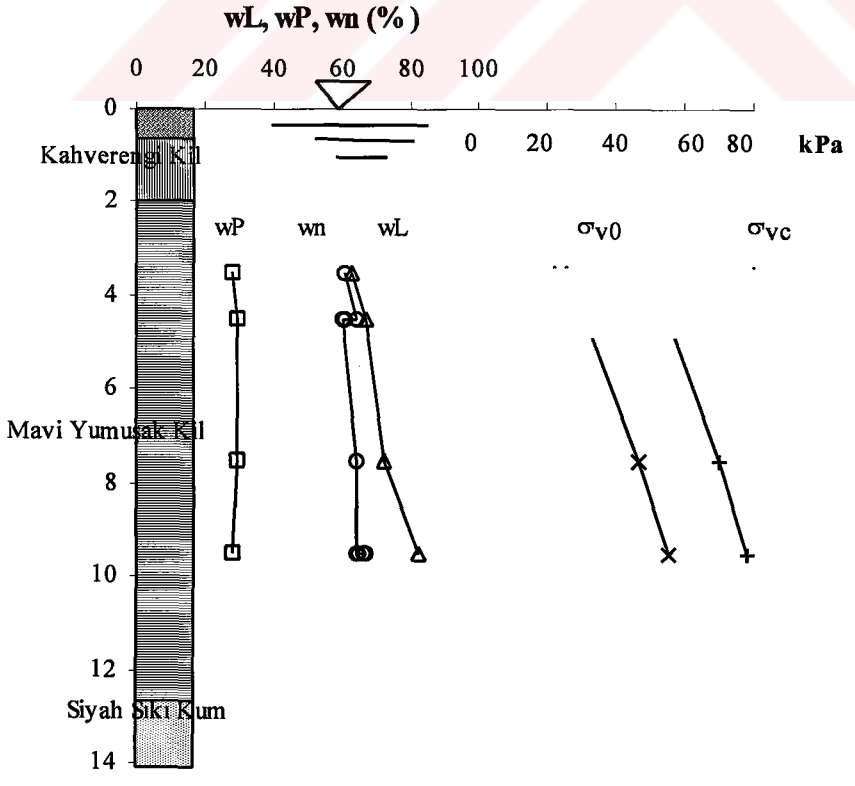
yüzeyinden sırasıyla 9.50m, 7.50m, 4.50m ve 3.50m derinliklerden alınan yumuşak mavi kil zeminin doğal su muhtevaları, kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlıkları, kıvam ve likitlik indisleri Tablo 4.1'de, elek ve hidrometre analizinden belirlenen dane dağılımı ve aktiviteleri Tablo 4.2'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1'den görülebileceği gibi, bu tez çalışmasında kullanılan zemin numuneleri birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre yüksek plastisiteli kil olup, Casagrande kartında A hattının üzerinde bulunmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan zeminlerin kıvam indisleri (I_C) ve likitlik indisleri (I_L) incelendiğinde; zemin yüzeyinden 9.50m derinden alınan numunelerin kıvam indisi $I_C > 0.25$ olup mavi kil zemin "yumuşak" kıvamdadır. Zemin yüzeyinden 7.50m; 4.50m ve 3.50m derinden alınan numunelerin kıvam indisleri ise $0 < I_C < 0.25$ aralığında olup bu derinliklerden alınan mavi kil zemin "çok yumuşak" kıvamdadır.

Benzer şekilde, tüm zemin numunelerinde likitlik indisi $0 < I_L < 1$ olup mavi kil zemin plastik durumdadır. Ancak tüm zemin numunelerinin likitlik indisleri 1'e oldukça yakın olup kil zeminin kıvamının likit duruma yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2'de hidrometre deneyi sonuçları özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan kil numuneler üzerinde yapılan elek analizlerinde kum-çakıl boyutunda kaba daneli zemine rastlanılmamış olup 200 nolu elek üzerinde sadece koyu kahverengi renkli, deniz yosunlarından oluşan organik malzeme bulunmuştur. Elek ve hidrometre analizlerine göre deneylerde kullanılan zeminde organik madde miktarı ağırlıkça %1.50'yi geçmemektedir ve numunelerin aktiviteleri $A = 0.94 - 2.35$ arasında değerler almaktadır. Zemin yüzeyinden 9.50m, 7.50m ve 4.50m derinden alınan numunelerin aktiviteleri $A > 1$ olup zeminin oldukça aktif olduğu, dolayısıyla kil boyutlu danelerin zeminin özelliklerine etkisinin oldukça fazla olduğu görülmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan deneylerde kullanılan yumuşak mavi kilin bileşim özelliklerinin tayini için İ.T.Ü. Kimya-Metalürji, Fen-Edebiyat ve Maden Fakültelerindeki çeşitli laboratuvarlarda malzemenin kimyasal içerik analizi, DTA, TG, X-Ray ve İnfra-Red Analizleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen veriler ışığında önemli miktarda ikincil sıkışma davranışı gösteren yumuşak mavi kil zeminin minerolojik ve bileşim özellikleri belirlenerek zeminin bileşiminin sıkışma davranışına etkisi araştırılmıştır.



Şekil 4.6. Zeminin Indeks Ozelliklerinin Derinlikle Değişimi

4.2.3.2 Kimyasal İçerik Analizi

Yumuşak mavi kil zeminin kimyasal bileşimini belirleyebilmek için Kimya-Metalurji Fakültesinde kimyasal içerik analizleri yapılmıştır. Örselenmemiş ve havada kurutulmuş kil numunesinin öncelikle nemi (geoteknik mühendisliği terminolojisinde su muhtevası) belirlenmiş, ardından numune 1000 °C'ye kadar ısıtılarak kızdırma kaybı bulunmuştur. Kızdırma kaybıyla, malzeme içindeki Ca, Mg, Na ve K-karbonatlar, kükürtler vb. organik içeriklerin miktarı belirlenebilmiştir. Ardından malzeme, HF(hidrojenflorür) + $HClO_4$(perklorikasit) + HNO_3(nitrikasit) karışımı ile parçalanarak diğer organik malzemelerden arındırılmış ve deneye tabi tutularak malzeme içindeki kimyasal içerikler tayin edilmiştir. Tablo 4.3'te kimyasal içerik analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.3'te, hiçbir gerilmeye maruz kalmamış ve önce havada daha sonra etüvde 60°C'de kurutulmuş numune üzerinde yapılan SEM analizi sırasında numunede belirlenen elemental analiz sonuçları da gösterilmiştir. Tablo 4.3'ten görülebileceği üzere gerek kimyasal içerik analizi ve gerekse SEM analizleri sırasında yapılan elemental analiz sonuçları birbirleriyle

Tablo 4.3. Kimyasal İçerik Analizi Sonuçları

Numune İçindeki Elementler	Elementler Cinsinden (%)	Numune İçindeki Oksitler	Oksitler Cinsinden (%)	SEM Analizi Sırasında Yapılan Elemental Analiz (%) (*)
K	1.45	K_2O	1.75	3.52
Na	0.17	Na_2O	0.23	0.91
SiO_2	46.9	SiO_2	46.9	48.97
Ca	4.65	CaO	6.50	13.65
Mg	3.08	MgO	5.10	5.52
Fe	5.41	FeO	6.96	15.47
Al	7.90	Al_2O_3	14.92	15.37
Ti	0.65	TiO_2	1.08	1.60
Nem : % 33.85				-
Kızdırma Kaybı : % 15.68				-

(*) örselenmemiş, hiçbir gerilmeye maruz kalmamış ve önce havada daha sonra etüvde 60°C'de kurutulmuş numune

uyum içersindedir. Zira kimyasal içerik analizi yapılırken numunede, önce kızdırma kaybının belirlenmesi sırasında K, Mg, Na ve Ca-karbonatlar, kükürtler vb. organik içeriklerin miktarı belirlenmiş, ardından geri kalan numune HF(hidrojenflorür) + $HClO_4$(perklorikasit) + HNO_3(nitrikasit) karışımı ile parçalanarak diğer organik malzemelerden arındırılmıştır. Bu sebeple, malzemede gerek kızdırma kaybı ve gerekse organik malzemelerden arındırma işlemi sırasında Ca, Mg, Na ve K elementlerinden kayıplar oluşmuştur. Bu nedenle, bu elementlerin oranları arasında bir miktar farklar söz konusudur. Ancak, Si, Al ve Ti elementlerinin yüzdeler cinsinden birbiriyle uyumu gözlemlenmektedir.

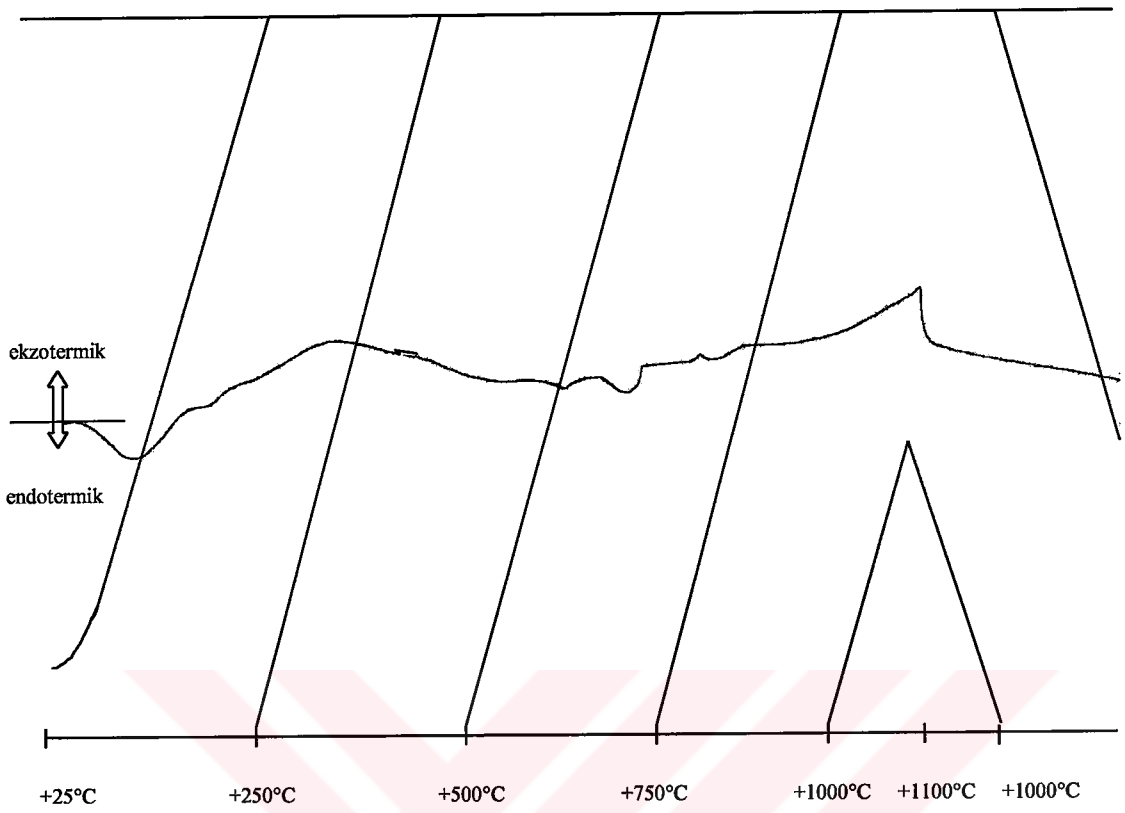
Kimyasal içerik ve elemental analizler sonucunda malzemenin kimyasal içeriği belirlenebilmekle birlikte, malzemenin minerolojisiyle ilgili doğrudan bir yorum yapılamamaktadır. Ancak, genel olarak Na^{+} ve K^{+}'a nazaran daha yüksek Mg^{+2} ve Ca^{+2} ihtiva eden, yüksek alkalili kayalar ve ferromagnezyumlu minerallerin montmorillonit esaslı olabileceği bilinmektedir. Tezin ilerleyen bölümlerinde anlatılan ve numune üzerinde yapılan diğer analizlerle (X-Ray, DTA, İnfrared) kimyasal içerik analizi birlikte değerlendirildiğinde, tez çalışmasında kullanılan zemindeki kil boyutlu daneciklerin, çoğunlukla montmorillonit minerali içerdiği ve yüksek Ca içeriğinin bu minerallerin Ca-montmorillonit olduğunu kesin olarak gösterdiği görülmektedir.

4.2.3.3 DTA Analizi

Örselenmemiş, hiçbir gerilmeye maruz kalmamış ve önce havada daha sonra etüvde 60°C'de kurutulmuş yumuşak mavi kil numune üzerinde Kimya-Metalürji Fakültesinde DTA analizi yapılmıştır. Deneyde Rigaku Thermoflex adlı alet ile 21-1100 °C sıcaklıklar arasında, 10 °C/dak ısıtma hızı ve 2.5 mm/dak kaydedici hızı ile 21.3 mg'lık numune üzerinde çalışılmıştır. DTA analizi sonucu çizilen grafik Şekil 4.7'de, DTA analizi sonucu belirlenen reaksiyon pikleri ise Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. DTA Analizi Pikleri

1. Reaksiyon (°C)		2. Reaksiyon (°C)		3. Reaksiyon (°C)	
Pik Sıcaklığı	Pik Aralığı	Pik Sıcaklığı	Pik Aralığı	Pik Sıcaklığı	Pik Aralığı
75	75-162	728	634-728		



Şekil 4.7. DTA Analizi

Tablo 4.4'te özetlenen DTA analizi pikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. 75 °C'de mineralin fiziksel su kaybından ileri gelen endotermik pik oluşmuştur. Montmorillonitlerde endotermik pikler 50-100 °C civarındadır. Na-montmorillonitte (bentonit) endotermik pik 135 °C'lere varmaktadır.

2. Grafikte 323 °C'deki ekzotermik pik organik maddelere aittir.

3. Kristal yapıdaki OH^{-1} tepe sıcaklığı 634 °C olan pikle gitmeye başlamaktadır. Daha sonra 728 °C olan endotermik pikle OH^{-1} iyice yok olmaktadır.

4. 728 °C'deki endotermik pik yabancı maddelerden (kuvars, silt vs.) ileri gelmektedir.

5. 634-728 °C arasındaki endotermik pik, kristal yapıdaki suyun kaybolmasını göstermektedir. Pikin konumu oktahedral yapıdaki Al'un yerine geçen Mg ve Fe'nin az veya çok olmasına bağlıdır. Kaolinlerde bu pik çok daha keskindir.

6. Deneye tabii tutulan numunede görülen her iki endotermik pikte de mineralin kristal yapısında bir değişiklik olmamış, sadece bir miktar küçülme görülmüştür.

Sonuç olarak; yukarıda özetlenen bilgiler ışığında ve literatürde kil mineralleri için verilen tipik DTA eğrilerinden hereketle, analize tabi tutulan doğal yumuşak mavi kilin esas olarak montmorillonit minerali içerdiği, nispeten az miktardaki kaolin minerali ve kuvars ile karbonatların da bulunduğu belirlenmiştir.

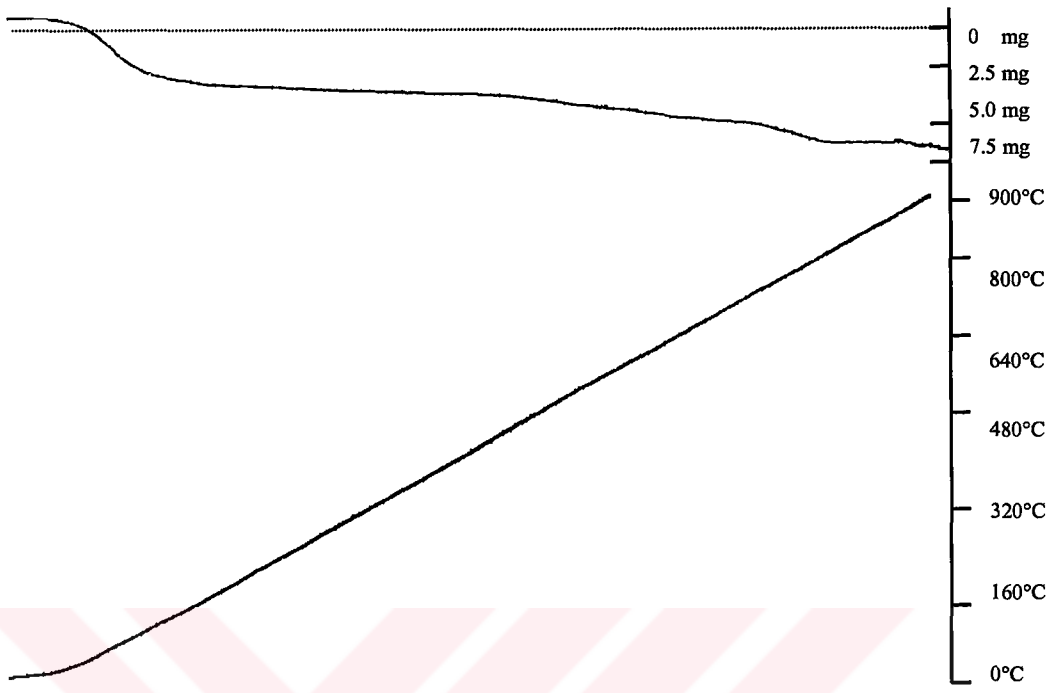
4.2.3.4 TG Analizi

Örselenmemiş, hiçbir gerilmeye maruz kalmamış ve önce havada daha sonra etüvde 60°C'de kurutulmuş yumuşak mavi kil numune üzerinde Kimya-Metalürji Fakültesinde TG analizi yapılmıştır. Deneyde, 28-900 °C sıcaklıklar arasında, 10 °C/dak ısıtma hızı ile 40 mg'lık numune üzerinde çalışılmıştır. TG analizi sonucu çizilen grafik Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere malzeme ısıtıldığında, 28-160 °C, 160-700 °C ve 700-900 °C sıcaklıkları arasında üç farklı grupla modellenebilecek şekilde ağırlık kaybına uğramaktadır. Sıcaklıkla birlikte malzemedeki ağırlık kaybı Tablo 4.5'de gösterilmiştir. Tablo 4.5'den görüldüğü üzere malzeme 900 °C'ye kadar ısıtıldığında malzemede %18.125 oranında ağırlık kaybı olmaktadır. Kimyasal içerik analizinde %15.68 oranında kızdırma kaybı belirlenmiştir. Kimyasal içerik analizinde önce numunenin nemi alındığı için boşluk suyunun kaybından dolayı ağırlık kaybı dikkate alınamamıştır. Ancak, yine de gerek kızdırma kaybı ve gerekse TG analiziyle belirlenen ağırlık kaybı değerleri üstüste düşmektedir.

Tablo 4.5. TG Analizi

Sıcaklık (°C)	Ağırlık Kaybı (mg)	% Cinsinden Ağırlık Kaybı
28-160	3.5	8.75
160-700	2.0	5.0
700-900	1.75	4.375
Toplam:	7.25 mg	18.125

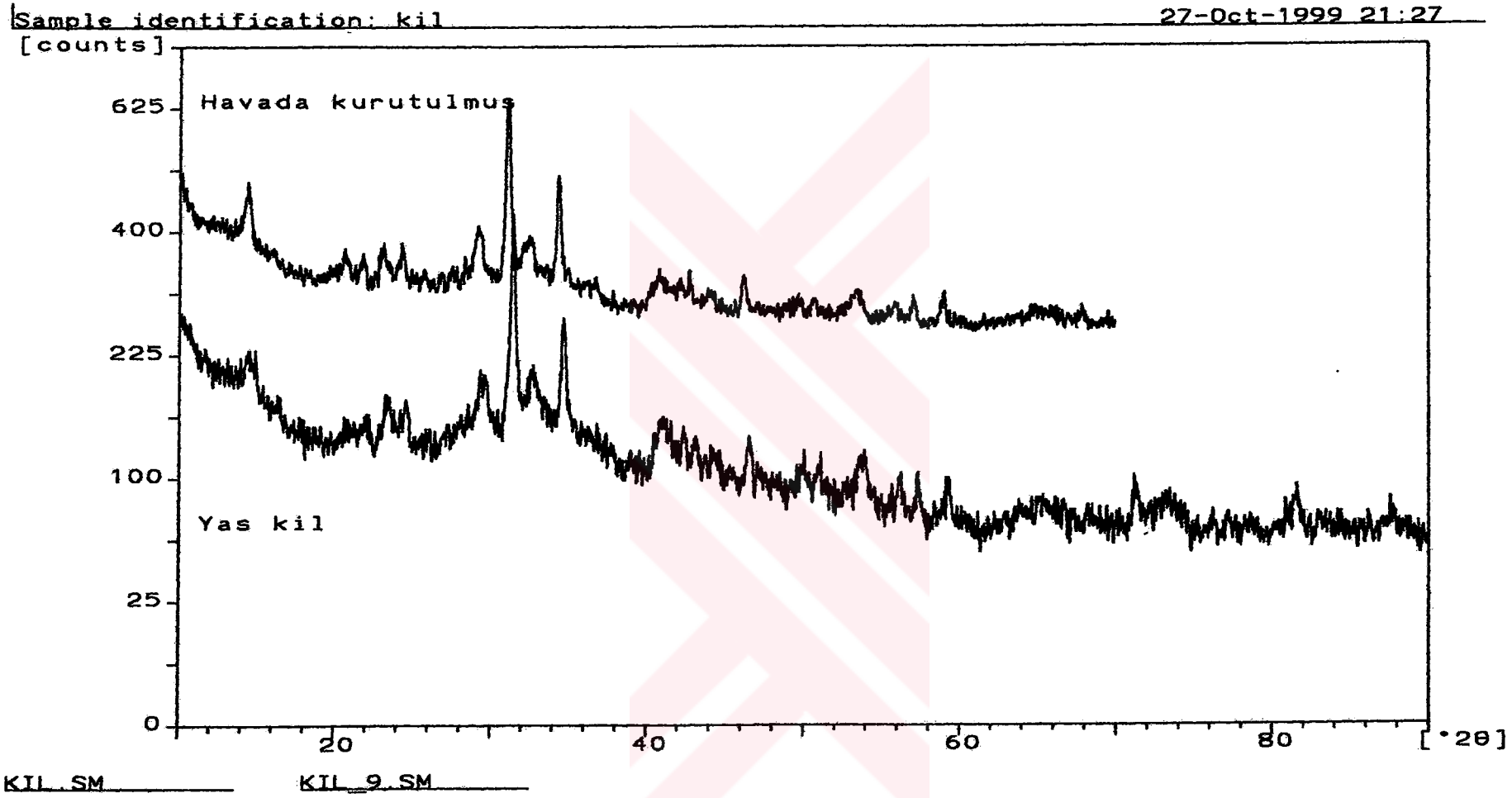


Şekil 4.8. TG Analizi

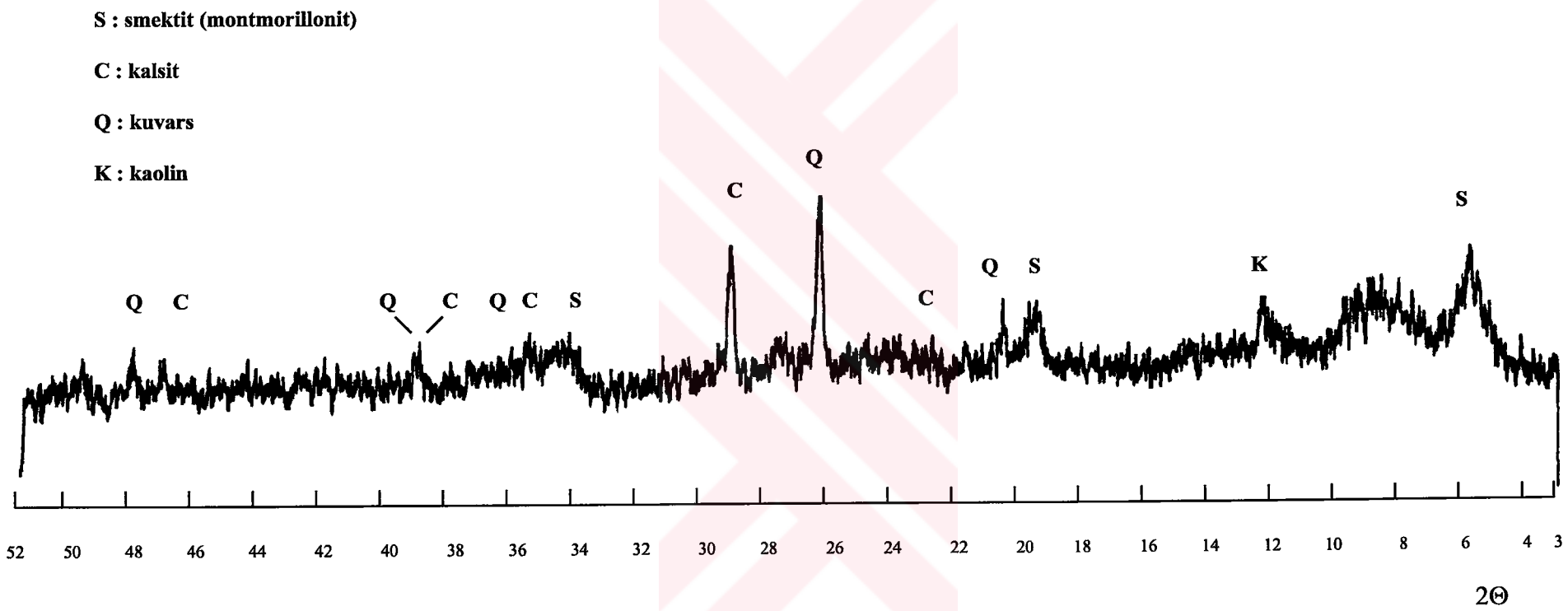
4.2.3.5 X-Ray Analizleri

Samsun-Çarşamba Havalanının yapıldığı alandan alınan yumuşak mavi kilin içeriğini belirleyebilmek için İ.T.Ü. Maden ve Kimya-Metalürji Fakültelerinde X-Ray analizleri yapılmıştır. Kimya-Metalürji Fakültesinde, PW1710 BASED tipli Philips Analytical X-Ray B.V difraktometrede Co anot kullanılarak 10-89° (2Θ)

açılarında, yaş ve havada kurutulmuş numune üzerinde X-Ray Analizi yapılmış ve elde edilen grafikler Şekil 4.9(a)'da verilmiştir. Analize göre, doğal numunede önemli miktarda kuvars, kalsit ($CaCO_3$) ve bir miktar kaolin bulunduğu belirlenmiş, ancak düşük 2Θ açılarında pik veren montmorillonit, klorit, illit ve benzeri minerallerin var olup olmadığı belirlenememiştir. Bu nedenle, daha düşük 2Θ açılarında çalışan bir X-Ray aleti ile Maden Fakültesi X-Ray Laboratuvarında benzer analiz tekrarlanmıştır. Philips difraktometreyle Ni filtreyle 2Θ = 1°/dak hızla, Cu kα radyasyonuna tabi tutulan numunenin düşük 2Θ açılarında (3-52° arası) X-Ray analizi yapılmış ve elde edilen grafik Şekil 4.9(b)'de verilmiştir. Şekil 4.9(b)'de gösterilen grafikte deneye tutulan numunenin ağırlıklı olarak smektit minerali



Şekil 4.9. (a) Kimya-Metalürji Fakültesi X-Ray Laboratuvarında Yapılan X-Ray Analizi



Şekil 4.9. (b) Maden Fakültesi X-Ray Laboratuvarında Yapılan X-Ray Analizi

içerdiği, kil boyutlu minerallerin %40-50 dolayında montmorillonit, toplam %30 dolayında eşit miktarda kalsit ve kuvars ve %10 dolayında kaolin içerdiği belirlenmiştir.

4.2.3.6 Infra-Red Analizi

Yumuşak mavi kil numunesi üzerinde Fen-Edebiyat Fakültesinde infrared analizi yapılmıştır. Deneyde kullanılan Mattson 1000 FTIR Spectrometer adlı cihazın çalışma bölgesi 650-4000 cm^{-1} (2.5-16 μ) arasındadır. Analiz için numune etüvde 60 °C'de kurutulduktan sonra tablet haline getirilmiş ve kızılötesi ışınlarla aydınlatılarak malzemenin infrared spektrumu ölçülmüştür. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de infared spektrumları gösterilmektedir. İnfrared spektrumunda görülen adsorpsiyon piklerine karşılık gelen dalga sayılarından hareketle malzemenin içeriğinin tayin edilebilmektedir. Malzemenin infrared spektrumu incelendiğinde Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilen diyagramlardan yararlanılarak aşağıdaki tespitler yapılmıştır:

a) 465-523 cm^{-1} dalga sayılarındaki adsorpsiyon Si-O bükülme bandını göstermektedir.

b) 794-805 cm^{-1}'de MgAlOH'un varlığı gözükmektedir.

c) 922 cm^{-1}'de Al_2OH'un varlığı görülmektedir.

d) 1044 cm^{-1} dalga sayısındaki adsorpsiyon montmorillonitteki Si-O gerilme bandını göstermektedir.

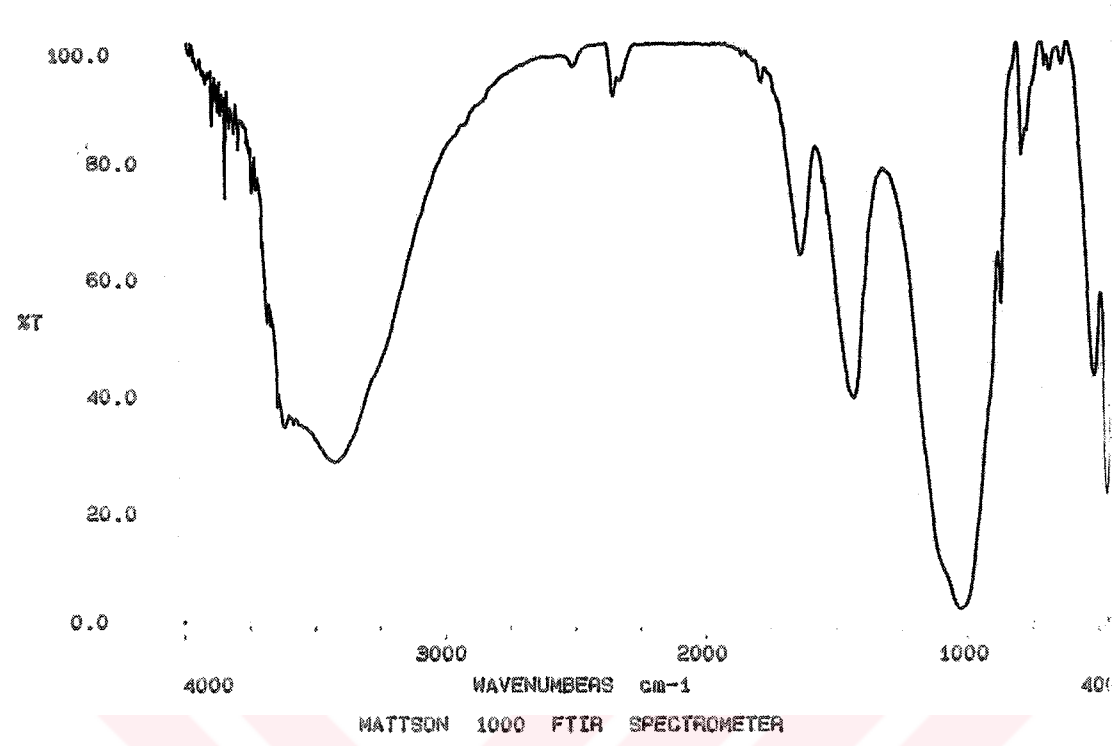
e) 1429 cm^{-1}'de malzemede az da olsa dolomitin varlığı tespit edilmiştir.

f) 1633-1655 cm^{-1}'de H-O-H bükülme titreşim bandı oluşmuştur.

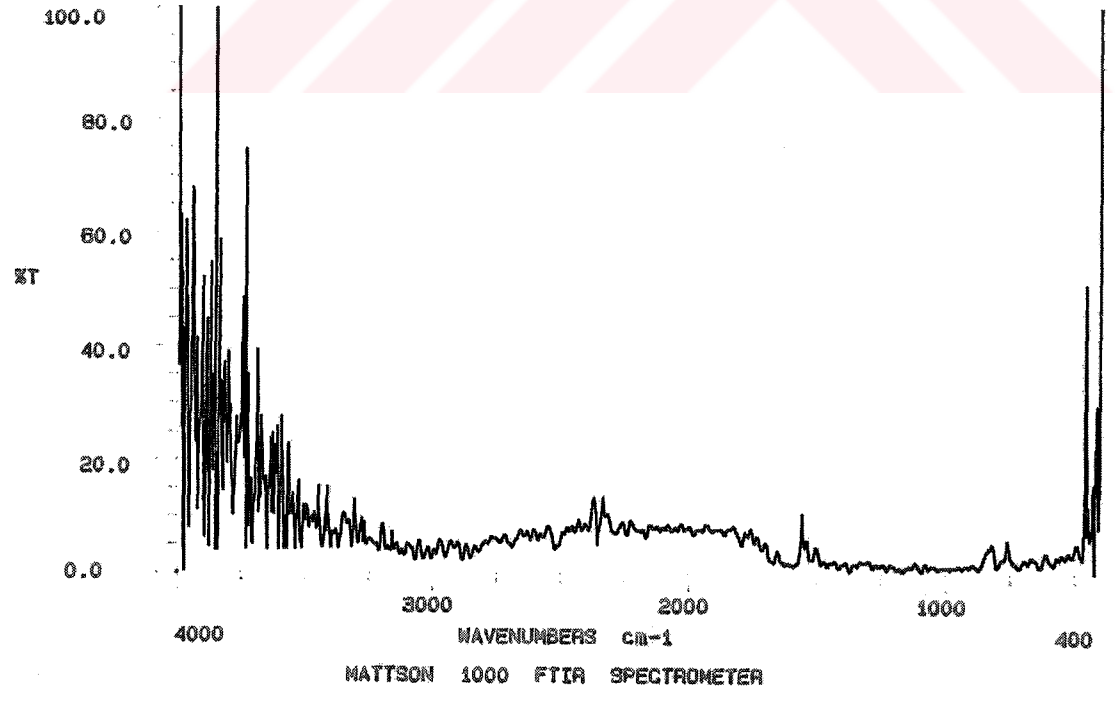
g) 3400-3700 cm^{-1} dalga sayılarındaki asdorspsiyon yapısal hidroksil gerilme bandıdır. 3433 cm^{-1}'de H-O-H gerilme titreşimi piki gözükmektedir

h) 3627 cm^{-1} dalga sayısındaki adsorpsiyon montmorillonitin varlığını göstermektedir.

i) 3646-3649 dalga sayılarındaki adsorpsiyon montmorillonit içindeki kaolinin varlığını göstermektedir.



Şekil 4.10. İnfrared Analizi



Şekil 4.11. İnfrared Analizi

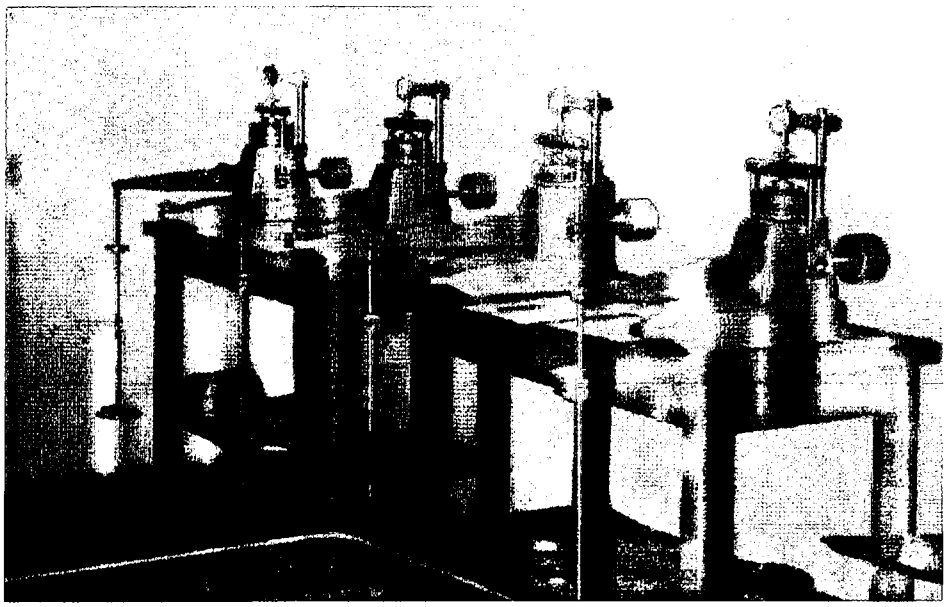
Sonuç olarak; yukarıda maddeler halinde verilen tespitler ışığında deneye tabi tutulan kil numunesinde önemli miktarda montmorillonit, kaolin mineralleri, kuvars ve karbonatlar bulunduğu, karbonatların bir kısmının $MgCO_3$ niteliğinde olduğu ve montmorillonitte Si yerine bolca Al geçtiği anlaşılmaktadır. Nitekim, aynı numune üzerinde yapılan kimyasal içerik analizlerinde, Ca'a yakın oranda Mg bulunduğu, Al oranının genelde yüksek olduğu belirlenmiştir. Al yüzdesinin yüksek olması kil minerallerinde Si yerine Al'un geçtiğinin bir göstergesi olduğu belirlenmiştir. İnfrared analizlerinde belirlenen bir diğer tespit ise montmorillonitin büyük ihtimalle Ca-montmorillonit tipinde olduğudur. Çünkü, Na-montmorillonit (bilinen bir diğer adıyla bentonit) 3627 cm^{-1} dalga sayısında daha büyük adsorpsiyon piki vermektedir. Gerek kimyasal içerik analizi ve gerekse infrared analizi birbirini doğrulamaktadır.

4.3 Deney Düzeni, Deney Programı ve Deneylerin Yapılışı

4.3.1 Konsolidasyon Deneyleri

Bu çalışmada ring çapı 5 cm, ring alanı 19.63 cm^2 ve ring yüksekliği 2 cm olan klasik sabit ringli Wykeham-Farrance marka konsolidasyon deney aletleri ile çalışılmıştır. dört adet Wykeham-Farrance marka konsolidasyon deney aleti Şekil 4.12'de gösterildiği üzere masalara sabitlenerek uzun süreli konsolidasyon deneyleri boyunca titreşim veya başka dış etkilerden mümkün olduğunca etkilenmemeleri sağlanmıştır. Uzun süreli konsolidasyon deneyi boyunca ring sürtünmesini en aza indirmek için paslanmaz çelikten olan ringlerin iç yüzeyleri yağlanmıştır.

Deneysel çalışmada öncelikle klasik konsolidasyon deneyleri yapılmış ve herbir gerilme için gerek Casagrande-log(t) gerek Taylor-$\sqrt{t}$ yöntemleriyle birincil konsolidasyonun tamamlanması için gerekli t_p süreleri belirlenmiştir. Bu sayede EOP e-log p'_0 eğrisini yani "birincil konsolidasyonun tamamlandığı eğriyi" çizebilmek mümkün olmuştur. Daha sonra yarı logaritmik e-log p_0' diyagramı üzerinde $10t_p$ eğrisi çizilmiş t_p-$10t_p$ arasında ikincil sıkışma parametreleri hesaplanarak Mesri ve Godlewski(1977) tarafından ileri sürüldüğü gibi kil zeminler için tekil bir C_α/C_c oranı olup olmadığı araştırılmıştır.



Şekil 4.12. Deney Düzeni

İkinci grup deneylerde ise yapılan ilk grup klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen bilgiler ışığında uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. İlk grup deneylerde birincil konsolidasyonun küçük gerilmeler altında 60-100 dakikada büyük konsolidasyon basınçları altında ise 100-150 dakikada tamamlandığı belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında uzun süreli konsolidasyon deneylerinde kil zeminin ikincil sıkışma davranışının araştırılacağı gerilmelerde deney programına göre bir hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde yükleme yapılırken ara kademelerde konsolidasyon basıncı altında birincil konsolidasyonun tamamlanması için basınç kademesine göre 100-200 dakika beklemek yeterli görülmüştür. İkincil sıkışma davranışının araştırılacağı gerilmelerde bir hafta ile 10 gün arasında beklendiği deneylerde, yük bekleme süresine göre t_p-$10t_p$, ve $10t_p$-$100t_p$ aralığında C_α ile C_c arasındaki oranının sabit olup olmadığı belirlenmiştir. Bu grup deneyler içinde bir kısım deneylerde sabit gerilme altında 2.5-6.5 ay kadar uzun süreler beklenmiş, zamanla C_α ve diğer ikincil sıkışma parametreleri arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde, ikincil sıkışma davranışını modellemekte hem ikincil sıkışma katsayısı - C_α hem ikincil sıkışma indeksi - $C_{\alpha\varepsilon}$ hem de farklı derinliklerde farklı ilk boşluk oranlarındaki aynı zemin için yapılan deneylerdeki ikincil sıkışma parametrelerini normalize ederek birbirleriyle karşılaştırabilmek için ikincil sıkışma indeksinin modifiye edilmiş hali-modifiye

ikincil sıkışma indeksi-$C_{\alpha p}$, ($C_{\alpha p} = \frac{C_\alpha}{(1+e_p)}$) kullanılmıştır. Bu bağıntıda e_p, birincil konsolidasyonun tamamlanmasının ardından e-log t eğrisinin düz kısmında $10t_p$ zamanında yani bir logaritmik çevrim boyunca ikincil sıkışmanın tamamlandığı boşluk oranına denk gelen boşluk oranını göstermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında 6 adeti klasik konsolidasyon deneyi olmak üzere toplam 24 adet konsolidasyon deneyi yapılmış, klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri boyunca 279 adet gerilme seviyesinde yükleme-boşaltma adımları tekrarlanmış ve farklı derinliklerdeki yumuşak kil zemin için toplam 80 adet gerilme seviyesinde 1 hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde beklenerek yumuşak kil zeminin uzun süreli konsolidasyon davranışı araştırılmıştır. Buna göre, klasik konsolidasyon deneyleri Tablo 4.6'da, uzun süreli konsolidasyon deneylerinde uygulanan yük bekleme süreleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Böylece, iki grup deney sonuçlarından hareketle önkonsolidasyon basıncından önce ve sonra çeşitli gerilmelerde gerek birincil, gerekse ikincil sıkışma parametreleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar birbiri ile kıyaslanarak C_α ile C_c arasında tekil bir ilişki bulunup bulunmadığı, C_α'nin hangi parametrelere bağlı olduğu ve C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha\varepsilon p}$ ile p'-uygulanan konsolidasyon basıncı, derinlik ve başlangıç boşluk oranı arasında içsel bir etkileşim olup olmadığı araştırılmıştır. Bölüm 5'te herbir deney grubundan elde edilen sonuçlar ve sonuçların yorumu verilmiştir.

Tablo 4.6. Klasik Konsolidasyon Deneyleri

Sondaj/Araştırma Çukur No	Derinlik (m)	Deney No	Deney Yöntemi
S1	9.50	A01	Klasik
		A02	Klasik
		A03	Klasik tekrarlı
S1	7.50	B01	Klasik
S3	4.5	C01	Klasik
A1	3.5	D01	Klasik

Tablo 4.7. Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerinde Uygulanan Bekleme Süreleri

Sondaj/Araştırma Çukur No	Derinlik (m)	Deney No	İkincil Sıkışmaya Gidilen Gerilmeler (kPa)	Yük Bekletme Süreleri	Ara Gerilmelerdeki Yük Bekleme Süreleri
S1	9.50	A1	25 - 100 - 300	1 hafta-1 hafta-10 gün	100 dakika-200 dakika
		A2	50 - 150 - 400	1 hafta-1 hafta-1 hafta	100 dakika
		A3	75 - 200	1 hafta-1 hafta	100 dakika
S1	7.50	B1	25 - 100	10 gün-187 gün	150 dakika
		B2	50 - 150	10 gün-187 gün	150 dakika
		B3	75	198 gün	24 saat
S3	4.5	C1	12.5 - 75 - 200	1 hafta-1 hafta-10 gün	100 dakika-200 dakika
		C2	25 - 100 - 300	1 hafta-1 hafta-10 gün	100 dakika-200 dakika
		C3	50 - 150 - 400	1 hafta-1 hafta-10 gün	100 dakika-200 dakika
A1	3.5	D1	25	-	Tüm gerilmelerde 150 dakika
		D2	100	-	Tüm gerilmelerde 150 dakika
		D3	400	-	150 dakika-200 dakika
		D4	25	1 hafta	100 dakika-200 dakika
		D5	100	10 gün	100 dakika-200 dakika
		D6	400	10 gün	100 dakika-200 dakika
		D7	25	70 gün	100 dakika-200 dakika
		D8	100	69 gün	100 dakika-200 dakika
		D9	400	69 gün	100 dakika-200 dakika

4.3.2 SEM Analizleri

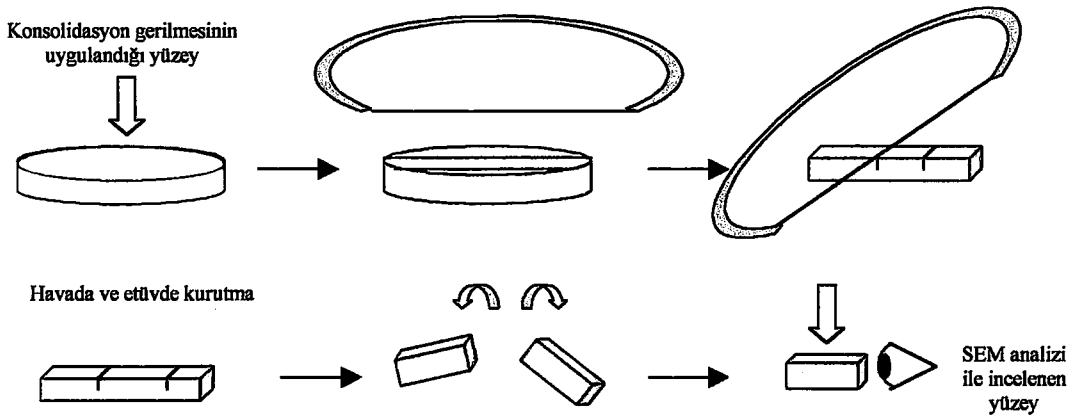
Deneysel çalışmanın bu bölümünde, zemin yüzeyinden 3.5 m derinlikten alınan kil zeminin doğadaki tabii hali ile birincil ve ikincil sıkışma süresince fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler taramalı elektron mikroskopu (SEM) altında incelenerek araştırılmıştır. Bu amaçla SEM analizlerinde konsolidasyon gerilmesinin uygulandığı yüzeye dik yani bir boyutlu konsolidasyonun oluştuğu yüzey incelenmiştir. Bu sayede konsolidasyon süreci boyunca zeminin fabrik yapısındaki değişiklikleri, danelerin yük uygulandıkça bir dizilime geçip geçmediğini görmek mümkün olmuştur.

Yumuşak mavi kil zemin üzerinde yapılan SEM analizlerinde öncelikle zemin yüzeyinden 3.5 m derinden alınan örselenmemiş ve hiçbir gerilmeye maruz kalmamış (e_0 boşluk oranına sahip) numune üzerinde SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra aynı derinlikten çıkarılan kil zemin 25 kPa, 100 kPa ve 400 kPa gerilmelerinde konsolidasyona terkedilmiş ve bu konsolidasyon basınçları altında zamanla kil zeminin fabrik yapısındaki değişiklikler taramalı elektron mikroskopla araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk grup analizlerde Tablo 4.8'de gösterildiği gibi tüm gerilmelerde ve 25 kPa, 100 kPa ve 400 kPa gerilmeleri altında, 150-200 dakika konsolidasyona bırakılarak birincil konsolidasyonun tamamlandığı sürelerde (t_p) deney kesilerek SEM analizleri için numune hazırlanmıştır. İkinci grup analizlerde, ara kademelerde 100-200 dakika beklenirken analiz yapılacak gerilmelerde 1 hafta-10 gün beklenerek ikincil sıkışmanın devam ettiği ve $100t_p$ zamanına denk gelen sürede (ikincil sıkışmanın iki log çevrimi boyunca oluştuğu sürede) deneyler kesilerek SEM analizleri için numune hazırlanmıştır. Son grup analizlerde ise benzer şekilde ara kademelerde 100-200 dakika beklenirken 25 kPa, 100 kPa ve 400 kPa gerilmeleri altında numuneler 69-70 gün konsolidasyona terkedilmiş ve bu süre sonunda deneyler kesilerek SEM analizleri için numunenin hazırlanmasına başlanmıştır.

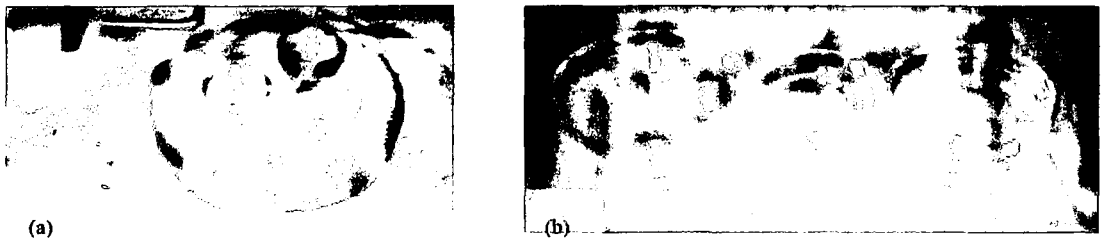
SEM analizleri için numune hazırlanması bu çalışmada başlı başına aşılması gerekli en önemli sorun olmuştur. SEM analizlerinde boşluk sıvısının yok edilmesi veya başka bir maddeyle yerdeğiştirilmesi gerekmektedir. Zeminin fabrik yapısını bozmadan bunu gerçekleştirmek zordur. İlk etapta birkaç deneme çalışması yapılmış

ve boşluk sıvısının zeminin fabrik yapısını bozmadan yokedilmesi için en uygun yöntem olarak 1 hafta süreyle havada kurutmanın ardından, 1'er haftalık süreyle etüv sıcaklığını kademeler halinde artırarak numunenin etüvde kurutulması olduğu tespit edilmiştir. Bu amaçla, deney programına göre konsolidasyon deneyinin bitirilmesine karar verildiğinde, numune derhal ödometre kabından çıkarıldıktan ve deney sonu su muhtevasını ölçmek için bir miktar numune ayrıldıktan sonra paslanmaz çelik ringden çıkarılan numuneler kıl testere ile dikdörtgen prizma halinde kesilmiştir. Kesilen dikdörtgen prizma şeklindeki numune, daha sonra SEM aletinin numune alma bölümüne sığabilmesi ve zorunlu olan boyunun kısaltılması işleminin rahatlıkla yapılabilmesi için kıl testere ile 0.5-1.0 mm kadar birkaç yerden daha diklemesine kesilmiştir. Kesilen numune bir hafta süreyle havada daha sonra derecesi kademeli olarak artırılan etüvde kurutularak boşluk sıvısının yok edilmesi sağlanmıştır. SEM aleti ile incelenecek yüzeyin hazırlanması aşamasında dikdörtgen prizma şeklindeki numune kenarlardan tutularak kırılmıştır. Böylece, numunenin dış zorlama olmadan en zayıf yerden kırılması sağlanmıştır. Şekil 4.13'de konsolidasyon deneyine son verildiği andan itibaren numunenin kaplamaya hazır hale gelmesine kadar geçen hazırlık süresi şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.14(a)'da sahadan çelik silindirik kalıplarla alınan blok numunelerden SEM analizi için örselenmemiş numune çıkarılışı, Şekil 4.14(b)'de kaplamaya hazır hale getirilen numuneler gösterilmiştir.

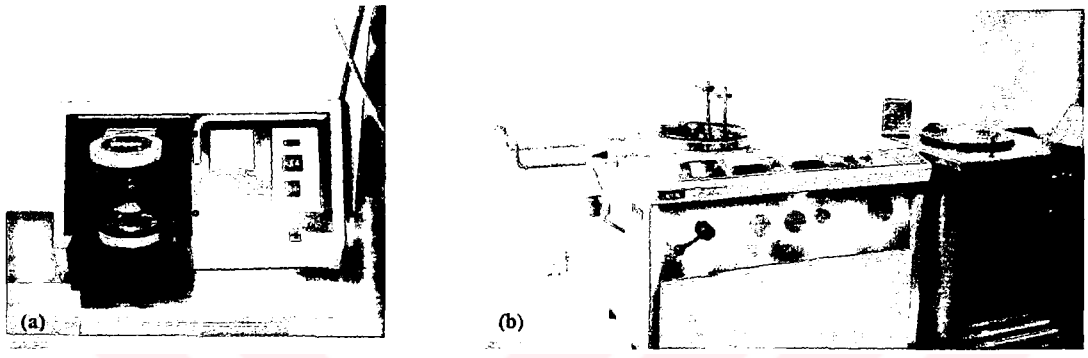
SEM aletinde elektron ışını genelde çalışılacak malzemenin yüzeyine odaklanmakta bazı elektronlar numuneden saçılmakta ve numunenin farklı bölgeleri bu saçılmanın miktarına bağlı olarak açık veya koyu renk olarak gözükmektedir, ikincil elektronlar ise üç boyutlu imaj şeklinde gözüken numunenin yüzeyinden dışarı çıkmaktadır.



Şekil 4.13. Karbon Kaplama İşlemi İçin Numune Hazırlanması Adımları



Şekil 4.14. (a) Çelik Silindirik Kalıplardan Örselenmemiş Numune Çıkarılışı
(b) Karbon Kaplama İçin Hazırlanmış Numuneler



Şekil 4.15. (a) Altın Kaplama Yapılan Ünite (b) Karbon Kaplama Yapılan Ünite

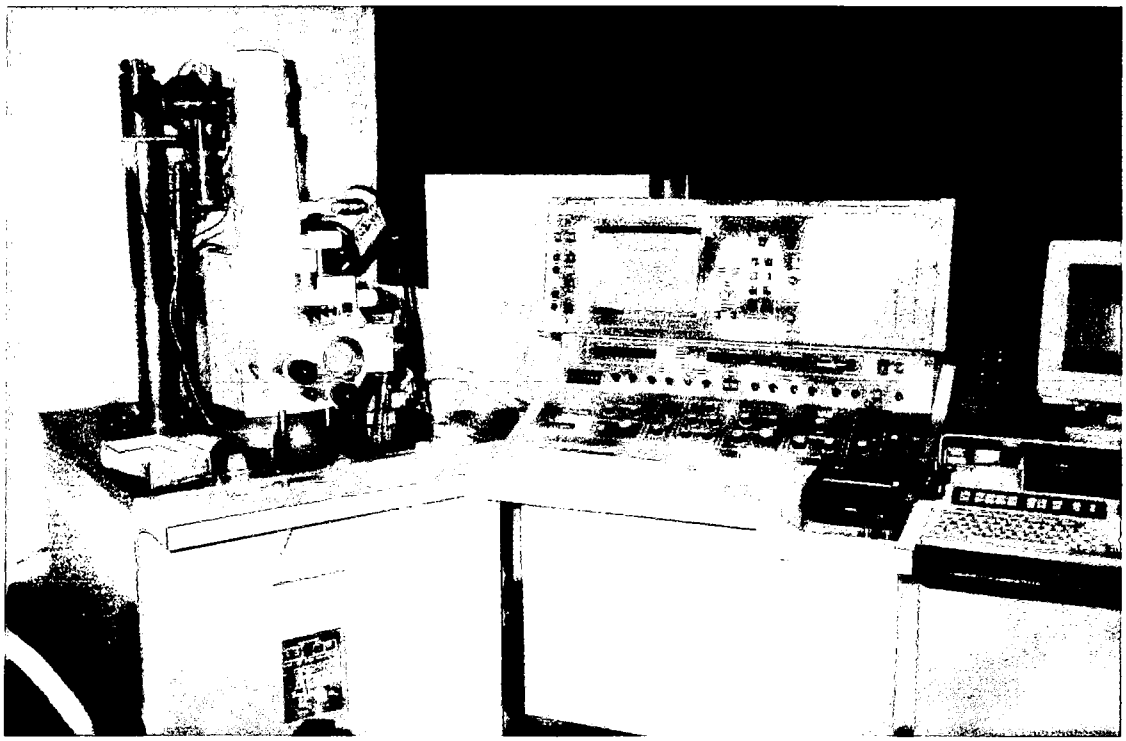
SEM aleti içinde incelenecek numunenin içinden elektronların geçişini sağlamak için karbon veya altın gibi iletken bir element ile kaplanması gerekmektedir. Bu amaçla Kimya-Metalürji Fakültesi SEM Laboratuvarında, altın kaplama yapılacak numunelere Hummer VII Sputtering System adlı aletle vakum uygulanarak numuneler adsorbe su filmi tabakasından tümüyle arındırılmış, daha sonra aynı aletle altın kaplama yapılmıştır (Şekil 4.14(a)). Karbon kaplama yapılacak numunelerde ise JEOL JEE-4x Vacuum Evaporator adlı deney aleti ile vakum uygulandıktan sonra karbon kaplanması işlemine geçilmiştir (Şekil 4.14(b)). Çoğu malzeme için altın kaplama, karbon kaplamaya nazaran SEM aleti içinde daha iyi görüntü vermesine karşın, deneme aşamasında yapılan analizlerde bu tez çalışmasında kullanılan mavi kil zemin için altın kaplamanın SEM aletinde iyi görüntü vermediği belirlenmiştir. SEM analizlerinde görüntü kalitesini artırmak için tüm numuneler çift kat karbon ile kaplanmıştır.

Kaplaması tamamlanmış numuneler JEOL JSM-840 Scanning Microscope ile incelenmiştir. Kaplamaları tamamlanmış üniteler numune alma bölümüne özel bir alet ile yerleştirilmiş ve analize başlanmadan evvel numunelerin havanın neminden etkilenme riskini ortadan kaldırmak için tekrar vakum uygulanmıştır. Daha sonra

yoğun bir elektron ışınına tutulan numunelerin görüntüsü bilgisayar ve monitör yardımıyla alınmıştır. Analiz sırasında 100 ile 13000 arasında değişen oranlarda büyütme yapılmıştır. 5000'den büyük büyütmelerde kil minerallerini açıkça görmek mümkün olmuştur. Analizler sırasında numunenin odaklanan bir bölümü için elektron ışınlarının yansıması, sıçraması veya yayılmasından hareketle numunenin içindeki elementleri belirlemek mümkündür. Ancak, SEM analizi için hazırlanan tüm numuneler altın veya karbon kaplandığı için numune içinde olduğu belirlenen elementlerin yüzdesi numune hakkında yalnızca kaba bir fikir vermektedir. Bununla birlikte zaman zaman yapılan bu tür analizler Kimya-Metalurji Fakültesinin kimya laboratuvarında yapılan ve detayları Bölüm 4.2.4.2'de verilen kimyasal içerik analizleri ile üstüste düşmüştür. Kil zeminin incelenen kesitinden görüntüler, Polapan 55PN adlı özel Polaroid filmiyle alınmıştır. Şekil 4.16'da JEOL JSM-840 Scanning Microscope marka SEM deney aletinde elektonların gönderildiği ana ünitenin numune alma bölümüne nunumenin yerleştirilişi, Şekil 4.17'de JEOL JSM-840 Scanning Microscope marka SEM aleti tüm üniteleriyle birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.16. JEOL JSM-840 Scanning Microscope Marka SEM Aletinin Ana Ünitesinin Numune Alma Bölümüne İncelenecek Numunenin Yerleştirilişi



Şekil 4.17. JEOL JSM-840 Scanning Microscope Marka SEM Aleti

4.3.3 Arazi Yükleme Deneyleri

Samsun-Çarşamba Havaalanı, Samsun-Çarşamba karayolunun 25. kilometresinde, karayolu ile Karadeniz arasında kalan geniş bir delta düzlüğünde, kalınlığı yaklaşık 100 m dolayında olan bir alüvyon istifi üzerinde inşa edilmektedir. Pistin deniz tarafındaki ilk 500 m'lik bölümünde karşılaşılan yumuşak kil ve turba zeminlerin, pistin geri kalan 2500 m'lik bölümünde bulunmadığı belirlenmiştir. Bu maksatla, inşa edilecek pistin, KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki kesiminde önyükleme yapılarak iyileştirilip iyileştirilemeyeceğini belirleyebilmek için pistte önyükleme programına geçilmeden önce yumuşak zeminin en kalın olduğu pist başında 45.0 x 20.0 m boyutlarında, 2.5 m yüksekliğinde test dolgusu yapılması ve test dolgusunda teşkil edilecek oturma plakaları vasıtasıyla oturma-zaman bağıntısının izlenmesi kararlaştırılmıştır. Altı ay süreyle test dolgusu altındaki yumuşak gri-mavi kil zeminin in-situ yük-oturma-zaman davranışı izlenmiş ve test dolgusundan derlenen veriler, ön yükleme ile yumuşak zeminin makul sürede konsolide edilebileceğini, konsolidasyonu hızlandırmak amacıyla başkaca önlemler alınmasına gerek olmadığını ortaya koymuştur (Sağlamer ve Yılmaz, 1998). Daha sonra, elverişsiz zemin koşullarının belirlendiği ilk 500 m uzunluktaki pist bölgesinde altı ay süreyle

ön yükleme yapılmasına karar verilmiştir. Bu maksatla, söz konusu pist kesiminde h = 3.5 m yükseklikteki granüler malzeme ile ön yükleme yapılmıştır. (4.2.1), (4.2.2) ve (4.2.3) nolu paragraflarda Samsun-Çarşamba Havaalanı sahasının jeolojisi, zemin profili ve sahada yapılan arazi çalışmaları anlatılmış, Şekil 4.2'de Havalanı uçuş pisti KM 0+000 ~ KM 0+500 arası zemin profili, Şekil 4.3'te ise pist dolgusu ve test dolgusunda tesis edilen oturma plakalarının yerleri gösterilmiştir. Tez çalışmasının arazi yükleme deneyleri ile ilgili bölümünde test dolgusunda bir yıl, pist bölgesinde ise altı ay süreyle yapılan ön yüklemelerde derlenen geoteknik data değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinin ilk 500 metresinden, Shelby tüpleri ve çelik silindirik kalıplarla zemin yüzeyinden 9.50 m, 7.50 m, 4.50 m ve 3.50m derinliklerden alınan ve üzerlerindeki örtü yükleri birbirinden farklı, aynı minerolojik yapıda olan örselenmemiş genç normal konsolide kil zemin numuneleri üzerinde, birincil ve ikincil sıkışma davranışını incelemek amacıyla iki grup konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında 6 adeti klasik konsolidasyon deneyi olmak üzere toplam 24 adet konsolidasyon deneyi yapılmış, klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri boyunca 279 adet gerilme seviyesinde yükleme-boşaltma adımları tekrarlanmış, toplam 80 adet gerilme seviyesinde 1 hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde beklenerek yumuşak kil zeminin uzun süreli konsolidasyon davranışı araştırılmıştır. Klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleriyle yumuşak mavi kil zeminin ikincil sıkışma davranışı ve ikincil sıkışma parametrelerine, uygulanan konsolidasyon basıncının ve zamanın yani uzun süreli yüklemenin etkisi araştırılmış, numuneler üzerinde yapılan minerolojik kompozisyon deneyleri ve taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) numunelerde konsolidasyon sürecinde birincil ve ikincil sıkışmalarla fabrik yapıdaki ve mineral iskeletindeki değişimler araştırılmıştır. Tüm bu deneysel çalışmalar yanında araştırmacılar tarafından vurgulanan arazi gözlemleri ve laboratuvar deneyleri arasındaki farklılıkların nedenleri, deneysel çalışmaların sonuçları ile Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pisti KM 0+000 ile KM 0+500 arasında bir yıl süreyle yapılan uzun süreli arazi gözlemleri sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve sonuçlar olası sebepleriyle birlikte yorumlanmıştır. Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir.

5.1 Konsolidasyon Deneyleri

5.1.1 Klasik Konsolidasyon Deneyleri

İlk grup deneylerde, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinin ilk 500 metresinden, Shelby tüpleri ve çelik silindirik kalıplarla zemin yüzeyinden 9.50 m, 7.50 m, 4.50 m ve 3.50m derinliklerden alınan üzerlerindeki örtü yükleri birbirinden farklı olan genç normal konsolide yumuşak kil zemin numuneleri üzerinde klasik konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Şekil 5.1'de bu grupta yapılan 6 adet klasik konsolidasyon deneyine ait e-log p′ eğrileri toplu halde gösterilmiştir. Tablo 5.1'de tüm klasik konsolidasyon deneylerine özet bilgiler verilmiştir.

Laboratuvarda yapılan klasik kademeli ödometre deneyinde yük artım oranı LIR = Δp / p = 1 alınmıştır. Ancak, literatürden genelde birincil konsolidasyonun 1 saat ve daha kısa sürede sonuçlandığı ve 24 saatlik bekleme süresinde bir veya daha fazla ikincil sıkışma çevrimi oluştuğu bilinmektedir. Bu nedenle Ladd (1973), Mesri ve Choi (1985) ve ASTM D2435-80, önkonsolidasyon basıncının belirlenmesinde konsolidasyon eğrisinin birincil konsolidasyonun tamamlanmasına kadar geçen süreye göre çizilmesini önermektedir. A.B.D.'de yaygın olarak önkonsolidasyon basıncının belirlenmesinde, konsolidasyon deneyi EOP'ye göre yorumlanmaktadır. Bu çalışmada, her biri farklı derinlikten alınan kil zemin için yapılan konsolidasyon deneylerinde, çıkılan herbir gerilme için gerek log(t) gerek $\sqrt{t}$ yöntemleriyle birincil konsolidasyonun tamamlanması için gerekli t_p süreleri belirlenmiştir. Böylece, EOP'ye göre e-log p' eğrisini çizebilmek ve önkonsolidasyon basıncını daha doğru bir şekilde belirlemek mümkün olmuştur.

Konsolidasyon deneylerinde küçük gerilmeler altında birincil konsolidasyonun 60-100 dakikada, büyük konsolidasyon basınçları altında ise 100-150 dakikada tamamlandığı görülmüş, 24 saat beklemeli yük artım oranı Δp/p=1 olan klasik konsolidasyon deneylerinde, 24 saat yani 1440 dakika içinde birincil konsolidasyonun tamamlanmasından sonra bir log çevriminde ikincil sıkışmaların oluştuğu ve dolayısıyla ikincil sıkışma parametrelerinin klasik konsolidasyon deneylerinden rahatlıkla hesaplanabileceği belirlenmiştir. Böylelikle, hem herbir gerilme seviyesindeki oturma-zaman grafiklerinden hareketle ikincil sıkışma

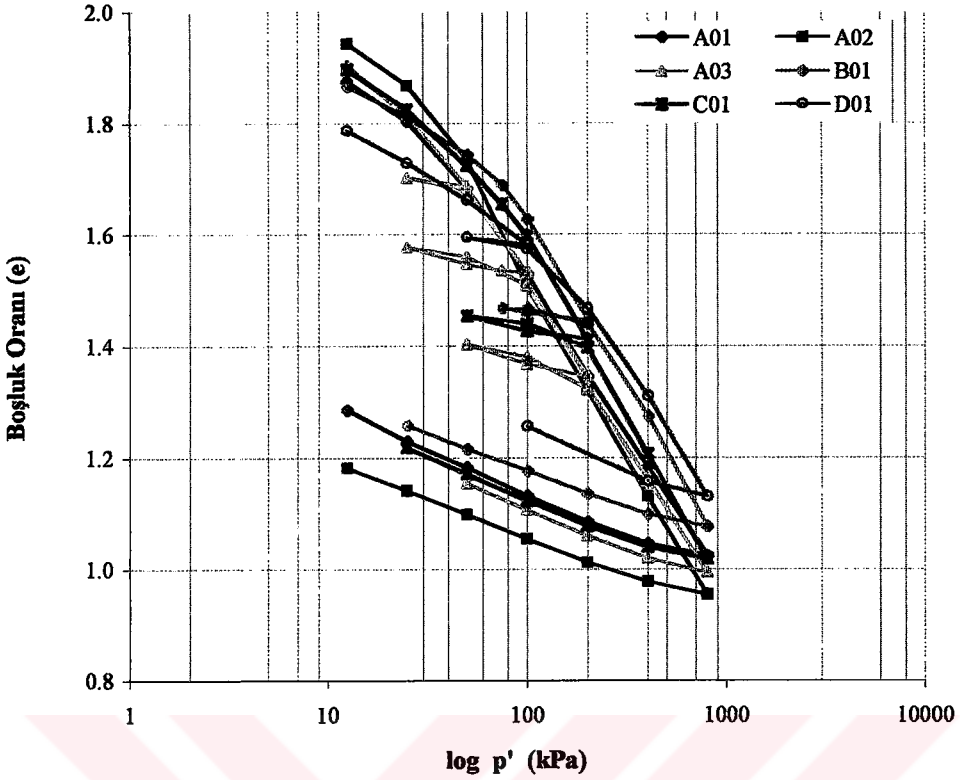
Tablo 5.1. Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait Özet Veriler

Deney No	Derinlik (m)	Başlangıç su muhtevası w_0 (%)	Deney sonu su muhtevası w_s (%)	Başlangıç doğal bir. hac. ağr. γ_0 (kN/m³)	Deney sonu doğal bir. hac. γ_s (kN/m³)	Başlangıç boşluk oranı e_0	Deney sonu boşluk oranı e_s
A01	9.50	66.52	45.75	15.6	17.7	1.950	1.286
A02	9.50	66.62	42.06	15.6	18.0	2.041	1.283
A03	9.50	66.35	41.10	15.5	18.2	2.017	1.156
B01	7.50	64.09	44.11	16.0	18.0	1.928	1.260
C01	4.50	64.15	43.94	14.6	16.7	1.940	1.220
D01	3.50	60.56	45.00	16.6	18.9	1.813	1.257

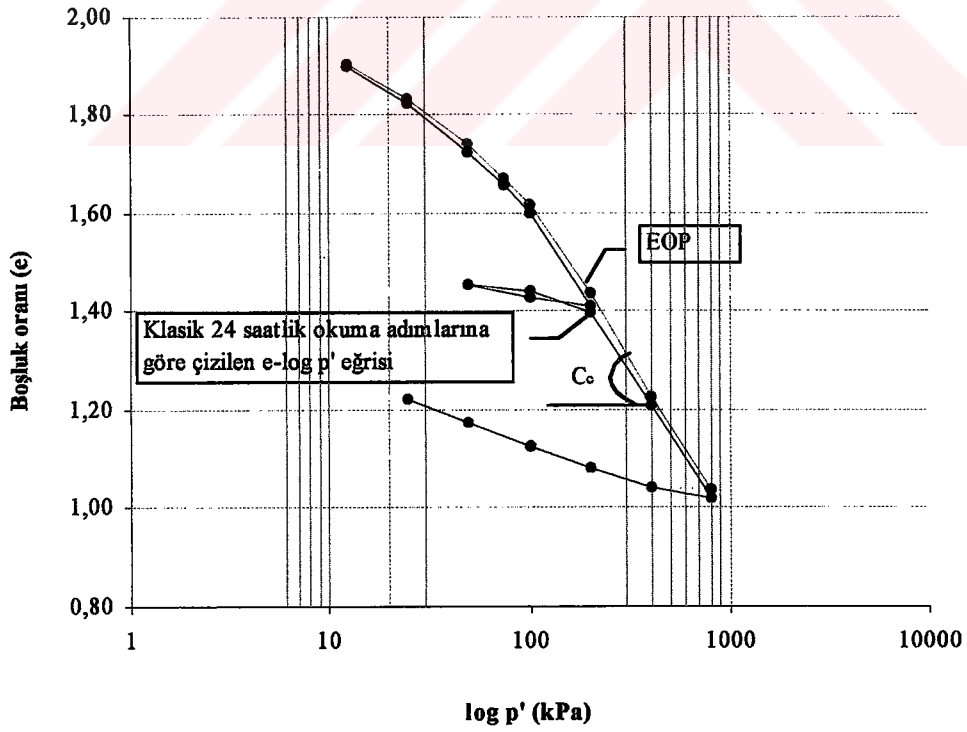
parametreleri belirlenebilmiş hem de EOP'ye göre çizilen e-log p' eğrisinden hareketle önkonsolidasyon basınçları belirlenebilmiştir.

