

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGU ALTINDAKİ KİLLİ ZEMİNLERİN  
PERMEABİLİTE KARAKTERİSTİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

İnş.Müh. Pelin TOHUMCU

106343

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

106343

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı

: Prof. Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN

Prof. Dr. Gökhan Baykal

Prof. Dr. Sörmek Yıldırım

*(Handwritten signatures and initials)*

İSTANBUL, 2001

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ÖNSÖZ.....	xv
ÖZET.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. TEORİ.....	64
3.1 Giriş.....	64
3.2 Zemin İçinde Su Akımı.....	64
3.3 Darcy Yasası.....	68
3.4 Permeabiliteyi Etkileyen Faktörler .....	71
3.4.1 Dane Çapı Dağılımı .....	72
3.4.2 Dane Şekli ve Yapısı.....	72
3.4.3 Dane Boyutunun Etkisi .....	72
3.4.4 Dane Düzeninin Etkisi .....	72
3.4.5 Süreksizliklerin ve Zemin İç Yapısının Etkisi .....	73
3.4.6 Zemin Kütleli Boyutunun Etkisi .....	74
3.4.7 Minerolojik Birleşim.....	75
3.4.8 Boşluk Oranı.....	75
3.4.9 Suyu Doygunluk Derecesi.....	76
3.4.10 Sıvının Yapısı .....	76
3.4.11 Sıcaklığın Etkisi.....	76
3.5 Permeabilite Katsayısını Belirleme Yöntemleri.....	79
3.5.1 Permeabilite Katsayısının Konsolidasyon Deneylerinden İndirekt Olarak Belirlenmesi.....	79
3.5.1.1 Klasik Konsolidasyon Deneyleri Sonucu Elde Edilen $c_v$ 'den Permeabilite Katsayısının Bulunuşu .....	79
3.5.1.2 CGT ve CRS Deneylerinden Permeabilite Katsayısının Belirlenmesi;.....	83
3.5.2 Hazen Metodu .....	86
3.5.3 Kozeny-Carman Metodu.....	88
3.5.4 Diğer Ampirik Eşitlikler.....	88
3.5.5 Permeabilite Katsayısının Laboratuvar Deneyleri İle Direkt Olarak Belirlenmesi	89
3.5.5.1 Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi .....	89
3.5.5.2 Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi .....	90
3.5.5.3 Deneyler Sırasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar .....	91
3.5.5.4 Üç eksenli Basınç Deneylerinde Permeabilitenin Belirlenmesi.....	91
3.5.5.5 Standart Ödometrelerde Yapılan Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi .....	94
3.5.5.6 Radyal Akımlı Permeametrelerde Permeabilite Deneyi .....	97
3.5.5.7 Rowe Hücresi'nde Permeabilite Deneyleri .....	97
3.5.6 Arazi Deneyleri.....	98
3.5.6.1 Arazi Gözlem Kuyuları Yardımı ile Permeabilitenin Belirlenmesi .....	98
3.5.6.2 Sondaj Deliği Tabanında Permeabilite Deneyleri .....	102

3.5.6.3	Tıkaç Deneyleri .....	106
3.5.6.4	Sızıntı Hızları Kullanılarak Permeabilitenin Belirlenmesi .....	107
3.5.6.5	Yeraltı Su Seviyesi Değişimlerine Dayanan Arazi Metodları.....	109
3.6	Dolgu Altında Yer Alan Yumuşak Zeminlerin Permeabilitesi .....	111
3.6.1	Permeabilite Anizotropisi ve Yatay Permeabilite .....	116
3.6.2	Zeminin İç Yapısı .....	117
3.6.3	Yatay Drenaj.....	117
4.	DENEYSSEL ÇALIŞMA VE KULLANILAN DENEY TEKNİKLERİ .....	121
4.1	Giriş.....	121
4.2	Deneysel Çalışmada kullanılan Zemin Örnekleri ve Özellikleri.....	122
4.3	Deneysel Çalışmada Kullanılan Gerilmeler .....	125
4.4	Kullanılan Deneysel Aygıtları .....	126
4.4.1	Rowe Hücresi Konsolidasyon Aletinin Özellikleri ve Kullanıldığı Yerler .....	126
4.4.2	Rowe Hücresinde Gerçekleştirilen Deneyler .....	128
4.4.2.1	Konsolidasyon deneyleri.....	128
4.4.2.2	Permeabilite deneyleri.....	130
4.4.2.2.1	Radyal Permeabilite Deneyi.....	132
4.4.2.2.2	Düşey Permeabilite Deneyi.....	134
4.5	Numunenin Hazırlanması ve Rowe Hücresine Yerleştirilmesi.....	135
4.6	Düşey Yönlü Konsolidasyon Deneyleri.....	135
4.7	Düşey Yönlü Permeabilite Deneyleri .....	136
4.8	Dışarı Yönlü Yatay Drenajlı Konsolidasyon Deneyleri .....	139
4.9	Radyal Permeabilite Deneyleri.....	141
4.9.1	Kum Drenin Oluşturulması .....	144
5.	DENEYSSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	147
5.1	Permeabilite Katsayıları ve Konsolidasyon Katsayılarının Kademeli Yükleme Altında Değişimi.....	147
5.2	Permeabilitenin Boşluk Oranı ile Olan Değişiminin Formülasyonu .....	150
5.2.1	Düşey Permeabilitenin Boşluk Oranı ile Değişimi.....	151
5.2.2	Yatay Permeabilitenin Boşluk Oranı ile Olan Değişimi.....	155
5.3	Permeabilite anizotropisi.....	162
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	164
KAYNAKLAR .....		167
EKLER .....		169
ÖZGEÇMİŞ.....		233

## SİMGE LİSTESİ

a	büretin kesit alanı
A	log e-log k doğrusunun eğimi
A	numunenin kesit alanı
A	sondaj kılıfı kesit alanı
B	log e-log k doğrusunun düşey ekseni kestiği yer
C	log e-log k(1+e) doğrusunun düşey ekseni kestiği değer
$C_1$	bir katsayı
$C_c$	sıkışabilirlik indeksi
$C_F$	kil yüzdesi
$c_h$	düşey konsolidasyon katsayısı
$C_{kh}$	yatay permeabilite değişim indeksi
$C_{kv}$	düşey permeabilite değişim indeksi
$c_v$	düşey konsolidasyon katsayısı
d	boru çapı
D	kılıf borusunun çapı
$D_{10}$	efektif dane çapı
$D_5$	zemin içindeki danelerin %5'nin daha büyük olduğu çap
$e_0$	doğal boşluk oranı
$e_m$	ortalama boşluk oranı
F	giriş faktörü
g	yerçekimi ivmesi
$G_s$	özgül ağırlık
H	Bourdan basınç ölçerinin deney yerinin ortasından yüksekliği
h	hidrolik yük
H	numune boyu
h	su kolonu yüksekliği
h	t süre sonra büretteki su seviyesi
$H_c$	sabit hidrolik yük
$H_f$	borudaki sürtünme kaybı
$H_g$	yer altı su seviyesinin deney yeri ortasından olan yüksekliği
$h_0$	büretteki başlangıç su seviyesi
$I_p$	plastisite indisi
i	hidrolik eğim

$i_p$	basınç eğimi
$K$	spesifik permeabilite katsayısı
$k_h$	düşey permeabilite katsayısı
$k_{hi}$	yerinde arazide ölçülmüş yatay permeabilite katsayısı
$k_{ho}$	başlangıçtaki(doğal)yatay permeabilite katsayısı
$K_o$	sükunetteki yatay zemin basıncı katsayısı
$k_r$	radyal permeabilite
$k_v$	düşey permeabilite katsayısı
$k_{vo}$	başlangıçtaki(doğal) düşey permeabilite katsayısı
$L$	kılıf borusunun zemin içine girme miktarı
$L$	numune boyu
$M$	deformasyon modülü
$M_v$	hacimsel sıkışama katsayısı
$n$	$\log e - \log k(1+e)$ doğrusunun eğimi,
$n_e$	efektif porozite
$O_{90}$	geotekstil gözenek açıklığı
$q$	birim zamanda geçen su miktarı
$Q$	su miktarı
$q_\infty$	$q:1/\sqrt{t}$ doğrusunun ordinatı kestiği nokta
$R$	kil numunesinin dış yarıçapı
$r$	numune yarıçapı, silindirik ucun alanına eşit kürenin yarıçapı
$r_e$	numunenin dış yarıçapı
$Re$	Reynolds sayısı
$r_i$	numunenin iç yarıçapı
$r_k$	permeabilite anizotropisi oranı
$S$	oturma miktarı
$\gamma$	sıvının birim hacim ağırlığı
$\mu$	suyun vizkozitesi
$t$	zaman
$T_v$	zaman faktörü
$u_b$	numune tabanında oluşan boşluk suyu basıncı
$v$	akım hızı
$w$	doğal su muhtevası
$w_L$	likit limit su muhtevası

$w_p$	plastik limit su muhtevası
$z$	derinlik
$\sigma'_1$	eksenel gerilme
$\sigma'_3$	hücre basıncı
$\sigma'_p$	önkonsolidasyon basıncı
$\sigma'_{vm}$	ortalama efektif gerilme
$\sigma'_{vo}$	düşey jeolojik efektif gerilme
$\Delta e$	boşluk oranındaki değişim
$\Delta h$	hidrolik yük farkı
$\partial H$	numune boyundaki değişim
$\Delta H$	numune boyundaki değişme miktarı
$\Delta k$	permeabilite katsayısındaki değişim
$\Delta p$	basınç farkı
$\Delta u$	boşluk suyu basıncı farkı
$\partial u$	boşluk suyu basıncındaki değişim
$\varepsilon_v$	düşey şekil değiştirme
$\Delta V$	hacimsel değişme
$\gamma_w$	suyun birim hacim ağırlığı
$\eta_w$	suyun dinamik vizkozitesi
$\rho_w$	suyun yoğunluğu

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Permeabilite ölçümleri için düzenlenmiş üç eksenli deney aleti (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	7
Şekil 2.2 Üç eksenli permeabilite deneylerinde bürütlerdeki seviye değişimlerine göre elde edilen Akım hızı-Hidrolik Eğim İlişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	7
Şekil 2.3 Farklı Hidrolik Eğimler altında üç eksenli permeabilite deneylerinden elde edilen Akım hızı-Hidrolik eğim ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a) .....	8
Şekil 2.4 Düşen seviyeli permeabilite deneyine göre uyarlanmış ödometre hücresi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	8
Şekil 2.5 Ödometrelerde yapılan düşen seviyeli deneylerden elde edilen log h-zaman ilişkileri(Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a) .....	10
Şekil 2.6 Louiseville kili üzerinde yapılan tipik OEDK deneyleri sonucunda elde edilen e- $\log\sigma_v$ ' ve e- $\log k$ ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	10
Şekil 2.7 Louiseville kili için CRS ve düşen seviyeli deneylerden elde edilen e- $\log\sigma_v$ ' ve loge-k ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a) .....	11
Şekil 2.8 Batiscan kili üzerinde yapılan ödometre ve üç eksenli permeabilite deneylerinden elde edilen e- $\log k$ ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a) .....	11
Şekil 2.9 Büyük boyutlu numuneler üzerinde ölçülen üç eksenli ve küçük boyutlu numuneler üzerinde ölçülen ödometre permeabilite değerlerinin karşılaştırılması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	13
Şekil 2.10 Louiseville kili için OED <sub>CV</sub> , OEDK, CRS ve CGT yöntemlerinden elde edilen e- $\log k$ ilişkilerinin karşılaştırılması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a) .....	13
Şekil 2.11 Champlain kili için OEDK ile ölçülen permeabiliteler ile OED <sub>CV</sub> ile hesaplanan permeabilitelerin karşılaştırılması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	15
Şekil 2.12 Batiscan Kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b).....	15
Şekil 2.13 Backebol kili için Permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b).....	17
Şekil 2.14 Matagami kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b).....	17
Şekil 2.15 Louiseville kili için e-k ilişkisinin detaylı araştırması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b) .....	19
Şekil 2.16 Champlain deniz killeri için e- $\log k_v$ ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b).....	19
Şekil 2.17 e- $\log k_v$ ilişkileri dağılımının $I_p$ +Kil yüzdesi 'nin fonksiyonu olarak gösterilmesi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b) .....	20
Şekil 2.18 Bütün killeri için Permeabilite değişim indeksi $C_k$ ile $e_o$ arasındaki ilişki (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b).....	20
Şekil 2.19 Radial akımlı permeametre (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990).....	23
Şekil 2.20 Louiseville kili için Yatay permeabilite ve Düşey efektif gerilmenin şekil değiştirme ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990).....	23
Şekil 2.21 Matagami kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990) .....	24
Şekil 2.22 Louiseville kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990) .....	24
Şekil 2.23 Louiseville kili için permeabilite- boşluk oranı değişimi (Leroueil vd.,1990).....	25
Şekil 2.24 Saint-Esprit kili için permeabilite- boşluk oranı değişimi (Leroueil vd.,1990).....	25
Şekil 2.25 Backebol kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990).....	27

Şekil 2.26 Permeabilite değişim indeksleri $C_{kv}$ ve $C_{kh}$ ile başlangıç boşluk oranı $e_0$ arasındaki ilişki (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990).....	27
Şekil 2.27 Radyal permeabilite ölçümü için geliştirilen ödometre deney aleti (Al-Tabbaa ve Wood, 1987).....	28
Şekil 2.28 Radyal drenaj için konsolidasyon sırasında meydana gelen drenaj izleri(Al-Tabbaa ve Wood, 1987) .....	28
Şekil 2.29 Radyal drenajlı düşen seviyeli permeabilite deneyleri için log h- t ilişkileri (Al-Tabbaa ve Wood, 1987).....	28
Şekil 2.30 Normal konsolide kaolin için permeabilite-boşluk oranı ilişkileri(Al-Tabbaa ve Wood, 1987).....	30
Şekil 2.31 Aşırı konsolide kaolin için permeabilite- boşluk oranı ilişkileri (Al-Tabbaa ve Wood, 1987).....	30
Şekil 2.32 Berthierville test dolgusu altındaki zemine ait zemin profili ve dolgu altında yer alan enstrumantasyon (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988).....	32
Şekil 2.33 Berthierville test dolgusu altındaki zeminde meydana gelen oturmalar (Kabbaj vd., 1988).....	32
Şekil 2.34 Berthierville test dolgusu altında gözlenen atık boşluk suyu basınçları (Kabbaj vd., 1988).....	33
Şekil 2.35 Konsolidasyon sırasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronu ve oturma dağılımı (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988).....	33
Şekil 2.36 Permeabilite –Boşluk oranı ilişkileri (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988).....	35
Şekil 2.37 Direkt yöntemlerle belirlenmiş permeabilite katsayıları ile konsolidasyon katsayılarından hesaplanmış permeabilite katsayılarının karşılaştırması (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988).....	35
Şekil 2.38 Doğal boşluk oranında çeşitli yöntemlerle belirlenmiş permeabilite katsayısı profilleri (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988).....	35
Şekil 2.39 Radial akım için geliştirilmiş olan hidrolik ödometre (Little, Wood, Paul ve Bouozza ,1992).....	37
Şekil 2.40 Hariot-Watt Üniversitesinde yapılan klasik ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı-permeabilite ilişkileri (Little, Wood, Paul ve Bouozza ,1992).....	37
Şekil 2.41 Hidrolik ödometrelerde kontrollü akım deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite-boşluk oranı ilişkileri (Little, Wood, Paul ve Bouozza ,1992).....	40
Şekil 2.42 9m.derinlikten alınan kil numunesine ait tipik e-log $\sigma'_v$ ve e-log $k_v$ ilişkileri (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992) .....	43
Şekil 2.43. Laboratuarda ölçülen düşey permeabilite katsayıları (Leroueil, Lerat, Hight, Powell ,1992).....	43
Şekil 2.44 Bothkennar kili için laboratuvar deneylerinden elde edilen Permeabilite katsayısı profilleri (Leroueil, Lerat, Hight, Powell ,1992) .....	44
Şekil 2.45 $e_0$ ile $C_k$ arasındaki ilişki (Leroueil, Lerat, Hight, Powell ,1992).....	44
Şekil 2.46 Bothkennar kili için Laboratuarda ölçülen yatay permeabilite katsayıları(Leroueil, Lerat, Hight, Powell ,1992).....	45
Şekil 2.47 Arazide yapılan deneyler sonucunda elde edilen permeabilite profilleri (Leroueil, Lerat, Hight, Powell ,1992).....	45
Şekil 2.48 Londra kili için laboratuarda ve arazide ölçülen permeabilite katsayıları (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990) .....	48
Şekil 2.49 Londra kilinin geoteknik indeks özellikleri (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990) 48	
Şekil 2.50 Londra kili için Ödometre deneylerinden düşey permeabilite katsayısının değerlendirilmesi (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990) .....	48
Şekil 2.51 Londra kili için Ödometre deneyleri sonucu elde edilen e-log k ilişkileri (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990) .....	49



Şekil 2.52 Değişik killer için $e_0$ ile $C_k$ 'nın değişimi (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)....	49
Şekil 2.53 Londra kili için üçeksenli permeabilite deneylerinden düşey permeabilite katsayısının değerlendirilmesi (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990) .....	49
Şekil 2.54 e ve k arasındaki nonlinear ilişki (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982).....	52
Şekil 2.55 Permeabilite boşluk oranı ilişkisi (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982).....	52
Şekil 2.56 Normal konsolide bir kil için $k:e^m/(1+e)$ ilişkisi( Loudon,1953).....	52
Şekil 2.57 Kaolin için kil için $k:e^m/(1+e)$ ilişkisi (Michaels veLin,1954) .....	53
Şekil 2.58 New Liskeard kili için kil için $k:e^m/(1+e)$ ilişkisi (Raymond,1966).....	53
Şekil 2.59 Leda kilinin sıkışabilirlik ve permeabilite karakterisitikleri(Walker ve Raymond, 1968).....	53
Şekil 2.60 Konsolidometre/permeametre aletinin şematik şekli(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982) .....	55
Şekil 2.61 Gri kumlu kil için sıkışabilirlik ve permeabilite ilişkileri(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982) .....	55
Şekil 2.62 Gri kumlu kil için $c_v$ ile $\log\sigma'$ ilişkisi(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982).	55
Şekil 2.63 İki farklı kumlu gri kil numunesi üzerinde yapılmış permeabilite deney sonuçları (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982).....	57
Şekil 2.64 Aynı numune üzerinde iki farklı metod kullanılarak elde edilmiş e-k ilişkileri (Raymond,1966) .....	57
Şekil 2.65 Tipik sıkışabilirlik karakteristikleri (Raymond,1966) .....	57
Şekil 2.66 Sıkışabilirlik ve permeabilite sonuçlarına göre elde edilmiş $c_v$ - $\log\sigma'$ eğrileri (Raymond,1966) .....	58
Şekil 2.67 İki farklı numune üzerinde iki farklı metoddan elde edilmiş e- $\log k$ ilişkileri (Raymond,1966) .....	58
Şekil 2.68 Yoğrulmuş kaolin kili için elde edilmiş CRSC deney sonuçları(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982) .....	58
Şekil 2.69 Cubzac- les ponts vadisi jeolojik kesiti (Magnan, Mieussens ve Queyrai,1983)...	60
Şekil 2.70 Cubzac- les ponts'ta inşa edilen test dolgularının planı (Magnan, Mieussens ve Queyrai,1983) .....	60
Şekil 2.71 Ödometre deneyleri (a) düşey drenajlı düşey numune (b) düşey drenajlı yatay numune (c) radyal drenajlı düşey numune (Magnan, Mieussens ve Queyrai,1983) .....	60
Şekil 2.72 Cubzac-les-ponts düşey ve yatay permeabilite profilleri (Magnan, Mieussens ve Queyrai,1983) .....	60
Şekil 3.1 Zemin içinde su akımı: (a) su partikülünün esas akım izi (b) idealize edilmiş akım çizgileri .....	65
Şekil 3.2 Bir hidrolik eğim altında zemin içindeki yatay su akımı .....	65
Şekil 3.3 Yatayla belirli bir açı yapan zemin kolonu içindeki su akımı.....	67
Şekil 3.4 Darcy'nin permeabilite problemi için tasarladığı deney düzeneği (Foundation Enginering) .....	67
Şekil 3.5 Akımın hızının hidrolik eğim ile olan değişimi.....	70
Şekil 3.6 Permeabilite katsayısının zemin cinsi ve zemin yoğunluğu ile olan ilişkisi .....	77
Şekil 3.7 Konsolidasyon basıncı ile permeabilitenin değişimi .....	78
Şekil 3.8 Sıcaklık ile suyun dinamik vizkozitesi arasındaki ilişki (Kaye and Laby, 1973).....	78
Şekil 3.9 Louseville kilinin ödometre deneyi esnasında konsolidasyon katsayısının konsolidasyon yüzdesi olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a).....	82
Şekil 3.10 CRSC deney aletinin tipik bir şekli (Gorman, Hopkins, Deen, Drenevich, 1978).	84
Şekil 3.11 CGT deneyi süresince numunede e ve $\sigma_v'$ değişimleri (Magnan ve Deroy, 1981)	84
Şekil 3.12 Louiseville kili üzerinde yapılan CRS ve düşenseviyeli deneylerden elde edilmiş e- $\log \sigma_v'$ ve e- $\log k$ ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a) .....	87
Şekil 3.13 Sabit seviyeli permeabilite deneyi.....	89
Şekil 3.14 Düşen seviyeli permeabilite deneyi.....	90

Şekil 3.15 Üç eksenli deney aletinin permeabilite deneyi için düzenlenmiş şekli (Manual of soil laboratory testing, vol.3) .....	92
Şekil 3.16 Üç eksenli deney aletinde oluşabilecek sorunlar (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983).....	92
Şekil 3.17 Ödometre düşen seviyeli permeabilite deneylerinde gerilme koşulları ve hacim değişimi davranışı (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983) .....	96
Şekil 3.18 Arazi kuyu pompa deneyi .....	100
Şekil 3.19 Giriş Faktörleri .....	103
Şekil 3.20 Zaman Faktörünün Bulunuşu.....	104
Şekil 3.21 $q_{\infty}$ nın Bulunuşu.....	105
Şekil 3.22 Sızıntı hızı ölçümlerinden permeabilitenin belirlenmesi .....	108
Şekil 3.23 Zemin içerisine akan su miktarından permeabilite katsayısının tahmini .....	110
Şekil 3.24 Yumuşak killerin sıkışabilirliği ve permeabilitesi (Mesri vd., 1992) .....	112
Şekil 3.25 Yumuşak kil numunesi üzerinde yapılan düşen seviyeli ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonuçları ve arazi permeabilite deneyleri ile laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması (Mesri vd.,1992).....	112
Şekil 3.26 CRS ödometre deneylerinden elde edilmiş $k_v$ ile Düşen seviyeli ve sabit seviyeli permeabilite deneuyllerinden elde edilmiş $k_v$ değerlerinin karşılaştırılması (Mesri vd.,1992).....	112
Şekil 3.27 Kil boyutu yüzdesine ve aktivite katsayısına göre normalize edilmiş permeabiliteboşluk oranı ilişkisi (Mesri vd.,1992).....	114
Şekil 3.28 Farklı aktivite katsayısına sahip yumuşak killerde $k_{v0}$ ve $e_0/CF$ arasındaki ampirik korelasyon (Mesri vd.,1992) .....	114
Şekil 3.29 $C_k$ ile $e_0$ arasındaki ampirik korelasyon (Mesri vd.,1992) .....	115
Şekil 3.30 Yumuşak kil çökellerinin permeabilite anizotropisi (Mesri vd.,1992) .....	115
Şekil 3.31 Radyal drenaj için düzenlenmiş üç eksenli konsolidasyon deneyi .....	120
Şekil 3.32 Drenin oluşturulması için kullanılacak mandrel tipleri.....	120
Şekil 4.1 Memba batardosu altındaki tipik zemin profili (Soydemir,1970).....	123
Şekil 4.2 B22 aksında deneysel çalışma için göz önüne alınan derinliklerdeki zemin elemanları (Kılıç, 2000) .....	124
Şekil 4.3 Rowe hücresi konsolidasyon deneyleri için drenaj ve yükleme koşulları.....	129
Şekil 4.4 Rowe hücresinde permeabilite deneyleri için akım koşulları .....	131
Şekil 4.5 Radial permeabilite deneyi sırasında oluşan basınç dağılımı .....	133
Şekil 4.6 Rowe hücresinin düşey yönlü konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali .....	137
Şekil 4.7 Rowe hücresinin düşey yönlü permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali.....	137
Şekil 4.8 Hacim değişim ölçer .....	138
Şekil 4.9 Rowe hücresinin dışarı yönlü radyal konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali .....	140
Şekil 4.10 Rowe hücresinin radyal permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali.....	143
Şekil 4.11 Rowe hücresinin kum drene doğru radyal drenajlı konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali .....	143
Şekil 4.12 Kum drenin dane çapı dağılımı .....	145
Şekil 5.1 Yeşil kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen $e - \log k_v$ ilişkisi.....	151
Şekil 5.2 Siyah kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen $e - \log k_v$ ilişki.....	152
Şekil 5.3 Yeşil kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_v$ ilişkisi... ..	153
Şekil 5.4 Siyah kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_v$ ilişkisi ..	153
Şekil 5.6 Siyah kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_v(1+e)$ ilişkisi .....	154
Şekil 5.7 Yeşil kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen $e - \log k_h$ ilişkisi .....	156
Şekil 5.8 Siyah kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen $e - \log k_h$ ilişkisi.....	156
Şekil 5.9 Yeşil kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_h$ ilişkisi ...	157

Şekil 5.10 Siyah kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_h$ ilişkisi	157
Şekil 5.11 Yeşil kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_h(1+e)$ ilişkisi	158
Şekil 5.12 Siyah kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen $\log e - \log k_h(1+e)$ ilişkisi	158
Şekil 5.13 Yeşil kil için düşey ve radyal konsolidasyon deneylerinden elde edilen $e - \log \sigma'_v$ eğrileri	161
Şekil 5.14 Siyah kil için düşey ve radyal konsolidasyon deneylerinden elde edilen $e - \log \sigma'_v$ eğrileri	161
Şekil 5.15 $C_k$ 'nın $e_o$ ile dağılımı	163
Şekil 5.16 $C_c/C_k$ 'nın $e_o$ ile dağılımı	163
Şekil Ek-4.1a Yeşil kil için 25 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	169
Şekil Ek-4.1b Yeşil kil için 77kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	170
Şekil Ek-4.1c Yeşil kil için 77 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	171
Şekil Ek-4.1d Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	172
Şekil Ek-4.1e Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	173
Şekil Ek-4.1f Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	174
Şekil Ek-4.1g Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	175
Şekil Ek-4.1h Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	176
Şekil Ek-4.1ı Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	177
Şekil Ek-4.1i Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	178
Şekil Ek-4.1j Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	179
Şekil Ek-4.1k Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	180
Şekil Ek-4.1 l Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	181
Şekil Ek-4.1m Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	182
Şekil Ek-4.1n Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	183
Şekil Ek-4.2 a Yeşil kil için 25 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	184
Şekil Ek-4.2 b Yeşil kil için 50 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	185
Şekil Ek-4.2 c Yeşil kil için 77 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	186
Şekil Ek-4.2d Yeşil kil için 77 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği	187
Şekil Ek-4.2e Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği	188

Şekil Ek-4.2 f Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı -zaman grafiği.....	189
Şekil Ek-4.2 g Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	190
Şekil Ek-4.2 h Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	191
Şekil Ek-4.2 ı Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	192
Şekil Ek-4.2 i Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	193
Şekil Ek-4.2 j Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	194
Şekil Ek-4.2 k Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	195
Şekil Ek-4.2 l Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	196
Şekil Ek-4.2 m Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	197
Şekil Ek-4.2 n Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	198
Şekil Ek-4.2 o Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	199
Şekil Ek-4.3 a Siyah kil için 25 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	200
Şekil Ek-4.3 b Siyah kil için 50 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	201
Şekil Ek-4.3 c Siyah kil için 100 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	202
Şekil Ek-4.3 d Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	203
Şekil Ek-4.3e Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	204
Şekil Ek-4.3f Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	205
Şekil Ek-4.3g Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	206
Şekil Ek-4.3 h Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	207
Şekil Ek-4.3 ı Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	208
Şekil Ek-4.3 i Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	209
Şekil Ek-4.3 j Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	210
Şekil Ek-4.3 k Siyah kil için 314 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	211
Şekil Ek-4.3 l Siyah kil için 314kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	212
Şekil Ek-4.3 m Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	213

Şekil Ek-4.3 n Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	214
Şekil Ek-4.3 o Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	215
Şekil Ek-4.3 ö Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	216
Şekil Ek-4.4 a Siyah kil için 50 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	217
Şekil Ek-4.4 b Siyah kil için 115 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	218
Şekil Ek-4.4 c Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	219
Şekil Ek-4.4 d Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	220
Şekil Ek-4.4 e Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	221
Şekil Ek-4.4 f Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	222
Şekil Ek-4.4 g Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	223
Şekil Ek-4.4 h Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	224
Şekil Ek-4.4 ı Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	225
Şekil Ek-4.4 i Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	226
Şekil Ek-4.4 j Siyah kil için 314 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	227
Şekil Ek-4.4 k Siyah kil için 314 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	228
Şekil Ek-4.4 l Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	229
Şekil Ek-4.4 m Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	230
Şekil Ek-4.4 n Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği.....	231
Şekil Ek-4.4 o Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği.....	232

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 İncelenen killerin geoteknik özellikleri( Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)	5
Çizelge 2.2 Konsolidasyon ve permeabilite deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları (Özçoban,1988)	63
Çizelge 4.1 Kullanılan zeminlere ait özellikler	123
Çizelge 4.2a B22 aksında yeşil kil tabakasında 7.50m derinlikte belirlenen efektif düşey asal gerilmeler ( Kılıç, 2000)	125
Çizelge 4.2b B22 aksında siyah kil tabakasında 19 m derinlikte belirlenen efektif düşey asal gerilmeler ( Kılıç, 2000)	126
Çizelge 4.3 Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre önerilen maksimum hidrolik eğim değerleri (ASTM D5084)	137
Çizelge 4.4 Deneyde kullanılan killere ve geotekstile ait özellikler	146
Çizelge 5.1 Yeşil kil için belirlenmiş permeabilite ve konsolidasyon katsayıları	149
Çizelge 5.2 Siyah kil için belirlenmiş permeabilite ve konsolidasyon katsayıları	150
Çizelge 5.3 Permeabilite parametreleri	159
Çizelge 5.4 Yeşil kil ve siyah kil için sıkışma indeksleri	160

## ÖNSÖZ

Permeabilitenin mühendislik tasarımlarında önemli bir yere sahip olduğu ve anahtar bir eleman olarak göz önünde bulundurulduğu geoteknik problemlerden birisi de kademeli olarak inşa edilen dolgular altında yer alan yumuşak zeminlerin konsolidasyon davranışının araştırılmasıdır. Bu çalışmada dolgu altında yer alan yumuşak zeminlerin permeabilite karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile Alibey barajı temel zeminin kademeli dolgu inşaatı sırasında yatay ve düşey permeabilite katsayılarındaki değişim laboratuvarında deneysel çalışmalarla belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, Kılıç (2000) tarafından Alibey barajı temel zemininin kademeli dolgu inşaatı sırasındaki davranışını modellemek için gerçekleştirilen nümerik analiz çalışmalarında kullanılan temel zeminine ait permeabilite parametreleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın genel bir giriş bölümünden sonra 2. Bölümde konu ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. 3. Bölümde ise zeminlerde su akımı, permeabilitenin farklı deney düzenekleri ile belirlenmesi ve permeabilite katsayısının önemi hakkında bilgiler verilmiştir. 4. Bölümde, Alibey barajı temel zeminin permeabilite özelliklerini belirlemek amacı ile laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır. 5. Bölümde yapılan deneysel çalışmalar özetlenerek deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. 6. ve son bölümde ise sonuçlar ve öneriler kısmına yer verilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında, nezaketle tez danışmanım olmayı kabul eden, değerli bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasına katkıda bulunan tez danışmanım Prof. Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN' a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım sırasında görüşlerini aldığım Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM' a ve çalışmalarına göstermiş olduğu ilgi ve verdiği destekten dolayı Doç.Dr.Mustafa YILDIRIM'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince araştırmalarından, deneyimlerinden yararlandığım ve karşılaştığım problemlerin çözümünde yardımını hiçbir zaman eksik etmeyen Araş.Gör. Dr.Havvanur KILIÇ' a ve deneysel çalışma sırasında laboratuvarında karşılaştığım sorunların çözümünde bilgisine başvurduğum Öğr.Gör.Dr.Şükrü ÖZÇOBAN' a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam süresince yardımları ve destekleri ile her zaman yanımda olan arkadaşlarım Araş. Gör.Murat TONAROĞLU ve Araş.Gör.Şenol ADATEPE'ye çok teşekkür ederim. Her zaman gösterdiği ilgiden ve verdiği destekten dolayı Yrd. Doç.Dr. Zafer KÜTÜĞ'e çok teşekkür ederim. Hacim değişim ölçerin kalibrasyonu sırasındaki katkılarından dolayı Araş.Gör.İlknur SARGIN'a ve ilgilerinden dolayı Yrd.Doç.Dr. Mehmet BERİLGİN'e, Araş.Gör.Saadet BERİLGİN'e ve Araş.Gör. Perihan İPEKOĞLU'na çok teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı teknisyen Erhan EROL'a ve Ali YÜKSEL'e ve emeği geçen herkese katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince beni destekleyen babama ve anneme gösterdikleri sabır ve anlayış için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında büyük desteğini ve yardımını gördüğüm İnş.Yük.Müh. Ali ÖZENER'e çok teşekkür ederim.

## ÖZET

Geoteknik mühendisliğinde permeabilite zeminlerin en temel özelliklerinden birisidir. Mühendislik pratiğinde ortaya çıkan problemlerin bir çoğu zemin davranışında oldukça baskın bir faktör olan permeabilite katsayısının tasarımcı tarafından yeterince dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır. Permeabilitenin zeminlerin en temel özelliklerinden birisi olması, mühendislik tasarımlarında önemli ve büyüyen bir problem haline gelmesi yakın zamanda permeabilitenin de killerin mekanik davranışları kadar yoğun bir şekilde incelenmesi gerekliliğini getirmiştir.

Permeabilitenin mühendislik tasarımlarında önemli bir rol oynadığı ve anahtar bir eleman olarak göz önünde bulundurulduğu geoteknik problemlerden birisi de kademeli olarak inşa edilen dolgular altında yer alan yumuşak zeminlerin konsolidasyon davranışının araştırılmasıdır. Bu davranışın araştırılmasında temel zeminin dolgu inşaatına başlanmadan önceki yatay ve düşey permeabilite katsayısının ve inşaat sırasında meydana gelecek değişimlerin bilinmesi ve göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bu çalışmada dolgu altında yer alan yumuşak zeminlerin permeabilite karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile yüksek sıkışabilirliğe ve zayıf taşıma gücüne sahip Alibey barajı temel zemininin kademeli dolgu inşaatı sırasında yatay ve düşey permeabilite katsayılarındaki değişimi laboratuvarında deneysel çalışmalarla belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, Kılıç (2000) tarafından Alibey barajı temel zemininin aşamalı dolgu inşaatı sırasındaki davranışını modellemek için gerçekleştirilen gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon analizi çalışmalarında kullanılan temel zeminine ait permeabilite parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Araziden alınan örselenmiş numuneler bulamaç halinde hazırlanarak klasik permeabilite deney düzeneklerinden farklı bir deney sistemi olan Rowe hücresinde arazi başlangıç gerilmesine kadar konsolide edilmiş ve yine aynı deney sisteminde nümerik analizden belirlenmiş arazide kademeli dolgu altında etkiyecek olan efektif asal gerilmeler altında düşey ve yatay permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yatay permeabilite deneylerinde düşey permeabilite deneylerinden farklı olarak numune ortasına yerleştirilen bir kum dren vasıtası ile numune içerisinde radyal akım oluşturulmuş ve yatay permeabilite katsayısı belirlenmiştir.

Yapılan yatay ve düşey permeabilite deneyleri sonucunda temel zeminin permeabilitesinin boşluk oranı ile olan değişiminin çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen ilişkiler ile uyumlu olduğu görülmüş ve böylece Kılıç (2000) tarafından nümerik analizlerde kabul edilen lineer  $e$ -log  $k$  ilişkisi hem yatay, hem de düşey permeabilite değişimi için deneysel olarak doğrulanmıştır. Permeabilitenin değişimini gösteren  $C_k$  parametresinin değeri ise Kılıç (2000) tarafından kabul edilen değerden daha düşük olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışma bu tür deneysel çalışmaların, özellikle permeabilite anizotropisi açısından, örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmesinin daha faydalı ve gerçekçi olacağını göstermiştir. Ayrıca, permeabilite ile ilgili parametrelerin belirlenmesi için yapılacak araştırmaların laboratuvarında farklı deney düzeneklerinde yapılacak deneylerle ve arazide yerinde yapılacak permeabilite deneyleri ile desteklenmesinin ve sonuçlarının karşılaştırılması ile daha doğru ve gerçekçi sonuçlara ulaşılabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte Rowe hücresinde gerçekleştirilen permeabilite deneylerinin, özellikle yatay permeabilitenin laboratuvarında direkt olarak belirlenebilme kolaylığı açısından oldukça iyi bir deney tekniği olduğu düşünülmektedir.



## ABSTRACT

Permeability is one of the fundamental properties of soils in geotechnical engineering. Many of the problems encountered in engineering are due to the insufficient consideration of permeability which is one of the dominating factors affecting the behavior of soils. Since the permeability is a key element and as it is a problem of growing importance in engineering designs, it became a necessity to investigate the permeability behavior of soils as intensively as their mechanical behavior.

One of the problems which permeability plays a significant role is the investigation of consolidation behavior of soils underneath the embankments. While investigating this behavior, the variations of horizontal and vertical permeability during construction have to be taken into account by the designer.

In this study as a part of the continuing research on the properties and behavior of foundation layers of Alibey dam, a comprehensive experimental investigation has been carried out on the permeability characteristics of the natural ground in order to define the variation of its permeability with changing void ratio.

In the content of this experimental research, the variations of horizontal (radial) and vertical permeability of natural foundation layers of Alibey Dam which are known to have high compressibility and low bearing capacity have been investigated by the means of some permeability tests performed in the laboratory. The permeability parameters determined from the laboratory experiments were compared with those of the parameters used by Kılıç(2000) in analysing the stress-strain-consolidation behavior of soil layers under the dam.

In order to determine the mode of variation of horizontal and vertical permeability with void ratio with laboratory tests samples were reconstituted by slurry consolidation and consolidated both vertically and radially in the Rowe cell under effective principle stresses imposed on them during staged fill construction and which were obtained from the numerical analysis by Kılıç(2000). At the end of each consolidation period vertical and horizontal permeability tests were conducted on samples. Horizontal (radial) permeability tests were performed by forming a sand drain in the center of the samples.

The variations of both horizontal and vertical permeability with void ratio were found to be in good agreement with some of the relationships proposed by other researchers. The assumption of a linear  $e$ -log  $k$  relationship considered in the numerical analysis by Kılıç (2000) is confirmed for the variation of both horizontal and vertical permeability.  $C_k$  parameter which is utilized to define the change of permeability with void ratio is experimentally determined in horizontal and vertical permeability tests. The experimentally determined values of  $C_k$  are observed to be lower than the values used by Kılıç (2000). The coefficient of consolidation values obtained from the vertical consolidation tests were compared with the coefficients of consolidation back-calculated from field behavior and it was seen that the values determined in the field were greater than the laboratory values due to the presence of silt laminae in the field.

As a consequence of this study, the Rowe cell is recommended to be a very useful experiment apparatus to determine the radial and vertical permeability of soils. Additionally, it is believed that different laboratory and field permeability tests should be carried out in order to be able to make a comparison between different methods of measurement and to establish a realistic value of the coefficient of permeability.

## 1.GİRİŞ

İçerisinden, suyun veya gazın geçebileceği birbirleri ile bağlantılı boşluklar, çatlaklar veya başka geçiş yolları içeren malzemeler geçirimli bir malzeme olarak tanımlanır. Bu tanımdan yola çıkıldığında zeminler, agregalar, tutturulmuş veya ayırık kayalar genellikle havayı ve suyu geçirebilen malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu anlamda permeabilite zeminin ya da kayanın içerisinden suyun geçmesine müsaade ettiği kapasite olarak tanımlanabilir.

Geoteknik mühendisliğinde permeabilite, zeminlerin en temel özelliklerinden birisidir. Hidrolik yapılar, yollar, drenajın önemli olduğu diğer mühendislik yapılarının tasarımlarında ve yapım aşamalarında ortaya çıkan problemlerin çoğu zemin ve kaya ortamındaki permeabilite dengesizliğinden kaynaklanmaktadır. Su, sıkça duvar arkasından, yol temel tabakası altından, kanal kaplamalarından sızarak bu tür mühendislik yapılarının güvenliğine ve performansına zararlı etkilerde bulunmaktadır. Zemin ve kaya ortamında hapsolmuş olan su boşluk suyu basıncı artışlarına neden olmakta ve depremler esnasında stabiliteyi ciddi bir şekilde tehdit etmektedir. Bina ya da baraj temellerinin oturduğu zemin formasyonunun yüksek permeabilitesi ciddi sızıntı ve kaldırma kuvveti problemlerine neden olmaktadır. Ayrıca, permeabilite yumuşak kil çökelleri üzerinde inşa edilen dolgular ve depolama alanlarının tasarım ve yapımında, yeraltı suyu rejiminin araştırılmasında, doğal veya kazı ile oluşturulmuş şevlerin uzun süreli stabilite davranışında, mühendislik yapılarının çevresinde veya içerisinde uygulanan yükler altında kil formasyonlarının konsolidasyon davranışının araştırılmasında oldukça baskın rol oynayan bir parametre olmaktadır.

Permeabilitenin anahtar bir eleman olarak göz önünde bulundurulduğu geoteknik problemlerden en önemlisi ve en karmaşığı hiç şüphesiz konsolidasyon yani oturma analizleridir. Oturma analizi için gerekli olan önemli bilgiler; her bir tabaka için güvenilir bir ön konsolidasyon basıncı tahmini, birincil konsolidasyonun tamamlandığı  $e-\log \sigma_v'$  eğrileri ve permeabilitenin boşluk oranı ile değişimi ( $e-k$ ) ilişkileridir. Bunun yanında, dolgu altında yer alan kil tabakalarının konsolidasyonunu hızlandırmak için düşey drenler kullanılması durumunda, şekil değiştirmelerin düşey fakat su akımının yatay olduğu bilinmektedir. Bu durumda, kil tabakasının doğal boşluk oranındaki yatay permeabilitesinin düşey sıkışma sırasındaki değişimi önemli önemli olmakta değerler dren tiplerinin ve yerlerinin seçiminde, projenin maliyetinde anahtar parametre olmaktadır. Raymond (1966), Mesri ve Rokhsar(1974) ve Tavenas(1979) yaptıkları çalışmalar sonucunda kil formasyonlarının konsolidasyon(oturma) analizinde kilin permeabilite ve sıkışma parametrelerinin numerik analizlerde bağımsız veri olarak kullanılmasının Terzaghi' nin bir boyutlu konsolidasyon

probleminin çözümünden elde edilen konsolidasyon katsayısına ( $c_v$ ) başvurmadan daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda bahsedildiği gibi permeabilitenin zeminlerin en temel özelliklerinden birisi olması, mühendislik tasarımlarında önemli rol oynaması ve doğal yumuşak killerin permeabilitesinin ölçülmesinin oldukça önemli ve büyüyen bir problem haline gelmesi yakın zamanda permeabilitenin killerin mekanik davranışları kadar yoğun bir şekilde incelenmesi gerekliliğini getirmiştir. Yatay ve düşey permeabilite laboratuvarında ve arazide değişik deneysel metodlar kullanılarak belirlenmesi, direkt ve indirekt değerlendirme yöntemleri sonucu elde edilen değerlerin karşılaştırılması ve en pratik yöntemin saptanmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir. Böylece değişik laboratuvar ve arazi ölçüm teknikleri de kullanılarak permeabilitenin büyüklüğünü saptayan parametreler, permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişiminin kuralı ve doğal killerin permeabilite anizotropisi belirlenmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışmada da yumuşak killerin davranışını inceleyen araştırmaların bir parçası olarak Alibeyköy barajı temel zeminini oluşturan yeşil kil ve siyah kil tabakalarının permeabilite karakteristikleri laboratuvarında deneysel yöntemler kullanılarak araştırılması amaçlanmıştır. Daha önce yapılan araştırmalarda çoğunlukla yatay ve düşey permeabilitenin belirlenmesi için geleneksel laboratuvar deneyleri olan permeametre ve ödometre hücrelerinde sabit seviyeli ve düşen seviyeli permeabilite deneylerinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada ise gerek yatay gerekse düşey permeabilite deneyleri yapabileceği ve büyük boyutlardaki numuneler üzerinde deney yapma olanağını sağlayan Rowe konsolidasyon hücresinden yararlanılmıştır. Deneyler kademeli yükleme altında uzun süreli davranışı ayrıntılı olarak araştırılan Alibeyköy Barajı dolgusu altında yer alan ve konsolidasyon davranışını kontrol eden siyah ve yeşil kil tabakalarından alınmış örselenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sulu çamur kıvamında hazırlanan numuneler önce Alibeyköy Barajı'nın Kılıç(2000) tarafından PLAXIS programı kullanılarak modellenmesi sonucunda belirlenmiş arazideki efektif jeolojik gerilmeler altında konsolide edilmişlerdir. Arazideki düşey jeolojik efektif gerilmeye karşılık gelen gerilmeden başlanarak, nümerik analizler sonucu kademeli yükleme altında olduğu belirlenen gerilmeler altında konsolide edilmiş ve daha sonra ise bu gerilmeler altında düşey ve yatay permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait yatay permeabilite katsayısını belirleyebilmek için numuneler düşey jeolojik gerilmeye kadar konsolide edildikten sonra numune ortasında bir kum dren oluşturularak yatay permeabiliteyi ölçmek için gerekli yatay drenaj sınırları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçların literatürde farklı deney düzenekleri kullanılarak elde edilmiş boşluk oranı-permeabilite ilişkileri ile olan

uyumu araştırılmıştır. Böylece Alibeyköy temel zeminini oluşturan yeşil ve siyah kil tabakalarının yatay ve düşey permeabilite katsayısının, dolgu kademelerinin inşaatı sırasında boşluk oranı ile olan değişimi laboratuarda deneysel olarak modellenmeye çalışılmıştır. Deneysel olarak elde edilen boşluk oranı ile permeabilite katsayısı arasındaki ilişkiler, literatürde benzer çalışmalarda önerilen farklı ilişkilerle tanımlanmaya çalışılmış ve bunlarla uyumu araştırılmıştır. Permeabilite katsayısının laboratuarda direkt olarak belirlenebilmesi açısından Rowe hücresinde permeabilite deneylerinin gerçekleştirilmesinin oldukça iyi bir yöntem olduğu saptanmıştır. Özellikle drenaj koşullarının kontrol edilebilmesi ,hem konsolidasyon hem de permeabilite deneylerinin gerçekleştirilebilmesi, büyük boyutlu numunelerde deney yapma imkanının bulunması, bu deneysel tekniğin olumlu yönlerini oluşturmaktadır. Araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yatay ve düşey permeabilite deneylerinin gerçekleştirilmesi durumunda, zeminin iç yapısı da göz önünde bulundurulacağı için, daha gerçekçi sonuçların elde edilebileceği açıktır. Böylece permeabilite anizotropisi ve permeabilitenin arazideki değerleri hakkında daha doğru fikirler elde edilebilecektir.

## 2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Zeminlerin permeabilite katsayısını belirlenmesi geoteknik mühendisliğinde oldukça zor bir problem olarak değerlendirilmiştir. Çevre korumasına karşı büyüyen ilgi, yeraltı suyunun ve uzaklaştırılabilir zararlı atıkların kontrol altında tutulması isteği, permeabilitenin belirlenebilmesi için güvenilir metodlara olan ihtiyacı da dikkate değer bir biçimde artırmıştır.

Daha güvenilir metodların tespiti için hem laboratuarda hem de arazide farklı deney teknikleri kullanılarak ve bu teknikler birbirleri ile karşılaştırılarak zeminlerin permeabilitesini belirlemek konusunda ilerlemeler kaydedilmiştir. Gerek arazide gerekse laboratuarda yapılan deneyler sonucu permeabilitenin belirlenmesi için kullanılan en klasik yöntemlerden birisi olan, laboratuarda kademeli yüklemeli ödometre deneylerinden bulunan  $c_v$ 'nin kullanılması yolu ile  $k$  değerinin hesaplanmasındaki kısıtlamalar ve sınırlamalar oldukça iyi saptanmıştır.(Olson 1985; Tavenas ve diğerleri 1983b). Bununla beraber homojen killerin permeabilitesinin direkt olarak ölçülmesi için olan teknikler, güvenilir ve gerçekleştirilmesi kolay olan noktaya kadar ilerletilmiştir (Olson ve Daniel 1981; Tavenas ve diğerleri 1983b). Fakat anizotropi, heterojenlik ve tabakalanmanın olabileceği arazi koşullarında, laboratuvar deneyleri ile permeabilitelerinin araştırılmasında küçük numunelerin büyük zemin kütlelerini temsili, hâlâ ciddi bir sorun olarak kalmaktadır (Simons 1975; Walker ve Morgan 1977).

Anizotropi, heterojenlik ve tabakalanmanın olası olduğu koşullar altında zeminlerin permeabilitesini belirlemek için yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları şu şekilde özetlenebilir.

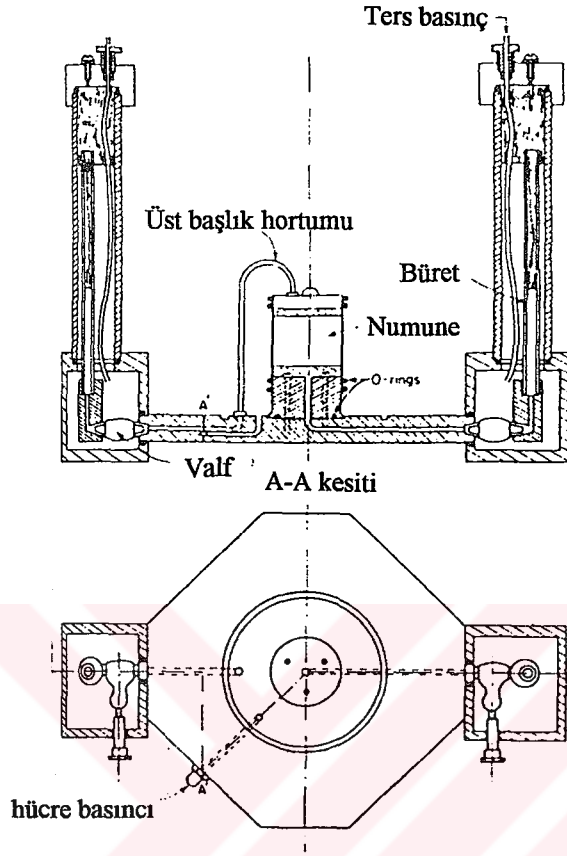
Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil (1983a) tarafından doğal killerin özelliklerinin ve kil formasyonlarının davranışını inceleyen araştırmaların bir parçası olarak yumuşak killerin permeabilitesi üzerinde geniş kapsamlı olarak araştırılmıştır. Bu bağlamda, permeabilite katsayısının direkt ve indirekt değerlendirme metodları karşılaştırılarak en iyi pratik metodun belirlenmesi amaçlanmıştır. Laboratuarda gerçekleştirilen deneyler, üç eksenli basınç aletinde ve ödometre hücrelerinde gerçekleştirilmiştir. Ödometrelerde permeabilite deneyleri üç tipte gerçekleştirilmiştir. Bunlar, geleneksel ödometre deneyi, sabit şekil değiştirme hızlı konsolidasyon deneyi (CRS), kontrollü hidrolik eğimli konsolidasyon (CGT) deneyleridir. Sızıntı olasılıklarını yok edecek bir şekilde geliştirilmiş olan üç eksenli deney aletinde 50mm, 100 mm, 200mm çaplı numuneler üzerinde arazi gerilme koşulları altında permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelere ait zemin özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1 İncelenen killerin geoteknik özellikleri( Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)

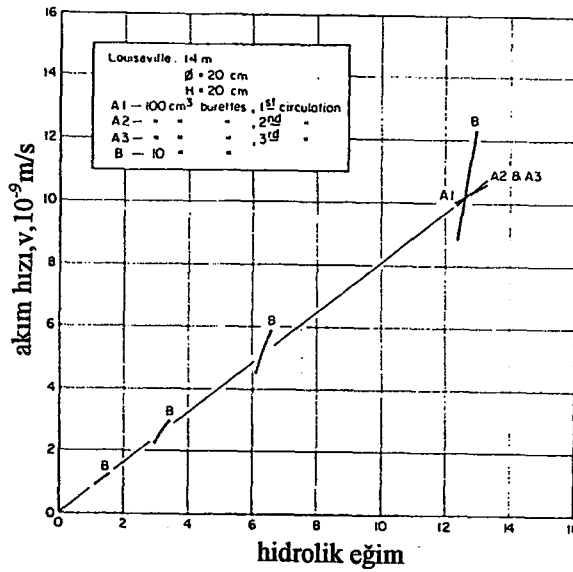
Bölge	Derinlik(m)	w(%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	I <sub>L</sub>	%<2 $\mu$	$\sigma'_p$ (kPa)	C <sub>c</sub>
<b>Champlain Deniz Killeri</b>									
St- Zotique	2.00 -17.00	91-63	61-43	25-23	36-20	1.8- 2.2	80-60	50-240	6.0- 2.0
Fort Lennox	6.10	79	70	22	48	1.2	81	180	3.0
St- Hilaire	9.50	69	55	23	32	1.4	71	125	4.0
Mascouche	3.80	61	55	24	31	1.2	76	290	2.8
Louiseville	2.90-26.00	79-60	71-59	27-25	44-34	1.2- 0.8	77-85	80-300	3.7- 2.2
Batiscan	5.50-20.50	80-71	35-54	22-24	17-31	2.6- 1.5	77-91	80-190	2.2- 4.5
St- Thuribe	6.90	52	44	22	22	1.3	44	195	1.2
St-Alban	1.90-7.80	90-40	53-28	25-18	28-10	2.7- 2.0	78-31	40-100	2.5- 1.2
<b>Diğer Kanada Killeri</b>									
B2	4.90-13.10	31.38	30.20	15-14	15-06	1.4- 2.9	36-43	150-105	0.3- 0.5
B6	2.80-13.40	53-29	24-44	14-25	21-09	2.1- 0.9	76-51	130-180	0.7- 0.3
Matagami	1.9-10.30	108-48	74-48	25-28	49-20	2.3- 1.4	91-65	55-90	5.6- 1.2
<b>Diğer Killer</b>									
Atchafalaya	20.80	65	99	37	62	0.5	76	160	1.1
Backaebol	5.40	81	74	28	46	1.1	59	55	2.2
Lilla Mellösa	4.30	104	111	38	73	0.9	63	40	3.1

Üç eksenli deney aletinde 200mm çaplı numuneler üzerinde farklı ters basınçlar uygulanarak ve farklı hidrolik eğimler kullanılarak yapılan deneylerle Darcy yasası'nın geçerliliği de araştırılmıştır. Şekil 2.1' de gösterilen üç eksenli deney aleti, sabit seviyeli permeabilite deneyler gerçekleştirebilmek için numunenin alt ve üst uçlarına bağlantılı olarak yerleştirilen, ters basıncın uygulanabildiği, içeri giren ve dışarı çıkan akım miktarının ölçülebildiği iki tane büretten oluşmaktadır. Büretlere uygulanan ters basınçlar civa sütunu yardımı ile sağlanmıştır. Büretlerdeki seviye farkı numune içerisinde efektif gerilme değişimine ve dolayısı ile ilişkili olarak hacim değişimlerine neden olmaktadır. Eğer seviye değişimi hızlı ise hacim değişimleri deney için engelleyici nitelikte olmaktadır. Bu durum 200 mm çapındaki numune üzerinde yapılmış 7 başarılı deney sonuçları ile kanıtlanmıştır. Şekil 2.2'de deneylerde farklı hidrolik eğimlerde ölçülen akım hızları gösterilmiştir. Yapılan A seri deneylerde 100 cm<sup>3</sup>' lük büretler ve hidrolik eğim değeri olarak ise 12.5 değeri kullanılmıştır. Deneyler yaklaşık olarak 72 saati aşan bir periyot içerisinde tamamlanmıştır. A<sub>2</sub> ve A<sub>3</sub> deney serilerinde kararlı akıma ulaşır ulaşmaz akım hızı ile hidrolik eğimin Darcy yasası ile uyumlu olduğu görülmektedir. B serisi deneylerinde ise 10 cm<sup>3</sup>'lük büretlerde farklı hidrolik eğim değerleri kullanılarak permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Maksimum hidrolik eğim olan 12.5 değerinde akım hızının yüksek olması nedeni ile boşluk suyu basıncında 6 saatte 1.2 kPa kadarlık ani bir değişim olmuştur. Bu durumda, numunedeki hacim değişimlerinin dolayısı ile efektif gerilme değişimlerinin A serisindeki deneyler ile karşılaştırıldığında oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 2.2' den de görüleceği gibi hız- hidrolik eğim değişimleri de Darcy yasası'ndan sapmaktadır. Azalan hidrolik eğim değerlerinde ise Darcy yasasından olan sapmalar daha az olmaktadır. Hidrolik eğimin 1.4 olması halinde ise sapmanın ihmal edilebilir mertebede olduğu sonucu çıkmaktadır. Şekil 2.3, 50 mm ve 200mm çapındaki Louiseville kili, Matagami kili ve Atchalafaya kili numuneleri üzerinde Darcy yasası'nın geçerliliğini araştırmak için yapılmış deney sonuçlarını göstermektedir. Bütün deneylerde v-i ilişkileri orijinden geçen bir doğru üzerine düşmekte ve böylece Darcy yasası'nın geçerliliğini doğrulamaktadır.

