



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Yumuşak Kil. Kons. Davranışı

Doktora Tezi

ARZU DERİLDEN

Ref
İNŞ
466
2003

50
98

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

917

YUMUŞAK KİLLERİN KONSOLİDASYON DAVRANIŞI

İnş.Yük. Müh. Saadet Arzu BERİLGİN

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20 Mayıs 2003
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM (YTÜ)
: Prof. Dr. Erol GÜLER (BÜ)
: Prof. Dr. Atilla ANSAL (BÜ)
: Prof. Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU (İTÜ)

İSTANBUL, 2003

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC): R150/478

Kayıt No : 1896

Geldiği Yer : Fen Biliml. Enst.

Tarih : 03.11.2003

Fiyat : 8.060.000

Fatura No :

Ayniyat No : 1/21

Ek :

SİĞİRCİ LİSTESİ

KISALTIMA LİSTESİ

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

XV-179

SİĞİRCİ LİSTESİ

ÇİZELGE LİSTESİ

ÖNSÖZ

ÖZET

ABSTRACT

YUMUŞAK KİLLERİN KONSOLİDASYON DAVRANIŞI

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

473

İnş.Yük. Müh. Saadet Arzu BERİLGİN

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM (YTÜ)

Prof. Dr. Erol GÜLER (BÜ)

Prof. Dr. Atilla ANSAL (BÜ)

Prof. Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU (İTÜ)

Giriş

Konsolidasyon Kavramları

İsmail Kaptan, Şekil Değişimi (Terzaghi) Kavramlarına Göre

İsmail Kaptan, Şekil Değişimi Kavramlarına Göre Yeni Bir Model (CS)

Makro ve Mikro Değişimler

İsmail Kaptan, Şekil Değişimi Kavramlarına Göre (Günay, 1998)

Tez Boyutlu Şekil Değişimi Kavramlarına Göre Yeni Bir Nükleik Çözüm Çıkarılması

Model Tanımı

İSTANBUL, 2003

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiiiv
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	
1.1 Giriş	1
1.2 Çalışmanın Amacı	2
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	
2.1 Giriş	4
2.2 Yüksek Su Muhtevasına Sahip Yumuşak Killi Zeminler	4
2.3 Yüksek Su Muhtevasına Sahip Zeminlerin Malzeme Özellikleri	5
2.3.1 İndeks Özellikleri.....	5
2.3.2 Sıkışabilirlik ve Permeabilite Özellikleri.....	7
2.4 Arazi Özellikleri	14
2.5 Yüksek Su Muhtevasına Sahip Yumuşak Killerin Konsolidasyon Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Yöntemleri.....	14
2.5.1 Kademeli Yükleme Deneyi (Ödometre Deneyi)	15
2.5.2 Sabit Deformasyon Hızlı Deneyler (Constant Rate of Strain, CRS Test)	15
2.5.3 Hidrolik Eğim Kontrollü Deneyler (Controlled Gradient Test)	16
2.5.4 Yükleme Kontrollü Deneyler (Constant Rate of Loading Test).....	16
2.5.5 Sürekli Yükleme Deneyleri (Continous Loading Test)	16
2.5.6 Relaksasyon Deneyleri	16
2.5.7 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyleri	18
3 YÜKSEK SU MUHTEVASINA SAHİP YUMUŞAK KİLLERDE KONSOLIDASYON KURAMLARI	
3.1 Giriş	22
3.2 Konsolidasyon Kuramları	23
3.3 Sonsuz Küçük Şekil Değiştirme (Terzaghi) Konsolidasyon Kuramı	23
3.4 Büyük Şekil Değiştirme Konsolidasyonu İçin Nonlinear Model: CS2	29
3.4.1 Malzeme Bünye Bağlılıkları.....	31
3.5 Sonlu -Şekil Değiştirme Konsolidasyon Teorisi (Gibson Eşitliği)	39
3.6 Tek Boyutlu Sonlu Şekil Değiştirme Konsolidasyon Denklemi için Bir Nümerik Çözüm: Condes0.....	41
3.6.1 Model Tanımı	41

3.6.2	Condes0 Modeli Bünye Bağlılıları	43
3.7	Konsolidasyon Kuramlarının Genel Değerlendirmesi.....	43
4	DENEY YÖNTEMİ:SIZINTI ETKİLİ KONSOLIDASYON DENEYİ	
4.1	Giriş	45
4.2	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi	45
4.3	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deney Düzenegi	47
4.4	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyinin Yapılışı.....	51
4.4.1	Deney Aletlerinin ve Numunenin Hazırlanması.....	51
4.4.2	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi (SEK)-Kademeli Yükleme Deneyi (KYD) Yapılışı ve Permeabilite Ölçümü (PÖ).....	52
4.5	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi -Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları.....	49
4.5.1	Haliç Kili Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi, Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları	55
4.5.2	Alibey Yeşil Kili Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi, Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları.....	63
4.5.3	Alibey Siyah Kili Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi, Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları	65
5	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	
5.1	Giriş	67
5.2	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyinde Kararlı Durum Hali Çözüm Algoritması	68
5.3	Parametrelerin Belirlenmesinde Kullanılan Algoritma	72
5.4	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deney Sonuçları ve SICTA Programıyla Elde Edilen Parametrelerle Belirlenen Sıkışabilirlik ve Permeabilite İlişkileri	74
5.4.1	Haliç Kili Haliç Kili Sıkışabilirlik Permeabilite İlişkileri	74
5.4.2	Alibey Yeşil Kili Kili Sıkışabilirlik Permeabilite İlişkileri	77
5.4.3	Alibey Siyah Kili Kili Sıkışabilirlik Permeabilite İlişkileri	77
5.5	Haliç Kilinde Sedimentasyon Tankı Oturma Analizi.....	85
5.5.1	CS2 Modelde SEK Deney Verileri Kullanılarak Yapılan Oturma Analizi	85
5.5.2	CS2 Modelde SICTA Programıyla Elde Edilen Parametreler Kullanılarak Yapılan Oturma Analizi	87
5.5.3	Condes0 Programında SICTA Programıyla Elde Edilen Parametreler Kullanılarak Yapılan Oturma Analizi.....	87
5.5.4	Haliç Tarama Çamurunun Arazideki Davranışının CS2 Model ve CONDES0 ile Modellenmesi	87
5.6	Zemin İndeks Özellikleri Kullanılarak A,B,C,D ve Z Parametre Tahminlerinin Yapılması.....	91
5.6.1	A Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_C), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_P) Değerleri Kullanılarak Yapılması.....	94
5.6.2	B Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_C), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_P) Değerleri Kullanılarak Yapılması	94
5.6.3	Z Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_C), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_P) Değerleri Kullanılarak Yapılması	101
5.6.4	C Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_C), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_P) Değerleri Kullanılarak Yapılması	105
5.6.5	D Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_C), Likidite İndisi (I_L) ve	

	Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması	105
5.7	Permeabilite katsayısı (k)-Etkatif Gerilme (σ'_v) ve Permeabilite katsayısı(k)- Likidite İndisi I_L (%) İlişkisi	112
5.8	Etkatif Gerilme (σ'_v) -Boşluk Oranı (e) ve Permeabilite Katsayısı (k)-Boşluk Oranı (e) İlişkileri	116
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	121
KAYNAKLAR.....		125
EKLER.....		130
Ek 1	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deney Sonuçları.....	130
Ek 2	Haliç Kili Deney No:1 SICTA Program Verileri	150
ÖZGEÇMİŞ.....		178
TEŞEKKÜR		179

SİMGE LİSTESİ

v_{rf}	Boşluk suyunun nispi deşarj hızı
\tilde{v}_s	Katıların hızı
\tilde{v}_{rf}	Nispi sızıntı hızı
\tilde{v}_f	Sıvının sızıntı hızı
τ	Hesap zaman aralığı
ξ	Euler koordinatı
σ	Toplam gerilme
σ'	Efektif gerilme
σ'_s	Kademeli yükleme deneyi sonuç efektif gerilme değeri
σ'_0	Yükleme pistonu tarafından uygulanan düşey gerilme değeri
σ'_c	Numune tabanında efektif gerilme
Δe	Boşluk oranı değişimi
γ_k	Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	Zemin danelerinin tabii birim hacim ağırlığı
σ_{sw}'	Numunenin kendi ağırlığı altında oluşan efektif gerilme değeri
σ_{v0}'	Düşey efektif gerilme
γ_w	Suyun tabii birim hacim ağırlığı
a, a_1	Lagrange koordinat sistemi
A_s	Numune alanı
a_v	Zeminin sıkışma katsayısı
c	Danelerin konsantrasyonu
C_c	Sıkışma İndisi
C_k	Hidrolik geçirgenlik değişimi indeksi
c_v	Konsolidasyon katsayısı
E	Zemin üstüzyüzeyinden itibaren buharlaşma oranı
e_0	Başlangıç boşluk oranı
e_{00}	Sıfır efektif gerilme durumuna karşılık gelen boşluk oranı
$e_{a,j}$	Tabaka içinde başlangıç boşluk oranları
e_{cr}	Çatlama boşluk oranı
e_f	Sonuç boşluk oranı
e_s	Kademeli yükleme deneyi sonuç boşluk oranı
g	Yerçekimi ivmesi
G_s	Dane özgül ağırlığı
H_0	Numunenin başlangıç yüksekliği
H_d	Drenaj yolu uzunluğu
H_f	Numunenin sonuç yüksekliği
H_r	Permeabilite deneyi sonunda numunenin ortalama yüksekliği
H_s	Zemin danelerinin kuru haldeki yüksekliği
i	Hidrolik eğim
I_c	Relatif konsistans
I_L	Likidite indisi
I_p	Plastisite indisi
j	Eleman koordinatı
k	Permeabilite katsayısı
k_h	Yatay permeabilite katsayısı

k_s	Kademeli yükleme deneyi permeabilite katsayısı
k_v	Düşey permeabilite katsayısı
L_0	Başlangıç tabaka yüksekliği
M	Kütle
M_s	Numunenin kuru ağırlığı
m_v	Hacimsel sıkışma katsayısı
n	Porozite
Q_{in}	Zemine giren su miktarı
Q_{out}	Zeminden çıkan su miktarı
q_x	Su akışı
R_j	Eleman sayısı
t	Zaman
T	Zaman faktörü
u	Boşluk suyu basıncı
u_e	Hidrolik koşullar nedeniyle oluşan artık boşluk suyu basıncı
u_i	Uygulanan gerilme artışı nedeniyle oluşan artık boşluk suyu basıncı
v	Su ve zemin tabakalarının arasında ortaya çıkan relatif hız değeri
v_c	Çatlak zeminde hız bağıntısı
v_s	Zemin danelerinin hızıdır
V_t	Toplam hacim
v_u	Çatlak olmayan zeminde hız bağıntısı
V_w	Suyun hacmi
w	Doğal su muhtevası
w_0	Başlangıç su muhtevası
w_L	Likit limit su muhtevası
w_P	Plastik limit su muhtevası
Z	Derinlik faktörü
z	Düşey Eulerian koordinatı
$z_{o,j}$	Merkez düğüm noktası koordinatı
Δq	Efektif gerilme artışı
Δu	Boşluk suyu basıncı değişimi
Δu_w	Toplam su kaybı
α	Elemanın alanının yüksekliğine oranı
ε	Birim şekil değiştirme
ε_v	Hacimsel şekil değiştirme
ρ_w	Suyun yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

SEK	Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi	6
KYD	Kademeli Yükleme Deneyi	6
PÖ	Permeabilite Ölçümü	6
LVDT	Deplasman Ölçer	6
Şekil 2.3	OKS püreyi dışarıdan sıkıştırma deneyi	10
Şekil 2.4	Sıvıyı dışarıdan sıkıştırma deneyi	17
Şekil 2.5	Kalın ve ince taneli toprakların sıvıyı dışarıdan sıkıştırma deneyi	20
Şekil 3.1	Deplasman ölçer	21
Şekil 3.2	LVDT	27
Şekil 3.3	LVDT	27
Şekil 3.4	LVDT	27
Şekil 3.5	LVDT	27
Şekil 3.6	LVDT	27
Şekil 3.7	LVDT	27
Şekil 3.8	LVDT	27
Şekil 3.9	LVDT	27
Şekil 3.10	LVDT	27
Şekil 3.11	LVDT	27
Şekil 3.12	LVDT	27
Şekil 3.13	LVDT	27
Şekil 3.14	LVDT	27
Şekil 3.15	LVDT	27
Şekil 3.16	LVDT	27
Şekil 3.17	LVDT	27
Şekil 3.18	LVDT	27
Şekil 3.19	LVDT	27
Şekil 3.20	LVDT	27
Şekil 3.21	LVDT	27
Şekil 3.22	LVDT	27
Şekil 3.23	LVDT	27
Şekil 3.24	LVDT	27
Şekil 3.25	LVDT	27
Şekil 3.26	LVDT	27
Şekil 3.27	LVDT	27
Şekil 3.28	LVDT	27
Şekil 3.29	LVDT	27
Şekil 3.30	LVDT	27
Şekil 3.31	LVDT	27
Şekil 3.32	LVDT	27
Şekil 3.33	LVDT	27
Şekil 3.34	LVDT	27
Şekil 3.35	LVDT	27
Şekil 3.36	LVDT	27
Şekil 3.37	LVDT	27
Şekil 3.38	LVDT	27
Şekil 3.39	LVDT	27
Şekil 3.40	LVDT	27
Şekil 3.41	LVDT	27
Şekil 3.42	LVDT	27
Şekil 3.43	LVDT	27
Şekil 3.44	LVDT	27
Şekil 3.45	LVDT	27
Şekil 3.46	LVDT	27
Şekil 3.47	LVDT	27
Şekil 3.48	LVDT	27
Şekil 3.49	LVDT	27
Şekil 3.50	LVDT	27
Şekil 3.51	LVDT	27
Şekil 3.52	LVDT	27
Şekil 3.53	LVDT	27
Şekil 3.54	LVDT	27
Şekil 3.55	LVDT	27
Şekil 3.56	LVDT	27
Şekil 3.57	LVDT	27
Şekil 3.58	LVDT	27
Şekil 3.59	LVDT	27
Şekil 3.60	LVDT	27
Şekil 3.61	LVDT	27
Şekil 3.62	LVDT	27
Şekil 3.63	LVDT	27
Şekil 3.64	LVDT	27
Şekil 3.65	LVDT	27
Şekil 3.66	LVDT	27
Şekil 3.67	LVDT	27
Şekil 3.68	LVDT	27
Şekil 3.69	LVDT	27
Şekil 3.70	LVDT	27
Şekil 3.71	LVDT	27
Şekil 3.72	LVDT	27
Şekil 3.73	LVDT	27
Şekil 3.74	LVDT	27
Şekil 3.75	LVDT	27
Şekil 3.76	LVDT	27
Şekil 3.77	LVDT	27
Şekil 3.78	LVDT	27
Şekil 3.79	LVDT	27
Şekil 3.80	LVDT	27
Şekil 3.81	LVDT	27
Şekil 3.82	LVDT	27
Şekil 3.83	LVDT	27
Şekil 3.84	LVDT	27
Şekil 3.85	LVDT	27
Şekil 3.86	LVDT	27
Şekil 3.87	LVDT	27
Şekil 3.88	LVDT	27
Şekil 3.89	LVDT	27
Şekil 3.90	LVDT	27
Şekil 3.91	LVDT	27
Şekil 3.92	LVDT	27
Şekil 3.93	LVDT	27
Şekil 3.94	LVDT	27
Şekil 3.95	LVDT	27
Şekil 3.96	LVDT	27
Şekil 3.97	LVDT	27
Şekil 3.98	LVDT	27
Şekil 3.99	LVDT	27
Şekil 4.00	LVDT	27

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Farklı tarama çamurlarında ve madeni çamurlarda Atterberg limitleri (Yong ve Townsend,1984).....	6
Şekil 2.2 Farklı tarama çamurlarında ve madeni çamurlarda permeabilite katsayısı-boşluk oranı değişimi (Yong ve Townsend,1984)	10
Şekil 2.3 CRS deney düzeneği (Tonaroğlu,1998)	17
Şekil 2.4 Sızıntı etkili deney sonuçları C-1 numunesi $e_{00}=13.07$ (FIPR, Vol:3 ,1994).....	20
Şekil 2.5 Kademeli yükleme ve permeabilite ölçümü deney sonuçları C-1 numunesi $e_{00}=13.07$ (FIPR ,1994)	21
Şekil 3.1 Laboratuvar sıkışma eğrisi	27
Şekil 3.2 Çift drenajlı zemin tabakasında herhangi bir yerleşim ve zaman faktörü için konsolidasyon	27
Şekil 3.3 T- U_{ort} grafiği	28
Şekil 3.4 CS2 için geometri: (a) başlangıç konfigürasyonu ($t<0$) ve (b) düşey efektif gerilmenin artım ($t \geq 0$) uygulamasından sonra konfigürasyon	30
Şekil 3.5 Zemin bünye ilişkileri : Sıkışabilirlik.....	32
Şekil 3.6 Zemin bünye ilişkileri: Permeabilite	32
Şekil 3.7 Bitişik elemanlar arasındaki sıvı akışı.....	36
Şekil 4.1 Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği şeması	48
Şekil 4.2 Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği	50
Şekil 4.3 Haliç kili SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_0=11.44$)	58
Şekil 4.4 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 11.44$, Kademeli Yükleme: 5.0 kPa).....	59
Şekil 4.5 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 11.44$, Kademeli Yükleme: 25.0 kPa).....	60
Şekil 4.6 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 11.44$, Kademeli Yükleme:85.0 kPa).....	61
Şekil 5.1 Haliç kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e)- efektif gerilme (σ') grafiği.....	76
Şekil 5.2 Haliç kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) – permeabilite katsayısı (k) grafiği	76
Şekil 5.3 Alibey Barajı yeşil kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e)-efektif gerilme (σ') grafiği	79
Şekil 5.4 Alibey Barajı yeşil kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e)-permeabilite katsayısı (k) grafiği.....	79
Şekil 5.5 Alibey Barajı siyah kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e)-efektif gerilme (σ') grafiği	81
Şekil 5.6 Alibey Barajı siyah kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e)-permeabilite katsayısı (k) grafiği.....	81
Şekil 5.7 Alibey Barajı yeşil kili üzerinde daha önceden yapılan (Tohumcu,2001) permeabilite deneyleri -SEK ve kademeli yükleme ve permeabilite deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması	82
Şekil 5.8 Alibey Barajı siyah kili üzerinde daha önceden yapılan (Tohumcu,2001) permeabilite deneyleri -SEKve kademeli yükleme ve permeabilite deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması	84
Şekil 5.9 Sedimentasyon tankı oturma davranışının CS2 programında SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verileri kullanılarak modellenmesi	86
Şekil 5.10 Sedimentasyon tankı oturma davranışının CS2 programında SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verilerinden elde edilen parametreler	

kullanılarak modellenmesi	88
Şekil 5.11 Sedimentasyon tankı oturma davranışının CONDES0 programında SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak modellenmesinin karşılaştırılması	89
Şekil 5.12 Sedimentasyon tankı oturma davranışının $e_0=7.894$ SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verileri ve deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak CS2 ve CONDES0 programlarıyla modellenmesi ..	90
Şekil 5.13 Haliç tarama çamurunda (zemin indeks özellikleri yardımı ile belirlenen tahmin parametreleri CONDES0 ve CS2 modellerinde kullanılarak) oturma analizlerinin arazi ölçümleriyle karşılaştırılması	92
Şekil 5.14 A Katsayısının relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği.....	95
Şekil 5.15 $A/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği.....	95
Şekil 5.16 A Katsayısının likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	96
Şekil 5.17 $A/(1+e_0)$ değerinin likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	96
Şekil 5.18 A Katsayısının plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	97
Şekil 5.19 $A/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	97
Şekil 5.20 B Katsayısının relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği	98
Şekil 5.21 $B/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği.....	98
Şekil 5.22 B Katsayısının likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	99
Şekil 5.23 $B/(1+e_0)$ değerinin likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	99
Şekil 5.24 B Katsayısının plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	100
Şekil 5.25 $B/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	100
Şekil 5.26 Z Katsayısının relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği	102
Şekil 5.27 $Z/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği	102
Şekil 5.28 Z Katsayısının likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	103
Şekil 5.29 $Z/(1+e_0)$ değerinin likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	103
Şekil 5.30 Z Katsayısının plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	104
Şekil 5.31 $Z/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	104
Şekil 5.32 C Katsayısının relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği	106
Şekil 5.33 $C/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği.....	106
Şekil 5.34 C Katsayısının likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	107
Şekil 5.35 $C/(1+e_0)$ değerinin likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	107
Şekil 5.36 C Katsayısının plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	108
Şekil 5.37 $C/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	108
Şekil 5.38 D Katsayısının relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği.....	109
Şekil 5.39 $D/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_C) değerine bağlı değişimi grafiği.....	109
Şekil 5.40 D Katsayısının likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	110
Şekil 5.41 $D/(1+e_0)$ değerinin likitide indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği	110
Şekil 5.42 D Katsayısının plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	111
Şekil 5.43 $D/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_P) değerine bağlı değişimi grafiği	111
Şekil 5.44 Permeabilite katsayısının (k) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişim grafiği	113
Şekil 5.45 Permeabilite katsayısının (k) likitide indeksine (I_L) bağlı değişim grafiği (FIPR,1983)	114
Şekil 5.46 Permeabilite katsayısının (k) likitide indeksine (I_L) bağlı değişim grafiği (Bu çalışma)	115
Şekil 5.47 Farklı plastisite indisi (I_P) değerlerine sahip killerde SEK deney sonuçlarıyla belirlenen boşluk oranı (e)-efektif gerilme (σ'_v) ilişkisi	117
Şekil 5.48 Farklı plastisite indisi (I_P) değerlerine sahip killerde SEK deney sonuçlarıyla belirlenen ve zemin indeks özellikleri kullanılarak tahmin edilen boşluk oranı (e)-efektif gerilme (σ'_v) ilişkisi	119

Şekil 5.49 Farklı plastisite indisi (I_p) değerlerine sahip killerde SEK deney sonuçlarıyla belirlenen ve zemin indeks özellikleri kullanılarak tahmin edilen boşluk oranı (e)-permeabilite katsayısı (k) ilişkisi	120
Şekil Ek 1.1 Haliç kili $e_{00}= 7.89$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 2)	130
Şekil Ek 1.2 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 7.89$, Kademeli Yükleme: 5.0 kPa.....)	131
Şekil Ek 1.3 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 7.89$, Kademeli Yükleme: 25.0 kPa.....)	132
Şekil Ek 1.4 Haliç kili $e_{00}= 9.36$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 3)	133
Şekil Ek 1.5 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 9.36$ Kademeli Yükleme: 5.0 kPa.....)	134
Şekil Ek 1.6 Haliç kili $e_{00}= 6.57$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 4)	135
Şekil Ek 1.7 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=6.57$ Kademeli Yükleme: 5.0 kPa.....)	135
Şekil Ek 1.8 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=6.57$ Kademeli Yükleme: 10.0 kPa.....)	136
Şekil Ek 1.9 Haliç kili $e_{00}= 7.52$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 5)	137
Şekil Ek 1.10 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=7.52$ Kademeli Yükleme: 5.0 kPa.....)	138
Şekil Ek 1.11 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=7.52$ Kademeli Yükleme: 25.0 kPa.....)	138
Şekil Ek 1.12 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=7.52$ Kademeli Yükleme: 85.0 kPa.....)	139
Şekil Ek 1.13 Alibey yeşil kili $e_{00}= 2.94$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 6).....	140
Şekil Ek 1.14 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=2.94$ Kademeli Yükleme: 40.0 kPa....)	140
Şekil Ek 1.15 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=2.94$ Kademeli Yükleme: 100.0 kPa..)	141
Şekil Ek 1.16 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=2.94$ Kademeli Yükleme: 200.0 kPa..)	141
Şekil Ek 1.17 Alibey yeşil kili $e_{00}= 4.60$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 7).....	142
Şekil Ek 1.18 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=4.60$ Kademeli Yükleme: 40.0 kPa....)	142
Şekil Ek 1.19 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=4.60$ Kademeli Yükleme: 80.0 kPa....)	143
Şekil Ek 1.20 Alibey yeşil kili $e_{00}= 8.21$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 8).....	143
Şekil Ek 1.21 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=8.21$ Kademeli Yükleme: 40.0 kPa....)	144
Şekil Ek 1.22 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=8.21$ Kademeli Yükleme: 60.0 kPa....)	144
Şekil Ek 1.23 Alibey siyah kili $e_{00}= 6.06$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 9).....	145
Şekil Ek 1.24 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü	

	zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=6.06$ Kademeli Yükleme: 40.0 kPa....	145
Şekil Ek 1.25	Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=6.06$ Kademeli Yükleme: 80.0 kPa....	146
Şekil Ek 1.26	Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=6.06$ Kademeli Yükleme: 100.0 kPa..	146
Şekil Ek 1.27	Alibey siyah kili $e_{00}= 5.16$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 10).....	147
Şekil Ek 1.28	Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=5.16$ Kademeli Yükleme: 80.0 kPa....	147
Şekil Ek 1.29	Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=5.16$ Kademeli Yükleme: 100.0 kPa..	148
Şekil Ek 1.30	Alibey siyah kili $e_{00}= 3.00$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No: 11).....	148
Şekil Ek 1.31	Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=3.00$ Kademeli Yükleme: 40.0 kPa....	149
Şekil Ek 1.32	Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}=3.00$ Kademeli Yükleme: 200.0 kPa..	149
Şekil Ek 3.1	Haliç kili SEK deneyi filtre edilmiş zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_0=11.44$)	178
Şekil Ek 3.2	Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi filtre edilmiş permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 11.44$, Kademeli Yükleme: 5.0 kPa).....	178
Şekil Ek 3.3	Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi filtre edilmiş permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 11.44$, Kademeli Yükleme: 25.0 kPa).....	179
Şekil Ek 3.4	Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi filtre edilmiş permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_{00}= 11.44$, Kademeli Yükleme: 85.0 kPa).....	179

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Farklı araştırmacılar tarafından önerilen boşluk oranı (e)-permeabilite katsayısı (k) eşitlikleri.....	13
Çizelge 4.1 Deneylerde uygulanan Darcy hızları.....	53
Çizelge 4.2 Haliç kili $e_{00}=11.44$ (Deney No:1)) deney sonuçları.....	56
Çizelge 4.3 Haliç kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (SEK) ve kademeli yükleme ile permeabilite ölçümü deney sonuçları.....	57
Çizelge 4.4 Alibey yeşil kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (SEK) ve kademeli yükleme ile permeabilite ölçümü deney sonuçları	64
Çizelge 4.5 Alibey siyah kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (SEK) ve kademeli yükleme ile permeabilite ölçümü deney sonuçları	66
Çizelge 5.1 Haliç kili SICTA programı ile belirlenen A,B,C, D ve Z katsayıları değerleri.....	75
Çizelge.5.2 Alibey Barajı yeşil kili için SICTA programı ile belirlenen A,B,C,D ve Z katsayıları değerleri.....	78
Çizelge 5.3 Alibey Barajı siyah kili için SICTA programı ile belirlenen A,B,C,D ve Z katsayıları değerleri.....	89
Çizelge 5.4 Haliç kili oturma analizlerinde kullanılan ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleriyle belirlenen A,B,Z,C ve D katsayıları	91
Çizelge 5.5 Fosfatik killerde zemin indeks özellikleri ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleriyle belirlenen A,B,Z,C ve D katsayıları.....	93
Çizelge Ek 1.1 Haliç kili $e_{00}=7.89$ (Deney No:2) deney sonuçları	130
Çizelge Ek 1.2 Haliç kili $e_{00}=9.36$ (Deney No:3) deney sonuçları	133
Çizelge Ek 1.3 Haliç kili $e_{00}=6.57$ (Deney No:4) deney sonuçları	134
Çizelge Ek 1.4 Haliç kili $e_{00}=7.52$ (Deney No:5) deney sonuçları	137

ÖNSÖZ

Günümüzde dipsel tarama çamurları, maden çamurları, kanalizasyon çamurları gibi atık maddelerin depolanması ve depolandıkları sahaların kullanıma kazanılması ekonomik ve çevresel açılarından önem taşımaktadır. Bu alanların kullanıma kazanılması için depolandığı sahalarda davranışının tahmin edilmesi ile mümkün olacağı açıktır. Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altında non-lineer olan deformasyon davranışının doğru tahmini; fiziksel olayı modelleyen bir matematiksel model ile denklemin çözümünü için gerekli zeminin özelliklerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilebilir. Son otuz yılda yapılan bilimsel çalışmalar yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin deformasyon davranışı hakkında önemli bulgular elde edilmesini sağlamıştır.

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özellikleri belirlemek üzere farklı çalışma prensiplerine sahip bir çok deney yöntemi literatürde mevcuttur. Bu deneylerin bazıları sabit deformasyon hızlı deneyler, konsolidometre, hidrolik yük farkı, santrifüj deneyleri ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri olarak sayılabilir. Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özellikleri belirlemek üzere son yıllarda ilk kez İmai (1979) tarafından oluşturulan sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği diğer yöntemlere kıyasla bir çok avantaja sahiptir. Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği Znidarcic ve Liu (1989) tarafından geliştirilerek yüksek nonlinear konsolidasyon ilişkilerini değerlendirmek için daha güvenilir yeni bir deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem İmai (1979) tarafından düzenlenen orijinal sızıntı etkili konsolidasyon deneyi esas alınarak düzenlenmiştir.

Bu tez çalışmasında üç farklı kil numunesi üzerinde (Haliç kili, Alibey yeşil kili, Alibey siyah kili) farklı sıfır efektif gerilme başlangıç boşluk oranlarında (e_{00}) hazırlanmış numunelerde sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deneylerini içeren bir deneysel çalışma programı gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında genel bir giriş bölümünden sonra 2. Bölümde konu ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. 3. Bölümde ise yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde konsolidasyon kuramlarına ait bilgiler verilmiştir. 4. Bölümde bu tez çalışmasında da kullanılan ve yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özelliklerini belirlemeye yarayan sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneğini hakkında bilgi verilmiş, sızıntı etkili konsolidasyon, kademeli yükleme ve permeabilite ölçümü deneylerinin yapılışı özetlenerek deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. 5. Bölümde deneylerden elde edilen sonuçların analizlerine yer verilmiştir. 6. ve son bölümde ise sonuçlar ve öneriler kısmına yer verilmiştir.

Tez çalışmam sırasında, değerli bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasında katkılarını gördüğüm tez yürütücüm Prof Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN'a, her konuda maddi ve manevi destek gördüğüm sevgili eşim Yrd.Doç Dr. Mehmet Berilgen'e, deney sisteminin çalışması için gerekli yazılımı University of Wisconsin'de hazırlayarak yollayan Prof.Dr. Tuncer EDİL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarımdaki problemlerin çözümünde başvurduğum Öğr.Gör.Dr. Şükrü ÖZÇOBAN'a yardımlarını esirgemeyen yakın arkadaşım Araş.Gör. Perihan İPEKOĞLU'na, Araş. Gör. Murat Tonaroğlu'na, Araş.Gör. Pelin TOHUMCU'ya, Araş.Gör. Şenol ADATEPE'ye, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarından dolayı teknisyen Erhan EROL'a ve Ali YÜKSEL'e ve emeği geçen herkese çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince beni sabırla destekleyen, yardımlarını esirgemeyen anne, baba ve kızıma gösterdikleri anlayış için çok teşekkür ederim.

ÖZET

Günümüzde dipsel tarama çamurları, maden çamurları, kanalizasyon çamurları gibi atık maddelerin depolanması ve depolandıkları sahaların kullanıma kazanılması ekonomik ve çevresel açılardan önem taşımaktadır. Bu alanların kullanıma kazanılması için depolandığı sahalarda davranışının tahmin edilmesi ile mümkün olacağı açıktır. Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altında non-lineer olan deformasyon davranışının doğru tahmin edilmesi için fiziksel olayı modelleyen bir matematiksel model ile denklemin çözümünü elde edebilmek için zeminin özelliklerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilebilir. Son otuz yılda yapılan bilimsel çalışmalar yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin deformasyon davranışı hakkında önemli bulgular elde edilmesini sağlamıştır.

Yüksek su muhtevasına sahip killi malzemelerin konsolidasyon davranışının incelenmesinde malzemenin kendi ağırlığı altında ve çok küçük efektif gerilme durumlarında konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi klasik konsolidasyon deneyleriyle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ilk kez İmai (1979) tarafından bu tip zeminlerin davranışını gerçeğe daha yakın modelleyen, akış hızı kontrollü sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (Seepage Induced Consolidation Test) kullanılmış ve bu düzenek Abu-Hejleh, Znidarcic ve Barnes (1996) tarafından geliştirilerek sızıntı etkisi bir pompa tarafından sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin depolandığı sahada kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altındaki davranışını tahmin edebilmek için gerekli sıkışma özelliklerinin (efektif gerilme-boşluk oranı($e-\sigma_v$) ve permeabilite-boşluk oranı($k-e$) ilişkisi) belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda YTÜ Geoteknik Laboratuvarı'nda sızıntı etkili bir konsolidasyon deney düzeneği kurularak, üç ayrı kil için "slurry" kıvamda hazırlanan numuneler üzerinde sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen boşluk oranı-efektif gerilme($e-\sigma_v$) ve efektif gerilme-permeabilite katsayısı ilişkisine ait bulguların literatürde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde elde edilen bulgularla uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Suyu doymuş yumuşak zeminler, konsolidasyon, sızıntı etkili konsolidasyon deneyi.

ABSTRACT

Storing contaminant soils, such as dredge materials, sludge and mine tailings, and reclaiming contaminant soil storage areas back into the economy has arisen as an important economical and environmental problem in today's world. It is clear that this reclamation will only become possible after successful prediction and modelling of behaviour of soil in the storage areas. In order to accurately predict the non-linear deformation behaviour of high water content soils under its own weight and/or through surcharge loading, it is imperative that we obtain both a mathematical model that will accurately predict the physical event, and also, to solve this mathematical model, the physical properties of the soil. The scientific studies in the last thirty years have revealed important discoveries regarding the deformation behaviour of high water content soils.

Determination of consolidation properties of high water content clays under its own weight and/or very little effective stress is currently not possible through the classic experimental methods. A new experimental technique, dubbed "Seepage Induced Consolidation Test" by Imai (1979), was developed to more realistically study the consolidation behaviour of such high water content soils under seepage forces. This experimental setup was further developed by Abu-Hejleh, Znidarcic and Barnes (1996) through simulation of seepage forces using a flow pump applied to the soil sample.

The goal of this thesis was to determine the consolidation properties (specifically the "variation of void ratio with effective stress ($e-\sigma_v$)" and "coefficient of permeability with void ratio ($k-e$)" relationship) of high water content soils that are deposited in areas where they are subject to compression under their own weight and/or surcharge loads. A seepage induced testing system was built at the Yildiz Technical University Soil Mechanics Laboratory, and this system was used to investigate three different clay samples that were prepared in a slurry style mix. The experimental results were observed to be consistent with the relationships proposed in the literature for the "variation of void ratio with effective stress" and "coefficient of permeability with void ratio" during consolidation of high water content soils.

Keywords: Saturated soft soil, consolidation, seepage induced consolidation test.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Ekonomik ve çevresel güvenlik açısından yüksek sıkışabilirliğe sahip dıpsel çamur, maden çamurları, kanalizasyon çamurları gibi atık maddelerin uygun bir yerde depolanması ve bu depolama sahalarının kullanıma kazandırılması son yıllarda geoteknik mühendisliğinde çözüm aranan önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Ülkemizde de Haliç, İzmir Körfezi, İzmit Körfezi gibi çevre kirliliği olan bölgelerdeki denizel dıpsel çamurların taranarak depolanması veya çeşitli endüstriyel ve kentsel atık çamurların depolanması güncel mühendislik problemlerindedir. Bu çamurların depolanarak yeni araziler elde edilmesi hem güvenlik hem de ülke ekonomisi açısından yararlı olmaktadır. Dünyada bu şekilde atık çamurlar ile ortaya çıkan sahaların değerlendirilerek kullanıldığı bir çok örneğe A.B.D ve Japonya gibi ülkelerde sık rastlanılmaktadır. Ülkemizde de son yıllarda İstanbul'da Haliç'in kirlenmesine çözüm getirmesi bakımından yaklaşık 5 milyon metre küp dıpsel çamuru taranarak Alibey'de kullanılmayan eski taş ocaklarında bir baraj arkasında oluşturulan depolama havuzuna pompalanmıştır. Bu depolama alanında pompalanan çamur kütlesi üzerinde oluşan sahanın İstanbul kentine kazandırılması ekonomik ve sosyal açıdan yararlı olacaktır. Bu sahanın kazanılması için yapılacak iyileştirme çalışmalarında depolanan çamurun kendi ağırlığı ve/veya üzerine konacak sürşarj yükleri altındaki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Depolanan çamurun davranışını tahmin etmede deneysel yöntemlerden yararlanarak oturma-zaman ilişkisinin belirlenmesi gerekmektedir.

Taranmış çamurlar gibi yüksek su muhtevasına sahip zeminler kayma mukavemeti sıfır veya sıfıra yakın olan malzemelerdir. Ayrıca yüksek miktarda organik madde içermektedirler. İşte bu nedenlerden dolayı klasik zemin mekaniği teorileri ile davranışlarını açıklamak mümkün olmamaktadır. Bu malzemelerin depolandıkları sahalarda kendi ağırlıkları altında zamanla sırasıyla sedimantasyon, konsolidasyon ve desikasyon olayları gerçekleşmektedir.

Yüksek su muhtevasına sahip bu malzemelerin depolandığı sahalarda çökmesi geoteknik mühendisliği açısından önemsenmediği için analizlerde genellikle ihmal edilmektedir. Sedimentasyon süreci konsolidasyonla karşılaştırıldığında çok kısa sürmekte buna rağmen konsolidasyon, yıllar süren bir zaman dilimi içinde gerçekleşmektedir. Arazideki yumuşak zeminin kendi ağırlığı altında sedimantasyonu sonrası konsolidasyon problemini çözebilmek için dört elemana ihtiyaç vardır. Bunlar konsolidasyonu ifade eden denklem, başlangıç ve sınır koşulları, malzeme özellikleri ve çözüm yöntemidir. Analizlerdeki en önemli madde çok

geniş bir aralıkta değişen ve her yeni malzeme için belirlenmesi gereken malzeme karakteristikleridir. Bu malzeme karakteristiklerinin kalitesi arazide yumuşak zeminlerin konsolidasyon analizleri sonuçlarının gerçek değerlere yaklaşmasında büyük önem taşır. Konsolidasyon süreci, zemine ait sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerinin her ikisine de bağlıdır.

Konsolidasyon sürecinin bitimine bağlı olarak, suyun yukarı akışıyla desikasyon olayı başlar. Genellikle desikasyon buharlaşma olarak tanımlansa da yeraltı su seviyesinin yeterince azalması da desikasyona neden olabilir. Genellikle desikasyon süreci emme veya negatif boşluk suyu basıncı altında zeminin sıkışması olarak tanımlanabilir. Bu nedenle boşluk suyu basıncı atmosfer basıncı altına düştüğünde zemin desikasyona uğrar. Bu süreç içinde zemin büzülür ve su kaybeder fakat büyük bir bölümünde suya doygunluk korunur.

Yüksek su muhtevasına sahip yumuşak killi zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi sırasında malzemenin kendi ağırlığı altında ve çok küçük efektif gerilme durumlarında konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi klasik konsolidasyon deneyleriyle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ilk kez İmai (1979) tarafından bu tip zeminlerde akış hızı kontrollü hidrolik konsolidasyon deneyini uygulamıştır. Daha sonra bu deney yöntemi sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (Seepage Induced Consolidation Test) adını almıştır. İmai (1979) deneyleri sabit-duvar konsolidometresinde numune içinde aşağı doğru oluşturulan bir hidrolik eğim ile gerçekleştirmiştir. Bu sayede numunede oluşan sızıntı kuvvetleri zemini konsolide etmiş ve numune içinde uniform olmayan bir efektif gerilme dağılışı oluşması sağlanmıştır. Numune içinde oluşan boşluk suyu basıncı deney süresince ölçülmüş, boşluk oranı dağılımı deney sonunda numuneyi dilimlere ayırarak hesaplanmıştır. Znidarcic ve Liu (1989) yüksek nonlineer konsolidasyon ilişkilerini değerlendirmek için daha güvenilir yeni bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem İmai (1979) tarafından düzenlenen orijinal sızıntı etkili konsolidasyon deneyi esas alınarak düzenlenmiştir. Bu yeni yöntem diğer deney yöntemlerindeki dezavantajları ve sınırlandırılmaları ortadan kaldırmıştır.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında yüksek su muhtevasına sahip çeşitli killerin kendi ağırlıkları ve/veya sürşarj yükleri altında konsolidasyon oturmalarını tahmin etmek kullanılan hesap yöntemlerinde kullanılacak malzeme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu hesap yöntemleri çamurun kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu hesaplayabilmek için çok küçük

gerilme seviyelerinde boşluk oranı-efektif gerilme ve hidrolik iletkenlik boşluk oranı ilişkisini göz önüne almaktadır. Bu ilişkilerin saptanması için yukarıda sözü edilen yeni deney teknikleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, halen dünyada düşük gerilme seviyelerinde malzemenin sıkışabilirlik özelliklerini elde etmekte kullanılan en verimli deney tekniği Seepage Induce Test(Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi)'lerden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında Haliç dipsel tarama çamuru, slurry hale getirilmiş Alibey Barajı civarından alınan siyah ve yeşil killer üzerinde Sızıntı Etkili Konsolidasyon deneyleri yapılmış ve elde edilen verilerle nonlineer konsolidasyon analizler yapılmıştır. Analizler Haliç tarama çamurunun depolandığı saha ve aynı sahadan alınan çamurun bir laboratuvar model deneyindeki davranışını içermektedir.

Diğer yandan sızıntı etkili kondolidasyon deneyinden elde olunan bünye özelliklerinin (boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı -hidrolik iletkenlik) zeminin kıvam özellikleri ve başlangıç boşluk oranı (sıfır efektif gerilmeye karşı gelen) ile değişimi araştırılmış ve bu değişimlerden boşluk oranı- efektif gerilme ve hidrolik iletkenlik boşluk oranı değişimini veren ampirik bağıntılar bulunmuştur.

Yukarıda verilen amaçlar ışığında hazırlanan bu tezde birinci bölümde yüksek su muhtevallı zeminlerin davranışını araştırmanın gerekçeleri ve tez planı verildikten sonra ikinci bölümde konuyla ilgili literatür araştırmasına yer verilmiş ve üçüncü bölümde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon davranışını analiz etmek için geliştirilen konsolidasyon kuramları açıklanmıştır. Dördüncü bölümde Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deney Yöntemi ayrıntılı bir şekilde verildikten sonra beşinci bölümden yapılan sızıntı etkili deney sonuçlarından elde edilen bulgular sunulmaktadır. Ayrıca bu bölümde deneylerden elde edilen bulgular ile yapılan nümerik analiz sonuçlarının arazi ve laboratuvar model deneyi ölçümleri ile karşılaştırılmasına yer verilmekte ve yukarıda bahsedilen bünye özelliklerinin kıvam özellikleri ve başlangıç boşluk oranına göre değişimleri incelenmektedir. Bu inceleme sonucunda bir takım ampirik bağıntılar elde edilmekte ve bu bağıntılarla model ve arazi analiz edilerek ölçümlerle karşılaştırılmaktadır. Altıncı ve son bölümde ise elde olunan bulgular ışığında sonuç ve öneriler verilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin mühendislik özelliklerinin bilinmesi onlar üzerinde yapılacak işlemler (taşınma, depolama ve yeniden kazandırma gibi) için yöntem belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Bu tür zeminleri meydana getiren danelerin boyutları, kıvam limitleri, başlangıç boşluk oranları, kendi ağırlıkları altında sıkışma özellikleri depolandıkları sahalarda davranışları yani kendi ağırlıkları altında ve/veya üzerlerine konan yükler altında oturmalarını belirlemek açısından önemlidir.

Tarama çamurları madensel çamurlar gibi yüksek su muhtevalarındaki yumuşak zeminlerde, uzun yıllardır yapılan çalışmalar, bu tip zeminlerin arazide depolandıkları yerlerdeki davranışları izlenerek laboratuvar ve arazi deneyleri yardımıyla benzer zeminlerin davranışlarını tahmin etmek açısından büyük gelişmeler sağlamıştır. Ayrıca yapılan çalışmalar, araştırmalar sırasında kullanılan deney yöntemlerinin geliştirilmesine ve böylece nümerik çalışmaların daha başarılı olmasına yardımcı olmuştur. Literatürde nehir ve denizlerden taranan malzemelerde, Florida fosfatik killeri gibi maden çamurlarından oluşan yumuşak killerde ve ayrıca su muhtevası çok yüksek çok yumuşak organik killer üzerinde yapılan bir çok çalışmaya rastlamak mümkündür (Carrier, Bromwell, ve Somogyi, (1983), Somogyi,(1979), McWay,Townsend, ve Bloomquist,(1986), Hejlen, ve Znidarcic, (1992)). Bu bölümde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin mühendislik özellikleri ve bunlar üzerinde yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

2.2 Yüksek Su Muhtevasına Sahip Yumuşak Killi Zeminler

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin sonlu şekil değiştirme konsolidasyon problemleri; matematik modellemede, yeni laboratuvar deney yöntemleri ve yeni malzeme modelleri geliştirilmesinde büyük katkılar sağlamıştır. Bu problem fiziksel ve matematiksel olarak hayli non-lineer olup arazi ve malzeme özelliklerinin dağılımı genel olarak geoteknik mühendisliğinin olaya bakış kapsamından daha geniştir. Verilen bir problemde hatayı en aza indirerek en doğru çözüme ulaşabilmek açısından, problemi oluşturan her bir eleman dikkatle incelenerek sonucu etkileyecek yanlış veri girişini en aza indirmek gerekmektedir.

2.3 Yüksek Su Muhtevasına Sahip Zeminlerin Malzeme Özellikleri

2.3.1 İndeks Özellikleri

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyonunu hesaplamada başarılı sonuçlar elde edilebilmesi için arazideki davranışı doğru modelleyecek bir teori ve kullanılacak malzeme özelliklerinin uygun ve doğru olarak seçilmesine gereksinim vardır. Bu nedenle konsolidasyonu tanımlayan teori arazi koşullarını yeterli olarak yansıtmalı ve gerekli materyal özellikleri doğru ve tam olarak belirlenmelidir.

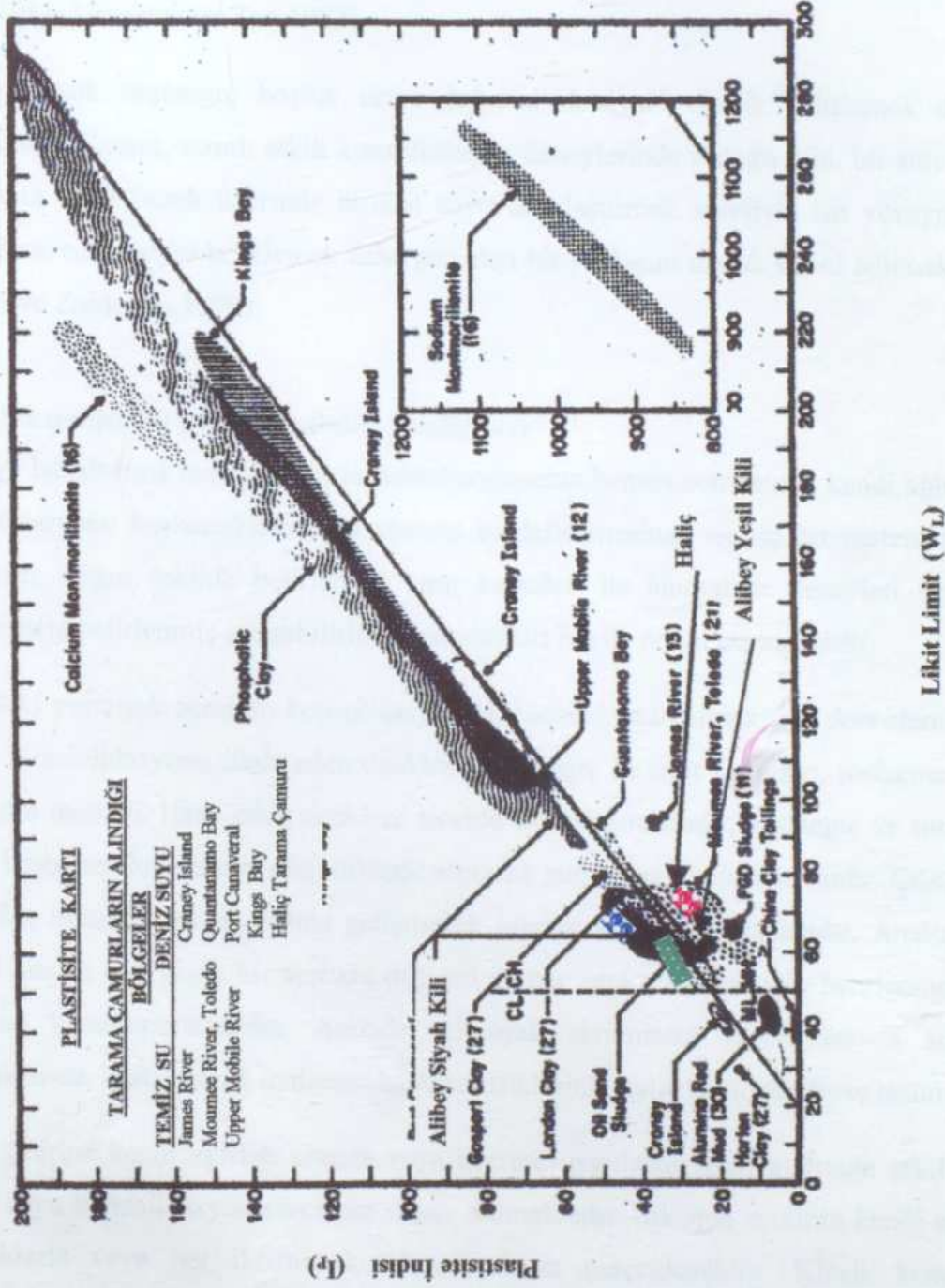
Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde tüm malzeme parametrelerinin değerlendirilmesi problemin çözümünde başarıya ulaşmak açısından büyük önem taşımaktadır. Öncelikle araziye yerleştirilecek malzeme miktarı ve boşluk oranı yapılan ölçümler ile yeterli doğrulukta belirlenmelidir. Araziye yerleştirilen bu malzemenin boşluk oranını belirlemek zor bir iş olmakla birlikte, uygun ekipman ve deneyimli kişiler tarafından örselenmemiş numuneler alınarak veya örselenmiş zeminden alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerle bulunan indeks özellikleri ampirik formüllerde kullanılarak belirlenebilir.

Konsolidasyon süreci zemine ait sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerinin her ikisine de bağlıdır. Bu özelliklerin yanı sıra zemine ait plastisite özelliği de yapılan bir çok araştırmada belirlenmiştir. Amerika Birleşik Devletinde çok sayıda farklı taranmış çamur malzemede yapılan deneylerde elde edilen plastisite kartı Şekil 2.1 (Carrier, Bromwell ve Somogyi, 1983) verilmiştir. Bu çalışmada üzerinde çalışılan zemin malzemeleri de bu grafiğe işlenmiştir. Grafikte taranmış çamurlarda elde edilen değerlerin çok geniş bir alana yayılmasına rağmen, deneyimler göstermiştir ki (Krizek ve Salem,1974; Carrier, Bromwell ve Somogyi,1983) aynı bir bölgedeki zemin özellikleri çok benzerdir.

Başlangıç boşluk oranı genellikle taranmış çamur zemin tabakalarının kendi ağırlığı altında konsolidasyon analizlerinde, zeminin sedimentasyonu esnasında sıfır gerilme durumunu ifade ederken kullanılmaktadır. Monte ve Krizek (1976) bu durumu zeminin maksimum su muhtevasına sahip olmasına nedeniyle zemin-su sisteminin viskoz bir sıvı gibi davranması nedeniyle "limit akış" durumu olarak nitelendirmişlerdir. Killi zeminlerdeki permeabilite ölçümlerinden ve bünye denklemlerinden ortaya çıkana tartışmalarda, Monte ve Krizek (1976) başlangıç boşluk oranı (e_0) değeri likit limitin dört-beş katına eşit olduğunu iddia etmişler ve slurry konsolidasyon deneylerinden elde edilen

$$e_0=4.30w_L \quad (2.1)$$

eşitliğini kullanmışlardır. Carrier,Bromwell ve Somogyi (1983) tarafından yapılan çalışmada



Şekil 2.1 Farklı tarama çamurlarında ve madeni çamurlarda Atterberg Limitleri (Carrier vd, 1983)

dönüştürülmüştür. Literatürde birçok sonlu şekil değiştirme teorisi eşitlikleri mevcut olup bu eşitliklerin esasını aynı temel ilkeler üzerine kurulmuştur.

Terzaghi konsolidasyon teorisindeki yetersizliği aşmak için önerilen ve nümerik çözümlerde sonlu farklar yöntemini kullanan iki farklı yaklaşımların birincisi "artan küçük şekil değiştirme", ikincisi ise "sonlu şekil değiştirme" yaklaşımıdır. Artan küçük şekil değiştirme modelinde, Olson ve Ladd (1979) Yong, Siu ve Sheeran (1983), Fox ve Berles (1997) gibi araştırmacılar Terzaghi eşitliğindeki basitliği korumuşlar ve adimsal lineer artım tekniği ile sonlu şekil değiştirme analizi yapılmasına olanak sağlamışlardır. Bu önerilen çözüm yöntemlerinin hepsinde, gözönüne alınan tabakayı alt tabakalara ayırmayı gerektirmektedir. Her tabaka için farklı malzeme özellikleri tanımlanmakta ve her farklı tabakadaki ara yüzeyler arasında süreklilik sağlanmaktadır. Konsolidasyon modellerinde kullanılan tüm eşitliklerde zemin tamamen suya doygun, zeminin ve suyun hareketi tek boyutlu ve konsolidasyonun birincil olduğu kabul edilmektedir.

Yapılan araştırmalarda üstel fonksiyonların, zeminlerin tek boyutlu konsolidasyon davranışını en iyi şekilde tanımladığı ve deneysel verilere kolayca uygulanabildiği bulunmuştur. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Monte ve Krizek (1976) tarafından tarama çamurları gibi yumuşak killi zeminlerin sıkışması ile ilgili yapılan araştırmalarda efektif gerilme (σ') ve şekil değiştirme (ε) arasındaki ilişkiyi,

$$\sigma' = M\varepsilon^N \quad (2.3)$$

$N=2$ olarak parabolik olarak ifade etmişlerdir. Koppula ve Morgenstern (1982) tarafından yapılan çalışmada ise ,

$$\frac{de}{d\sigma'} = \left[\frac{de}{d\sigma'} \right]_0 \left[\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right]^P \quad (2.4)$$

eşitlik e boşluk oranı ve P (yarı logaritmik eşitlik ise 1-lineer ise 0) 1 ve 0 arasında değişen sabit bir sayı olacak şekilde ifade edilmiştir.

Cargill (1983) ise araştırmasında e_{00} , v , e_{∞} ve λ ampirik parametreler olmak üzere eksponansiyel eşitliği ,

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda\sigma') + e_{\infty} \quad (2.5)$$

olarak ifade etmişlerdir. Somogyi (1979) tarafından sıkışmayı tanımlamak üzere A ve B ampirik katsayılar olarak belirlenmiş ve eşitlik,

$$e = A\sigma'^B \quad (2.6)$$

olarak verilmiştir. Son olarak bu konuda Liu ve Znidarcic (1991) tarafından yapılan çalışmalarda konsolidasyon sırasında yumuşak killerin sıkışmasını tanımlayan ,

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (2.7)$$

(2.7) eksponansiyel fonksiyonunun deneysel verilere kolayca uydurulabildiği bulunmuştur. Eşitlikte B üssü değeri daima negatiftir. Araştırmacılar bu formdaki sıkışabilirlik ilişkisi ile, genel logaritmik eşitlikte bulunan tüm eksikliklerin giderildiğini ileri sürmüşler, sıfır efektif gerilme durumundaki boşluk oranı tanımlanarak, gerilme büyüklüğüne bakılmaksızın boşluk oranının negatif olmasının engellendiğini belirlemişlerdir.

Yumuşak zeminlerin konsolidasyon probleminde en büyük önemi taşıyan ilişkinin permeabilitenin boşluk oranıyla ilişkisi olmasına rağmen, bu ilişkinin sınırlarının büyüklüğü problemi ilişkiyi en zor belirlenen ilişki haline getirmektedir. Şekil 2.2'de de görülebileceği gibi permeabilitenin boşluk oranıyla değişimi çok büyük aralıklarda gerçekleşmektedir.

Monte ve Krizek (1976) tarafında önerilen eşitlik,

$$\frac{k}{1+e} = S + Te \quad (2.8)$$

formunda olup k permeabilite katsayısı, S ve T ampirik katsayılarıdır. Koppula ve Morgenstren (1976) tarafından yapılan çalışmada ise eşitlik yeniden düzenlenerek,

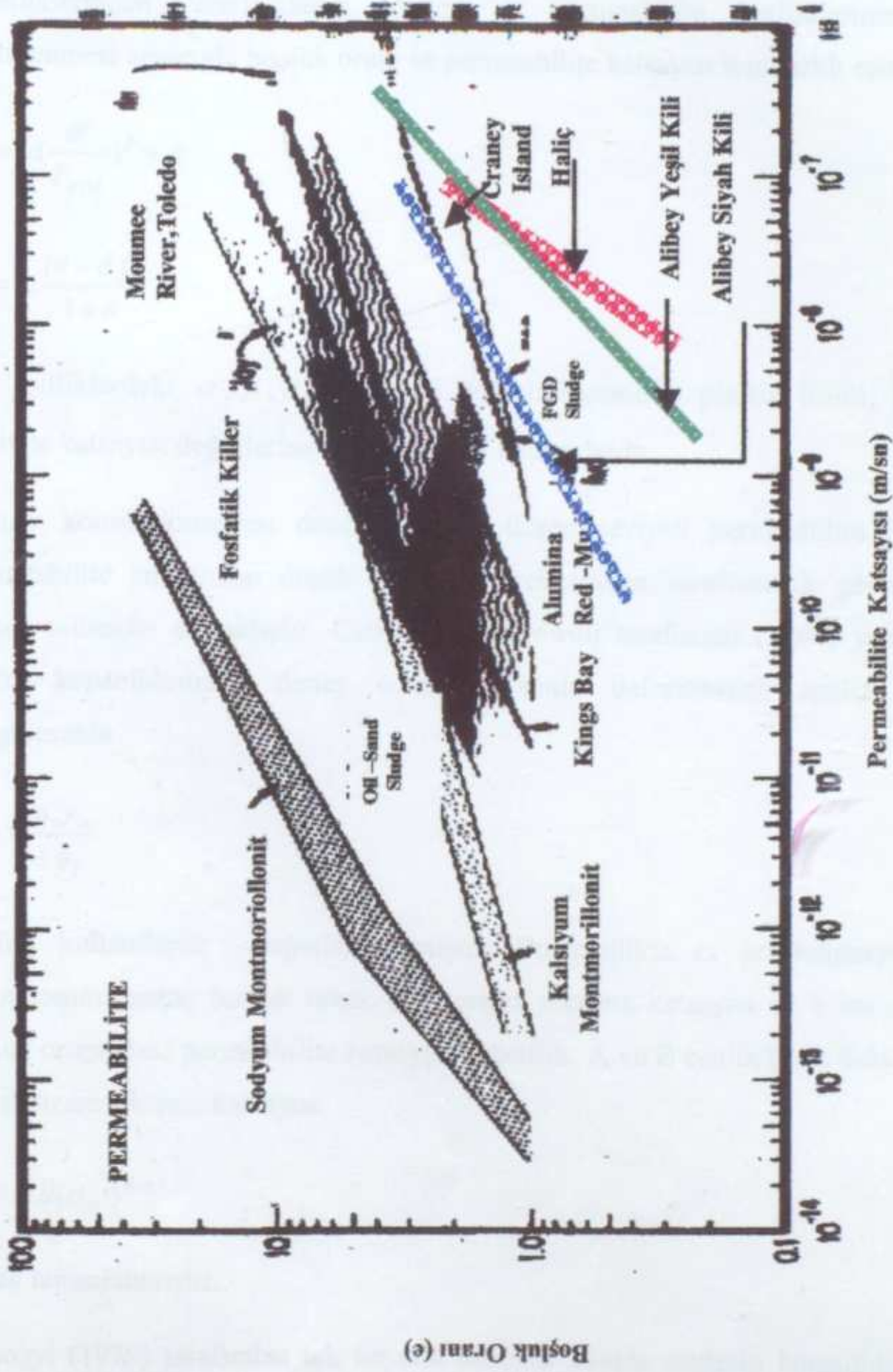
$$\frac{k}{1+e} = \left[\frac{k}{1+e} \right]_0 \left[\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right]^R \quad (2.9)$$

şeklinde verilmiştir. Burada R ampirik bir katsayıdır. Samarasinghe, Huang ve Dervich (1982), Bromwell ve Somogyi (1983) yılında yapılan çalışmalarda,

$$k(1+e) = Ee^F \quad (2.10)$$

ve Carrier ve Beckman (1984) tarafından yapılan çalışmada ise

$$k(1+e) = G(e-H)^J \quad (2.11)$$



Şekil 2.2 Farklı tarama çamurlarında ve madeni çamurlarda permeabilite katsayısı –boşluk oranı değişimi ((Carrier vd, 1983)

F,G,H ve J ampirik katsayılar olmak üzere farklı artımsal eşitlikler öne sürülmüşse de bu yaklaşımlar teorilerde kullanılmamıştır.

Carrier ve Beckman tarafından (1984) yapılan farklı bir çalışmada; zeminlerin indeks özelliklerinden yararlanılarak sıkışma ve permeabilite özelliklerinin pratikte kolayca belirlenmesi amacıyla boşluk oranı ve permeabilite katsayısı için farklı eşitlikler önerilmiştir.

$$e = \alpha \left(\frac{\sigma'}{P_{ATM}} \right)^\beta + \varepsilon \quad (2.12)$$

$$k = \mu \frac{(e - \delta)^\nu}{1 + e} \quad (2.13)$$

Bu eşitliklerdeki $\alpha, \beta, \varepsilon, \eta, \nu, \delta$ değerleri zeminin plastik limiti, plastisite indisi ve aktivite katsayısı değerlerine bağlı ampirik katsayılardır.

Çamur konsolidometresi deney aletinde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılarak permeabilite katsayısını düşük sızıntı kuvvetlerinden yararlanarak güvenilir değerler elde etmek mümkün olmaktadır. Carrier ve Bromwell tarafından (1980) yapılan bir çalışmada slurry konsolidometre deney sonuçları sonlu deformasyon analizi yapan bilgisayar programında

$$k = \frac{c_v a_v \gamma_w}{1 + e_f} \quad (2.14)$$

eşitliği kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu eşitlikte c_v konsolidasyon katsayısı, e_f malzemenin sonuç boşluk oranı, a_v zeminin sıkışma katsayısı ve k ise malzemenin sonuç boşluk oranındaki permeabilite katsayısı değeridir. A ve B eşitlik (2.6)'deki ampirik katsayılar olmak üzere sıkışma katsayısı

$$a_v = AB(\sigma'_b)^{B-1} \quad (2.15)$$

olarak tanımlanmıştır.

Somogyi (1979) tarafından tek boyutlu sıkışma altında zeminin konsolidasyonu sırasındaki permeabilite değerleri

$$k = C e^D \quad (2.16)$$

fonksiyonuyla tanımlanmıştır. Burada C ve D ampirik katsayılarıdır. Konsolidasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan bu non-linear eşitlik permeabiliteyi modellemek üzere tanımlanan diğer fonksiyonlardan daha esneklerdir.

Fox (1997) tarafından; çamur malzemelerin sıkışabilirlik ve hidrolik geçirgenlikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi için uygulanan hidrolik konsolidasyon deneyinde farklı bir deney tekniği ve deney sonuçlarının yorumlanmasında esas alınacak yeni bir teori uygulanmasını öneren farklı bir çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada esas alınan teoride Fox (1996) permeabilite katsayısını

$$k_v = k_{v0} (\sigma_v' / \sigma_{v0}')^{-A} \quad (2.17)$$

olarak tanımlamıştır. A katsayısı C_c / C_k ya eşittir. Burada C_c sıkışma indisi ve C_k hidrolik geçirgenlik değişimi indeksi değerleri olup A katsayısı sabit bir değer değildir.

Yumuşak zeminlerde yapılan deneysel çalışmaların amacı eşitliklerde kullanılan parametreleri en doğru şekilde belirleyerek konsolidasyon problemlerinde güvenilir sonuçlara ulaşmayı sağlayabilmektir. Bu tip yüksek su muhtevasına sahip yumuşak zeminlerde kendi ağırlığı ile konsolidasyon söz konusu olduğundan çok küçük efektif gerilme seviyelerine karşılık boşluk oranı ve permeabilite katsayısı değerlerinin saptanması arazideki davranışı modellemek açısından büyük önem taşımaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen boşluk oranı ve permeabilite katsayısı bağıntıları Çizelge 2.1' de bir tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 2.1 Farklı araştırmacılar tarafından önerilen boşluk oranı(e)-permeabilite katsayısı eşitlikleri

Araştırmacılar	Boşluk Oranı (e)	Permeabilite Katsayısı (k)
Cargill (1983)	$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma') + e_{\infty}$	
Carrier ve Beckman (1984)	$k(1+e) = G(e-H)^J$	$k(1+e) = G(e-H)^J$
Koppula ve MorgEnstern (1982)	$\frac{de}{d\sigma'} = \left[\frac{de}{d\sigma'} \right]_0 \left[\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right]^P$	$\frac{k}{1+e} = \left[\frac{k}{1+e} \right]_0 \left[\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right]^R$
Somogyi (1979)	$e = A\sigma'^B$	$k = C e^D$
Liu ve Znidarcic,(1991)	$e = A(\sigma' + Z)^B$	$k = C e^D$
Monte ve Krizek(1976)	$\sigma' = M\varepsilon^N$	$\frac{k}{1+e} = S + Te$
Carrier ve Bromwell (1983)	$e = \alpha \left(\frac{\sigma'}{P_{ATM}} \right)^B + \varepsilon$ (1983)	$k = \frac{c_v a_v \gamma_w}{1+e_f}$ (1980), $k = \mu \frac{(e-\delta)^v}{1+e}$ (1983)
Samarasinghe,Huangve Drenvich (1982), Carrier Bromwell ve Somogyi (1983)	-	$k(1+e) = Ee^F$
Fox (1997)	-	$k_v = k_{v0} (\sigma'_v / \sigma'_{v0})^{-A}$

2.4 Arazi Özellikleri

Geoteknik mühendisliğinde bir çok problemde zemin özelliklerinin belirlenmesinde ortaya çıkan zorluklar, bir alanda depolanan taranmış malzemelerde, arazide oluşan kendine özgü farklı durumlar nedeniyle önemli boyutlara ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra bu tip malzemelerin arazide ve bazen de laboratuvar koşullarında, problemin matematik modellenmesinde yeterli derecede tanımlanamayan bazı fiziksel özellikleri vardır. Bu özelliklerden bazıları malzemenin heterojenliği, depolama sahasında malzemenin organik içerikli olmasına bağlı farklı nitelikteki gaz oluşumları, ikincil konsolidasyon ve zeminin desikasyonuna bağlı kabuk oluşumu olarak sıralanabilir.