Şekil 5.2'de C01 nolu tekrarlı, 24 saat beklemeli, yük artım oranı $\Delta p/p=1$ olan klasik konsolidasyon deneyine ait e-log p' eğrileri gösterilmiştir. Kırmızı ile çizilen eğri, laboratuvarda 24 saatlik yükleme adımına göre çizilen klasik e-log p' eğrisini, siyah renkle çizilen eğri ise 24 saatlik yükleme adımından hareketle herbir gerilme kademesinde birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p zamanının belirlenmesi için çizilen EOP'ye göre e-log p' eğrisini göstermektedir. A01, A02, A03, B01 ve D01 nolu deneylere ait e-log p' eğrileri Ek'te Şekil A.1'de verilmiştir.

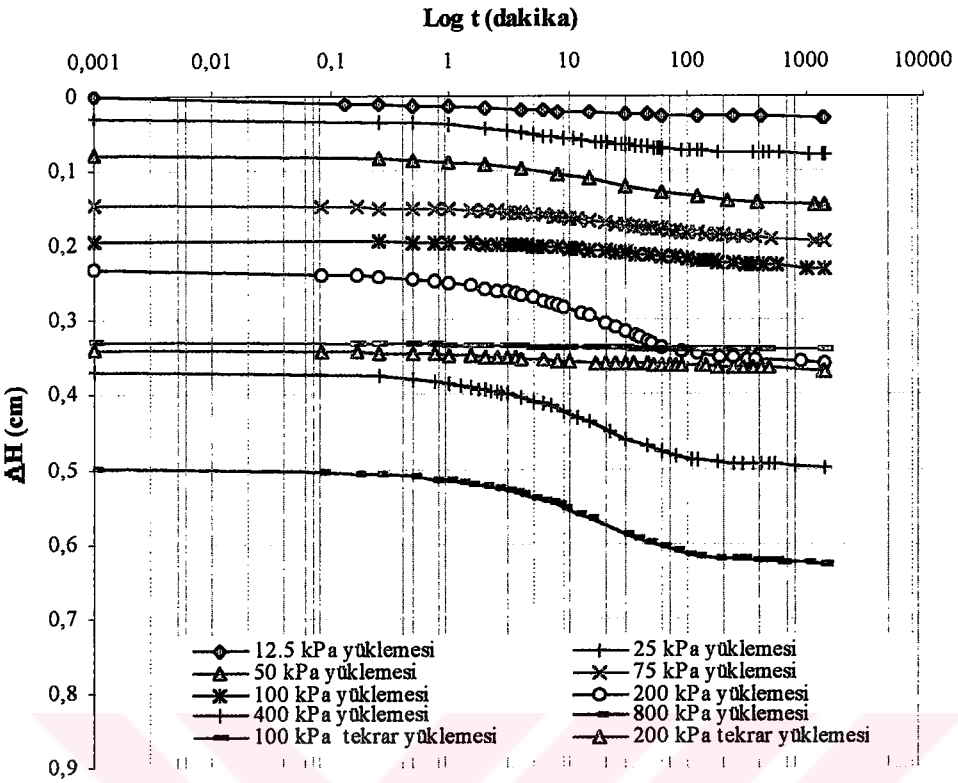
Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te C01 nolu klasik konsolidasyon deneyine ait tüm gerilme kademelerini toplu olarak gösteren ΔH-log (t) ve ΔH-$\sqrt{t}$ grafikleri gösterilmiştir. Diğer deneylere ait ΔH-log (t) ve ΔH-$\sqrt{t}$ grafikleri Ek'te Şekil B.1~Şekil B.5'de verilmiştir. Herbir gerilme seviyesi için birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p süresi Casagrande ve Taylor Yöntemlerine göre hesaplanıp ortalaması alındıktan ve Şekil 5.2'de gösterilen EOP'ye göre e-log p' eğrisi çizilip önkonsolidasyon basıncı belirlendikten sonra herbir gerilme kademesi için o gerilme seviyesindeki ikincil sıkışma parametreleri hesaplanmıştır. Şekil 5.5'te C01 nolu deneyde 25 kPa gerilme seviyesinde t_p-$10t_p$ arasında ikincil sıkışma katsayısı-C_α'nın belirlenişi



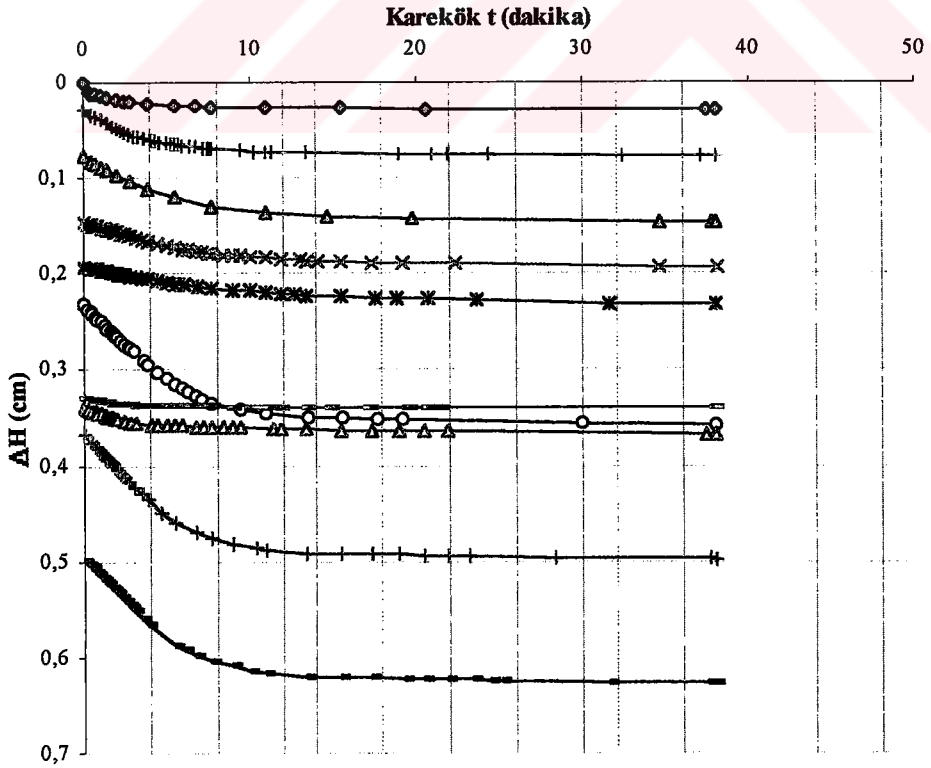
Şekil 5.1. Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri



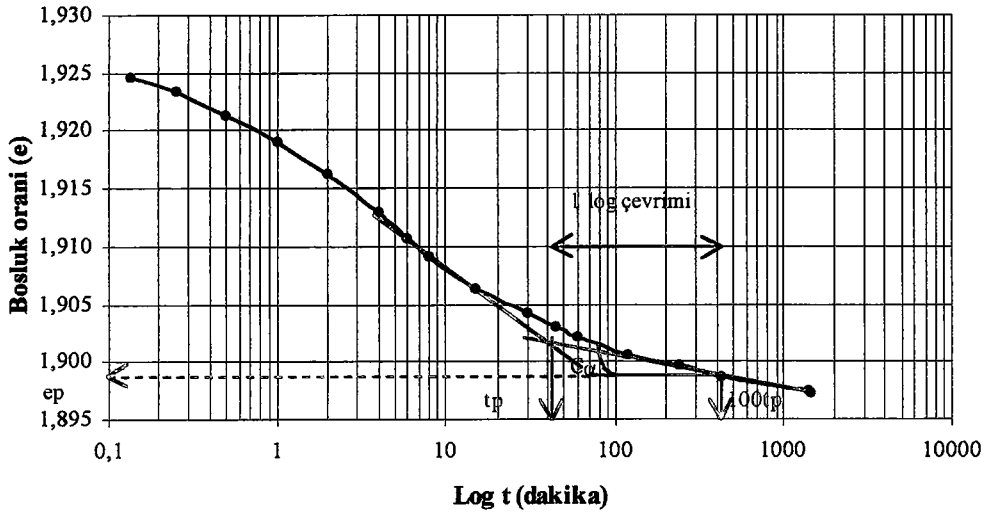
Şekil 5.2. C01 Nolu Deneye Ait e-log p' eğrisi



Şekil 5.3 C01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafikleri



Şekil 5.4. C01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-karekök (t) Grafikleri

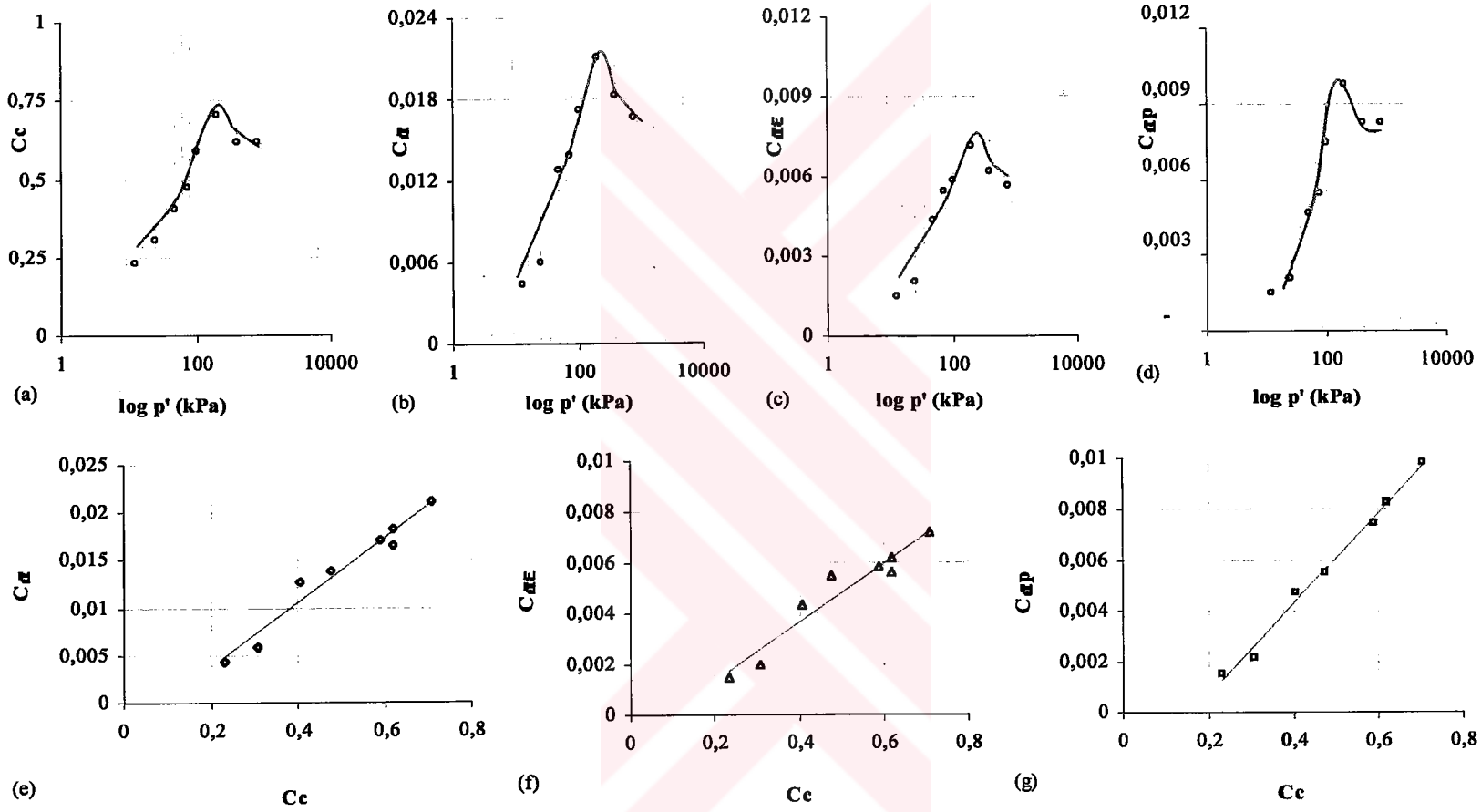


Şekil 5.5. C01 Nolu Deneyde 25 kPa Gerilme Seviyesine Ait e-log(t) Grafiği

gösterilmektedir. $C_\alpha = \delta e/\delta \log(t)$, Şekil 5.5'te gösterilen e-log t grafiğinde ikincil sıkışmaların başladığı t_p anından itibaren lineer giden kısmın eğiminden kolaylıkla belirlenebilmektedir. C_α değerinin bulunmasından sonra başlangıç boşluk oranı (e_0) ile hesaplanacak gerilme seviyesindeki ikincil sıkışmanın 1 log çevrimi boyunca tamamlandığı t_p zamanına denk gelen boşluk oranı (e_p) değerlerinden hareketle $C_{\alpha\varepsilon}$-ikincil sıkışma oranı ve $C_{\alpha p}$-modifiye ikincil sıkışma oranı hesaplanmaktadır. Diğer yandan, e-log p' eğrisi üzerinde de herbir gerilme seviyesinde eğriye teğet çizilerek C_c-sıkışma indisi belirlenmiştir. Tablo 5.2 'de C01 nolu konsolidasyon deneyine ait gerilme seviyeleri için hesaplanan ikincil sıkışma parametreleri özet halinde verilmiştir. Tablo 5.2'den görülebileceği gibi C01 nolu deney için uygulanan konsolidasyon basıncına göre sıkışma indisinin değişimine bağlı olarak ikincil sıkışma parametreleri de değişmektedir. İkincil sıkışma parametreleri C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ ile C_c arasındaki ilişkiye bakıldığında dar bir aralıkta olduğu görülmektedir. Zemin yüzeyinden 4.50 m derinlikten alınan yumuşak mavi kil zemin için ikincil sıkışma katsayısının sıkışma indisine oranı (C_α / C_c), çeşitli gerilme seviyelerinde 0.019~0.032 arasında değerler almaktadır. İkincil sıkışma oranının, sıkışma indisine oranı ($C_{\alpha\varepsilon} / C_c$) ise 0.006~0.012 arasında değerler alırken modifiye ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasında $C_{\alpha p} / C_c = 0.007$~$0.014$ oranı gözlenmektedir. C01 nolu deney için C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ katsayılarının gerilmeye bağlı olarak değişimi ve sıkışma indisi-C_c'ye oranları Şekil 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.2. C01 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki İkincil Sıkışma Parametreleri

Gerilme (kPa)	Sıkışma indisi C_c	İkincil sıkışma katsayısı C_α	İkincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$	Modifiye ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha p}$	C_α / C_c	$C_{\alpha\varepsilon} / C_c$	$C_{\alpha p} / C_c$
12.5	0.233	0.004	0.001	0.002	0.019	0.006	0.007
25	0.307	0.006	0.002	0.002	0.019	0.007	0.007
50	0.405	0.013	0.004	0.005	0.032	0.011	0.012
75	0.475	0.014	0.005	0.005	0.029	0.012	0.012
100	0.590	0.017	0.006	0.007	0.029	0.010	0.013
200	0.707	0.021	0.007	0.010	0.030	0.010	0.014
400	0.620	0.018	0.006	0.008	0.029	0.010	0.013
800	0.620	0.017	0.006	0.008	0.027	0.009	0.013
Ortalama					0.027	0.009	0.011



Şekil 5.6. C01 Nolu Deney İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki

İkincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) ile sıkışma indisi-C_c arasında doğru orantılı tekil bir ilişki vardır (Mesri ve Godlewski, 1977). Bu ilişki Şekil 5.6'da görülmektedir. Şekil 5.6 (a)'da C_c'nin uygulanan konsolidasyon gerilmesine göre değişimi verilmiştir. Uygulanan konsolidasyon basıncına bağlı olarak ikincil sıkışma parametrelerindeki aynı değişim Şekil 5.6 (b), Şekil 5.6 (c) ve Şekil 5.6 (d)'de açıkça görülmektedir. C_c'nin gerilmeye bağlı olarak artması durumunda ikincil sıkışma parametrelerinde artış, C_c'nin sabit olması durumunda sabit, C_c'nin azalması durumunda ise ikincil sıkışma parametrelerinde C_c'ye bağlı olarak azalma görülmektedir. C_c ile ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) arasındaki tekil ilişkiyi göstermek için çizilen Şekil 5.6 (e), Şekil 5.6 (f) ve Şekil 5.6 (g)'de, yatay eksende C_c, düşey eksende C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ çizilirse deney sırasında uygulanan konsolidasyon basınçları için doğrusal ve tekil bir ilişki olduğu ve bu tekil ilişkinin aynı kil için tüm gerilme kademelerinde sabit olduğu görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında yapılan 6 adet klasik konsolidasyon deneyleri için C_c, C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ katsayılarının gerilmeye bağlı olarak değişimi ve C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ katsayılarının sıkışma indisi-C_c'ye oranları Şekil 5.7'de verilmiştir. Tablo 5.3'te ise tüm klasik konsolidasyon deneylerine ait gerilme seviyeleri için hesaplanan ikincil sıkışma parametreleri özet halinde verilmiştir. Tablo 5.3'ten görüleceği üzere farklı konsolidasyon basınçları altında ikincil sıkışma katsayısının sıkışma indisine oranı C_α / C_c=0.017~0.045 arasında, ikincil sıkışma oranının sıkışma indisine oranı $C_{\alpha\varepsilon} / C_c$= 0.006~0.016 arasında ve modifiye ikincil sıkışma oranının sıkışma indisine oranı ise $C_{\alpha p} / C_c$=0.006~0.018 arasında değerler almaktadır.

İkincil sıkışma ile konsolidasyon basıncı (efektif gerilme) arasındaki etkileşim hakkında çeşitli araştırmacılar arasında farklı görüşler öne sürülmektedir. Newland ve Alley (1960), Horn ve Lamb (1964) C_α'nın konsolidasyon basıncından bağımsız olduğunu savunmakta iken, Wahls (1962) C_α'nın konsolidasyon basıncıyla azaldığını belirtmiştir. Ladd ve Preston (1965), C_α ile konsolidasyon basıncı arasındaki ilişkinin zemine göre değiştiğini savunurken, Haefeli ve Schaad (1948) aralarında ilişki olmadığını ileri sürmektedir. Mesri (1977) ise σ'_c kritik gerilme olmak üzere,

Tablo 5.3. Tüm Klasik Konsolidasyon Deneyleri İçin Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki İkincil Sıkışma Parametreleri

Deney no	Gerilme (kPa)	Sıkışma indisi C_c	İkincil sıkışma katsayısı C_α	İkincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$	Modifiye ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha p}$	C_α / C_c	$C_{\alpha\varepsilon} / C_c$	$C_{\alpha p} / C_c$
A01	12.5	0.227	0.009	0.003	0.003	0.039	0.013	0.014
	25	0.373	0.014	0.005	0.005	0.038	0.013	0.013
	50	0.495	0.020	0.007	0.007	0.040	0.014	0.015
	100	0.591	0.024	0.008	0.009	0.041	0.014	0.016
	200	0.571	0.020	0.007	0.009	0.034	0.012	0.016
	400	0.540	0.019	0.006	0.008	0.035	0.012	0.016
	800	0.540	0.018	0.006	0.008	0.033	0.011	0.015
A02	12.5	0.230	0.011	0.004	0.004	0.049	0.016	0.017
	25	0.380	0.014	0.005	0.005	0.036	0.012	0.013
	50	0.466	0.021	0.007	0.008	0.045	0.015	0.016
	100	0.676	0.025	0.008	0.010	0.038	0.012	0.016
	200	0.625	0.023	0.008	0.010	0.037	0.012	0.015
	400	0.598	0.020	0.007	0.009	0.034	0.011	0.016
	800	0.598	0.019	0.006	0.009	0.032	0.011	0.015
A03	12.5	0.296	0.011	0.004	0.004	0.039	0.013	0.013
	25	0.406	0.016	0.005	0.006	0.040	0.013	0.014
	50	0.513	0.019	0.006	0.007	0.038	0.013	0.014
	100	0.608	0.023	0.008	0.009	0.037	0.012	0.015
	200	0.607	0.022	0.007	0.010	0.037	0.012	0.016
	400	0.569	0.021	0.007	0.009	0.036	0.012	0.017
	800	0.569	0.020	0.006	0.010	0.034	0.011	0.017

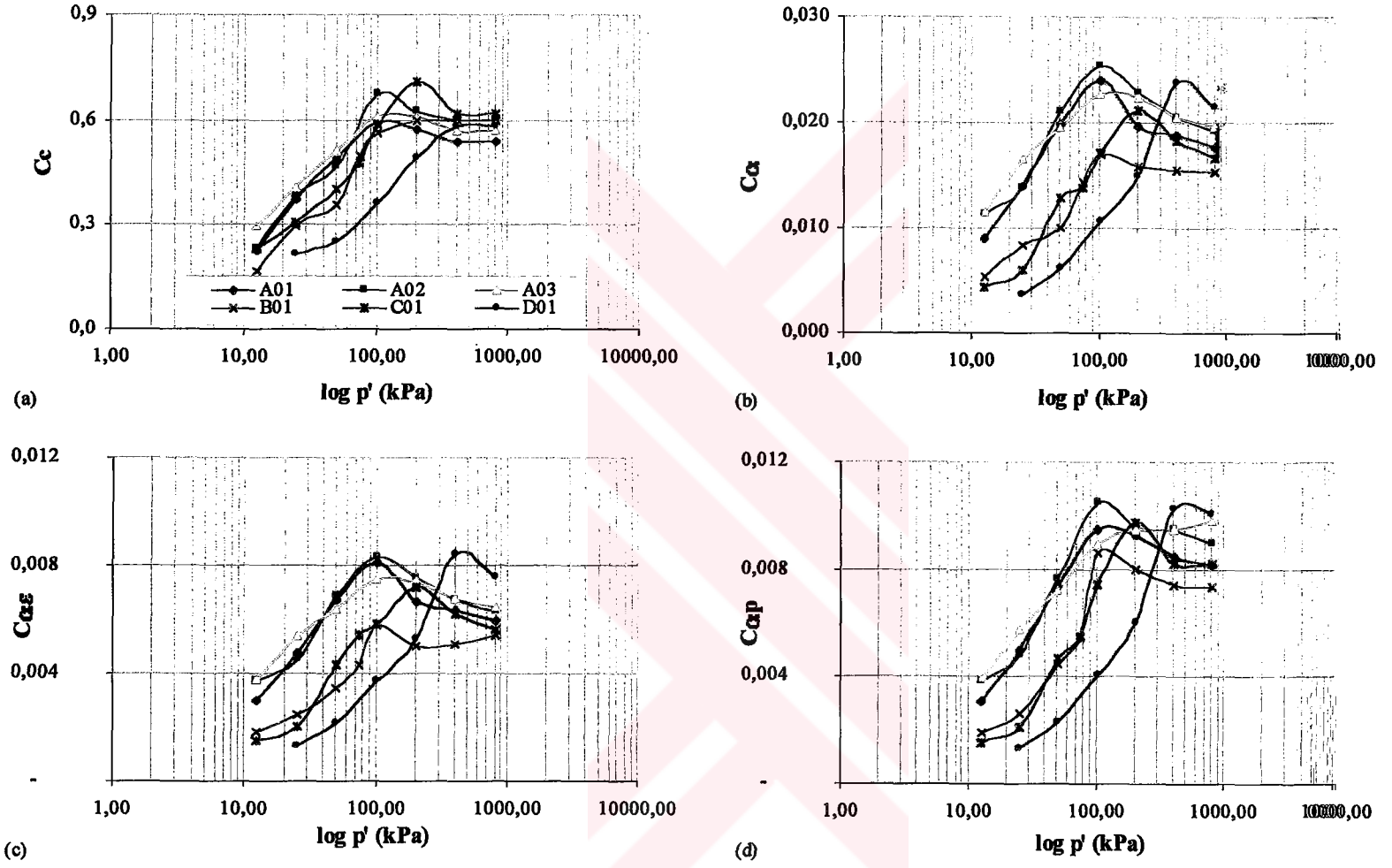
Tablo 5.3 (devam)

Deney no	Gerilme (kPa)	Sıkışma indisi C_c	İkincil sıkışma katsayısı C_α	İkincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$	Modifiye ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha p}$	C_α / C_c	$C_{\alpha\varepsilon} / C_c$	$C_{\alpha p} / C_c$
B01	12.5	0.167	0.005	0.002	0.002	0.032	0.011	0.011
	25	0.299	0.008	0.003	0.003	0.028	0.008	0.009
	50	0.356	0.010	0.003	0.004	0.028	0.010	0.013
	75	0.486	0.014	0.004	0.006	0.030	0.009	0.011
	100	0.566	0.017	0.006	0.009	0.030	0.010	0.015
	200	0.596	0.016	0.005	0.008	0.027	0.009	0.014
	400	0.600	0.015	0.005	0.007	0.026	0.009	0.012
	800	0.598	0.015	0.005	0.007	0.026	0.009	0.012
C01	12.5	0.233	0.004	0.001	0.002	0.019	0.006	0.007
	25	0.307	0.006	0.002	0.002	0.019	0.007	0.007
	50	0.405	0.013	0.004	0.005	0.032	0.011	0.012
	75	0.405	0.014	0.005	0.005	0.034	0.012	0.013
	100	0.602	0.017	0.006	0.007	0.029	0.010	0.011
	200	0.707	0.021	0.007	0.009	0.030	0.010	0.012
	400	0.620	0.018	0.006	0.008	0.029	0.010	0.013
	800	0.620	0.017	0.006	0.008	0.027	0.009	0.013
D01	25	0.216	0.004	0.001	0.001	0.017	0.006	0.006
	50	0.252	0.006	0.002	0.002	0.024	0.009	0.009
	100	0.362	0.011	0.004	0.004	0.029	0.010	0.011
	200	0.492	0.015	0.005	0.006	0.030	0.011	0.012
	400	0.584	0.024	0.008	0.010	0.041	0.014	0.018
	800	0.584	0.021	0.008	0.010	0.037	0.013	0.017
Ortalama						0.033	0.011	0.013

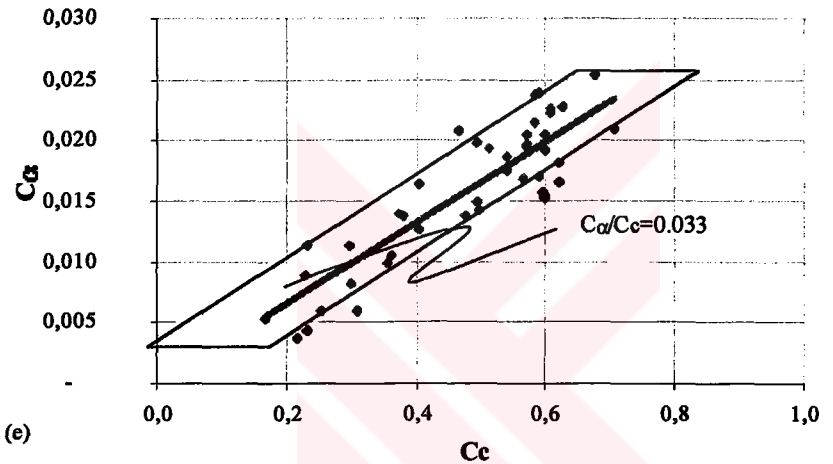
C_α değerinin 0.5 σ'_c ile 1.5 σ'_c aralığındaki konsolidasyon basınçları için artacağını savunmaktadır. Mesri ve Godlewski (1977) çalışmasında, kritik basınçtan küçük konsolidasyon gerilmeleri için zamanla C_α'nın arttığı, büyük konsolidasyon gerilmeleri için ise azaldığını belirtmiştir. C_c'nin σ' ile sabit kaldığı efektif gerilme aralığında kritik basınçtan daha büyük konsolidasyon basınçları için C_α'nın da zamanla sabit kalacağını göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan ilk grup deneylerde, gerek sıkışma indisi-C_c ve gerekse ikincil sıkışma parametrelerinin (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) uygulanan konsolidasyon basıncına bağlı olarak yükseldiği ve bir kritik gerilmeden sonra bir miktar azaldığı ya da sabit kaldığı belirlenmiştir. Şekil 5.7(a), Şekil 5.7(b), Şekil 5.7(c) ve Şekil 5.7(d)'den görüleceği üzere bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde, sıkışma indisi-C_c ve ikincil sıkışma parametreleri (ikincil sıkışma katsayısı-C_α, ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ve modifiye ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha p}$) değerleri, önkonsolidasyon basıncından küçük gerilmelerde zamanla artmakta, ön konsolidasyon basıncının 0.5p'$_c$ ile 2p'$_c$ aralığında artışı hızlanmaktadır. Önkonsolidasyon basıncının 2p'$_c$ değerinden sonra ise nispeten azalmakta veya sabit kalmaktadır. İkincil sıkışma parametreleri (ikincil sıkışma katsayısı-C_α, ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ve modifiye ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha p}$) değerleri, pik değerlere önkonsolidasyon basıncını bir miktar geçen gerilmede ulaşmaktadır. Önkonsolidasyon basıncından düşük gerilmelerde, $C_{\alpha\varepsilon}$-ikincil sıkışma oranı 0.001 ile 0.003 arasında değerler almaktayken 0.5p'$_c$ ile 2p'$_c$ aralığında ikincil sıkışma oranı 0.004 ile 0.008 arasında değerler almakta ve 2p'$_c$ değerini geçen gerilmelerde C_c'nin değişimine bağlı olarak ikincil sıkışma oranı 0.006-0.007 değerlerine azalmaktadır.

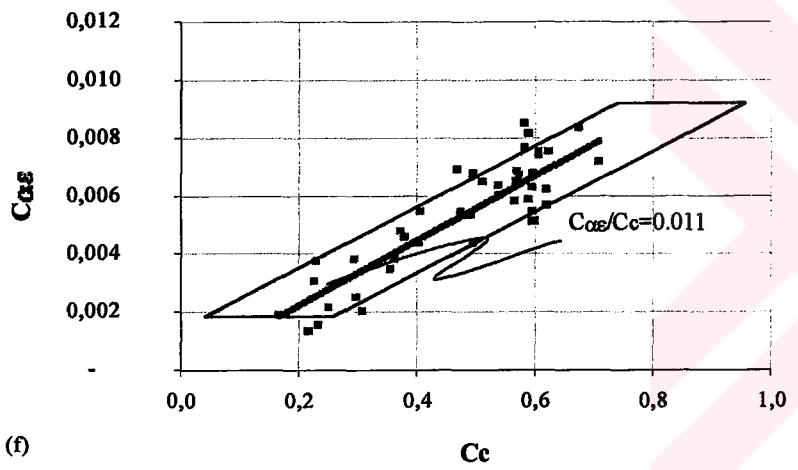
Mesri (1973) tarafından zeminlerin ikincil sıkışabilirliklerini esas alan sınıflandırması bu tez çalışması içinde Bölüm 3.7, Tablo 3.4'te verilmiştir. Mesri'nin 1973'te sunduğu çalışmaya göre birçok kil zemin için ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ değerleri % 0.1-10 aralığında kalmaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan deneylerde kullanılan yumuşak mavi kil zemin için, $C_{\alpha\varepsilon}$-ikincil sıkışma oranı 0.001 ile 0.008 (% 0.1~ 0.8) arasında değerler almaktadır. Yukarıdaki paragraflarda anlatıldığı üzere, kritik basınçtan küçük gerilmelerde (0.5p'$_c$ ile 2p'$_c$ aralığında) zemin düşük ikincil



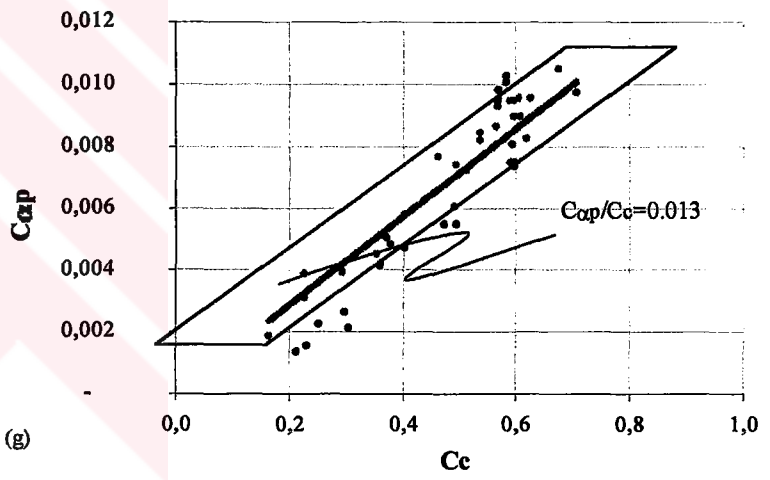
Şekil 5.7. Klasik Konsolidasyon Deneyleri İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki



(e)



(f)



(g)

Şekil 5.7. devam

sıkışabilirlik göstermektedir. Kritik basınç aralığında zemin, orta derecede ikincil sıkışabilirlik davranışı göstermekte olup kritik basınçtan sonra düşük-orta ikincil sıkışabilirlik göstermektedir. Bu beklenen bir durumdur. Zira, önkonsolidasyon basıncından daha az gerilme aralığında ikincil sıkışma katsayısı, tekrar sıkışma bölümündeki gerilmenin artmasıyla artmakta ve maksimum önkonsolidasyon basıncının hemen ötesinde bir gerilme seviyesinde bir maksimum değerine ulaşmaktadır. Bundan sonra normal konsolide kilin değerleri ile birleşmekte ve ikincil sıkışabilirlik artmakta dolayısıyla daha fazla ikincil sıkışma yapmaktadır.

Hacim değişimindeki tüm mekanizmalar zamana bağımlıdır. Efektif gerilmenin artımına karşılık oluşan her yapısal tepki, hem zamana bağımlı değişikliklere sebep olur, hem de zamana bağımlı değişikliklerin sonucudur. Bu nedenle, zaman artımı veya efektif gerilmenin artımıyla meydana gelen değişikliklerin büyüklüğü içsel bağımlıdır. Konsolidasyon süreci boyunca C_c sabit değildir ve sürekli değişmektedir (Şekil 5.7(a)). İkincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) ile sıkışma indisi-C_c arasında tekil bir ilişki vardır ve bu ilişki herhangi efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir (Şekil 5.7(e), Şekil 5.7(f) ve Şekil 5.7(g)).

Sonuç olarak; tez çalışması kapsamında yumuşak mavi kil zemin üzerinde yapılan ilk grup klasik konsolidasyon deneylerinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. C_α($C_{\alpha\varepsilon}$ veya $C_{\alpha p}$) ve C_c arasında tekil bir ilişki vardır ve bu tekil ilişki, herhangi efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir. Aynı kil zemin için ikincil sıkışma süresince, tüm efektif gerilmelerde ve boşluk oranlarında ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasındaki ilişki tektir.

2. İkincil sıkışma katsayısı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_\alpha / C_c = 0.017\sim0.049$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_\alpha / C_c = 0.33$ alınabilecektir.

3. İkincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_{\alpha\varepsilon} / C_c = 0.006\sim0.016$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha\varepsilon} / C_c = 0.011$ seçilebilecektir.

4. Modifiye ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_{\alpha p} / C_c = 0.006 \sim 0.018$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha p} / C_c = 0.013$ alınabilecektir.

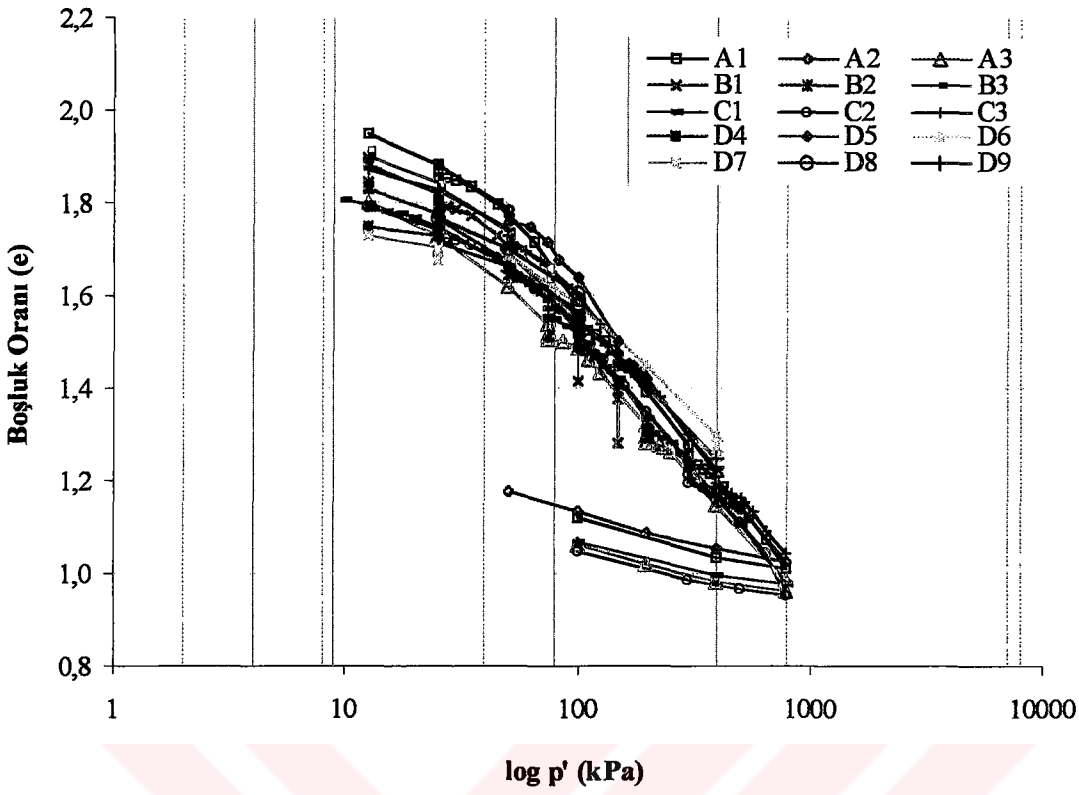
5.1.2 Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri

Deneysel çalışma kapsamında yapılan ikinci grup deneylerde, genç normal konsolide yumuşak mavi kil zemin numuneleri üzerinde uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Tablo 5.4'te tüm uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait özet bilgiler verilmiştir. Bu deney grubu içinde yapılan A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 ve C3 konsolidasyon deneylerinde, 4.Bölümde Tablo 4.8'de verilen gerilmelerde (1 hafta-10 gün süreyle) uzun süreli yükleme yapılmıştır. B1, B2 ve B3 nolu deneylerde 75, 100 ve 150 kPa gerilmelerinde 6.5 ay süreyle uzun süreli yükleme yapılmıştır. Zemin yüzeyinden 3.50 m derinlikten alınan numuneler üzerinde yapılan D grubu deneylerde ise daha farklı bir yol izlenmiştir. D1, D2 ve D3 nolu deneylerde istenilen konsolidasyon basınçlarında (25, 100 ve 400 kPa) birincil konsolidasyonun tamamlanmasını takiben konsolidasyon deneyine son verilmiş ve bu numuneler, daha sonra SEM analizi yapmak üzere hazırlanmıştır. D4, D5 ve D6 nolu deneylerde, istenilen konsolidasyon basınçlarında (25, 100 ve 400 kPa) ikincil sıkışmanın 2 log çevrimi oluşmasını takiben $100t_p$ zamanında konsolidasyon deneyine son verilmiş ve bu numuneler daha sonra SEM analizi yapmak üzere hazırlanmıştır. D7, D8 ve D9 nolu deneylerde ise istenilen konsolidasyon basınçlarında (25, 100 ve 400 kPa) zamanla ikincil sıkışma parametrelerinde bir değişim olup olmadığını anlamak için 69-70 gün süreyle uzun süreli yükleme yapılmış ve benzer şekilde bu değişimi laboratuvarda incelemek için 69-70 gün sonunda konsolidasyon deneyine son verilmiş ve numuneler daha sonra SEM analizi yapmak üzere hazırlanmıştır. Şekil 5.8'de bu grupta yapılan 18 adet konsolidasyon deneylerine ait e-log p′ eğrileri toplu halde gösterilmiştir.

İlk grup klasik konsolidasyon deneylerinde birincil konsolidasyonun küçük gerilmeler altında 60-100 dakikada büyük konsolidasyon basınçları altında ise 100-150 dakikada tamamlandığı belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında uzun süreli konsolidasyon deneylerinde kil zeminin ikincil sıkışma davranışının araştırılacağı gerilmelerde deney programına göre 1 hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde

Tablo 5.4. Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerine Ait Özet Veriler

Deney No	Derinlik (m)	Başlangıç su muhtevası w_0 (%)	Deney sonu su muhtevası w_s (%)	Başlangıç doğal bir. hac. ağr. γ_0 (kN/m³)	Deney sonu doğal bir. hac. γ_s (kN/m³)	Başlangıç boşluk oranı e_0	Deney sonu boşluk oranı e_s
A1	9.5	64.86	39.75	1.56	1.84	2.017	1.118
A2	9.5	66.72	41.85	1.61	1.90	2.035	1.177
A3	9.5	64.29	37.76	1.50	1.76	1.869	1.062
B1	7.5	64.09	49.58	1.51	1.68	1.972	1.416
B2	7.5	64.09	44.86	1.59	1.82	1.942	1.281
B3	7.5	64.09	53.22	1.53	1.68	1.993	1.520
C1	4.5	60.10	38.48	1.59	1.88	1.833	1.068
C2	4.5	60.57	37.78	1.50	1.79	1.830	1.049
C3	4.5	64.53	37.51	1.47	1.80	1.920	1.041
D1	3.5	59.71	55.82	1.66	1.71	1.519	1.486
D2	3.5	59.71	53.71	1.58	1.67	1.658	1.502
D3	3.5	59.71	43.81	1.62	1.87	1.614	1.092
D4	3.5	62.98	61.45	1.62	1.66	1.767	1.716
D5	3.5	62.98	55.13	1.56	1.65	1.758	1.540
D6	3.5	62.98	44.86	1.55	1.74	1.808	1.253
D7	3.5	60.56	59.98	1.63	1.68	1.755	1.675
D8	3.5	60.56	55.53	1.56	1.66	1.833	1.551
D9	3.5	60.56	41.70	1.53	1.76	1.800	1.165



Şekil 5.8. Uzun Süreli Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri

yükleme yapılırken ara kademelerde konsolidasyon basıncı altında birincil konsolidasyonun tamamlanması için basınç kademesine göre 100-200 dakika beklemek yeterli görülmüştür. Yani birincil konsolidasyonun tamamlandığı sürede yükleme tamamlanmış kabul edilip bir sonraki yükleme seviyesine geçilmiştir. Birincil konsolidasyonun tamamlanması için gerekli t_p süreleri hesaplanırken hem önceki klasik konsolidasyon deneyleri sonuçlarından yararlanılmış hem de deney süresince gerek log(t) gerekse $\sqrt{t}$ yöntemleriyle birincil konsolidasyonun tamamlanması için gerekli t_p süreleri belirlenmiştir. Birincil konsolidasyonun tamamlandığı belirlenince bir sonraki yükleme seviyesine geçilmiştir. İkincil sıkışmaya gidilen gerilmele seviyelerinde programa göre uzun süre beklenirken, ikincil sıkışmaya gidilen gerilmelerden sonra yük artım oranı $LIR = \Delta p/p = 0.05 \sim 0.30$ seçilerek daha sık yükleme yapılmış ve bu gerilmelerde de sadece birincil konsolidasyonun tamamlanması beklenmiştir. Uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait ΔH-log t ve ΔH-$\sqrt{t}$ grafikleri Ek'te Şekil B.6~Şekil B.23'te verilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyleri sonuçları aşağıdaki paragraflarda değerlendirilmiştir.

5.1.3 Uzun Süreli Yüklemenin Etkisi

Deneysel çalışmanın bu bölümünde uzun süreli konsolidasyon deneylerinde ikincil sıkışmaya gidilen gerilme sonrasında düşük yük artım oranlarıyla çalışılarak ikincil sıkışmanın konsolidasyon davranışına etkisi araştırılmıştır.

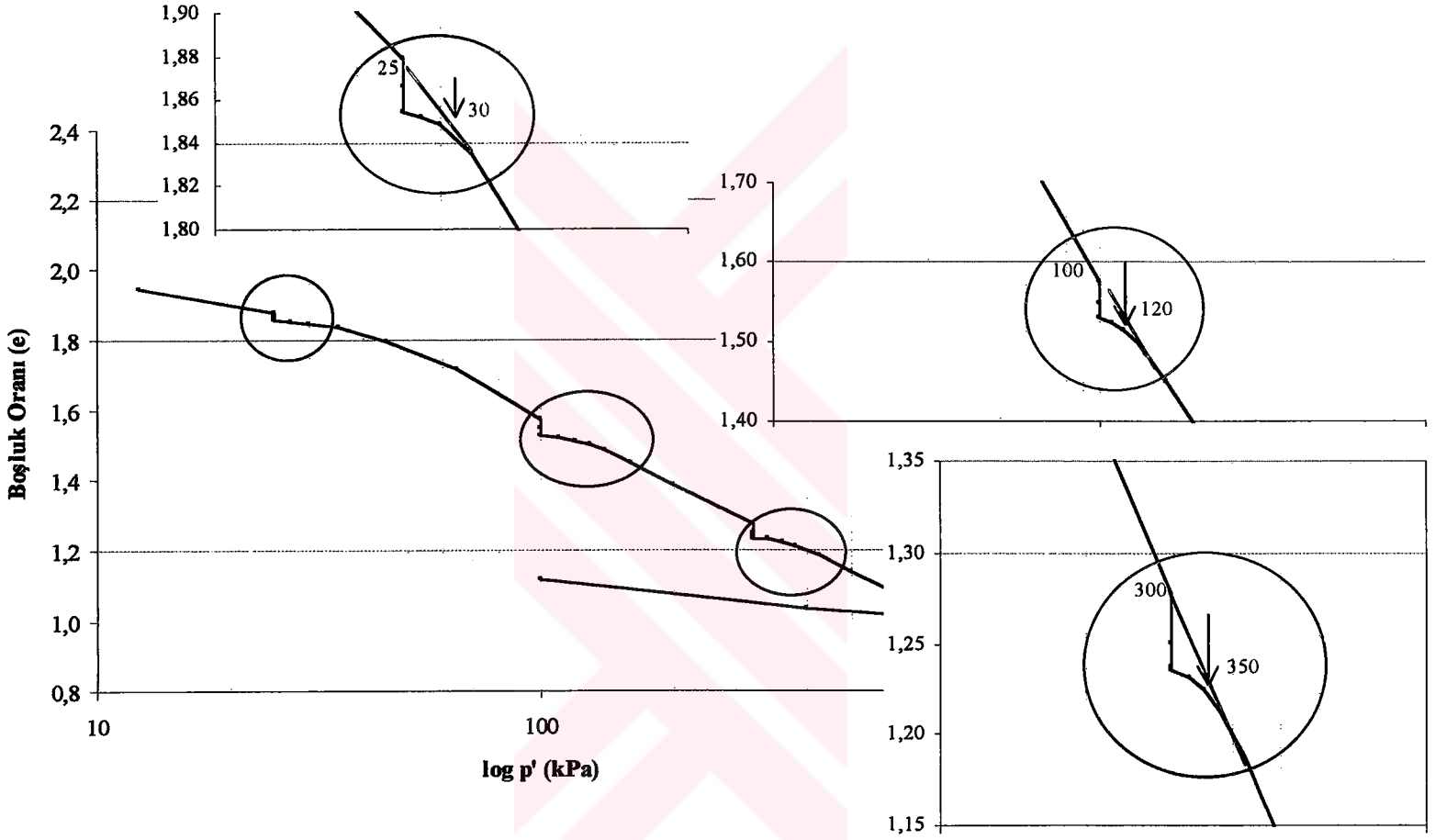
1950-1960 yıllarında Purdue Üniversitesinde yapılan deneysel çalışmalarda, normal konsolide killerin hacim değişikliğine başlamadan küçük fakat önemli bir basınç artımına dayanabildiği ve bu "p_{cq}-görünür önkonsolidasyon basıncının", yüksek kalitedeki örselenmemiş numunelerin küçük yük artımlarıyla test edilmesiyle ilgili olduğu belirlenmiştir (Leonards ve Girault, 1961). Leonards ve Deschamps (1995), uzun süreli ikincil sıkışmanın ardından ikincil sıkışmaya gidilen gerilme-p'den daha büyük p_{cq} değeri oluştuğunu, p_{cq}/p oranının genelde 1.1 ~ 1.4 oranında olduğunu ve plastik killerde daha yüksek p_{cq}/p oranı olduğunu belirtmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda sonuç olarak ikincil sıkışma hızının bir önceki yükün uygulanma süresinden etkilendiği ve bu etkilenmenin önyüklemeye benzer bir etki olduğu belirtilmektedir. İkincil sıkışma oranının esasen önceki yüklemenin süresi tarafından etkilendiği yönünde genel bir kanı oluşmaktadır. İkincil sıkışma oranı üzerinde tüm doğal zemin çökellerinin maruz kaldığı uzun süreli yüklemenin etkisi, önyükleme etkisiyle benzeşmektedir. İkincil sıkışma miktarı yük bekletimi ile oluşmakta ve gelişmektedir. Sonuç olarak, dışsal gerilmelere karşı daha yüksek gerilme sergileyen daha uzun bekletimli numune herhangi bir zaman aralığında daha az ani ve birincil sıkışmalar gösterecektir. İleri yüklemelerde bu davranış basınç artımının artması ile açıkça görünür hale gelmektedir. Zemin yüzeyinden 9.50 m derinlikten alınan, arazide üzerindeki örtü yükü $p'_0 = 55$ kPa ve önkonsolidasyon basıncı $p'_c = 78$ kPa olarak hesaplanan A1 nolu deneye ait e-log p' grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir. A1 nolu deneyde 25, 100 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde uzun süreli yükleme yapılmıştır. İkincil sıkışmaya gidilecek gerilmelerden sonra yük artım oranı LIR = 0.05~0.30 seçilerek sık yükleme yapılmış ve bu gerilmelerde sadece birincil konsolidasyonun tamamlanması yeterli görülmüştür. Böylece, ikincil sıkışmalara izin verilecek 25, 100 ve 300 kPa gerilme seviyelerinde uzun süreli yükleme sebebiyle, ileri yüklemelerde önyüklemeye benzer bir etki olup olmadığı araştırılmıştır.

Şekil 5.9'dan görüleceği üzere A1 nolu deneyde, 25 kPa gerilme seviyesinde 1 hafta süreyle uzun süreli yükleme yapılıp ikincil sıkışmaların 2 log çevrimi boyunca oluşmasına izin verildikten sonra düşük yük artım oranlarıyla sadece birincil konsolidasyonun tamamlanmasına izin verilen yüklemeler yapıldığında "görünür önkonsolidasyon basıncının-p_{cq}" oluştuğu görülmektedir. 25 kPa gerilme seviyesinde 1 hafta süreyle uzun süreli yükleme yapıldıktan sonra p_{cq}/p oranı = 1.2 bulunmuştur. Yani numune 30 kPa gerilme seviyesine kadar daha az ani ve birincil sıkışma göstermiştir. 30 kPa gerilme seviyesinden sonra ikincil sıkışma nedeniyle oluşan önyüklemeye benzer etki ortadan kalkmıştır.

Benzer şekilde, 100 kPa gerilme seviyesinde 1 hafta süreyle 2 log çevrimi ikincil sıkışmaya izin verilecek şekilde uzun süreli yükleme yapıldıktan sonra numune, 120 kPa gerilme seviyesine kadar daha az ani ve birincil sıkışma göstermiş ve görünür önkonsolidasyon basıncı-p_{cq} = 1.2 bulunmuştur. p_{cq}/p oranı = 1.2'dir ve 100 kPa gerilme seviyesinden sonra ikincil sıkışma nedeniyle oluşan önyüklemeye benzer etki ortadan kalkmıştır.

300 kPa gerilme seviyesinde ise 10 gün süreyle (2 log çevrimi ikincil sıkışma yapması için gerekli süre) uzun süreli yükleme yapıldıktan sonra numune, p_{cq} = 350 kPa gerilme seviyesine kadar daha az ani ve birincil sıkışma göstermiş ve p_{cq}/p oranı = 1.17 olarak bulunmuştur. 350 kPa gerilme seviyesinden sonra ikincil sıkışma nedeniyle oluşan önyüklemeye benzer etki ortadan kalkmıştır.

Sonuç olarak; A1 nolu konsolidasyon deneyinde kil zemin, 25; 100 ve 300 kPa gerilmeleri altında birincil konsolidasyonunu tamamladıktan sonra 2 log çevrimi boyunca (bu deneyde 1 hafta-10 gün) ikincil sıkışmaya terk edilip daha sonra küçük yük artımlarıyla konsolidasyon deneyine devam edilirse deney sonu elde edilen e-log p' eğrisinde zeminin, uzun süreli ikincil sıkışma yapan gerilme sonrası bir miktar yük artımında daha az ani ve birincil sıkışmalar gösterdiği görülmüştür. Bu tez çalışması kapsamında yapılan diğer uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait uzun süreli yüklemenin zeminin oturma davranışa etkisini gösteren Şekiller Ek'te Şekil C.1~Şekil C.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.9. A1 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi

Tablo 5.5'te, bu tez çalışması kapsamında yapılan diğer uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait deney datası tablo halinde özetlenerek verilmiştir. Tablo 5.5'ten görüleceği üzere, yumuşak mavi kil zeminde uzun süreli ikincil sıkışmaya terkedilen gerilme (p) sonrasında yumuşak zemin, p_{cq}/p = 1.13~1.33 oranında gerilme artışına kadar bir dayanım göstermektedir. Önkonsolidasyon basıncından düşük gerilmelerde ikincil sıkışma yapılan gerilme sonrası zemindeki direnç p_{cq}/p = 1.20 ile 1.25 arasında değerler alırken önkonsolidasyon basıncına yakın gerilmelerde bu oran p_{cq}/p =1.25~1.33 arasında değerler almaktadır. Büyük gerilmelerde ikincil sıkışma yapılan gerilme sonrası zemindeki direnç p_{cq}/p = 1.13 ile 1.19 arasında değişmektedir. Dolayısıyla arazide örtü yükü altında, uzun süre ikincil sıkışmaya maruz kalınan gerilmelerden daha düşük gerilmelerde zemin daha az birincil ve ani sıkışma yaparken, daha yüksek gerilmelerde nispeten daha fazla birincil ve ani sıkışma yapacaktır.

Arazide üzerindeki örtü yükü altında uzun süre konsolide olan normal konsolide yumuşak killer, daha sonra üzerlerine etkiyen küçük gerilme artımında beklenilen miktarda birincil ve ani sıkışma yapmamaktadır ve bu durum klasik konsolidasyon deneyleriyle belirlenememektedir. Halbuki, laboratuvarda yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyleriyle belirlenen bu zemin davranışı, arazide üzerindeki örtü yükü altında uzun süre (binlerce, yüzbinlerce yıl) konsolide olan ve büyük miktarda ikincil sıkışma yapan normal konsolide yumuşak killerin küçük gerilme artımlarında neden daha az birincil ve ani sıkışma davranışı gösterdiğine fiziksel olarak açıklık getirmektedir. Laboratuvar ortamında yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyleriyle, uzun süre ikincil sıkışmaya maruz bırakılan gerilme sonrası küçük yük artımlarıyla yükleme yapılır ve küçük yük artımlarında zeminin sadece birincil konsolidasyonunu tamamlamasına izin verilirse, daha büyük gerilmelerde görünür önkonsolidasyon basıncı-P_{cq} olarak adlandırılan gerilmeye kadar zemin, önyüklemeyle iyileştirilmiş zemin gibi daha az birincil ve ani sıkışma davranışı göstermektedir.

Tablo 5.5. İkincil Sıkışma Nedeniyle Oluşan Görünür Önkonsolidasyon Basıncı

Deney No	Derinlik (m)	İkincil sıkışmaya gidilen gerilme p (kPa)	Görünür önkonsolidasyon basıncı p_{cq} (kPa)	p_{cq}/p
A1	9.50	25	30	1.20
		100	120	1.20
		300	350	1.17
A2	9.50	50	62.5	1.25
		150	175	1.17
		400	450	1.13
A3	9.50	75	100	1.33
		200	237.5	1.19
B1	7.50	25	30	1.20
B2	7.50	50	62.5	1.25
C1	4.50	12.5	15	1.20
		75	90	1.20
		200	230	1.15
C2	4.50	25	30	1.20
		100	120	1.20
		300	350	1.17
C3	4.50	50	60	1.20
		150	185	1.23
		400	500	1.25

İkincil sıkışma oranı üzerinde tüm doğal zemin birikintilerinin maruz kaldığı uzun süreli yüklemenin etkisi, önyükleme etkisiyle benzeşmektedir. İkincil sıkışma miktarı yük bekletimi ile oluşmakta ve gelişmektedir. Sonuç olarak; dışsal gerilmelere karşı daha yüksek direnç sergileyen daha uzun bekletimli numune herhangi bir zaman aralığında daha az ani ve birincil sıkışmalar gösterecektir. İkincil sıkışma davranışı gösteren kil zeminlerde uzun süreli yüklemenin etkisi önyüklemeye benzer bir etki yaratmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan ikinci grup uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, yumuşak mavi kil zeminde, uzun süreli ikincil sıkışmaya terkedilen gerilme (p) sonrasında yumuşak zemin, p_{cq}/p = 1.13~1.33 oranında gerilme artışına kadar bir dayanım göstermekte ve dolayısıyla daha az birincil ve ikincil sıkışma yapmaktadır. Ancak p_q/p = 1.13~1.33 oranından daha yüksek gerilmelerde yumuşak kil zeminin davranışı tekrar EOP e-log p' eğrisine ulaşmakta ve beklenilen miktarda birincil konsolidasyon sıkışması ve ani sıkışma yapmaktadır. Yapılan uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, düşük gerilmelerde, uzun süreli yüklemenin etkisi nispeten yüksek iken daha büyük gerilmelerde uzun süreli yüklemenin etkisinin daha az olduğu belirlenmiştir. Ancak, uzun süreli yüklemenin etkisi tümüyle ikincil sıkışmanın miktarına ve ikincil sıkışmaya maruz kalınan sürenin uzunluğuna bağlıdır. Sonuç olarak; ikincil sıkışma miktarı ne kadar çoksa ve ne kadar uzun süre zemin ikincil sıkışma yapıyorsa bu etki o kadar büyük olacak ve zemin bu etki oranında nispeten daha büyük oranda gerilme artımlarına direnç gösterecek şekilde daha az birincil sıkışma yapacaktır.

5.1.4 İkincil Sıkışma Sürecinde İkincil Sıkışma Parametrelerinin Zamanla Değişimi

Deneysel çalışmanın bu bölümünde uzun süreli konsolidasyon deneylerinde ikincil sıkışmaya gidilen gerilmelerde ikincil sıkışma süresince ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) belirlenmiş, ikincil sıkışma parametreleri ile C_c arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu deney grubu içinde yapılan tüm uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait özet veriler Tablo 5.4'te, uzun süreli konsolidasyon deneyleriyle ilgili yükleme adımları 4. Bölümde Tablo 4.8'de verilmiştir. Şekil 5.8'de, bu grupta yapılan 18 adet uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait e-log p' eğrileri toplu halde

gösterilmiştir. Deneylerde izlenen yöntem önceki paragraflarda anlatıldığı için bu bölümde ilk önce; A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3, D4, D5 ve D6 nolu konsolidasyon deneylerinde, uygulanan konsolidasyon basıncı altında 1 hafta-10 gün süreyle yapılan uzun süreli yükleme deneyi sonuçları irdelenerek ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$), sıkışma indisi-C_c ile zaman arasındaki değişim incelenmiştir.

A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3, D4, D5 ve D6 nolu uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, çeşitli konsolidasyon basınçları altında 1 hafta ile 10 gün arasında yükleme yapılmış, böylece uygulanan konsolidasyon basıncı altında zemin birincil konsolidasyonunu tamamladıktan sonra 2 log çevrimi boyunca ikincil sıkışmanın oluşmasına izin verilmiştir. İkincil sıkışmanın 1 hafta-10 gün süreyle (2 log çevrimi boyunca) oluşmasına izin verilen gerilme kademelerinde, tüm deneylerde ikincil sıkışma boyunca ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasındaki oran araştırılmıştır. İzlenen yöntem şu şekildedir:

1) Konsolidasyon deneyi boyunca tüm gerilme seviyeleri için birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p süreleri gerek Casagrande (log t) ve gerekse Taylor ($\sqrt{t}$)yöntemiyle belirlenmiştir.

2) Yarı logaritmik e-log p' eksenleri üzerinde birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p zamanına karşılık gelen EOP eğrisi çizilmiştir.

3) Uzun süreli yükleme yapılan konsolidasyon basınçları için $10t_p$ zamanına karşılık gelen boşluk oranı $(e)_{10tp}$ ve $100t_p$ zamanına karşılık gelen boşluk oranı $(e)_{100tp}$ işaretlenmiştir.

4) Uzun süreli yükleme yapılmayan gerilme seviyeleri için $(e)_{10tp}$ ve $(e)_{100tp}$ boşluk oranları ekstrapolasyonla hesaplanarak deneydeki tüm gerilme seviyeleri için t_p, $10t_p$ ve $100t_p$'ye karşılık gelen e-log p' eğrileri elde edilmiştir.

5) Uzun süreli yükleme yapılan her konsolidasyon basıncı seviyesi için t_p, $10t_p$ ve $100t_p$'ye karşılık gelen e-log p' eğrileri üzerinde eğriye teğet çizilip eğiminden sıkışma indisi-C_c hesaplanmıştır.

6) Uzun süreli yükleme yapılan konsolidasyon basınçları için yarı logaritmik e-log t eğrisi üzerinde, t_p, $10t_p$ ve $100t_p$ zamanlarına karşılık gelen boşluk oranları işaretlenip t_p-$10t_p$ ve $10t_p$-$100t_p$ arasında e-log t eğrisinin eğiminden ikincil sıkışma katsayısı-C_α hesaplanmıştır.

7) Tüm deneyler ve uzun süreli yüklemeye gidilen tüm gerilme seviyeleri için ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasındaki oran araştırılmıştır.

Tüm uzun süreli deneylerde zamanla C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ katsayılarının gerilmeye bağlı olarak değişimi ve sıkışma indisi-C_c'ye oranları Tablo5.6'da verilmiştir. Uygulanan konsolidasyon basıncı altında zamanla C_c azalabilmekte, artabilmekte veya sabit kalmaktadır. İkincil sıkışma katsayısı-C_α ise sıkışma indisinin zamanla değişime bağlı olarak azalmakta, artmakta veya sabit kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda t_p-$10t_p$ ve $10t_p$-$100t_p$ arasında ikincil sıkışma katsayısı-C_α ve sıkışma indisi-C_c arasındaki oranın herhangi efektif gerilme ve boşluk oranında sabit olduğu belirlenmiştir. Tablo 5.6'dan görülebileceği gibi tüm uzun süreli deneylerde ikincil sıkışma parametreleri, t_p-$10t_p$ ve $10t_p$-$100t_p$ arasında zamana bağlı olarak değiştiği halde sıkışma indisi de zamana bağlı olarak değiştiği için aralarındaki oran sabit kalmaktadır ve bu durum tüm gerilme seviyesinde geçerlidir. Şu halde, ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) ile C_c arasında tekil bir ilişki vardır ve bu tekil ilişki, herhangi zaman, efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir. t_p-$10t_p$ ve $10t_p$-$100t_p$ arasında, ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$) ile sıkışma indisi-C_c oranlanırsa aralarındaki tekil ilişki şu şekildedir:

$$\frac{[C_\alpha]_{tp-10tp}}{[C_c]_{tp-10tp}} = \frac{[C_\alpha]_{10tp-100t}}{[C_c]_{10tp-100tp}} = \ldots \qquad (5.1)$$

$$\frac{[C_{\alpha\varepsilon}]_{tp-10tp}}{[C_c]_{tp-10tp}} = \frac{[C_{\alpha\varepsilon}]_{10tp-100tp}}{[C_c]_{10tp-100tp}} = \ldots \qquad (5.2)$$

$$\frac{[C_{\alpha p}]_{tp-10tp}}{[C_c]_{tp-10tp}} = \frac{[C_{\alpha p}]_{10tp-100tp}}{[C_c]_{10tp-100tp}} = \ldots \qquad (5.3)$$

Tablo 5.6. Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri İçin Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki İkincil Sıkışma Parametreleri

Deney	Gerilme (kPa)	C_c	t_p-$10t_p$						C_c	$10t_p$-$100t_p$					
			C_α	$C_{\alpha\varepsilon}$	$C_{\alpha p}$	C_α/C_c	$C_{\alpha\varepsilon}/C_c$	$C_{\alpha p}/C_c$		C_α	$C_{\alpha\varepsilon}$	$C_{\alpha p}$	C_α/C_c	$C_{\alpha\varepsilon}/C_c$	$C_{\alpha p}/C_c$
A1	25	0.256	0.014	0.005	0.005	0.055	0.018	0.019	0.210	0.012	0.004	0.004	0.055	0.018	0.019
	100	0.697	0.028	0.009	0.011	0.040	0.013	0.016	0.500	0.018	0.006	0.007	0.037	0.012	0.014
	300	0.620	0.025	0.008	0.010	0.040	0.013	0.016	0.350	0.011	0.004	0.005	0.032	0.011	0.014
A2	50	0.328	0.014	0.005	0.005	0.042	0.014	0.015	0.240	0.009	0.003	0.003	0.039	0.013	0.014
	150	0.725	0.027	0.009	0.011	0.037	0.013	0.016	0.400	0.014	0.005	0.006	0.035	0.011	0.014
	400	0.682	0.026	0.009	0.011	0.038	0.012	0.016	0.600	0.022	0.007	0.010	0.036	0.012	0.017
A3	75	0.492	0.018	0.006	0.007	0.036	0.013	0.014	0.200	0.007	0.003	0.003	0.036	0.013	0.014
	200	0.628	0.022	0.008	0.010	0.035	0.012	0.015	0.400	0.012	0.004	0.005	0.031	0.011	0.014
	800	0.544	0.020	0.007	0.010	0.037	0.013	0.019							
B1	12.5	0.255	0.011	0.004	0.004	0.045	0.015	0.016							
	25	0.371	0.013	0.004	0.004	0.034	0.011	0.012	0.330	0.011	0.004	0.004	0.034	0.011	0.012
	50	0.506	0.017	0.006	0.006	0.033	0.011	0.012							
	100	0.506	0.017	0.006	0.007	0.034	0.012	0.014	0.580	0.020	0.007	0.008	0.034	0.012	0.014
B2	12.5	0.217	0.009	0.003	0.003	0.043	0.015	0.015							
	25	0.355	0.010	0.003	0.004	0.029	0.010	0.010							
	50	0.425	0.013	0.004	0.005	0.029	0.010	0.011	0.390	0.011	0.004	0.004	0.029	0.010	0.011
	100	0.613	0.018	0.006	0.007	0.029	0.010	0.012							
	150	0.613	0.018	0.006	0.007	0.029	0.010	0.012	0.635	0.019	0.006	0.008	0.030	0.010	0.012

Tablo 5.6. (devam)

Deney	Gerilme (kPa)	C_c	t_p-$10t_p$						C_c	$10t_p$-$100t_p$					
			C_α	$C_{\alpha\varepsilon}$	$C_{\alpha p}$	C_α/C_c	$C_{\alpha\varepsilon}/C_c$	$C_{\alpha p}/C_c$		C_α	$C_{\alpha\varepsilon}$	$C_{\alpha p}$	C_α/C_c	$C_{\alpha\varepsilon}/C_c$	$C_{\alpha p}/C_c$
B3	12.5	0.233	0.007	0.002	0.002	0.030	0.010	0.010							
	25	0.293	0.008	0.003	0.003	0.027	0.009	0.010							
	50	0.373	0.010	0.003	0.004	0.026	0.009	0.009							
	75	0.413	0.012	0.004	0.004	0.028	0.009	0.011	0.580	0.016	0.005	0.006	0.028	0.009	0.011
C1	12.5	0.145	0.004	0.002	0.002	0.030	0.010	0.011	0.235	0.007	0.002	0.003	0.030	0.011	0.011
	75	0.582	0.022	0.008	0.008	0.037	0.013	0.015	0.530	0.020	0.007	0.008	0.037	0.013	0.015
	200	0.550	0.021	0.007	0.009	0.038	0.013	0.016	0.420	0.015	0.005	0.007	0.036	0.013	0.016
C2	25	0.224	0.006	0.002	0.002	0.026	0.009	0.010	0.400	0.010	0.004	0.004	0.026	0.009	0.010
	100	0.636	0.025	0.008	0.010	0.040	0.013	0.016	0.660	0.025	0.009	0.010	0.037	0.013	0.015
	300	0.605	0.024	0.008	0.010	0.039	0.013	0.016	0.490	0.019	0.007	0.009	0.039	0.014	0.018
C3	50	0.474	0.015	0.005	0.005	0.031	0.011	0.011	0.440	0.014	0.005	0.005	0.031	0.011	0.011
	150	0.686	0.025	0.009	0.011	0.037	0.013	0.017	0.720	0.027	0.009	0.011	0.038	0.013	0.016
	400	0.576	0.025	0.008	0.010	0.043	0.015	0.017	0.350	0.015	0.005	0.007	0.043	0.015	0.020
D4	25	0.202	0.005	0.002	0.002	0.026	0.010	0.010	0.150	0.004	0.001	0.001	0.027	0.010	0.010
D5	100	0.306	0.013	0.005	0.005	0.043	0.016	0.017	0.306	0.010	0.003	0.004	0.031	0.011	0.012
D6	400	0.498	0.023	0.008	0.010	0.047	0.017	0.021	0.300	0.014	0.005	0.006	0.047	0.017	0.021
D7	25	0.216	0.005	0.002	0.002	0.021	0.008	0.008	0.250	0.005	0.002	0.002	0.021	0.008	0.008
D8	100	0.330	0.013	0.005	0.005	0.039	0.014	0.015	0.260	0.010	0.004	0.004	0.039	0.014	0.015
D9	400	0.545	0.018	0.007	0.008	0.033	0.012	0.015	0.520	0.017	0.006	0.008	0.032	0.012	0.015
Ortalama						0.035	0.012	0.014	Ortalama				0.035	0.012	0.014

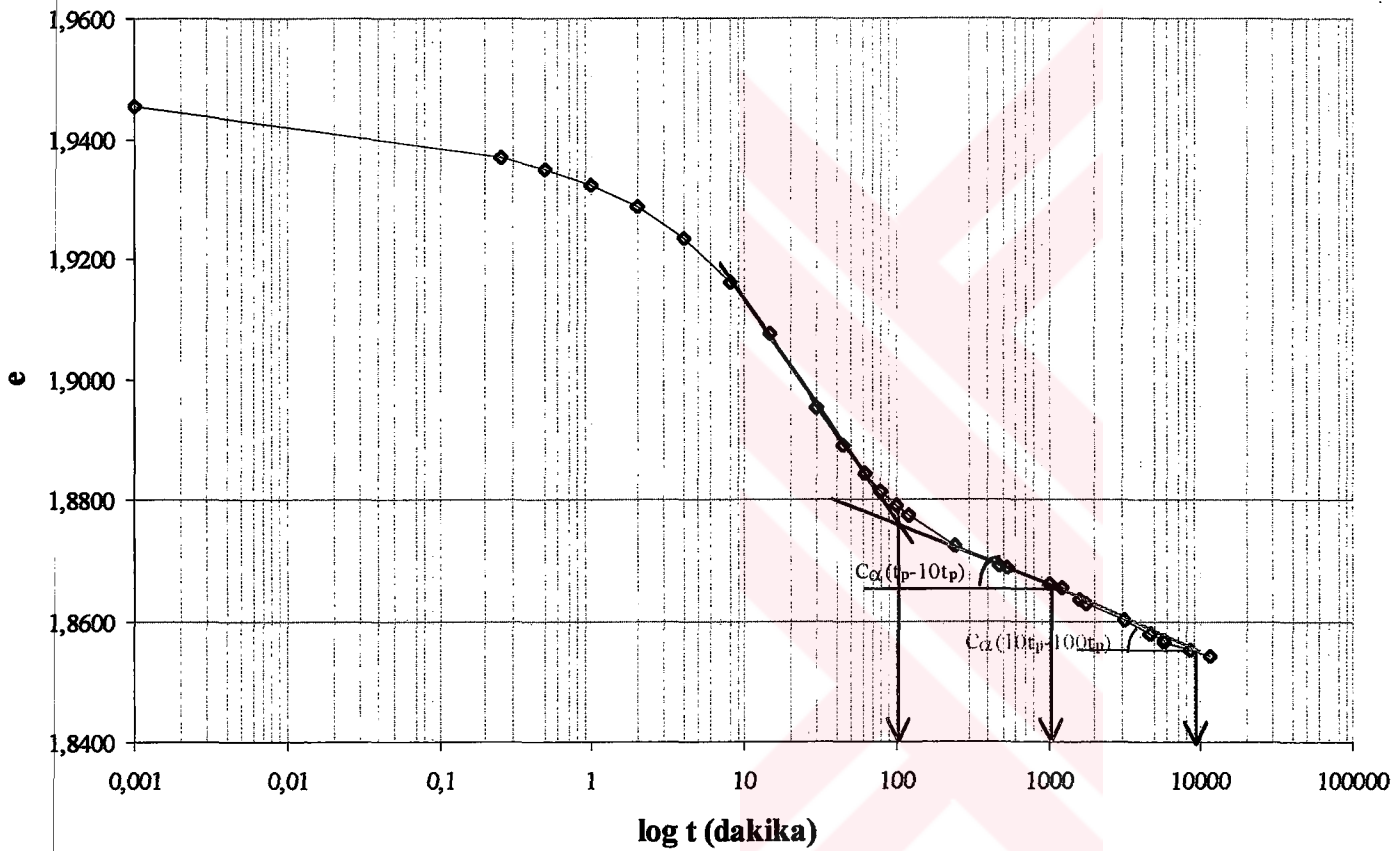
A1 nolu deneyde üç gerilme seviyesinde (25, 100 ve 300 kPa) uzun süreli konsolidasyona gidilmiştir. Şekil 5.10 'da A1 nolu deneye ait 25 kPa gerilme seviyesinde birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p süresinin belirlenmesi ve t_p-$10t_p$ ile $10t_p$-$100t_p$ arasında ikincil sıkışma katsayısı-C_α belirlenişi gösterilmiştir. Tüm gerilme seviyelerinde birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p süresinin ve boşluk oranının belirlenmesinin ardından uzun süreli yüklemeye gidilen gerilme seviyelerinde $10t_p$ ve $100t_p$ zamanına karşılık gelen boşluk oranları belirlenerek yarı logaritmik eksen takımında işaretlenmiştir. e-log p' eksen takımında t_p (EOP-birincil konsolidasyonun tamamlandığı eğri), $10t_p$ ve $100t_p$'ye karşılık gelen e-log p' eğrileri elde edilmiştir. Gerek t_p ve gerekse $10t_p$ ile $100t_p$ konsolidasyon eğrilerinden hareketle sıkışma indisi-C_c grafiksel olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.11'de A1 nolu deneyde, t_p, $10t_p$ ve $100t_p$ zamanlarına karşılık gelen e-log p' eğrilerin çizilişi ve çeşitli gerilme seviyelerinde C_c-sıkışma indisi ile C_α-ikincil sıkışma katsayısının hesaplanışı gösterilmiştir. Diğer uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait e-log p' eğrileri Ek'te Şekil C.8~Şekil C.15'te gösterilmiştir.