Aynı araştırmacılar tarafından permeabiliteyi belirlemek için ödometre hücrelerinde düşen seviyeli permeabilite deneyleri de yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ödometre hücrelerinin düşen seviyeli deneylere adapte edilmiş hali Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Ödometre aletinde yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyleri ile başlangıç arazi koşulları altındaki ( $\sigma_{vo}, e_o$ ) permeabilitenin yanısıra artan düşey efektif gerilmeler altında permeabilite katsayısı k'nın boşluk oranı e ile olan değişimi belirlenmiştir.

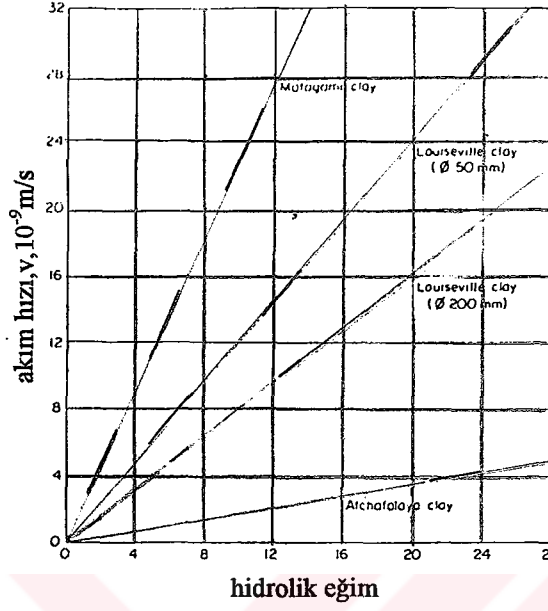


Şekil 2.1 Permeabilite ölçümleri için düzenlenmiş üç eksenli deney aleti (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)

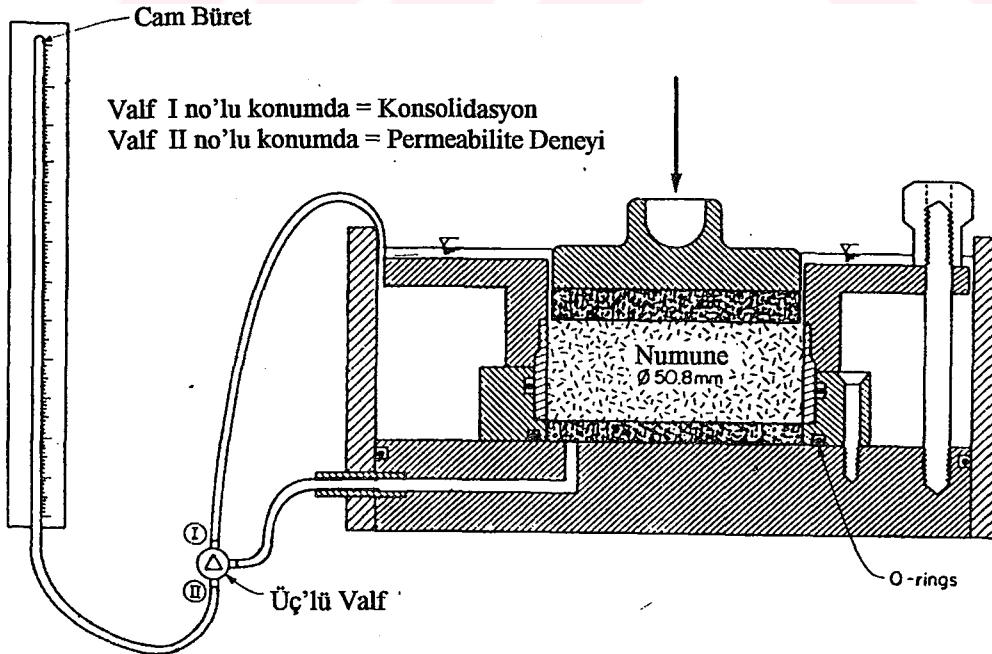


Şekil 2.2 Üç eksenli permeabilite deneylerinde büretlerdeki seviye değişimlerine göre elde edilen Akım hızı-Hidrolik Eğim İlişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)





Şekil 2.3 Farklı Hidrolik Eğimler altında üç eksenli permeabilite deneylerinden elde edilen Akım hızı-Hidrolik eğim ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



Şekil 2.4 Düşen seviyeli permeabilite deneyine göre uyarlanmış ödometre hücresi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)

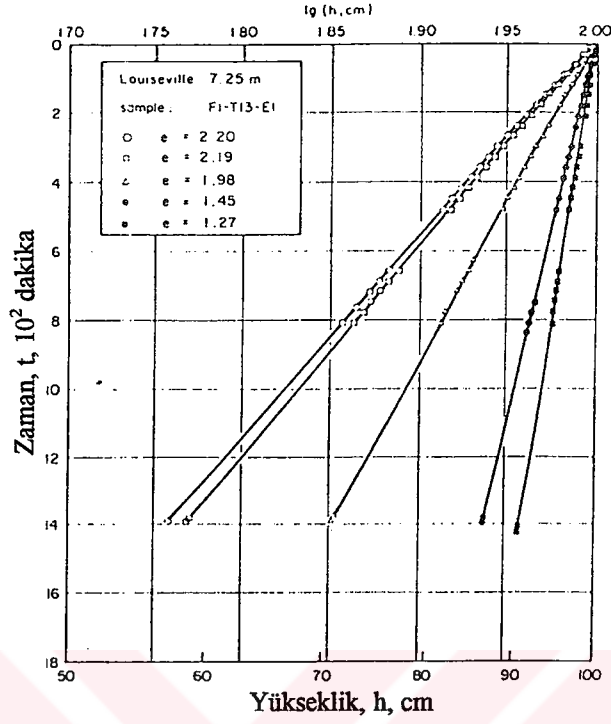
Bu deneyler sonucunda Louiseville kili için Şekil 2.5'te gösterildiği gibi hidrolik yük-zaman (logh-t) ilişkileri elde edilmiştir. Deney sonuçlarının doğrusallığı 30-50'nin altındaki hidrolik eğimlerde Darcy yasası'nın geçerliliğini göstermektedir. Louiseville kili için logh-t ilişkisi kullanılarak farklı boşluk oranı değerlerindeki permeabilite katsayıları elde edilmiştir. Şekil 2.6'da yapılan konsolidasyon /permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen  $e-\log\sigma'_v$  ve  $e-\log k$  ilişkileri görülmektedir.

Permeabilitenin konsolidasyon deney yöntemleri ile belirlenmesinin bir bölümü olarak CRS ve CGT deneyleri yapılmıştır. CGT deneyinde, numunenin tabanında oluşan  $u_b$  sabit tutulmuş ve  $k$ ,  $M$  (deformasyon modülü) ve boşluk suyu basıncı izokronlarının deney süresince sabit olduğu varsayılarak ve Darcy yasası'nın uygulanması ile permeabilite katsayısı elde edilmiştir. Numune boyunun zamana göre değişimi  $(\partial H/\partial t)$  kullanılarak permeabilite katsayısı ( $k$ ) ve  $\Delta e=(1+e_0)/ (\Delta H/H)$  eşitliği kullanılarak boşluk oranı değişimleri elde edilmiştir. Sonuç olarak istenilen  $e-k$  ilişkisi de elde edilmiştir.

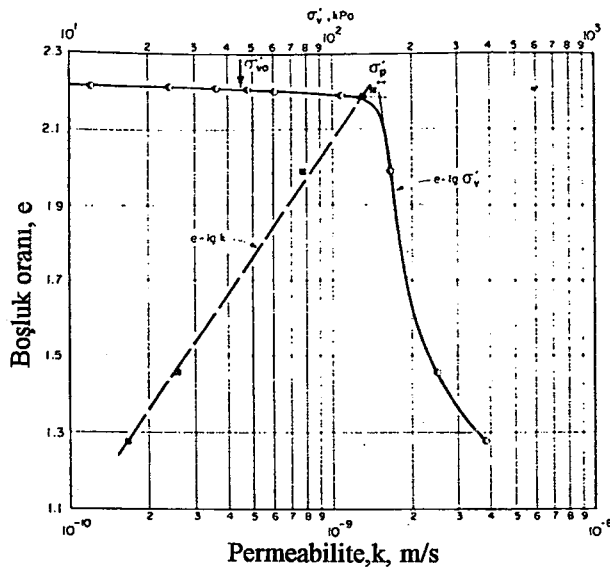
CRS deneylerinde ise şekil değiştirme hızı sabit tutularak Smith ve Wahls(1969) tarafından varsayılan sabit permeabilite ve boşluk oranının zamanla değişiminin doğrusal olduğu ilişki geçerli kabul edilmiştir. Louiseville kili için CRS deneyinden elde edilen sonuçlar 1,8 ile 2,1 arasındaki boşluk oranlarında ödometrede yapılan düşen seviyeli deney sonuçları ile oldukça büyük farklılık göstermektedir (Şekil 2.7).Azalan boşluk oranı değerlerinde bu farklılaşma azalmasına rağmen hesaplanan  $k$  değerleri, lineer  $e-\log k$  ilişkisi veren direkt ölçüm metodlarından düşük değerlerdedir. Sonuç olarak CRS deneylerinden elde edilen  $k$  değerleri  $\sigma'_p$  civarlarında çok büyük olmakta , küçük boşluk oranı değerlerinde ise olabildiğinden az olmaktadır. CGT deneylerinde ise bütün boşluk oranı değerlerinde  $k$  değeri çok küçük olarak tahmin edilmiştir.

Bu araştırmanın bir başka parçası olarak numunenin arazideki koşulları temsil edebilmesi ve numune boyutlarının etkilerinin araştırılması için üç eksenli deneylerde  $\emptyset 200\text{mm} \times 200\text{mm}$  ve  $\emptyset 50\text{mm} \times 50\text{mm}$  boyutlarındaki numunelerde sabit seviyeli deneyler ve ödometrede düşen seviyeli deneyler yapılmıştır. Batiscan kili üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Şekil 2.8' de gösterilmiştir.  $\emptyset 200\text{mm}$  boyutundaki üç eksenli deney numunelerinde ölçülen permeabilite değeri 100mm çapındaki numuneden elde edilen 50 mm çapındaki ödometre numunelerinde ölçülen permeabilite katsayısı değerlerinin ortasına düşmektedir.

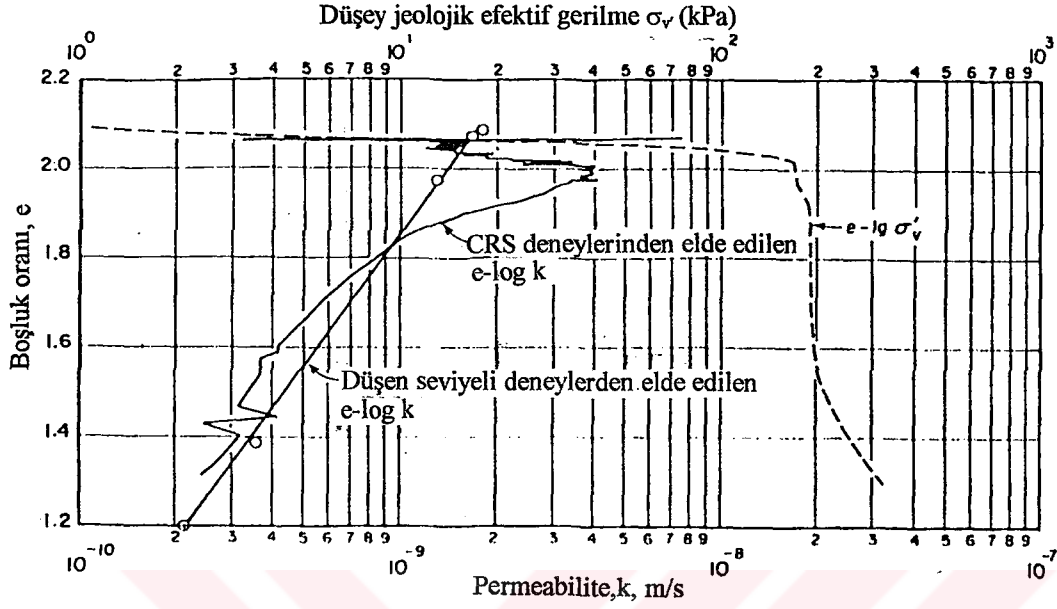
Kanada ve diğer bölgelerden alınan 13 farklı numune üzerinde yapılan benzer deney sonuçları da Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Şekil 2.9, büyük boyutlu numunelerde yapılan üç eksenli ve küçük boyutlu numunelerde yapılan üç eksenli ve ödometre deneylerinden elde edilen  $k_{vo}$



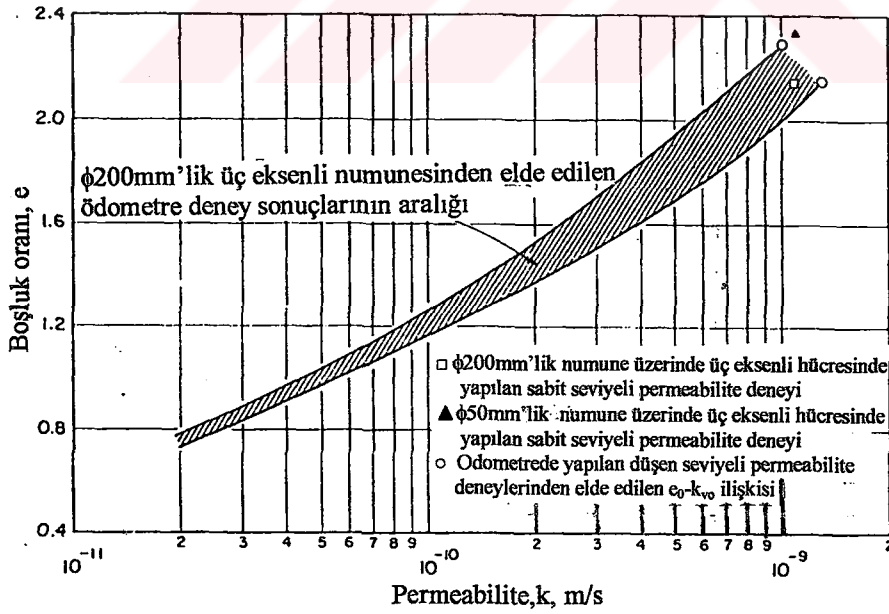
Şekil 2.5 Ödometrelerde yapılan düşen seviyeli deneylerden elde edilen log h-zaman ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



Şekil 2.6 Louiseville kili üzerinde yapılan tipik OEDK deneyleri sonucunda elde edilen  $e-\log \sigma_v'$  ve  $e-\log k$  ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



Şekil 2.7 Louiseville kili için CRS ve düşen seviyeli deneylerden elde edilen  $e-\log \sigma'_v$  ve  $\log e-k$  ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



Şekil 2.8 Batiscan kili üzerinde yapılan ödometre ve üç eksenli permeabilite deneylerinden elde edilen  $e-\log k$  ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)

değerlerinin karşılaştırılmasını sunmaktadır. Uyum genel itibari ile oldukça iyi olmakla beraber dataların dağılımı şu şekildedir.

$$0,63 k_{vo(\delta do)} < k_{vo(\delta 200)} < 1,56 k_{vo(\delta do)}$$

$$0,65 k_{vo(\delta do)} < k_{vo(\delta 50)} < 1,20 k_{vo(\delta do)}$$

Farklı metodlarla belirlenen permeabilite katsayısı değerlerinin karşılaştırılması amacı ile doğal killer üzerinde bir seri deneyler yapılmıştır. Bunlar, ödometre hücresinde düşen seviyeli direkt ölçüm(OEDK), kademeli ödometre deneyleri ile  $c_v$ 'nin Taylor metodu kullanılarak yorumlanması(OED<sub>CvT</sub>) veya Cassagrande metodu kullanılarak yorumlanması(OED<sub>CvC</sub>), CRS ile yorumlanması(CRS) ve kontrollü hidrolik eğimli deneyler ile yorumlanması(CGT) olarak belirtilerek Louiseville kili için yapılan çeşitli metodlardan elde edilen e-log k ilişkilerinin tipik karşılaştırması Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

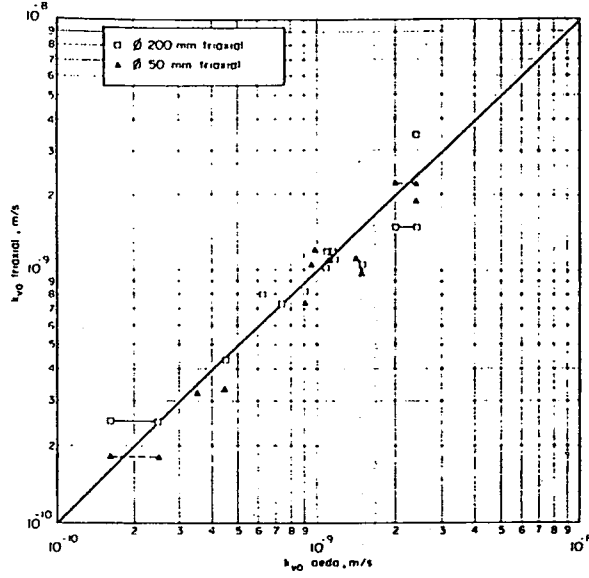
OEDK deneylerinden elde edilen direkt ölçümler doğrusal bir e-log k ilişkisi göstermektedir. OEDK deneylerinden Louiseville kili için elde edilen  $k_{vo}=1,8 \times 10^{-9}$  m/sn değeri yapılan üç eksenli deneylerle bulunan değer ile de doğrulanmaktadır. Şekil 2.7 'de gösterilen CRS sonuçları Şekil 2.10 'da verilen sonuçlar ile uyumluluk göstermiştir. CGT deney sonuçları ise CRS deney sonuçlarına göre daha düzensiz olmakla birlikte k değeri daha az tahmin edilmiştir.

Son olarak, Champlain killeri üzerinde yapılan çalışmada  $c_v$  değerinin kademeli yüklemeli ödometre deneylerinden yorumlanması ile aynı numune üzerinde deneyin bir parçası olarak yapılan OEDK deneyinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça farklı k değerlerinin bulunduğu görülmüştür. Bu durum Şekil 2.11' de düşen seviyeli ödometre deneylerinden elde edilen k ile aynı ödometre deneyinde Taylor ve Cassagrande metodu kullanılarak bulunan  $c_v$  değerinden elde edilen k'nın karşılaştırılması ile de gösterilmiştir.

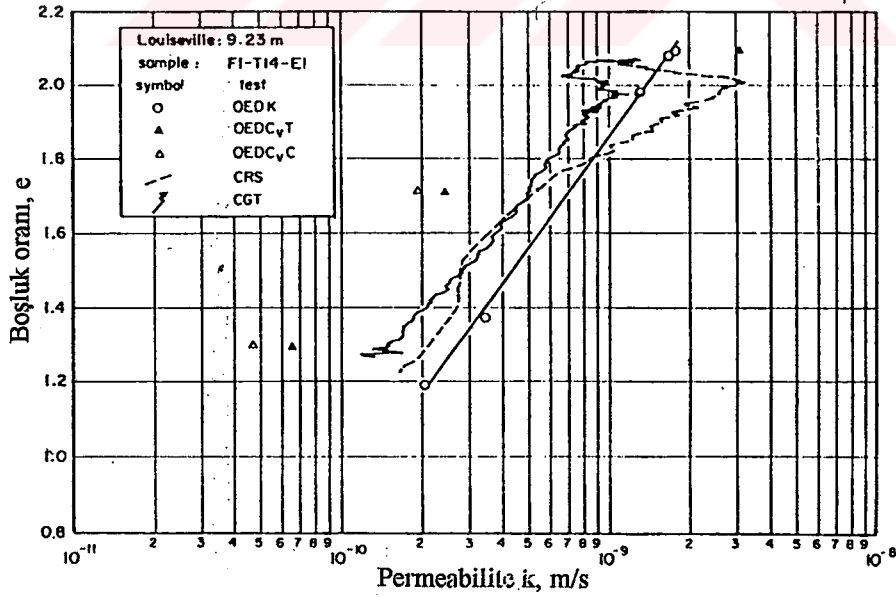
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular konsolidasyon deneyleri sonuçlarının edilen k'nın dolaylı olarak değerlendirilmesi ile dolaylı olarak k'nın elde edilmesini amaçlayan metodların doğal killerin permeabilite karakteristiklerinin belirlenmesi açısından yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır.

Son olarak bu çalışmanın genel sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Doğal killerde Darcy yasasının, hidrolik eğimlerin 0.1'den 50'ye kadar değiştiği bir aralıkta yapılan deneylerde Darcy yasası'nın geçerliliği doğrulanmıştır. Darcy yasası'nın daha küçük hidrolik eğimlerde de geçerli olabildiği fakat, kil numunelerinde meydana gelen birincil ve



Şekil 2.9 Büyük boyutlu numuneler üzerinde ölçülen üç eksenli ve küçük boyutlu numuneler üzerinde ölçülen ödometre permeabilite değerlerinin karşılaştırılması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



Şekil 2.10 Louiseville kili için OEDCV, OEDK, CRS ve CGT yöntemlerinden elde edilen e-log k ilişkilerinin karşılaştırılması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)

ikincil hacim değişimleri ve permeabilite deneyleri esnasında meydana gelebilen bazı hatalardan dolayı tam bir doğrulamanın yapılmasının mümkün olmadığı belirlenmiştir.

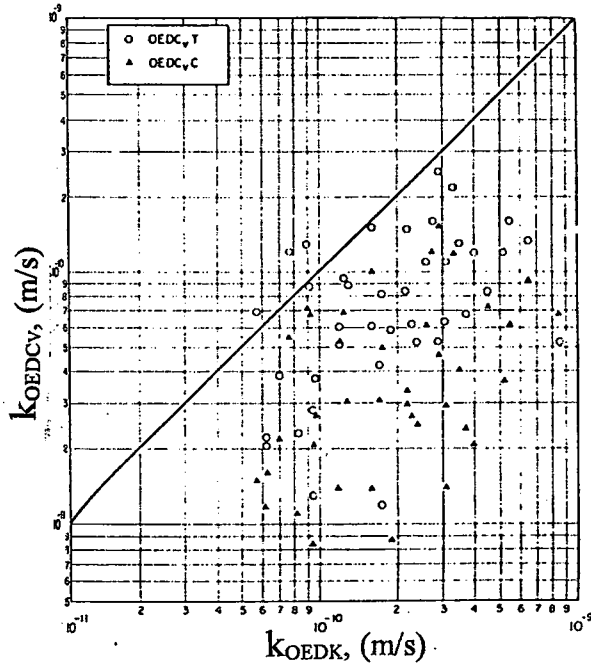
2. Örselenmemiş numunelerde permeabilite katsayısı'nın belirlenmesi için güvenilir metodlar ve araçlar geliştirilmiştir. Üç eksenli deneyde sabit seviyeli deneylerle sızıntı serbestliğine olanak sağlanmış ve deney süresince olan hacim değişiklikleri kontrol altında tutulabilmektedir. Üç eksenli deneylerin başka bir avantajı ise 200mm çap ve 200mm yüksekliğe kadar olan büyük boyutlu numunelerde deney yapma olanağı sağlamasıdır. Böylece, numunenin gerçek arazi koşullarını temsil edebilme problemi de kısmen ortadan kalkmış olmaktadır. Ödometrelerde yapılan düşen seviyeli deneyler de güvenilir, hızlı ve gerçekleştirilmesi oldukça basit bir deney yöntemi olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek hidrolik eğimlerin kullanılması numunede sızıntıdan ve hacim değişimlerinden dolayı olabilecek hataların azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca; permeabilite-boşluk oranı ilişkisinin tamamı pratik olarak tanımlanabilmektedir.

3. Konsolidasyon deneylerinin tüm türlerinden  $k$  veya  $e-k$  ilişkisinin dolaylı yollardan elde edilmesi Terzaghi'nin konsolidasyon teorisi varsayımlarının yanlış yorumlanmasından dolayı yetersiz kalmaktadır.

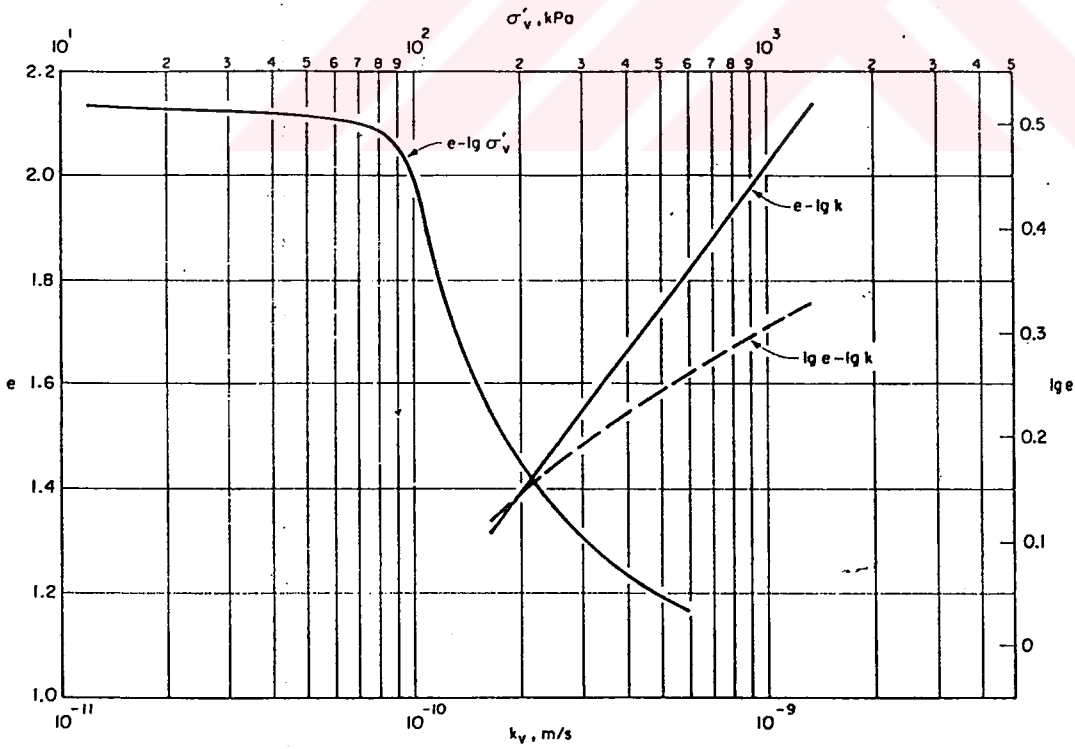
4. Ödometre deneylerinde düşen seviyeli olarak yapılan deneyler doğal killerin permeabilite karakteristiklerini belirlemek için en iyi pratik metod olarak ortaya çıkmaktadır.

Tavenas, Jean, Leblond, Leroueil(1983b) tarafından doğal yumuşak killerin permeabilite karakteristiklerini belirlemek için yapılan çalışmanın ikinci aşamasında Kanada, Amerika ve İsviçre'den örselenmemiş olarak alınan doğal killerin permeabilite karakteristikleri laboratuarda araştırılmıştır. Araştırmada incelenen doğal killere ait zemin özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir. Sonuçlar, mühendislik pratiğinde karşılaşılan ve geçerliliği en çok olan hacimsel şekil değiştirmenin geçerli olduğu doğrusal ilişki olan  $e-\log k$  ilişkisi şeklinde verilmiştir.

Deneylerin ilk aşamasında 200mm çapında, 100mm yüksekliğinde numuneler arazi efektif gerilmeleri altında konsolide edilerek bu numuneler üzerinde büyük üç eksenli hücrede sabit seviyeli deneyler yapılmıştır. Bu deneyleri takiben numune düşey ve yatay olarak kesilerek üç eksenli hücre için 50mm çapında, 50mm yüksekliğinde ve ödometre deneyi için 50mm çapında ve 19 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanarak yeniden permeabilite deneyleri yapılmıştır. Küçük üç eksenli numuneler üzerinde de büyük numunelerde olduğu gibi arazi gerilmeleri altında sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Ödometre numuneleri ise klasik konsolidasyon deneyine maruz bırakılmış ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisinin



Şekil 2.11 Champlain kili için OEDK ile ölçülen permeabiliteler ile OED<sub>c<sub>v</sub></sub> ile hesaplanan permeabilitelerin karşılaştırılması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



Şekil 2.12 Batiscan Kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)



tanımlanabilmesi için konsolidasyonun değişik kademelerinde düşen seviyeli deneyler yardımı ile permeabilite ölçümleri yapılmıştır. Büyük ve küçük numunelerde, düşey ve yatay yönlerden alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler permeabilite anizotropisinin olduğu kadar boyut etkilerinin de değerlendirilmesi için yapılmıştır.

200 mm ve 50 mm çaplarındaki numunelerde yapılan üç eksenli deneyler, Tavenas ve diğerleri tarafından (1983a)'da belirtildiği gibi özel olarak dizayn edilmiş sızıntı serbestliği tanınan hücrelerde yapılmıştır (Şekil 2.1). Üç eksenli deneylerde hidrolik eğim oluşturmak için gerekli olan boşluk suyu basıncı farkı  $\Delta u$ , numunenin tabanında  $+\Delta u/2$  ve numunenin üzerinde ise  $-\Delta u/2$  olarak uygulanarak sağlanmıştır.

Ödometre deneyleri ise yine Tavenas ve diğerleri tarafından (1983a) belirtilen ve permeabilite ölçümleri için geliştirilmiş olan hücrede gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.4). Konsolidasyon yüklemesi, yük artış oranı 1.5 olan kademeler halinde 24 saatlik periyotlarla uygulanmıştır.  $\sigma_{vo}'$  değerinden sonraki gerilmelerde her 24 saatlik konsolidasyonun sonunda numunede sabit bir boşluk oranı değerini devam ettirebilmek için ödometre askısı kilitlemiş ve 24 saatlik konsolidasyon periyodunun sonunda düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir.

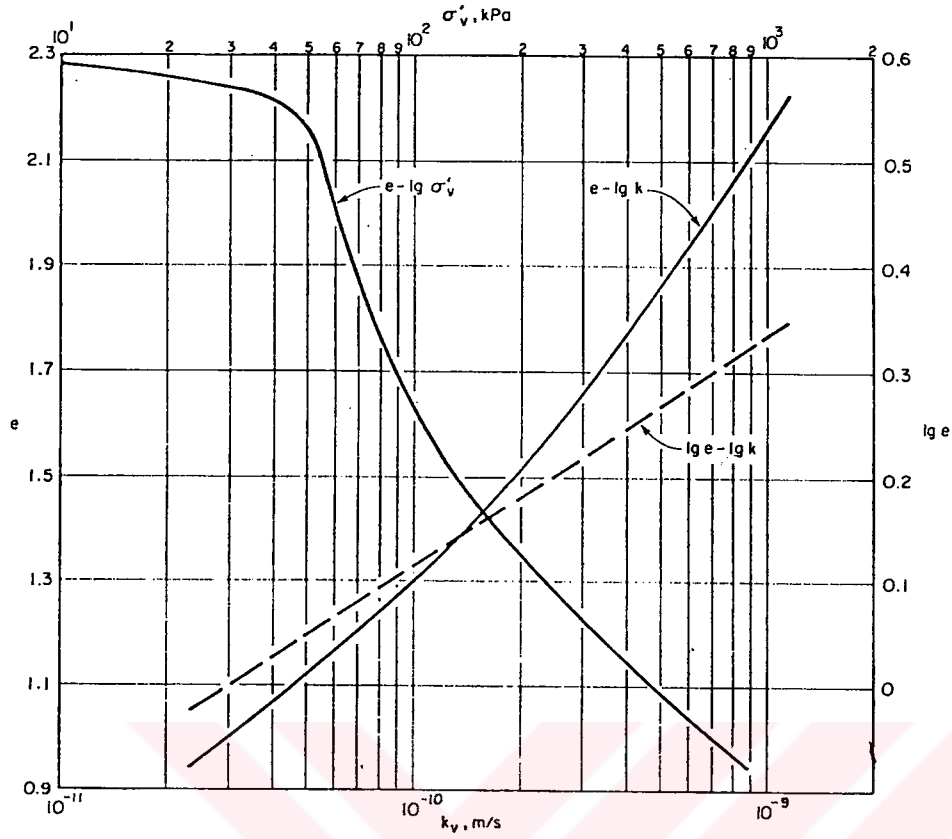
Araştırmanın bir parçası olarak literatürde boşluk oranı ile permeabilite arasında kurulmuş olan çeşitli ilişkilerin doğruluğu ve uygulanabilirliği yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalarla belirlenmeye çalışılmıştır. Örneğin Batiscan kili üzerinde yapılan permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen ve Şekil 2.12' de gösterilen e-log k ilişkisi kilin sıkışması ile birlikte permeabilitedeki azalmanın doğrusallığını iyi bir şekilde temsil etmektedir ve Taylor tarafından önerilen ampirik doğrusal ilişki ile de uyumluluk göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 2.12'den de görüleceği gibi log e-log k ilişkisi ise eğrisel bir formdadır. Taylor (1948) tarafından önerilen bu ilişki ;

$$\log k = \log k_0 - \frac{(e_0 - e)}{C_k} \quad (2.1)$$

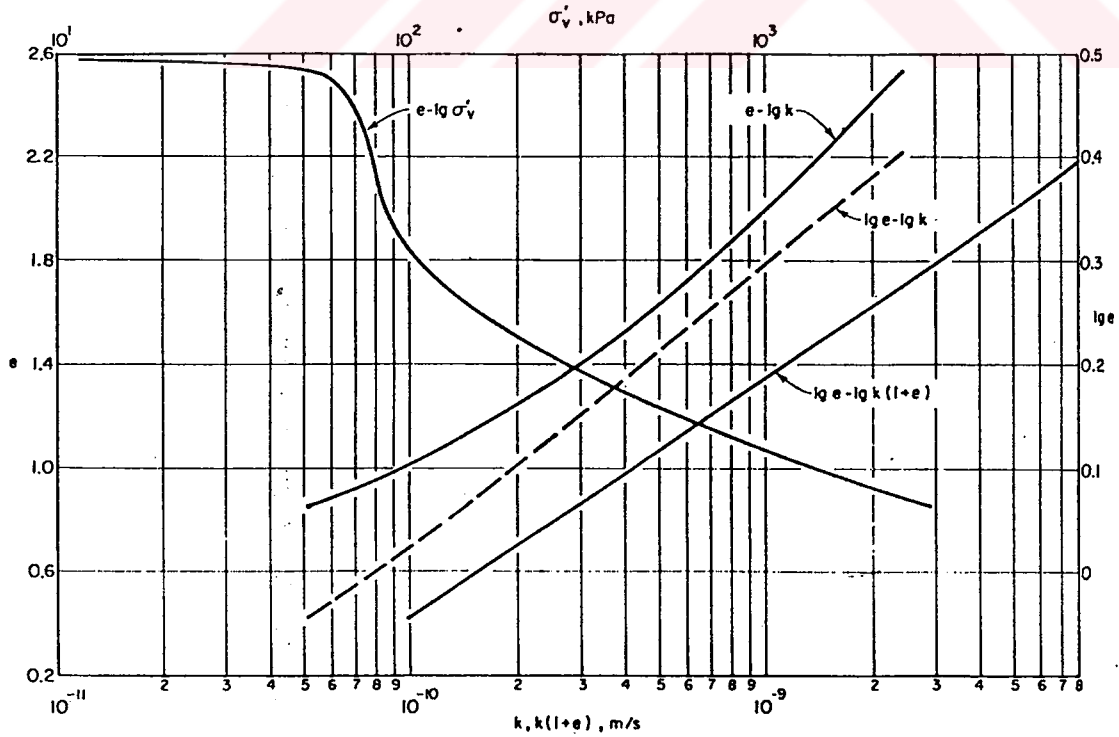
şeklindedir. Backebol kilinde yapılan permeabilite deney sonuçlarına göre ise elde edilen e-log k ilişkisi eğrisel bir formdadır (Şekil 2.13) ve log e-log k ilişkisi doğrusal olup Mesri ve Olson tarafından önerilen (2.2) no'lu eşitlikle oldukça uyumludur.

$$\log k = A \log e + B \quad (2.2)$$

Son olarak Matagami kilinde oldukça büyük şekil değiştirmelere ve büyük boşluk oranı değişimlerine maruz bırakılarak yapılan deneyler sonucunda permeabilite ile boşluk oranı



Şekil 2.13 Backebol kili için Permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)



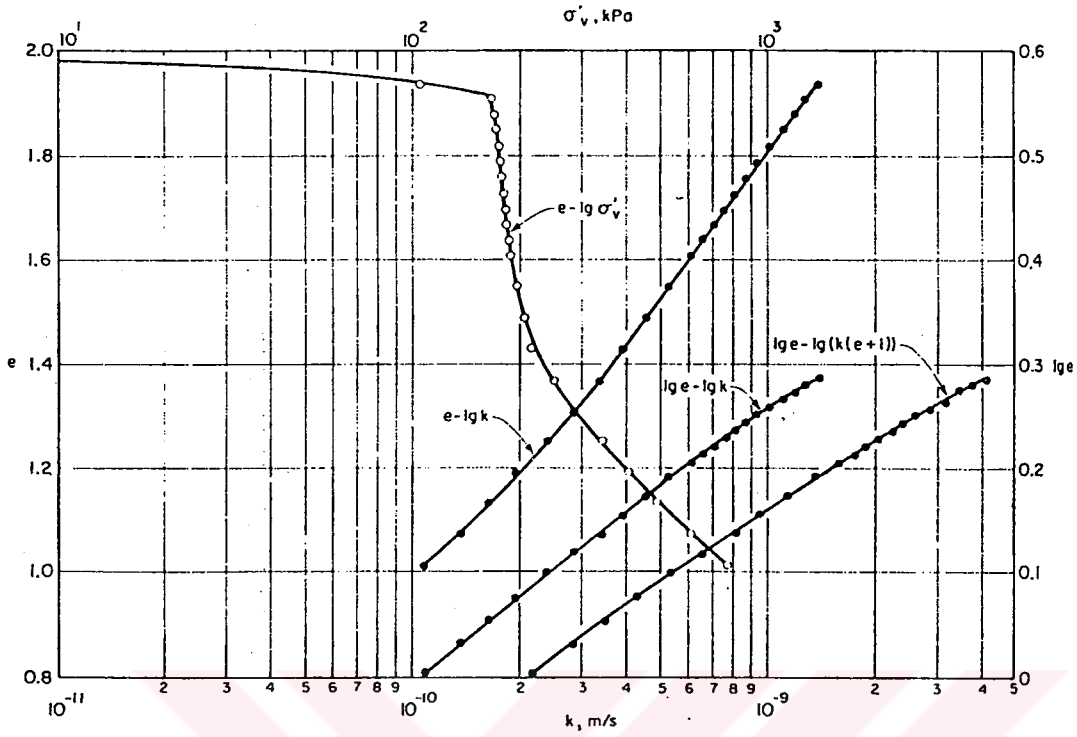
Şekil 2.14 Matagami kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)

arasında elde edilen e-k ilişkisinin Taylor(1984) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikle uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Şekil 2.14). Şekil 2.14'den de görüleceği gibi log e-log k (1+e) ilişkisi doğrusal bir ilişki vermektedir.

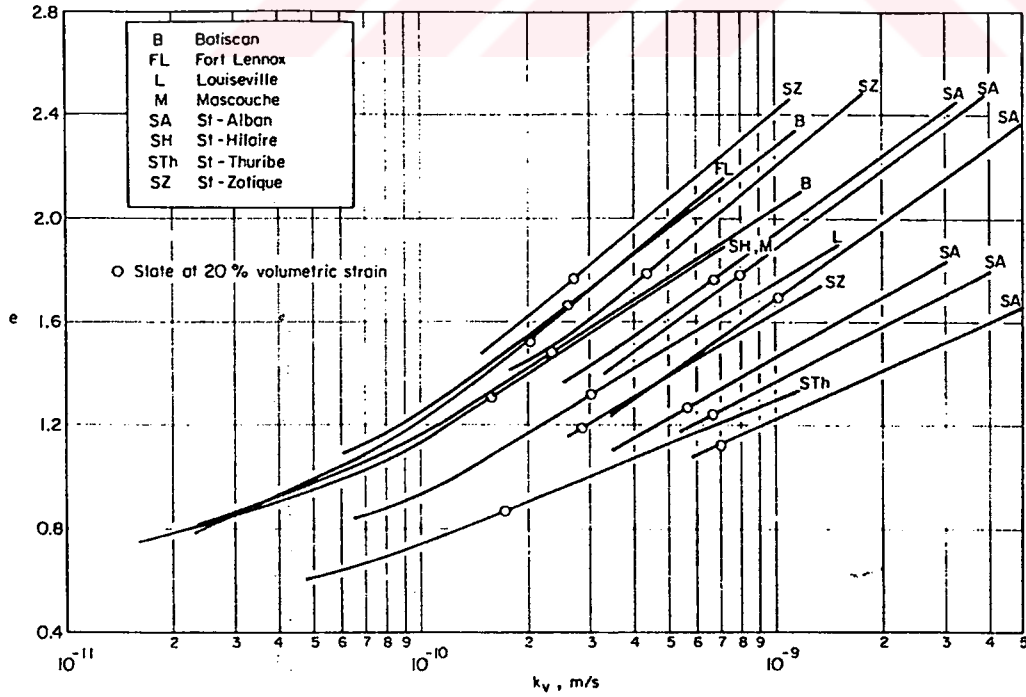
$$k=C. (e^n/1+e) \quad (2.3)$$

Yukarıda bahsedilen eşitliklerin doğruluğunu saptamak amacı ile Louiseville kilinden alınan örselenmemiş numune üzerinde özel bir CRS konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deney, 0' dan %12'lik şekil değiştirmeye kadar her %1'lik ,%12'den %32'lik şekil değiştirmeye kadar ise her %2'lik şekil değiştirmede durdurulmuştur. Her bir durdurmada 20 saatten sonraki periyod içerisinde neredeyse sabit numune boyu ve boşluk oranı değerleri altında düşen seviyeli deneyler yapılmıştır. Bu deneyin amacı, detaylı bir e-log k ilişkisi elde etmek ve meydana gelen yapısal değişmelerin getirdiği etkileri kontrol etmektir. Deneyden elde edilen e-log $\sigma_v'$  ve farklı e-k ilişkileri Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Champlain killeri için çizilen tipik e- log $\sigma_v'$  eğrileri ön konsolidasyon basıncına denk gelen bir noktada kırılmayı ve bu noktadan sonrada artan yüksek bir sıkışabilirliği göstermektedir. % 18' i aşan şekil değiştirmelerden sonra ise bu yüksek sıkışabilirliğin azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak e-k ilişkisi 0- %20'lik şekil değiştirmeler arasında oldukça iyi ve lineer bir e-log k ilişkisi oluştururken, %20' i aşan yüksek şekil değiştirmelerde belirgin bir eğriselleşme göstermektedir. e-log k ilişkisinin şeklindeki bu değişiklik e- log $\sigma_v'$  eğrisinin eğimindeki değişim ile ilgilidir. Bu durum Olsen(1962) tarafından ifade edildiği gibi % 20'i aşan şekil değiştirmelerde kilin davranışında ve yapısal düzeninde bir değişikliğin olduğunu yansıtmaktadır. Olsen(1962) bunun zeminin makro ve mikro boşluklarının büyüklüğünde ve biçimindeki yapısal değişikliklerle ilgili olduğunu savunmaktadır. Olsen tarafından önerilen bu varsayımın Delage(1977) tarafından geliştirilen porozimetre ve elektron mikroskopları ile de doğrulanması gerektiği açıktır. Doğal bir kilin yapısal düzenindeki değişikliğin önemli bir sonucu da akım izinin pürüzlülüğüdür. Akım izinin pürüzlülüğü tekil ve basit bir e-k ilişkisini geçersiz kılmakta ve e-k arasındaki ilişkileri çeşitlendirmektedir.

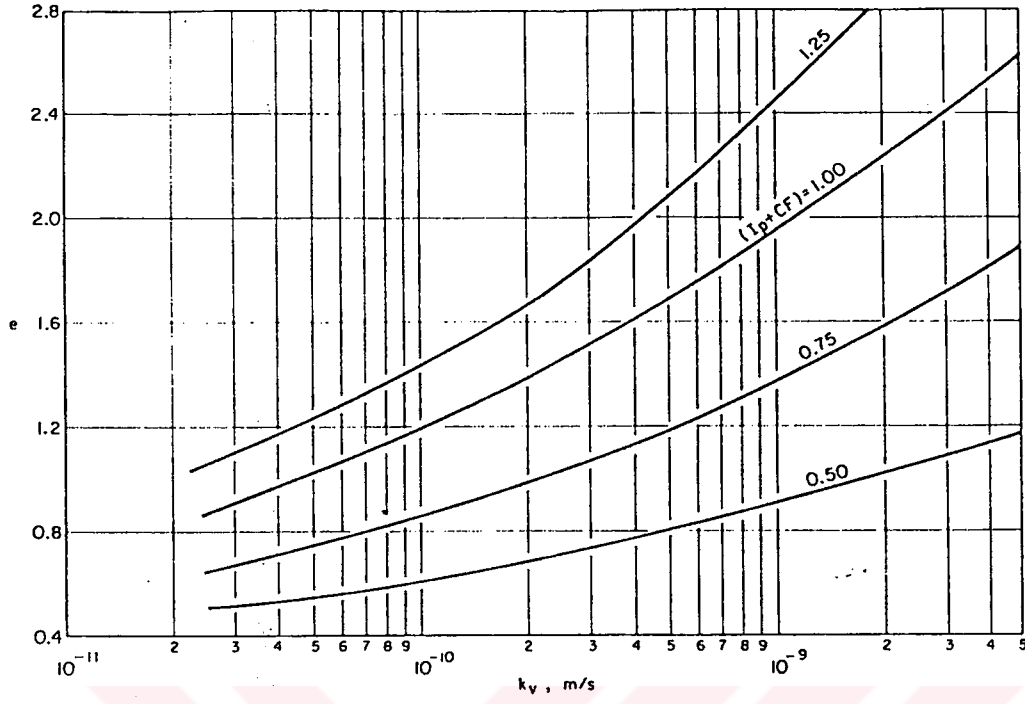
Yapılan bu çalışmada aynı zamanda permeabiliteyi etkileyen önemli parametrelerden olan kil yüzdesi ve plastisite indisinin etkisi ayrıntılı bir şekilde araştırılmış ve bu etkiyi kanıtlamak amacı ile Champlain killeri ve Atchafalaya kili üzerinde deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak bir kilin e-log k ilişkisini ve eğrisini kil yüzdesinin ve plastisite indisinin yönlendirdiği görülmüştür. Düşük plastisite ve düşük kil yüzdesi e-k ilişkisinde daha az bir eğriselliğe neden olurken yüksek değerlerdeki kil yüzdesi ve plastisite indislerinde bunun tam tersi olmaktadır (Şekil 2.16 ). Şekil 2.17'de ise seçilen farklı plastisite indisi+kil yüzdesi ( $I_p+C_F$ ) değerlerine göre çizilmiş olan sonuçların tipik e-log k eğrileri gösterilmiştir. Bu eğriler,  $I_p+C_F$



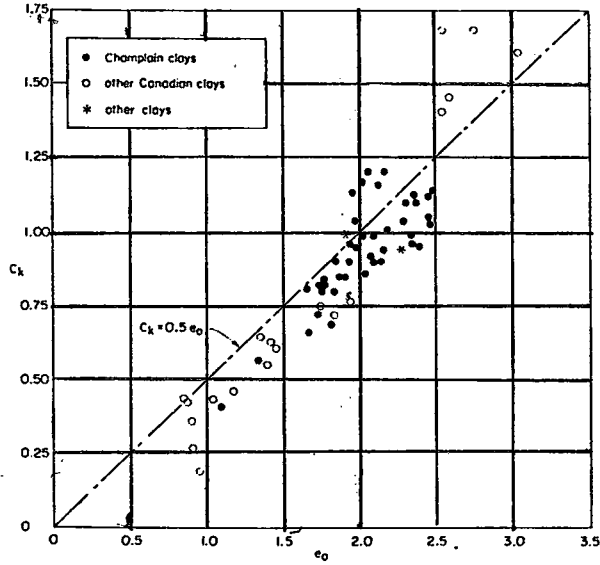
Şekil 2.15 Louiseville kili için  $e$ - $k$  ilişkisinin detaylı araştırması (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)



Şekil 2.16 Champlain deniz killeri için  $e$ - $\log k_v$  ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)



Şekil 2.17 e-log  $k_v$  ilişkileri dağılımının  $I_p$  + Kil yüzdesi 'nin fonksiyonu olarak gösterilmesi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)



Şekil 2.18 Bütün killer için Permeabilite değişim indeksi  $C_k$  ile  $e_0$  arasındaki ilişki (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983b)

parametresinin e-log k eğrilerinin pozisyonunu ve eğriliklerini büyük oranda etkilediğini işaret etmektedir.

Doğal killerin permeabilitesinin boşluk oranı ile değişimini ifade etmekte sıkça kullanılan permeabilite değişim indeksi ( $C_k$ ) bu çalışmada da bütün deneylerde %20' den az olan hacimsel şekil değiştirmeler için e-log k eğrisinin eğimi olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.18' de gösterilen deneysel sonuçlardan  $C_k$  ile  $e_0$  arasında bir ilişki olduğu görülmektedir.

$$C_k = 0.5e_0 \quad (2.4)$$

Tavenas vd. (1983b) tarafından Kanada, Amerika ve İsviçre'den alınan yumuşak örselenmemiş killerin permeabilitesi üzerinde yapılan geniş laboratuvar çalışması sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Kilin cinsini, başlangıç boşluk oranını ve boşluk oranı değişim aralığını göz önünde bulundurmeyen permeabilite ve boşluk oranı ilişkilerinin hiçbiri genel olarak geçerli değildir.
2. Pratik bakış açısından (2.1) no' lu eşitlik başlangıç boşluk oranı değerleri 2.5'tan küçük boşluk oranları için ve mühendislik pratiğinde karşılaşılan hacimsel şekil değiştirmeler için mükemmel olmaktadır. Bu lineer ilişkinin yararı, permeabilitenin değerlendirilmesini  $k_0$  ve  $C_k$  ile sınırlandırmasıdır.
3. Doğal boşluk oranındaki örselenmemiş yumuşak killerin permeabilitesi olan  $k_0$  sadece boşluk oranının ve dane boyutunun değil aynı zamanda kilin plastisitesinin ve kil yüzdesinin de bir fonksiyonudur.  $k_0$  için artan  $I_p$ /Kil Yüzdesi oranına karşılık artan bir  $k_0$  eğilimi gözlenmiştir.
4. Anizotropi, deniz killerinin arazideki (doğal koşullardaki) permeabilitesi için önemli bir özellik olmamaktadır.
5. Üzerinde deney yapılan bütün killer için e-log k ilişkileri, ampirik parametre  $I_p + CF$ 'e göre oldukça iyi bir düzenlilik göstermektedir. Parametre ne kadar yüksekse kilin geçirimsizliği de o kadar azalmaktadır.
6. Permeabilite değişim indeksi basit olarak boşluk oranı ile ilişkilidir ve  $C_k = 0,5e_0$  ilişkisi oldukça pratik bir yaklaşımdır.

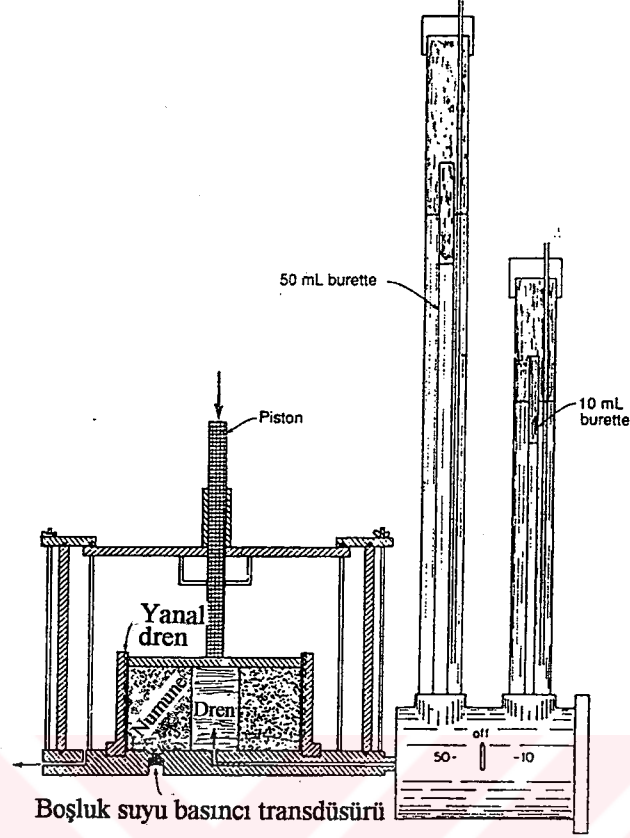
Leroeil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle (1990) tarafından yapılan çalışmada mühendislik pratiğine rehberlik etmesi bakımından doğal killerin düşey sıkışma altında düşey permeabilite ve yatay permeabilitelerindeki değişim incelenmiştir. İnceleme, 5 farklı inceleme bölgesinden alınan numuneler üzerinde yapılan 7 seri deneyi içermektedir. Bu deneyler, Louiseville, Saint Alban, Saint Esprit, Backebol ve Matagami tabakalı killeri için

yapılan deneylerdir. Her bir kil için farklı deney programı uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar, yatay permeabilite ölçümleri için radyal akımlı permeametre (Şekil 2.19), düşey permeabilite için ise üç eksenli (Şekil 2.1) ve ödometre deney aletinin (Şekil 2.4) kullanılmasına karar verilmiştir. Yatay permeabilitenin belirlenmesi için Şekil 2.19'da gösterilen radyal akımlı permeametre ile ilgili olan diğer ayrıntılara Bölüm 3'te ayrı olarak değinilecektir.