2.5 Yüksek Su Muhtevasına Sahip Yumuşak Killerin Konsolidasyon Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Yöntemleri

Sulu çamurların ve çok yumuşak killi zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin farklı gerilme durumlarındaki davranışlarını belirlemek üzere günümüze dek bir çok farklı konsolidasyon deney tekniği uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki düşük efektif gerilme durumlarında klasik konsolidasyon deneyleri zeminin davranışını belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla yapılan her yeni çalışma da bu eksiklikler giderilmeye çalışılarak, zeminin konsolidasyon özelliklerini daha doğru bir yaklaşımla belirleyen yeni deney yöntemleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen her deney yönteminin diğerlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Yüksek su muhtevasına sahip yumuşak zeminlerde malzemenin davranışını ifade eden bünye fonksiyonları $k(e)$ ve $de/d\sigma'$ 'nin belirlenmesi için takip edilen farklı bir yaklaşım konsolidasyonun izlenmesi ve daha sonra alınan verilerden geri-hesap (back analysis) yapılarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Teorilerdeki malzeme özelliklerini hesaplamak için kullanılan farklı bir çok konsolidasyon deneyi bulunmaktadır. Znidarcic, v.d. (1984) tarafından yapılan bir çalışmada, literatürde adı geçen ve pratikte de suya doygun zeminlerin konsolidasyonunda kullanılan deney yöntemleri aşağıda sıralanmıştır :

1. Kademeli yükleme deneyi
2. Sabit deformasyon hızlı deneyler,
3. Eğim kontrollü deneyler,
4. Yük Kontrollü deneyler,
5. Sürekli yükleme deneyleri
6. Relaksiyon deneyleri.

7. Sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri.

Yukarıda adı geçen tüm deney yöntemleri ve analiz yöntemleri zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin laboratuarda belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bazıları kullanılan teorik yaklaşımlar ve kabul ettiği varsayımlar nedeniyle diğerlerinden daha üstündür.

2.5.1 Kademeli Yükleme Deneyi (Ödometre Deneyi)

Standart ödometre deneyi olarak adlandırılan bu deney yöntemi ince bir numune üzerine bir yük artışı uygulanarak meydana gelen oturmaların ölçülmesi şeklinde uygulanmaktadır. İlk defa Terzaghi tarafından uygulanmış bu yöntem zeminlerin konsolidasyon özelliklerin belirlemede en çok kullanılan deney yöntemidir. Bu deney sonuçları zemine ait boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisini ve ters analiz yöntemi kullanılarak permeabilite katsayısı değerini belirlemek mümkün olmaktadır.

Kademeli yükleme deney yönteminin en önemli dezavantajı zeminin konsolidasyon karakteristiklerini belirlemenin sadece deney süresince mümkün olmasıdır. Bu nedenle gerçeğe en yakın sonuçları elde etmek için düzenlenmesi gereken deney haftalarca hatta aylarca zaman alabilmektedir. Bu durum özellikle çok yumuşak numuneler için geçerli olmuş ve bu tip zeminler için farklı deney yöntemlerinin geliştirilmesinde büyük önem taşımıştır.

2.5.2 Sabit Deformasyon Hızlı Deneyler (Constant Rate of Strain, CRS Test,)

Hamilton ve Crawford (1959) tarafından uygulanan sabit deformasyon hızlı deneyler, deney hızını artırmak ve test edilen zeminin deformasyon oranlarını arazi deformasyon oranlarına yaklaştırmak amacıyla düzenlenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında araştırmacılar boşluk oranı- efektif gerilme ilişkilerinde deney sırasındaki deformasyon oranına bağlı olarak önemli farklar meydana geldiğini bulmuşlardır. Araştırmacılar ayrıca deney süresince numunede artık boşluk suyu basıncı ortaya çıktığını ve boşluk suyu basıncının önemli değerlere ulaşmasını engellemek üzere deneyin küçük hızlarda gerçekleştirilmesi gerektiğini belirlemişlerdir. Gelişen deney sistemleri ile deney süresince boşluk suyu basıncı ölçümü yapılarak efektif gerilme değerlerini belirlemek mümkün olmuş ve zemine ait permeabilite ile ilgili bilgileri elde etmek mümkün hale gelmiştir. Özellikle son yıllarda başta zemin iskeletinin zamana bağlı davranışı üzerine çalışan bilim adamları olmak üzere, bir çok araştırmacı tarafından daha sürekli bir veri akışı sağlaması, insan emeğini oldukça aza indirmesi, boşluk suyu basınçlarının ölçülmesine imkan vermesi, deney süresini kısaltması ve numuneyi doyurmak

için ters basınç verilmesine olanak sağlaması gibi avantajları nedeniyle tek boyutlu drenaj şartlarının geçerli olduğu zamana bağlı davranış ile ilgili olarak yapılan çalışmalar sırasında standart ödometre deneylerine kıyasla daha çok kabul görmeye başlamıştır. YTÜ laboratuvarında kullanılmakta olan örnek bir CRS deney düzeneği Şekil 2.3'de verilmiştir. Suya doygun killerde CRS deney sistemi kullanılarak Florida fosfatik killeri, Kaolin ve diğer bazı kil numuneler üzerinde deneyler düzenlenmiş, deney sonuçları yumuşak killerde non-lineer özellikleri ve büyük deformasyonları göz önüne alan "suya doygun zeminlerde tek boyutlu deformasyon teorisi" kullanılarak değerlendirilmiş ve zemine ait permeabilite ve sıkışabilirlik ilişkilerini belirlemede iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir . (Znidarcic vd,1986). CRS Deney verilerini analiz etmek için Smith ve Wahls (1969), Wissa vd.(1971), Umehara ve Zen (1980) ve Lee (1981) tarafından farklı yöntemler geliştirilmiştir.

2.5.3 Hidrolik Eğim Kontrollü Deneyler (Controlled Gradient Test)

Bu deney yönteminde numuneye uygulanacak yükleme hızı drenajsız durumda boşluk suyu basıncı deney boyunca sabit olacak şekilde ayarlanmaktadır. Bunu yapabilmek için sırasıyla geri dönüşümü sağlayacak bir düzeneğe ve gerekli laboratuvar malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır (Znidarcic. vd., 1984).

2.5.4 Sabit Yükleme Hızlı Deneyler (Constant Rate of Loading Test)

Bu deney tekniği ve analiz yöntemi Aboshi (1979) tarafından önerilmiştir ve yöntem Schiffman'ın teorik çalışmasını esas almıştır (Znidarcic, 1984).

2.5.5 Sürekli Yükleme Deneyleri (Continuous Loading Test)

Bu deney tekniği sabit deformasyon hızlı deneyler, eğim kontrollü deneyler ve sabit yükleme hızlı deneylerin bir varyasyonu şeklinde uygulanmaktadır. Bu deney tekniğinde numuneye uygulanan yükün drenajsız yüzeyde oluşan boşluksuyu basıncına oranı sabit olacak şekilde, sürekli bir yük uygulanmaktadır.

Sürekli yükleme deneyi boyunca numunede oluşan boşluk suyu basıncı, uygulana yük ve numunedeki deformasyon değerlerinin zamana bağlı değişimleri bir veri toplama sistemiyle kaydedilerek analizlerde kullanılmaktadır. Ayrıca numunede deney boyunca permeabilitenin sabit olduğu kabulüne uygun olarak yükleme hızları düşük seviyelerde tutulmaktadır.

2.5.6 Relaksasyon Deneyleri

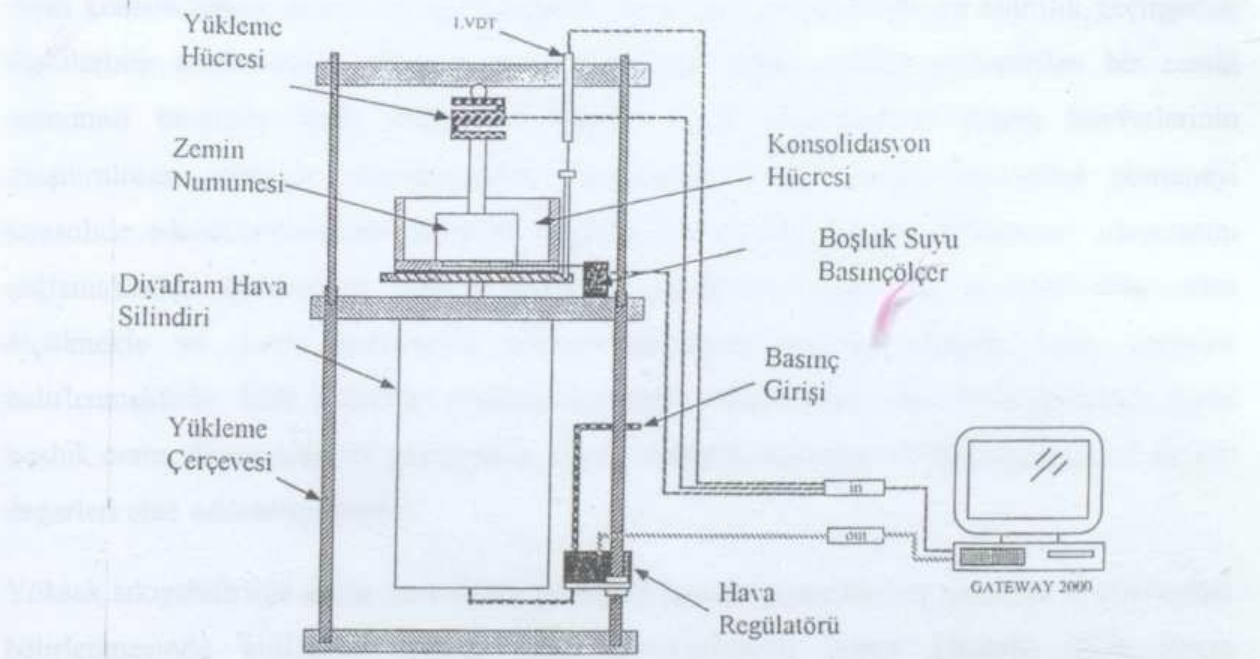
Zemin numunesinde konsolidasyon karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan bir deney

yüklemelerden oluşan bir dizi yüklemelerle birlikte gerçekleştirilir. Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder.

Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder. Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder. Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder.

2.3.7. CRS Deneyi

CRS (Consolidation Rate Test) deneyi, toprakların konsolidasyon hızının belirlenmesi için kullanılan bir dizi yüklemelerle gerçekleştirilir. Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir.



Şekil 2.3 CRS deney düzeneği (Tonaroğlu, 1998)

Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder. Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder. Bu süreçte, yüklemelerin uygulandığı hız ve süreler, deneyin amaçlarına göre belirlenir. Ayrıca, yüklemelerin uygulandığı süreler, deneyin sonuçlarına da etki eder.

yöntemi olan relaksiyon deneyi ilk olarak Terzaghi tarafından konsolidasyon teorisiyle birlikte önerilen bir deney tekniğidir.

Relaksiyon deneyi numunede oluşan kararsız durum şartlarının ardından yapılmaktadır. Bu durum relaksiyon deneyi için bir başlangıç durumu olmaktadır. Numunede kararsız durum halinin oluşturulması kısa zaman aralıklarıyla yük uygulanması veya numunenin uygulanan bir hızla deformasyonu ile sağlanmaktadır. Numunedeki bu kararsız hale ulaşıldığında numunedeki deformasyonlar belirlenmekte ve relaksiyon deneyi başlamaktadır. Bu deney süresince numunenin bazı bölgeleri konsolide olurken bazıları da şişmektedir. Bu deney tekniğinde Terzaghi'nin kararsız durum hali şartlarını açıkça belirtmemiş olması nedeniyle deneyin başlangıç sınır koşulları da bilinmemektedir (Znidarcic. vd., 1984).

2.5.7 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyleri

İmai (1979) tarafından ilk olarak "Hidrolik Konsolidasyon Deneyi"adıyla önerilen sızıntı etkili konsolidasyon deney tekniği yumuşak zeminlerin sıkışabilirlik ve hidrolik geçirgenlik ilişkilerinin araştırılması amacıyla, konsolidometre deney aletine yerleştirilen bir zemin numunesi üzerinde aşağı doğru bir hidrolik eğim oluşturularak sızıntı kuvvetlerinin oluşturulması şeklinde düzenlenmiştir. Numunede oluşan sızıntı kuvvetleri numuneyi konsolide ederek numunede üniform olmayan bir efektif gerilme dağılımının oluşmasını sağlamaktadır. Numunede oluşan bölgesel boşluksuyu basınçları numune tabanından ölçülmekte ve deney sonucunda numune parçalara ayrılarak boşluk oranı değerleri belirlenmektedir. Elde edilen bu ölçümlerden düşey efektif gerilmenin bir fonksiyonu olarak boşluk oranı, düşey hidrolik geçirgenlik, hacim değişimi katsayısı ve konsolidasyon katsayısı değerleri elde edilebilmektedir.

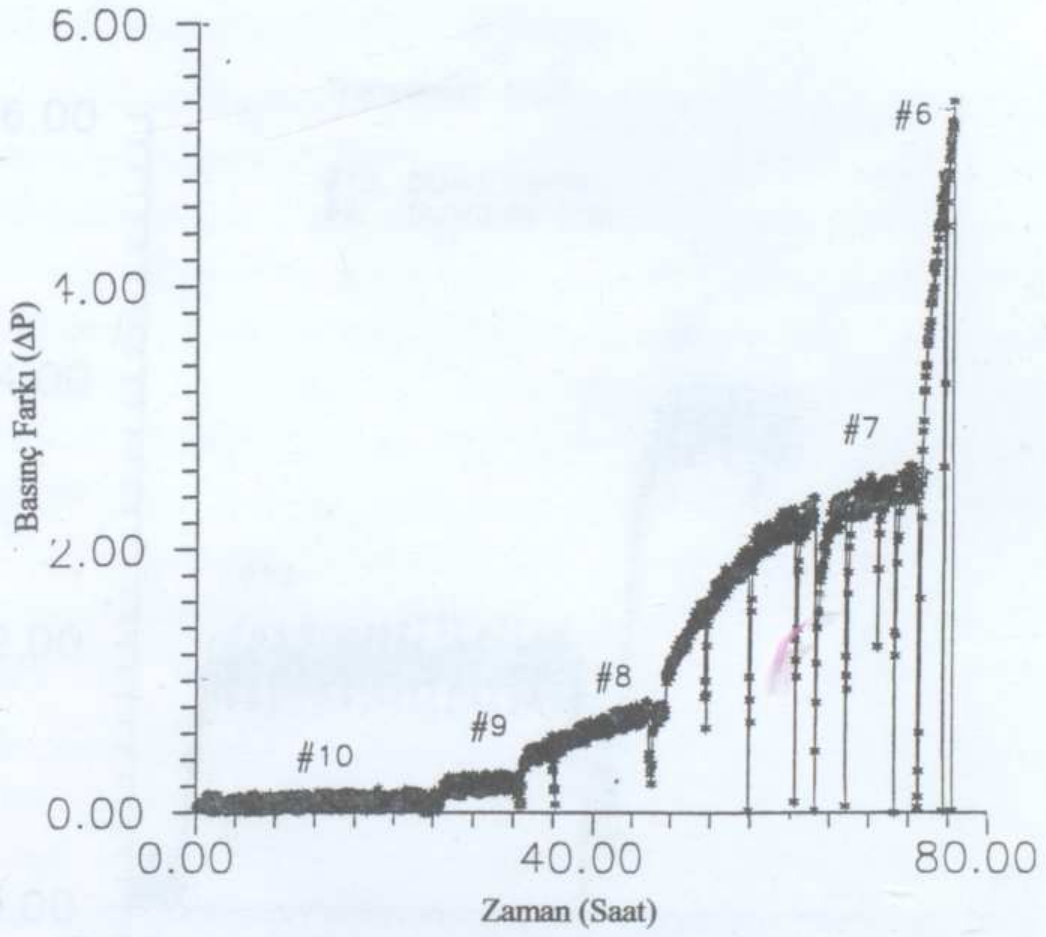
Yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerin ve dipsel tarama çamurlarının malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan sızıntı etkili konsolidasyon deney yöntemi diğer deney yöntemlerine kıyasla bir çok avantaja sahiptir. Bunlardan ilki; sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerinin tek bir deneyle belirlenebilmesi, ikincisi ilişkilerin tek bir hidrolik eğim ile belirlenebilmesi, üçüncüsü herhangi bir teorik yaklaşıma ihtiyaç duymadan ilişkilerin doğrudan ölçümlerle belirlenebilmesi ve son olarak deneylerin düşük efektif gerilme seviyelerinde gerçekleştirilebilmesidir. Sonuç olarak sızıntı etkili konsolidasyon deneyi yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde deney süresini çok kısaltır. Bununla beraber İmai (1979) tarafından önerilen orijinal yöntemin bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan ilki; akış süresi boyunca numunede oluşan bölgesel boşluk suyu basınçlarını ölçmek özel bir deney

sistemi gerektirmektedir. İkinci olarak, bölgesel olarak boşluk oranı değerlerini belirlemek için numuneyi dilimlere ayırmak gerekmektedir. Üçüncü olarak konsolidometrenin yan çeperlerinde akım kanallarının oluşmasıyla deney sonuçları yanlış değerler verebilmektedir. Bu nedenle numune üst yüzeyine bir sürşarj uygulanarak bu problemin çözümlenmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca deneyde bölgesel boşluk suyu basınçlarının ölçülmesi zor olup çok gelişmiş deney tekniği gerektirmektedir. Bu dezavantajları nedeniyle hidrolik konsolidasyon deney tekniği pratikte çok fazla kullanılmamaktadır (Fox ve Baxter., 1997).

Orijinal deney düzeneğindeki dezavantajların giderilmesi için Huerta vd. (1988) tarafından deney sisteminde bazı yenilikler yapılarak deney verilerinin değerlendirildiği yeni bir analiz yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yöntemde bölgesel boşluk suyu basınçlarının ve boşluk oranı değerlerinin bulunması gereği kalmamıştır. Sonucun elde edilmesi için kararlı durum akış hızının bilinmesi ve deney sonucu numune tabanındaki boşluk oranının belirlenmesi yeterli olmaktadır.

Znidarcic ve Liu (1989) yüksek nonlinear konsolidasyon ilişkilerini değerlendirmek için daha güvenilir yeni bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem İmai (1979) tarafından düzenlenen orijinal sızıntı etkili konsolidasyon deneyi esas alınarak düzenlenmiştir. Fosfat killerinin sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerini belirlemek amacıyla Florida Fosfat Enstitüsü'nün desteğiyle yürütülen bir çalışmada bu deney sistemi kullanılarak farklı bölgelerden alınmış fosfat killeri üzerinde ayrıntılı bir deneysel çalışma yapılmıştır. Fosfat killeri üzerinde yapılan bu çalışmada $G_s = 2.92$ $w_L = \%114$ ve $w_p = \%33$ olan C-1 adlı numune üzerinde yapılan sızıntı etkili deney sonuçları Şekil 2.4' de ve kademeli yükleme ve permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil 2.5' de verilmiştir.

Bu yeni yöntem diğer deney yöntemlerdeki dezavantajları ve sınırlandırılmaları ortadan kaldırmıştır. Bu yüzden bu tez çalışmasında kullanılan yüksek su muhtevasına sahip ince daneli zeminlerin konsolidasyon özelliklerini belirlemek için Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi tercih edilmiştir. Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi düzeneği ve deneyin yapılış hakkında ayrıntılı bilgiler Bölüm 4'de verilmiştir.



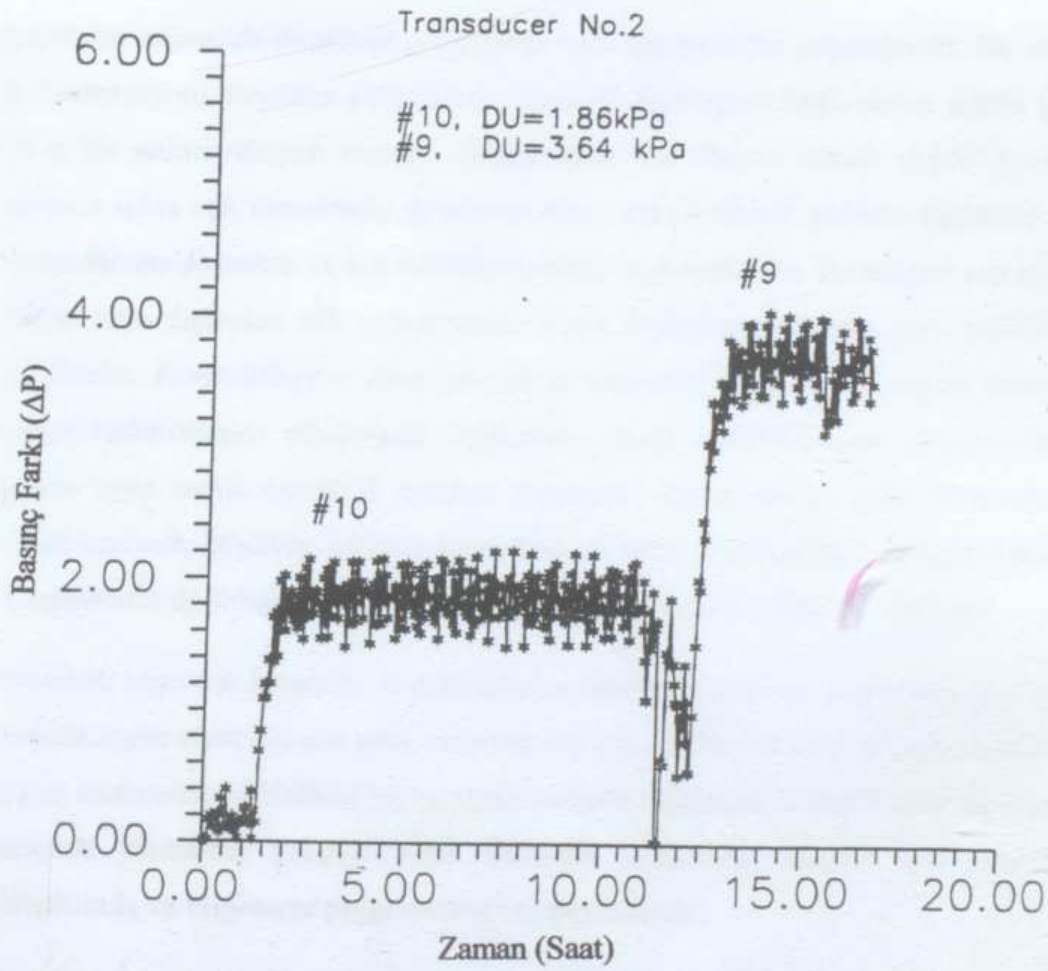
Şekil 2.4 Sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları C-1 Numunesi $e_{00}=13.07$

(FIPR , Vol:3 1994)

A. BÖLÜM YÜKSEK HİDRAULİK YÜKSELİMİN YÜKSELİM KILARINDA
KONSOLIDASYON KURUĞUNUN

ŞEKİL

Şekil 2.5, kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları C-1 Numunesi $e_{00}=13.07$ için, transdüser No.2'nin ölçtüğü basınç farkı (ΔP) ile zaman arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafikte, iki farklı yüklemeye karşılık gelen basınç farkları görülmektedir: #10 için $DU=1.86 \text{ kPa}$ ve #9 için $DU=3.64 \text{ kPa}$. Basınç farkı, zamanla artarak sabit bir değere ulaşır ve bu sabit değere ulaşmadan önceki zaman aralığı, suyun toprakta hareket etmesi için gereken süreyi gösterir.



Şekil 2.5 Kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları C-1 Numunesi $e_{00}=13.07$

3. BÖLÜM YÜKSEK SU MUHTEVASINA SAHİP YUMUŞAK KİLLERDE KONSOLİDASYON KURAMLARI

3.1 Giriş

Yumuşak atıkların depolanması ve bu depo alanlarının kazanılması için yapılan çalışmalar geoteknik mühendisliğinde modern deneysel ve analitik yöntemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Başlangıçta araştırmaların ilk amacının yüksek su muhtevasına sahip yumuşak atıkların depolanması olmasına rağmen, analizler daha düşük su muhtevasına sahip konsolide olmamış zeminler içinde uygulanabilir hale gelmiştir.

Depolama esnasında depolanmış çamurlar bazı aşamalardan geçmektedir. İlk olarak, çökme (sedimentasyon) meydana gelmekte ve çamurun kalınlığına bağlı olarak zemin üzerinde yavaş yavaş bir sedimentasyon kolonu oluşmaktadır. Bu süreçte zemin efektif gerilmesi derinlik boyunca sıfıra eşit olmaktadır. Çökme olayı zemin efektif gerilme değerleri sıfırdan farklı olunca tamamlanmakta ve konsolidasyon olayı başlamaktadır. Bu süreçte zemin kendi ağırlığı altında veya dışarıdan yük uygulayarak zemin dışına çıkan zemin suyu sayesinde konsolide olmaktadır. Konsolidasyon sürecinde veya tamamlandıktan sonra zemin yüzeyinde biriken suların buharlaşması neticesinde desikasyon süreci başlamaktadır. Desikasyon buharlaşma durana veya zemin büzülme limitine ulaşınca kadar devam eder. Desikasyon süresince zemin üzerinde büyüyen çatlaklı bir kabuk tabakası oluşmaktadır. Oluşan kabuğun kalınlığı ve çatlakların derinliği zemin karakteristiklerine ve hava koşullarına bağlıdır.

Arazideki çamurun kıvamını yoğunlaştırma sürecini oluşturan sedimentasyon, konsolidasyon ve desikasyon süreçleri son otuz yılda yapılan çalışmalar sonucunda fiziksel olayı modelleyen uygun matematiksel ifadeler ve bu modeller için parametre üretmek için yararlanılan modern deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Bununla birlikte bu teoriler için nümerik çözümler geliştirilmiş ve bilgisayar programlarına uygulanmıştır.

Bu bölümde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon davranışını modellemek için geliştirilen kuramlar ve bunların çözüm tekniklerinden bahsedilecektir. Bunun için ilk önce Terzaghi tarafından geliştirilen ilk konsolidasyon teorisi verilecek daha sonra büyük miktarda deformasyon yapan yüksek su muhtevalı zeminlerin analizinde kullanılan konsolidasyon kuramları ve bunların çözüm yöntemleri anlatılacaktır.

3.2 Konsolidasyon Kuramları

Konsolidasyon kuramı ilk olarak Karl Terzaghi (1923) tarafından ortaya atılmış ve küçük hacim değişimi yapan zeminlerin konsolidasyon oturmalarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu kuram zeminlerin kendi ağırlığını ve büyük miktarda meydana gelecek deformasyonları göz ardı ettiği için yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon analizlerinde yeterli yaklaşıklıkta sonuçlar vermemektedir. Terzaghi kuramı Konsolidasyon kavramını ilk defa mühendislik literatürüne sokması ve böylece zemin mekaniği biliminin kurulmasına yol açmasından dolayı büyük öneme sahiptir.

Yüksek su muhtevalarına sahip ince daneli zeminlerin konsolidasyon davranışını tahmin etmek için kullanılan konsolidasyon kuramları iki gruba ayrılabilir. Birinci gruptaki kuramlar Terzaghi konsolidasyon kuramına dayanmakta olup o'nun konsolidasyon süresince sabit kabul ettiği malzeme özelliklerini zamana bağlı olarak artımsal olarak değiştirilmektedir (Olson ve Ladd, 1979; Yong vd., 1983; Fox ve Berles, 1997). İkinci gruptakiler ise Gibson vd. (1967) tarafından geliştirilen sonlu şekil değiştirme konsolidasyon kuramına dayanmaktadır (Gibson vd., 1967; Monte ve Krizek, 1976; Schiffman, 1980). Bu bölümde yüksek su muhtevasına sahip ince daneli zeminlerin konsolidasyon analizi için geliştirilen bu kuramlar incelenecektir.

3.3 Sonsuz Küçük Şekil Değiştirme (Terzaghi) Konsolidasyon Kuramı

Terzaghi konsolidasyon kuramı, halen yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bir takım kabuller üzerine kurulmuştur. Bu kabuller

- Sıkışabilir kil tabakası homojendir ve tamamen suya doygunudur.
- Zemin daneleri ve boşluklardaki suyun sıkışması ihmal edilmektedir.
- Zemin boşluklarındaki suyun hareketi Darcy yasasına uyar.
- Drenaj ve sıkışmanın sadece bir yönde (düşey) olduğu kabul edilmektedir.
- Şekil değiştirmeler küçüktür.
- Hacim değişimleri (dolayısıyla boşluk oranı değişimi) efektif gerilme değişimine bağlıdır.
- Efektif gerilme değişimleri boşluk suyu basıncı değişimlerine bağlıdır.
- Permeabilite katsayısı konsolidasyon süresince sabit kalmaktadır.
- Zemin konsolidasyon katsayısı c_v konsolidasyon süresince sabit kalmaktadır.

Bu varsayımlar çerçevesinde tanımlanan Terzaghi konsolidasyon kuramı küçük şekil değiştirmeleri göz önüne aldığında pratik maksatlar için arazide yeterli sonucu verdiği

görülmüştür. Bu yüzden halen temel mühendisliği uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Terzaghi eşitliğinin çıkartılması için de bir diferansiyel zemin elemanı incelenebilir. Bu inceleme sırasında dikkat edilmesi gereken bu elemandan dışarı çıkan suyun hacmidir. Darcy'nin yasasına göre, akışın miktarı zeminin permeabilitesine olduğu kadar hidrolik eğimine de bağlıdır. Akışa neden olan hidrolik eğim, $\Delta u/(\rho_w g)$ bağıntısı yardımıyla elemanın içerisindeki artık boşluk suyu basıncı ile ilişkilendirilmiştir. Su sıkışamaz olarak kabul edildiği için, hacim değişimi, dt kadarlık bir diferansiyel zamanda elemanın içine ve dışına doğru olan akıştaki farka eşit olmalıdır. Eşitliğin bu kısmı şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{-k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt \quad (3.1)$$

Bu denklemde z ile sembolize edilen ifade zemin elemanındaki derinlik veya alan değişkenidir. Bu denklemde kısmi diferansiyel kullanılmıştır. Çünkü boşluk suyu basıncı hem derinliğin hem de zamanın bir fonksiyonudur.

Eşitliğin diğer kısmı, ödometre deneyinden elde edilen a_v (sıkışabilirlik katsayısı = gerilme-deformasyon ilişkisi = zeminin modülü) değeri yardımıyla, efektif gerilmedeki değişimi zemin iskeletinin boşluk oranındaki değişim (veya hacim değişim) ile ilişkilendirerek elde edilmiştir. Efektif gerilme prensiplerinden yola çıkılarak, efektif gerilmedeki değişim boşluk basıncındaki değişime eşitlenebilir. Bir başka deyişle, toplam gerilme sabit olduğu sürece, artık boşluk suyu basıncı zamanla sönümleneceği için, aynı zamanda efektif gerilmede de bir artış vardır ($\Delta \sigma'_v = -\Delta u$). u hem derinliğin hem de zamanın bir fonksiyonu olarak bilindiği için, eşitliğin bu yarısı genellikle şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{-a_v}{1+e_0} \frac{\partial u}{\partial t} dz dt \quad (3.2)$$

Bu iki bölüm bir araya getirilerek denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{-k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt = \frac{-a_v}{1+e_0} \frac{\partial u}{\partial t} dz dt \quad (3.3)$$

Denklem düzenlenecek olursa

$$\frac{-k}{\rho_w g} \frac{1+e_0}{a_v} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.4)$$

oluşturulabilir. Bu denklemde $k/(\rho_w g)(1 + e_0)/a_v = c_v$ 'ye eşittir. O halde (3.4) eşitliği

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. c_v konsolidasyon işlemini idare eden malzeme özelliklerini içeren bir katsayıdır ve literatürde konsolidasyon katsayısı olarak geçer. Boyutu $L^2 T^{-1}$ cinsindedir.

(3.5) eşitliği Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon eşitliğidir. Eşitlik temel olarak, matematiksel fiziğin kullanımı ile bulunan difüzyon eşitliğinin bir formudur. Bir çok fiziksel difüzyon olayı bu eşitlik ile açıklanmıştır (örneğin, katı cisimlerdeki ısı iletimi gibi). Zeminler için difüzyon sabiti c_v 'dir. Aslında bilinmektedir ki c_v sabit bir değer değildir. Fakat eşitliği lineer ve dolayısıyla da daha kolay bir hale getirebilmek için k , a_v ve c_v sabit varsayılmıştır.

Terzaghi konsolidasyon Eşitliğinin çözülebilmesi için ilk olarak bir boyutlu konsolidasyon için geçerli başlangıç ve sınır koşulları belirlenmelidir. Bu koşullar şunlardır:

- Sıkışabilir tabaka hem alttan hem de üstten drenaja açıktır.
- Başlangıç artık boşluk suyu basıncı ($\Delta u = u_i$), uygulanan gerilme artışına ($\Delta \sigma$) eşittir.

Başlangıç ve sınır koşulları şu şekilde de gösterilebilir:

$z = 0$ ve $z = 2H$ için, $u = 0$ (Konsolide olan kil tabakasının kalınlığı olarak $2H$ alınmıştır)

$t = 0$ için,

$$t = 0 \quad \Delta u = u_i = \Delta \sigma = (\sigma'_2 - \sigma'_1) \quad (3.6)$$

$t = \infty$ için

$$t = \infty \quad \Delta u = 0. \quad (3.7)$$

Terzaghi (1923) ısı transferi ile ilgili çalışmalar sırasında kullanılan denklemini konsolidasyon problemlerini çözmek amacıyla uyarlamıştır:

$$u = (\sigma'_2 - \sigma'_1) \sum_{n=0}^{\infty} f_1(Z) f_2(T) \quad (3.8)$$

Bu fomüldeki Z ve T boyutsuz katsayılarıdır. Z terimi, geometrik bir parametre olup z / H 'a eşittir. T terimi, zaman faktörü olarak bilinir ve aşağıda gösterilen bağıntı vasıtasıyla konsolidasyon katsayısı ile ilişkilidir.

$$T = c_v \frac{t}{H_d^2} \quad (3.9)$$

burada, t zamanı, H_d en uzun drenaj yolunun uzunluğunu göstermektedir. Drenaj çift taraflı ise tabaka kalınlığının yarısı, drenaj tek taraflı ise tabaka kalınlığı drenaj mesafesi gibi kabul edilir.

Konsolide olan tabakanın herhangi bir z derinliğindeki (ve herhangi bir andaki) konsolidasyon oranı o andaki boşluk oranı ve nihai boşluk oranı ile ilişkilidir. Konsolidasyon oranı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} \quad (3.10)$$

Şekil 3.1' de gösterildiği gibi e bir ara değerdir. Bu şekilde grafiksel olarak görülen, AB ve AC'ye karşılık gelen ordinatların oranıdır. Gerilmeler ve boşluk oranları kullanılarak 3.10 eşitliği şu forma dönüştürülebilir:

$$U_z = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\Delta\sigma'} = \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (3.11)$$

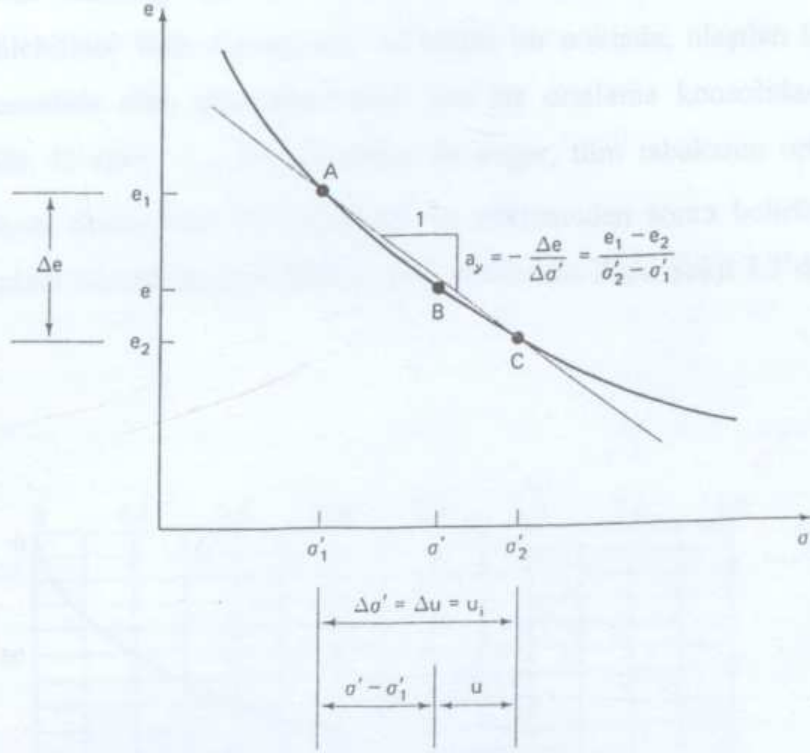
Burada, u_i uygulanan gerilme artışı nedeniyle oluşan başlangıç artık boşluk suyu basıncını,

σ' ve u değerleri 3.10 eşitliğindeki e değerine karşılık gelen ara değerleri göstermektedir.

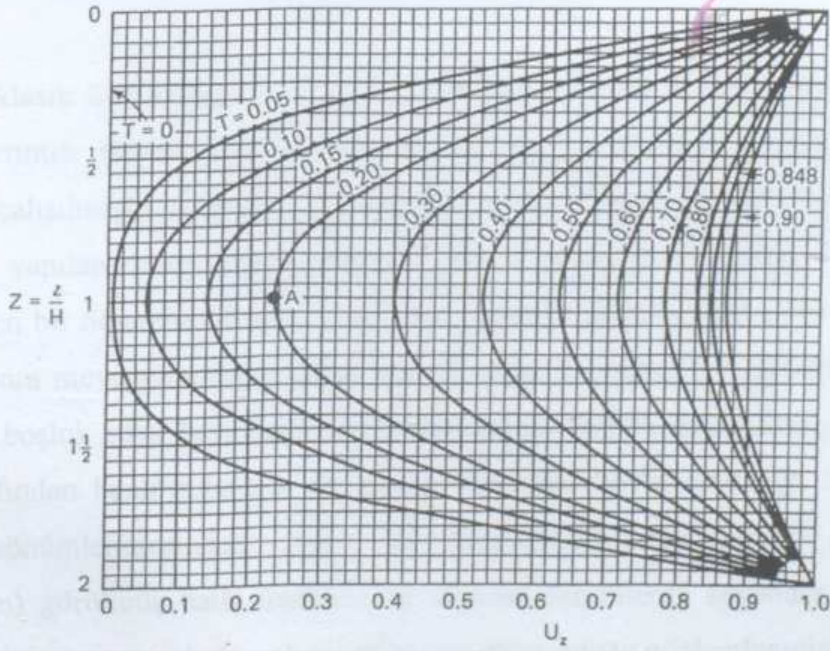
Eşitlik 3.10 ve 3.11' den açıkça görülmektedir ki U_z yüklemenin başlangıcında sıfırdır ve boşluk oranı e_1 'den e_2 'ye doğru değişirken yavaş yavaş 1'e (veya % 100'e) artar. Tabii ki, aynı zamanda, toplam gerilme sabit olduğu sürece, artık hidrostatik gerilme (boşluk suyu basıncı) u_i değerinden sıfıra doğru azaldığı için, efektif gerilme σ'_1 değerinden σ'_2 değerine artar. Ayrıca konsolidasyon oranı (U_z) konsolidasyonun yüzde cinsinden derecesini de göstermektedir. Buradan yola çıkılarak, 3.8 eşitliğinde konsolidasyon oranı için bir çözüm oluşturmak mümkün olmuştur.

$$U_z = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} f_1(Z) f_2(T) \quad (3.12)$$

Bu eşitliğin çözümü boyutsuz parametreler kullanılarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekil 3.2'den, konsolide olan tabakada herhangi bir noktada yüklemenin başlangıcından sonra herhangi bir zaman için konsolidasyon derecesinin miktarını bulmak mümkündür. Tabakanın

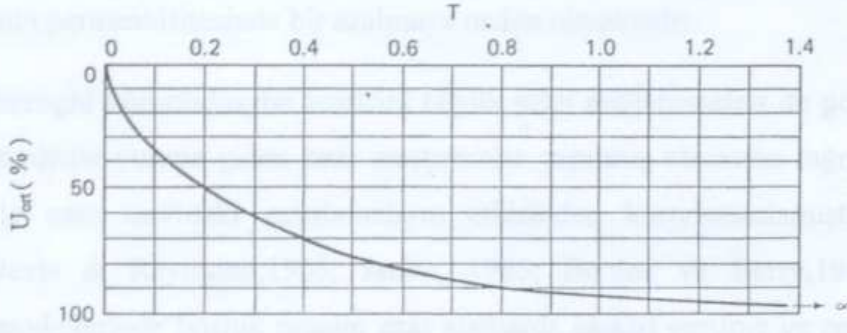


Şekil 3.1 Laboratuvar sıkışma eğrisi



Şekil 3.2 Çift drenajlı zemin tabakasında herhangi bir yerleşim ve zaman faktörü için konsolidasyon

toplam kalınlığı ve sınır drenaj şartları için konsolidasyon katsayısı c_v kullanılarak zaman faktörü (T), (3.2) eşitliğinden çıkartılabilir. T biliniyorsa, Şekil 3.2 yardımıyla, konsolide olan tabakanın içersindeki herhangi bir derinlikteki noktada ulaşılan konsolidasyon derecesi rahatlıkla tespit edilebilir. Bazı durumlarda ise belirli bir noktada, ulaşılan konsolidasyon derecesi yerine konsolide olan tabakanın tümü için bir ortalama konsolidasyon derecesi bulunmak istenebilir. U veya U_{ort} ile gösterilen bu değer, tüm tabakanın ortalama olarak ulaştığı konsolidasyon derecesinin bir ölçüsüdür ve yüklemmeden sonra belirli bir zamanda tabakada oluşan toplam oturma ile ilişkilidir. U ve T arasındaki ilişki Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 T- U_{ort} grafiği

Terzaghi'nin klasik konsolidasyon teorisi halen kullanılmakla beraber, zemin mekanikçiler tarafından ayrıntılı olarak incelenmeye ve teorisinin eksik kaldığı düşünülen noktaları açıklanmaya çalışılmıştır. Örneğin, Terzaghi'nin teorisi zaman etkisini yok varsaymaktadır. Laboratuarda yapılan deney klasik yükleme adımlı olup 10-15 günlük bir süre içersinde gerçekleştirilen bir ödometre deneyi sonucunda bulunan nihai boşluk oranının, arazide belki de seneler sonra meydana gelecek nihai boşluk oranı değerine eşit olacağını varsayılmıştır. Ayrıca, artık boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile birlikte konsolidasyonun sona erdiği bu teori tarafından benimsenmişse de, gerçek durumun böyle olmadığı, artık boşluk suyu basıncının sönmülmesinden sonra da konsolidasyonun devam ettiği (sekonder konsolidasyon) görülmüş hatta özellikle de organik zeminlerde sekonder konsolidasyonun toplam konsolidasyonun çok önemli bir miktarını oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilmesi esnasında yapılan bir çok kabuller nedeniyle, eşitliğin tüm boşluk suyu basıncı problemlerine rastgele uygulanması halinde büyük hatalar ortaya çıkabilecektir. Gerçekte eşitliğin elde edilmesi sırasında yapılan tüm bu kabuller arazi koşullarındaki gerçeklerle ters

düşmektedir. Genel olarak permeabilite boşluk oranı ile değişmekte, sıkışma katsayısı m_v de, varolan boşluk suyu basınçlarına bağlı efektif gerilmenin değişmesiyle değişmektedir. Eğer akış miktarı büyükse, eşitlik toplam yüksekliği de hesaba katmalıdır aksi takdirde çözümler yanlış olacaktır. Diğer yandan Terzaghi konsolidasyon eşitliği büyük miktarda şekil değiştirme yapan zeminlerin konsolidasyon davranışını modellemek için yeterli sonucu vermez. Çünkü suya doygun zeminlerde sıkışabilirlik efektif gerilmenin non-lineer bir fonksiyonu olup çözümlerin doğru şekilde yapılabilmesi için bunun kuram içinde yer alması gerekmektedir. Ayrıca permeabilite ve konsolidasyon katsayısı konsolidasyon süresince sabit kalmamaktadır. Büyük şekil değiştirmeler ortaya çıktığında zemin gözenekleri sıkışarak birbirlerine basınç uygular ve bunun sonucu olarak zeminin boşluk oranında bir azalma meydana gelir. Daha küçük boşluk oranı değerleri suyun akışının engellenmesine neden olarak zeminin permeabilitesinde bir azalmaya neden olmaktadır.

Geçmişte Terzaghi konsolidasyon teorisini büyük şekil değiştirmeleri de göze alacak şekilde yeniden düzenleme yoluna giden bazı araştırmalar yapılmış olmasına rağmen yenilenen bu teorilerde de esas teorideki sınırlamaların etkisinden kurtulunamamıştır (Richart,1957; Lo,1960; Davis & Raymond,1965; Janbu, 1965; Barden ve Berry,1965). Sonlu şekil değiştirme modellerinde boşluk oranını esas alanlarda efektif gerilme ve permeabilitenin her ikisinin de boşluk oranıyla ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte boşluk suyu basıncını esas alan modellerde ise, boşluk oranının efektif gerilmeye, permeabilitenin de boşluk oranına bağlı olduğu kabul edilmektedir.

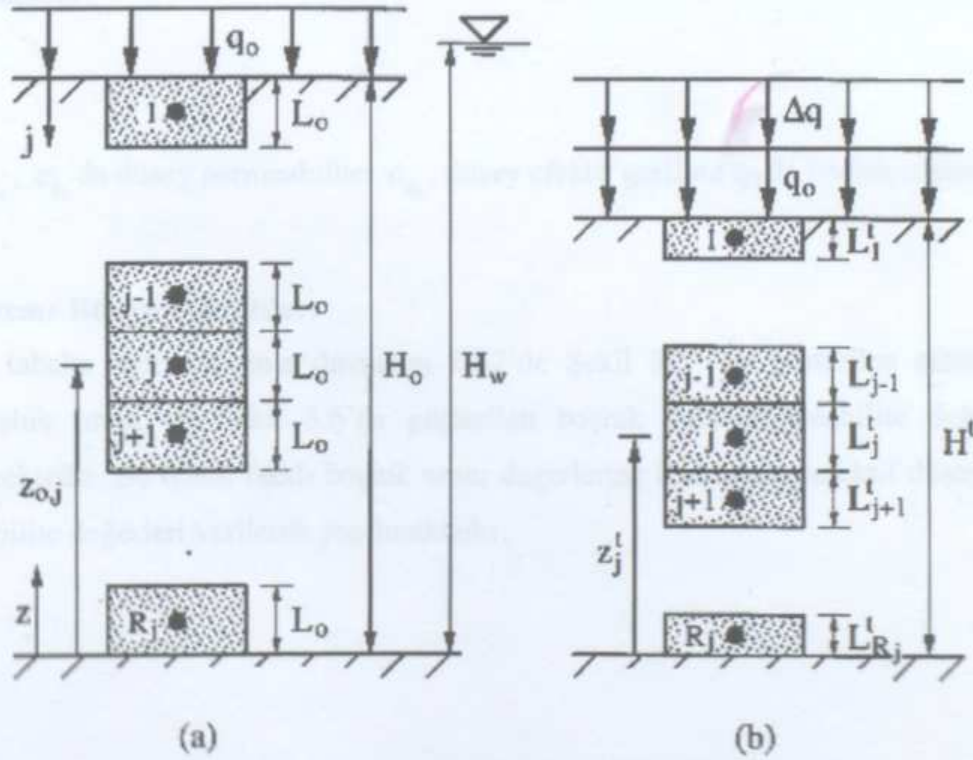
3.4 Büyük Şekil Değiştirme Konsolidasyonu İçin Nonlineer Model: CS2

Tek boyutlu büyük şekil değiştirme konsolidasyonunu fiziksel olarak en iyi modelleyen Gibson vd. (1967) tarafından geliştirilen matematiksel ifadeye bulunduğu halde, Townsend ve McVay (1990), adımsallineer modellerin (piecewise-linear), başlangıç koşulları, sınır koşulları ve zemin heterojenliği dikkate alındığında daha uygun sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir. Adımsal lineer (Piecewise-Linear) yaklaşımda, problemin geometrisi, malzeme özellikleri, sıvı akışı ve efektif gerilme ile ilgili olan tüm değişkenler sabit Eulerian koordinat sistemine göre her zaman adımından sonra güncelleştirilmektedir. Olson ve Ladd (1979), tarafından Crank-Nicholson yönteminin kullanıldığı bir model geliştirilmiş ve Yong vd. (1983) tarafından geliştirilen kesin sonlu fark yöntemini (Explicit Finite Difference) kullanmıştır. Adımsal lineer modellerde işlem sayısı, malzeme koordinatlarını kullanan modellere (Lagrangian koordinat sistemi) nazaran daha fazladır. Adımsal lineer yöntemde belirlenmiş ikinci sınırlama, küçük artımsal hataların birikerek sonucu iraksamasıdır. Bununla

beraber, Yong ve Ludwig (1984), adımsal olarak yerleştirilen bir çamur tabakasının kendi ağırlığı altında konsolidasyonu için adımsal lineer çözümlerinin Gibson vd.(1967), tarafından verilen çözüme eşit olduğunu göstermiştir.

Fox ve Berles (1997) tarafından önerilen CS2 modeli, tek boyutlu büyük şekil değiştirme konsolidasyonu için Terzaghi konsolidasyon denklemini malzeme bünye davranışını adımsal lineer olarak dikkate alınarak sonlu farklar yöntemi ile çözüm yöntemidir. Modelde geleneksel Terzaghi teorisi için hesaplanan düzeltme faktörleri, geçen zamanın hesaplanan değerleri üzerinde düşey şekil değiştirmenin etkisi ve konsolidasyon sırasında maksimum artık boşluk suyu basıncı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Farklı veri noktaları ile tanımlanan bu modelde, yapısal ilişkiler Eulerian koordinat sistemi kullanılarak geliştirilmiştir. Fox ve Berles (1997) tarafından küçük şekil değiştirme, büyük şekil değiştirme, kendi ağırlığı altında oturma davranışı ve nonlinear yapı ilişkilerini de içine alan dört ayrı problemin çözümü yapılarak diğer analitik ve nümerik çözümlerle karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça tatmin olduğu görülmüştür.

CS2 modelde yük uygulanmadan önce sıkışabilir tabakanın geometrisi Şekil 3.4'de gösterildiği gibi modellenmektedir.



Şekil 3.4 CS2 için geometri: (a) başlangıç konfigürasyonu ($t < 0$) ve (b) düşey efektif gerilmenin artım ($t \geq 0$) uygulamasından sonra konfigürasyon

CS2 modele göre sonsuz yanal uzunluğu ve başlangıç H_0 yüksekliğine sahip doygun homojen bir zemin tabakası, katı daneler ve boşluk suyu sıkıştırılmaz olduğunda iki fazlı bir malzeme gibi davranmaktadır. Düşey Eulerian koordinatı z , tabakanın altıyla sabit bir başlangıç yüzeyinden yukarı doğru pozitif olarak tanımlanmaktadır. Eleman koordinatı j , alt sınır orijininin yukarıya doğrudur. Tabaka, başlangıç yüksekliği L_0 olan birim uzunlukta R_j adet elemana bölünür. Bu elemanların başlangıç yüksekliğine yerleşen merkez düğüm noktasının koordinatı $z_{0,j}$ olarak tanımlanır. Tabaka içinde başlangıç boşluk oranları $e_{a,j}$ olup, ortamın efektif jeolojik gerilme q_0 ve zeminin kendi ağırlığı ile dengede olabileceği varsayılmaktadır. Tabakanın alt ve üst sınırları drenajlı ve geçirimsiz olarak belirlenebilmektedir. Drenaj sınırları, sabit bir H_w yüksekliğinde yeraltı su seviyesine hidrolik olarak birleştirilir. $t=0$ 'da ani bir düşey efektif gerilme artımı Δq , sıkışabilir tabakaya uygulanır. Çözümler sırasında hem q_0 hem de Δq sabittir ve üstteki sınırla birlikte hareket eder. Daha sonra bir t zamanında Şekil 3.3a'da, tabakanın yüksekliği H^t ve j th elemanın yüksekliği L'_j olur. Düğümler düşey olarak hareket etmekte ve konsolidasyon işlemi boyunca ayrı ayrı elemanların merkezinde kalmaktadır. Düğüm özellikleri z'_j , hareketsiz başlangıç noktasına göre ele alınmakta ve her zaman adımı güncellenmektedir. CS2'de, hesap zaman aralığı τ , aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

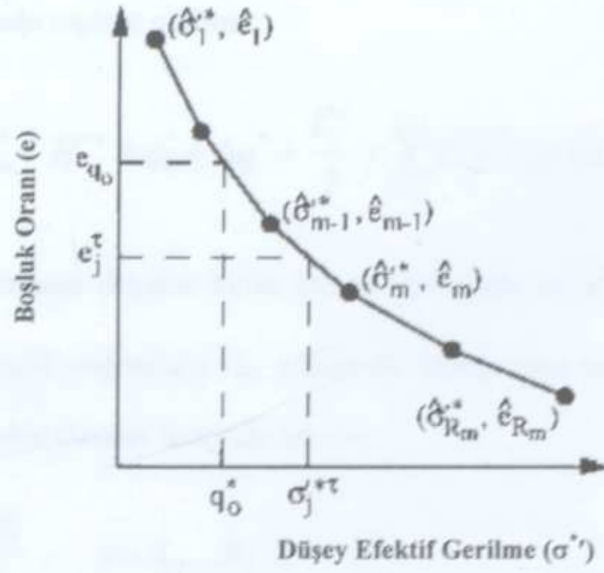
$$\tau = k_{q_0} t \quad (3.13)$$

Burada, k_{q_0} , e_{q_0} da düşey permeabilite; e_{q_0} , düşey efektif gerilme q_0 da boşluk oranıdır.

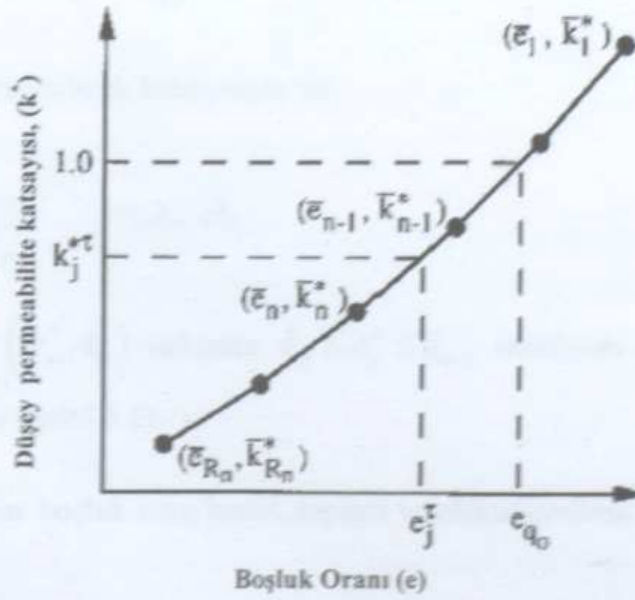
3.4.1 Malzeme Bünye Bağlılıkları

Sıkışabilir tabaka için malzeme davranışı CS2'de Şekil 3.5' de gösterilen efektif düşey gerilme-boşluk oranı ve Şekil 3.6'da gösterilen boşluk oranı-permeabilite değişimi ile modellenmektedir. Bu işlem farklı boşluk oranı değerlerine karşı gelen efektif düşey gerilme ile permeabilite değerleri verilerek yapılmaktadır.

Toplam gerilme, efektif gerilme ve boşluk oranı ile ilgili olarak, boşluk oranı gerilme ilişkisi (Şekil 3.5) ve su potansiyel enerjisi ile ilgili olarak, su potansiyel enerjisi gerilme ilişkisi (Şekil 3.6) aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.5 Zemin bünye ilişkileri: sıkışabilirlik



Şekil 3.6 Zemin bünye ilişkileri: permeabilite

Toplam gerilme, efektif gerilme, ve boşluk basıncı: Her bir düğümde düşey toplam gerilme sıkışabilir tabakanın kendi ağırlığı ve uygulanan jeolojik gerilmeden hesaplanmaktadır. $\tau \geq 0$ için j, $\sigma_j^{*\tau}$ düğümünde toplam gerilme

$$\sigma_j^{*\tau} = \frac{\sigma_j^\tau}{H_0 \gamma_w} = H_w^* - H^{*\tau} + q_0^* + \Delta q^* + \frac{L_j^{*\tau}}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} L_i^{*\tau} \gamma_i^{*\tau} \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.14)$$

Burada, $\gamma_j^{*\tau}$, j elemanın doygun birim hacim ağırlığıdır ve e_j^τ , boşluk oranı yerini tutar. CS2'de katıların özgül yoğunluğu G_s , sıkışabilir tabaka için sabittir ve e_j^τ , verilen zaman artımı üzerinden herbir eleman üzerinde sabittir.

$$\gamma_j^{*\tau} = \frac{\gamma_j^\tau}{\gamma_w} = \frac{G_s + e_j^\tau}{1 + e_j^\tau}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.15)$$

j, $\sigma_j^{*\tau}$ düğümünde düşey efektif gerilme, e_j^τ den hesaplanmaktadır ve sıkışabilirlik eğrisi aşağıda verildiği gibidir.

$$\sigma_j^{*\tau} = \frac{\sigma_j^\tau}{H_0 \gamma_w} = \sigma_{m-1}^{*\tau} + \frac{e_{m-1} - e_j^\tau}{a_{v,j}^{*\tau}}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.16)$$

Burada, $a_{v,j}^{*\tau}$, sıkışabilirlik katsayısıdır ve

$$a_{v,j}^{*\tau} = -\frac{\hat{e}_m - \hat{e}_{m-1}}{\hat{\sigma}_m^{*\tau} - \hat{\sigma}_{m-1}^{*\tau}}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.17)$$

$(\hat{\sigma}_{m-1}^{*\tau}, \hat{e}_{m-1})$ ve $(\hat{\sigma}_m^{*\tau}, \hat{e}_m)$ noktaları $\hat{e}_m \leq e_j^\tau \leq \hat{e}_{m-1}$ aralığında sıkışabilirlik eğrisinin lineer parçasını tanımlar (Şekil 3.5).

j, $u_j^{*\tau}$ düğümü için boşluk suyu basıncı, toplam ve efektif gerilme arasındaki farktır,

$$u_j^{*\tau} = \frac{u_j^\tau}{H_0 \gamma_w} = \sigma_j^{*\tau} - \sigma_j^{*\tau}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.18)$$

ve aşırı boşluk suyu basıncı yerine aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$u_{ex,j}^{*\tau} = \frac{u_{ex,j}^{\tau}}{H_0 \gamma_w} = u_j^{*\tau} + z_j^{*\tau} - H_w^*, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.19)$$

Permeabilite (3.16) eşitliğine benzer olarak, j , $k_j^{*\tau}$ elemanı için düşey permeabilite aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_j^{*\tau} = \frac{k_j^{\tau}}{k_{q_0}} = k_{n-1}^* + \frac{k_n^* - k_{n-1}^*}{e_n - e_{n-1}} (e_j^{\tau} - e_{n-1}), \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.20)$$

(e_{n-1}, k_{n-1}^*) ve (e_n, k_n^*) noktaları $e_n \leq e_j^{\tau} \leq e_{n-1}$ aralığında permeabilite eğrisinin lineer parçasını tanımlar (Şekil 3.5). Bitişik elemanların permeabilitesi genellikle eşit olmayacağı için eşit permeabilite serileri eleman içinde sıvı akışını hesaplamak için kullanılır. τ zamanında eşit permeabilite serileri $k_{s,j}^{*\tau}$, j düğümü ve $(j-1)$ düğümü arasında bulunur.

$$k_{s,j}^{*\tau} = \frac{k_{j-1}^{*\tau} k_j^{*\tau} (L_{j-1}^{\tau} + L_j^{\tau})}{L_{j-1}^{\tau} k_j^{*\tau} + L_j^{\tau}}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.21)$$

Kütle ve momentumun korunumu: için her eleman içinde bulunan katıların ağırlığı konsolidasyon işlemi boyunca değişmez değerdedir. Böylece, katı daneleri bir elemandan bir sonrakine geçemez ve düğümler gibi eleman ara yüzeylerinin zemin iskeleti içinde gömüleceği düşünülebilir. Her bir elemanın üst ve alt sınırlarına karşı sıvı hızının düşünülmesi kütle denge hesabı için yeterlidir.

Atalet kuvvetleri ihmal edilerek, katı aşamada ayrıca hareket halinde poroz bir ortam içinde bulunan sıvı akışı Darcy- Gersevanov (1934) yasası ile ifade edilir.

$$n(\tilde{v}_f - \tilde{v}_s) = -ki \quad (3.22)$$

Burada, n , porozite; \tilde{v}_f sıvının sızıntı hızı; \tilde{v}_s katıların hızı; k , permeabilite; i , hidrolik eğim dir. Hem \tilde{v}_f hem \tilde{v}_s tabakanın temelinde hareketsiz düzleme göre mutlak hızlardır. İlgili hareketin prensibi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\tilde{v}_f = \tilde{v}_{rf} + \tilde{v}_s = \frac{v_{rf}}{n} + \tilde{v}_s \quad (3.23)$$

\tilde{v}_{rf} ve v_{rf} katı aşamaya göre sırası ile nispi sızıntı hızı ve boşluk suyunun nispi deşarj hızıdır. (3.22) eşitliği (3.23) eşitliği yerine konularak nispi deşarj hızı yazılır.

$$v_{rf} = -ki \quad (3.24)$$

CS2'de göreceli deşarj hızı (yukarı doğru pozitif) $v_{rf,j}^{*r}$, j ve j-1 düğümleri arasında aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Şekil 3.7).

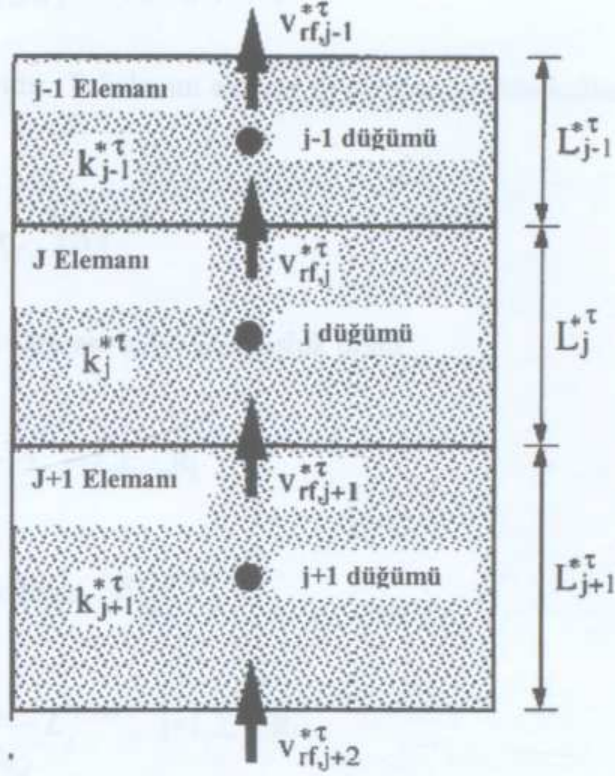
$$v_{rf,j}^{*r} = \frac{v_{rf,j}^r}{k_{q_0}} = -k_{s,j}^{*r} i_j^r, \quad j=2,3,\dots,R_j \quad (3.25)$$

$$i_j^r = \frac{h_{j-1}^{*r} - h_j^{*r}}{z_{j-1}^{*r} - z_j^{*r}}, \quad j=2,3,\dots,R_j, \quad (3.26)$$

ve j, h_j^{*r} düğümü için ,

$$h_j^{*r} = \frac{h_j^r}{H_0} = z_j^{*r} + u_j^{*r}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.27)$$

olarak tariflenir.



Şekil 3.7 Bitişik elemanlar arasındaki sıvı akışı

Aşağıdaki ek eşitlikler tabakanın alt ve üst sınırlarında gereklidir.

$$i_1^r = \frac{H_w^* - h_1^{*\tau}}{H^{*\tau} - z_1^{*\tau}} \quad \text{üst sınırda hidrolik eğim (drenajlı)} \quad (3.28)$$

$$i_1^r = 0 \quad \text{üst sınırda hidrolik eğim (drenajsız)} \quad (3.29)$$

$$i_b^r = \frac{h_{R_j} - H_w^*}{z_{R_j}^{*\tau}} \quad \text{alt sınırda hidrolik eğim (drenajlı)} \quad (3.30)$$

$$i_b^r = 0 \quad \text{alt sınırda hidrolik eğim (drenajsız)} \quad (3.31)$$

$$v_{rf,1}^{*\tau} = -k_1^{*\tau} i_1^r \quad \text{üst sınırda nispi deşarj hızı} \quad (3.32)$$

$$v_{rf,b}^{*\tau} = -k_{R_j}^{*\tau} i_b^r \quad \text{alt sınırda nispi deşarj hızı} \quad (3.33)$$

İntegrasyon yöntemi kullanılarak, $\tau + \Delta\tau$ zamanında j elemanın yüksekliği,

$$L_j^{*\tau+\Delta\tau} = L_j^{*\tau} - (v_{rf,j}^{*\tau} - v_{rf,j+1}^{*\tau}) \Delta\tau, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.34)$$

Burada $\Delta\tau$ zaman artımıdır. Tabakanın altında R_j elemanı yerini kullanan eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$L_{R_j}^{*\tau+\Delta\tau} = L_{R_j}^{*\tau} - (v_{rf,R_j}^{*\tau} - v_{rf,b}^{*\tau}) \Delta\tau \quad (3.35)$$

$\tau + \Delta\tau$ zamanda her bir j elemanı için yeni boşluk oranı ,

$$e_j^{\tau+\Delta\tau} = \frac{L_j^{*\tau+\Delta\tau} (1 + e_{0,j})}{L_0^*} - 1, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.36)$$

ve katıların ağırlığı yerine tutan $W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau}$,

$$W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau} = \frac{W_{s,j}^{\tau+\Delta\tau}}{H_0 \gamma_w} = \frac{G_s}{1 + e_{0,j}} L_j^{*\tau+\Delta\tau}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.37)$$

(3.36) ve (3.37) eşitlikleri birleştirilerek,

$$W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau} = \frac{G_s}{1 + e_{0,j}} L_0^j, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.38)$$

j elemanı için katıların başlangıç ağırlığına eşit hale gelir. Böylece, katı kütle konsolidasyon işlemi boyunca her bir eleman için değişmez.