Nitekim A1 nolu deneyde 25 kPa gerilme seviyesinde, t_p-$10t_p$ ve $10t_p$-$100t_p$ arasında bu ilişki aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

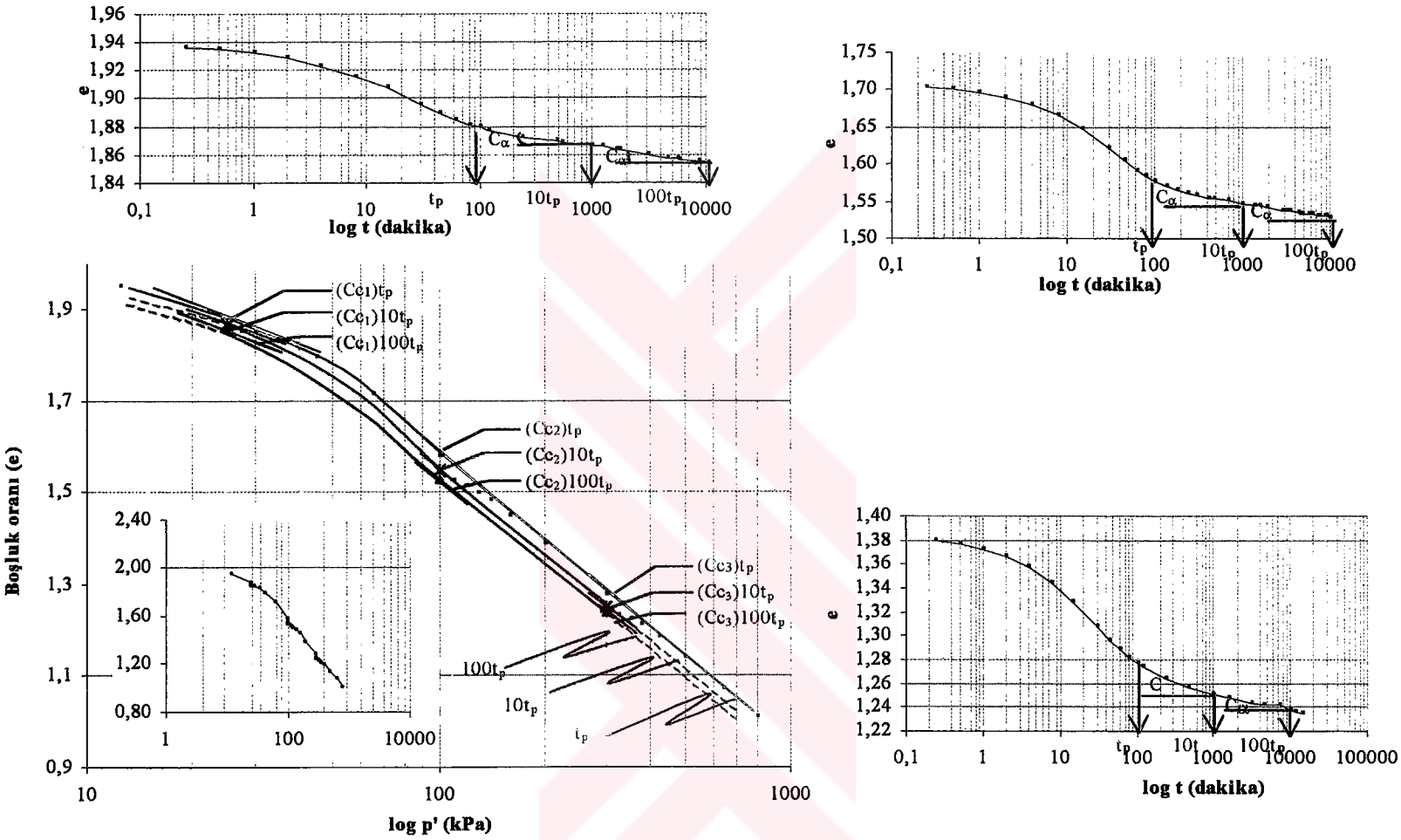
$$\frac{[C_\alpha]_{tp-10tp}}{[C_c]_{tp-10tp}} = \frac{[C_\alpha]_{10tp-100tp}}{[C_c]_{10tp-100tp}} \rightarrow \frac{[0.014]_{tp-10tp}}{[0.256]_{tp-10tp}} = \frac{[0.012]_{10tp-100tp}}{[0.210]_{10tp-100tp}} = 0.055 \qquad (5.4)$$

$$\frac{[C_{\alpha\varepsilon}]_{tp-10tp}}{[C_c]_{tp-10tp}} = \frac{[C_{\alpha\varepsilon}]_{10tp-100tp}}{[C_c]_{10tp-100tp}} \rightarrow \frac{[0.0047]_{tp-10tp}}{[0.2560]_{tp-10tp}} = \frac{[0.0038]_{10tp-100tp}}{[0.2100]_{10tp-100tp}} = 0.018 \qquad (5.5)$$

$$\frac{[C_{\alpha p}]_{tp-10tp}}{[C_c]_{tp-10tp}} = \frac{[C_{\alpha p}]_{10tp-100tp}}{[C_c]_{10tp-100tp}} \rightarrow \frac{[0.0049]_{tp-10tp}}{[0.2560]_{tp-10tp}} = \frac{[0.0040]_{10tp-100tp}}{[0.2100]_{10tp-100tp}} = 0.019 \qquad (5.6)$$



Şekil 5.10. A1 Nolu Deneyde 25 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Katsayılarının Belirlenmesi

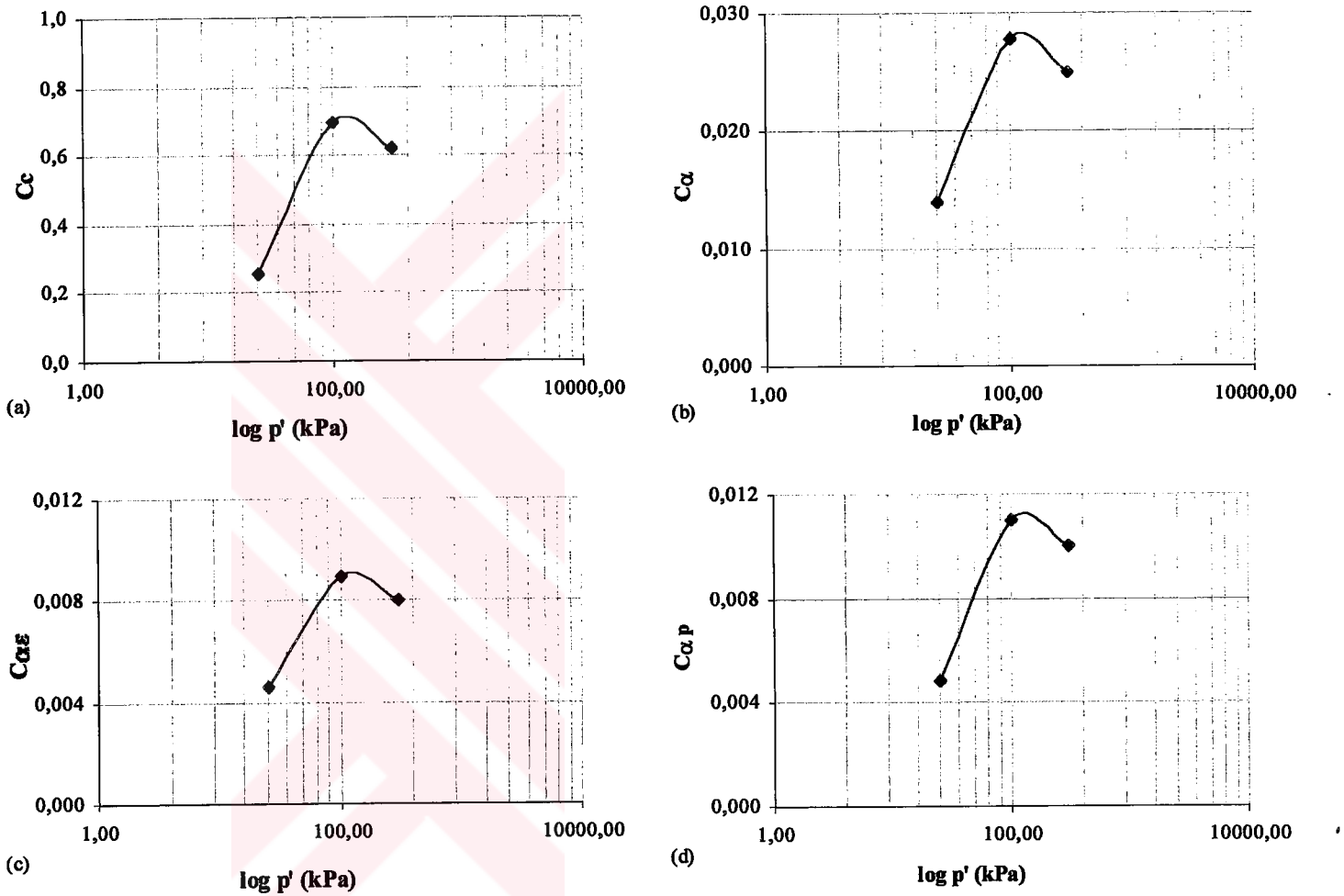


Şekil 5.11. A1 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Belirlenmesi

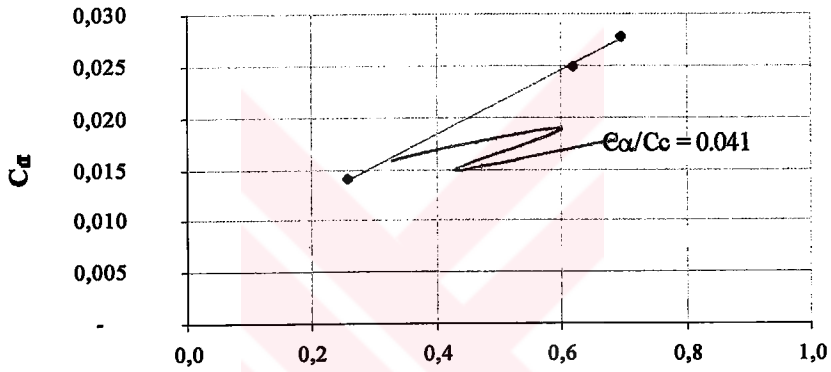
A1 nolu deney için C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ ve $C_{\alpha p}$ katsayılarının gerilmeye bağlı olarak değişimi ve sıkışma indisi-C_c'ye oranları grafiksel olarak Şekil 5.12'de verilmiştir. Bölüm 5.1.1'de klasik konsolidasyon deneylerinde anlatıldığı gibi, benzer şekilde A1 nolu deneyde de, seçilen gerilme seviyelerinde uzun süreli yükleme yapıldığında ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasında gerilmeye ve zamana bağlı ilişki belirlenmiştir. Şekil 5.12'den görülebileceği gibi, ikincil sıkışma parametrelerinde C_c'nin gerilmeye bağlı olarak artması durumunda artış, C_c'nin sabit olması durumunda sabit, C_c'nin azalması durumunda ise C_c'ye bağlı olarak azalma görülmektedir.

Benzer davranış, tüm uzun süreli konsolidasyon deneylerinde uzun süreli yükleme yapılan tüm gerilme seviyelerinde gözlemlenmiştir ve bu durum Tablo 5.6'da açıkça görülmektedir. Tablo 5.6'dan görüleceği üzere zemin yüzeyinden dört farklı derinlikten alınan aynı kil zemin üzerinde yapılan uzun süreli konsolidasyon deneylerinde farklı konsolidasyon basınçları altında t_p-$10t_p$ ile $10t_p$-$100t_p$ arasında, sıkışma indisinin değişimine bağlı olarak, ikincil sıkışma parametreleri de değişmekte ve aralarındaki oran ikincil sıkışmanın oluştuğu süreç boyunca sabit kalmaktadır. Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde farklı konsolidasyon basınçları altında t_p-$10t_p$ ile $10t_p$-$100t_p$ arasında, ikincil sıkışma katsayısının sıkışma indisine oranı C_α / C_c=0.026~0.055 arasında, ikincil sıkışma oranının sıkışma indisine oranı $C_{\alpha\varepsilon} / C_c$= 0.009~0.018 arasında ve modifiye ikincil sıkışma oranının sıkışma indisine oranı ise $C_{\alpha p} / C_c$=0.008~0.019 arasında değerler almaktadır. Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde ikincil konsolidasyon süresince 2 log çevriminde belirlenen sıkışma indisleri, ikincil sıkışma parametreleri ve aralarındaki oran Bölüm 5.1.1'de klasik konsolidasyon deneylerinde belirlenen sıkışma indisleri, ikincil sıkışma parametreleri ve aralarındaki oran ile uyum içersindedir.

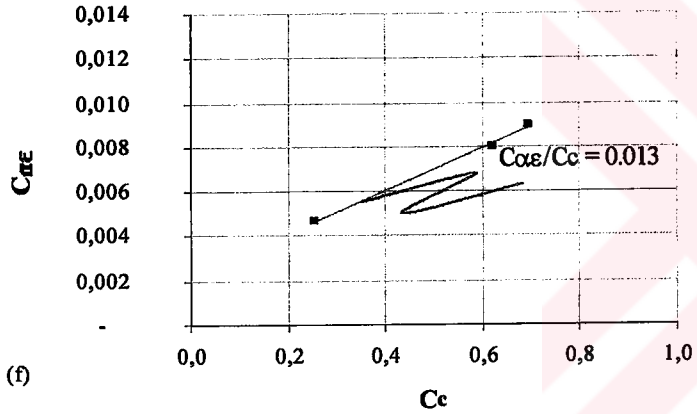
Bölüm 5.1.1'de klasik konsolidasyon deneylerinden elde edilen data ışığında ön değerlendirme yapılmıştır. İkincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi ve ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisinin gerilmeye bağlı olarak değişimleri belirlenmiş ve klasik konsolidasyon deneylerine göre varılan sonuçlar verilmiştir. Yumuşak mavi kil zemin için ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi



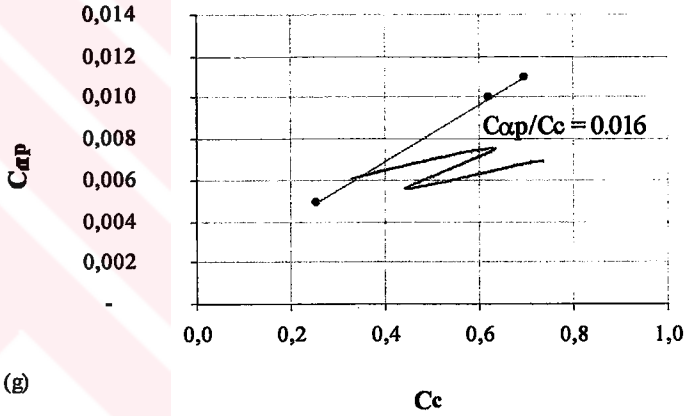
Şekil 5.12. A1 Nolu Deney İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e
Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki



(e)



(f)



(g)

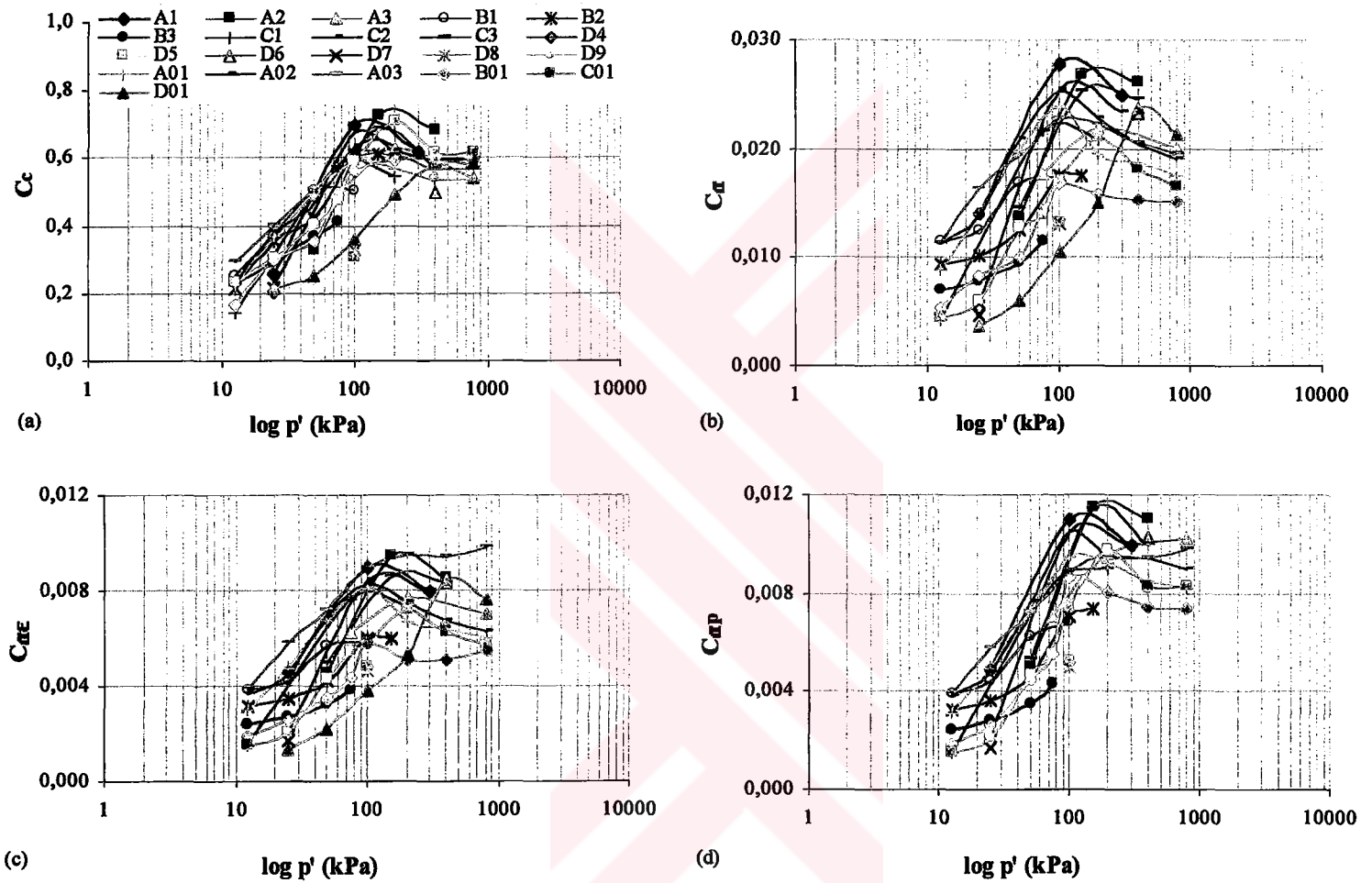
Şekil 5.12. devam

arasındaki ilişki, bunların gerilmeyle ve zamanla değişimi için tüm klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri birarada değerlendirilmelidir. Tezin bu bölümünde deneysel çalışma kapsmında yapılan tüm klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri birarada değerlendirilecektir. Şekil 5.13 'te tüm klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisinin gerilmeye bağlı değişimi ve sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametreleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.

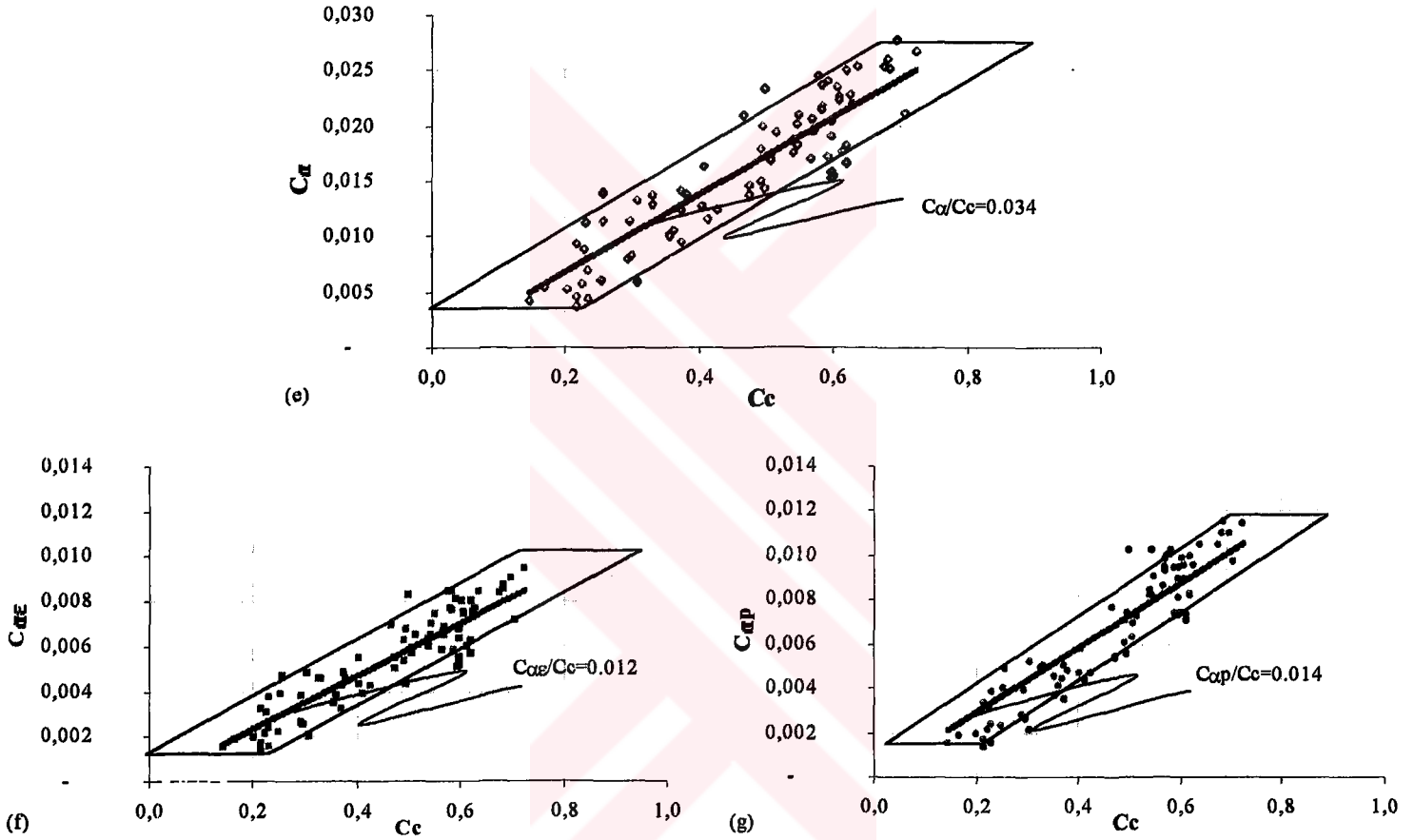
Yapılan klasik ve uzun süreli tüm konsolidasyon deneylerinde ikincil sıkışma süresince belirlenen sıkışma indisleri, ikincil sıkışma parametreleri ve aralarındaki ilişki birarada değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır.

1. Tüm yapılan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri birarada değerlendirildiğinde, ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$, 0.0013 ile 0.0095 arasında değerler almaktadır. Kritik basınçtan küçük gerilmelerde ($p' < 0.5p'_c$) zemin düşük ikincil sıkışabilirlik ($C_{\alpha\varepsilon} < \%\ 0.4$) göstermektedir. Kritik basınç aralığında zemin, orta-yüksek derecede ikincil sıkışabilirlik ($C_{\alpha\varepsilon} = \%\ 0.5 - \%\ 0.95$) davranışı göstermekte olup kritik basınçtan sonra orta ikincil sıkışabilirlik ($C_{\alpha\varepsilon} = \%\ 0.6 - \%\ 0.8$) davranışı göstermektedir. Samsun Çarşamba Havalanı uçuş pisti sahasından alınan yumuşak mavi kil zemin, genel olarak orta ikincil sıkışabilirlik davranışı göstermektedir. İkincil sıkışma parametrelerinin önkonsolidasyon basıncına bağlı olarak değimi beklenen bir durumdur. Zira, önkonsolidasyon basıncından daha az gerilme aralığında ikincil sıkışma katsayısı, tekrar sıkışma bölümündeki gerilmenin artmasıyla artmakta ve maksimum önkonsolidasyon basıncının hemen ötesinde bir gerilme seviyesinde bir maksimum değere ulaşmaktadır. Bundan sonra normal konsolide kilin değerleri ile birleşmekte ve ikincil sıkışabilirlik artmakta dolayısıyla daha fazla ikincil sıkışma yapmaktadır. Hacim değişimdeki tüm mekanizmalar zamana bağımlıdır. Efektif gerilmenin artımına karşılık oluşan her yapısal tepki, hem zamana bağımlı değişikliklere sebep olur hem de zamana bağımlı değişikliklerin sonucudur. Bu nedenle, zaman artımı veya efektif gerilmenin artımıyla meydana gelen değişikliklerin büyüklüğü içsel bağımlıdır. Konsolidasyon prosesi boyunca C_c sabit değildir ve sürekli değişmektedir.

YÖK EĞİTİM



Şekil 5.13. Tüm Klasik ve Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri İçin (a) C_c-Gerilme İlişkisi. (b) C_α-Gerilme İlişkisi. (c) $C_{\alpha\varepsilon}$-Gerilme İlişkisi. (d) $C_{\alpha p}$-Gerilme İlişkisi. (e) C_c-C_α Arasındaki İlişki. (f) C_c-$C_{\alpha\varepsilon}$ Arasındaki İlişki. (g) C_c-$C_{\alpha p}$ Arasındaki İlişki



Şekil 5.13. devam

2. C_α-ikincil sıkışma katsayısı, kritik basınçtan küçük gerilmelerde 0.004 ile 0.014 arasında değerler almaktayken, $0.5p'_c$ ile $2p'_c$ aralığında ikincil sıkışma oranı 0.015 ile 0.028 arasında değerler almakta ve $2p'_c$ değerini geçen gerilmelerde C_c'nin değişimine bağlı olarak ikincil sıkışma katsayısı 0.017-0.027 değerlerine azalmaktadır.

3. $C_{\alpha p}$-modifiye ikincil sıkışma oranı ise, ön konsolidasyon basıncından önce 0.001 ile 0.004 arasında değerler almaktayken $0.5p'_c$ ile $2p'_c$ aralığında 0.04 ile 0.011 arasında değerlerine yükselmekte ve $2p'_c$ değerini geçen gerilmelerde C_c'nin değişimine bağlı olarak 0.006-0.009 değerlerine azalmaktadır.

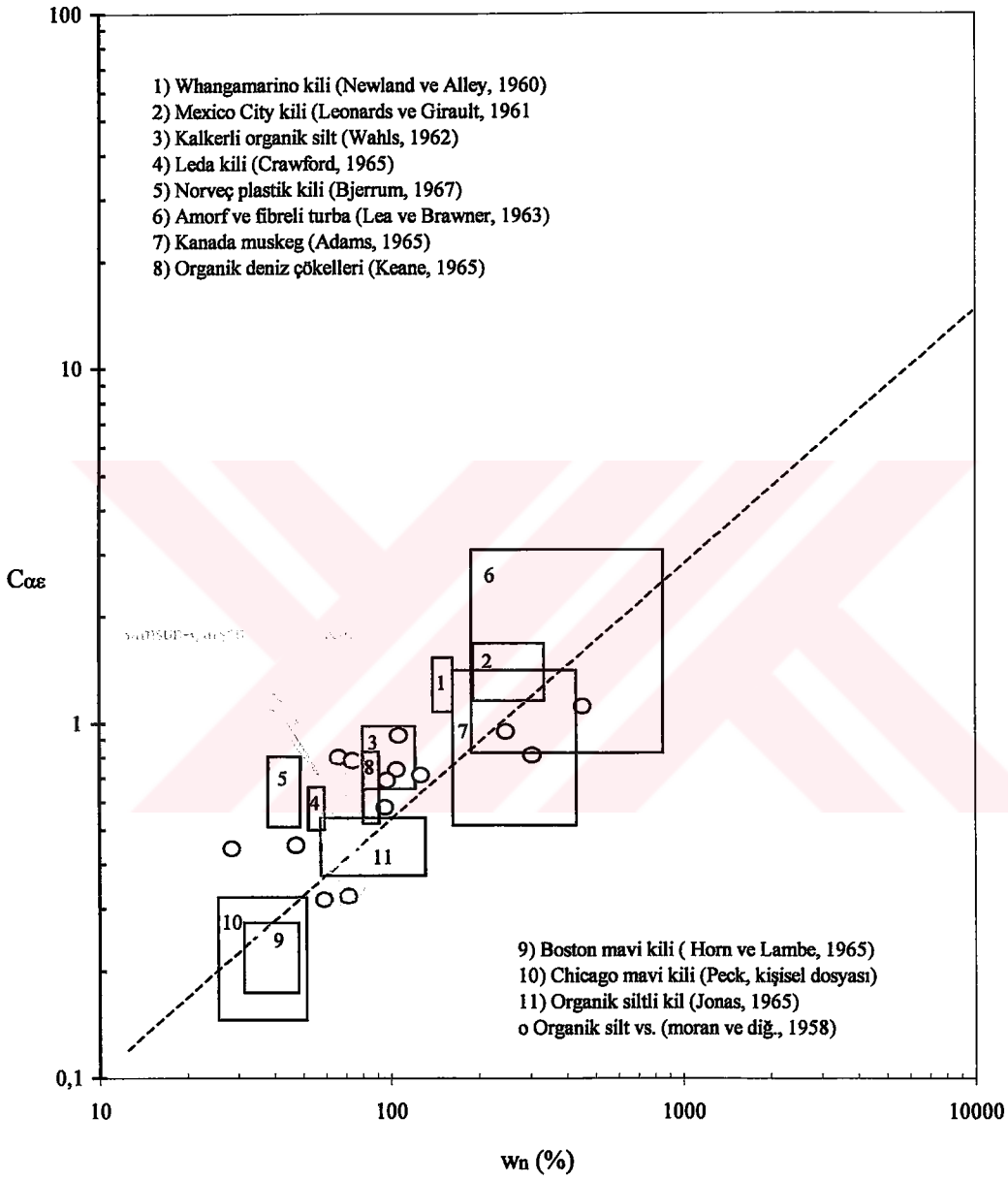
4. İkincil sıkışma katsayısı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_\alpha / C_c = 0.017 \sim 0.055$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_\alpha / C_c = 0.34$ alınabilecektir.

5. İkincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_{\alpha\varepsilon} / C_c = 0.006 \sim 0.018$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha\varepsilon} / C_c = 0.012$ seçilebilecektir.

6. Modifiye ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_{\alpha p} / C_c = 0.006 \sim 0.021$ aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha p} / C_c = 0.014$ alınabilecektir.

7. Yumuşak mavi kil zemin için ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ veya $C_{\alpha p}$) ile sıkışma indisi (C_c) arasında tekil bir ilişki vardır ve bu tekil ilişki herhangi zaman, efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir. İkincil konsolidasyon süresince, tüm efektif gerilmeler, boşluk oranları ve zamanda ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasındaki ilişki tektir.

Yapılan 24 adet klasik ve uzun süreli tüm konsolidasyon deneylerinde, çeşitli gerilme seviyelerinde belirlenen ikincil sıkışma oranları ile zeminin başlangıçtaki doğal su muhtevası arasındaki ilişki, Şekil 5.14'te literatürde farklı doğal zemin çökelleri için verilen ikincil sıkışma katsayısı ile doğal su muhtevası arasındaki



Şekil 5.14. Doğal Su Muhtevası İle İkincil Sıkışma Oranı Arasındaki İlişki

ilişkileri gösteren Şekil üzerinde işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 5.14'ten görülebileceği gibi Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinden alınan yumuşak mavi kil zemin, Boston ve Chicago mavi kili ile Leda kili, Norveç Plastik kili ve organik siltli kil arasında bir davranış göstermektedir.

Denizel orjinli Samsun-Çarşamba mavi kilinin mühendislik özellikleri Bölüm 4.1.4'te detaylı olarak anlatılmıştır. Mavi kil zemin, esas olarak ağırlıkça % 18-38 oranında kil boyutlu partiküller içeren, ağırlıkça % 1-1.5 oranında deniz yosunlarından oluşan organik içeriğe sahip yüksek plastisiteli ve yüksek aktiviteli bir kil olup, kil minerallerinin büyük çoğunluğunu Ca-montmorillonit cinsi mineraller ve bir miktar kaolin oluşturmaktadır. Ancak, her ne kadar ağırlıklı olarak montmorillonit cinsi kil mineralleri içeren mavi kil zeminin doğal su muhtevasının ve likit limitinin daha yüksek olması beklense de, montmorillonitin Ca-montmorillonit cinsi olması sebebiyle doğal su muhtevaları, likit limit değerleri ve ikincil sıkışabilirlikleri diğer Na-montmorillonit esaslı killere (Mexico City kili vb.) nazaran daha düşüktür ve illit esaslı Norveç Plastik kili ve Leda kiline benzer derecede ikincil sıkışabilirlik davranışı göstermektedir (Jonas, 1964; .Horn ve Lambe, 1964; Crawford, 1965; Bjerrum, 1967).

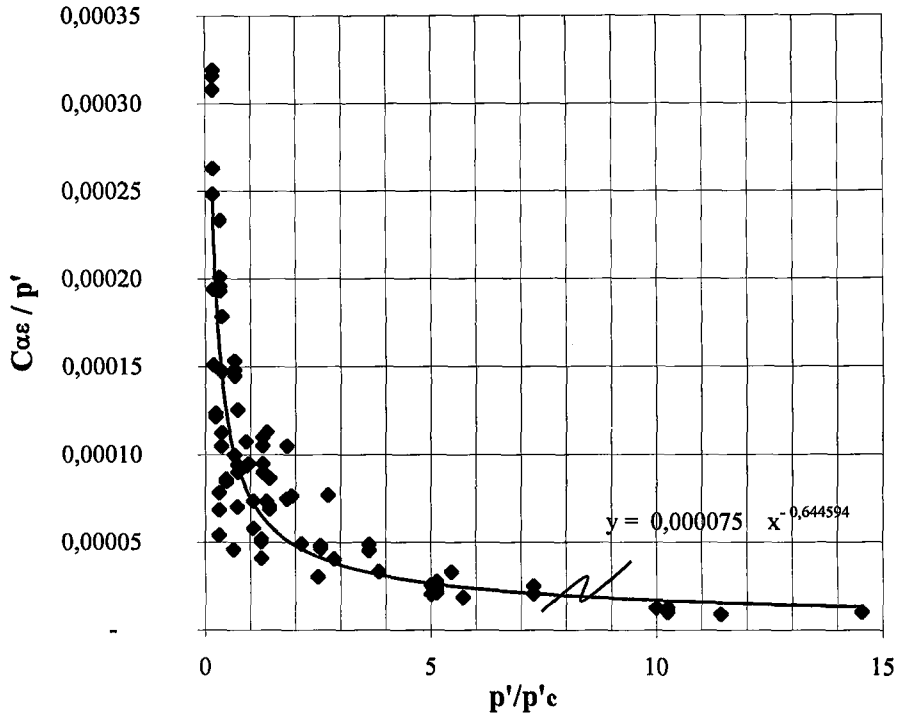
5.1.5. İkincil Sıkışma Oranı İle Konsolidasyon Basıncı Arasındaki İlişki

Daha önce belirtildiği gibi yakın zamanda çökelmiş ve kendi ağırlığı altında dengeye gelmiş fakat hiçbir belirgin ikincil veya gecikmiş konsolidasyona uğramamış killer "genç normal konsolide killer" olarak sınıflandırılmaktadır (Bjerrum, 1973). Bu tür killer, yalnızca üzerindeki örtü yükünü taşıyabilen ve ekstra bir yük altında büyük oturmalar yapan killerdir. Deneysel çalışmada kullanışan yumuşak mavi kil zemin, genç konsolide bir kil olup malzemenin mühendislik ve indeks özellikleri Bölüm 4.1.'te detaylı olarak verilmiştir. Eğer genç normal konsolide bir kil sabit efektif gerilme altında yüzlerce veya binlerce yıl terkedilirse, kil oturmaya devam eder. İkincil veya gecikmiş konsolidasyon sonucu daneler yapısal olarak yeniden dizilir ve daha stabil bir yapıya kavuşarak kil zeminin mukavemeti artar, sıkışabilirliği azalır. Zamanla kildeki gecikmiş konsolidasyon daha fazla sıkışmaya karşı direnç gösterir. Bölüm 5.1.1 ile Bölüm 5.1.4'te, deneysel çalışmada kullanılan yumuşak mavi kil

zeminin ikincil sıkışma davranışı incelenmiş, yapılan 24 adet klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen oturma-zaman datasından hareketle sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametrelerinin sabit efektif gerilme altında zamanla değişimi ve birbirleriyle ilişkisi irdelenmiş ve ikincil sıkışma davranışı gösteren killerde ikincil sıkışma süresince, sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametreleri arasında tekil bir ilişki olduğu ve bu tekil ilişkinin herhangi zaman, efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerli olduğu gösterilmiştir.

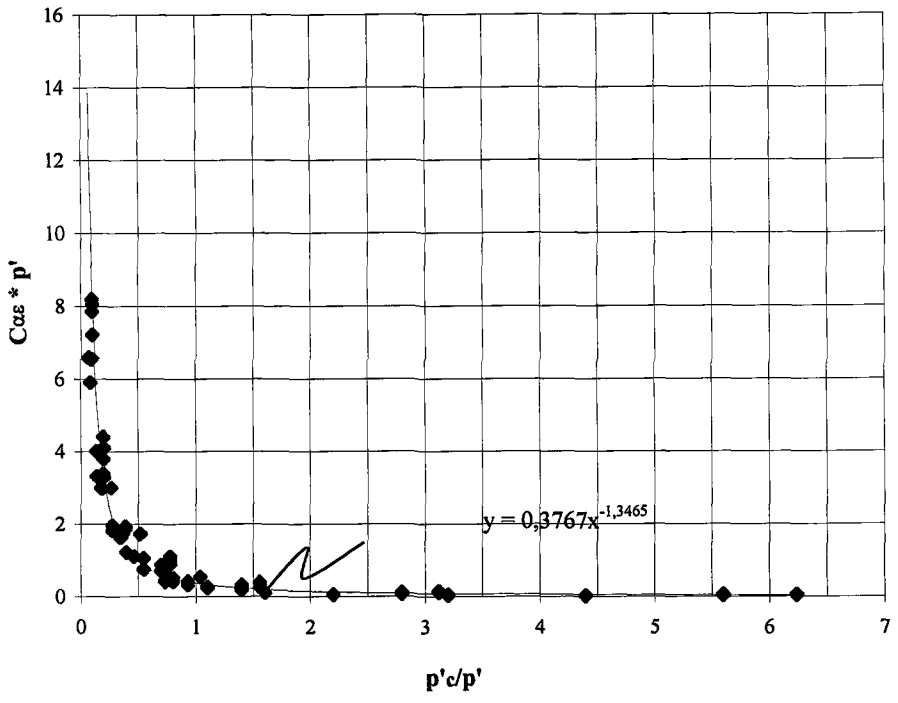
Önceki paragraflarda anlatıldığı üzere deformasyon, oturma, agregasyon veya dispersiyon, adsorbe filminin bozulması, çift tabakaların genişlemesi veya büzülmesi gibi hacim değişimdeki tüm mekanizmalar efektif gerilmenin değişimi sırasında zamanla etkili olmaktadır. Hacim değişimdeki tüm mekanizmalar, viskoz veya viskoz olmayan bir zincir-reaksiyon prosesidir ve bu nedenle zamana bağımlıdır. Efektif gerilmenin artımına karşılık oluşan her yapısal tepki, hem zamana bağımlı değişikliklere sebep olur, hem de zamana bağımlı değişikliklerin sonucudur. Bu nedenle, zaman artımı veya efektif gerilmenin artımıyla meydana gelen değişikliklerin büyüklüğü içsel bağımlıdır.

Deneysel çalışmanın bu kısmında, mavi kil zemin için ikincil sıkışma parametreleri ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan zemin numuneleri, zemin yüzeyinden 9.50 m, 7.50 m, 4.50 m ve 3.50m derinliklerden alındığı ve üzerlerindeki örtü yükleri birbirinden farklı olduğu için başlangıç boşluk oranları ve önkonsolidasyon basınçları da birbirinden farklıdır. Bu nedenle, ikincil sıkışma parametreleri ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasındaki korelasyonu kurabilmek için kullanılacak grafiklerde eksenlerden en az birisini normalize etmek ve bu şekilde aradaki korelasyonu kurmak daha doğru bir yaklaşım olmaktadır. Bu sebeple, uygulanan efektif gerilme önkonsolidasyon basıncına bölünerek (p'/p'_c) veya önkonsolidasyon basıncı uygulanan konsolidasyon basıncına oranlanarak (p'_c/p') normalizasyona gidilmiştir. İkincil sıkışma parametreleri ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasındaki korelasyon kurulurken, ikincil sıkışabilirlik hakkında daha fazla bilgi veren ikincil sıkışma oranı kullanılmıştır. Tüm klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen oturma-zaman verilerinden hareketle, ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasında dört tip korelasyon oluşturulmuştur.



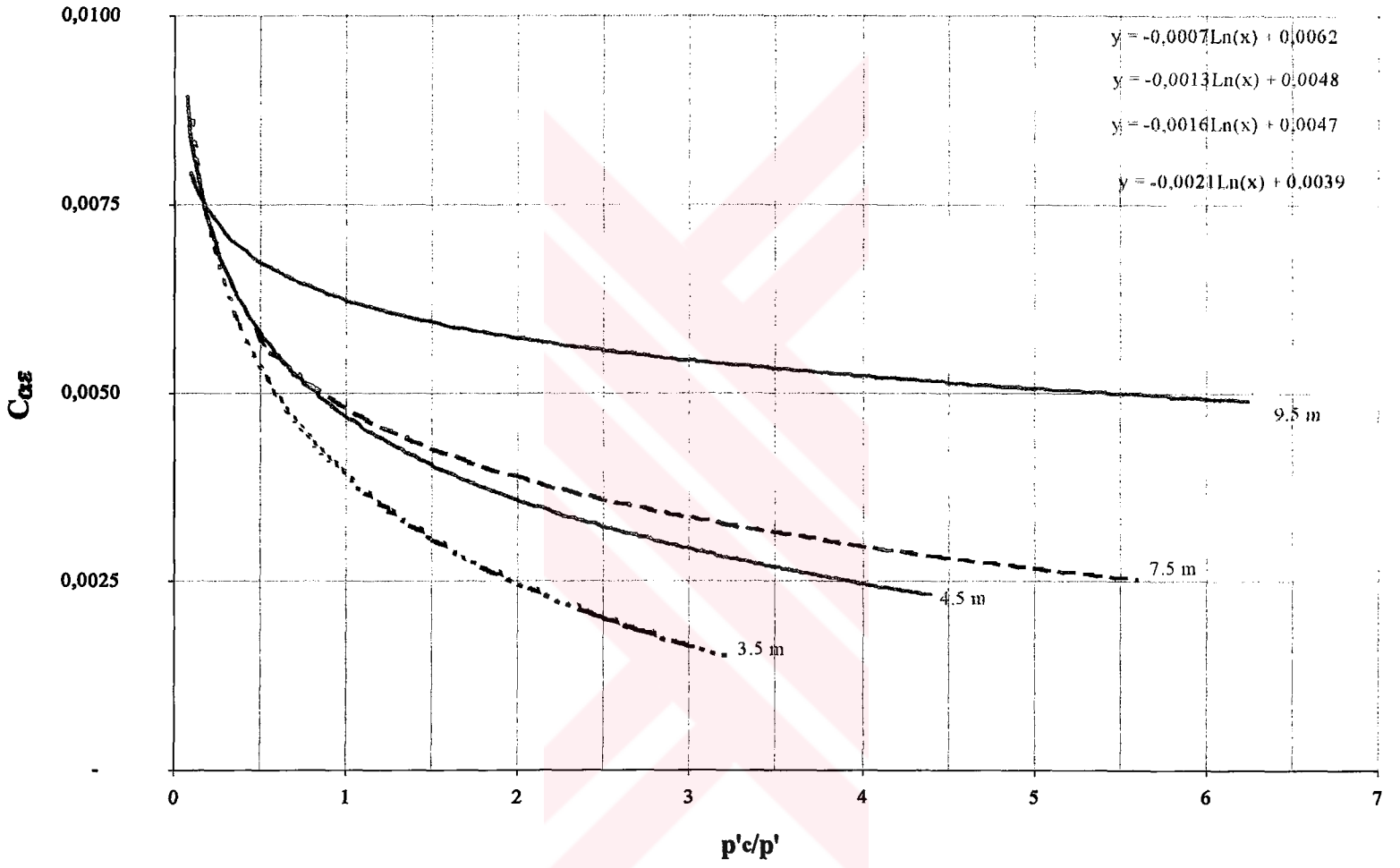
Şekil 5.15. Tüm Deneyler ve İkincil Sıkışma Fazı İçin $C_{\alpha\varepsilon}$ /p'-p'/p'$_c$ Bağıntısı Elde Edilmesi

Deneysel çalışma kapsamında farklı derinliklerden alınan ve farklı konsolidasyon basınçları altında ikincil sıkışmaya terkedilen zemin için yapılan tüm klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri sonuçları birarada değerlendirildiğinde Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilen korelasyonlar belirlenmiştir. Yatay eksende p'/p'$_c$ ve düşey eksende $C_{\alpha\varepsilon}$/p' olmak üzere tüm deneylerden elde edilen veriler bir eksen takımı üzerinde işaretlendiğinde ikincil sıkışma süresince, ikincil sıkışma oranı ve konsolidasyon arasında Şekil 5.21'de verilen grafikte gösterildiği gibi bir korelasyon olduğu görülmektedir. Şekil 5.22'de ise benzer şekilde, yatay eksende p'$_c$/p' ve düşey eksende $C_{\alpha\varepsilon}$*p' olmak üzere tüm deneyler bir eksen takımı üzerinde işaretlendiğinde yine ikincil sıkışma oranının uygulanan konsolidasyon basıncının bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.16 ve Şekil 5.16'da verilen bağıntılardan hareketle, belirli bir derinlikten alınan yumuşak mavi kil zemin için pratik amaçlara yönelik olarak ikincil sıkışabilirlik hakkında bir tahmin yapabilmektedir. Gerek Şekil 5.15 ve gerekse Şekil 5.16'da verilen ikincil sıkışma oranı ve konsolidasyon arasındaki fonksiyonel ilişki tüm deney datasını kapsamaktadır.



Şekil 5.16. Tüm Deneyler ve İkincil Sıkışma Fazı İçin $C_{\alpha\varepsilon}$*p'-p'$_c$/p' Grafiğinden Elde Edilmesi

İkincil sıkışma oranı ile konsolidasyon arasındaki fonksiyonel ilişkiden hareketle ikincil sıkışma oranını ve dolayısıyla ikincil sıkışma miktarını belirlemek için, tüm deney sonuçlarının birarada değerlendirilmesi farklı derinliklerden alınan, üzerlerindeki örtü yükü ve önkonsolidasyon basıncı farklı olan ve dolayısıyla farklı boşluk oranlarına sahip olan kil zemin için hassas bir öngörü yapmaya yeterli olmayacaktır. Bu sebeple, zemin yüzeyinden dört farklı derinlikten alınan zemin numuneleri için ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ile p'$_c$/p' arasındaki fonksiyonel ilişki ayrı ayrı değerlendirilmiş ve bulunan korelasyonlar Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Şekil 5.17'den görülebileceği gibi, tüm klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerine ait sonuçlar derinliğe bağlı olarak değerlendirildiğinde, zemin yüzeyinden farklı derinliklerden alınan zemin numuneleri üzerinde örtü yükleri farklı ve dolayısıyla önkonsolidasyon basınçları da farklı olduğundan farklı derinliklerden alınan zeminler için ikincil sıkışma oranlarının farklı mertebelerde olduğu görülmektedir. Zemin yüzeyinden 9.5 m, 7.5 m, 4.5 m ve 3.5 m derinden alınan kil numunelerde derinliğe bağlı olarak önkonsolidasyon basınçları farklı olduğundan ikincil sıkışabilirlikleri karşılaştırabilmek için yatay eksende normalizasyon işlemi yapılmış ve bu sayede aynı efektif gerilme altında (p'$_c$/p') ikincil sıkışma oranları

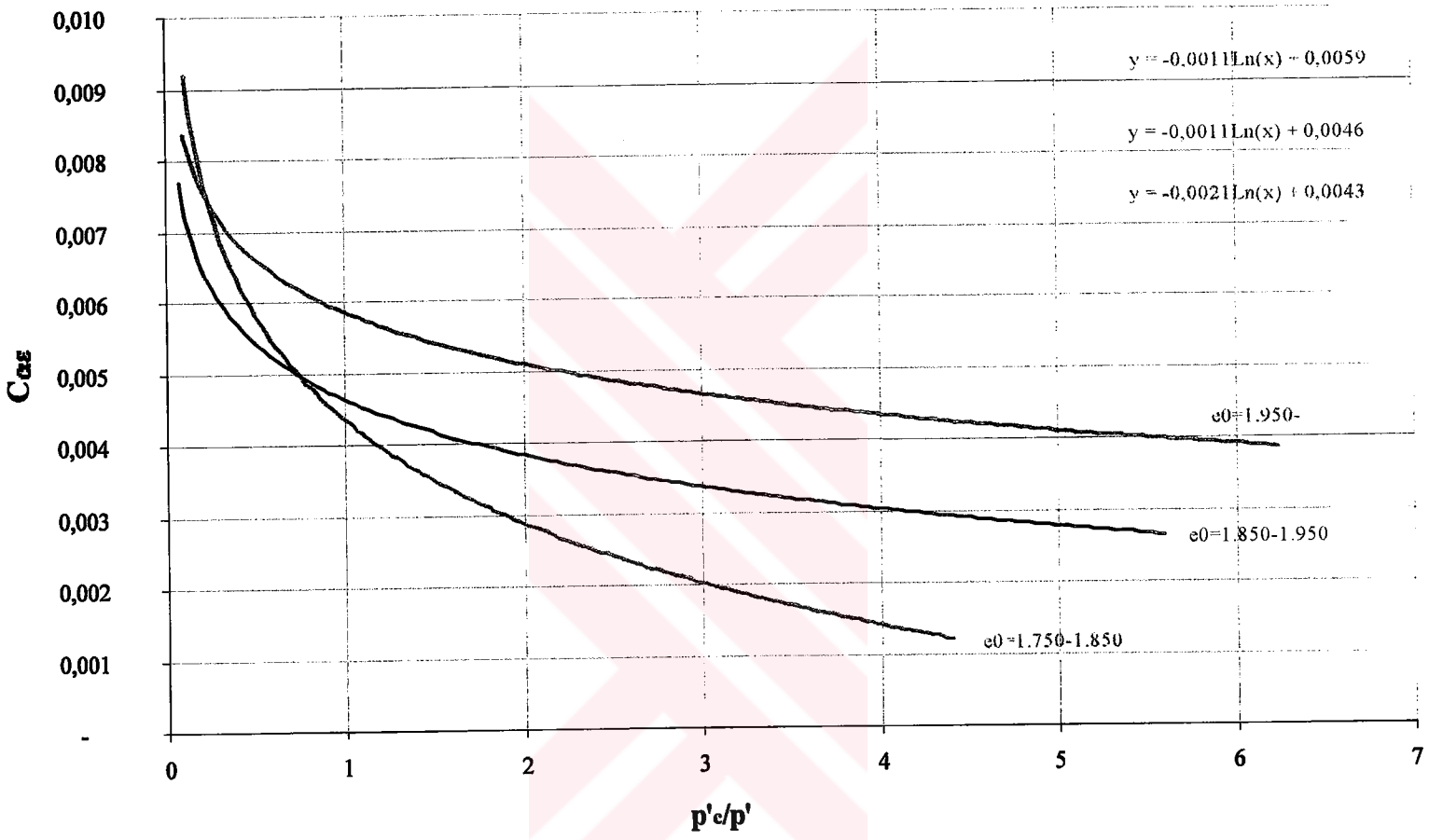


Şekil 5.17. $C_{\alpha\varepsilon}$ - p'_c/p' Bağıntısının Derinlikle Değişmesi

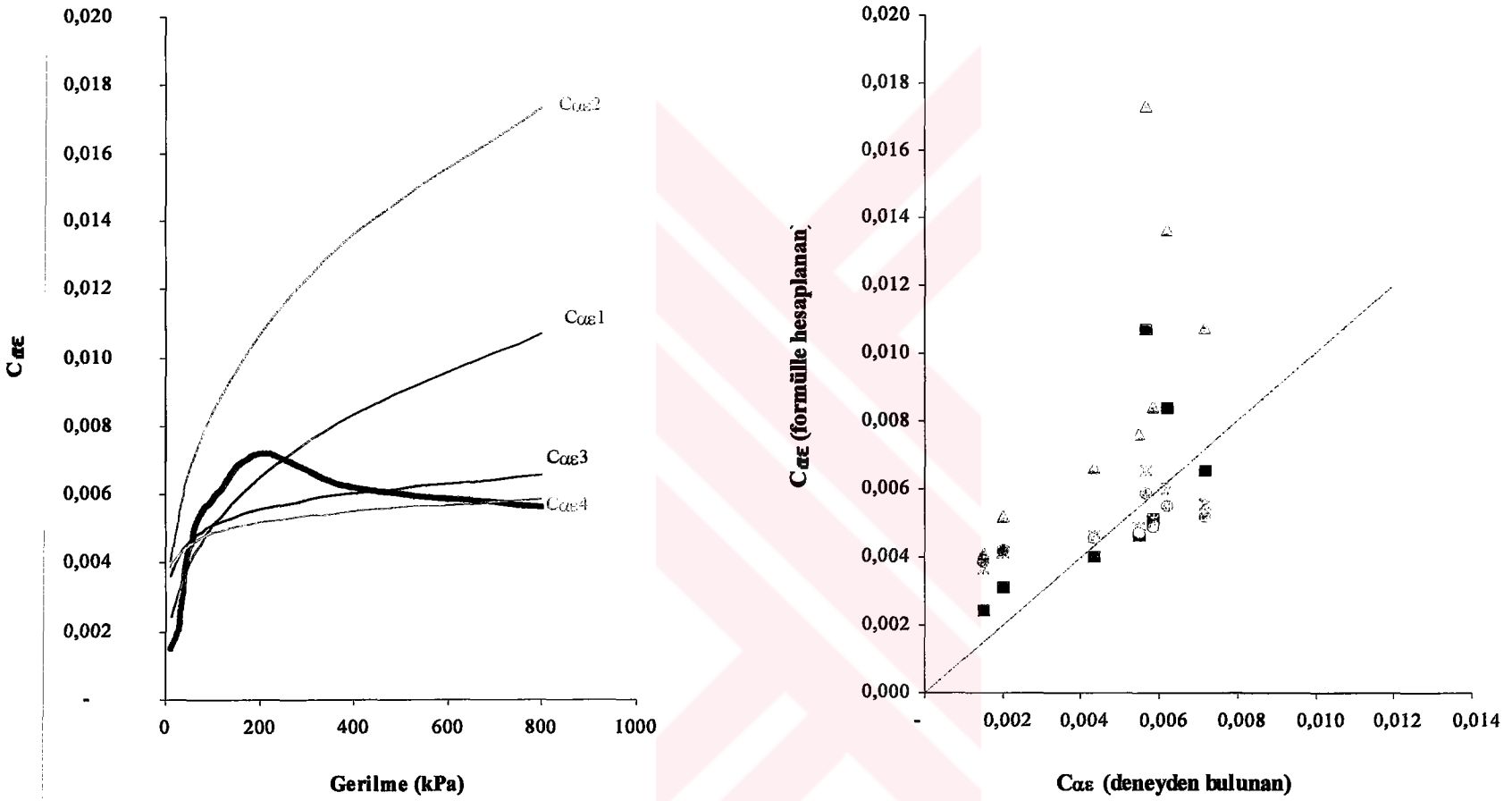
arasındaki değişim belirlenebilmiştir. Şekil 5.17'den görülebileceği gibi, önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ($p' > p'_c$ ve $p'_c/p' < 1$) ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir fark olmamasına karşın önkonsolidasyon basıncından küçük gerilmelerde ($p' < p'_c$ ve $p'_c/p' > 1$) ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir farklılaşma ve derinlik artıkça ikincil sıkışma oranının artması şeklinde bir davranış görülmektedir.

Şekil 5.17'de gösterilen ve ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ile p'_c/p' arasındaki fonksiyonel ilişkiyi gösteren bağıntılar, zemin yüzeyinden farklı derinliklerden alınan ve dolayısıyla üzerlerindeki örtü yükü ve önkonsolidasyon basıncı farklı olan kil zemin tabakaları için hazırlanmış olup ekstrapolasyonla farklı derinliklerdeki kil zemin tabakaları için de ikincil sıkışma oranları Şekil 5.17'den hesaplanabilmektedir. Ancak, aynı örtü yükü altında konsolide olan zemin tabakaları jeolojik süreçte çökelme sırasında içerdikleri organik malzeme miktarına bağlı olarak farklı boşluk oranlarına sahip olabilmektedir. Nitekim, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmada kullanılan kil zeminde yapılan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinde belirlenen başlangıç boşluk oranları Tablo 5.1 ve Tablo 5.4'te verilmiştir. İlgili tablolardan görüldüğü üzere ve detayları Bölüm 4.1'te anlatıldığı üzere, deniz yosunlarından oluşan organik malzeme içeren yumuşak kıvamlı mavi kil zeminde jeolojik süreç içinde sedimentasyon sırasında aynı derinliklerde bulunan zemin tabakalarında dahi organik malzemenin ağırlıkça miktarına bağlı olarak başlangıç boşluk oranları farklı olabilmektedir. Bu nedenle, ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ile p'_c/p' arasındaki fonksiyonel ilişkiyi gösteren ve Şekil 5.17'de verilen bağıntılar başlangıç boşluk oranlarına bağlı olarak yeniden yorumlanmıştır. Şekil 5.18'de boşluk oranları e_0 = 1.750-1.850, e_0 = 1.850-1.950 ve e_0 = 1.950-2.050 aralığında olan kil zeminler için ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ile p'_c/p' arasındaki bağıntılar gösterilmiştir.

Şekil 5.18'den görülebileceği gibi, ikincil sıkışma oranı, uygulanan boşluk oranına ve başlangıç boşluk oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Daha fazla boşluk oranına sahip olan zeminin daha fazla ikincil sıkışabilirlik yapacağı aşikardır. Şekil 5.18'de verilen grafiğe göre, önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde



Şekil 5.18. $C_{\alpha\varepsilon}$ - p'_c/p' Bağıntısının Boşluk Oranıyla Değişmesi



Şekil 5.19. C01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması

($p' > p'_c$ ve $p'_c/p' < 1$) ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir fark olmamasına karşın, önkonsolidasyon basıncından küçük gerilmelerde ($p' < p'_c$ ve $p'_c/p' > 1$) ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir farklılaşma ve derinlik artıkça ikincil sıkışma oranının artması şeklinde bir davranış görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Zira, önkonsolidasyon basıncından daha küçük gerilme aralığında ikincil sıkışma katsayısı (C_α) ve dolayısıyla ikincil sıkışma oranı ($C_\alpha=C_\alpha/(1+e_0)$), tekrar sıkışma bölümündeki gerilmenin artmasıyla artmakta ve maksimum önkonsolidasyon basıncının hemen ötesinde bir gerilme seviyesinde bir maksimum değerine ulaşmaktadır. Bundan sonra normal konsolide kilin değerleri ile birleşmekte ve ikincil sıkışabilirlik artmakta dolayısıyla daha fazla ikincil sıkışma yapmaktadır.

Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilen diyagramlarda, ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ile p'_c/p' arasındaki bağıntıların formülasyonu da verilmiştir. Dört tip korelasyon için, deneysel çalışmalarda belirlenen ikincil sıkışma oranı ile formülle verilen ikincil sıkışma oranları karşılaştırılmış ve dört tip korelasyondan hangisinin deneyden belirlenen değere daha fazla yaklaştığı araştırılmıştır. Şekil 5.19'da C01 nolu deney için deneyden hesaplanan ikincil sıkışma oranları ile Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilen dört tip korelasyonun karşılaştırması yapılmıştır. Diğer deneylere ait karşılaştırmayı veren Şekiller Ek'te Şekil D.1~Şekil D.5'te verilmiştir. Şekil 5.19 (a)'da, deneysel olarak belirlenen uygulanan konsolidasyon basıncına bağlı olarak ikincil sıkışma oranının değişimi ile dört tip formülasyonla hesaplanan grafikler verilmiştir. Şekil 5.19 (b)'de ise deneyden hesaplanan ikincil sıkışma oranları, dört tip formülasyonla belirlenen ikincil sıkışma oranlarıyla karşılaştırılmıştır. C01 nolu deney için verilen dört tip korelasyon incelendiğinde Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilen, ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ile p'_c/p' arasındaki fonksiyonel ilişkiyi, derinliğe veya başlangıç boşluk oranına bağlı olarak veren formülasyonların daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Sonuç olarak; deneysel çalışma kapsamında yapılan 24 adet konsolidasyon deneylerinden elde edilen oturma-zaman datasından hareketle ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasında dört tip korelasyon bulunmuştur. Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilen dört tip korelasyondan hareketle, Çarşamba Deltasındaki yumuşak mavi kil zemine ait ikincil sıkışma

oranlarını efektif gerilmeye bağlı olarak veya grafikten okuyarak efektif gerilme artışı sonrasında oluşabilecek ikincil sıkışma hakkında yaklaşık bir fikir edinilebilecektir.

5.1.6. Üçüncül Sıkışma

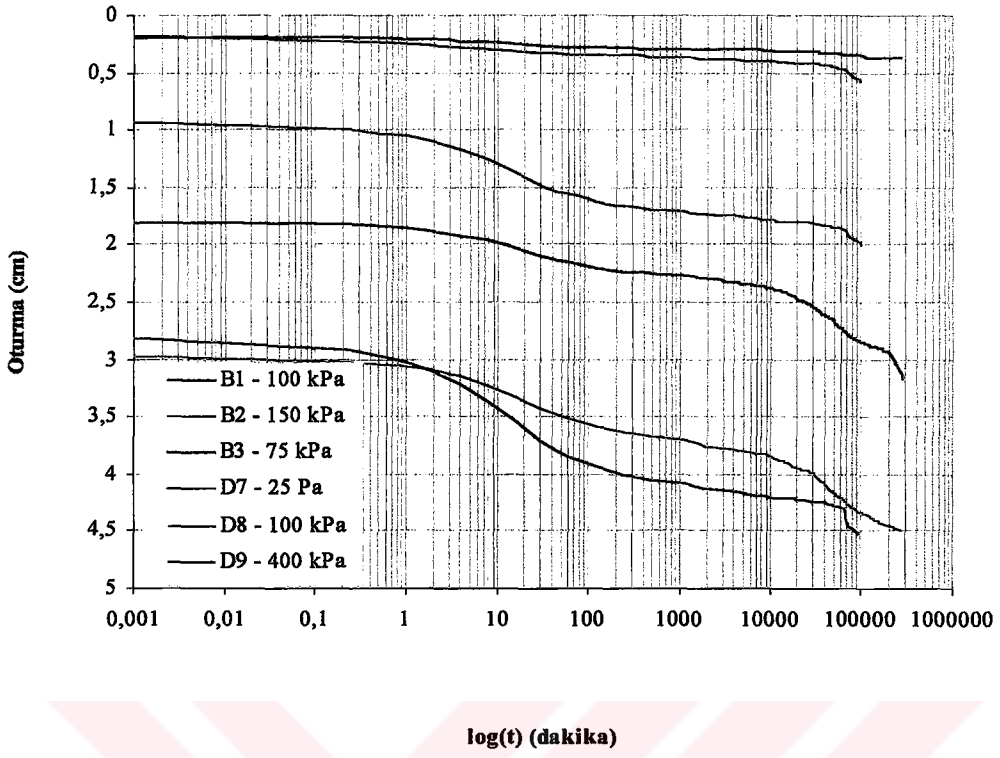
Normal konsolide yumuşak mavi kil zemin üzerinde yapılan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneyleriyle, yumuşak kil zeminin büyük oranda ikincil sıkışma yaptığı, sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametrelerinin zamanla ve gerilmeyle değişimi ve birbirlerine oranı daha önceki paragraflarda detaylı olarak incelenmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. Deneysel çalışmanın önemli bir kısmında, çeşitli konsolidasyon basınçları altında, 1 hafta-10 gün süreyle (2 log çevrimi boyunca) yükleme yapılarak ikincil sıkışmanın oluşmasına izin verilen gerilme kademelerinde, tüm deneylerde ikincil sıkışma boyunca ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasındaki oran araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın bu kısmında, B1, B2 ve B3 nolu deneylerde 75, 100 ve 150 kPa gerilmelerinde 187-198 günlük (6.5 ay) süreyle; D7, D8 ve D9 nolu deneylerde ise 69-70 gün süreyle 25, 100 ve 400 kPa gerilmelerinde zamanla ikincil sıkışma parametrelerinde ne gibi bir değişim oluştuğu ve üçüncül sıkışma davranışının görülüp görülmediği araştırılmıştır. B1, B2 ve B3 nolu deneylerde birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p süresinden sonra 2000 t_p süresince (3 log çevriminde daha uzun bir süre), D7, D8 ve D9 nolu deneylerde ise 1000t_p süresince (3 log çevrimi boyunca) ikincil sıkışmanın gelişmesine izin verilmiş ve sürekli oturma-zaman okumaları kayıt edilmiştir.

Literatürde verilen çalışmalarda, büyük oranda ikincil sıkışma yapan turba zeminlerde ve bazı organik içerikli yumuşak kil zeminlerde -aynı efektif gerilme- altında, ikincil sıkışma parametrelerinin zamanla arttığı, şekil değiştirme hızının zamanla azaldığı ve hatta turba zeminlerde karşılaşılan ve üçüncül sıkışma olarak nitelendirilen davranışı gösterdiği belirtilmektedir (Edil, Dhowian, 1979; denHaan, Edil, 1994b; denHaan, 1994c; denHaan, 1994d; denHaan, 1995; Fox, Edil, 1994). Lo (1961) ise çalışmasında üçüncül sıkışma etkisine dikkat çekmiş ve ayrı bir yorum getirmiştir. Lo, yumuşak killerin ikincil sıkışma süresince gösterdiği davranışı üç modelle açıklamış ve Tip III olarak adlandırılan davranışın kilin çökelmesinden sonra gelişen yapısal bir etkinin sonucu olduğunu ve boşluklu bir yapıda çökelen kil

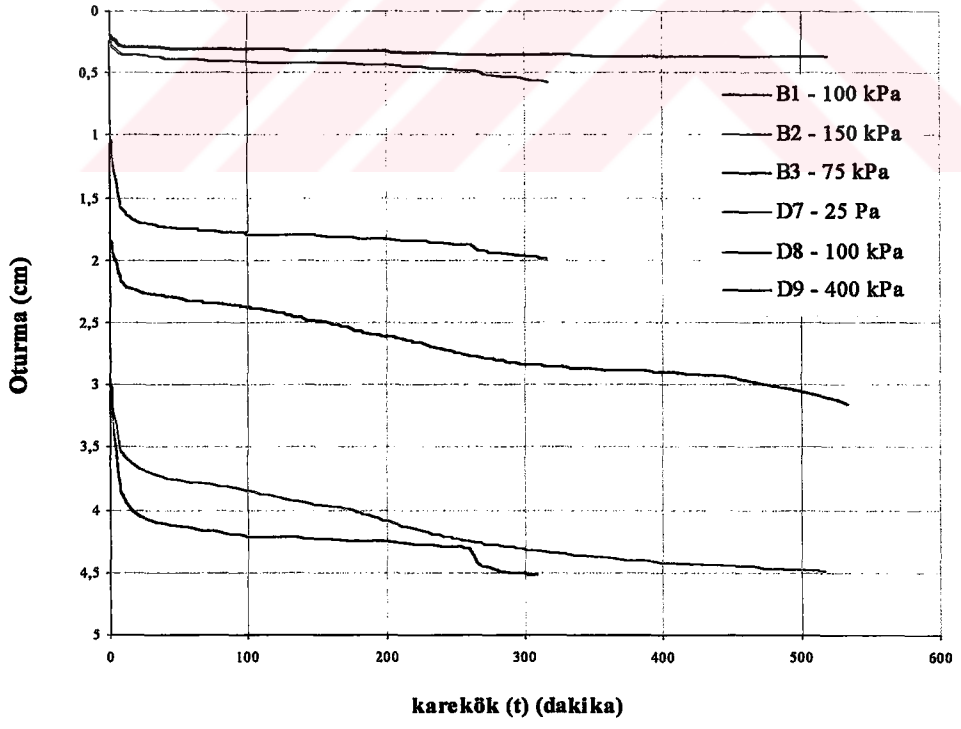
danelerinin dizilişlerini, zaman ve örtü yükü yardımıyla kimyasal bağlarla gelişen çimentolanmanın da etkisiyle, boşluklu ve gevşek yapının bir kritik gerilmede yapısal kırılma gösterme eğilimi taşıdığını ve sonuç olarak ikincil sıkışmanın oluştuğunu ifade etmiştir.