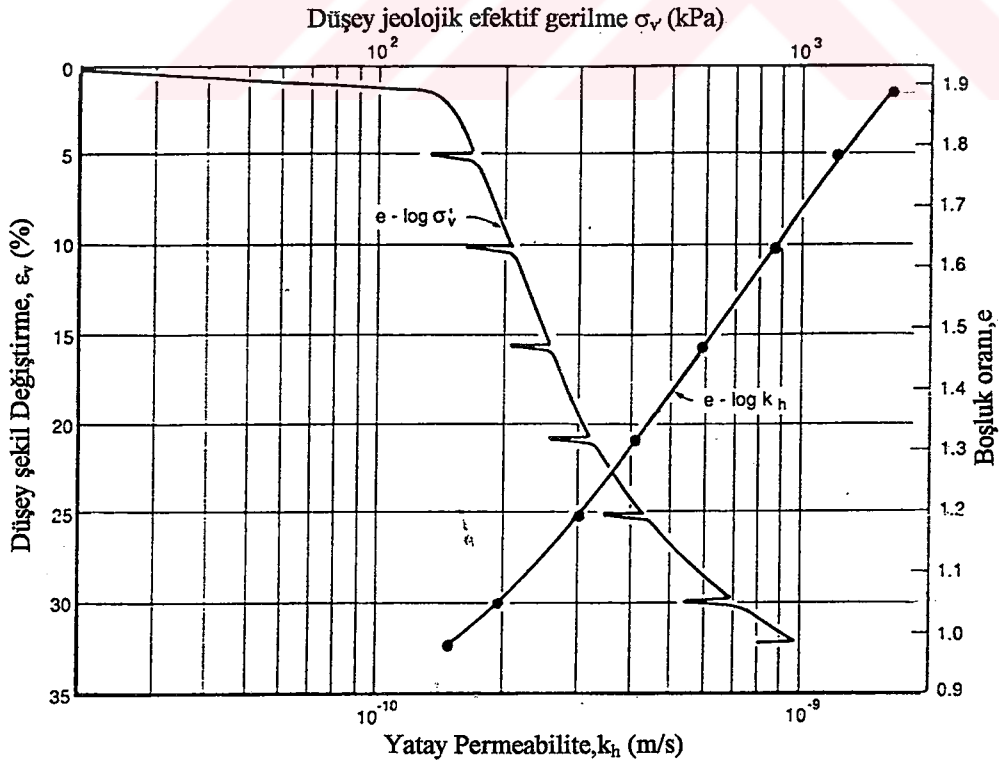
Radyal akımlı permeametre deneyinin yapıldığı Louiseville kili için elde edilen  $\varepsilon_v$ - log  $k_h$  diagramları Şekil 2.20 ' de gösterilmiştir.

Düşey permeabilite ölçümleri, üç eksenli deney aletinde sabit seviyeli, ödometrede ise düşen seviyeli olmak üzere iki tipte gerçekleştirilmiştir. Bu teknikler, Tavenas ve diğerlerinin(1983b) tarif ettiği ve üzerinde çalışmalar yaptığı şekilde gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli deney numuneleri 51mm çapında ve 51mm ile 66mm arasında değişen yüksekliktedirler. Farklı boşluk oranlarında deneye tabi tutulan numunelere gerilmeler  $\sigma_3' = K_0 \cdot \sigma_1'$  olacak şekilde adım adım uygulanmıştır. Böylece sıkışmanın bir boyutlu olması sağlanmıştır. Birincil konsolidasyonun bittiği anda düşey ve yatay gerilmeler azaltılmış ve daha sonra permeabilite deneyi hidrolik eğim 10 olacak şekilde numune tabanındaki ters basınç artırılarak başlatılmıştır. Matagami kili için üç eksenli deneyden elde edilen boşluk oranı permeabilite ilişkileri Şekil 2.21' de gösterilmiştir. Matagami kili için yapılan bu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır ki; tabakalı killerde sıkışma ile birlikte düşey permeabilite homojen killerdeki benzer şekilde değişmektedir. Diğer taraftan yatay permeabilitede meydana gelen azalma daha küçük olmaktadır. Böylece iyileştirilmemiş tabakalı bir kil formasyonu üzerinde inşa edilecek bir dolguda yatay drenajın göreceli etkisi oturmalarla birlikte artacaktır. Bu dolgu altındaki tabakalı kil formasyonunun düşey drenajla iyileştirilmesi durumunda ise konsolidasyon  $0.5e_0$  kadarlık bir permeabilite değişim indeksine bağlı olarak beklenen konsolidasyondan daha hızlı meydana gelecektir. Louiseville kili için yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen e-log  $k_v$  ve radyal permeabilite sonucu elde edilen e-log  $k_h$  ilişkileri Şekil 2.22' de gösterilmiştir. Şekil 2.23 ise Louiseville kili için elde edilen deneysel sonuçlar ile Jean(1983) ve Lapierre(1987) tarafından elde edilen sonuçların bir arada bulunduğu e-log k dağılımı görülmektedir.

Düşey permeabiliteyi ölçmek için yapılan ödometre numuneleri 5mm çapında ve 19mm yüksekliğindedir. Numunelere yüklemeler adım adım uygulanmış ve 24 saat bu yükler altında konsolidasyona maruz bırakılmışlardır. Permeabilite ölçümünün gerek duyulduğu yükleme adımlarında ise numune tabanındaki su basıncını artırmak sureti ile düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Saint-Esprit bölgesinden alınan kil numuneleri

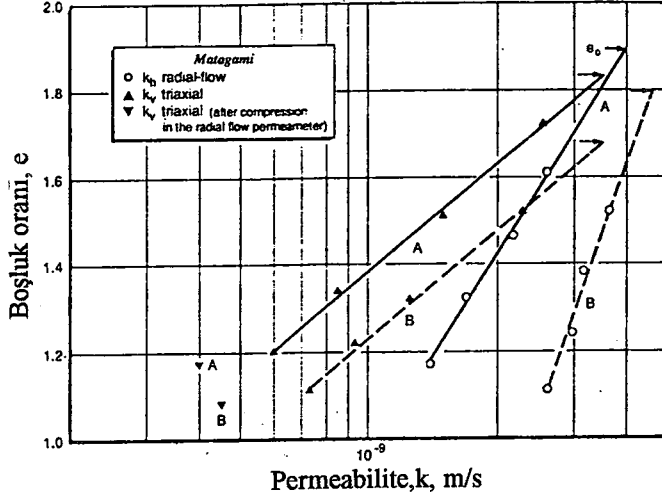


Şekil 2.19 Radial akımlı permeametre (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990)

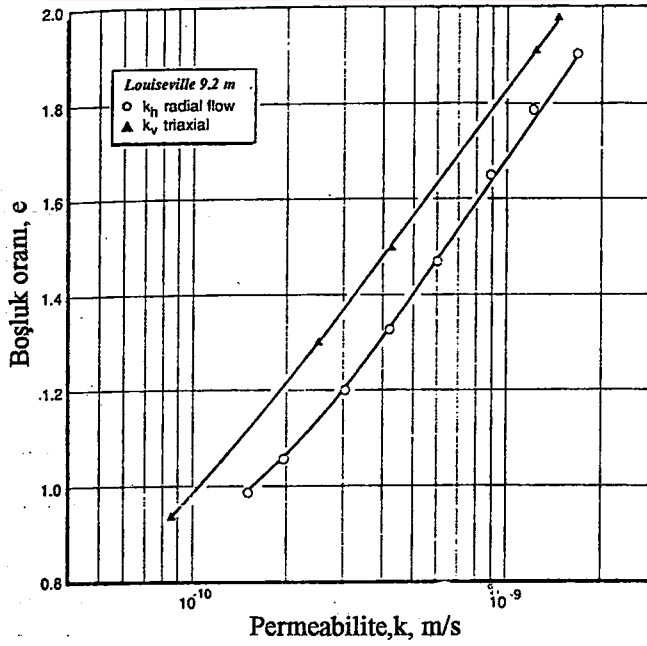


Şekil 2.20 Louiseville kili için Yatay permeabilite ve Düşey efektif gerilmenin şekil değişirme ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990)

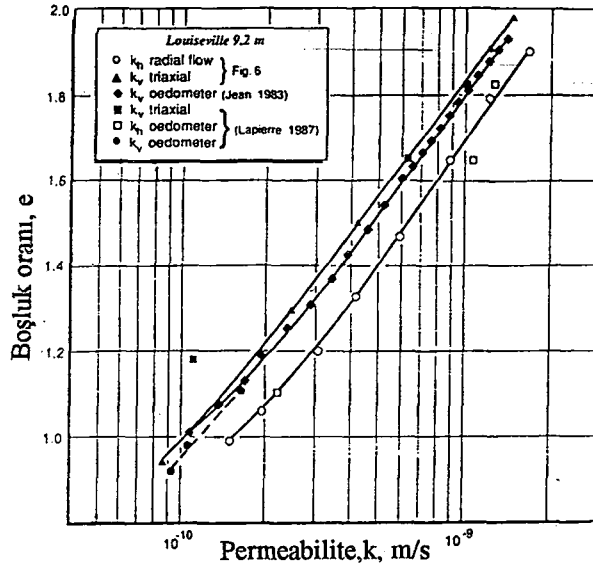




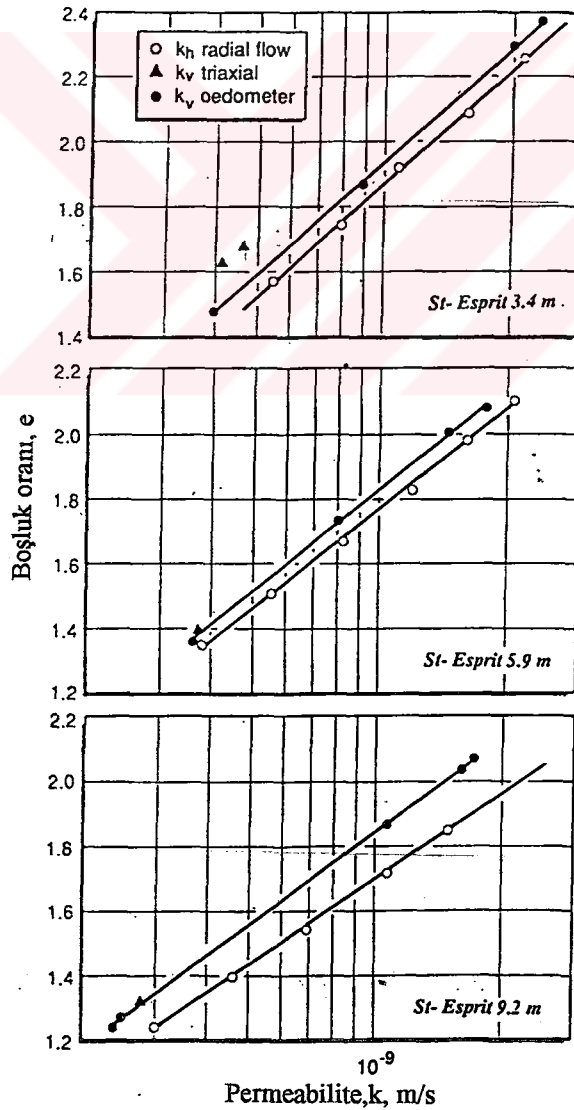
Şekil 2.21 Matagami kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990)



Şekil 2.22 Louisville kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990)



Şekil 2.23 Louisville kili için permeabilite- boşluk oranı değişimi (Leroueil vd.,1990)



Şekil 2.24 Saint-Esprit kili için permeabilite- boşluk oranı değişimi (Leroueil vd.,1990)

üzerinde yapılan ödometre ve radyal akımlı permeabilite deney sonuçları Şekil 2.24'te gösterilmektedir. Bu deneylerden farklı derinlikler için elde edilen  $e\text{-log } k_v$  ve  $e\text{-log } k_h$  ilişkileri paralellik göstermektedir. Backebol kili için yapılan ödometre, radial akımlı permeabilite ve üçeksenli deney sonuçları Şekil 2.25'te verilmiştir.

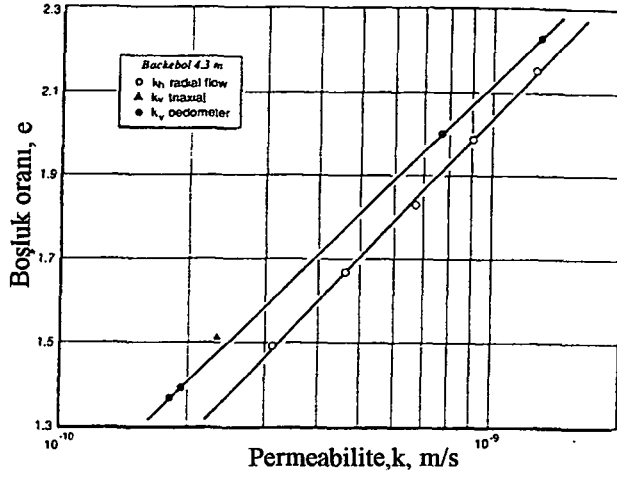
Araştırmanın genel sonuçları şu şekilde özetlenebilir;

Deniz killeri üzerinde yapılan deney sonuçları göstermektedir ki;  $e\text{-log } k_v$  ve  $e\text{-log } k_h$  ilişkileri esas olarak paraleldirler ve permeabilite anizotropisi, %25'e kadar şekil değiştirmelerde önemli derecede değişmemektedir (Şekil 2.22 ve Şekil 2.25). Tavenas ve diğerleri tarafından (1983a) önerilen yaklaşık bir ilişki olan  $C_k = 0.5e_0$  ilişkisi düşey ve yatay permeabilitenin her ikisi için de geçerlidir (Şekil 2.26).

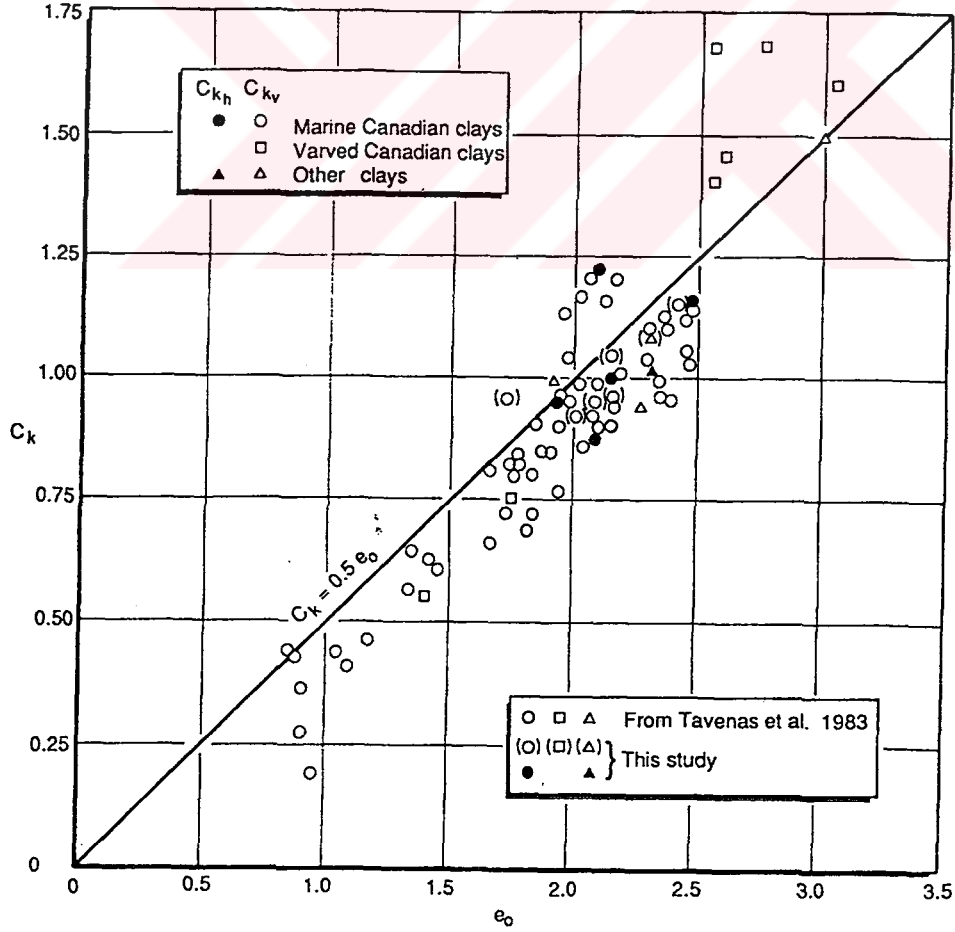
Tabakalı killer için, düşey sıkışma ile birlikte yatay permeabilitede meydana gelen azalma düşey permeabilitede meydana gelen azalmadan daha küçüktür ve böylece permeabilite anizotropisinin sıkışma ile birlikte artmakta olduğu belirlenmektedir. Bu artışın nedeni ise kil tabakasının siltli tabakadan daha çok sıkışabilmesi ve düşey permeabilitedeki azalmanın yatay permeabilitedeki azalmaya oranla daha fazla olması şeklinde açıklanabilir (Şekil 2.21).

Al-Tabbaa ve Wood (1987) slurry kıvamında hazırlanarak konsolide edilen kaolin kilinin yatay ve düşey permeabilitelerinin düşey şekil değiştirme ile olan değişimini incelemişlerdir. Kaolin kilinin permeabilite özelliklerini belirlemek için düşen seviyeli permeabilite deneyleri kullanılmıştır. Bu amaç için geleneksel ödometre aleti Şekil 2.27'de gösterildiği gibi geliştirilerek hem yatay hem de düşey permeabilitenin ölçülebilmesi imkanı sağlanmıştır. İç çapı 88mm olan ödometre deney aletinde düşey permeabilitenin ölçümü için alt ve üst poroz plakalar kullanılmıştır. Bununla birlikte düşen seviyeli permeabilite deneyini yapabilmek için ödometre tabanı 5mm'lik bürete bağlanarak su seviyesi farkı uygulanmıştır.

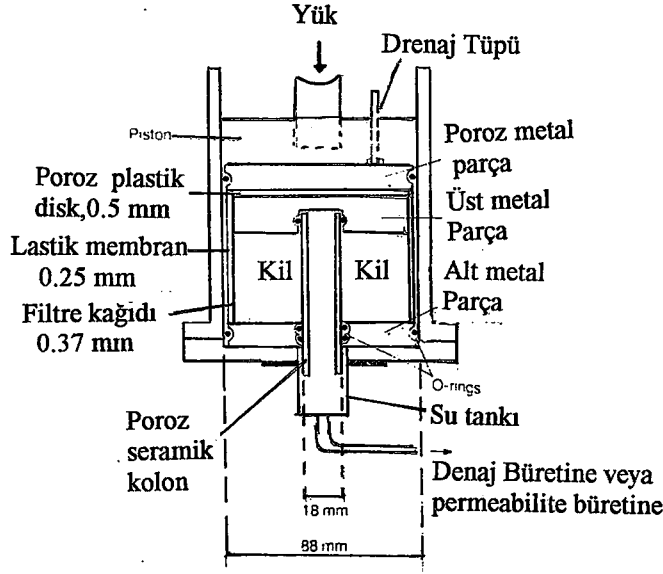
Yatay permeabiliteyi ölçmek için Şekil 2.27'de gösterilen ödometre aletinde geçirimsiz alt ve üst plakalar üst plakanın merkezine yerleşebilen ve kilin sıkışması sırasında alt plakanın merkezi içersine kayabilen 18mm çapındaki poroz seramik kolonun yerleşebileceği şekilde yapılmıştır. Numune etrafına filtre kağıdı sarılarak kil içerisindeki suyun radyal olarak merkezi poroz kolon içersine doğru yönelerek drene olabilmesi sağlanmıştır (Şekil 2.28-a). Her konsolidasyon adımı sonrasında poroz seramik kolon 5 mm çapındaki bürete bağlanarak Şekil 2.28b' de gösterildiği gibi numune içerisindeki su akımını radyal olarak filtre kağıdına doğru yönlendiren bir su seviyesi farkı uygulanmıştır. Düşen seviyeli deneyler sırasında düşen seviye miktarları 24 saatlik periyodu aşan sürelerde gerçekleştirilmiştir ve her iki günde bir yeni bir yükleme adımına geçilmiştir. Her deneyin sonunda ise numune içerisindeki su



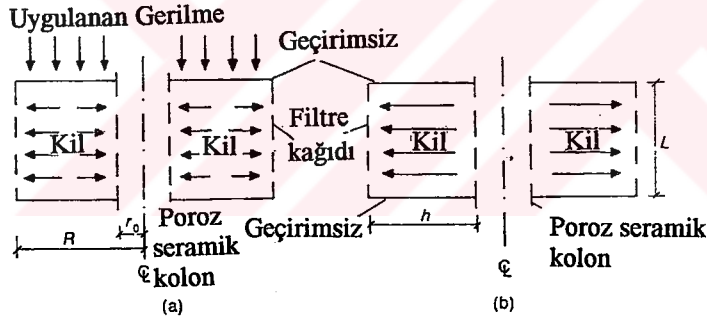
Şekil 2.25 Backebol kili için permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi (Leroeil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990)



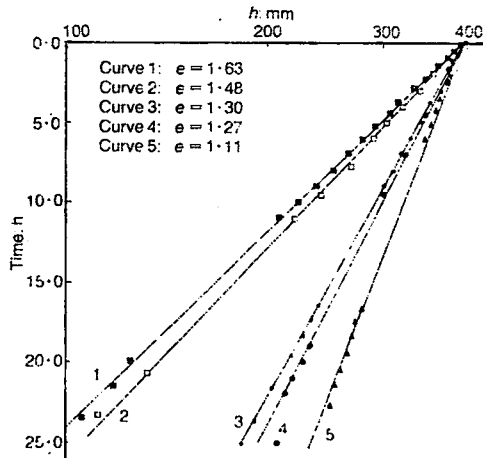
Şekil 2.26 Permeabilite değişim indeksleri  $C_{k_v}$  ve  $C_{k_h}$  ile başlangıç boşluk oranı  $e_0$  arasındaki ilişki (Leroeil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle, 1990)



Şekil 2.27 Radyal permeabilite ölçümü için geliştirilen ödometre deney aleti (Al-Tabbaa ve Wood, 1987)



Şekil 2.28 Radyal drenaj için konsolidasyon sırasında meydana gelen drenaj izleri (Al-Tabbaa ve Wood, 1987)



Şekil 2.29 Radyal drenajlı düşen seviyeli permeabilite deneyleri için log h-t ilişkileri (Al-Tabbaa ve Wood, 1987)

muhtevası değişimi ölçülmüştür. Düşey permeabilite ve yatay permeabilitenin değerlendirilmesi için sırası ile şu formüller kullanılmıştır.

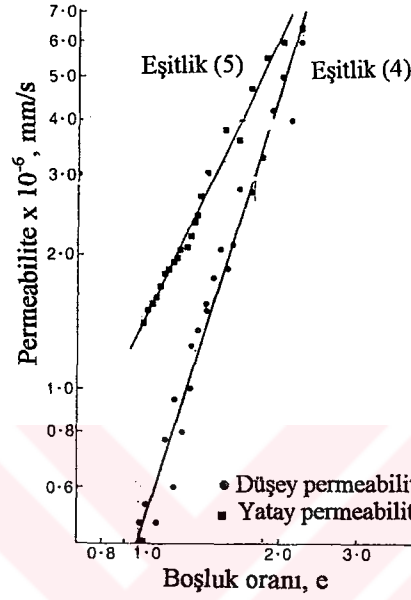
$$k_v = \frac{a L}{A t} \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (2.5)$$

$$k_h = \left(\frac{a}{2\pi L t}\right) \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (2.6)$$

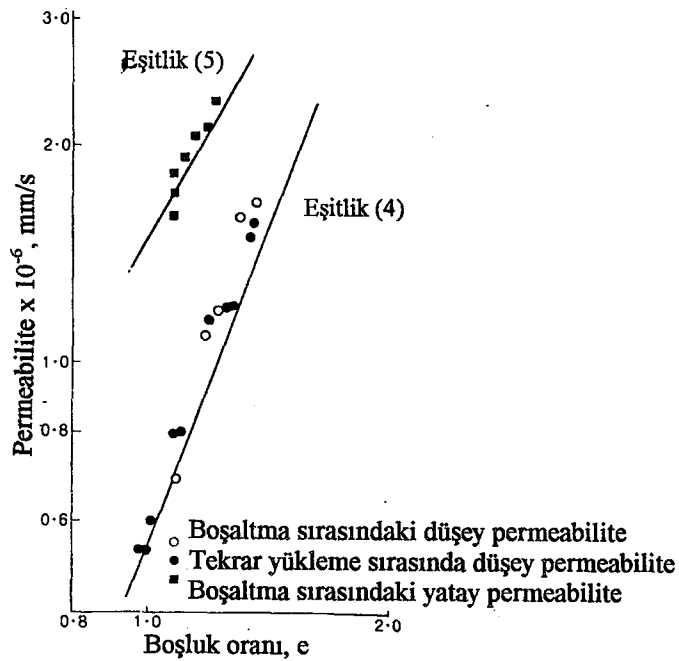
(2.5) eşitliğinde geçen;  $k_v$  düşey permeabilite,  $a$  permeabilite büretinin kesit alanı,  $A$  kil numunesinin kesit alanı,  $L$  numune yüksekliği,  $h_0$   $t=0$  anındaki başlangıç su yüksekliği,  $h$  ise  $t$  anındaki büretteki su yüksekliğidir. (2.6) denkleminde yer alan  $r_0$  ve  $R$  sırası ile kil numunesinin iç ve dış çapıdır (şekil 2.28).

Radial akım ile yürütölen bazı düşen seviyeli permeabilite deneylerinin tipik sonuçları şekil 2.29' da gösterilmiştir. Zaman ile su seviyenin logaritması arasındaki ilişki (2.6) no'lu denklemden umulduğu gibi yaklaşık olarak lineerdir. Lineerlikten olan sapma sadece deneylerin ilk 15 dakikasında gözlenmiştir. Kaolin kiline ait düşen seviyeli deneylerden elde edilen düşey ve yatay permeabiliteler logaritmik eksenlerde boşluk oranına karşılık çizilerek şekil 2.30' da gösterilmiştir. Bu sonuçlar, düşey gerilmenin kararlı bir şekilde arttırıldığı boşluk oranının ise kararlı bir şekilde azaldığı normal konsolide kaolin üzerinde yapılmış deneylerden elde edilmiştir. Bu deneyler sonucunda şekil 2.30'daki datalarla uyumlu olarak  $k_v = 0,53e^{3.16} \times 10^{-6}$  mm/sn ve  $k_h = 1.49e^{2.03} \times 10^{-6}$  mm/sn değerlerinde elde edilmiştir.

Beyaz kaolin kilinin permeabilitesi aynı zamanda aşırı konsolide durum için de incelenmiştir. Düşey permeabilite ölçümleri yükleme ve boşaltma çevrimleri sırasında geręekleřtirilmiřtir. Radial permeabilite ölçümü ise sadece boşaltma izi çerçevesinde yapılmıştır. Permeabiliteler, düşen seviyeli deney prosedürü kullanılarak ölçölmüş ve sonuğlanan değerler normal konsolide kaolin üzerinde yapılan deneylerden elde edilen (2.5) ve (2.6) denklemlerinden elde olunan doğrularla birlikte şekil 2.31'de gösterilmiştir. Bu doğrular, aşırı konsolide kaolin için de dikkate değer bir uyum göstererek, bir boyutlu yükleme ve boşaltma aşamalarında kaolininin permeabilitesinin başlıca boşluk oranına bağlı olduğunu ve herhangi bir halde aşırı konsolidasyon oranından bağımsız olduğunu göstermektedirler. Yapılan çalışmada elde edilen permeabilite deney sonuçları permeabilite anizotropisi açısından likitite indisine bağlı olarak da incelenmiştir. Buna göre zeminin likitite indisinin 1.8 olduğu durumda permeabilite anizotropisi oranının 1.0 olduğu görölmüştür ve bu değer sıkışma ile birlikte artarak likitite indisi 0 olduğunda 2.8 değerine ulaşmıştır. Araştırmacılar, bu davranışı şekil değiştirme ile birlikte meydana gelen büyük düşey gerilmeye dik oluşan partiköl eğimi ile



Şekil 2.30 Normal konsolide kaolin için permeabilite-boşluk oranı ilişkileri (Al-Tabbaa ve Wood, 1987)



Şekil 2.31 Aşırı konsolide kaolin için permeabilite- boşluk oranı ilişkileri (Al-Tabbaa ve Wood, 1987)

ilişkilendirmişlerdir. Znidarcic ve Alban (1988) aynı kil üzerinde yaptıkları deney sonucunda likitite indisinin 1-1.3 civarlarında olduğu durumda  $r_k$  değerinin 1.75 gibi daha büyük değerlerde olduğunu tespit etmişlerdir.

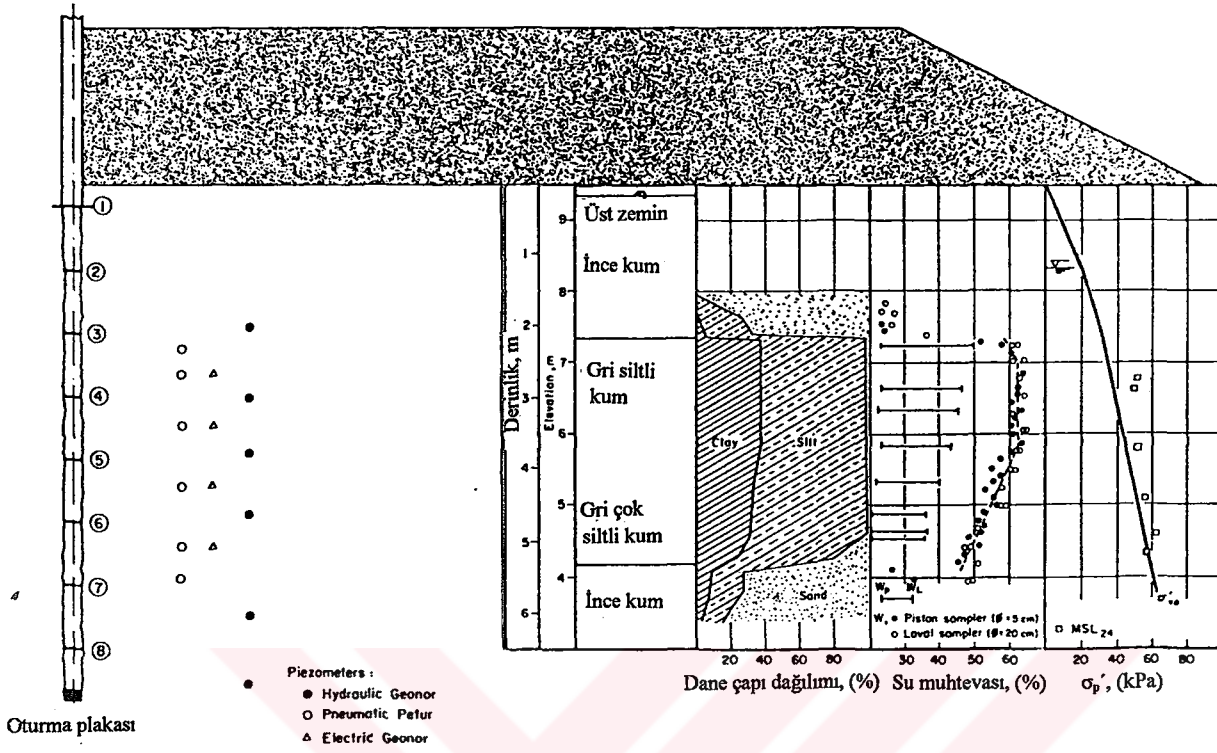
Al- Tabbaa ve Wood (1987) tarafından yapılan bu çalışma sonucunda düşey ve yatay permeabilitenin başlıca boşluk oranına bağlı olduğu görülmektedir. Yüksek boşluk oranı değerlerinde kil partiküllerinin yöneliminin tamamı ile rastgele olduğu ve buna bağlı olarak permeabilitenin de her yönde aynı olduğu yani izotropik olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber kilin düşey yönde ve bir boyutlu olarak sıkıştırılması ile birlikte düşey permeabilite yatay permeabiliteye oranla daha hızlı bir şekilde azalmaya başlayarak permeabilite anizotropisinin olduğu tespit edilmiştir.

Leroueil, Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle (1988) yaptıkları çalışma sonucunda dolgu altında yer alan bir kil tabakasının permeabilitesinin direkt olarak belirlenmesine yönelik yeni bir yöntem geliştirmişlerdir.

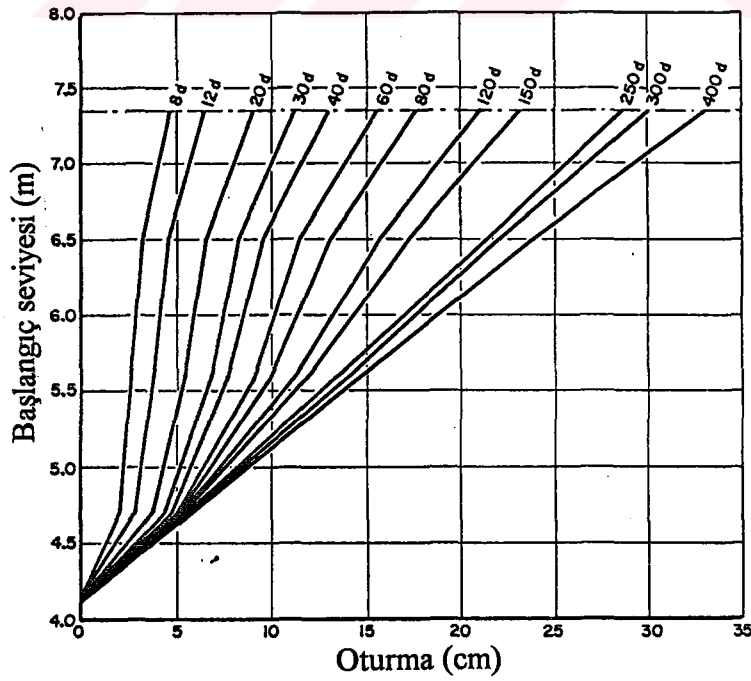
Piezometrelerle ve derinlere yerleştirilmiş oturma ölçüm aygıtları ile donatılmış Berthierville deneme dolgusu 3.2 m kalınlığındaki homojen kil tabakası üzerine uzunluğu 2.9m olacak şekilde inşa edilmiştir. Şekil 2.32'de test dolgusunun inşa edildiği bölgeye ait zemin profili ve dolguda yapılan enstrümantasyon gösterilmiştir. Konsolidasyonun bir boyutlu konsolidasyona yakın bir şekilde olduğu kabul edilmiştir ve yapım süresince ve bunu izleyen 3 sene boyunca dolgunun davranışı Kabbaj ve diğerleri (1988) tarafından gözlemlenmiştir. Test dolgusu altında meydana gelen oturmalar ve artık boşluk suyu basınçları sırası ile Şekil 2.33 ve Şekil 2.34'te gösterilmiştir.

Dolgu altındaki kil tabakasının yeterli enstrümantasyona sahip olması nedeni ile farklı zamanlarda konsolidasyon sırasındaki boşluk suyu basıncı ( $u'$ ) ve oturma profillerini belirlemek mümkün olmuştur. Bu sayede "gerçek" arazi permeabilite değeri farklı derinliklerde, farklı zamanlarda ve farklı şekil değiştirmelerde belirlenebilmiştir. Şekil 2.35,  $t_i$  anındaki  $u'$  ve  $t_{i+1}$  ile  $t_{i-1}$  zamanlarındaki  $S$  (oturma) izokronlarını göstermektedir. Darcy yasasından faydalanılarak bir noktadaki permeabilite katsayısı farklı zamanlarda ve dolayısı ile farklı yerel şekil değiştirmelerde hesaplanarak, göz önünde alınan derinlikte gerçek " $k-e_v$ " ya da " $k-e$ " ilişkisini tanımlamak mümkün olmuştur. Metodun uygulanabilirliği için gerekli olan varsayımlar ise sadece Darcy yasası'nın geçerli olduğu, konsolidasyonun bir boyutlu olduğu ve zeminin tamamen suya doygun olduğudur. Bunun için Şekil 2.35'deki izokronlar esas alınarak ve aşağıdaki ilişki kullanılarak permeabilite değerleri hesaplanmıştır.

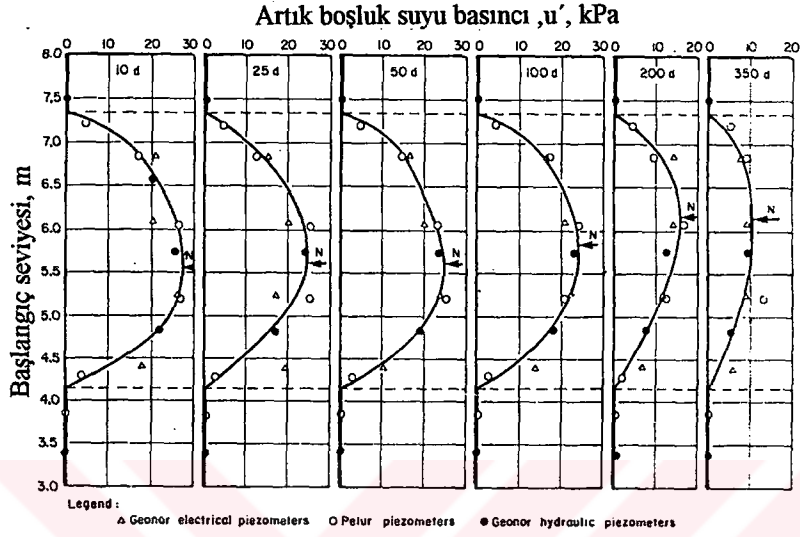




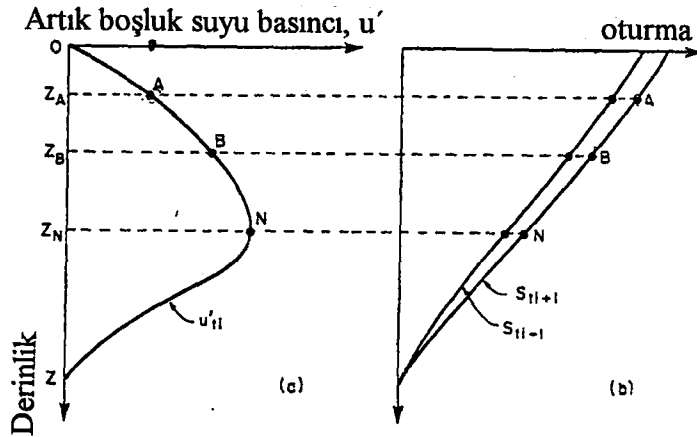
Şekil 2.32 Berthierville test dolgusu altındaki zemine ait zemin profili ve dolgu altında yer alan enstrumantasyon (Leroueil, Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988)



Şekil 2.33 Berthierville test dolgusu altındaki zeminde meydana gelen oturmalar (Kabbaj vd., 1988)



Şekil 2.34 Berthierville test dolgusu altında gözlenen artık boşluk suyu basınçları (Kabbaj vd., 1988)



Şekil 2.35 Konsolidasyon sırasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronu ve oturma dağılımı (Leroueil, Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988)

$$k_{A,t_i} = \frac{\gamma_w}{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)} \left[ \frac{\partial(S_A - S_N)}{\partial t} \right]_{t_i} \quad (2.7)$$

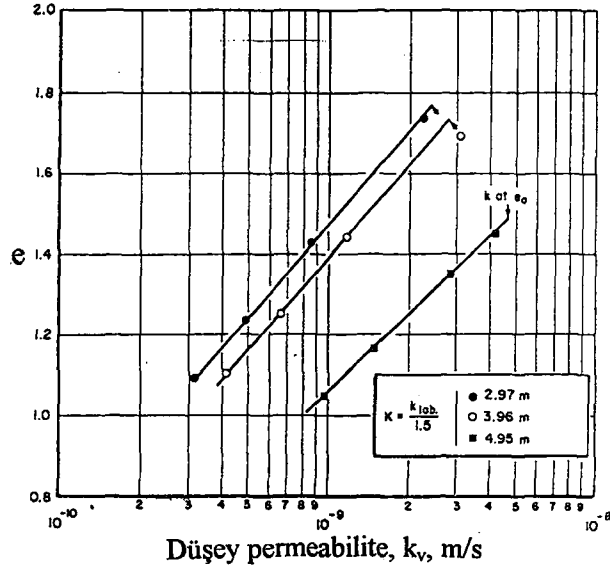
Berthierville kili üzerinde permeabilite deneyleri hem laboratuarda hem de arazide gerçekleştirilmiştir. Laboratuarda, standart ödometre deneyleri ile 24 saatlik konsolidasyon periyodu sonunda düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Bu tür bir teknik kullanılarak elde edilen sonuçların Doğu Kanada killeri (Tavenas vd.1983b) üzerinde yapılan sabit seviyeli permeabilite deneylerinden elde edilen sonuçlar ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Yapılan 8 seri deneyin sonuçları Şekil 2.36'de ve Şekil 2.37'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çalışılan boşluk oranı aralığında lineer bir e-log  $k_v$  ilişkisi vermektedir.

Bazı ödometre deneylerinde, permeabilite katsayısının indirekt olarak elde edilmesine olanak veren  $c_v$  değerleri Cassagrande logaritmik metod ve Taylor karekök metodu kullanılarak bulunmuştur. Bu katsayılar, permeabilite katsayısını oldukça düşük olarak tahmin etmektedir. Benzer sonuçlar, bu farklılıkların öneminin az olduğu hassaslığı ve sıkışabilirliği daha az olan zeminlerde de Tavenas vd.(1983b) ve Olson vd.(1985) tarafından belirlenmiştir.

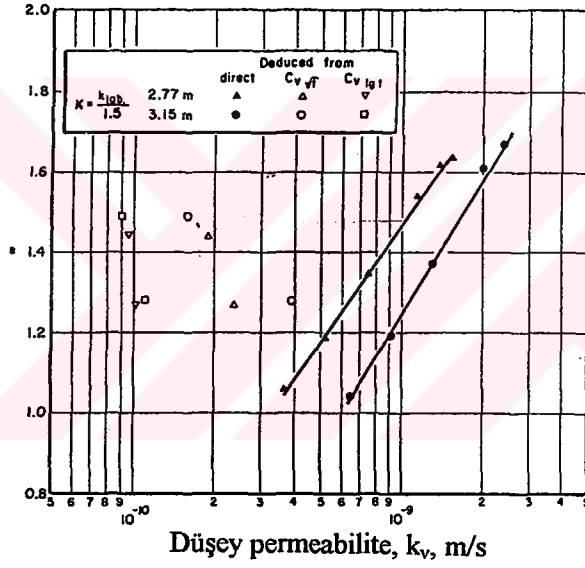
Arazi permeabilite deneyleri hem sabit seviyeli hem de düşen seviyeli deneyler kullanılarak yerine itmeli piezometrelerle ve Permac tipi kendinden delgili permeametre (Tavenas vd. 1983 c, 1986b) ile gerçekleştirilmiştir. Araziden elde edilen bu değerlerin yorumlanması için Tavenas vd (1986a) tarafından önerilen bir yöntem kullanılmıştır. Şekil 2.38 düşen seviyeli ve sabit seviyeli deneylerin benzer sonuçlar gösterdiğini ve yerine itmeli piezometrelerin laboratuvar deneylerinden daha düşük değerler verdiğini, kendinden delgili permeametrelerin ise daha büyük değerler verdiğini göstermiştir.

Özet olarak; Berthierville deneme dolgusu üzerinde yukarıda bahsedilen metodun geçerliliğini araştırmak ve uygulamak için ve bununla birlikte gerçek permeabiliteyi değişik tekniklerle laboraturada ve arazide bulunan permeabilite değerleri ile karşılaştırmak için çeşitli araştırmalar yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

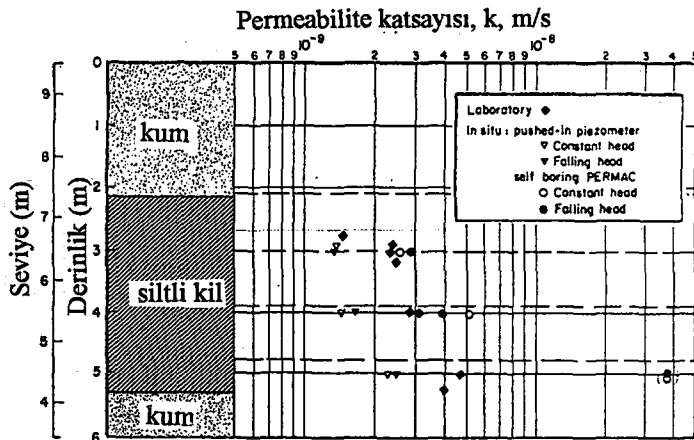
- Bu metod, elde yeterli datanın bulunduğu durumlarda uygulanabilir bir yöntem olmakla beraber büyük hidrolik eğimlerin karşılaşılabildiği drenaj sınırlarında yanlış sonuçlar verebilmektedir.
- Permeabilite indeksindeki değişme ( $C_k = \Delta e / \Delta \lg k$ ) arazide ve laboratuarda hemen hemen aynıdır.



Şekil 2.36 Permeabilite –Boşluk oranı ilişkileri (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988)



Şekil 2.37 Direkt yöntemlerle belirlenmiş permeabilite katsayıları ile konsolidasyon katsayılarından hesaplanmış permeabilite katsayılarının karşılaştırması (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988)



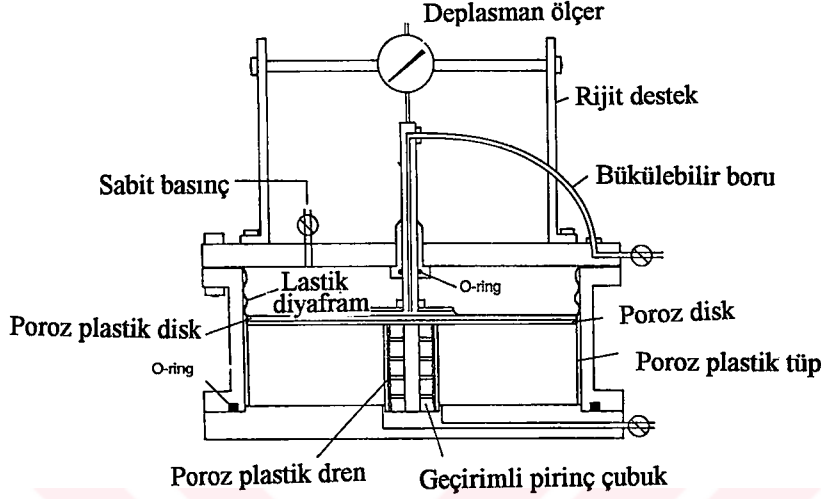
Şekil 2.38 Doğal boşluk oranında çeşitli yöntemlerle belirlenmiş permeabilite katsayısı profilleri (Leroueil,Diene, Tavenas, Kabbaj ve Rochelle 1988)

- Arazideki gerçek permeabilite değeri laboratuarda direkt metodlarla ölçülen permeabiliteden biraz daha fazladır. Aralarındaki oran yaklaşık 1.6'dır.
- Ödometre deneyinden elde edilen Cv'i kullanarak bulunan permeabilite katsayısı arazideki permeabilite katsayısını oldukça düşük olarak tahmin etmektedir.
- Self-boring (kendinden delgili) permeametre ile ölçülen permeabilite katsayısı şekil değiştirmenin sıfır olduğu durumda gerçek arazi permeabilitesini temsil etmekte iken, piezometreler vasıtası ile bulunan katsayı daha düşük olarak tahmin etmektedir.

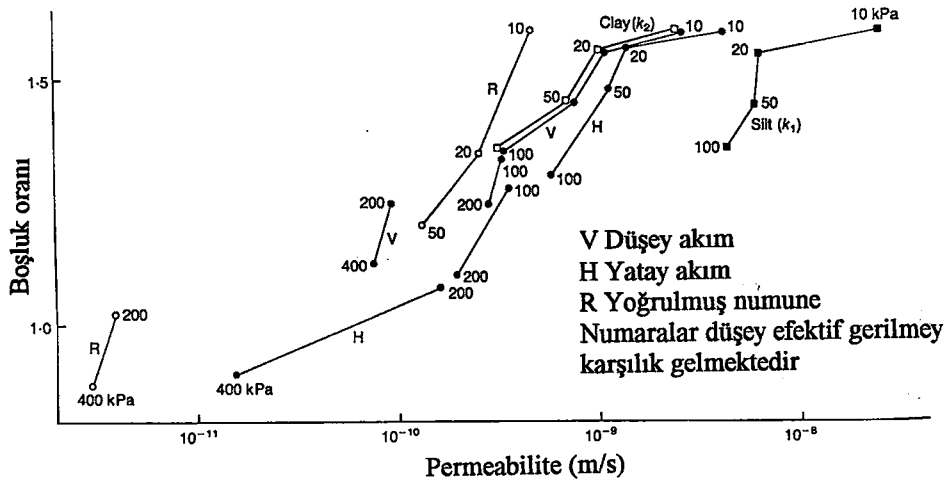
Little, Wood, Paul ve Bouozza (1992) tarafından Bothkennar kilinin permeabilitesinin kilin iç yapısına bağlı olarak değişimi araştırılmıştır. Bu amaç için Bothkennar kiline ait numuneler üzerinde iki farklı deney yapılmıştır. Bu deneyler, klasik ödometre deneyleri ve Rowe cell olarak bilinen hidrolik ödometrelerle yapılan permeabilite deneyleridir. Yapılan deneyler sonucunda Bothkennar kilinde derinlikle birlikte değişen permeabilite anizotropisine zemin bünyesinde yer alan önemli derecedeki farklılaşmaların neden olabileceği belirtilmiştir.

Rowe cell tipi deney hücreleri kullanılarak yapılan deneyler hem düşey hem de yatay permeabiliteyi ölçmeye imkan vermektedir. Düşey drenajlı deneyler için numunenin bütün çapı boyunca drenajını sağlayan üst ve alt poroz diskler kullanılmıştır. Radyal akımlı deneyler için ise Al-Tabaa ve Wood (1987) tarafından önerilen teknik tarif edilmiştir (Şekil 2.39). Silindirik dış drenaj sınırlarını sağlayabilmek için ödometre ringinin çevresine bir tabaka poroz plastik yerleştirilmiştir. İç drenaj sınırı için ise geçirimli pirinç bir çubuk kullanılmıştır. Hücrenin tabanında numunenin yüksek basınç altında sıkıştırılması durumunda merkezi drenin kolayca kayabilmesi için bir oyuk oluşturulmuştur. Böylece deney süresince drenaj sınırlarının değişmemesi sağlanmıştır. Düşey ve yatay permeabilite deneyleri konsolidasyon deneyleri ile birlikte yürütülmüştür ve permeabilite deneyleri boyunca sabit akım hızı uygulanmıştır. Bütün konsolidasyon aşamaları için basınç istenilen değere çıkartılmış ve 24 saat'lik konsolidasyon periyodunun hemen sonrasında ise permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kayıt edilen permeabilite değişimleri bu değerlerdeki boşluk oranı değişimlerine karşılık çizilmiştir. Her deneyin sonunda Rowe hücresi sökülerek numunenin nihai su muhtevası belirlenmiş ve düşey deplasman ölçer vasıtası ile numunenin boy değişimleri de kayıt edilmiştir.

Kil numunenin iç yapısının permeabilite anizotropisi üzerindeki etkisini araştırmak için üç numune üzerinde ödometre deneyleri ile yapılmıştır. Numunelerden iki tanesi tüplerden örselenmemiş olarak elde edilmiş, diğeri ise doğal su muhtevasında hazırlanmış yeniden yapılandırılmış zemin numunesidir. Örselenmemiş zemin numuneleri tüpten çıkarılmadan



Şekil 2.39 Radial akım için geliştirilmiş olan hidrolik ödometre (Little, Wood, Paul ve Bouozza ,1992)



Şekil 2.40 Hariot-Watt Üniversitesinde yapılan klasik ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı-permeabilite ilişkileri (Little, Wood, Paul ve Bouozza ,1992)

önce Oxford Üniversitesi tarafından tasarlanmış olan bir densimetre kullanılarak X ışınları ile taranarak zemin hakkında bir fikir elde edilmiştir. Örselenmemiş numunelerden birisi sondaj tüpünden çıkan zemin kolonunun yatay yüzeyinden alınmıştır. Dolayısı ile yapılacak klasik ödometre deneyinde konsolidasyon sırasındaki drenajın düşey olması sağlanmıştır. Diğer örselenmemiş numune ise zemin kolonunun düşey yüzeyinden alınmıştır ve dolayısı ile bu numunenin konsolidasyonu sırasında drenajın yatay olması sağlanmıştır. Numuneler, 0-400 kPa arasında uygun artımlarla yüklenmiş ve boşaltılmıştır. Son boşaltma işleminden sonra ise anlık boşluk oranlarının hesabı için su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Permeabilitenin belirlenmesi için;

$$k = \frac{T_v \cdot (H^2)}{t_{90}} \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (2.8)$$

eşitliği kullanılmıştır. Eşitlikte yer alan  $T_v$  %30 konsolidasyon yüzdesine karşılık gelen zaman faktörü,  $H$  numune kalınlığı,  $m_v$  hacimsel sıkışma katsayısı,  $\gamma_w$  ise suyun birim hacim ağırlığıdır. Bu eşitliğin permeabilitenin hesaplanması için sadece indirekt bir yöntem olduğu bilinmektedir, fakat laboratuarda hazırlanmış kil üzerindeki yapılan deneyler sonucunda direkt ve indirekt yöntemlerin permeabilite üzerindeki uyumlu sonuçları (Al-Tabbaa ve Wood, 1987) göz önünde bulundurularak bu çalışmada da bu eşitlikten elde edilen değerlerin bir fikir verdiği düşünülmüştür. Klasik ödometre deneyinden elde edilen boşluk oranı-permeabilite ilişkileri Şekil 2.40' da görülmektedir.