Her bir zaman adımında, sıkışabilir tabakanın yüksekliği, oturma ve ortalama konsolidasyon derecesi sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle verilir.

$$H^{*\tau} = \sum_{j=1}^{R_j} L_j^{*\tau} \quad (3.39)$$

$$S^{*\tau} = \frac{S^\tau}{H_0} = 1 - H^{*\tau} \quad (3.40)$$

$$U_{avg}^{\tau} = \frac{S^{\tau}}{S^*} \quad (3.41)$$

Burada, S^{τ} , τ zamanında oturmadır; S^* , sıkışabilir tabakanın nihai şekil değiştirmesidir ($= S/H_0$) ve S , konsolidasyon sonunda toplam oturmadır. Yerel konsolidasyon derecesi boşluk oranı, $U_{e,j}^{\tau}$, ve aşırı boşluk basıncı, $U_{u,j}^{\tau}$ ye göre tanımlanmaktadır.

$$U_{e,j}^{\tau} = \frac{e_{0,j} - e_j^{\tau}}{e_{0,j} - e_{f,j}}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.42)$$

$$U_{u,j}^{\tau} = 1 - \frac{u_{ex,j}^{\tau}}{\Delta q^*}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.43)$$

Burada, $e_{f,j}$ konsolidasyon sonunda j elemanı için nihai boşluk orandır

Zaman artımını her bir zaman adımında hesaplamak için iki kriter kullanılmıştır. Birinci kriter, Terzaghi konsolidasyon eşitliğinin sonlu fark çözümü aşağıdaki gibi uyarlanır.

$$\Delta t = \frac{\alpha (\Delta z)^2}{c_v} \quad (3.44)$$

Burada, $\alpha \leq 0.5$ bir sabittir; c_v , konsolidasyon katsayısıdır ve Δz , düşey düğüm aralığıdır. CS2'de j elemanı için konsolidasyon katsayısı, $c_{v,j}^{\tau}$ aşağıda ifade edildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$c_{v,j}^{\tau} = \frac{c_{v,j}^{\tau}}{k_{q_0}} = \frac{k_j^{\tau} (1 + e_j^{\tau})}{a_{v,j}^{\tau}}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.45)$$

(3.44) ve (3.45) eşitlikleri birleştirilerek ve j zaman artımı elemanı için $L_j^{\tau} H_0$ olarak Δz ye yaklaştırılarak,

$$\Delta \tau_j = \frac{k_{q_0} \Delta t}{H_0} = \frac{\alpha a_{v,j}^{\tau} (L_j^{\tau})^2}{k_j^{\tau} (1 + e_j^{\tau})}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (3.46)$$

elde edilmektedir.

Nümerik çalışmaların, $\alpha \approx 0.4$ için en doğru ve $\alpha < 0.5$ için en sabit olduğunu göstermesine

rağmen, Δq^* eşitliğine bağlı olarak, (3.46) eşitliği kullanılarak hesaplanan zaman artımlarının, drenaj sınırları yanında yüksek başlangıç deşarj hızına uygun olarak çözümlerin sonucu aşırı büyük yapabildiği belirlenmiştir. Bu nedenle, ikinci bir zaman artımı kriterinin, konsolidasyonun ilk aşamaları sırasında modelin doğruluğunu arttırmak için kullanılabilceği vurgulanmıştır:

$$\Delta \tau_j = \left| \frac{0.01L_0^*(e_{0,j} - e_{f,j})}{(1 + e_{0,j})(v_{f,j}^* - v_{f,j+1}^*)} \right|, j=1,2,\dots,R_j-1 \quad (3.47)$$

$$\Delta \tau_{R_j} = \left| \frac{0.01L_0^*(e_{0,R_j} - e_{f,R_j})}{(1 + e_{0,R_j})(v_{f,R_j}^* - v_{f,b}^*)} \right| \quad (3.48)$$

Sonuç olarak bu tez çalışmasında deney verilerini analiz etmede kullanılan CS2 modeli, büyük deformasyonların, kendi ağırlığı altındaki davranış, sıvı ve zeminin birbirine göre relatif hızlarının, konsolidasyon süresince değişen hidrolik geçirgenlik ve sıkışabilirliğin hesaplarında göz önüne alındığı bir konsolidasyon modelidir. Geleneksel Terzaghi konsolidasyon teorisinde kullanılan Euler koordinat sistemi kullanılmaktadır.

3.5 Sonlu -Şekil Değiştirme Konsolidasyon Teorisi (Gibson Eşitliği)

Yukarıda değinildiği gibi klasik Terzaghi konsolidasyon kuramındaki kısıtlamalar nedeni ile bu eşitliğin kendi ağırlığı altında konsolide olan ve büyük miktarda deformasyon yapan zemin tabakalarına uygulanması doğru sonuç vermez. Bu sebeple bu tür zeminlerin konsolidasyon davranışını modelleyebilmek için, malzemenin kendi ağırlığından kaynaklanan ve büyük miktarda meydana gelecek deformasyonları hesaplayabilecek uygun malzeme bünye bağıntıları dikkate alan kuramlara gereksinim doğmuştur. Bu bağlamda Gibson, England ve Hussey (1967) tarafından ortaya konulan kuram bu gereksinimleri karşılamıştır. Gibson, England ve Hussey (1967) tarafından yazılan bir boyutlu lineer olmayan sonlu şekil değiştirme konsolidasyon eşitliğinde, kalın kil tabakalarının hızlı depolanması, yavaş yavaş biriktirilmesi ve yüklenmesi ile meydana gelecek konsolidasyon davranışı analiz edilebilmektedir. Bu eşitlik aşağıda verildiği şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] - f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.49)$$

burada

$$g(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (3.50)$$

$$f(e) = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{(1+e)} \right] \quad (3.51)$$

olup e boşluk oranı, γ_s ve γ_w sırasıyla ortamı meydana getiren katı ve sıvı kısımların birim hacim ağırlıkları, k permeabilite katsayısını, σ' düşey efektif gerilme, z ise azalan koordinattır. Bu koordinat, referans düzlemi ve Lagrangian (başlangıç) koordinatı arasında kalan katı kısımların birim alana gelen hacmi olarak tanımlanmaktadır. Burada, azalan koordinat sistemi yerçekimi yönünde hareket etmektedir.

Yukarıda verilen (3.49) eşitliği difüzyon-adveksiyon tipinde lineer olmayan bir denklemdir. Bu diferansiyel denklemin verilen sınır koşulları altında çözülebilmesi boşluk oranı–efektif gerilme ve permeabilite arasındaki ilişkiyi veren bir fonksiyonun tanımlanması ile mümkün olmaktadır.

Sonlu şekil değiştirme yapan kil tabakalarının deformasyon analizi için denklemin çözümünde azalan koordinat sisteminin kullanılması daha uygun düştüğü yazarları tarafından belirtilmektedir. Zemin yüzeyinin yeri belli olmadığı için Euler tipi koordinat kullanıldığında güçlüklerle karşılaşılır. Bu güçlüğü yenmek için sabit olan sınıra göre koordinat sistemi alınır. Konsolidasyon sürecinde yüzey değişmektedir ve problemin bilinmeyenlerinden biridir. Oysa katı kısmın (daneler) hacmi sabit kalmaktadır. Çözümde herhangi bir t anındaki z derinlikteki Euler koordinatı ξ şu şekilde ifade edilir

$$\xi(x,t) = \int_0^z [1 + e(z',t)] dz' \quad (3.52)$$

Konsolidasyon davranışı; tamamıyla suya doygun zeminlerin, kendi ağırlıkları nedeniyle oluşan gerilmeler ve dışarıdan uygulanan yüklemelere karşı bir tepki vermesi gerçeği üstüne formüle edilmiştir. Bununla birlikte konsolidasyon olayı sadece zemin tabakalarının şekillenmesi olayının bir parçasıdır. Şekillenmenin basit bir başlangıcı, özellikle deniz çökellerinde, denize yağmur yağması esnasında gerçekleşir. Bu da Stokes (Lamb,1932) sedimentasyon kanunu ile modellenmektedir. Bu sistemde danelerin aşağı hareketi engellenmiş oturma olarak adlandırılır. Bu süreç ilk defa Kynch (1952) tarafından aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{d}{dc} [cv_s(c)] \frac{\partial c}{\partial \xi} = 0 \quad (3.53)$$

Bu eşitlikte c danelerin konsantrasyonu ve v_s zemin danelerinin hızıdır. Eğer zemin konsantrasyonu sıfıra yaklaşmak eğiliminde ise Kynch (1952)'in teorisi Stoke (Lamb,1932) teorisine dönüşür. Efektif gerilmenin sıfıra yaklaşmasına izin verildiğinde eşitlik aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{\partial e}{\partial t} + f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad (3.54)$$

Eşitlik (3.53) ve (3.54) arasındaki benzerlik açıktır ve Been (1980) tarafından da belirtildiği gibi efektif gerilme sıfıra yaklaştığında non-lineer sonlu deformasyon konsolidasyon kuramında tam olarak Kynch'in teorisine eşit hale gelir (Schiffman, Pane ve Gibson,1984)

3.6 Tek Boyutlu Sonlu Şekil Değiştirme Konsolidasyon Denklemi için Bir Nümerik Çözüm: Condes0

Gibson vd. (1967) tarafından geliştirilen tek boyutlu sonlu şekil değiştirme teorisinin ifade edildiği diferansiyel denklem için bir çok araştırmacı tarafından kapalı ve nümerik çözümler geliştirilmiştir (Caldwell vd.(1984), Schiffman vd.,(1984), Scully vd(1984), McVay vd (1986)., Townsend ve McVay (1990), Abu-Hejlehve Znidarcic (1992)). Geliştirilen çözüm yöntemlerinde fiziksel olayı modelleyen bir diferansiyel denklem olduğu halde bilinmeyen sayısı birden fazla olduğundan çözümü yapabilmek için efektif gerilme-boşluk oranı ve boşluk oranı-permeabilite ilişkileri birer fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan çözüm algoritması ise Znidarcic ve Abu Hejleh (1994) tarafından geliştirilmiştir. Bu algoritmada tek boyutlu sıkışma, üç boyutlu büzülme ve yumuşak zeminlerde düşey çatlakların oluşumu modellenmektedir. Condes0 algoritması ile yapılan analizlerde zamana bağlı olarak yüksekliği artan yüksek su muhtevasına sahip ince daneli zeminlerin (maden atığı, tarama çamuru vb) kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altında konsolidasyon ve desikasyon sonucu derinlikle değişen boşluk oranı dağılımını, tabaka kalınlığını ve çatlakların büyüklüğünün zamana bağlı tek boyutlu değişimini bulmak mümkün olabilmektedir.

3.6.1 Model Tanımı

Condes0, Abu-Hejleh ve Znidarcic (1995) tarafından önerilen tek boyutlu büyük deformasyon desikasyon teorisinde verilen bazı kabuller esas alınarak geliştirilmiş bir çözüm

algoritmasıdır. Algoritmada Gibson vd. (1967) tarafından verilen diferansiyel denklemin çözümü için bir takım kabuller yapılmıştır. Yapılan kabullere göre:

- Tek boyutlu konsolidasyon boyunca ve üç boyutlu desikasyonda, boşluk oranı değeri zemin büzülme limiti altına düşünceye kadar yumuşak zeminler tamamen suya doygundur,
- Tek boyutlu konsolidasyonda düşey deformasyona neden olan tek boyutlu düşey akış dikkate alınır, bununla birlikte üç boyutlu desikasyonda yatay ve düşey deformasyonlar dikkate alınmaktadır,
- Zemin yatayda homojendir,
- Zemin iskeleti sıkışmayan su nedeniyle etkilenmez ve krip yoktur,
- Desikasyon süresince oluşan çatlak derinliği ve çatlak yayılımı üniformdur.

Yukarıda belirtilen kabullerin yanı sıra Darcy yasası ve kütle korunumu ilkesi de tek boyutlu sıkışma ve üç boyutlu desikasyon süreci boyunca kullanılmıştır. Condes0 analizlerinde kullanılan bünye bağıntıları :

Tek boyutlu sıkışmada boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi (Liu ve Znidarcic(1991)),

$$e = A_1(\sigma' + Z_1)^{B_1} \quad (3.55)$$

Bu eşitlikte e boşluk oranı, σ' düşey efektif gerilme ve A_1, B_1 ve Z_1 ampirik katsayılarıdır. Bu tez çalışmasında programda kullanılan bu katsayılar sızıntı etkili konsolidasyon deney verilerinin Sicta adlı programda değerlendirilmesiyle elde edilmiştir.

Üç boyutlu desikasyonda boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi (Abu-Hejleh ve Znidarcic, 1995),

$$e = A_2(\sigma' + Z_2)^{B_2} \quad (3.56)$$

Bu eşitlikte e boşluk oranı, σ' düşey efektif gerilme ve A_2, B_2 ve Z_2 ampirik katsayılarıdır.

Tek boyutlu sıkışmada ve üç boyutlu desikasyonda boşluk oranı-permeabilite ilişkisi (Somogyi,1979)

$$k = Ce^D \quad (3.57)$$

eşitliğiyle verilmektedir. Eşitlikteki e boşluk oranı, C ve D ampirik katsayılarıdır.

3.6.2 Condes0 Modeli Bünye Bağlılıları

Bir önceki bölümde verilen eşitliklerin, Lagrange koordinat sisteminde hız bağıntıları ile birlikte formüle edilmesiyle modelde kullanılan bünye bağıntıları oluşturulmuştur. Hız eşitliği ve kütle bünye denklemleri aşağıdaki gibidir:

Tek boyutlu sıkışmada; hız bağıntısı,

$$v_u = \frac{k(G_s - 1)}{1 + e} + \frac{k(1 + e_0)}{\gamma_w(1 + e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \quad (3.58)$$

Bünye bağıntısı:

$$\frac{\partial v_u}{\partial a} = \frac{-1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.59)$$

Üçboyutlu desikasyonda; hız bağıntısı,

$$v_c = -k + \frac{k(e\gamma_w + \gamma_s)}{\gamma_w(1 + e)} \left(1 - \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e_{cr}}\right) + \frac{k\alpha(1 + e_{cr})}{\gamma_w(1 + e)} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial a_1} \quad (3.60)$$

Bünye bağıntısı:

$$\frac{\partial(\alpha v_c)}{\partial a_1} + \mu E \frac{\partial \alpha}{\partial a_1} = \frac{-1}{1 + e_i} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.61)$$

olarak kullanılmıştır. Bu eşitliklerde: k, permeabilite katsayısı; t, zaman; a, a₁ Lagrange koordinat sistemi; e_{cr} çatlama boşluk oranı; e₀ sıfır efektif gerilme değerine karşılık gelen başlangıç boşluk oranı; G_s zeminin özgül yoğunluğu; v_c, çatlak zeminde hız bağıntısı; v_u, çatlak olmayan zeminde hız bağıntısı; α elemanın alanının yüksekliğine oranı; E, zemin üst yüzeyinden itibaren buharlaşma oranı ve η, çatlak duvarlarındaki buharlaşmayı belirleyen ampirik bir parametredir.

CS2 modelde olduğu gibi bu modelde de tek boyutlu sıkışmada boşluk oranı-permeabilite ilişkisinde (Somogyi, 1979) tarafından önerilen (3.57) eşitliği kullanılmaktadır.

3.7 Konsolidasyon Kuramlarının Genel Değerlendirilmesi

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon hesabını gerçeğe yakın yapabilmek için yukarıda verilen kuramlardan yararlanılması gerekmektedir. Yukarıda ayrıntıları verilen

bu kuramlarda zemin davranışı nonlinear kabul edilmekte ve sıkışma parametreleri (efektif gerilme-boşluk oranı ve boşluk oranı-permeabilite katsayısı) zamana bağlı olarak değiştirilmektedir. Çözümlerde sıkışma özelliklerinin üstel fonksiyonlar olarak verilmesi kuramları ifade eden eşitliklerin çözülmesini ve gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen kuramlara ait iki farklı analiz yöntemi göz önüne alınmış ve bu yöntemlerle laboratuvar deneylerinden elde edilen sıkışma parametreleri ile analizler yapılmıştır. Analizlerde kullanılan birinci yöntem Gibson vd. (1967) tarafından geliştirilen sonlu şekil değiştirme konsolidasyon kuramına dayanan ve Abu Hejleh ve Znidarcic (1992) tarafından geliştirilen çözüm algoritmasıdır. Diğeri ise Fox ve Berles (1997) tarafından geliştirilen ve Terzaghi konsolidasyon kuramına dayanan nümerik çözüm algoritmasıdır. Bu ikinci analiz yöntemi birinci yöntemle göre çok daha basit olmasına karşın gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bu çözüm yöntemleri ile yapılan analiz sonuçları ayrıntılı olarak beşinci bölümde sunulmuştur.

4. DENEY YÖNTEMİ: SIZINTI ETKİLİ KONSOLİDASYON DENEYİ

4.1 Giriş

Dipsel tarama çamurları, maden çamurları, kanalizasyon çamurları gibi atık maddelerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi günümüzde geoteknik ve çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır. Yüksek su muhtevasına sahip killi zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi sırasında malzemenin kendi ağırlığı altında ve çok küçük efektif gerilme durumlarında konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi klasik konsolidasyon deneyleriyle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ilk kez İmai (1979) tarafından bu tip zeminlerde akış hızı kontrollü hidrolik konsolidasyon deneyini uygulamıştır. Daha sonra bu deney yöntemi sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (Seepage Induced Consolidation Test) adını almıştır. İmai (1979) deneyleri konsolidometresinde numune içinde aşağı doğru oluşturulan bir hidrolik eğim ile gerçekleştirmiştir. Bu sayede numunede oluşan sızıntı kuvvetleri zemini konsolide etmiş ve numune içinde uniform olmayan bir efektif gerilme dağılımı oluşması sağlanmıştır. Numune içinde oluşan boşluk suyu basıncı deney süresince ölçülmüş, boşluk oranı dağılımı deney sonunda numuneyi dilimlere ayırarak hesaplanmıştır.

4.2 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özellikleri belirlemek üzere farklı çalışma sistemlerine sahip bir çok deney yöntemi literatürde mevcuttur. Bu deneylerin bazıları sabit deformasyon hızlı deneyler, konsolidometre, hidrolik konsolidasyon, santrifüj deneyleri ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri olarak sayılabilir. Tüm bu deney yöntemlerinin uygulanma esaslarına ve veri değerlendirme yöntemlerine bağlı olarak avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özellikleri belirlemek üzere son yıllarda ilk kez İmai (1979) tarafından oluşturulan sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği diğer yöntemlere kıyasla bir çok avantaja sahiptir. Znidarcic ve Liu (1989) sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneğinde bazı iyileştirmeler yaparak yüksek nonlineer konsolidasyon ilişkilerini değerlendirmek için daha güvenilir yeni bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem İmai (1979) tarafından düzenlenen orijinal sızıntı etkili konsolidasyon deneyi esas alınarak düzenlenmiştir. Bu yeni yöntem ile diğer deney yöntemlerindeki dezavantajların ve sınırlandırılmaların birçoğu ortadan kaldırmıştır. İmai (1979) tarafından geliştirilen sızıntı etkili deney yönteminin dezavantajlarından ilki, sistemin özel deney aletleri gerektirmesi, ikincisi ise deney sonunda alınan dataların kalitesinin deneyi yapan kişiye bağlı olmasıdır. Bununla birlikte boşluk oranı dağılımının belirlenmesinde kullanılan yöntem güvenilir olmamakla birlikte yanlış sonuçların

bulunabildiği Znidarcic (1996) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Znidarcic (1986) tarafından, lineerleştirilmiş konsolidasyon teorisini temel alan sabit deformasyon hızlı deney tekniğinin de çok yumuşak kohezyonlu zeminler için uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi aynı amaçla uygulanan Hidrolik Yük Farkı tekniği (Fox ve Baxter, 1997) ile karşılaştırıldığında da birçok avantaja sahiptir. Bunlardan ilki, akım pompası sayesinde; hacim değişimlerini ölçen metotlardan dört kat daha hassas bir şekilde dengeli durum akım hızlarının belirlenmesi sağlanmaktadır. İkinci olarak, akım pompası, düşük efektif gerilme değerlerinde daha güvenilir sonuçlar almayı sağlamaktadır. Son olarak ise, deney esnasında zeminin dengeli duruma gelişi transdüserler yardımıyla anında kontrol edilebilmektedir (Abu-Hejleh, Znidarcic ve Barnes, 1996).

Florida fosfatik killeri üzerinde sızıntı etkili konsolidasyon deneyi ve birçok analizler yapılmıştır (Abu-Hejleh ve Znidarcic,1995). Sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde zemin dengeli durum koşullarına ulaşmadan geçici bir konsolidasyon sağlanmaktadır. Böylece bu evrede elde edilen veriler belirlenen konsolidasyon için bağımsız bir doğrulama şansı vermektedir. Konsolidasyon karakteristikleri sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde yalnız dengeli durum sonuçları kullanılarak belirlenmektedir. Bilinen deney yöntemleriyle fosfatik killerin belirlenmiş malzeme özellikleri, CONDES0 programı kullanılarak sızıntı tesirli konsolidasyon deneyi örneklenmiştir. Fosfatik killerde yapılan araştırmalar sonucu düşük gerilmeler altında belirlenen konsolidasyon karakteristiklerinin doğrulukları gerçekleşmiştir. Arazideki boşluk oranının derinlikle değişimi deney sonuçları kullanılan yapılan nümerik çalışmada olumlu sonuçlar alınmıştır. Analizlerde depolama koşulları, ani dolgu yapılması ve değişen uniform dolgu hızları halleri alınarak örneklenmiştir. Sonuçlar; özellikle dolgu hızı yüksek olduğunda, zemin tabakalarının yüksekliği nedeniyle oluşan kendi ağırlığı altındaki konsolidasyonun dolgu hızından bağımsız olduğu göstermiştir.

Bu deney yönteminde, zemin numunesindeki suyun akım pompasıyla geri çekilerek akım hızının sabit tutulması sağlanır. Suyun aşağı doğru akmasına bağlı olarak, numune konsolide olur ve zemin boyunca basınç farklılıklarına neden olur. Bu basınç farklılıkları deney boyunca ölçülür ve veri toplama sistemi ile kaydedilir. Sabit akış dengeli duruma ulaşıncaya, yani konsolidasyon tamamlanıp, zemin içindeki basınç farklılığı sabit bir değer alıncaya kadar devam eder. Deneylerde belirlenen basınç düşüşleri akış mesafesi bitiminde akım pompasının sıfırlanması sonucu oluşmaktadır. Deney verilerinde görülen akış kesintileri boşluk basıncı davranışını önemli olarak etkilemez.

Abu-Hejleh ve Znidarcic (1994) tarafından kullanılan SICTA adı verilen bilgisayar programı, tekrarlayan bir parametre değerlendirme algoritması ile sızıntı etkili konsolidasyon deneyi sonucunda elde edilen verileri değerlendirerek, numune davranışının teoride ve toplanan datalar arasındaki farkı minimize edilmektedir. SICTA adlı bu program ile konsolidasyon analizlerinde gerekli olan zemine ait A, B, Z, C ve D değerlerini belirlenebilmektedir.

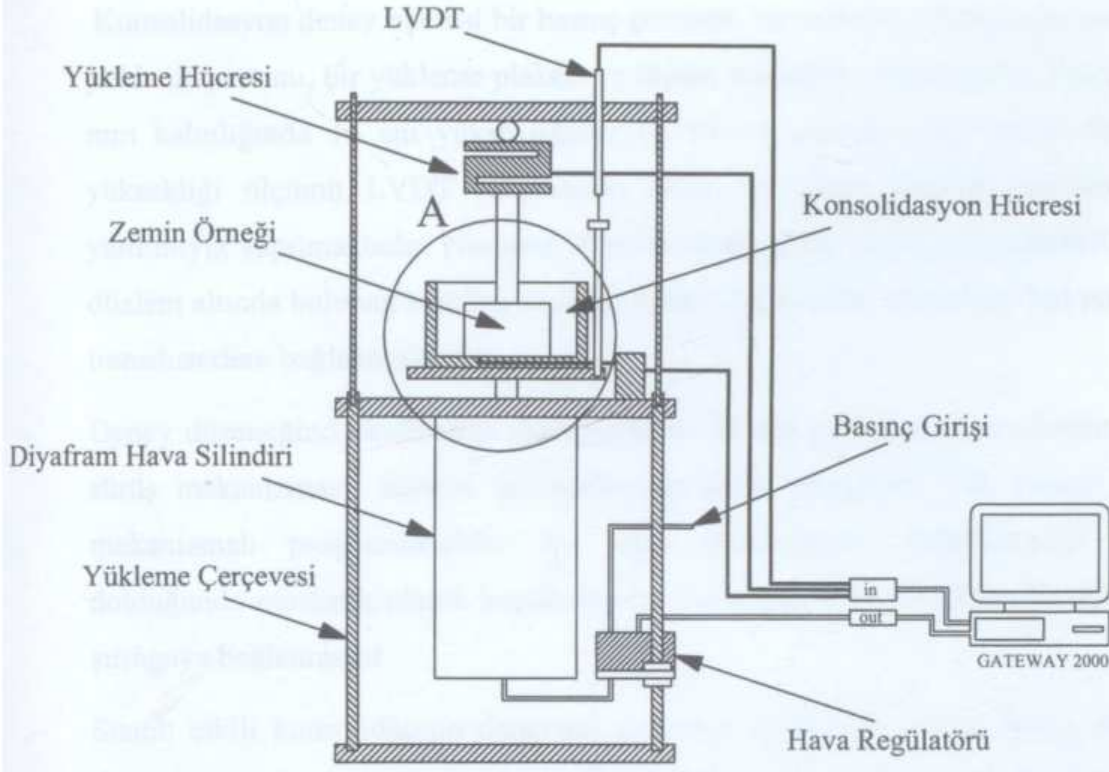
4.3 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deney Düzeneği

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi laboratuvar ekipmanı saydam bir halka içinde zemin numunesini kaplayan bir basınç hücresi, hafif bir piston ve tabana oturan geçirimli bir düzlem plaka, yükleme halkası, ve yüksekliği ölçmek için deformasyon saatinden oluşmaktadır. Alt tabandaki iki kanal zemin tabanındaki boşluk suyunu akış pompasına ve basınç ölççere (transduser) bağlamakta olup akış pompası ile numunedeki akış oranı hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Numunenin her iki tarafındaki basıncın zamana bağlı değişimleri, basınç transduserleri ile bir veri toplama sistemi vasıtasıyla bilgisayara istenilen zaman aralıklarıyla kaydedilmektedir.

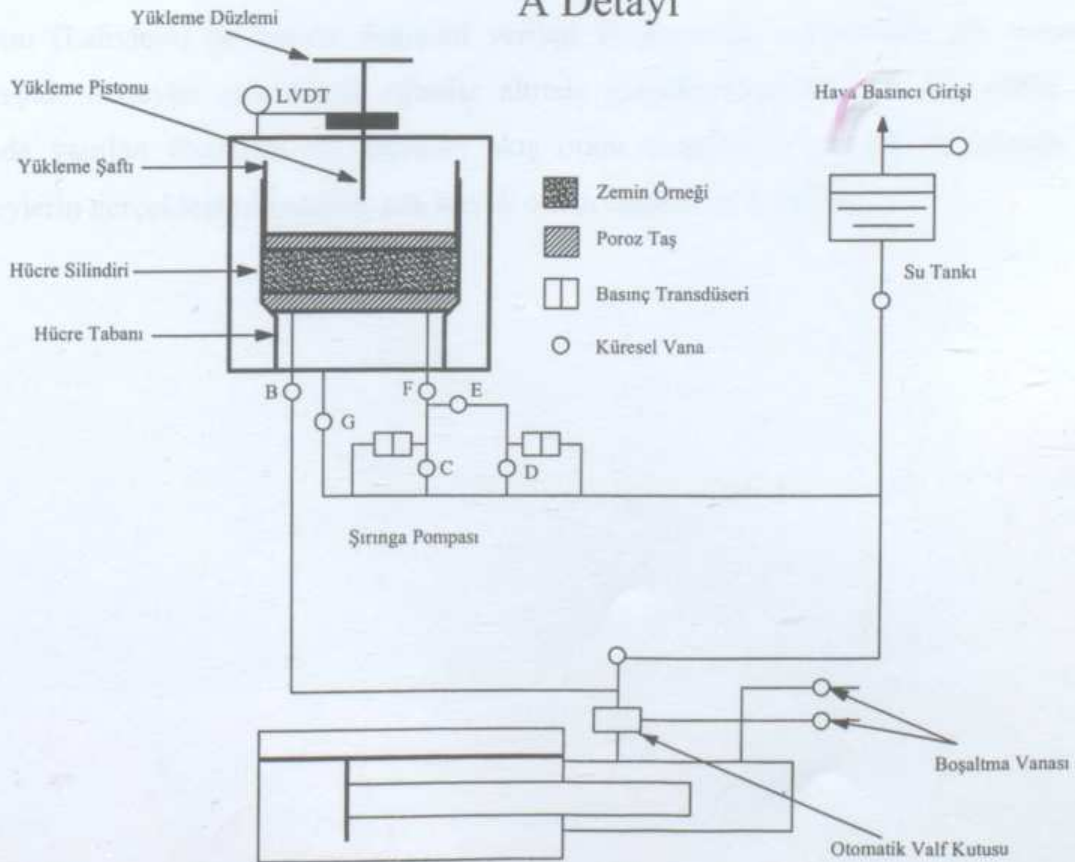
Bu deneyde zemin numunesindeki su bir pompa ile geri çekilerek akım hızının sabit tutulması sağlanmaktadır. Suyun aşağı doğru akmasına bağlı olarak, değişen hidrolik yük farkı ile numune konsolide olmakta ve zemin boyunca basınç farklılıkları oluşmaktadır. Bu basınç farklılıkları deney süresince ölçülerek veri toplama sistemi ile kaydedilmektedir. Sabit akış dengeli duruma ulaşıncaya, yani konsolidasyon tamamlanıp zemin içindeki basınç farklılığı sabit bir değer alınca kadar devam etmektedir.

Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği beş ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar ;

- Basınç kontrol paneli
- Sızıntı etkili konsolidasyon deney hücresi ve basınç transduserleri
- Pompa (Hız ayarlı)
- Yükleme sistemi
- Veri toplama ve değerlendirme sistemi (Bilgisayar ve Labview programı)



A Detayı



Şekil 4.1 Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği şeması

Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında kullanılan sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği şeması Şekil 4.1'de, genel görünümü ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Konsolidasyon deney hücresi bir basınç çemberi, bir numune silindiri, bir oturma plakası, bir yükleme pistonu, bir yükleme plakası ve ölçüm saatinden oluşmaktadır. Numune silindiri 0.4 mm kalınlığında 16 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında olup deney süresince numune yüksekliği ölçümü LVDT (deplasman ölçer) ve hücre üzerine yerleştirilen bir cetvel yardımıyla yapılmaktadır. Numune silindiri tabanına bir poroz taş yerleştirilmiştir. Geçirgen düzlem altında bulunan kanallar suyu iki kanala dağıtmakta, bunlardan biri pompaya diğeri de transduserlere bağlanmaktadır.

Deney düzeneğinde kullanılan akım pompası iki ana parçadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki sürüş mekanizması, ikincisi ise paslanmaz çelik şiringadır. Tek şiringa ile çekme/ıtme mekanizmalı programlanabilir bir sürüş mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca şiringa dolduğunda otomatik olarak boşaltılmasını sağlamak üzere bir otomatik dolun vana kutusu şiringaya bağlanmıştır.

Sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri süresince numunede oluşan basınç farkları Validyne Engineering Corporation tarafından imal edilen DP 215 basınç transduserleri tarafından ölçülmüştür. Transduserler her iki deney sisteminde de bilgisayara bağlı olup veri toplama sistemi (Labview) ile basınç değişimi verileri bilgisayarda toplanmıştır. Bu transduserler sayesinde deneyler çok düşük eğimler altında gerçekleştirilebilmiştir. Bu düşük eğimler altında yapılan ölçümler ve sağlanan akış oranı kontrolü, yumuşak zeminlerde yapılan deneylerin gerçekleştirilmesinde çok büyük önem taşıyan iki özelliktir.



Şekil 4.2 Sızınıtı etkili konsolidasyon deney düzenneği

4.4 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyinin Yapılışı

4.4.1 Deney Aletlerinin ve Numunenin Hazırlanması

Sızıntı etkili konsolidasyon deneylerinde numune hazırlanmasındaki birinci adım; ters basınç verilerek sistemin suya doyurulmasıdır. Diğer adımda pompa ve numune hücresi tabanı su ile doldurulmakta ve sistemdeki hava dışarı atılmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan akım pompasına ait şırınganın su ile dolması sağlanmakta, hücre tabanındaki B vanası açılarak numune ringinin içinde bulunduğu sistem suyla doldurulmaktadır. Hücre tabanına yerleştirilmiş poroz taşlardan hava kabarcıkları çıkması sona erdiğinde B vanası kapatılarak suya doyurma işlemi birkaç defa tekrarlanmaktadır.

Hücre içine konulmadan önce gerekli miktardaki kil numune homojen bir karışım haline getirilerek kaba boşaltılırken sorun yaratmayacak bir kıvamda olması sağlanmaktadır. Eğer kil numune içindeki su miktarı çok düşükse, uygun kıvama gelmesi için gerekli olan su zemine eklenerek karışımdan alınan iki-üç numune üzerinde yapılan su muhtevası deneyi ile zeminin su muhtevası belirlenmektedir. Bu veri deney forma yazılmakta ve zeminin başlangıç boşluk oranı değeri ;

$$e_0 = w G_s \quad (4.1)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Bu formüldeki w ölçülen su muhtevası değeri, G_s ise zeminin özgül ağırlık değeridir. Su muhtevası için alınan bu numunelerden farklı olarak sıfır efektif gerilme durumundaki boşluk oranı değerini belirlemek için numunenin ilk 3 cm'lik bölümünden iki tüp numune alınarak e_{00} değeri belirlenir. Bu tüpler içindeki kil numuneler buharlaşması engellemek için ağızları kapatılarak bir-iki gün kendi ağırlığında konsolidasyona bırakılır. Konsolidasyon tamamlandığında zemin üstündeki su uzaklaştırılmaktadır. Sıfır efektif gerilme değerine karşılık gelen su muhtevasını belirlemek için yüzeyden bir miktar kil numune alınarak ve sıfır efektif boşluk oranı ;

$$e_{00} = w G_s \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte w numunenin su muhtevası, G_s özgül hacim değerleridir.

Numune hücre içine yerleştirilmeden önce ring içinde bulunan fazla su temizlenerek filtre kağıdı hücre tabanına yerleştirilmekte ve numune tekrar karıştırılarak huni yardımıyla hemen hücre içine boşaltılmaktadır. Numune yüksekliği yaklaşık 4-5 cm arasında olması uygun olmaktadır. Ölçülere tam uygun olarak kesilmiş filtre kağıdı dikkatlice numune üstüne yerleştirilmektedir. Numune piston numuneye oturtulduğunda örselenmesini önlemek

amacıyla numune 2-3 saat kadar beklemeye bırakılır ve yükleme pistonun ring içine yerleştirilerek numune üstünde kalmasına izin verilmektedir. Başlangıç numune yüksekliği takılan ölçek sayesinde okunarak sızıntı etkili konsolidasyon deney föyüne işlenmektedir.

Numune hazır olduğunda sızıntı etkili konsolidasyon hücresinin şeffaf boru ve üst başlığı yerleştirilerek, üç bağlantı çubuğu ile kapatılmaktadır. Bu işlem sırasında hücre üstündeki tasfiye vanası açık olmalı ve yükleme şaftı ve okuma saati hücre kapatıldığında numuneye değmeyecek şekilde kilitli tutulmalıdır. O aşamaya gelindiğinde G vanası açılarak hücre su ile doldurulmakta ve su dışarı sızmaya başladığında vana kapatılmaktadır.

Numuneye ters basınç uygulanması sırasında örselenmesini engellemek için B vanası kapalı tutulmaktadır. Basınç regülatöründe ters basınç yavaşça artırılarak numuneye ters basınç uygulanmaktadır. İstenilen basınç seviyesine ulaşıldığında, yükleme şaftının ters basınç ile yükselerek yükleme çerçevesindeki hava silindirin pistonuna değmesi sağlanarak, B vanası açık halde numune ters basınç altında bir gece bekletilmektedir.

4.4.2 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi (SEK)–Kademeli Yükleme Deneyi (KYD) Yapılışı ve Permeabilite Ölçümü (PÖ)

Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi numune kendi ağırlığı altında çökeldikten sonra çok düşük bir basınç (0.25 kPa) altında yapılmaktadır. Deneyin her aşamasında numuneye 200 kPa'lık bir ters basınç verilmektedir.

Deney düzeneğinde kullanılan akım pompası iki ana parçadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki şırınga pistonunun itme/çekme mekanizması, ikincisi ise paslanmaz çelik şırıngadır. Tek şırınga ile çekme/itme mekanizmalı programlanabilir bir sürüş mekanizması oluşturulmuştur. Ayrıca şırınga dolduğunda boşaltılmasını sağlamak üzere bir otomatik valf kutusu şırıngaya bağlanarak şırınganın boşaltılması otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Akış hızı, sürüş mekanizmasının hızı ve şırınga çapına bağlı olarak belirlenebilmektedir. 0.5" şırınga çapı için uygulanan akış oranları ve ona karşılık gelen hız değerleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Deney süresince numunede oluşan basınç farkları iki adet basınç transduserleri tarafından ölçülmektedir. Transduserler bilgisayara bağlı olup bir veri toplama sistemi ile basınç değişimi verileri bilgisayara kaydedilmektedir.

Çizelge4.1 Deneilerde uygulanan Darcy hızları

HIZ AYARI (#)	AKIŞ HIZI (ml/saat))	DENEY HIZLARI (m/sn)
1	360	1.273×10^{-5}
2	180	3.369×10^{-6}
3	120	4.246×10^{-6}
4	60	2.123×10^{-6}
5	30	1.061×10^{-6}
6	15	5.307×10^{-7}
7	7.5	2.653×10^{-7}
8	4	1.415×10^{-7}
9	2	7.077×10^{-8}
10	1	3.538×10^{-8}
11	0.5	1.769×10^{-8}
12	0.25	$0,884 \times 10^{-8}$

Deneilerde su akımı kararlı duruma eriştiğinde tabandaki efektif gerilme değeri σ_c' :

$$\sigma_c' = \sigma_0' + \sigma_{s,w}' + \sigma_v' \quad (4.3)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada σ_0' yükleme pistonu tarafından uygulanan düşey gerilme değeri, $\sigma_{s,w}'$ numunenin kendi ağırlığı altında oluşan efektif gerilme değeri olup

$$\sigma_{s,w}' = (G_s - 1) H_s \gamma_w \quad (4.4)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte G_s numunenin özgül ağırlığı, γ_w suyun birim hacim ağırlığı, H_s numune yüksekliği değeridir.

Numunenin her akış hızında ölçülen basınç farkı (σ_v') değerleri sabit oluncaya yani numune o akış hızında konsolidasyonunu tamamlayana kadar beklenmekte ve akış hızları artırılarak deney tekrarlanmaktadır. Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi tamamlandıktan sonra numunenin son yüksekliği ölçülmektedir. Son yükseklik ölçümü yapıldıktan sonra numune yükleme pistonu yardımıyla yüksek basınç değerleri uygulanarak konsolide edilmektedir. Kademeli yükleme esnasında, her yük kademesinde aynı zamanda permeabilite ölçümü yapılmaktadır. Kademeli yükleme için 10-100 kPa arasındaki basınç değerleri

uygulanmaktadır. Hassas transdüserlerin aşırı yüklenmesini engellemek ve çift yönlü drenaj koşulları sağlayarak konsolidasyonu kolaylaştırmak için yük uygulama işlemi sırasında Şekil 4.1'de görülen C,D ve A vanaları açık tutularak, uygulanan yük altında numune 24 saat için konsolidasyona bırakılmaktadır. Numune tamamen konsolide olduğunda veri toplama sistemi sıfırlanarak permeabilite deneyi yapılmaktadır. Başlangıç değerleri birkaç dakika içinde toplandıktan sonra pompa seçilmiş bir oran için akım modunda çalıştırılarak birkaç dakika geçtikten sonra A, C ve D vanaları kapatılmaktadır. Deney, numune içindeki hidrolik yük farkı kararlı hale gelene kadar devam etmektedir. Permeabilite değeri :

$$k_s = \frac{q}{A_s i_r} \quad (4.5)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada q Çizelge 4 1'de verilen akış hızı, A_s numune alanı ve i_r hidrolik eğimdir. Hidrolik eğim (i_r) değeri:

$$i_r = \frac{\Delta\sigma'_v}{H_r \gamma_w} \quad (4.6)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada H_r permeabilite deneyi sonunda numunenin ortalama yüksekliğidir. Numunede daha büyük oturmalara neden olmamak için permeabilite deneyi küçük hidrolik eğim değerlerinde düzenlenmektedir. Her yük kademesi sonunda permeabilite deneyleri tekrarlanarak, her yük kademesi için boşluk oranı ve permeabilite değerleri belirlenmekte ve deney sonunda numune 24 saat etüvde kurutulup kuru ağırlık (M_s) ve numune yüksekliği (H_s) değerleri belirlenmektedir.

4.5 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi-Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları

Bu bölümde Haliç kili, Alibey yeşil kili, Alibey siyah kili adı verilen üç farklı kil numunesi üzerinde farklı başlangıç boşluk oranlarında yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi ve permeabilite ölçümü deney sonuçları sunulmaktadır.

Sızıntı etkili üç eksenli konsolidasyon deneyleri ve permeabilite ölçümleri sırasında tüm deneylerde zemin üzerine 0.25 kPa değerinde bir sürşarj yükü uygulanmış ve kendi ağırlığı altındaki efektif gerilme değeri (4.3) ve (4.4) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Deney sırasında boy değişimi ölçümleri deplasman ölçer (LVDT) yardımıyla yapılmış ve veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Zemine ait permeabilite değerleri eşitlik (4.5) yardımıyla hesaplanmış burada zeminin yüzey alanı $A=78.5 \text{ cm}^2$ olarak alınmıştır. Eşitlik (4.5)'de yer alan zemine ait hidrolik eğim değeri ise eşitlik (4.6) yardımıyla belirlenmiştir. Eşitlik (4.6)'da yer alan efektif gerilme değeri ($\Delta\sigma'_v$) ve numune yüksekliği değerleri (H)

deneylerden elde edilmiştir. Deneyler sırasında zemine uygulanacak uygun Darcy hızı değerleri, hazırlık deneyleri sırasında daha önceden farklı killerde yapılan deney verileri göz önüne alınarak deneme yoluyla belirlenmiştir.

4.5.1 Haliç Kili Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi, Kademeli Yükleme Deneyi Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları

Haliç dipsel tarama çamurundan alınan zemin numunesi üzerinde beş farklı başlangıç boşluk oranında (Deney1, Deney2, Deney 3, Deney 4, Deney5) düzenlenen sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Çizelge 4.2'de, kademeli yükleme deneyi ve permeabilite ölçümü deney sonuçları toplu halde Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan Haliç kil numunesine ait zemin indeks özellikleri aşağıdadır:

- W_L (%) = 53
- W_P (%) = 23
- I_P (%) = 30
- G_S = 2.72

Haliç kilinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 11.44$ değerinde düzenlenen Deney No:1 deneyinde uygulanan akış değerleri sıra ile #7,#6,#5 bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 0.364, 0.445, 0.575'dir. 5.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 1.31×10^{-7} m/sn, 25.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #8,#7 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 6.75×10^{-8} m/sn, 85.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 4.60×10^{-8} m/sn olarak bulunmuştur. Sızıntı etkili konsolidasyon deney verileri, veri toplama işlemi sırasında transudusere gelen elektrik akımındaki değişikliklere ve pompanın boşaltılmasına bağlı olarak sıçramalar göstermiştir. Deneyler sonucu elde edilen ve hesap işlemleri sırasında kullanılan bu basınç değerleri (doğruya en yakın ortalama değerlerini bulmak amacıyla) Matlab programındaki "Decimate" fonksiyonu kullanılarak filtre edilmiştir. Filtre edilmeden kullanılan datalar ile filtre edilerek kullanılan datalardan belirlenen ortalama değerler arasında, sonuçları etkileyecek önemli bir fark olmadığı saptanmıştır. Bununla birlikte başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 11.44$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme deneyinden elde edilen verilerin Matlab programında gerçekleştirilen filtrasyon işlemi sonucundaki eğrileri grafiksel olarak şekillerde verilmiştir.

Başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 7.894$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme deneyinde (Deney No:2) elde edilen veriler Çizelge

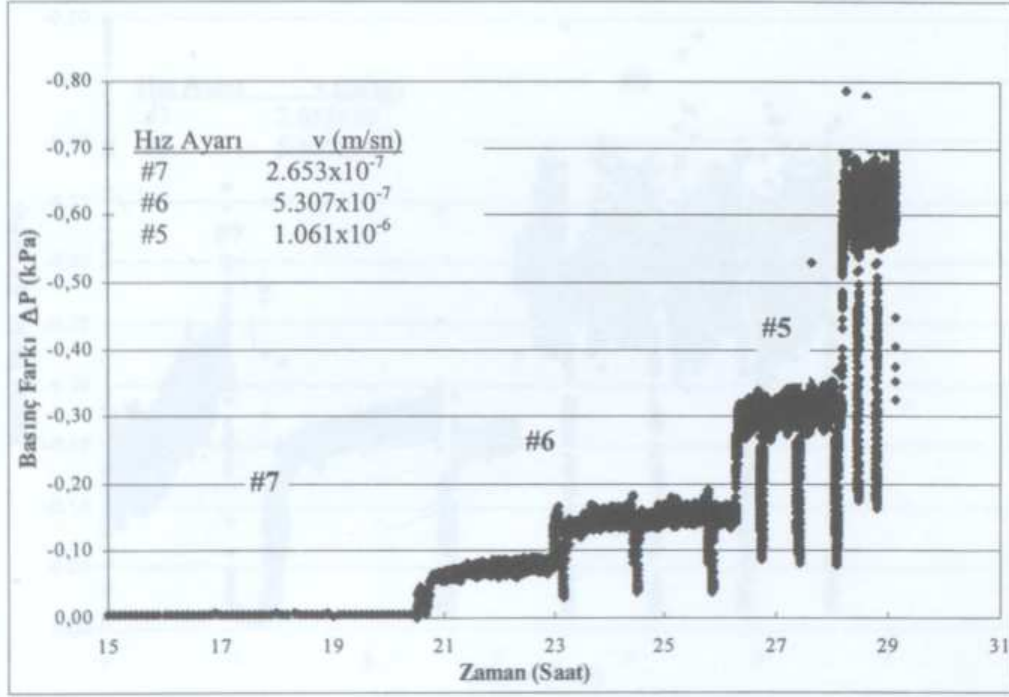
Ek 1.1' de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.1'de, 5.0, ve 25.0 kPa kademeli yükleme altında permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.2 ve Şekil Ek 1.3'de verilmiştir. Haliç kilinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 7.894$ değerinde düzenlenen (Deney No:3) deneyinde uygulanan akım değerleri sıra ile #7,#6,#5; bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 0.63, 1.08, 1.63'dür. 5.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 9.72×10^{-8} m/sn, 25.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 6.85×10^{-8} m/sn olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.2 Haliç kili $e_{00} = 11.44$ (Deney No:1) deney sonuçları

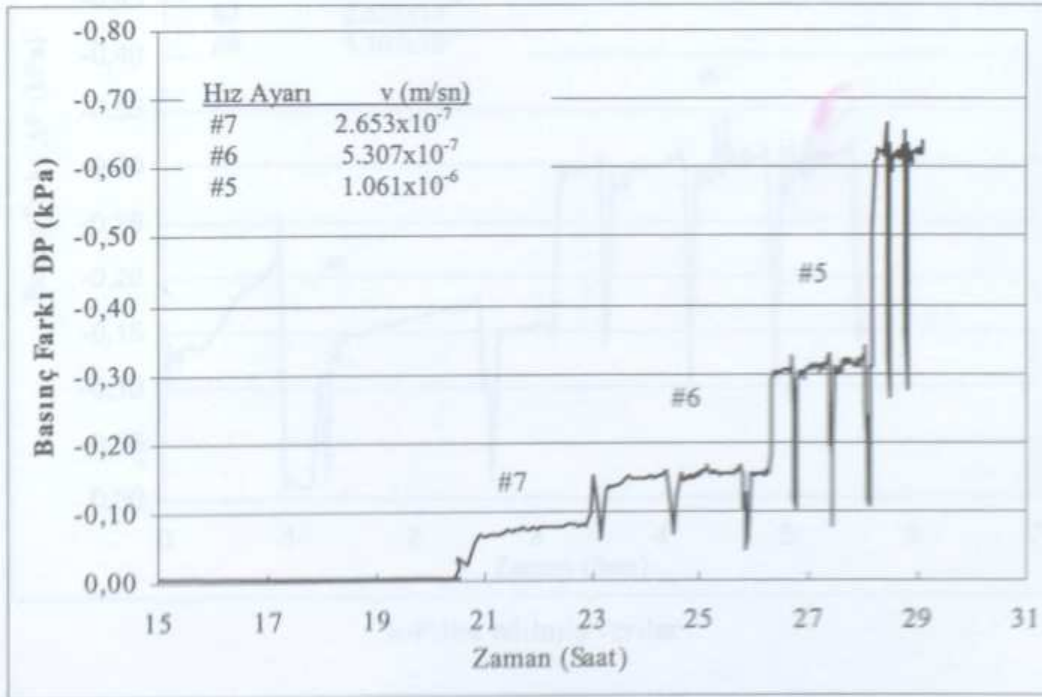
DENEY 1					
Efektif Gerilme(kPa)	H(m)	$\Delta H/H * (1+e_0)$	Boşluk Oranı(e)	Hız(#)	k (m/sn)
0.001	0.036	0.00	11.44		-
0.364	0.018	6.22	5.22	7	-
0.445	0.0155	7.08	4.36	6	-
0.575	0.0145	7.43	4.01	5	-
5.0	0.0096	9.12	2.32	7	1.31×10^{-7}
5.0	0.0096	9.12	2.32	6	1.35×10^{-7}
25.0	0.0070	10.02	1.41	8	6.74×10^{-8}
25.0	0.0070	10.02	1.41	7	5.2×10^{-8}
85.0	0.0057	10.47	0.97	7	4.6×10^{-8}
85.0	0.0057	10.47	0.97	6	5.1×10^{-8}

Çizelge 4.2 Haliç kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (SEK) ve kademeli yükleme (KY) deneyi ile permeabilite ölçümü deney sonuçları

Deney No	Uygulanan Akım	Efektif Gerilme	Boşluk Oranı	Ölçülen permeabilite
	Hızları	(kPa)	(e)	Katsayıları Değerleri (m/sn)
1 ($e_0=11.44$)	SEK # 7	0.364	5.22	-
	# 6	0.445	4.36	-
	# 5	0.575	4.01	-
	KY # 7, # 6	5.0	2.32	$1.31 \times 10^{-7}, 1.35 \times 10^{-7}$
	# 8, # 7	25.0	1.41	$6.74 \times 10^{-8}, 5.2 \times 10^{-8}$
	# 7, # 6	85.0	0.97	$4.6 \times 10^{-8}, 5.1 \times 10^{-8}$
2 ($e_0=7.894$)	SEK # 7	0.63	3.13	-
	# 6	1.08	2.85	-
	# 5	1.63	2.56	-
	KY # 7, # 6	5.0	1.86	$9.72 \times 10^{-8}, 9.72 \times 10^{-8}$
	# 7, # 6	25.0	1.11	$6.85 \times 10^{-8}, 6.85 \times 10^{-8}$
3 ($e_0=9.36$)	SEK # 7	0.57	3.60	-
	# 6	0.84	3.21	-
	# 5	1.45	2.62	-
	K.Y # 7, # 6	5.0	2.32	$1.15 \times 10^{-7}, 1.05 \times 10^{-7}$
4 ($e_0=6.57$)	SEK # 7	0.364	5.22	-
	# 6	0.445	4.36	-
	# 5	0.575	4.01	-
	KY # 8, # 7	5.0	2.32	$1.21 \times 10^{-7}, 1.39 \times 10^{-7}$
	# 8, # 7	10.0	1.41	$8.6 \times 10^{-8}, 1.01 \times 10^{-7}$
5 ($e_0=7.52$)	SEK # 8	0.41	5.22	-
	# 7	0.52	4.36	-
	# 6	0.75	4.01	-
	KY # 7, # 6	5.0	2.32	$1.1 \times 10^{-7}, 8.9 \times 10^{-8}$
	# 7, # 6	25.0	1.41	$5.9 \times 10^{-8}, 6.2 \times 10^{-8}$
	# 7, # 6	85.0	0.97	$3.8 \times 10^{-8}, 4.0 \times 10^{-8}$

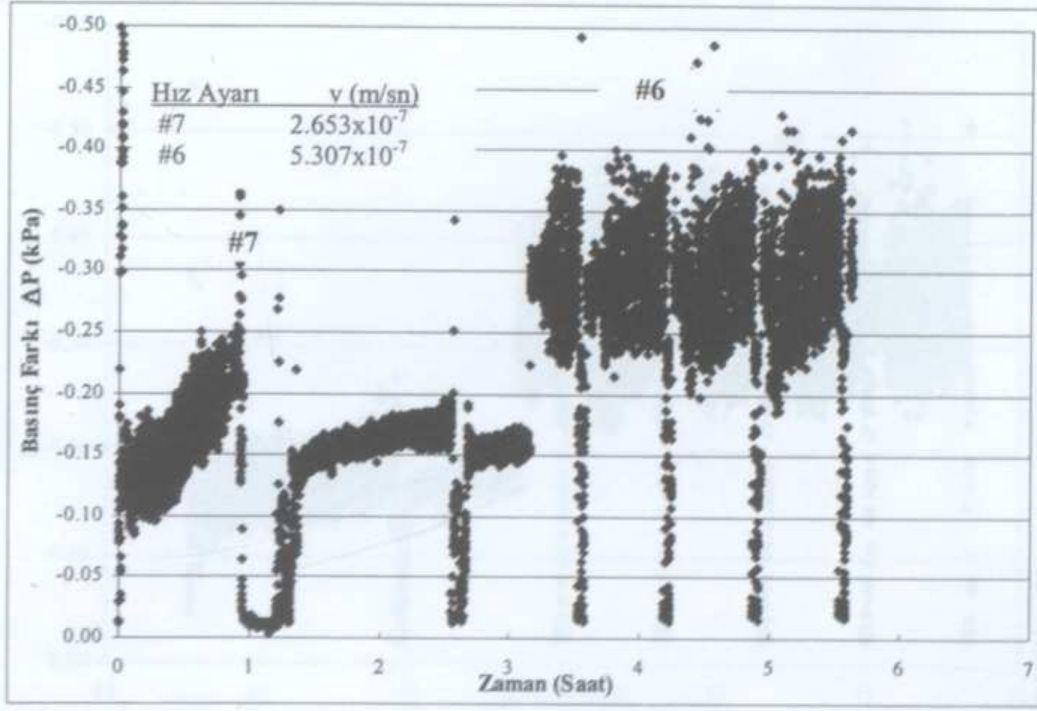


a-Filtre edilmemiş veriler

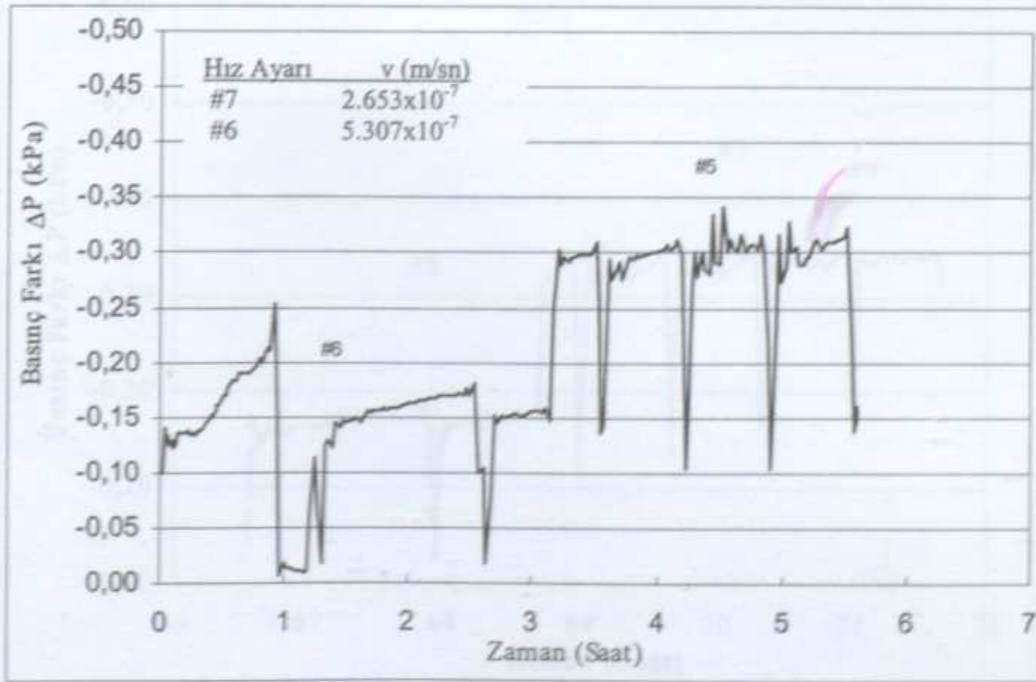


b-Filtre edilmiş veriler

Şekil 4.3 Haliç kili $e_{00} = 11.44$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği
($e_0 = 11.44$)

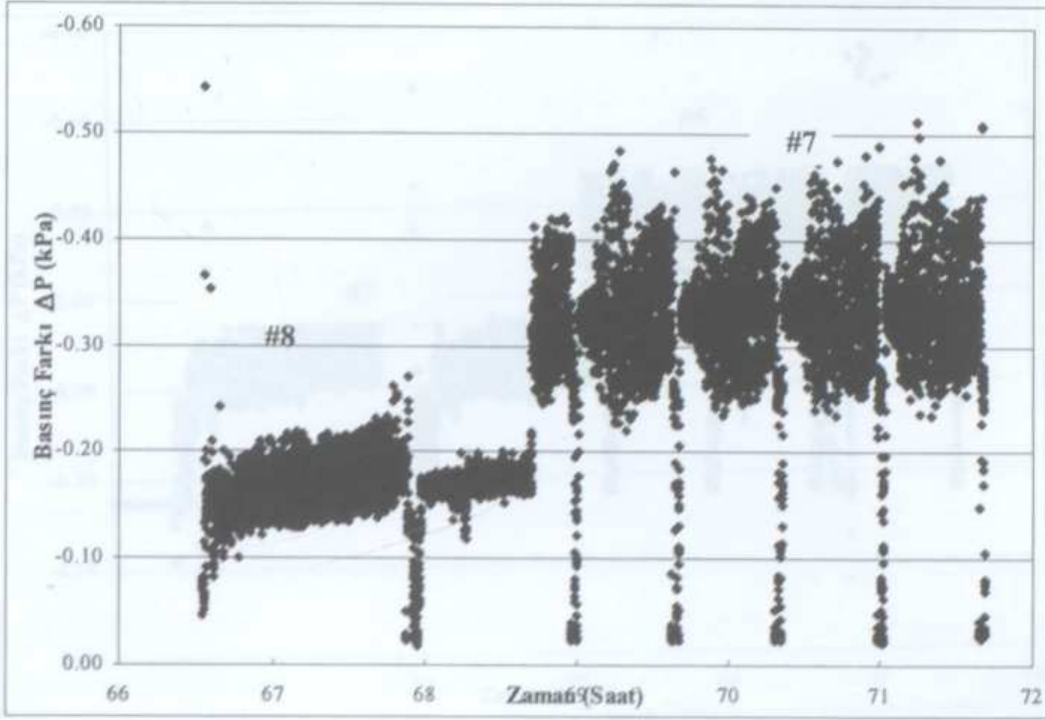


a-Filtre edilmemiş veriler

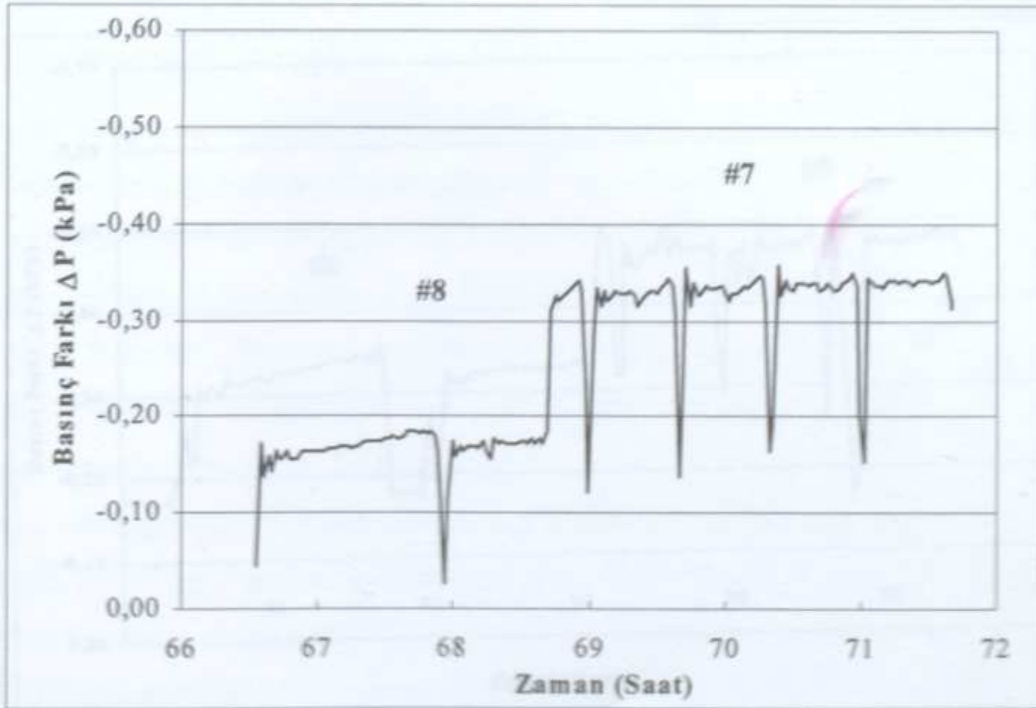


b-Filtre edilmiş veriler

Şekil 4.4 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=11.44$; Kademeli Yükleme: 5.0 kPa)

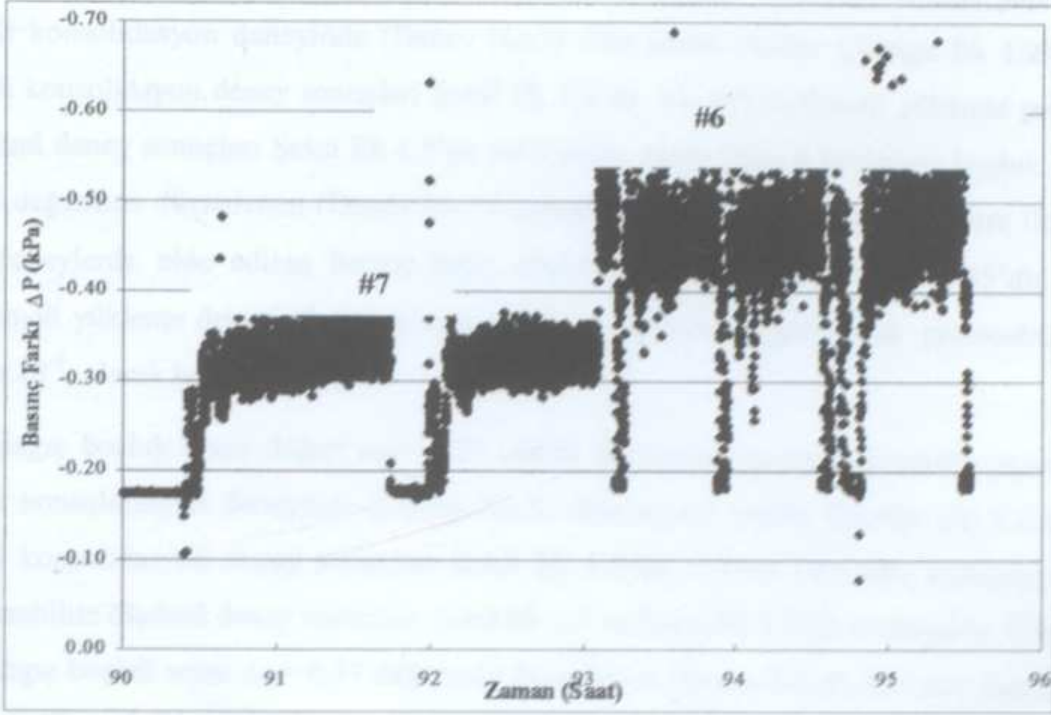


a-Filtre edilmemiş veriler

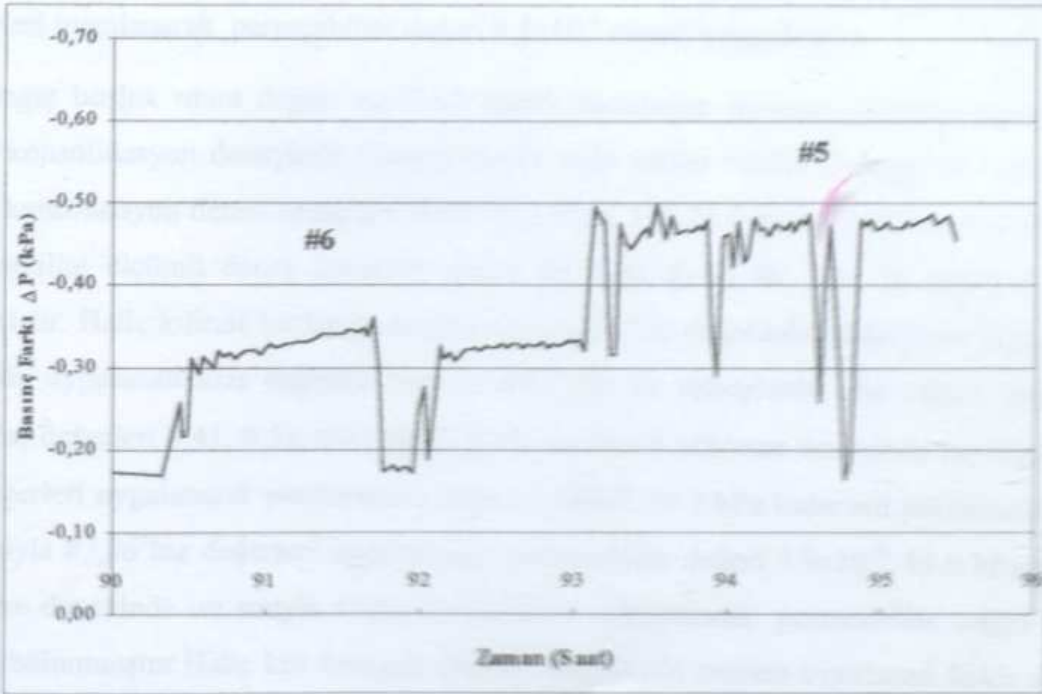


b-Filtre edilmiş veriler

Şekil 4.5 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($\sigma_0=11,44$; Kademeli Yükleme: 25.0 kPa)



a-Filtre edilmemiş veriler



b-Filtre edilmiş veriler

Şekil 4.6 Haliç kili sıranı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($\sigma_v = 11,44$; Kademeli Yükleme: 85,0 kPa)

Başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00}= 9.36$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde (Deney No:3) elde edilen veriler Çizelge Ek 1.2'de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.4'de, 5.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.5'de verilmiştir. Haliç kilinde başlangıç boşluk oranı $e_{00}= 9.36$ değerinde düzenlenen (Deney No:3) deneyde uygulanan akış değerleri sıra ile #7,#6,#5 bu deneylerde elde edilen basınç farkı $\Delta P(kPa)$ değerleri 0.57, 0.84, 1.45'dir. 5.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 1.15×10^{-7} , olarak bulunmuştur.

Başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00}= 6.57$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde (Deney No:3) elde edilen veriler Çizelge Ek 1.3'de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.6'da, 5.0 ve 10.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.7 ve Şekil Ek 1.8'de verilmiştir. Haliç kilinde başlangıç boşluk oranı $e_{00}= 6.57$ değerinde düzenlenen (Deney No:4) deneyde uygulanan akış değerleri sıra ile #7,#6,#5 bu deneylerde elde edilen basınç farkı $\Delta P(kPa)$ değerleri 0.55, 0.66, 0.9'dır. 5.0 kPa kademeli yükleme deneyinde sırayla #8,#7 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 1.21×10^{-7} , 10.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #8,#7 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 8.5×10^{-8} olarak bulunmuştur.

Başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00}=7.52$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde (Deney No:5) elde edilen veriler Çizelge Ek 1.4'de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.9'da, 5.0, 25.0 ve 85.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.10, Şekil Ek 1.11 ve Şekil Ek 1.12'de verilmiştir. Haliç kilinde başlangıç boşluk oranı $e_{00}=7.52$ değerinde düzenlenen (Deney No:5) deneyde uygulanan akış değerleri sıra ile #8,#7,#6 bu deneylerde elde edilen basınç farkı $\Delta P(kPa)$ değerleri 0.41, 0.52, 0.75'dir. 5.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri $1.1E-07$, 25.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 5.9×10^{-8} , 85.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #7,#6 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 3.8×10^{-8} olarak bulunmuştur. Haliç kili üzerinde yapılan deneylerde zemine uygulanan farklı akım hızı değerlerinde numuneler kısa sürede konsolide olmuş, tabanda oluşan basınç farkı değerleri kısa zamanda artarak sabit bir değer almışlardır. Ayrıca haliç kilinin yüksek geçirgenliğine bağlı olarak zemine uygulanan akım hızı değerleri fosfatik killerde uygulanan değerlerden daha büyük seçilmiştir. Deneyler sırasında basınç farkında meydana gelen ani sıçramalar pompanın boşaltılmasına bağlı olarak ortaya çıkmıştır.

4.5.2 Alibey Yeşil Kili Sızıntı Etkili Konsolidasyon, Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları

Bu tez çalışmasında kullanılan deney yöntemi ile elde olunan sonuçların geçerliliğini sınamak amacıyla daha önce üzerinde geniş kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiş olan Alibey Barajı temel zemininden alınmış yeşil ve siyah kil numunelerinden laboratuarda sulu çamur örnekleri hazırlanmıştır. Bu kil zeminlere ait zemin indeks özellikleri; baraj zemini üzerinde yapılan sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde YTÜ laboratuvarında yapılan deneyler ile tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan yeşil kil numunesine ait zemin indeks özellikleri aşağıdadır:

- W_L (%) = 60
- W_P (%) = 35
- I_P (%) = 25
- $G_S = 2.70$

Alibey Barajı temel zemininden alınan yeşil kil numuneleri üzerinde farklı başlangıç boşluk oranı değerlerinde ($e_{00} = 2.94, 4.6, 8.21$) üçer adet sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deneyleri yapılmış ve bu deneylerden elde edilen veriler Çizelge 4.4'te topluca verilmiştir.

Alibey yeşil kili üzerinde, başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 2.94$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde elde edilen veriler Çizelge 4.4'te sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.13'de, 40.0, 100.0 ve 200.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.14, Şekil Ek 1.15 ve Şekil Ek 1.16'da verilmiştir. Alibey yeşil kili üzerinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 2.94$ değerinde düzenlenen (Deney No:7) deneyde, uygulanan Darcy hızı q (m/sn) değerleri sırasıyla #8, #7, #6, bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 0.07, 0.124, 0.325'tir. 40.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırasıyla #9, #8 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri $0.29E-07$ (m/sn), 100.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırasıyla #9, #8 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 2.12×10^{-8} (m/sn), 200.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırasıyla #10, #9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 8.5×10^{-8} (m/sn) olarak bulunmuştur.

Alibey yeşil kili üzerinde, başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 4.6$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde elde edilen veriler Çizelge 4.5'te sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.17'de, 40.0 ve 80.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.18 ve Şekil Ek 1.19'da verilmiştir. Alibey yeşil kili üzerinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 4.6$ değerinde düzenlenen (Deney No:8)

deneyde; uygulanan Darcy hızı q (m/sn) değerleri sıra ile #8,#7,#6 bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 0.69, 0.81, 1.04'dür. 40.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #9,#8 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 0.28×10^{-7} (m/sn), 80.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #10,#9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 1.5×10^{-8} (m/sn) olarak bulunmuştur.

Alibey yeşil kili üzerinde, başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 8.21$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde elde edilen veriler Çizelge 4.4'de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.20'de, 40.0 ve 60.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.21 ve Şekil Ek 1.22'de verilmiştir. Alibey yeşil kili üzerinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 8.21$ değerinde düzenlenen (Deney No:8) deneyde; uygulanan Darcy hızı q (m/sn) değerleri sıra ile #8,#7,#6 bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 0.39, 0.53, 1.34'dür. 40.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #10,#9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 0.34×10^{-7} (m/sn), 60.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #10,#9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 2.05×10^{-8} (m/sn) olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.4 Alibey yeşil kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (SEK) ve kademeli yükleme (KY) deneyi ile permeabilite ölçümü deney sonuçları

<u>Deney No</u>	<u>Uygulanan Akım</u> <u>Hızları</u>	<u>Efektif Gerilme</u> <u>(kPa)</u>	<u>Boşluk Oranı</u> <u>(e)</u>	<u>Ölçülen permeabilite</u> <u>Katsayıları Değerleri</u> <u>(m/sn)</u>
6 ($e_0=2.94$)	SEK # 8	0.39	2.82	-
	# 7	0.45	2.81	-
	# 6	0.65	2.77	-
	KY # 9, # 8	40.0	1.45	$2.9 \times 10^{-8}, 3.3 \times 10^{-8}$
	# 9, # 8	100.0	1.24	$2.1 \times 10^{-8}, 2.7 \times 10^{-8}$
# 10, # 9	200.0	0.94	$9.5 \times 10^{-9}, 9.6 \times 10^{-9}$	
7 ($e_0=4.6$)	SEK # 8	0.69	3.64	-
	# 7	0.81	3.61	-
	# 6	1.04	3.47	-
	KY # 9, # 8	40.0	1.44	$2.8 \times 10^{-8}, 3.1 \times 10^{-8}$
	# 10, # 9	80.0	1.23	$1.6 \times 10^{-8}, 1.5 \times 10^{-8}$
8 ($e_0=8.21$)	SEK # 8	0.39	4.26	-
	# 7	0.53	4.03	-
	# 6	1.34	3.41	-
	KY # 10, # 9	40.0	1.46	$3.4 \times 10^{-8}, 3.6 \times 10^{-8}$
	# 10, # 9	60.0	1.23	$2.23 \times 10^{-8}, 2.05 \times 10^{-8}$

4.5.3 Alibey Siyah Kili Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi, Kademeli Yükleme Deneyi ve Permeabilite Ölçümü Deney Sonuçları

Bu tez çalışmasında kullanılan diğer bir kil numunesi de Alibey Barajı temel zemininden alınmış siyah kil numuneleridir. Siyah kile ait zemin indeks özellikleri; baraj zemini üzerinde yapılan sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde YTÜ laboratuvarında yapılan deneyler ile tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan siyah kil numunesine ait zemin indeks özellikleri aşağıdadır:

- W_L (%) = 67
- W_P (%) = 25
- I_P (%) = 42
- $G_s = 2.72$

Alibey Barajı temel zemininden alınan siyah kil numuneleri üzerinde farklı başlangıç boşluk oranı değerlerinde ($e_{00} = 6.06, 5.16, 3.00$) üçer adet sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deneyleri yapılmış ve bu deneylerden elde edilen veriler Çizelge 4.5'de topluca verilmiştir.

Siyah kili üzerinde, başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 6.06$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde elde edilen veriler Çizelge 4.5'de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.23'de, 40.0, 80.0 ve 100.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.24, Şekil Ek 1.25 ve Şekil Ek 1.26'da verilmiştir. Alibey siyah kili üzerinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 6.06$ değerinde düzenlenen (Deney No:9) deneyde; uygulanan Darcy hızı akış değerleri sıra ile #8,#7,#6 bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 0.10, 0.38, 1.5'dir. 40.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #11,#10 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 0.19×10^{-8} (m/sn), 80.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #11,#10 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 1.73×10^{-9} (m/sn), 100.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #10,#9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 1.58×10^{-9} (m/sn) olarak bulunmuştur.

Alibey siyah kili üzerinde, başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00} = 5.16$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde elde edilen veriler Çizelge 4.5'de, sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.27'de, 80.0 ve 100.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.28 ve Şekil Ek 1.29'da verilmiştir. Alibey siyah kili üzerinde başlangıç boşluk oranı $e_{00} = 5.16$ değerinde düzenlenen (Deney No:10) deneyde; uygulanan Darcy hızı akış değerleri sıra ile #8,#7,#6 bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 1.28, 2.70, 3.20'dir. 80.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #10, #9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri 0.23×10^{-8} (m/sn),

100.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #10,#9 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri $1.3Ex10^{-9}$ (m/sn) olarak bulunmuştur.

Alibey siyah kili üzerinde, başlangıç boşluk oranı değeri $e_{00}= 3.00$ olarak hazırlanan numune üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde elde edilen veriler Çizelge 4.5'de sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları Şekil Ek 1.30'da, 40.0 ve 200.0 kPa kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları Şekil Ek 1.31 ve Şekil Ek 1.32'de verilmiştir. Alibey siyah kili üzerinde başlangıç boşluk oranı $e_{00}=3.00$ değerinde düzenlenen (Deney No:11) deneyde; uygulanan Darcy hızı akış değerleri sıra ile #8,#7dir. Bu deneylerde elde edilen basınç farkı ΔP (kPa) değerleri 3.45, 7.5'dir. 40.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #12,#11 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri $0.25x10^{-8}$ (m/sn), 60.0 kPa kademeli yükleme deneyinde ise sırayla #12,#11 hız değerleri uygulanarak permeabilite değeri $0.75x10^{-9}$ (m/sn) olarak bulunmuştur.

Haliç kili yeşil kil ve siyah kil üzerinde yapılan tüm bu SEK ve KY ve PÖ deneylerinde elde edilen veriler daha önceden fosfatik killer üzerinde yapılmış literatürde yer alan deneyler ile (Abu-Hejleh,Znidarcic ve Robertson 1992) ve daha önceden bu çalışmada kullanılan zeminler üzerinde yapılan araştırmalarla (Tohumcu, 2001) uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu deneysel verilerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi Bölüm 5'de ayrıntılı olarak verilecektir.

Çizelge 4.5 Alibey siyah kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (SEK) ve kademeli yükleme (KY) deneyi ile permeabilite ölçümü deney sonuçları

Deney No	Uygulanan Akım Hızları	Efektif Gerilme (kPa)	Boşluk Oranı (e)	k (m/sn)
9 ($e_0=6.06$)	SEK # 8	0.436	5.38	-
	# 7	0.516	5.37	-
	# 6	0.716	5.31	-
	KY # 11, # 10	40.0	2.04	$1.90x10^{-9}, 1.98x10^{-9}$
	# 11, # 10	80.0	1.35	$1.73x10^{-9}, 1.75x10^{-9}$
	# 11	100.0	0.97	$1.58x10^{-9}$
10 ($e_0=5.16$)	SEK # 8	1.57	3.09	-
	# 7	2.99	2.99	-
	# 6	3.49	2.91	-
	KY # 10, # 9	80.0	1.46	$2.3x10^{-9}, 3.1x10^{-9}$
	# 10, # 9	100.0	1.32	$1.3x10^{-9}, 1.7x10^{-9}$
11 ($e_0=3.00$)	SEK # 9	3.77	2.33	-
	# 8	7.82	2.23	-
	KY # 11, # 10	40.0	1.52	$3.4x10^{-9}, 3.6x10^{-9}$
	# 12, # 11	200.0	0.96	$2.23x10^{-9}, 2.05x10^{-9}$

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Giriş

Tarama çamurları, madensel çamurlar gibi yüksek su muhtevalarındaki yumuşak zeminlerde, uzun yıllardır yapılan çalışmalar bu tip zeminlerin arazideki düşük efektif gerilme durumlarında sıkışma ve permeabilite özelliklerinin gerçeğe uygun olarak belirlenebilmesine imkan sağlamıştır. Yapılan bu son çalışmalarla sıkışma kapasitesi yüksek olan ve büyük deformasyonların meydana geldiği bu tip zeminlerde arazi ve laboratuarda yapılan deneysel çalışmalarda ve zemin davranışının modellendiği konsolidasyon teorisinde büyük gelişmeler ve yenilikler gerçekleşmiştir. Çevresel ve geoteknik açıdan son yıllarda büyük bir problem haline gelen bu tip zeminlerin arazideki davranışını gerçeğe en yakın olarak belirlemek mümkün hale gelmiş ve bu tip zeminlerin arazide düşük efektif gerilme durumlarında sıkışabilirlik ve permeabilite ilişkilerini belirlemek mümkün olmuştur. Bu konuda son yıllarda yapılan bir çok çalışma içinde yumuşak killi zeminlerin efektif gerilme-boşluk oranı ilişkisini en iyi tanımlayan ve modelleyen deney yöntemi sızıntı etkili konsolidasyon deney yöntemidir. Bu deney yönteminde efektif gerilme-boşluk oranını tanımlayan ilişki Liu ve Znidarcic (1991) tarafından eşitlik (2.7)'de önerilmiş ve literatürde yer almıştır. Yapılan araştırmalarda permeabilite-boşluk oranını tanımlayan ilişkiyi belirlemek üzere Somogyi (1979) tarafından önerilen (2.16) eşitliği kullanılmıştır.

Sızıntı etkili konsolidasyon deney yöntemi son yıllarda su muhtevası yüksek yumuşak killi zeminlerin çok düşük efektif gerilme durumlarında konsolidasyon davranışını en iyi şekilde modelleyerek arazideki zemin davranışını en iyi tanımlayan deney yöntemi olarak kabul görmektedir. Sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçlarını değerlendirmek üzere (Abu-Hejleh ve Znidarcic, 1992), deneysel olarak belirlenmiş değerler ile hesaplanan değerler arasındaki farkı minimize eden Sicta adlı program hazırlanmıştır. Eşitlik (2.7) ve (2.16)'daki A,B,C,D ve Z parametreleri bu program kullanılarak elde edilmiş yumuşak zeminlere ait, boşluk oranının efektif gerilmeye ve permeabilite katsayısına bağlı değişimini belirlemek mümkün olmuştur. Kararlı durum hali sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde bu iki esas ilişki ile tanımlanabilmektedir. Bu nedenle parametrelerin belirlenmesi için kararlı durum hali temel alınmıştır.

Kararlı durumda akışı sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde formüle edilebilmesi için iki sınır şartının ve bazı değerlerin bilinmesi gerekmektedir. Bilinmesi gerekli sınır şartları

- Uygulanan akış hızı (v), deneyden bilinmektedir.
- Düşey efektif gerilme değeri.

Gerekli olan diğer veriler ise:

- Numunenin başlangıç yüksekliği, (H_0)
- Suyun tabii birim hacim ağırlığı, (γ_w)
- Zeminine ait özgül yoğunluk değeri (G_s)

Bu verilerin tümü Bölüm 4'de ayrıntılı olarak açıklandığı gibi sızıntı etkili konsolidasyon deney verilerinden elde edilebilmektedir. Kararlı durumda deneyden elde edilen veriler ise,

- Numunenin sonuç yüksekliği, (H_f)
- Numune alt ve üst yüzeyleri arasında oluşan basınç farkları nedeniyle numune tabanında oluşan ve transdüserler yardımıyla ölçülebilen efektif gerilme değeridir.

Parametre tahmini algoritmasına gerekli verileri belirlemek üzere sızıntı etkili konsolidasyon deneyinden sonra daha büyük gerilme değerlerinde kademeli yükleme deneyi düzenlenmesi gerekmektedir. Büyük gerilmeler altında sıkışan bu zemin tabakasında permeabilite k_s , efektif gerilme σ'_s ve ona karşılık gelen boşluk oranı değeri (e_s) belirlenmektedir.

Bu bölümde sızıntı etkili konsolidasyon deneyinin nümerik çözüm algoritması ve deneylerden elde edilen parametrelerin değerlendirilmesi probleminin çözümünde kullanılan algoritma sunulacaktır.

5.2 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyinde Kararlı Durum Hali Çözüm Algoritması

Sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçları sonucu elde edilmek istenilen A,B,C,D ve Z ampirik parametreleri her zemin numunesi için elde edilmesi gereken değerlerdir. Abu-Hejleh ve Znidarcic (1992) tarafından sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde zeminde kararlı durum koşullarını göze alarak nümerik bir algoritma yardımıyla A,B,C,D ve Z ampirik parametrelerini belirleyen SICTA adlı bir bilgisayar programı yazılmıştır. Deney verileri kullanılarak elde edilen A,B,C,D ve Z parametrelerini tabanda oluşan efektif gerilme (σ'_c) ve kararlı durumda hesaplanan zemininin sonuç yüksekliği h_c değerleri belirlemektedir. Kararlı durumda hesaplanan taban gerilmesi ve deneysel olarak belirlenen taban gerilmesi değerinin normalize farkları hb (1)

$$hb(1) = \left| 1 - \frac{\sigma'_c}{\sigma_f} \right| \quad (5.1)$$

Ve hesaplanmış sonuç yüksekliğinin, kararlı durumda deneylerden elde edilen sonuç yüksekliğine oranı $hb(2)$,

$$hb(2) = \left(1 - \frac{h_c}{h_f}\right) \quad (5.2)$$

σ'_r , h_f sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde kararlı durumda belirlenmiş efektif gerilme ve sonuç yükseklik değerleri olmak üzere belirlenmektedir.

Kararlı durumda deneyi tanımlayan üç eşitlik Lagrange koordinatları kullanılarak, aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Denge eşitliği,

$$\frac{\partial \sigma}{\partial a} - \frac{e\gamma_w + \gamma_s}{1 + e_0} = 0 \quad (5.3)$$

σ toplam gerilme, γ_s zemin danelerinin tabii birim hacim ağırlığı ve γ_w suyun tabii birim hacim ağırlığı olarak tanımlanmıştır.

- Akım eşitliği,

$$v = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u_e}{\partial a} \frac{1 + e_0}{1 + e} \quad (5.4)$$

v su ve zemin tabakalarının arasında ortaya çıkan relatif hız değeri, u_e hidrolik koşullar nedeniyle oluşan artık boşluk suyu basıncı olarak tanımlanmıştır.

- Efektif gerilme eşitliği,

$$\sigma' = \sigma - u_s - u_e \quad (5.5)$$

olarak verilmekte bu rada u_s statik boşluk suyu basıncı Lagrange koordinat sisteminde bir a koordinatında ,

$$u_s = \frac{1 + e}{1 + e_0} \gamma_w a \quad (5.6)$$

veya

$$\frac{\partial u_s}{\partial a} = \frac{1 + e}{1 + e_0} \gamma_w \quad (5.7)$$

olarak tanımlanmıştır.

Tanımlanan bu üç eşitlik, sıkışabilirlik ve permeabilitenin tanımlandığı (2.7) ve (2.16) eşitlikleriyle beraber sızıntı etkili konsolidasyon problemini nümerik olarak çözmek için kullanılmaktadır (Abu-Hejleh ve Znidarcic, 1992).

Herhangi bir derinlikteki efektif gerilme değeri Lagrange koordinat ekseninde integral formda şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\int_b^a \frac{\partial \sigma'}{\partial a} da = \int_b^a \frac{\partial \sigma}{\partial a} da - \int_b^a \frac{\partial u_s}{\partial a} - \int_b^a \frac{\partial u_e}{\partial a} \quad (5.8)$$

Denge eşitliği ve akım da dahil edilerek tekrar düzenlendiğinde ;

$$\sigma'(a) - \sigma'_0 = \int_b^a \frac{e\gamma_w + \gamma_s}{1 + e_0} da - \int_b^a \frac{1 + e}{1 + e_0} \gamma_w da - \int_b^a \frac{v\gamma_w}{k} \frac{1 + e}{1 + e_0} dz \quad (5.9)$$

σ'_0 numunenin üst yüzünde sürşarja bağlı oluşan gerilme değeri olmak üzere, şeklinde ifade edilir.

Lagrange koordinatlarıyla zemin koordinatları z arasındaki bağıntı ise,

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{1}{1 + e_0} \quad (5.10)$$

olarak tanımlanmıştır. Böylece malzeme koordinatlarıyla tanımlanan sonuç eşitlik,

$$\sigma'(z) = \sigma'_0 + \int_b^a e\gamma_w + \gamma_s dz - \int_b^a (1 + e)\gamma_w da + \int_b^a \frac{v\gamma_w}{k}(1 + e) dz \quad (5.11)$$

veya

$$\sigma'(z) = \sigma'_0 + (\gamma_s - \gamma_w)z + \int_b^a \frac{v\gamma_w}{k}(1 + e) dz \quad (5.12)$$

olarak düzenlenebilir. Sürşarj yükünden ve kendi ağırlığından dolayı oluşan efektif gerilme değeri

$$\sigma'(z)_{surch+self} = \sigma'_0 + (\gamma_s - \gamma_w)z \quad (5.13)$$

Sızıntı kuvvetlerinin etkisiyle oluşan efektif gerilme değeri ise,

$$\sigma'(z)_{seepage} = \int_b^a \frac{v\gamma_w}{k}(1 + e) dz \quad (5.14)$$

olarak tanımlanır. Bu eşitlikte v, kararlı durumda zemin boyunca uygulanan sabit akış hızı değeridir.

Sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde kararlı durumda çözüm süreci şu şekilde aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Numune, sıfır efektif gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranından (e_{00}) daha yüksek olabilecek şekilde başlangıç boşluk oranında (e_0) hazırlanır. Bu durumda sedimantasyon

sürecine bağlı olarak kendi ağırlığında konsolidasyon başlamaktadır. Konsolidasyon modelinde sedimantasyon sürecinin modellenememesi nedeniyle başlangıç numune yüksekliği değeri (H_0)

$$H_0 = H_s(1 + e_0) \quad (5.15)$$

eşitliğinden belirlenmektedir. Bu eşitlikte H_s zemin danelerinin kuru haldeki yüksekliğidir.

Bu prosesin sonunda zeminin sedimantasyona, uygulanan sürşarj yüküne ve kendi ağırlığı altında konsolidasyonuna bağlı olarak, dışarıdan uygulanan herhangi bir akım olmaksızın oturmalar meydana gelmektedir. Bu adımda herhangi bir z koordinatındaki zeminin efektif gerilme değeri (5.3) eşitliği kullanılarak belirlenmektedir. Bu değere karşılık gelen boşluk oranı değeri (e) ise (2.7) eşitliği kullanılarak belirlenmektedir. Numunenin kendi ağırlığı ve sürşarj yükleri altında sıkışması sonucunda oluşan sonuç yüksekliği değeri ise :

$$h_c = \int_0^{H_s} (1 + e) dz \quad (5.16)$$

eşitliğinden elde edilmektedir. Burada H_s değeri numunenin sıfır efektif gerilme değerindeki yüksekliğinin (H_0) ($1 + e_0$) değerine oranıdır.

İkinci bir adım olarak numuneye uygulanan sabit akış değeri numunede (5.14) eşitliği ile tanımlanan ek efektif gerilme artışları meydana getirmektedir. Numunede oluşan efektif gerilme değeri eşitlik (5.12) yardımıyla belirlenir.

Kararlı durumda numunede oluşan sonuç efektif gerilme ve boşluk oranı dağılımları ve sonuç yükseklik değeri bir iterasyon planı dahilinde hesaplanmaktadır. Birinci iterasyonda kendi ağırlığı ve sürşarj yüklerine bağlı olarak boşluk oranı dağılımı değerleri, permeabilite dağılımı için (2.16) eşitliği kullanılarak ve sızıntı kuvvetleri nedeniyle daha sonra oluşan ek gerilmeleri yenilemek üzere kullanılmaktadır. Yeni gerilme değeri belirlendiğinde bu gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranı dağılımı daha önceden olduğu gibi hesaplanarak yeni permeabilite değerlerini ve sızıntı kuvvetlerini bulmak için bu yeni değer kullanılmaktadır.

Bu iterasyon algoritması nümerik olarak bilgisayarda kullanıldığında hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

Kararlı durumda boşluk oranı dağılımı elde edildiğinde numunenin sonuç yüksekliği (5.16) eşitliği ile hesaplanarak numune tabanında oluşan efektif gerilme değeri,

$$\sigma'_c = \left(\frac{e_b}{A}\right)^{\frac{1}{B}} - Z \quad (5.17)$$

e_b tabandaki boşluk oranı olacak şekilde belirlenmektedir. Daha sonra bu değerler eşitlik (5.1) ve (5.2) eşitliklerinde kullanılmaktadır.

5.3 Parametrelerin Belirlenmesinde Kullanılan Algoritma

Parametre belirleme yöntemlerinin en önemli amacı (2.7) ve (2.16) eşitliklerinde tanımlanan sıkışabilirlik ve permeabilite fonksiyonlarını en iyi ifade eden A,B,C,D ve Z parametrelerini bulmaktır.

Bu parametreler bulunurken B ve D parametreleri serbest parametreler olarak seçilip tahmin edilerek,Z,C ve D parametreleri ise boşluk oranı ve efektif gerilmeye bağlı olan diğerleri sıfır efektif gerilmeye karşılık gelen boşluk oranı (e_{00}) ve kademeli yükleme deneyleri sonucu elde edilen e_s, σ'_s ve k_s değerleri kullanılarak ,

$$Z = \frac{\sigma'_s}{\left(\frac{e_s}{e_0}\right)^{\frac{1}{B}} - 1} \quad (5.18)$$

$$A = \frac{e_0}{Z^B} \quad (5.19)$$

$$C = \frac{k_s}{(e_s)^D} \quad (5.20)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

Parametre tahmininde kullanılan diğer veriler ise ;

- B ve D parametrelerinin başlangıç tahmin değerleri,
- B parametresine ait en alt ve en üst sınır değerleri b_l, b_h ve D parametresine ait en alt ve en üst sınır değerleri d_l, d_h .

Belirlenen bu B ve D değerleri her zaman bir $x(2)$ vektörüne atanır. k' ya bağlı olarak yapılan iterasyonda B parametresi $a1(k)$ ve D parametresi ise $a2(k)$ vektörlerine atanır.

Gauss-Newton yaklaşımında, daha iyi tahminler yapabilmek amacıyla B ve D parametrelerinin eski değerleri veya x vektörü yeni tahminler ile değiştirilmektedir. Bu metot her iterasyonda, x vektörüne bağlı olarak normalize hb vektöründeki oluşan değişimleri lineerize etme temeline dayanmaktadır. Burada x ve hb vektörleri iki veri noktasına aittir. Bu nedenle bir sonraki iterasyondaki normalize vektör hb_{k+1} Taylor serisi kullanılarak şu şekilde oluşturulmuştur.

$$hb(1)_{k+1} = hb(1)_k + \frac{\partial hb(1)_k}{\partial a1(k)} da(1) + \frac{\partial hb(1)_k}{\partial a2(k)} da(2) \quad (5.21)$$

$$hb(2)_{k+1} = hb(2)_k + \frac{\partial hb(2)_k}{\partial a1(k)} da(1) + \frac{\partial hb(2)_k}{\partial a2(k)} da(2) \quad (5.22)$$

Burada da vektörleri B ve D'deki adimsal artışlardaki değişimleri tanımlamaktadır. Bir önceki eşitliklerindeki kısmi türevler sonulu farklara açıldığında ,

$$\frac{\partial hb(1)_k}{\partial a1(k)} = \frac{hb(1)_k(a1(k) + .0001) - hb(1)_k(a1(k))}{0.0001} \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial hb(1)_k}{\partial a2(k)} = \frac{hb(1)_k(a2(k) + .0001) - hb(1)_k(a2(k))}{0.0001} \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial hb(2)_k}{\partial a1(k)} = \frac{hb(2)_k(a1(k) + .0001) - hb(2)_k(a1(k))}{0.0001} \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial hb(2)_k}{\partial a2(k)} = \frac{hb(2)_k(a2(k) + .0001) - hb(2)_k(a2(k))}{0.0001} \quad (5.26)$$

Eşitlik (5.21) ve (5.22) verilen fark vektörü hb_{k+1} sifıra eşit alınarak,

$$\begin{bmatrix} hb(1)_k \\ hb(2)_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial hb(1)_k}{\partial a1(k)} & \frac{\partial hb(1)_k}{\partial a2(k)} \\ \frac{\partial hb(2)_k}{\partial a1(k)} & \frac{\partial hb(2)_k}{\partial a2(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} da(1) \\ da(2) \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

şeklinde düzenlenebilir. Bu matris fark vektörü hb vektörünün x vektörüne bağlı jakobiyenidir.

Çözüm vektörü (da) matris formda,

$$\begin{bmatrix} da(1) \\ da(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial hb(1)_k}{\partial a1(k)} & \frac{\partial hb(1)_k}{\partial a2(k)} \\ \frac{\partial hb(2)_k}{\partial a1(k)} & \frac{\partial hb(2)_k}{\partial a2(k)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} hb(1)_k \\ hb(2)_k \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

yazılabilmektedir.

B ve D için bir sonraki iterasyon çözümleri şu şekilde yenilenmektedir:

$$a1(k+1) = a1(k) + da(1) \quad (5.29)$$

$$a2(k+1) = a2(k) + da(2) \quad (5.30)$$

Eğer $a_1(k)$ ve $a_2(k)$ 'nin herhangi bir iterasyondaki değeri B ve D parametreleri için verilen alt ve üst sınırları aşacak olursa, bu limit değerleri sağlamak için tahminler doğrultusunda adım sayısı azaltılmaktadır.

Hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki toplam normalize fark değerleri error (k) k iterasyonunda,

$$\text{Error}(k)=hb(1)+hb(2) \quad (5.31)$$

olarak formüle edilmiştir. Buna rağmen bu iterasyon adımıdaki normalize fark bir önceki adımdaki değerini,

$$\text{error}(k) > \text{error}(k-1) + 0.02 \quad (5.32)$$

kriterine göre aşıyorsa, daha iyi bir tahmin için B ve D'nin tekrarlanması gerekmektedir. Bu noktada doğru seçme stratejisi yapılan çalışmaya (Abu-Hejleh, A.N., Znidarcic, D., 1992) adapte edilerek B ve D parametrelerinin her iterasyon adımından bir önceki iterasyondaki aralarındaki toplam normalize farka göre belirleme zorunluluğu getirilmiştir.

Bir önceki tahmin değerini, o adımdaki tahminleri ile kontrol ederek eğer gerekiyorsa yeni tahminleri kullanarak, yenileyebilen bir iterasyon yöntemi kullanılarak daha önceden verilen kriterlere uyan, tatmin edici sonuca ulaşılan kadar çözüm yapmak mümkün olmaktadır.

5.4 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deney Sonuçları ve SICTA Programıyla Elde Edilen Parametrelerle Belirlenen Sıkışabilirlik ve Permeabilite İlişkileri

5.4.1 Haliç Kili Sıkışabilirlik ve Permeabilite İlişkileri

Haliç kilinde beş ayrı başlangıç boşluk oranında (e_{00}) hazırlanmış numunede gerçekleştirilen sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçlarından elde edilen veriler yukarıda çözüm algoritması verilen ve Abu-Hejleh ve Znidarcic (1994) tarafından geliştirilen SICTA adı verilen eğri geçirme programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneylerde ölçülen değerlerin (2.7) ve (2.16) eşitliklerinde yerine konulmasıyla elde edilen denklem takımının SICTA tarafından çözülmesiyle A, B, C, D ve Z ampirik parametrelerinin değerleri elde edilmiştir ve bu veriler Çizelge 5.1'de verilmiştir. Haliç kilinde $e_0=11.44$ başlangıç boşluk oranında düzenlenen deneyde; numuneye farklı akım hızları uygulanması sonucu numune tabanında oluşan basınç farkı değerleri ve kademeli yükleme sonrası uygulanan permeabilite ölçümü deney verileri SICTA programında değerlendirilerek elde edilen A, B, Z, C ve D parametreleri ve program çıktıları EK 2'de verilmiştir. Haliç kilinde uygulanan SEK deney sonuçlarından elde edilen $(e)-(\sigma_v')$ grafiği Şekil 5.1'de $(s)-(k)$ grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir. Bu grafiklerde deney verileri noktalar

Çizelge 5.1 Haliç kili için SICTA programı ile belirlenen A,B,C,D ve Z katsayıları değerleri

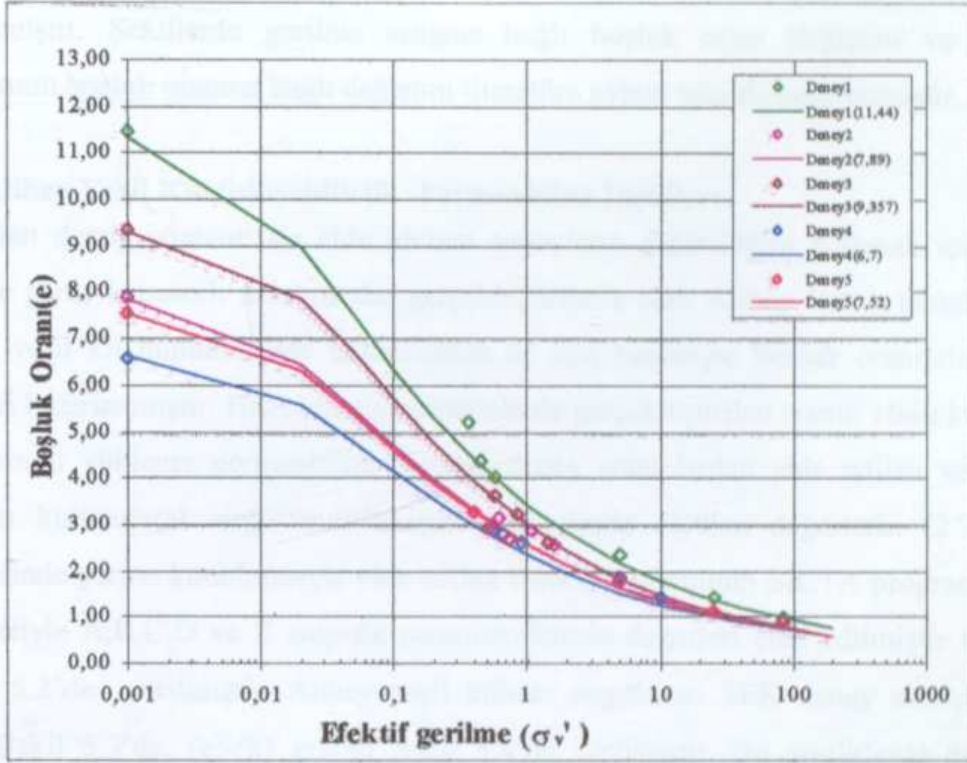
DENEY1	A	B	Z	C	D
111	3.746940	-0.296990	0.023320	2.235500x10 ⁻⁰⁸	2.101000
112	3.390600	-0.235590	0.005730	1.911200x10 ⁻⁰⁸	2.287240
113	3.282490	-0.215540	0.003050	1.440000x10 ⁻⁰⁸	2.622670
121	3.730080	-0.302140	0.024500	3.626800x10 ⁻⁰⁸	1.807910
122	3.298830	-0.264030	0.009010	3.556700x10 ⁻⁰⁸	1.864740
123	3.180510	-0.252690	0.006310	3.390000x10 ⁻⁰⁸	2.004420
131	3.721070	-0.304940	0.025150	4.915200x10 ⁻⁰⁸	1.623730
132	3.263840	-0.275440	0.010530	4.919300x10 ⁻⁰⁸	1.644180
133	3.144430	-0.267050	0.007940	4.937200x10 ⁻⁰⁸	1.732870

DENEY2	A	B	Z	C	D
211	2.614010	-0.211300	0.005350	4.999500x10 ⁻⁰⁸	1.069370
212	2.583640	-0.284080	0.004200	6.613900x10 ⁻⁰⁸	0.617090
213	2.412910	-0.161690	0.006600	5.015700x10 ⁻⁰⁸	1.062790
221	2.533990	-0.253990	0.011340	6.165900x10 ⁻⁰⁹	0.884650
222	2.527210	-0.253620	0.011210	6.320700x10 ⁻⁰⁸	0.660630
223	2.380080	-0.285000	0.006080	6.202900x10 ⁻⁰⁸	0.830570

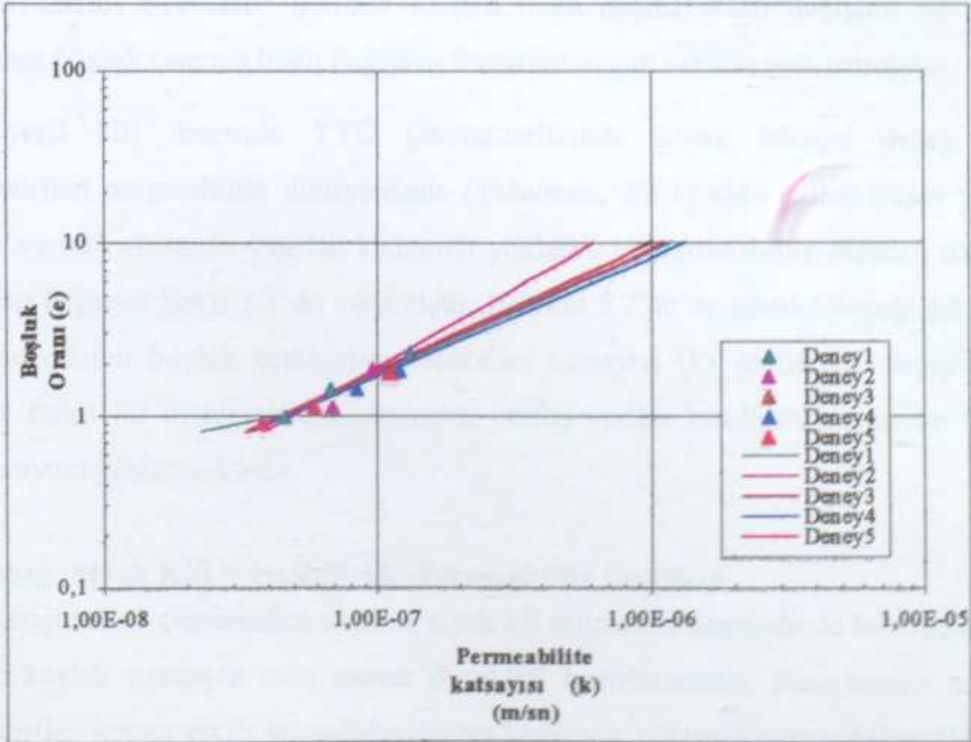
DENEY3	A	B	Z	C	D
211	2.775110	-0.289500	0.015020	6.126600x10 ⁻⁰⁸	1.136890
212	2.679200	-0.267880	0.009390	6.305800x10 ⁻⁰⁸	1.084840
213	2.454720	-0.213770	0.001910	6.572400x10 ⁻⁰⁸	1.010090

DENEY4	A	B	Z	C	D
411	2.411270	-0.178140	0.003600	2.446600x10 ⁻⁰⁸	2.694170
412	2.400730	-0.175420	0.003220	1.698900x10 ⁻⁰⁸	3.308810
413	2.322360	-0.154850	0.001210	1.024000x10 ⁻⁰⁷	4.161970
421	2.324430	-0.220100	0.008910	4.029900x10 ⁻⁰⁸	2.218060
422	2.320490	-0.219370	0.008700	3.562400x10 ⁻⁰⁸	2.584520
423	2.249560	-0.205920	0.005920	3.114000x10 ⁻⁰⁸	2.984110

DENEY5	A	B	Z	C	D
511	2.539700	-0.227620	0.008490	4.432400x10 ⁻⁰⁸	1.607000
512	2.409190	-0.195000	0.002920	4.926700x10 ⁻⁰⁸	1.420860
513	2.346500	-0.178670	0.001480	5.089900x10 ⁻⁰⁸	1.363190
521	2.488040	-0.248480	0.011660	4.986200x10 ⁻⁰⁸	1.508660
522	2.335040	-0.228790	0.006020	5.048000x10 ⁻⁰⁸	1.398220
523	2.274680	-0.220650	0.004430	5.064100x10 ⁻⁰⁸	1.369680
531	2.517220	-0.236560	0.009790	4.643800x10 ⁻⁰⁸	1.568690
532	2.350990	-0.221190	0.005210	4.595100x10 ⁻⁰⁸	1.486270
533	2.283890	-0.214670	0.003880	4.585800x10 ⁻⁰⁸	1.470340



Şekil 5.1 Haliç kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) -efektif gerilme (σ'_v) grafiği



Şekil 5.2 Haliç kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) -permeabilite katsayısı (k) grafiği

şeklinde, parametreler yardımıyla eşitlikler kullanılarak elde edilen veriler ise eğriler ile gösterilmiştir. Şekillerde gerilme artışına bağlı boşluk oranı değişimi ve permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı değişimi literatüre uygun şekilde belirlenmiştir.

5.4.2 Alibey Yeşil Kili Sıkışabilirlik -Permeabilite İlişkileri

Kullanılan deney yöntemi ile elde olunan sonuçların geçerliliğini sınamak için daha önce üzerinde geniş kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiş olan Alibey Barajı temel zemininden alınmış yeşil kil numunesinde laboratuarda üç ayrı başlangıç boşluk oranında sulu çamur örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış numunelerde gerçekleştirilen sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçlarından elde edilen veriler SICTA programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneylerde ölçülen değerlerin (2.7) ve (2.16) eşitliklerinde yerine konulmasıyla elde edilen denklem takımının SICTA programı tarafından çözülmesiyle A,B,C,D ve Z ampirik parametrelerinin değerleri elde edilmiştir ve bu veriler Çizelge 5.2’de verilmiştir. Alibey yeşil kilinde uygulanan SEK deney sonuçları $(e)-(\sigma_v')$ grafiği Şekil 5.3’de, $(e)-(k)$ grafiği Şekil 5.4’de verilmiştir. Bu grafiklerde deney verileri noktalar şeklinde, parametreler yardımıyla eşitlikler kullanılarak elde edilen veriler ise eğriler ile gösterilmiştir. Şekillerde gerilme artışına bağlı boşluk oranı değişimi ve permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı değişimi literatüre uygun şekilde belirlenmiştir.

Alibey yeşil kili üzerinde YTÜ laboratuvarlarında Rowe hücresi deney sisteminde gerçekleştirilen permeabilite deneylerinde (Tohumcu, 2001) elde edilen düşey permeabilite değerleri ve bu çalışmada yapılan kademeli yükleme ve permeabilite ölçümü deneylerinden elde edilen değerler Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekilde 5.7’de de görülebileceği gibi logaritmik eksenlerde çizilen boşluk oranı(e)-permeabilite katsayısı (k) grafiğinde değişim literatüre uygun ve farklı iki deney sisteminden elde edilen veriler kendi aralarında ve literatürdeki değerlere uyum göstermektedir.

5.4.3 Alibey Siyah Kili Sıkışabilirlik -Permeabilite İlişkileri

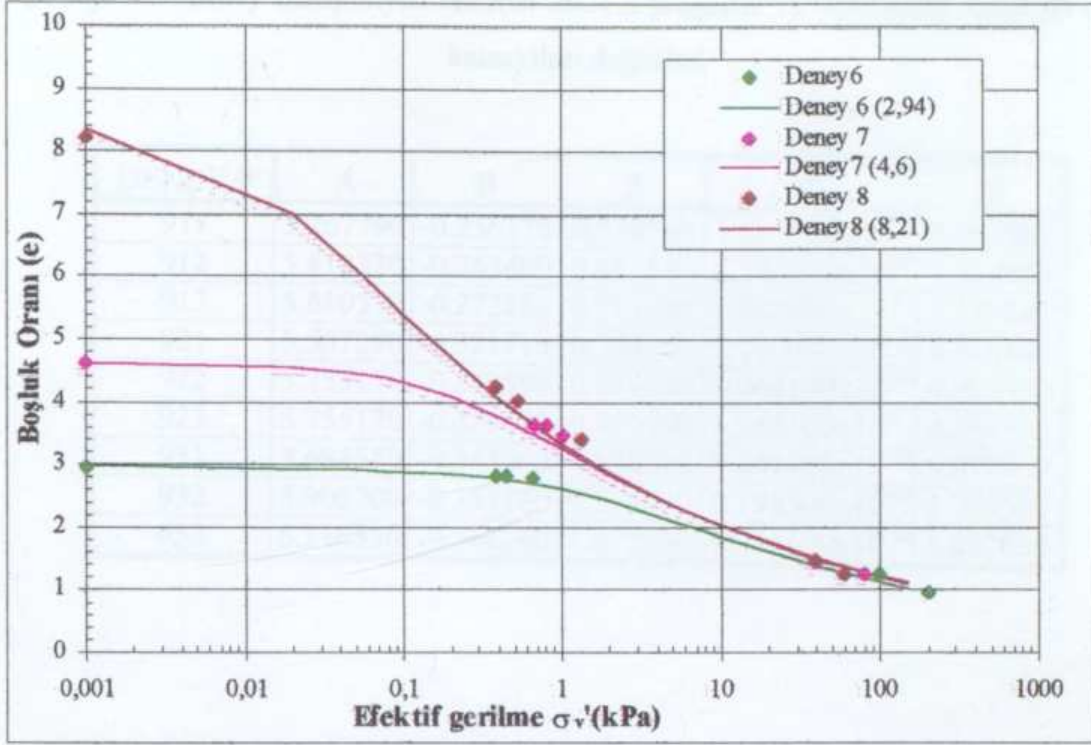
Alibey Barajı temel zemininden alınmış siyah kil numunesi üzerinde de laboratuarda üç ayrı başlangıç boşluk oranında sulu çamur örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış numunelerde gerçekleştirilen sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçlarından elde edilen veriler SICTA programı kullanılarak A,B,C,D ve Z ampirik parametrelerinin değerleri elde edilmiş ve bu veriler Çizelge 5.3’de verilmiştir. Alibey siyah kilinde uygulanan SEK deney sonuçları $(e)-(\sigma_v')$ grafiği Şekil 5.5’de, $(e)-(k)$ grafiği Şekil 5.6’da verilmiştir. Bu grafiklerde deney verileri noktalar şeklinde, parametreler yardımıyla eşitlikler kullanılarak elde edilen veriler ise eğriler ile gösterilmiştir. Şekillerde gerilme

Çizelge 5.2 Alibey Barajı yeşil kili için SICTA programı ile belirlenen A,B,C,D ve Z katsayıları değerleri

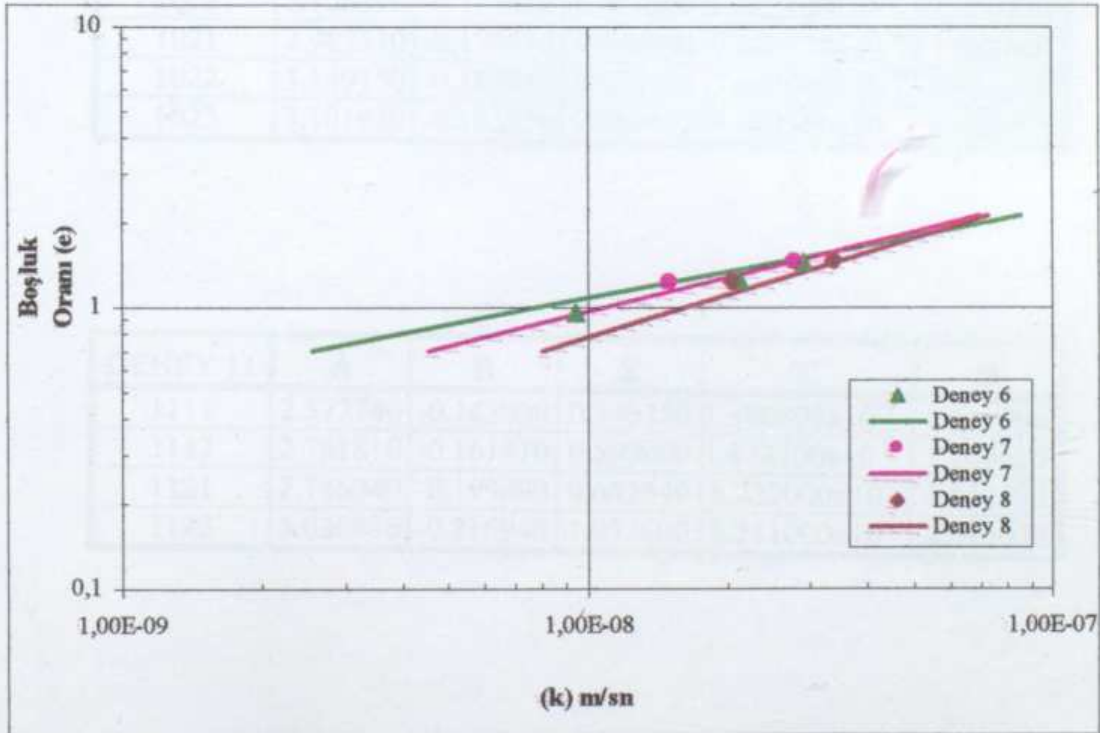
DENEY 6	A	B	Z	C	D
611	3.254610	-0.216870	1.590000	7.075000x10 ⁻⁹	3.796680
612	3.230700	-0.214960	1.550600	6.820000x10 ⁻⁹	3.895390
613	3.127160	-0.206490	1.348350	7.759800x10 ⁻⁹	3.548100
621	3.192410	-0.204340	1.496430	1.000000x10 ⁻⁸	3.463700
622	3.172900	-0.203030	1.455700	9.842800x10 ⁻⁹	3.540280
623	3.085650	-0.197070	1.278080	1.047300x10 ⁻⁸	3.253750
631	3.358280	-0.236350	1.755800	1.090000x10 ⁻⁸	3.373830
632	3.336180	-0.235120	1.712020	1.100000x10 ⁻⁸	3.432720
633	3.239540	-0.229620	1.525820	1.090000x10 ⁻⁸	3.214160

DENEY 7	A	B	Z	C	D
711	3.367020	-0.229860	0.257310	1.476500x10 ⁻⁸	1.754930
712	3.410550	-0.233300	0.277370	1.301400x10 ⁻⁸	2.102200
713	3.327050	-0.226650	0.239460	1.133400x10 ⁻⁸	2.480210
721	3.364580	-0.229470	0.255910	9.760000x10 ⁻⁹	2.075800
722	3.406720	-0.232300	0.274510	9.176500x10 ⁻⁹	2.373760
723	3.323410	-0.226680	0.238340	8.565300x10 ⁻⁹	2.706750

DENEY 8	A	B	Z	C	D
811	3.339710	-0.222430	0.017530	1.656400x10 ⁻⁸	1.866550
812	3.288240	-0.218230	0.015100	1.824000x10 ⁻⁹	1.616390
813	3.181460	-0.209280	0.010780	2.488600x10 ⁻⁸	0.810000
821	3.290960	-0.238370	0.021600	1.327800x10 ⁻⁸	2.018990
822	3.243870	-0.234860	0.019180	1.388000x10 ⁻⁸	1.812880
823	3.153740	-0.227980	0.015040	1.591400x10 ⁻⁸	1.177100



Şekil 5.3 Alibey Barajı yeşil kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) - efektif gerilme (σ_v') grafiği



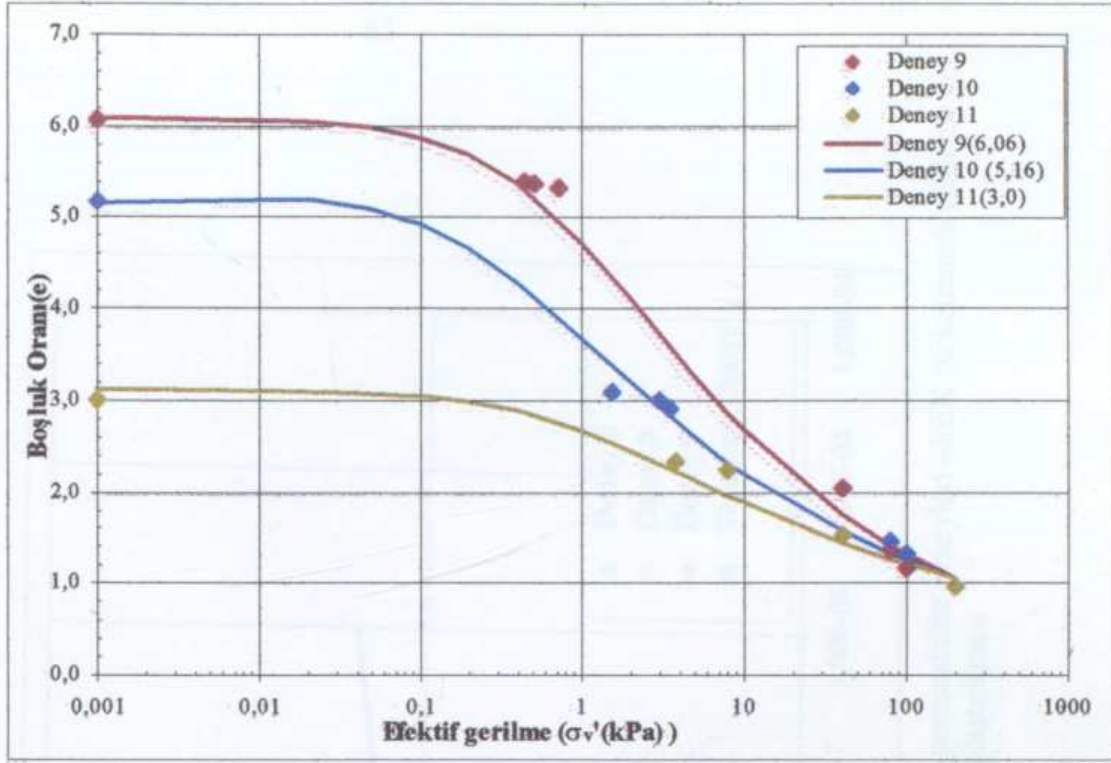
Şekil 5.4 Alibey Barajı yeşil kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) - permeabilite katsayısı k (m/sn) grafiği

Çizelge 5.3 Alibey Barajı siyah kili için SICTA programı ile belirlenen A,B,C,D ve Z katsayıları değerleri

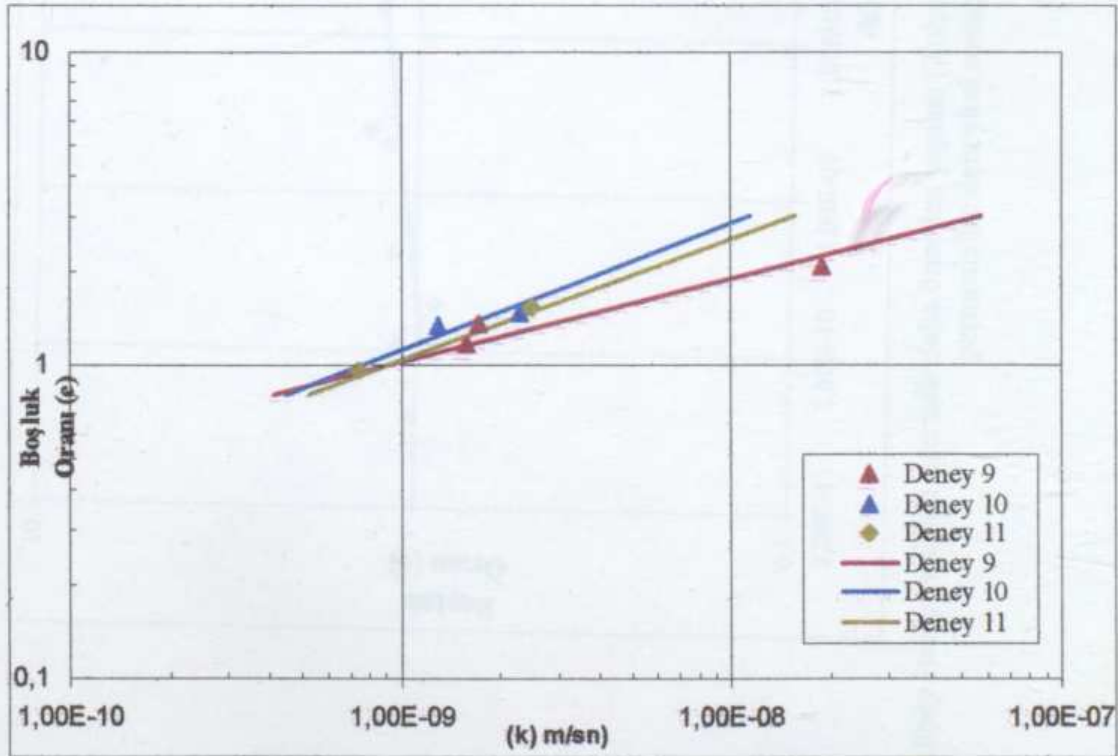
DENEY 9	A	B	Z	C	D
911	5.267790	-0.256170	0.578740	1.855500×10^{-9}	3.262900
912	5.413320	-0.263400	0.651540	1.790400×10^{-9}	3.312960
913	5.610570	-0.272880	0.753980	1.822000×10^{-9}	3.288849
921	5.557280	-0.321710	0.764000	5.110000×10^{-10}	4.028440
922	5.755170	-0.329590	0.855050	5.062100×10^{-10}	4.064950
923	5.755170	-0.329590	0.855050	5.062100×10^{-9}	4.064950
931	5.684550	-0.345060	0.830810	9.241700×10^{-10}	3.677460
932	5.906200	-0.353280	0.929820	9.198500×10^{-10}	3.709590
933	6.216550	-0.364260	1.072530	9.214500×10^{-10}	3.697630

DENEY 10	A	B	Z	C	D
1011	2.999850	-0.163700	0.036400	1.391000×10^{-9}	1.319290
1012	3.153050	-0.175050	0.059970	1.418500×10^{-9}	1.268020
1013	3.106390	-0.171650	0.052000	1.082900×10^{-9}	1.976250
1021	2.987510	-0.177510	0.046020	7.826100×10^{-10}	1.832890
1022	3.149150	-0.188940	0.073280	7.861000×10^{-10}	1.816720
1023	3.101620	-0.185650	0.064450	6.582300×10^{-10}	2.458010

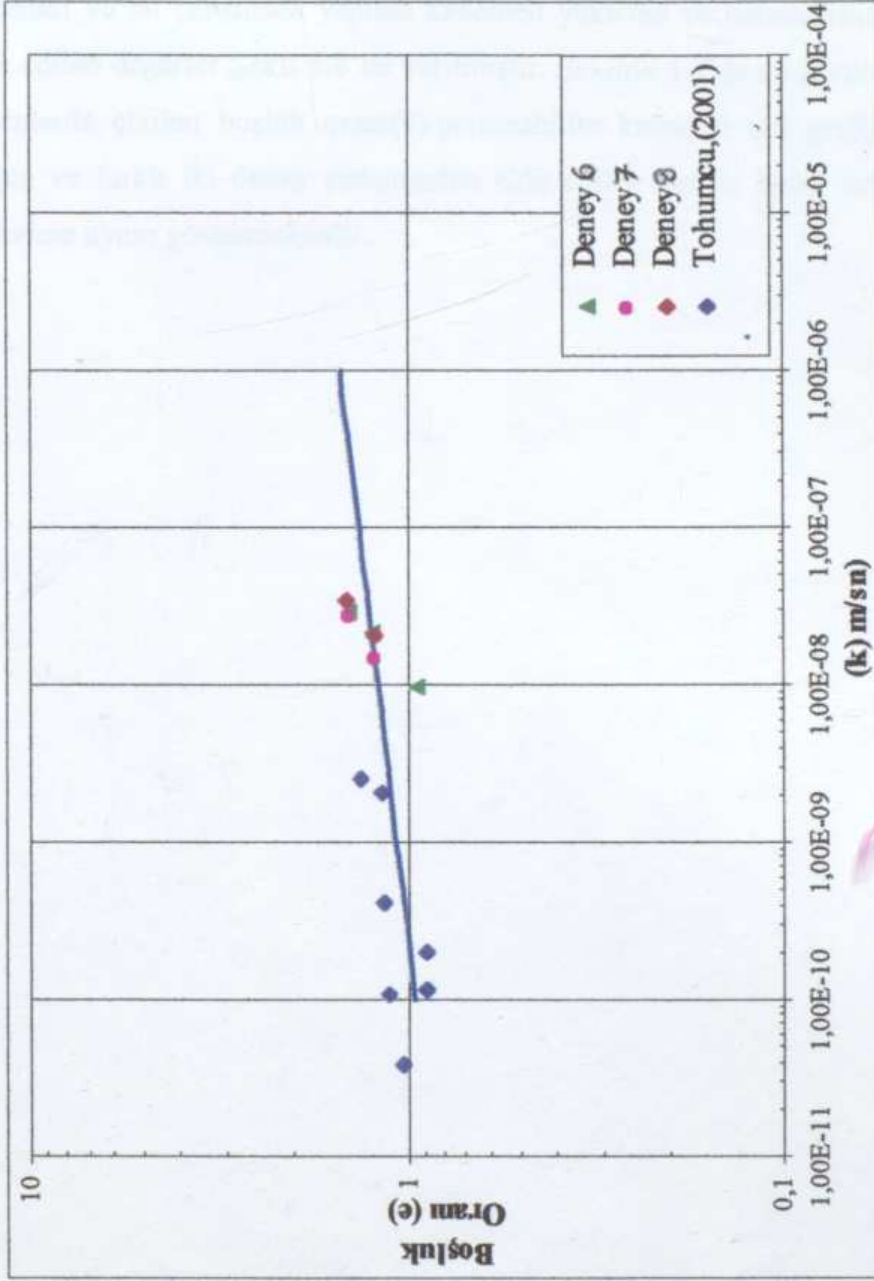
DENEY 11	A	B	Z	C	D
1111	2.577740	-0.143030	0.346250	1.380800×10^{-9}	1.419990
1112	2.761810	-0.161410	0.599000	1.472200×10^{-9}	1.266610
1121	2.746940	-0.199090	0.642340	8.222000×10^{-10}	2.042590
1122	3.020880	-0.216940	1.032000	8.211000×10^{-10}	2.015000



Şekil 5.5 Alibey Barajı siyah kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) - efektif gerilme (σ') grafiği



Şekil 5.6 Alibey Barajı siyah kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) - permeabilite katsayısı (k) grafiği

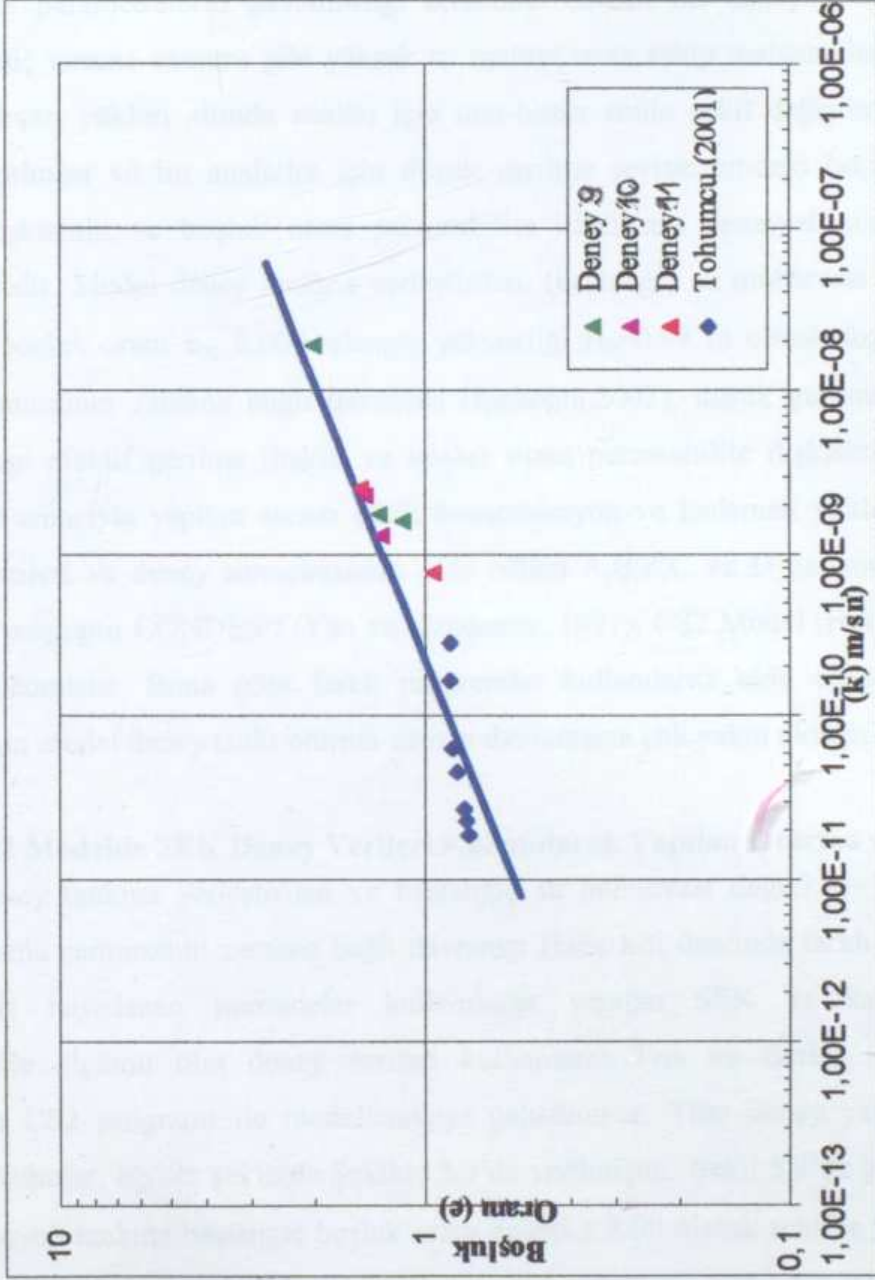


Şekil 5.7 Alibey Barajı yeşil kili üzerinde daha önceden yapılan (Tohumcu,2001) permeabilite deneyleri –SEK ve kademeli yükleme ve permeabilite deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması

artışına bağlı boşluk oranı değişimi ve permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı değişimi literatüre uygun şekilde belirlenmiştir.