Bu tez çalışmasında, kimi araştırmacılar tarafından üçüncül sıkışma, kimi araştırmacılar tarafından ise laboratuvar ortamında uzun süreli deney yapma neticesinde ortaya çıkan kimyasal sebeplere (poroz kağıtın bozuşması, bakteriyal üreme v.b.) veya kilin kritik bir gerilme sonrası yapısının kırılmasına bağlanan bu olayın yumuşak mavi kil için geçerli olup olmadığı araştırılmıştır. Yüksek boşluk oranı, su muhtevası ve düşük birim hacim ağırlıkları ile killerden ayrılmasına rağmen killere benzer sıkışma davranışı gösteren turba zeminlerde her ne kadar üçüncül sıkışma davranışı görülmesi olağan bir durum ise de, organik içeriğe sahip killerde görülen bu üçüncül sıkışma davranışına tatmin edici açıklamalar ve yorumlar getirilememiştir. Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucu, yumuşak mavi kil zeminde gözlemlenen davranışın üçüncül sıkışma hipotezinin bir göstergesi olduğu düşünülmektedir. Aşağıdaki paragraflarda bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar ayrıntılarıyla verilmiştir.

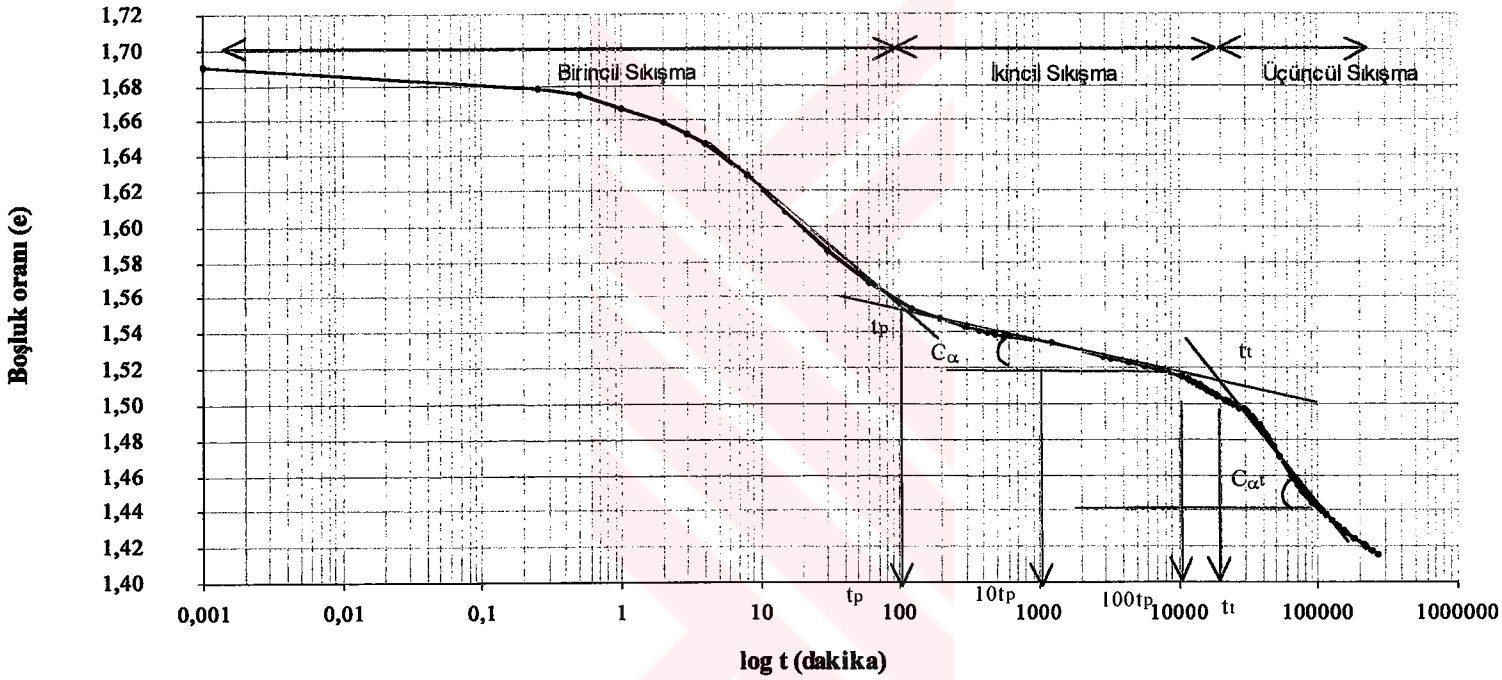
Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de, 6 deneye ait ΔH-log(t) ve ΔH-$\sqrt{t}$ diyagramları gösterilmiştir. Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'den görülebileceği gibi, uzun süre sabit efektif gerilme altında ikincil sıkışmaya terkedilen kil numunede, belli bir süre (2 log çevrimi-100t_p'den daha uzun bir süre) sonra oturma-zaman eğrisinin bir dönüm yaparak sıkışma eğrisinin eğiminin arttığı ve birincil konsolidasyon süresince oluşan eğime paralel bir eğimle sıkışmaların devam ettiği görülmektedir. ΔH-log(t) ve ΔH-$\sqrt{t}$ diyagramları incelendiğinde, ikincil sıkışma sırasında, 2 log çevrimi-100t_p'den daha uzun bir süre sonra sıkışma eğrisinin eğiminin dolayısıyla ikincil sıkışma parametrelerinin arttığı ve kilin Tip III olarak tanımlanan davranışı gösterdiği görülmektedir. Şekil 5.22'de ise B1 nolu deneye ait 100 kPa gerilme seviyesindeki uzun süreli deneye ait e-log (t) diyagramı gösterilmektedir. Şekil 5.22'den görülebileceği gibi e-log t grafiğinde, birincil konsolidasyonun tamamlandığı t_p süresini takiben 2 log çevrimi boyunca ikincil sıkışmalar sabit bir eğimle (ikincil sıkışma katsayısı-C_α = δe/δlog t) devam ettikten bir süre sonra eğim, birincil



Şekil 5.20. Üçüncül Sıkışma Yapan Deneylere Ait ΔH-log (t) Grafikleri



Şekil 5.21. Üçüncül Sıkışma Yapan Deneylere Ait ΔH-karekök (t) Grafikleri



Şekil 5.22. B1 Nolu Deneyde 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil ve Üçüncül Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı

konsolidasyon süresince oluşan eğime paralel olacak şekilde artarak sıkışmalar devam etmektedir. İkincil konsolidasyon süresince e-log t eğrisi üzerinde sıkışmaların sabit bir eğimle lineer olarak devam ettiği kısım ile eğimin artmaya başladığı kesimden çizilecek lineer çizgi kesiştirildiğinde üçüncül sıkışmanın başladığı t_t zamanı belirlenebilmektedir (Edil ve Dhowian, 1979).

B1 nolu deneyde 100 kPa gerilme seviyesi için Şekil 5.22'de verilen e-log t eğrisinde, üçüncül sıkışmanın başladığı t_t süresinden sonra e-log t eğrisinin lineer kesiminin eğimi alınarak üçüncül sıkışma katsayısı-$C_{\alpha t}$ ve üçüncül sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon t}$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

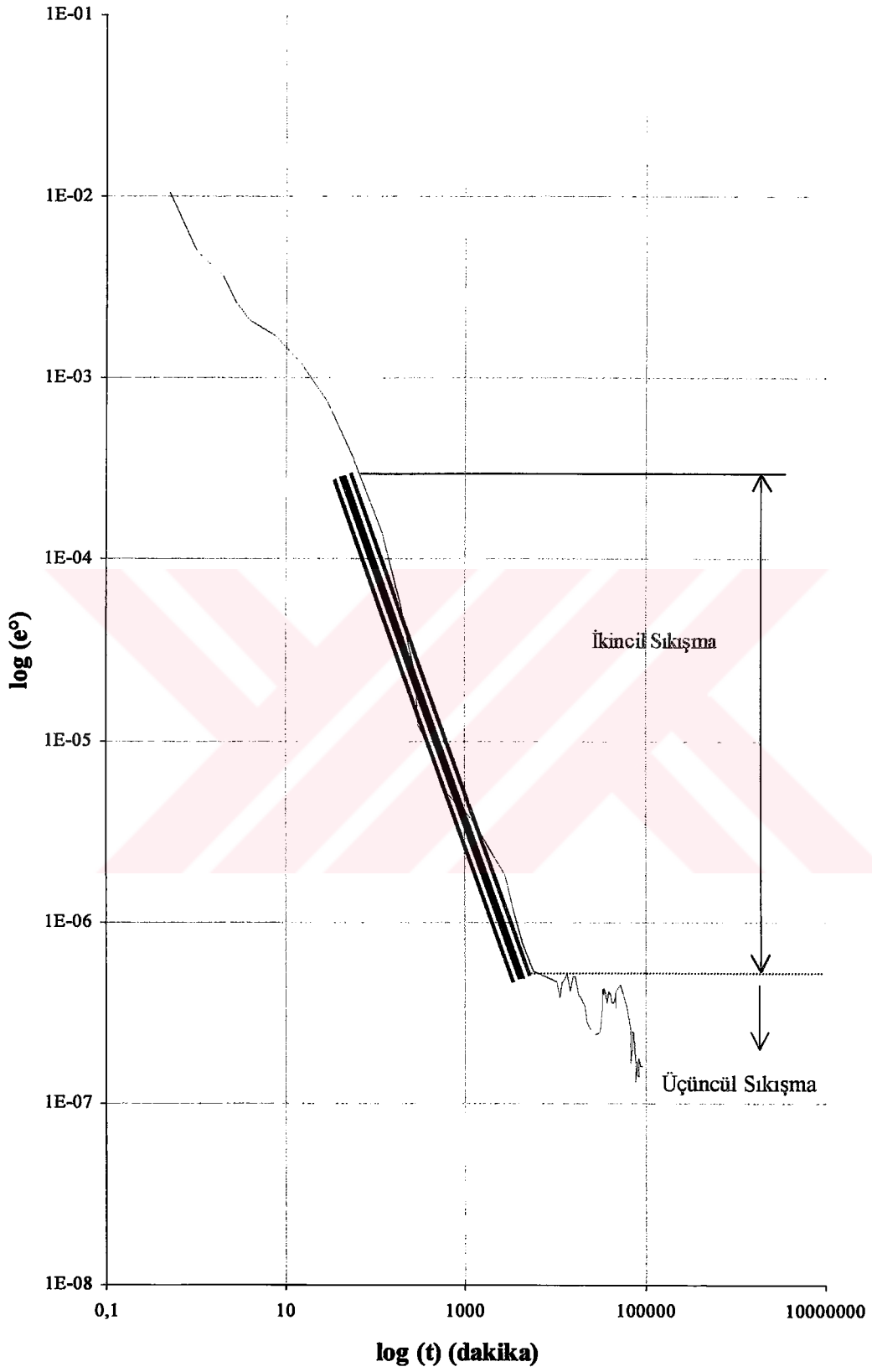
$$C_{\alpha t} = \Delta e / \Delta \log t \tag{5.7}$$

$$C_{\alpha\varepsilon t} = C_{\alpha t} / 1 + e_0 \tag{5.8}$$

B1 nolu deneyde 100 kPa gerilme seviyesinde, ikincil sıkışma katsayısı C_α, ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ile üçüncül sıkışma katsayısı-$C_{\alpha t}$ ve üçüncül sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon t}$ karşılaştırılması Tablo 5.7'de verilmiştir. Tablo 5.7'den görülebileceği gibi ikincil sıkışma süresince ikincil sıkışma parametreleri, genelde aynı değerleri almakta ve bir önceki bölümde (Bölüm 5.2.2) anlatıldığı gibi sıkışma indisi ile aralarındaki tekil ilişki geçerli olmaktayken, üçüncül sıkışmanın oluştuğu t_t anından itibaren (5.7) ve (5.8) bağıntıları ile hesaplanan üçüncül sıkışma parametreleri, ikincil sıkışma-zaman parametrelerinin yaklaşık dört katı olmaktadır.

Tablo 5.7. B1 Nolu Deneyde 100 kPa Gerilme Seviyesindeki İkincil ve Üçüncül Sıkışma Parametreleri

İkincil Sıkışma				Üçüncül Sıkışma t_t Sonrası	
t_p-$10t_p$ Arası		$10t_p$-$100t_p$ Arası			
C_α	$C_{\alpha\varepsilon}$	C_α	$C_{\alpha\varepsilon}$	$C_{\alpha t}$	$C_{\alpha\varepsilon t}$
0.017	0.006	0.020	0.007	0.088	0.029



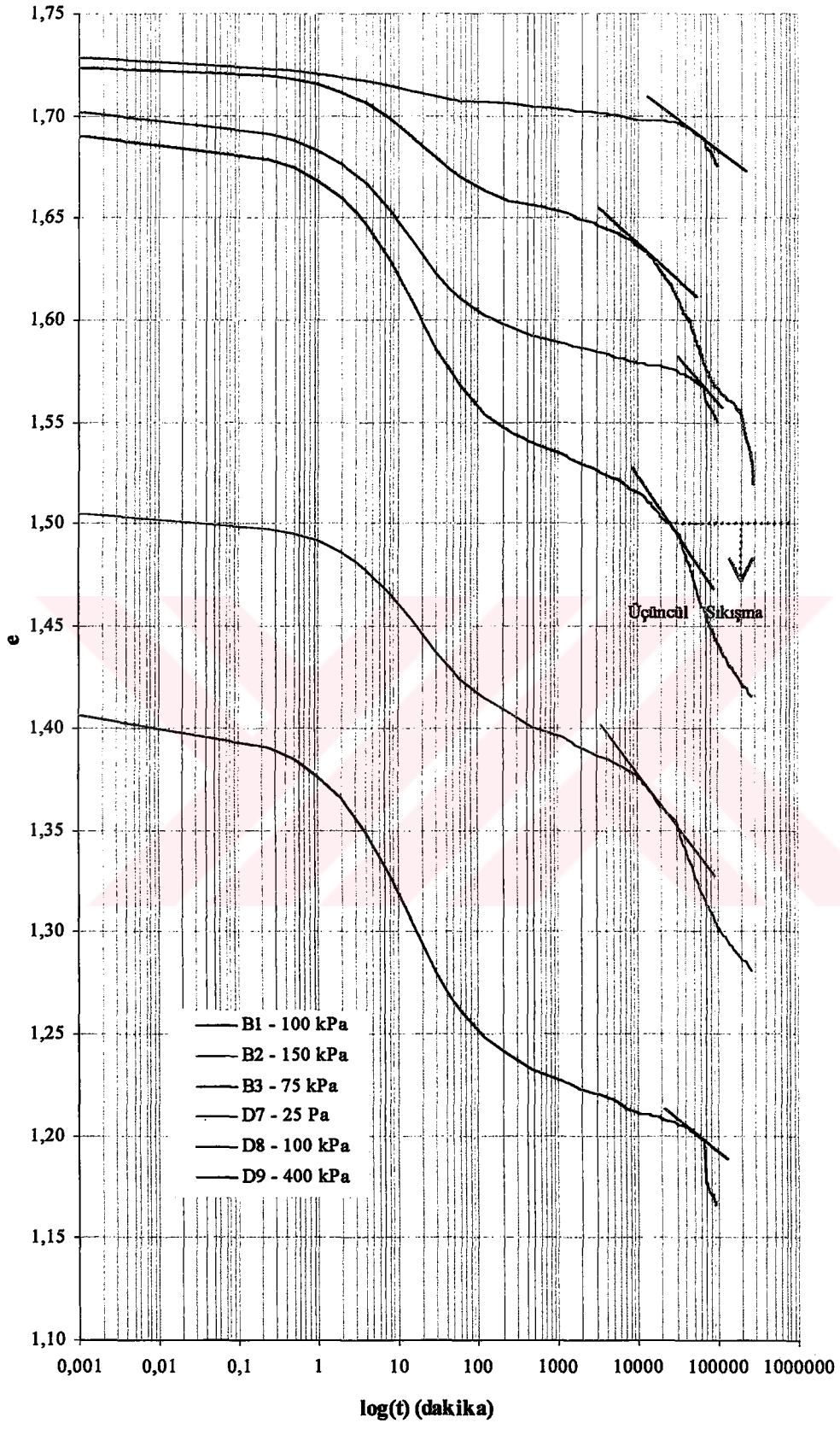
Şekil 5.23. B1 Nolu Deneyde 100 kPa Gerilme Seviyesinde log $\dot{e}$ -log t Eğrisi

İkincil konsolidasyonu takiben e-log t diyagramında, sıkışmaların tekrar hızlandığı dönüm noktasından itibaren oluşan sıkışma davranışı "Üçüncül Sıkışma" olarak tanımlanmaktadır. Üçüncül sıkışma olarak adlandırılan olayın varlığı, logaritmik eksende boşluk oranı değişim hızı zamana karşı çizilerek de belli olmaktadır. Boşluk oranı değişim hızı;.

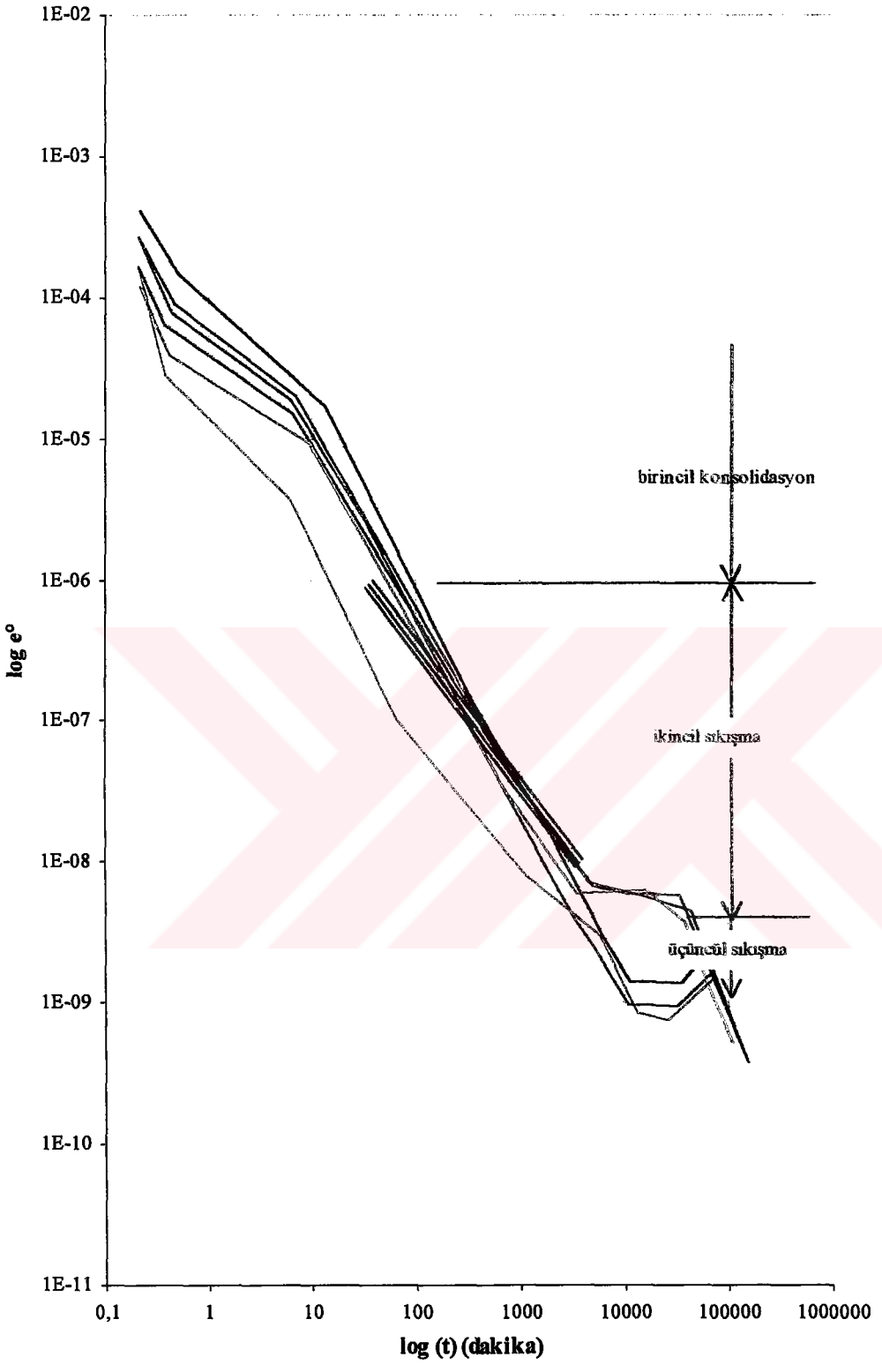
$$\dot{e} = \frac{de}{dt} \tag{5.9}$$

eşitliğiyle tariflenmektedir. İkincil konsolidasyon süresince, ikincil sıkışma katsayısı $-C_\alpha$ sabit olacağı için boşluk oranı değişim hızı da zamanla sabit olacaktır. Bu durumda logaritmik eksende, log $\dot{e}$ - log t eğrisinde eğimin sabit olduğu bölüm ikincil sıkışmayı, eğimin değiştiği yer ise üçüncül sıkışmayı gösterecektir. Şekil 5.23'de B1 nolu deneyde 100 kPa gerilme seviyesinde log $\dot{e}$-log t eğrisi gösterilmektedir. Şekil 5.23'den görüldüğü gibi, ikincil sıkışma süresince eğrinin eğimi yaklaşık m = 1 olmakta ve üçüncül sıkışmanın başladığı andan itibaren boşluk oranı değişim hızı-$\dot{e}$ artarak devam etmektedir. Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 birlikte yorumlanırsa, ikincil sıkışma süresince boşluk oranı değişim hızı ve dolayısıyla sıkışma hızı sabit devam etmekteyken, ikincil sıkışmayı takip eden ve üçüncül sıkışma olarak adlandırılan bölümde tekrar boşluk oranı değişim hızı ve dolayısıyla sıkışma hızı artmaktadır.

Tablo 5.8'de, B1, B2, B3 D7, D8 ve D9 nolu deneylere ait üçüncül sıkışma katsayısı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranları-$C_{\alpha\varepsilon t}$ gösterilmiştir. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'de B1, B2, B3 D7, D8 ve D9 nolu deneylere ait e-log (t) ve log $\dot{e}$ - log t diyagramları toplu olarak verilmiştir. Şekil 5.24'de verilen e-log t eğrilerinde de B1 nolu deneydeki gibi ikincil sıkışma devam ederken belli bir noktada (2 log çevrimi-$100t_p$'den daha uzun bir süre) sıkışma eğiminin arttığı ve dolayısıyla üçüncül sıkışma davranışının oluştuğu açıkça görülmektedir. Şekil 5.25'de verilen log $\dot{e}$ - log t diyagramlarında da benzer şekilde ikincil sıkışmanın sona erip üçüncül sıkışmanın başladığı süreçten itibaren sıkışma hızı tekrar hız kazanmaktadır.



Şekil 5.24. Üçüncül Konsolidasyona Gidilen Deneylere Ait e-log (t) Grafikleri



Şekil 5.25. B1, B2, B3 D7, D8 ve D9 Nolu Deneylere Ait log $\overset{0}{e}$ - log t Diyagramları

Tablo 5.8 Tüm Uzun Süreli Konsolidasyon Deneyleri İçin Çeşitli Gerilme Seviyelerindeki Üçüncül Sıkışma Parametreleri

Deney no	Gerilme (kPa)	$C_{\alpha t}$ (üçüncül sıkışma katsayısı)	$C_{\alpha\varepsilon t}$ (üçüncül sıkışma oranı)
B1	100	0.088	0.030
B2	150	0.078	0.026
B3	75	0.079	0.026
D7	25	0.051	0.019
D8	100	0.064	0.023
D9	400	0.086	0.031

5.2. Arazi Gözlemleri İle Deneysel Çalışmalar Arasındaki İlişki

Samsun-Çarşamba Havalanı sahasında yapılan zemin araştırmalarında, 3000 m uzunluktaki uçuş pistinin deniz tarafındaki ilk 500 m lik bölümünde, zemin yüzeyindeki orta katı-katı kahverengi kil tabakası altında karşılaşılan yumuşak mavi kil ve turba zeminlerin, pistin geri kalan 2500 m'lik bölümünde bulunmadığı, kahverengi kil tabakasının altında sıkı yerleşmiş kum istifine girildiği belirlenmiştir. Bu sebeple, zemin araştırmaları KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki pist bölümünde yoğunlaştırılmış ve pistin bu bölümünde, pist üst yapısı imal edilmeden önce ön yüklemeyle zemin iyileştirmesi yapılıp yapılamayacağı araştırılmıştır (Sağlamer, 1996). Bu maksatla, yumuşak zeminin en kalın olduğu pist başında h = 2.5 m yükseklikte bir test dolgusu yapılmış ve oturma plakaları tesis edilerek altı ay süreyle yumuşak mavi kil zeminin in-situ yük-oturma-zaman davranışı belirlenmiştir. Test dolgusundan derlenen veriler, ön yükleme ile yumuşak kil zeminin makul sürede konsolide edilebileceğini, konsolidasyonu hızlandırmak amacıyla başkaca önlemler alınmasına gerek olmadığını ortaya koymuştur. Daha sonra, elverişsiz zemin koşullarının belirlendiği ilk 500 m uzunluktaki pist bölgesinde altı ay süreyle ön yükleme yapılmasına karar verilmiştir. Bu maksatla, söz konusu pist kesiminde

h = 3.5 m yükseklikteki granüler malzeme ile ön yükleme yapılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde, pist başlangıcındaki test dolgusunda bir yıl, pistin 500 m uzunluktaki kesiminde ise altı ay süreyle yapılan ön yüklemelerde derlenen geoteknik data değerlendirilecek ve laboratuvar deneyleriyle karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

Havaalanı sahasında yapılan zemin araştırmalarında belirlenen zemin profili Şekil 4.2'de, test ve pist dolgusu içine yerleştirilen okuma plakalarının yerleşimi ve sondaj kuyuları ile muayene çukurlarının vaziyet planındaki konumları Şekil 4.3'te verilmiştir. İnceleme alanının jeolojisi, zemin profili ve sahada yapılan zemin araştırmaları 4.Bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki pist bölgesinde uygulanacak zemin iyileştirme yöntemine karar verilmeden önce yumuşak zeminin en kalın olduğu pist başlangıcında ön yükleme yapılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, planda 25.0 m x 45.0 m boyutlarında bir alanda ön yükleme yapılmıştır. Ön yüklemede, granüler malzeme ile yapılan dolgu yüksekliği h = 2.5 m olup efektif gerilme artışı 2.5 x 20 = 50 kPa seçilmiştir. Test dolgusuna başlanmadan önce oniki noktaya oturma plakaları yerleştirilmiştir. 8/6/1997 günü test dolgusu tamamlanmış ve oturma gözlemlerine başlanmıştır. 12 adet oturma plakalarından yaklaşık altı aylık bir dönemde alınan okumalardan literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler uygulanarak konsolidasyon katsayısı ve birincil konsolidasyonun U = %90 değerine ulaştığı süre hesaplanmıştır. Tablo 5.9'da 1, 5 ve 6 nolu plakalar için hesaplanan değerler verilmiştir. Tablo 5.9'dan görüleceği gibi, test yüklemesinin yapıldığı ve mavi kil tabakasının en kalın olduğu kesimde, birincil konsolidasyonun U = % 90 değerine 60-90 günlük bir sürede ulaşılmıştır. Birincil konsolidasyon sürecinde meydana gelen oturmalar H_p = 30-50 cm dolayındadır. (c_v) konsolidasyon katsayısı değerleri hesaplanırken çift yönlü drenaj olduğu ve test dolgusu bölgesinde mavi kil tabakası kalınlığının H = 14.00 m olduğu dikkate alınmıştır. Dolayısıyla drenaj boyu H_d = 7.00 m seçilmiştir.

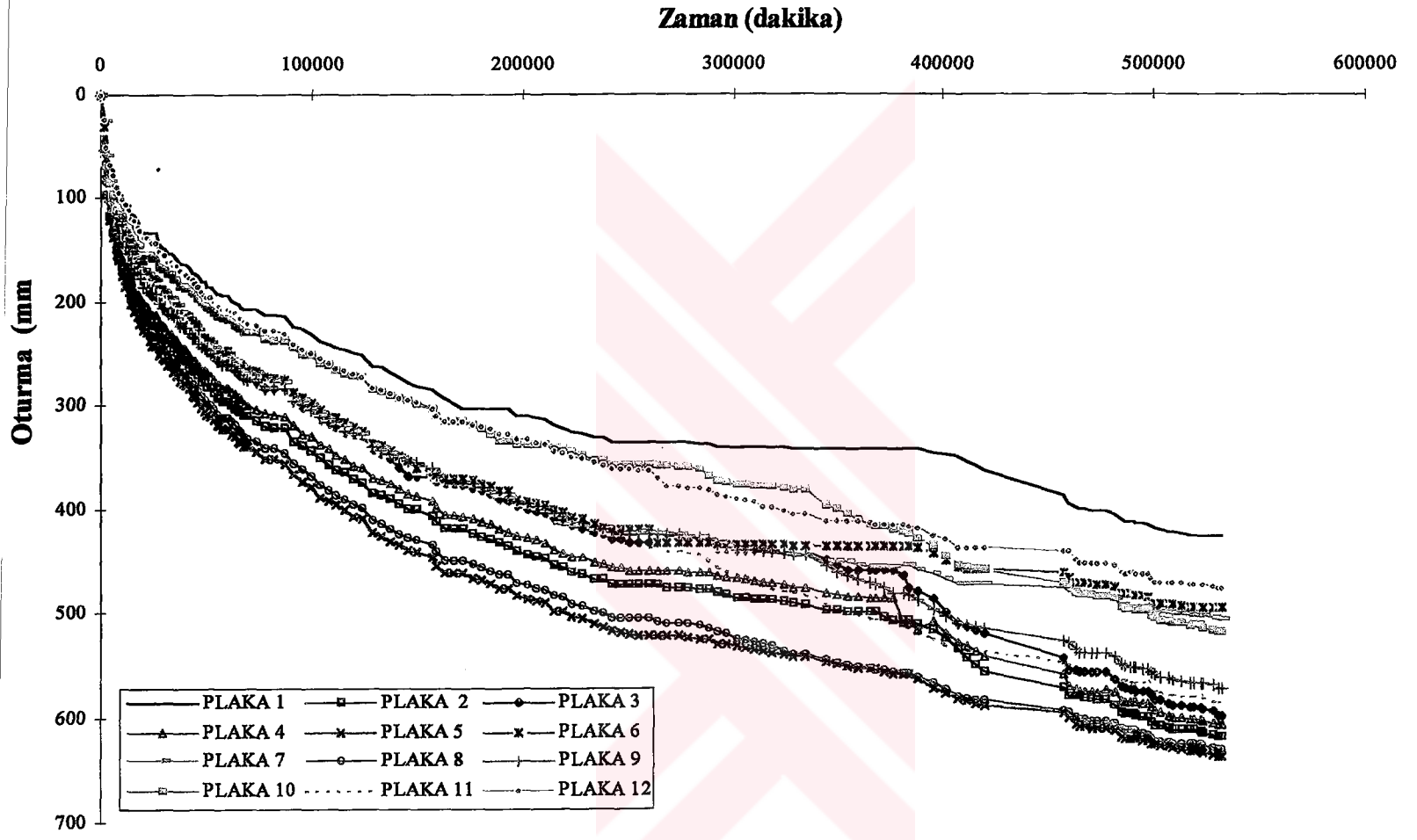
Test dolgusunda, efektif gerilme artışının 0 → 50 kPa kademesi için belirlenen arazi konsolidasyon katsayıları c_v = 0.035 - 0.07 cm^2/sn aralığında değerler almıştır. Ortalama bir değer olarak $c_v = 5 \times 10^{-2}$ cm^2/sn değeri seçilebilecektir. Önyükleme dolgusu sırasında 50 kPa kademesi için laboratuvarda belirlenen konsolidasyon

Tablo 5.9. Test Dolgusundan Elde Edilen Veriler

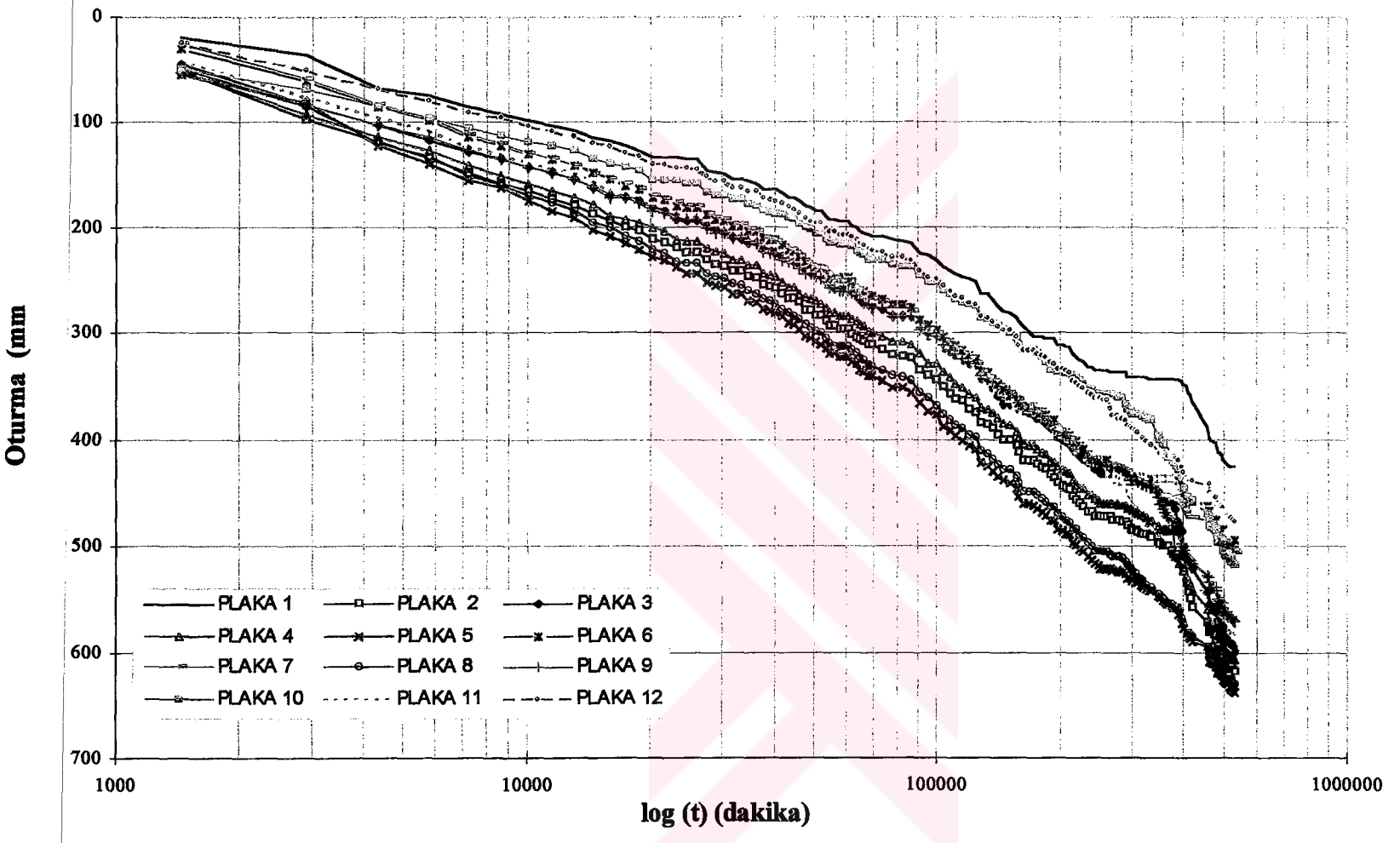
	$\sqrt{t}$		log t	
Nokta No.	t_{90} (gün)	c_v (cm^2/sn)	t_{50} (gün)	c_v (cm^2/sn)
1	90	0.05	32	0.035
5	63	0.07	24	0.047
6	67	0.07	30	0.037

katsayısı $c_v = 4 \times 10^{-4}$ cm^2/sn dolayında olup arazide belirlenen konsolidasyon katsayıları, laboratuvar konsolidasyon katsayılarından yaklaşık 100 kat daha büyüktür. Diğer bir deyişle, arazide birincil konsolidasyon yüz kat daha hızlı gelişmiştir. Test dolgusunda 12 ay süreyle yapılan yükleme sonucu elde edilen oturma-zaman davranışı Şekil 5.26'da, oturma-log (t) ve oturma-karekök (t) davranışları ise sırasıyla Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de gösterilmiştir. 12 aylık süre sonunda test dolgusunun merkezinde oturmalar 63-64 cm iken, köşelerdeki oturmalar 43-48 cm dolayında olmuştur. Test dolgusunda, 60-90 gün (86400 – 129600 dakika) içinde birincil konsolidasyonun U = %90 değerine ulaşmasına ve ikincil sıkışma yapmasına rağmen oturmalar devam etmiş ve hatta 200-270 gün (288000–388800 dakika) sonra oturmalar hızlanarak artmıştır.

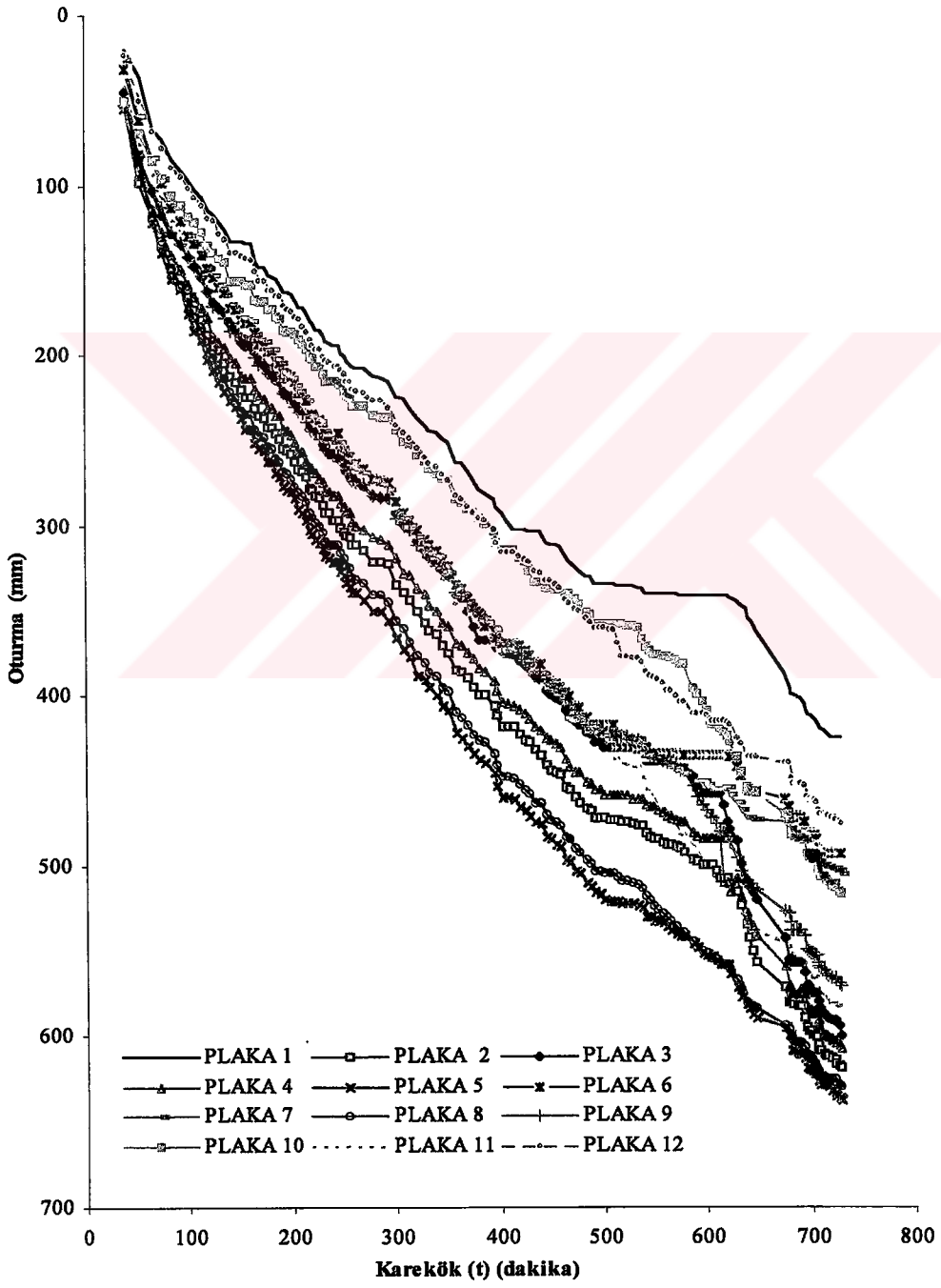
Yumuşak mavi kil tabakasının en kalın olduğu pist başlangıcında yapılan test dolgusunda, U = % 90 konsolidasyon oranına iki-üç ay gibi bir sürede ulaşıldığının görülmesi üzerine, yumuşak mavi kil tabakasına oturan 500 m uzunluktaki pist bölümünde, pist üst yapısı inşa edilmeden önce ön yüklemeyle temel zemini özelliklerinin iyileştirilebileceğine karar verilmiştir. Pistin söz konusu kesimine granüler malzeme serilmeye Kasım 1997 içerisinde başlanmış ve 500 m uzunluktaki pist bölümünde h = 3.5 m yükseklikteki ön yükleme 27 Aralık 1997'de tamamlanmıştır. Böylece, $\Delta\sigma$ = 70 kPa gibi bir efektif gerilme artışıyla ön yükleme yapılmıştır. Ön yüklemede uygulanacak gerilme artışına karar verilmeden önce stabilite analizleri yapılarak seçilen efektif gerilme artışı altında zemin profilinde bir kayma göçmesinin oluşmayacağı kontrol edilmiştir (Sağlamer, 1996). Pist eksenine 50 m ara ile oturma plakaları yerleştirilmiş ve altı aylık bir sürede oturma gözlemleri



Şekil 5.26. Test Dolgusunun 12 Ay Süreyle Oturma-Zaman Davranışı



Şekil 5.27. Test Dolgusunun 12 Ay Süreyle Oturma-log (Zaman) Davranışı



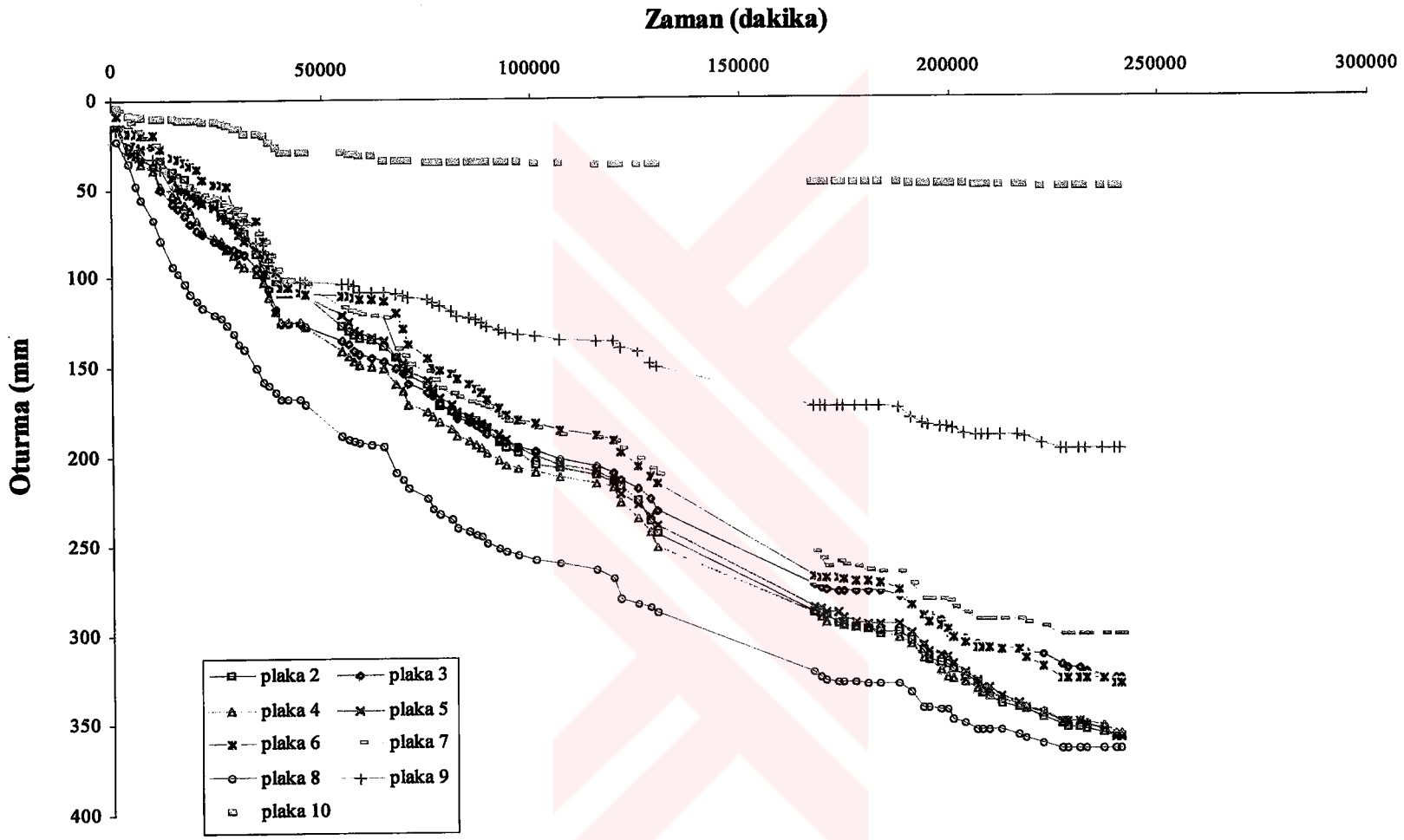
Şekil 5.28. Test Dolgusunun 12 Ay Süreyle Oturma-karekök (Zaman) Davranışı

yapılmıştır. Pist dolgusunda 6 ay süreyle yapılan yükleme sonucu elde edilen oturma-zaman davranışı Şekil 5.29'da, oturma-log (t) ve oturma-karekök (t) davranışı ise sırasıyla Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de gösterilmiştir. Yumuşak mavi kilin kalın olduğu kesimlerde meydana gelen oturmalar 30-37 cm dolayında değerler alırken, mavi kil tabakasının ince olduğu 10 noktasındaki oturma 5 cm ile sınırlı kalmıştır. Pist dolgusunda, 35-40 gün (50400–57600 dakika) içinde birincil konsolidasyonun U = %90 değerine ulaşmasına ve ikincil sıkışma yapmasına rağmen oturmalar devam etmiş ve hatta yaklaşık 115 gün (165600 dakika) sonra oturmalar hızlanarak artmıştır.

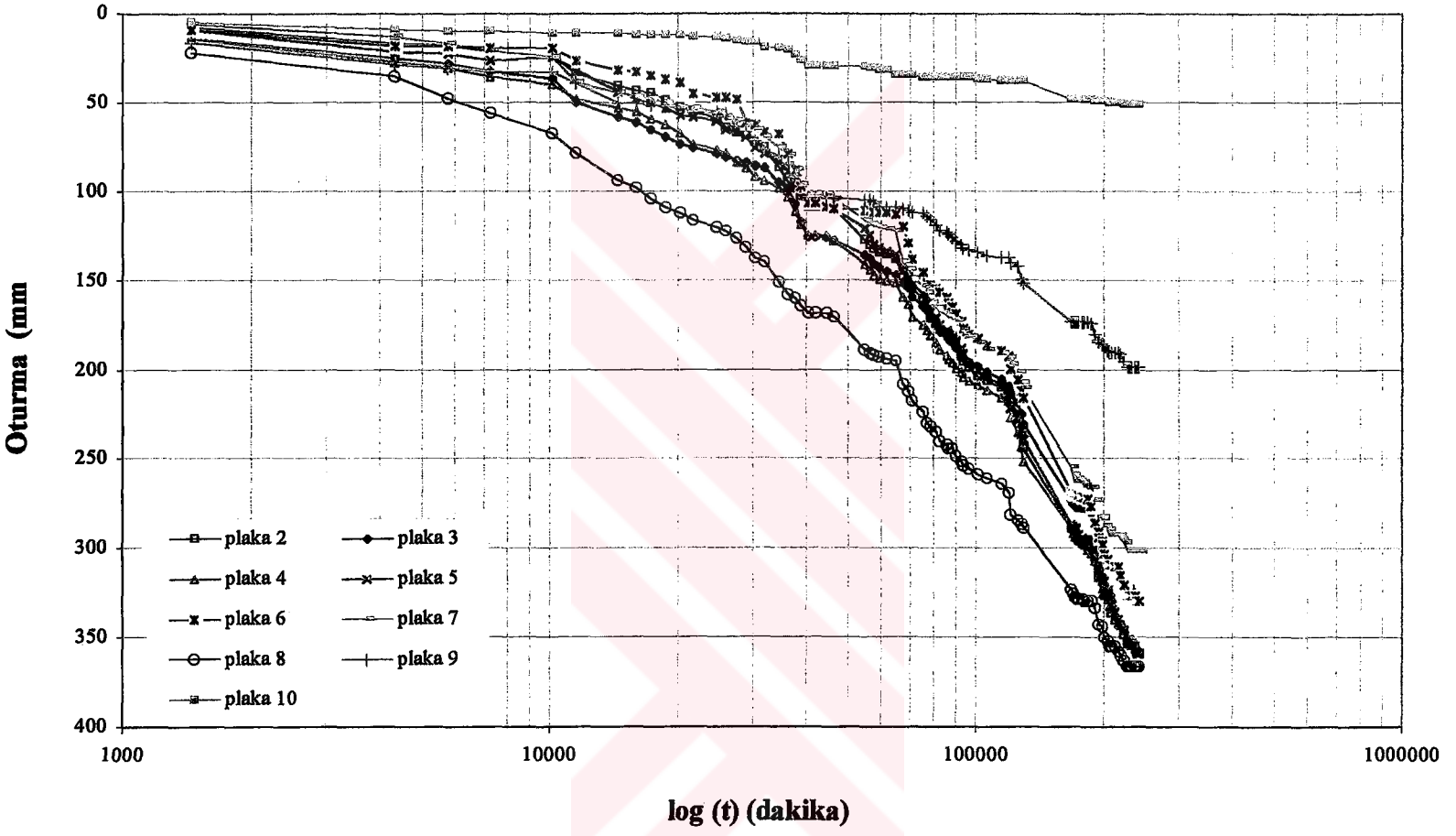
Test dolgusunun oturma davranışını gösteren Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28 ile pist dolgusunun oturma davranışını gösteren Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31, aynı lokasyondan alınan kil zemin numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleriyle belirlenen ve detayları Bölüm 5.1.'de anlatılan ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının arazide de meydana geldiğini göstermektedir. Arazi ve laboratuvarda elde edilen deneysel sonuçlar Bölüm 5.2.1 ve Bölüm 5.2.2'de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

5.2.1. Test Dolgusunda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışmaların Laboratuvar Deneyleriyle Karşılaştırılması

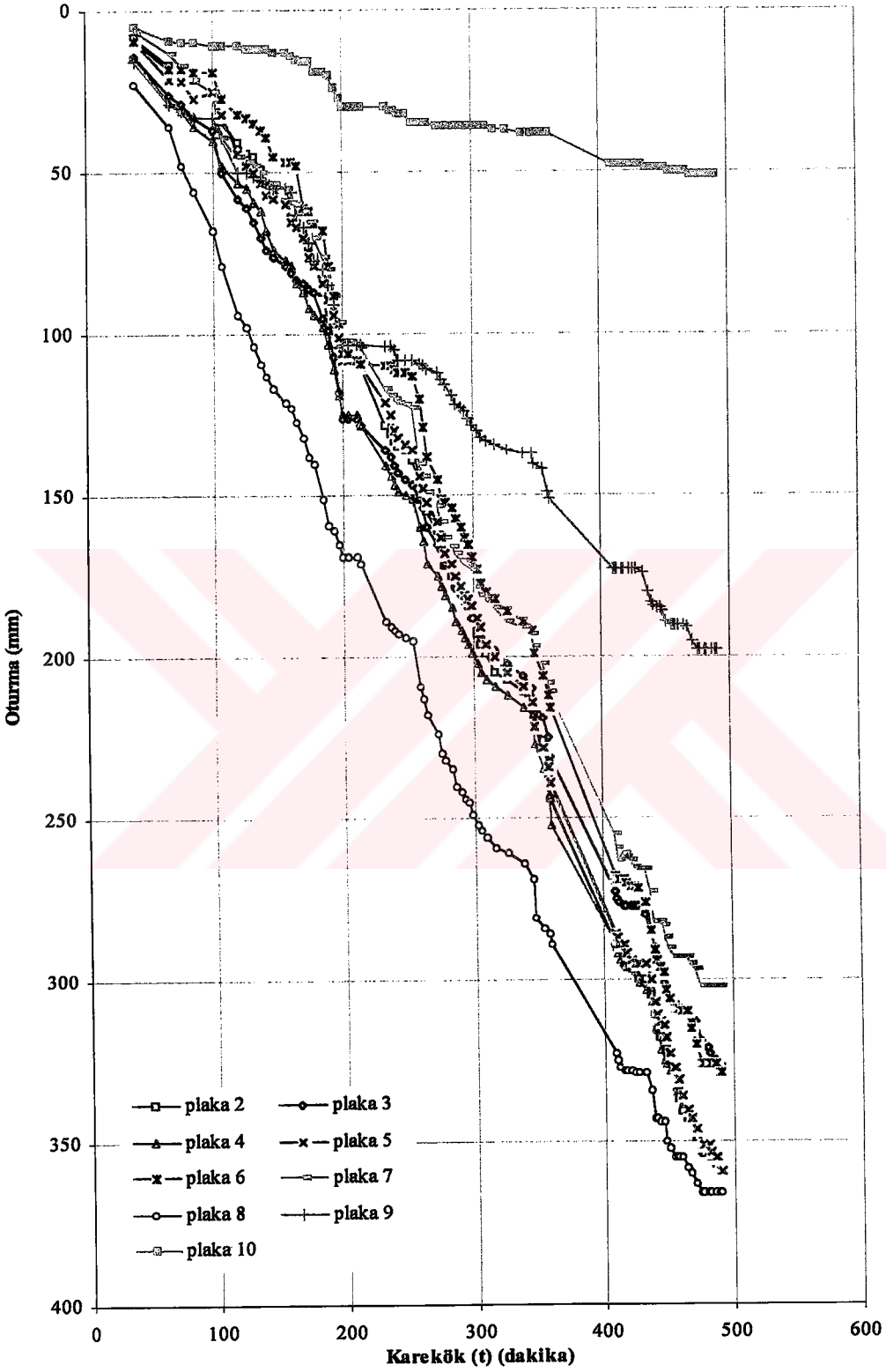
Pist başlangıcında, yumuşak mavi kil tabakasının en kalın olduğu kesimde h = 2.5 m yüksekliğinde granüler malzeme ile yapılan dolguda efektif gerilme artışı 2.5 x 20 = 50 kPa olarak seçilmiş, test dolgusu içinde tesis edilen 12 adet plakada, 12 ay süreyle oturma gözlemleri yapılmıştır. Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de gösterildiği üzere test dolgusunda, birincil konsolidasyon tamamlandıktan ve önemli miktarda ikincil sıkışma meydana geldikten sonra oturmalar devam etmiş ve hatta 200-270 gün (288000 – 388800 dakika) sonra oturmalar hızlanarak artmıştır. Test dolgusunda gözlemlenen davranış tümüyle aynı lokasyondan alınan kil zemin numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleriyle belirlenen ve detayları Bölüm 5.1.'de verilen ikincil ve üçüncül sıkışma davranışıyla üst üste düşmektedir. Sahada 12 ay süreyle yapılan oturma gözlemlerinden hareketle herbir oturma plakası için ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon t}$ belirlenmiştir.



Şekil 5.29. Pist Dolgusunun 6 Ay Süreyle Oturma-Zaman Davranışı



Şekil 5.30. Pist Dolgusunun 6 Ay Süreyle Oturma-log (Zaman) Davranışı



Şekil 5.31. Pist Dolgusunun 6 Ay Süreyle Oturma-karekök (Zaman) Davranışı

Konsolidasyon sürecinde birim boy değişimi ve birim boşluk oranı değişimi arasında (5.10)'daki gibi bir bağıntı vardır.

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H_0} \times (1 + e_0) \tag{5.10}$$

(5.10) eşitliği ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{C_\alpha}{(1+e_0)}$ eşitliği içine yerleştirildiğinde (5.11)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{C_\alpha}{1+e_0} = \frac{\Delta e / \Delta \log t}{1+e_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times \frac{1}{\Delta \log t} = \frac{\Delta H}{H_0} \times \frac{1}{\Delta \log t} \tag{5.11}$$

$$C_{\alpha\varepsilon t} = \frac{C_{\alpha t}}{1+e_0} = \frac{\Delta e / \Delta \log t}{1+e_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times \frac{1}{\Delta \log t} = \frac{\Delta H}{H_0} \times \frac{1}{\Delta \log t} \tag{5.12}$$

Benzer şekilde üçüncül sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon t}$ 'de üçüncül sıkışmaların başladığı t_t anından itibaren aynı şekilde hesaplanabilecektir.

Şekil 5.32'de test dolgusu içine yerleştirilen 1, 5 ve 10 nolu plakalara ait oturma-log (zaman) eğrisi gösterilmiştir. 1 nolu plaka test dolgusunun denize yakın köşesinde, 5 nolu plaka test dolgusunun merkezinde, 10 nolu plaka ise test dolgusunun piste bakan köşesinde tesis edilmiştir. Şekil 5.32'den görülebileceği gibi, test dolgusunda 12 ay süreyle yapılan okuma gözlemlerinde yaklaşık 200-270 gün (288000 – 388800 dakika) sonra oturmaların hızlanarak arttığı, laboratuvarda (2.5-6 ay süreyle) yapılan uzun süreli konsolidasyon deneylerine benzer şekilde üçüncül sıkışmanın meydana geldiği görülmektedir.

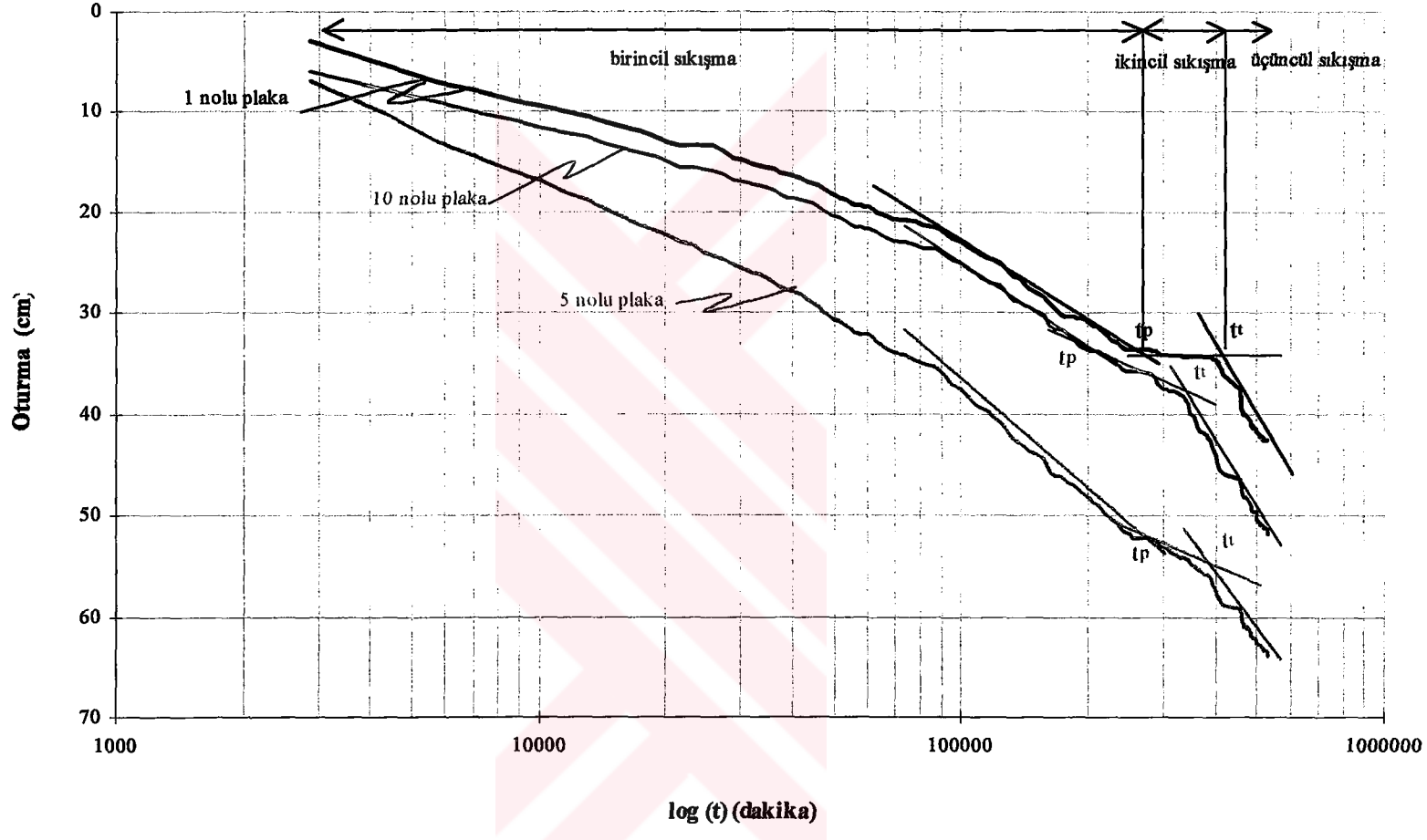
Test dolgusu içinde tesis edilen 12 adet oturma plakasından elde edilen oturma-zaman datasından hareketle (5.11) ve (5.12) bağıntıları kullanılarak hesaplanan ikincil ve üçüncül sıkışma parametreleri Tablo 5.10'da verilmiştir. Tablo 5.10'dan görülebileceği gibi oturma plakalarında gözlemlenen oturma davranışına göre, ortalama ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon} = 0.019$ ve üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t} = 0.042$ hesaplanmıştır.

Tablo 5.10. Test Dolgusundaki Plakalara Ait İkincil ve Üçüncül Sıkışma Oranları

Plaka No.	İkincil Sıkışma Oranı ($C_{\alpha\varepsilon}$)	Üçüncül Sıkışma Oranı ($C_{\alpha\varepsilon t}$)
1	0.0115	0.0460
2	0.0197	0.0542
3	0.0191	0.0615
4	0.0195	0.0521
5	0.0236	0.0332
6	0.0180	0.0287
7	0.0195	0.0232
8	0.0235	0.0316
9	0.0200	0.0431
10	0.0190	0.0432
Ortalama	0.019	0.042

Test dolgusunda h = 2.5 m yüksekliğinde dolgu yapıldığı için zemin tabakalarında $\Delta\sigma$ = 50 kPa dolayında gerilme artışı oluşmuştur. $\Delta\sigma$ = 50 kPa gerilme artışı için hesaplanan ortalama ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon} = 0.019$ iken, Bölüm 5.1.4'te Tablo 5.6'da A2, B1, B2, B3 ve C3 nolu deneylerde, 50 kPa gerilme seviyesinde ikincil sıkışma oranı için $C_{\alpha\varepsilon} = 0.003\text{-}0.006$ değerleri belirlenmiştir. Arazide belirlenen ikincil sıkışma oranı, laboratuvarda belirlenen değerin yaklaşık dört katıdır. Diğer bir deyişle, belirli bir (t) süresi için arazide dört kat daha fazla ikincil sıkışma oturması meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, arazide belirli miktarda ikincil sıkışma, laboratuvarda hesaplanana göre dört kat daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

Test dolgusu için hesaplanan ortalama üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t} = 0.042$, Bölüm 5.1.5'te Tablo 5.8'de B3 nolu deney için 75 kPa gerilme seviyesi için verilen üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t} = 0.026$ dolayındadır. Benzer şekilde arazide belirlenen üçüncül sıkışma oranı, laboratuvarda belirlenen değerin yaklaşık iki katıdır. Diğer bir deyişle, belirli bir (t) süresi için arazide iki kat daha fazla üçüncül sıkışma oturması meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, arazide belirli miktarda üçüncül sıkışma iki kat daha kısa sürede gerçekleşmektedir.



Şekil 5.32. Test Dolgusunda 1, 5 ve10 Nolu Plakalarda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışma Davranışının Grafiksel Olarak Gösterimi

Arazide, organik malzeme içeren yumuşak mavi kil zemin tabakalarındaki organik malzemenin dağılımı homojen değildir. Bu durum, sahadan alınan örselenmemiş numunelerde de görülmüştür. Sedimentasyon süresince organik malzemeler yer yer yoğun bir şekilde zemin içinde birkaç cm kalınlığında gelişigüzel, dağınık yayılmış bantlar halinde olduğu için arazide belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarının laboratuvarda belirlenen değerlere nazaran daha fazla olması beklenen bir durumdur. Ancak, laboratuvarda 2 cm yüksekliğinde, 5 cm çapında olan küçük numunelerle konsolidasyon deneyleri yapıldığı için numune alıcılardan konsolidasyon deneyi için numune alınırken mümkün olduğunca numunenin organik malzeme içeren kesimlerinden kaçınılmıştır. Buna karşın, 2 cm yüksekliğinde 5 cm çapındaki konsolidasyon ringi içindeki kil zeminde, mikro ölçekte bulunan organik zeminler nedeniyle tıpkı arazide belirlendiği gibi ikincil ve üçüncül sıkışma davranışları belirlenmiştir.

Laboratuvarda uzun süreli konsolidasyon deneyleriyle hesaplanan ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarından hareketle, arazideki ikincil ve üçüncül sıkışmaları hesaplamak ve önceden tahmin etmek mümkündür.

(H) sıkışabilir tabaka kalınlığı için ikincil sıkışma süresince, belirli bir (t) süresi için birincil konsolidasyonun tamamlanıp ikincil sıkışmanın başladığı (t_p) süresi biliniyorsa ikincil sıkışma miktarı (5.13)'deki gibi hesaplanır:

$$S_\alpha = C_{\alpha\varepsilon} \times H \times \log(\frac{t}{t_p}) \qquad (5.13)$$

Benzer şekilde belirli bir (t) süresi için ikincil sıkışmanın tamamlanıp üçüncül sıkışmanın başladığı (t_t) süresi biliniyorsa üçüncül sıkışma miktarı (5.14)'deki gibi hesaplanır:

$$S_{\alpha t} = C_{\alpha\varepsilon t} \times H \times \log(\frac{t}{t_t}) \qquad (5.14)$$

(5.13) ve (5.14) eşitliklerinden görülebileceği gibi ikincil sıkışma (S_α) ve üçüncül sıkışma miktarları ($S_{\alpha t}$), sıkışmaların hesaplanacağı (t) yapı ömrü ile ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$ ile doğru orantılıdır. Diğer bir deyişle, (t) yapı ömrü için arazide laboratuvarda hesaplanan değerlere göre, dört kat daha fazla ikincil sıkışma oturması ve iki kat daha fazla üçüncül sıkışma oturması meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, laboratuvarda hesaplananlara nazaran arazide belirli miktardaki ikincil sıkışma dört kat daha sürede, üçüncül sıkışma ise iki kat daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, önyükleme dolgusu sırasında 50 kPa kademesi için arazide belirlenen konsolidasyon katsayıları, laboratuvar konsolidasyon katsayılarından yaklaşık 100 kat daha büyüktür. Diğer bir deyişle, arazide birincil konsolidasyon yüz kat daha hızlı gelişmiştir.

Sonuç olarak, arazide belirlenen konsolidasyon katsayıları (c_v) laboratuvarda belirlenen katsayılara göre 100 kat daha büyük olmasına karşılık, arazi için belirlenen ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$, laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarına nazaran iki-dört kat daha fazladır ve pratik olarak laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranları arazideki değerlerle aynı kabul edilebilecektir. Bu nedenle, laboratuvarda yapılacak 2-3 aylık uzun süreli konsolidasyon deneylerinden hareketle arazide oluşabilecek ikincil ve üçüncül sıkışma miktarlarını önceden tahmin etmek ve kestirmek mümkün olabilecektir.

5.2.1. Pist Dolgusunda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışmaların Laboratuvar Deneyleriyle Karşılaştırılması

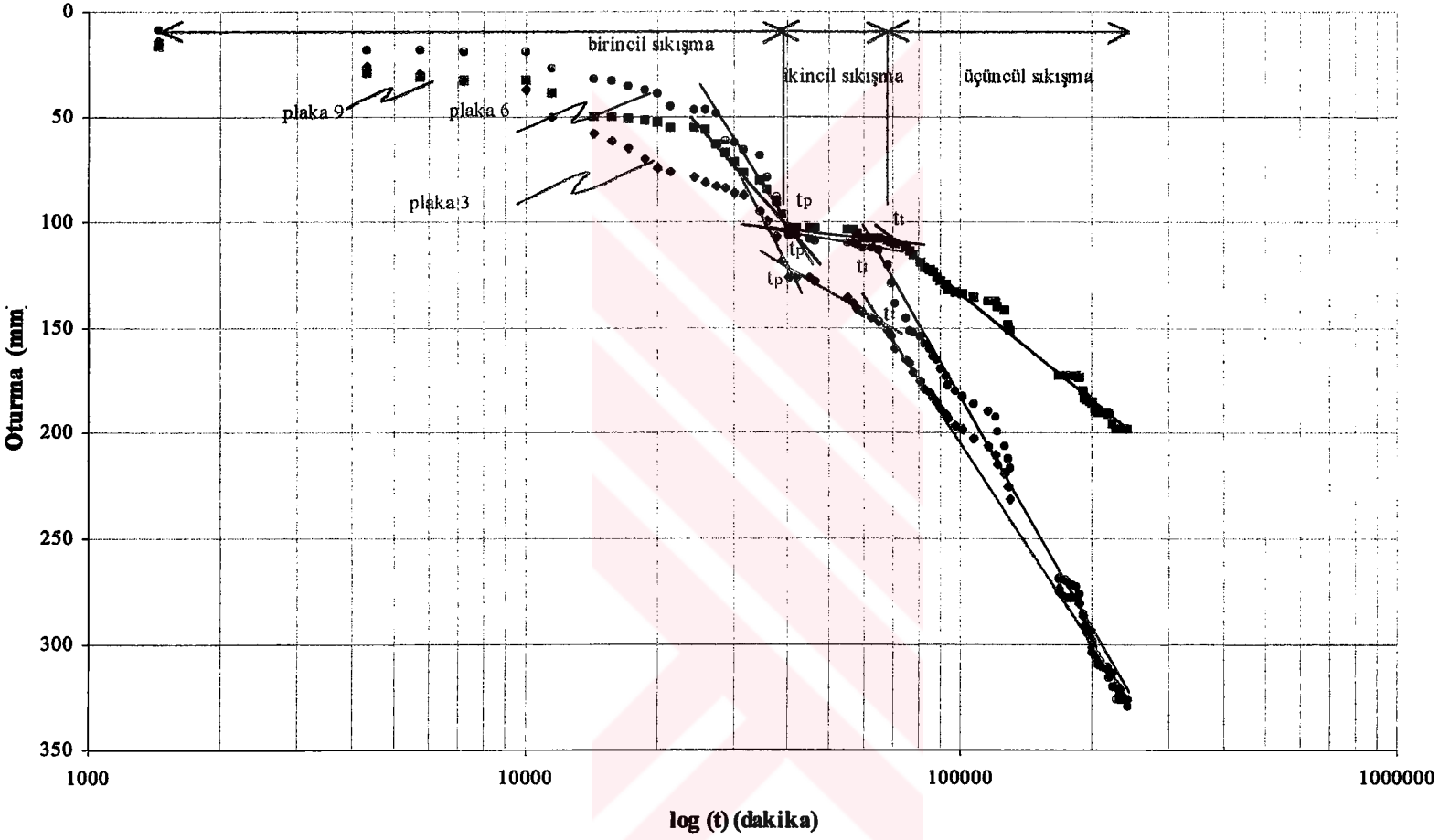
Pist dolgusu içinde tesis edilen 10 adet plakada 6 ay süreyle oturma gözlemleri yapılmıştır. Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de gösterildiği gibi, pist dolgusunda da tıpkı test dolgusunda olduğu gibi birincil konsolidasyonun 35-40 gün (50400 - 57600 dakika) içinde U = %90 değerine ulaşmasına ve ikincil sıkışma yapmasına rağmen oturmalar devam etmiş ve hatta yaklaşık 115 gün (165600 dakika) sonra oturmalar hızlanarak artmıştır. Pist dolgusunda gözlemlenen davranış tümüyle aynı lokasyondan alınan kil zemin numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleriyle belirlenen ve detayları Bölüm 5.2.1.'de verilen test dolgusunda görülen ikincil ve üçüncül sıkışma davranışına benzemektedir. Ancak, denize yakın olan pist

başlangıcından karayoluna doğru gidildikçe, sıkışabilir yumuşak mavi kil tabakasının kalınlığı ve yumuşak mavi kil zemin içindeki organik zemin içeriği azaldığı için, birincil konsolidasyon daha kısa sürede tamamlanmış ve ikincil ve üçüncül sıkışma oranları pist başlangıcında yapılan test dolgusunda gözlemlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarına göre daha az olmuştur. Buna karşılık, pist dolgusunda gözlemlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranları laboratuvarda yapılan klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinde belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarıyla üstüste düşmektedir.