Zeminin içyapısı hakkında bilgi edinebilmek için X ışınları kullanılarak tarama yapılmıştır. Yapılan tarama sonucunda yatay permeabilite katsayısının araştırılacağı numune içerisinde 6 silt tabakasının mevcut olduğu belirlenmiştir. Düşey permeabilite deneyleri için kullanılacak numune üzerinde de yapılan taramalardan elde olunan geniş bilgi ile birlikte silt tabakalarının ve bunlar arasında yer alan kil tabakasının tekil permeabilitelerinin belirlenmesi mümkün olabilmıştır. Bunun için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$k_v = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n}} \quad (2.9)$$

$$k_h = \frac{1}{H} (k_1 \cdot H_1 + k_2 \cdot H_2 + \dots + k_n \cdot H_n) \quad (2.10)$$

Yapılan deneylerden tüm numuneler için  $k_v, k_h$  değerleri elde edilmiştir. Eşitliklerde geçen  $H_1, H_2, \dots, H_n$  tabakaların kalınlıkları  $k_1, k_2, \dots, k_n$  bu tabakaların permeabilite katsayıları

ve H ise tüm numune kalınlığını göstermektedir. Bu çalışma için silt tabakasının izotropik ve permeabilitesinin  $k_1$ , kil tabakasının da izotropik ve permeabilitesinin  $k_2$  olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, düşey olarak sıkıştırılan kil ve silt tabakalarının eşit oranda sıkıştığı kabul edilmiştir.

Deneyden elde edilen verilere göre 0-10 kPa'lık yükleme aralığında, düşey drenajlı numunelerde tüm numunenin düşey permeabilite katsayısı  $k_v=2.47 \times 10^{-9}$  m/s, yatay drenajlı numune için ise  $k_h=3.986 \times 10^{-9}$  m/s olarak elde edilmiştir. Buna göre yukarıda belirtilen eşitlikler kullanılarak silt tabakası için permeabilite  $k_1=2.36 \times 10^{-8}$  m/s, kil tabakası için ise  $k_2=2.249 \times 10^{-9}$  m/s olarak elde edilmiştir. Benzer hesaplamalar diğer yükleme adımları için de gerçekleştirilmiştir.  $k_1$  ve  $k_2$ 'nin boşluk oranı ile olan değişimi Şekil 2.40'da gösterilmiştir.

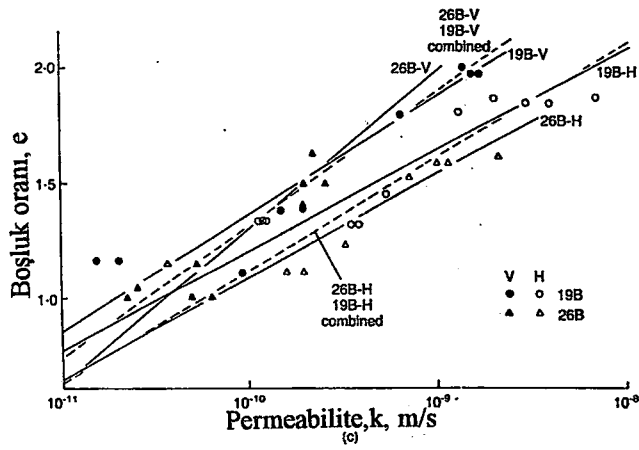
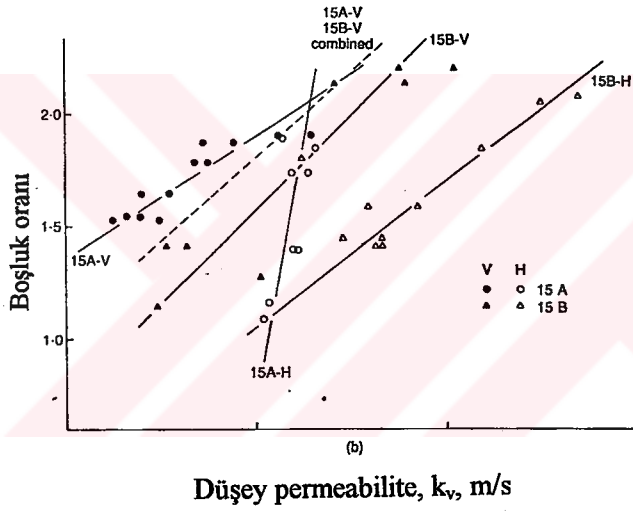
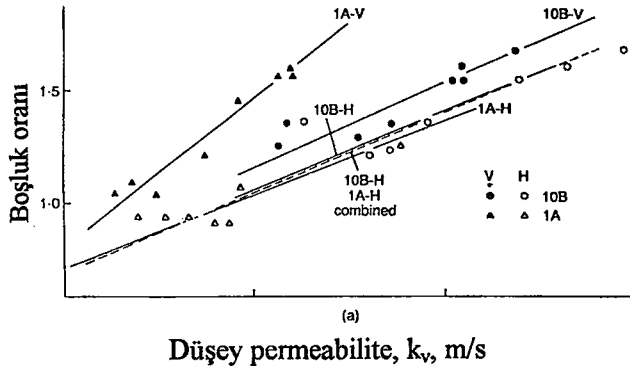
Bothkennar kili, permeabilite anizotropisini araştırmak için üç kısma ayrılmıştır. Bu kısımlardan alınan örselenmemiş numunelerin 200mm'lik sondaj tüplerinden çıkarılmış olup bu numuneler üzerinde 75 mm ve 150mm çapındaki hidrolik ödometrelerde(Rowe hücrelerinde) düşey ve yatay permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Belirlenen üç ayrı tabakanın farklı makrobünye özellikleri olduğu X ışınları yardımı ile ortaya çıkarılmış ve böylelikle permeabilite anizotropisi üzerindeki etkileri de yorumlanmıştır.

Şekil 2.41' de farklı bünye özellikleri gösteren bu tabakalara ait örnekler üzerinde yapılan yatay ve düşey permeabilite deneylerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Buna göre Şekil 2.41(a) da görüldüğü gibi yüzeysel derinliklerde bulunan kilin homojen olduğu ve az derecede permeabilite anizotropisi gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 2.41(b) de ise 8 m derinlikten alınan numunelerden elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu sonuçlara göre bu kısımdaki zeminin oldukça yüksek anizotropiye sahip olduğu görülmektedir. Daha önceden elde edilen veriler ışığında bu derinlikteki kilin yatay permeabilitesini ve permeabilite anizotropisini artıran önemli miktarda silt ve ince kum bantları içermesi de deney sonuçlarının doğruluğunu göstermektedir.

Son olarak 10-15 m derinlikte yer alan kil için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2.41(c) de gösterilmektedir. X ışınları ile yapılan tarama sonucu bu kısımda yer alan kilin bünyesi az miktarda yatay tabakalanma içerdiği için en az derecede anizotropi göstermektedir.

Bothkennar kil üzerinde yapılan araştırma, Bothkennar kilinin önemli ve değişken derecede permeabilite anizotropisine sahip olduğunu ve bu anizotropinin zeminin iç yapısından büyük oranda etkilendiğini göstermektedir. Kilin silt bantları içeren kısımlarının anizotropik permeabilite karakteristiği gösterdiği belirlenmiş ve bu durum laboratuvar gözlemleri ile de doğrulanmıştır.





Şekil 2.41 Hidrolik ödometrelerde kontrollü akım deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite-boşluk oranı ilişkileri (Little, Wood, Paul ve Bouozza ,1992)

Leroueil, Lerat, Hight, Powell (1992) tarafından Bothkennar kili üzerinde yapılan araştırmaların devamı olarak İskoçya Bothkennar'da yer alan haliç killerinin çeşitli özelliklerini belirlemek için hidrolik kondüktivitesi yani permeabilitesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu özellikleri belirleyebilmek için ;

- a. Hem düşey hem de yatay permeabilitenin derinlikle olan değişiminin belirlenmesi, ve
- b. Zeminin sıkışma ile birlikte permeabilitesinde meydana gelen değişiminin araştırılması gerektiği belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen hususlar göz önünde bulundurularak, çalışmalar hem arazide hem de laboratuarda gerçekteşirilmifitir. Arazideki hidrolik kondüktivite (permeabilite) yerine itmeli piezometreler, kendinden delgili permeametreler ve Tortensson, (1984) ve Tortensson ve Petson (1986) tarafından geliştirilmiş bir çeşit yerine itmeli piozometre olan BAT sistemi kullanılarak belirlenmiştir. BAT isteminin bilinen kendinden delgili permeometrelerden farkı sabit seviyeli permeabilite deneyleri yerine düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılabilmektedir. Düşey ve yatay permeabilitenin düşey sıkışma ile olan değişimini belirleyebilmek için laboratuarda ödometre hücresi, üç eksenli hücre ve radyal akımlı hücre kullanılmıştır. Sonuçlar, numune boyu etkisine ve zeminin iç yapısına bağlı olarak 1.5-2 arasında değişen anizotropi oranı göstermektedir. Ayrıca, bu çalışma sonucunda yerine itmeli piezometrelerin , BAT sisteminin permeabiliteyi oldukça düşük oranda tahmin ettiği belirlenmiştir. Permeabiliteyi en iyi temsil eden profilin kendinden delgili permametreler tarafından verildiği belirtilmiştir. Permeabilitenin sıkışma ile birlikte olan değişiminin  $C_k=0.5e_0$  olarak karakterize edilebileceği de kanıtlanmıştır.

Deney prosedürü olarak, arazide 3,6,9,12 ve 15m derinliklerdeki permeabilite, yerine itmeli piezometreler,kendinden delgili permeametre (Tavenas vd.1986a) ve BAT sistemi (Torstensson,1984) ile ölçülmüştür. Laboratuarda ise özellikle aynı derinliklerden alınan numuneler üzerinde permeabilite deneyleri gerçekteşirilmifitir. Düşey permeabilite, hem üç eksenli hücrede hem de ödometre hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Yatay permeabiliteyi ölçmek için ise radyal akımlı hücre kullanılmıştır.

Bothkennar kilinin permeabilite karakteristiklerini araştırmak amacı ile yapılan laboratuvar deney sonuçları şu şekilde özetlenebilir.

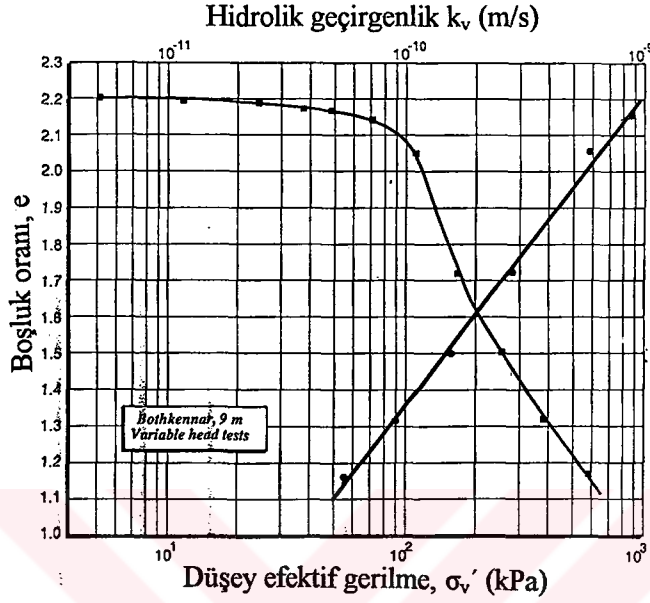
9 m derinlikten alınan bir kil numunesinden elde edilen e-log  $\sigma'_v$  ve e-log  $k_v$  eğrileri (şekil 2.42) farklı derinliklerdeki Bothkennar kiline ait numunelerden ve diğer doğal killerden (Tavenas vd, 1983a) elde edilen eğrilerle oldukça benzeşmektedir. e-log  $k_v$  eğrisinin şekil

değiştirmelerin %30 mertebesine ulaştığı değerlere kadar lineer bir eğilimde olduğu gözlenmektedir.

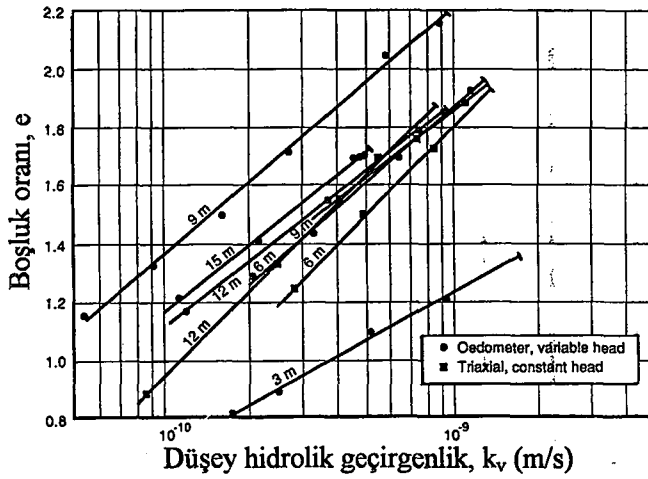
Yapılan üç eksenli ve ödometre deneylerinden elde edilen bütün  $e\text{-log } k_v$  ilişkileri Şekil 2.43' de gösterildiği gibi lineerdir ve killerin permeabilitesinin doğal boşluk oranındaki  $k_{v0}$  ve düşey permeabilite değişim indeksi  $c_{kv}$  ile tarif edilebileceğini doğrulamaktadır. 6m ve 12 m derinliklerden alınan kil numuneler üzerinde yapılan üç eksenli deneylerden elde edilen  $e\text{-log } k_v$  ilişkileri doğrularının aynı derinlikten alınan kil numuneler üzerinde yapılan ödometre deneylerinden elde edilen  $e\text{-log } k_v$  doğrularından daha dik olmasının nedeni ise kullanılan suyun deney sonuçları üzerindeki etkisi olarak yorumlanmıştır.  $k_{v0}$  değerlerinin derinlikle olan değişiminin gösterildiği Şekil 2.44, üç eksenli deneylerden elde edilen değerlerin ödometre deneylerinden elde edilen değerlerden biraz daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum, büyük boyutlu üç eksenli numunelerin kaçınılmaz olarak daha fazla silt ve kum tabakaları ve mercekleri içermesi, buna karşılık ödometre numunelerinin bu kısımlardan kaçınılmak sureti ile daha küçük boyutta olması olarak açıklanmıştır.

Şekil 2.43'de gösterilen sonuçlara göre çizilmiş olan Şekil 2.45'de  $C_{kv}$  değerleri doğal boşluk oranı  $e_0$ ' ın bir fonksiyonu olarak diğer deniz killerinden elde edilen  $C_{kv}$  değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Bu sonuçların oldukça benzerlik gösterdiği ve  $C_{kv} = 0.5e_0$  çizgisinin altında yer aldığı görülmektedir. Ödometre deney sonuçları, elde edilen  $C_{kv}$  değerlerini gerçek değerinden daha az tahmin etse de Şekil 2.45'de gösterilen doğru Bothkennar kilinin düşey permeabilite değişim indeksi için iyi bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

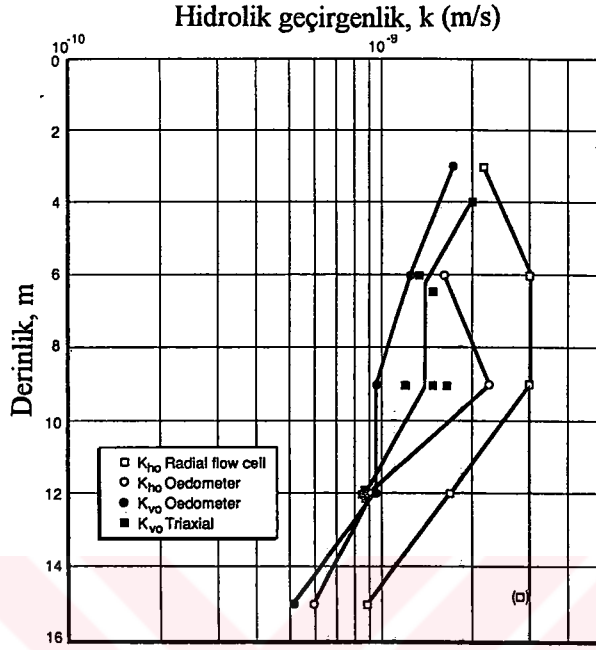
Farklı düşey Şekil değiştirmelerde radyal akımlı hücrede llen yatay permeabilite değerleri boşluk oranının bir fonksiyonu olarak Şekil 2.46' da gösterilmiştir. Düşey permeabilite de olduğu gibi (Şekil 2.43)  $e\text{-log } k_h$  ilişkilerinde de doğrusallık görülmüş ve  $C_{kh}$  eğimleri de düşey permeabilite için gözlenen eğimler ile benzerlik göstermiştir (Şekil 2.45). Detaylı bir Şekilde üzerinde çalışılmamasına rağmen, bu durum anizotropinin sıkışma ile önemli miktarda değişmediği kanısını doğurmuştur. Gerçekleştirilen dometre deneylerinden elde edilen doğal boşluk oranındaki yatay permeabilite katsayıları ( $k_{h0}$ ) Şekil 2.46'da gösterildiği gibidir. Bu değerler, radyal permeabilite deneylerinden llen yatay permeabilite değerlerinden daha küçüktür. Bu durum ise yine numune boyutunun permeabilite üzerindeki etkisini göstermektedir.



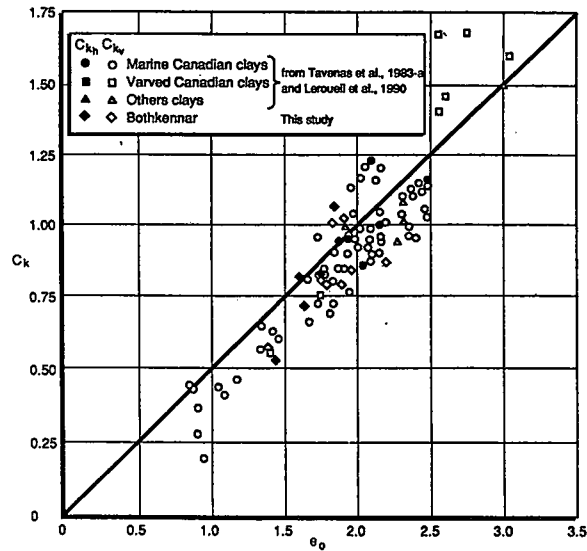
Şekil 2.42 9m.derinlikten alınan kil numunesine ait tipik  $e$ - $\log \sigma'_v$  ve  $e$ - $\log k_v$  ilişkileri (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992)



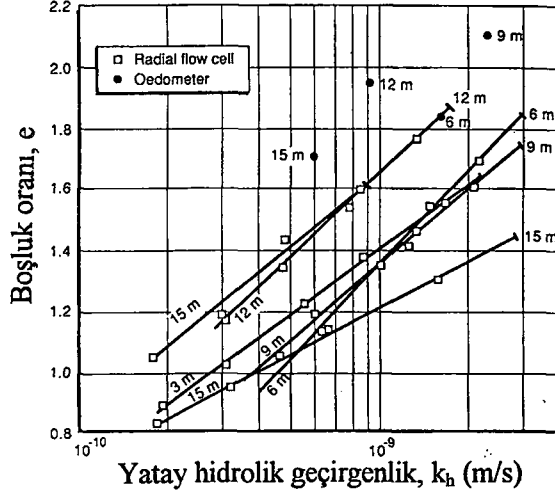
Şekil 2.43. Laboratuarda ölçülen düşey permeabilite katsayıları (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992)



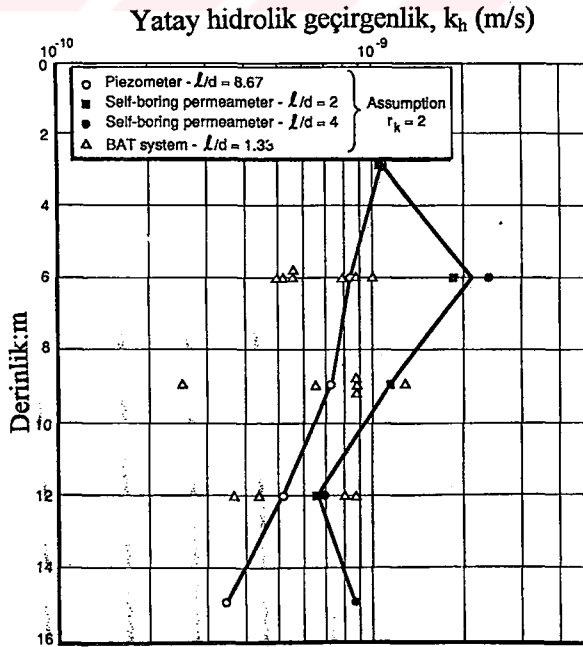
Şekil 2.44 Bothkennar kili için laboratuvar deneylerinden elde edilen Permeabilite katsayısı profilleri (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992)



Şekil 2.45  $e_0$  ile  $C_k$  arasındaki ilişki (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992)



Şekil 2.46 Bothkennar kili için Laboratuarda ölçülen yatay permeabilite katsayıları (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992)



Şekil 2.47 Arazide yapılan deneyler sonucunda elde edilen permeabilite profilleri (Leroueil, Lerat, Hight, Powell, 1992)

Permeabilitenin arazideki değişimini gözlemlemek amacı ile yapılan deneylerden elde edilen ana sonuçlar aşığıdaki gibi özetlenebilir.

Piezometrelerde yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerler laboratuarda tanımlanan profille aynı eğilimde yani derinlikle birlikte azalmaktadır (Şekil 2.44). Laboratuvar ve arazi ölçümlerinin karşılaştırılması sırasında ortam sıcaklığının boşluk suyunun etkisi üzerindeki etkisi de göz önünde bulundurularak arazi ölçüm değerleri 1.4 ile çarpılmıştır. Bu düzeltme yapıldığında arazi deneyleri sonucu elde edilen  $k_{h0}$  profili laboratuarda elde edilen  $k_{v0}$  profiline oldukça yakın bir profil çizmektedir (Şekil 2.44 ve Şekil 2.47).

Arazi ölçümlerinin diğer bir kısmını oluşturan self boring permeametre ölçümleri, piezometre ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldığında self- boring permeametre metodunun piezometre ölçümlerinden 1.8 mertebesinde daha büyük sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu tür bir farklılığın ise çarpılma, piezometrelerin kurulması sırasında ilk tabakalı kısmın sıvanması, poroz elemanının tıkanması ve probun etrafındaki kilin tekrar konsolide olması nedeni ile oluşmuş olabileceği düşünülmüştür. Bununla birlikte self-boring permeametrenin,  $k_{h0}$  değerlerini daha doğru olarak tahmin ettiği sonucu çıkarılmıştır. BAT sisteminin de kullanıldığı arazi ölçüm sonuçları Şekil 2.47' de görüldüğü gibi değişmektedir. Bu değerler ise self-boring permeametreler ile ölçülen değerlerden genel olarak daha küçüktür ve bu durum yine benzer olarak sıvanma , tıkanma ve yeniden konsolide olmakla açıklanmıştır. Yerine itmeli piezometrelerde olduğu gibi BAT sistemi de yatay permeabiliteyi değerinin altında vermektedir.

Bothkennar alüvyonal yumuşak kil çökelinin düşey ve yatay permeabilitesi üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar deneylerinin sonucunda permeabilite anizotropisinin zeminin iç yapısına (bünyesine) bağlı olarak değiştii görülmüştür. Zeminde yatay tabakalanmanın olmadığı kısımlarında (3m derinlikte yer alan) anizotropi oranı ( $r_k$ ) küçük, tabakalanma derecesinin arttığı kısımlarda ise anizotropi oranı artmaktadır. Bothkennar kilinde anizotropi oranı ortalama olarak 1.5-2 olarak elde edilmiş ve düşey sıkışma ile birlikte önemli derecede değişmediği gözlenmiştir. Permeabilitenin düşey sıkışma ile olan değişimi diğer doğal killerde olduğu gibi  $C_k=0.5e_0$  ilişkisi ile karakterize edilmiştir.

Chandler, Leroueil ve Trenter (1990) tarafından yapılan çalışmada, Londra kilinin permeabilite katsayısını hesaplamak için kendinden delgili permeametrenin de yer aldığı değişik yöntemler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geleneksel piezometre teknikleri kullanılarak ölçülmüş olan arazi (yerinde) permeabilite ölçüm değerleri ve laboratuvar permeabilite değerlendirmeleri ile karşılaştırılmıştır.

Londra kilinin arazideki permeabilitesini ölçebilmek için kullanılan kendinden delgili permeametre deneylerinden elde edilen sonuçların oldukça uyumlu nitelikte olduğu ve permeabilitenin derinlikle azaldığı belirlenmiştir. Böylece, deney metodunun katı killerde de başarılı bir şekilde uygulanabileceği görülmüştür.

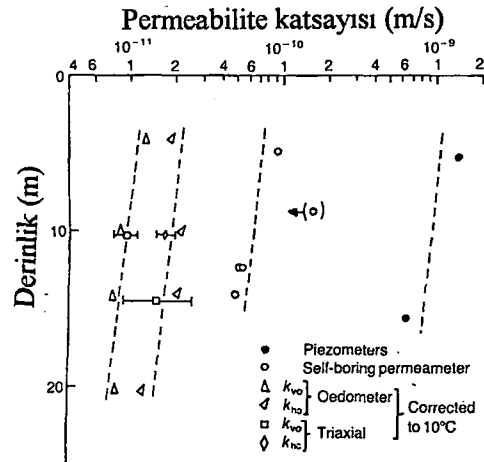
Arazide kendinden delgili permeametre aleti kullanılarak açılan birbirine yakın iki komşu sondaj kuyusunda sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Buna göre L/D oranları sırası ile 8, 2, 8 olan permeametrelerde 5 m, 12.5 m, 14 m derinliklerde yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Şekil 2.48’ de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi permeabilite katsayısı derinlikle azalmaktadır.

Arazide yapılan diğer yerinde ölçüm tekniklerinden birisi olan piezometrelerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.48 ve Şekil 2.49’da gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi bu yöntemle elde edilmiş permeabilite değerleri kendinden delgili permeametre yönteminden elde edilen sonuçlardan daha büyük değerler vermektedir.

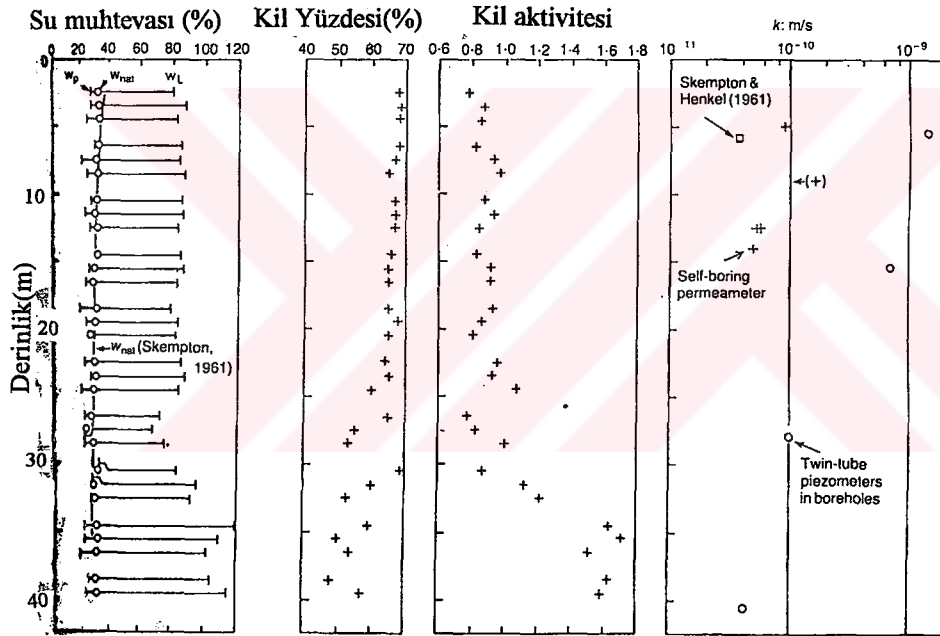
Londra kilinin permeabilite karakteristiklerini belirlemek amacı ile laboratuvarında da bir seri deney yapılmıştır. Denometre hücresinde ve üç eksenli hücrede yapılan deneyleri kapsamaktadır. Ödometre hücrelerinde yapılan düşey permeabilite deneyleri 4.1m derinlikten alınan boşluk oranları 0.87 ve 0.68 olan numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.50’de gösterilmektedir. Zamana karşı çizilen hacim değişimleri oldukça doğrusal bir uyum göstermiştir ve bu şekilde  $k_v$  değerleri belirlenebilmiştir. 4.1m derinlikten alınan ve hem yatay hem de düşey olarak kesilen numuneler için elde edilen log permeabilite ve boşluk oranı ilişkisi Şekil 2.51’de gösterilmiştir. Çalışılan boşluk oranı dağılımı içerisinde bu ilişkilerin yaklaşık olarak lineer olması dikkat çekicidir. Düşey permeabilite için elde edilen eğim yaklaşık olarak  $0.5e_0$  değerine eşittir. Elde edilen bu değer Tavenas ve diğerleri tarafından yumuşak killer için bulunan ilişki ile de oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir (Şekil 2.52).

Laboratuvarında gerçekleştirilen ikinci kısım deneyler üç eksenli hücrelerde yapılan 2 adet sabit seviyeli permeabilite deneyini kapsamaktadır. Deney numuneleri 10 m derinlikten alınmıştır. Numunelerden bir tanesi düşey permeabiliteyi ölçmek için düşey olarak, diğeri ise yatay permeabiliteyi ölçmek için yatay olarak kesilmiştir. Numuneler başlangıçta 164 kPa ‘lık efektif gerilmeye kadar konsolide edilmiştir ve daha sonra numuneler üzerinde permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonucuna göre elde edilen değerler Şekil 2.53’ de gösterilmiştir. İçeri ve dışarı akım arasında oluşan fark, numunenin şişmesinden veya sistemde oluşan küçük sızıntılardan kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır.

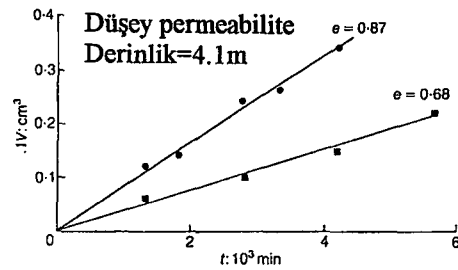




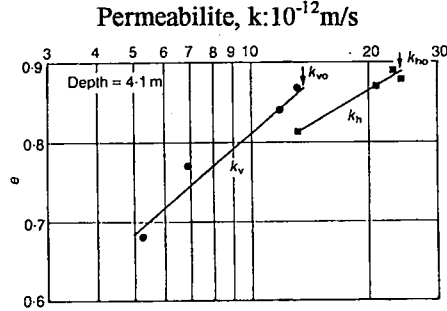
Şekil 2.48 Londra kili için labaratuarda ve arazide ölçülen permeabilite katsayıları (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)



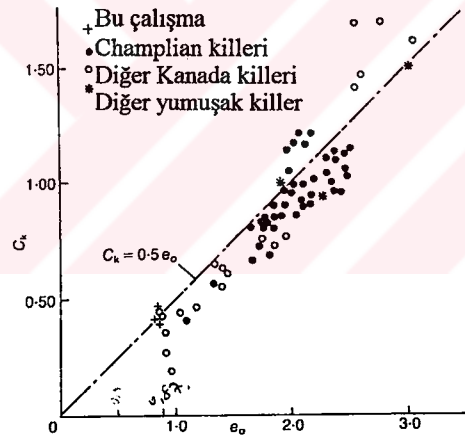
Şekil 2.49 Londra kilinin geoteknik indeks özellikleri (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)



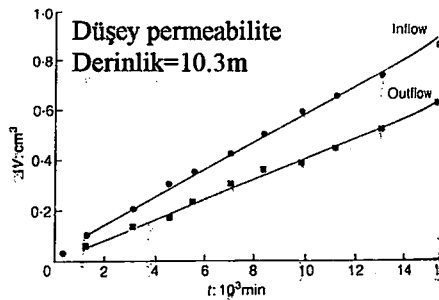
Şekil 2.50 Londra kili için Ödometre deneylerinden düşey permeabilite katsayısının değerlendirilmesi (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)



Şekil 2.51 Londra kili için Ödometre deneyleri sonucu elde edilen  $e$ -log  $k$  ilişkileri (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)



Şekil 2.52 Değişik killeri için  $e_0$  ile  $C_k$ 'nin değişimi (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)



Şekil 2.53 Londra kili için üçeksenli permeabilite deneylerinden düşey permeabilite katsayısının değerlendirilmesi (Chandler, Leroueil ve Trenter,1990)

Şekil 2.48 üç eksenli deney aletinde ölçülen yatay ve düşey permeabilite değerlerini diğer laboratuvar deneyleri ve arazi ölçüm değerleri ile karşılaştırmalı olarak vermektedir.

Genel bir sonuç olarak Londra kilinin permeabilite özelliklerini belirleyebilmek amacı ile yapılan bu çalışma, kendinden delgili permeametre kullanılarak yapılan ölçümlerin geleneksel sabit seviyeli piezometre deneylerine göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Kullanılan deney aletinin zeminin iç yapısında (bünyesinde) ve doğal arazi gerilmelerinde en az örselenmeye neden olacak şekilde düzenlenmiş olması en önemli özelliklerini oluşturmaktadır. Bunun yanında zeminin yapışma ve bulaşma etkilerinin en az düzeye inmesi de kullanılan sistemin avantajını ortaya koymaktadır.

Londra kilinde arazideki doğal gerilmelere yakın efektif gerilme değerlerinde yapılan laboratuvar deneylerinde yatay permeabilitenin düşey permeabiliteye oranı 2 olarak belirlenmiştir. Kendinden delgili permeametrede elde edilen yatay permeabilite değeri ise aynı boşluk oranı değerlerinde 51 mm çapındaki laboratuvar numunelerinde ölçülen değerlerin 4 katı olarak elde edilmiştir (Şekil 2.48).

Samarasinghe, Huang ve Drnevich (1982) tarafından permeabilite katsayısı ( $k$ ) ile boşluk oranı ( $e$ ) arasında ve konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) ile düşey efektif gerilme ( $\sigma_v'$ ) arasında bir ilişki kurulmuştur. Araştırma kapsamında kurulan bu ilişkilerin doğruluğunu saptayabilmek için normal konsolide killer üzerinde bir seri laboratuvar deneyi yapılmıştır.

Çalışmada literatürde bir çok araştırmacı tarafından önerilen ilişkilere ek olarak kumların ve killerin boşluk oranına göre permeabilitesinin değişimini gösteren farklı bir eşitlik konu edilmektedir. Şekil 2.54'te gösterilen deneysel sonuçlardan yola çıkılarak kumların ve killerin boşluk oranına göre permeabilitesi aşağıdaki eşitlikle tarif edilmiştir.

$$k = C \cdot \frac{e^n}{1 + e} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki eşitlikte;  $C$ ,  $k$  ile aynı birimde olan bir sabit ve  $n$  ise zeminin cinsine bağlı olarak değişen bir sabittir.

Bu eşitlik,  $n$ 'e bağlı olarak  $k$ 'nın  $e^n/1+e$  değerine göre dağılımının orijinden geçen bir doğru şeklinde olduğunu göstermektedir (Şekil 2.55a). Buna göre 2.11 no'lu eşitlik aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenmiştir.

$$\text{Log} [k(1 + e)] = n \cdot \text{log } e + \text{log } C \quad (2.12)$$

2.12 no'lu eşitliğe göre boşluk oranı “e” ile  $\log[k(1+e)]$  arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu görülmektedir. Sonuç olarak; eşitlikte geçen n, bu doğrunun eğimi ,  $\log C$  ise bu doğrunun düşey eksenini kestiği yer olarak tariflenebilmektedir (Şekil 2.55b).

Normal konsolide zeminler için bu eşitliğin doğrulandığı görülmektedir (Şekil 2.56, Şekil 2.57 ve Şekil 2.58). Şekil 2.59' da aynı trendin aşırı konsolide zeminler için de ortaya çıktığını göstermesine rağmen yeterli sayıda aşırı konsolide zemin için doğrulanması gerektiği belirtilmektedir.

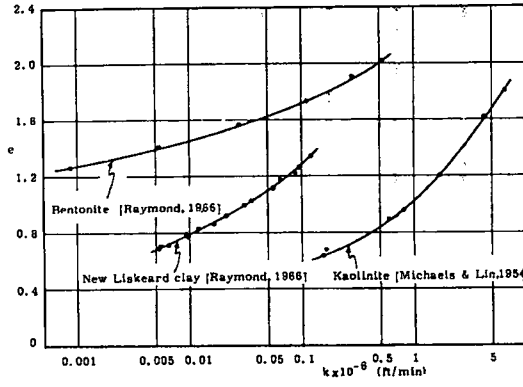
Normal konsolide zeminlerin konsolidasyon hızını tahmin eden önemli bir zemin parametresi olan  $c_v$ ' nin Terzaghi' nin teorisine dayalı olarak standart ödometre deneylerinden elde edilen eğrilerden veya konsolidasyon deneylerinin farklı versiyonlarından olan sabit şekil değiştirme hızlı konsolidasyon deneylerinden ve CGT deneylerinden (Constant gradient tests) elde edilen değerlerle bulunabildiği bilinmektedir. Deneysel olarak bulunan  $c_v$ , genellikle uygulanan efektif gerilmenin ( $\sigma_v'$ ) bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Fakat bu gösterim,  $c_v$ 'nin  $\sigma_v'$  değerine bağlı olarak oldukça geniş bir aralığını göstermektedir ve bunlar arasındaki ilişki ile ilgili olarak çok az çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, k'nın sabit olarak varsayılmadığı diferansiyel bir konsolidasyon eşitliği türetilmiştir. Elde olunan bu ilişkide de Terzaghi teoreminde varsayıldığı gibi normal konsolide killer için  $e$ - $\log \sigma_v'$  arasında lineer bir ilişki ortaya çıkmakta ve  $c_v$ 'nin  $\sigma_v'$  ile direkt bir ilişkisi olduğu gösterilmektedir.  $\sigma_v'$  ile  $c_v$  arasındaki teorik ilişki Terzaghi teoreminden yararlanarak elde edilen deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Türetilen bu eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$c_v = \frac{2.303C}{\gamma_w \cdot c_c} \left( -C_c \cdot \log \frac{\sigma_v'}{\sigma_1} + e_1 \right)^n \quad (2.13)$$

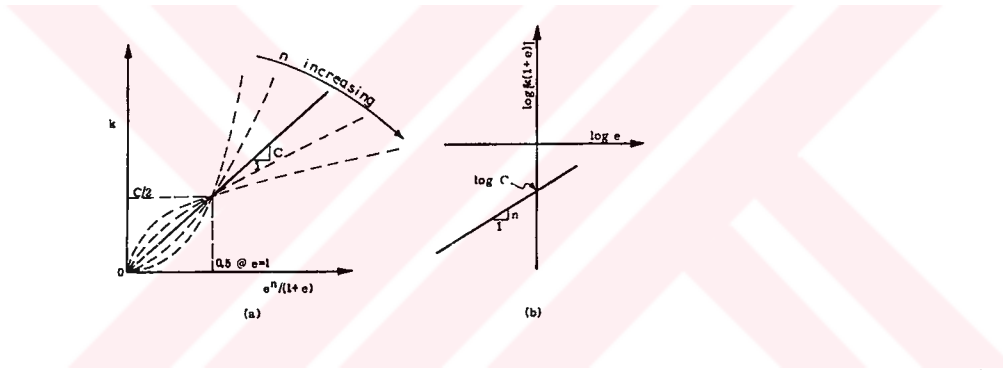
Eşitlikte geçen  $C_c$  zeminin sıkışma indisi;  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı;  $e_1$   $\sigma_1'$  efektif gerilme değerindeki boşluk oranı ; n, zeminin cinsine bağlı olarak değişen bir sabit ; C değeri ise permeabilite katsayısı ile aynı birimde olan bir sabittir.

Normal konsolide zeminlerin boşluk oranı (e) ile permeabilite katsayısı(k) arasındaki ilişkiyi araştırmak amacı ile yapılan laboratuvar deneyleri şu şekilde özetlenebilir;

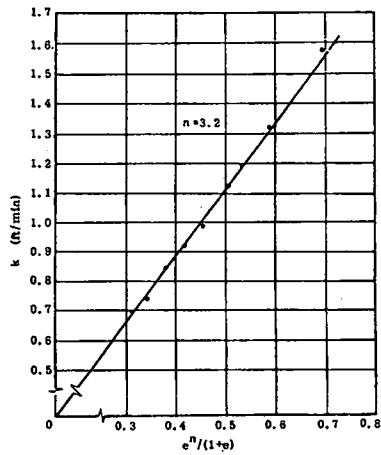
Likit limiti %27 ve plastisite indisi %14 olan kumlu gri bir kil üzerinde Anteus ters basınçlı konsolidometre/ permeametre aleti kullanılarak bir seri laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deney numuneleri 2.5 inch (63.5mm) çapında ve ¾ inch (19.1 mm) yüksekliğindedir. Şekil 2.60' da



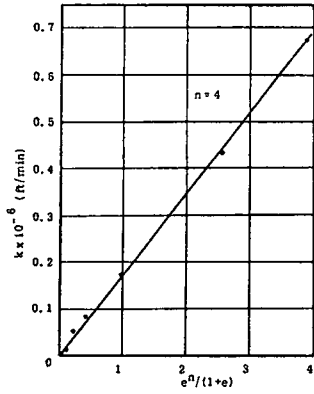
Şekil 2.54 e ve k arasındaki nonlineer ilişki (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)



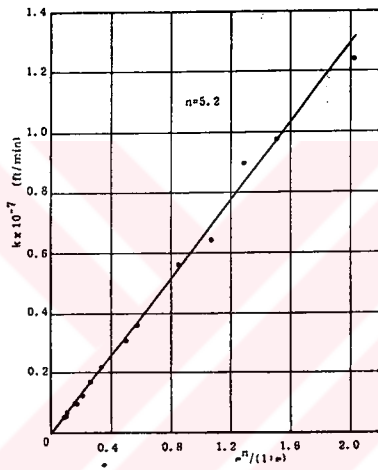
Şekil 2.55 Permeabilite boşluk oranı ilişkisi (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)



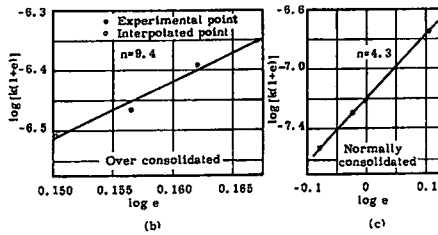
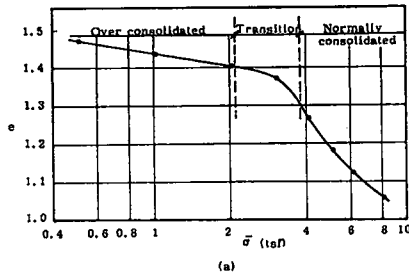
Şekil 2.56 Normal konsolide bir kil için  $k:e^n/(1+e)$  ilişkisi (Loudon, 1953)



Şekil 2.57 Kaolin için  $k: \frac{e^n}{1+e}$  ilişkisi (Michaels ve Lin, 1954)



Şekil 2.58 New Liskeard kili için  $k: \frac{e^n}{1+e}$  ilişkisi (Raymond, 1966)



Şekil 2.59 Leda kilinin sıkışabilirlik ve permeabilite karakteristikleri (Walker ve Raymond, 1968)

deney aletinin şekli görülmektedir. Aynı numune üzerinde hem direkt permeabilite deneyi hem de standart konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Numune, normal konsolide bir örnek elde etmek için suni olarak sulu çamur (slurry) haldeki bir karışımdan çökeltilerek hazırlanmıştır. Numunenin, belirli bir boşluk oranı değerine getirilebilmesi için numune önce konsolide edilmiş, daha sonra düzenli aralıklarla yük artırılarak bir seri konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Permeabilite deneyleri ise her bir yükleme artışının sonunda ve birincil konsolidasyonun tamamlanmasından sonra yapılmıştır. Kumlu gri kil üzerinde yapılan sıkışabilirlik ve permeabilite deneylerinin sonuçları Şekil 2.61a ve 2.61b' de görülmektedir.

Sıkışabilirlik ve permeabilite parametrelerinin (2.13) no'lu denklemlerle kullanılması ile elde edilen  $c_v$ -log  $\sigma'_v$  eğrisi log t ve  $\sqrt{t}$  metodlarından elde edilen deneysel verilerle birlikte Şekil 2.62'de gösterilmiştir. Şekil 2.62, teorik ve deneysel eğrilerin aynı şekilde ve aynı değişim eğiliminde olduğunu göstermektedir.

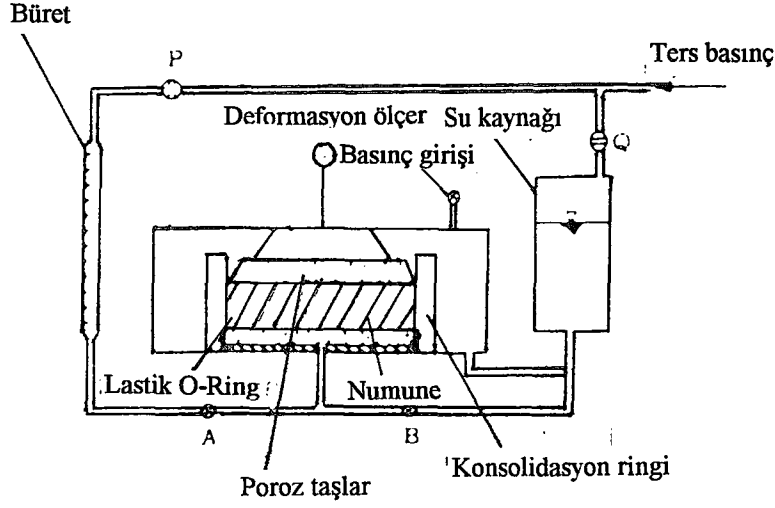
Karşılaştırma yapabilmek amacı ile iki ayrı kumlu gri kil üzerinde aynı deneyler yapılmıştır. Şekil 2.63 iki numunenin log  $[k(1+e)]$ 'e karşı log e değişimi karşılaştırmasını göstermektedir. Grafiklerin eğimi (n) aynı olmasına rağmen düşey ekseni kesen C değerinde biraz farklılık olduğu görülmektedir. Aynı zemin üzerinde Raymond (1966) tarafından hidrostatik konsolidasyon ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Plastisite indisi normalden yükseğe kadar değişen üç farklı zemin için çeşitli deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bütün numuneler, suni olarak çökeltilmiştir. Konsolidasyon deneyleri gerilme artış oranı 1 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir ve permeabilite deneyi aynı numune üzerinde her gerilme artışı sonunda yapılmıştır. Direkt olarak ölçülen permeabilite, Terzaghi teoreminin geçerliliğinin varsayıldığı konsolidasyon deney sonuçlarından indirekt (dolaylı) olarak türetilen permeabilite ile karşılaştırılmıştır. Yani;

$$k = \frac{\gamma_w \cdot c_v \cdot \left( \frac{de}{d\sigma'} \right)}{1 + e} \quad (2.14a)$$

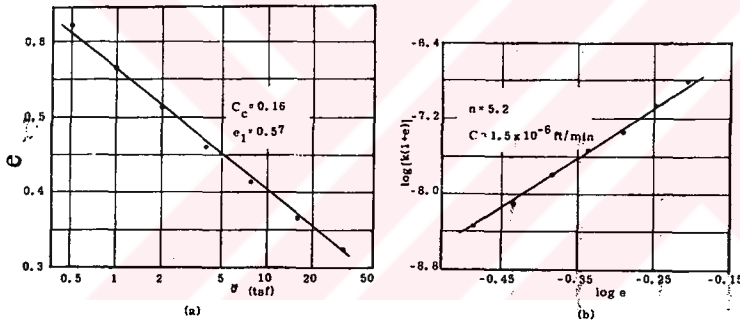
e-log  $\sigma'_v$  grafiği doğrusal olduğu zaman ;

$$k = \frac{\gamma_w \cdot c_v \cdot C_c}{2.303(1 + e)\sigma'} \quad (2.14b)$$

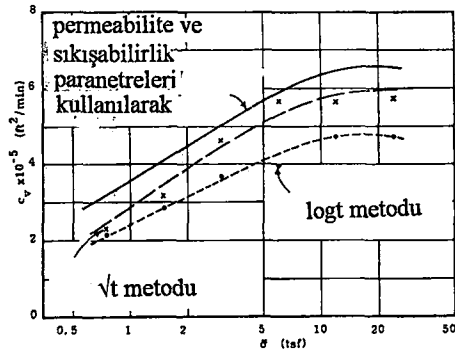
Yukarıdaki denklemlerde yer alan  $k, c_v, \sigma'_v$  değerleri bir gerilme artışı için elde edilen ortalama değerlerdir.



Şekil 2.60 Konsolidemetre/permeametre aletinin şematik şekli(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)



Şekil 2.61 Gri kumlu kil için sıkışabilirlik ve permeabilite ilişkileri(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)



Şekil 2.62 Gri kumlu kil için  $c_v$  ile  $\log \sigma$  ilişkisi(Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)



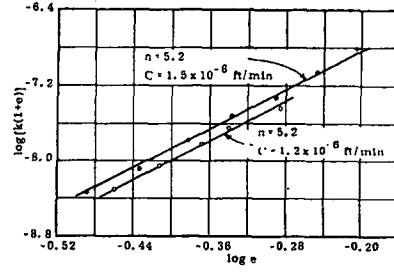
Her üç zemine ait numunelerin üzerinde yapılan direkt ve indirekt deneylerden elde edilen permeabilite ilişkileri Şekil 2.64a'da gösterilmiştir.  $\log[k(1+e)]$ 'e karşılık çizilen  $\log e$  değişimi de Şekil 2.64b'de görülmektedir. Bu doğrusal dağılımlar, permeabilite parametresi  $n$ 'in her zemin için yaklaşık olarak aynı olduğunu,  $C$ 'nin ise deney metoduna göre değiştiğini göstermektedir.

Üç zemin için elde edilen tipik  $e$ - $\log \sigma_v'$  değerleri Şekil 2.65'de gösterilmiştir. Raymond (1966) konsolidasyon katsayısına ait bilgileri sunmamışsa da  $c_v$ - $\log \sigma_v'$  eğrileri Şekil 2.64'de verilen direkt ölçülen permeabilite parametreleri  $n$  ve  $C$ , Şekil 2.65'te verilen sıkışabilirlik parametreleri  $C_c$  ve  $e_1$  kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu şekilde elde edilen  $c_v$ - $\log \sigma_v'$  eğrileri Şekil 2.66'da gösterilmiştir.  $c_v$ - $\log \sigma_v'$  eğrileri, konsolidasyon deneylerinden türetilen permeabilite parametreleri kullanılarak elde edilse de şekil olarak aynı olacakları belirtilmiştir. Çünkü,  $n$  değerleri yaklaşık olarak aynı kalmakta ve  $C$  değerlerindeki değişme nedeni ile düşey olarak dağılım göstereceği tahmin edilmiştir.

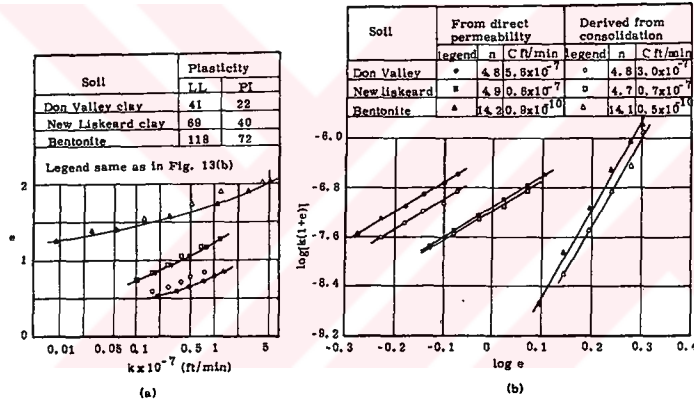
Raymond (1966) aynı zamanda aynı üç zemin numunesi üzerinde ödometre deney aletinde bir seri konsolidasyon ve permeabilite deneyi gerçekleştirmiştir. Fakat, bu kez her zemin için sırası ile konsolidasyon ve permeabilite deneyi için iki farklı numune kullanılmıştır. Bu numuneler de suni olarak çökeltilerek ve Terzaghi teoreminin geçerli olduğu kabul edilerek permeabilite katsayısı( $k$ ) konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilmiştir. Her zemin için birinci numuneden ölçülen direkt permeabilite ve ikinci numuneden indirekt olarak ölçülen permeabilite Şekil 2.67a'da gösterilmiştir. Aynı data,  $\log[k(1+e)]$ :  $\log e$  değişimi şeklinde çizilerek Şekil 2.67b'de gösterilmiştir. Her zemin için 1 no'lu numunenin ve 2 no'lu numunenin değeri yaklaşık olarak aynı iken  $C$  parametresi iki numune arasında farklılık göstermektedir. Zeminlerin  $n$  ve  $C$  değerlerinin bir karşılaştırması olan Şekil 2.64b ve Şekil 2.67b her zemin için  $n$  değerinin yaklaşık olarak aynı,  $C$  değerinin ise deney numunesindeki ve deney metodundaki farklılıklara bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Yeniden yapılandırılmış kaolen kili üzerinde yapılan CRS deney düzeneğinde, deney numunesi sabit şekil değiştirme hızı altında deforme edilmiştir ve tabandaki boşluk suyu basıncı ölçülmüştür. Terzaghi'nin ana denklemi boşluk suyu basıncı izokronlarının parabolik olduğu varsayılarak çözüldüğü takdirde  $c_v$  için şu şekilde bir ifade elde edilir.