Alibey siyah kili üzerinde YTÜ laboratuvarlarında Rowe hücresi deney sisteminde gerçekleştirilen permeabilite deneylerinde (Tohumcu,2001) elde edilen düşey permeabilite değerleri ve bu çalışmada yapılan kademeli yükleme ve permeabilite ölçümü deneylerinden elde edilen değerler Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekilde 5.8'de de görülebileceği gibi logaritmik eksenlerde çizilen boşluk oranı(e)-permeabilite katsayısı (k) grafiğinde değişim literatüre uygun ve farklı iki deney sisteminden elde edilen veriler kendi aralarında ve literatürdeki değerlere uyum göstermektedir.





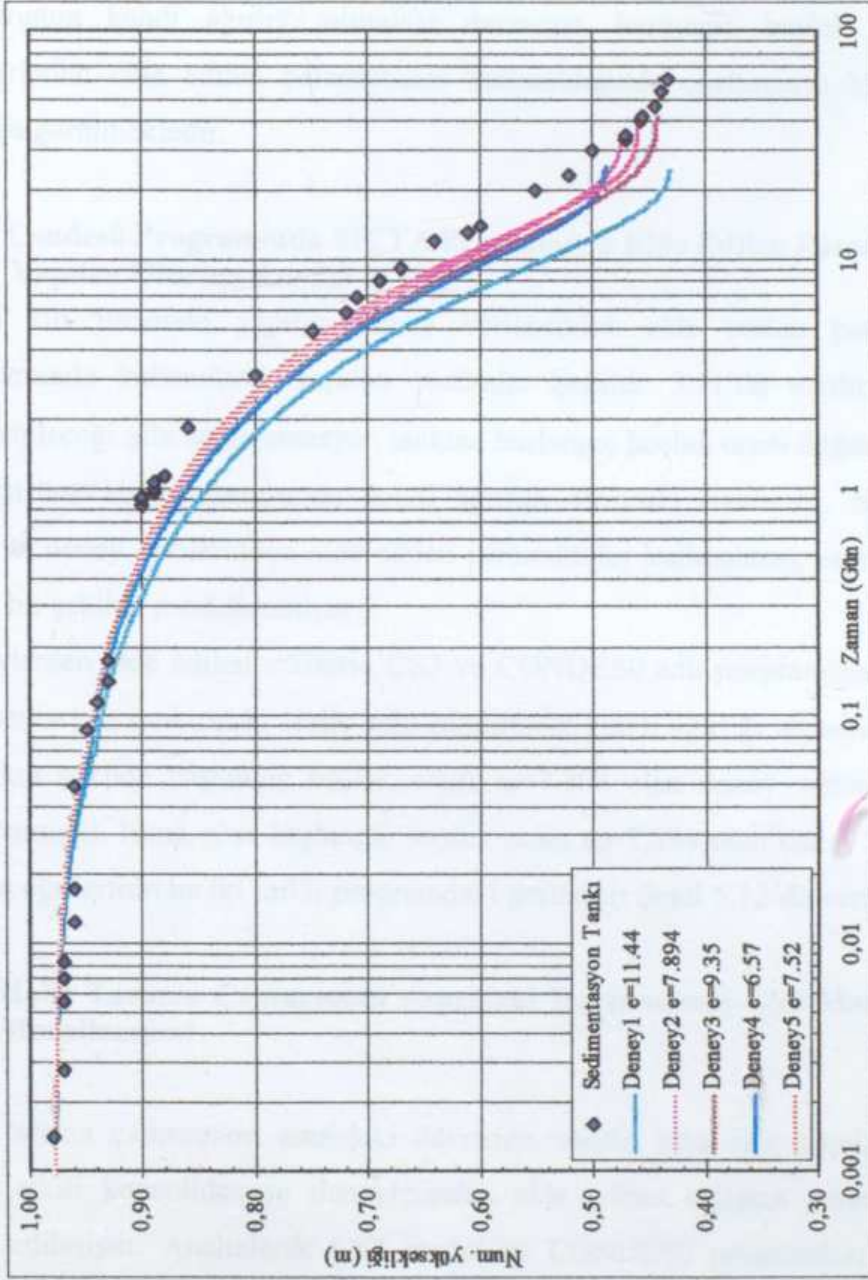
Şekil 5.8 Alibey Barajı siyah kili üzerinde daha önceden yapılan (Tohumcu, 2001) permeabilite deneyleri –SEK ve kademeli yükleme ve permeabilite deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması

5.5 Haliç Kilinde Sedimentasyon Tankı Oturma Analizi

Depolanan yüksek su muhtevasına sahip çamurun kendi ağırlığı altında konsolidasyonu sonucu meydana gelecek oturmaların doğru tahmin edilmesinde model deneyler yapılması ve sonuçlarının nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması, arazi davranışının tahmininde kullanılacak parametrelerin güvenilirliği açısından önemli bir deneyim sağlamıştır. Diğer yandan Haliç tarama çamuru gibi yüksek su muhtevasına sahip malzemelerin kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altında analizi için non-lineer sonlu şekil değiştirme (finite strain) analizi yapılması ve bu analizler için düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı efektif gerilme ilişkisinin ve boşluk oranı permeabilite ilişkisinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Model deney tankına yerleştirilen, (başlangıç su muhtevası değeri $w=300\%$, başlangıç boşluk oranı $e_0=8.00$, başlangıç yüksekliği $H_0=0.98$ m olmak üzere) Haliç dipsel tarama çamurunun zamana bağlı davranışı (İpekoğlu,2002), düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı efektif gerilme ilişkisi ve boşluk oranı permeabilite ilişkisini deneysel olarak belirlenme amacıyla yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü verileri ve deney sonuçlarından elde edilen A,B,Z,C ve D parametreleri, iki farklı bilgisayar programı CONDES0 (Yao ve Znidarcic, 1997); CS2 Model (Fox ve Berles, 1997) ile modellenmiştir. Buna göre farklı programlar kullanılarak elde edilen oturma-zaman davranışının model deney tankı oturma-zaman davranışına çok yakın olduğu belirlenmiştir.

5.5.1 CS2 Modelde SEK Deney Verileri Kullanılarak Yapılan Oturma Analizi

Model deney tankına yerleştirilen ve başlangıç su muhtevası değeri $w=300\%$ olan Haliç dipsel tarama çamurunun zamana bağlı davranışı Haliç kili üzerinde farklı başlangıç boşluk oranlarında hazırlanan numuneler kullanılarak yapılan SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü tüm deney verileri kullanılarak Fox ve Berles (1997) tarafından hazırlanan CS2 programı ile modellenmeye çalışılmıştır. Tüm deney verileri kullanılarak yapılan çözümler, eğriler şeklinde Şekilde 5.9'da verilmiştir. Şekil 5.9'de görülebileceği gibi sedimentasyon tankına başlangıç boşluk oranı değeri $e_0=8.00$ olacak şekilde yerleştirilen Haliç çamurunun davranışı, başlangıç boşluk oranı yine $e_0=8-9$ arasında değişen deney sonuçları kullanılarak gerçeğe yakın bir şekilde modellenmiştir.



Şekil 5.9 Sedimentasyon tankı oturma davranışının CS2 programında SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verileri kullanılarak modellenmesi

5.5.2 CS2 Modelde SICTA Programıyla Elde Edilen Parametreler Kullanılarak Yapılan Oturma Analizi

Haliç kili üzerinde yapılan deney verilerinden elde edilen parametreler CS2 programında kullanılarak yapılan çözümler Şekilde 5.10'da verilmiştir. Şekilde 5.10'da görülebileceği gibi sedimentasyon tankına başlangıç boşluk oranı değeri $\cong 8.00$ olacak şekilde yerleştirilen Haliç çamurunun kendi ağırlığı altındaki davranışı, başlangıç boşluk oranı $e=7.894$ deney verilerinden elde edilen parametreler kullanıldığında çözümlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

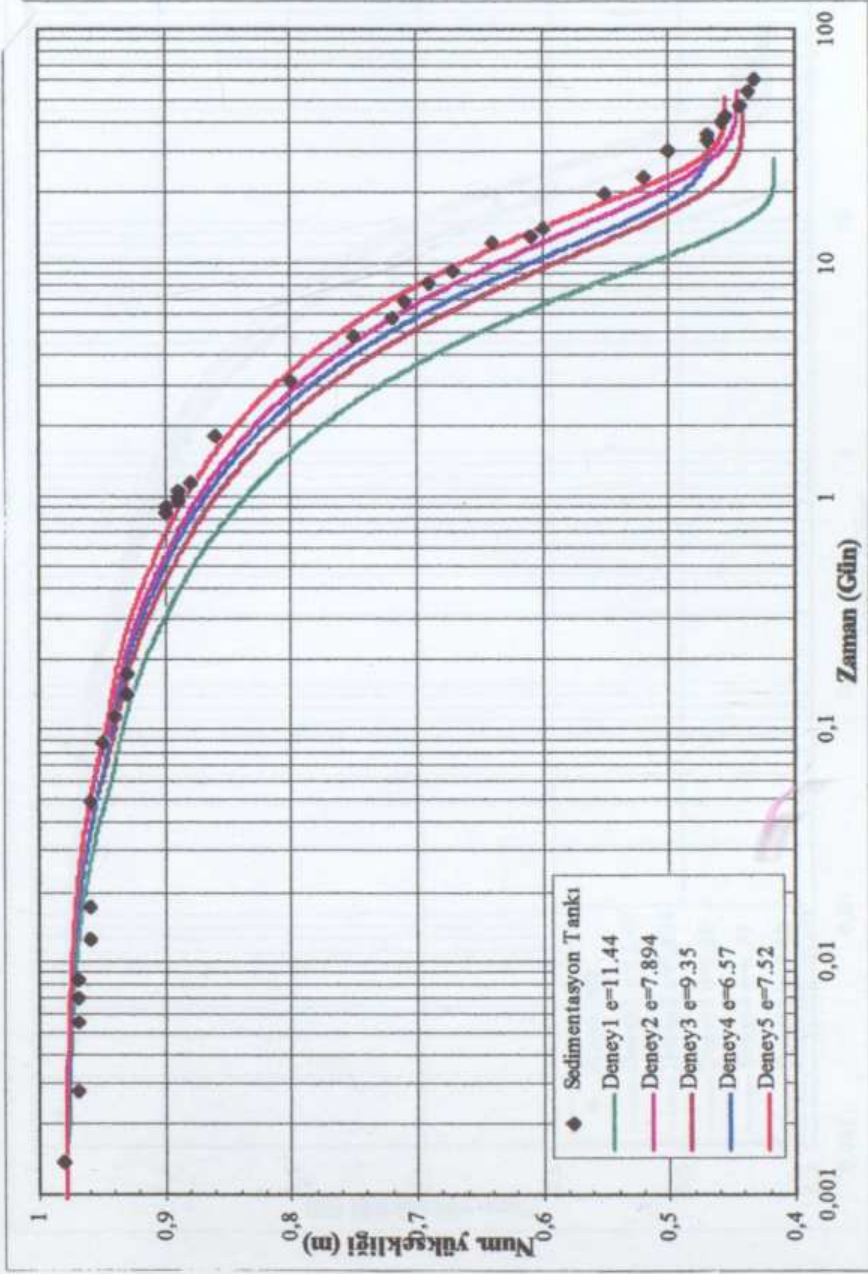
5.5.3 Condes0 Programında SICTA Programıyla Elde Edilen Parametreler Kullanılarak Yapılan Oturma Analizi

Haliç kili üzerinde yapılan deney verilerinden elde edilen parametreler CONDES0 programında kullanılarak yapılan çözümler Şekilde 5.11'de verilmiştir. Şekilde 5.11'de görülebileceği gibi sedimentasyon tankına başlangıç boşluk oranı değeri $\cong 8.00$ olacak şekilde yerleştirilen Haliç çamurunun kendi ağırlığı altındaki davranışı, başlangıç boşluk oranı $e=7.894$ deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak yapılan çözüm ile gerçeğe yakın bir şekilde modellenmiştir.

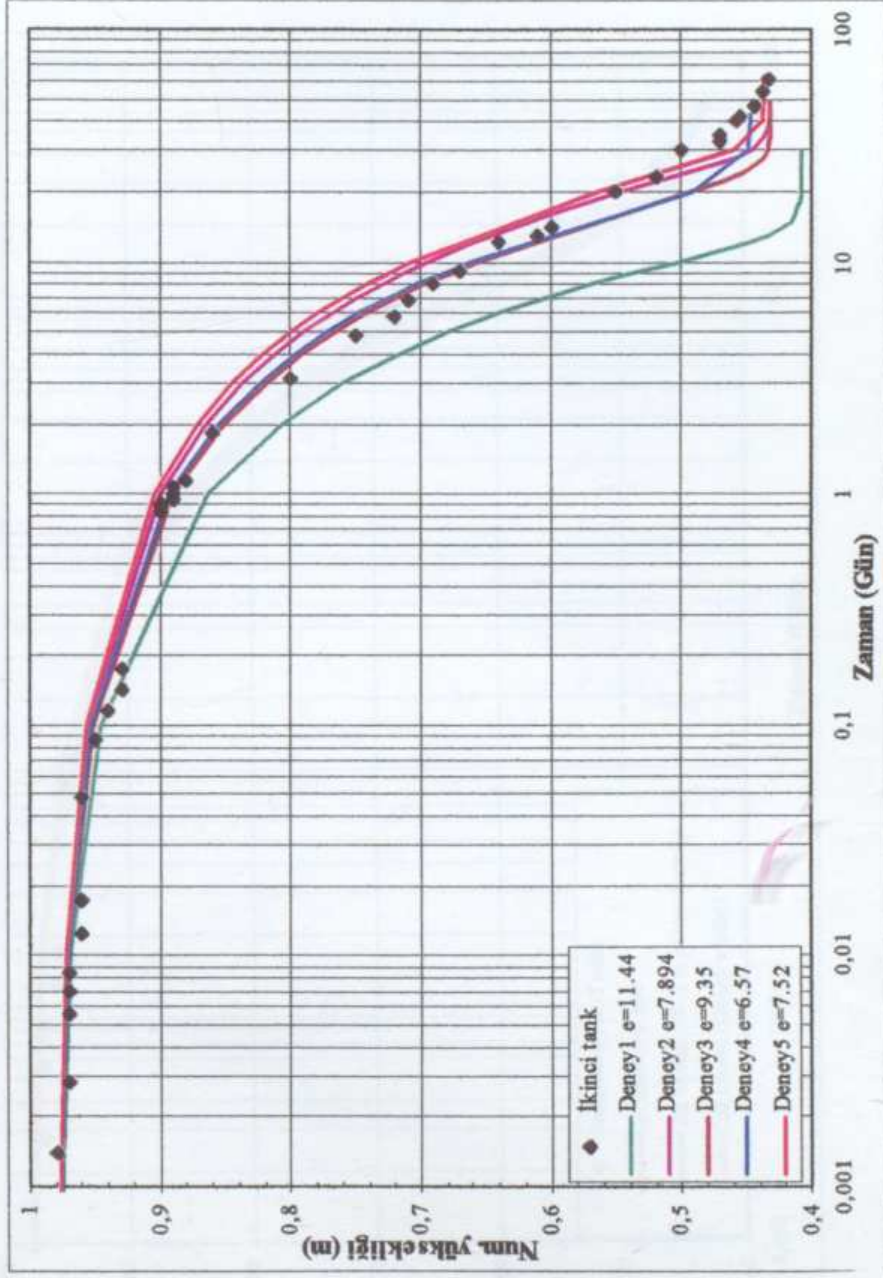
Deneylerden elde edilen verilerin CS2 ve CONDES0 adlı programlarda yapılan analizlerde; sedimentasyon tankındaki Haliç sulu çamurunun kendi ağırlığı altındaki davranışını doğruya en yakın şekilde başlangıç boşluk oranı $e_0=7.894$ olan deney verisinden elde edilebildiği belirlenmiştir. Buna göre başlangıç boşluk oranı $e_0=7.894$ olan deney verisinden elde edilen oturma eğrilerinin bu iki farklı programdaki grafikleri Şekil 5.12'de verilmiştir.

5.5.4 Haliç Tarama Çamurunun Arazideki Davranışının CS2 Model ve CONDES0 ile Modellenmesi

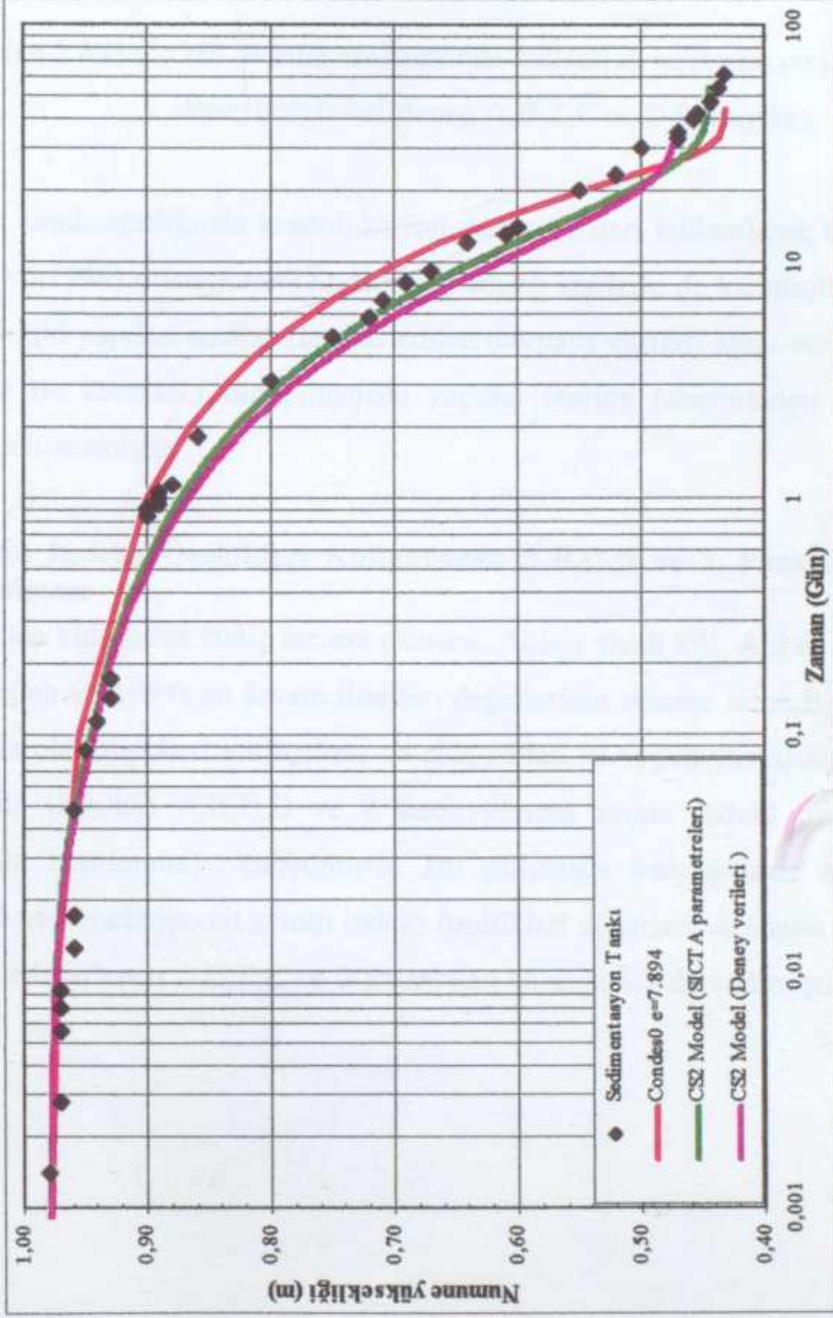
Haliç tarama çamurunun arazideki davranışı, model tank için yapılanlara benzer şekilde sızıntı etkili konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma parametreleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde CS2 model ve CONDES0 programları kullanılmıştır. Haliç tarama çamurunun depolandığı Alibeyköy' deki sahada başlangıç yüksekliği 73 m olup başlangıç su muhtevası %300'dir. Analizlerde, malzeme bünye ilişkilerini veren (2.7) ve (2.16) bağıntıları için gerekli malzeme katsayıları Çizelge (5.4)'de verilmiştir. Bu malzeme katsayıları sızıntı etkili konsolidasyon deneylerinden belirlenmiş olup yukarıda açıklandığı gibi model tank analizlerinde de kullanılmıştır. İki farklı çözüm yöntemine göre yapılan analizlerden elde edilen oturma-zaman değişim Şekil 5.13'de verilmiştir. CS2 model ve Condes0 programlarında yapılan oturma davranışı analizler ayrıca, Haliç tarama çamurunda



Şekil 5.10 Sedimentasyon tankı oturma davranışının CS2 programında SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak modellenmesi



Şekil 5.11 Sedimentasyon tankı oturma davranışının CONDES0 programında SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak modellenmesinin karşılaştırılması



Şekil 5.12 Sedimentasyon tankı oturma davranışının $e_0=7.894$ SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verileri ve deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak CS2 ve CONDES0 programlarıyla modellenmesi

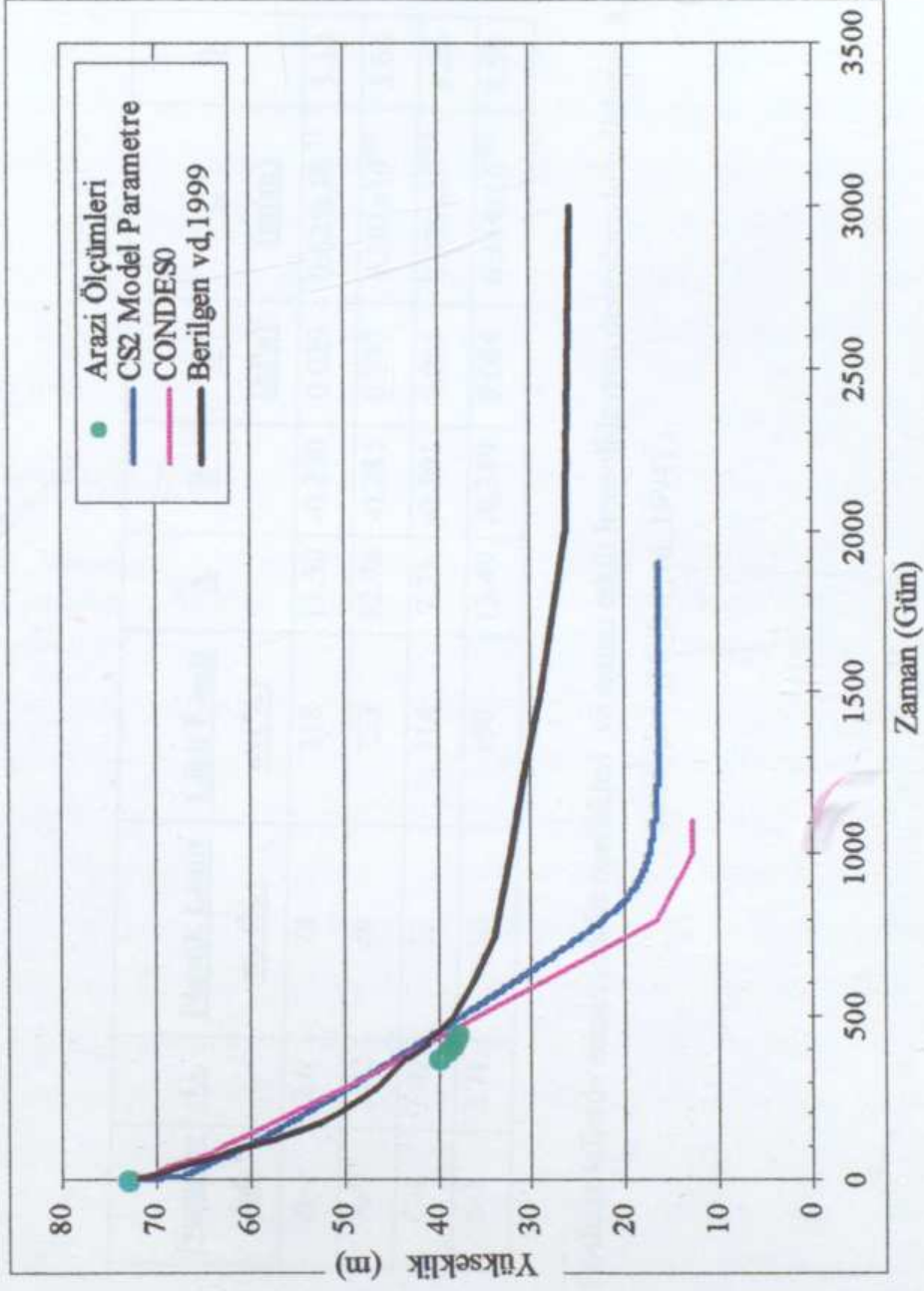
<u>Numune</u> <u>Adı</u>	<u>G_s</u>	<u>Plastik Limit</u> <u>w_p (%)</u>	<u>Likit Limit</u> <u>w_L (%)</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>Z</u> <u>(kPa)</u>	<u>C</u> <u>(m/sn)</u>	<u>D</u>
Haliç	2.71	50	75	2.33	-0.29	0.010	4.76x10 ⁻⁸	2.00

Çizelge 5.4 Haliç kili oturma analizlerinde kullanılan ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleriyle belirlenen A,B,Z,C ve D katsayıları

daha önce kendi ağırlığında konsolidasyon deney verileri kullanılarak CS2 modelde yapılan (Berilgen vd,1999) oturma analizinden elde edilen verilerle de karşılaştırılmıştır. Grafikte de görüldüğü gibi yapılan analizlerle elde edilen davranış eğrileri arazi verileriyle uyumlu olup, daha önce bu konudaki bir çalışmada yapılan oturma tahmininden daha büyük oturma değerleri belirlenmiştir.

5.6 Zemin İndeks Özellikleri Kullanılarak A,B,C,D ve Z Parametre Tahminlerinin Yapılması

Bu çalışmada kullanılan Haliç tarama çamuru, Alibey siyah kili, Alibey yeşil kili ile fosfatik killere (Hejleh vd,1994) ait kıvam limitleri değerlerinin zemine ait A,B,C,D ve Z katsayıları değerleriyle olan ilişkileri araştırılmış ve elde edilen en uygun yaklaşımlarla sıkışabilirlik ve permeabilite ilişkileri A,B,C,D ve Z katsayılarının zemin indeks özelliklerinden tahmin edilmesi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırma amacı ile kullanılan fosfatik kil numunelerine ait zemin indeks özellikleri değerleri ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleriyle belirlenen A,B,Z,C ve D katsayıları Çizelge 5.5’de verilmiştir (Hejleh, vd.,1994).



Şekil 5.13 Haliç tarama çamurunda (zemin indeks özellikleri yardımı ile belirlenen tahmin parametreleri CONDES0 ve CS2 modellerinde kullanılarak) oturma analizlerinin arazi ölçümleriyle karşılaştırılması

<u>Numune Adı</u>	<u>G_s</u>	<u>Plastik Limit w_p(%)</u>	<u>Likit Limit w_L(%)</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>Z (kPa)</u>	<u>C (m/sn)</u>	<u>D</u>
A-1	2.6	74	318	11.50	-0.230	0.029	0.625x10 ⁻¹¹	3.14
A-9	2.82	49	233	12.74	-0.285	0.277	0.361x10 ⁻¹¹	3.64
C-1	2.92	33	114	7.75	-0.191	0.065	0.429x10 ⁻¹¹	4.26
S-1	2.71	50	198	13.49	-0.319	0.064	0.384x10 ⁻¹¹	3.50

Çizelge 5.5 Fosfatik killerde zemin indeks özellikleri ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleriyle belirlenen A,B,Z,C ve D katsayıları (Hejleh ,vd.,1994)

5.6.1 A Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_c), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması

Boşluk oranının efektif gerilmeye bağlı değişimini (2.7) eşitliğinde tanımlayan ve sızıntı etkili konsolidasyon deney verileri kullanılarak elde edilen A katsayısının relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimini veren grafikler sırayla Şekil 5.14, Şekil 5.16 ve Şekil 5.18'de verilmiştir. Ayrıca A parametresinin başlangıç boşluk oranına göre normalize edilmesiyle elde edilen $A/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimi de araştırılmış ve elde edilen grafikler 5.15, Şekil 5.17 ve Şekil 5.19'de verilmiştir. Tüm bu grafikler incelendiğinde A ve $A/(1+e_0)$ değerlerinin relatif konsistans (I_c) ve likidite indisine bağlı değişimlerin (I_L) düzgün bir eğrisel yaklaşım göstermedikleri bunun yanı sıra A katsayısının plastisite indisine bağlı (I_p) değişiminin Şekil 5.18'de görülebileceği gibi üstel bir fonksiyon olarak,

$$A = 0.27I_p^{0.73} \quad (5.33)$$

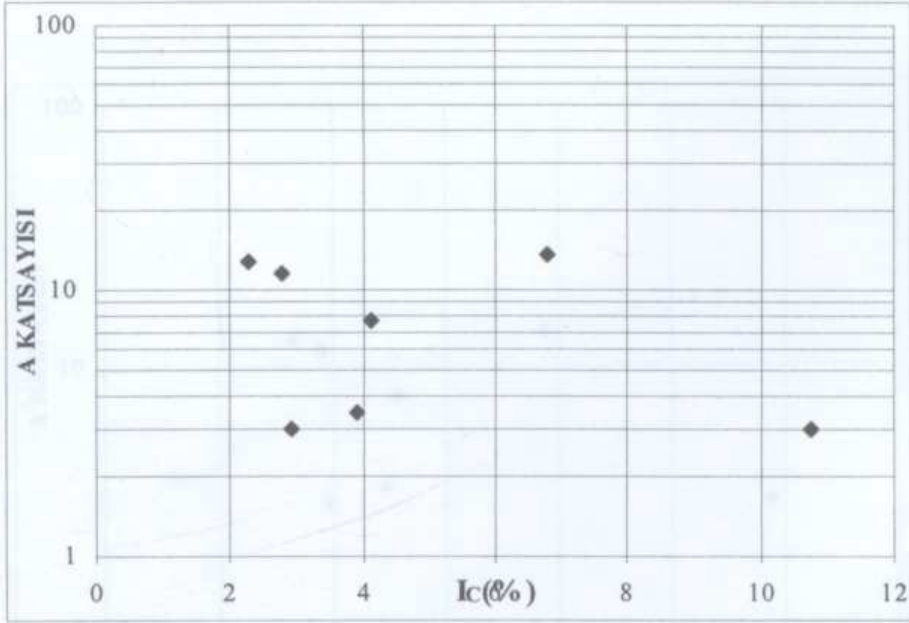
eşitliği ile ifade edilebileceği belirlenmiştir.

5.6.2 B Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_c), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması

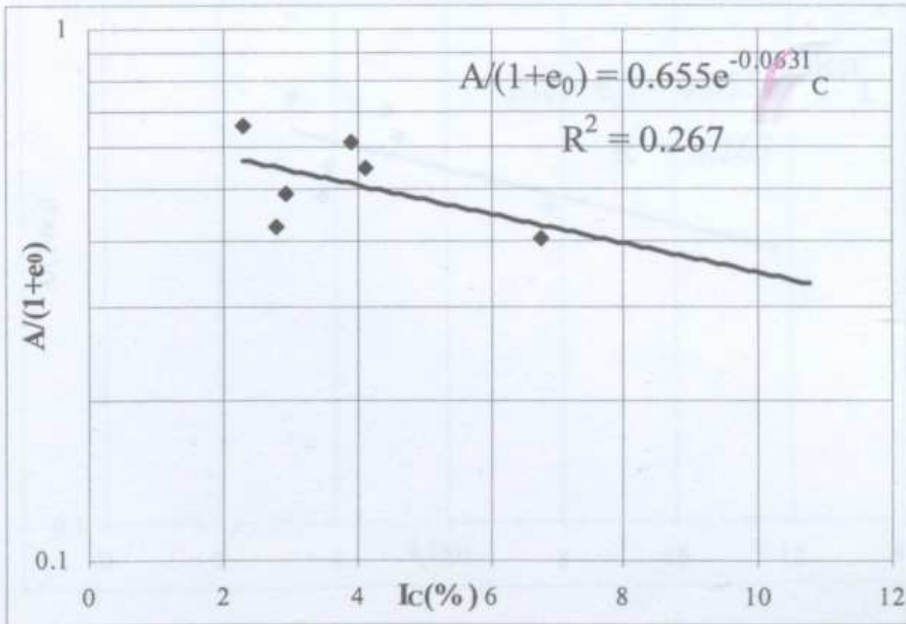
Boşluk oranının efektif gerilmeye bağlı değişimini (2.7) eşitliğinde tanımlayan ve sızıntı etkili konsolidasyon deney verileri kullanılarak elde edilen B katsayısının relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimini veren grafikler sırayla Şekil 5.20, Şekil 5.22 ve Şekil 5.24'de verilmiştir. Ayrıca B parametresinin başlangıç boşluk oranına göre normalize edilmesiyle elde edilen $B/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimi de araştırılmış ve elde edilen grafikler 5.21, Şekil 5.23 ve Şekil 5.25'de verilmiştir. Tüm bu grafikler incelendiğinde B katsayısının değerinin 0.15-0.35 gibi dar aralıkta değiştiği belirlenmiş ve relatif konsistans (I_c) ve likidite indisine bağlı değişimlerin (I_L) bir eğrisel yaklaşıma uygun davrandıkları görülmüştür. Ancak bu yaklaşımların genel bir ifade olarak verilebilmesi için genel bir eğilim belirlenmiş olmasına rağmen, farklı kil zeminler üzerinde yapılmış çok sayıda deneysel veriye ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte deneysel verilerden elde edilen $B/(1+e_0)$ değerinin de plastisite indisine bağlı (I_p) değişiminin düzgün bir eğrisel yaklaşım gösterdiği ve Şekil 5.25'deki grafikte de görülebileceği gibi üstel bir fonksiyon olarak,

$$\frac{B}{1+e_0} = 0.32I_p^{-0.66} \quad (5.34)$$

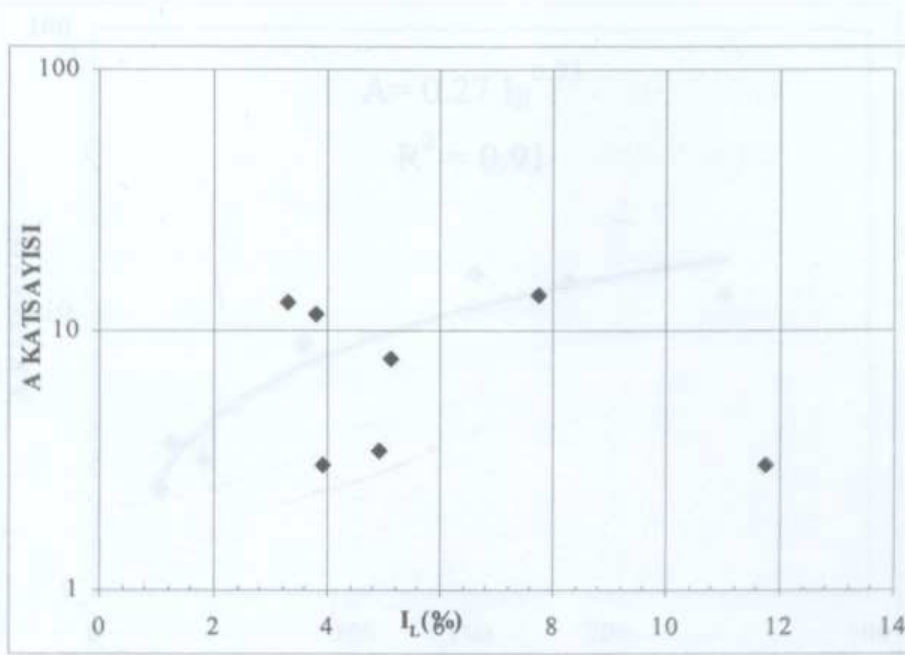
eşitliği ile ifade edilebileceği belirlenmiştir.



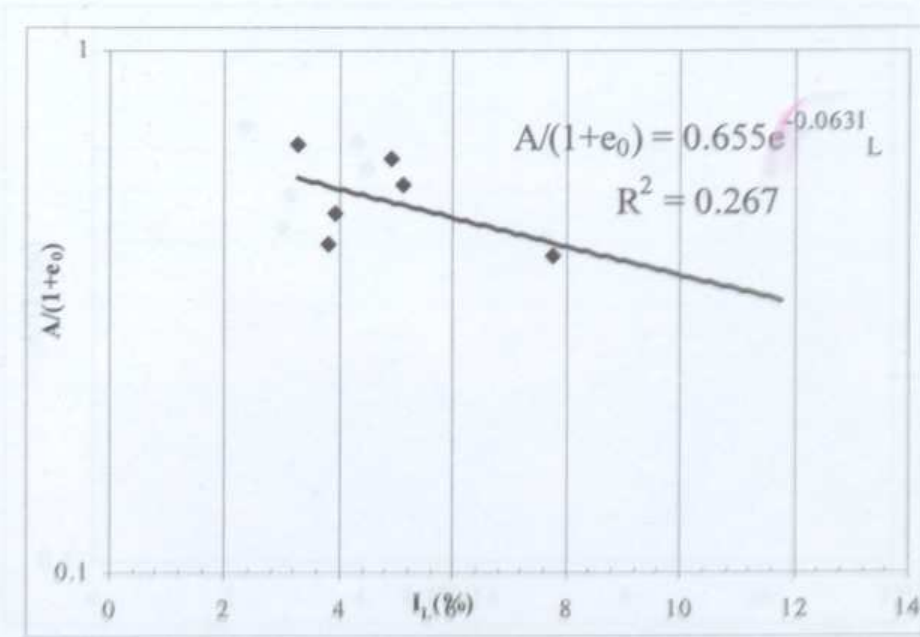
Şekil 5.14 A Katsayısınının relatif konsistans (I_c)değerine bağlı değişimi grafiği



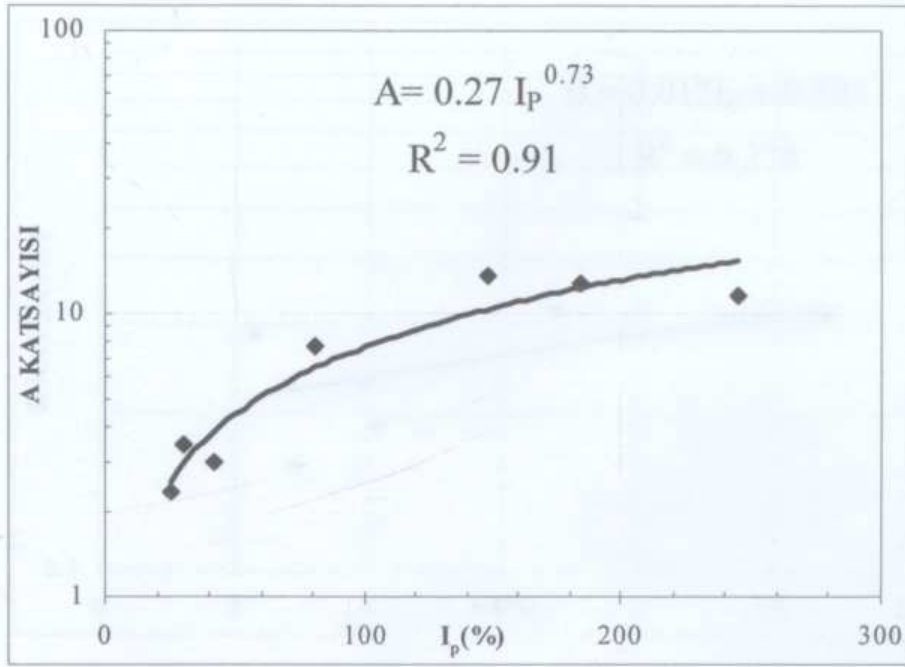
Şekil 5.15 $A/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c)değerine bağlı değişimi grafiği



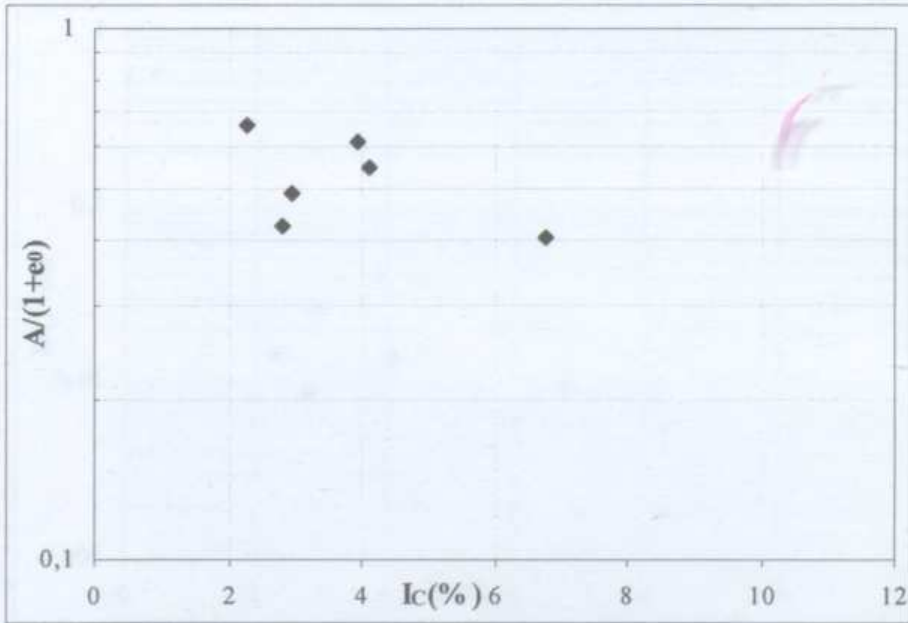
Şekil 5.16 A Katsayısının likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



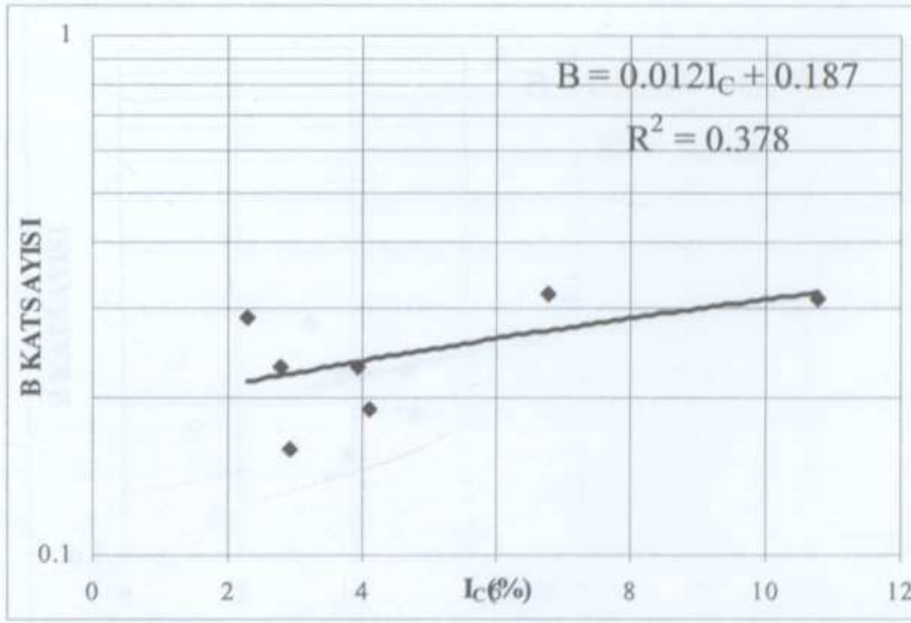
Şekil 5.17 $A/(1+e_0)$ değerinin likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



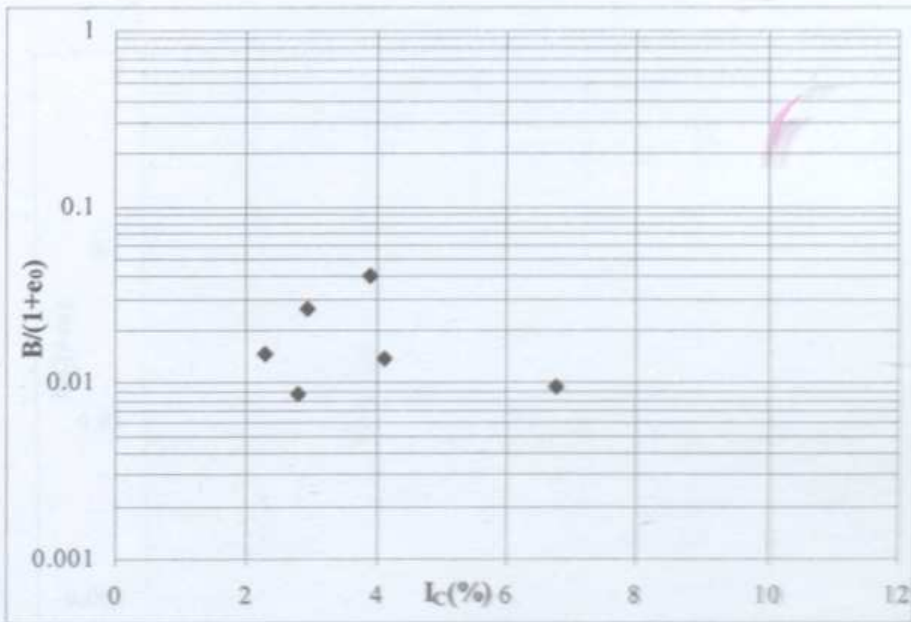
Şekil 5.18 A Katsayısının plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



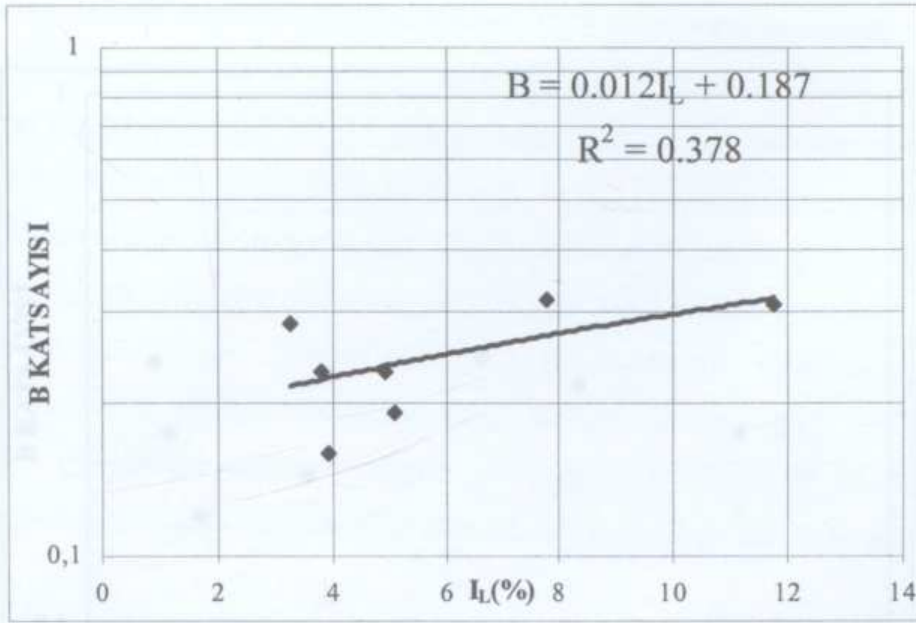
Şekil 5.19 $A/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.20 B Katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği

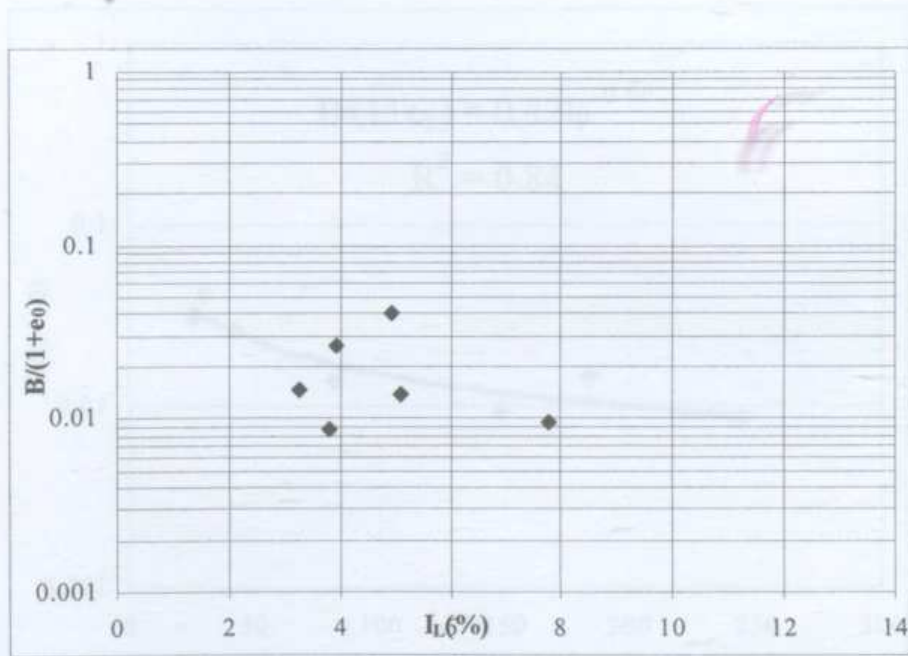


Şekil 5.21 $B/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.22 B Katsayısının likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği

Şekil 5.24 B Katsayısının piyasa faizi (i_0) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.23 $B/(1+i_0)$ değerinin likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği

5.4.3 Z Parametresi Tabiriyle Relatif Konsantrasyon (I_c), Likitite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması

Bu grafikte, büyük oranda çabuk gerilmeye bağlı değişimini (1.7) açıklar. Bu durumda, e_0 değeri büyük

konanlar için, I_p değeri büyük olur ve I_c değeri küçük olur. Bu durumda, I_c değeri küçük olur.

likitite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerleri aynı değere sahip olabilir. Bu durumda,

Şekil 5.26 Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de verilmektedir. Aynı Z parametresi değeri için, büyük

oranda çabuk gerilmeye bağlı olarak, I_c değeri büyük olur ve I_L değeri küçük olur.

likitite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerleri aynı değere sahip olabilir. Bu durumda,

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'de verilmektedir. Aynı Z parametresi değeri için, büyük

oranda çabuk gerilmeye bağlı olarak, I_c değeri büyük olur ve I_L değeri küçük olur.

likitite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerleri aynı değere sahip olabilir. Bu durumda,

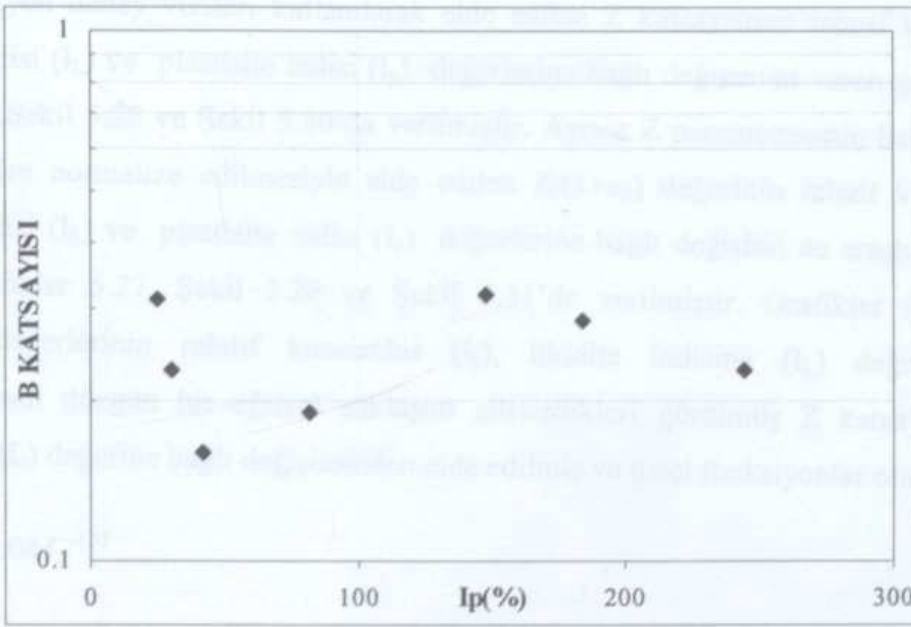
Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de verilmektedir. Aynı Z parametresi değeri için, büyük

oranda çabuk gerilmeye bağlı olarak, I_c değeri büyük olur ve I_L değeri küçük olur.

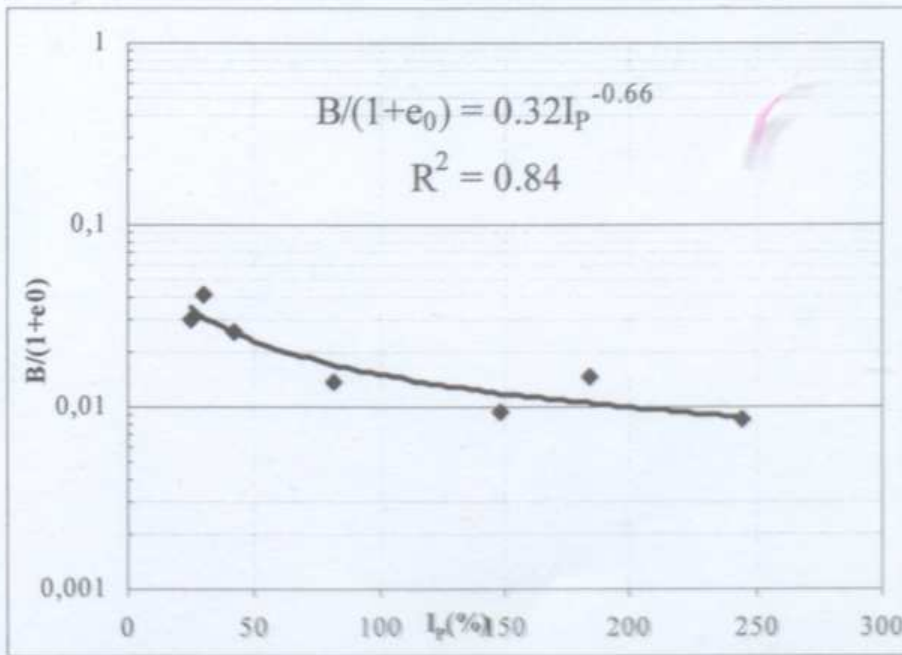
likitite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerleri aynı değere sahip olabilir. Bu durumda,

Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'de verilmektedir. Aynı Z parametresi değeri için, büyük

oranda çabuk gerilmeye bağlı olarak, I_c değeri büyük olur ve I_L değeri küçük olur.



Şekil 5.24 B Katsayısının plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.25 $B/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği

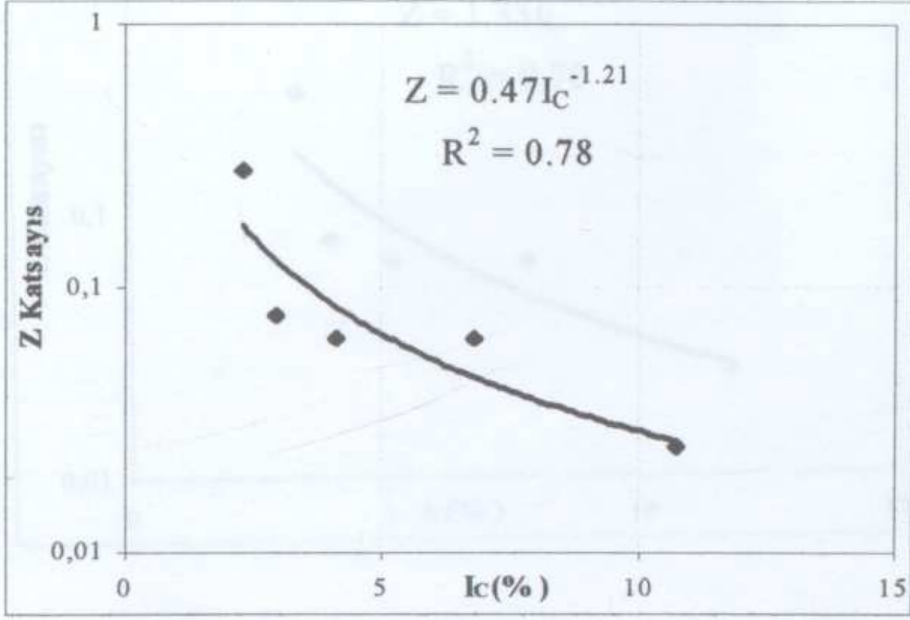
5.6.3 Z Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_c), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması

Boşluk oranının efektif gerilmeye bağlı değişimini (2.7) eşitliğinde tanımlayan ve sızıntı etkili konsolidasyon deney verileri kullanılarak elde edilen Z katsayısının relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimini veren grafikler sırayla Şekil 5.26, Şekil 5.28 ve Şekil 5.30'da verilmiştir. Ayrıca Z parametresinin başlangıç boşluk oranına göre normalize edilmesiyle elde edilen $Z/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimi de araştırılmış ve elde edilen grafikler 5.27, Şekil 5.26 ve Şekil 5.31'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde $Z/(1+e_0)$ değerlerinin relatif konsistans (I_c), likidite indisine (I_L) değerlerine bağlı değişimlerinin düzgün bir eğrisel yaklaşım gösterdikleri görülmüş Z katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişiminden elde edilmiş ve üstel fonksiyonlar olarak,

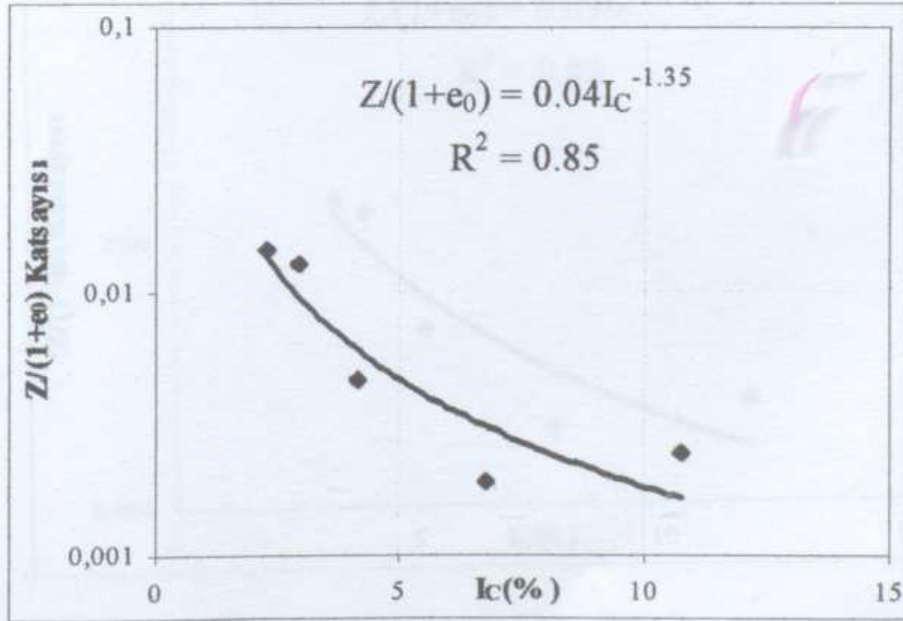
$$\frac{Z}{(1+e_0)} = 0.04I_c^{-1.35} \quad (5.35)$$

$$\frac{Z}{(1+e_0)} = 0.09I_L^{-1.62} \quad (5.36)$$

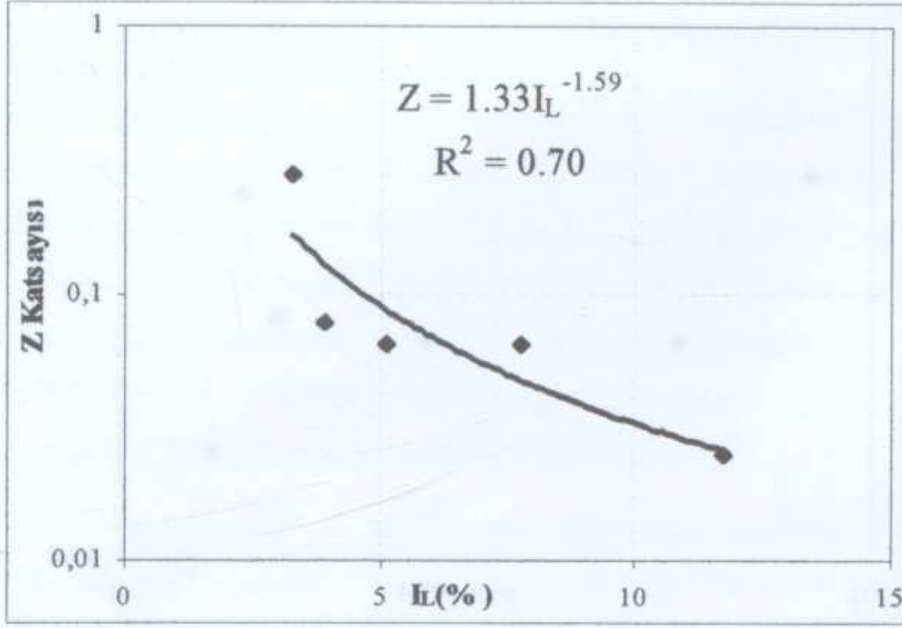
eşitlikleri ile ifade edilebileceği belirlenmiştir.



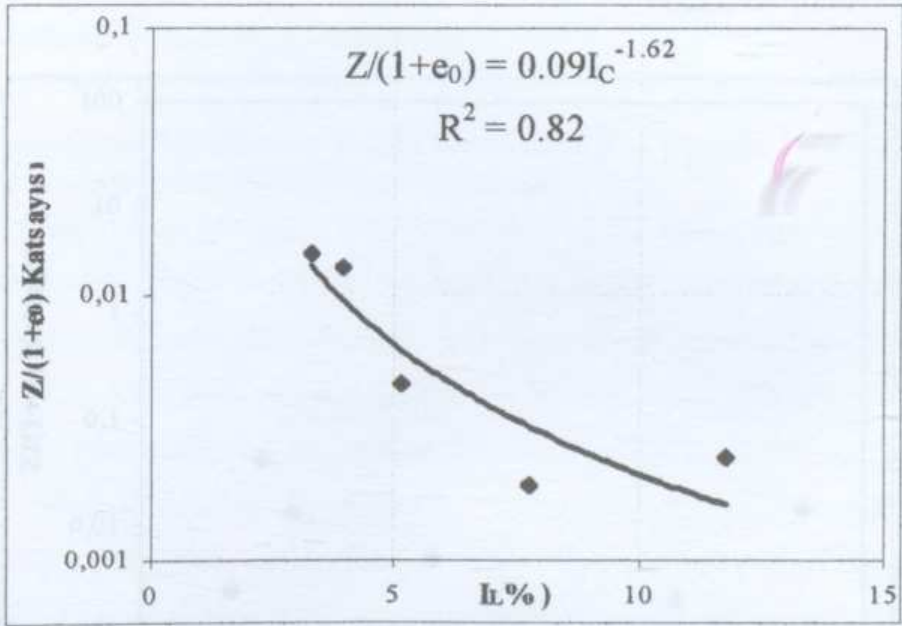
Şekil 5.26 Z Katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



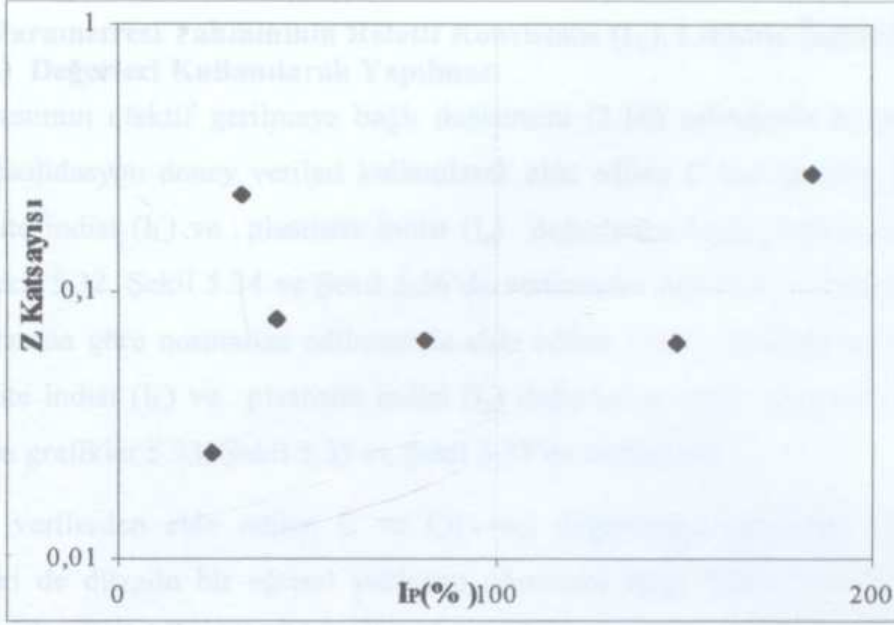
Şekil 5.27 $Z/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



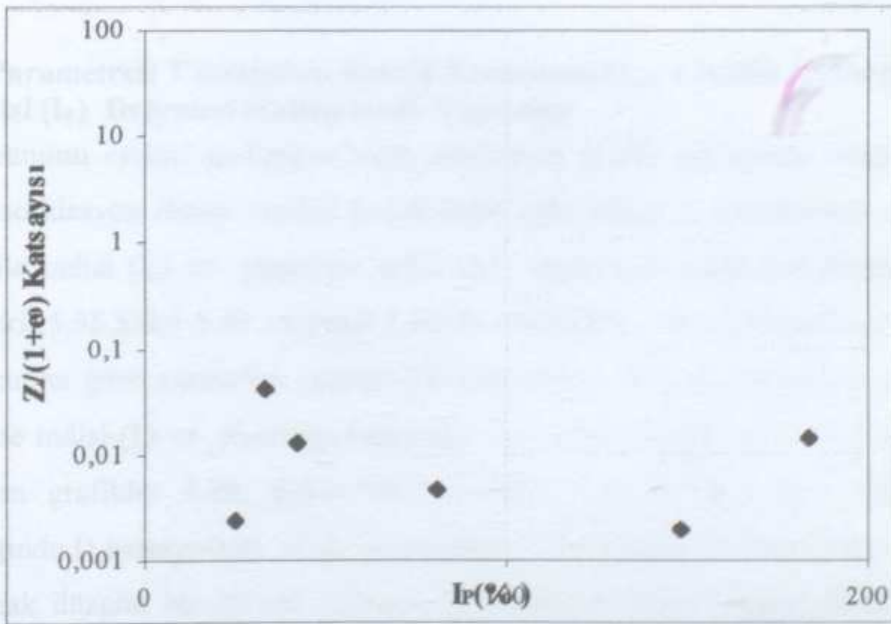
Şekil 5.28 Z Katsayısının likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.29 $Z/(1+e_0)$ değerinin likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.29 Z katsayısının plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.30 $Z/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği

5.6.4 C Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_c), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması

Boşluk oranının efektif gerilmeye bağlı değişimini (2.16) eşitliğinde tanımlayan ve sızıntı etkili konsolidasyon deney verileri kullanılarak elde edilen C katsayısının relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimini veren grafikler sırayla Şekil 5.32, Şekil 5.34 ve Şekil 5.36'da verilmiştir. Ayrıca C parametresinin başlangıç boşluk oranına göre normalize edilmesiyle elde edilen $C/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimi de araştırılmış ve elde edilen grafikler 5.33, Şekil 5.35 ve Şekil 5.37'de verilmiştir.