Şekil 5.33'de pist dolgusu içine yerleştirilen 3, 6 ve 9 nolu plakalara ait oturma-log (zaman) eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.33'den görülebileceği gibi, pist dolgusunda 6 ay süreyle yapılan okuma gözlemlerinde, oturma plakalarında yaklaşık 50-70 gün (72000 – 100800 dakika) sonra oturmaların hızlanarak arttığı, laboratuvarda (2.5-6 ay süreyle) yapılan uzun süreli konsolidasyon deneylerinde belirlendiği gibi üçüncül sıkışma davranışının ortaya çıktığı görülmektedir. Pist dolgusunda mavi kil tabakasının kalın olduğu plakalarda (2, 3 ve 4 nolu plakalar gibi) ikincil sıkışma daha uzun sürede tamamlanırken, mavi kil tabakasının ince olduğu lokasyondaki plakalarda beklendiği üzere ikincil sıkışma daha kısa sürede tamamlanmaktadır.

Pist dolgusu içinde tesis edilen 10 adet oturma plakasından elde edilen oturma-zaman datasından hareketle (5.11) ve (5.12) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan ikincil ve üçüncül sıkışma parametreleri Tablo 5.11'de verilmiştir. Tablo 5.11'den görülebileceği gibi oturma plakalarında gözlemlenen oturma davranışına göre, ortalama ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ = 0.010 ve ortalama üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$ = 0.030 hesaplanmıştır.

Pist dolgusunda h = 3.5 m yüksekliğinde dolgu yapıldığı için zemin tabakalarında $\Delta\sigma$ = 70 kPa dolayında gerilme artışı oluşmuştur. Pist dolgusunda $\Delta\sigma$ = 70 kPa gerilme artışı için hesaplanan ortalama ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ = 0.010 iken, Bölüm 5.1.4'te Tablo 5.6'da A3, B3 ve C1 nolu laboratuvar deneylerinde, 75 kPa gerilme seviyesindeki ikincil sıkışma oranı için $C_{\alpha\varepsilon}$ = 0.004-0.008 değerleri belirlenmiştir. Arazide belirlenen ikincil sıkışma oranı, laboratuvarda belirlenen değerin yaklaşık



Şekil 5.33. Pist Dolgusunda 3.6 ve9 Nolu Plakalarda Gözlemlenen İkincil ve Üçüncül Sıkışma Davranışının Grafiksel Olarak Gösterimi

Tablo 5.11. Pist Dolgusundaki Plakalara Ait İkincil ve Üçüncül Sıkışma Oranları

Plaka No.	İkincil Sıkışma Oranı ($C_{\alpha\varepsilon}$)	Üçüncül Sıkışma Oranı ($C_{\alpha\varepsilon t}$)
1	0.005	0.040
2	0.015	0.032
3	0.016	0.029
4	0.011	0.027
5	0.012	0.030
6	0.004	0.031
7	0.010	0.026
8	0.020	0.036
9	0.009	0.038
10	0.003	0.009
Ortalama	0.010	0.030

1.6 katıdır. Diğer bir deyişle, belirli bir (t) süresi için arazide 1.6 kat daha fazla ikincil sıkışma oturması meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, arazide belirli miktarda ikincil sıkışma, laboratuvarda hesaplanana göre 1.6 kat daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

Test dolgusu için hesaplanan ortalama üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$= 0.030, Bölüm 5.1.5'te Tablo 5.8'de B3 nolu deney için 75 kPa gerilme seviyesi için verilen üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$= 0.026 dolayındadır. Benzer şekilde arazide belirlenen üçüncül sıkışma oranı, laboratuvarda belirlenen değerin 1.15 katı olup yaklaşık aynı alınabilecektir.

Sonuç olarak, arazide belirlenen konsolidasyon katsayıları (c_v) laboratuvarda belirlenen katsayılara göre 100 kat daha büyük olmasına karşılık, arazi için belirlenen ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$, laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarına nazaran 1-1.6 kat daha fazladır ve pratik olarak laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranları arazideki değerlerle aynı kabul edilebilecektir. Bu nedenle, laboratuvarda yapılacak 2-3 aylık uzun süreli konsolidasyon deneylerinden hareketle arazide oluşabilecek ikincil ve

üçüncül sıkışma miktarlarını önceden tahmin etmek ve kestirmek mümkün olabilecektir.

5.3. SEM Analizleri

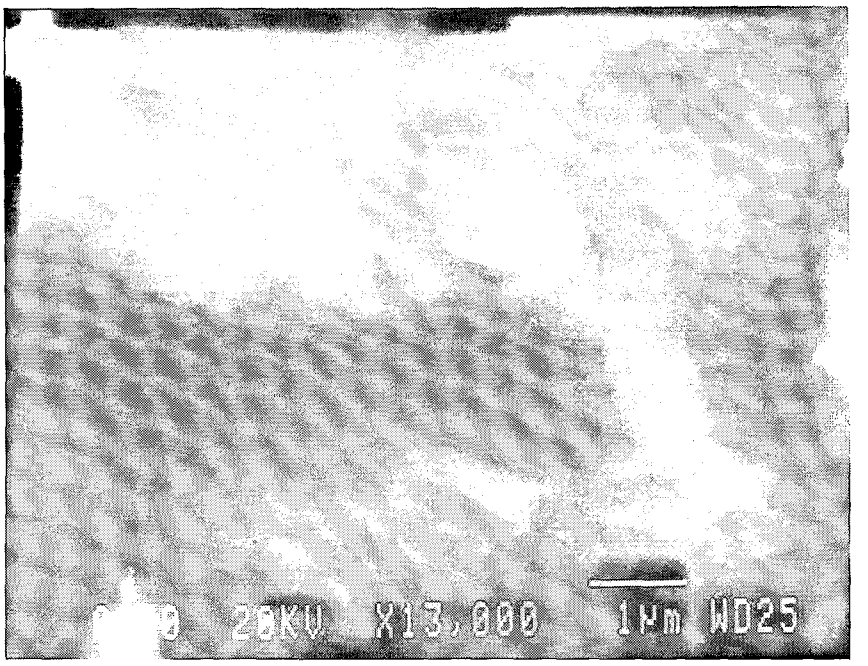
Deneysel çalışmanın bu bölümünde, zemin yüzeyinden 3.5 m derinlikten alınan kil zeminin doğadaki hali ile birincil konsolidasyon, ikincil ve üçüncül sıkışma süresince fabrik yapısında meydana gelen değişiklikler taramalı elektron mikroskopu (SEM) altında incelenerek araştırılmıştır. Bu amaçla SEM analizlerinde konsolidasyon gerilmesinin uygulandığı yüzeye dik yani bir boyutlu konsolidasyonun oluştuğu düşey yüzey incelenmiştir. Bu sayede konsolidasyon süreci boyunca zeminin fabrik yapısındaki değişiklikleri, danelerin yük uygulandıkça bir dizilime geçip geçmediğini görmek mümkün olmuştur.

Yumuşak mavi kil zemin üzerinde yapılan SEM analizlerinde öncelikle zemin yüzeyinden 3.5 m derinden alınan örselenmemiş ve konsolidasyon deneyi uygulanmamış (e_0 boşluk oranına sahip) numune üzerinde SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra aynı derinlikten çıkarılan kil zemin 25, 100 ve 400 kPa gerilmelerinde uzun süreli konsolidasyona terkedilmiş ve bu konsolidasyon basınçları altında zamanla kil zeminin fabrik yapısındaki değişiklikler taramalı elektron mikroskopuyla araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk grup analizlerde 4. Bölüm Tablo 4.8'de gösterildiği gibi tüm gerilmelerde ve analiz yapılacak 25, 100 ve 400 kPa gerilmeleri altında 150-200 dakika konsolidasyona bırakılarak birincil konsolidasyonun tamamlandığı sürelerde (t_p) deney kesilerek SEM analizleri için numune hazırlanmıştır. İkinci grup analizlerde, ara kademelerde 100-200 dakika beklenirken analiz yapılacak gerilmelerde 1 hafta-10 gün beklenerek ikincil sıkışmanın devam ettiği ve $100t_p$ zamanına denk gelen sürede (ikincil sıkışmanın iki log çevrimi boyunca oluştuğu sürede) deneylere son verilmiş ve SEM analizleri için numune hazırlanmıştır. Son grup analizlerde ise benzer şekilde ara kademelerde 100-200 dakika beklenirken 25, 100 ve 400 kPa gerilmeleri altında numuneler yaklaşık 70 gün konsolidasyona terkedilmiş ve üçüncül sıkışmanın oluştuğu görüldükten sonra deneyler kesilerek SEM analizleri için numune hazırlanmasına başlanmıştır.

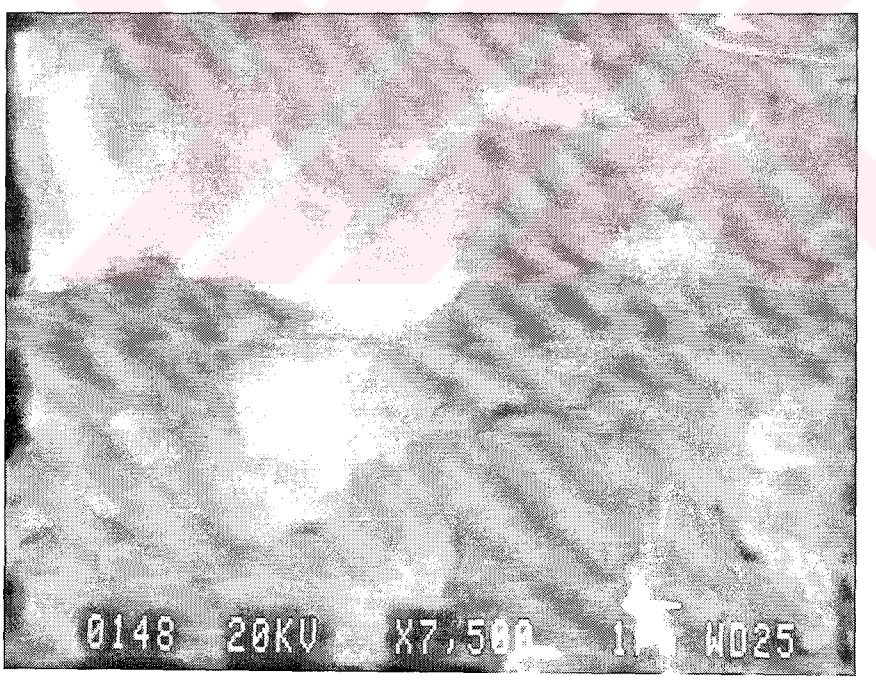
5.3.1 Örselenmemiş Numune Üzerinde Yapılan SEM Analizleri

4. Bölüm (4.2.4) paragrafında bu deneysel çalışmada kullanılan kil malzemenin mühendislik özellikleri detaylarıyla incelenmiş ve kil zeminin ağırlıkça % 1.0-1.5 oranında deniz yosunları ve sazlardan oluşan organik malzeme içeren, yüksek aktiviteli ve plastisiteli, "yumuşak" kıvamda (CH) sınıfı yağlı kil olduğu belirtilmiştir. Mavi kil zemin üzerinde yapılan kimyasal içerik, DTA, TG, Infared ve X-Ray analizlerinde malzemedeki kil minerallerinin esas olarak % 40-50 oranında Ca-montmorillonit, % 30 dolayında kalsit ve kuvars, % 10 dolayında kaolin mineralleri olduğu belirlenmiştir. 3.5 m derinlikten alınan örselenmemiş mavi kil zemin üzerinde yapılan SEM analizlerinde, gerek montmorillonit ve gerekse organik malzemeler gözlemlenmiş ve analizler sırasında SEM aleti yardımıyla sık sık elemental analizler de yapılmıştır. SEM analizleri sırasında alınan görüntülerden bir kısmı Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de gösterilmektedir. Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'de örselenmemiş kil zemindeki montmorillonitlerin varlığı ve kil zeminin fabrik yapısı açıkça görülmektedir. Örselenmemiş zemin numunesinde kil zeminin fabrik yapısının, dane kenarları diğer danelerin yüzüne gelecek şekilde floküle ve topak bir yapı şeklinde olduğu görülmektedir.

Daha önceki paragraflarda anlatıldığı üzere kil zemin içinde, deniz yosunlarından ve sazlıklardan oluşan organik malzemeler mikro ve makro ölçekte görülmektedir. SEM analizleri için numune hazırlama yöntemi 4. Bölümde (4.3.2) nolu paragrafta Şekil 4.13'te gösterilmiştir. İncelenecek kesit için numune hazırlanması sırasında ince çubuk halinde kesilen zemin numunesini kırma işlemi yapılırken numune, en zayıf olduğu yerden kırıldığından ve genellikle zemin içindeki en zayıf kısımlar organik malzemelerin zemin içinde bolca karşılaşıldığı yerler olduğundan, SEM analizlerinde incelenen kesitlerde organik malzemeler görülmektedir. Şekil 5.36'da kil zemin içindeki organik malzemelerden bir kesit gösterilmektedir. SEM analizlerine başlamadan karbon kaplama öncesinde ve sonrasında vakum işlemi uygulanarak zemin numunesi içindeki tüm sıvılar yok edildiği için zemin içinde, oksijensiz ortamda çürümeden duran organik malzemeleri oluşturan hücreler içindeki sıvılarda yok edilmektedir. Bu nedenle, Şekil 5.36'dan görülebileceği gibi organik malzemelerdeki hücreler açıkça gözükmektedir.

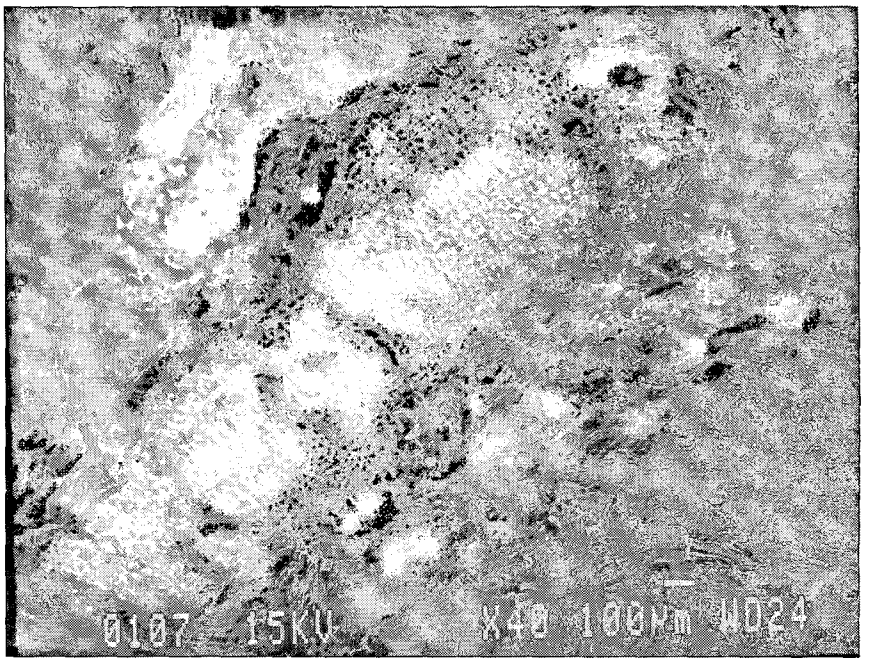


Şekil 5.34. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune

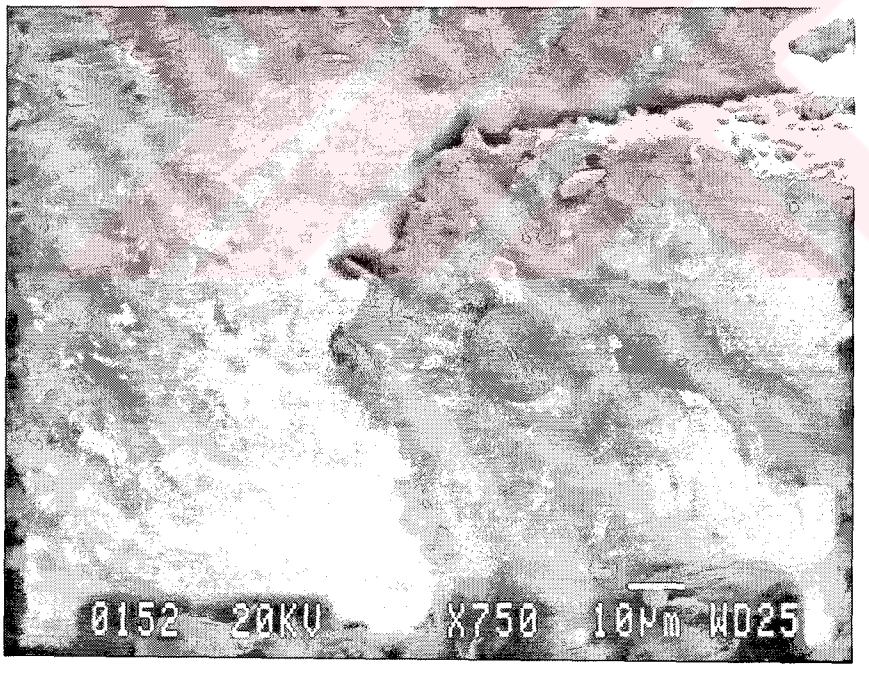


Şekil 5.35. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune

Şekil 5.37'de ve Şekil 5.38'de organik bir lif içindeki küresel formda olan FeS_2 (demirsülfür) bileşimindeki melnikovit, jel pirit yada daha bilinen adıyla framboyidal pirit gösterilmiştir. Samsun-Çarşamba Havaalanı sahası, Karadeniz sahili boyunca Üst Kretaseye ait fliş fasiyesinin hakim olduğu filiş tabakaları içinde bolca

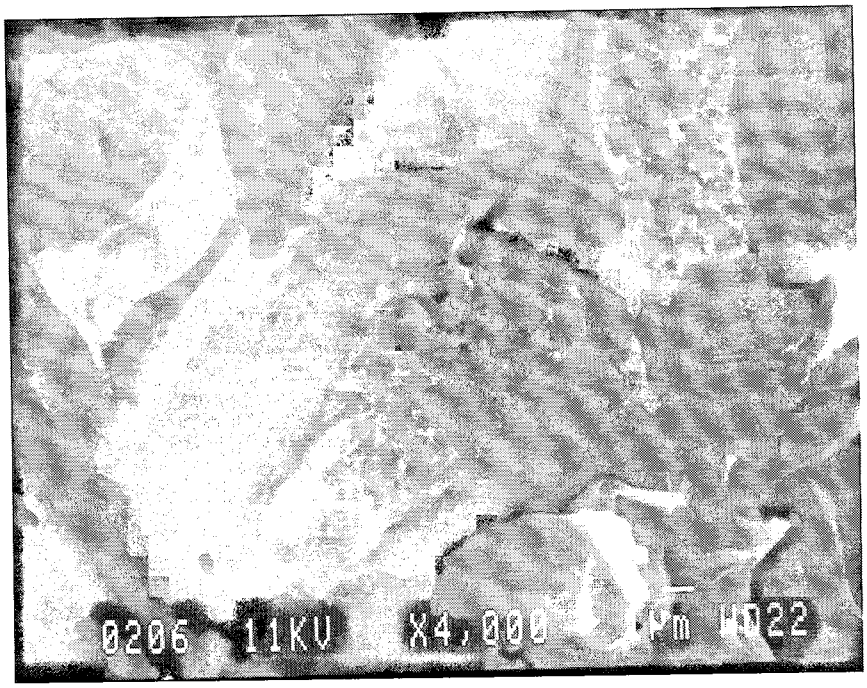


Şekil 5.36. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune



Şekil 5.37. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune

volkanitlerin olduğu, andezit-bazalt lavları-tüf gibi birimler yanında asit lavların izlerinin de görüldüğü bir alan olan Çarşamba Deltasında yer aldığı için, jeolojik süreçte volkanlardan püsküren demir kökenli elementlerin dane içinde iyon alışverişi sonucu framboyidal pirit oluştuğu bilinmektedir. SEM analizlerinde yapılan kesit



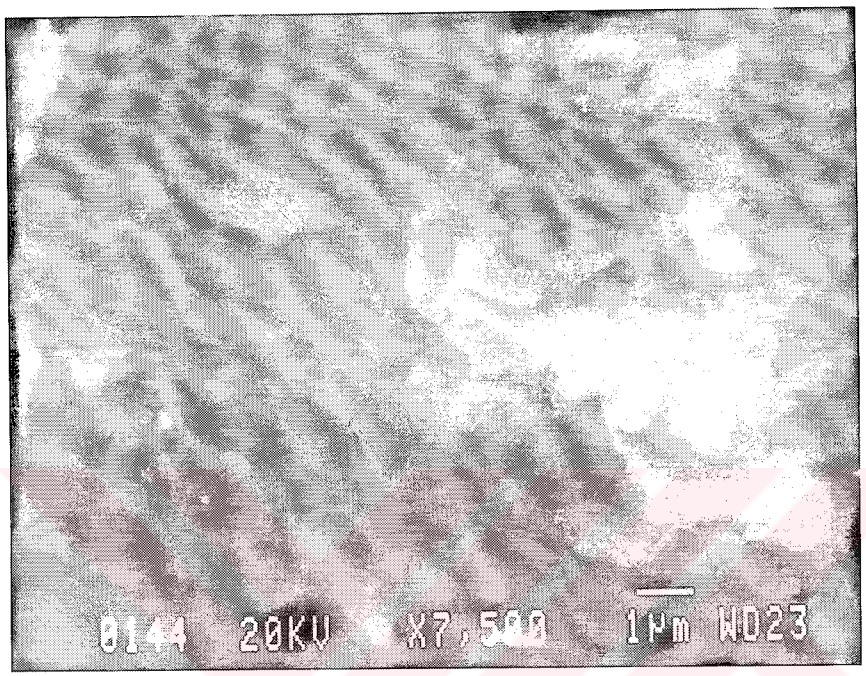
Şekil 5.38. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune

incelemelerinde organik malzemelerin etrafında bolca framboyidal piritler görülmüştür. Küresel formdaki framboyidal pirit oluşumları, SEM aleti ile daha büyük büyütme oranlarında yakından incelendiğinde küresel formun içinde daha küçük boyuttaki küresel oluşumların olduğu ve daha da yakından incelendiğinde jel piritin kübik kristal yapıda olduğu görülmektedir. Jeolojik süreç devam ettiğinden zemin yüzeyinden 3.5 m derinden alınan örselenmemiş numunelerde, numunelerin alındığı tarihte de mineraller arası iyon alışverişi sonucu framboyidal pirit oluşumuna devam ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 5.38'de daneler arasında oluşumuna devam eden framboyidal pirit kütlesi görülmektedir. Şekil 5.37 ve Şekil 5.38 karşılaştırıldığında, Şekil 5.38'de gösterilen melnikovitteki kübik formdaki kristallerinin seçilebildiği ve melnikovitin gelişimine devam ettiği görülmektedir.

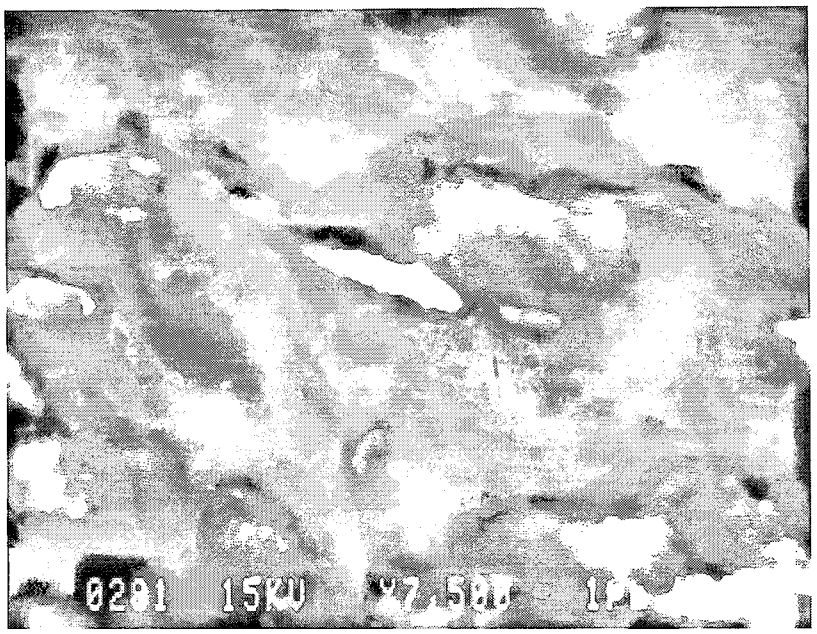
5.3.2 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Sıkışmaya Terkedilen Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri

Örselenmemiş ve yüklenmemiş zemin numunesi üzerinde yapılan SEM analizlerinden sonra, aynı derinlikten alınan örselenmemiş zemin numuneleri, 25 kPa gerilme altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedildikten sonra sökülerek SEM analizleri için hazırlanmış ve SEM'de yapılan analizlerle konsolidasyon prosesi

boyunca (birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma) daneler arasındaki dizilim, fabrik yapıdaki değişim, danelerde kırılma ve yapıda bozulma gibi etkilerin oluşup oluşmadığı fiziksel olarak gösterilmiş ve nedenleri sorgulanmıştır. SEM analizlerinde yük uygulanan yüzeye dik kesitte çalışılmıştır. Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41,



Şekil 5.39. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune

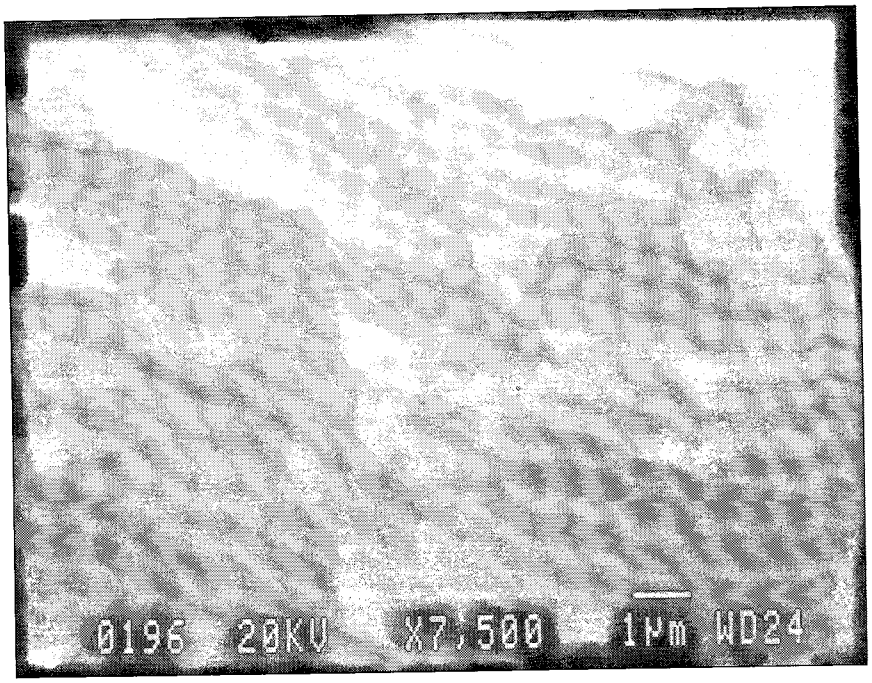


Şekil 5.40. 25 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune

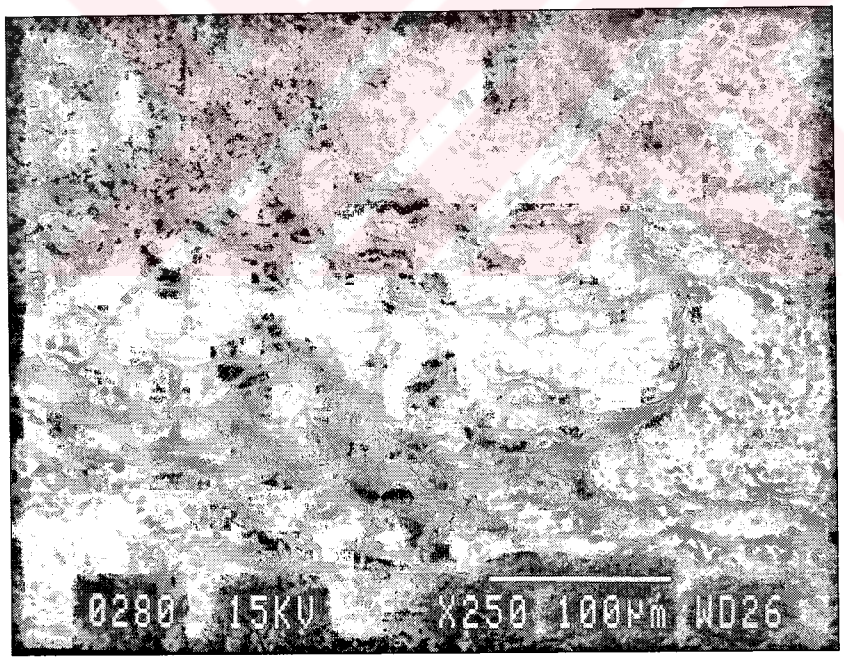
Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te, zemin yüzeyinden 3.5 m derinden alınan zemin numunesinde 25 kPa gerilme altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilen zemin numunelerinden SEM aletiyle alınan görüntüler gösterelmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde, zemin numunesi 25 kPa gerilme altında, ilk önce 150 dakika süreyle konsolidasyona terkedilmiş ve kil zeminin birincil konsolidasyonunu tamamladığı Casagrande ve Taylor yöntemiyle belirlendikten sonra ikincil sıkışmanın gelişmesine izin verilmeden numune SEM analiziyle incelenmek üzere konsolidasyon aletinden çıkarılmıştır. Şekil 5.39'da birincil konsolidasyonunu henüz tamamlamış zemin numunesindeki fabrik yapı gösterilmektedir. Şekil 5.39'da kil minerallerinin (danelerin) birincil sıkışma nedeniyle bir miktar birincil sıkışma yaptığı ancak fabrik yapının floküle yapısını koruduğu görülmektedir. Örselenmemiş ve üzerindeki örtü yükü dışında ekstra hiçbir gerilmeye maruz kalmamış kil zemindeki fabrik yapıyı gösteren Şekil 5.34 ve Şekil 5.35 ile Şekil 5.39 kıyaslandığında, önkonsolidasyon basıncından daha küçük gerilme seviyesinde fabrik yapının hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 5.36 ile Şekil 5.42 kıyaslandığında, örselenmemiş ve yüklenmemiş zeminde organik malzemelerin yapısını korumasına rağmen, birincil konsolidasyon süresince organik malzemelerdeki formun nispeten bozulduğu ve yükün etkidiği düzleme dik kesitte oryante olduğu görülmektedir. Şekil 5.36'da organik malzemedeki kare formundaki boşlukların, 25 kPa gibi düşük bir gerilmede dahi basınç etkisiyle sıkıştığı ve dikdörtgen forma dönüştüğü görülmektedir (Şekil 5.42).

Şekil 5.40 ile Şekil 5.43'te, 25 kPa gerilme altında 1 hafta süreyle ikincil sıkışma yapmasına izin verilen zemin numunesinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.40'ta kil zemin içindeki kil mineralleri ve danelerin fabrik yapısı gösterilmiştir. Birincil konsolidasyonu henüz tamamlayan zemindeki fabrik yapı (Şekil 5.39) ile ikincil sıkışmasını 2 log çevrimi boyunca yapan zeminin fabrik yapısı (Şekil 5.40) karşılaştırıldığında, fabrik yapının nispeten bozulduğu, floküle ve topak yapının değişerek danelerin yüke dik yönde dizilmeye başladığı görülmektedir. Benzer şekilde, ikincil sıkışma yapan zeminde, organik malzemelerin bozulduğu ve hatta yer yer kırıldığı ve formunu tümüyle değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5.43)

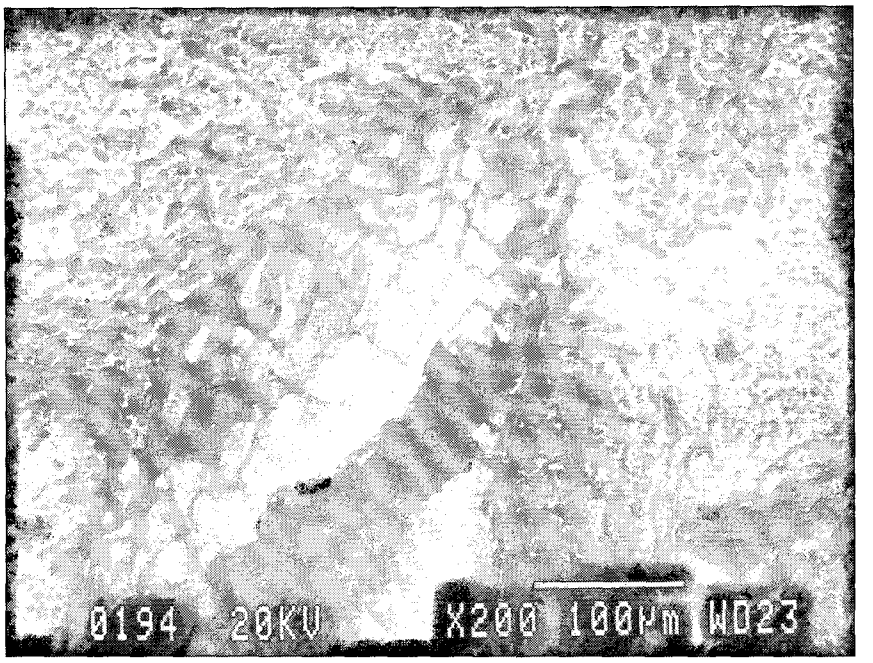


Şekil 5.41. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune

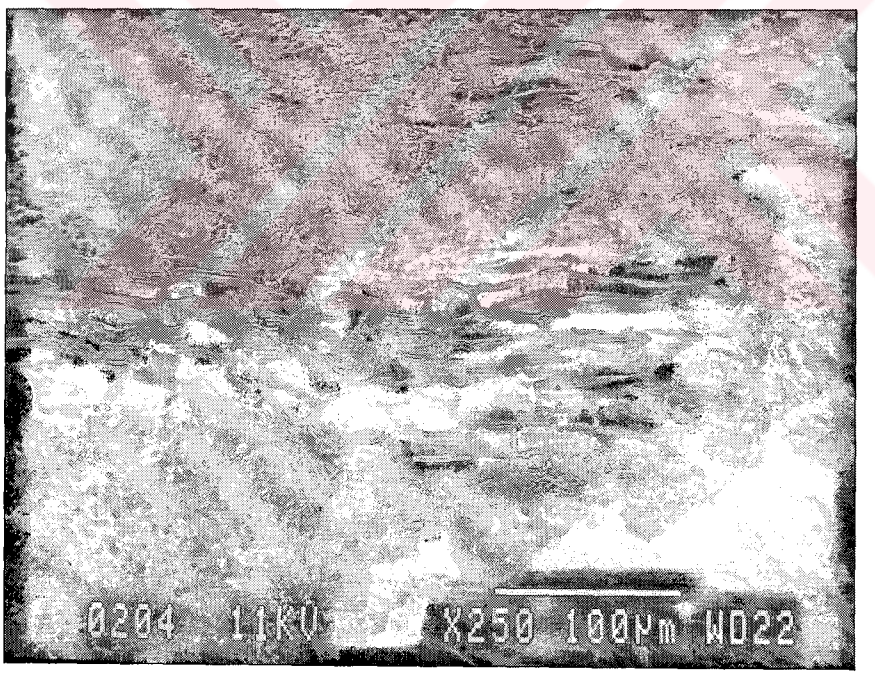


Şekil 5.42. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune

Şekil 5.41 ile Şekil 5.44'te, 25 kPa gerilme altında 70 gün süreyle üçüncül sıkışma yapmasına izin verilen zemin numunesinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.41'de kil zemin içindeki kil mineralleri ve danelerin fabrik



Şekil 5.43. 25 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune



Şekil 5.44. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune

yapısı gösterilmiştir. İkincil sıkışma yapan zemindeki fabrik yapı (Şekil 5.40) ile üçüncül sıkışma yapan zeminin fabrik yapısı (Şekil 5.41) karşılaştırıldığında fabrik yapının tümüyle bozulduğu ve floküle olmayan yapı oluşacak şekilde, montmorillonit minerallerinin yükün uygulandığı düzleme paralel doğrultu boyunca

dizildiği görülmektedir. Benzer şekilde, üçüncül sıkışma yapan zeminde, organik malzemelerin yapısının tümüyle bozularak iskeletin kırıldığı ve formunu tümüyle değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5.44). Şekil 5.44 dikkatlice incelendiğinde, organik malzemelerdeki başlangıçta kare formundaki hücrelerin ya tümüyle yada kısmen kırılıp bozunarak yükün uygulandığı düzleme paralel doğrultu boyunca dizildiği görülmektedir.

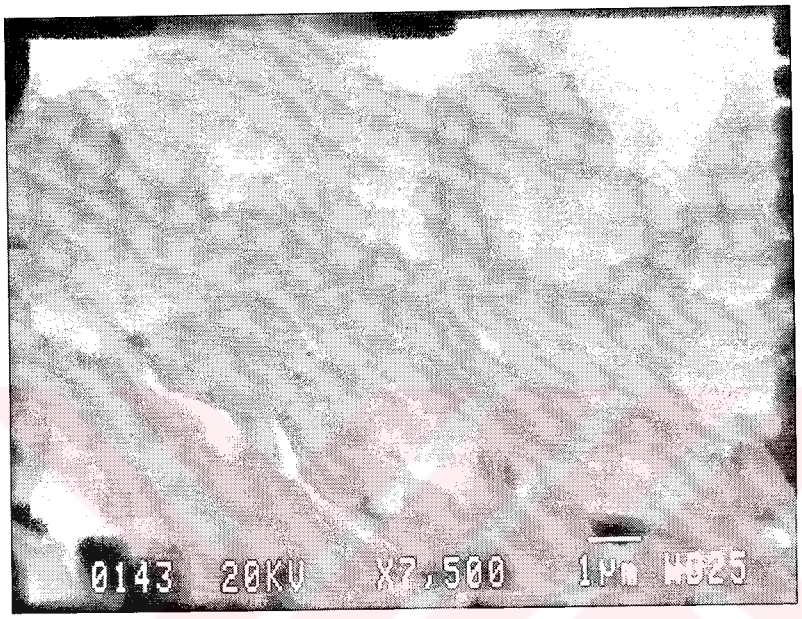
25 kPa gerilme altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilmiş numunelerden alınan SEM görüntüleri tümüyle incelendiğinde, başlangıçta floküle ve topak bir yapı sergileyen zeminin fabrik yapısının birincil konsolidasyon süresince yapısını kısmen koruduğu, ikincil sıkışma süresince ise zeminin dane yapısının bozulmaya başladığı ve özellikle organik malzemelerin hücre çatısının kısmen bozulduğu görülmüştür. Üçüncül sıkışma süresince ise başlangıçtaki fabrik yapının tümüyle bozularak floküle ve topak yapının zamanla floküle olmayan ve topak yapıya dönüştüğü, danelerin uzun eksenleri boyunca yükün uygulandığı düzleme paralel bir doğrultu boyunca dizildiği tespit edilmiştir.

5.3.3 100 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Sıkışmaya Terkedilen Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri

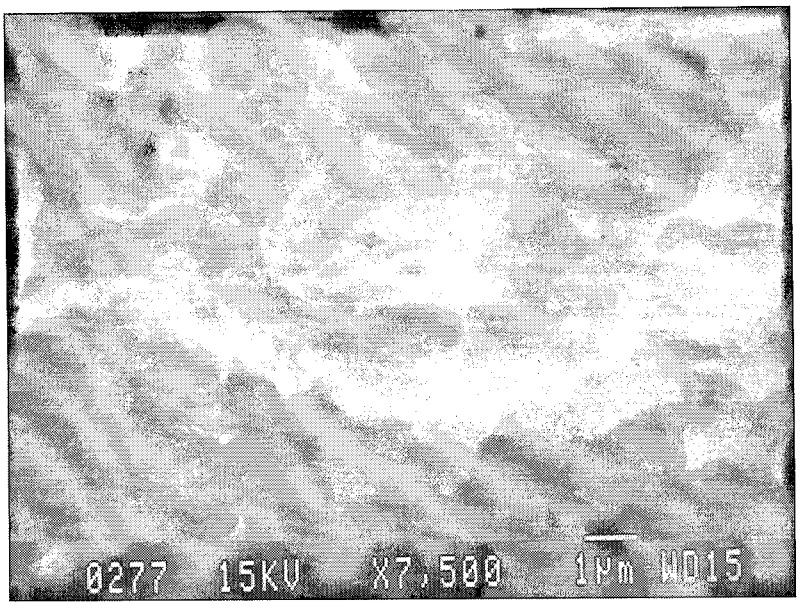
Şekil 5.45, Şekil 5.46, Şekil 5.47, Şekil 5.48, Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'de, zemin yüzeyinden 3.5 m derinden alınan zemin numunesinde 100 kPa gerilme altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilen zemin numunelerinden SEM aleti vasıtasıyla alınan görüntüler verilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, zemin numunesi önkonsolidasyon basıncından biraz daha büyük olan 100 kPa gerilme altında, birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma süresince fabrik yapıdaki değişimler araştırılmıştır.

Şekil 5.45'de birincil konsolidasyonunu henüz tamamlamış zemin numunesindeki fabrik yapı gösterilmektedir. Kil minerallerinin (danelerin) birincil sıkışma nedeniyle bir miktar birincil sıkışma yaptığı ancak fabrik yapının floküle yapısını kısmen koruduğu görülmektedir. Örselenmemiş ve üzerindeki örtü yükü dışında ekstra hiçbir gerilmeye maruz kalmamış kil zemindeki fabrik yapıyı gösteren Şekil 5.34 ve

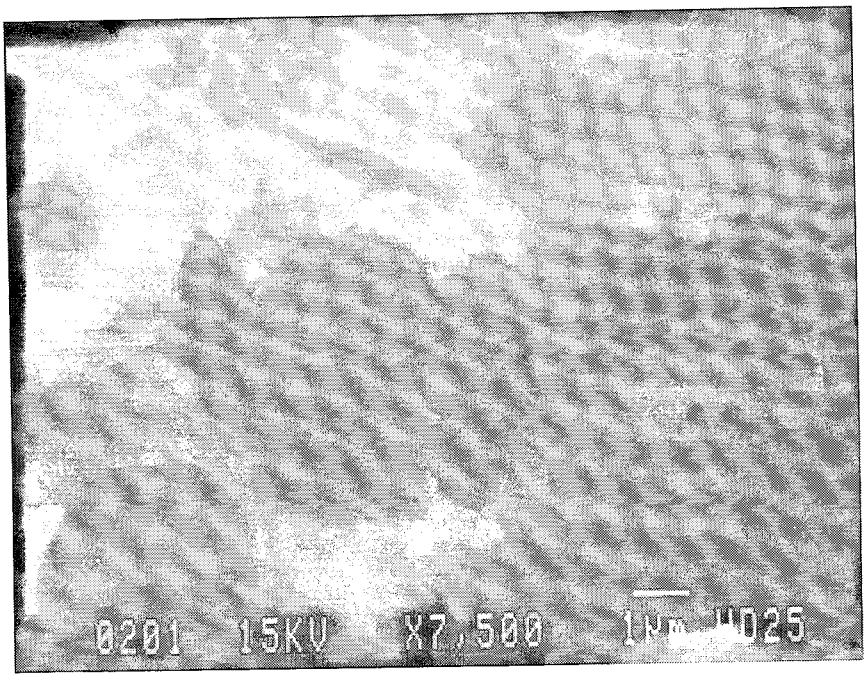
Şekil 5.35 ile Şekil 5.45 kıyaslandığında, önkonsolidasyon basıncından biraz büyük gerilmede fabrik yapının hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 5.36 ile Şekil 5.48 kıyaslandığında, örselenmemiş ve yüklenmemiş zeminde organik malzemelerin yapısını korumasına karşılık, birincil konsolidasyon süresince organik malzemelerdeki formun da nispeten korunduğu görülmektedir.



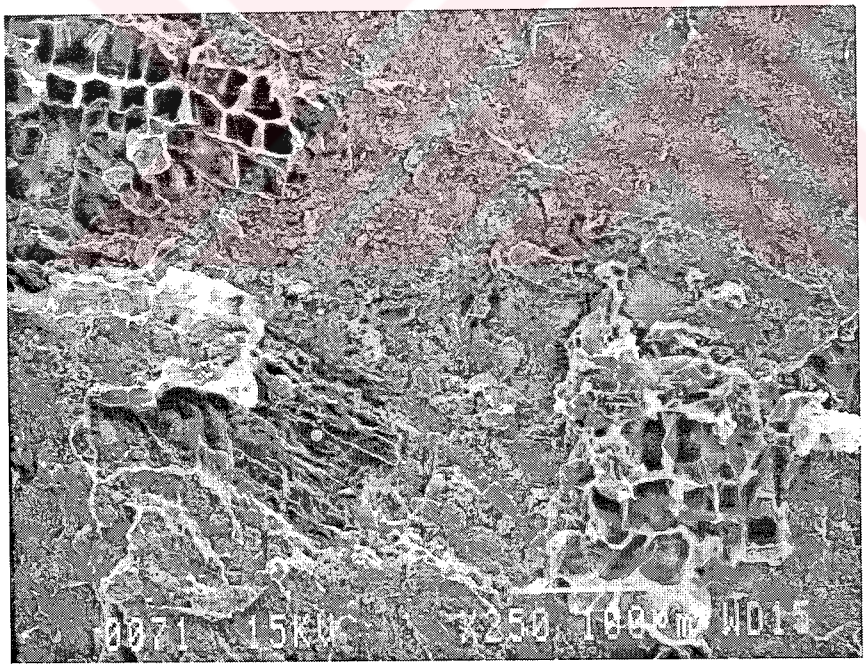
Şekil 5.45. 100kPa Gerilme Altında Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune



Şekil 5.46. 100kPa Gerilme Altında İkincil Sıkışma Yapan Numune

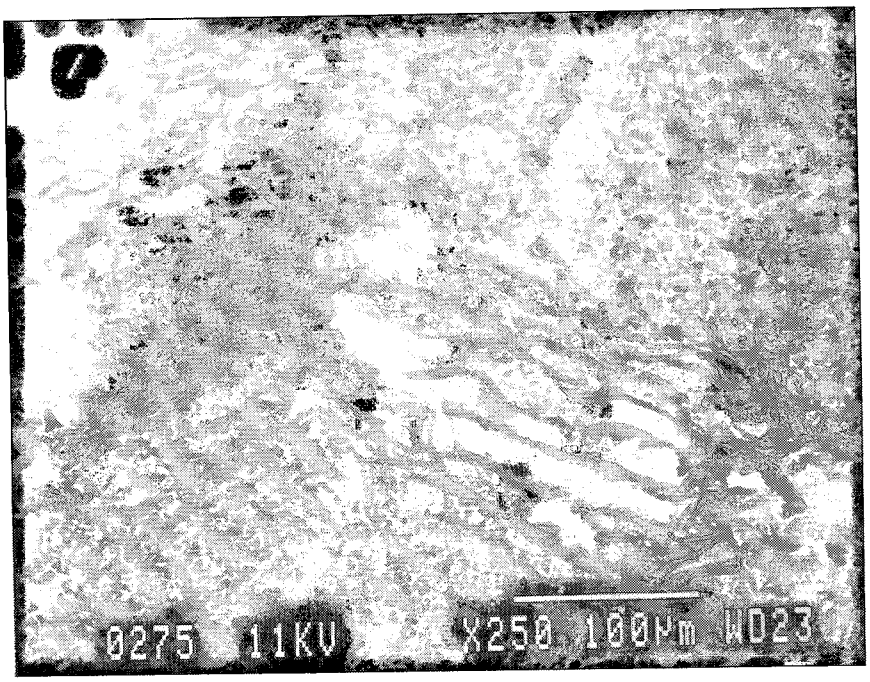


Şekil 5.47. 100 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune

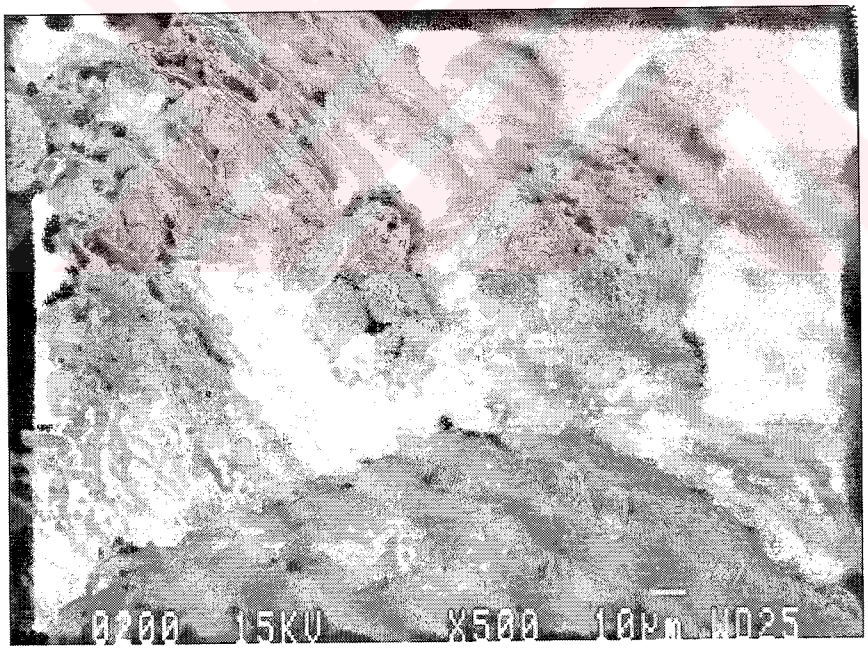


Şekil 5.48. 100 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune

Şekil 5.46 ile Şekil 5.49'da, 100 kPa gerilme altında 10 gün süreyle ikincil sıkışma yapmasına izin verilen zemin numunesinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.46'da kil zemin içindeki kil mineralleri ve danelerin fabrik yapısı gösterilmiştir. Birincil konsolidasyonu henüz tamamlayan ve birincil sıkışma



Şekil 5.49. 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Yapan Numune



Şekil 5.50. 100 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune

yapan zemindeki fabrik yapı (Şekil 5.39) ile ikincil sıkışmasını 2 log çevrimi boyunca yapan zeminin fabrik yapısı (Şekil 5.46) karşılaştırıldığında fabrik yapının bozulduğu, floküle ve topak yapının değişerek floküle olmayan yapı oluştuğu görülmektedir. Benzer şekilde, ikincil sıkışma yapan zeminde, organik malzemelerin

çatısının bozulduğu ve hatta yer yer kırılıp bükülerek formunu tümüyle değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5.49)

Şekil 5.47 ile Şekil 5.50'de, 100 kPa gerilme altında 69 gün süreyle üçüncül sıkışma yapmasına izin verilen zemin numunesinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.47'de kil zemin içindeki kil mineralleri ve danelerin fabrik yapısı gösterilmiştir. İkincil sıkışma yapan zemindeki fabrik yapı (Şekil 5.46) ile üçüncül sıkışma yapan zeminin fabrik yapısı (Şekil 5.47) karşılaştırıldığında fabrik yapının tümüyle bozulduğu ve floküle olmayan yapı oluşacak şekilde, montmorillonit minerallerinin yoğun bir şekilde topaklandığı görülmektedir. Benzer şekilde üçüncül sıkışma yapan zeminde, organik malzemelerin yapısının tümüyle bozunarak çatısının kırıldığı ve formunu tümüyle değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5.50). Şekil 5.50 dikkatlice incelendiğinde organik malzemelerin etrafında yer alan melnikovitlerin (framboyidal pirit) kısmen bozunarak kristallerinin dilimlendiği yada tümüyle bozularak kristallerine ayrıldığı açık ve net olarak görülmektedir. Şekilde ayrıca, organik malzemelerdeki başlangıçta kare formundaki hücrelerin ya tümüyle yada kısmen kırılıp bozunarak yükün uygulandığı düzleme paralel doğrultu boyunca dizildiği görülmektedir.

100 kPa gerilme altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilmiş numunelerden alınan SEM görüntüleri tümüyle incelendiğinde, başlangıçta floküle ve topak bir yapı sergileyen zeminin fabrik yapısının birincil konsolidasyon süresince kısmen korunduğu, ikincil sıkışma süresince ise zeminin dane yapısının ve özellikle organik malzemelerin hücre çatısının bozulduğu görülmüştür. Üçüncül sıkışma süresince ise başlangıçtaki fabrik yapısının tümüyle bozularak floküle ve topak yapının zamanla floküle olmayan ve yoğun topak bir yapıya dönüştüğü, danelerin uzun eksenleri boyunca yükün uygulandığı düzleme paralel bir doğrultu boyunca dizildiği tespit edilmiştir.

5.3.4 400 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil, İkincil ve Üçüncül Sıkışmaya Terkedilen Zemin Numunesi Üzerinde Yapılan SEM Analizleri

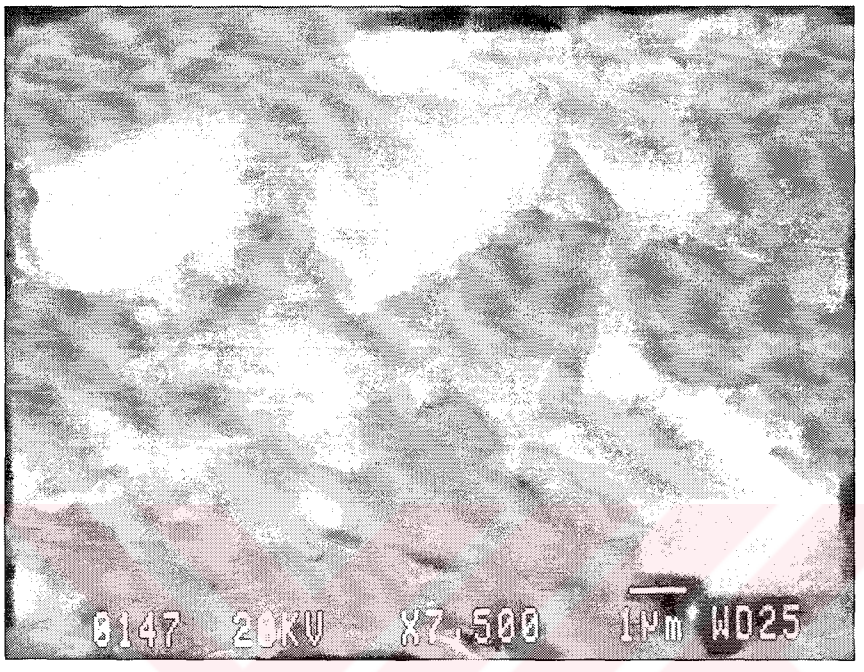
Şekil 5.51, Şekil 5.52, Şekil 5.53, Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56 ve Şekil 5.57'de, zemin yüzeyinden 3.5 m derinden alınan zemin numunesinde 400 kPa gerilme

altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilen zemin numunelerinden SEM aleti vasıtasıyla alınan görüntüleri göstermektedir. Çalışmanın bu bölümünde, zemin numunesinin önkonsolidasyon basıncından büyük olan 400 kPa gerilme altındaki birincil, ikincil ve üçüncül sıkışma süresince fabrik yapıdaki değişim araştırılmıştır.

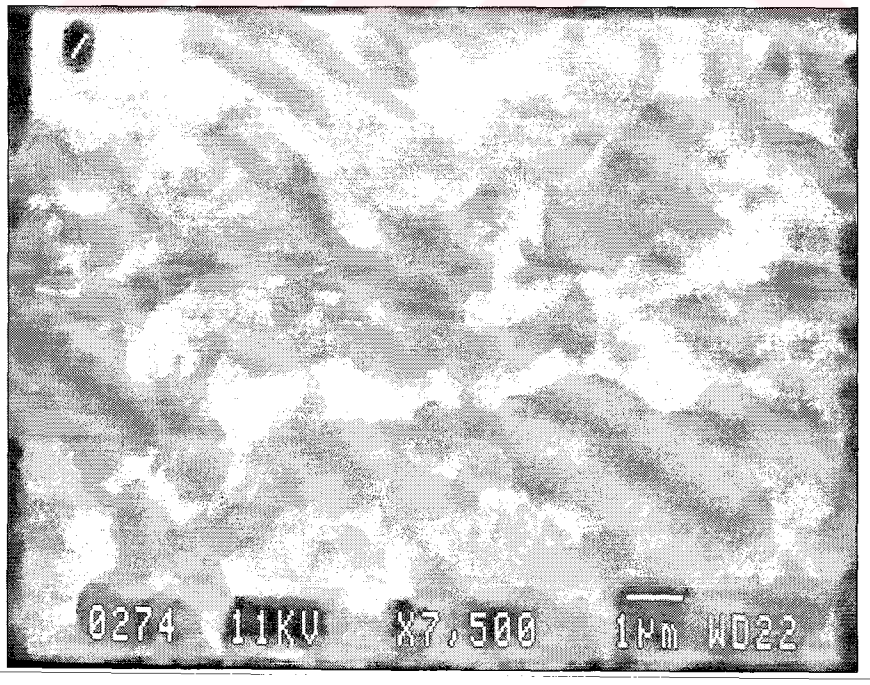
Şekil 5.51'de birincil konsolidasyonunu henüz tamamlamış zemin numunesindeki fabrik yapı gösterilmektedir. Kil minerallerinin (danelerin) birincil sıkışma nedeniyle bir miktar birincil sıkışma yaptığı ve fabrikteki floküle yapının nispeten bozularak floküle olmayan yapıya dönüştüğü görülmektedir. Örselenmemiş ve üzerindeki örtü yükü dışında ekstra hiçbir gerilmeye maruz kalmamış kil zemindeki fabrik yapıyı gösteren Şekil 5.34 ve Şekil 5.35 ile 100 kPa gerilme altında birincil konsolidasyona terkedilen zemin numenisindeki fabrik yapıyı gösteren Şekil 5.45 ile Şekil 5.51 kıyaslandığında, zeminin doğal haline kıyasla tümüyle, önkonsolidasyon basıncına yakın bir gerilmedeki (100 kPa) fabrik yapıya nazaran ise kısmen değiştiği görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 5.36 ile Şekil 5.53 kıyaslandığında, örselenmemiş ve yüklenmemiş zeminde organik malzemelerin yapısını korumasına karşılık, birincil konsolidasyon süresince organik malzemelerdeki formun da bozulmaya başladığı ve melnikovitlerin kırılmaya bozunmaya meylettiği görülmektedir.

Şekil 5.52 ile Şekil 5.55'de, 400 kPa gerilme altında 10 gün süreyle ikincil sıkışma yapmasına izin verilen zemin numunesinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.52'de kil zemin içindeki kil mineralleri ve danelerin fabrik yapısı gösterilmiştir. Birincil konsolidasyonu henüz tamamlayan ve birincil sıkışma yapan zemindeki fabrik yapı (Şekil 5.51) ile ikincil sıkışmasını 2 log çevrimi boyunca yapan zeminin fabrik yapısı (Şekil 5.52) karşılaştırıldığında fabrik yapının bozulduğu, floküle ve topak yapının değişerek floküle olmayan yoğun topak yapı oluşturduğu görülmektedir. Benzer şekilde ikincil sıkışma yapan zeminde, organik malzemelerinde bozulduğu, kırılıp bükülerek formunu tümüyle değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5.55). İkincil sıkışma süresince büyük gerilmelerde kemerlenme etkisinin ortadan kimi yerlerde kısmen kimi yerlerde tümüyle kalkmasıyla organik malzemelerin buna bağlı olarak eğilip büküldüğü Şekil 5.55'te açıkça gözükmektedir.

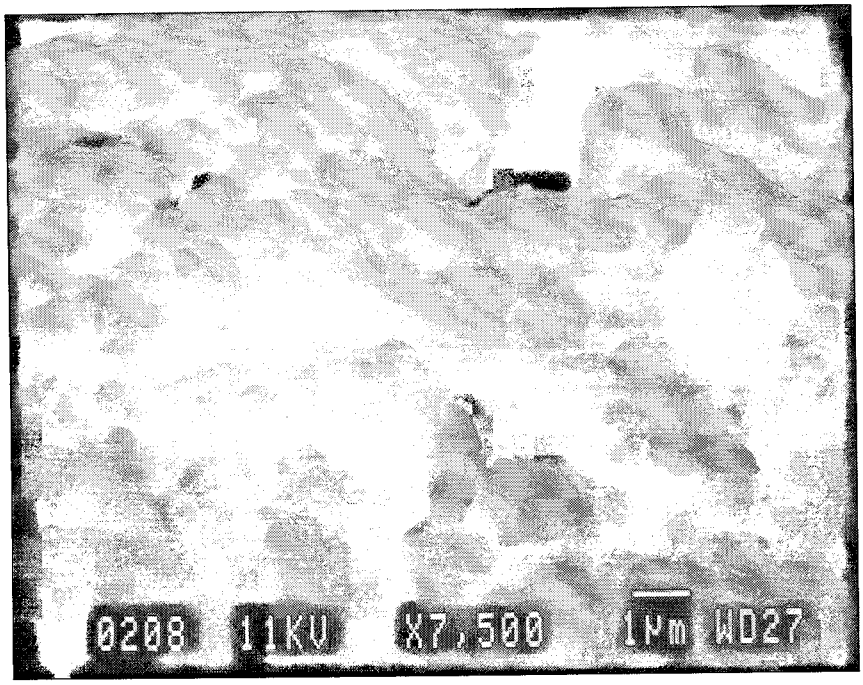
Şekil 5.53 ile Şekil 5.56 ve Şekil 5.57'de, 400 kPa gerilme altında 69 gün süreyle üçüncül sıkışma yapmasına izin verilen zemin numunesinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.53'de kil zemin içindeki kil mineralleri ve danelerin fabrik



Şekil 5.51. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune



Şekil 5.52. 400 kPa Gerilme Altında İkincil Sıkışma Yapan Numune



Şekil 5.53. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune

yapısı gösterilmiştir. İkincil sıkışma yapan zemindeki fabrik yapı (Şekil 5.52) ile üçüncül sıkışma yapan zeminin fabrik yapısı (Şekil 5.53) karşılaştırıldığında fabrik yapının tümüyle bozulduğu ve floküle olmayan yapı oluşacak şekilde, montmorillonit minerallerinin yoğun bir şekilde topaklandığı görülmektedir. Benzer şekilde üçüncül sıkışma yapan zeminde, organik malzemelerin yapısının tümüyle bozunarak çatısının kırıldığı ve formunu tümüyle değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5.56 ve Şekil 5.57). Şekil 5.56'da organik malzemelerin çatısının tümüyle bozulduğu, sıkıştığı ve üstüste binerek kırıldığı görülmektedir. Şekilde ayrıca, organik malzemelerdeki başlangıçta kare formundaki hücrelerin tümüyle kırılıp bozunarak yükün uygulandığı düzleme paralel doğrultu boyunca dizildiği görülmektedir. Şekil 5.57 dikkatlice incelendiğinde ise organik malzemelerin etrafında yer alan melnikovitlerin (framboyidal pirit) kısmen bozunarak kristallerinin dilimlendiği yada tümüyle bozunarak kristallerine ayrıldığı açık ve net olarak görülmektedir.

400 kPa gerilme altında birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilmiş numunelerden alınan SEM görüntüleri tümüyle incelendiğinde, başlangıçta floküle ve topak bir yapı sergileyen zeminin fabrik yapısının büyük gerilmeler çıkılması sebebiyle birincil konsolidasyon süresince yapısının bozulmaya başladığı, ikincil

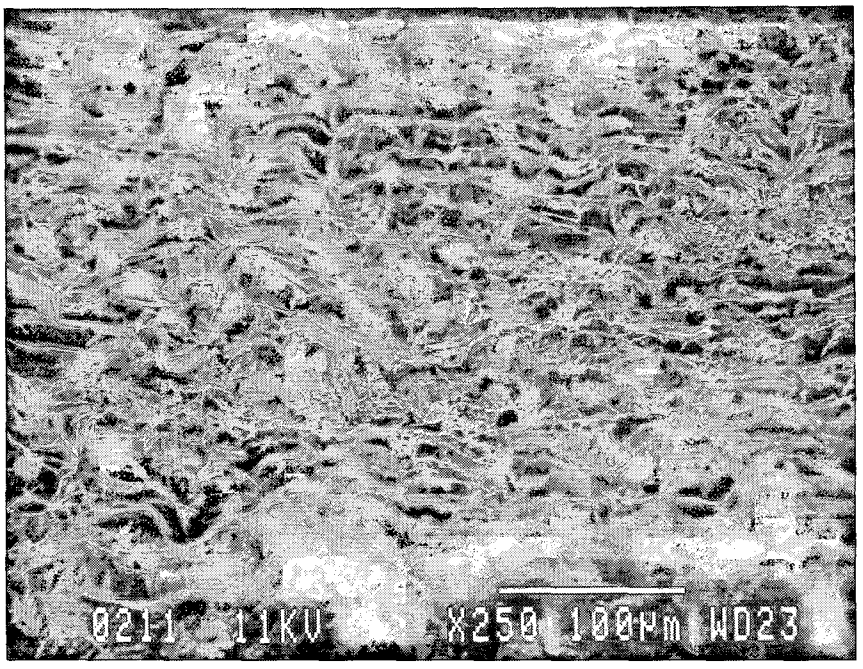


Şekil 5.54. 400 kPa Gerilme Altında Birincil Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune

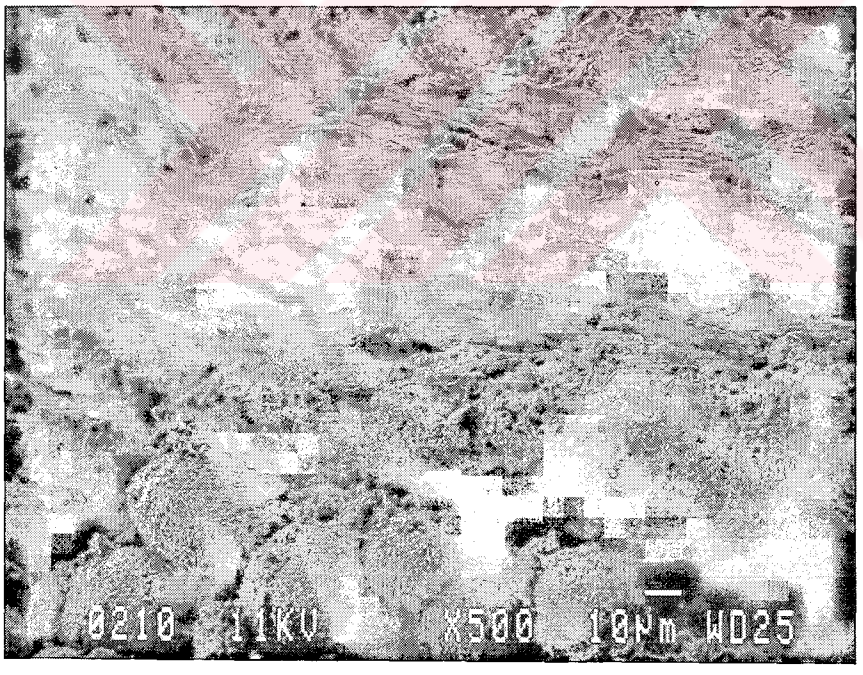


Şekil 5.55. 400 kPa Gerilme Altında İkincil Sıkışma Yapan Numune

sıkışma süresince ise zeminin dane yapısının ve özellikle organik malzemelerin hücre çatısının kısmen bozulduğu görülmüştür. Üçüncül sıkışma süresince ise başlangıçtaki fabrik yapısının tümüyle bozularak floküle ve topak yapının zamanla



Şekil 5.56. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune



Şekil 5.57. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Sıkışma Yapan Numune

floküle olmayan ve yoğun topak bir yapıya dönüştüğü, danelerin uzun eksenleri boyunca yükün uygulandığı düzleme paralel bir doğrultu boyunca dizildiği tespit edilmiştir.

5.3.5 SEM Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında yapılan SEM analizlerinde 25,100 ve 400 kPa gerilmeler altında zemin numunelerinin sırasıyla birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaya terkedilmesi durumunda, zeminin fabrik yapısındaki değişim araştırılmış ve bu değişim SEM aletinde alınan görüntülerle incelenmiştir.

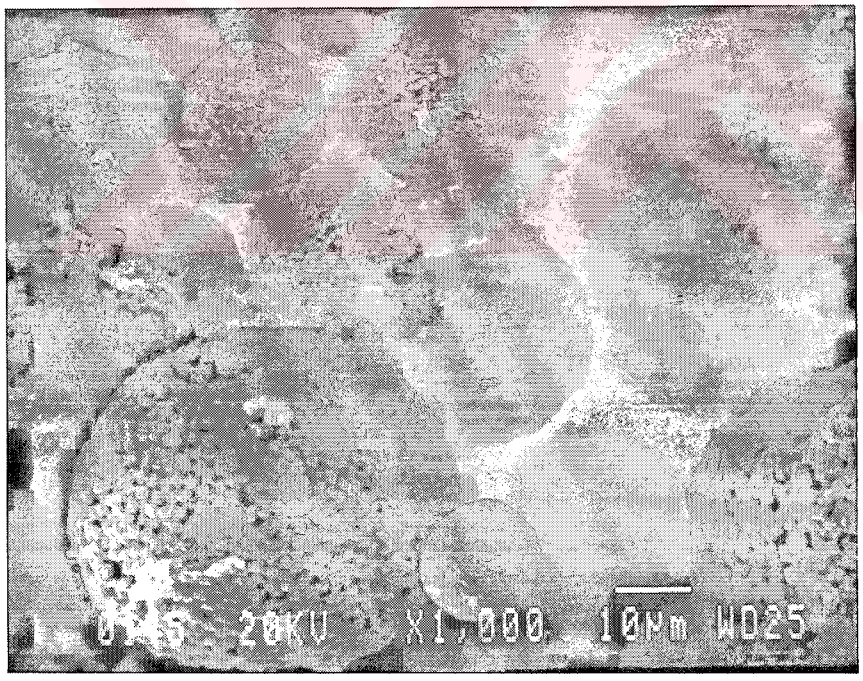
Yapılan analizler sonucu, başlangıçta floküle ve topak bir yapı sergileyen zeminin fabrik yapısının -önkonsolidasyon basıncından küçük ve yakın gerilmelerde (25 ve 100 kPa)- birincil konsolidasyon süresince oluşan sıkışmalarla korunduğunu ve birincil sıkışmaların floküle yapı arasındaki boşlukların hacminin azalması sonucu oluştuğu görülmüştür. Önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ise (400 kPa) fabrikteki floküle yapının nispeten bozularak floküle olmayan yapıya dönüştüğü görülmektedir.

İkincil sıkışma süresince ise -önkonsolidasyon basıncından küçük ve yakın gerilmelerde (25 ve 100 kPa)- zeminin dane yapısı bozulmaya başlamış ve özellikle organik malzemelerin hücre çatısının kısmen bozulduğu görülmüştür. Önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ise (400 kPa) karşılaştırıldığında fabrik yapının bozulduğu, floküle ve topak yapının değişerek floküle olmayan yoğun topak yapı oluşturduğu görülmektedir.