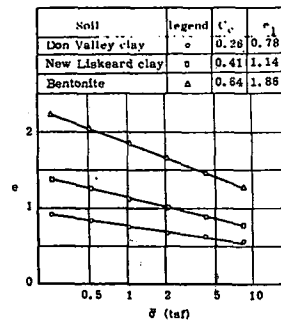
$$c_v = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \cdot \frac{H^2}{2u_b} \quad (2.15)$$



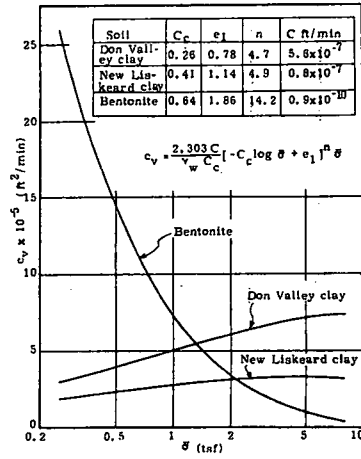
Şekil 2.63 İki farklı kumlu gri kil numunesi üzerinde yapılmış permeabilite deney sonuçları (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)



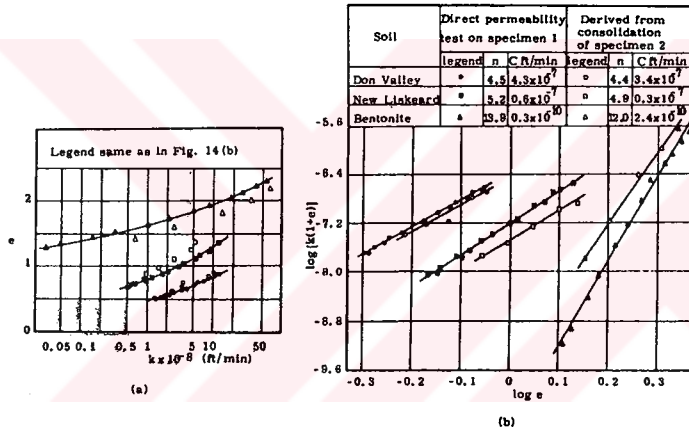
Şekil 2.64 Aynı numune üzerinde iki farklı metod kullanılarak elde edilmiş e-k ilişkileri (Raymond, 1966)



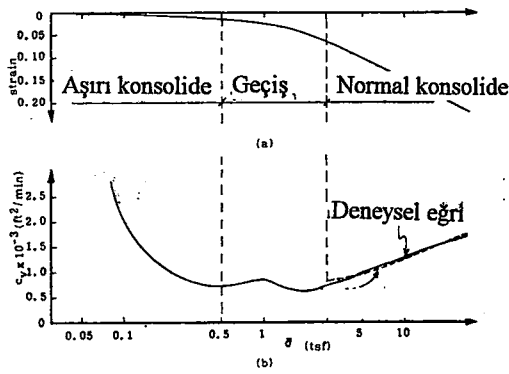
Şekil 2.65 Tipik sıkışabilirlik karakteristikleri (Raymond, 1966)



Şekil 2.66 Sıkışabilirlik ve permeabilite sonuçlarına göre elde edilmiş  $c_v$ - $\log \sigma'$  eğrileri (Raymond, 1966)



Şekil 2.67 İki farklı numune üzerinde iki farklı metoddan elde edilmiş  $e$ - $\log k$  ilişkileri (Raymond, 1966)



Şekil 2.68 Yoğrulmuş kaolin kili için elde edilmiş CRSC deney sonuçları (Samarasinghe, Huang ve Drnevich, 1982)

Eşitlikte geçen  $H$  numune kalınlığıdır. Kaolen numunesinden elde edilen CRS deney sonuçları Şekil 2.68'de gösterilmektedir. Şekil 2.68a'da  $e\text{-log}\sigma_v'$  değişiminin normal konsolide aralığı doğrusal bir çizgiye yaklaşmaktadır. Aşırı konsolidasyon aralığında ise aynı doğrusallık meydana gelmemiştir. Bu numune üzerinde direkt permeabilite deneyi gerçekleştirilmemiştir. Bu yüzden 2.13 no'lu eşitliğin kullanılmasında konsolidasyon deney sonuçlarından türetilerek elde edilen permeabilite sabitleri  $C$  ve  $n$  kullanılmış ve dolayısı ile iki eğri arasındaki uyum beklenildiği gibi oluşmuştur.

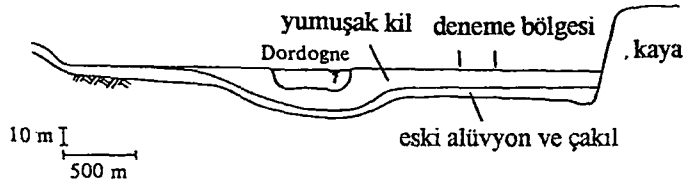
Daha önceki araştırmalar, normal konsolide zeminler için permeabilite ile boşluk oranı arasındaki ilişkinin (2.11 eşitlik) aşırı konsolide zeminler içinde geçerli olabileceği belirtmektedir. Aşırı konsolide aralıktaki zeminin  $n$  değeri normal konsolide aralıktaki zeminin  $n$  değerinden daha fazladır. Bu deney sonuçları, permeabilite parametresinin zeminin türüne bağlı olduğunu göstermektedir.

Bu araştırmanın temel sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

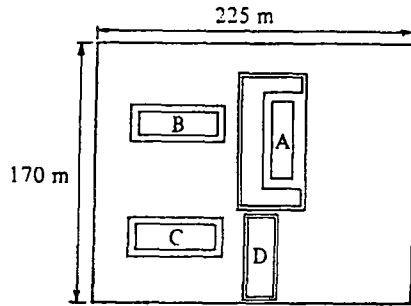
- a. Normal konsolide bir kilin permeabilitesi 2.11 eşitliği tarafından zeminin boşluk oranı ile ilişkilendirilebilir. Bu eşitlikteki  $n$  ve  $C$  parametreleri  $\log[k(1+e)]: \log e$  doğrusal ilişkisinden belirlenebilir.
- b. Permeabilite parametresi  $n$  zemin türüne bağlıdır.

Magnan, Mieussens ve Queyrai (1983) tarafından 1972 yılında yumuşak killer üzerinde yer alan dolguların davranışı üzerinde bir çalışma yapmak için Cubzac-les ponts' ta bir arazi seçilerek dört tane deneme dolgusu inşa edilmiştir. Seçilen bölgenin jeolojik kesiti ve yerleşim planı sırası ile Şekil 2.69' da ve Şekil 2.70' de görülmektedir. Yapılan dört deneme dolgusu da araştırmanın farklı amaçlarına yönelik olarak inşa edilmişlerdir. Şöyle ki; A dolgusu nihai yüksekliği 4.5 m olacak şekilde inşa edilmiş ve bu dolgu inşa edilecek diğer dolgu yüksekliklerinin ayarlanabilmesi için bir ön bilgi oluşturmuştur. B dolgusu, 2.3m yüksekliğinde ve ani göçmeye karşı güvenliği 1.5 olacak şekilde inşa edilmiştir. Bu dolgu ise temel zeminin ve bu dolguya komşu olan(yakın olan) zeminin zamana bağlı konsolidasyon davranışının araştırabilmesi amacı ile inşa edilmiştir.

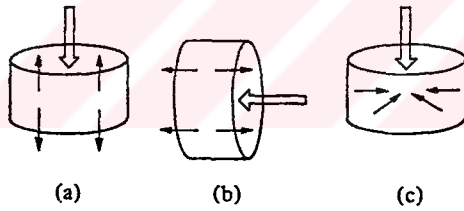
C dolgusu, 3 m yüksekliğinde ve göçmeye karşı güvenliği 1.2 olacak şekilde yapılarak temel zeminin göçmeye yakın durumdaki davranışı incelenmiştir. D dolgusu ise 1m yüksekliğinde göçmeye karşı güvenliği 3 olacak şekilde inşa edilerek temel zemininin yavaş yükleme koşullarındaki davranışı incelenmiştir.



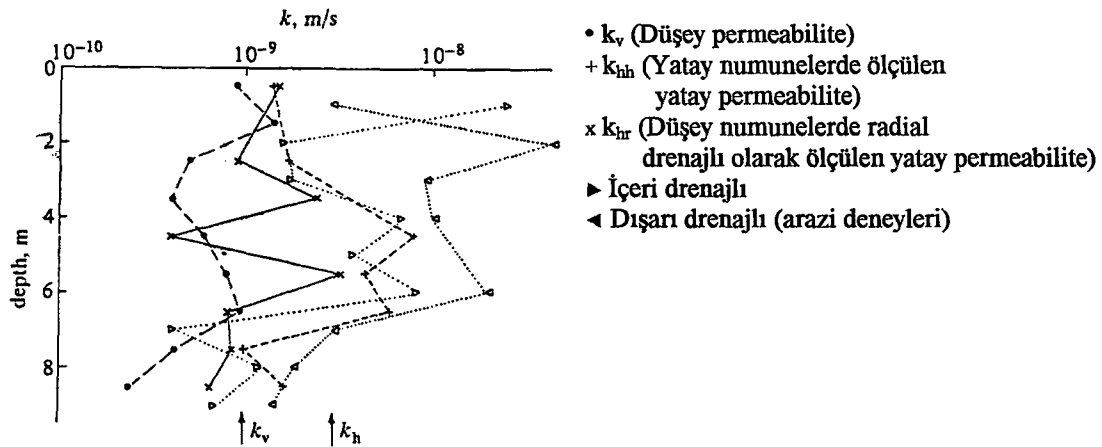
Şekil 2.69 Cubzac-les-ponts vadisi jeolojik kesiti (Magnan, Mieussens ve Queyrai, 1983)



Şekil 2.70 Cubzac-les-ponts'ta inşa edilen test dolgularının planı (Magnan, Mieussens ve Queyrai, 1983)



Şekil 2.71 Ödometre deneyleri (a) düşey drenajlı düşey numune (b) düşey drenajlı yatay numune (c) radyal drenajlı düşey numune (Magnan, Mieussens ve Queyrai, 1983)



Şekil 2.72 Cubzac-les-ponts düşey ve yatay permeabilite profilleri (Magnan, Mieussens ve Queyrai, 1983)

İnşa edilen dört dolgu içerisinde yer alan B dolgusunun inşa edildikten sonraki zamana bağlı deformasyonlarını incelemek amacı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Zamana bağlı deformasyonların belirlenebilmesi için analizde kullanılmak üzere, zemine ait yatay ve düşey permeabilite katsayılarına ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için, zemin içindeki artık boşluk suyu basınçlarının sönmülenmesi sırasındaki su akımının düşey yönde olacağı düşünülerek geleneksel ödometre aletinde numuneler orjinal düşey eksenleri boyunca yüklenmişler ve düşey permeabilite katsayısı elde edilmiştir (Şekil 2.71a).

Elde edilen düşey permeabilite değerleri Şekil 2.72' de gösterilmiştir. Yatay permeabilite katsayıları ise iki farklı deney yapılarak elde edilmiştir. Bunun için;

i. Numuneler geleneksel ödometre deney aletinde orjinal yatay doğrultuları boyunca yüklenmiş ve dolayısı ile su akımının da yatay doğrultuda oluşması sağlanmıştır (Şekil 2.71b). Bu şekilde elde edilen yatay permeabilite katsayısı değerleri ( $k_{hh}$ ) Şekil 2.72'de gösterilmiştir.

ii. Ödometre deney aletinde numuneler orjinal düşey eksenleri boyunca yüklenmiş fakat su akımının radyal olarak kum drene doğru yönelmesi sağlanmıştır (Şekil 2.71c). Bu şekilde elde edilen  $k_{hr}$  permeabilite katsayısı değerleri Şekil 2.72'de gösterildiği gibidir.

Genel olarak, yüklemenin düşey fakat su akımının radyal olduğu numunelerde (Şekil 2.71c) ölçülen permeabilite değerlerinin yüklemenin yatay ve su akımının da yatay olduğu numunelerde (Şekil 2.71b) ölçülen permeabilite değerlerinden daha küçük olduğu görülmüştür. Deneme bölgesinde self-boring permeametre kullanılarak yerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen yatay permeabilite değerleri ( $k_{hi}$ ) Şekil 2.72'de gösterilmiştir ve genel anlamda bu değerlerin laboratuvar deneylerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, amaçlanan analiz için uniform yatay ve düşey permeabilite değeri alınmıştır.

Özçoban (1988) tarafından killerde permeabilitenin yatay ve düşey numunelerde konsolidasyonla değişimi incelenmiştir. Bu amaç için arazideki jeolojik yükleme doğrultusuna paralel ve dik yönlerde konsolidasyon deneyleri yapılarak, konsolidasyon yönündeki permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Bunun için sondajlardan aynı özellikleri taşıyan yani derinlikleri, tane birim hacim ağırlığı, kil, silt yüzdeleri ve doğal su muhtevaları birbirine yakın numuneler alınarak bu numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri ve permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada permeabilite okumalı konsolidasyon deney sistemi ve geleneksel konsolidasyon deney sistemi olmak üzere iki ayrı konsolidasyon

deney sistemi kullanılmıştır. Permeabilite okumalı konsolidasyon deney düzeneği Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Normal konsolidasyon deneyi sonucunda,  $\Delta H - \log t$  eğrisinden yararlanarak  $c_v$  katsayısı belirlenmiş ve bundan permeabilite katsayısı hesaplanmıştır. Permeabilite okumalı konsolidasyon deneyi için düzenlenen sistem ise sabit seviyeli permeabilite deney sistemine benzemektedir. Çalışmada, civa sütunu ile numune altına verilen basınçla suyun zemin içinden geçirilmesi sağlanmıştır. Kısaca, permeabilitenin ölçülmesi için gerekli olan ters basınç civa sütunu ile sağlanmıştır. Civa ölçeğinden numunenin içinden geçen suyun miktarı ölçülerek deney, akış hızı yaklaşık olarak sabit bir değere sahip oluncaya kadar sürdürülmüştür. Sistemde numunedan çıkan su dışarı atılmayarak sistemin kapalı bir devre olarak çalışması sağlanmıştır. Yani; alt başlıktan geçmeye zorlanan su üst başlıktaki çıkışlardan alınarak civanın olduğu tarafa geri getirilmiştir. Deney sırasında drenaj boyu olarak numune yüksekliği yani 20mm alınmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda permeabilite katsayısı  $10^{-6}$  cm/s ile  $10^{-8}$  cm/s arasında değişmiştir.

Araştırma sonucunda konsolidasyon deneylerinden ve permeabilite okumalı konsolidasyon elde edilen permeabilite katsayıları Çizelge 2.2' de gösterilmiştir. Yatay ve düşey numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde, deney sırasında konsolidasyon oturmalarının farklı olduğu fakat permeabilitenin fazla değişmediği gözlenmiştir. Bununla birlikte, Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi konsolidasyon deneyinden hesaplanarak elde edilen permeabilite katsayısı ile permeabilite okumalı sistemden belirlenen permeabilite katsayısı arasında büyük bir fark bulunmamıştır.

Çizelge 2.2 Konsolidasyon ve permeabilite deneylerinden elde edilen permeabilite katsayıları  
(Özçoban,1988)

Numune Konumu ve No	Yük Kademesi (P) kPa	Kademe Farkı ( $\Delta p$ ) kPa	Konsolidasyon Katsayısı ( $c_v$ ) $m^2/s$	Permeabilite katsayısı (k) m/s
PD1	400	200	$8.92 \times 10^{-9}$	$1.97 \times 10^{-11}$
PD1	200	100	$1.302 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-11}$
PD2	400	200	$3.20 \times 10^{-8}$	$3.7 \times 10^{-11}$
PD2	200	100	$6.15 \times 10^{-8}$	$5.05 \times 10^{-11}$
PD3	400	200	$2.35 \times 10^{-8}$	$5.27 \times 10^{-11}$
PD3	200	100	$8.53 \times 10^{-8}$	$2.80 \times 10^{-10}$
PY3	400	200	$7.80 \times 10^{-8}$	$6.22 \times 10^{-11}$
PY3	200	100	$1.59 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-10}$
ND1	400	200	$2.37 \times 10^{-12}$	$2.1 \times 10^{-13}$
ND1	200	100	$9.05 \times 10^{-9}$	$9.23 \times 10^{-11}$
ND2	400	200	$5.67 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-12}$
ND2	200	100	$3.2 \times 10^{-8}$	$3.17 \times 10^{-11}$
NY2	400	200	$1.96 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-11}$
NY2	200	100	$4.6 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-12}$
NY3	400	200	$5.16 \times 10^{-9}$	$4.2 \times 10^{-12}$
NY3	200	100	$9.08 \times 10^{-9}$	$9.8 \times 10^{-12}$

Tabloda geçen PD permeabiliteli sistemdeki düşey numuneyi; PY permeabiliteli sistemdeki yatay numuneyi; ND normal konsolidasyon sistemindeki düşey numuneyi; ve NY ise normal konsolidasyon sistemindeki yatay numuneyi göstermektedir.



### 3. TEORİ

#### 3.1 Giriş

Bir zeminin permeabilitesi, içinden bir sıvının geçmesine izin verebilme kapasitesinin ölçümüdür. Geoteknik mühendisliğinde bu sıvı büyük bir çoğunlukla su olarak anlaşılır. Zemin genel olarak katı partiküllerden ve bu partiküller arası boşluklardan meydana gelmektedir. Bu boşluklar genelde kendi aralarında bağlantılıdır ve suyun geçmesine imkan verirler. Bu durumda da zemin suya karşı geçirimli bir hal alır. Permeabilitenin derecesi, tamamen suya doymun bir zemine hidrolik basınç farkı uygulanarak ve suyun kararlı akım hızının ölçülmesi ile belirlenir ve permeabilite katsayısı hıza bağlı olarak ifade edilir.

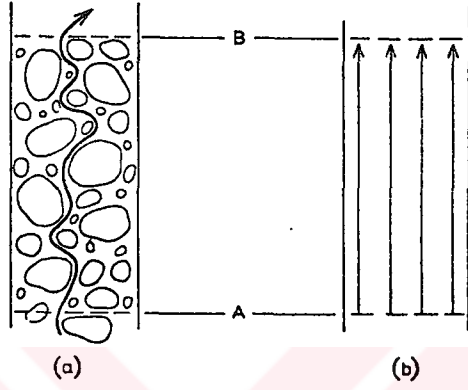
Serbest drenaja izin veren çakıllardan kumlara ve geçirimsiz killere kadar bütün tip zeminlerde su akımı aynı fiziksel kurallar tarafından yönetilmektedir. Zeminlerin permeabilite karakteristikleri arasındaki farklılıktan dolayı bir kilin permeabilitesi bir kumun permeabilitesinden on milyon kat daha az olabilmektedir. Bu yüzden permeabilitenin belirlenmesi için kullanılacak metodlar zemin cinsine göre değişmektedir.

#### 3.2 Zemin İçinde Su Akımı

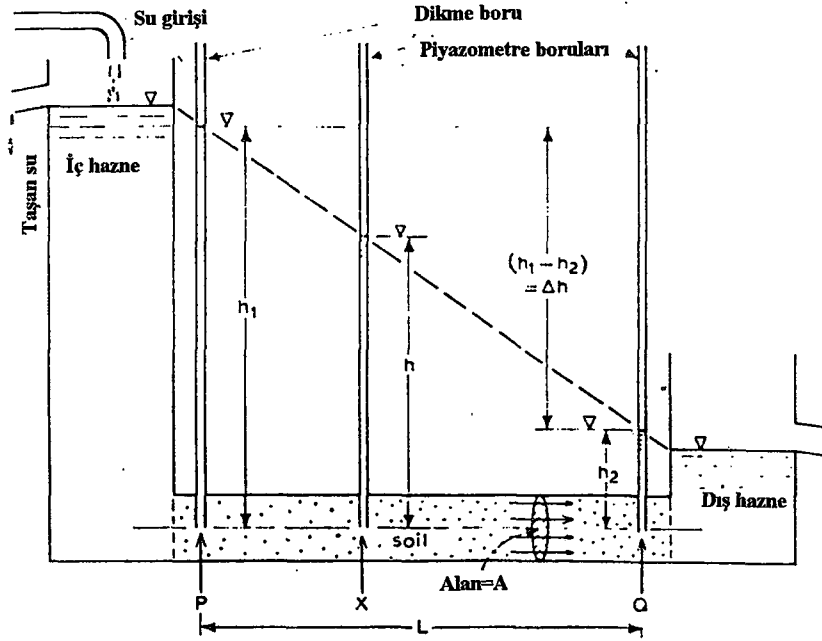
Bir zemin kolonu içerisindeki suyun akımı Şekil 3.1' de gösterildiği gibidir. Bir su taneciği A seviyesinden B seviyesine ulaşmak için zemin daneciklerinin etrafından ve boşlukların içerisinde geçerek şekilde görüldüğü gibi dolambaçlı bir yol izler (Şekil 3.1a). Su taneciğinin zemin içerisindeki bu hareketi anlık olarak boşlukların dizilişine ve boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Fakat, pratik amaçlar için zemin kütlesi bir bütün olarak düşünülebilir ve her bir su taneciğinin Şekil 3.1b' de gösterildiği gibi akım çizgisi olarak adlandırılan düzgün bir yol izlediği varsayılabilir. Akım çizgileri doğrusal çizgiler veya düzgün eğriler şeklinde olabilir ve bu çizgiler ya da eğriler sabit bir hızdaki su akımını temsil etmektedirler. Bu sabit hız ise akım hızı olarak adlandırılır.

Şekil 3.2' de bir zemin tabakası içerisinde oluşan yatay akım gösterilmiştir. Eğer herhangi bir X noktasındaki zemin içerisine bir piezometre borusu yerleştirilirse, su o X noktadaki suyun statik basıncını belirten bir seviyeye kadar yükselir. Bu borudaki su seviyesi piezometrik seviye olarak, su basıncı ise basınç yükü olarak adlandırılır. X noktası için basınç yükü bu noktadaki su kolonunun yüksekliğidir (h). Su basıncı aşağıdaki ilişki kullanılarak ifade edilebilir,

$$p = h \cdot \rho_w \cdot g \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 Zemin içinde su akımı: (a) su partikülünün esas akım izi (b) idealize edilmiş akım çizgileri



Şekil 3.2 Bir hidrolik eğim altında zemin içindeki yatay su akımı

Yukarıdaki eşitlikte  $\rho_w$  ve  $g$  sırası ile suyun yoğunluğu ve yerçekimi ivmesidir.  $p$ ,  $\text{kN/m}^2$  cinsinden yazıldığında bu ifade şu şekle dönüştürülebilir.

$$p = \frac{9.81}{1000} h \quad (\text{kN/m}^2) \quad (3.2)$$

Şekil 3.2' de gösterilen zemin içerisinde P noktasından Q noktasına doğru bir akım oluşturulmak isteniyorsa, P ve Q noktaları arasında bir basınç farkının olması gerekmektedir yani, P noktasındaki piezometrik seviyenin Q noktasındaki piezometrik seviyeden daha büyük olması gerekmektedir. P ve Q arasındaki piezometrik seviye farkı, bu iki nokta arasındaki hidrolik yük farkıdır. P ve Q noktaları arasındaki piezometrik yükseklikler sırası ile  $h_1$  ve  $h_2$  olarak ifade edilirse bu yükseklikler arasındaki fark ( $h_1 - h_2$ ) değerine eşit olur. Seviye farkının P ve Q noktaları arasındaki mesafe olan  $L$ 'e oranı hidrolik eğim ( $i$ ) olarak ifade edilir.

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.3)$$

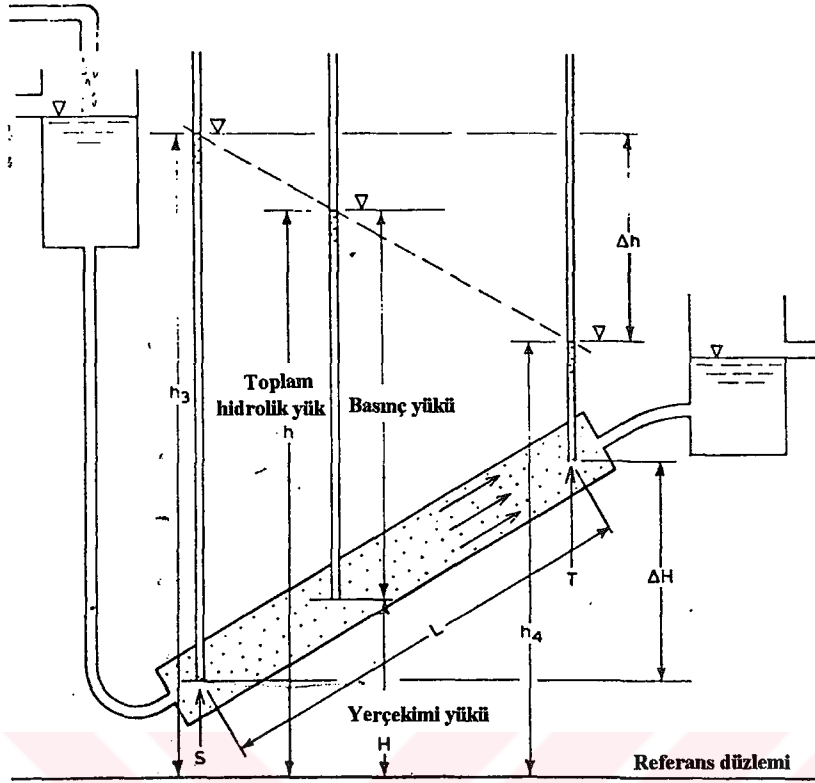
Eğer su akımı yatay değil ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibi yatayla bir açı yapıyorsa S ve T noktaları arasındaki seviye farkı hesaba katılmalıdır. Bunun için ortak bir referans seviyesi göz önüne alınarak  $h_3$  ve  $h_4$  piezometrik yüksekliklerini ölçmek gerekir.  $L$  mesafesi ise akım çizgilerinin doğrultusu boyunca yani zemin silindirisinin eksenini boyunca S ve T noktaları arasındaki mesafedir. Sonuç olarak, hidrolik eğim yukarıda verildiği gibi;

$$i = \frac{h_3 - h_4}{L} = \frac{\Delta H}{L} \quad (3.4)$$

Zemin içerisindeki akımla bağlantılı olarak düşünülen ve neredeyse hiç değişmeyen su hızı akım hızıdır ve boşlukların içerisinde geçen su partiküllerinin gerçek hızı değildir. Bu hız deşarj hızı olarak da adlandırılır. Kararlı akım koşulları altında deşarj hızı akımı meydana getiren hidrolik basınç ile doğru orantılıdır ve suyun viskozitesi ile de ters orantılıdır. Bu ifade oransal olarak şu şekilde gösterilebilir.

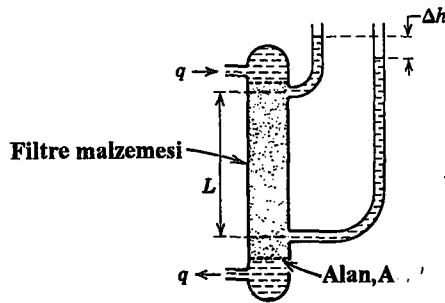
$$v \propto \frac{i_p}{\eta} \quad (3.5)$$

Burada,  $v$  akım hızı veya deşarj hızı;  $\eta$  sıvının dinamik viskozitesi;  $i_p$  basınç eğimi olmakla beraber değeri  $\Delta p/L$ ' dir. Yani, akım çizgileri boyunca her birim mesafede meydana gelen basınç farkı olarak tanımlanabilir.



$\Delta H = S$  ve  $T$  noktaları arasındaki geometrik yükseklik farkı  
 $\Delta h = S$  ve  $T$  noktaları arasındaki toplam yükseklik farkı  
 Hidrolik eğim =  $\Delta h/L$

Şekil 3.3 Yatayla belirli bir açı yapan zemin kolonu içindeki su akımı



Şekil 3.4 Darcy'nin permeabilite problemi için tasarladığı deney düzeneği (Foundation Engineering)

$i_p = \frac{\Delta p}{L} = \frac{\Delta H \cdot \rho_w \cdot g}{L} = i \cdot \rho_w \cdot g$  olduğundan dolayı (3.5) eşitliği aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$v = \frac{K \cdot \rho_w \cdot g \cdot i}{\eta} \quad (3.6)$$

İfadede yer alan K ampirik bir sabit olup spesifik permeabilite olarak adlandırılmaktadır ve alan boyutundadır. Spesifik permeabilite, verilen bir porozitede sabit bir değerdedir ve sıvının özelliklerinden bağımsızdır. Bir çok mühendislik probleminde su akımı ile ilgilenildiğinden aşağıdaki gibi bir düzenleme yapılabilir;

$$k = \frac{K \cdot \rho_w \cdot g}{\eta_w} \quad (3.7)$$

Eşitlikte geçen k permeabilite katsayısı;  $\eta_w$  suyun dinamik vizkozitesidir. Böylece (3.5) eşitliği şu şekilde yazılabilir.

$$v = k \cdot i \quad (3.8)$$

Zemin mekaniğinde genellikle kullanılan permeabilite katsayısı ile spesifik permeabilite arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilebilir.

Su için;  $\rho_w = 1.00 \text{ Mg/m}^3$

$\eta_w =$  yaklaşık olarak  $20^\circ\text{C}$ ' de  $10^{-3}$  Pas

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Buna göre,  $k = \frac{K}{(1000)^2} \cdot \frac{1000 \cdot 9.81}{10^{-3}} = 9.81K$  ya da yaklaşık olarak  $k(\text{m/s}) = 10K(\text{mm}^2)$

şeklinde alınabilir.

Eğer; A kesit alanına (akım çizgilerine dik olarak ölçülen) sahip bir zemin kolonundan t zamanında geçen su miktarı Q ise , q ile ifade edilen birim zamanda geçen su miktarı Q/t'e eşittir ve akım hızı ise aşağıdaki eşitlikle de ifade edilebilir..

$$v = \frac{Q}{A \cdot t} = \frac{q}{A} (\text{m/s}) \quad (3.9)$$

### 3.3 Darcy Yasası

Darcy (1856) permeabilite problemini araştırmak için çok basit bir deney aleti kullanarak suyun ince kum numunelerinin içerisinde geçmesini sağlamıştır. Darcy'nin bu amaçla

tasarladığı deney düzeneği Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Darcy'nin bu deneyleri birim zamanda kum içerisinden geçen su akımının numunelerin A kesit alanı ve numunenin iki ucu arasındaki hidrolik yük farkı ile doğru orantılı, deney yapılan kum kolonunun boyu ile de ters orantılı olduğunu göstermiştir. Bu ilişkiler şu şekilde ifade edilebilir;

$$q \propto \frac{A \cdot \Delta h}{L} \text{ ya da ,}$$

$$q = (\text{bir sabit}) \frac{A \cdot \Delta h}{L} \quad (3.10)$$

Deneyssel olarak elde olunan bu basit ilişki Darcy kanunu olarak bilinmektedir. Darcy'nin permeabiliteyi belirlemek için kullandığı bu direkt yaklaşım, az ya da çok sayıda varsayımları içeren kompleks diferansiyel denklemlerin çözümünde karşılaşılan zorlukları da yok etmiştir. Bu eşitlik, geçirimli bir ortamdaki akımın analizi ve permeabiliteyi belirlemek için oldukça güçlü ve pratik bir çözüm olmaktadır. Darcy eşitliğinin en çok kullanılan hallerinden birisi de,

$$Q = k \cdot i \cdot A \cdot t \quad (3.11)$$

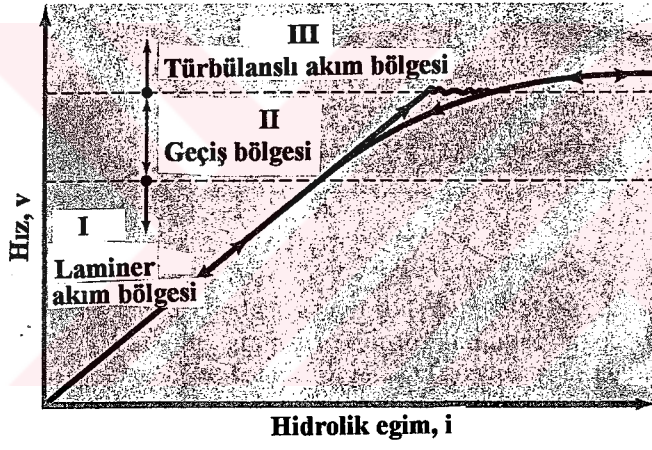
olmaktadır. Darcy tarafından tariflenen permeabilite katsayısı, zeminin belirli bir kesitini temsil eden ortalama bir istatistiksel faktördür. Permeabilite katsayısı, verilen bir zemin kütlesi üzerinde dikkatli deneyler sonucunda belirlendiğinde, o zeminin bütünü de temsil edebilmektedir. Pratik problemlerde geniş zemin alanlarının permeabilitesini, sınırlı hacimlerdeki zeminlerden elde etmek gerekmektedir. Kural olarak, bir deneyde geniş kütlelerin kullanılması sonuçların daha güvenilir olmasının sağlamaktadır. Fakat, deneyler dikkatli bir şekilde yapıldığında oldukça küçük numuneler üzerinde yapılan deneyler de dikkate değer nitelikte sonuçlar verebilmektedir. Darcy yasası'na göre , akımın hızı ve geçirimli ortamdan geçen sızıntı miktarı hidrolik eğimle doğru orantılıdır. Bu durumda akımın laminar yani türbülanslı olmayan bir akım olması gerekmektedir. Genel olarak akım hızının(v) hidrolik eğim(i) ile olan değişimi Şekil 3.5'te gösterildiği gibi olmaktadır. Bu şekilden görüleceği gibi grafikte üç farklı alan yer almaktadır.

1.Laminer akım bölgesi (Bölge 1)

2.Geçiş bölgesi(Bölge 2)

3. Türbülanslı akım bölgesi (Bölge 3)

Hidrolik eğim yavaş bir şekilde artırıldığı zaman akım birinci ve ikinci bölgelerde laminar akım sınırlarında kalmakta ve bu bölgelerde hız ile hidrolik eğim arasında doğrusal bir ilişki oluşmaktadır. Hidrolik eğimin daha büyük değerlerinde ise akım türbülanslı akım (Bölge 3)



Şekil 3.5 Akımın hızının hidrolik eğim ile olan değişimi

halini alır. Hidrolik eğim tekrar azaltıldığında ise laminar akım koşulları sadece birinci bölgede ortaya çıkmaktadır.

Akımın laminar ya da türbülanslı akım olup olmadığını ise Reynolds sayısına (Re) göre belirlenir.

$$Re = \frac{\gamma \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3.12)$$

Burada,  $\gamma$  sıvının yoğunluğu;  $d$  borunun çapı;  $v$  hız;  $\mu$  ise suyun viskozitesidir.

Dairesel borularda türbülanslı akım Reynolds sayısı 2000' den büyük olduğunda ortaya çıkmaktadır.

Darcy yasası'nın büyük çoğunlukta akım durumlarında geçerli olduğu üzerinde hemfikir olunmasına rağmen, herhangi bir akım probleminde bu yasanın geçerliliğini sorgulamak için bir kriter oluşturmak oldukça zordur. Bu durumda türbülansın ters (olumsuz) durumlar yaratacağı düşünülmeli ve güvenilir sınırlar gözönünde tutulmalıdır.

Genel olarak çatlaklı kayalarda, çakıllarda ve iri daneli kumlarda türbülanslı akım koşulları ortaya çıkmaktadır. Taylor (1948) zeminlerin içerisindeki akımın genellikle laminar olduğunu, fakat efektif dane çapı 0.5 mm'i aştığında akımın, yarı türbülanslı hal almadığını belirtmektedir. Terzaghi Darcy yasası'nın geçerli olduğu aralığı araştırmıştır ve bu yasanın geniş bir aralıktaki zemin ve hidrolik eğimler için geçerli olduğu sonucuna varmıştır. Muskat (1937) akım sistemlerinin büyük bir çoğunluğunun önemli derecede Darcy yasası tarafından kontrol edildiğini belirtmektedir.

### 3.4 Permeabiliteyi Etkileyen Faktörler

Permeabilite bir zeminin temel özelliği olmamakla beraber bir kaç faktöre dayanmaktadır. Bu faktörler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Dane çapı dağılımı
2. Dane şekli ve yapısı
3. Dane boyutunun etkisi
4. Dane düzeninin etkisi
5. Süreksizliklerin ve zemin iç yapısının etkisi
6. Zemin boyutunun (büyüklüğünün) etkisi
7. Minerolojik bileşim



- 8.Boşluk oranı
- 9.Suya doygunluk derecesi
- 10.Sıvının yapısı
- 11.Sıcaklığın etkisi

### 3.4.1 Dane Çapı Dağılımı

Granüler bir zeminin permeabilitesi zeminin dane çapı dağılımından ve özellikle ince daneli partiküllerden oldukça etkilenmektedir. Partiküller ne kadar çok küçük olursa, partiküller arası boşluklar da o kadar küçük olmaktadır ve bu yüzden suyun zemin içerisinden geçebilmesine karşı olan direnç partikül boyutu azaldıkça artmaktadır (yani permeabilite azalmaktadır). Bu anlamda efektif dane çapı olan  $D_{10}$ ' un önemi oldukça fazladır ve Hazen (1930) tarafından permeabilitenin belirlenmesi için önerilen formüle de temel oluşturmaktadır.

### 3.4.2 Dane Şekli ve Yapısı

Dane şekli ve yapısı da permeabiliteyi önemli oranda etkilemektedir. Boyuna uzanmış veya düzensiz daneler, küresel daneler etrafında oluşan akım izlerinden daha dolambaçlı ve eğrisel akım izleri meydana getirmektedirler. Pürüzlü yüzey yapısına sahip olan daneler akıma karşı düzgün yüzey yapısına sahip danelerden daha fazla bir sürtünme direnci oluştururlar. Dane şekli ve dane yapısı suyun zemin içindeki akım hızını azaltmakta, yani zeminin permeabilitesini azaltmaktadır.

### 3.4.3 Dane Boyutunun Etkisi

Teorik çalışmalardan permeabilitenin boşluk yüzeyinin karesi ile ve zemin danelerinin çapının karesi ile değiştiği beklenmektedir. Şekil 3.6'da çeşitli boyutlardaki zeminlerin ve agregaların permeabilite katsayılarının tipik değerleri gösterilmiştir. Zeminlerin permeabilitesi dane boyutu ile önemli miktarda değişmektedir..

Kural olarak permeabilite dane boyutu gibib zeminin herhangi bir özelliğinden belirlenmesi yerine deneysel olarak belirlenmelidir. Genel olarak zemin cinsi ve dane boyutu önemlidir, fakat permeabilite için sadece yaklaşık bir aralık belirttiği bilinmelidir. Permeabilitenin genel olarak zemin cinsi ile olan değişimi ve zeminin yoğunluğunun da permeabilite üzerinde bir etkisi olduğu Şekil 3.6' da görülmektedir.

### 3.4.4 Dane Düzeninin Etkisi

Zemin danelerinin düzeni permeabiliteyi iki önemli şekilde etkilemektedir.

1. Ayrışma veya tabakalaşma
2. Partiküllerin bir araya yönelmesi, ince danelerin geniş bir şekilde dağılması.

Doğal zemin çökelleri her zaman yapı olarak az veya çok tabakalı ve uniform olmayan durumda bulunurlar. Su tarafından taşınarak çökelmiş olan zeminler, dane çapı dağılımı ve permeabilitesi değişen yatay tabakalar halinde meydana gelirler. Bu çökeller yatay yönde düşey yöne göre daha geçirimli bir yapıya sahiptirler. Rüzgar etkisi ile taşınmış olan kumlar ve silterin ise düşey yöndeki permeabiliteleri yatay yöndeki permeabilitelerinden bitki kökleri nedeni ile oluşmuş boru biçimindeki boşlukların etkisinden dolayı daha büyüktür. Zemin çökellerinin oluşmasına bağlı olarak bir çok değişiklik meydana gelmektedir. Sonuç olarak; zeminlerin oluşum şekillerinin bilinmesi bu zeminlerin mühendislik özelliklerinin anlaşılmasında oldukça yararlı olmaktadır. Tabakalanmanın etkisinin ve öneminin en göz alıcı örnekleri barajların ve köprü kenar ayaklarının suya karşı geçirimsizliklerinin sağlanması sırasında görülmektedir.

Sıkıştırılmış zeminlerin dane düzeninin permeabilite ve diğer zemin özellikleri üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Örneğin, eğer zeminler kuru tarafta sıkıştırılırlarsa, oldukça geçirimli yapıya sahip olurlarken, sıkıştırma su muhtevası yüksek olduğunda partiküller birbirleri üzerinden kaymaya başlayarak birbirlerine yaklaşarak oldukça yakın bir hal alırlar. Bu durumda ise zemin geçirimsiz bir yapıya sahip olur. Suyu karşı geçirimsiz bir yapı oluşturmak için zemin danelerinin bu özelliğinden yararlanarak baraj çekirdekleri yüksek derecede geçirimsiz olarak yapılabilmektedir.

#### **3.4.5 Süreksizliklerin ve Zemin İç Yapısının Etkisi**

Doğal durumlarında bir çok zemin tabakalanma yani farklı zemin tiplerine ait tabakaları içerdiklerinden homojen değildirler ve anizotropurlar. Tabakalaşmış bir çökelin tabakalanmaya paralel permeabilitesi ( $k_h$ ) çoğunlukla tabakalanmaya dik olan permeabiliteden ( $k_v$ ) birkaç kat daha büyüktür. Bir çok tabakadan oluşmuş zeminlerde ise iki permeabilite katsayısının birbirine oranı ( $k_h/k_v$ ) permeabilite oranı olarak bilinmektedir ve değeri 100 veya daha fazla olabilir. Permeabiliteyi etkileyen anizotropinin diğer özellikleri ise fisürler, mercerler ya da silt, kum veya organik bazı materyallerin zemin içerisinde bulunarak bir süreksizlik oluşturmasıdır. Arazide kohezyonlu zeminlerin permeabiliteleri süreksizliklerin varlığından büyük oranda etkilenmektedir ve laboratuarda küçük numuneler üzerinde ölçülen permeabilite değerinden daha büyük değerlerde olabilmektedir. Ayrıca, ince daneli zeminlerin permeabilitesi bu zeminlerin topaklanma, danelerinin dağılımından ve yöneliminden ve bir arada bulunma halleri gibi mikro yapılarından önemli miktarda etkilenmektedir. Ortaya

çıkarılmamış eklem, damar, ve kum bantları hidrolik yapılarda ciddi sorunlara neden olabilmektedir. Sıkıştırılmış killer genellikle büzülme ve kayma çatlakları içermektedir. Bu çatlakların etkisi ile formasyonlar çatlaklar arasında kalan killerden binlerce kat daha geçirimli bir hale gelirler. Bu duruma benzer olarak eklemli bir kayacın permeabilitesi de bu eklemeler arasında yer alan esas kayaç kütlelerinin permeabilitesinden fazladır. Bir çok baraj inşaatı bilinmeyen eklem ve damar sistemlerinin su ile dolması ve borulanmanın meydana gelmesi nedeni ile göçmüştür. Bu yüzden önemli projelerde dikkatli ve yeterli zemin araştırması yapılarak bu süreksizliklerin ve benzer yapıların araştırılması yapılmalıdır.

Eklemli kayaçların ve süreksizlikler içeren zeminlerin permeabilitesi hakkında fikir sahibi olunmak isteniyorsa, geniş pompalama deneyleri ile bütün tabaka incelenerek eklemelerin ve süreksizliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bir çok formasyonun permeabilitesi süreksizlikler tarafından kontrol edilmektedir ve bu formasyonlarda tek olarak yapılmış sondajlarda yapılan deneyler yanıltıcı olabilmektedir.

Londe (1972) eklemli kayaçların permeabilitesinin fisürlerin genişliğine bağlı olduğuna işaret etmektedir ve bu fisürlerin genişliğinde olabilecek herhengi bir değişikliğin permeabiliteyi önemli bir şekilde etkilediğini belirtmektedir. Aynı şekilde zeminlerde var olabilecek süreksizliklerin boyutu da zeminin permeabilitesini önemli derecede etkilemektedir. Buna bağlı olarak uygulanan gerilmedeki az bir değişiklik zeminin ya da kayanın yerel permeabilitesini değiştirebilmektedir.

#### **3.4.6 Zemin Kütleli Boyutunun Etkisi**

Sızıntı koşullarının projeye göre değiştirileceği bir projenin gelişimi içinde permeabilite katsayılarının belirlenmesinde, çalışmanın önemi sızıntı davranışını etkileyecek olan zemin kütlelerinin boyutu ile ilgili olmaktadır. Detaylı bir deney programı uygulanıyor olsa bile, deney çukurlarından elde edilebilecek küçük numunelerden elde edilen deney sonuçlarının numuneler araziye temsil ettiği sürece geçerli olduğu bilinmelidir. Neely (1974) arazide yapılan permeabilite deneyleri sonucu elde edilen permeabilite katsayısı değerlerinin laboratuvarında küçük numuneler üzerinde yapılan permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen değerlerden daha büyük olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni laboratuvar numunelerinin arazideki zeminin içerdiği fisürleri, kum bantları gibi süreksizlikleri tam olarak temsil edememesinden kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde büyük boyutlu kuyu pompalama deneyleri sonuçlarının, çok sayıdaki örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deneylerden daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Eğer arazide yeraltı su seviyesinde meydana gelen mevsimsel değişimler ya da diğer başka değişimler denetlenebilirse zeminin permeabilitesi hakkında bazı ipuçları elde etmek mümkün olabilmektedir. Olabilecek her durumda seçilmiş olan sondaj kuyularında veya deneme çukurlarında uzun bir peryot içerisinde su seviyeleri kontrol edilmelidir. En azından yıllık olarak kurak dönemlerde ve yağışın olduğu dönemlerde bu kontrollerin yapılması gerekmektedir. Doğal ya da yapay iç akımlar (şelale, sulama vb.) ve dış akımlar(drenaj, kuyu pompalama yolu ile su çekme vb) sonucunda yer altı su seviyesinde olan değişimler, zemin tabakaları arasında yer alabilecek kum bantlarının ya da permeabilitesi yüksek olan diğer tabakaların varlığını gösterebilmektedir. Sonuç olarak, tasarımda büyük çaptaki yeraltı su seviyesi değişimleri, geçmişte yapılan kayıtlı gözlemler de dikkate alınarak, gözlenmelidir.

### 3.4.7 Minerolojik Birleşim

İnce daneli zeminlerde, minerolojik birleşimin permeabiliteye ek olarak bir etkisi bulunmaktadır. Çünkü farklı tipte mineraller bünyelerinde farklı kalınlıkta absorbe su bulundurmakta ve dolayısı ile efektif boşluk boyutu da değişmektedir. Bu nedenle killerin permeabilitesini mineral cinsi, dane boyutundan daha fazla etkilmektedir. Fakat, kumlarda ve çakıllarda minerolojik bileşimin etkisi oldukça küçüktür.

### 3.4.8 Boşluk Oranı

Zeminin yerleştirilme biçiminin veya kompakte olmasının, daneler arasındaki boşlukların düzeni ve boyutu üzerinde önemli bir etkisi vardır ve dolayısı ile bu etki permeabilite üzerinde de vardır. Boşlukların hacmi boşluk oranı ( $e$ ) veya poroziteye ( $n$ ) dayanarak ifade edilmektedir. Boşluk oranı kumların permeabilitesini belirlemek için kullanılan Kozeny (1927) eşitliğinde de kullanılmaktadır.

Zemin kütlelerinin yoğunluğu, aynı zamanda boşluk oranı veya porozitesi dane boyutu ve zemin yapısından daha az olmamakla birlikte, zeminlerin permeabilitesini önemli derecede etkilemektedir. Genellikle su bentlerinin yapımı sırasında bendin altındaki zemin suya karşı geçirimsizliği sağlamak amacı ile, yerinde sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Kısaca; zemin yoğunluğunun artması yani boşlukların azaltılması zeminin permeabilitesini azaltmaktadır. Yoğunluğun diğer bir anlamda boşluk oranının permeabilite ile olan ilişkisi Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi permeabilite zeminlerin gevşek durumlarından sıkı durumlarına kadar 2-1000 kat kadar bir değişim göstermektedir. Bununla birlikte partikül boyutları birbirlerine ne kadar yakın olursa permeabilite katsayısı yoğunluktan o kadar az oranda etkilenmektedir. Killerin ve turba zeminlerin konsolidasyonu üzerinde yapılan çalışmalarda yüksek derecede sıkışabilirliğe sahip bu formasyonların

konsolidasyon hızı ilk permeabilite katsayıları kullanılarak araştırılmıştır. Çünkü zeminlerin konsolidasyonu sırasında permeabiliteleri azalmaktadır. Genellikle kil formasyonlarının permeabilitelerindeki azalma orta derecede iken, organik siltler, killer ve turba zeminler gibi sıkışabilirliği yüksek olan zeminlerde bu azalma daha fazladır. Sıkışabilirliği yüksek olan zeminlerin analizinde permeabilite değişiminden yararlanan basitleştirilmiş hesap yöntemlerine gerek duyulmaktadır. Konsolidasyondan kaynaklanan permeabilitedeki tipik değişimler Şekil 3.7' de gösterilmiştir.

### 3.4.9 Suya Doymuluk Derecesi

Boşluk hacminin yüzde kaçının su ile doymun olduğunu gösteren suya doymunluk derecesi permeabilite ölçümlerinde oldukça önemlidir. Hava kabarcıkları, daneler arasındaki sızıntı kanallarına engel olarak permeabiliteyi de azaltmaktadır. Eğer suya doymunluk derecesi %85'den az ise, Darcy yasası geçerli olmamaktadır.

### 3.4.10 Sıvının Yapısı

Spesifik permeabilite bir zemin için özel koşullarda sabittir. Permeabilite katsayısı,  $k$ , ise nüfuz eden sıvının özelliklerine dayanmaktadır. Bir sıvının permeabiliteyi etkileyen özellikleri bu sıvının yoğunluğu ve dinamik vizkozitesidir.

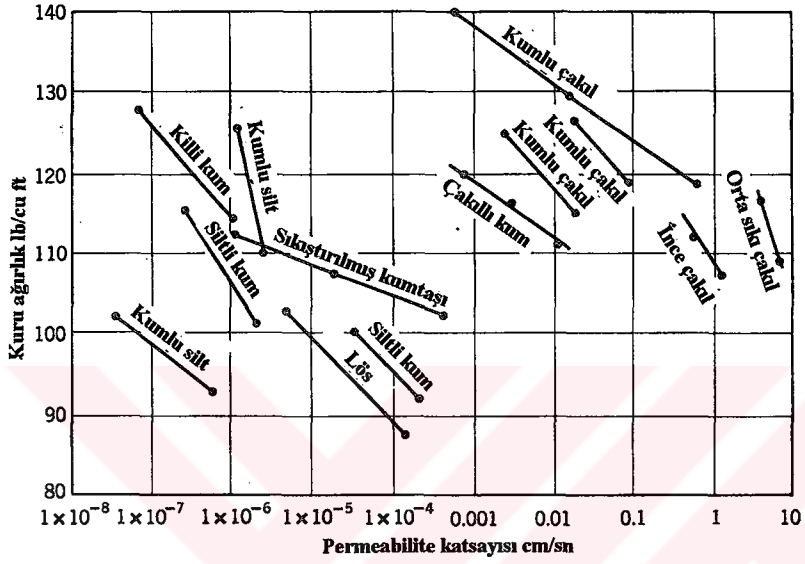
### 3.4.11 Sıcaklığın Etkisi

(3.7) eşitliğinden de görüleceği gibi bir zemin için permeabilite katsayısı değeri sabit değildir, ve  $\eta_w$  ile ifade edilen sıvının(suyun) vizkozitesine bağlıdır. Vizkozite sıcaklıkla değişebilmekte ve 20°C' den 10°C' ye kadar yaklaşık %30 oranında artmaktadır. Bu yüzden laboratuarda ya da arazide permeabilite deneyi gerçekleştirilirken suyun sıcaklığı mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Permeabiliteyi standart bir sıcaklık (20°C)'e bağlı olarak hesaplamak yaygın olanıdır. Herhangi bir sıcaklıkta suyun vizkozitesinin 20°C' deki suyun dinamik vizkozitesine oranı Şekil 3.8'de gösterilmektedir. T°C'de gerçekleştirilen bir permeabilite deneyi,  $k_T$  gibi bir permeabilite katsayısı değeri veriyorsa,  $k_{20}$  aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

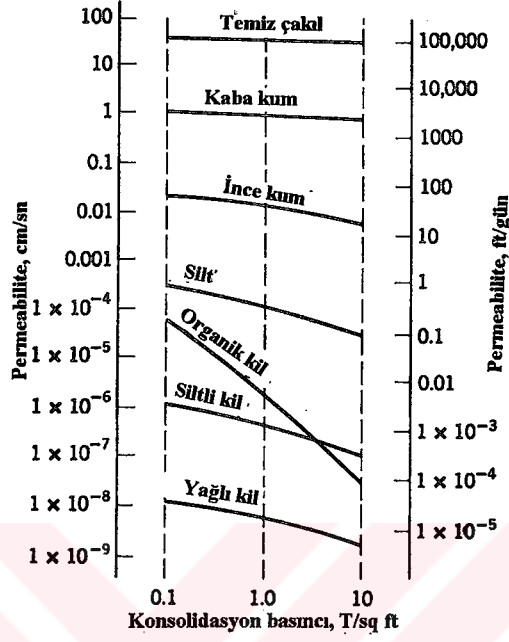
$$k_{20} = k_T \left( \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \right) \quad (3.13)$$

Burada,  $\left( \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \right)$  Şekil 3.8'deki grafikten T°C' e karşılık gelen değer olarak alınabilir.

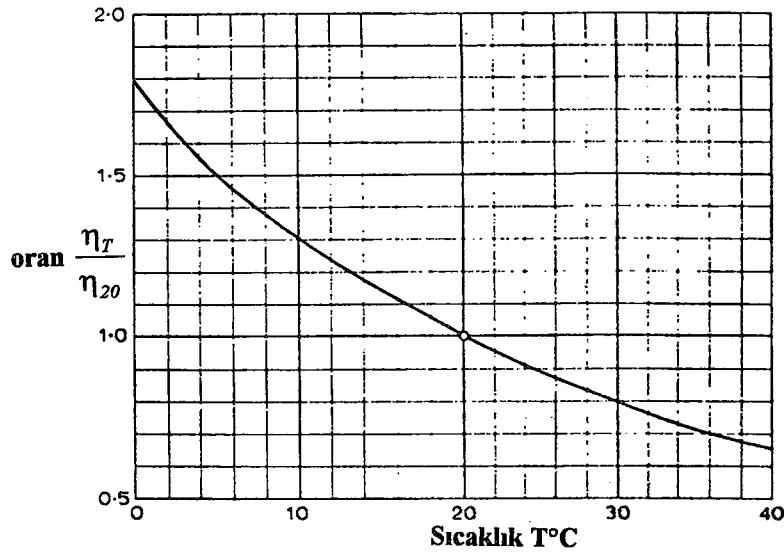
Zeminlerde karşılaşılan en yüksek sıcaklıklarda vizkozite için yapılan maksimum düzeltme yaklaşık %100 oranındadır.



Şekil 3.6 Permeabilite katsayısının zemin cinsi ve zemin yoğunluğu ile olan ilişkisi



Şekil 3.7 Konsolidasyon basıncı ile permeabilitenin değişimi



Şekil 3.8 Sıcaklık ile suyun dinamik viskozitesi arasındaki ilişki (Kaye and Laby, 1973)

### 3.5 Permeabilite Katsayısını Belirleme Yöntemleri

Literatürde permeabilite katsayısını belirlemek için kullanılan bir çok metod yer almaktadır. Bu konu üzerinde yapılan araştırmalar ilerledikçe, permeabilite katsayısını belirlemek için gerek laboratuarda gerekse arazide uygulanabilen farklı deney tekniklerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Geoteknik mühendisliğinde permeabilite katsayısının oldukça önemli bir kavram olması nedeni ile, çalışmalar deneysel olarak hem laboratuarda hem de arazide gerçekleştirilerek, farklı yöntemlerin birbirleri ile olan yakınlığı veya uyumu analiz edilmeye çalışılmıştır. Böylece permeabilitenin direkt ve indirekt değerlendirme metodları karşılaştırılarak en iyi pratik metodun kanıtlanması amaç edinilmiştir.

Bu kısımda, permeabilite katsayısını laboratuvar ve arazi deney yöntemleri ve indirekt yöntemlerle belirlemek için önerilen metodlara değinilmiştir.