Deneysel verilerden elde edilen C ve $C/(1+e_0)$ değerlerinin plastisite indisine bağlı (I_p) değişimleri de düzgün bir eğrisel yaklaşım göstermiş olup, Şekil 5.36 ve 5.37'de verilen grafiklerde de görülebileceği gibi üstel fonksiyonlar olarak,

$$C = 0.01I_p^{-4.15} \quad (5.37)$$

$$\frac{C}{1+e_0} = 0.0042I_p^{-4.58} \quad (5.38)$$

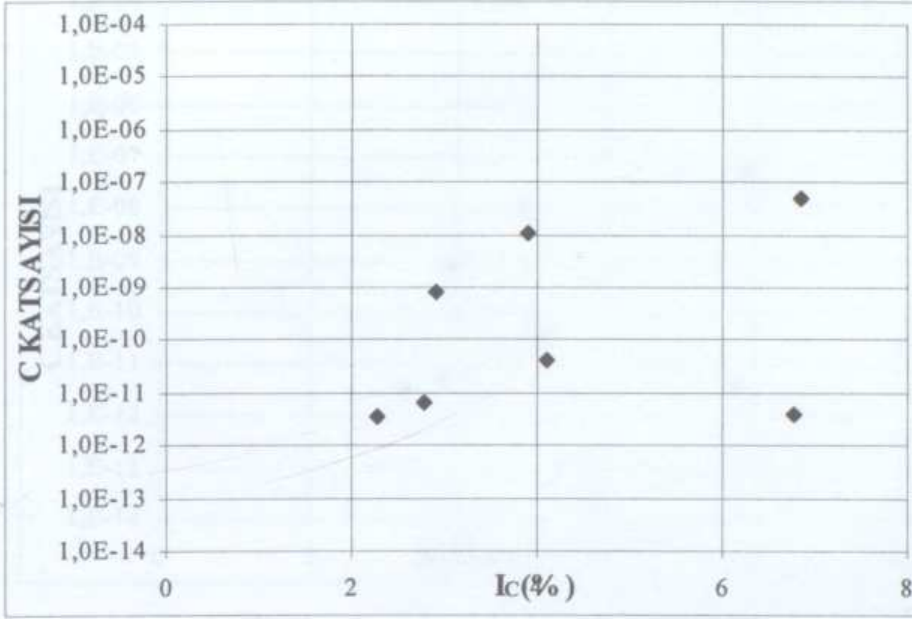
eşitlikleri ile ifade edilebileceği belirlenmiştir.

5.6.5 D Parametresi Tahmininin Relatif Konsistans (I_c), Likidite İndisi (I_L) ve Plastisite İndisi (I_p) Değerleri Kullanılarak Yapılması

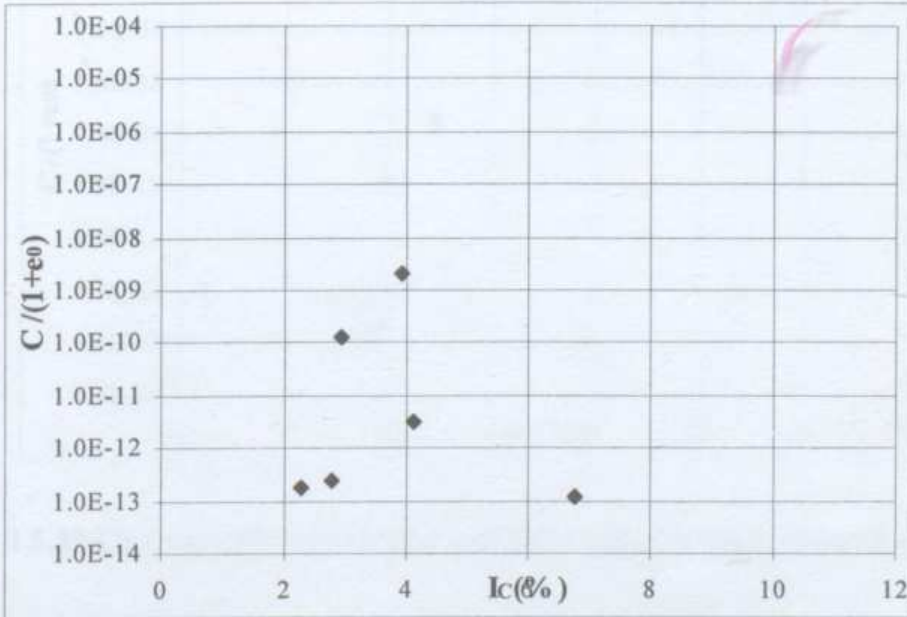
Boşluk oranının efektif gerilmeye bağlı değişimini (2.16) eşitliğinde tanımlayan ve sızıntı etkili konsolidasyon deney verileri kullanılarak elde edilen D katsayısının relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimini veren grafikler sırayla Şekil 5.38, Şekil 5.40 ve Şekil 5.42'de verilmiştir. Ayrıca D parametresinin başlangıç boşluk oranına göre normalize edilmesiyle elde edilen $D/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c), likidite indisi (I_L) ve plastisite indisi (I_p) değerlerine bağlı değişimleri de araştırılmış ve elde edilen grafikler 5.39, Şekil 5.41 ve Şekil 5.43'de verilmiştir. Tüm bu grafikler incelendiğinde D katsayısının relatif konsistans (I_c) ve likidite indisine bağlı değişimlerin (I_L) genel olarak düzgün bir eğrisel yaklaşım gösterdikleri belirlenmiştir. Buna bağlı olarak D katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişiminin Şekil 5.38'de görülebileceği gibi deneylerden bulunan değerlere en uygun olarak üstel bir fonksiyon şeklinde,

$$D = 5.75I_c^{-0.61} \quad (5.39)$$

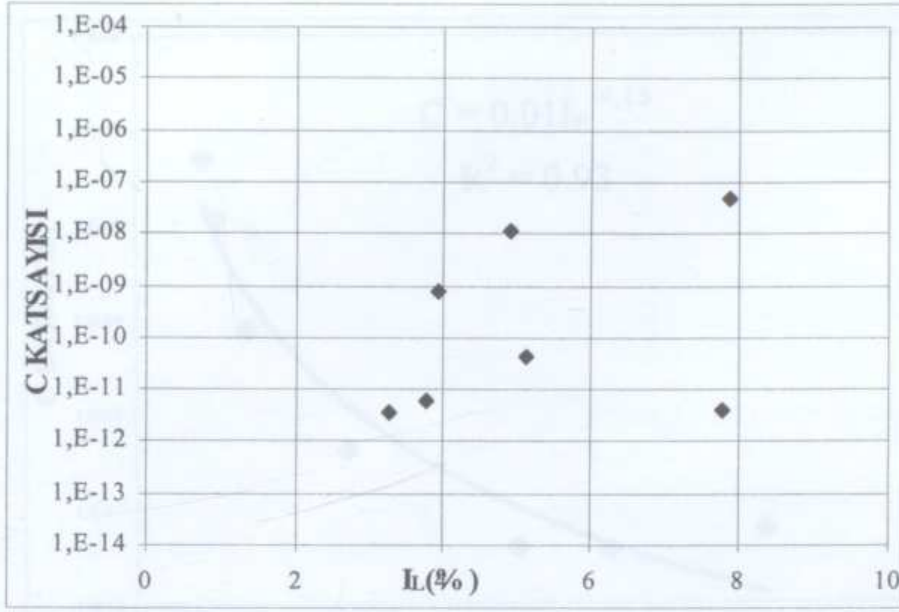
eşitliği ile ifade edilebileceği belirlenmiştir.



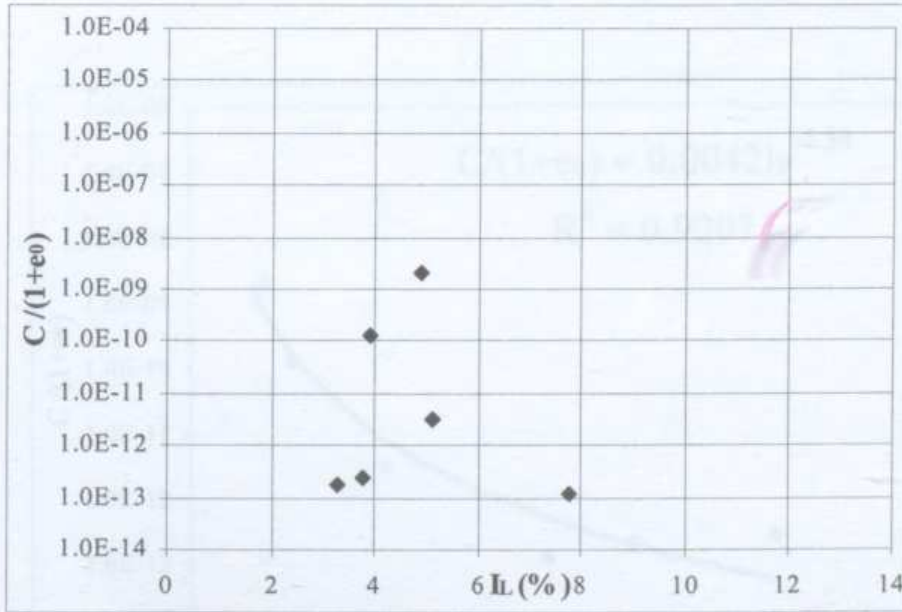
Şekil 5.32 C Katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



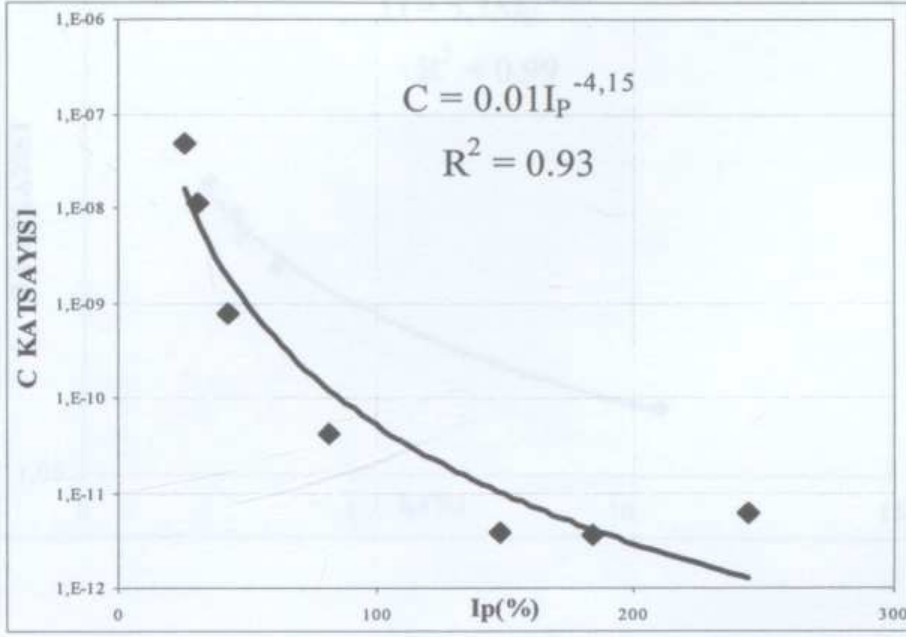
Şekil 5.33 $C/(1+e_0)$ Katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



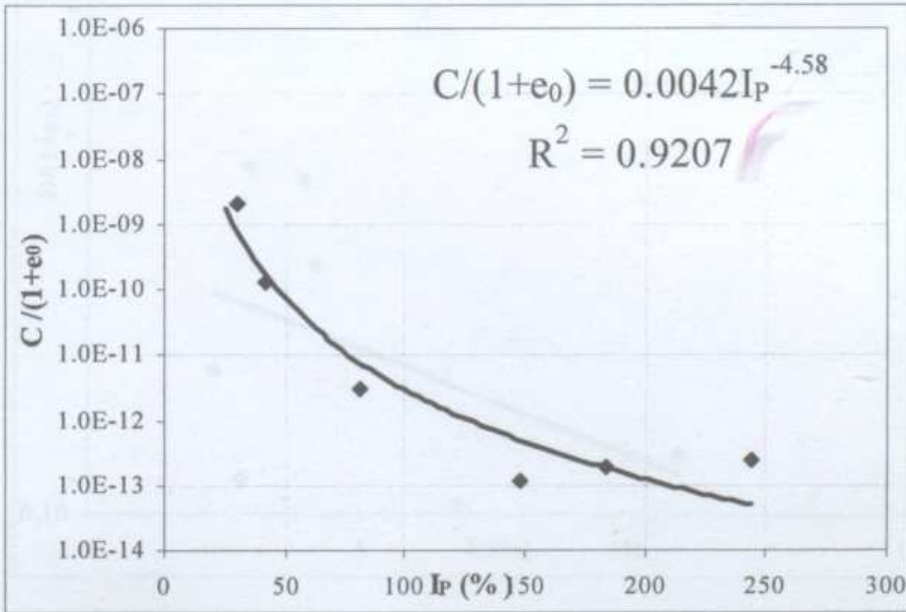
Şekil 5.34 C Katsayısının likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



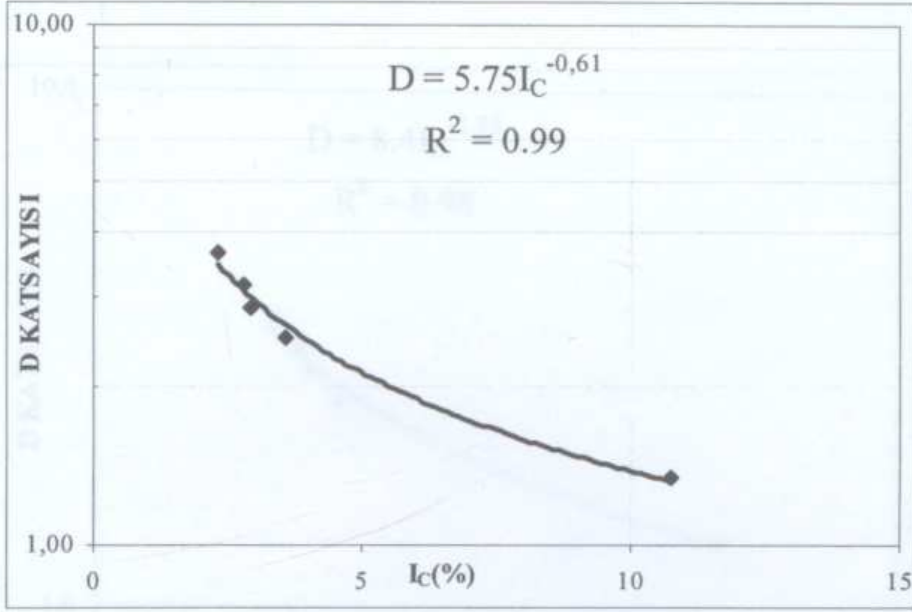
Şekil 5.35 $C/(1+e_0)$ değerinin likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



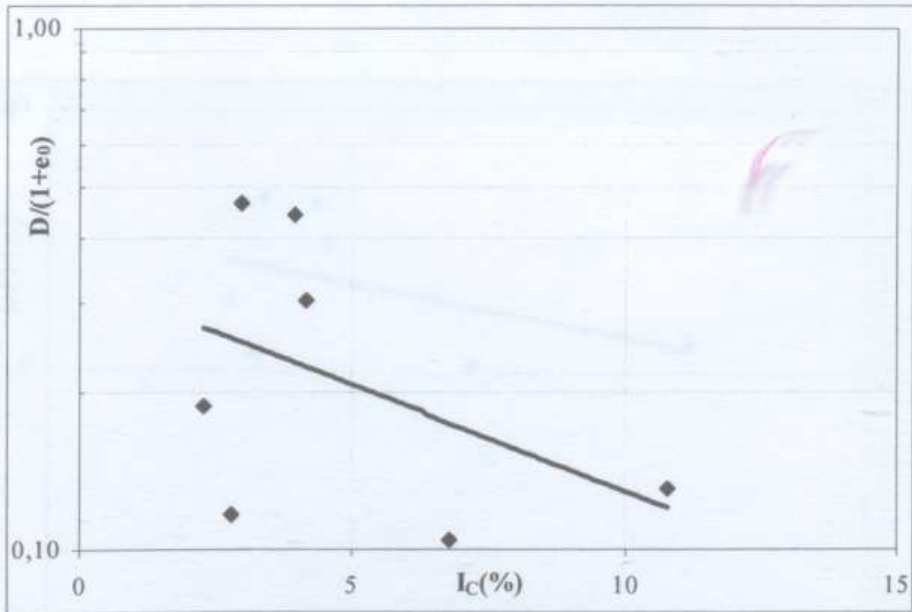
Şekil 5.36 C Katsayısının plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



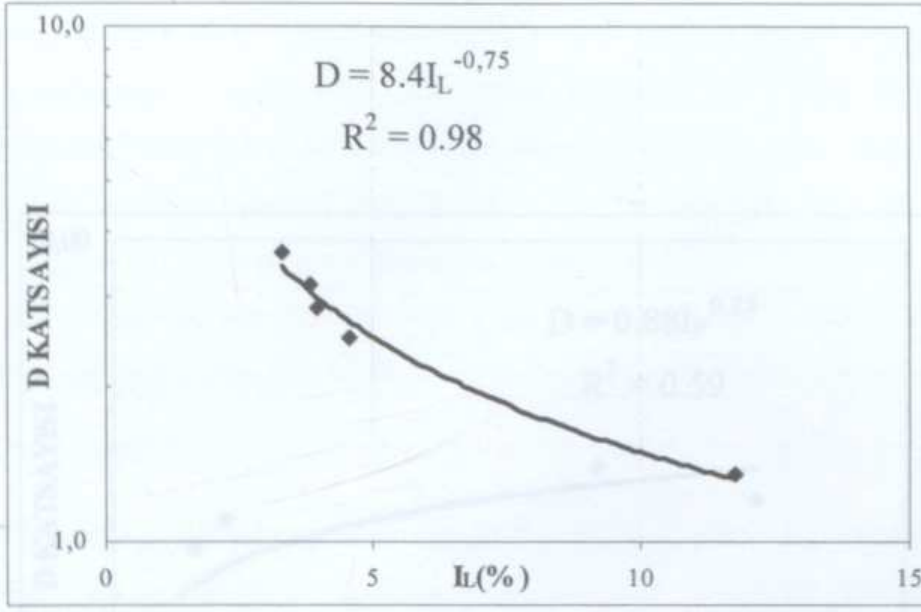
Şekil 5.37 $C/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



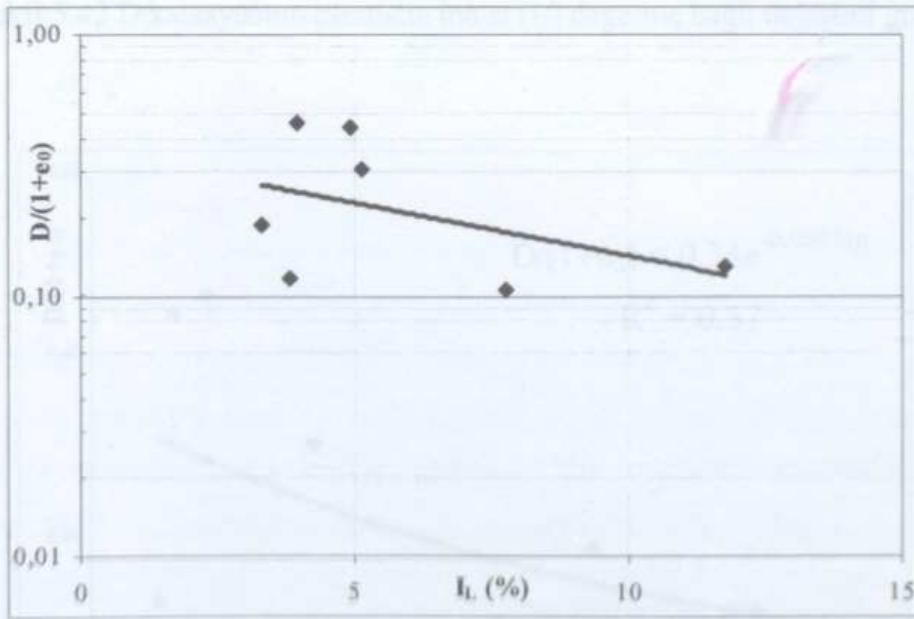
Şekil 5.38 D Katsayısının relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.39 $D/(1+e_0)$ değerinin relatif konsistans (I_c) değerine bağlı değişimi grafiği



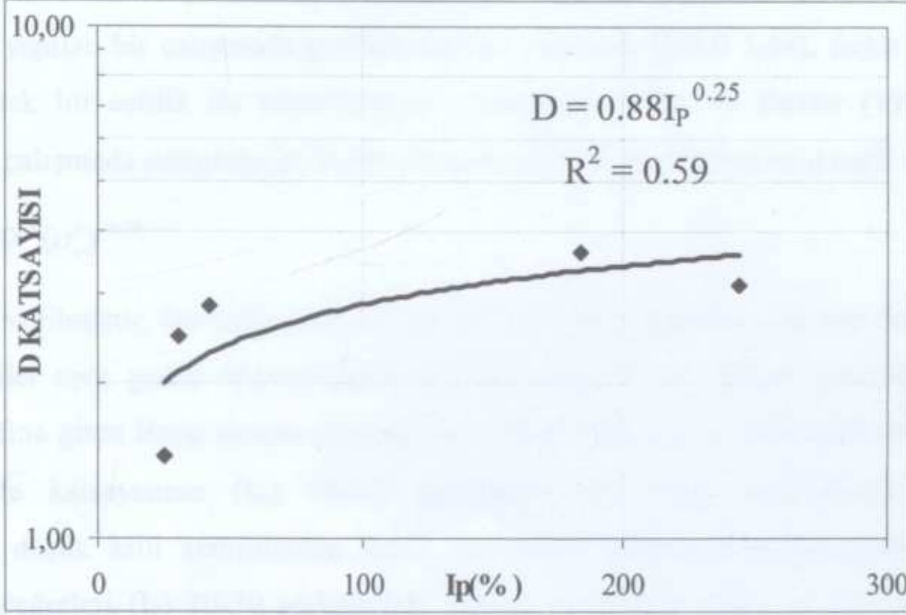
Şekil 5.40 D Katsayısının likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği



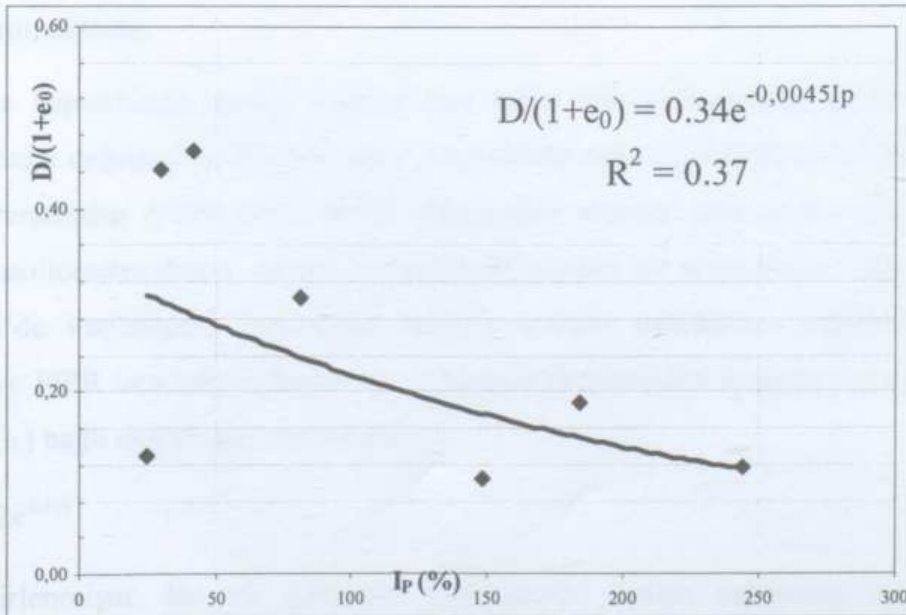
Şekil 5.41 $D/(1+e_0)$ değerinin likidite indisi (I_L) değerine bağlı değişimi grafiği

5.3 Permeabilite katsayısı(D)-Etkin Çerçeve (e_0) ve Permeabilite katsayısı-
Likitite İndisi (I_p ,%) İlişkisi

Yüksek sıkışılabilirliğe sahip zeminlerde yüksek efektif gerilme uygulanarak deney yapılarak elde edilen permeabilite katsayısı (D) etkin çerçeve (e_0) ve likitite indisi (I_p) arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir ilişkiyi belirlemek için aşağıdaki ilişkiyi kullanılmıştır.



Şekil 5.42 D katsayısının plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği



Şekil 5.43 $D/(1+e_0)$ değerinin plastisite indisi (I_p) değerine bağlı değişimi grafiği

5.7 Permeabilite katsayısı(k)-Efektif Gerilme (σ'_v) ve Permeabilite katsayısı(k)-Likidite İndisi I_L (%) İlişkisi

Yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde düşük efektif gerilme seviyelerinde düşey yönde hesaplanan permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişimleri farklı araştırmacılar tarafından farklı kil numuneleri üzerinde (fosfatik killer, taranmış çamurlar, deniz killeri ve kaolin çamurları) incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar Fox ve Baxter (1997) tarafından yapılan bir çalışmada grafikte topluca verilerek (Şekil 5.44), farklı kil zeminlerin davranışı tek bir eşitlik ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Fox ve Baxter (1997) tarafından yapılan bu çalışmada permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişimi,

$$k = 3.68 \times 10^{-8} (\sigma'_v)^{-0.78} \quad (5.40)$$

eşitliği ile verilmiştir. Bu çalışmada üç ayrı kil numunesi üzerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler aynı grafik üzerine Şekil 5.44'de işlenmiş ve yüksek plastisiteli silt (MH) zemin sınıfına giren Haliç tarama çamurunda, Alibey yeşil kili ve deniz killerinde elde edilen permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişiminin, permeabilite katsayıları düşük killi zeminlerden farklı bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Buna göre plasitite değerleri (I_p) 20-30 aralığındaki yüksek plastisiteli siltler ve silt-kil sınırında yer alan zeminler için permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişimini veren yeni bir eşitlik:

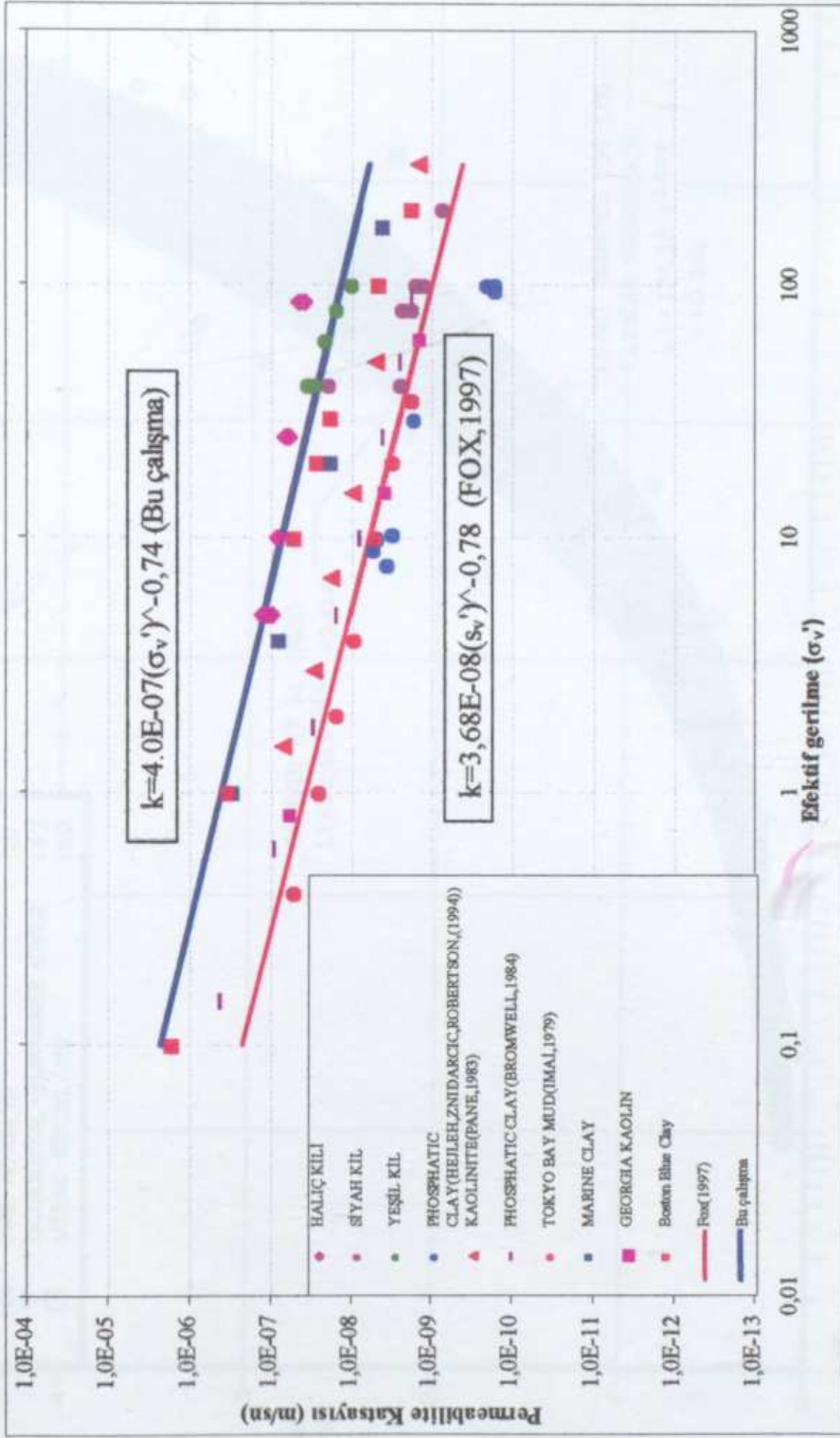
$$k = 4.0 \times 10^{-7} (\sigma'_v)^{-0.74} \quad (5.41)$$

olarak önerilmektedir.

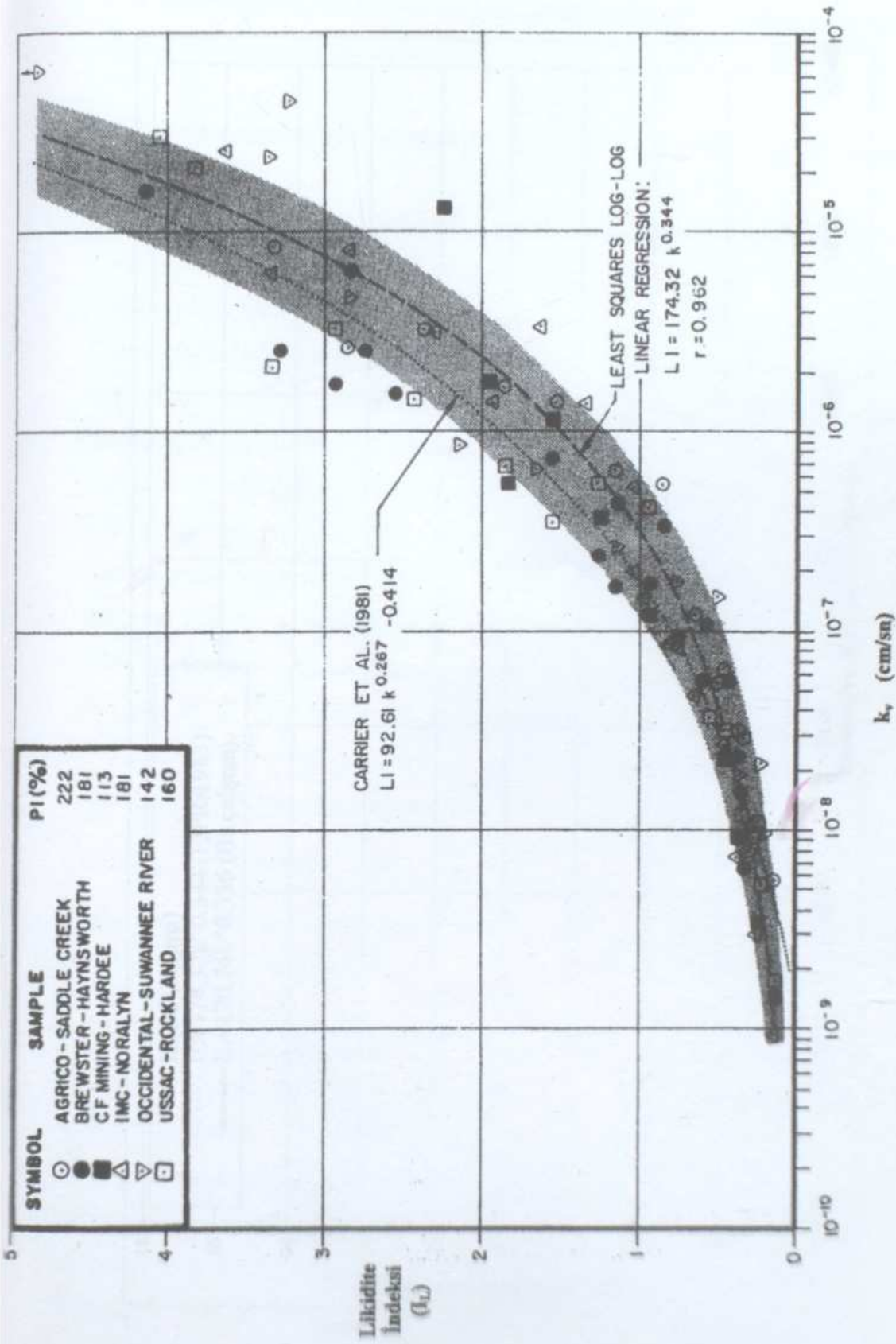
Bu çalışma kapsamında; deney yapılan tüm killer için permeabilite katsayısının likidite indeksine bağlı değişimi de araştırılmıştır. Literatürde daha önce Florida Fosfat Araştırmaları Enstitüsü tarafından (FIPR,1983) farklı bölgelerden alınmış yedi adet fosfat kili üzerinde Slurry Konsoliometre deney verileri kullanılarak yapılan bir araştırmada elde edilen veriler Şekil 5.45'de verilmiştir. Buna göre fosfatik killerin davranışını kapsamlı bir şekilde inceleyen ve FIPR tarafından yapılan bu çalışmada permeabilite katsayısının (cm/sn) likidite indeksine (I_L) bağlı değişimini veren eşitlik:

$$I_L = 174.32k^{0.344} \quad (5.42)$$

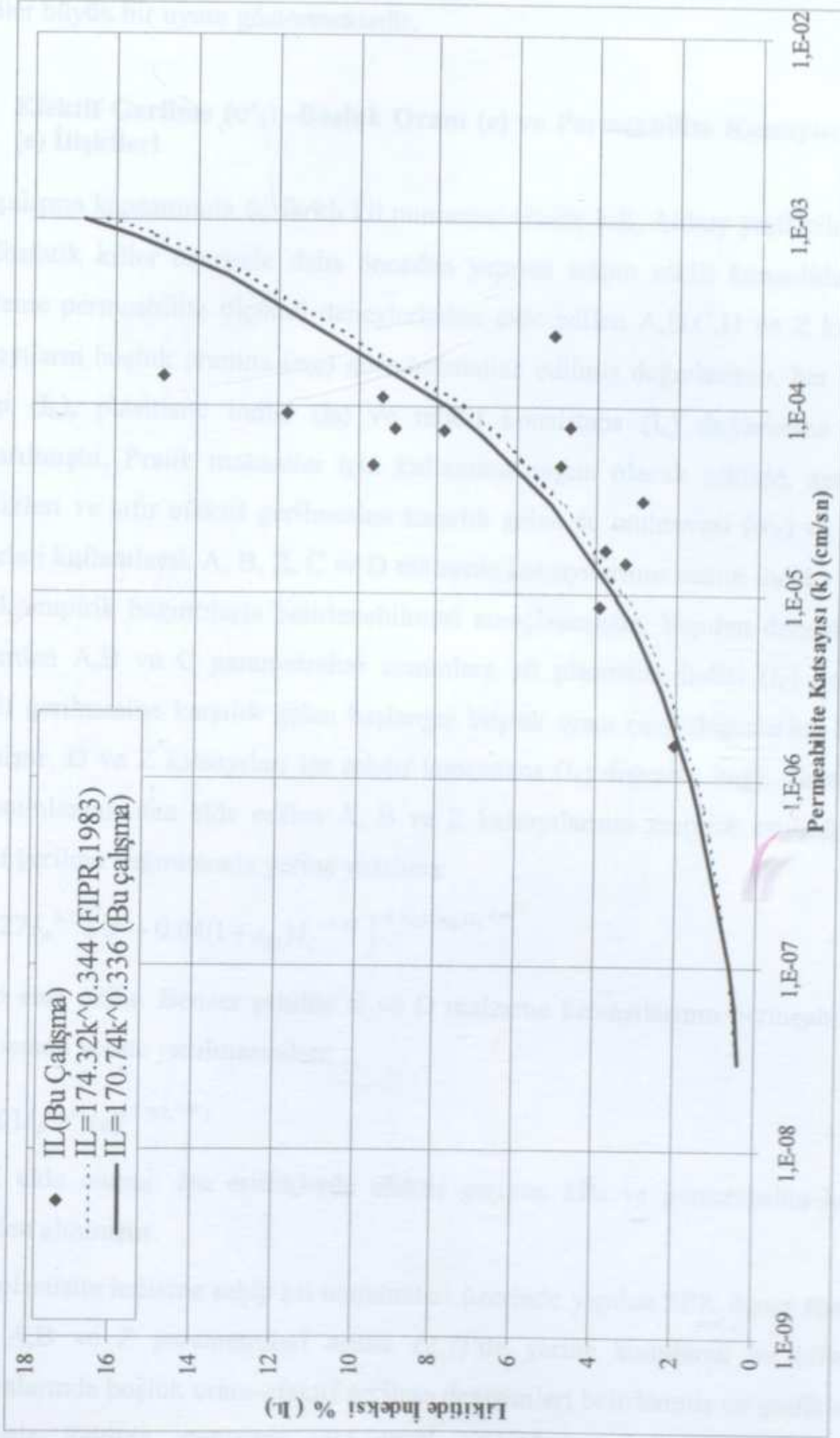
olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmada ise permeabilite katsayısının (cm/sn) likidite indeksine (I_L) bağlı değişimini veren grafik Şekil 5.46'de verilmiştir. permeabilite katsayısının (cm/sn) likidite indeksine (I_L) bağlı değişimini veren eşitlik ise :



Şekil 5.44 Permeabilite katsayısının (k) efektif gerilmeye (σ_v) bağlı değişim grafiği



Şekil 5.45 Permeabilite katsayısının (k) likidite indeksine (LI) bağlı değişim grafiği (FIPR, 1983)



Şekil 5.46 Permeabilite katsayısının (k) likidite indeksine (IL) bağlı değişim grafiği (Bu Çalışma)

$$I_L = 170.74k^{0.336} \quad (5.43)$$

olarak belirlenmiştir. Şekil 5.45 ve 5.46'da da görüldüğü gibi her iki çalışmada elde edilen veriler büyük bir uyum göstermektedir.

5.8 Efektif Gerilme (σ'_v) -Boşluk Oranı (e) ve Permeabilite Katsayısı (k)-Boşluk Oranı (e) İlişkileri

Bu çalışma kapsamında üç farklı kil numunesi (Haliç kili, Alibey yeşil kili, Alibey siyah kili) ve fosfatik killer üzerinde daha önceden yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deneylerinden elde edilen A,B,C,D ve Z katsayılarının ve bu katsayıların boşluk oranına (e_{00}) göre normalize edilmiş değerlerinin, her zemine ait likidite indisi (I_L), plasitisite indisi (I_p) ve relatif konsistans (I_c) değerlerine bağlı değişimleri araştırılmıştır. Pratik maksatlar için kullanıma uygun olacak şekilde, zemine ait plasitisite özellikleri ve sıfır efektif gerilmesine karşılık gelen su muhtevası (w_0) ve boşluk oranı (e_{00}) değerleri kullanılarak A, B, Z, C ve D malzeme katsayılarının zemin indeks özelliklerine bağlı olarak ampirik bağıntılarla belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen verilerden A,B ve C parametreleri zeminlere ait plasitisite indisi (I_p) değerlerine ve sıfır efektif gerilmesine karşılık gelen başlangıç boşluk oranı (e_{00}) değerlerine bağlı olarak ifade edilmiştir. D ve Z katsayıları ise relatif konsistans (I_c) değerine bağlı olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalardan elde edilen A, B ve Z katsayılarının ampirik eşitlikleri, boşluk oranı-efektif gerilme bağıntısında yerine yazılırsa

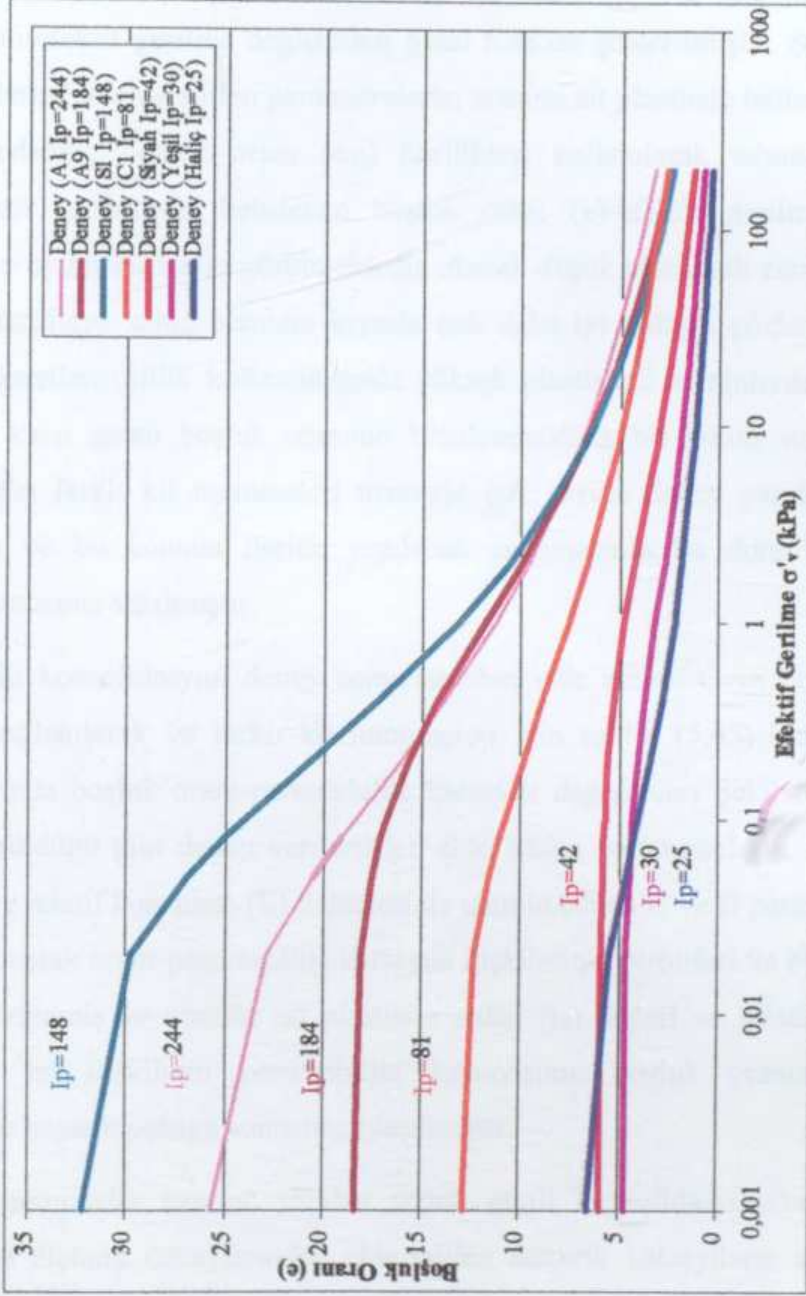
$$e = 0.27I_p^{0.73} \left[\sigma' + 0.04(1 + e_{00})I_c^{-1.35} \right]^{-0.32(1+e_{00})I_p^{-0.66}} \quad (5.44)$$

eşitliği elde edilir. Benzer şekilde C ve D malzeme katsayılarının permeabilite-boşluk oranı bağıntısında yerine yazılmasından;

$$k = 0.01I_p^{-4.15} (e)^{(5.75I_c^{-0.61})} \quad (5.45)$$

eşitliği elde olunur. Bu eşitliklerde efektif gerilme kPa ve permeabilite katsayısı ise m/s cinsinden alınmıştır.

Farklı plasitisite indisine sahip kil numuneleri üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen A,B ve Z parametreleri eşitlik (2.7)'de yerine konularak bu killerin yüksek su muhtevalarında boşluk oranı-efektif gerilme değişimleri belirlenmiş ve grafikler Şekil 5.47'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük efektif gerilme seviyelerindeki boşluk oranı değerleri yüksek plasitisiteli kil zeminlerde düşük plasitisiteye sahip silt oranı yüksek killi zeminlere göre daha büyük, yüksek gerilme seviyelerinde ise daha küçük boşluk oranına sahip



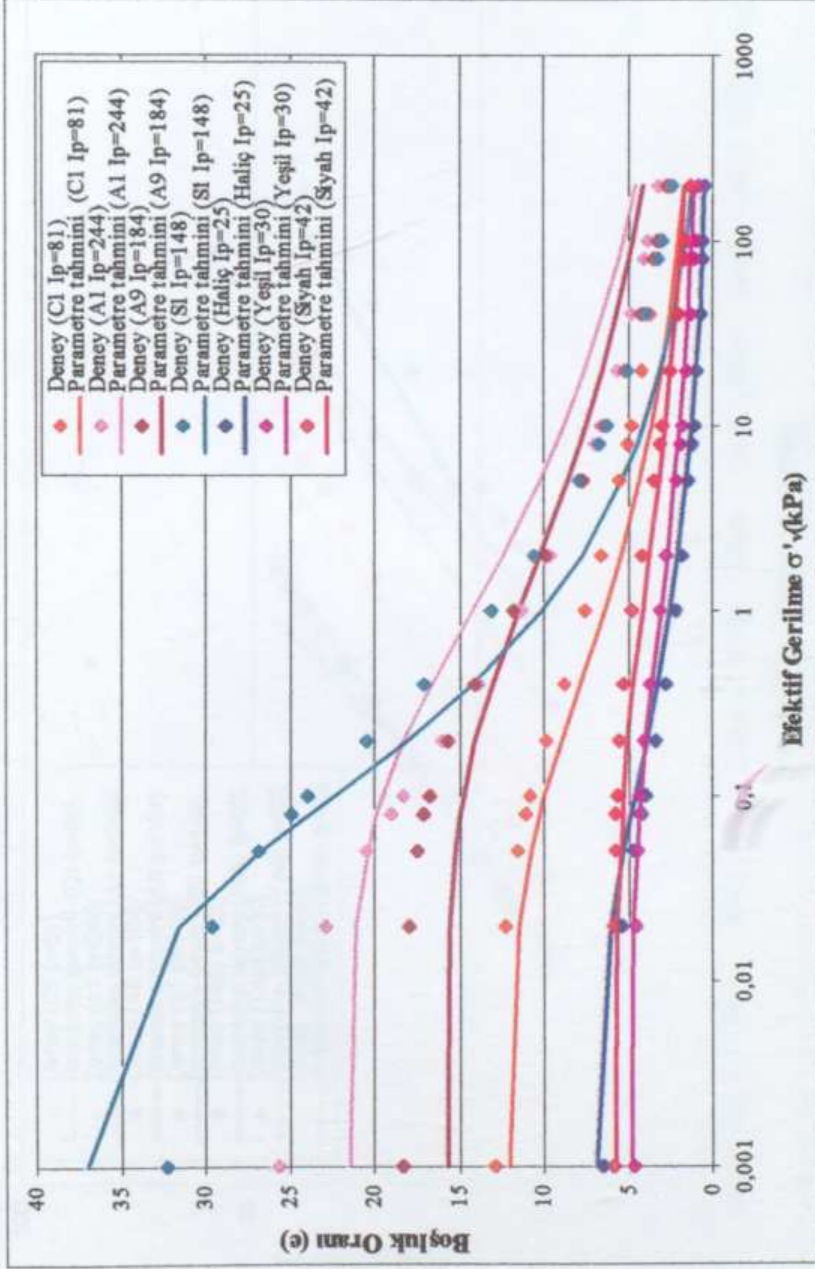
Şekil 5.47 Farklı plastisite indisi (I_p) değerlerine sahip killerde SEK deney sonuçlarıyla belirlenen boşluk oranı (e)- efektif gerilme (σ'_v) ilişkisi

oldukları görülmektedir. Genel olarak kil çamurlarında boşluk oranı-efektif gerilme davranışının zeminin plastisitesine bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir.

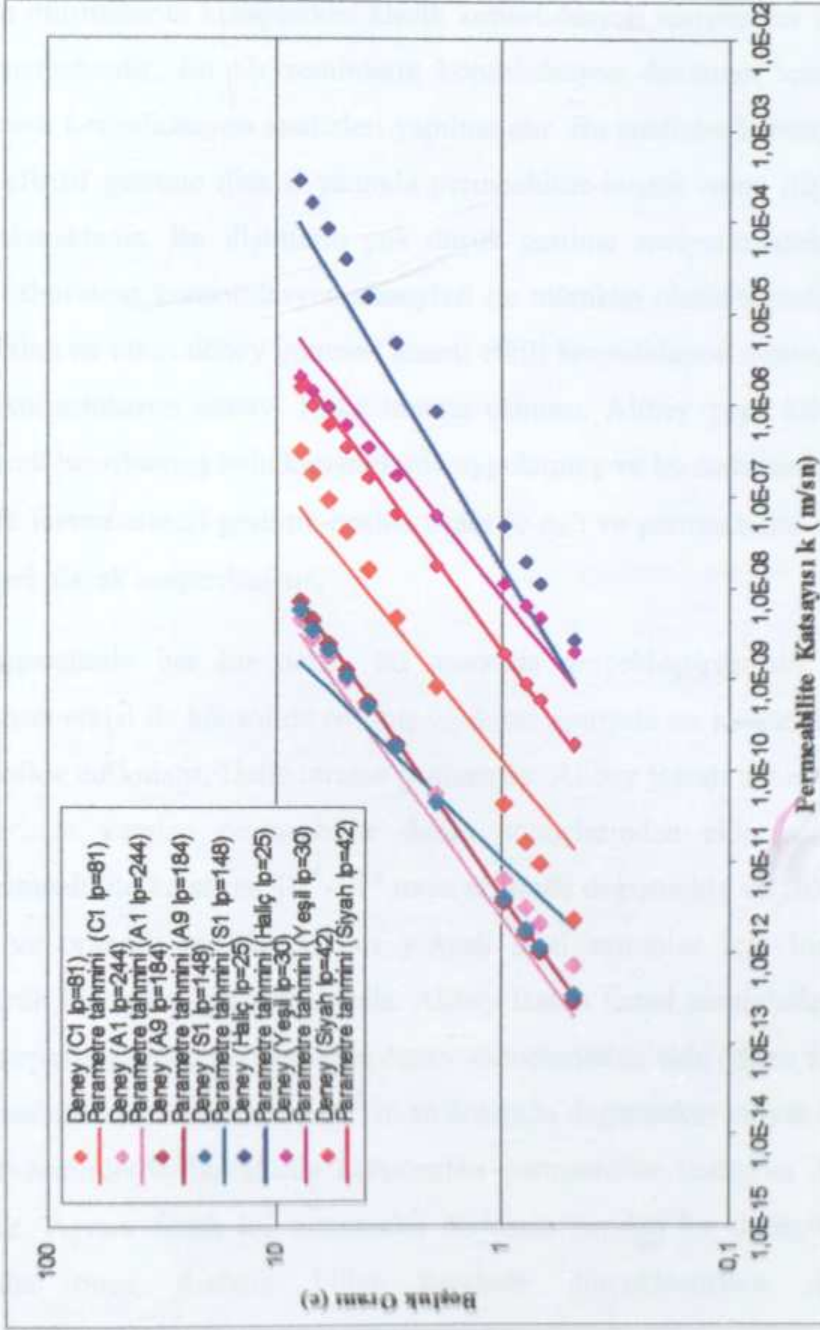
Sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilen A,B ve Z parametreleri eşitlik (2.7)'de kullanılarak (grafik üzerinde noktalar ile gösterilmiştir) ve farklı kil numuneleri için eşitlik (5.44) kullanılarak (grafik üzerinde eğriler ile gösterilmiştir), yüksek su muhtevalarında boşluk oranı-efektif gerilme değişimleri Şekil 5.48'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney verilerinden elde edilen parametrelerle, zemine ait plastisite indisi (I_p), relatif konsitans (I_c) ve başlangıç boşluk oranı (e_{00}) özellikleri kullanılarak tahmin edilen A,B ve Z parametreleri yardımıyla belirlenen boşluk oranı (e)-efektif gerilme ilişkisi eğrilerinin birbirleri ile uyum sağladığı görülmektedir. Ancak düşük plastisiteli zeminler için bu uyumun yüksek plastisiteye sahip olanlara kıyasla çok daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca (5.44)'de önerilen eşitlik kullanıldığında yüksek plastisiteli zeminlerde sıfır efektif gerilme seviyesine karşı gelen boşluk oranının belirlenmesinde bir takım sınırlamalar olduğu bu sınırlamaların farklı kil numuneleri üzerinde çok sayıda deney yapılarak kaldırılabilceği belirlenmiş ve bu konuda ileride yapılacak çalışmalarda bu durumun dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Sızıntı etkili konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilen C ve D parametreleri eşitlik (2.16)'da kullanılarak ve farklı kil numuneleri için eşitlik (5.45) kullanılarak, yüksek su muhtevalarında boşluk oranı-permeabilite katsayısı değişimleri Şekil 5.49'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney verilerinden elde edilen parametrelerle, zemine ait plastisite indisi (I_p) ve relatif konsitans (I_c) değerleri ile tahmin edilen C ve D parametreleri kullanılarak belirlenen boşluk oranı-permeabilite katsayısı ilişkilerinin birbirleri ile büyük bir uyum içinde olduğu belirlenmiş ve zemine ait plastisite indisi (I_p) değeri ve relatif konsistans (I_c) ile tanımlanan bu ilişkilerin permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı değişimini belirlemekte başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Farklı kil numuneler üzerine yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deneylerinden elde edilen ampirik katsayıların zemine ait özelliklere bağlı değişimlerinin araştırıldığı bu çalışma sonucunda, boşluk oranının efektif gerilmeye bağlı ve permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı değişimini veren eşitliklerin doğruya en yakın şekilde tanımlanabilmesi için farklı kil numuneler üzerinde mümkün olduğunca fazla deney yapılarak sonuçlarının tümünün birlikte değerlendirilmesinin yararlı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.48 Farklı plastisite indisi (I_p) değerlerine sahip killerde SEK deney sonuçlarıyla belirlenen ve zemin indeks özellikleri kullanılarak tahmin edilen boşluk oranı (e)- efektif gerilme (σ'_v) ilişkisi



Şekil 5. 49 Farklı plastisite indisi (I_p) değerlerine sahip kilerde SEK deney sonuçlarıyla belirlenen ve zemin indeks özellikleri kullanılarak tahmin edilen boşluk oranı (e)- permeabilite katsayısı (k) ilişkisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek su muhtevasına sahip ince daneli zeminler (tarama çamuru, maden atığı vb.) konsolidasyonunu tamamlamamış olup kendi ağırlığı ve/veya düşey sürşarj yükleri altında çok büyük miktarda şekil değiştirme (oturma) meydana getirdiğinden, bu tür zeminlerin konsolidasyon oturmalarını hesaplarken klasik konsolidasyon teorisinden yararlanmak doğru sonuçlar vermemektedir. Bu tür zeminlerin konsolidasyon davranışı için non-lineer sonlu şekil değiştirmeli konsolidasyon analizleri yapılmalıdır. Bu analizlerde bünye bağıntısı olarak boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi yanında permeabilite-boşluk oranı ilişkisinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu ilişkilerin çok düşük gerilme seviyelerindeki değerlerini elde etmek klasik laboratuvar konsolidasyon deneyleri ile mümkün olmamaktadır. Günümüzde bu amaçla kullanılan en etkin deney yöntemi sızıntı etkili konsolidasyon deneyidir. Bu çalışmada sızıntı etkili konsolidasyon deneyi Haliç tarama çamuru, Alibey yeşil kili ve Alibey siyah kilinden alınarak hazırlanmış sulu karışımlarda uygulanmış ve bu zeminler için düşük gerilme seviyelerini de içeren efektif gerilme-boşluk oranı ($e-\sigma'_v$) ve permeabilite- boşluk oranı ($k-e$) ilişkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda her bir deney iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada numuneler sızıntı etkisi ile konsolide edilmiş ve ikinci aşamada ise kademeli yük uygulanarak numune konsolide edilmiştir. Haliç tarama çamuru ve Alibey Barajı temel zemininden alınan yeşil kil üzerinde yapılan permeabilite deney sonuçlarından elde edilen verilere göre zeminlerin permeabilite katsayısı 10^{-6} - 10^{-8} m/sn arasında değişmekte ve yüksek plastisiteli kil oranı düşük ve organik madde miktarı yüksek siltli zeminler için literatürde yer alan değerlerle büyük bir uyum göstermektedir. Alibey Barajı temel zemininden alınan siyah kil numuneleri üzerinde yapılan permeabilite deney sonuçlarından elde edilen verilere göre ise bu zeminin permeabilite katsayısı 10^{-7} - 10^{-10} m/sn arasında değişmekte ve yüksek plastisiteli, kil sınıfına giren zeminlerde literatürde karşılaşılan permeabilite katsayısı değerleriyle uyum göstermektedir. Ayrıca farklı kil numuneler üzerinde yapılan bu deneylerden elde edilen verilerin daha önce fosfatik killer üzerinde gerçekleştirilen deney verileriyle (FIPRVol:3,1994) uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Üç farklı kil numunesi üzerinde kullanılan sızıntı etkili konsolidasyon (SEK) ve kademeli yüklemeli konsolidasyon aşamalarında ölçülen sıkışma permeabilite deney verileri değerlendirilerek

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (6.1)$$

ve

$$k = C e^D \quad (6.2)$$

eşitliklerinde boşluk oranı-efektif gerilme ($e-\sigma_v$) ve efektif gerilme-permeabilite ($k-e$) ilişkilerini tanımlayan A,B,C,D ve Z parametreleri her üç kil numunesi için belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak elde edilen boşluk oranı-efektif gerilme ($e-\sigma_v$) ve permeabilite katsayısı-boşluk oranı ($k-e$) ilişkisine ait bulguların literatürde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde elde edilen bulgularla uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada Alibey yeşil kili ve siyah kili için elde edilen permeabilite-boşluk oranı ilişkisi, bu kil numuneler üzerinde daha önce yapılan çalışma sonuçları ile de uyum içindedir.

Fox ve Baxter (1997) tarafından yapılan bir çalışmada farklı çalışmalarda farklı kil numuneleri üzerinde (fosfatik killer, taranmış çamurlar, deniz killeri ve kaolin çamurları) elde edilen permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişimleri inceleyerek, farklı kil zeminlerin davranışı tek bir eşitlik ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında üç ayrı kil numunesi üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri sonuçları aynı grafik üzerine işlenmiş ve yüksek plastisiteli silt (MH) zemin sınıfına giren Haliç tarama çamuru, Alibey yeşil kili ve deniz killerinde elde edilen permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişiminin, permeabilite katsayıları düşük killi zeminlerden farklı olduğu belirlenmiştir. Buna plasitite değerleri (I_p) 20-30 aralığında değişen yüksek plastisiteli siltler ve silt-kil sınırında yer alan zeminler için permeabilite katsayısının (k_v) efektif gerilmeye (σ'_v) bağlı değişimini veren yeni bir eşitlik elde edilmiştir.

DeneySEL veriler ile permeabilite katsayısının likidite indeksine (I_L) bağlı değişimi de belirlenmiştir. Eldeki verilerin, daha önce fosfatik killerin permeabilite katsayısının (cm/sn) likidite indeksine (I_L) bağlı değişiminin araştırıldığı bir çalışmada elde edilenlerle büyük uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Haliç tarama çamuru gibi yüksek su muhtevasına sahip malzemelerin kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altında analizi için non-lineer sonlu şekil değiştirme (finite strain) analizi yapılması ve bu analizler için düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı efektif gerilme ilişkisinin ve boşluk oranı permeabilite ilişkisinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir model deney tankına yerleştirilen (İpekoğlu, 2002), Haliç dipsel tarama çamurunun (başlangıç su muhtevası değeri $w=300\%$, başlangıç boşluk oranı $e_0=8.00$, başlangıç yüksekliği $H_0=0.98$ m olmak üzere) zamana bağlı davranışı, Haliç kili üzerinde

düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı efektif gerilme ilişkisi ve boşluk oranı permeabilite ilişkisini deneysel olarak belirlenmesi amacı ile yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçları ve deney sonuçlarından elde edilen A,B,Z,C ve D parametreleri, iki farklı konsolidasyon analizi programında kullanılarak modellenmiştir CONDES0 (Yao,D., Znidarcic. D.1997), CS2 Model (P.J.Fox, J.D.Berles.1997). Buna göre farklı modeller kullanılarak elde edilen oturma-zaman davranışının model deney tankı oturma-zaman davranışına çok yakın olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan Haliç çamurunun depolandığı sahadaki davranışını tahmin etmek için CS2 ve Condes0 modellerinde deneylerden elde edilen parametreler kullanılarak oturma analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler ile Haliç tarama çamurunun arazideki davranışının uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada üç farklı kil numunesi üzerinde (Haliç kili, Alibey yeşil kili, Alibey siyah kili) yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri ile fosfatik killer üzerinde daha önce yapılan sızıntı etkili konsolidasyon deneylerinden elde edilen A,B,C,D ve Z katsayıları, sıfır efektif gerilmede başlangıç boşluk oranına (e_{00}) göre normalize edilmiş değerlerinin, likidite indisi (I_L), plastisite indisi (I_p) ve relatif konsistans (I_c) değerlerine bağlı değişimleri araştırılmıştır. Bu araştırma sonuçlarına göre A,B ve C katsayıları için elde edilen değerlerin plastisite indisine (I_p), D ve Z katsayıları için elde edilen değerlerin ise relatif konsistansa (I_c) bağlı değişimlerinin birbirlerine uygun bir eğilim içinde oldukları belirlenmiştir. B/(1+ e_{00}) değeri ve C katsayısının plastisite indisine bağlı olarak azaldıkları, A katsayısının ise plastisite indisine bağlı olarak arttığı; D ve Z katsayılarının ise relatif konsistans (I_c) değerine bağlı olarak azaldıkları görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında zemin indeks özellikleri kullanılarak yapılan parametre tahminleri ve deneysel verilerden elde edilen,

$$e = 0.27 I_p^{0.73} \left[\sigma' + 0.04(1 + e_{00}) I_c^{-1.35} \right]^{-0.32(1 + e_{00}) I_p^{-0.66}} \quad (6.3)$$

$$k = 0.01 I_p^{-4.15} (e)^{(5.75 I_c^{-0.61})} \quad (6.4)$$

ve eşitlik 6.3 ve 6.4'de verilen parametrelerle efektif gerilme-boşluk oranı ($e-\sigma_v$) ve permeabilite-boşluk oranı ($k-e$) ilişkileri belirlenerek birbiriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre zemin indeks özellikleri kullanılarak yapılan parametre tahminlerinin deneysel verilerle uyum içinde olup, zeminin oturma ve geçirgenlik ilişkilerini belirlemede başarılı olduğu ve bu parametreler kullanılarak yapılan oturma analizlerinin araziyle uyum gösterdiği sonucuna

Farklı plastisite indisine sahip kil numuneleri üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen A,B ve Z parametreleri kullanılarak bu killerin yüksek su muhtevalarında boşluk oranı-efektif gerilme değişimleri belirlenmiştir. Düşük efektif gerilme seviyelerindeki boşluk oranı değerlerinin yüksek plastisiteli kil çamurlarında büyük, düşük plastisiteye sahip silt oranı yüksek killi zeminlerde ise küçük değerler aldığı belirlenmiştir. Yüksek gerilme seviyelerine çıkıldıkça yüksek plastisiteli killere kıyasla düşük plastisiteli zeminlerin daha yüksek boşluk oranına sahip oldukları ve oturma miktarlarının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Genel olarak kil çamurlarında boşluk oranı-efektif gerilme davranışının zeminin plastisitesine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterdiği görülmüştür.

A,B,C,D ve Z katsayılarının zeminin plastiklik özellikleri ve başlangıç boşluk oranına göre değişimi için belirlenen ampirik eşitliklerin pratik maksatlar için çok yararlı olacağı açıktır. Ancak bu eşitliklerin daha güvenilir sonuçlar vermesi için yeni çalışmalar yapılması ve farklı zeminler üzerinde elde edilecek bulguların yapacağı katkılar ile pratikte yaygın olarak kullanılması beklenebilir.

KAYNAKLAR

Abu-Hejleh, A. N. ve Znidarcic, D., (1992), "User Manual for Computer Program SICTA " Rep. Prepared for FIPR, Vol:2 ,Dep.of Civ. Engr. University of Colarado, Boulder, Colo.

Abu-Hejleh, A. N. ve Znidarcic, D., (1995), "Dessiccation Theory for Soft Cohesive Soils " Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 121(6), 493-502.

Abu-Hejleh, A. N., Znidarcic, D., ve Barnes, B.L (1996), "Consolidation characteristics of phosphatic clays." J. Geotech. Engrg., ASCE, 122(4), 295-301.

Abu-Hejleh, A. N., Znidarcic, D., ve Robertson, A. (1992), "Results of Seepage Induced Consolidation Test of Phosphatic Clays" Rep. Prepared for FIPR, Vol:3 , Dep.of Civ. Engr. University of Colarado,Boulder,Colo.