Turba zeminlerde karşılaşılan ve organik malzeme içeren kil zeminlerde ise ender olarak rastlanan üçüncül sıkışma yapan bir zemin olan Samsun-Çarşamba mavi kilinin üçüncül sıkışma süresince, başlangıçtaki fabrik yapısının tümüyle bozularak floküle ve topak yapının zamanla floküle olmayan ve topak bir yapıya dönüştüğü, danelerin uzun eksenleri boyunca yükün uygulandığı düzleme paralel bir doğrultu boyunca dizildiği tespit edilmiştir. Bilindiği üzere, gerilmeler genelde tüm dane ve dane grupları arasında eşit dağılmaz. Fabrik elemanlarının kemerlenmesi sonucu bazı dane ve dane grupları gerilme almazlar. Üçüncül sıkışmalara, danelerin kemerlenmesi nedeniyle gerilme almayan organik malzemelerin, zamanla kemerlenmenin bozulması sonucu gerilme almaya başlayınca hücre çatılarının çökmesi, kırılması sonucuyla oluştuğu kanaatine varılmıştır. Şekil 5.58'de 100 kPa gerilme altında ikincil sıkışma süresince organik zemin etrafında bolca karşılaşılan

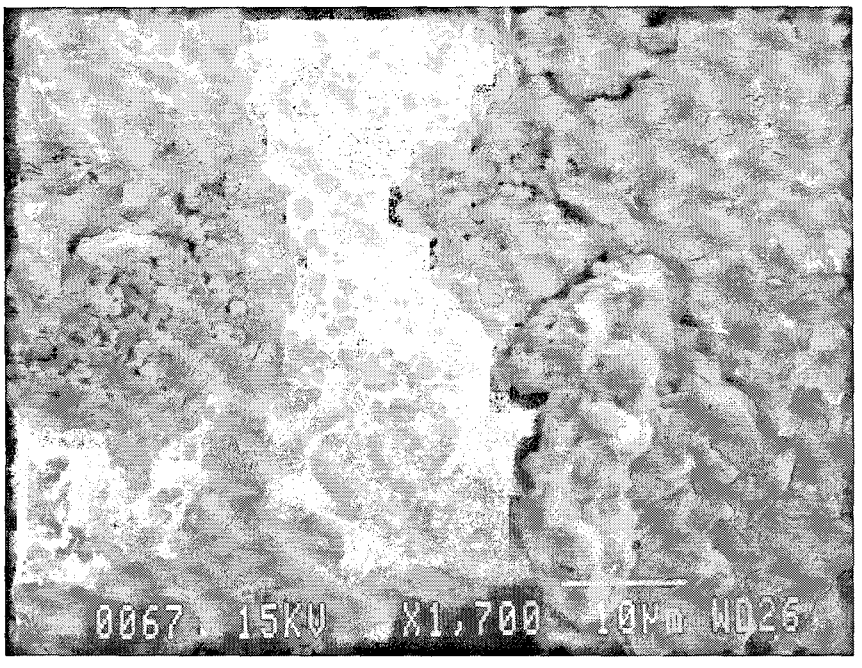


Şekil 5.58. 100 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Sürecinde Kemerlenme Etkisinin Kalkmasıyla Melnikovitlerin Bozulması



Şekil 5.59. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Birincil Sıkışma Sürecinde Kemerlenme Etkisinin Kalkmasıyla Melnikovitlerin Bozulması

melnikovitlerin (farmboyidal pirit veya jel pirit) organik malzemeler etrafında kemerlenme yapan danelerdeki kemerlenme etkisinin zamanla ortadan kalkması



Şekil 5.60. 400 kPa Gerilme Seviyesinde İkincil Sıkışma Sürecinde Kemerlenme Etkisinin Tümüle Kalkması Sonucu Melnikovitlerin Dağılması

sonucu yapısının bozularak daha küçük küresel formalara dönüşmesi gösterilmiştir. Şekil 5.59'da ise 400 kPa gerilme altında birincil konsolidasyon süresince dahi melnikovitlerin, organik malzemeler etrafında kemerlenme yapan danelerdeki kemerlenme etkisinin zamanla ortadan kalkması sonucu yapısının bozulması görülmektedir. Şekil 5.58 ve Şekil 5.59 birlikte değerlendirildiğinde, fabrik yapıdaki kemerlenme etkisinin önkonsolidsyon basıncına yakın gerilmelerde (100 kPa) ikincil sıkışma süresince bozulmaya başlamasına rağmen önkonsolidsyon basıncından büyük gerilmelerde (400 kPa) birincil konsolidasyon süresince bozulmaya başladığını göstermektedir. Bu durum büyük oranda ikincil sıkışabilirliği olan zeminlerdeki ikincil sıkışmalara açıklık getirmesine rağmen üçüncül sıkışma davranışını tam olarak açıklamamaktadır. Şekil 5.60'da 400 kPa gerilme altında ikincil sıkışma süresince framboyidal piritlerin yer yer tümüyle bozulup kırılarak ve hatta dağılarak mikro ölçekte büyük boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Üçüncül sıkışma, esas olarak bu tip organik malzemelerin tümüyle dağılıp bozularak oluşturduğu boşluklara doğru hareket eden danelerin yeniden dizilmesi sonucu tekrar hız kazanan sıkışma sürecinin bir sonucudur.

Üçüncül sıkışma davranışı, ikincil sıkışma sırasında daneler arasındaki kemerlenmenin yükün uygulanma süresine bağlı olarak azalması ve sonuçta organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılarak yeniden zeminin oluşan bu yeni boşlukları dolduracak şekilde sıkışmaya başlaması olarak açıklanabilir. Tüm konsolidasyon süreci boyunca, kil zemin içindeki daneler ile organik malzemelerin davranışları karşılaştırıldığında, üçüncül sıkışmaların esas olarak zemin içindeki organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılması sebebiyle oluştuğu görüşüne ulaşılmıştır.

6. GENEL SONUÇLAR

Uzun bir süredir zeminlerde, sabit bir efektif gerilme altında oturmaların devam ettiği bilinmektedir. Suya doygun bir zeminde çoğu zaman konsolidasyonun bitimine doğru oturmaların zamanla artan bir şekilde devam ettiği ve klasik Terzaghi Konsolidasyon Teorisinin öngördüğü şekilde asimptotik olmadığı farkedilmiş ve bu davranış, çoğu araştırmacı tarafından "ikincil konsolidasyon", "ikincil sıkışma" veya "krip" olarak adlandırılmıştır. Hacim değişimi, birincil sıkışma (birincil konsolidasyon) olarak adlandırılan hidrodinamik etki sonucu oluşur, diğer hacim değişimi ise ikincil sıkışma sonucu meydana gelir (Mesri, 1973).

Tez çalışması kapsamında 24 adet konsolidasyon deneyi yapılmış ve farklı derinliklerdeki yumuşak kil zemin için toplam 80 adet gerilme seviyesinde 1 hafta ile 6.5 ay arasında değişen sürelerde beklenerek yumuşak kil zeminin uzun süreli konsolidasyon davranışı araştırılmıştır. Yapılan 24 adet klasik ve uzun süreli konsolidasyon deneylerinden elde edilen oturma-zaman datasından hareketle sıkışma indisi ile ikincil sıkışma parametrelerinin sabit efektif gerilme altında zamanla değişimi ile birbirleriyle ilişkisi araştırılmıştır. Uzun süreli yüklemenin zemin davranışına etkisi araştırılmış ve ikincil sıkışma süreci boyunca oluşan üçüncül sıkışma olayı deneysel sonuçlarla ve SEM analizlerinden alınan fotoğraflarla açıklanmıştır. Diğer yandan laboratuvarda yapılan deneylerden elde edilen data ile arazide 6-12 ay müddetle yapılan uzun süreli oturma gözlemleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Arazi ve laboratuvar deneylerinden ve SEM analizi sonuçlarından hareketle elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Deneyde kullanılan yumuşak mavi kil zemin, kritik basınçtan küçük gerilmelerde ($p' < 0.5p'_c$) zemin düşük ikincil sıkışabilirlik ($C_{\alpha\varepsilon} < \%\ 0.4$) göstermektedir. Kritik basınç aralığında ($p' \approx 0.5p'_c$) zemin, orta-yüksek derecede ikincil sıkışabilirlik ($C_{\alpha\varepsilon} = \%\ 0.5 - \%\ 0.95$) davranışı göstermekte olup kritik basınçtan dha büyük gerilmelerde, orta ikincil sıkışabilirlik ($C_{\alpha\varepsilon} = \%\ 0.6 - \%\ 0.8$) davranışı göstermektedir. Samsun Çarşamba Havalanı uçuş pisti boyunca alınan yumuşak

mavi kil zemin, genel olarak orta derecede ikincil sıkışabilirlik davranışı göstermektedir.

2. Yumuşak mavi kil zemin için, ikincil sıkışma parametreleri (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$ veya $C_{\alpha p}$) ile sıkışma indisi (C_c) arasında tekil bir ilişki vardır ve bu tekil ilişki herhangi zaman, efektif gerilme ve boşluk oranı için ikincil sıkışma süresince geçerlidir. Diğer bir deyişle, ikincil sıkışma süresince, herhangi (σ', e, t) için (C_α, $C_{\alpha\varepsilon}$, $C_{\alpha p}$) $\propto C_c$'dir. İkincil konsolidasyon süresince, tüm efektif gerilmeler, boşluk oranları ve zamanda ikincil sıkışma parametreleri ile sıkışma indisi arasındaki ilişki tektir.

3. Deneylerde kullanılan kil zemin için, ikincil sıkışma katsayısı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki C_α / C_c = 0.02~0.06 aralığında olup ortalama bir değer olarak C_α / C_c = 0.034 alınabilecektir. Benzer şekilde, ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki $C_{\alpha\varepsilon} / C_c$ = 0.006~0.018 aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha\varepsilon} / C_c$ = 0.012 seçilebilecektir. Modifiye ikincil sıkışma oranı ile sıkışma indisi arasındaki ilişki ise $C_{\alpha p} / C_c$ = 0.006~0.021 aralığında olup ortalama bir değer olarak $C_{\alpha p} / C_c$ = 0.014 alınabilecektir. Literatürde, birçok zemin için C_α/C_c oranı 0.025-0.100 aralığında olduğu belirtilmekte ve Bölüm 3.1.3.1, Tablo 3.4'te çeşitli zeminler için C_α/C_c oranları verilmektedir (Mesri ve Godlewski, 1977; Suthaker ve Don Scott, 1995; Mesri, Shahien ve Feng, 1995). Deneysel çalışmada belirlenen değerler literatürde verilen değerlerle uyum içersindedir.

4. Deneysel çalışma kapsamında yapılan 24 adet konsolidasyon deneylerinden elde edilen oturma-zaman datasından hareketle ikincil sıkışma oranı-$C_{\alpha\varepsilon}$ ile uygulanan konsolidasyon basıncı arasında dört tip korelasyon bulunmuştur. Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te verilen dört tip korelasyondan hareketle, deneylerde kullanılan yumuşak mavi kil zeminde, ikincil sıkışma oranlarını efektif gerilmeye bağlı olarak kestirmek veya grafikten okuyarak efektif gerilme artışı sonrasında arazide oluşabilecek ikincil sıkışma hakkında yaklaşık bir fikir edinmek mümkün olmaktadır.

5. Önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ($p' > p'_c$ ve $p'_c/p' < 1$) ikincil sıkışma oranları arasında belirgin bir fark olmamasına karşın, önkonsolidasyon basıncından küçük gerilmelerde ($p' < p'_c$ ve $p'_c/p' > 1$) ikincil sıkışma oranları

arasında belirgin bir farklılaşma ve derinlik artıkça ikincil sıkışma oranının artması şeklinde bir davranış görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Zira, önkonsolidasyon basıncından daha küçük gerilmelerde ikincil sıkışma katsayısı (C_α) ve dolayısıyla ikincil sıkışma oranı ($C_\alpha=C_\alpha/(1+e_0)$), tekrar sıkışma bölümündeki gerilmenin artmasıyla artmakta ve maksimum önkonsolidasyon basıncının hemen ötesindeki bir gerilme seviyesinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Bundan sonra, arzi bakir konsolidasyon eğrisi üzerine düşmekte ve ikincil sıkışabilirlik artmakta dolayısıyla daha fazla ikincil sıkışma meydana gelmektedir.

6. Bu tez çalışması kapsamında yapılan uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, yumuşak mavi kil zeminde, uzun süreli ikincil sıkışmaya terkedilen gerilme (p) sonrasında yumuşak zemin, p_{cq}/p = 1.13~1.33 oranındaki gerilme artışlarına kadar önyüklenmiş zemin gibi davranmakta ve dolayısıyla daha az birincil ve ikincil sıkışma yapmaktadır (p_{cq}, görünür önkonsolidasyon basıncıdır). Ancak p_{cq}/p = 1.13~1.33 oranından daha yüksek gerilmelerde yumuşak kil zeminin davranışı tekrar (EOP) e-log p' eğrisine uymakta ve beklenilen miktarda birincil konsolidasyon sıkışması yapmaktadır. Yapılan uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, düşük gerilmelerde, uzun süreli yüklemenin etkisi nispeten yüksek iken daha büyük gerilmelerde uzun süreli yüklemenin etkisinin daha az olduğu belirlenmiştir. Ancak, uzun süreli yüklemenin etkisi tümüyle ikincil sıkışmanın miktarına ve ikincil sıkışmadaki bekleme süresinin uzunluğuna bağlıdır.

7. Bügüne değin yüksek boşluk oranı, su muhtevası ve düşük birim hacim ağırlıkları ile killerden ayrılmasına rağmen killere benzer sıkışma davranışı gösteren turba zeminlerde her ne kadar üçüncül sıkışma davranışı görülmesi olağan bir durumsa da, organik içeriğe sahip killerde görülen bu üçüncül sıkışma davranışına tatmin edici açıklamalar ve yorumlar getirilememiştir. Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucu, Samsun-Çarşamba Havaalanı uçuş pistinden alınan ve ağırlıkça %1.5-2 oranında organik lifler içeren yumuşak mavi kil zeminde gözlenen davranış üçüncül sıkışma hipotezinin bir göstergesidir. B1, B2, B3 D7, D8 ve D9 nolu uzun süreli konsolidasyon deneylerinde ikincil konsolidasyon devam ederken belli bir noktada (2 log

çevrimi-$100t_p$'den daha uzun bir süre) sıkışma eğiminin arttığı ve dolayısıyla üçüncül sıkışma davranışının oluştuğu açıkça görülmektedir.

8. İkincil konsolidasyonu takiben (e-log t) diyagramında, sıkışmaların tekrar hızlandığı dönüm noktasından itibaren oluşan sıkışma davranışı "Üçüncül Sıkışma" olarak tanımlanmıştır. Üçüncül sıkışma olarak tanımlanan olayın varlığı, logaritmik eksende boşluk oranı değişim hızı zamana karşı çizilerek belli olmaktadır. $\log \overset{0}{e}$ - log t eğrisinde eğimin sabit olduğu bölüm ikincil konsolidasyonu, eğimin değiştiği yer ise üçüncül sıkışmayı göstermektedir.

9. Test ve pist dolgusu için arazide belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranları, laboratuvarda belirlenen değerin yaklaşık bir-dört katıdır. Diğer bir deyişle, (t) yapı ömrü için arazide laboratuvarda hesaplanan değerlere göre, iki-dört kat daha fazla ikincil sıkışma oturması ve bir-iki kat daha fazla üçüncül sıkışma oturması meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, laboratuvarda hesaplananlara nazaran arazide belirli miktardaki ikincil sıkışma iki-dört kat daha sürede, üçüncül sıkışma ise bir-iki kat daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Arazide belirlenen konsolidasyon katsayıları (c_v) laboratuvarda belirlenen katsayılara göre 100 kat daha büyük olmasına karşılık, arazi için belirlenen ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon}$ ve üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha\varepsilon t}$, laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranlarına nazaran bir-dört kat daha fazladır ve pratik olarak laboratuvarda belirlenen ikincil ve üçüncül sıkışma oranları arazideki değerlerle aynı kabul edilebilecektir. Gerek test ve gerekse pist dolgusunda yapılan uzun süreli oturma gözlemlerinden elde edilen data ile laboratuvarda yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyleri sonuçları üstüste düşmektedir. Bu nedenle, laboratuvarda yapılacak 2-3 aylık uzun süreli konsolidasyon deneylerinden hareketle arazide oluşabilecek ikincil ve üçüncül sıkışma miktarlarını önceden tahmin etmek ve kestirmek mümkün olabilecektir.

10. Deneysel çalışma kapsamında, konsolidasyon sürecinde birincil, ikincil ve üçüncül sıkışmaların kil zeminin fabrik yapısında meydana getirdiği değişiklikler taramalı elektron mikroskopu (SEM) altında incelenerek araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucu, başlangıçta floküle ve topak bir yapı sergileyen zeminin fabrik yapısının önkonsolidasyon basıncından küçük ve yakın gerilmelerde (25 ve 100 kPa) birincil konsolidasyon süresince oluşan sıkışmalarla korunduğu ve

birincil sıkışmaların floküle yapı arasındaki boşlukların hacminin azalması sonucu oluştuğu görülmüştür. Önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde ise (400 kPa) fabrikteki floküle yapının nispeten bozularak floküle olmayan yapıya dönüştüğü görülmektedir. İkincil sıkışma süresince ise önkonsolidasyon basıncından küçük ve yakın gerilmelerde (25 ve 100 kPa) zeminin dane yapısı bozulmaya başladığı ve özellikle organik malzemelerin hücre çatısının kısmen bozulduğu görülmüştür. Önkonsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde (400 kPa) ise fabrik yapının bozulduğu, floküle ve topak yapının değişerek floküle olmayan yoğun topak yapı oluştuğu görülmüştür.

11. Üçüncül sıkışma yapan zeminde yapılan SEM analizleri değerlendirilerek üçüncül sıkışma davranışı açıklanmaya çalışılmıştır. Üçüncül sıkışma davranışı, ikincil sıkışma sırasında daneler arasındaki kemerlenmenin sabit efektif gerilme altında, gerilmenin uygulanma süresine bağlı olarak azalması ve sonuçta organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılarak zeminin yeniden oluşan bu yeni boşlukları dolduracak şekilde sıkışmaya başlaması olarak açıklanabilir. Tüm konsolidasyon süreci boyunca, kil zemin içindeki daneler ile organik malzemelerin davranışları karşılaştırıldığında, üçüncül sıkışmaların esas olarak zemin içindeki organik malzemelerin çatısının tümüyle kırılması sebebiyle oluştuğu görüşüne ulaşılmıştır.

12. Bu çalışmada yapılan öngörüler ve belirlenen konsolidasyon davranışları, Samsun-Çarşamba Havalanının inşa edildiği Deltadan alınan yumuşak mavi kil zemin için geçerlidir. Üçüncül sıkışma sırasında killerin davranışını kesin olarak belirleyebilmek için farklı jeolojik geçmişe ve kimyasal içeriğe sahip örselenmemiş yumuşak killer ve yoğrulmış killer üzerinde de benzer uzun süreli konsolidasyon deneyleri yapılmalı ve kilin kimyasal ve minerolojik içerikleri detaylı olarak araştırılmalıdır. Üçüncül sıkışmanın oluştuğu andan itibaren oluşan şekil değiştirme hızı, ikincil konsolidasyon sırasındaki şekil değiştirme hızına yakın veya daha fazla olabilir. Üçüncül sıkışma süresince şekil değiştirme hızının, ikincil konsolidasyon sırasındaki şekil değiştirme hızından daha fazla olduğu tespit edilirse, hızın artımı arazide uzun vadede oluşabilecek üçüncül sıkışmaların büyüklüğünü verecektir. Bu durumda, bu özelliğe sahip killer üzerinde yapılacak yapılarla ilgili ciddi çalışmalar yapılmalı ve oturma analizlerinde muhakkak üçüncül sıkışmalar da dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

Aboshi, H., Yoshikuni, H., Maruyama, S., 1970. Constant Loading Rate Consolidation Test, *Soils and Foundations*, Vol. **10**, No. 1, 43-56.

Aboshi, H., 1973. An experimental Investigation on the Similitude in the Consolidation of A Soft Clay Including the Secondary Creep Settlement, *Proc. of the 8th ICSMFE, Vol. 4.3*, p.88.

Aboshi, H., Matsuda, H., Okuda, M., 1981. Preconsolidation by Separate-Type Consolidometer, *Proc. of the 10th ICSMFE, Vol. 3*, 577-580.

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

Adams, J., 1965. The Engineering Behaviour of A Canadian Muskeg, *Proc. 6th Int. Conf. on SMFE, Montreal, Canada, Vol.* **1**, 3-7.

Andersland, O. B., Mathew, P. J., 1973. Consolidation of High Ash Papermill Sludges, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **99**, No. SM5, 365-374.

Balasubramaniam, A. S., Brenner, R. P., 1981. Consolidation and Settlement of Soft Clay, *Soft Clay Engineering*, pp. 481-566, Eds. Brand, E.W. & Brenner R.P., Elsevier, Amsterdam.

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.

Barnes, G.E., 1995. Soil Mechanics Principles and Practice, MacMillan, London.

Barber, E. S., 1961. Notes on Secondary Consolidation, *Proc. Highway Research Board, Vol.* **40**, 663-675

Berre, T., Iversen, K., 1972. Oedometer Tests With Different Specimen Heights on A Clay Exhibiting Large Secondary Compression, *Geotechnique* **22**, No. 1, 53-70.

Berry, P. L., Vickers, B., 1974. Consolidation of Fibrous Peat, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.* **101**, No. GT8, 741-753.

Bjerrum, L., 1954. Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays, *Geotechnique* **4**, 49-69.

Bjerrum, L., 1967. Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, *Geotechnique* **17**, 81-118.

Bjerrum, L., 1969. Weathering of Marine Clays in Temperate Climates, First Contribution to Spec. Session 7, 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico City, *Norwegian Geotech. Inst. Pub.*, No. **85**, 43-45.

Bjerrum, L., 1972. Embankments on Soft Ground, *Proc. Spec. Conf. Performance of Earth and Earth-Supported Structures,* Lafayette, Vol. 2, 1-54.

Bjerrum, L., 1973. Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays, State-of-the-Art Report to Session IV, 8th *Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Moscow, Vol. **III**, 111-159.

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

Buisman, A. S. K., 1936. Results of Long Duration Settlement Tests, *Proc. 1st Int. Conf. on SMFE, Vol. 1*, Cambridge, Mass., 103-106.

Casagrande, L., 1932. Research on the Atterberg Limits of Soil, *Public Roads,* No. **13**(8),, 121-130.

Chang, Y. C. E. 1969. Long Term Consolidation Beneath Test Fills at Vasby, Sweden, a part of Ph.D. Thesis.

Christoulas, S., Kalteziotis, N., Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 1987. Engineering Geology of Soft Clays. Examples from Greece, in *Embankments on Soft Clays*, pp. 1-31, Edited by The Public Works Research Center of Greece, Ministry of Environment, Athens.

Collins, K., McGown, A., 1974. The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils, *Geotechnique*, Vol. 24, No. **2**.

Crawford, C. B., 1964. Interpretation of The Consolidation Test, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **90**, No. SM5, 87-102.

Crawford, C. B., Sutherland, J. G., 1971. The Empress Hotel, Victoria, British Colombia, Sixty-Five Years of Foundation Settlements, *Can. Geotech. Jour., Vol.* **8**, No.1, 77-98.

Das, B., 1994. Principles of Geotechnical Engineering, PWS Publishing, 3rd Edition, Boston.

denHaan, E. J., El Amir, L. S. F., 1994a. A Simple Formula for Final Settlement of Surface Loads on Peat, in *Advances in Understanding and Modelling The Mechanical Behaviour of Peat*, pp. 35-48, Eds. denHaan, Termaat & Edil, Balkema, Rotterdam.

denHaan, E. J., Edil, T. B., 1994b. Secondary and Tertiary Compression of Peat, in *Advances in Understanding and Modelling The Mechanical Behaviour of Peat*, pp. 49-60, Eds. denHaan, Termaat & Edil, Balkema, Rotterdam.

denHaan, E. J., 1994c. General Report Session 1: One-Dimensional Behaviour, in *Advances in Understanding and Modelling The Mechanical Behaviour of Peat*, pp. 95-130, Eds. denHaan, Termaat & Edil, Balkema, Rotterdam.

denHaan, E. J., 1994d. Summary of Session 1: One-Dimensional Behaviour, in *Advances in Understanding and Modelling The Mechanical Behaviour of Peat*, pp. 131-140, Eds. denHaan, Termaat & Edil, Balkema, Rotterdam.

denHaan, E. J., 1995. Generalization of The Stress, Strain and Time Measures of Soil Compression, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 513-518, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

Edil, T. B., Dhowian, A. W., 1979. Analysis of Long-Term Compression of Peats, Geotechnical Engineering, Vol. **10**, 159-178.

Edil, T. B., Xiaodong, W., 1999. Shear Strength and K_0 of Peats and Organic Soils, *Geotechnics of High Water Content Materials, ASTM STP* **1374**, PA.

Edil, T. B., 1999. Construction Over Soft Organic Ground: Issues and Recent Directions, 47th Annual Geotechnical Engineering Conference, University of Minnesota, Minnesota.

Eide, O., 1968. *Geotechnical Problems With Soft Bangkok Clay*, Norwegian Geotech. Ins., Pub. No. 78, 9 pp.

Erkal, T., 1995. Plio-Quaternary Evolution of the Yesilirmak Delta, Northern Turkey, in *Geology of the Black Sea Region*, pp. 123-128, Eds. Erler, Ercan, Bingöl, Örçel, Ankara.

Flodin, N., Broms, B., 1981. History of Civil Engineering in Soft Clay, in *Soft Clay Engineering*, pp. 27-156, Eds. Brand, E.W. & Brenner R.P., Elsevier, Amsterdam.

Fox, P. J., Edil, T. B., 1994. Temperature-Induced One-Dimensional Creep of Peat, in *Advances in Understanding and Modelling The Mechanical Behaviour of Peat*, pp. 27-34, Eds. denHaan, Termaat & Edil, Balkema, Rotterdam.

Fujiwara, H., Ue, S., Yasuhara, K., 1987. Secondary Compression of Clay Under Repeated Loading, Japanese Society of SMFE, *Soils and Foundations*, Vol. **27**, No: 2, 21-30.

Garlanger, J. E., 1972. The Consolidation of Soils Exhibiting Creep Under Constant Effective Stress, *Geotechnique* **22**, No. 1, 71-78.

Gibson, R. E., Lo, K. Y., 1961. A Theory of Consolidation for Soils Exhibiting Secondary Compression, Norwegian Geotech. Inst. Publication, No.41.

Girault, P., Finn, W. D., Nathan, N. D., 1962. Discussion : Secondary Compression of Clays, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **88**, No. SM1, 63-66.

Goldberg, T., 1964. Discussion: Design of Foundations for Control o Settlement, *Proc. ASCE,* III.

Göksu, E., 1974. 1:500 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası-Samsun, Editörler: Pamir ve Erentöz, MTA, Ankara.

Graham, J., Crooks, J. H. A., Bell, A. L., 1983. Time Effects on The Stress-Strain Behaviour of Natural Soft Clays, *Geotechnique* **33**, No. 3, 327-340.

Greensmith, J. T., 1978. *Petrology of the Sedimentary Rocks*, George Allen and Unwin, London, 241 pp.

Güngör, N., 1999. Kişisel görüşme.

Haefeli, R., Schaad, W., 1948. Time Effect in Connection with Consolidation Tests, *Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol.* **3**, 23-29.

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

Hansen, B., 1969. A Mathematical Model for Creep Phenomena in Clay, *Proc. 7th Int. Conf. SMFE, Special Session 12*, 12-18.

Holtz, R., Kovacs, W. D., 1985. *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, 733 pp.

Horn, H. M., Lambe, T. W., 1964. Settlement of Buildings on the MIT Campus, *Jour. SMFE, ASCE, Vol.* **90**, No. SM5, Proc. Paper 4038, 181-196.

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

Koppejan, A. W., 1948. A Formula Combining the Terzaghi Load Compression Relationship and Buisman Secular Time Effect, *Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.* **3**, Rotterdam, 32-37.

Jonas, E., 1964. Subsurface Stabilization of Organic Silt-Clay by Precompression, *Jour. SMFE, ASCE, Vol.* **90**, No. SM5, Proc. Paper 4031, 363-376.

Ladd, C. C., Preston, W. E., 1965. On the Secondary Compression of Saturated Clays, *Soils Publication 181*, MIT, Cambridge, Massachusetts.

Ladd, C. C., 1971. Strength Parameters and Stress-Strain Bahavior of Saturated Clays, Report R71-23, *Soils Publication 278*, MIT, Cambridge, Massachusetts.

Ladd, C. C., 1973. Settlement Analysis for Cohesive Soils, *Research Report R71-2, Dept. of Civ. Eng.*, MIT, 115p.

Ladd, C. C., 1977. Stress-Deformation and Strength Characteristics, *Proc. of the 9th ICSMFE,* Vol. 2, pp.421-494.

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

Lancellotta, R., 1995. Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam.

Larsson, G. A., 1986. Consolidation of Soft Soils, *Swedish Geotechnical Institute* Report No. 29, Linkoping, Sweden.

Lea, N. D., Brawner, C. O., 1963. Higway Design and Construction Over Peat Deposits in Lower British Columbia, *Higway Research Record,* No. 7.

Leonards, G. A., Ramiah, B. K., 1959. Time Effects in the Consolidation of Clays, ASTM, STP 254, 116-130.

Leonards, G. A., Girault, P., 1961. A Study of the One-Dimensional Consolidation Test, *Proc. of the 5th ICSMFE, Vol. 2,* 213-218

Leonards, G. A., Altschaeffl, A. G., 1964. Compressibility of Clay, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **90**, No. SM5, 133-155.

Leonards, G. A., 1977. Panel Discussion, *Proc. 9th Int. Conf. SMFE, Vol.* **3**. 384-386.

Leonards, G. A., Deschamps, R. J., 1995. Origin and Significance of The Quasi-Preconsolidation in Clay Soils, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 341-347, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., Bouchard, R., 1985. Stress-Strain- Strain Rate for The Compressibility of Sensitive Natural Clays, *Geotechnique* **35**, No. 2, 159-180.

Leroueil, S., 1988. Recent Developments in Consolidation of Natural Clays, *Can. Geotech. Jour., Vol.* **25**, No. 1, 85-107.

Leroueil, S., 1994. Compression of Clays: Fundamental and Practical Aspects, *ASCE Conf. on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, College Station, Vol.* **1**, 57-76.

Leroueil, S., 1995. Could It Be That Clays Have No Unique Way of Behaving During Consolidation?, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 1039-1048, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

Lo, K. Y., 1961. Secondary Compression of Clays, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **87**, No. SM4, 61-87.

Lowe, J., Jonas, E., Obrcian, V., 1969. Controlled Gradient Consolidation Tests, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **95**, No. SM1, 77-97.

Mesri, G., 1973. Coefficient of Secondary Compression, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **99**, No. SM1, 123-137.

Mesri, G., Rokhsar, A., 1974. Theory of Consolidation for Clays, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.* **100**, No. GT8, 889-904.

Mesri, G., 1975. Discussion: New Design Procedure for Stability of Soft Clays, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.* **101**, No. GT4, 409-412.

Mesri, G., Rokhsar, A., Bohor, B. F., 1975. Composition and Compressibility of Typical Samples of Mexico City Clay, *Geotechnique* **25**, No. 3, 527-554.

Mesri, G., Godlewski, P. M., 1977. Time- and Stress-Compressibility Interrelationship, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.* **103**, No. GT5, 417-430.

Mesri, G., Choi, Y. K., 1985. Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays, *Jour. of Geotech. Eng., ASCE, Vol.* **111**, No. 4, 441-464.

Mesri, G., Castro, A., 1987. C_a / C_c Concept and K_0 During Secondary Compression, *Jour. of Geotech. Eng., ASCE, Vol.* **113**, No. 3, 230-247.

Mesri, G., Shahien, M., Feng T. W., 1995. Compressibility Parameters During Primary Consolidation, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 1021-1037, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

Mitchell, J. K., 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley&Sons, Inc., New York, 407 pp.

Murray, R. T., 1978. Developments in Two- And Three-Dimensional Consolidation Theory. in *Developments in Soil Mechanics-1,* Ed. C. R. Scott, pp. 103-147, Applied Science Publishers, London.

Newland, P. L., Allely, B. H., 1960. Discussion, *Jour. of Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, Vol.* **86**, No. SM6, 99-101.

Olson, R. E., 1977. Consolidation Under Time Dependent Loading, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.* **103**, No. GT1, 55-60.

Olson, R. E., 1998. Settlement of Embankments on Soft Clays, *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE, Vol.* **124**, No. 8, 659-669.

Perret, D., Locat, J., Leroueil, S., 1995. Strength Development With Burial in Fine-Grained Sediments From the Saguenay Fjord, Quebec. Canadian Geotech. Jour.

Poulos, H. G., Ambrosis L. P., Davis, E. H., 1976 Method of Calculating Long-Term Creep Settlements, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.* **102**, No. GT7, 787-804.

Rizkakallah, V., Blümel, W., Richwien, W., 1977. Consolidation and Shear Strength of Soft Organic Clay of Bremerhaven, *Proc. Int. Symp. Soft Clay*, Bangkok, 133-145.

Sağlamer, A., 1996. Ulaştırma Bakanlığı DLH İnşaatı Genel Müdürlüğü Samsun (Çarşamba) Havaalanı Zemin ve Temel Mühendisliği Raporu, İ.T.Ü., İstanbul.

Sağlamer, A., Yılmaz, E., 1998. Samsun-Çarşamba Havaalanı İnşaatında Pist Temel Zemininin Ön Yükleme Yöntemiyle İyileştirilmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 22-23 Ekim, s. 512-521..

Samson, L., La Rochelle, P., 1972. Design and Performance of An Expressway Constructed Over Peat by Preloading, *Can. Geotech. Jour., Vol.* **9**, No. 4, 447-466.

Schifmann, R. L., Ladd, C. C., Chen, T. F., 1964. The Secondary Consolidation of Clay, Internation Union of Theoretical and Applied Mechanics, *Symp. On Rheology and Soil Mechanics*, Grenoble, France, 273-304.

Sekiguchi, H., Toriihara, M., 1976. Theory of One-Dimensional Consolidation of Clays with Consideration of Their Rheological Properties, *Soils and Foundations*, Vol. **16**, No. 1, 27-44.

Skempton, A.W., Northey, R. D., 1952. The Sensitivity of Clays, *Geotechnique* **3**, 30-53.

Skempton, A.W., 1960. Terzaghi 's Discovery of Effective Stress, *In: From Theory to Practice in Soil Mechanics*, pp. 42-53, Wiley, New York.

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

Sridharan, A, Rao, S., 1982. Mechanisms Controlling The Secondary Compression of Clays, *Geotechnique* **32**, No. 3, 249-260.

Suthaker, N. N., Don Scott, J., 1995. Creep Behavior of Oil Sand Fine Tails, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 195-200, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

Tang, Y. X., Imai, G., 1995. A Constitutive Relation With Creep and Its Application to Numerical Analysis of One-Dimensional Consolidation in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 465-472, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

Taylor, Merchant, 1940. A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression, *Jour. Maths. Phys.*, Vol. **19**, No. 3, 167-185.

Terzaghi, K., 1926. The Mechanics of Absorption and of the Swelling of Gels, *Proc. 4th Natl. Symp. Colloid Chemistry*, Cambridge, Mass., 58-78.

Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, New York, 510 pp.

Terzaghi, K., 1955. Influence of Geological Factors on the Engineering Properties of Sediments, *Economic Geology* **50**, 557-618.

Terzaghi, K., Peck, R. B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Torrance, J. K., 1974. A Laboratory Investigation of the Effect of Leaching on the Compressibility and Shear Strength of Norwegian Marine Clays, *Geotechnique* **24**, No. 2, 155-173.

Tovey, N. K., 1971. A Selection of Scanning Electron Micrographs of Clays, CUED/C-SOILS/TR5a(1971), University of Cambridge, Department of Civil Engineering.

Tsukada, Y., Yasuhara, K., 1995. Scale Effects in One-Dimensional Consolidation of Clay, in *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, pp. 211-216, Eds. Yoshikuni & Kusakabe, Balkema, Rotterdam.

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

Wahls, H.E., 1962. Analysis of Primary and Secondary Consolidation, *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.* **88**, No. SM6, 207-231.

Walker, L. K., Raymond, G. P., 1968. The Prediction of Consolidation Rates in A Cemented Clay, C*an. Geotech. Jour.,Vol.* **5**, No. 4, 192-216.

Weber, W. G., 1969. Performance of Embankments Constructed Over Peat, *Jour. SMFE, ASCE, Vol.* **95**, No. 1, 53-76.

Yin, J., Graham, J., 1994a. Equivalent Times and One-Dimensional Elastic Viscoplastic Modelling of Time-Dependent Stress-Strain Behaviour of Clays, *Can. Geotech. Jour., No.* **31**, 42-52.

Yin, J., Graham, J., Clark, J. I., Gao, L., 1994b. Modelling Unanticipated Pore-Water Pressures in Soft Clays, *Can. Geotech. Jour., No.* **31**, 773-778.

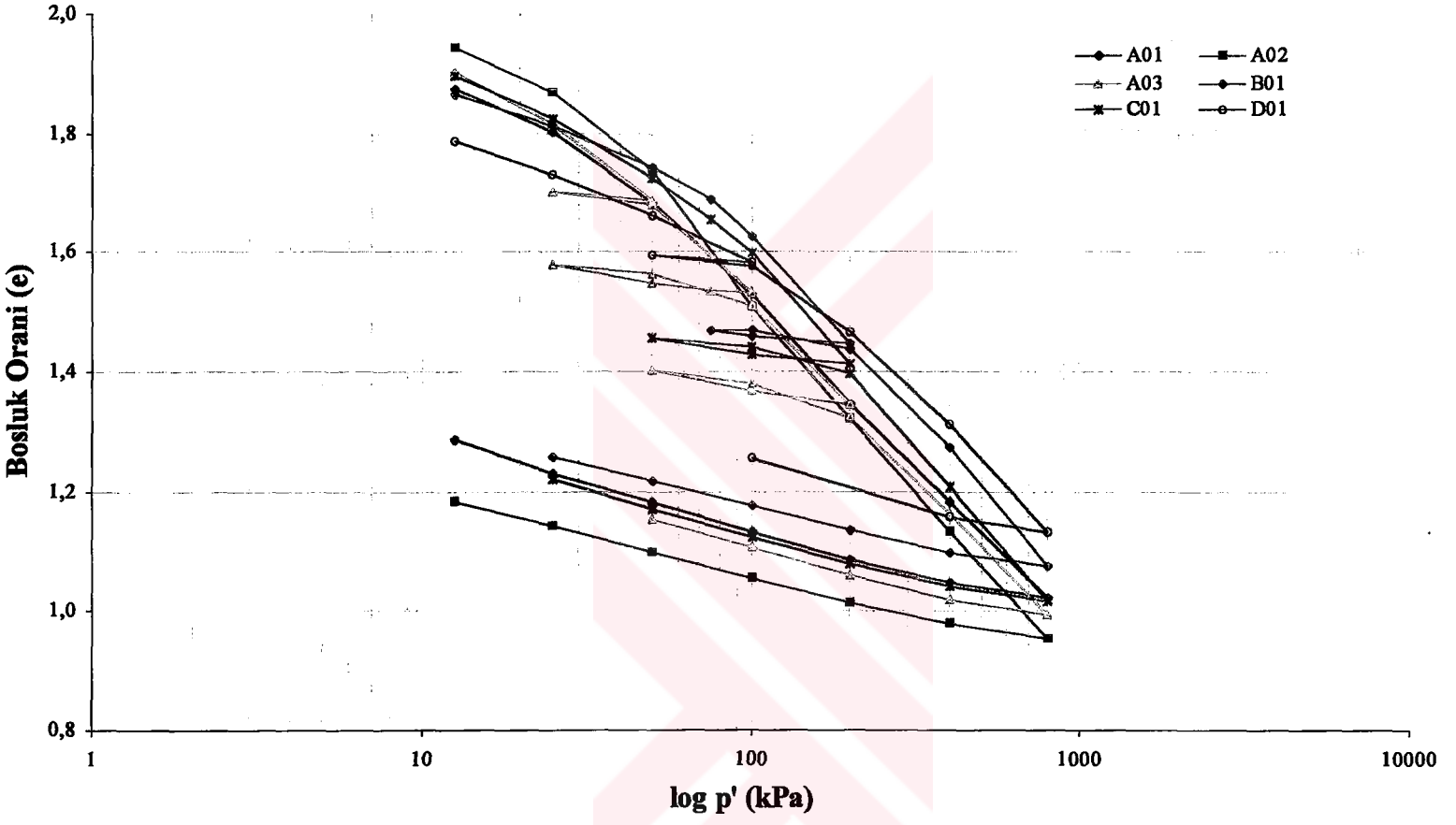
EKLER

- Şekil A : Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri

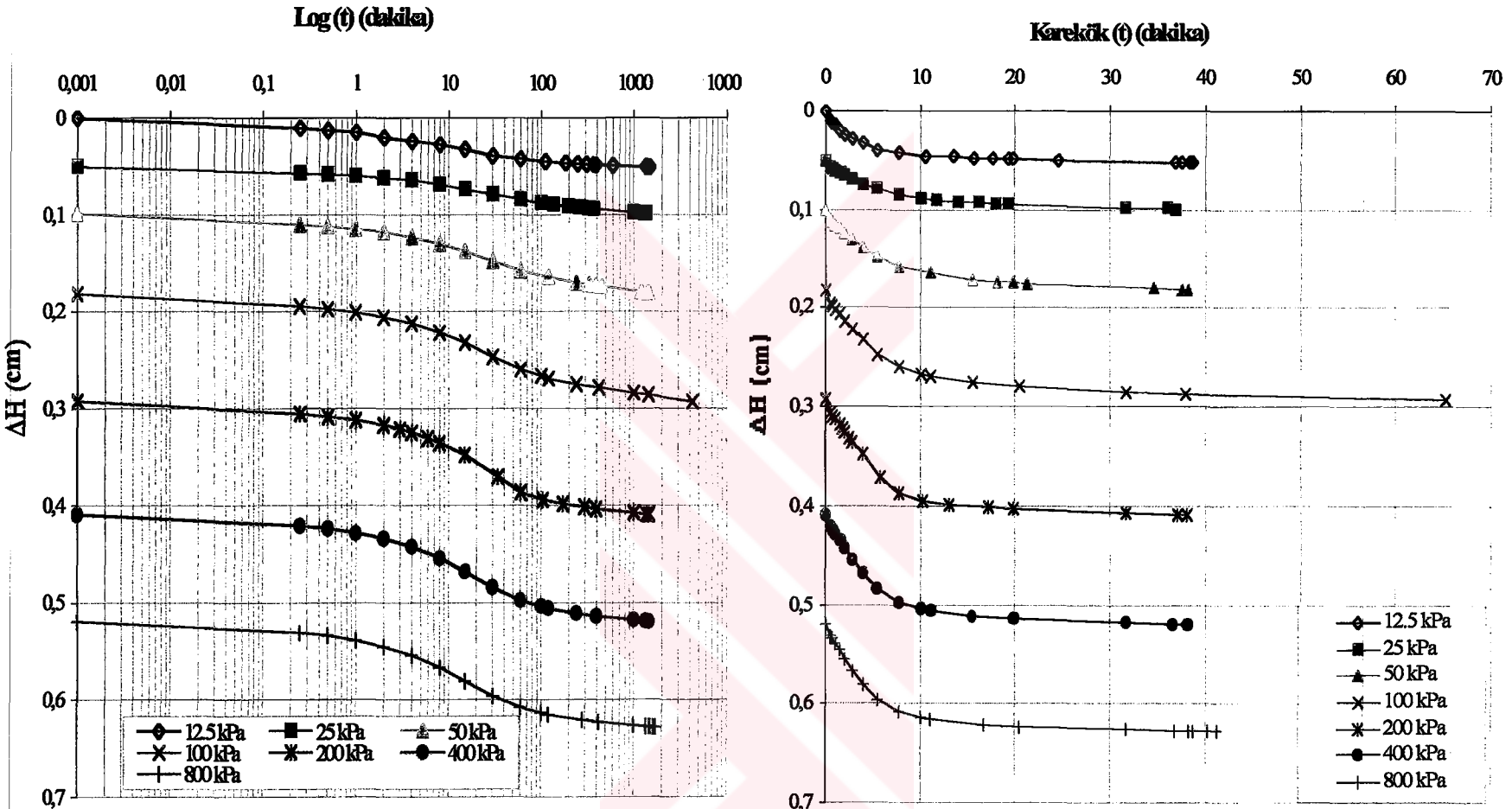
- Şekil B : Tüm Konsolidasyon Deneylerine Ait ΔH-log (t) ve ΔH-karekök (t) Grafikleri

- Şekil C : Tüm Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri, Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı ve Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması

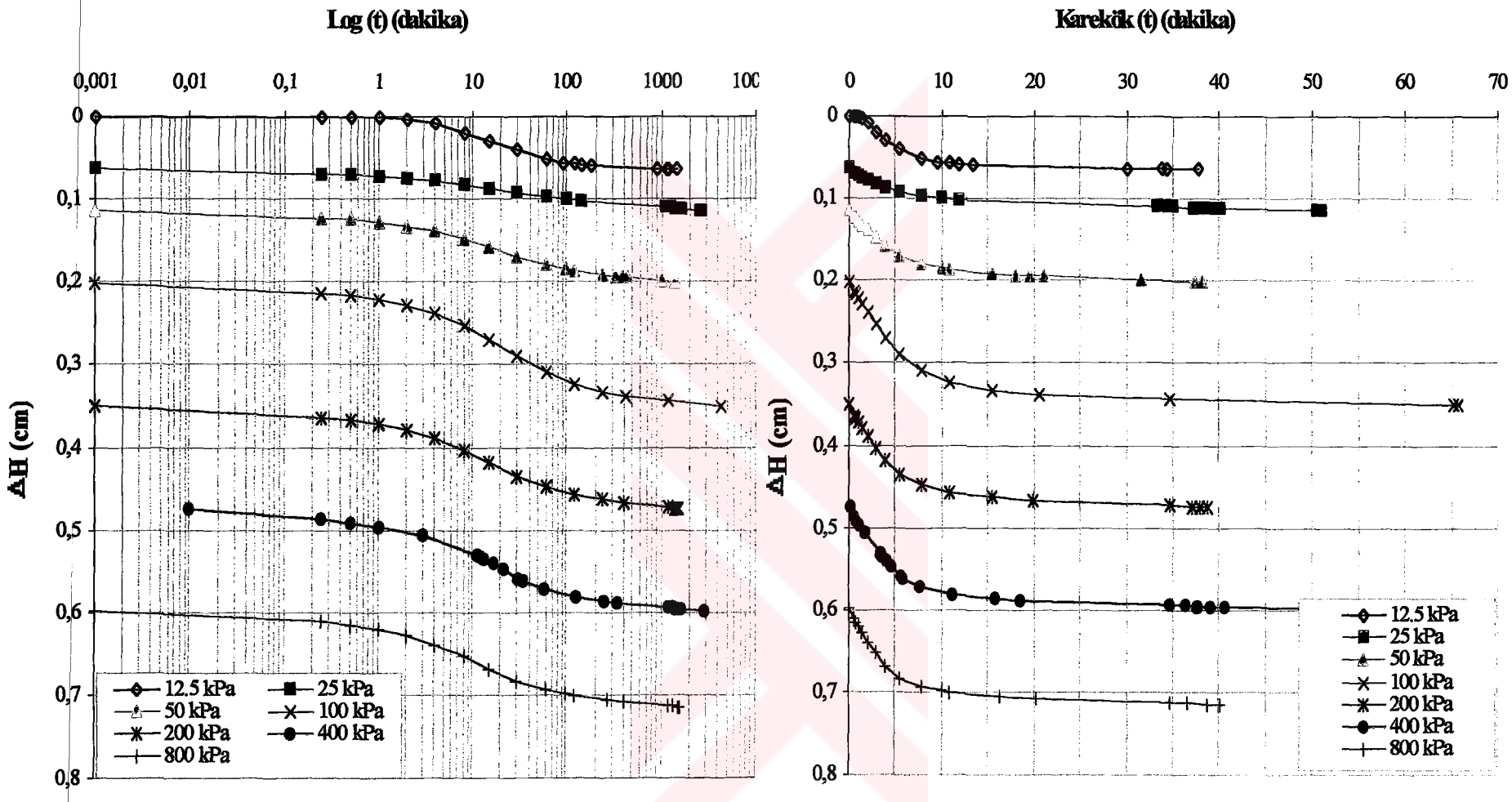
- Şekil E : SEM Analizi Fotoğrafları



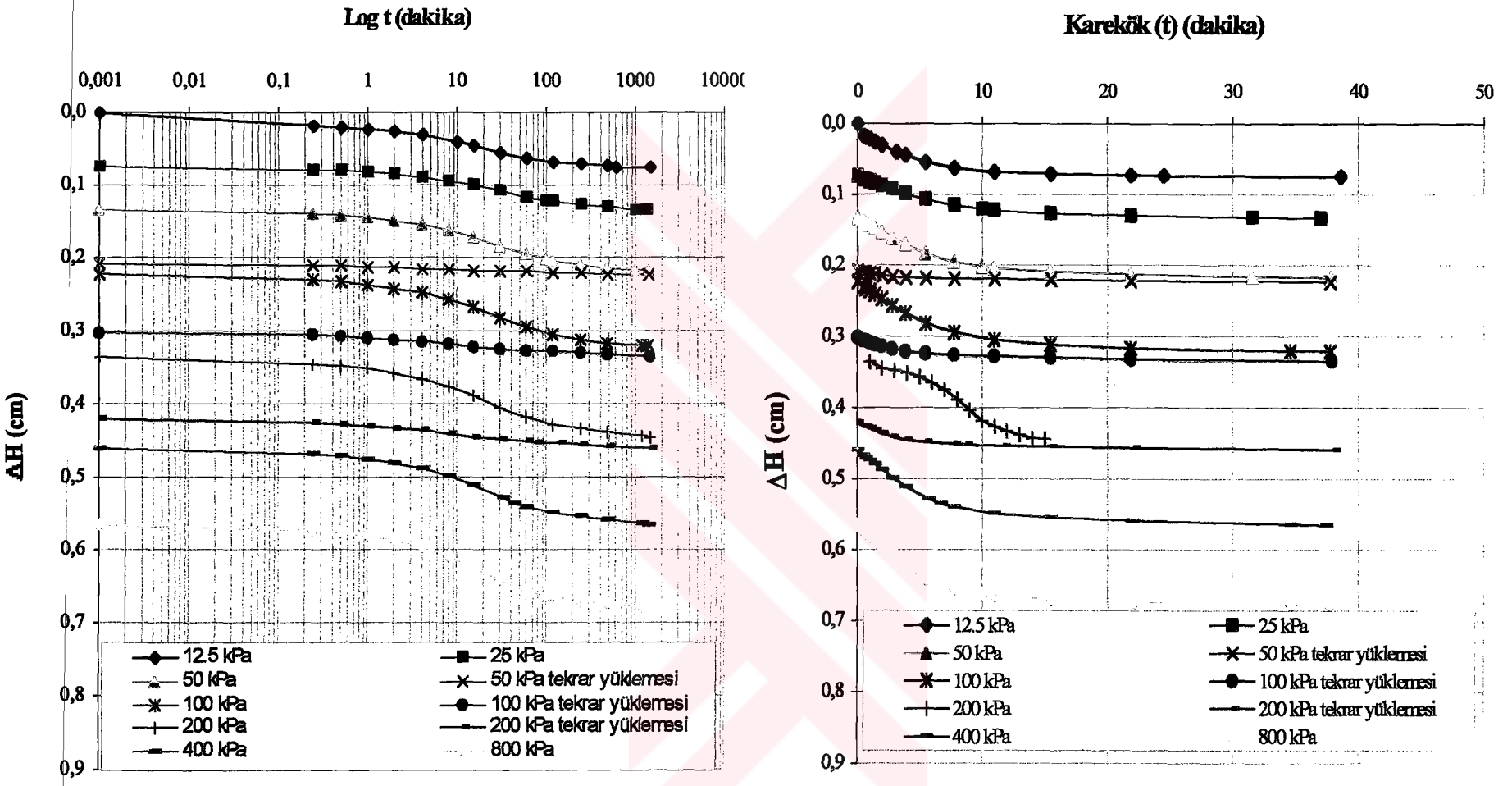
Şekil A.1. Tüm Klasik Konsolidasyon Deneylerine Ait e-log p' Eğrileri



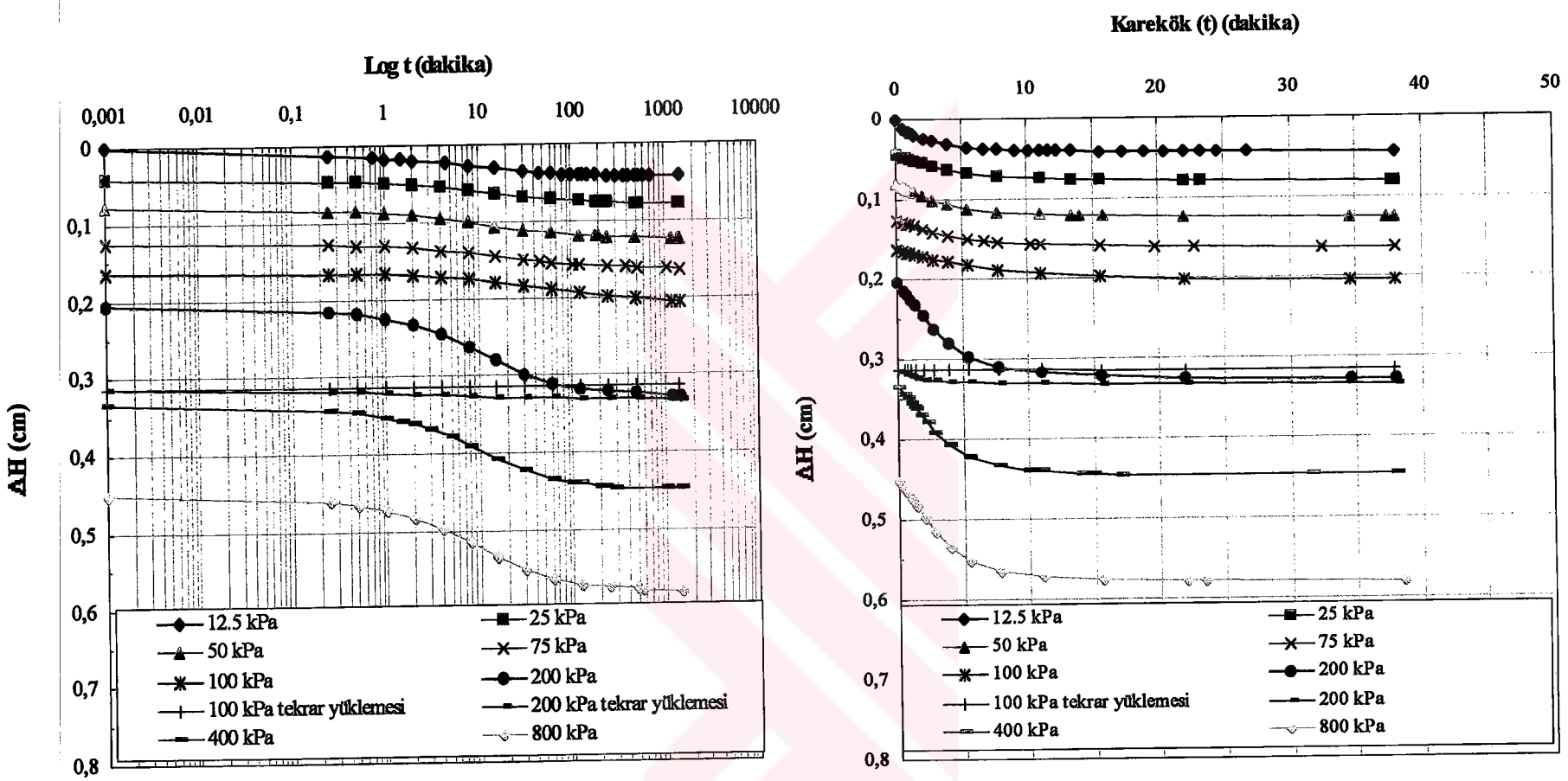
Şekil B.1. (a) A01 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



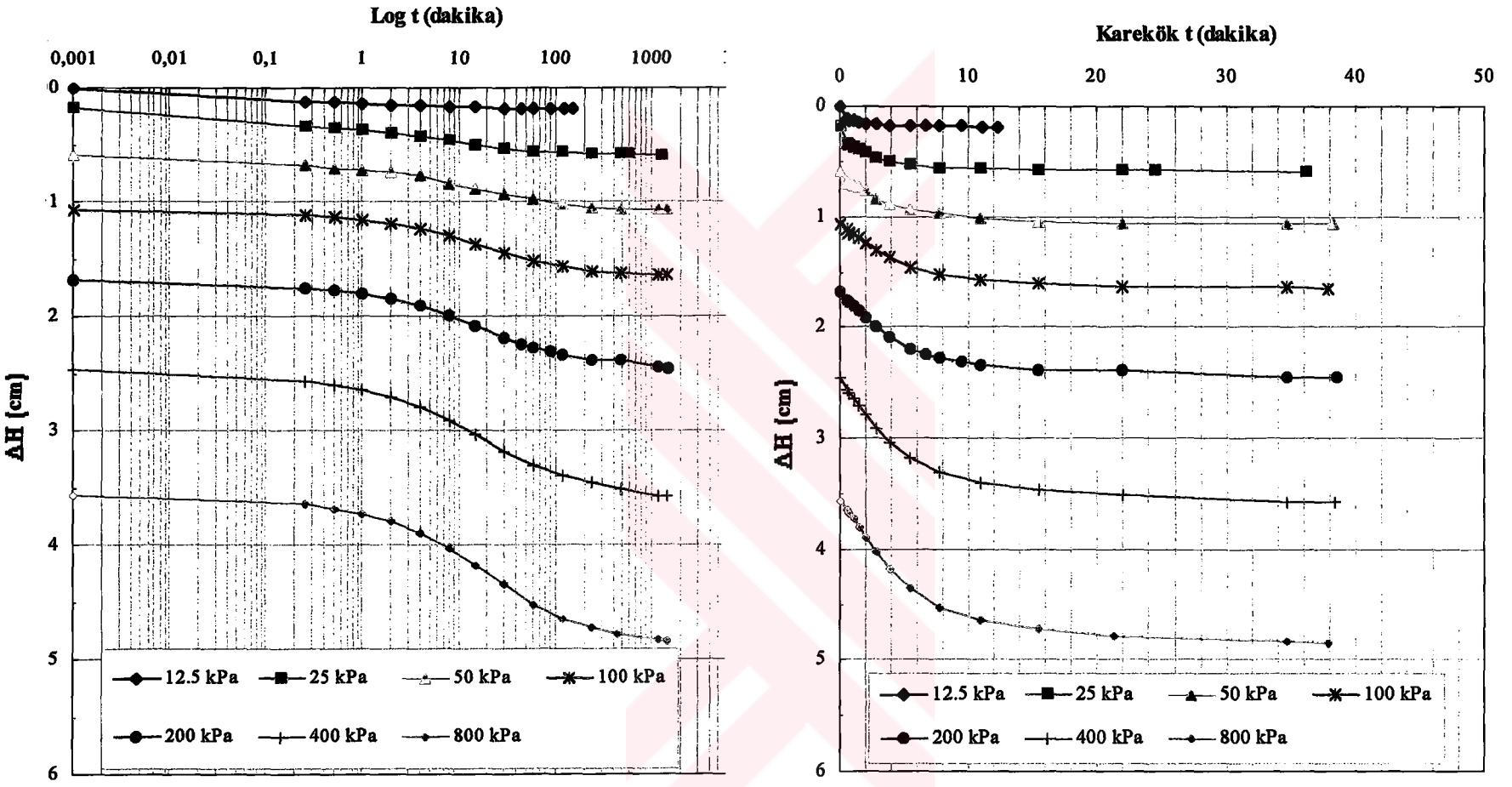
Şekil B.2. (a) A02 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



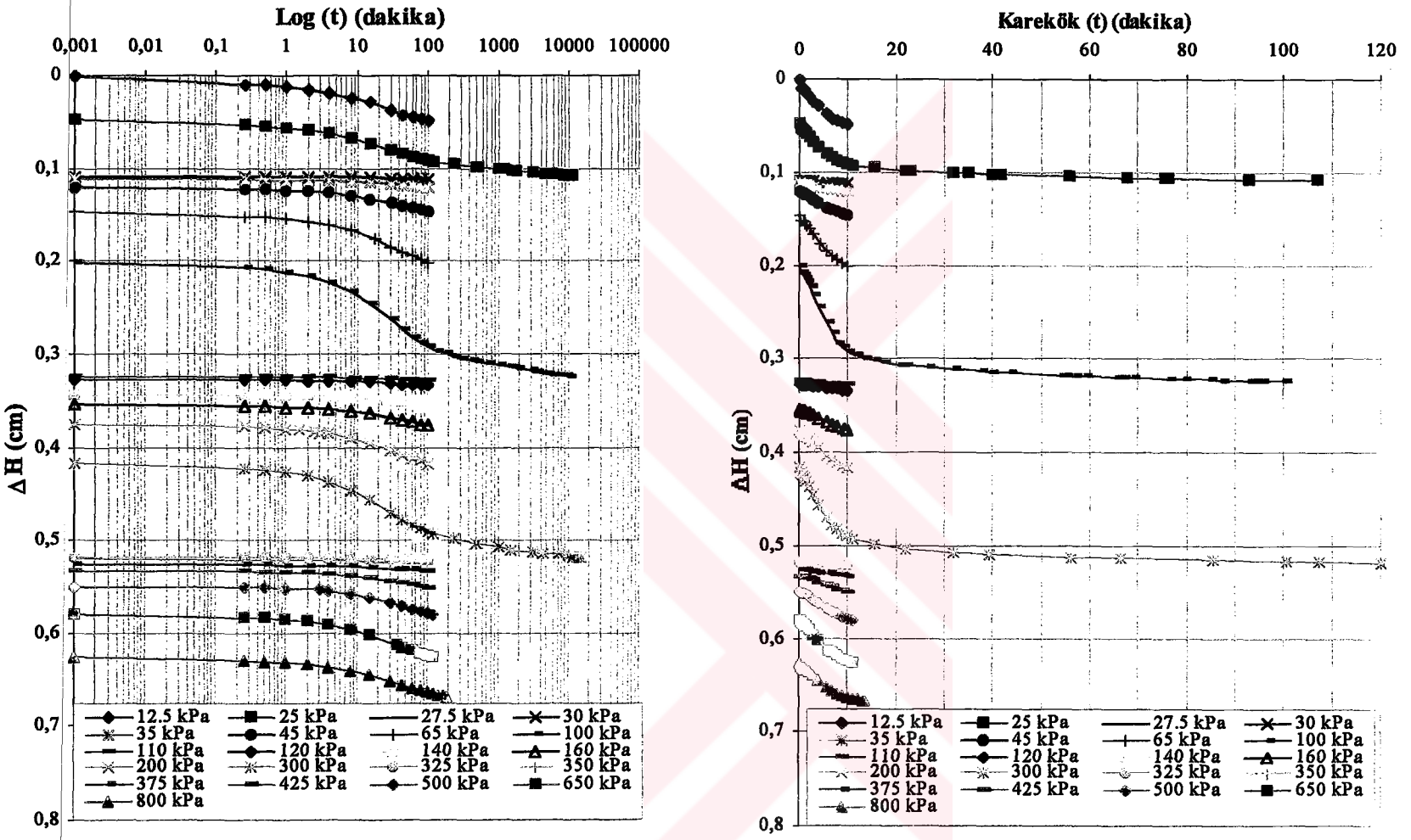
Şekil B.3. (a) A03 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



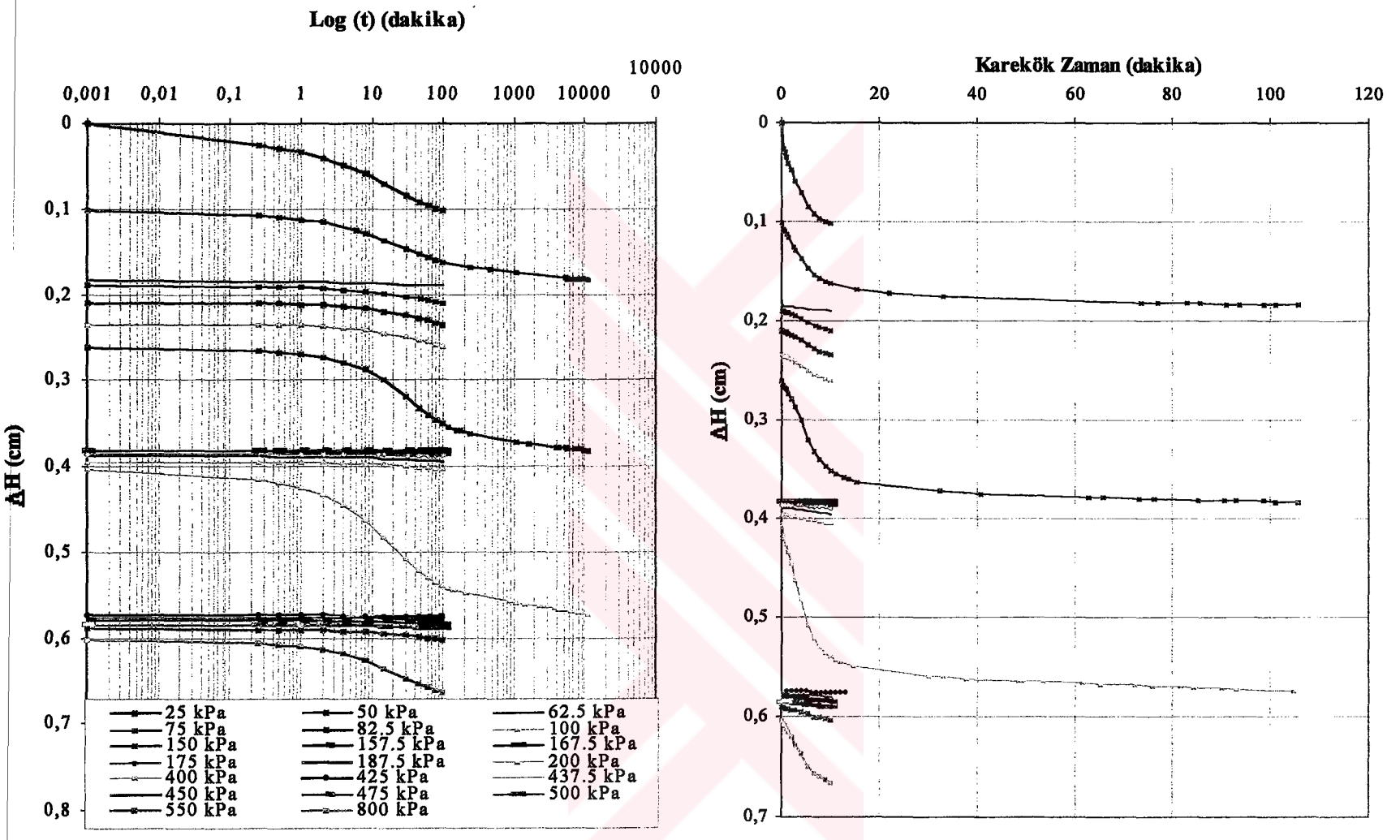
Şekil B.4. (a) B01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



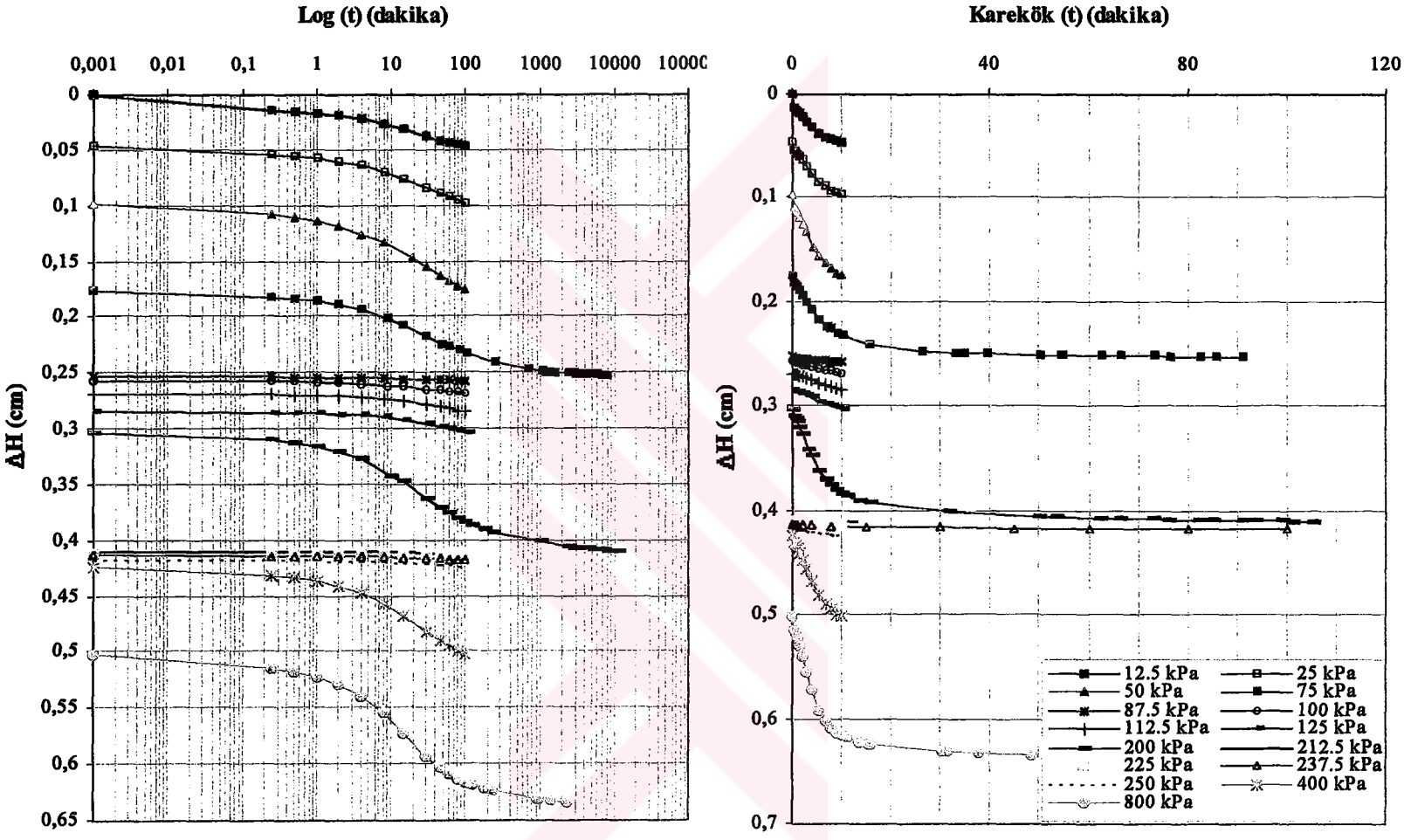
Şekil B.5. (a) D01 Nolu Deneye Ait Tüm ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