#### 3.5.1 Permeabilite Katsayısının Konsolidasyon Deneylerinden İndirekt Olarak Belirlenmesi

Permeabilitenin indirekt yöntemlerle tayin edilmesi, direkt bir permeabilite ölçümünün pratik olmadığı durumlarda ya da direkt olarak ölçülmüş değerin kontrol edilmesi amacı ile oldukça yararlı olmaktadır. Uygulanan bir gerilme altında bir kilin konsolidasyon hızı permeabilite tarafından kontrol edilmektedir. Bu şekilde konsolidasyon deneylerinin geoteknik mühendisliğinde azalan boşluk oranlarına göre veya başlangıç koşulları ( $e_0, \sigma_{v0}$ ) altında konsolidasyon hızı gözlemlenerek permeabilite katsayısını yorumlamak mantıklı olmaktadır. Permeabilite katsayısının belirlenebilmesi için üç farklı tipte konsolidasyon deneyi düzenlenebilir. Bu deneyler klasik ödometre deneyi, CRS (sabit şekil değiştirme hızlı) ve CGT (sabit hidroluk eğimli) deneyleridir. Fakat, Terzaghi teorisinin konsolidasyon hızını permeabiliteye göre yorumlamak için kullandığı bir seri varsayım kriterinin davranışını tam olarak yansıtmamaktadır. Dolayısı ile permeabiliteni indirekt(dolaylı) olarak değerlendirilmesi önemli hatalara neden olabilmektedir.

##### 3.5.1.1 Klasik Konsolidasyon Deneyleri Sonucu Elde Edilen $c_v$ 'den Permeabilite Katsayısının Bulunuşu

Terzaghi' nin bir boyutlu konsolidasyon teorisinin kapalı formda bir çözümü herhangi bir yükleme anında ödometre numunesindeki konsolidasyon süresince uygulanabilmektedir. Fakat, Terzaghi'nin bu kapalı formdaki çözümünü içeren teori aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır.

- 1.Şekil değiştirmeler çok küçük ve bir boyutludur.
- 2.Zemin suya doygunudur.



- 3.Zemin daneleri ve boşluklar sıkışmazdır.
- 4.Zemin homojendir.
- 5.Konsolidasyon süresince zeminin geçirimliliği ve sıkışabilirliği sabittir.
- 6.Akım bir boyutlu ve akım için Darcy yasası( $v=k.i$ ) geçerlidir.
- 7.Şekil değiştirmeler ile efektif gerilmeler arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur.
- 8.Zeminde krip ve ikincil deformasyonlar meydana gelmez.

Bu varsayımlara göre bir boyutlu konsolidasyon eşitliği şu şekildedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.14)$$

Burada  $c_v$  konsolidasyon katsayısıdır ve sabit bir değer olarak kabul edilir.

$$c_v = \frac{k(1+e)\sigma'_v}{0.434\gamma_w \cdot C_c} = \frac{kM}{\gamma_w} \quad (3.15)$$

Yukarıdaki ifade de geçen , k permeabilite katsayısı; M deformasyon modülü; e boşluk oranı;  $C_c$  kilin sıkışma indisi' dir.

(3.14) eşitliğinin çözümü  $U=f(T)$  formunda yazılabilir. Burada yer alan T zaman faktörüdür ve aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilir.

$$T = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (3.16)$$

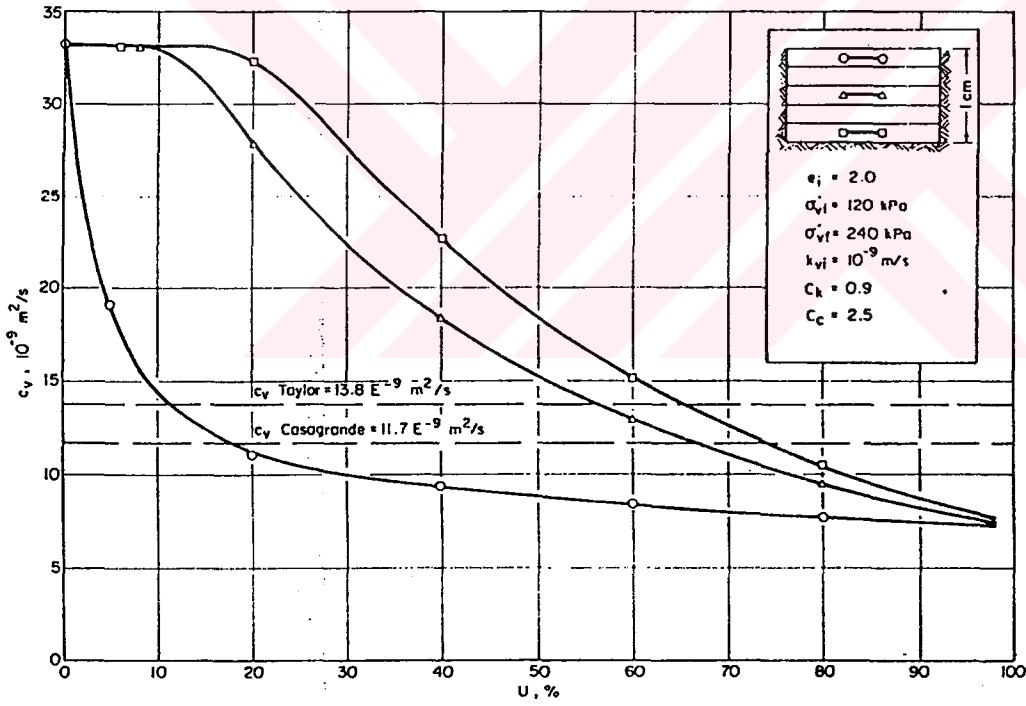
İfadede yer alan H drenaj kalınlığıdır. Zaman faktörü T değeri bir boyutlu konsolidasyon için verilmiş olan konsolidasyon yüzdesi-zaman faktörü eğrilerinden belirlenebilmektedir.

(7) no'lu varsayımdan yola çıkılarak konsolidasyon yüzdesi  $U(t)$  herhangi bir t anındaki oturma miktarının nihai oturmaya oranı olarak düşünülür.

Çeşitli varsayımlar nadir olarak tatmin edici olduğundan oturma-zaman gözlemlerinin konsolidasyon yüzdesi cinsinden yorumlanabilmesi için değişik ampirik yaklaşımlar gerekmektedir. Bu yüzden T'nin ve dolayısı ile konsolidasyon katsayısının tanımlanabilmesi için Casagrande ve Fadum(1944) ve Taylor(1948) tarafından bu amaç için önerilen yöntemler rutin olarak kullanılmaktadır. Konsolidasyon katsayısı  $c_v$ 'nin bulunması ve kilin diğer karakteristiklerinin de bilinmesi halinde (3.15) no'lu eşitlik kullanılarak permeabilite katsayısı belirlenebilmektedir.

Terzaghi teorisinin çözümünün doğal killere olan uygulanabilirliği ile ilgili olan problemler Tavenas(1979) tarafından belirtilmiştir. Terzaghi teorisinde  $k$ ,  $M$  ve  $c_v$  değerlerinin konsolidasyon sırasında sabit kaldığının varsayılmasının teorisinin en büyük eksikliğini oluşturduğu düşünülmektedir. Normal konsolide halde bulunan killerde konsolidasyon sırasında boşluk oranının azalması ile birlikte sıkışabilirlik  $M$ , permeabilite katsayısı  $k$ , ve dolayısı ile konsolidasyon katsayısı  $c_v$  değerlerinde önemli değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Louiseville kilinde klasik ödometre deneyleri yapılarak ve konsolidasyon sırasında  $k$ ,  $M$  değerlerinde olan değişimleri hesaba katan ve (3.14) eşitliğinin numerik çözümü olan CONMULT metodu kullanılarak, Terzaghi çözümünden olan sapmalar belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.9' dan görüleceği gibi kademeli yükleme sırasında konsolidasyon katsayısı  $c_v$  başlangıçtaki  $33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  değerinden konsolidasyon sonunda  $7.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  değerine düşmüştür.  $c_v$  değerindeki bu azalmanın drenaj sınırlarında numune ortasındaki azalmaya göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum ise numune içerisinde homojen olmayan bir durumun oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte numune içerisinde oluşan bu durum diğer taraftan boşluk suyu basıncı izokronlarında deformasyona ve oturma-zaman ilişkilerinde değişikliğe neden olmaktadır. Değişmiş olan bu oturma-zaman ilişkilerinden Casagrande ve Taylor metodları kullanılarak elde edilmiş olan  $c_v$  değerleri Şekil 3.9' da gösterildiği gibi maksimum ve minimum  $c_v$  değerlerinin ortasına düşmektedir. Taylor metodu kullanılarak elde edilen  $c_v$  değeri, oturma- zaman ilişkisinin başlangıç kısımlarını göz önüne alarak yapılan bir hesaba dayalı olduğu için daha yüksek bir değerde olmaktadır.  $M$  veya  $\sigma$  ve  $e$ 'nin kesin değerlerini tanımlamanın güç olması nedeni ile deney sonuçlarından elde edilmiş olan ortalama  $c_v$  değerleri kullanılarak (3.14) eşitliği yardımı ile permeabilite katsayısına geçmek oldukça zor olmaktadır.

Killerin ve siltlerin permeabilite katsayıları sık olarak konsolidasyon deney aletinin düşen seviyeli permeametre olarak kullanılması yolu ile belirlenebilmektedir. Böylece elde edilen sonuçların (3.15) eşitliğinden indirekt yolla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yoluna gidilmektedir. Hesaplama sonucunda elde edilen değerlerin, direkt metodlarla elde edilen permeabilite katsayısından daha güvenilir olduğuna inanılmaktadır. Bunun nedeni olarak, hesaplanan permeabilite değerlerinin numune kenarlarında olabilecek borulanma etkilerinden ve deneysel hatalardan bağımsız olduğu gösterilmektedir. Bununla birlikte Terzaghi konsolidasyon teorisinin yukarıda bahsedilen varsayımları, doğal killerin davranışını tam olarak yansıtmamaktadır ( Tavenas vd.1983).



Şekil 3.9 Louseville kilinin ödometre deneyi esnasında konsolidasyon katsayısının konsolidasyon yüzdesi olan değişimi (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)

### 3.5.1.2 CGT ve CRS Deneylerinden Permeabilite Katsayısının Belirlenmesi;

CRS (sabit şekil değiştirme hızlı) deney aleti, Şekil 3.10'da görüleceği gibi, bir üçeksneli hücrelerinden, konsolidasyon ringinden ve bu ringe oturtulmuş olan yükleme sisteminden oluşmaktadır. Boşluk suyu basınçları numune tabanında bir boşluk suyu basıncı transdüsörü yardımı ile ve oluşan deplasmanlar ise deplasman ölçerler sayesinde ölçülmektedir.

En genel formu ile bir boyutlu konsolidasyonun diferansiyel eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{-k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (3.17)$$

veya, hacimsel şekil değiştirme  $\epsilon_v$  ile efektif gerilme ( $\sigma' = \sigma - u$ ) arasındaki lineer ilişki varsayılarak ;

$$\frac{k \cdot M}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (3.18)$$

Kontrollü hidrolik eğimli deneylerde (CGT), numunenin altındaki boşluk suyu basıncı sabit olarak tutulur. K, M ve boşluk suyu basıncı izokronlarının deney süresince sabit tutulduğu varsayılır. Lowe vd.(1969)  $\frac{\partial u}{\partial t}$  değerinin 0 olduğu 3.18 eşitliğinde H yüksekliğindeki numunede boşluk suyu basıncının Z derinliği ile olan dağılımının parabolik olduğunu göstermiştir.

$$u = -u_b \cdot \frac{z^2}{H^2} + \frac{2z}{H} u_b \quad (3.19)$$

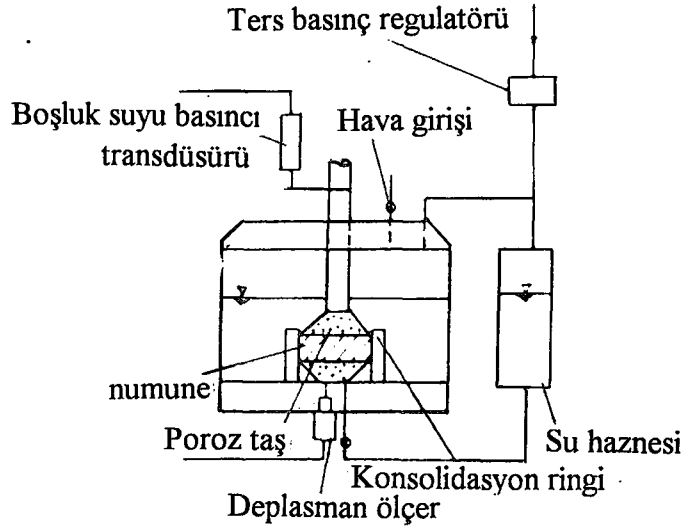
(3.19) eşitliğinden ve numunenin yukarı kısımlarında Darcy yasası' nın geçerliliğinden yola çıkılarak zeminin permeabilite katsayısı elde edilebilir. Burada boşluk suyu akımı hızı, numunenin hacimsel şekil değiştirmesine eşittir ve bu yüzden boşluk suyunun akım hızı;

$$v = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.20)$$

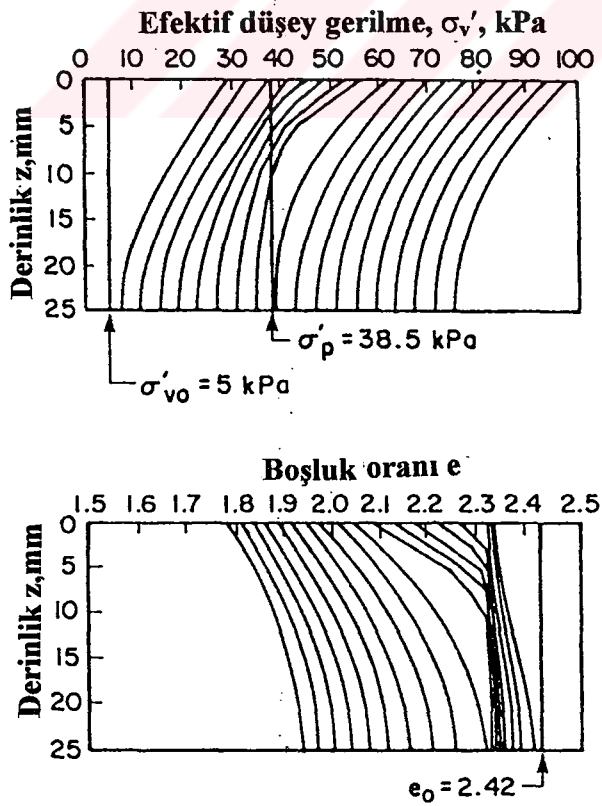
olur.

Hidrolik eğim, (3.20) no'lu eşitliğin z' e göre z=0' daki türevinden elde edilerek şu şekilde yazılabilir.

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{2u_b}{\gamma_w \cdot H} \quad (3.21)$$



Şekil 3.10 CRSC deney aletinin tipik bir şekli (Gorman, Hopkins, Deen, Drenevich, 1978)



Şekil 3.11 CGT deneyi süresince numunede e ve  $\sigma'_v$  değişimleri (Magnan ve Deroy, 1981)

Darcy yasası'nın temel eşitliği olan (3.8) eşitliğine göre (3.20) ve (3.21) eşitlikleri gerektiği gibi düzenlenirse permeabilite katsayısı aşağıdaki eşitlik vasıtası ile kolayca hesaplanabilir.

$$k = \frac{\partial H}{\partial t} \cdot \frac{H \cdot \gamma_w}{2u_b} \quad (3.22)$$

Bu yüzden numune yüksekliğinin zamana göre değişim gözlemleri  $\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)$  ve H değişkenleri kullanılarak (3.22) eşitliğindeki k ve buna karşılık gelen boşluk oranı  $\Delta e = \frac{(1 + e_0)}{\Delta H / H}$  eşitliğinden hesaplanabilmektedir. CGT deney sonuçları e-k ilişkisini, direkt olarak vermektedir.

CRS deneylerinde şekil değiştirme hızı sabittir. Smith ve Wahls (1969) 3.17 eşitliğini sabit bir permeabilite ve doğrusal zaman- boşluk oranı ilişkisi varsayarak yeniden çözmüştür. Bu durumda, boşluk oranının herhangi bir zamanda derinlikle değişiminin sabit olduğu varsayılarak ve (3.17) eşitliğinden yola çıkılarak, CGT deneylerinden elde edilen (3.19) ve (3.22) eşitliklerine eşdeğer boşluk suyu basıncı ve k değerleri elde edilebilmektedir.  $\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)$  sabit tutulduğu için, CRS deneyindeki boşluk suyu basıncı  $u_b$  kullanılarak (3.22) eşitliğindeki k, numune yüksekliğinin ve boşluk oranının fonksiyonu olarak yazılabilir.

Kademeli yüklenen konsolidasyon testinde olduğu gibi (3.19) eşitliğine ulaşmak için gerekli varsayımlar, CRS ve CGT deneylerinde doğal killerin davranışını, doğru bir şekilde temsil etmemektedir ve çıkan permeabilite-boşluk oranı ilişkisinin değerlendirilmesi de sorgulanabilir bir ilişki olarak ortaya çıkmaktadır. Tavanas vd(1979) ve Leroueil vd (1980) tarafından elde edilen sonuçlara göre CGT ve CRS deneyleri sırasında normal konsolide hale gelen doğal kilin sıkışabilirliğindeki değişim boşluk suyu basıncı izokronlarında deformasyona ve hidrolik eğimin  $(i = \frac{2u_b}{\gamma_w})$  teorik değerinde önemli miktarda artışa neden olmaktadır. Magnan ve Deray

(1981) CONMULT nümerik çözümünü kullanarak  $\sigma_p'$  değerinde sıkışabilirliğin artışının hidrolik eğimlerdeki artışa neden olan etkisini Şekil 3.11'de göstermiştir. Bu yüzden (3.22) no'lu denklem göz önüne alınarak hesaplanan bu kademedeki permeabilitenin olduğundan büyük bir değerde tahmin edilmesine neden olmaktadır. Şekil 3.11 aynı zamanda uniform olmayan bir boşluk oranı dağılımının oluşturulduğunu da göstermektedir. Drenaj sınırına yakın olan noktada hesaplanan k değeri, ortalama boşluk oranı değeri ile aralarında ilişki kurularak hesaplanmış k değerinden oldukça küçük çıkmaktadır. Bu iki durum, asıl olan ilişkiden daha farklı bir boşluk oranı-permeabilite ilişkisinin yorumlanması konusunda uzlaşmaktadır.

CRS ve CGT deneylerinin sorgulanabilir yorumlarının etkisi Şekil 3.12' deki örnekle en iyi açıklanmaktadır. Louiseville kilinden elde edilen örnekler üzerinde yapılan CRS deneylerinden bulunan e-log k ilişkisi, 1.8-2.1 değerindeki boşluk oranları arasında elde edilen düşen seviyeli ödometre deney sonuçları ile çelişmektedir.  $\sigma_v'$  ile  $\sigma_p'$  arasında artan efektif gerilme değerleri için hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri  $1.5 \times 10^{-4}$  m/s değerinden  $4 \times 10^{-9}$  m/s değerine kadar tahminen artmaktadır. Boşluk oranının 1.8 olduğu  $\sigma_v' = \sigma_p' + 10$  kPa değerinde ise, permeabilite hızlı bir şekilde  $0.8 \times 10^{-9}$  m/s değerine düşmektedir. Daha düşük değerlerdeki boşluk oranları için k değerindeki azalma biraz daha yavaşlamaktadır. Fakat, hesaplanan değerler doğrusal bir ilişki sunan direkt ölçülmüş e-log k sonuçlarından daha az değerler göstermektedir. 1.8' den büyük boşluk oranlarında k değerinin oldukça büyük tahmin edilmiş olmasının nedeni,  $\sigma_p'$  efektif gerilme değeri civarında k değerinin yanlış olarak değerlendirilmesidir. Küçük boşluk oranı değerlerinde e-log k ilişkisinin olduğundan daha az bir şekilde tahmin edilmesi ise, permeabilite katsayısı k'nın ölçüldüğü yukarı sınırlardaki boşluk oranı yerine ortalama boşluk oranının kullanılması ile ilişkilendirilebilir. Herhangi bir durumda deney sonuçlarının yanlış yorumlanması nedeni ile CRS deneyinden hesaplanan e-log k ilişkisi Louiseville kilinin gerçek davranışını temsil etmemektedir.

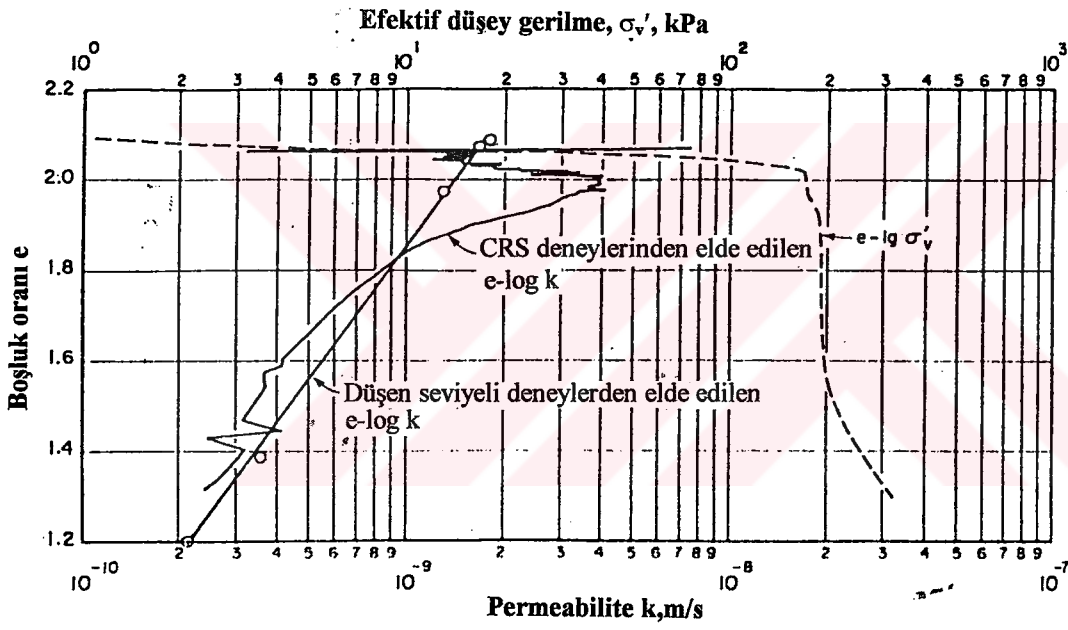
e-log k ilişkisinin yorumlanmasının zor ve karmaşık olan etkisi CGT deneylerinde CRS deneylerinden daha az görülmektedir. Bunun nedeni; CGT deneylerinde ortaya çıkacak olan hidrolik eğim aralığını (büyüklüğünü) ve dolayısı ile k değerlerinin ölçülmesinde meydana gelebilecek hataları sınırlayan küçük  $u_b$  değerlerinin uygulanmasıdır. Ayrıca; k değeri  $\sigma_p'$  değerinde oluşan homojen olmayan şekil değiştirme etkisini de hesaba katan ortalama şekil değiştirme hızından hesap edilmiştir. CRS deneylerinde ise tabandaki boşluk suyu basıncı büyük olabilmekte ve  $\sigma_p'$  değerinde hidrolik eğim değişimlerine yol açabilmektedir. Böylece permeabilite katsayısı numunenin alt kısmında ölçülen ve  $\sigma_p'$  değerine yakın değerlerde meydana gelen değişimlerden oldukça etkilenen  $u_b$  değerinden hesaplanmaktadır.

### 3.5.2 Hazen Metodu

Hazen (1911) tarafından kumların permeabilite katsayısını belirlemek için aşağıdaki formül önerilmektedir.

$$k(\text{cm/s}) = C_1 \cdot (D_{10})^2 \quad (3.23)$$

Eşitlikte yer alan  $D_{10}$  (cm) efektif dane çapını göstermektedir.  $C_1$  ise yaklaşık olarak 90 ile 120 arasında değişen bir katsayı olmakla beraber genelde 100 olarak alınmaktadır. Hazen tarafından önerilen bu formül Hazen'in gevşek, temiz ve filtre özelliği bulunan kumlarda



Şekil 3.12 Louiseville kili üzerinde yapılan CRS ve düşenseviyeli deneylerden elde edilmiş  $e$ - $\log \sigma_v'$  ve  $e$ - $\log k$  ilişkileri (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983a)



yaptığı gözlemlere dayanmaktadır. Kumun içerisinde çok az miktarda silt ve kilin bulunması bile kumun permeabilitesini azaltabilmektedir.

### 3.5.3 Kozeny-Carman Metodu

Kumlu zeminlerin permeabilite katsayısını tahmin edebilmede oldukça iyi sonuçlar veren diğer bir yöntem ise Kozeny-Carman eşitliğine dayanmaktadır. Kozeny-Carman eşitliği aşağıda yer aldığı gibidir.

$$k \propto \frac{e^3}{1+e} \quad (3.24)$$

İfade de yer alan  $k$ ,  $e$  boşluk oranı değerine karşılık gelen permeabilite katsayısıdır. Yukarıdaki eşitlik aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir;

$$k = C_1 \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (3.25)$$

Burada  $C_1$  değeri bir sabittir.

Daha önceden de bahsedildiği gibi türbülanslı akım koşulları iri daneli çakıllarda ve kumlarda görülmekte ve bu koşullar altında bu tür zeminlerde Darcy yasası geçerli olmamaktadır. Ancak hidrolik eğimin düşük olduğu durumlarda laminer akım koşulları ortaya çıkmaktadır. Kenney, Lau, Ofoegbu (1984) dane boyutları 0.074mm ile 25.4 mm, uniformluk katsayısı,  $C_u$ , 1.04 ile 12 arasında değişen çeşitli granüler zemin numuneleri üzerinde bir takım laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Numuneler, rölatif sıklıkları %80 ve daha fazlası olacak şekilde hazırlanarak üzerlerinde permeabilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan permeabilite deneyleri Laminer akım koşulları altında,

$$K (\text{mm}^2) = (0.05-1) \cdot (D_5)^2 \quad (3.26)$$

Burada;  $D_5$ , zemin içindeki danelerin %5'nin daha küçük olduğu çap ve  $K$  ise spesifik permeabilitedir.

### 3.5.4 Diğer Ampirik Eşitlikler

Deneyel gözlemler sonucunda Samarasinghe, Huang ve Drnevich (1982) normal konsolide killer için bir önceki bölümde de bahsedilmiş olan (2.11) eşitliğini önermişlerdir. İfadede yer alan  $C$  ve  $n$  katsayıları deneysel olarak belirlenen katsayıları göstermektedir.

Permeabilitenin belirlenmesi için kullanılan indirekt yöntemler ve ampirik eşitliklerin yaklaşık yöntemler olduğu bilinmeli ve kural olarak zeminlerin permeabilite katsayısının genellikle direkt olarak laboratuvar deneyleri kullanılarak belirlenmesi benimsenmektedir.

### 3.5.5 Permeabilite Katsayısının Laboratuvar Deneyleri İle Direkt Olarak Belirlenmesi

Zeminlerin permeabilitesi, zemine ait kesit alanının, hidrolik eğimin ve akım miktarının bilinebildiği ya da tahmin edilebildiği kontrollü deneyler sonucunda belirlenebilmektedir. En sık kullanılan laboratuvar permeabilite deneyleri sabit seviyeli ve düşen seviyeli permeabilite deneyleridir. Rutin olarak kullanılan bu deney metodlarının dışında, laboratuvar permeabilitenin daha hassas bir şekilde ölçülebilmesi için geliştirilmiş farklı deneysel yöntemler de bulunmaktadır.

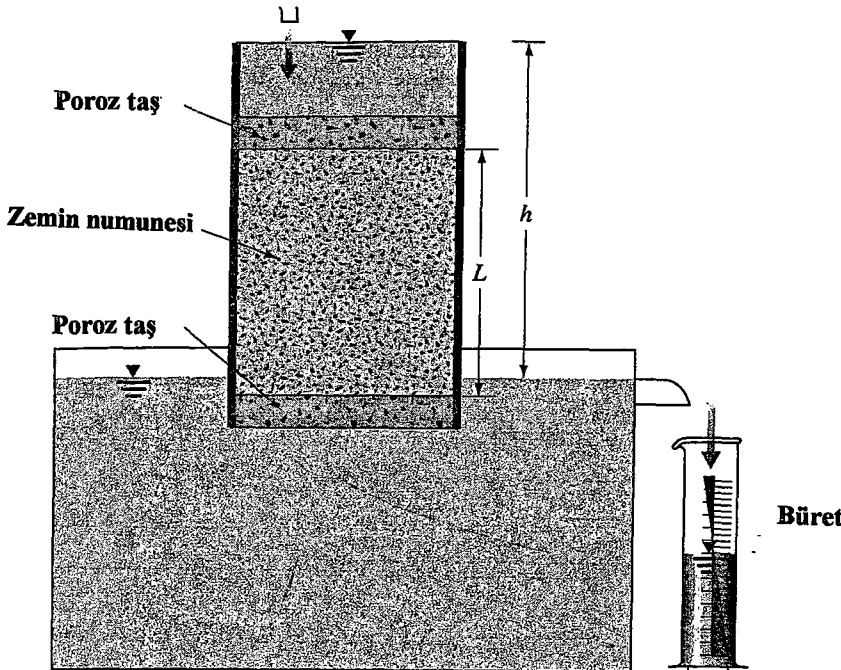
#### 3.5.5.1 Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi

Sabit seviyeli permeabilite aletinin tipik bir örneği Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Bu tipte bir laboratuvar deney düzeneğinde zemin numunesi üzerindeki hidrolik yük ( $\Delta h$ ) deney süresince sabit tutularak, belirli bir zaman süresi ( $t$ ) içinde zeminden geçen su miktarı ( $Q$ ) ölçülmektedir (Özaydın,1997). Zemin numunesinin kesit alanı  $A$  ise, (3.11) eşitliği ve hidrolik eğim

$i = \frac{\Delta h}{L}$  olduğuna göre, permeabilite katsayısı

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (3.27)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Sabit seviyeli permeabilite deneyi daha çok filtre veya drenaj amaçlı kullanılacak agregalar gibi geçirimli zeminler için uygulanmaktadır. Eğer permeabilite düşük ise deney için geçen süre uzayabilmekte ve bu sırada olan buharlaşmadan dolayı deney sonuçlarında hata meydana gelebilmektedir. Bu nedenle düşük permeabiliteli zeminler için laboratuvarda düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılması uygun olmaktadır.



Şekil 3.13 Sabit seviyeli permeabilite deneyi

### 3.5.5.2 Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi

Bu deney düzeninde (Şekil 3.14) zemin numunesi üzerindeki hidrolik yükün zamanla değişimi ölçülerek ve Darcy yasasından yararlanarak permeabilite katsayısı hesaplanmaktadır. Eğer  $t=t_1$  zamanında  $h=h_1$  ve  $t=t_2$  zamanında  $h=h_2$  ise,  $dt$  gibi bir zaman aralığında zeminden geçen su miktarı

$$dq = k \left( \frac{h}{L} \right) \cdot A \cdot dt = -adh \quad (3.28)$$

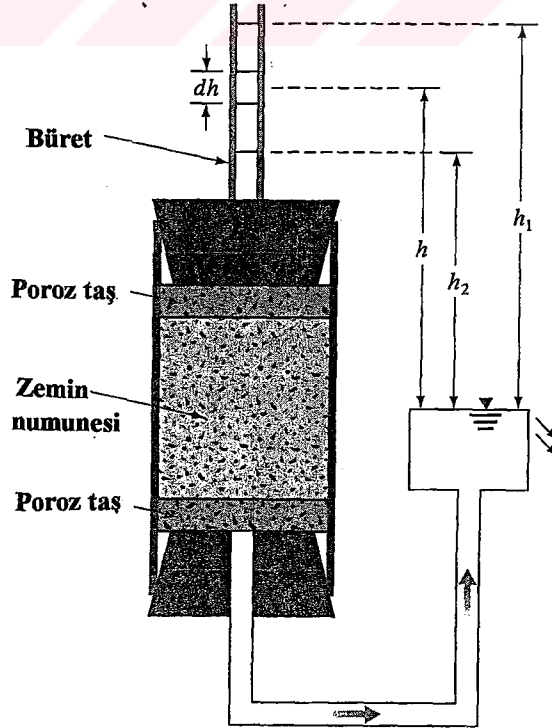
olduğu için

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = - \frac{L \cdot a}{k \cdot A} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} \quad (3.29)$$

ve buradan permeabilite katsayısını veren

$$k = \frac{L \cdot a}{(t_2 - t_1) \cdot A} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.30)$$

ilişkisi elde edilmektedir.



Şekil 3.14 Düşen seviyeli permeabilite deneyi

### 3.5.5.3 Deneyler Sırasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Permeametrelerle zeminin yerleştirilmesi esnasında zeminin ayrışmasından kaçınmak gerekmektedir. Eğer ince daneli zemin ayrışırsa, bu durumda geçirimsiz bir tabaka oluşması ve deney sonuçlarını olumsuz yönde etkilemesi kaçınılmazdır.

Permeabilite deneyi sürerken ölçülen permeabilite sürekli bir şekilde düşüş gösterir. Bu durum, deneyde kullanılan suyun içerisindeki hava kabarcıklarının zemin içerisindeki boşlukları doldurmasından kaynaklanmaktadır. Musluk suyunda önemli miktarda hava vardır. Oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktaki saf su hava kabarcıklarının zemin içerisindeki boşlukları doldurmasına engel olmaktadır.

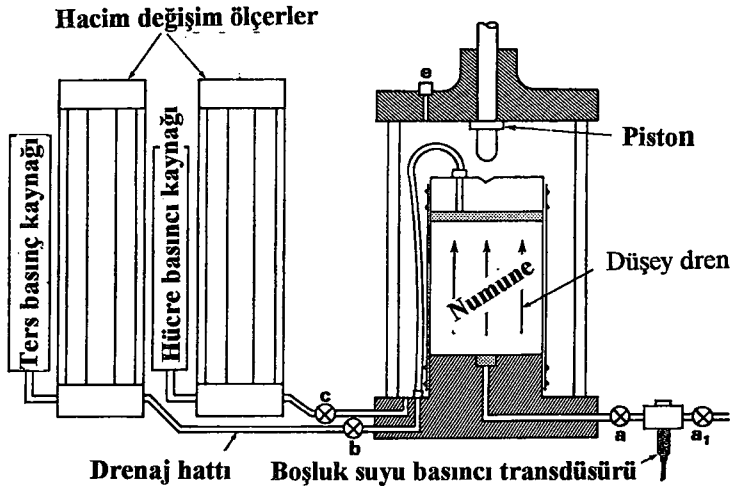
Bouska (1973) zeminlerin permeabilitesini belirlemek için yapılan permeabilite deneylerinde hava kabarcıklarının etkisini azaltmak için havası alınmış saf su kullanılmasını önermektedir.

Laboratuarda zeminlerin permeabilitesini belirlerken değişkenlerin sayısını en aza indirmek gerekmektedir. Önemi en az olan suyun viskozitesi deneylerin 20°C'de yapılması durumunda veya farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler için belirli düzeltmeler yapılarak standartlaştırılabilmektedir. Bu düzeltmenin nasıl yapıldığı 3.4.11' de belirtilmiştir.

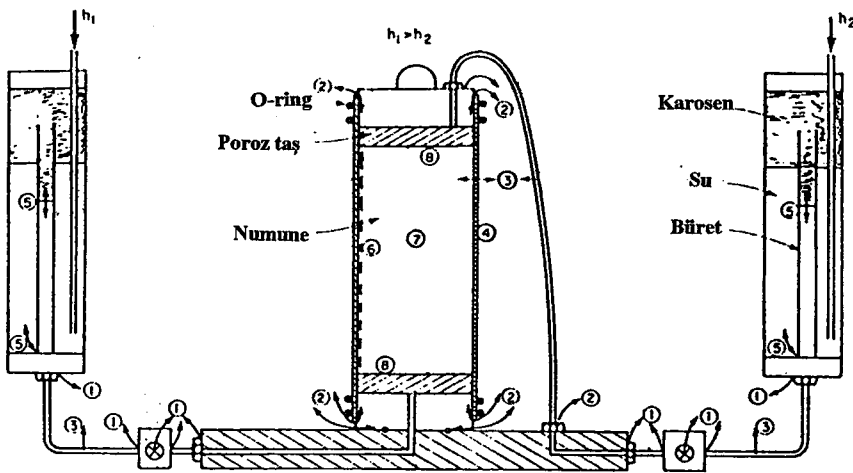
Permeabilite deneylerinde kullanılan suyun mineral içeriği de elde edilen permeabilite katsayılarını etkilemektedir. Bazı araştırmacılar su içerisinde bulunan bazı tuz çeşitlerinin tarımsal zeminler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Özellikle, içerisinde yüzlerce tuz karışımı içeren musluk suyu ile yapılan permeabilite deneylerinin, yüksek derecede sodyum tuzu içeren saf su ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan çok daha büyük değerler verdiği görülmüştür. Zeminden geçen su miktarında meydana gelebilecek değişikliğin ana sebebi, zemin içerisinde yer alan tuzlar ile su içerisinde yer alan tuzlar arasında oluşabilen reaksiyonlardır.

### 3.5.5.4 Üç eksenli Basınç Deneylerinde Permeabilitenin Belirlenmesi

Üç eksenli deneylerle permeabilitenin belirlenmesi oldukça büyük avantajlar sağlamaktadır. Farklı boyutlardaki numuneler için farklı boyutlarda hücre yapılabilme olanağı, numunenin arazideki doğal durumunu temsil edebilme olanağını da verebilmektedir. Ayrıca; numuneye arazideki koşullara eşit efektif gerilme ve ters basınçların da uygulanabilir olması ayrı bir avantaj oluşturmaktadır. Üç eksenli deney sisteminde hem düşen seviyeli hem de sabit seviyeli deney gerçekleştirilebilmesine rağmen, çoğunlukla sabit seviyeli deney tercih edilmektedir. Böylelikle numunenin içerisine giren ve numuneden çıkan su miktarlarının ölçülmesi kolay olmakta ve permeabilite ölçümünün doğruluğu sağlanabilmektedir. Üç eksenli deney aletinin permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali Şekil 3.15'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.15 Üç eksenli deney aletinin permeabilite deneyi için düzenlenmiş şekli (Manual of soil laboratory testing, vol.3)



Şekil 3.16 Üç eksenli deney aletinde oluşabilecek sorunlar (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983)

Üç eksenli deneylerde permeabilite katsayısını belirleyebilmek için numune önce arazideki efektif gerilmeye eşit bir gerilme altında konsolide edilir. Akımın oluşabilmesi için gerekli hidrolik eğim,  $i$ , ise numunenin alt ve üst kısmına boşluk suyu basıncı farkı, yani efektif gerilme farkı, uygulanması ile elde edilir. Numune içerisinde meydana gelebilecek herhangi bir hacim değişikliğini önlemek için numunenin alt ve üst kısmına uygulanacak boşluk suyu basıncının değerini iyi ayarlamak gerekmektedir. Şöyle ki; eğer numune aşırı konsolide ise, oluşacak hacim değişiklikleri aşırı konsolide kilin katılığına bağlı olarak küçük ve hızlı olacaktır. Uygulanmak istenilen hidrolik eğim,  $i$  ( $=\Delta u/H\gamma_w$ ) H yüksekliğindeki numunenin bir ucundaki ters basıncı artırarak veya azaltarak oluşturulmaya çalışılırsa, bu durumda numuneye etkiyen efektif gerilmeye azalma veya artma meydana gelecektir. Bu durumda tüm numune içerisinde şişme ya da konsolidasyon oluşacaktır. Bu durumu önleyebilmek için, numunenin bir ucunda ters basıncı  $(\Delta u/2)$  oranında artırmak, diğer ucunda ise  $(\Delta u/2)$  oranında azaltmak sureti ile bir hidrolik eğim meydana getirilmelidir. Böylelikle numune içerisinde konsolidasyon ve şişme birlikte gelişerek birbirlerini telafi edebileceklerdir. Diğer taraftan, numune başlangıçta normal konsolide ise ters basıncın azatılarak uygulanması numunenin bir bölümünde büyük hacim değişikliklerine neden olacaktır. Bu durumda ise hidrolik eğim, numunenin sadece bir tarafında  $\Delta u$  kadarlık bir ters basınç uygulanarak sağlanmalıdır. Sonuç olarak düşey permeabilite katsayısı ( $k_v$ ) aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

$$k_v = \frac{q \cdot L}{60 \cdot A \cdot 102 \Delta p} \quad (3.31)$$

Eşitlikte yer alan  $\Delta p$  Şekil 3.15 te görülen  $p_1$  ve  $p_2$  ters basınçları arasındaki fark;  $A$  ( $\text{mm}^2$ ) numunenin kesit alanı;  $q$  ml/dakika cinsinden oluşan akımın hızı;  $L$  ise mm cinsinden numune boyudur.

Üç eksenli deney aletinde gerçekleştirilen permeabilite deneyleri sırasında deney sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilecek bir çok sorun ortaya çıkabilmektedir. Şekil 3.16'da üç eksenli deney aletinde oluşabilecek sorunlar ve bu sorunların kaynağı numaralandırılarak gösterilmiştir. Bu numaraların karşılıkları aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

1. Dış bağlantıda olabilecek sızıntı
2. Hücre içerisindeki bağlantıda olabilecek sızıntı
3. Membran içerisinde ve hortumlarda meydana gelebilecek osmos ve difüzyon
4. Membranın su ile dolması

5. Ters basınç büretinde meydana gelebilecek sızıntı ve difüzyon
6. Numune ve membran arasında olabilecek akım
7. Poroz taşların ve numunenin suya doygun olmaması
8. Numunede konsolidasyon/şişme olması

### 3.5.5.5 Standart Ödometrelerde Yapılan Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi

Geleneksel ödometre deneyi ve deney prosedürü düşen seviyeli permeabilite deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için oldukça uygun bir deney sistemidir. Deney aletinin ve deney prosedürünün basitliğinin yanısıra, deney sistemi zeminin  $\sigma'_{v0}$  ve  $e_0$  koşullarındaki permeabilite değerini ve artan efektif gerilmelerde permeabilitenin boşluk oranına göre değişimini de ölçebilme imkanı verebilmektedir.

Geleneksel ödometre aleti, düşen seviyeli permeabilite deneyinin gerçekleştirilebilmesi amacı ile numunenin altı ile hücre tabanı arasında sıkı bir bağlantı yapılabilmesi için Şekil 2.4'te görüldüğü gibi düzenlenmiştir. Altta yer alan poroz taş bir hortum vasıtası ile üçlü bir vanaya bağlanır. Böylece; bu vana yardımı ile konsolidasyon esnasında çift yönlü drenaj sağlamak için hücre içerisindeki su ile, permeabilite sırasında ise 5 mm çapında ve 1 m yüksekliğindeki düşey cam tüple bağlantı sağlanabilmektedir. Bu tipteki bir hücre için ters basınç uygulama imkanı olmamaktadır.

Numunenin suya doygunluğunu sağlamak için numuneler hücre içerisinde su altında bırakılır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bu tarz bir yöntemin ters basıncın uygulanabildiği ödometrelerde yapılan konsolidasyon ve permeabilite deneylerinden bir farkı olmadığı görülmüştür. Klasik ödometre deney numunelerinde olduğu gibi bu deneyde de numune çapı 5cm ve numune yüksekliği 19 mm'dir. Her 24 saatlik konsolidasyon deneyi sonunda valf 2 numaralı konuma getirilir ve numune tabanı ile içerisi su ile dolu olan cam tübün bağlantısı sağlanır. Numune tabanı ile bağlantılı olan cam büretteki 100 cm yüksekliğindeki su seviyesi yardımı ile 19 mm yüksekliğindeki numunenin altı ve üstü arasında yaklaşık olarak 10 kPa değerinde bir boşluk suyu basıncı farkı sağlanır. Meydana gelen bu boşluk suyu basıncı farkı, numunenin şartlarına bağlı olarak efektif gerilmede çeşitli tiplerde değişikliklere neden olabilmektedir.

Numune yüksekliğinin deney süresince değişmesine izin verildiği durumda, uygulanan boşluk basıncı,  $u_b$ , numune tabanındaki efektif gerilmede  $\Delta\sigma'_v = u_b$  kadarlık bir azalmaya yol açacak, numunenin üst kısmında 0'a inecektir (Şekil 3.17b). Deney süresince  $u_b$  gittikçe azalacak ve dolayısı ile  $\sigma'_v$  değeri de artacaktır. Son olarak ilk değerine geri dönecektir.

Böylece tüm numunede deneyin başlangıcında şişme meydana gelecektir. Fakat, şişme aşırı konsolide halde iken meydana geleceği için tüm deney süresince olabilecek hacim değişimi çok az olacaktır. Hidrolik eğimin numune boyunca dağılımı ise yaklaşık olarak sabit kalacaktır. Diğer taraftan, ödometrelerde yapılan permeabilite deneylerinin amacı, kilin boşluk oranı-permeabilite ilişkilerini belirlemek olduğu için, permeabilite deney süresince numune yüksekliğinin sabit kalması pratiklik açısından istenir. Bunun için ödometrenin yükleme askısına takılan uygun bir sıkıştırıcı ile numune yüksekliğinin sabit kalması sağlanır. Bu durumda, numunenin ortalama boşluk oranı,  $e_m$ , sabit olarak kalır. Boşluk oranı da tekil olarak efektif gerilme ile ilişkili olduğu için, deney süresince ortalama efektif gerilme,  $\sigma'_{vm}$ , sabit olarak kalmalıdır.  $\sigma'_{vm}$  ve  $e_m$ 'nin deney süresince sabit olarak tutulabilmesi için, hidrolik eğimin oluşturulmasından sonra  $\sigma'_v$  değerindeki azalma ve numune tabanına yakın olan kısımlarda meydana gelecek olan şişme, numunenin üst kısmında oluşturulacak  $\sigma'_v$  kadarlık bir artışla karşılanmalıdır.

Eğer numune aşırı konsolide bir zemin ise, sıkışma ve şişme modülleri yaklaşık olarak birbirine eşittir. Bu durumda  $\sigma'_{vm}$  ve  $e_m$  değerlerinin sabit olarak kalması, numune üzerine  $\Delta\sigma_v=0.5u_b$  kadarlık bir toplam gerilme artışı ile mümkün olacaktır. Numune içerisinde oluşacak efektif gerilme dağılımı Şekil 3.17c'de görüldüğü gibidir. Yani, numunenin alt yarısında şişme, üst yarısında ise konsolidasyon meydana gelir. Bu durum, akım ölçümünde bir hataya neden olabilese de, hidrolik eğim numune içerisinde uniform olarak yayılacaktır.

Eğer numune normal konsolide ise, normal konsolidasyon sırasındaki sıkışma ve aşırı konsolidasyon sırasındaki şişme modülleri arasındaki farklılık Şekil 3.17d' de görüldüğü gibi daha kompleks bir gerilme halini doğurur. Buna ek olarak, hidrolik eğim de numune içerisinde eşit olmayan bir dağılım gösterir.

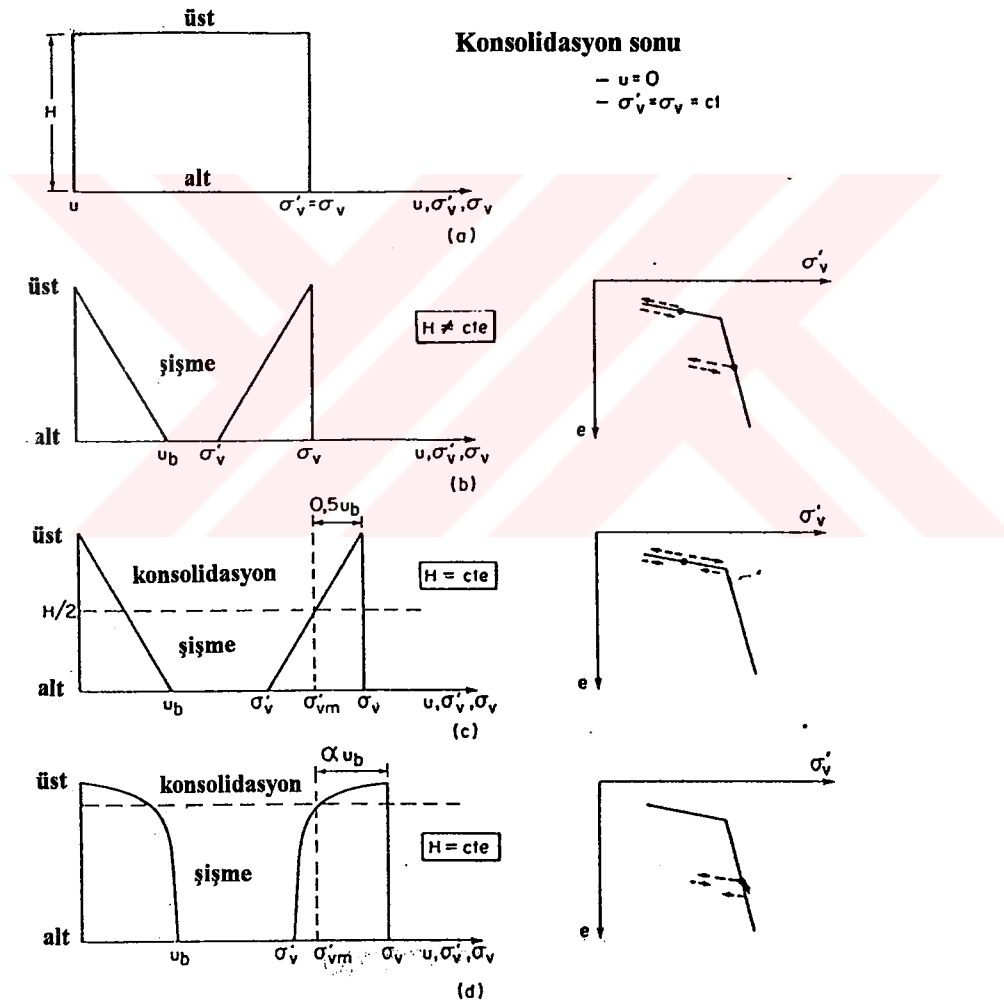
Numune hücre içerisinde Şekil 2.4' te görüldüğü gibi düzenlendikten sonra, deney geleneksel ödometre deneyi gibi yük artım oranı 2.0 olacak şekilde 24 saat'lik bir zaman süresince  $\sigma'_{vo}$  değerinde veya bu değere yakın bir efektif düşey gerilme altında konsolide edilir. Konsolidasyonun tamamlanmasından hemen sonra düşen seviyeli permeabilite deneyi gerçekleştirilir. Permeabilite deneyi, 24 saatlik bir süre boyunca büret içerisindeki su seviyesinin zamana göre değişimi gözlenerek tamamlanır. Ödometre ringinin çeperleri boyunca oluşabilecek akımı engellemek amacı ile başlangıç seviyesi olan  $h_0$  değerinin  $0.5\sigma'_{vo}$  değerinden daha küçük bir değer olmasına dikkat edilmelidir. Permeabilite ile boşluk oranı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacı ile daha sonraki yükleme adımları için de konsolidasyon ve konsolidasyonun bitiminden hemen sonra permeabilite deneyi gerçekleştirilir.



Düşen seviyeli permeabilite deneyi için Darcy yasası aşağıdaki şekilde ifade edilerek permeabilite katsayısı, farklı boşluk oranı değerleri için elde edilebilir.

$$k = 2.3026 \frac{a \cdot H}{A} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (3.32)$$

Yukarıdaki eşitlikte;  $a$  bütetin kesit alanı;  $A$  numunenin kesit alanı;  $H$  numune yüksekliği;  $h_1$  ve  $h_2$ ,  $t_1$  ve  $t_2$  anında permeabilite tüpünde ölçülen seviyelere karşılık gelmektedir.



Şekil 3.17 Ödometre düşen seviyeli permeabilite deneylerinde gerilme koşulları ve hacim değişimi davranışı (Tavenas, Leblond, Jean, Leroueil, 1983)

### 3.5.5.6 Radyal Akımlı Permeametrelerde Permeabilite Deneyi

Killi zeminlerin yatay permeabilite katsayısını belirlemek amacı ile Leroueil, Bouclin, Tavenas, Bergeron ve Rochelle (1994) tarafından Şekil 2.19'da da görülen bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Permeametre 180 mm çapında ve 90mm yüksekliğindeki numuneler için dizayn edilmiş bir hücre ve numuneye ters basınç verilmesi için bu hücrenin yerleştirildiği 300mm çapında ve 200mm yüksekliğindeki bir diğer hücreden meydana gelmektedir. Yatay permeabiliteyi belirlemek için numune merkezine 50 mm çapında bir delik açılarak bu deliğin içerisi sıkışabilirliği ve permeabilitesi yüksek geotekstil malzeme ile doldurulmaktadır. Drenaj sınırlarını oluşturan yatay dren ise ince bir tabakadan oluşmuş poroz paslanmaz çelikten yapılmıştır. Bu drenin geçirimsizliği de oldukça yüksek ve permeabilitesi  $5 \times 10^{-5}$  m/s'dir. Numune üzerine ve altına konulan birbirine paralel iki rijit plaka arasında sıkıştırılmak sureti ile su akımının merkezi enjeksiyon deliğinden yanal drene doğru yatay olarak hareket etmesi sağlanmaktadır. Hücredeki ve merkezi enjeksiyon deliğindeki basınç ise civa sütunu sayesinde sağlanmaktadır. Merkezi drenden yanal drene doğru geçen su hacmi ölçebilmek için ise Şekil 2.19' da görülen büret sistemi kullanılmaktadır. Akım miktarı büret içerisinde yer alan su-kerosen ara yüzeyinin yer değişimi ölçülerek belirlenebilmektedir. Radyal permeametrede yapılan deney sonucu numuneye ait yatay permeabilite katsayısı açışığıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

$$k_h = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi H \Delta h} \quad (3.33)$$

Eşitlikte; Q Akım hızı;  $r_e, r_i$  numunenin dış ve iç yarıçapları; H numune yüksekliği;  $\Delta h$  merkezi enjeksiyon deliği ile hücre arasında hücre arasındaki su seviyesi farkını göstermektedir.

Deney prosedürü ile ilgili olarak daha fazla ayrıntı Bergeron(1987) tarafından geniş bir şekilde verilmiştir.

### 3.5.5.7 Rowe Hücresi'nde Permeabilite Deneyleri

Zeminlerin permeabilite katsayısının direkt yöntemler kullanılarak belirlenebilmesi için son yıllarda hidrolik odometre olarak da isimlendirilen Rowe hücresi yaygın olarak kullanılmaktadır. Deney sisteminin en önemli özelliği büyük çaptaki örnekler üzerinde çalışma imkanı tanıyarak özellikle örselenmemiş numunelerde zeminin iç yapısının düşey ve yatay permeabilite katsayısına olan etkisinin araştırılabilmesidir.

Rowe hücresinde permeabilite deneyleri, hem düşey hem de yatay yönde gerçekleştirilebilmektedir. Bunun için her bir deney için farklı drenej sınırları oluşturularak istenilen konsolidasyon basıncı altında numune önce 24 saat boyunca konsolide edilerek, daha sonra sabit akım hızı uygulanarak, düşey ve yatay permeabilite deneyleri yapılabilmektedir. Permeabilite katsayısının değeri, numune boyunca permeabilitenin uniform olduğu varsayımına göre hesaplanmaktadır.

Sabit akım hızı ( $q$ ) ve akımın oluşmasını sağlayan boşluk suyu basıncı farkı ( $\Delta u$ ) göz önüne alınarak düşey permeabilite katsayısı aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanır.

$$k_v = \frac{h \cdot \gamma_w}{\pi r^2} \cdot \frac{q}{\Delta u} \quad (3.34)$$

Burada,  $h$  ve  $r$  sırası ile numune yüksekliği ve numune yarıçapı,  $\gamma_w$  ise suyun birim hacim ağırlığıdır.