Aiban, S. A., ve Znidarcic, D. (1989), "Evaluation of the flow pump and constant head techniques for permeability measurements." Geotechnique, London, England, 39(4), 655-666.

Ardaman & Associates,Inc, (1983), Evaluation of Phosphatic Clay Disposal and Reclamation Methods,Vo:4 , FIPR Pub No: 02-002-008,3-56.

Barden, L.ve Berry,P.L.(1965), "Consolidation of Normally Consolidated Clays, " Jnl Soil Mech. Fdn. Div. Am. Soc. Civ. Engrs 91,SM5,15-36.

Baxter, C. D. P. (1994) , "Gradient effects on measured hydraulic conductivity," MSCE thesis, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., West Lafayette, Ind.

Baxter, C. D. P., Fox, P. J., ve Leonards, G. A. (1995), "Gradient effects on measured hydraulic conductivity," Geoenvironment 2000, Vol. 1, Geotech. Spec..PubL No. 46, Y. B. Acar and D. E. Daniel, eds., ASCE, New York, N.Y., 746-757.

Been, K. (1980), "Stress-strain Behaviour of a Cohesive Soil Deposited Under Water" Ph.D. Dissertation, University of Oxford, Oxford, United Kingdom.

Been, K., ve Sills, G. C. (1981), "Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study." Geotechnique, London, England, 31(4), 519-535.

Berilgen, S.A., Berilgen, M.M. ve Özeydin, İ.K., (2002), "Haliç kilinin konsolidasyon özelliklerinin sızıntı etkili konsolidasyon deneyi ile belirlenmesi", ZMTM 9. Ulual Kongresi, Eskişehir.

Berilgen, M.M, Ozaydin, K., and Edil, T., (1999), "A Case Study: Dredging And Disposal Of Golden Horn", Geotechnics of High Water Content Materials, ASTM STP 1374, T.B. Edil and P.J. Fox, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Bromwell, L.G.(1984),"Consolidation of mining wastes."Proc.,Symp.on Sedimentation - Consolidation Models: Prediction and Validation, R. N. Yong and F. C. Townsend, eds., ASCE, New York, N.Y., 275-295.

Caldwell, J. A., Ferguson, K., Schiffman, R. L., ve Van Zyl, D. (1994), "Application of finite strain consolidation theory for engineering design and environmental planning of mine tailings impoundments." Proc., Symp. on Sedimentation-Consolidation Models: Prediction and Validation, R. N. Yong and F. C. Townsend, eds., ASCE, New York,N.Y., 581-606.

Cargill, K. W. (1983), "Procedures for Prediction of Consolidation in Soft Fine-Grained Dredged Material , Technical Report D-83-1,U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station ,Vicksburg,Missisipi.

Carrier, W. D. III , Bromwell, L. G., ve Somogyi, F. (1983), "Design capacity of slurried mineral waste ponds." J. Geotech. Engrg., ASCE,109(5), 699-716.

Carrier, W. D. III , ve Bromwell, L. G., (1980), " Geotechnical Analysis of Confined Spoil Disposal.", Proceedings of the Ninth World Conference on Dredging, Vancouver ,Canada,. 313-324.

Carrier, W. D. III , ve Bromwell, L. G., (1983), " Disposal and Reclamation of Mining and Dredging Wastes " Proceedings of the Seventh Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vancouver ,Canada, . 727-738.

Carrier, W. D. III ve Beckman , J.F. (1984), "Some Recent Observations on the Fundamental of Remolded Clays", Geotechnique , Vol: 34(2), 211-228.

Daniel, D. E. (1994), "State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils." Hydraulic conductivity and waste containntent transport in soil, ASTM STP 1142, D. E. Daniel and S. J. Trautwein, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., 30-78.

Davis, E.H. ve Raymond, G.P.(1965), "A Non-Linear Consolidation Theory of Consolidation," Geotechnique, London, England, 15(2), 161-173.

Edil, T. B., ve Erickson, A. E. (1985), "Procedure and equipment factors affecting permeability testing of a bentonite-sand Uner material." Hydraulic barriers in soil and rock, ASTM STP 874, A. I. Johnson, R. K. Frobel, N. J. Cavalli, and C. B. Pettersson, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., 155-170.

Feldkamp, J. R. (1989), "Permeability measurement of clay pastes by a non-linear analysis of transient seepage consolidation tests." Geotechnique, London, England, 39(1), 141-145.

Fox P., Berles C.D.P. (1997), "Consolidation Properties of Soil Slurries from Hydraulic Consolidation Test" . J. Geotech. Engrg., ASCE,123(8), 770-776.

Fox P.,ve Berles C J.D. (1997), "CS2: A Piecewise-Linear Model for Large Strain Consolidation " International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Vol:21, 453-475.

Fox, P. J. (1996), "Analysis of hydraulic gradient effects for laboratory hydraulic conductivity testing." Geotech. Testing J., 19(2), 181-190.

Gibson, R. E., England, G.L. ve Hussey, M.J.L (1967), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. I. finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers." Geotechnique 17, No: 3, 261-273.

Gibson, R. E., Schiffman, R. L., ve Cargill, K. W. (1981), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II. finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers." Can. Geotech. J., Ottawa, Canada, 18(2), 280-293.

Huerta, A., Kriegsmann, G. A., ve Krizek, R. J. (1988), "Permeability and compressibility of slurries from seepage-induced consolidation." 'J. Geotech. Zgrg., ASCE, 114(5), 614-627.

Imai,G. (1979), " Development Of A New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force", Soils and Foundations, 19,No,3,.45-60.

İpekoğlu, P., Berilgen. S. A., Berilgen, M. M. Ve Özçoban, M.Ş. (2002), "Haliç kilinin kendi ağırlığı altında konsolidasyonu", ZMTM 9. Kongresi, Eskişehir.

Janbu, N. (1965), "Consolidation of Clay Layers Based on Non-Linear Stress-Strain," Proc.6th. Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal 2,83-87.

Koppula, S.D., ve Morgenstern, N.R. (1982), " On the Consolidation of Sedimenting Clays", Canadian Geotechnical Journal , Volume 19, 260-268.

Krizek, R. J., ve Salem, A.M., (1974), "Behavior of Dredged Material in Diked Containment Areas", Technical Report No:5, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois.

Krizek, R. J., ve Somogyi, R (1984), "Perspectives on modelling consolidation of dredged materials," Proc., Symp. on Sedimentation-Consolidation Models: Prediction and Validation, R- N. Yong and F. C. Townsend, eds., ASCE, New York, N.Y., 296-332.

Kynch, G.J., (1952), "A theory of sedimentation," Transactions of the Faraday Society, 48, 166-176.

Lamb,H., (1932), Hydrodynamics, (Sixth Edition), Dover Publications, New York, New York.

Leonards, O.A., ve Girault, P. (1961), "A study of the one-dimensional I consolidation test.", 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg., Vol: 1, Paris,France,'213-218.

Liu, J.C., ve Znidarcic, D. (1991), "Modelling One-Dimensional Compression Characteristics of Soils" Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 117(1), 162-169.

McNabb, A.,(1960), "A Mathematical Treatment of One-Dimensional Soil Consolidation" Q. Appl.Maths.Vol:17: Number 4:337-347.

McVay, M., Townsend, F., ve Bloomquist, D. (1986), "Quiescent Consolidation of Phosphatic Waste. Clays. J. Geotech. Engrg., ASCE,112(11), 1033-1049.

Monte,J.L., ve Krizek R. J., (1976), "One-Dimensional Mathematical Model for Large - Strain Consolidation ", Geotechnique,Volume 26,Number 3,. 495-510.

Olson, R. E., ve Ladd, C. C (1979), " One-Dimensional Consolidation Problems" Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers,Volume 105, Number GT1, .11-30.

Özaydın, K., Yıldırım, S. ve Yıldırım, M., " Haliç Islah Projesi -Fizibilite Raporu: Dördüncü Geoteknik Ara Rapor ",Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Pane, V., Croce, P., Znidarcic, D., Ko, H.-Y., Olsen, H. W., ve Schiffman, R- L.. (1983), "Effects of Consolidation on Permeability Measurements for Soft Clay." Geotechnique, London, England, 33(L), 67-72.

Richart, F. E. (1957), "A Review of the Theories for Sand Drains, " Soil Mech. Fdn. Div. Am. Soc. Civ. Engrs 83,SM3,1-38.

Samarasinghe, A.M, Huang, Y. H., ve Drnevich, V.P. (1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol:108,Number GT6,.835-850.

Schiffman, R. L. (1980), " Finite and Infinitesimal Strain Consolidation " Journal of Geotechnical Division, ASCE, Vol.106, Num. GT2, pp 203-207.

Schiffman, R. L., Pane, V., ve Gibson, R. E. (1994), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. IV. an overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation." Proc., Symp. on Sedimentation-Consolidation Models: Prediction and Validation, R. N. Yong and F. C. Townsend, eds., ASCE, New York, N.Y., 1-29.

Scully, R. W., Schiffman, R. L., Olsen, H. W., ve Ko, H.-Y (1984), "Validation Of Consolidation Properties Of Phosphatic Clay At Very High Void Ratios." Proc. Synp. on Sedimentation-Consolidation Models: Prediction and Validation.

Somogyi, F. (1979), Analysis and Prediction of Phosphatic Clay Consolidation: Implementation Package, Technical Report, Florida Phosphatic Clay Research Project, Lakeland, Florida.

Somogyi, F., Carrier, W. D. III, Lawver, I. E., ve Beckman, J. F. (1984), "Waste Phosphatic Clay Disposal In Mine Cuts." Pmc., Symp. on Sedimentation Consolidation Models.- Prediction and Validation, R. N. Yong and F. C. Townsend, eds., ASCE, New York, N.Y., 545-564.

Terzaghi, K.T.(1923), " Die Berechnung der Durchlässigkeit des Tons aus dem Verlauf der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen, Akademie der Wissenschaften in Wien. Sitzungsberichte, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse 2a, No:132,125-138.

Tohumcu, P.(2001), "Dolgu Altındaki Killi Zeminlerin Permeabilite Karakteristiklerinin Belirlenmesi " Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Tonaroğlu, M.(1998) " Şekil Değiştirme Hızının Konsolidasyon Davranışı Üzerine Etkisi " Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Toorman, E. A. (1996), "Sedimentation And Self-Weight Consolidation: General Unifying Theory." Geotechnique, London, England, 46(1), 103-113.

Townsend, F. C., McVay, M. C., Bloomquist, D. G., ve McClimans, S. A. (1989), "Clay Waste Pond Reclamation By Sand-Clay Mix Or Capping." J. Geotech. Engrg., ASCE, 115(11), 1647-1666.

Townsend, F. C., ve McVay, M. C. (1990), "SOA: Large Strain Consolidation Predictions."- Journal of Geotech. Engrg., ASCE, 116(2), 222-243.

Umehara, Y., ve Zen, K.(1982), "Consolidation Characteristics of Dredged Marine Bottom Sediments with High Water Content" Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 22, Number 2, 40-54.

Yao, D.T.C., Znidarcic, D., (1997), User's Manual for Computer Program CONDES0, Prepared for FIPR, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder.

Yong, R. N., Siu, S.K.H., ve Sheeran, D.E. (1983), " On the Stability and Settling of Suspended Soils in Settling Ponds . Part I. Piece-wise Linear Consolidation Analysis of Sediment Layer " Canadian Geotechnical Journal, Volume 20, 817-826.

Yong, R. N., ve Ludwig . C.A., (1984)" Large Strain Consolidation Modelling of Land Subsidence " Proc.Symp.on Geotechnical Aspects of Mass and Materials Transport, Bangkok Thailand, 14-29.

Znidarcic, D. (1982), Laboratory Determination of Consolidation Properties of Cohesive Soil, Doctoral Dissertation, University of Colorado, Boulder, Colorado.

Znidarcic, D., Abu-Hejleh, A. N., Fairbanks, T., ve Robertson, A.(1992), "Seepage Induced Consolidation Test, Equipment Description and user's manuel." Rep. Prepared for FIPR, Vol:1, Dep.of Civ. Engr.

Znidarcic, D., Croce, P., Pane, V., Ko, H.-Y., ve Olsen, H. W. Schiffman, R. L., (1984), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: Part III. Existing Testing Procedures and Analyses" Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol:7, No:3 123-133.

Znidarcic, D., Croce, P., Pane, V., Ko, H.-Y., Olsen, H. W., ve Schiffman, R. L. (1984), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: III. Existing testing procedures and analyses," Geotech. Testing J., 7(3), 123-133.

Znidarcic, D., Liu, J. C., (1989), "Consolidation characteristics determination for dredged materials." Proc., 22 nd Annu. Dredging Seminear, Ctr. For dredged Studies, Texas A&M Univ., College Station, Tex., 45-65.

Znidarcic, D., Schiffman, R. L., Pane, V., Croce, P., Ko, H.Y., ve Olsen, H. W. (1986), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: Part V. constant rate of deformation testing and analysis." Geotechnique, London, England, 36(2), 227-237.

EKLER

EKİSİZİNGİ ETKİLİ KONSOLIDASYON DENEY SONUÇLARI

Ek 1 Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

Ek 2 Haliç Kili Deney No:1 SICTA Programı Deney Verileri

DENEY 2					
Etkililik Gerilme (kPa)	h (cm)	AB/D*(1-u _v)	Statik Devam (g)	Uzunu (g)	k (cm/yıl)
0.01	0.042	0.02	2.2	2.2	
0.5	0.0195	2.25	2.25	2.25	
1.08	0.0182	3.24	2.25	2.25	
1.65	0.0168	5.24	2.25	2.25	
5	0.0154	6.04	2.25	2.25	9.72E-08
5	0.0175	6.24	2.25	2.25	9.72E-08
25	0.01	6.78	1.17	1.17	6.85E-08
25	0.01	6.78	1.17	1.17	6.85E-08



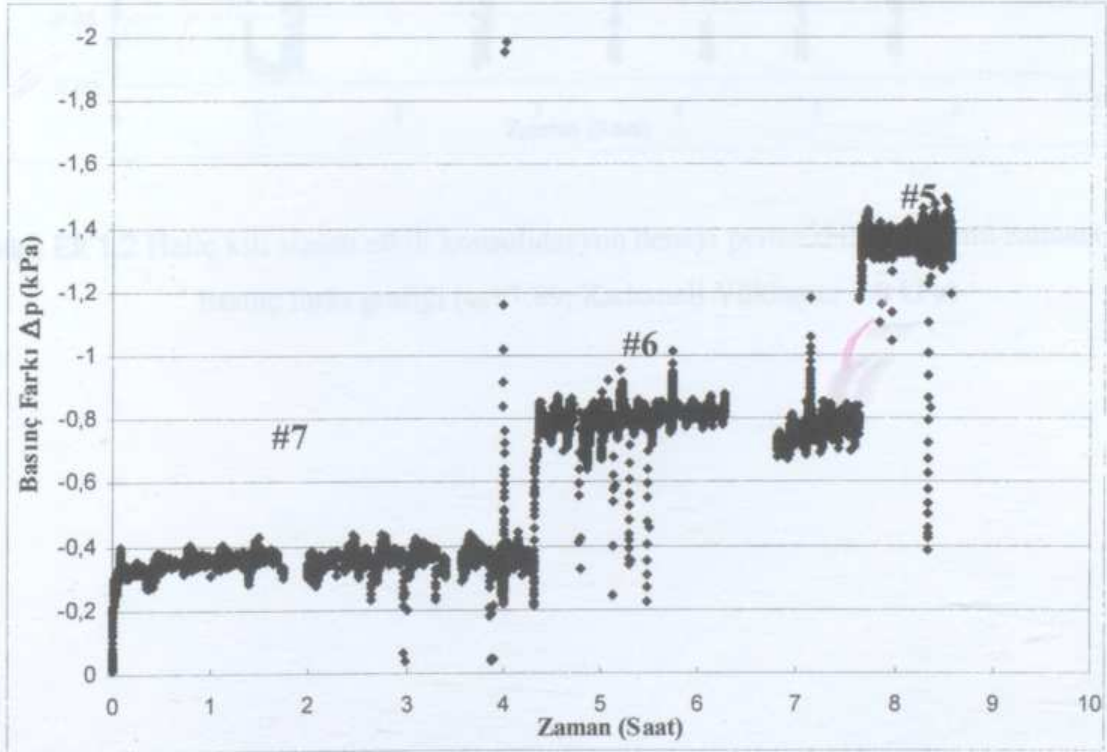
Sayı 18.14 Haliç Kili Deney No:1 SICTA Programı Deney Verileri

Deney No:2

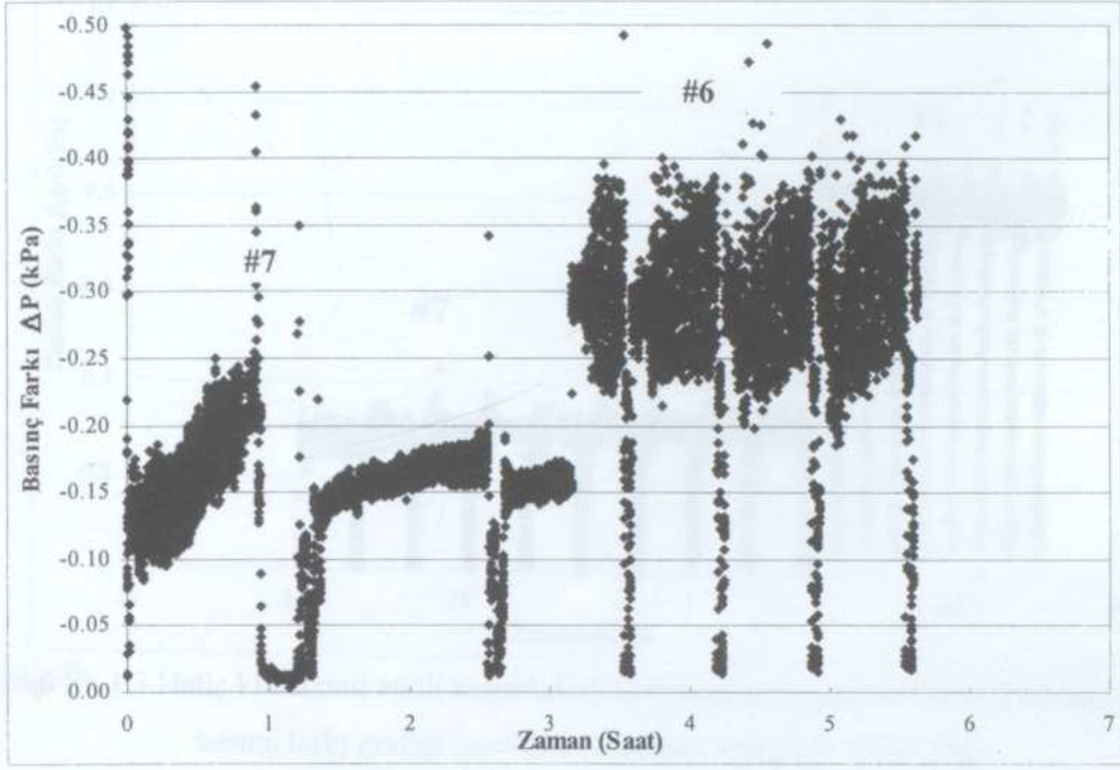
EK1:SIZINTI ETKİLİ KONSOLİDASYON DENEY SONUÇLARI

Çizelge Ek 1.1 Haliç kili $e_{00}= 7.89$ (Deney No:2) deney sonuçları

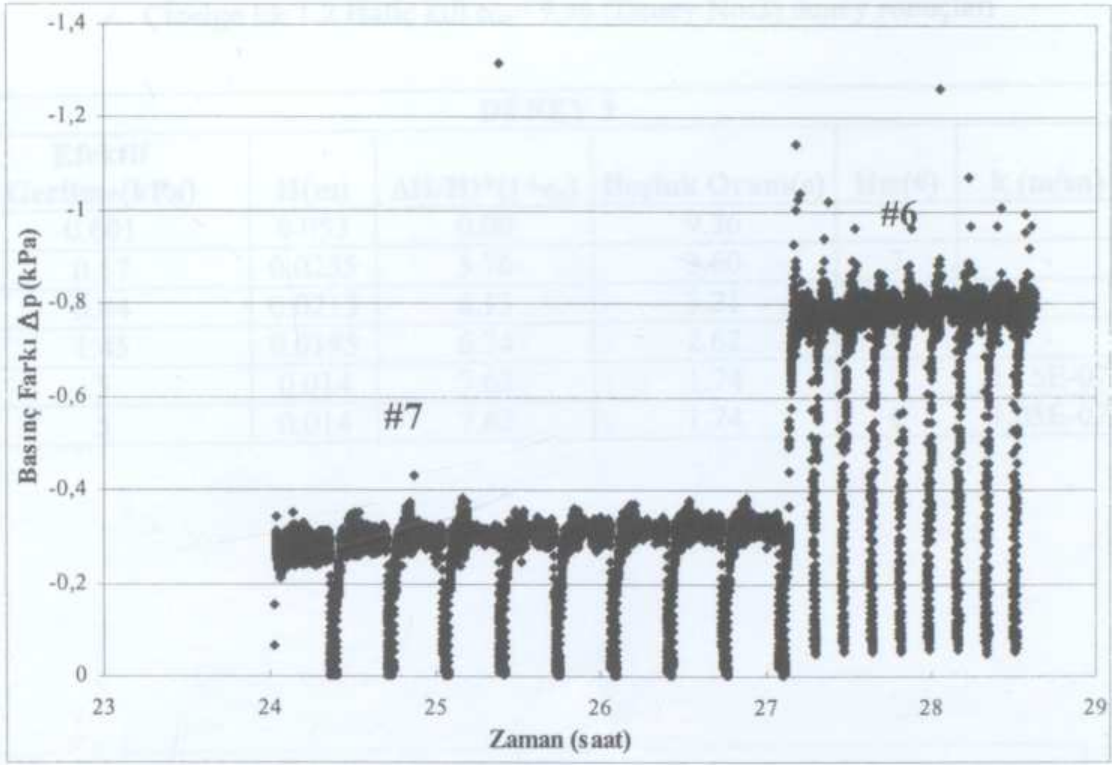
DENEY 2					
Efektif Gerilme(kPa)	H(m)	$\Delta H/H)*(1+e_0)$	Boşluk Oranı(e)	Hız(#)	k (m/sn)
0.001	0.042	0.00	7.89		-
0.63	0.0195	4.76	3.13	7	-
1.08	0.0182	5.04	2.85	6	-
1.63	0.0168	5.34	2.56	5	-
5	0.0135	6.04	1.86	7	9.72E-08
5	0.0135	6.04	1.86	6	9.72E-08
25	0.01	6.78	1.117	7	6.85E-08
25	0.01	6.78	1.117	6	6.85E-08



Şekil Ek 1.1 Haliç kili $e_{00}= 7.89$ SEK deneyi zamana bağılı basmaç farkı değışimi grafiğı
(Deney No:2)



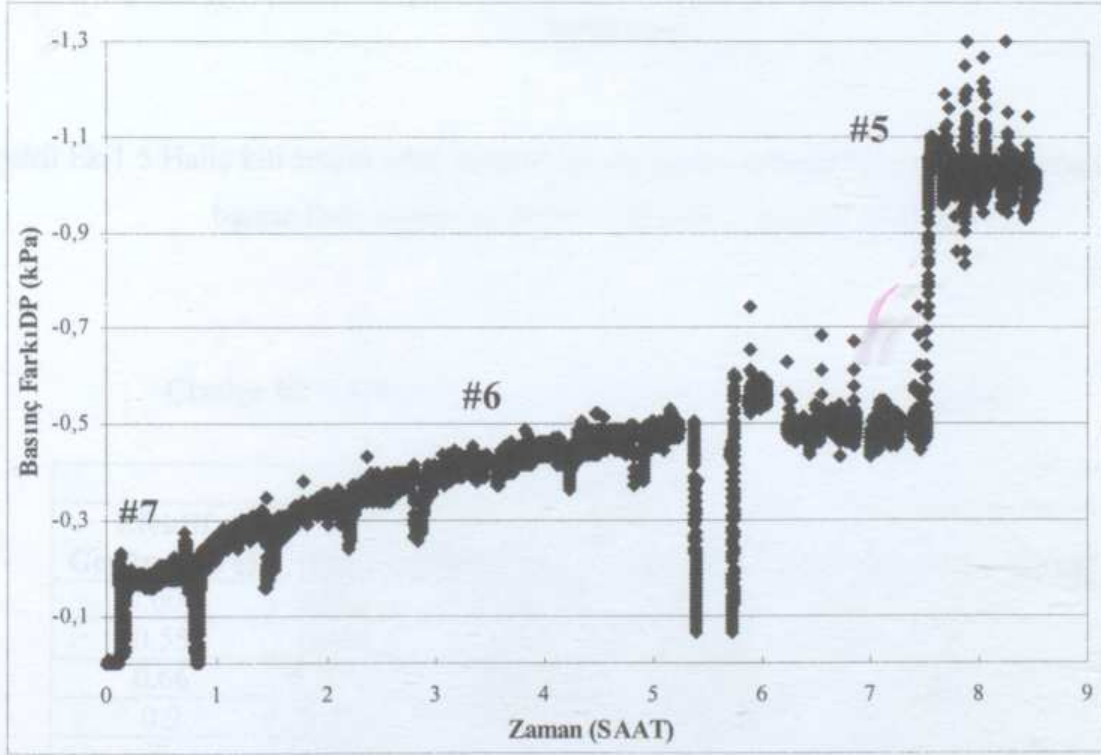
Şekil Ek 1.2 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=7.89$; Kademeli Yükleme: 5.0 kPa)

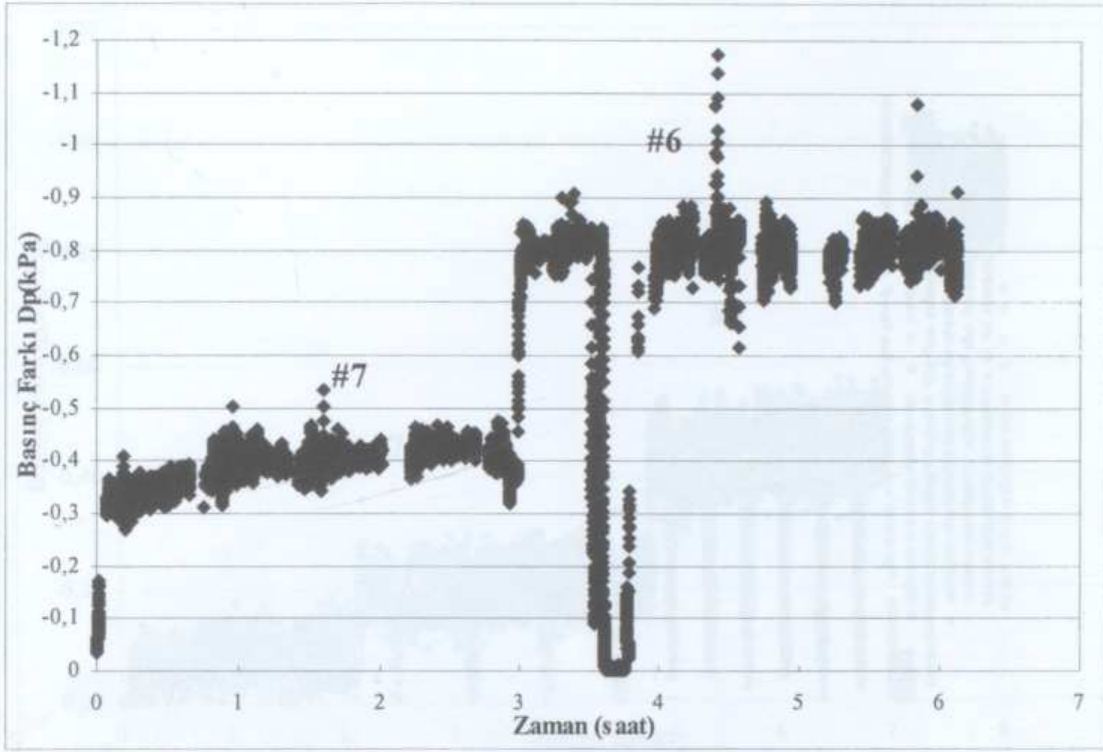


Şekil Ek 1.3 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=7.89$; Kademeli Yükleme: 25.0 kPa)

Çizelge Ek 1.2 Haliç kili $e_{00}= 9.36$ (Deney No:3) deney sonuçları

DENEY 3					
Efektif Gerilme(kPa)	H(m)	$\Delta H/H) \cdot (1+e_0)$	Boşluk Oranı(e)	Hız(#)	k (m/sn)
0.001	0.053	0.00	9.36		
0.57	0.0235	5.76	3.60	7	-
0.84	0.0215	6.15	3.21	6	-
1.45	0.0185	6.74	2.62	5	-
5	0.014	7.62	1.74	7	1.15E-07
5	0.014	7.62	1.74	6	1.05E-07

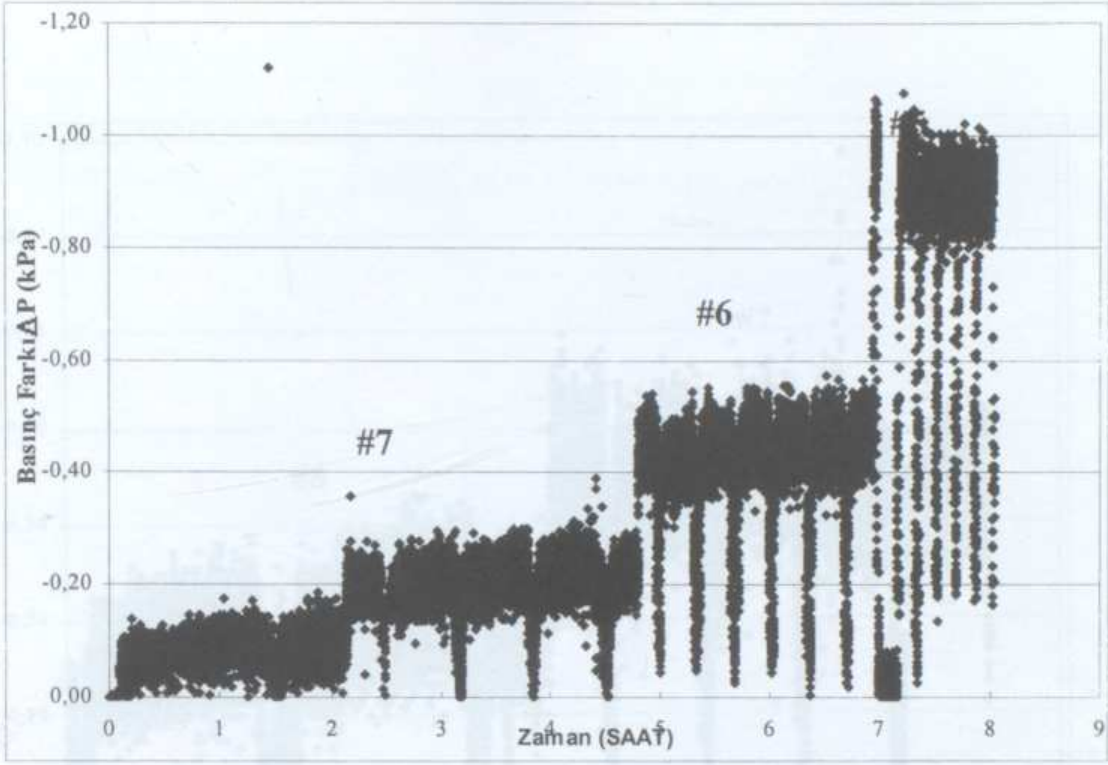
Şekil Ek 1.4 Haliç kili $e_{00}= 9.36$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:3)



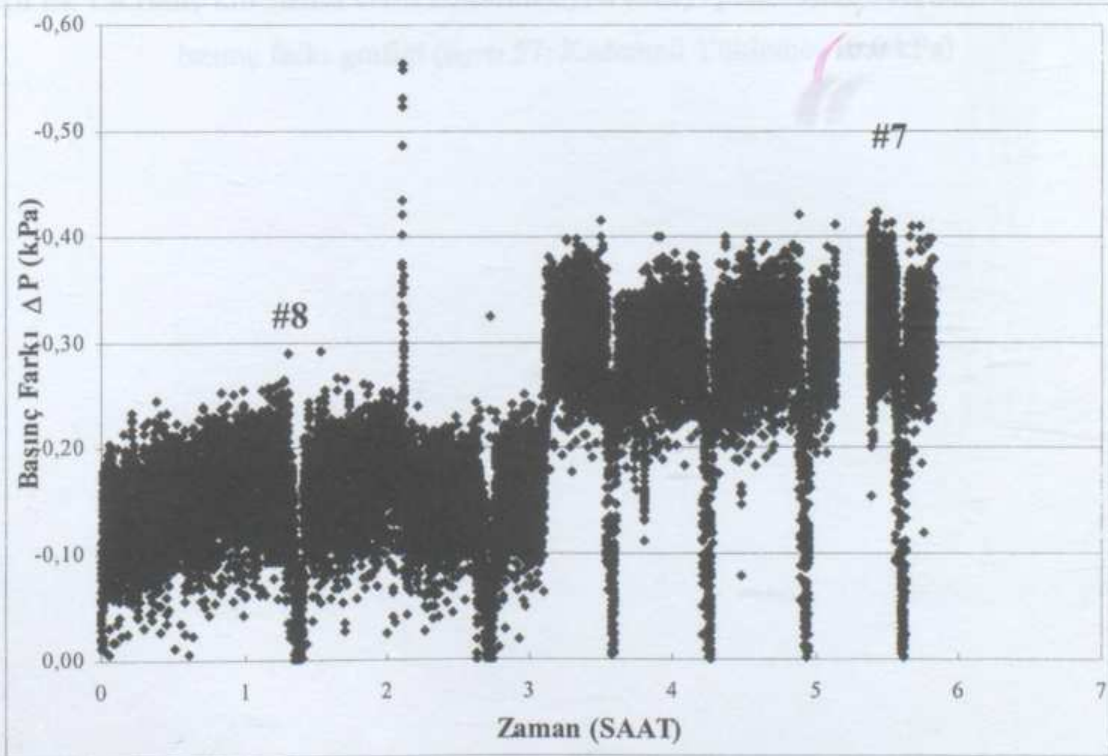
Şekil Ek 1.5 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=9.36$; Kademeli Yükleme: 5.0 kPa)

Çizelge Ek 1.3 Haliç kili $e_{00}= 6.57$ (Deney No:4) deney sonuçları

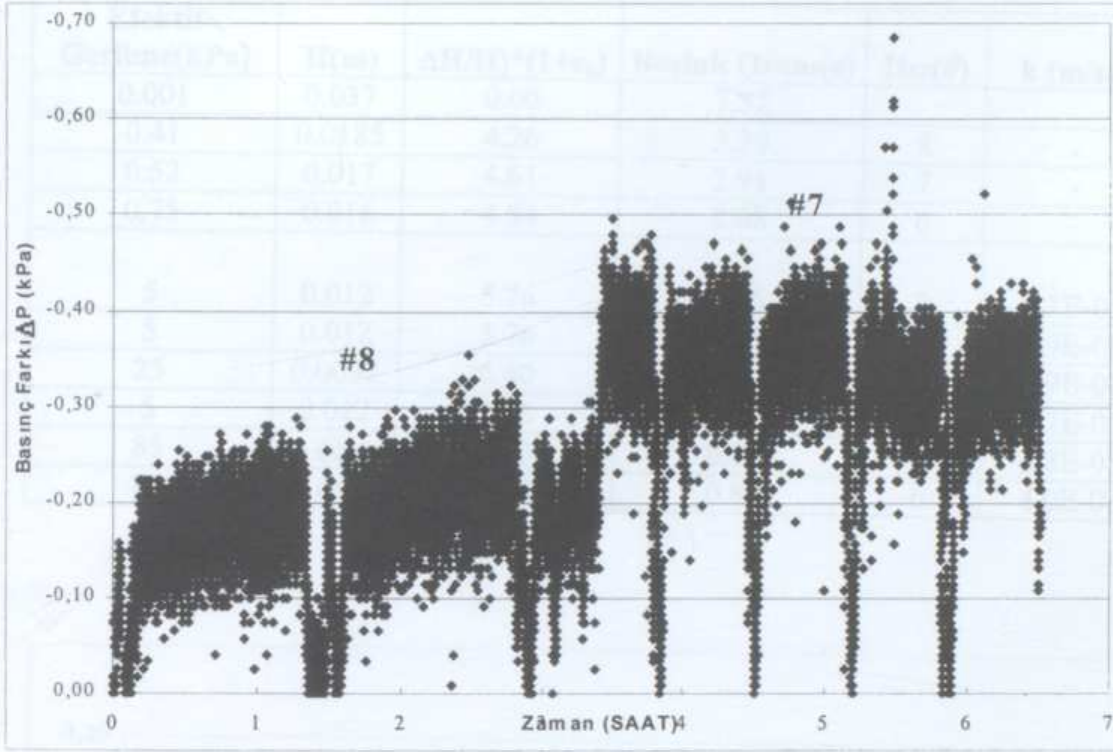
DENEY 4					
Efektif Gerilme(kPa)	H(m)	$\Delta H/H) \cdot (1+e_0)$	Boşluk Oranı(e)	Hız(#)	k (m/sn)
0.001	0.055	0.00	6.57		
0.55	0.028	3.72	2.85	7	-
0.66	0.0275	3.79	2.79	6	-
0.9	0.026	3.99	2.58	5	-
5	0.0204	4.76	1.81	8	1.21E-07
5	0.0204	4.76	1.81	7	1.39E-07
10	0.0175	5.16	1.41	8	8.6E-08
10	0.0175	5.16	1.41	7	1.01E-07



Şekil Ek 1.6 Haliç kili $e_{00}=6.57$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği
(Deney No:4)



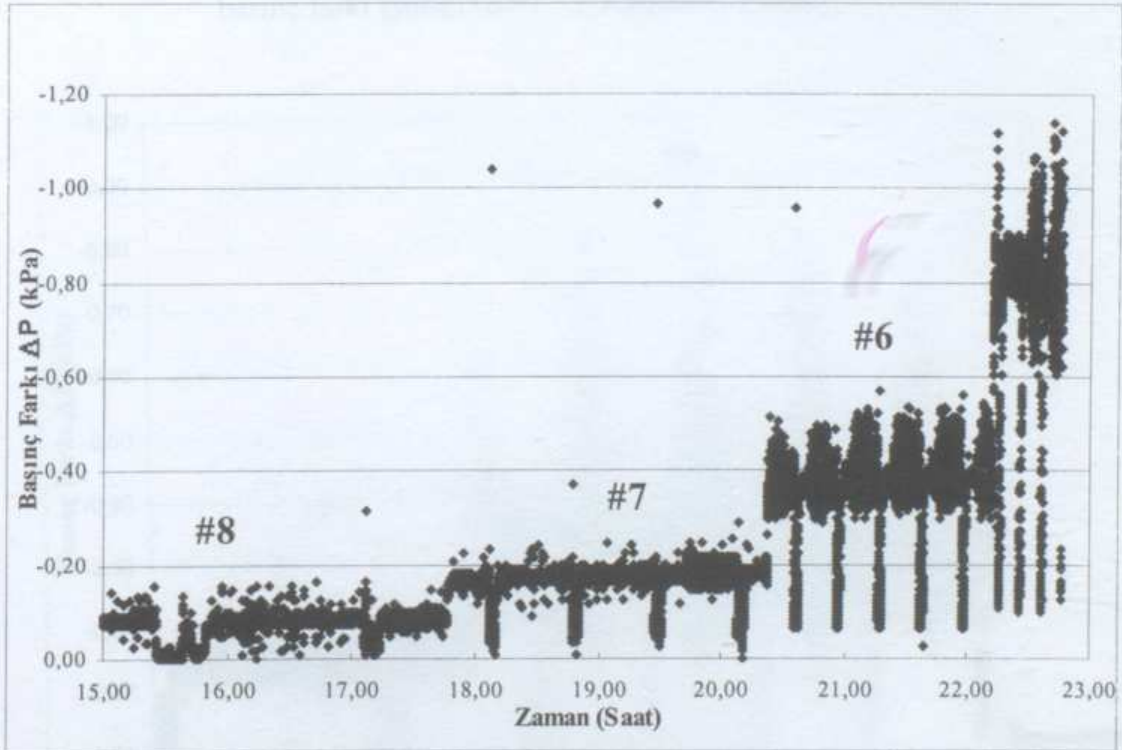
Şekil Ek 1.7 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=6.57$; Kademeli Yükleme: 5.0 kPa)

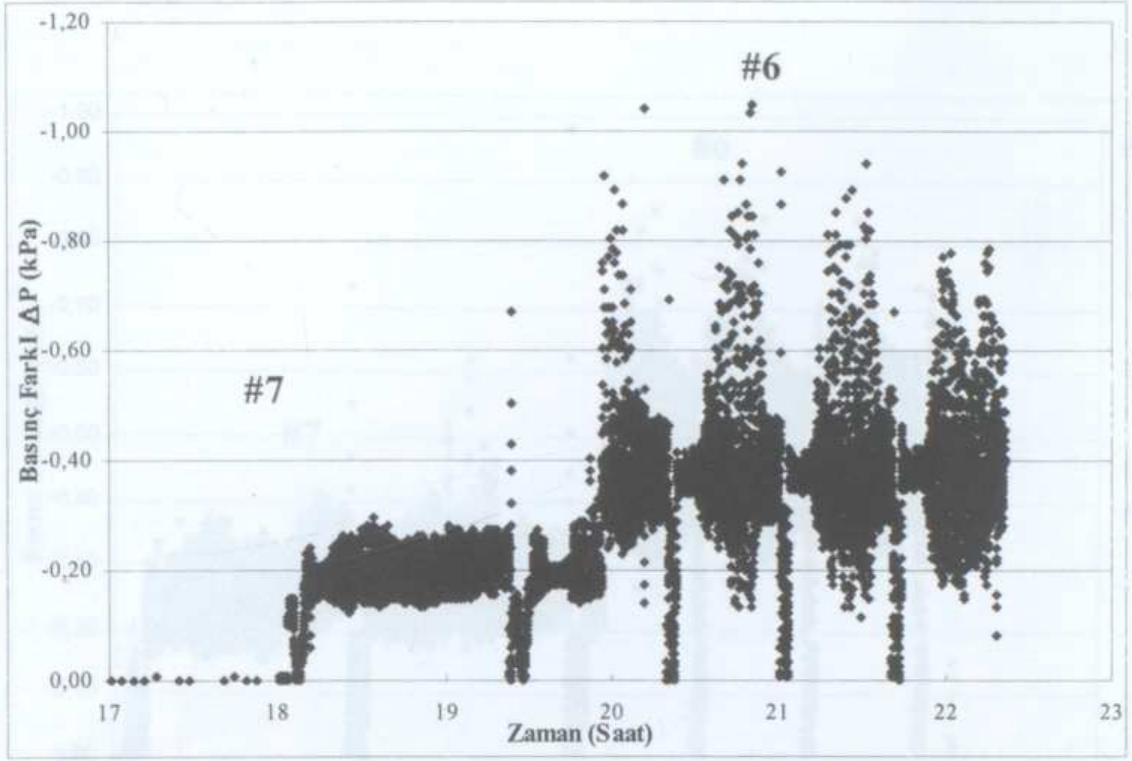


Şekil Ek 1.8 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=6.57$; Kademeli Yükleme: 10.0 kPa)

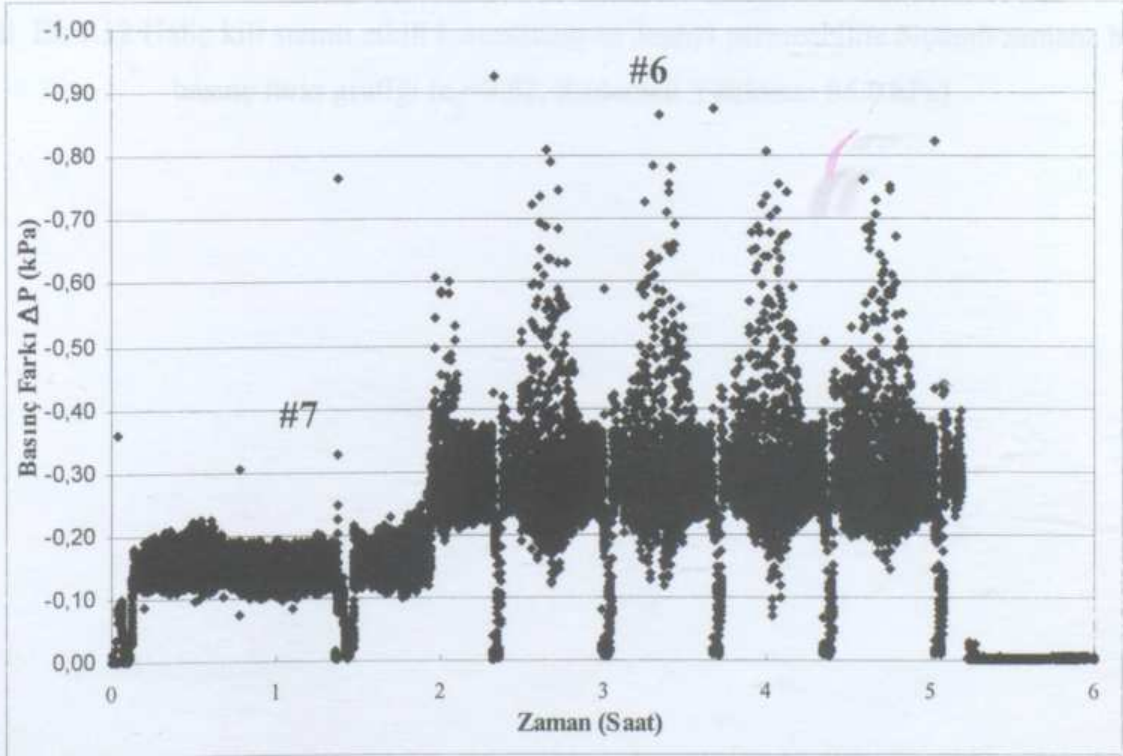
Çizelge Ek 1.4 Haliç kili $e_{00}=7.52$ (Deney No:5) deney sonuçları

DENEY 5					
Efektif Gerilme(kPa)	H(m)	$\Delta H/H \cdot (1+e_0)$	Boşluk Oranı(e)	Hız(#)	k (m/sn)
0.001	0.037	0.00	7.52		
0.41	0.0185	4.26	3.26	8	-
0.52	0.017	4.61	2.91	7	-
0.75	0.016	4.84	2.68	6	-
5	0.012	5.76	1.76	7	1.1E-07
5	0.012	5.76	1.76	6	8.9E-08
25	0.0092	6.40	1.12	7	5.9E-08
5	0.012	5.76	1.12	6	6.2E-08
85	0.0082	6.63	0.89	7	3.8E-08
85	0.0082	6.63	0.89	6	4.0E-08

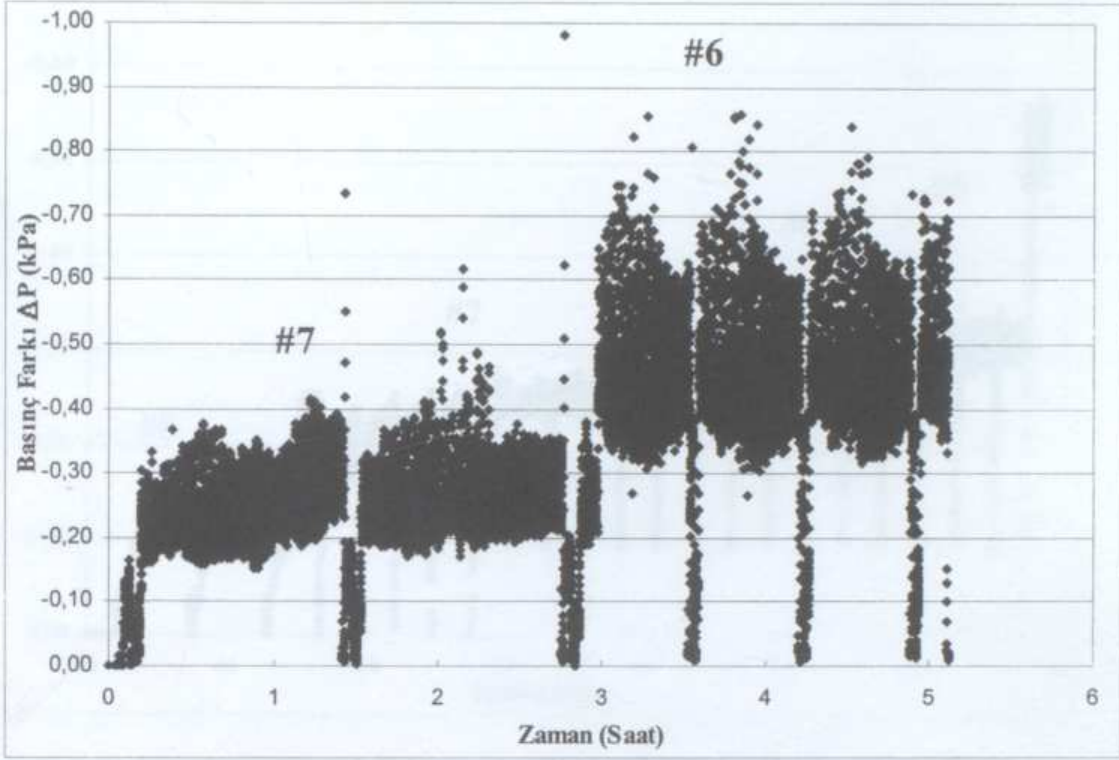
Şekil Ek 1.9 Haliç kili $e_{00}=7.52$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:5)



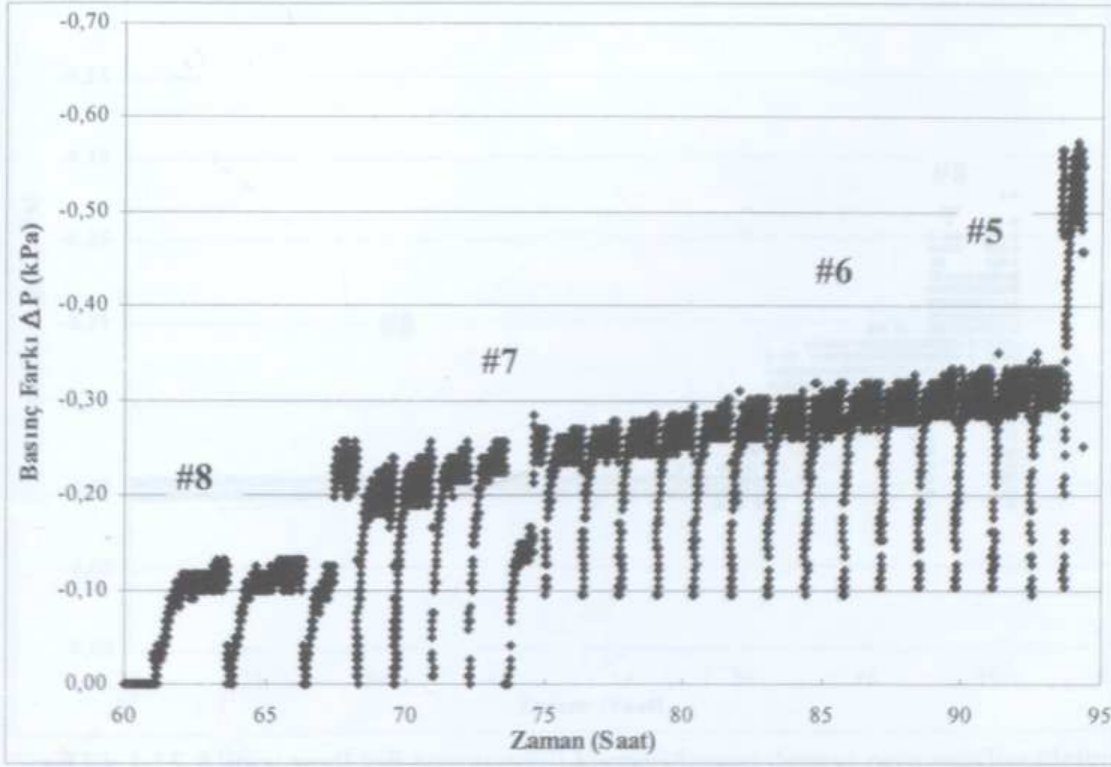
Şekil Ek 1.10 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=7.52$; Kademeli Yükleme: 5.0 kPa)



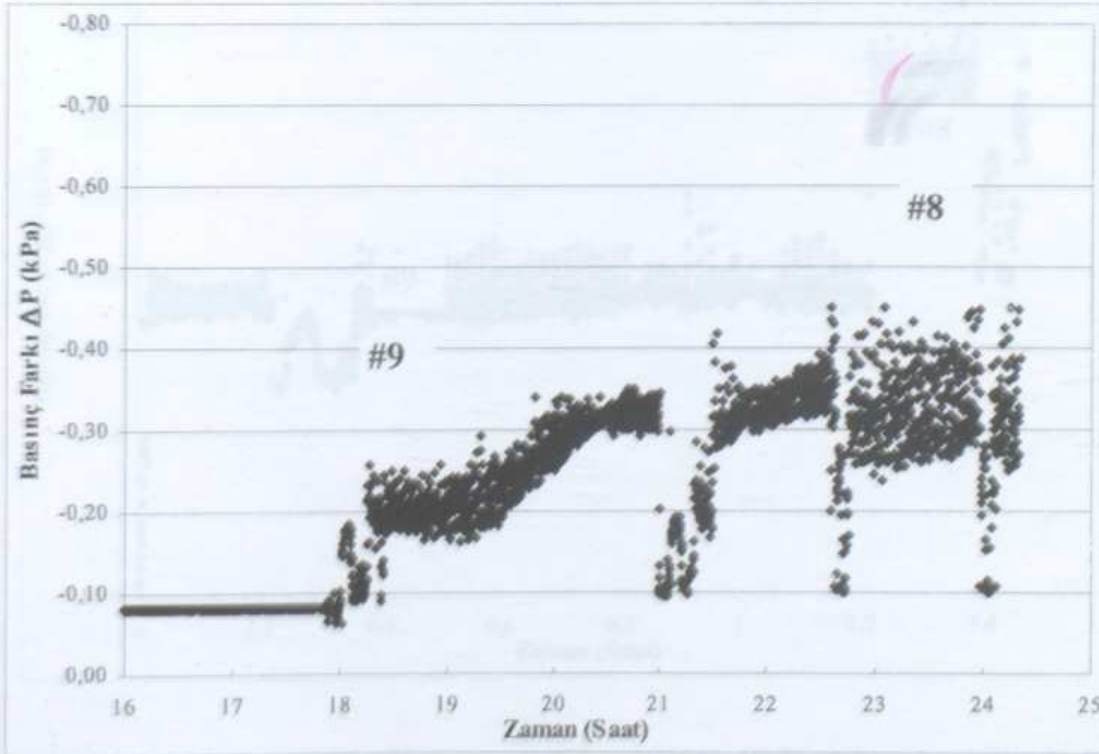
Şekil Ek 1.11 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=7.52$; Kademeli Yükleme: 25.0 kPa)



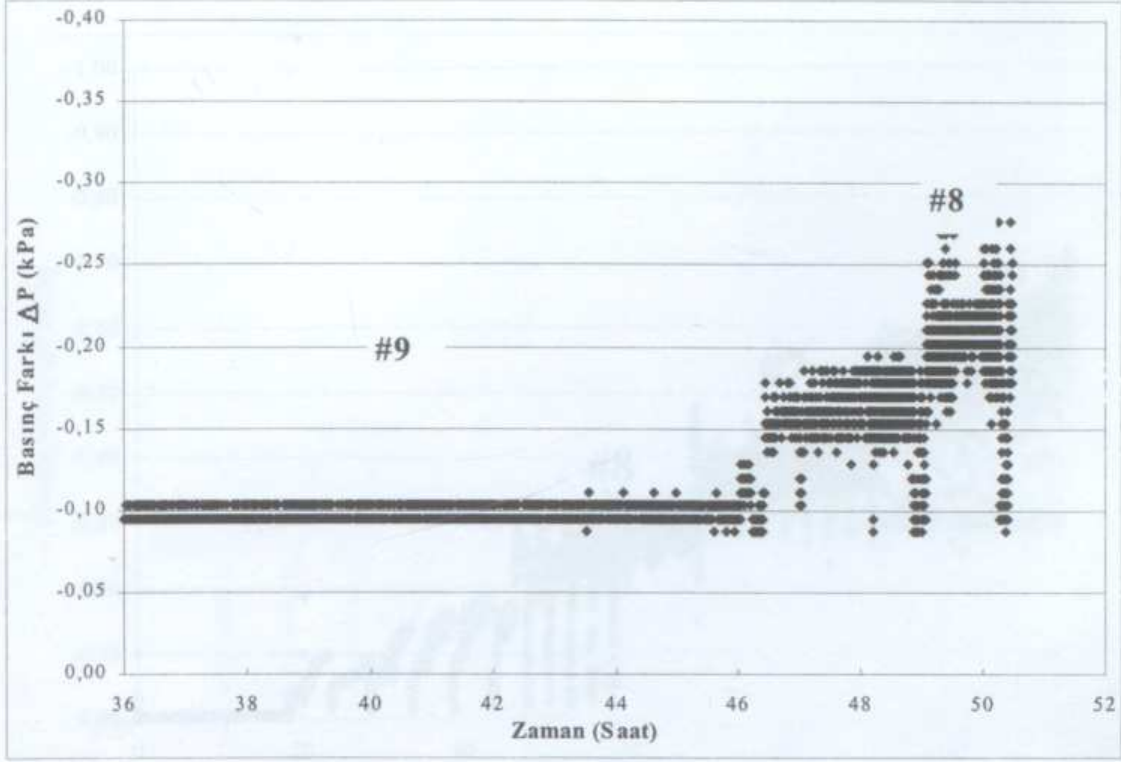
Şekil Ek 1.12 Haliç kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı grafiği ($e_0=7.52$; Kademeli Yükleme: 85.0 kPa)



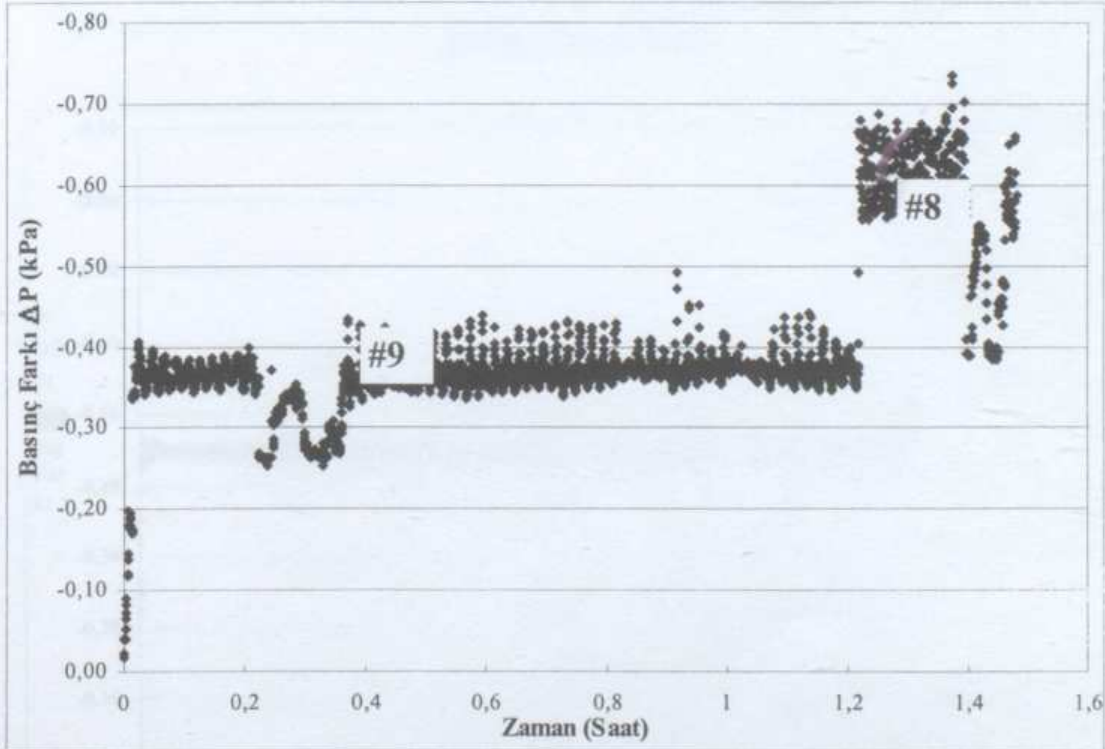
Şekil Ek 1.13 Alibey yeşil kili $e_{00}=2.94$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:6)



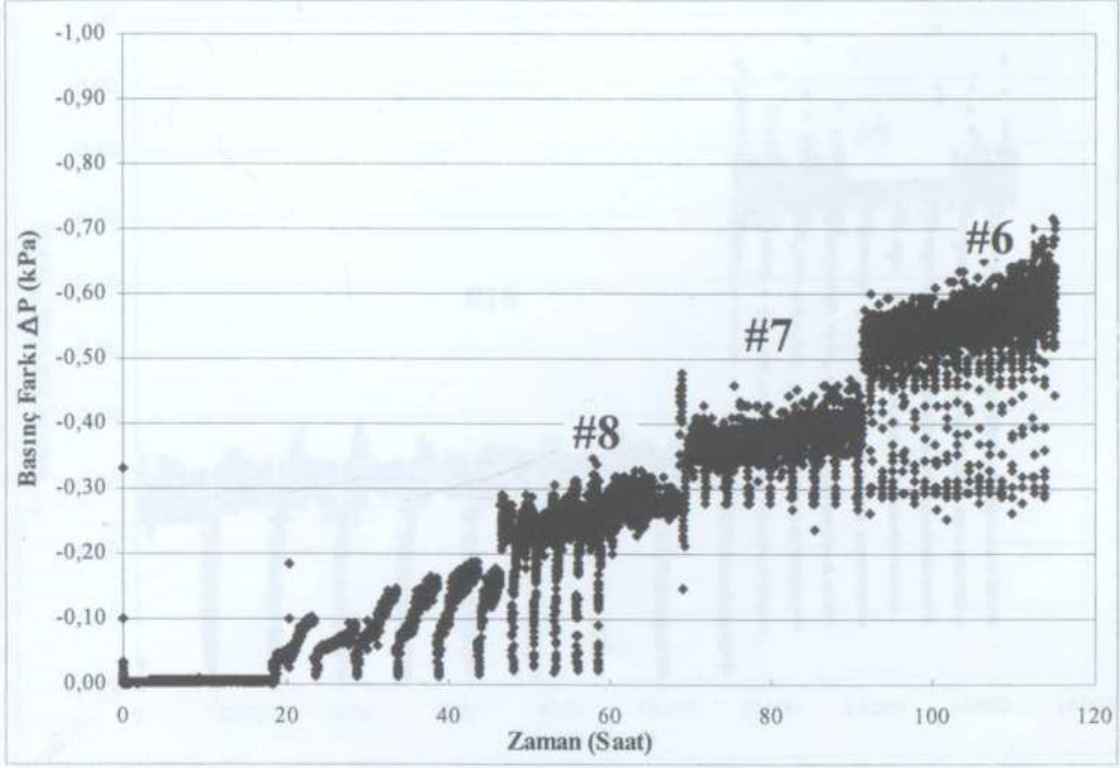
Şekil Ek 1.14 Alibey yeşil sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=2.94$, Kademeli Yükleme: 40 kPa)



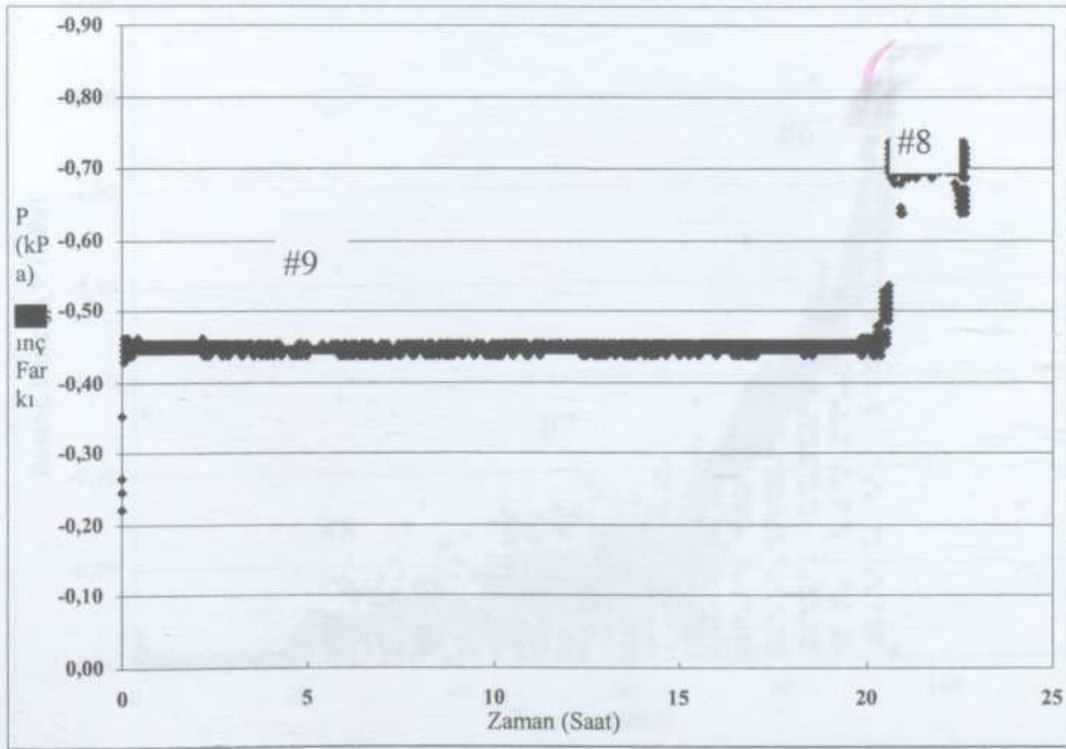
Şekil Ek 1.15 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}= 2.94$,Kademeli Yükleme:100 kPa)