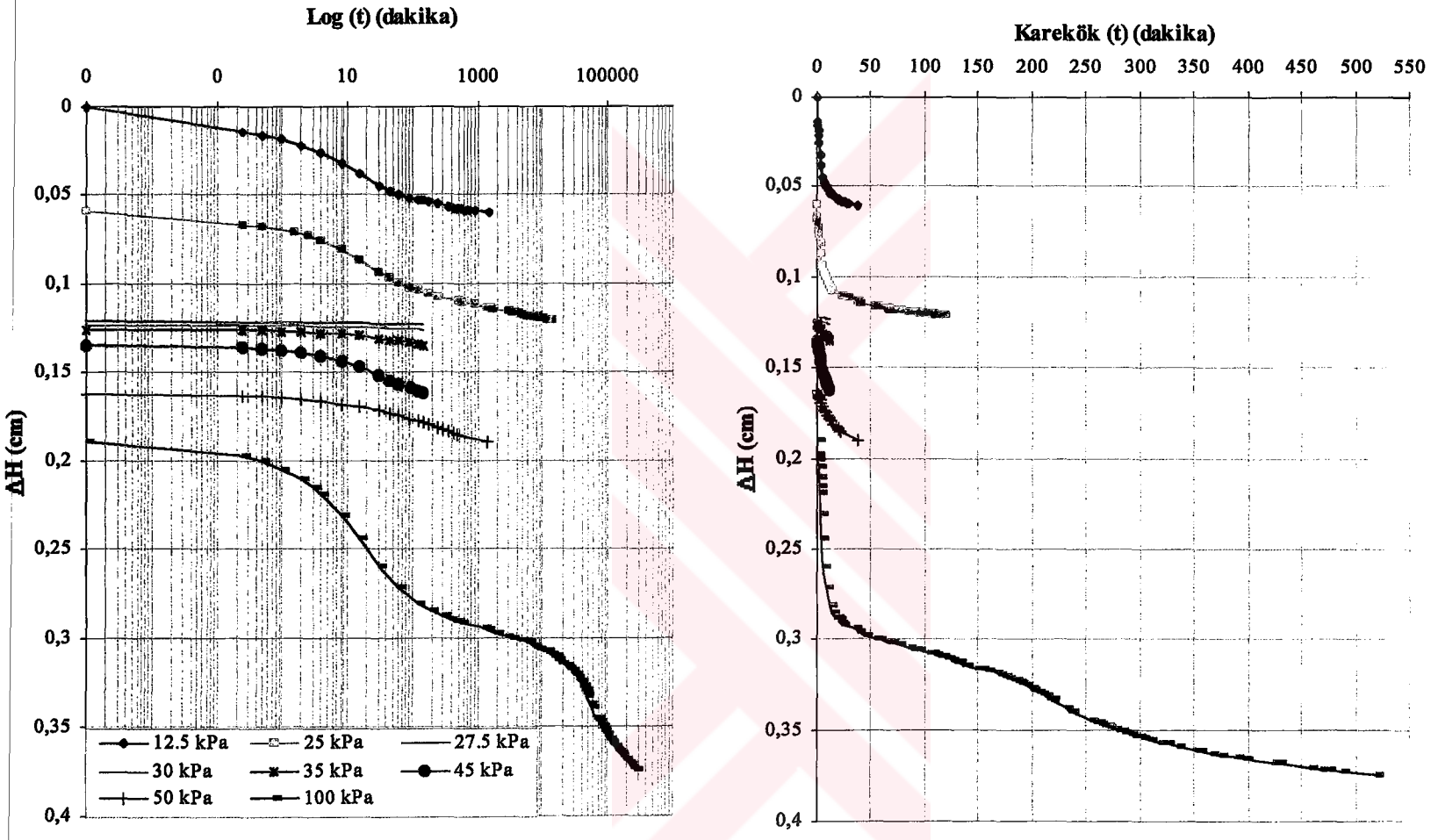
Şekil B.6. (a) A1 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



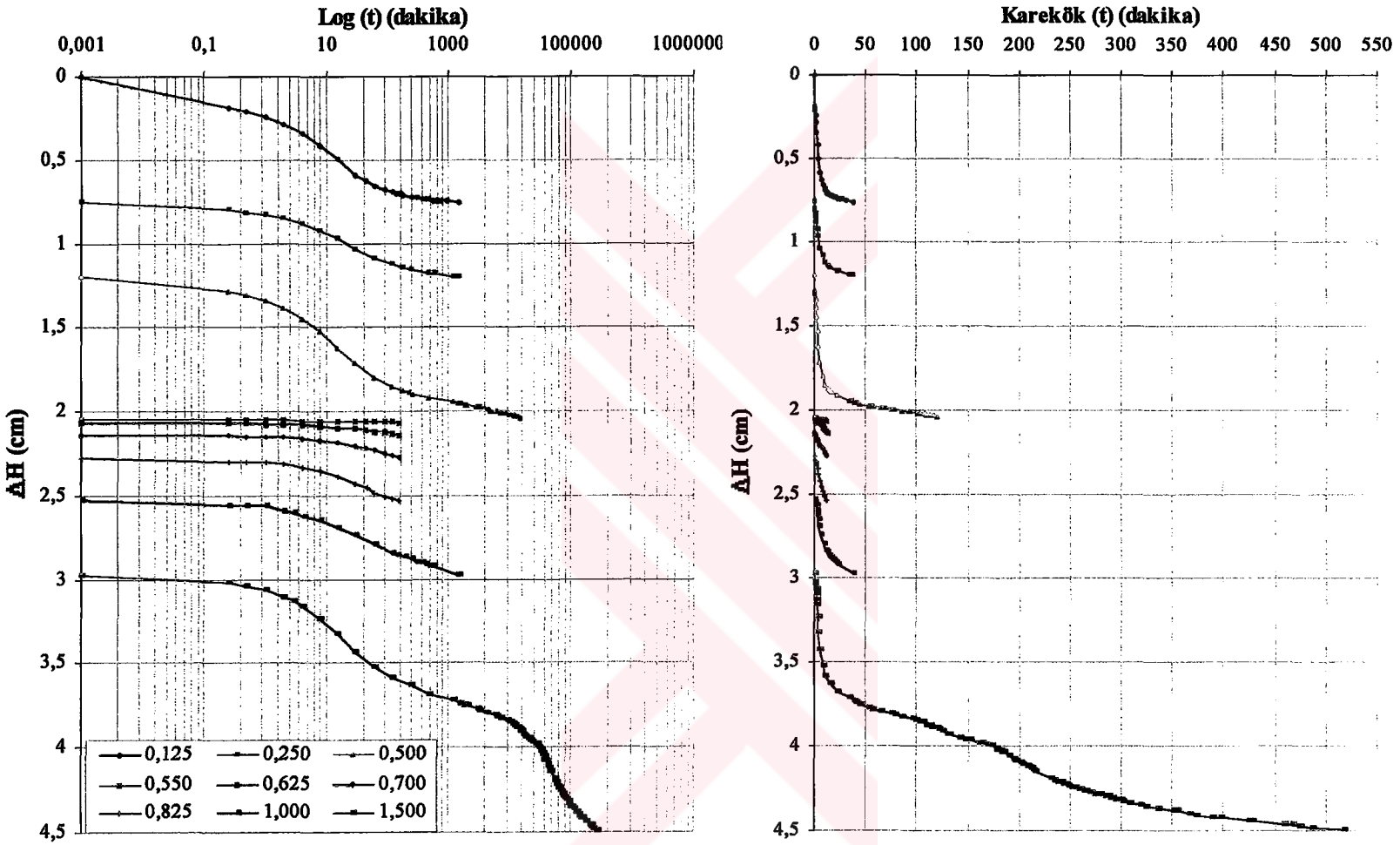
Şekil B.7. (a) A2 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



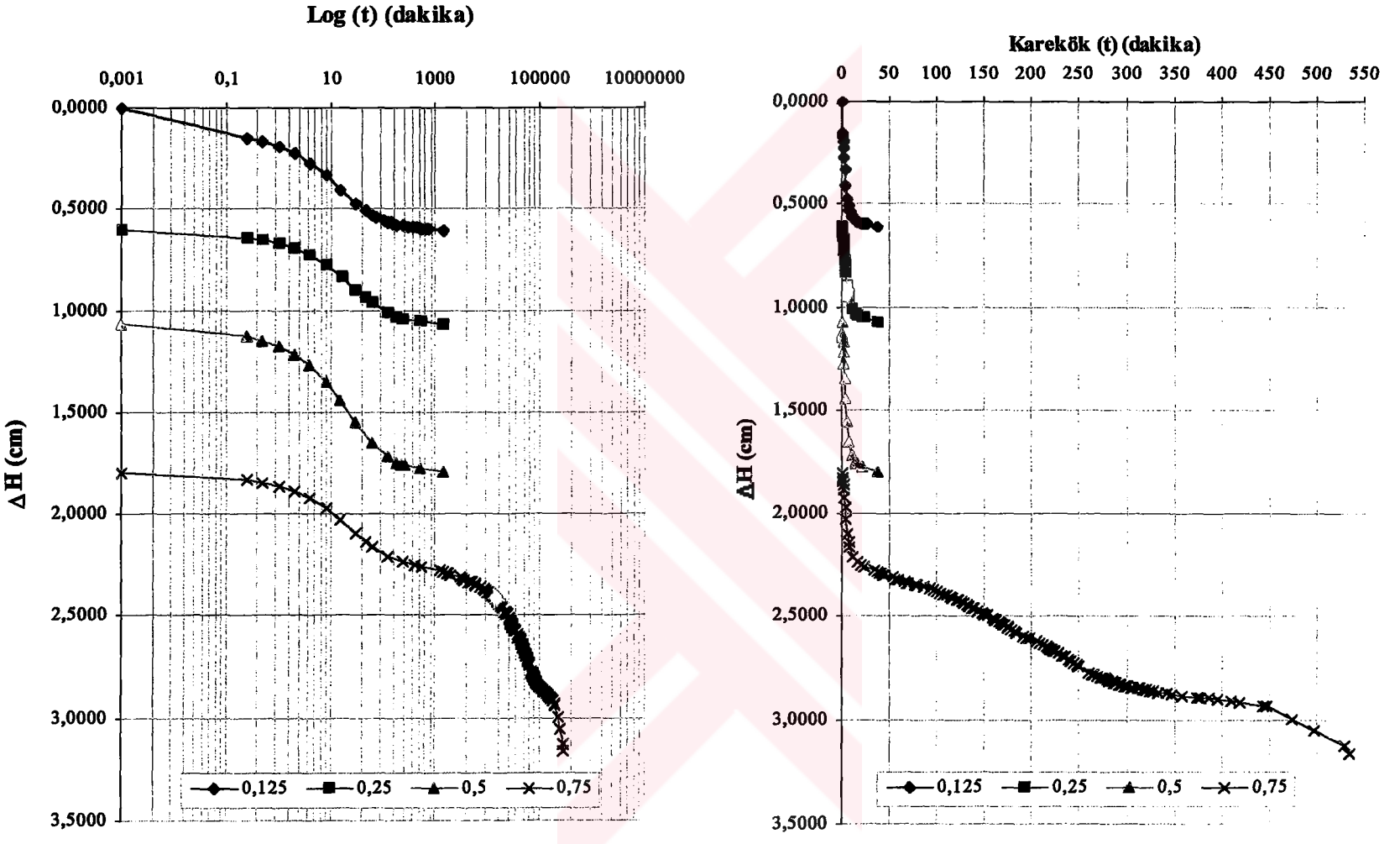
Şekil B.8. (a) A3 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



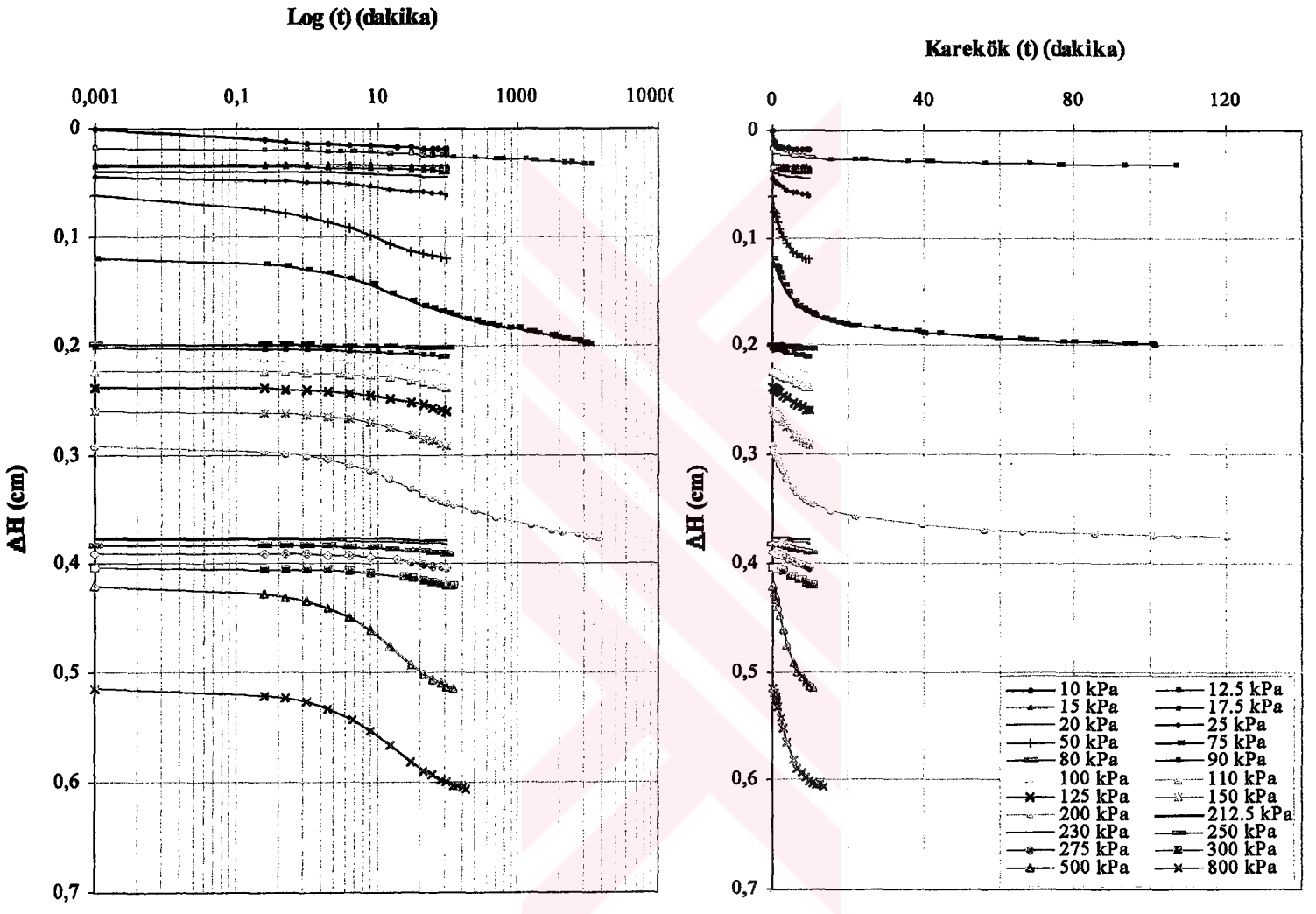
Şekil B.9. (a) B1 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



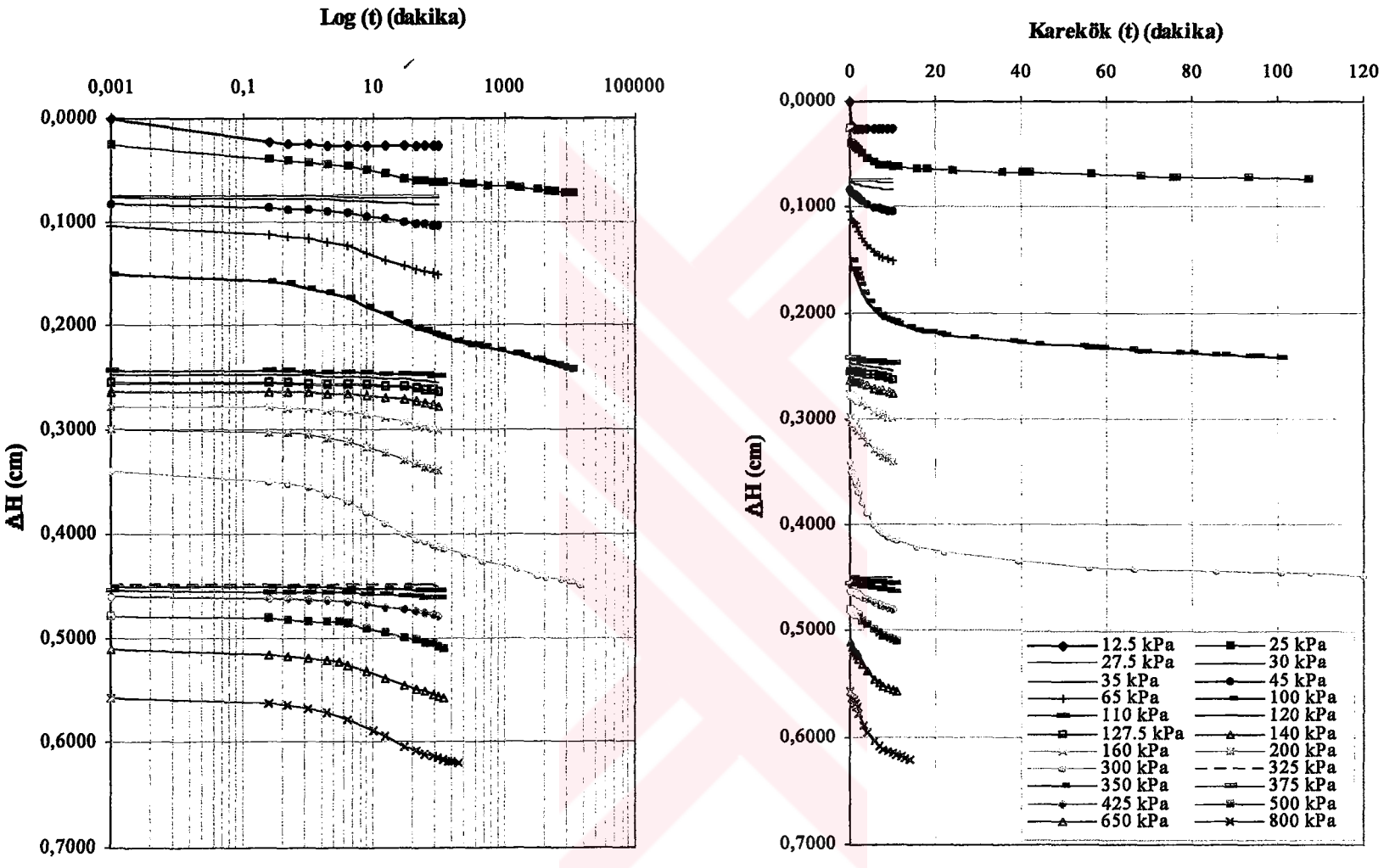
Şekil B.10. (a) B2 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



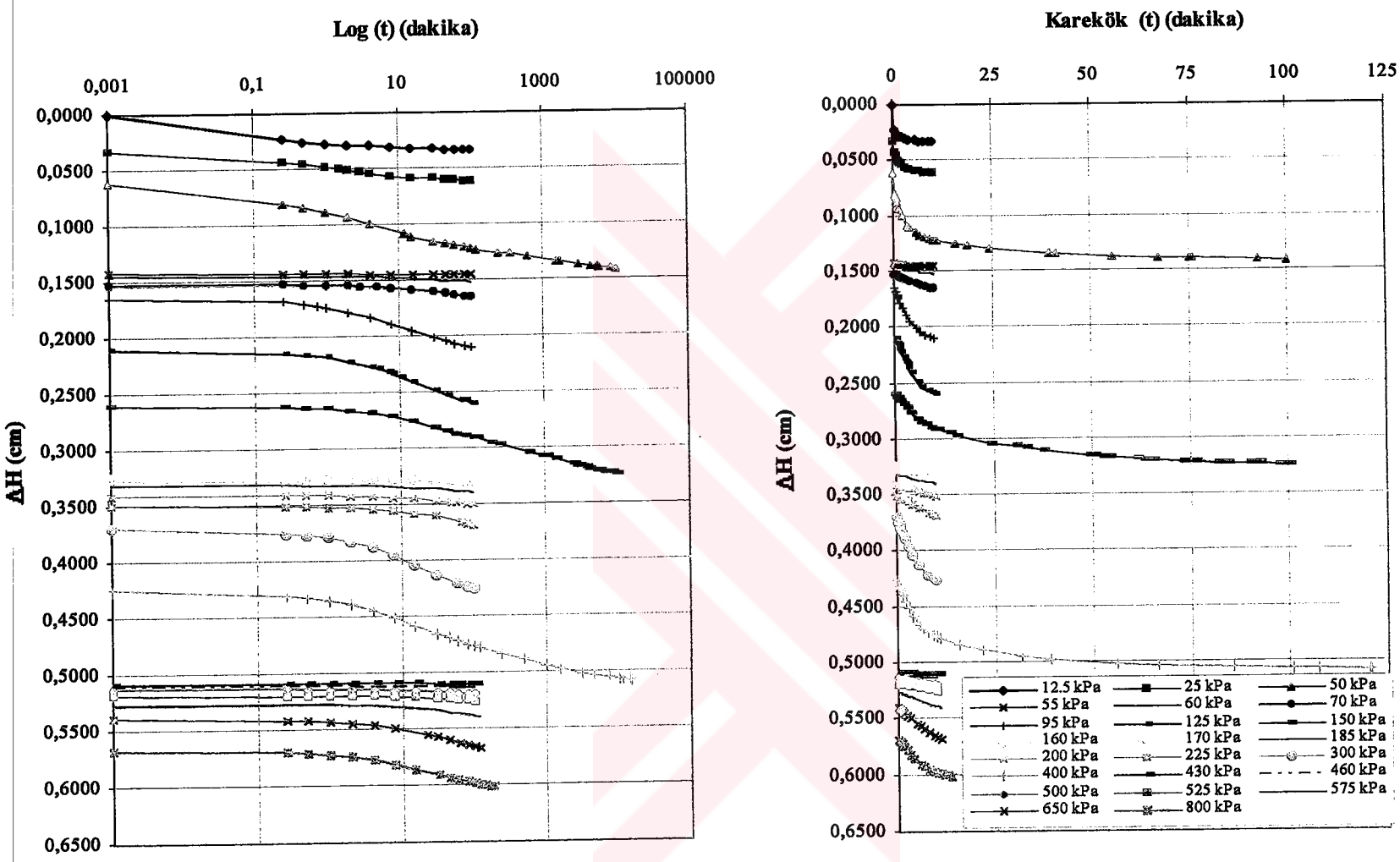
Şekil B.11. (a) B3 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



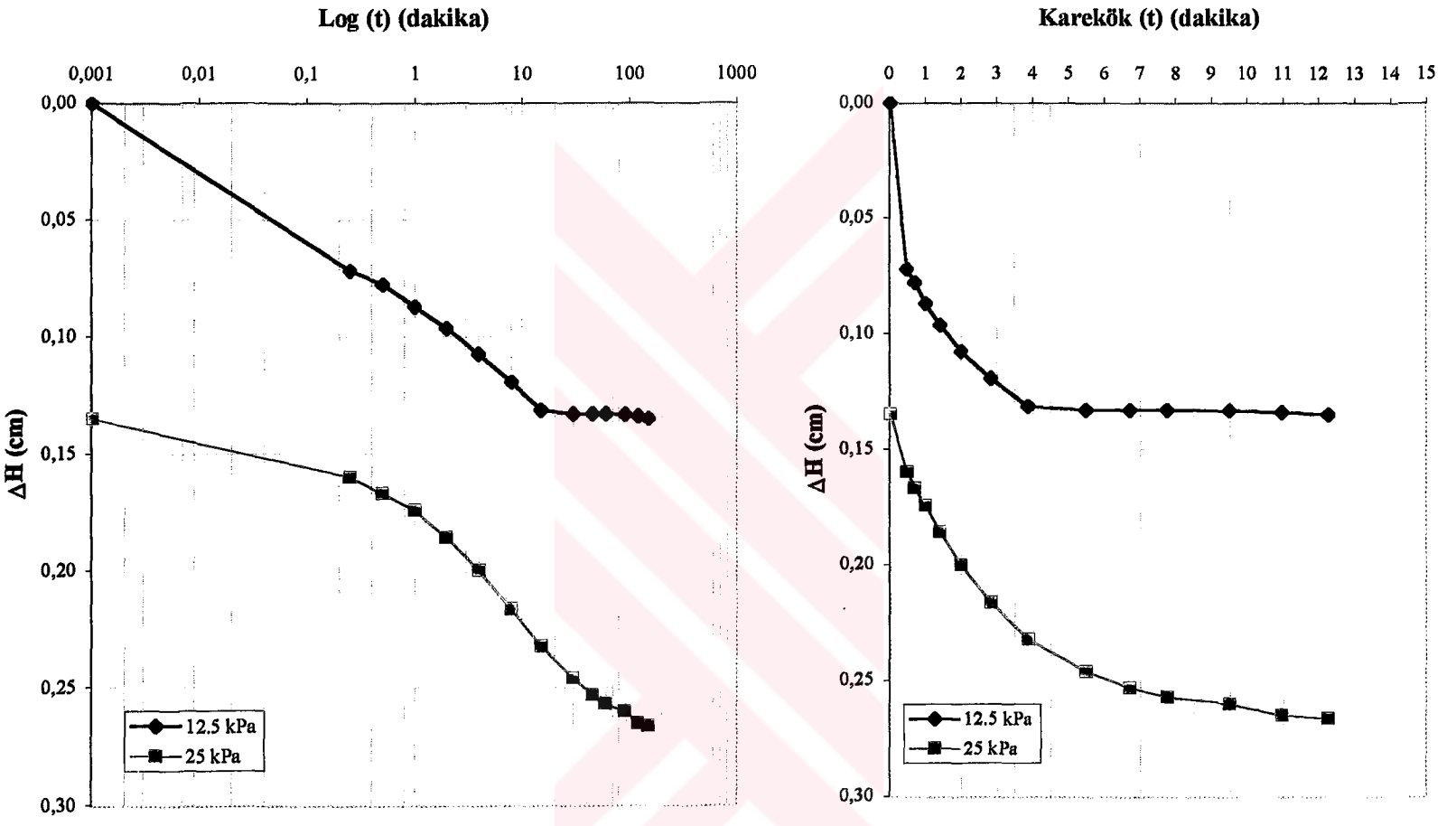
Şekil B.12. (a) C1 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



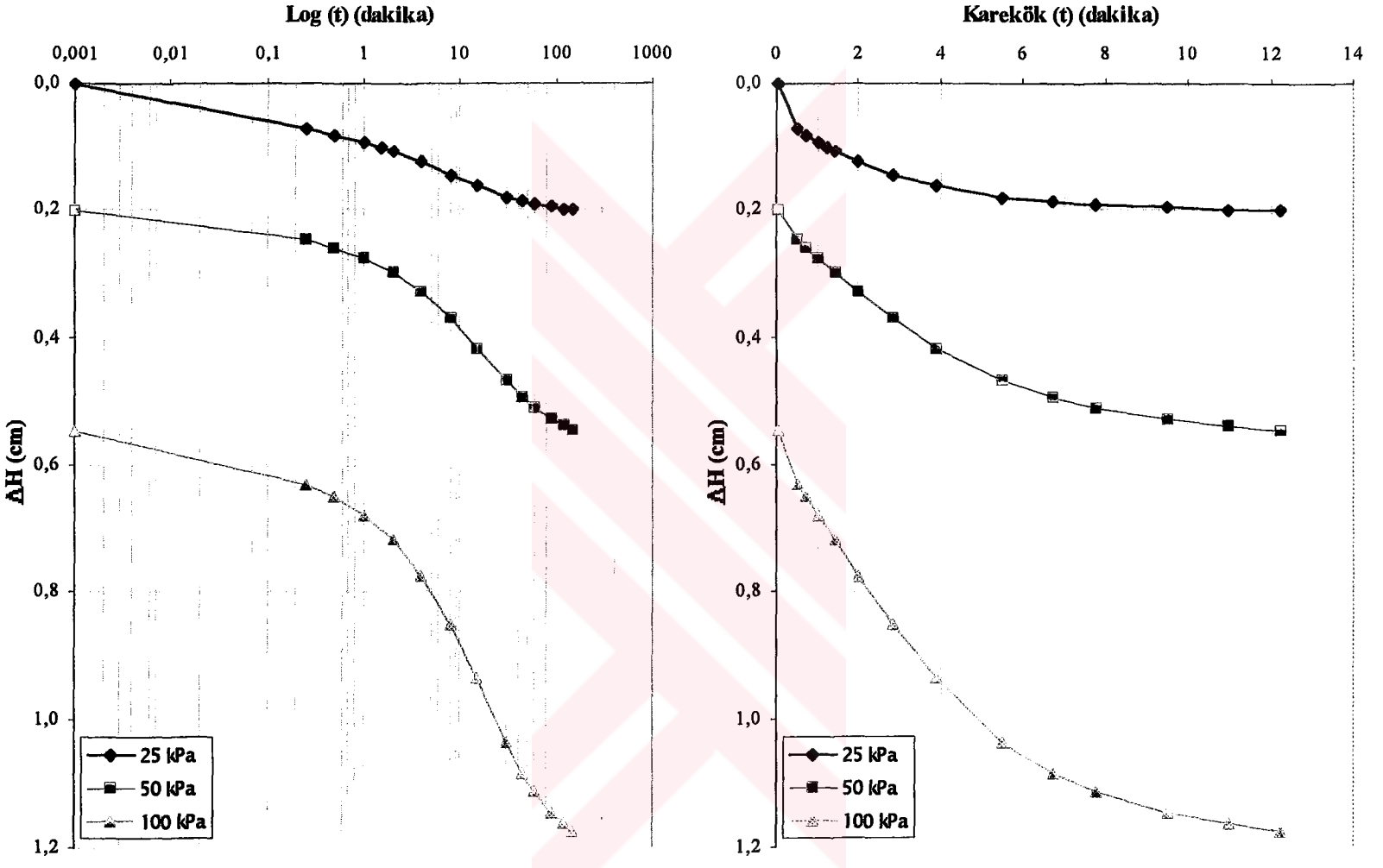
Şekil B.12. (a) C2 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



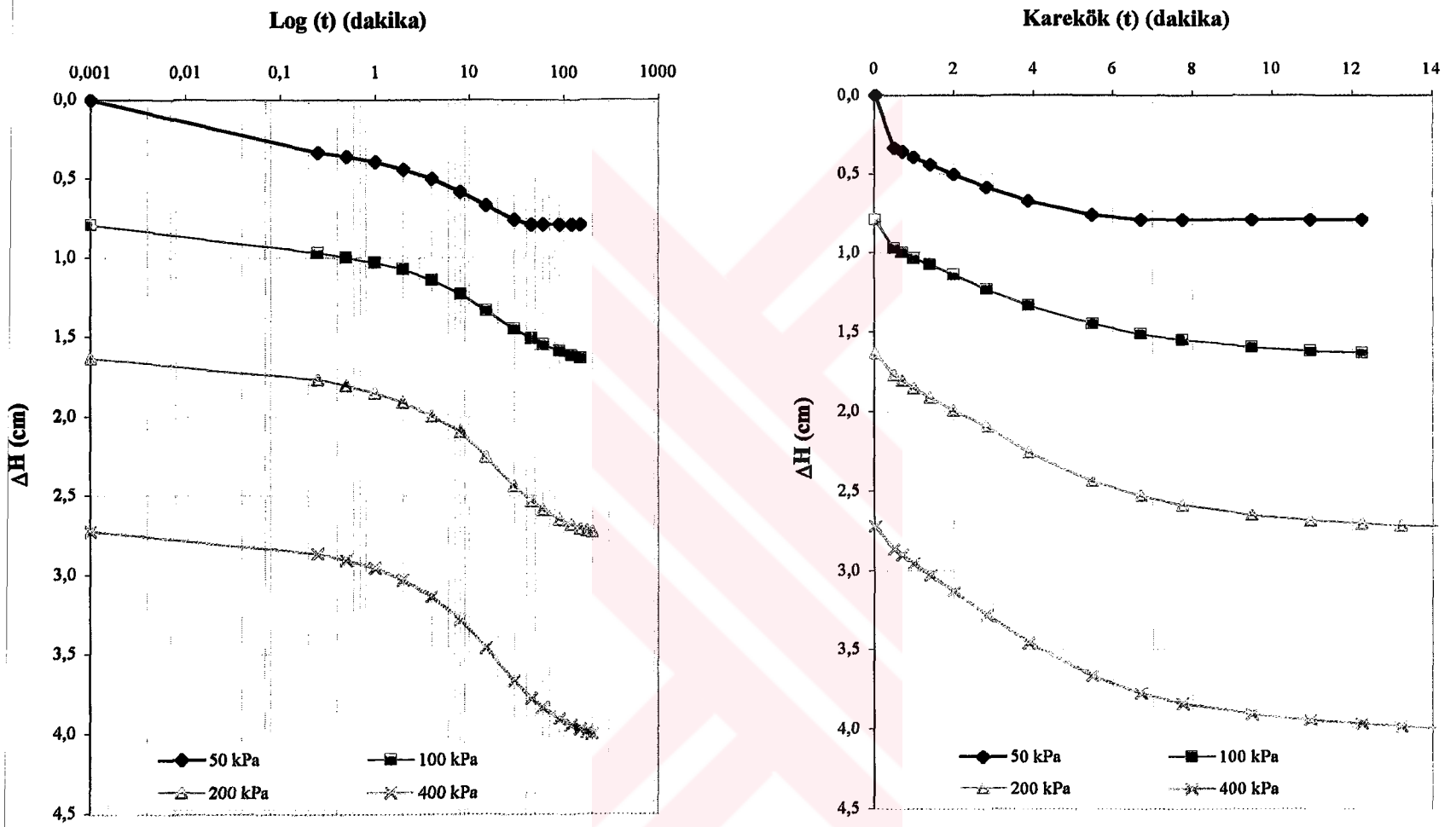
Şekil B.14. (a) C3 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



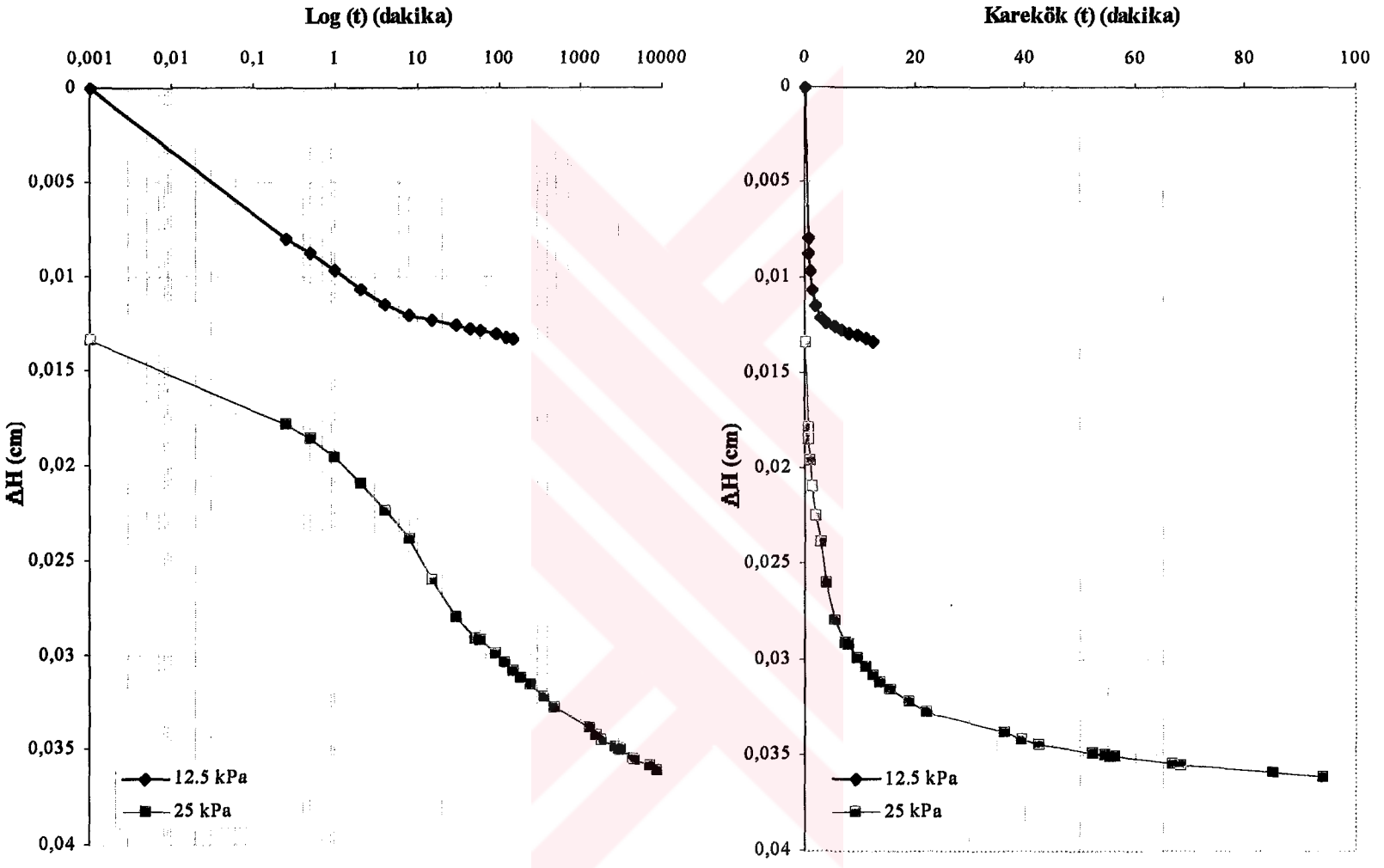
Şekil B.15. (a) D1 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



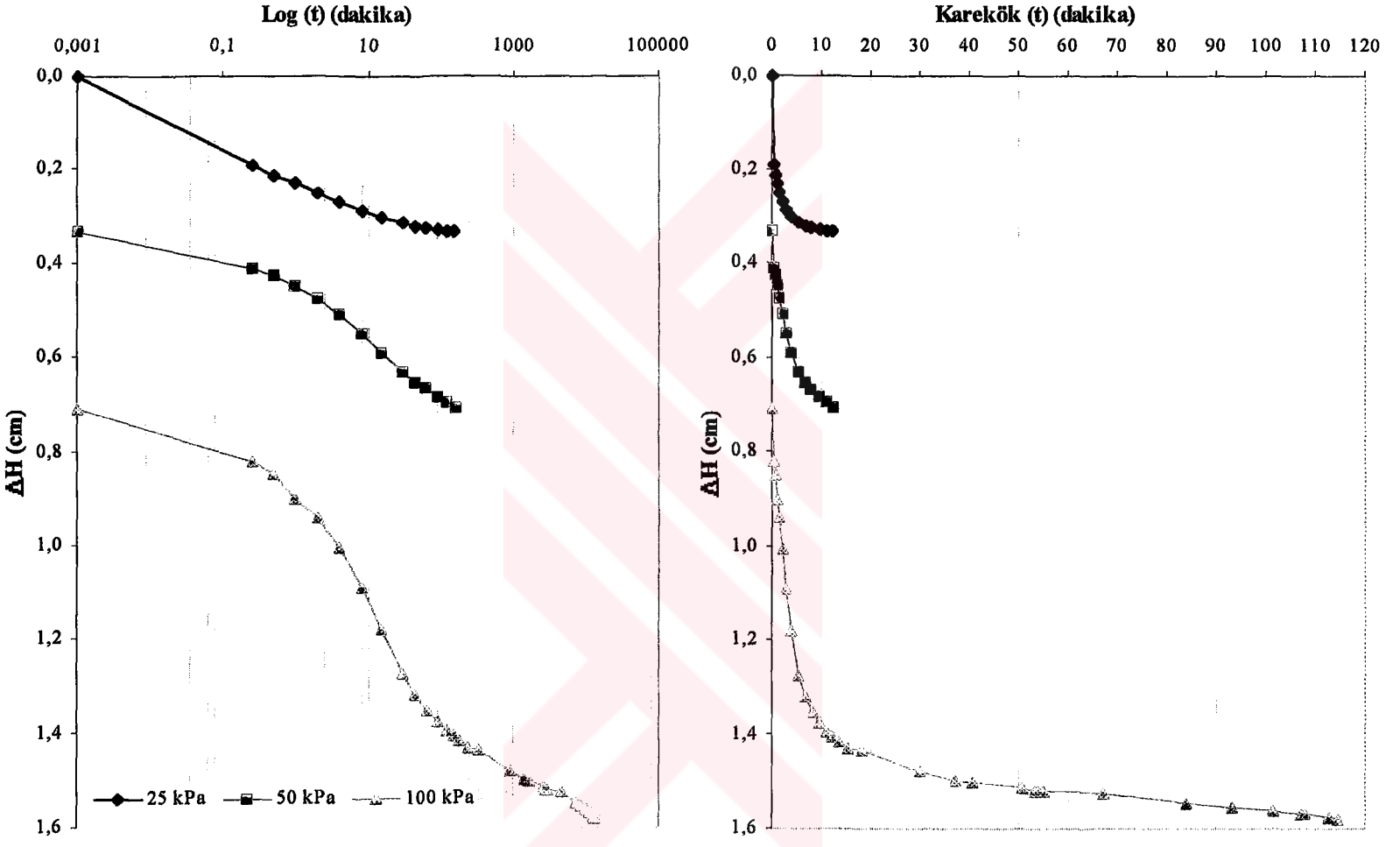
Şekil B.16. (a) D2 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



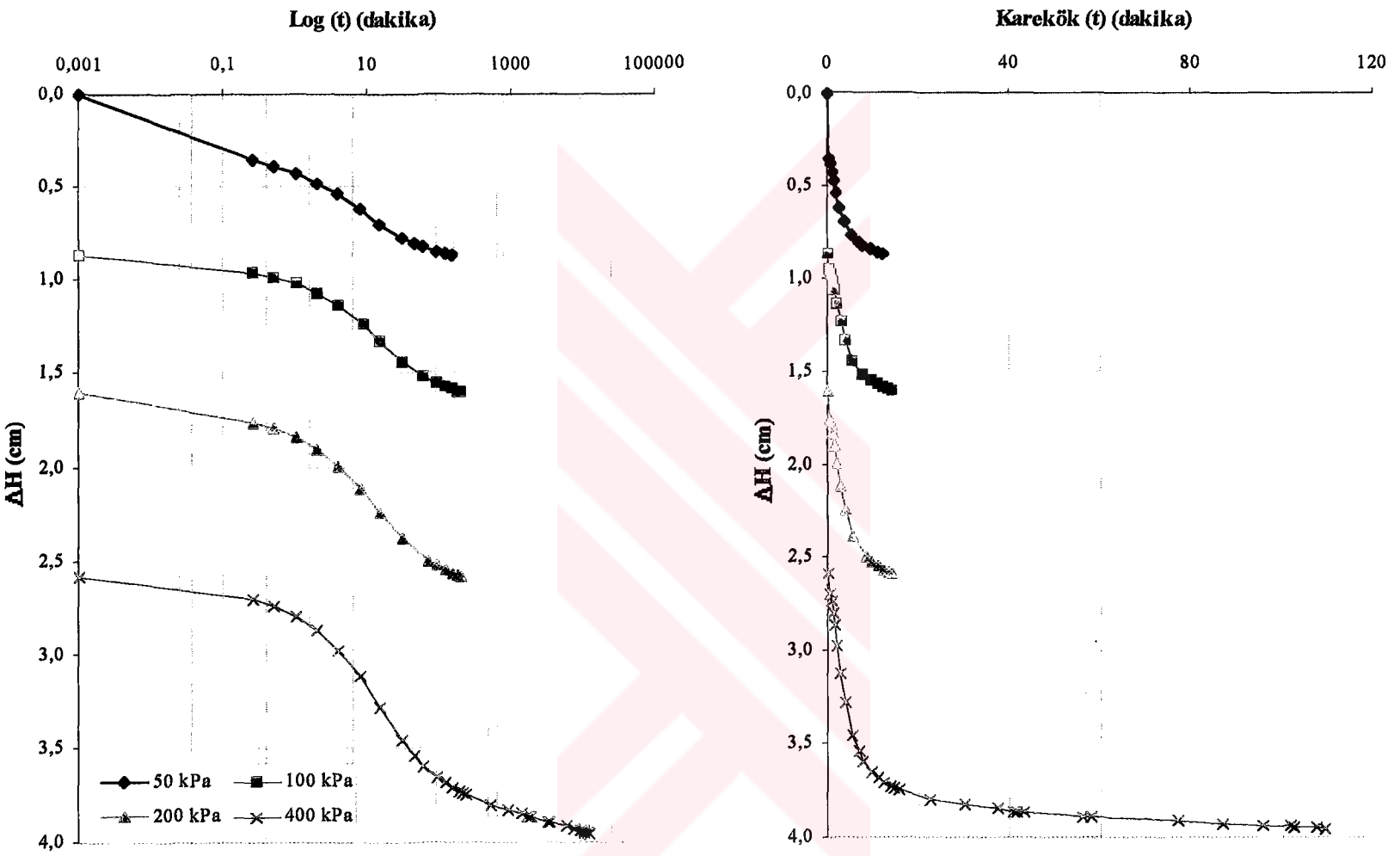
Şekil B.17. (a) D3 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



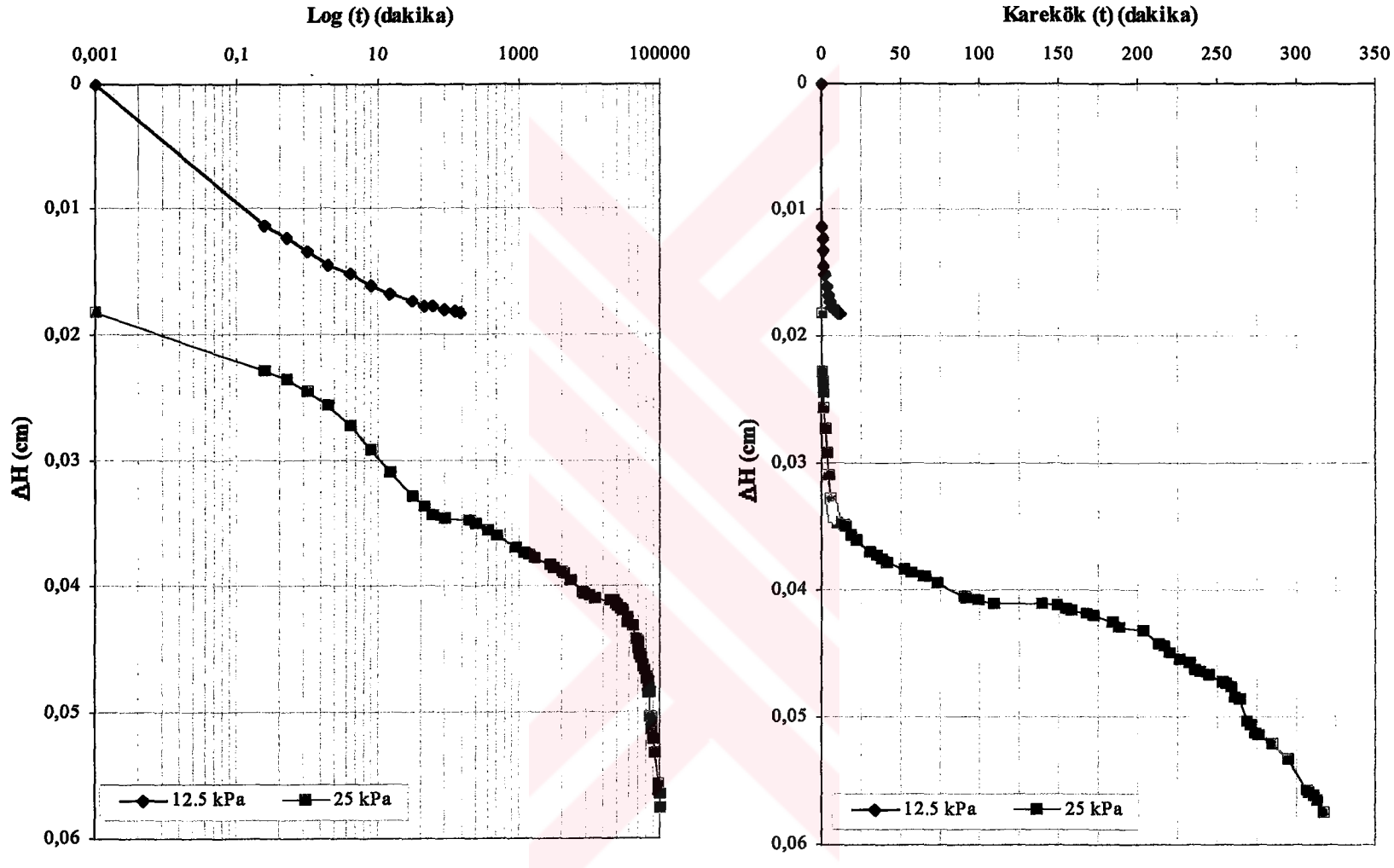
Şekil B.18. (a) D4 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



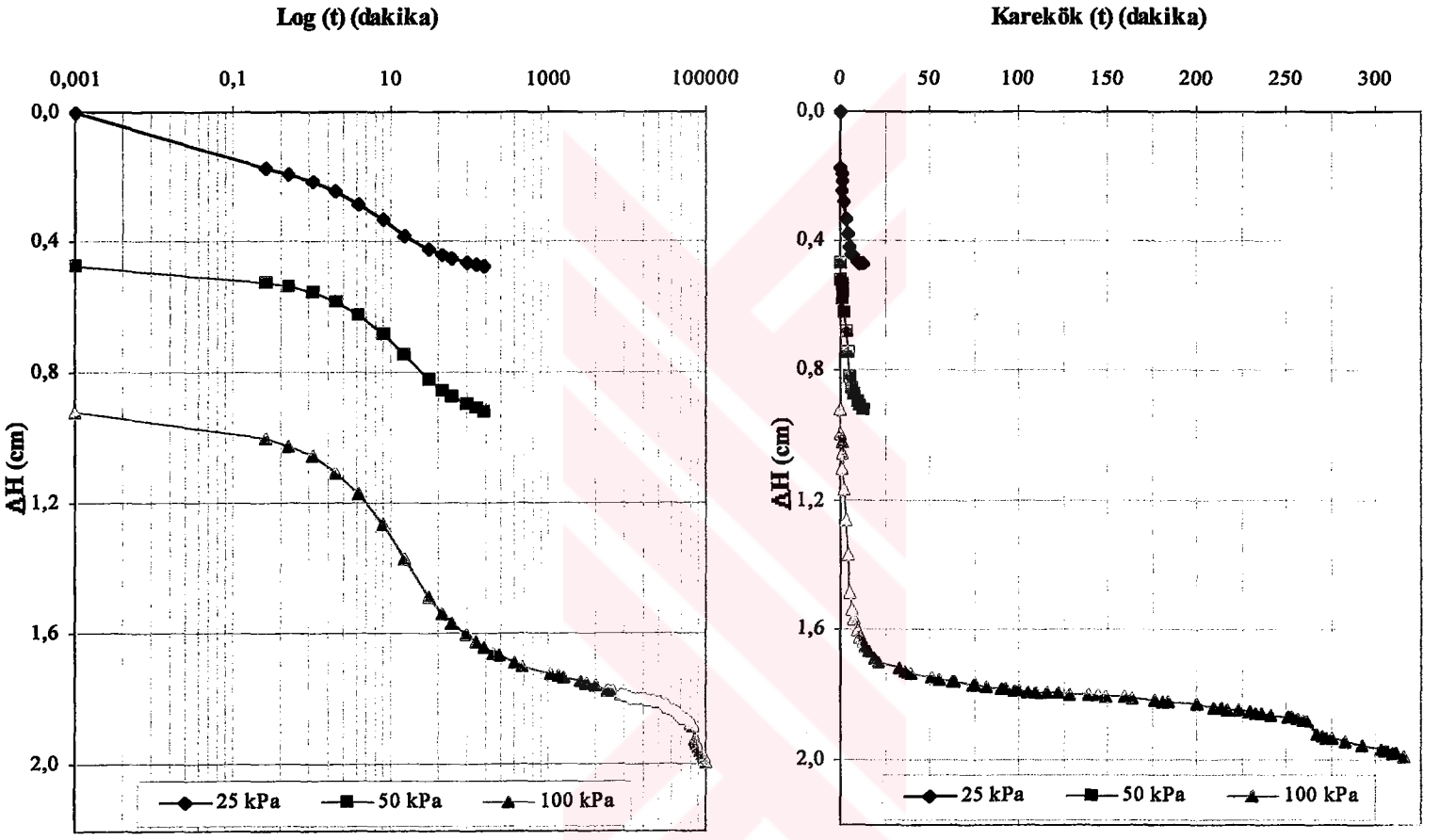
Şekil B.19. (a) D5 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



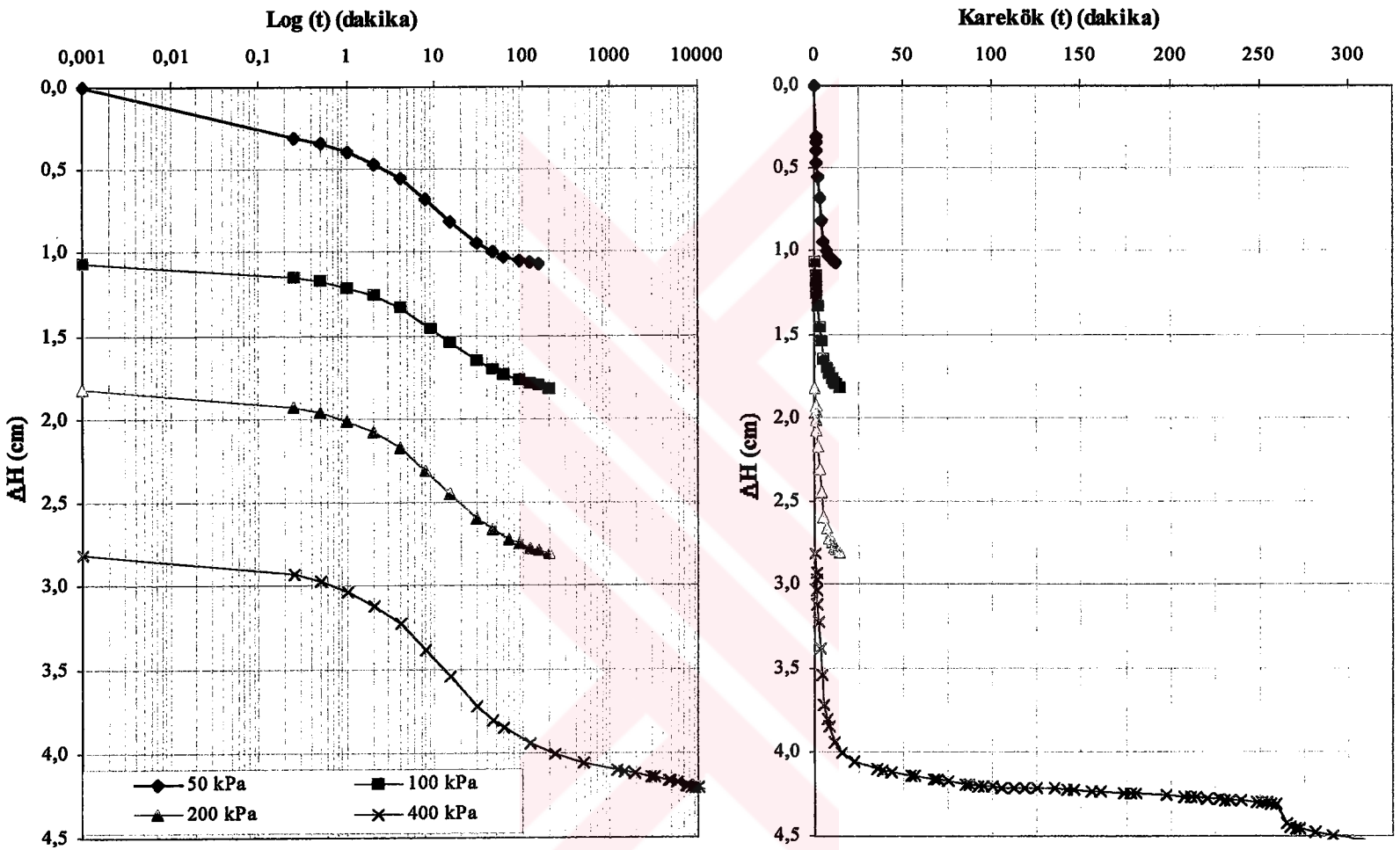
Şekil B.20. (a) D6 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



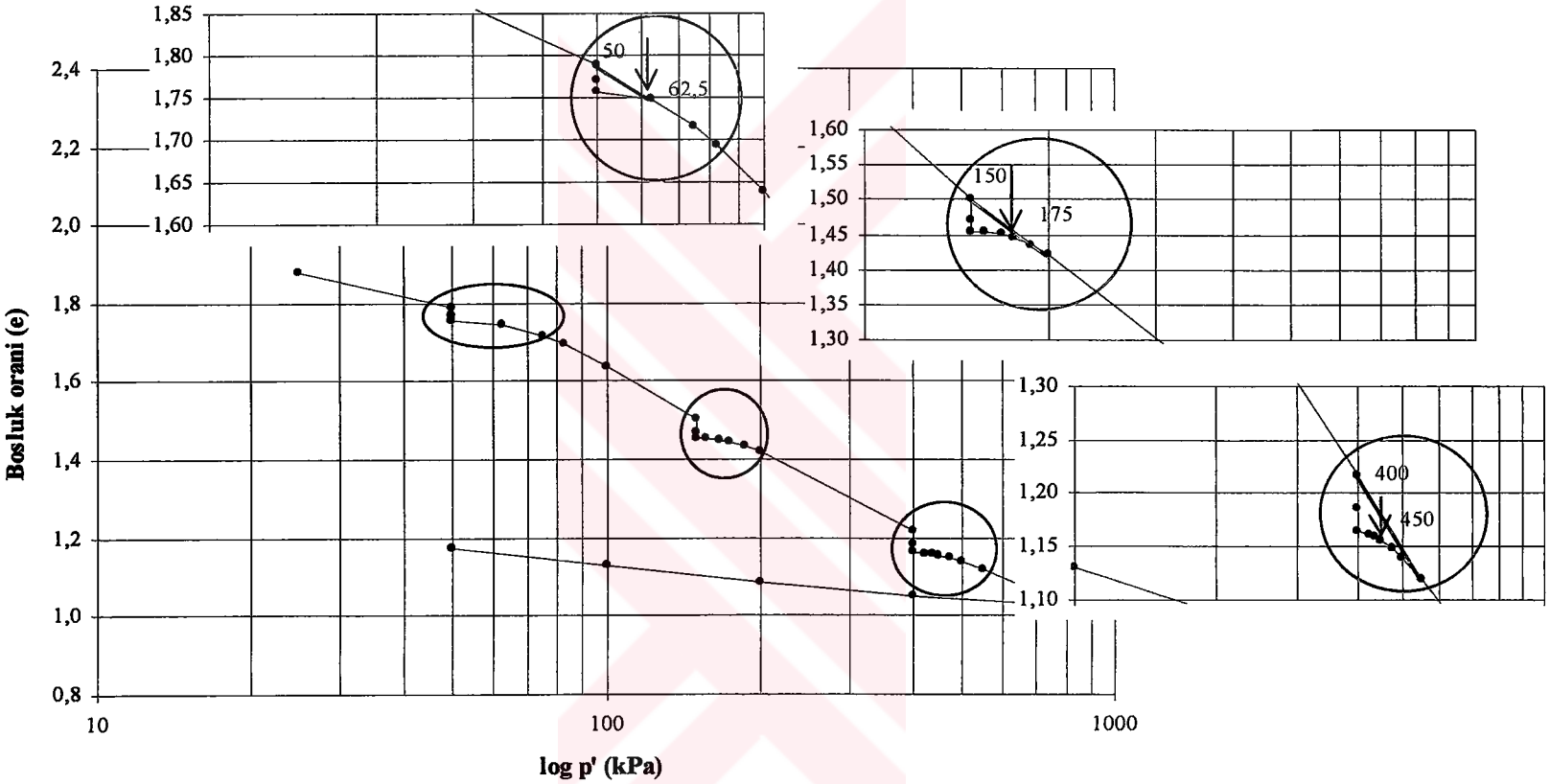
Şekil B.21. (a) D7 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



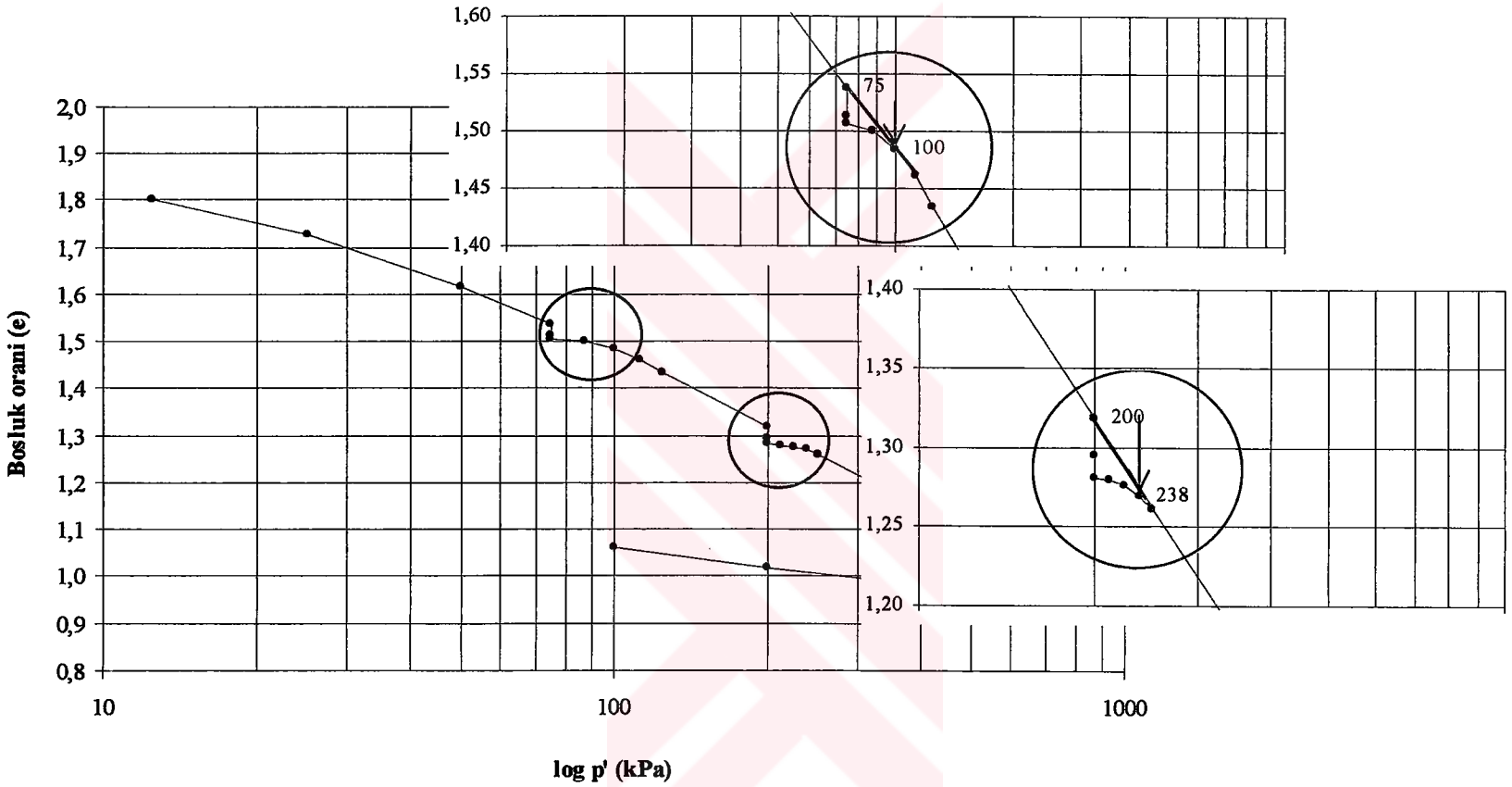
Şekil B.22. (a) D8 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



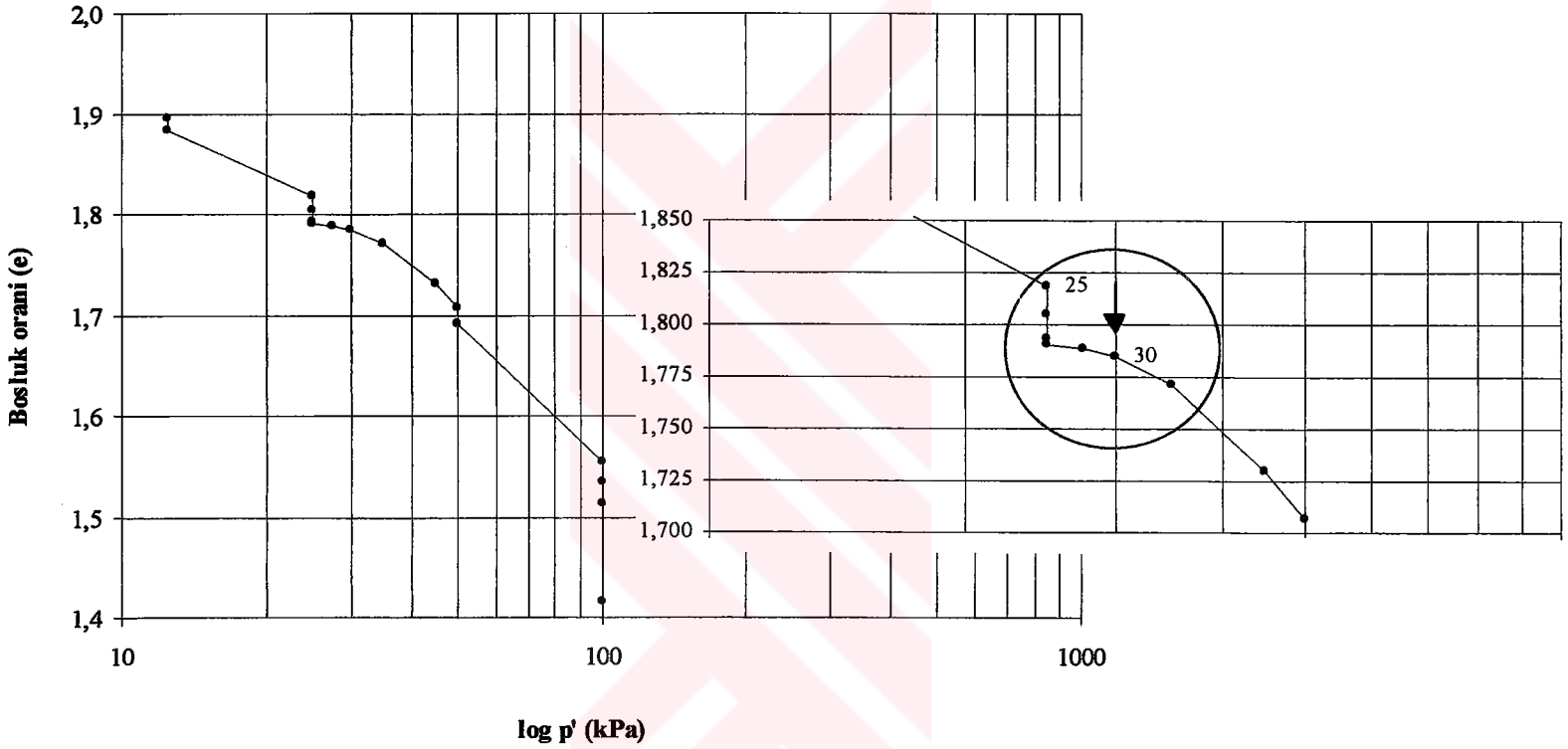
Şekil B.23. (a) D9 Nolu Deneye Ait ΔH-log (t) Grafiği. (b) ΔH-karekök (t) Grafiği



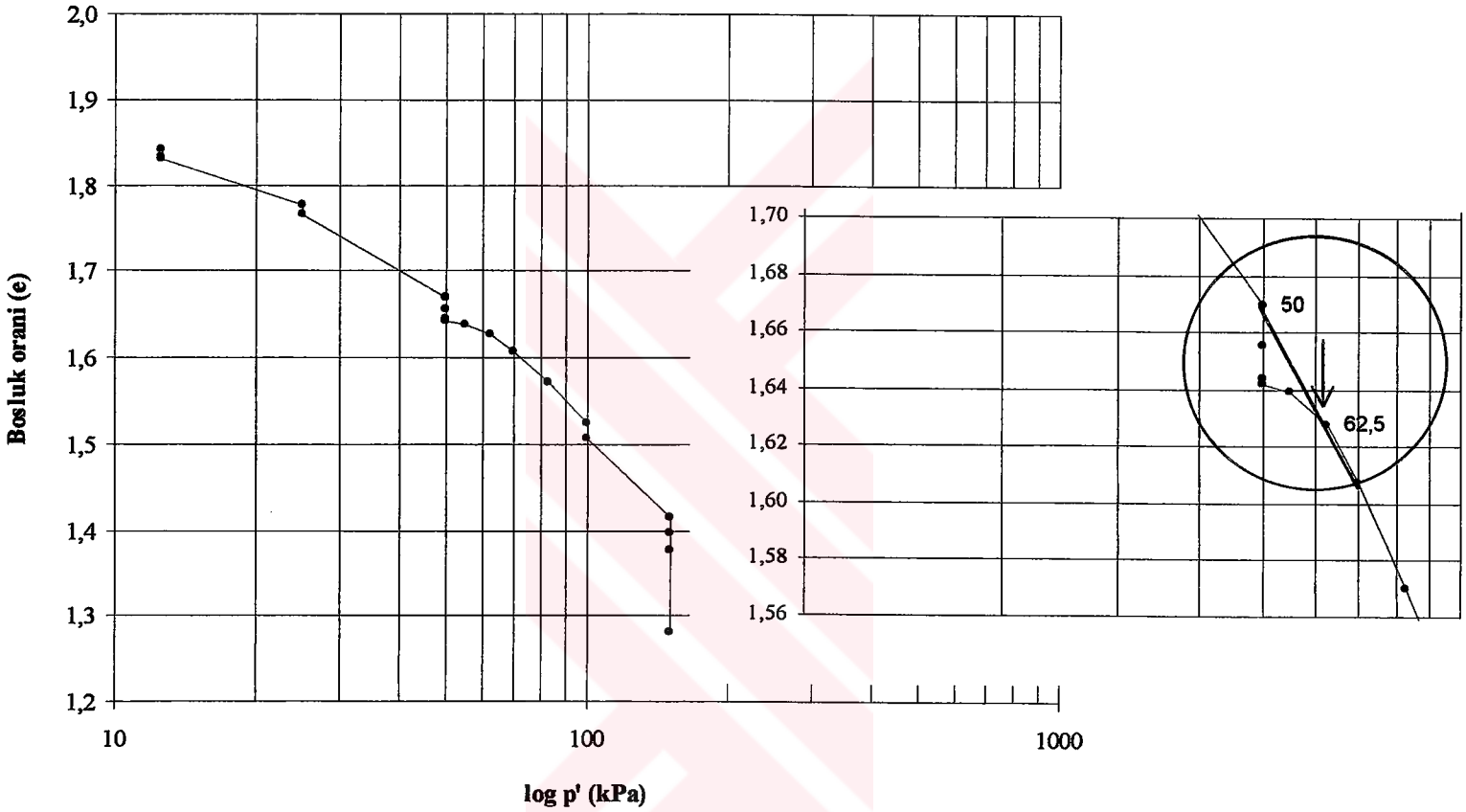
Şekil C.1. A2 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