Radyal akımlı durumda yatay permeabilite katsayısının bulunmasında ise aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır.

$$k_h = \frac{\gamma_w \cdot \ln(r_1 / r_2) \cdot q}{2\pi h \cdot \Delta u} \quad (3.35)$$

Burada,  $r_1$  ve  $r_2$ ; dış ve iç drenaj sınırlarının yarıçaplarıdır. Diğer terimler ise yukarıda yer alan düşey permeabilite eşitliğinde geçen terimlerle aynı anlamdadır.

Düşey ve yatay permeabiliteyi direkt olarak belirleyebilmek için kullanılan Rowe hücresinin özellikleri ve deneylere ait detaylar Bölüm 5'te geniş olarak verilecektir.

### 3.5.6 Arazi Deneyleri

Ne kadar dikkatli bir şekilde yapılırsa yapılsın, laboratuvar deneyleri sadece küçük boyutlu zemin numuneleri üzerinde yapıldığı için, büyük zemin hacimleri için sadece küçük noktaları temsil ederler. Sızıntı ve drenaj problemlerinde ise laboratuvar deneyleri arazideki durumu ne kadar iyi temsil edebildikleri konusunda emin olunduktan sonra kullanılabilir. Buna rağmen önemli projelerde arazideki büyük kütlelerin permeabilitesini ölçmek için arazi değerlerinin kullanılması daha güvenilir olmaktadır.

#### 3.5.6.1 Arazi Gözlem Kuyuları Yardımı ile Permeabilitenin Belirlenmesi

Arazide yapılan permeabilite deneylerinden en çok kullanılanı kuyu-pompa deneyidir. Bu deneyde bir kuyuya su pompalanarak ya da su çekilerek bu sırada yakın civarlarda açılan kuyularda su seviyesi okumaları yapılır. Bu deney kararlı duruma ulaşana kadar devam ettirilir. Kuyulara doğru olan radyal akımda Darcy yasası ve Dupuit varsayımı temel alınarak

basit kuyu formülü elde edilir. Dupuit, su geçirmez tabakadan en üste kadar herhangi bir noktada hidrolik eğimin sabit olduğunu ve değerinin su yüzeyinin eğimine eşit olduğunu varsayımıştır. Bu varsayım, kuyulara yakın yanlış sonuç vermekle birlikte, kuyulara fazla yakın olmayan yerlerde oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Basit kuyu formülü Şekil 3.18 referans olarak alınarak şu şekilde türetilebilir.

Kararlı durumun oluşmasından sonra birim zamanda kuyuya doğru olan su miktarı (3.11) denkleminde yola çıkılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$q = k \cdot i \cdot A$$

Kuyudan  $r$  mesafesinde suyun aktığı  $A$  alanı  $2\pi r h$  kadardır. Dupuit'in varsayımı  $i = \frac{dh}{dr}$

şeklinde uygulanarak;

$$q = 2\pi r h \frac{dh}{dr}$$

$$\frac{q dr}{r} = 2k\pi h dh$$

$$q \log_e r = \frac{2\pi k h^2}{Q} + c = \pi k h^2 + c$$

Düşey akımın ihmal edildiği  $R$  gibi bir radyal mesafede  $H = h$  ve

$$q \cdot \log_e R = \pi \cdot k \cdot H^2 + c$$

Bu yüzden,

$$c = q \cdot \log_e R - \pi \cdot k \cdot H^2$$

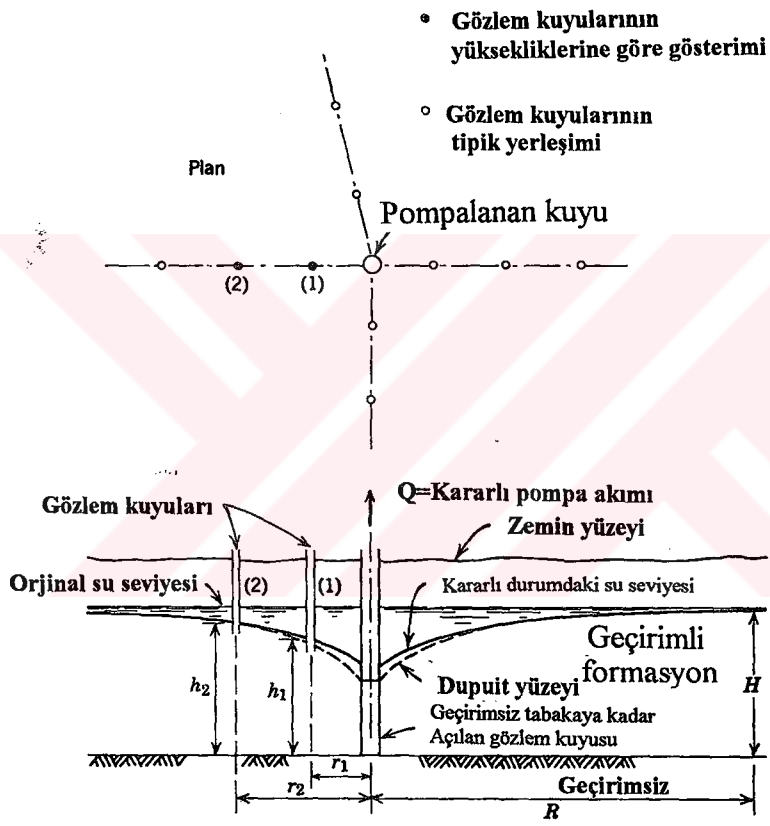
$$q \cdot \log_e r = \pi k h^2 + q \cdot \log_e R - \pi k H^2$$

$$q \cdot \log_e \frac{R}{r} = \pi k (H^2 - h^2)$$

Öyle ise,

$$k = \frac{q \cdot \log_e (R/r)}{\pi (H^2 - h^2)}$$

elde edilir.



Şekil 3.18 Arazi kuyu pompa deneyi

Yukarıdaki eşitlik yeniden düzenlenirse;

$$k = \frac{2.3 \log_{10}(R/r)}{\pi(H^2 - h^2)} = \frac{2.3 \log_{10}(r_2/r_1)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \quad (3.36)$$

(3.36) eşitliği kuyu pompalama deneyleri ile permeabilite katsayısının belirlenmesi için kullanılan basit kuyu formülüdür. Bu formül aynı zamanda q cinsinden yazılarak kuyunun verebileceği su miktarı da belirlenebilir;

$$q = \frac{\pi k \cdot (H^2 - h^2)}{2.3 \log_{10}(R/r)} = \frac{\pi k (h_2^2 - h_1^2)}{2.3 \log_{10}(r_2/r_1)} \quad (3.37)$$

Kuyu formülü aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır.

1. Pompalama kuyusu su taşıyan tabakanın tüm kalınlığı içerisinde kalmaktadır.
2. Kararlı akım durumu oluşmaktadır.
3. Su taşıyan tabaka homojen ve izotropik olup tüm doğrultularda belirli bir mesafe boyunca uzanmaktadır.
4. Dupuit varsayımı geçerlidir.

Kuyu pompa deneylerinin güvenilirliği yukarıdaki varsayımların ne kadar doğru bir şekilde yerine getirilebildiğine bağlıdır.

Kuyu pompa deneyleri hem yatay hem de eğimli su seviyelerinde yapılabilmektedir. Eğer su seviyesi yüzeyi hafif eğimli ise, su taşıyan formasyonun en alt sınırı orjinal su seviyesi yüzeyine paralel çizilerek su yüzeyi yataymış gibi kabul edilerek yapılabilmektedir.

Kuyu pompa deneyi oldukça pahalı bir deney olduğu için sadece belirgin bir şekilde ihtiyaç duyulduğunda ve detaylı arazi araştırmaları yapılarak formasyonlar belirlendikten sonra yapılması önerilmektedir. Deney sonucunda en iyi ve en doğru bilgiyi elde edebilmek için kuyu pompalama deneyleri arazide akıllıca seçilen yerlerde yapılmalıdır. Gözlem kuyuları yardımı ile yapılan kuyu pompalama deneyleri geniş alanlardaki zeminlerin permeabilitesinin ortalama olarak belirlenebilmesi için oldukça faydalı bir yöntemdir. Kuyu pompalama deneylerinde en az dört gözlem kuyusu gerekmektedir. Çok tabakalı zemin formasyonlarında ise piezometre ölçümleri gerekli olabilmektedir.

Kuyu pompa deneylerinde genel prosedür çeşitli gözlem kuyularındaki gözlemlere dayanarak permeabilite hesapları yapmak ve zeminin permeabilitesi hakkında bir fikir sahibi olmaktır. Belirlenen permeabilitenin doğruluğunu kontrol etmek, gözlem kuyularından en az iki farklı akım miktarı altında deney yapılarak sağlanır. Bazı formasyonlar permeabilitesi düşük iki

tabaka arasında permeabilitesi yüksek kum tabakaları içermektedir. Bu tür durumlarda özel bir akım ölçer sayesinde kuyu içerisindeki akım miktarı ile ölçerin ucundaki iticinin rotasyon hızı arasında bir kalibrasyon tablosu yardımı ile ilişki kurulur. Bu sayede küçük aralıklarda bütün derinliklerde okuma alınarak farklı tabakaların permeabilitesi belirlenebilmektedir. Bu bilginin sulama sistemlerinin sızıntı kontrollünde önemli bir etkisi vardır.

### 3.5.6.2 Sondaj Deliği Tabanında Permeabilite Deneyleri

Arazi kuyu pompa deneyi pahalı bir yöntem olması nedeni ile, gözlem kuyuları kullanılmaksızın açılan sondaj kuyularında zeminin permeabilite katsayısının yerinde belirlenebilmesi yoluna başvurulabilmektedir. Bu deneyin açılan sondaj kuyusunda yapılması hem zeminin fiziksel özelliklerinin hem de permeabilite katsayısının bir arada belirlenmesi dolayısı ile maliyet açısından oldukça ucuz olmaktadır. Dikkatli ve doğru bir şekilde yapıldığı takdirde bu deney yararlı sonuçlar vermektedir. Sondajlarda yapılan yerinde geçirimsizlik deneylerinde, doğal zemindekine göre daha farklı bir hidrolik yük verilmekte ve fark nedeniyle olan akış ölçülmektedir. Yaratılan bu fark sondaj deliğine su doldurmak yoluyla yapılırsa düşen basınçlı veya içe akış deneyi diye adlandırılmaktadır.

Sondaj deliğinden su pompalanarak basınç düşürülmüşse artan basınçlı deney veya dışa akış deneyi denilmektedir. Bir deney sırasında basınç sabit tutulabilir (sabit yüklü deney) veya zamanla dengeye gelmesine izin verilebilir (değişken yüklü deney). Bu deneyler yeraltı su seviyesi altındaki zeminlerin geçirgenliğini bulmakta geçerli iseler de, yeraltı suyu üzerindeki zeminlerde de yaklaşık değerlendirmeler için kullanılabilir.

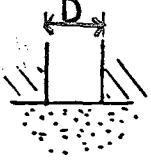
Deneyde sondaj tabanı temizlendikten sonra sondaj deliğinden zemine veya kılıf borusunun açık ucundan sondaj deliğine doğru olacak su akışı ölçülmektedir. Su akışının olacağı yüzeyi artırmak için sondaj deliği kılıf tabanından daha derine indirilebilir ve gerekiyorsa bu kesim uygun bir filtre malzeme ile desteklenebilir. Daha doğru ölçümler için delikli bir boru veya uygun bir piezometre ucu yerleştirilir, etrafına erozyon kontrolü için granüler filtre yerleştirilir ve kılıf çekilir. Filtrenin geçirimsizliğinin, deneyi yapılan zeminin geçirimsizliğinden fazla olması gerekmektedir. Sabit basınç yüklü deneylerde, süre sondaj deliğinin kısa bölümleri kullanıldığında kısaldığı gibi, sonuçların yorumu da basitleşmektedir. Özellikle killi zeminlerde delme nedeniyle oluşan boşluk suyu basınçlarının dengeye gelmesi için deneye kadar aylarca beklemek gerekebilir.

Sabit basınç yüklü deneylerde permeabilite

$$k = \frac{q}{FH_c} \quad (3.38)$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada,  $q$  debi;  $F$  giriş faktörü;  $H_0$  Sabit hidrolik yüküdür.

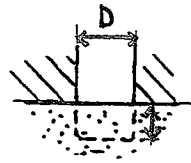
Bazı uç koşullarında giriş faktörü değerleri aşağıda verilmektedir.



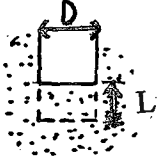
a)  $F= 2D$   
Taban geçirimsiz sınırdaki  
zeminle aynı yüzeyde



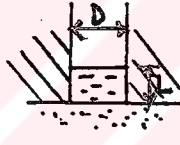
b)  $F=2,75 D$   
Taban uniform  
zeminde



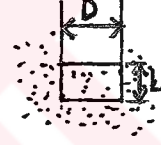
c) Delik geçirimsiz  
sınırdaki uzatılmış



d) Uniform zeminde  
uzatılmış delik



e) Delik ucu geçirimsiz  
zeminde, delik içinde  
zemin var



f) Delik uniform  
zeminde delikte  
zemin var.

$$F = \frac{2\pi L}{\log_e \left[ (L/D) + \sqrt{1 + (L/D)^2} \right]}$$

$$F = \frac{2D}{1 + (8/\pi)(L/D)}$$

$$F = \frac{2.75D}{1 + (11/\pi)(L/D)}$$

Şekil 3.19 Giriş Faktörleri

Eşitlikler Hvorslev tarafından verilmiş olup sondaj deliğinin açık ucu için türetilmişlerdir. (d) hali piezometreler için de kullanılabilir ancak  $L/D > 2$  için daha doğru sonuçlar veren eşitlikler önerilmektedir. (e) ve (f) kılif içindeki zeminlerin aşağıdaki zeminlerle aynı permabilitede olduğu varsayılmıştır. (a) ve (b) durumunda ortalama, (c) ve (d) durumunda düşey, (e) ve (f) durumunda yatay permeabilite ölçülmektedir. Yatay permeabilite, düşeyden çok fazla ise tüm deneyler yatay permeabiliteyi ölçme eğilimindedir.



$L/D > 2$  için Dunn ve Razouki (1975) tarafından

$$\frac{F}{D} = \frac{2.32\pi(L/D)}{\log_e(1.1(L/D + \sqrt{1 + 1.1(L/D)^2})} \quad (3.39)$$

eşitliği önerilmektedir. Filtre kullanıldığında eşitlikte bu çap gözönüne alınacaktır.

Değişken hidrolik yüklü deneylerde permeabilite,

$$k = \frac{A}{FT} \text{ veya } k = \frac{A}{F(t_2 - t_1)} \log_e \frac{H_1}{H_2} \quad (3.40)$$

ile bulunur. Burada,

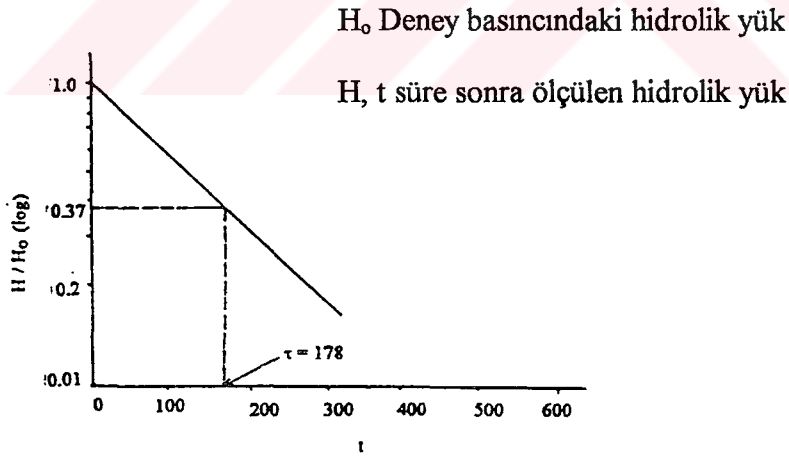
A: Sondaj kılıfı veya Standpipe kesit alanı

T: Zaman faktörü

$H_1$ : Deney başlangıcından  $t_1$  süre sonra hidrolik yük

$H_2$ : Deney başlangıcından  $t_2$  süre sonra hidrolik yük

Zaman faktörü ordinatı  $H/H_0$  değerlerinin logaritmasını, apsisi aradan geçen süreyi gösteren doğru üzerinde ordinatın 0.37 değerine karşılık gelen  $t$  süresidir.



Şekil 3.20 Zaman Faktörünün Bulunuşu

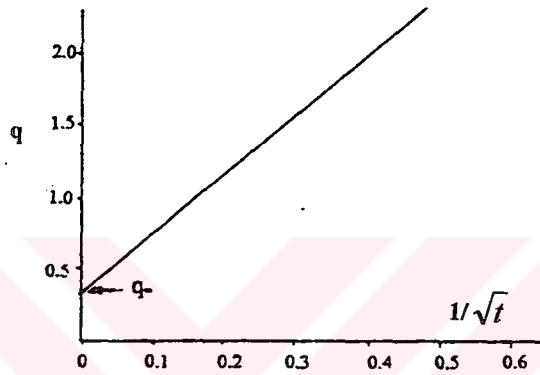
Gibson (1963) sabit hidrolik yük deneylerinde permeabilitenin katsayısının

$$k = \frac{q_\infty}{FH_c} \quad (3.41)$$

ve konsolidasyon veya şişme katsayısının ise

$$C = \frac{q_{\infty} r^2}{\pi n^2} \quad (3.42)$$

ile bulunabileceğini göstermektedir. Burada,  $q_{\infty}$ ,  $q$  ile  $1/\sqrt{t}$  arasında işaretlenmiş grafikte doğrunun ordinatı kestiği noktadır;  $r$  silindirik ucun alanına eşit kürenin yarıçapı;  $n$   $q:1/\sqrt{t}$  doğrusunun eğimidir.



Şekil 3.21  $q_{\infty}$ ' nin Bulunuşu

Yerinde geçirimsizlik deneyleri laboratuvar deneylerine göre hem daha fazla zemin kitlesi üzerinde ölçüm yapılması, hem de örnek alınması sırasında meydana gelen örselenmeye ilişkin olumsuzlukları olmaması nedeniyle daha güvenilir bulunmaktadır. Uygun bir sondaj yöntemi ve dikkatli bir delme tekniği ile deney öncesi zemin örselenmesi minimuma indirilebilir. Kohezyonsuz zeminde sondaj tabanında gevşeme, tabakalı zeminde sondaj kenarlarına karışık bir malzeme sıvanmasıyla daha geçirgen tabakaların tıkanması olasılığı, fissürlü formasyonlarda delme sırasında kırıntıların fissürleri tıkanması olasılığı hatırd tutulmalıdır.

Sabit hidrolik yüklü deneyler değişkenlere göre daha doğru sonuç verirler, ancak ikincilerin uygulaması daha kolaydır. Deneylerde kullanılan su basınçları hidrolik çatlatma doğurmayacak büyüklükte olmalıdır. Genelde su basıncındaki toplam artış, jeolojik efektif gerilmenin yarısını geçmemelidir.  $k > 10^{-3}$  m/sn olan çok geçirgen zeminlerde debiler, giriş ve çıkış hidrolik eğimleri fazla olabileceğinden bu durumlarda arazi pompalama deneyleri-basınç kuyu dışındaki piezometrelerle ölçülebilir-daha doğru sonuçlar verebilir. Kılıflı bir sondajda deney yapıldığında ölçülebilecek permeabilitenin alt sınırı kılıf borusu bağlantılarında sağlanan su geçirmezliğine ve kılıfın zeminde sızdırmaz olarak oturtulmasına bağlıdır. Bu alt limit yaklaşık  $10^{-10}$  m/sn dir. Daha düşük geçirgenlikteki zemin ve kayalarda bir deney

kesiminde enjeksiyonu yapılmış stanpipe veya piezometre ile deney yapmak en doğrusudur. Düşük permeabilitede debi küçük olduğundan ölçüm aygıtında sıcaklık değişikliklerine bağlı hatalar olabileceği düşünülmelidir.

Sıkışabilen zeminlerde geçirgenlik efektif gerilmenin bir fonksiyonu olabileceğinden, içe akış deneylerinde azalan, dışa akış deneylerinde artan efektif gerilmeler altındaki deney sonuçları farklı olabilir. Değişen hidrolik yüklü deneylerin başarısı konsolidasyon katsayısı ile değişmektedir. Prensipte olarak  $c_v$  veya şişme katsayısı hem sabit hem değişken hidrolik yüklü deneylerden saptanabilir, ancak pratikte sonuçların yorumundaki zorluk ve sondaj deliği ucundaki zeminin gerilme tarihçesindeki değişiklik nedeniyle sonuçların hassaslığı tartışmalıdır. Bu nedenle, ya büyük örneklerde yapılacak laboratuvar Rowe hücresi deneyi tercih edilmeli veya yerinde ölçülen  $k_f$  değeriyle standard odometrede bulunacak  $m_v$  ye göre hesaplanmalıdır.

### 3.5.6.3 Tıkaç Deneyleri

Tıkaç veya Lugeon deneyleri baraj temellerinde geçirgenlik ölçümü için standard bir deney biçimidir. Deney, kılıfsız bir sondaj deliğinde verilen bir basınç altında, verilen bir zamanda sızabilen su miktarını ölçme esasına dayanmaktadır. Deney yapılacak kesim ya sondaj tabanı ve bir adet tıkaç ile, ya da iki adet tıkaç ile belirlenir. Deneylerle kayaçların alacağı enjeksiyon miktarı, enjeksiyonun etkinliği, kayaç çatlak miktarı hakkında bilgi edinilir. Yeraltı su seviyesi üzerinde 100 m hidrolik yük altında, 1 m boyda 1 dakikada 1 litre su kabul eden kayaçta geçirgenlik 1 Lugeon'dur diye tarif edilir. Deney kesimi boyu çok küçük olmadıkça sonuçlar sondaj çapına hassas olmamakla birlikte, genelde çap 76 mm dir. 1 Lugeon yaklaşık  $10^{-7}$  m/sn ye karşılık gelmektedir. Tıkaç deneylerinde permeabilite katsayısı,

$$k = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r} \quad (3.43)$$

ile hesaplanabilir. Burada, Q debi; H deney kesimindeki hidrolik yük; L deney kesimi uzunluğu; r deney kesiminin yarıçapıdır.

Genelde deney değişik H ve Q değerleriyle yapıp elde edilen sonuçlara göre düzenlenecek grafikten k bulunur.

Tıkaç olarak değişik tipler kullanılıyorsa da en yaygını hava basınçlı olanıdır. Nitrojen veya oksijen gazı küçük çaplı naylon bir borudan gönderilerek şişirilir. Basınç tıkamak için yeterli, ancak kayaçta çatlatma yapmayacak kadar az olmalıdır. Sondaj deliğinde metre başına (12~17)  $\text{kN/m}^2$  bir basınç genelde uygulanan bir kuraldır. Deneyde kullanılan su basıncının maksimum değeri ise zeminde kaldırmaya neden olmamalı ve zayıf kayaçlarda tıkaçların

geçirimsizliğini bozmamalıdır. Bazı durumlarda yeraltı su seviyesi üzerinde 100 m lik standart hidrolik yük elde edilemeyebilir. Geçirimsizlik hesabında kullanılacak hidrolik yük,

$$H_T = P + (H - H_g) - H_f \quad (3.44)$$

olarak bulunmalıdır. Burada,  $H_T$  kayaca olan akışı sağlayan basınç yüküdür;  $P$  zemin yüzünde Bourdon basınç ölçerinde okunan (m) cinsinden değer;  $H$  Bourdon basınç ölçerinin deney yerinin ortasından olan yüksekliği;  $H_g$  Yeraltı su seviyesinin deney yeri ortasından yüksekliği;  $H_f$  borulardaki sürtünme yük kaybı olarak tarif edilebilir.

#### 3.5.6.4 Sızıntı Hızları Kullanılarak Permeabilitenin Belirlenmesi

Daha önceden verilen metodlar, açılan sondaj veya gözlem kuyularına akan veya bu kuyulardan pompalama yolu ile çekilen su miktarlarının ve su seviyelerindeki basıncın veya seviye değişimlerinin ölçülmesini gerektirmektedir. Burada bahsedilecek metod ise permeabilitenin sızıntı hızı ile ilişkilendirildiği bir yöntemdir. Başka bir ifade ile;

$$k = \frac{v_s \cdot n_e}{i} \quad (3.45)$$

Bu eşitlik permeabilitenin herhangi bir noktadaki akan su hızının ve hidrolik eğimin bilinmesi halinde bulunabileceğini göstermektedir. Genellikle çevredeki kuyular yardımı ile su tablasının hidrolik eğimi kolaylıkla bulunabilir. Çevrede kuyu bulunmaması halinde ise gözlem kuyuları oluşturmak sureti ile permeabilite katsayısı belirlenebilir. Akım hızı ise aşağıda verilen pratik metodlar yardımı ile belirlenebilir;

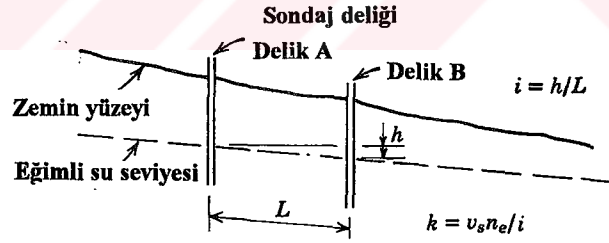
1. Açılan deney kuyusuna bir elektrolit yerleştirilerek bir galvanometre yardımı ile elektrolitin zemin içinde bilinen bir mesafeyi geçmesi için gerekli süre belirlenir.

2. Radyoaktif bir maddenin zemin içinde bilinen bir mesafeyi geçmesi için gerekli zaman belirlenir.

3. Florason sodyum benzeri bir boya maddesinin bir sonraki deney kuyusunda veya sızıntının yüzeye çıktığı noktada zamanın gözlemlenmesi sonucu belirlenir.

Yukarıda belirtilen prosedürlerin kullanıldığı deneyler Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Eğimli olarak devam eden su tablasına A kuyusundan konulan bir elektrolit veya radyoaktif maddenin B kuyusuna ulaşma zamanı uygun aletlerle ölçülerek, sızıntı hızı şekilde gösterilen  $L$  mesafesinin  $t$  zamanına bölünmesi ile bulunur. (3.45) eşitliğinde yer alan efektif porozite  $n_e$  ise yapılan deneylerden elde edilen bulgulardan yola çıkılarak bulunabilir veya hiç bir deney mevcut değil ise bu değer tahmin edilerek permeabilite katsayısı elde edilebilir.

Bununla birlikte boya maddesi kullanılarak yeraltı su akımının hızı veya değişik amaçlar için permeabilitenin belirlenmesi istenildiğinde, boya maddesinin çok ağır hareket etmesi nedeni ile herhangi bir gözlem yapılmayabilir. Özellikle formasyonların çok geçirimli tabakalar içermediği durumlarda, boya maddesinin kısa mesafeler için bile hareketi çok uzun zaman alabilir. Sızıntı hızı göz önüne alınarak permeabilite katsayısının belirlenmesi amaç edildiğinde, sondaj kuyularının ya da gözlem kuyularının akım çizgilerinin üzerinde açılmasına dikkat etmek gerekmektedir.



Şekil 3.22 Sızıntı hızı ölçümlerinden permeabilitenin belirlenmesi

### 3.5.6.5 Yeraltı Su Seviyesi Değişimlerine Dayanan Arazi Metodları

Yeraltı su hidrologları yeraltı su sistemlerinin değişen koşullar altındaki davranışlarını tanımlayabilmek ve gelecekteki değişim koşullarını tahmin edebilmek için çeşitli matematiksel modeller kullanılmaktadır. Weber ve Hassan (1972) yakın bir geçmişte böyle bir model üzerinde çalışmışlar ve yer altı suyunun davranış süreçlerini açıklamaya çalışmışlardır. Kullanılan matematiksel modeller ise, akım ağları ve Darcy yasası üzerinde çalışılarak değişen yeraltı su seviyesi koşullarının göz önünde bulundurulması yolu ile permeabilite katsayısının elde edilmesine yönelik yaklaşık hesaplamalardır. Bu hesaplamalar genel olarak aşağıdaki iki temel unsura dayanmaktadır;

1.Suyun yayılma hızının ölçülmesi

2.Belirli bir zaman süresi içerisinde zemin tabakaları içerisine giren veya zemin tabakalarından çıkan su miktarlarının tahmin edilmesi.

#### 1.Açık akım koşulları altında suyun yayılma hızından permeabilite katsayısının tahmin edilmesi

Yoğun yağışlarda meydana gelen sel olayları sonucu nehir su seviyesinin ani olarak artması sonucu suyun yayılması ile gözlem kuyularında bir yükselme oluşacaktır. Zemin kütlelerinin permeabilitesi de suyun yayılma hızı kullanılarak hesaplanabilmektedir. Açık akım koşulları altında yayılma uniform bir zemin içerisinde meydana geliyorsa, permeabilite katsayısı geçici akım ağlarının kullanılması ile belirlenebilir. Eğer suyun yayılma hızı biliniyorsa, permeabilite katsayısının yukarıda verilmiş olan (3.45) eşitliği ile hesaplanması mümkündür. Bununla birlikte ;

$$T = \sum \frac{\Delta L}{v_s} = \sum \frac{\Delta L n_e}{k \cdot i} = \frac{n_e}{k} \cdot \sum \frac{\Delta L}{i} \quad (3.46)$$

Burada, uzaklık= Hız x Zaman olduğu düşünülerek  $\Delta L$  kadarlık bir mesafe alınabilmesi için geçen süre  $\Delta t$ 'dir ve  $\Delta t = \Delta L / v_s$  şeklindedir. Suyun belirli bir L mesafesini alması için geçen toplam süre T ise  $\sum \Delta t$  değeri kadardır. Eğer toplam süre biliniyorsa, permeabilite katsayısı aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

$$k = \frac{n_e}{T} \sum \frac{\Delta L}{i} \quad (3.47)$$

#### 1.Permeabilite katsayısının zemin içerisinde giren veya çıkan su miktarına bağlı olarak belirlenmesi

Şekil 3.23'te görüldüğü gibi su seviyesinin yüksek geçirimsizliğe sahip bir tabaka içerisinde orta derecede geçirimsizliğe sahip bir tabakaya kadar yükselmesi sonucu altta yer alan

geçirimsizliği yüksek tabakanın permeabilitesi gözlem kuyularında meydana gelen su seviyesindeki yükselme göz önünde bulundurularak tahmin edilebilir.

Oluşan akım oldukça karışık ve analizinin yapılması oldukça güç olmasına rağmen aşağıdaki prosedürün izlenmesi pratik amaçlar için uygun olmaktadır.

1. Şekil 3.23'te görüldüğü gibi bir kesit çizilerek su seviyesinin başlangıç pozisyonu (seviye 1) belirlenir. Su seviyesinin seviye 2'e ulaşması için geçen süre (T) tespit edilir.

2. T süresince elde edilen su hacmi V ve su seviyesinin yükselmesi sonucu meydana gelen doymuş bölgenin ağırlık merkezine olan uzaklık L kayıt edilir.

Son olarak altta yer alan çakıl tabakasının permeabilite katsayısının değeri (3.11) eşitliği kullanılarak belirlenir. Şekil 3.23'teki örneğe göre;

T günde elde edilen toplam su miktarı  $= Q = V \cdot n_e$

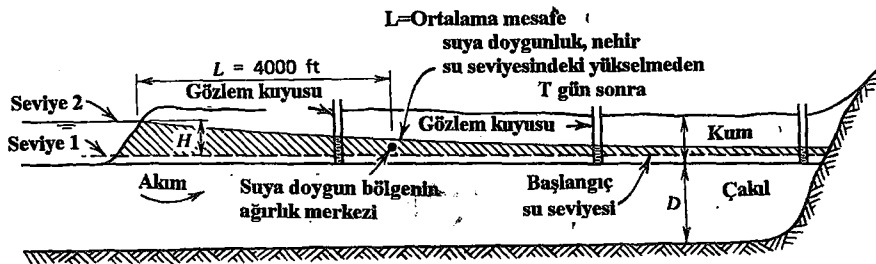
Debi  $= q = Q/t$

Akıma dik bölgenin kesit alanı  $= A$

Ortalama hidrolik eğimin  $H/L$ 'e eşit olduğu varsayılırsa, permeabilite katsayısı

$k = \frac{q}{i \cdot A}$  eşitliğinden belirlenir.

Yukarıda bahsedilen bu prosedür genellikle oldukça geniş arazilerde büyük kapasitedeki zemin kütlelerinin permeabilite katsayısını belirlemede kullanılmaktadır.



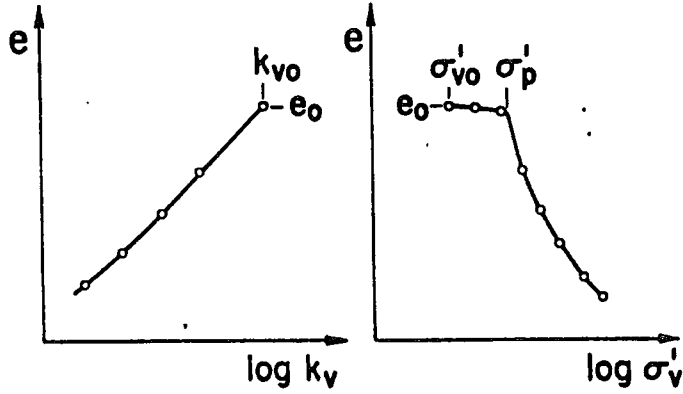
Şekil 3.23 Zemin içersine akan su miktarından permeabilite katsayısının tahmini

### 3.6 Dolgu Altında Yer Alan Yumuşak Zeminlerin Permeabilitesi

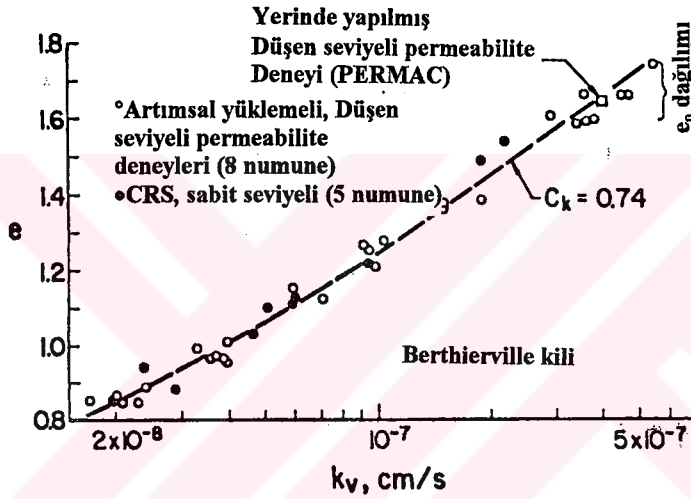
Yumuşak killer üzerinde yer alan dolguların zamanla yapacakları oturma miktarı, yumuşak kilin konsolidasyonu ve dolgu altındaki yumuşak zeminin yanıl akması ile ilgilidir. Oturmanın burada bahsedilen ikinci bileşeni genellikle çok küçüktür ve oturmanın en önemli bileşenini konsolidasyon oturması oluşturmaktadır. Yumuşak killerin oturma analizleri, genellikle zeminin sıkışabilirliğinin ve permeabilitesinin belirlenebilmesi için örselenmemiş numune alınması ve alınan bu örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerine dayanmaktadır. Buna ek olarak, doğal ya da sonradan oluşturulacak drenaj koşulları altında zemin yüzeyinin ve yüzey altındaki zeminin oturma sürecinin tahmin edilebilmesi için, sıkışabilirliğe ve permeabiliteye dayalı bir konsolidasyon teorisine ihtiyaç duyulmaktadır. Konsolidasyonun hızlandırılabilmesi için düşey drenlerin kullanılması durumunda, bunlara ek olarak drenlerin deşarj kapasitesi ile ilgili bilgi ve oluşturulması sırasında meydana gelen sıvaşma zonunun permeabilitesi ve sıkışabilirliği ile ilgili bilgilere ihtiyaç vardır. Bir boyutlu konsolidasyonu kontrol eden ana faktörler Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Bunlar, yeniden sıkışma ile bakir sıkışma arasındaki sınırı belirleyen önkonsolidasyon basıncı ve konsolidasyon sırasında önemli miktarda azalan permeabilitedir (Mesri, Lo, Feng, 1992).

Buzul devrine ait denizsel ve gölsel yumuşak kil çökellerinin bir çoğu küçük boyutlardaki kil numuneler üzerinde permeabilite deneyleri yapılacak kadar uniform özellik taşımaktadırlar. Ödometre deneyinin bir parçası olarak yapılan bu deneyler, arazi boşluk oranı değerlerinde düşey ve yatay yönlerdeki permeabilite,  $e$ -log  $k_v$ ,  $e$ -log  $k_h$  ilişkileri ya da  $\Delta e/\Delta \log k_v$  ve  $\Delta e/\Delta \log k_h$ ' a eşit olan  $C_k$  değerine bağlı olarak permeabilite katsayısında meydana gelen azalma hakkında bilgi vermektedir (Mesri vd.,1992). Artımsal yüklemeler (IL) sırasında yapılan düşen seviyeli ve sabit seviyeli deneyler ya da boşluk suyu basınçlarının ölçüldüğü CRS deneyleri doğal yumuşak kil çökellerinin permeabilitesi hakkında güvenilir bilgiler vermektedir. Literatürde farklı bölgelerde yer alan bir çok yumuşak kil örnekleri üzerinde yapılmış permeabilite deneylerinin sonuçları Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterilmektedir. Bu değerler laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilmiş değerler olup,  $k_{ho}$  hakkında güvenilir bilgiler elde edebilmek için özel arazi permeametreleri(örneğin; self boring permeametre, tıkanmayan proplar) gerekmektedir.  $C_k$  değeri için şu ana kadar arazi ölçümlerinden bir bilgi edinilememiştir(Tavenas vd., 1986). Bununla birlikte,  $k_{ho}/k_{vo} \cong 1$  olan yumuşak killerde laboratuvar deney sonuçları ile arazi permeabilite deney sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir (Şekil 3.25). Kontrol için herhangi bir alet ve boşluk suyu basıncı

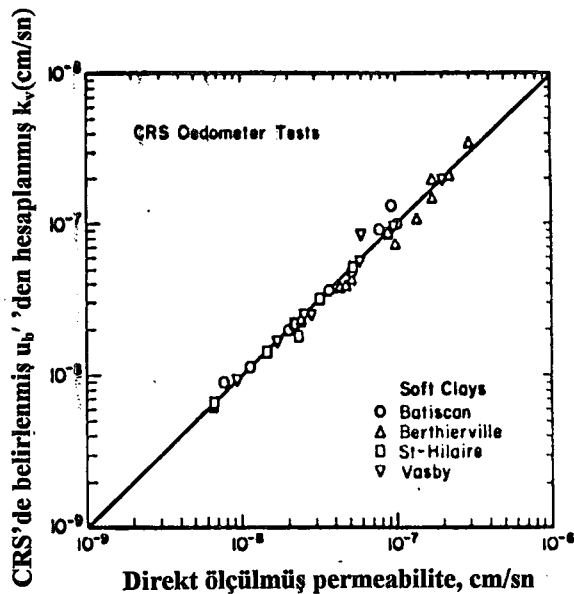




Şekil 3.24 Yumuşak killerin sıkışabilirliği ve permeabilitesi (Mesri vd., 1992)



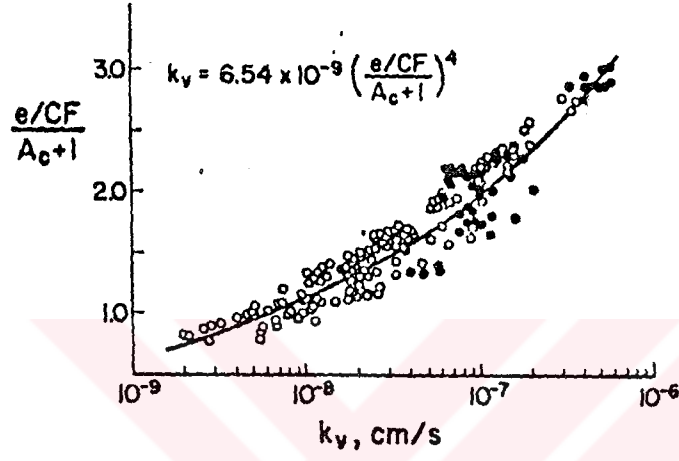
Şekil 3.25 Yumuşak kil numunesi üzerinde yapılan düşen seviyeli ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonuçları ve arazi permeabilite deneyleri ile laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması (Mesri vd., 1992)



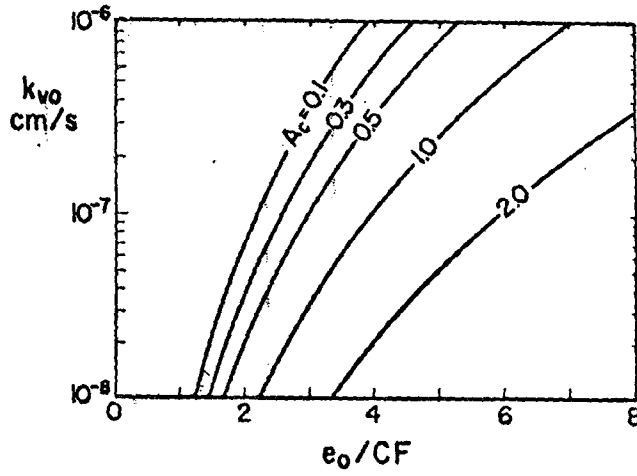
Şekil 3.26 CRS ödometre deneylerinden elde edilmiş  $k_v$  ile Düşen seviyeli ve sabit seviyeli permeabilite deneylerinden elde edilmiş  $k_v$  değerlerinin karşılaştırılması (Mesri vd., 1992)

ölçümü gerektirmeyen artımsal yüklemeli ödometrelerde (IL) yapılan düşen seviyeli ödometre deneyleri ise basit olduğu için tercih edilebilir, fakat yumuşak killerin sıkışabilirliği ve permeabilitesi hakkında en etkili bilgiyi CRS ödometre deneyleri vermektedir (Mesri ve Feng, 1992).

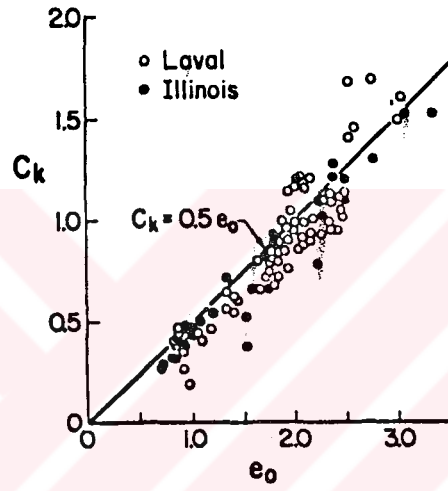
Her yumuşak kil çökelinin boşluk boyutu ve şekli, permeabilite ile boşluk oranı arasında farklı ve özgün bir ilişkiye yönlendirmektedir. Mesri vd.(1994) boşluk boyutu ve boşluk şekli etkilerini, kil boyutu yüzdesi  $CF = \% < 2\mu m$  ve aktivite katsayısı,  $A_c = I_p / CF$ , cinsinden ifade ederek, permeabilite ile boşluk oranı arasındaki ilişkide kullanmıştır. Elde edilen ampirik sonuçların Şekil 3.27'de gösterildiği ilişki, aktivite katsayısına ( $A_c$ ) ve  $e_0 / CF$  e bağlı olarak yumuşak kil çökelleri için  $k_{vo}$  değerini tahmin etmek için kullanılabilir (şekil 3.28).  $e_0 / CF$ , partikül boyutunu ve dolayısı ile boşluk boyutunu belirleyen minerolojinin göstergesi olduğu için permeabilite de aktivite katsayısının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. CF ile permeabilite arasındaki ilişki ters orantılıdır dolayısı ile CF' nin büyük değerlerinde permeabilite değeri küçülmektedir. Çünkü, CF'nin büyük değerleri küçük ve pürüzlü boşlukları göstermektedir. Yumuşak killerin arazideki doğal permeabilite katsayısı  $1 \times 10^{-7}$  cm/s civarındadır. Aslında yumuşak killerin çoğunda  $k_{vo}$  değeri bazı nedenlerden dolayı  $5 \times 10^{-8}$  cm/s'den  $5 \times 10^{-7}$  cm/s'e kadar değişmektedir. Yumuşak killer için e-log k ilişkilerinin eğilimi genel olarak  $C_k = \Delta e / \Delta \log k$  değerinin düşey sıkışma ile birlikte azalması şeklindedir. Fakat, başlangıçtan itibaren ( $e_0$ ,  $k_{vo}$ ,  $k_{ho}$ ) yaklaşık %20' lik şekil değiştirmeye kadar sabit bir  $C_k$  değeri ile temsil edilebilir. Doğal yumuşak killer için Şekil 3.29'da gösterildiği gibi başlangıç boşluk oranı ile  $C_k$  arasında ampirik bir korelasyon ortaya çıkmaktadır (Tavenas vd., 1983).  $C_k$  ile  $e_0$  arasında verilen bu direkt korelasyon, konsolidasyon sırasında düşük boşluk oranlarında stabilize edilmiş kil bileşimlerinin permeabilitesinin, yüksek doğal boşluk oranına sahip killerin permeabilitesine göre daha büyük oranda bir azalma göstereceğini ortaya koymaktadır.



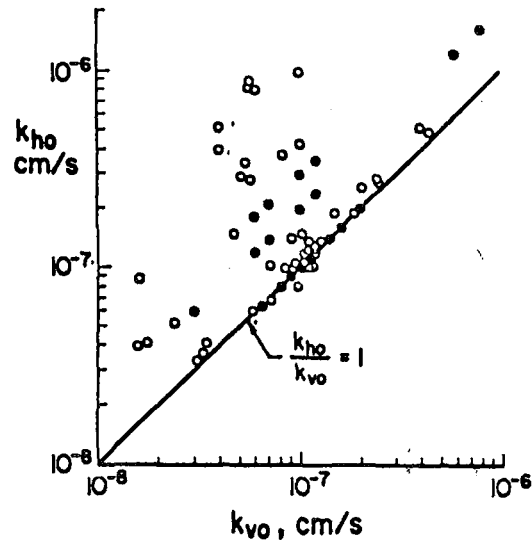
Şekil 3.27 Kil boyutu yüzdesine ve aktivite katsayısına göre normalize edilmiş permeabiliteboşluk oranı ilişkisi (Mesri vd.,1992).



Şekil 3.28 Farklı aktivite katsayısına sahip yumuşak kilerde  $k_{vo}$  ve  $e_o/CF$  arasındaki ampirik korelasyon (Mesri vd.,1992)



Şekil 3.29  $C_k$  ile  $e_0$  arasındaki empirik korelasyon (Mesri vd.,1992)



Şekil 3.30 Yumuşak kil çökellerinin permeabilite anizotropisi (Mesri vd.,1992)

### 3.6.1 Permeabilite Anizotropisi ve Yatay Permeabilite

Doğal zeminler çoğunlukla mekanik özellikleri ve permeabilite özellikleri açısından anizotropik özellik taşımaktadırlar. Bu anizotropinin başlıca nedenleri arasında, büyük alanlar boyunca depolanmaları sonucu maruz kaldıkları bir boyutlu gerilme tarihçesi, yoğunluklarında meydana gelen mevsimsel değişimler ve çökme süreçleri sonucunda zeminin dane çapı dağılımında düşey yönde meydana gelen değişimler sıralanabilir. Zeminin dane çapı dağılımında düşey yönde meydana gelen değişimin, bazı doğal zeminlerin permeabilite anizotropisi üzerinde önemli bir etkisi olduğu düşünülmektedir.

Düşey drenler kullanıldığı zaman genellikle permeabilite anizotropisi  $k_{ho}/k_{vo}$  oranına bağlı olarak ifade edilen  $k_h$  önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Yumuşak kil çökellerinde birbirinden bağımsız bir çok faktör permeabilite anizotropisine neden olabilmektedir (Mesri vd.,1994). Bu faktörlerden bir tanesi levha şekline sahip olan kil minerali partiküllerinin yatay oriyantasyonun baskın olmasına bağlıdır. Fakat, deniz kökenli bir çok yumuşak kil çökeli rastgele bir bünye oluşmasına neden olan agregalaşmış ve kafes şeklinde iç yapıya sahip homojen kil minerallerinden meydana gelmektedir. Bu yüzden deniz kökenli yumuşak killerde,  $k_{ho}/k_{vo}$  çok nadir olarak 1.5 değerinin aşmaktadır ve genellikle 1'e çok yakındır (Ladd 1976; Leroueil vd.,1990). Permeabilite anizotropisine neden olması olası olan diğer bir etken ise gösel yumuşak kil çökellerinin doğal tabakalanmasıdır (Chan ve Kenney 1973; Kenney ve Chan 1973; Kenney 1963, 1976). Fakat, tabakalı kil çökellerinde de permeabilite anizotropisi çok nadir olarak 5 değerini aşmaktadır ve genellikle 3'ten daha azdır. Bu durum Kenney (1963,1976) tarafından tabakalar arasında düşey doğrultuda meydana gelen permeabilite değişkenliğine ve beklenmedik geçiş bölgelerinin varlığının bulunmasına bağlı olarak açıklanmaktadır.  $k_{ho}/k_{vo}$  için literatürden elde edilen bilgiler (Tavenas vd.1983; Leroueil vd.1990) yumuşak killer üzerinde yer alan dolgular altında meydana gelmiş boşluk suyu basınçları gözlemlerinden, gözlemlenmiş ve hesaplanmış oturmaların karşılaştırmalarından geri hesaplama yolu ile elde edilen değerler ile birlikte Şekil 3.30' da özetlenmeye çalışılmıştır.  $k_{ho}/k_{vo}$  büyüklükleri 10' a eşit olan değerler, tabakalı ve ayrılmış kil çökellerine karşılık gelmektedir (Ladd ve Wissa 1970, Ladd ve Foott 1977). Sıkışabilir zeminlerin permeabilitesine ilişkin olarak tam bir bilginin bulunmaması halinde oturma analizleri için gereksinim duyulan permeabilite katsayısı Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da yer alan ampirik korelasyonlar kullanılarak tahmin edilebilir.

### 3.6.2 Zeminin İç Yapısı

Zemin iç yapısı (bünyesi), zemin bileşiminde yer alan fisürler, eklem yerleri gibi mühendislik davranışları üzerlerinde oldukça büyük etkisi olan süreksizlikleri ve yerel değişkenleri tarif etmektedir. Bununla birlikte Rowe(1972), zemin bünyesini, zeminin tabakalar halinde oluşması sırasında zemin danelerinin şekli, boyutu ve düzeni ile zemin daneleri arasında yer alan boşlukların ve diğer organik katkıların zemin daneleri ile birlikte meydana getirdikleri düzen şeklinde tarif etmektedir. Tabakalaşmış, fisürlü killerde veya sızıntı yolları meydana getirebilen organik madde içeren killerde zemin bünyesinin önemi oldukça fazladır. Bu tür zeminlerde zemin bünyesi veya diğer bir deyimle zeminin iç yapısı, zeminin tüm kütlelerinin drenaj özelliklerini belirleyen ve sonuç olarak zeminin konsolidasyon-şişme karakteristiklerinde baskın rol oynayan bir faktör olmaktadır. Örneğin, 10 m veya daha fazla kalınlıkta, düşük permeabiliteye sahip bir kil tabakasında, 3m aralıklarla kil zemine göre permeabilitesi daha fazla olan 0.1 mm kalınlığında silt tabakalarının yer alması bahsedilen kil tabakasının drenaj kapasitesini ve oturma hızını oldukça fazla miktarda artırabilmektedir (Rowe, 1968). Bunun için zeminin iç yapısının önemli bir şekilde değiştiği yerlerden zemini iyi bir şekilde temsil eden büyük çapta numuneler almak gerekmektedir. Çünkü, küçük çaplı numuneler zeminin iç yapısını yeteri kadar iyi temsil edememektedir (Rowe, 1972). Rowe (1968), Rowe hücresinde 250 mm çapındaki numuneler üzerinde yapılan deneylerin geleneksel ödometre deneylerine göre arazi davranışını daha iyi modelleyebildiğini belirlemiştir.

### 3.6.3 Yatay Drenaj

Yatay drenajın konsolidasyonu da içerisine alan bir çok geoteknik problemde oldukça önemli bir yeri vardır. Yatay permeabilitenin düşey permeabilite katsayısından daha büyük olması yatay drenajın dolayısı ile yatay permeabilitenin önemini daha da artırmaktadır. Bu önemine rağmen yatay drenajlı konsolidasyon problemi hala tam olarak anlaşılammıştır. Örneğin; esnek bir yapı altında yatay drenaj sonucunda meydana gelen uniform olmayan düşey şekil değiştirmeler, veya zeminin plastik deformasyonu sonucunda rigid bir yapı altında konsolidasyon aşamasının sonunda oluşan şekil değiştirmelerdeki rezidüel uniformsuzluklar, tasarımcı tarafından daha önceden hiç tahmin edilmeyen ve göz önünde bulundurulmayan ek gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır.

Geleneksel ödometre deneylerinde, kil numunesi iki rigid plaka arasında düşey olarak sıkıştırılır ve su akımı drenaj yüzeylerine doğru aşağı veya yukarı yönlü olarak meydana gelir. Deneysel gözlemler ise zemin içerisinde bir boyutlu düşey konsolidasyon katsayısı ve düşey yönlü akım için permeabilite katsayısı verecek şekilde yorumlanır. Geoteknik yapılar altında

meydana gelen oturmaların hızları çoğunlukla bu yapıların kenarları boyunca artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme hızı tarafından kontrol edilir. Bu hız ise zeminin düşey permeabilite katsayısından daha büyük olan yatay permeabilite katsayısı tarafından kontrol edilmektedir.

Bir çok tasarımcı konsolidasyonun bitiminde oluşan deplasmanları ve değişimleri dikkate alacak şekilde konsolidasyon analizleri yapmaktadır. Fakat, araştırmacılar konsolidasyon sırasında yapıda oluşacak deplasmanların aslında daha büyük olabileceğini belirtmektedirler. Yapıda hasara neden olabilecek deplasmanların derecesi genellikle oldukça küçüktür (Burland ve Wroth, 1975). Al-Tabbaa ve Wood tarafından, konsolidasyon sırasında yatay drenajın etkisini araştırmak için yapılan analitik çalışmaların sonuçlarına göre sıkışabilir bir zemin üzerinde ya da farklı oturmalar oluşmasına yatkın olan zeminlerde bir mühendislik yapısı tasarlanırken, drenaj koşulları tümü ile göz önünde bulundurularak konsolidasyon sürecinin bütünü ile analiz edilmesi gerektiği tavsiye edilmektedir. Böylece, radyal drenajdan dolayı olabilecek deplasmanların aşırı olup olmadığı araştırılmış olacaktır.