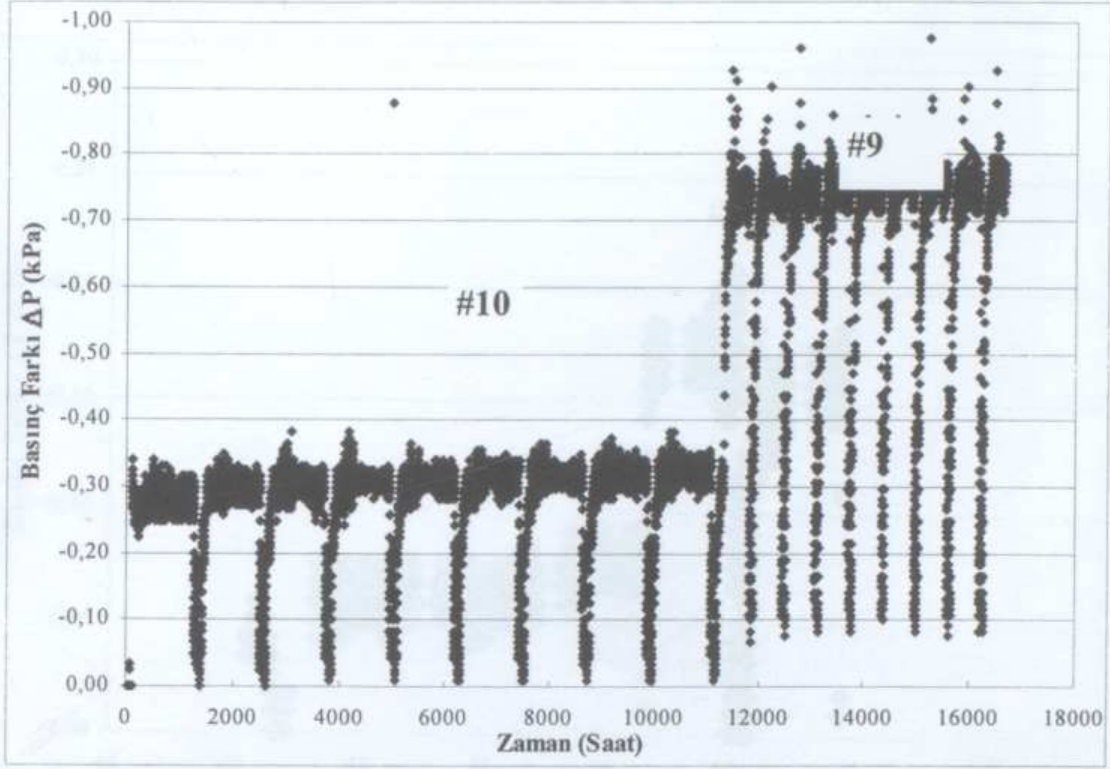
Şekil Ek 1.16 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}= 2.94$,Kademeli Yükleme:200 kPa)



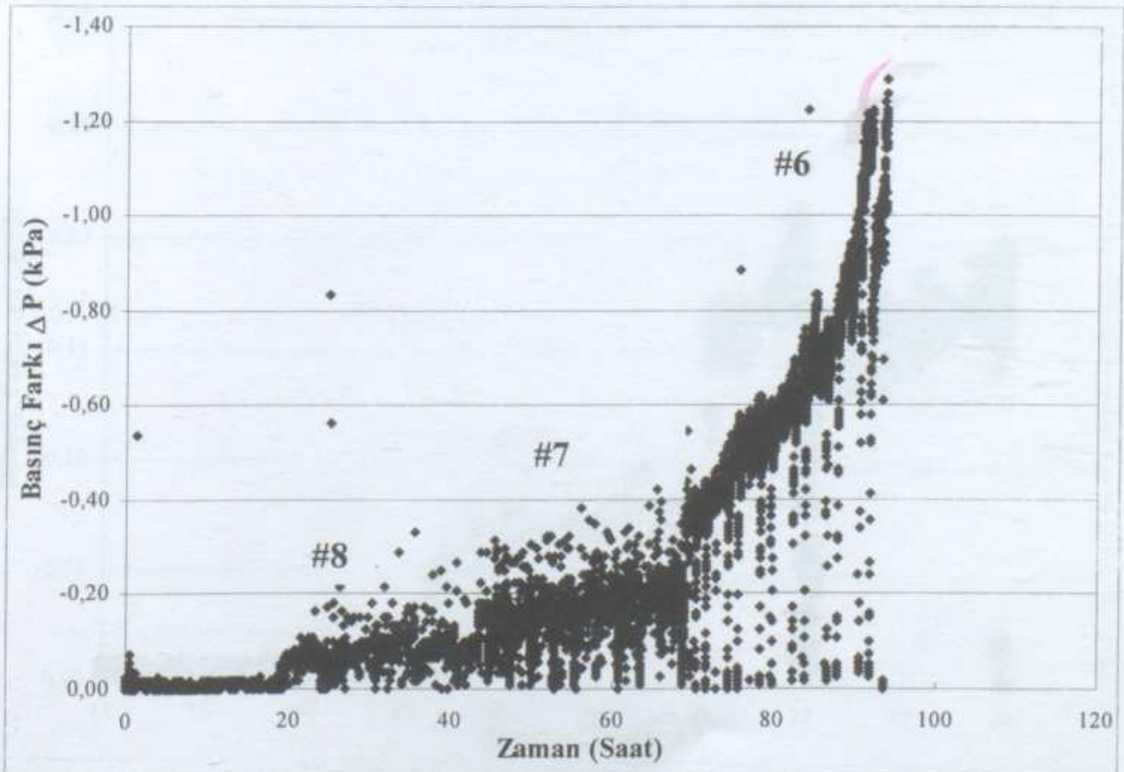
Şekil Ek 1.17 Alibey yeşil kili $e_{00}=4.60$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:7)



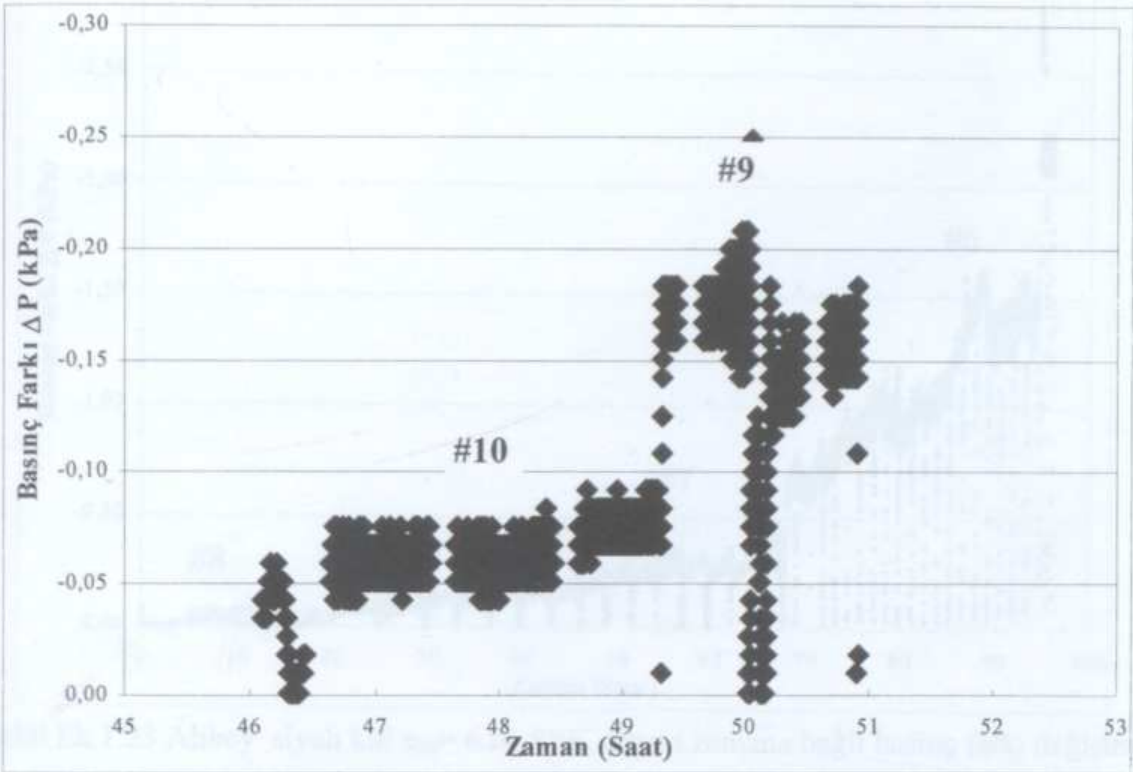
Şekil Ek 1.18 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=4.60$,Kademeli Yükleme:40 kPa)



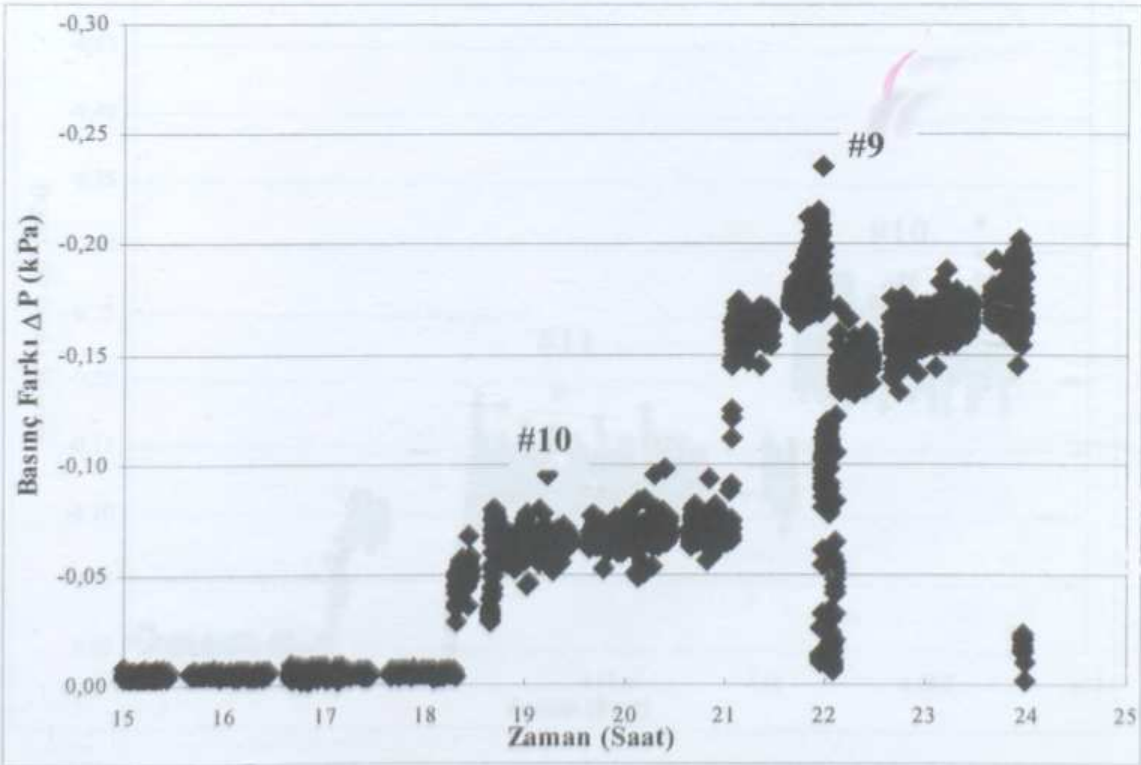
Şekil Ek 1.19 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=4.60$, Kademeli Yükleme: 80 kPa)



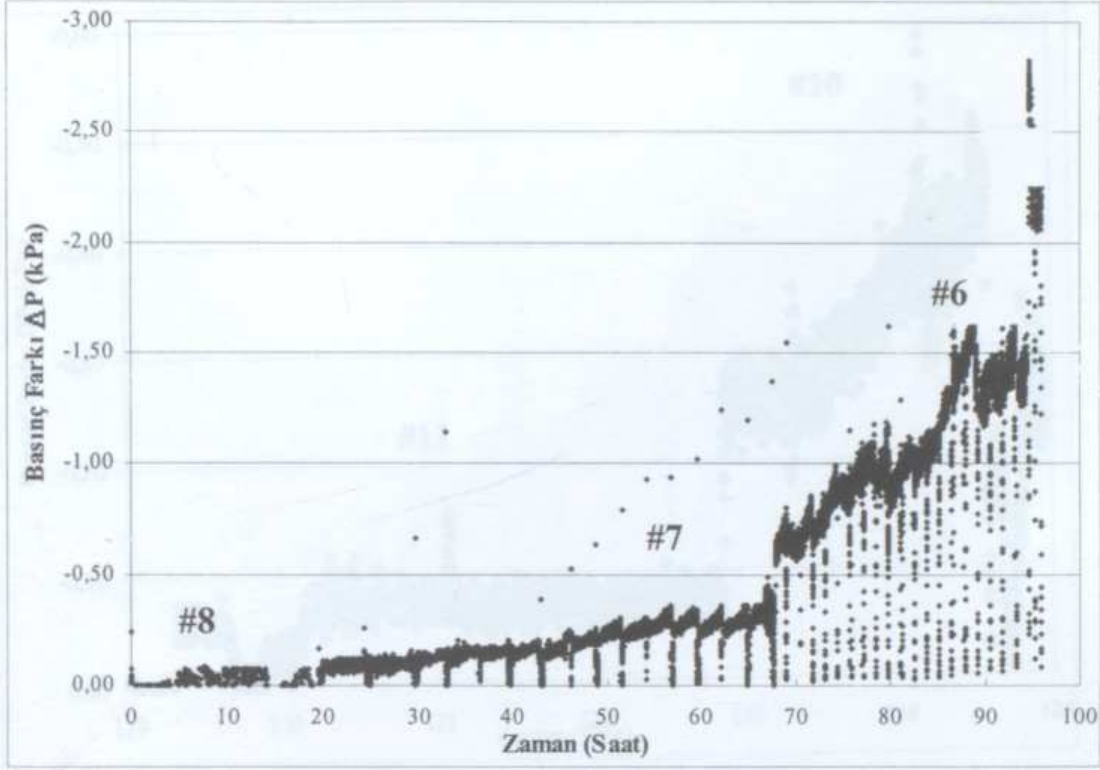
Şekil Ek 1.20 Alibey yeşil kili $e_{00}= 8.21$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:8)



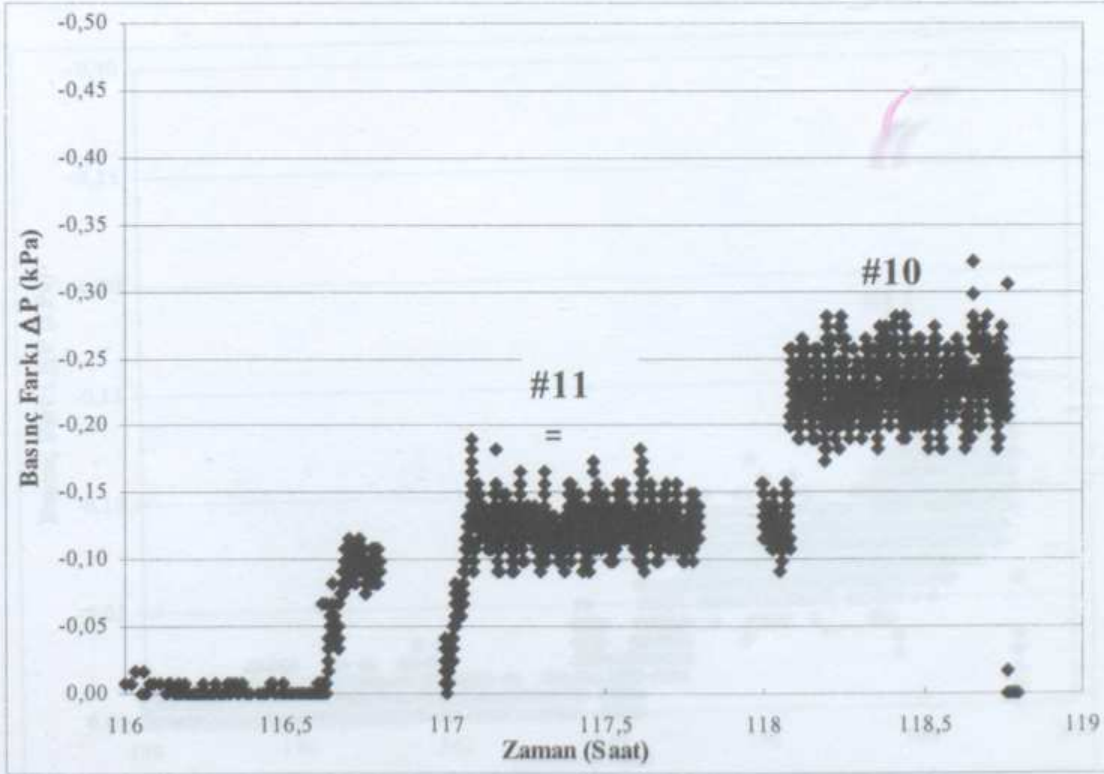
Şekil Ek 1.21 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=8.21$,Kademeli Yükleme:40 kPa)



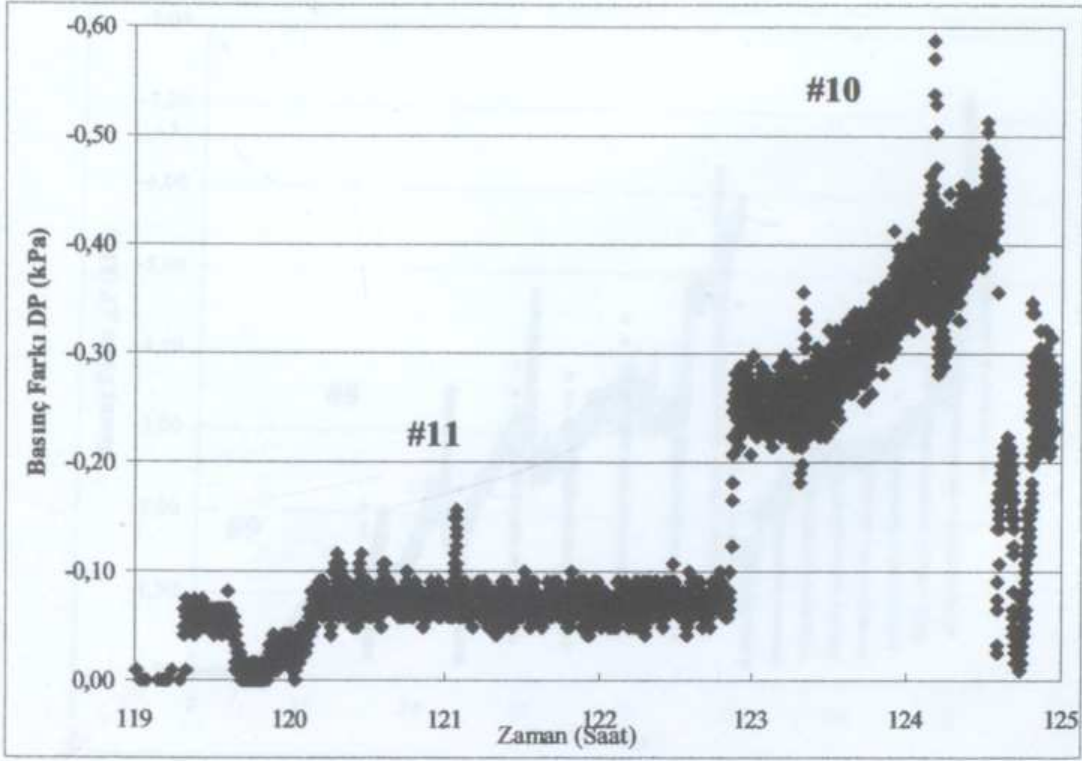
Şekil Ek 1.22 Alibey yeşil kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=8.21$,Kademeli Yükleme:60 kPa)



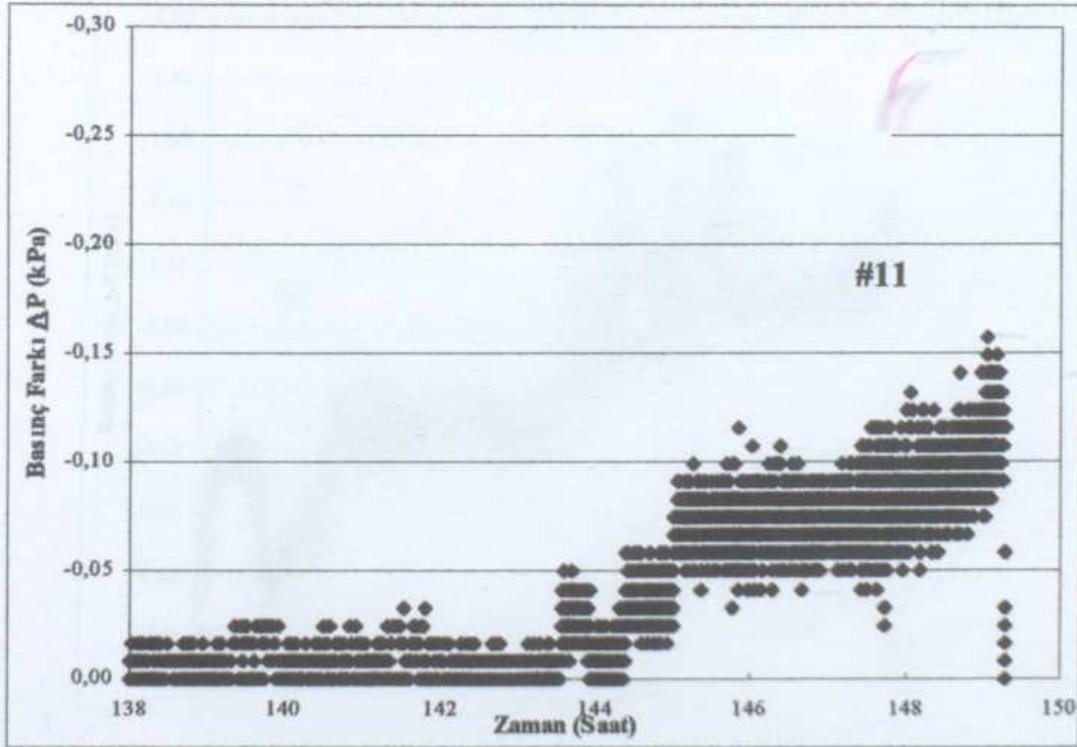
Şekil Ek 1.23 Alibey siyah kili $e_{00} = 6.06$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:9)



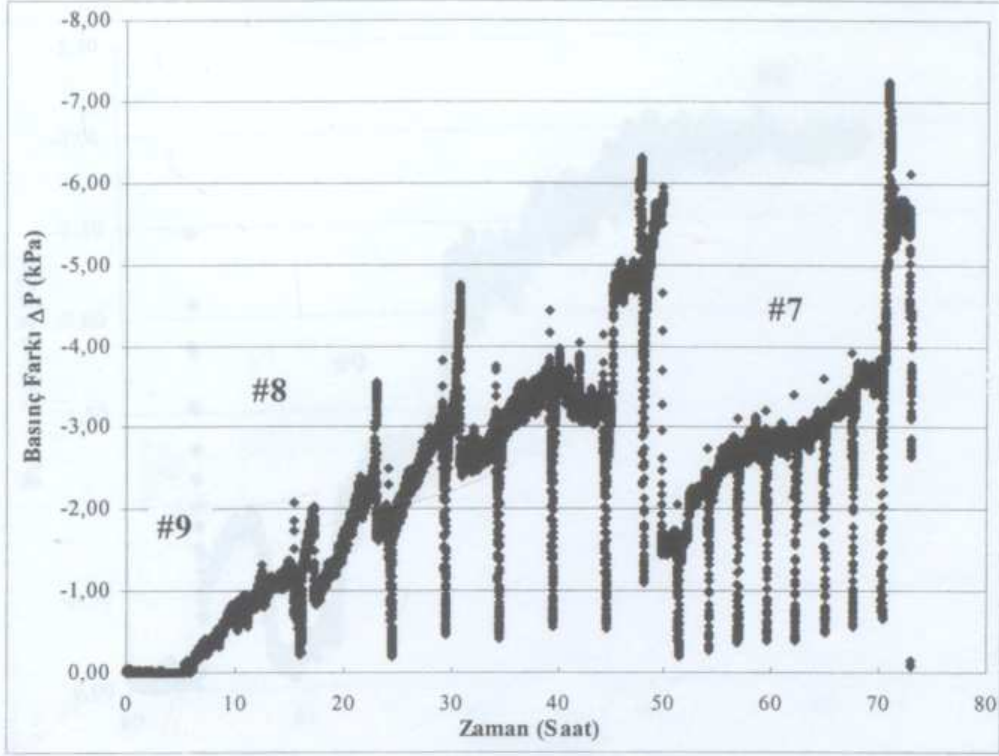
Şekil Ek 1.24 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00} = 6.06$, Kademeli Yükleme: 40 kPa)



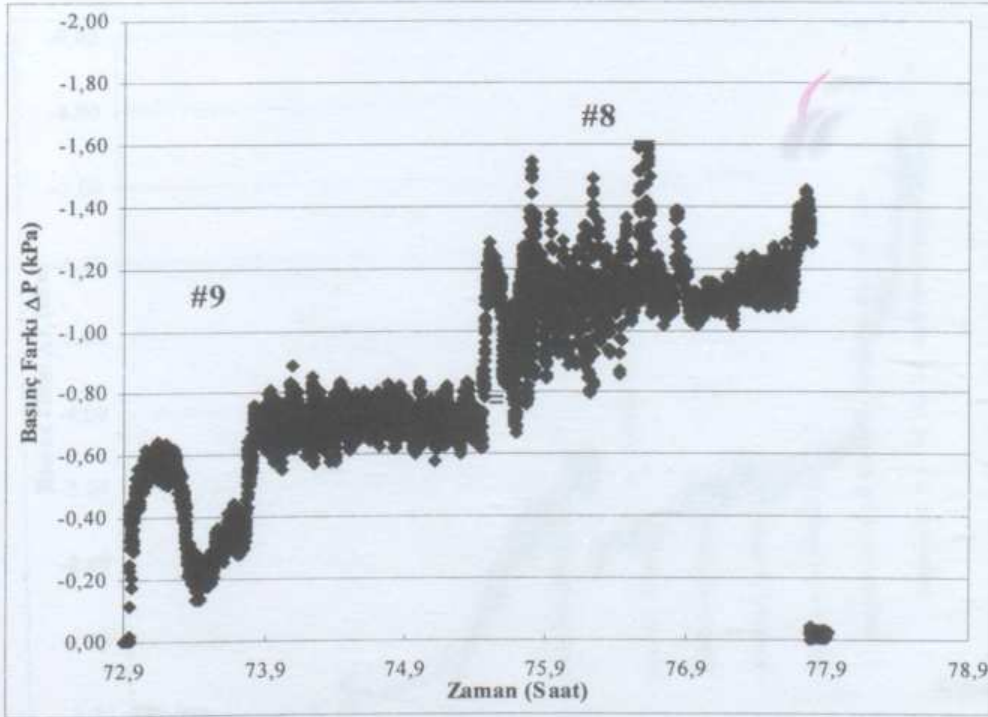
Şekil Ek 1.25 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=6.06$, Kademeli Yükleme: 80 kPa)



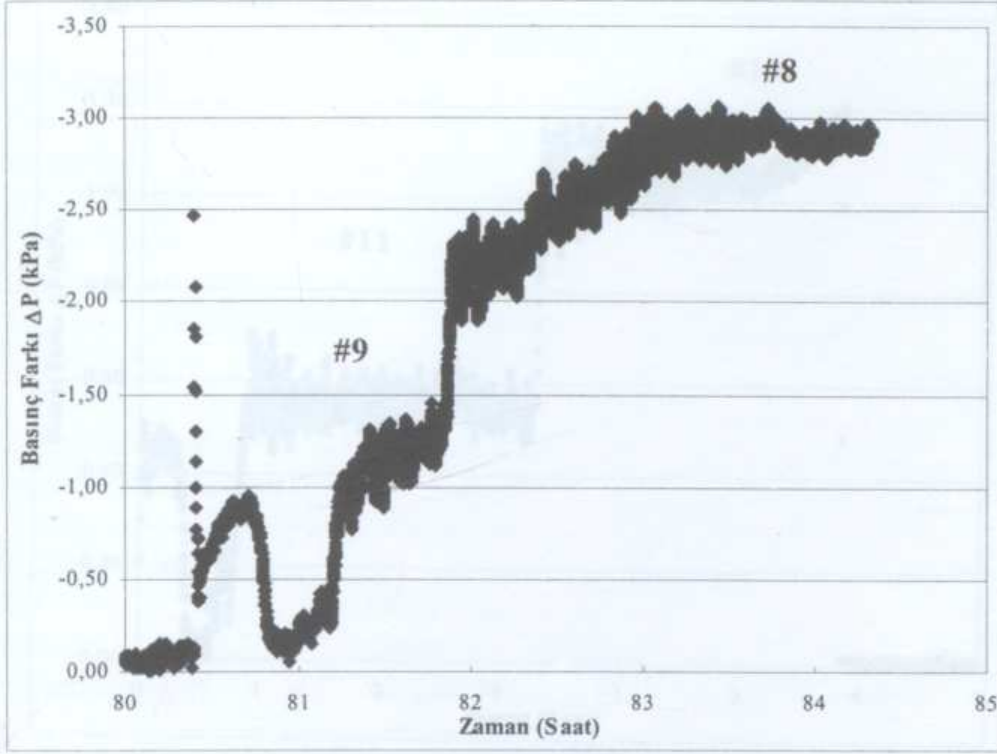
Şekil Ek 1.26 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=6.06$, Kademeli Yükleme: 100 kPa)



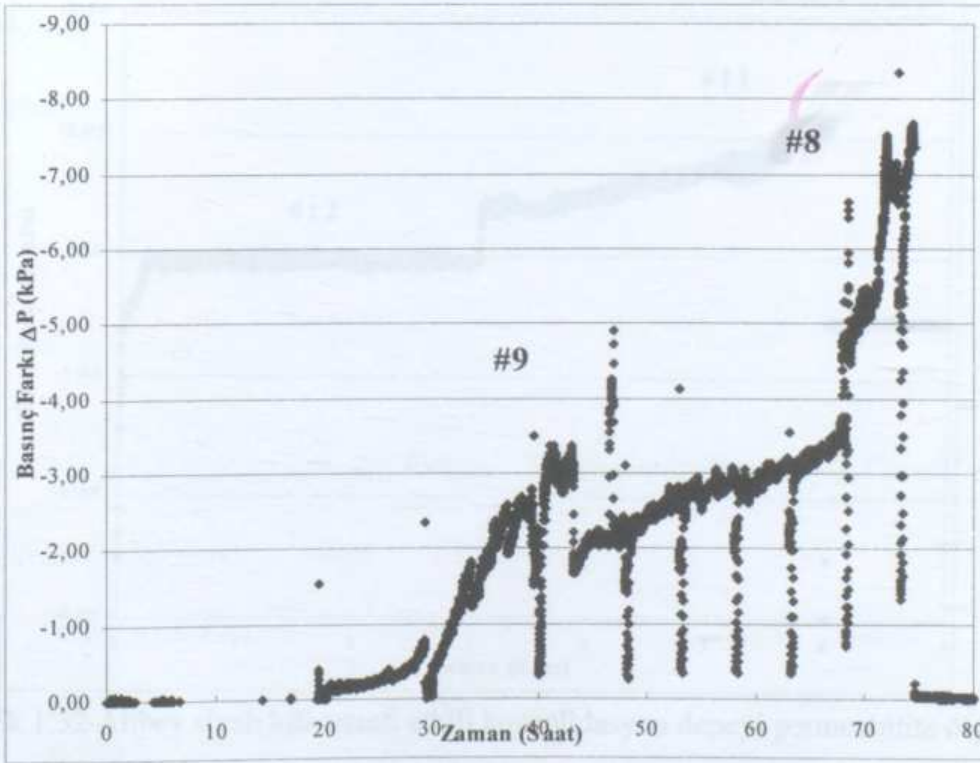
Şekil Ek 1.27 Alibey siyah kili $e_{00}= 5.16$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:10)



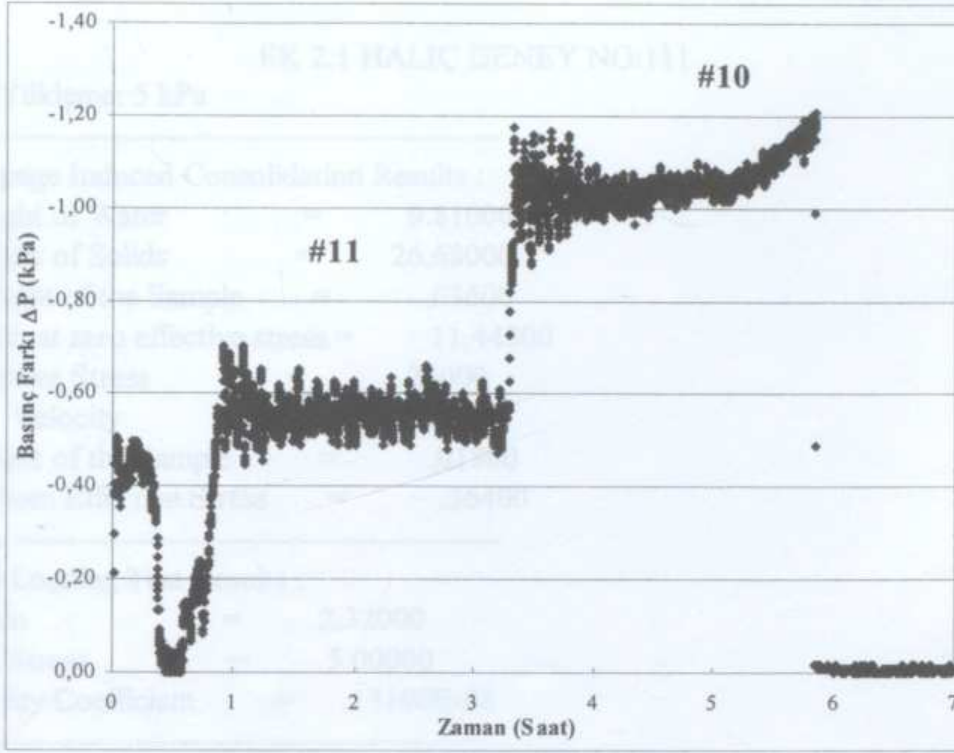
Şekil Ek 1.28 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=5.16$,Kademeli Yükleme:80 kPa)



Şekil Ek 1.29 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=5.16$,Kademeli Yükleme:100 kPa)



Şekil Ek 1.30 Alibey siyah kili $e_{00}= 3.00$ SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği (Deney No:11)



Şekil Ek 1.31 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=3.00$,Kademeli Yükleme:40 kPa)



Şekil Ek 1.32 Alibey siyah kili sızıntı etkili konsolidasyon deneyi permeabilite ölçümü zamana bağlı basınç farkı değişimi grafiği ($e_{00}=3.00$,Kademeli Yükleme:200 kPa)

EK 2. HALIÇ KİLİ DENEY NO:1 SICTA PROGRAMI VERİLERİ

EK 2.1 HALIÇ DENEY NO:111

Kademeli Yükleme: 5 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.26530E-06
Final Height of the Sample	=	.01800
Final Bottom Effective Stress	=	.36400

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	2.32000
Effective Stress	=	5.00000
Permeability Coefficient	=	.13100E-06

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.74694
Parameter B	=	-.29699
Parameter Z	=	.02332
Parameter C	=	.22355E-07
Parameter D	=	2.10100
Number of Iterations	=	6

Total Normalized Difference = .33603E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	5.507	.00000	.01844
2	5.500	.00047	.01797
3	5.493	.00094	.01750
4	5.486	.00141	.01703
5	5.478	.00188	.01656
6	5.471	.00235	.01609
7	5.464	.00282	.01562

8	5.457	.00328	.01516
9	5.450	.00375	.01469
10	5.443	.00422	.01422
11	5.436	.00468	.01376
12	5.429	.00515	.01329
13	5.423	.00561	.01283
14	5.416	.00608	.01236
15	5.409	.00654	.01190
16	5.402	.00700	.01144
17	5.396	.00747	.01097
18	5.389	.00793	.01051
19	5.382	.00839	.01005
20	5.376	.00885	.00959
21	5.369	.00931	.00913
22	5.363	.00978	.00866
23	5.356	.01024	.00820
24	5.350	.01069	.00774
25	5.343	.01115	.00729
26	5.337	.01161	.00683
27	5.331	.01207	.00637
28	5.324	.01253	.00591
29	5.318	.01299	.00545
30	5.312	.01344	.00500
31	5.305	.01390	.00454
32	5.299	.01436	.00408
33	5.293	.01481	.00363
34	5.287	.01527	.00317
35	5.281	.01572	.00272
36	5.275	.01618	.00226
37	5.269	.01663	.00181
38	5.263	.01708	.00136
39	5.257	.01754	.00090
40	5.251	.01799	.00045
41	5.245	.01844	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01844

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
----------	------------	-------	--------

1	5.507	.00000	.01800
2	5.491	.00047	.01753
3	5.475	.00094	.01706
4	5.459	.00141	.01659

5	5.443	.00187	.01613
6	5.427	.00234	.01566
7	5.412	.00280	.01520
8	5.397	.00327	.01473
9	5.382	.00373	.01427
10	5.367	.00419	.01381
11	5.352	.00465	.01335
12	5.337	.00511	.01289
13	5.322	.00557	.01243
14	5.308	.00602	.01198
15	5.294	.00648	.01152
16	5.280	.00694	.01106
17	5.266	.00739	.01061
18	5.252	.00784	.01016
19	5.238	.00829	.00971
20	5.224	.00874	.00925
21	5.211	.00919	.00881
22	5.198	.00964	.00836
23	5.184	.01009	.00791
24	5.171	.01054	.00746
25	5.158	.01098	.00702
26	5.146	.01143	.00657
27	5.133	.01187	.00613
28	5.120	.01232	.00568
29	5.108	.01276	.00524
30	5.095	.01320	.00480
31	5.083	.01364	.00436
32	5.071	.01408	.00392
33	5.059	.01452	.00348
34	5.047	.01496	.00304
35	5.035	.01540	.00260
36	5.023	.01583	.00217
37	5.011	.01627	.00173
38	5.000	.01670	.00130
39	4.988	.01713	.00086
40	4.977	.01757	.00043
41	4.966	.01800	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .36399

Calculated Final Height of the Sample = .01800

Number of Iterations = 5

Total Approximated Error = .85558E-06

EK 2.2 HALIÇ DENEY NO:112

Kademeli Yükleme: 5 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.53070E-06
Final Height of the Sample	=	.01550
Final Bottom Effective Stress	=	.44500

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	2.32000
Effective Stress	=	5.00000
Permeability Coefficient	=	.13100E-06

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.39060
Parameter B	=	-.23559
Parameter Z	=	.00573
Parameter C	=	.19112E-07
Parameter D	=	2.28724
Number of Iterations	=	6

Total Normalized Difference = .64728E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.675	.00000	.01614
2	4.669	.00041	.01573
3	4.664	.00082	.01532
4	4.659	.00123	.01491
5	4.654	.00164	.01450
6	4.649	.00205	.01409
7	4.644	.00246	.01368
8	4.639	.00286	.01328
9	4.634	.00327	.01287

10	4.629	.00368	.01246
11	4.624	.00409	.01205
12	4.619	.00449	.01165
13	4.614	.00490	.01124
14	4.609	.00531	.01083
15	4.604	.00571	.01043
16	4.599	.00612	.01002
17	4.594	.00652	.00962
18	4.590	.00693	.00921
19	4.585	.00733	.00881
20	4.580	.00773	.00841
21	4.575	.00814	.00800
22	4.571	.00854	.00760
23	4.566	.00894	.00720
24	4.561	.00935	.00679
25	4.557	.00975	.00639
26	4.552	.01015	.00599
27	4.548	.01055	.00559
28	4.543	.01095	.00519
29	4.539	.01135	.00479
30	4.534	.01176	.00439
31	4.530	.01216	.00399
32	4.525	.01256	.00359
33	4.521	.01296	.00319
34	4.516	.01335	.00279
35	4.512	.01375	.00239
36	4.508	.01415	.00199
37	4.503	.01455	.00159
38	4.499	.01495	.00119
39	4.495	.01535	.00079
40	4.490	.01574	.00040
41	4.486	.01614	.00000
Top Effective Stress			= .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01614

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.675	.00000	.01550
2	4.655	.00041	.01509
3	4.637	.00082	.01468
4	4.618	.00123	.01427

5	4.600	.00163	.01387
6	4.582	.00204	.01346
7	4.564	.00244	.01306
8	4.547	.00284	.01266
9	4.529	.00324	.01226
10	4.512	.00364	.01186
11	4.496	.00404	.01146
12	4.479	.00444	.01106
13	4.463	.00483	.01067
14	4.447	.00523	.01027
15	4.432	.00562	.00988
16	4.416	.00601	.00949
17	4.401	.00640	.00910
18	4.386	.00679	.00871
19	4.371	.00718	.00832
20	4.357	.00757	.00793
21	4.342	.00796	.00754
22	4.328	.00835	.00715
23	4.314	.00873	.00677
24	4.300	.00911	.00639
25	4.287	.00950	.00600
26	4.273	.00988	.00562
27	4.260	.01026	.00524
28	4.247	.01064	.00486
29	4.234	.01102	.00448
30	4.221	.01140	.00410
31	4.209	.01178	.00372
32	4.196	.01215	.00335
33	4.184	.01253	.00297
34	4.172	.01290	.00260
35	4.160	.01328	.00222
36	4.148	.01365	.00185
37	4.136	.01402	.00148
38	4.124	.01439	.00111
39	4.113	.01476	.00074
40	4.101	.01513	.00037
41	4.090	.01550	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .44503

Calculated Final Height of the Sample = .01550

Number of Iterations = 5

Total Approximated Error = .14368E-04

EK 2.3 HALIÇ DENEY NO:113

Kademeli Yükleme: 5 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.10600E-05
Final Height of the Sample	=	.01450
Final Bottom Effective Stress	=	.57500

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	2.32000
Effective Stress	=	5.00000
Permeability Coefficient	=	.13100E-06

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.28249
Parameter B	=	-.21554
Parameter Z	=	.00305
Parameter C	=	.14443E-07
Parameter D	=	2.62010
Number of Iterations	=	5

Total Normalized Difference = .94875E-05

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.414	.00000	.01542
2	4.409	.00039	.01503
3	4.404	.00078	.01464
4	4.400	.00117	.01425
5	4.395	.00156	.01386
6	4.391	.00195	.01347
7	4.387	.00234	.01308

8	4.382	.00273	.01269
9	4.378	.00312	.01230
10	4.373	.00351	.01191
11	4.369	.00390	.01152
12	4.365	.00429	.01113
13	4.360	.00468	.01074
14	4.356	.00506	.01036
15	4.352	.00545	.00997
16	4.348	.00584	.00958
17	4.343	.00623	.00920
18	4.339	.00661	.00881
19	4.335	.00700	.00842
20	4.331	.00738	.00804
21	4.327	.00777	.00765
22	4.323	.00816	.00727
23	4.319	.00854	.00688
24	4.315	.00892	.00650
25	4.311	.00931	.00611
26	4.307	.00969	.00573
27	4.303	.01008	.00534
28	4.299	.01046	.00496
29	4.295	.01084	.00458
30	4.291	.01123	.00419
31	4.287	.01161	.00381
32	4.283	.01199	.00343
33	4.279	.01237	.00305
34	4.275	.01276	.00267
35	4.271	.01314	.00228
36	4.268	.01352	.00190
37	4.264	.01390	.00152
38	4.260	.01428	.00114
39	4.256	.01466	.00076
40	4.253	.01504	.00038
41	4.249	.01542	.00000
Top Effective Stress			= .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01542

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.414	.00000	.01450
2	4.388	.00039	.01411
3	4.362	.00078	.01372

4	4.338	.00117	.01333
5	4.313	.00155	.01295
6	4.290	.00194	.01256
7	4.267	.00232	.01218
8	4.244	.00270	.01180
9	4.222	.00308	.01142
10	4.200	.00345	.01105
11	4.179	.00383	.01067
12	4.159	.00420	.01030
13	4.138	.00458	.00992
14	4.118	.00495	.00955
15	4.099	.00532	.00918
16	4.080	.00568	.00882
17	4.061	.00605	.00845
18	4.042	.00642	.00808
19	4.024	.00678	.00772
20	4.006	.00714	.00736
21	3.989	.00751	.00699
22	3.972	.00787	.00663
23	3.955	.00822	.00628
24	3.938	.00858	.00592
25	3.922	.00894	.00556
26	3.906	.00930	.00520
27	3.890	.00965	.00485
28	3.875	.01000	.00450
29	3.860	.01035	.00415
30	3.845	.01071	.00379
31	3.830	.01106	.00344
32	3.815	.01140	.00310
33	3.801	.01175	.00275
34	3.787	.01210	.00240
35	3.773	.01245	.00205
36	3.759	.01279	.00171
37	3.746	.01313	.00137
38	3.732	.01348	.00102
39	3.719	.01382	.00068
40	3.706	.01416	.00034
41	3.694	.01450	.00000
Top Effective Stress		=	.25000
Calculated Final Bottom Effective Stress		=	.57501
Calculated Final Height of the Sample		=	.01450
Number of Iterations		=	6
Total Approximated Error		=	.32070E-05

EK 2.4 HALIÇ DENEY NO:121

Kademeli Yükleme: 25 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.26530E-06
Final Height of the Sample	=	.01800
Final Bottom Effective Stress	=	.36400

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	1.41000
Effective Stress	=	25.00000
Permeability Coefficient	=	.67500E-07

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.73008
Parameter B	=	-.30214
Parameter Z	=	.02450
Parameter C	=	.36268E-07
Parameter D	=	1.80791
Number of Iterations	=	7

Total Normalized Difference = .20014E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	5.512	.00000	.01845
2	5.505	.00047	.01798
3	5.497	.00094	.01751
4	5.490	.00141	.01704
5	5.483	.00188	.01657
6	5.476	.00235	.01610
7	5.468	.00282	.01563
8	5.461	.00329	.01516

9	5.454	.00375	.01470
10	5.447	.00422	.01423
11	5.440	.00469	.01376
12	5.433	.00515	.01330
13	5.426	.00562	.01283
14	5.419	.00608	.01237
15	5.412	.00655	.01190
16	5.406	.00701	.01144
17	5.399	.00747	.01098
18	5.392	.00793	.01051
19	5.385	.00840	.01005
20	5.379	.00886	.00959
21	5.372	.00932	.00913
22	5.365	.00978	.00867
23	5.359	.01024	.00821
24	5.352	.01070	.00775
25	5.346	.01116	.00729
26	5.339	.01162	.00683
27	5.333	.01208	.00637
28	5.326	.01254	.00591
29	5.320	.01299	.00545
30	5.314	.01345	.00500
31	5.307	.01391	.00454
32	5.301	.01436	.00409
33	5.295	.01482	.00363
34	5.289	.01527	.00317
35	5.283	.01573	.00272
36	5.276	.01618	.00227
37	5.270	.01664	.00181
38	5.264	.01709	.00136
39	5.258	.01754	.00090
40	5.252	.01800	.00045
41	5.246	.01845	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01845

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	5.512	.00000	.01800
2	5.495	.00047	.01753
3	5.479	.00094	.01706
4	5.463	.00141	.01659
5	5.447	.00188	.01612

6	5.431	.00234	.01566
7	5.415	.00281	.01519
8	5.399	.00327	.01473
9	5.384	.00373	.01427
10	5.368	.00419	.01381
11	5.353	.00465	.01335
12	5.338	.00511	.01289
13	5.324	.00557	.01243
14	5.309	.00603	.01197
15	5.295	.00648	.01152
16	5.280	.00694	.01106
17	5.266	.00739	.01061
18	5.252	.00785	.01015
19	5.238	.00830	.00970
20	5.224	.00875	.00925
21	5.211	.00920	.00880
22	5.197	.00965	.00835
23	5.184	.01009	.00791
24	5.170	.01054	.00746
25	5.157	.01099	.00701
26	5.144	.01143	.00657
27	5.131	.01188	.00612
28	5.119	.01232	.00568
29	5.106	.01276	.00524
30	5.094	.01320	.00480
31	5.081	.01364	.00436
32	5.069	.01408	.00392
33	5.057	.01452	.00348
34	5.045	.01496	.00304
35	5.033	.01540	.00260
36	5.021	.01583	.00217
37	5.009	.01627	.00173
38	4.997	.01670	.00130
39	4.986	.01714	.00086
40	4.974	.01757	.00043
41	4.963	.01800	.00000
Top Effective Stress			= .25000
Calculated Final Bottom Effective Stress			= .36399
Calculated Final Height of the Sample			= .01800
Number of Iterations			= 4
Total Approximated Error			= .88205E-04

EK 2.5 HALIÇ DENEY NO:122

Kademeli Yükleme: 25 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.53070E-06
Final Height of the Sample	=	.01550
Final Bottom Effective Stress	=	.44500

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	1.41000
Effective Stress	=	25.00000
Permeability Coefficient	=	.67500E-07

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.29883
Parameter B	=	-.26403
Parameter Z	=	.00901
Parameter C	=	.35567E-07
Parameter D	=	1.86474
Number of Iterations	=	9

Total Normalized Difference = .50163E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.712	.00000	.01622
2	4.706	.00041	.01580
3	4.700	.00083	.01539
4	4.695	.00124	.01498
5	4.689	.00165	.01457
6	4.683	.00206	.01416
7	4.678	.00247	.01374
8	4.672	.00288	.01333

9	4.666	.00329	.01292
10	4.661	.00370	.01251
11	4.655	.00411	.01210
12	4.650	.00452	.01170
13	4.644	.00493	.01129
14	4.639	.00534	.01088
15	4.633	.00575	.01047
16	4.628	.00615	.01006
17	4.623	.00656	.00966
18	4.617	.00697	.00925
19	4.612	.00737	.00884
20	4.607	.00778	.00844
21	4.601	.00818	.00803
22	4.596	.00859	.00763
23	4.591	.00899	.00722
24	4.586	.00940	.00682
25	4.581	.00980	.00641
26	4.576	.01021	.00601
27	4.571	.01061	.00561
28	4.565	.01101	.00520
29	4.560	.01141	.00480
30	4.555	.01182	.00440
31	4.550	.01222	.00400
32	4.546	.01262	.00360
33	4.541	.01302	.00320
34	4.536	.01342	.00280
35	4.531	.01382	.00239
36	4.526	.01422	.00199
37	4.521	.01462	.00160
38	4.516	.01502	.00120
39	4.512	.01542	.00080
40	4.507	.01582	.00040
41	4.502	.01622	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01622

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.712	.00000	.01550
2	4.690	.00041	.01509
3	4.669	.00082	.01468

4	4.648	.00123	.01427
5	4.627	.00164	.01386
6	4.607	.00205	.01345
7	4.587	.00245	.01305
8	4.568	.00286	.01264
9	4.548	.00326	.01224
10	4.529	.00366	.01184
11	4.511	.00406	.01144
12	4.492	.00446	.01104
13	4.474	.00485	.01065
14	4.457	.00525	.01025
15	4.439	.00564	.00986
16	4.422	.00604	.00946
17	4.405	.00643	.00907
18	4.388	.00682	.00868
19	4.372	.00721	.00829
20	4.356	.00759	.00791
21	4.340	.00798	.00752
22	4.324	.00837	.00713
23	4.309	.00875	.00675
24	4.294	.00914	.00636
25	4.278	.00952	.00598
26	4.264	.00990	.00560
27	4.249	.01028	.00522
28	4.235	.01066	.00484
29	4.220	.01104	.00446
30	4.206	.01141	.00409
31	4.192	.01179	.00371
32	4.179	.01217	.00333
33	4.165	.01254	.00296
34	4.152	.01291	.00259
35	4.139	.01329	.00221
36	4.126	.01366	.00184
37	4.113	.01403	.00147
38	4.100	.01440	.00110
39	4.088	.01477	.00073
40	4.075	.01513	.00037
41	4.063	.01550	.00000
Top Effective Stress			= .25000
Calculated Final Bottom Effective Stress			= .44502
Calculated Final Height of the Sample			= .01550
Number of Iterations			= 5
Total Approximated Error			= .78994E-05

EK 2.6 HALIÇ DENEY NO:123

Kademeli Yükleme:25 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.10600E-05
Final Height of the Sample	=	.01450
Final Bottom Effective Stress	=	.57500

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	1.41000
Effective Stress	=	25.00000
Permeability Coefficient	=	.67500E-07

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.18051
Parameter B	=	-.25269
Parameter Z	=	.00631
Parameter C	=	.33900E-07
Parameter D	=	2.00442
Number of Iterations	=	7

Total Normalized Difference = .33179E-05

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.486	.00000	.01559
2	4.481	.00040	.01519
3	4.475	.00079	.01479
4	4.470	.00119	.01440
5	4.465	.00158	.01400
6	4.459	.00198	.01361
7	4.454	.00237	.01321
8	4.449	.00277	.01282

9	4.444	.00316	.01242
10	4.439	.00356	.01203
11	4.433	.00395	.01164
12	4.428	.00434	.01124
13	4.423	.00474	.01085
14	4.418	.00513	.01046
15	4.413	.00552	.01007
16	4.408	.00591	.00968
17	4.403	.00630	.00928
18	4.399	.00669	.00889
19	4.394	.00708	.00850
20	4.389	.00747	.00811
21	4.384	.00786	.00772
22	4.379	.00825	.00733
23	4.374	.00864	.00695
24	4.370	.00903	.00656
25	4.365	.00942	.00617
26	4.360	.00981	.00578
27	4.356	.01019	.00539
28	4.351	.01058	.00501
29	4.346	.01097	.00462
30	4.342	.01136	.00423
31	4.337	.01174	.00385
32	4.333	.01213	.00346
33	4.328	.01251	.00307
34	4.323	.01290	.00269
35	4.319	.01328	.00230
36	4.315	.01367	.00192
37	4.310	.01405	.00153
38	4.306	.01444	.00115
39	4.301	.01482	.00077
40	4.297	.01520	.00038
41	4.293	.01559	.00000
Top Effective Stress			= .25000
Calculated Final Bottom Effective Stress =			.29882
Calculated Final Height of the Sample =			.01559

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.486	.00000	.01450
2	4.454	.00040	.01410
3	4.424	.00079	.01371
4	4.394	.00118	.01332

5	4.365	.00157	.01293
6	4.336	.00196	.01254
7	4.309	.00234	.01216
8	4.282	.00273	.01177
9	4.256	.00311	.01139
10	4.230	.00349	.01101
11	4.205	.00386	.01064
12	4.181	.00424	.01026
13	4.157	.00461	.00989
14	4.133	.00499	.00951
15	4.110	.00536	.00914
16	4.088	.00572	.00878
17	4.066	.00609	.00841
18	4.045	.00646	.00804
19	4.024	.00682	.00768
20	4.003	.00718	.00732
21	3.983	.00755	.00695
22	3.963	.00791	.00659
23	3.944	.00826	.00624
24	3.925	.00862	.00588
25	3.906	.00898	.00552
26	3.888	.00933	.00517
27	3.870	.00968	.00482
28	3.852	.01004	.00446
29	3.834	.01039	.00411
30	3.817	.01074	.00376
31	3.801	.01108	.00342
32	3.784	.01143	.00307
33	3.768	.01178	.00272
34	3.752	.01212	.00238
35	3.736	.01246	.00204
36	3.721	.01281	.00169
37	3.706	.01315	.00135
38	3.691	.01349	.00101
39	3.676	.01383	.00067
40	3.662	.01416	.00034
41	3.647	.01450	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .57500

Calculated Final Height of the Sample = .01450

Number of Iterations = 5

Total Approximated Error = .68176E-04

EK 2.7 Haliç Deney No:131

Kademeli Yükleme :85 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.26530E-06
Final Height of the Sample	=	.01800
Final Bottom Effective Stress	=	.36400

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	.96000
Effective Stress	=	85.00000
Permeability Coefficient	=	.46000E-07

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.72107
Parameter B	=	-.30494
Parameter Z	=	.02515
Parameter C	=	.49152E-07
Parameter D	=	1.62373
Number of Iterations	=	8

Total Normalized Difference = .10414E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	5.515	.00000	.01845
2	5.507	.00047	.01798
3	5.500	.00094	.01751
4	5.493	.00141	.01704
5	5.485	.00188	.01657
6	5.478	.00235	.01610
7	5.471	.00282	.01563
8	5.464	.00329	.01517

9	5.456	.00375	.01470
10	5.449	.00422	.01423
11	5.442	.00469	.01377
12	5.435	.00515	.01330
13	5.428	.00562	.01283
14	5.421	.00608	.01237
15	5.414	.00655	.01191
16	5.408	.00701	.01144
17	5.401	.00747	.01098
18	5.394	.00794	.01052
19	5.387	.00840	.01005
20	5.380	.00886	.00959
21	5.374	.00932	.00913
22	5.367	.00978	.00867
23	5.360	.01024	.00821
24	5.354	.01070	.00775
25	5.347	.01116	.00729
26	5.341	.01162	.00683
27	5.334	.01208	.00637
28	5.328	.01254	.00591
29	5.321	.01300	.00546
30	5.315	.01345	.00500
31	5.309	.01391	.00454
32	5.302	.01437	.00409
33	5.296	.01482	.00363
34	5.290	.01528	.00317
35	5.284	.01573	.00272
36	5.277	.01619	.00227
37	5.271	.01664	.00181
38	5.265	.01710	.00136
39	5.259	.01755	.00090
40	5.253	.01800	.00045
41	5.247	.01845	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01845

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	5.515	.00000	.01800
2	5.498	.00047	.01753
3	5.481	.00094	.01706
4	5.465	.00141	.01659

5	5.448	.00188	.01612
6	5.432	.00234	.01566
7	5.416	.00281	.01519
8	5.401	.00327	.01473
9	5.385	.00373	.01427
10	5.369	.00419	.01381
11	5.354	.00465	.01335
12	5.339	.00511	.01289
13	5.324	.00557	.01243
14	5.309	.00603	.01197
15	5.295	.00648	.01152
16	5.280	.00694	.01106
17	5.266	.00739	.01061
18	5.252	.00785	.01015
19	5.238	.00830	.00970
20	5.224	.00875	.00925
21	5.210	.00920	.00880
22	5.197	.00965	.00835
23	5.183	.01010	.00790
24	5.170	.01054	.00746
25	5.157	.01099	.00701
26	5.144	.01143	.00657
27	5.131	.01188	.00612
28	5.118	.01232	.00568
29	5.105	.01276	.00524
30	5.093	.01320	.00480
31	5.080	.01364	.00436
32	5.068	.01408	.00392
33	5.055	.01452	.00348
34	5.043	.01496	.00304
35	5.031	.01540	.00260
36	5.019	.01583	.00217
37	5.008	.01627	.00173
38	4.996	.01670	.00130
39	4.984	.01714	.00086
40	4.973	.01757	.00043
41	4.962	.01800	.00000
Top Effective Stress			= .25000
Calculated Final Bottom Effective Stress			= .36400
Calculated Final Height of the Sample			= .01800
Number of Iterations			= 4
Total Approximated Error			= .59034E-04

EK 2.8 Haliç Deney No:132

Kademeli Yükleme: 85 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.53070E-06
Final Height of the Sample	=	.01550
Final Bottom Effective Stress	=	.44500

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	.96000
Effective Stress	=	85.00000
Permeability Coefficient	=	.46000E-07

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.26384
Parameter B	=	-.27544
Parameter Z	=	.01053
Parameter C	=	.49193E-07
Parameter D	=	1.64418
Number of Iterations	=	12

Total Normalized Difference = .72158E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.727	.00000	.01625
2	4.721	.00041	.01583
3	4.715	.00083	.01542
4	4.709	.00124	.01501
5	4.703	.00165	.01459
6	4.697	.00207	.01418

7	4.691	.00248	.01377
8	4.685	.00289	.01336
9	4.679	.00330	.01295
10	4.673	.00371	.01254
11	4.668	.00412	.01212
12	4.662	.00453	.01172
13	4.656	.00494	.01131
14	4.651	.00535	.01090
15	4.645	.00576	.01049
16	4.639	.00617	.01008
17	4.634	.00658	.00967
18	4.628	.00698	.00926
19	4.623	.00739	.00886
20	4.617	.00780	.00845
21	4.612	.00820	.00804
22	4.606	.00861	.00764
23	4.601	.00901	.00723
24	4.596	.00942	.00683
25	4.590	.00982	.00642
26	4.585	.01023	.00602
27	4.580	.01063	.00562
28	4.574	.01104	.00521
29	4.569	.01144	.00481
30	4.564	.01184	.00441
31	4.559	.01224	.00400
32	4.554	.01265	.00360
33	4.549	.01305	.00320
34	4.543	.01345	.00280
35	4.538	.01385	.00240
36	4.533	.01425	.00200
37	4.528	.01465	.00160
38	4.523	.01505	.00120
39	4.518	.01545	.00080
40	4.513	.01585	.00040
41	4.509	.01625	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01625

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.727	.00000	.01550
2	4.704	.00041	.01509
3	4.682	.00083	.01467

4	4.659	.00124	.01426
5	4.638	.00164	.01385
6	4.617	.00205	.01345
7	4.596	.00246	.01304
8	4.575	.00286	.01264
9	4.555	.00326	.01223
10	4.535	.00367	.01183
11	4.516	.00406	.01143
12	4.497	.00446	.01104
13	4.478	.00486	.01064
14	4.460	.00526	.01024
15	4.441	.00565	.00985
16	4.424	.00604	.00946
17	4.406	.00644	.00906
18	4.389	.00683	.00867
19	4.372	.00722	.00828
20	4.355	.00760	.00790
21	4.338	.00799	.00751
22	4.322	.00838	.00712
23	4.306	.00876	.00674
24	4.290	.00914	.00636
25	4.275	.00953	.00597
26	4.259	.00991	.00559
27	4.244	.01029	.00521
28	4.229	.01067	.00483
29	4.215	.01104	.00446
30	4.200	.01142	.00408
31	4.186	.01180	.00370
32	4.172	.01217	.00333
33	4.158	.01254	.00295
34	4.144	.01292	.00258
35	4.130	.01329	.00221
36	4.117	.01366	.00184
37	4.104	.01403	.00147
38	4.091	.01440	.00110
39	4.078	.01477	.00073
40	4.065	.01513	.00037
41	4.053	.01550	.00000
Top Effective Stress		=	.25000
Calculated Final Bottom Effective Stress		=	.44500
Calculated Final Height of the Sample		=	.01550
Number of Iterations		=	5
Total Approximated Error		=	.45947E-05

EK 2.9 Haliç Deney No:133

Kademeli Yükleme : 85 kPa

Seepage Induced Consolidation Results :

Unit Weight of Water	=	9.81000
Unit Weight of Solids	=	26.68000
Initial Height of the Sample	=	.03600
Void Ratio at zero effective stress	=	11.44000
Top Effective Stress	=	.25000
Darcian Velocity	=	.10600E-05
Final Height of the Sample	=	.01450
Final Bottom Effective Stress	=	.57500

Step Loading Test Results :

Void Ratio	=	.96000
Effective Stress	=	85.00000
Permeability Coefficient	=	.46000E-07

THE OUTPUT RESULTS ARE LISTED AS FOLLOWS :

PARAMETER ESTIMATION RESULTS

Parameter A	=	3.14431
Parameter B	=	-.26705
Parameter Z	=	.00794
Parameter C	=	.49372E-07
Parameter D	=	1.73287
Number of Iterations	=	11

Total Normalized Difference = .42442E-04

SELF WEIGHT AND SURCHARGE LOAD CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.515	.00000	.01565
2	4.509	.00040	.01526
3	4.503	.00080	.01486
4	4.498	.00120	.01446
5	4.492	.00159	.01406
6	4.487	.00199	.01366
7	4.481	.00239	.01327

8	4.476	.00278	.01287
9	4.470	.00318	.01247
10	4.465	.00357	.01208
11	4.459	.00397	.01168
12	4.454	.00436	.01129
13	4.449	.00476	.01089
14	4.443	.00515	.01050
15	4.438	.00555	.01011
16	4.433	.00594	.00971
17	4.428	.00633	.00932
18	4.422	.00673	.00893
19	4.417	.00712	.00854
20	4.412	.00751	.00814
21	4.407	.00790	.00775
22	4.402	.00829	.00736
23	4.397	.00868	.00697
24	4.392	.00907	.00658
25	4.387	.00946	.00619
26	4.382	.00985	.00580
27	4.377	.01024	.00541
28	4.372	.01063	.00502
29	4.367	.01102	.00464
30	4.362	.01141	.00425
31	4.357	.01179	.00386
32	4.353	.01218	.00347
33	4.348	.01257	.00308
34	4.343	.01296	.00270
35	4.338	.01334	.00231
36	4.334	.01373	.00193
37	4.329	.01411	.00154
38	4.324	.01450	.00115
39	4.320	.01488	.00077
40	4.315	.01527	.00038
41	4.310	.01565	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .29882

Calculated Final Height of the Sample = .01565

SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION RESULTS

Node No.	Void Ratio	Depth	Height
1	4.515	.00000	.01450
2	4.481	.00040	.01410
3	4.448	.00079	.01371

4	4.416	.00119	.01331
5	4.384	.00158	.01292
6	4.354	.00197	.01253
7	4.325	.00235	.01215
8	4.296	.00274	.01176
9	4.268	.00312	.01138
10	4.241	.00350	.01100
11	4.214	.00388	.01062
12	4.188	.00425	.01025
13	4.163	.00463	.00987
14	4.138	.00500	.00950
15	4.114	.00537	.00913
16	4.090	.00574	.00876
17	4.067	.00611	.00839
18	4.045	.00647	.00803
19	4.023	.00684	.00766
20	4.001	.00720	.00730
21	3.980	.00756	.00694
22	3.959	.00792	.00658
23	3.939	.00828	.00622
24	3.919	.00864	.00586
25	3.899	.00899	.00551
26	3.880	.00934	.00516
27	3.862	.00970	.00480
28	3.843	.01005	.00445
29	3.825	.01040	.00410
30	3.807	.01075	.00375
31	3.790	.01109	.00341
32	3.773	.01144	.00306
33	3.756	.01178	.00272
34	3.739	.01213	.00237
35	3.723	.01247	.00203
36	3.707	.01281	.00169
37	3.691	.01315	.00135
38	3.676	.01349	.00101
39	3.661	.01383	.00067
40	3.646	.01416	.00034
41	3.631	.01450	.00000

Top Effective Stress = .25000

Calculated Final Bottom Effective Stress = .57502

Calculated Final Height of the Sample = .01450

Number of Iterations = 5

Total Approximated Error = .39111E-04

Daftar year	Referensi	
1987	1987-1990	Survei KIR Lisensi
1990	1990-1994	Yahya Teknik Universitas Mahendradatta Pahlawan Muhammadiyah Holland
Yahya Lisensi	1994-1996	Yahya Teknik Universitas Pahlawan Indonesia Universitas Islam Arabien Diah, Geoteknik Program
Colony Lisensi		
		1996-Daftar edipor YIC Jepang Fakultas Insinyur Muhammadiyah
		Geoteknik ABD Arqamua Geoteknik

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	08.06.1973	
Doğum yeri	Erzincan	
Lise	1987-1990	Bursa Kız Lisesi
Lisans	1990-1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1994-1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı
Çalıştığı kurum		
		1996-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği
		Geoteknik ABD Araştırma Görevlisi

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışması YTÜ Araştırma Fonu'na desteklenen 21.05.01.01 No'lu "Dipsel Tarama Çamurunun Konsolidasyon – Desikasyon - Mukavemet Özelliklerinin Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi" isimli projeye sağlanan maddi katkılar sayesinde gerçekleştirilmiştir. YTÜ Araştırma Fonu Başkanlığı'na katkılarından ötürü teşekkürlerimi sunarım.