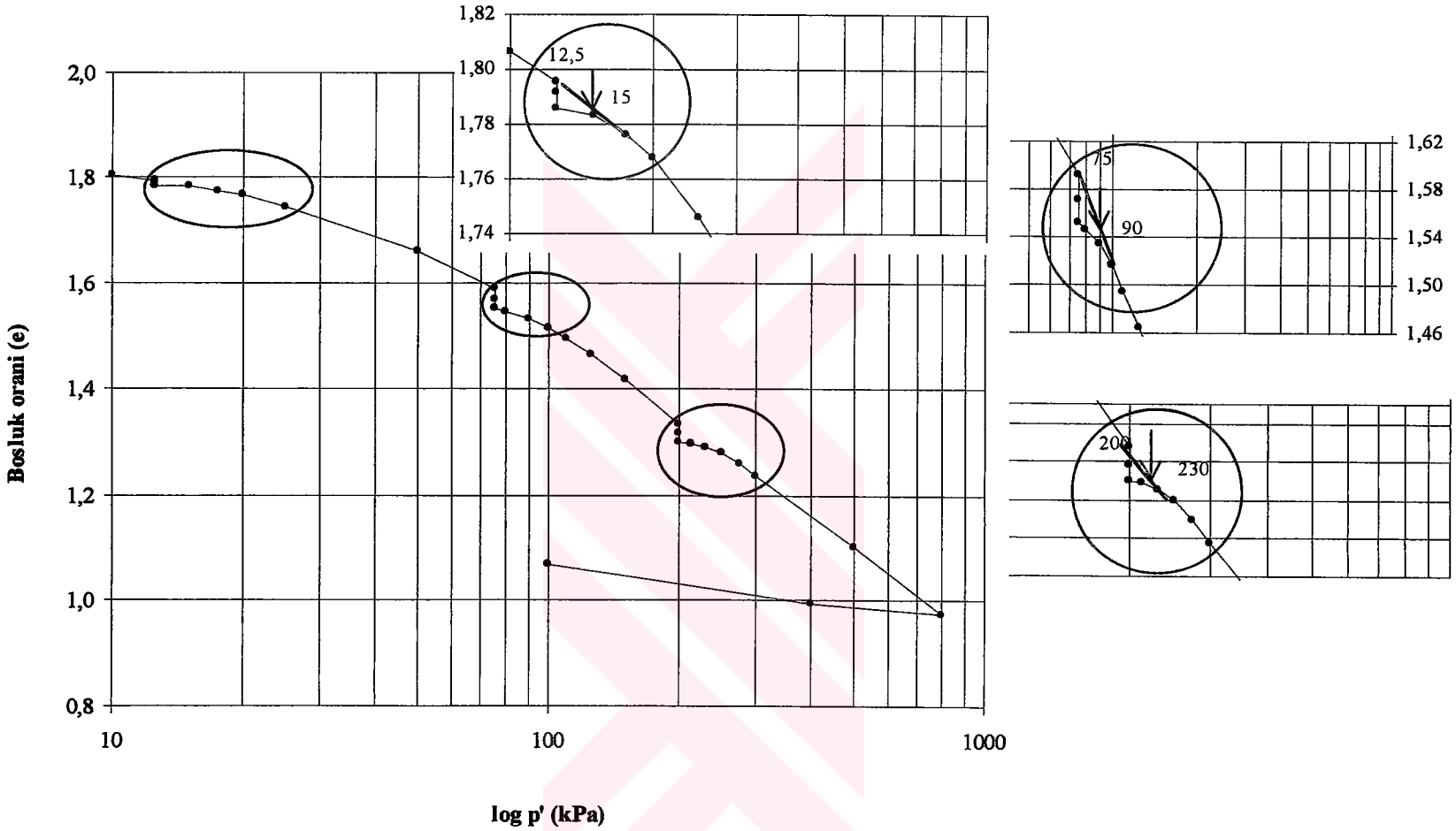
Şekil C.2. A3 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



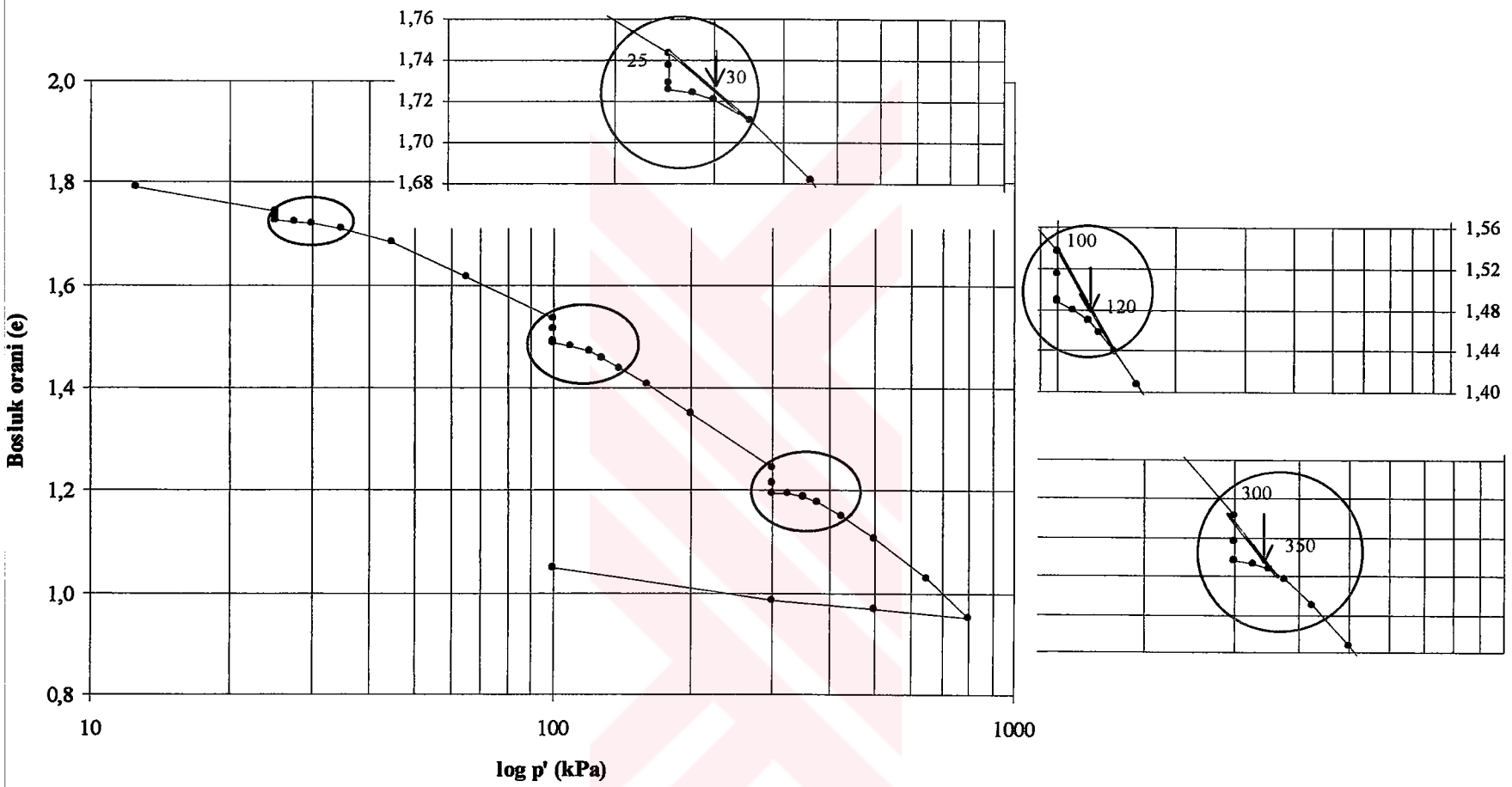
Şekil C.3. B1 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



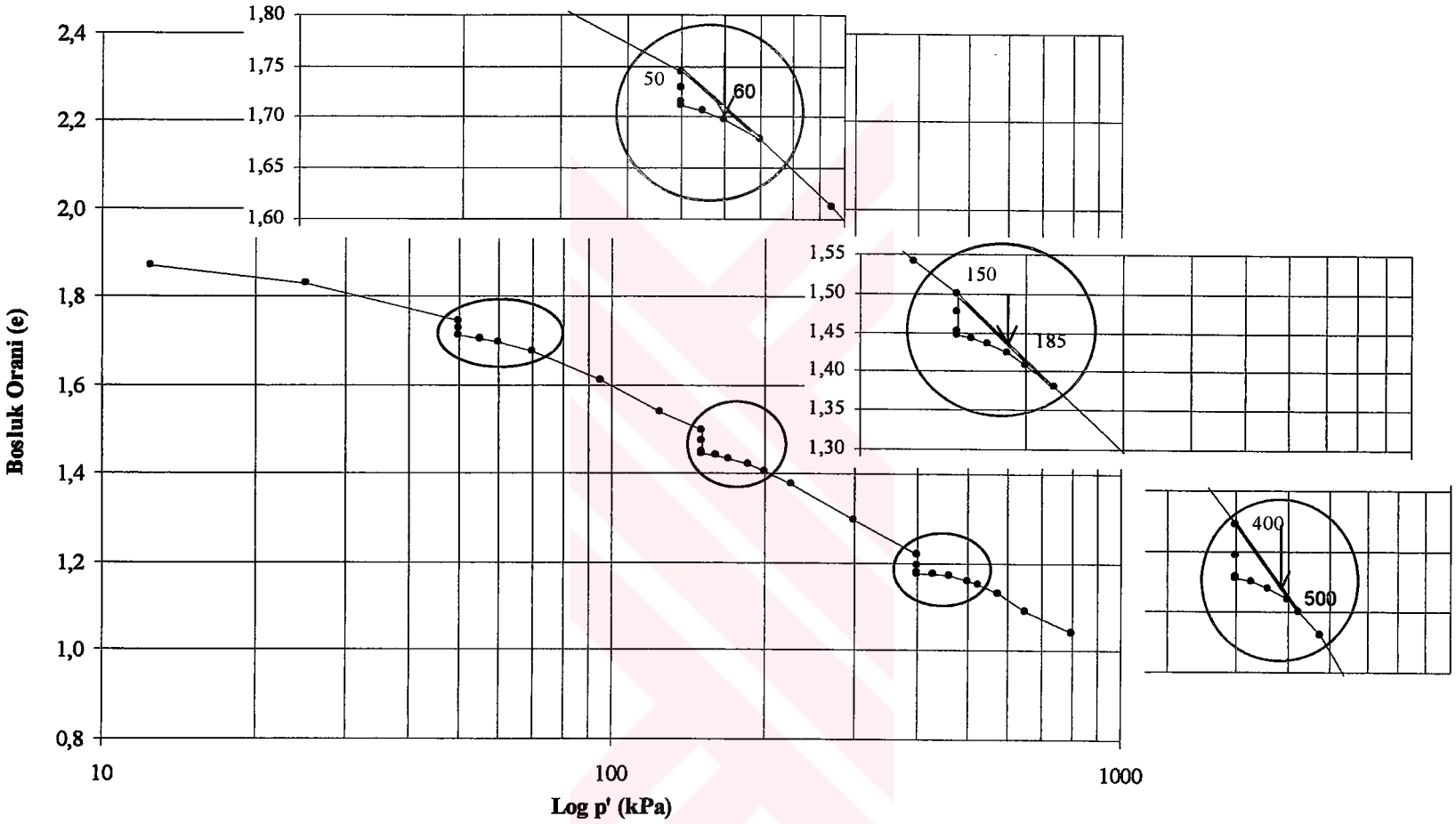
Şekil C.4. B2 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



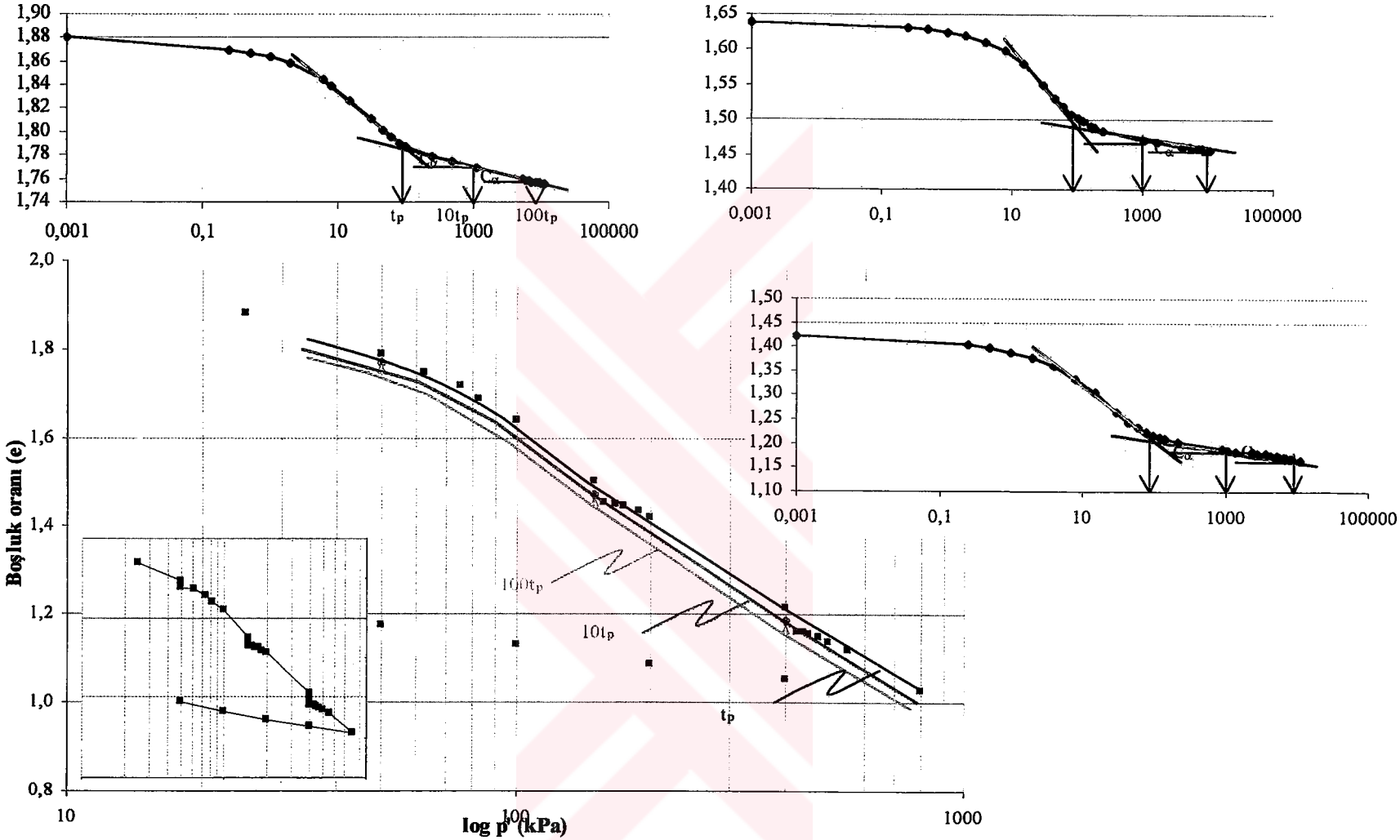
Şekil C.5. C1 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



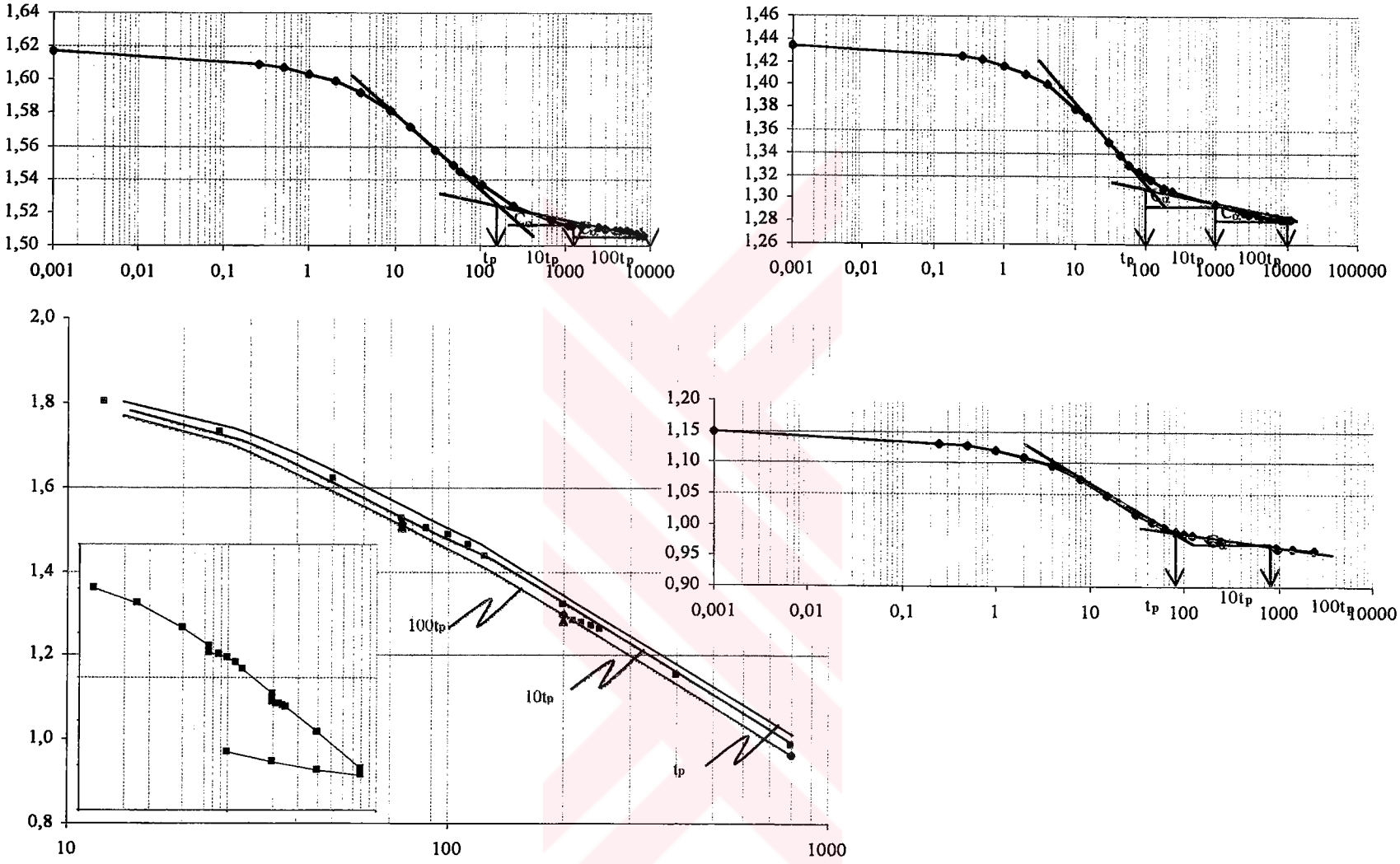
Şekil C.6. C2 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



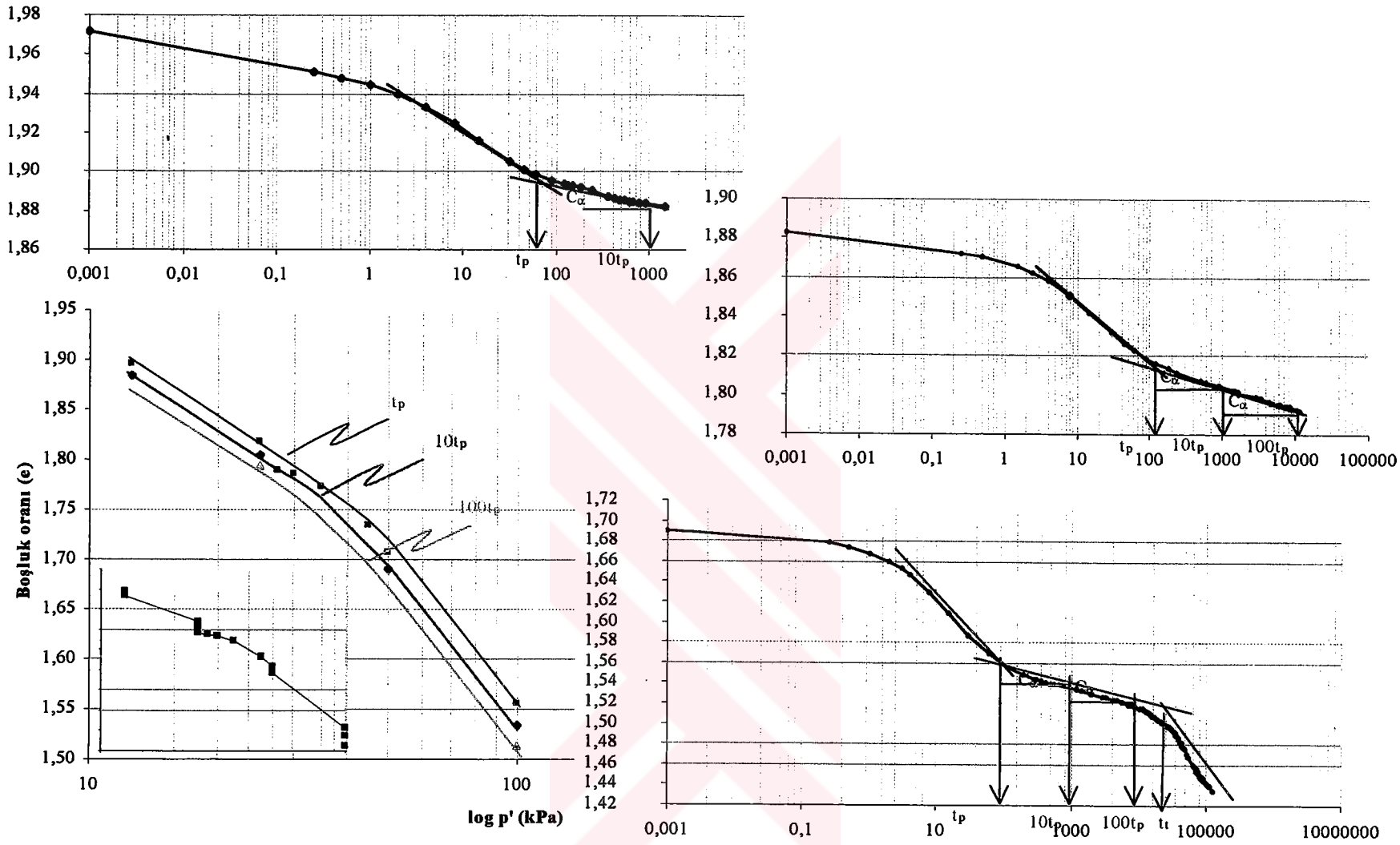
Şekil C.7. C3 Nolu Deneye Ait e-log p' Eğrisi



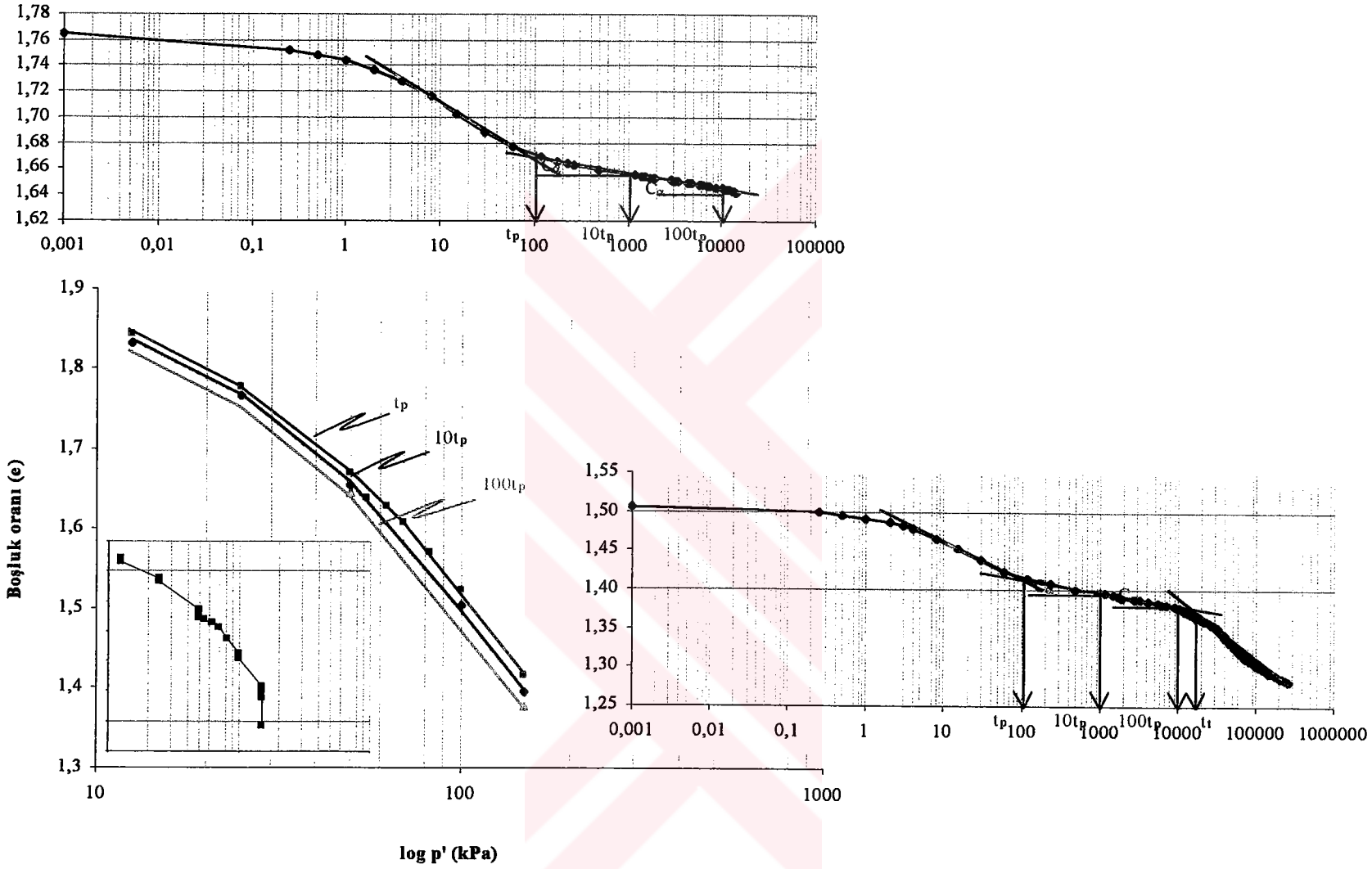
Şekil C.8. A2 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



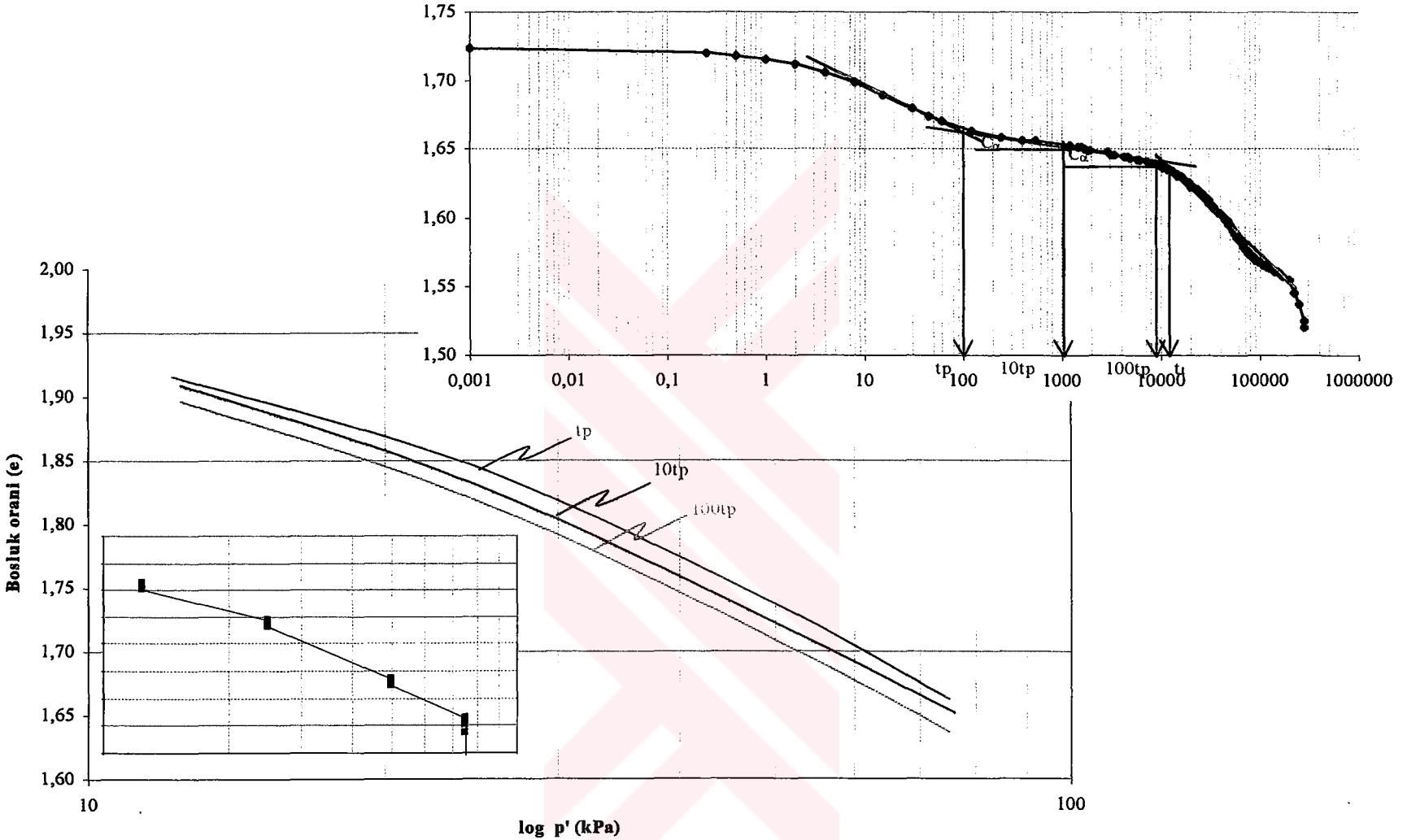
Şekil C.9. A3 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



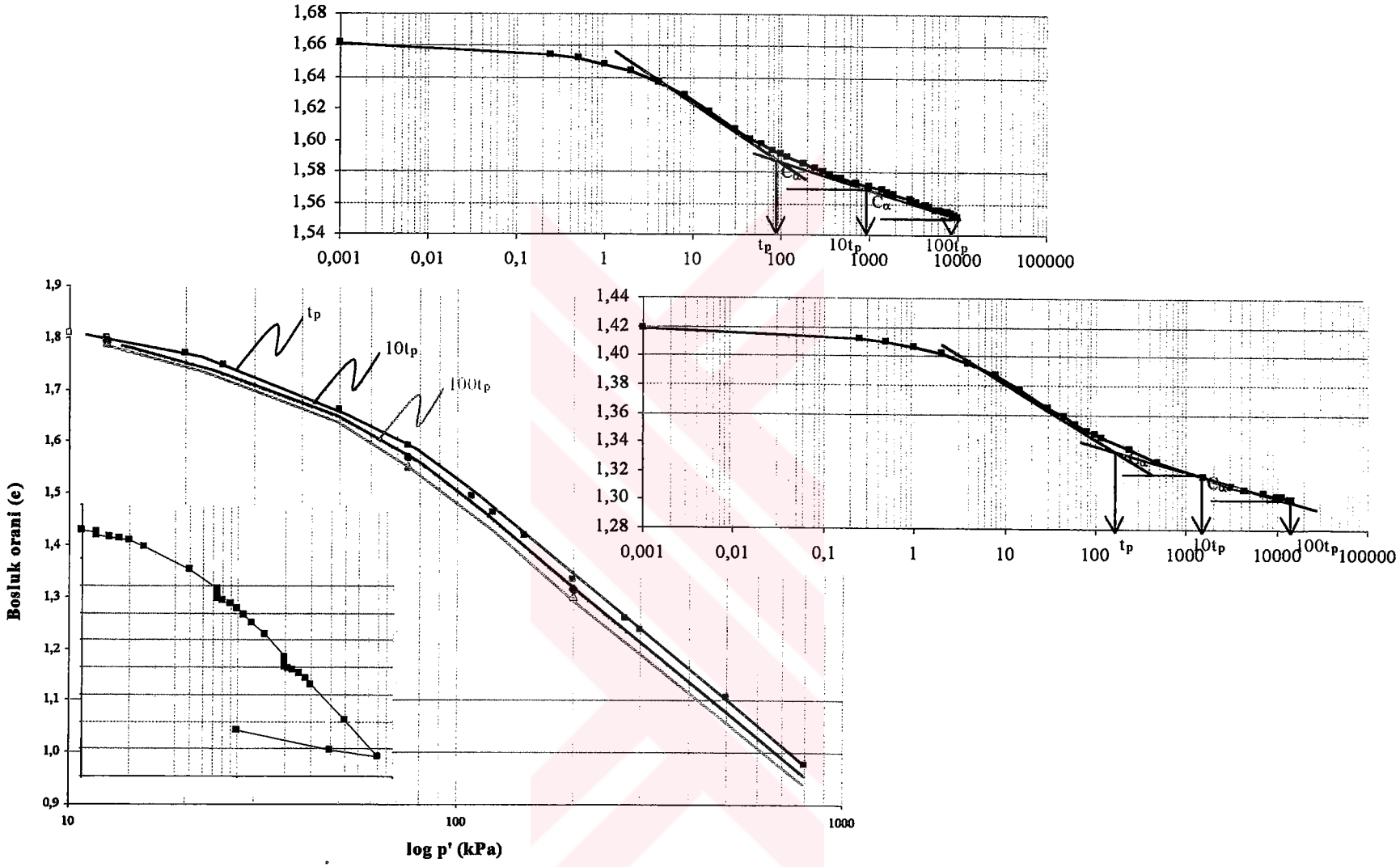
Şekil C.10. B1 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



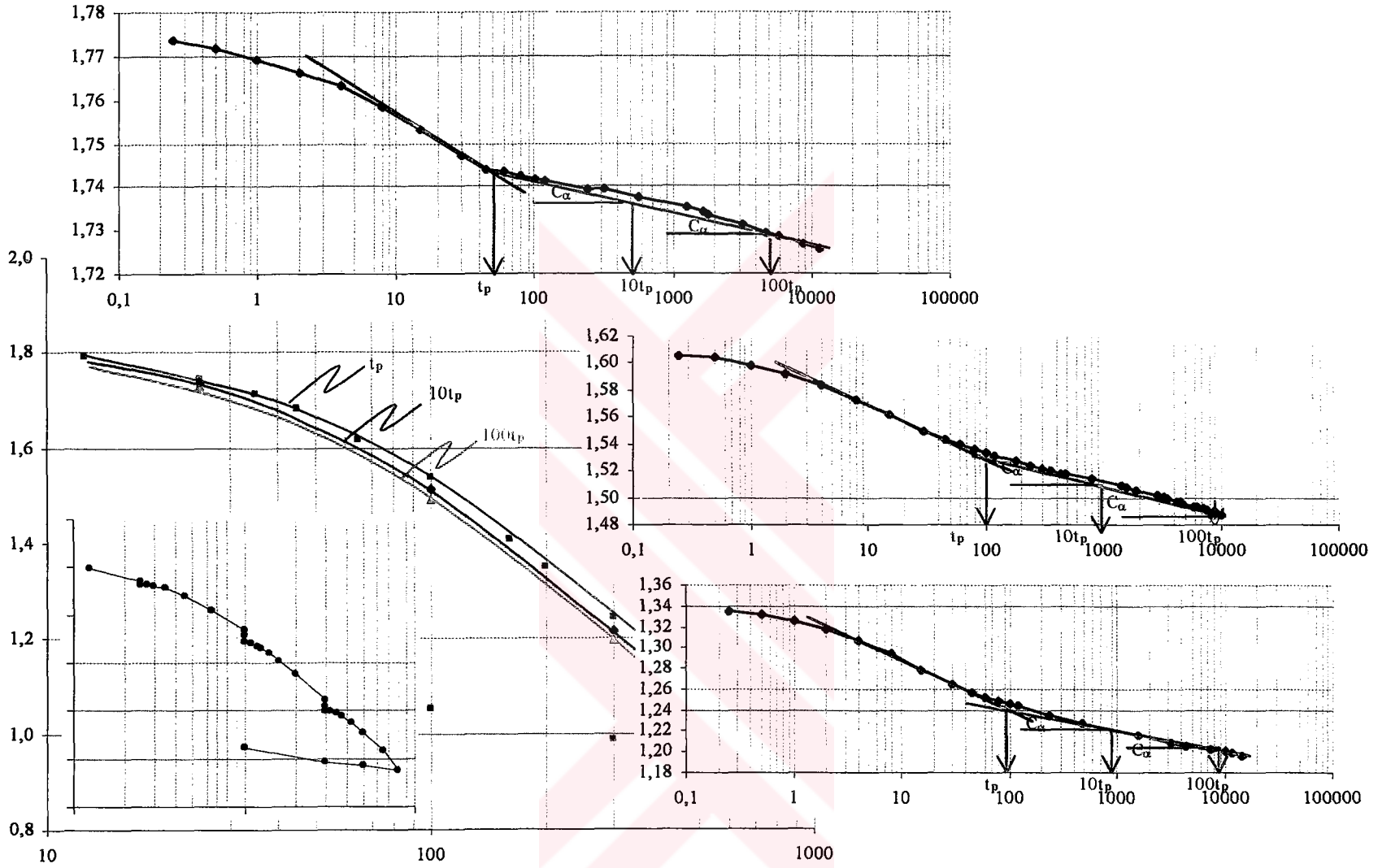
Şekil C.11. B2 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



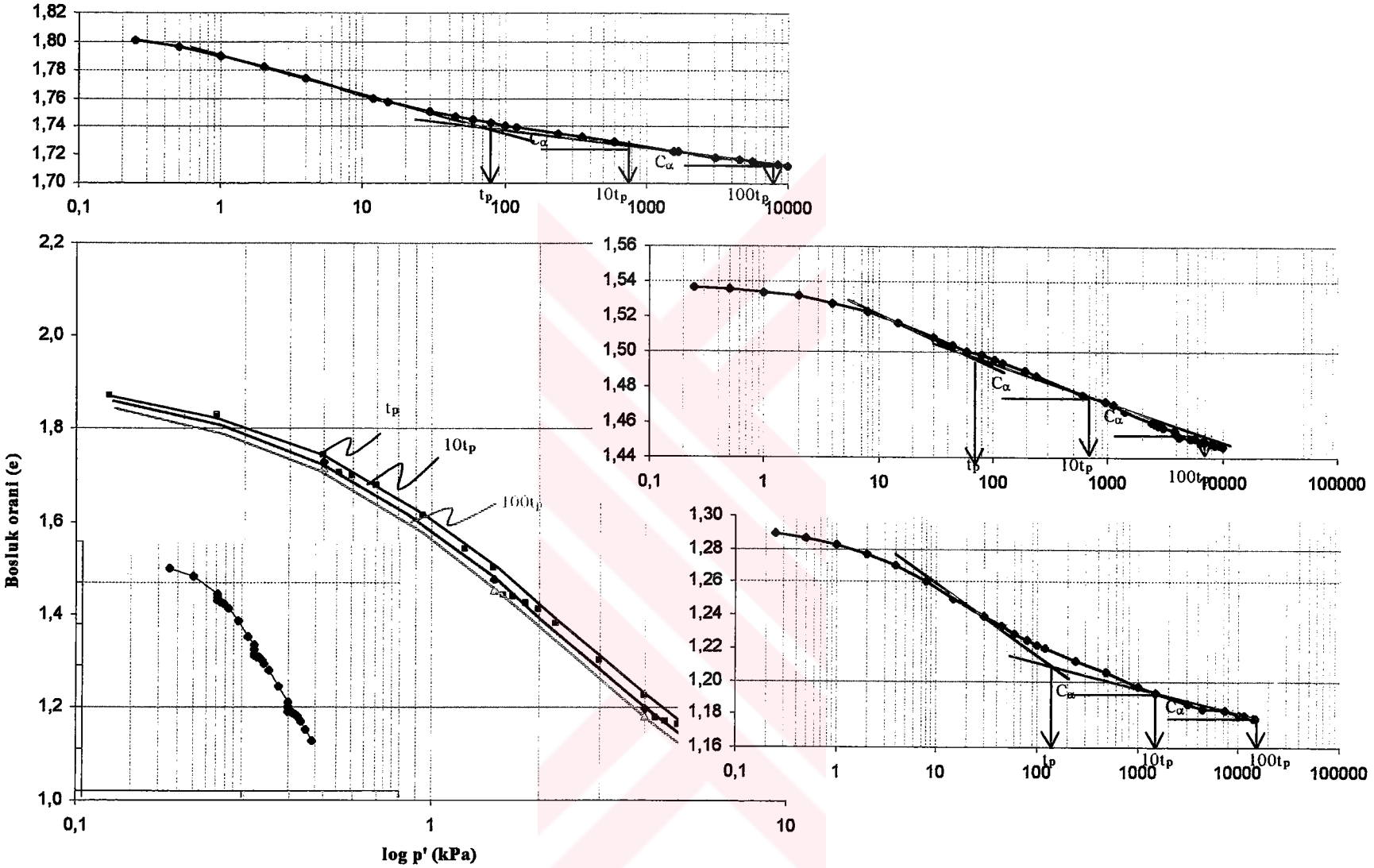
Şekil C.12. B3 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



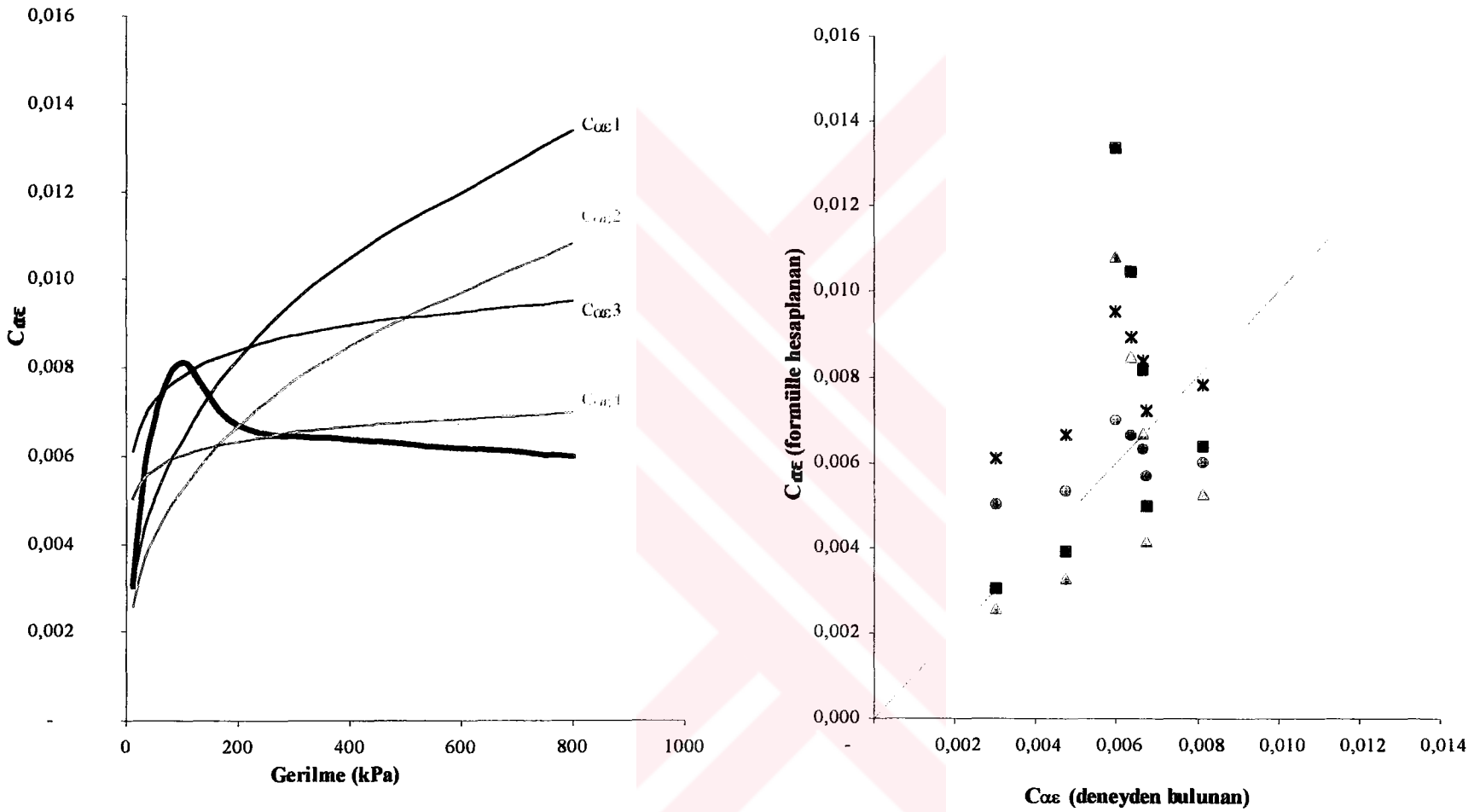
Şekil C.13. C1 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



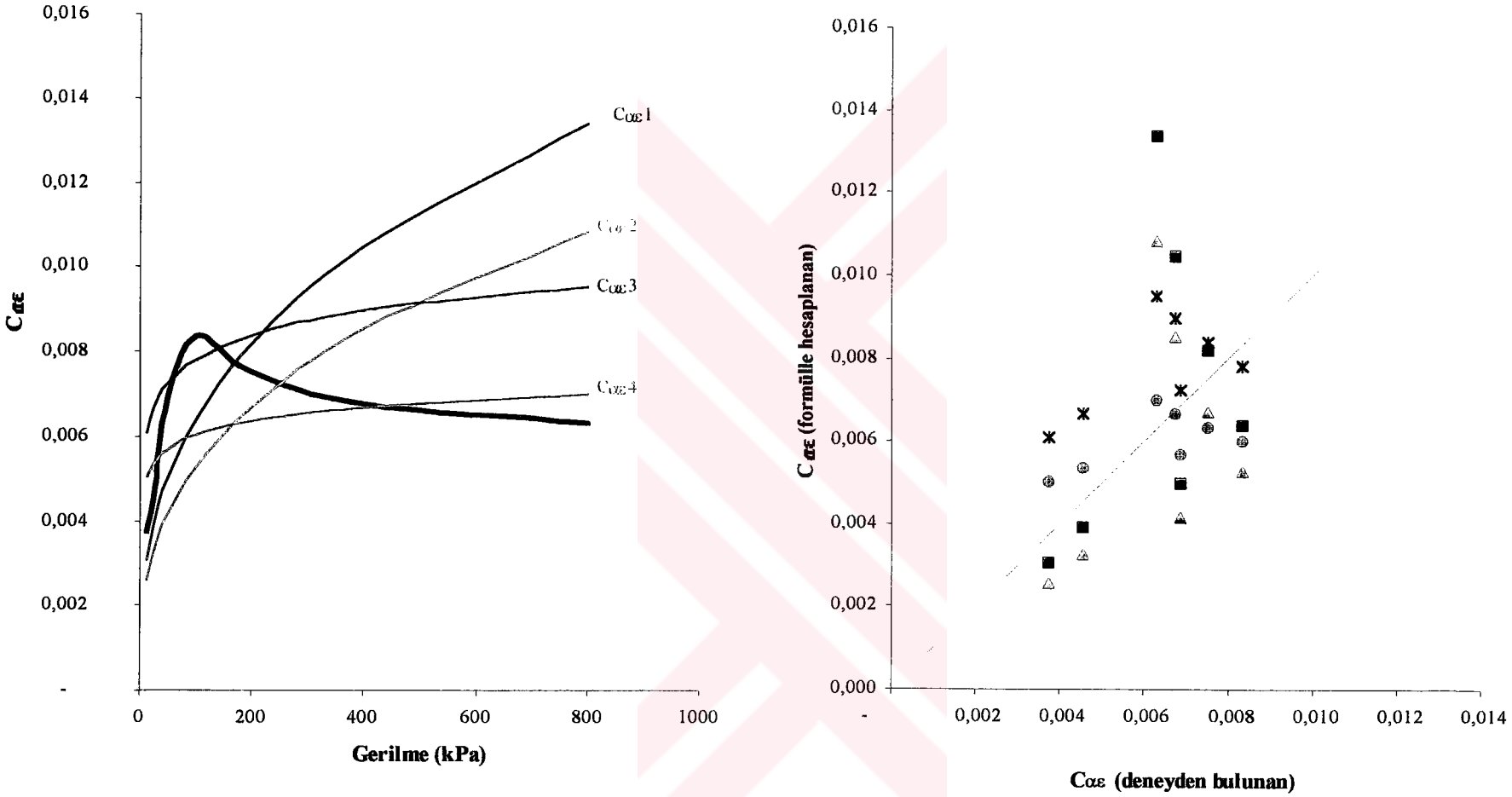
Şekil C.14. C2 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



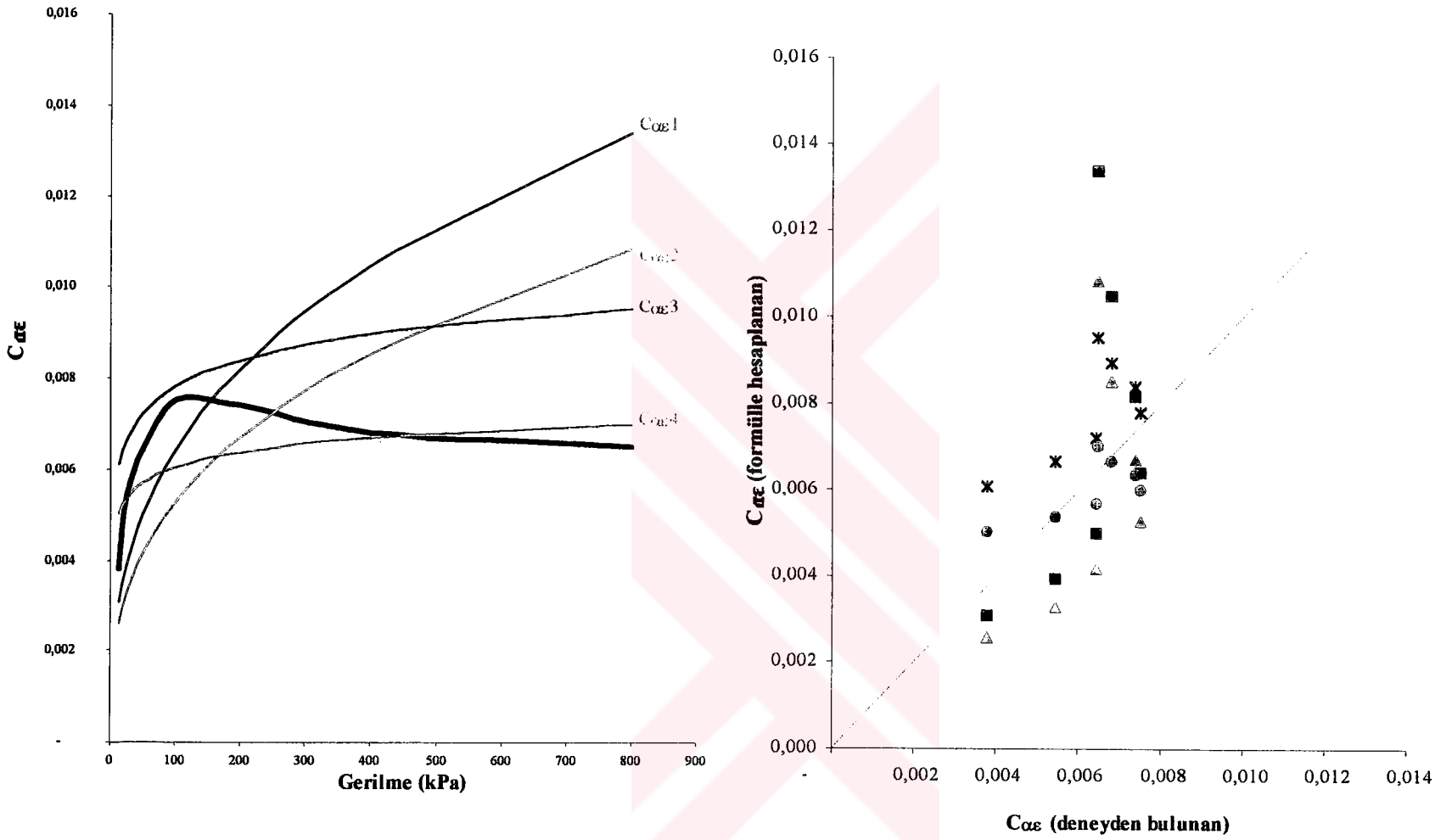
Şekil C.15. C3 Nolu Deneyde Çeşitli Gerilme Seviyelerinde Sıkışma ve İkincil Sıkışma Katsayılarının Hesaplanışı



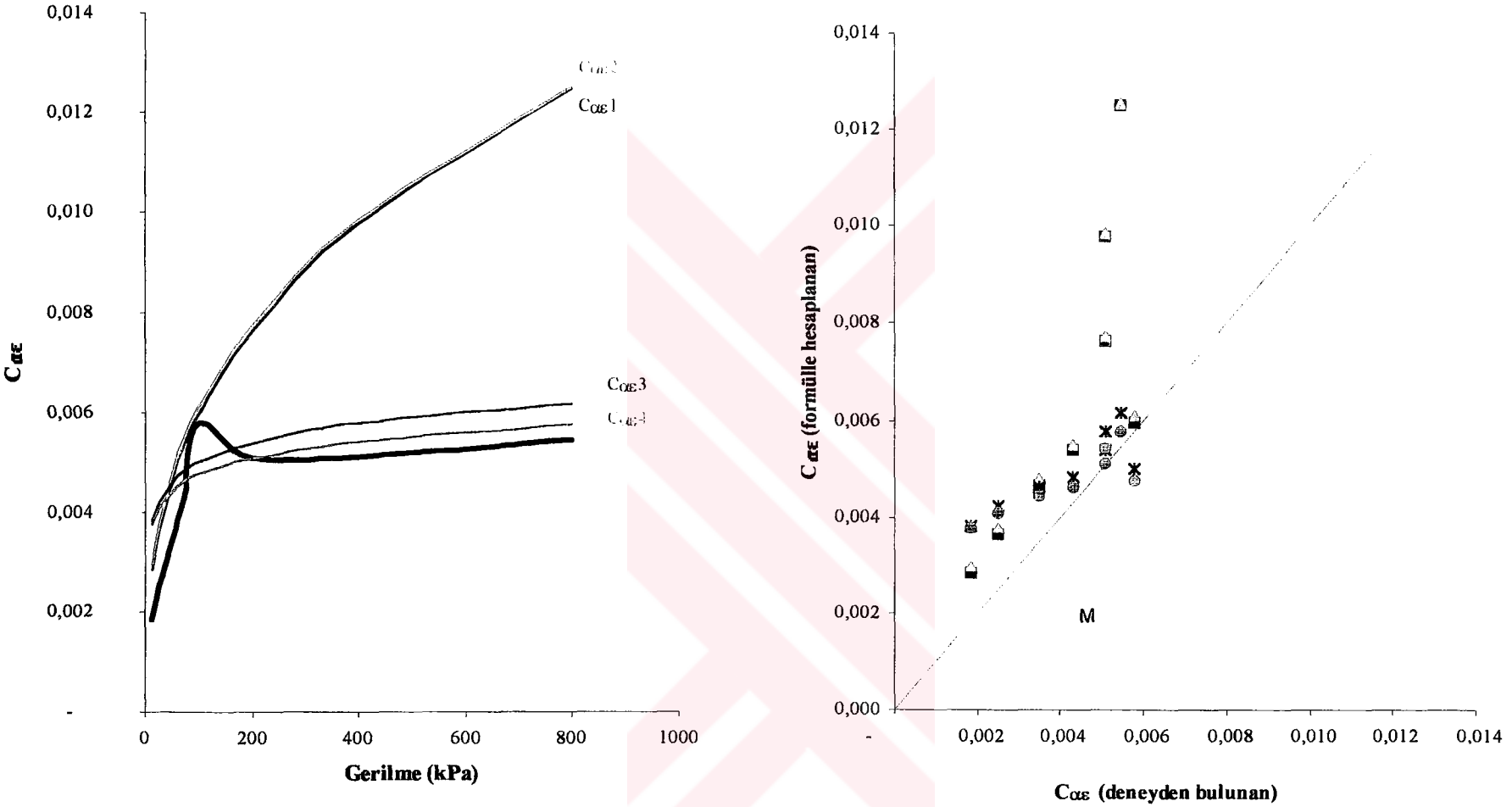
Şekil D.1. A01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması



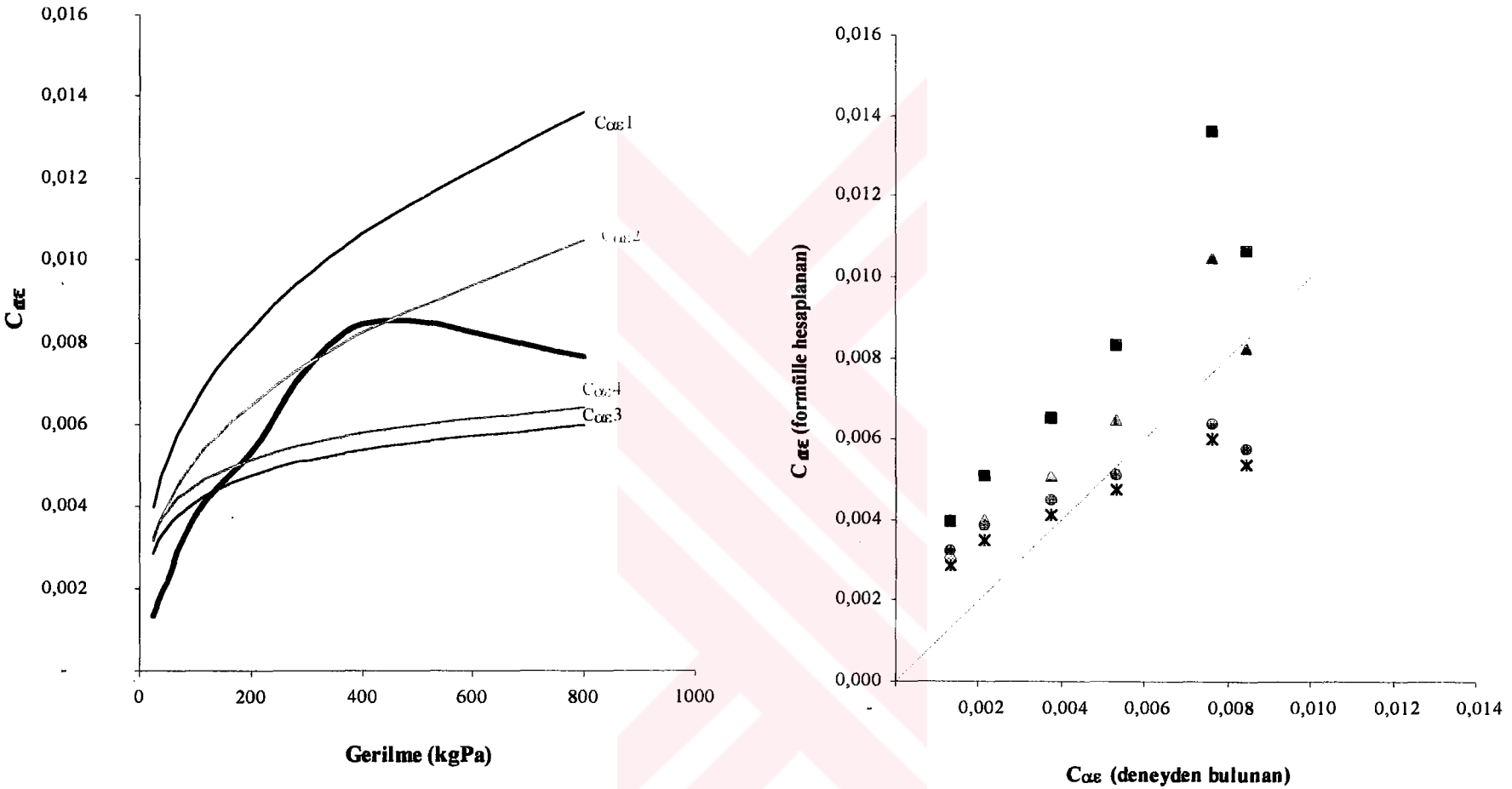
Şekil D.2. A02 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması



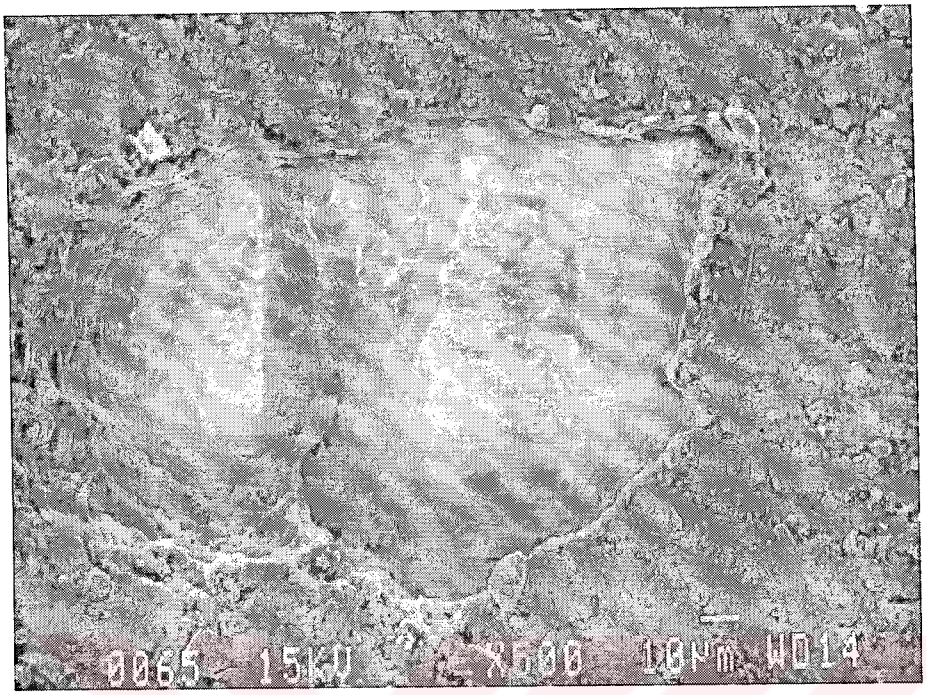
Şekil D.3. A03 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması



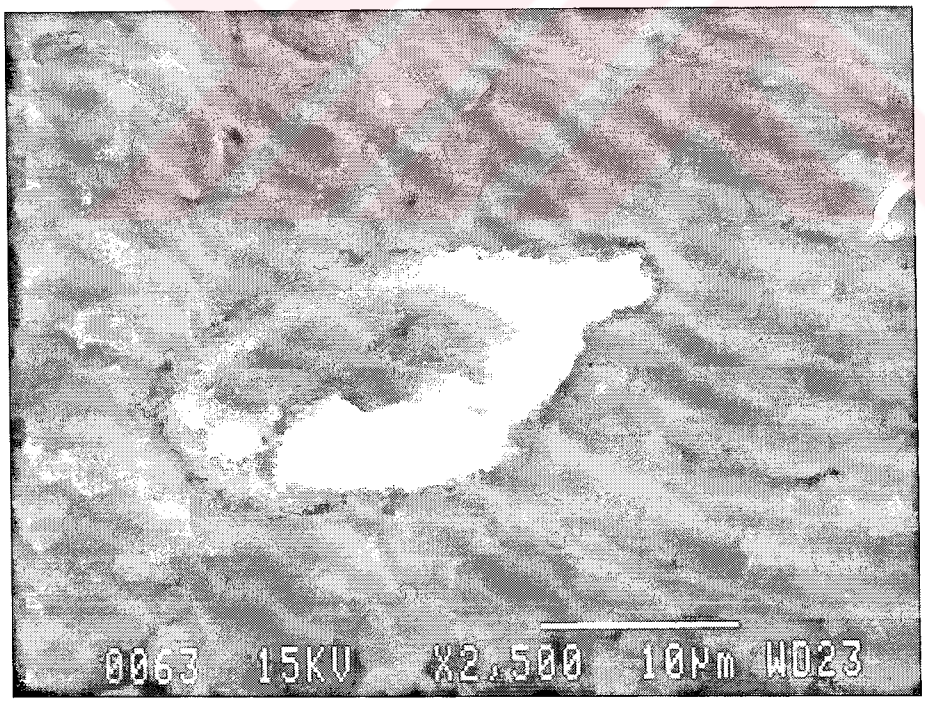
Şekil D.4. B01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması



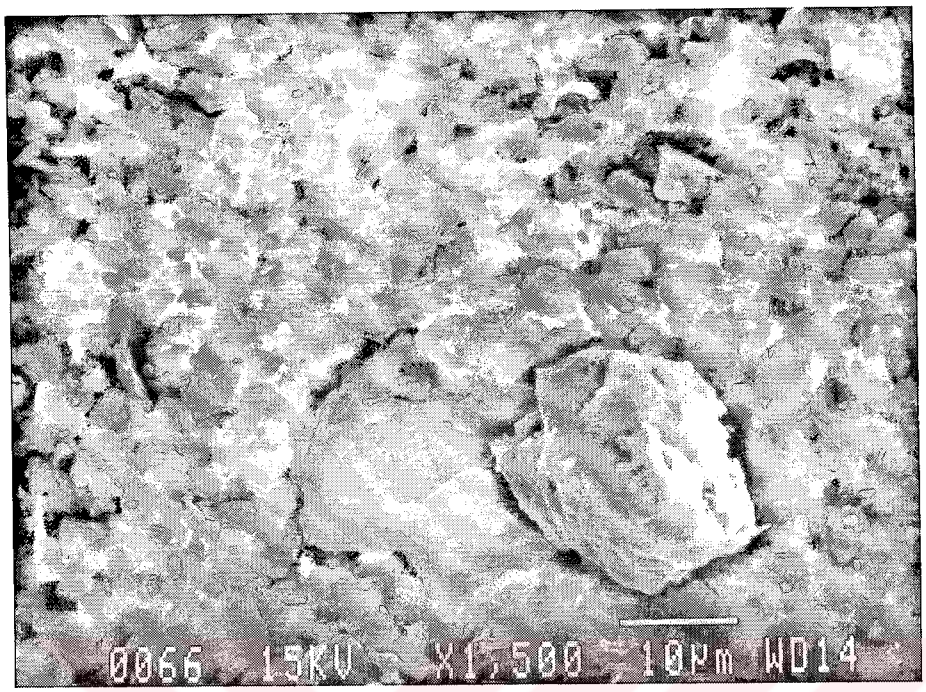
Şekil D.5. D01 nolu Deneyde Çeşitli Korelasyonlardan Elde Edilen İkincil Sıkışma Oranlarının Karşılaştırması



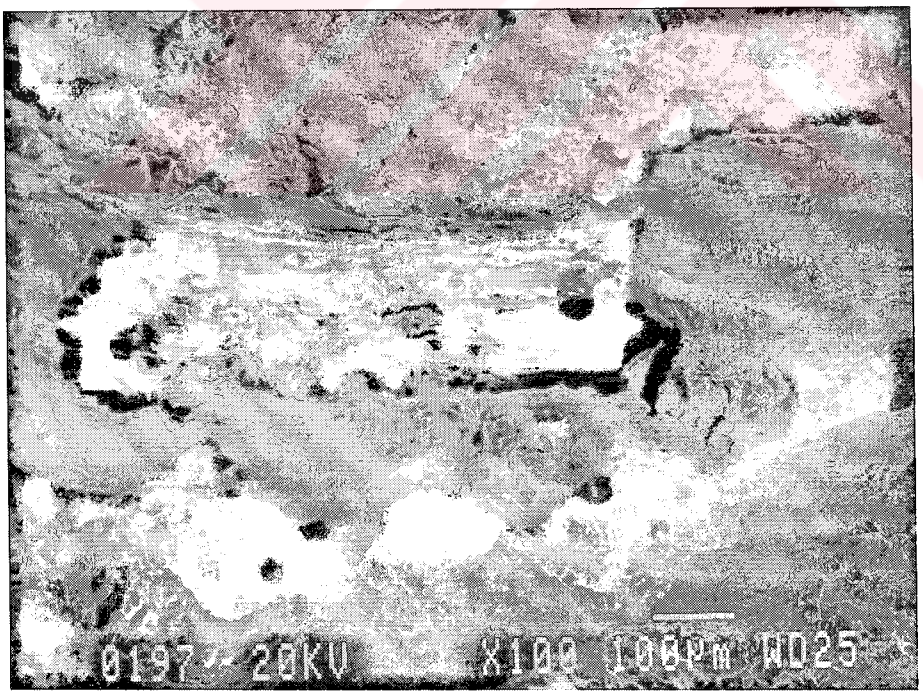
Şekil E.1. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune



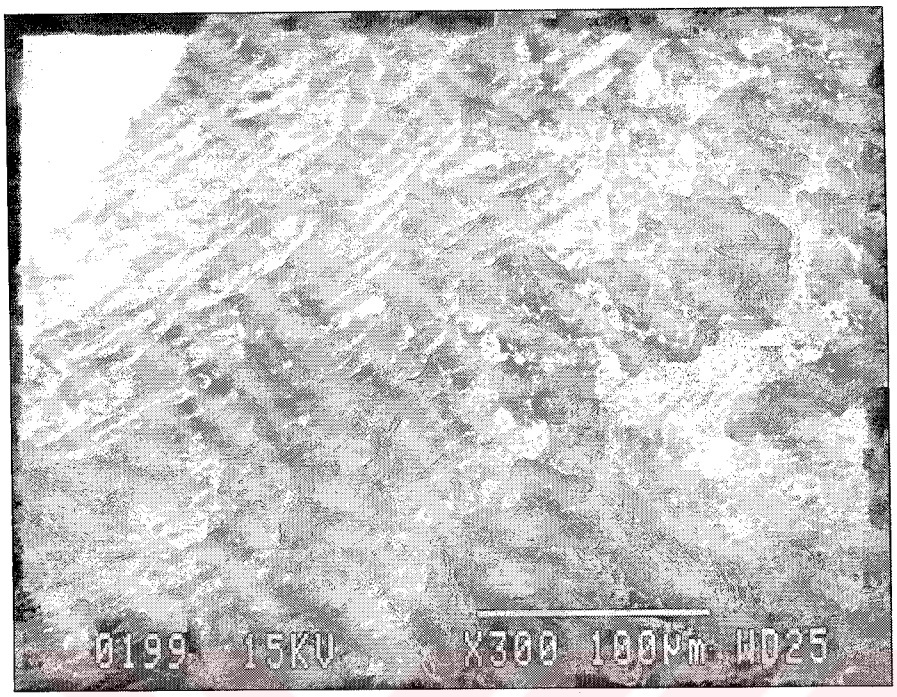
Şekil E.2. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune



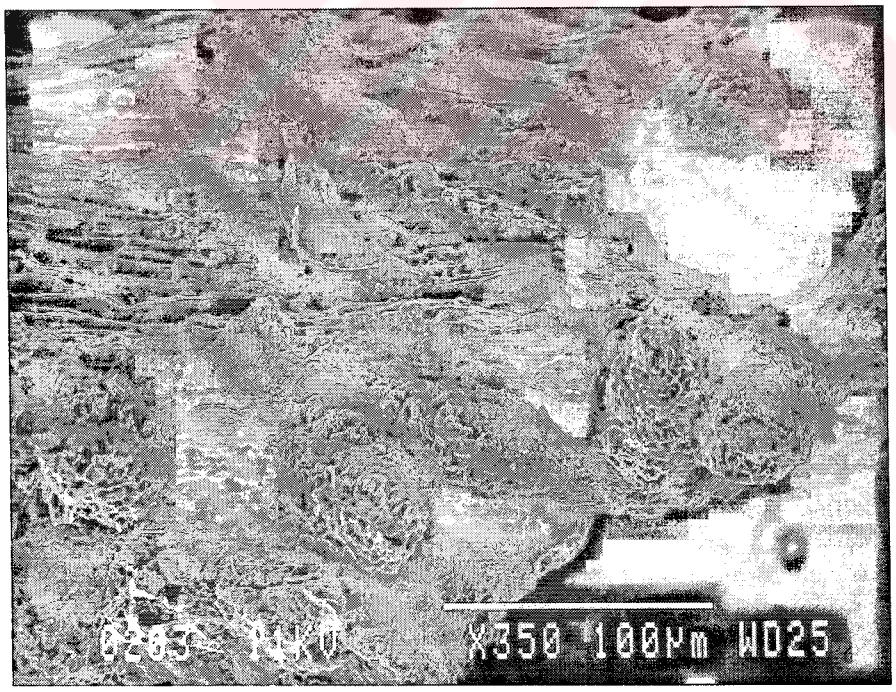
Şekil E.3. Örselenmemiş ve Yüklenmemiş Numune



Şekil E.4. 25 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune



Şekil E.5. 100 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune



Şekil E.6. 400 kPa Gerilme Seviyesinde Üçüncül Konsolidasyonunu Tamamlamış Numune

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Artvin'de doğdu. İlk öğrenimini Ali Suavi İlkokulunda, orta öğrenimini Vedide Baha Pars Ortaokulunda ve lise öğrenimini 1986 yılında İstanbul Şehremini Lisesinde tamamladı. Aynı yıl kazandığı İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 1991 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. 1991-1994 yıllarında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Mart 1996 ile Haziran 1996 tarihleri arasında İngilizce eğitimi almak için gittiği Cambridge'te yarı burslu olarak Cambridge Üniversitesinde, tez çalışması için literatür araştırmalarını tamamladı.