Konsolidasyon sırasında drenajın yatay (radyal) yönde oluşturulması ilk kez üç eksenli deneylerde Bishop ve Henkel(1957) tarafından tarif edilen filtre kağıdından yapılan kenar drenler kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.31). Rowe (1959) tarafından görsel killerde bu tarz bir yöntemle yapılan araştırmalar, numune etrafına sarılan sürekli şeritler halindeki filtre kağıdının bu kilde etkili bir dren rolü oynamadığını göstermiştir. Aynı şekilde Escario ve Uriel (1961), 4 inch çapındaki kil numunelerinde yaptıkları radyal drenajlı üç eksenli deneyler sonucunda benzer sonuçlara ulaşmışlar ve bunun üzerine yukarıda bahsedilen tipteki bir dren yerine kil numunesini çevreleyen 5 mm kalınlığında mikalı kum kullanarak oldukça tatminkar sonuçlar elde etmişlerdir. Mckinlay (1961), standart ödometre hücrelerinde yaptığı radyal drenajlı deneylerde, numuneyi poroz paslanmaz çelik bir ring içerisine yerleştirerek yanal drenajı modellemeye çalışmıştır.

Rowe ve Barden tarafından kullanılan ve siltlerin permeabilitesinden daha büyük bir permeabiliteye sahip olan poroz plastik materyal ise, çevresel dren olarak oldukça iyi sonuç vermiştir. Normal olarak, 1.5 mm'lik bir kalınlığın radyal drenajın sağlanabilmesi için yeterli kapasiteyi sağlayabildiği belirtilmiştir.

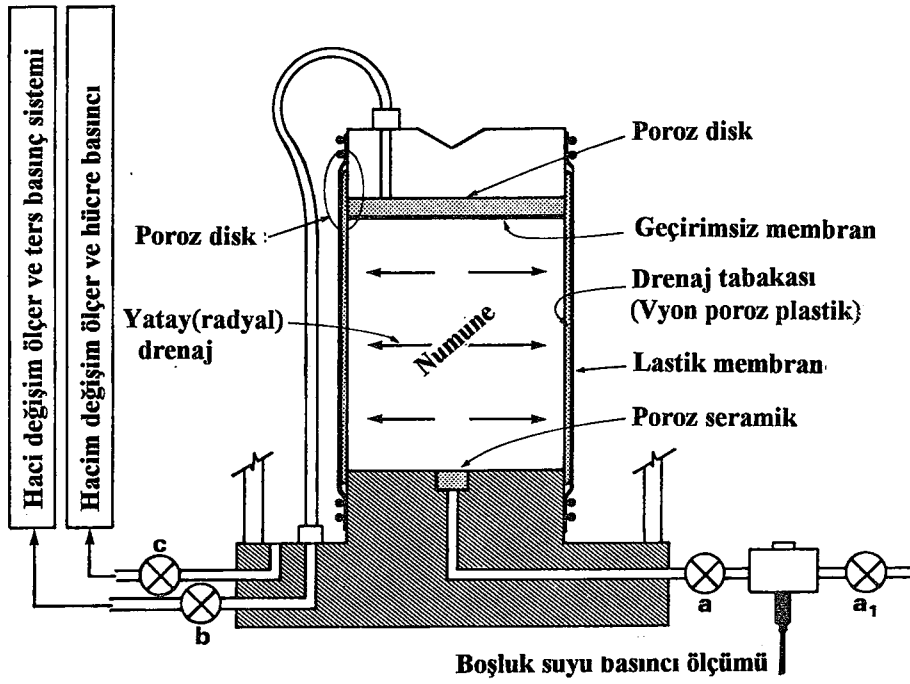
Rowe(1959) tarafından klasik ödometrelerde merkezi bir kum drene olan yatay (radyal) drenaj denenmiş ve başarıya ulaşılmıştır. Rowe ve Shields (1965) 3 inch, 6 inch, 10 inch yüksekliğindeki numunelerin konsolidasyonu sırasında yatay drenaj tabakalarını modellemek için poroz seramik diskler kullanmışlar ve numunenin merkezinde oluşturdukları temiz ince

kuma doğru bir radyal akım oluşturmuşlardır. Aynı araştırmacılar, numune çapının % 5' ini aşmayan kum dren çaplarının numunenin ölülen sıkışabilirliğinde çok az bir etkiye sahip olduğunu da belirtmişlerdir. Aynı zamanda drenin oluşturulabilmesi için ince cidarlı bir mandrel kullanılmasının zeminde en az örselenmeye neden olduğu belirlenmiştir. Singh ve Hattab (1979) Rowe hüresi deneylerinde merkezi drenin oluşturulabilmesi için kullanılabilir mandrel tiplerini şekil 3.32 deki gibi vermektedir.

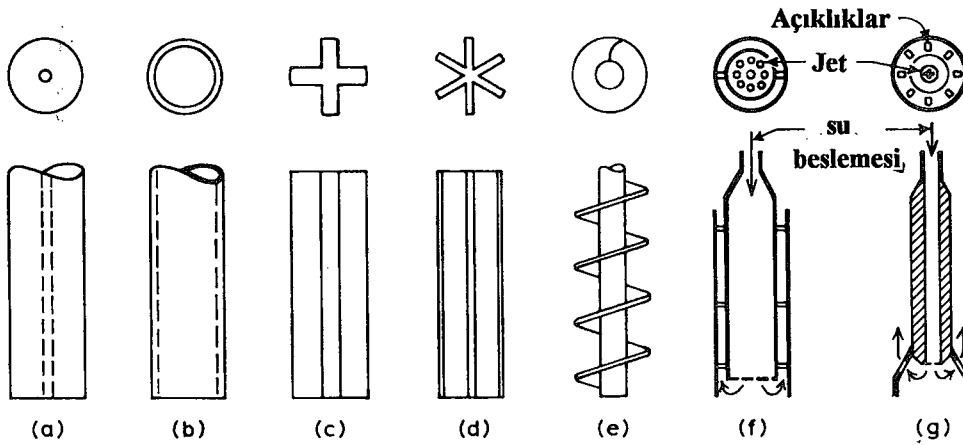
Rowe hüresinde yatay permeabilite katsayısını belirlemek için yukarıda bahsedildiği gibi zemin numunesinin merkezinde oluşturulan düşey bir dren kullanılmaktadır. Oluşturulan bu düşey dren aslında pratikte konsolidasyonu (oturmaları) hızlandırmak için kil tabakalarında oluşturulan kum drenleri rnelemektedir. Sonuç olarak yapılan bu deney sonucunda, düşey kum drenler modellenenilmekte ve böylece düşey drenlerin optimum yerleşim şekilleri ve çapları hakkında bir tahmin elde edilebilmektedir (Chalmers, 1982).







Şekil 3.31 Radyal drenaj için düzenlenmiş üç eksenli konsolidasyon deneyi



Şekil 3.32 Drenin oluşturulması için kullanılacak mandrel tipleri

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE KULLANILAN DENEY TEKNİKLERİ

### 4.1 Giriş

Çalışmanın bu bölümünde dolgu altında yer alan yumuşak temel zemininin permeabilite karakteristiklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirliğe sahip Alibey barajı temel zemininin aşamalı dolgu inşaatı sırasında yatay ve düşey permeabilite katsayılarında meydana gelen değişim laboratuvarında deneysel çalışmalarla belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ise bir sonraki bölümde, Kılıç (2000) tarafından Alibey Barajı temel zemininin aşamalı dolgu inşaatı sırasındaki davranışını modellemek için gerçekleştirilen gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon analizi çalışmalarında kullandığı temel zeminine ait permeabilite ile ilgili parametrelerle karşılaştırılmıştır.

Alibey barajının inşasına başlanmadan önce çok ayrıntılı bir zemin araştırması ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilerek temel zemini profili ve zemin özellikleri belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarının bütün olarak değerlendirilmesinden belirlenen sonuçlar Koç (1996) ve Özaydın vd.(1998)'de verilmiştir. Kılıç (2000) tarafından yapılan çalışmada ise Alibey Barajı temel zemininin gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışı sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Alibey Barajı temel zemininde değişik zamanlarda yapılan laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde olunan deneysel sonuçlar Kılıç(2000) tarafından yapılan nümerik analizlerde malzeme parametrelerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Analizlerde temel zeminin başlangıç koşulları ve başlangıçtaki malzeme parametreleri barajın inşaatına başlanmadan önce yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından, sıkışma ve mukavemet parametreleri ise Koç(1996) ve Özaydın vd.(1998)'den alınmıştır. Alibey Barajı temel zemini üzerinde yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri genel olarak temel zemininin sıkışabilirlik ve mukavemet analizlerini dikkate alan çalışmalar olmuştur. Fakat, konsolidasyon analizlerinde büyük rol oynayan permeabilite katsayısının belirlenmesine yönelik herhangi bir laboratuvar çalışması yapılmamıştır. Arazide ise barajın inşa edilmesi sırasında piezometreler ile ölçülen su basıncılarının tam sağlıklı sonuçlar vermemesi nedeni ile temel zemininin permeabilite katsayısındaki değişimi gözlemlemek mümkün olmamıştır. Temel zeminin permeabilite değişimi ile ilgili olarak detaylı bir bilginin olmaması nedeni ile Kılıç (2000) tarafından yapılan nümerik analizlerde, tek boyutlu sıkışma deneylerinden dolaylı olarak elde edilen düşey permeabilite katsayısı kullanılmış ve konsolidasyon analizlerinde permeabilitenin boşluk oranı ile değişimini temsil eden  $C_k$  parametresi ise yine tek boyutlu sıkışma deneylerinden elde edilen  $C_c$ 'e eşit olarak alınmıştır.

Bu çalışmada ise Kılıç (2000) tarafından Alibey Barajı temel zemininin gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışının sonlu elemanlar analizinde kullanılan permeabilite katsayısının konsolidasyon sırasında boşluk oranı ile olan değişimini gösteren  $C_k$  parametresinin ve permeabilite anizotropisinin laboratuarda deneysel çalışmalarla belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece Alibey Barajı temel zemini üzerinde yapılan deneysel çalışmaların tamamlayıcısı niteliğinde olan ve önemli bir parçasını oluşturan zeminin permeabilite karakteristiklerinin araştırılması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen bu değerler Kılıç(2000) tarafından yapılan nümerik analizlerde kullanılan permeabilite ile ilgili parametrelerle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar deneysel çalışmanın sonuçları ile birlikte Bölüm 5'te verilmiştir.

Deneysel çalışmaların ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı bu bölümde kademeli olarak inşa edilen Alibey Barajı'nın memba batardosu dolgusu altında yer alan yumuşak kil tabakasının permeabilite karakteristikleri laboratuarda deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Barajın dolgu inşası sırasında dolgudan kaynaklanan gerilmelerde meydana gelen değişmelerin arazide ölçülememesi nedeni ile deneysel çalışmada Kılıç (2000) tarafından PLAXIS isimli geoteknik mühendisliği problemlerinin nümerik analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programı kullanılarak belirlenmiş efektif asal gerilmeler kullanılmıştır. Baraj temel zemininde yer alan killi tabakaların düşey ve yatay permeabilite karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile Rowe hücresi olarak bilinen hidrolik ödometre aleti kullanılmıştır. Araziden alınan örselenmemiş numuneler bulamaç halinde hazırlanarak Rowe hücresinde arazi başlangıç gerilmesine kadar konsolide edilmiş, yine aynı deney sisteminde gerilme tarihçesi belirli numuneler üzerinde nümerik analizden belirlenen efektif asal gerilmeler altında düşey ve yatay permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir.

#### **4.2 Deneysel Çalışmada kullanılan Zemin Örnekleri ve Özellikleri**

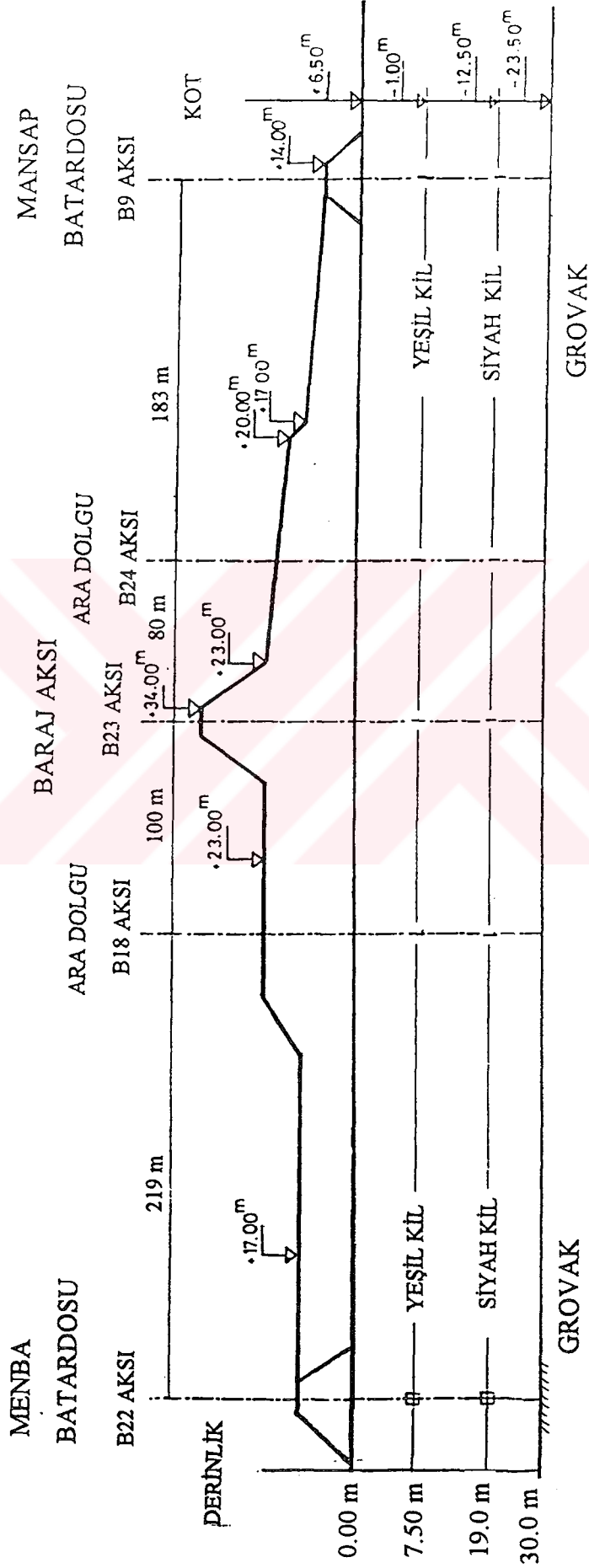
Deneysel çalışma için Alibeyköy barajı temel zeminin oluşturan başlıca iki tabaka olan orta katı yeşil kil ve orta katı siyah kil tabakalarından alınana numuneler kullanılmıştır. Baraj temel zeminine ait genelleştirilmiş profil ve değişik zemin tabakalarına ait geoteknik parametreler Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Temel zeminin en üst tabakasını oluşturan yaklaşık 1-3.6m kalınlığındaki sarı kil zemin tabakasından örnek mevcut olmadığı için bu kil üzerinde deneysel çalışma yapılamamıştır. Deneysel çalışmada kullanılan her iki zeminin özelliklerini belirleyebilmek için kıvam limiti deneyleri, dane birim hacim ağırlığı ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre her iki zemin de CH grubundadır. Kullanılan zeminlere ait özellikler Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kullanılan zeminlere ait özellikler

Zemin Cinsi	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	w <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	G <sub>s</sub>	Zemin Sınıfı
Siyah Kil	-	10	50	40	67	25	42	2.72	CH
Yeşil Kil	-	9	71	20	53	23	30	2.70	CH

↓ +6.5	İdealize edilmiş zemin profili	Tanımlama	Endeks Özellikler
↓ +5.0	Katı sarı kil YASS	Katı sarı - kahverengi kil. Yer yer organik. Alt bir metre genellikle kumlu ve çakıllı	w <sub>L</sub> =40-60 %, γ <sub>d</sub> =20 kN/m <sup>3</sup>
↓ +3.0	Orta katı yeşil kil	Orta katı, kirli yeşil kil yer yer siltli. Genellikle organik orta ile yüksek arası plastisite. Yer yer kum ceplerine rastlanmaktadır.	w <sub>n</sub> = 32-40 ; 32 % w <sub>L</sub> = 40-60 ; 55 % I <sub>p</sub> = 25-35 ; 30 % γ <sub>d</sub> =19 kN/m <sup>3</sup>
↓ -4.0	Orta katı siyah kil	Orta katı, siyah kil. Genellikle midye kabukları içermekte. Yüksek plastisite. Yer yer ağaç parçalarına ve kum ceplerine rastlanmaktadır.	w <sub>n</sub> = 40-60 ; 49 % w <sub>L</sub> = 55-70 ; 67 % I <sub>p</sub> = 30-50 ; 42 % γ <sub>d</sub> =17 kN/m <sup>3</sup>
↓ -18.0	Killi-kumlu çakıl	Çok heterojen bir tabaka, genellikle 1 - İnce siltli kum 2 - Çakıllı kum 3 - Kumlu ve çakıllı kil 4 - Koyu gri organik kil	γ <sub>d</sub> = 20 kN/m <sup>3</sup>
↓ -24.0	Kaya	Kaya	

Şekil 4.1 Memba batardosu altındaki tipik zemin profili (Soydemir,1970)



Şekil 4.2 B22 aksında deneysel çalışma için göz önüne alınan derinliklerdeki birim zemin elemanları (Kılıç, 2000)

### 4.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Gerilmeler

Baraj dolgusu altında yer alan yeşil kil ve siyah kil tabakalarına ait düşey ve yatay permeabilite katsayılarının belirlenebilmesi için kullanılan gerilmeler daha öncede bahsedildiği gibi PLAXIS isimli nümerik analiz programı kullanılarak elde edilmiş gerilmelerdir. Tipik kesiti Şekil 4.22'de gösterilen Alibeyköy Barajı temel zemininin aşamalı yüklemeye bağlı olarak yük uygulandıktan hemen sonraki yani drenajsız koşullardaki ve inşaat programına göre belirlenen bekleme süresi sonundaki davranışı incelenmiştir. Bunun için tüm baraj dolgu kesitleri için dolgu inşa edilmeden önceki jeolojik efektif gerilmeler belirlenmiş ve daha sonra ise her bir yükleme aşamasında konsolidasyon analizi sonundaki efektif asal gerilme değişimleri belirlenmiştir (Kılıç, 2000).

Deneysel çalışmada yukarıda bahsedilen analiz sonuçlarına göre B22 aksı altında yeşil kil ve siyah kil tabakaları için belirlenen düşey efektif asal gerilmeler kullanılmıştır. Kullanılan bu gerilmeler altında temel zeminin düşey ve yatay permeabilite katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır. PLAXIS programı kullanılarak B22 aksları için elde edilmiş düşey efektif asal gerilmeler yeşil kil ve siyah kil tabakaları için sırası ile Çizelge 4.2a ve 4.2b'de verilmiştir. Şekil 4.2'de B22 aksında deneysel çalışmada göz önüne alınan derinliklerdeki siyah kil ve yeşil kil tabakalarındaki zemin elemanları gösterilmiştir.

Çizelge 4.2a B22 aksında yeşil kil tabakasında 7.50m derinlikte belirlenen efektif düşey asal gerilmeler ( Kılıç, 2000)

<b>Yükleme Aşaması</b>	<b>Düşey Efektif Gerilme (kPa)</b>
Düşey jeolojik efektif gerilme	77
Yükleme kademesi 1	91.5
Yükleme kademesi 2	107
Yükleme kademesi 3	139.5
Yükleme kademesi 4	222
Yükleme kademesi 5	265
Yükleme kademesi 6	288

Çizelge 4.2b B22 aksında siyah kil tabakasında 19 m derinlikte belirlenen efektif düşey asal gerilmeler ( Kılıç, 2000)

Yükleme Aşaması	Düşey Efektif Gerilme (kPa)
Düşey jeolojik efektif gerilme	170
Yükleme kademesi 1	182
Yükleme kademesi 2	215
Yükleme kademesi 3	258
Yükleme kademesi 4	314
Yükleme kademesi 5	348.5
Yükleme kademesi 6	375

#### 4.4 Kullanılan Deney Aygıtları

Dolgu altında yer alan yumuşak zemin tabakalarının düşey ve yatay permeabilite katsayılarını belirlemek için Rowe hücresi isimli hidrolik ödometre aleti kullanılmıştır.

##### 4.4.1 Rowe Hücresi Konsolidasyon Aletinin Özellikleri ve Kullanıldığı Yerler

Rowe hücresi Manchester Üniversitesi' nde Prof. P.W. Rowe tarafından büyük çaptaki numuneleri konsolide edebilmek için, yeniden yapılandırılmış numune elde etmek için ve klasik ödometre aletinin yarattığı olumsuzlukları ve problemleri gidermek amacı ile geliştirilmiş olan bir tür hidrolik konsolidasyon hücresidir. Klasik ödometre deneylerinde karşılaşılan bu olumsuzluklar genel olarak düşük permeabiliteye sahip zeminlerde ve özellikle uniform olmayan çökeller üzerinde yapılan konsolidasyon deneyinde karşılaşılan zorluklardan ibarettir.

Rowe Cell konsolidasyon aletinin geleneksel ödometre aletinden ayrılan en önemli özelliği, numune üzerine uygulanan gerilmelerin mekanik bir yüklemeye sistemi yerine su basıncı vasıtası ile lastik bir diyafram kullanılarak etkilmesidir. Deney aletinin bu şekilde düzenlenmesi büyük çaptaki numunelerde deney yapılabilmesine ve deney sırasında büyük deformasyonların oluşabilmesine imkan vermektedir. Fakat, deney sisteminin en önemli avantajı, konsolidasyon deneyi sırasında drenajın kontrol altında tutulabilmesi ve boşluk suyu basınçlarının ölçülebilmesidir. Numuneye ters basınç uygulanarak numunenin suya doygunluğu sağlanabilmekte ve farklı yatay ve düşey drenaj koşulları uygulanabilmektedir. Özellikle drenaj koşullarının kontrol altında tutulabilmesi, drenajsız koşullar altında yüklemeye

yapılabilmesine ve dolayısı ile numune içerisinde oluşan boşluk suyu basınçlarının gözlenebilmesine imkan tanımaktadır. Drenaj koşullarının isteğe bağlı olarak ayarlanabiliyor olması, başlangıçta meydana gelen ani oturmanın konsolidasyon oturmasından ayrı olarak belirlenebilme avantajını da vermektedir. Çünkü, konsolidasyon oturması ancak drenaja izin verildikten sonra meydana gelecektir. Rowe hücresi ile ilgili olarak daha fazla ayrıntı Rowe ve Barden (1966) tarafından sunulmuştur. Bununla birlikte homojen olamayan killerde zemin iç yapısının etkileri de Rowe hücresi konsolidasyon aletinde incelenebilmektedir. Homojen olamayan killer üzerindeki bir araştırmanın sonuçları 12. Rankine Sempozyumunda sunulmuştur.

Rowe konsolidasyon aletinde büyük çapta numuneler kullanılarak deney yapma olanağı oturma analizleri için klasik ödometrelerde yapılan küçük çaptaki numunelere göre daha güvenilir ve arazide meydana gelen üç boyutlu konsolidasyon durumu için daha fazla bilgi sağlamaktadır. Benzer şekilde Rowe hücresinde özellikle küçük gerilmeler altında konsolide edilen büyük boyutlardaki numunelerden elde edilen  $c_v$  değerleri, geleneksel ödometrelerde küçük çaplı deney numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen  $c_v$  değerlerine göre daha doğru ve daha güvenilir değerler vermektedir (McGrown, Barden, Lee, 1974). Ayrıca, Rowe hücresinde yapılan konsolidasyon deney sonuçları arazide gözlenen ve belirlenen oturma hızları ve büyüklükleri ile oldukça iyi bir uyum göstermektedir (Lo, Bozozuk ve Law, 1976). Bu durumun, zemin iç yapısının etkisinden ayrı olarak büyük numunelerde oluşan yapısal vizkozitenin bir sonucu olduğu da araştırmacılar tarafından belirtilmektedir.

Araziden alınan bir zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler, zeminin arazideki doğal halini mümkün olduğu kadar iyi temsil edebilir nitelikteki numuneler üzerinde yapılmalıdır. Özellikle zemin içerisinde rastlanan makro-yapısal etkilerin, diğer bir deyimle zemin iç yapısının, deney sonuçlarına olan etkisi özellikle tabakalaşmış çökellerde göz ardı edilemez boyutlardadır. Bahsedilen bu durum göz önüne alındığında büyük boyutlardaki numunelerinin Rowe hücresinde deneye tabi tutulması ile zeminlerin yukarıda belirtilen makro-yapısal etkileri de gözardı edilmeyerek konsolidasyon sürecinin içersine dahil edilmiş, ve böylece, konsolidasyon hızının gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesi de sağlanmış olmaktadır (Rowe, 1968 ve 1972). Bununla birlikte, büyük çaptaki numunelerdeki makro-yapısal etkiler, küçük numuneler göre daha az örselenmeye maruz kalırlar. Aşırı örselenmeler,  $e$ -log  $p$  dağılımını etkilemekte ve gerilme tarihçesi hakkında belirsizlikler ve karmaşıklığa neden olmakta, özellikle önkonsolidasyon basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı hakkında düşük değerler vermektedir. Ayrıca, düşük gerilmelerde hacimsel sıkışma katsayıları ( $m_v$ ) için



yüksek değerler vermektedir. Bahsedilen bu olumsuzluklar, yüksek kalitede ve büyük çaplardaki numunelerde en aza indirilmekte ve zemin hakkında daha güvenilir ve gerçekçi bilgiler elde edilmektedir. Rowe hücresinde büyük çaptaki numuneler üzerinde bilinen gerilme koşulları altında yatay ve düşey permeabilite katsayılarını doğru olarak tahmin etmek mümkün olabilmektedir. Ayrıca, 250 mm çapındaki Rowe hücresi, yatay permeabilite katsayısının ölçülebilmesi için, numune içinde merkezi bir düşey drenin oluşturulabilmesi ne de imkan tanımaktadır.

Rowe hücresi kullanılarak yapılan deneyler değişik kategorilerdeki zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Hazırlanabilecek numune kategorileri şu şekilde özetlenebilir;

1. Örselenmemiş zemin numuneleri: Sondaj tüpünden numune çıkarıcı yardımı ile veya blok halindeki örselenmemiş bir zemin örneğinden tıraşlamak sureti ile elde edilir.
2. Sıkıştırılarak hazırlanmış zemin numunesi: Hücre içerisinde statik veya dinamik yöntemlerle sıkıştırılarak hazırlanmış zemin numuneleridir.
3. Yoğrulmuş( yeniden yapılandırılmış) numuneler: Bulamaç halindeki zemin numunesi Rowe hücresinde konsolide edilerek daha sonraki deneylerde kullanılır.
4. Farklı yerlerde daha önceden yoğrulmuş veya sıkıştırılmış zemin numunelerinin tıraşlanarak ya da tıraşlanmayarak örselenmemiş bir zemin numunesi gibi Rowe hücresine aktarılmasıdır.

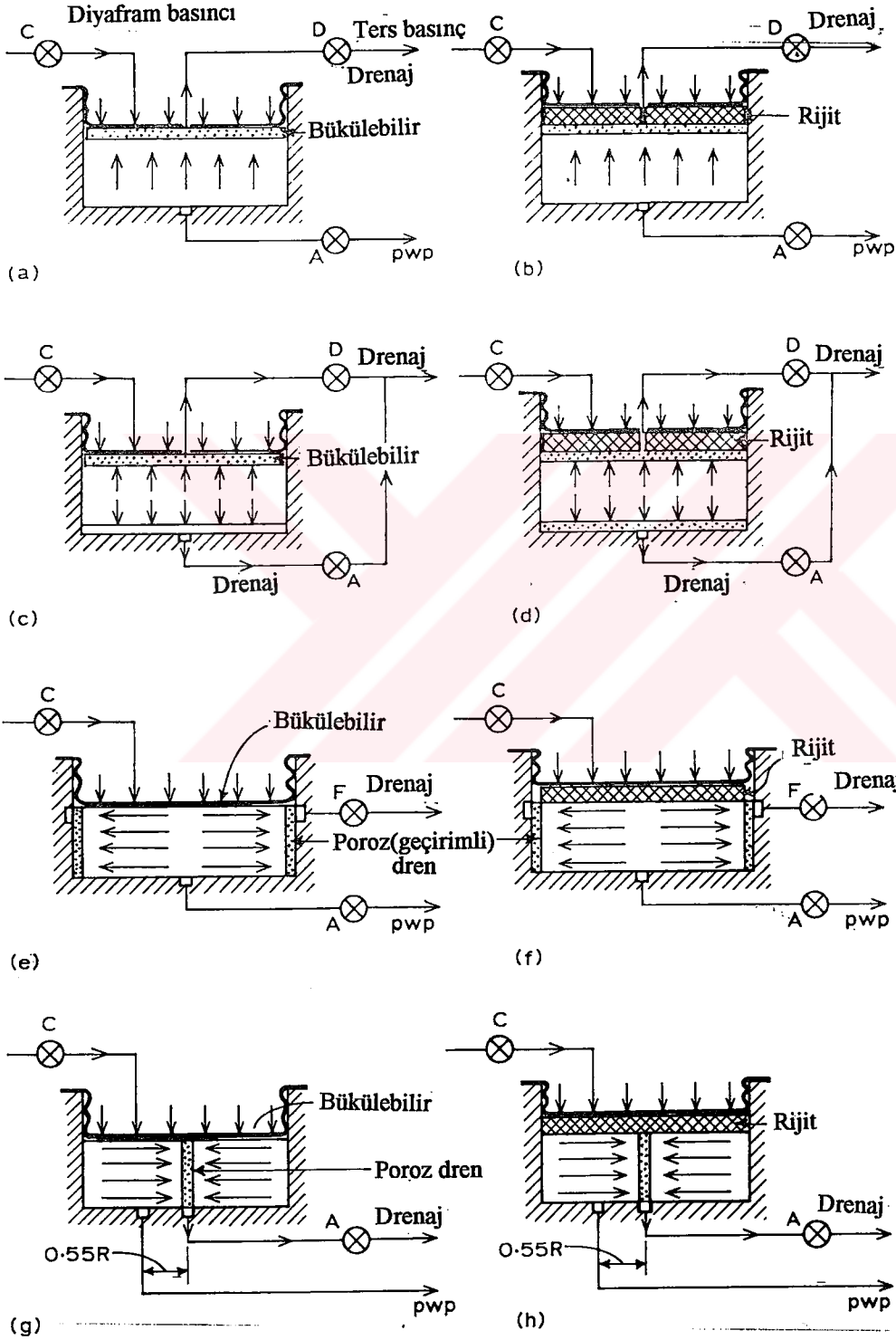
#### **4.4.2 Rowe Hücresinde Gerçekleştirilen Deneyler**

Rowe hücresinde farklı drenaj koşulları altında farklı yükleme şekilleri kullanılarak konsolidasyon ve permeabilite deneyleri yapılabilmektedir.

##### **4.4.2.1 Konsolidasyon deneyleri**

Yukarıda bahsedilen numune kategorilerinde dört farklı drenaj koşulu ve iki farklı yükleme şekli (eşit şekil değiştirme, serbest şekil değiştirme) kullanılarak toplam 8 farklı konsolidasyon deneyi gerçekleştirilebilmektedir. Mümkün olan sekiz farklı drenaj ve yükleme şekilleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Pratikte bu kombinasyonların tümü kullanılmamaktadır.

**a.Serbest şekil değiştirmeli, tek yönlü düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri:** Numunenin üst yüzeyinden tek yönlü drenaj sağlanır ve boşluk suyu basıncı tabandan ölçülür. Numune yüzeyine yerleştirilen bükülebilir bir plaka yardımı ile uniform bir basınç dağılımı ve serbest şekil değiştirme sağlanır (Şekil 4.3a).



Şekil 4.3 Rowe hücresi konsolidasyon deneyleri için drenaj ve yükleme koşulları

**b.Eşit şekil değiştirmeli, tek yönlü düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

Serbest şekil değiştirmeli tek yönlü düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri ile benzerdir, fakat zemin üst yüzeyine düzlemsel bir yüzey oluşturabilmek amacı ile rigid bir plaka konularak tüm numunenin eşit şekil değiştirmesi sağlanır (Şekil 4.3b).

**c.Serbest şekil değiştirmeli, çift yönlü düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

Gerçekleştirilecek olan konsolidasyon deneyi için drenaj aynı anda numune üst yüzeyinden ve alt yüzeyinden sağlanarak boşluk suyu basıncı ölçülmeksizin serbest şekil değiştirmeli olarak gerçekleştirilir (Şekil 4.3c).

**d.Eşit şekil değiştirmeli, çift yönlü düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

Bir önceki deneye benzer olarak fakat eşit şekil değiştirmelerin sağlanabilmesi için numunenin üst yüzeyine rijit bir plaka konularak gerçekleştirilir (Şekil 4.3d).

**e. Serbest şekil değiştirmeli, dışarı yönlü yatay drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

Numunenin üst ve alt yüzeylerinin herhangi bir drenaj etkisine karşı geçirimsiz bir materyalle kaplandığı ve yatay drenajın numune çevresinde oluşturulan geçirimli bir sınıra doğru oluşturulduğu serbest şekil değiştirmeli deneydir (Şekil 4.3e).

**f. Eşit şekil değiştirmeli, dışarı yönlü yatay drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

Eşit şekil değiştirme koşulları altında (e)'de bahsedilen şekilde gerçekleştirilen deneydir (Şekil 4.3f).

**g. Serbest şekil değiştirmeli içeri yönlü yatay drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

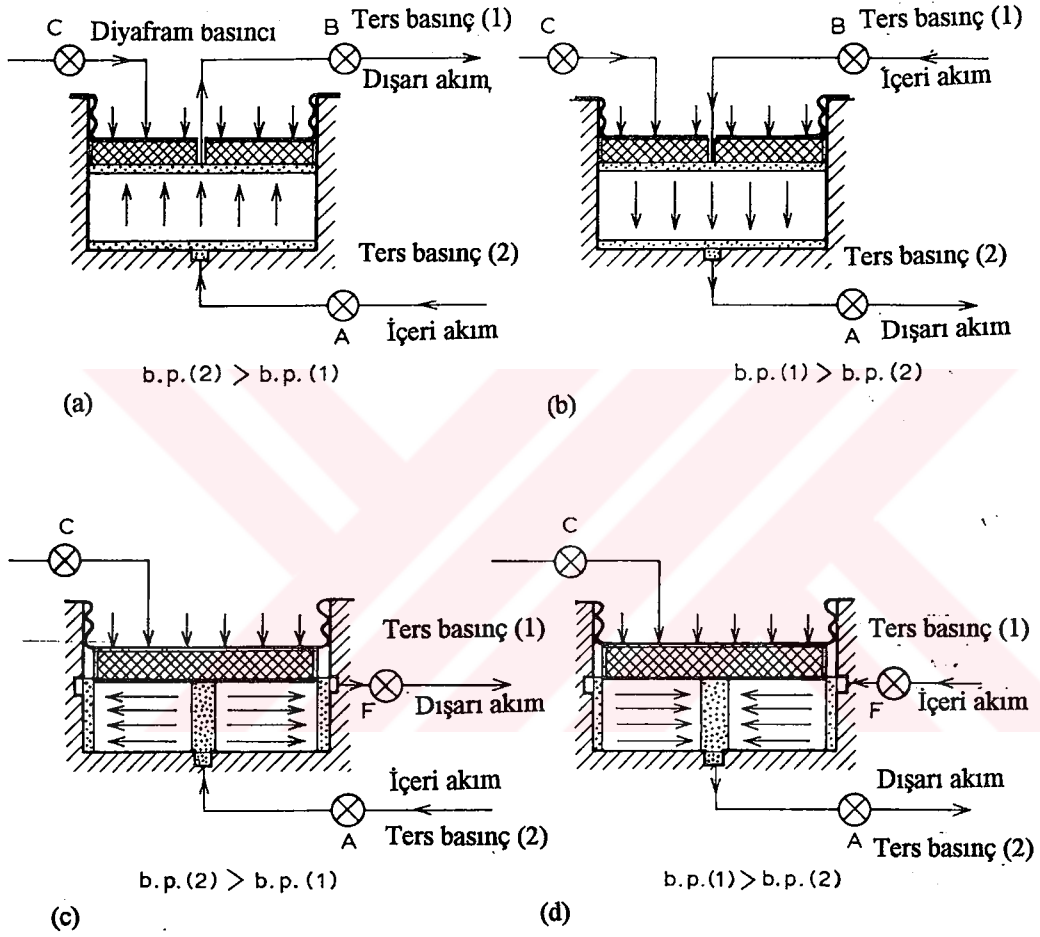
Serbest şekil değiştirmeler altında merkezde oluşturulan düşey bir drene doğru yatay drenaj oluşturulur. Boşluk suyu basıncı merkezden  $0.55R$  ( $R$ , hücrenin yarıçapı) mesafede ölçülür (Şekil 4.3g).

**h.Eşit şekil değiştirmeli içeri yönlü yatay drenajlı konsolidasyon deneyleri:**

Eşit şekil değiştirmeler altında serbest şekil değiştirmeli içeri yönlü yatay drenajlı konsolidasyon deneyine benzer bir konsolidasyon deneyidir (Şekil 4.3h).

#### 4.4.2.2 Permeabilite deneyleri

Permeabilite katsayısının direkt olarak belirlenebilmesine yönelik olarak yapılan permeabilite deneyleri, konsolidasyon deneylerine benzer olarak yukarıda bahsedilen dört tipteki numune kategorilerinde gerçekleştirilebilmektedir. Rowe hücresinde gerçekleştirilen dört tip permeabilite deneyi ve bu deneylerin akım koşulları Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Rowe hücresinde permeabilite deneyleri için akım koşulları

- a. Su akımının düşey olarak yukarı yönlü oluşturulduğu permeabilite deneyi (Şekil 4.4a).
- b. Su akımının düşey olarak aşağı yönlü oluşturulduğu permeabilite deneyi (Şekil 4.4 b).
- c. Su akımının yatay olarak geçirimli düşey kenarlara doğru gerçekleştirildiği permeabilite deneyi (Şekil 4.4c)
- d. Su akımının yatay olarak merkezde oluşturulan bir düşey drene doğru oluşturulduğu permeabilite deneyi (Şekil 4.4d)

Rowe hücresinde gerçekleştirilen permeabilite deneyleri çoğunlukla uniform bir kalınlığının elde edilebilmesi amacı ile eşit şekil değiştirmeli deneyler olarak yapılır. Permeabilite katsayısının belirlenebilmesi için kullanılan eşitlikler düşey akım koşullarında permeametre deneyi için kullanılan hesaplamalara benzerken, radyal akımlı deneyler için farklı bir eşitliğe ihtiyaç duyulmaktadır.

#### 4.4.2.2.1 Radyal Permeabilite Deneyi

Rowe hücresine yerleştirilen silindirik biçimli bir zeminin yatay (radyal) permeabilitesini elde edebilmek için permeabilite deney sistemi Şekil 4.4c veya Şekil 4.4d'de görüldüğü gibi gösterilebilir. Şekil 4.5'de ise radyal akım sırasında zemin numunesi ve oluşan basınç dağılımı gösterilmektedir. Kullanılan semboller şu şekilde açıklanabilir;

$$\text{Numune çapı} = D = 2r_2$$

$$\text{Merkezi dren çapı} = d = 2r_1$$

$$\text{Numune Yüksekliği} = H$$

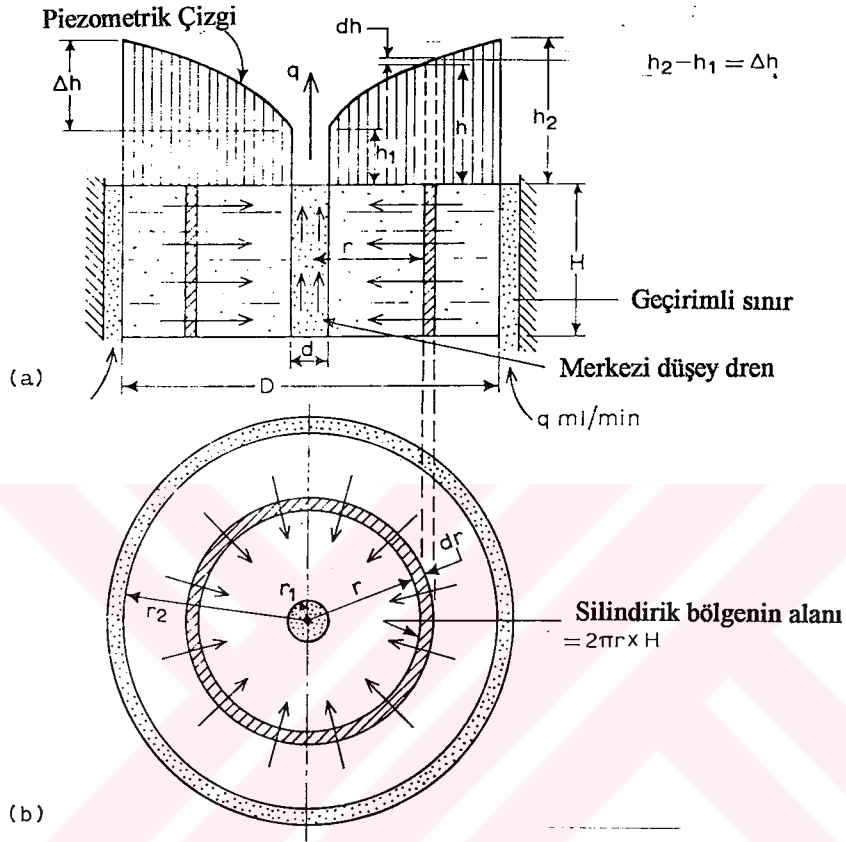
$$\text{Yanal drenden merkezi drene doğru akan suyun debisi} = q = Q/t$$

$$\text{Merkezden } r \text{ mesafesinde suyun yüksekliği} = h$$

$$\text{Merkezden } r \text{ mesafesindeki suyun akım hızı} = v$$

$$\text{Zeminin radyal permeabilitesi} = k_r$$

Eksenel olarak simetrik olan radyal akım koşulları, normalde permeabilite hesaplamaları için kabul edilen laminer akım koşullarına benzememektedir. Bunun nedeni ise, merkezde oluşturulan düşey drene doğru akım hızının artmasıdır. Ancak Şekil 4.5b'de gösterilen oldukça ince bir zemin elemanına Darcy yasası uygulanabilir. Suyun oluşan debisi,  $q$ , yarıçaptan bağımsızdır.



Şekil 4.5 Radial permeablite deneyi sırasında oluşan basınç dağılımı

Darcy eşitliğine göre ;

$$q = A \cdot k \cdot i \quad (4.1)$$

r yarıçapındaki bir ring için;  $A = 2\pi rH$

$$i = \frac{dh}{dr}$$

$$q = 2\pi rH \frac{dh}{dr} \cdot k_r \quad (4.2)$$

(4.2) no'lu eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenir,

$$k_r \cdot dh = \frac{q}{2\pi h} \cdot \frac{dr}{r}$$

ve elde edilen bu eşitliğin  $r=r_1$  ve  $r=r_2$  limitleri arasında integrasyonu alınır,

$$k_r (h_2 - h_1) = \frac{q}{2\pi H} \cdot \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (4.3)$$

Burada  $(h_2 - h_1)$  terimi, düşey drenaj sınırlarında meydana gelen hidrolik yük farkıdır ve basınç farkı ( $\Delta p$ ) olarak ta aşağıdaki eşitlik kullanılarak ifade edilebilir,

$$(\Delta p) = \Delta h \cdot \rho \cdot g = (h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot g$$

Bu ilişki (4.3) no'lu eşitlikte yerine konulursa,

$$k_r = \left( \frac{q \cdot \rho \cdot g}{2\pi H \cdot \Delta p} \right) \cdot \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (4.4)$$

olarak yatay (radyal) permeabilite katsayısı elde edilmiş olur.

#### 4.4.2.2 Düşey Permeabilite Deneyi

Düşey permeabilite katsayısı üç eksenli basınç deneyinde düşey permeabilite katsayısının belirlenme esaslarına dayanmaktadır ve hemen hemen aynı eşitlik kullanılmaktadır.

$$k_v = \frac{q \cdot L}{60 \cdot A \cdot 102 \Delta p} \quad (4.5)$$

Burada  $q$ , birim zamanda geçen su akımı (ml/dakika)

$L$ ; numunenin boyu (mm)

$A$ ; numunenin kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )

$\Delta p$ ; numunede oluşturulan basınç farkı (kPa)

Bu durumda,  $\Delta p = (p_1 - p_2)$  ve  $L=H$  olarak tarif edilirse ve eşitlik aşağıdaki gibi yeniden düzenlenirse permeabilite katsayısı m/s cinsinden elde edilebilir.

$$k_v = \frac{1.63 \cdot q \cdot H}{A(p_1 - p_2)} \times 10^{-4} \text{ (m/s)} \quad (4.6)$$

#### 4.5 Numunenin Hazırlanması ve Rowe Hücrelerine Yerleştirilmesi

Siyah kil ve yeşil kil numunelerinden sulu çamur (slurry) kıvamında numune hazırlamak için numuneler etüvde kurutulmuş ve daha sonra öğütülerek 40 no'lu elekten geçirilmiştir. 40 no'lu elekten geçirilmiş kısımlar, su muhtevaları likit limitlerinin yaklaşık 1.5 katı olacak şekilde saf su ile karıştırılarak bulamaç haline getirilmiştir. Hazırlanan bulamaçlar yaklaşık olarak 2-3 hafta süre ile hava ile teması olmayan bir kapta bekletilerek ve zaman zaman mikserle karıştırılarak danelerin segregasyonu önlenmiş ve numunelerin homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Böylece numune suya doymun hale de getirilmiştir.

Bulamaç halindeki numuneler, Rowe hücrelerine yerleştirilmeden önce yarım saat karıştırılarak konsolidasyona hazır hale getirilmiştir. Bulamacın başlangıçtaki konsolidasyonu sırasında hacim değişiminin çok fazla olacağı göz önünde bulundurularak, konsolidasyon sırasında üst üste iki hücre gövdesi kullanılmış ve böylece permeabilite deneyleri için yeterli kalınlıkta numuneler elde edilmesi amaçlanmıştır.

#### 4.6 Düşey Yönlü Konsolidasyon Deneyleri

Sulu çamur kıvamında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan düşey yönlü konsolidasyon aşamasında yukarıda da bahsedildiği gibi iki adet hücre gövdesi kullanılmıştır. Rowe hücrelerinin tek gövde kullanılarak düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Hücre tabanında yer alan poroz diskin tıkanmasını önlemek amacı ile hücrenin alt kısmına iki adet poroz kağıt konularak bulamaç halindeki numune hücreye boşaltılmıştır. Numune üzerine düşey yönde drenajı sağlamak amacı ile poroz disk ve numune kalınlığının uniform ve konsolidasyon sonunda numune üst yüzeyinin düzgün bir şekilde olabilmesi için rigid bir plaka yerleştirilmiştir. Drenajın üstten olabilmesi için ise rigid plakanın ortasındaki delik açık bırakılmıştır. Rowe hücrelerinin üst başlığı sıkıca kapatılarak tüm gövde boyunca yer alan bütün bağlantılar sıkıca vidalanmıştır. Rowe hücreleri üst başlığında yer alan lastik körüğün içerisi su ile doldurulmuştur. Lastik körüğün su ile doldurulmasından sonra sisteme C vanasından gerekli konsolidasyon basıncı uygulanarak sulu çamur halindeki numunenin düşey yönlü olarak konsolide olması sağlanmıştır. Konsolidasyon sırasında F vanası kapalı tutulmuş, çift yönlü drenajı sağlamak için ise A ve D



vanaları açık tutulmuştur. Konsolidasyon esnasında oluşan düşey deformasyonlar ve drenaj sırasında çıkan su miktarları belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Konsolidasyon sırasında meydana gelen düşey deformasyonlar bir transdüser tarafından bilgisayar aracılığı ile ölçülmüştür. Numunenin belirli bir konsolidasyon basıncı altında konsolidasyonunu tamamlayıp tamamlamadığına karar verebilmek için konsolidasyon sırasında oluşan oturma miktarları zamana karşı çizilmiştir. Her bir gerilme kademesi için düşey konsolidasyon deneylerinden elde olunan oturma-zaman grafikleri eklerde gösterilmiştir.

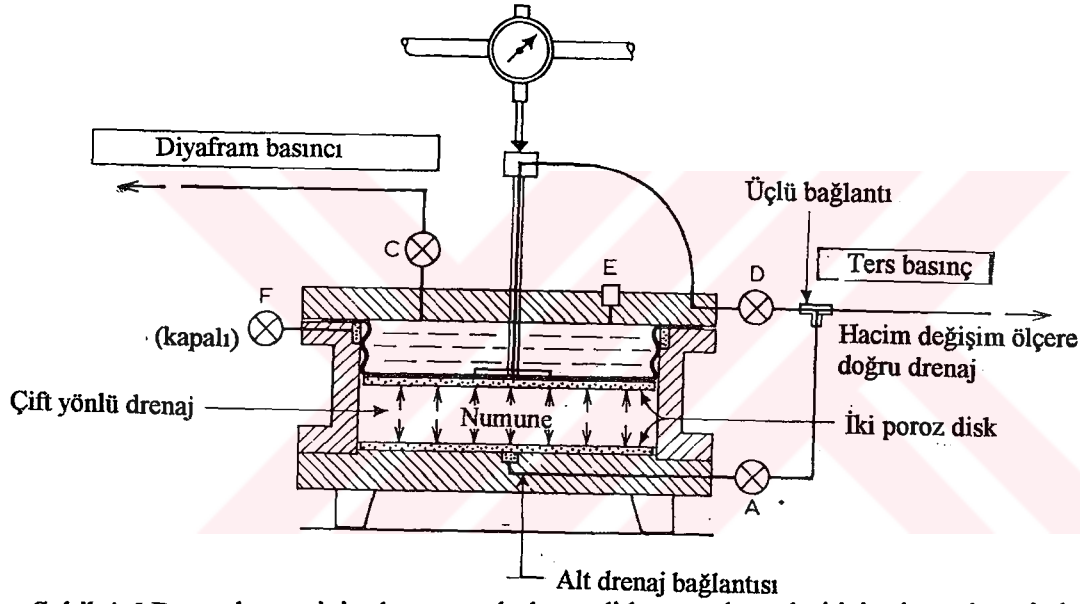
Baraj temel zeminin oluşturan yeşil kil ve siyah kil numuneleri bu şekilde arazideki düşey jeolojik efektif gerilmeye (Çizelge 4.2a ve 4.2b) kadar konsolide edilerek düşey permeabilite deneyi için hazır hale getirilmiştir. Bundan sonraki adımlarda ise numuneler üzerinde düşey jeolojik efektif gerilmeye denk gelen gerilmeden başlanarak yeşil kil için çizelge 4.2a ve siyah kil için ise Çizelge 4.2b'deki yükleme kademelerine karşılık gelen gerilmeler altında önce düşey yönlü konsolidasyon deneyi, konsolidasyonun tamamlanmasının ardından ise düşey yönlü permeabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Düşey yönlü permeabilite deneyi için aşağıdaki gibi bir yol izlenilmiştir.

#### 4.7 Düşey Yönlü Permeabilite Deneyleri

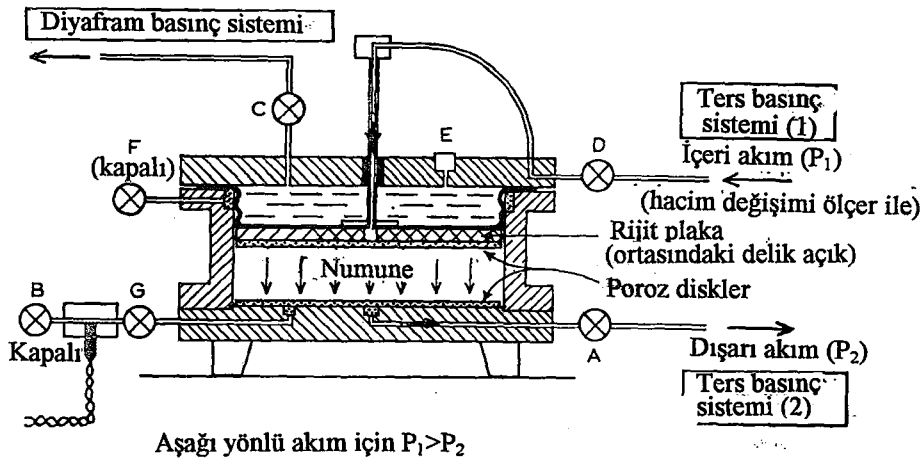
Konsolidasyon aşamasının tamamlanmasından yapılan düşey yönlü permeabilite deneyleri tek bir hücre gövdesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun ana nedeni, numuneye basıncı hidrolik olarak etkilenen diaframın açılma miktarının sınırlı olmasıdır. Artan deformasyonlarla birlikte diafram boyunun numunenin üst yüzeyine erişemeyebileceği düşünülerek ve bu tür bir olumsuzluğu engellemek amacı ile numune tek bir gövdeye aktarılmış ve fazlalık olan üst kısmı traşlanmak sureti ile hücre boyuna ve diaframın yerleşmesi için uygun hale getirilmiştir. Numunenin üzerine poroz disk onun üzerine ise rijit plaka yerleştirilmiştir. Drenajın üst taraftan sağlanabilmesi için rijit plaka ortasındaki delik açık bırakılmıştır. Hücre kapağı kapatılarak tüm bağlantılar sıkıca vidalanmıştır. Rowe hücresinin permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi C vanasından düşey olarak istenilen konsolidasyon basıncı verilebilmektedir. Permeabilite deneyinin gerçekleştirilebilmesi için numune içerisinde oluşturulması gereken hidrolik yük farkı, A vanası ile D vanası arasında bir basınç farkı oluşturulmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan basınç farkının seçiminde, Çizelge 4.3'te ASTM D5084 tarafından zeminlerin permeabilitelerine göre uygulanabilecek önerilen maksimum hidrolik eğim değerleri göz önünde bulundurulmuş, fakat uygulanan konsolidasyon basınçları altında, önerilen maksimum hidrolik eğim değeri olan 30 numune içerisinde akım oluşturmak için yeterli olmamıştır.

Çizelge 4.3 Zeminlerin permeabilite katsayılarına göre önerilen maksimum hidrolik eğim değerleri (ASTM D5084)

Zeminin permeabilitesi (m/s)	Maksimum hidrolik eğim
$10^{-5}$ - $10^{-6}$	2
$10^{-6}$ - $10^{-7}$	5
$10^{-7}$ - $10^{-8}$	10
$10^{-8}$ - $10^{-9}$	20
$<10^{-9}$	30



Şekil 4.6 Rowe hücresinin düşey yönlü konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali



Şekil 4.7 Rowe hücresinin düşey yönlü permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali

Bununla birlikte yüksek hidrolik eğim uygulanması sonucu numune içerisinde oluşabilecek borulanma ve erozyonu engellemek amacı ile, basınç farkının uygulanan düşey efektif gerilmenin %15-%20'ni aşmamasına dikkat edilmiştir (Little, Wood,Paul, Bouazza, 1992).

Permeabilite deneyi sırasında, A vanası bir hortum vasıtası ile atmosfere açık bir bürete bağlanmıştır ( $p_2=0$ ). D vanasından ise sabit bir  $p_1$  basıncı ile su verilmiştir. Numune içerisinde D vanasından giren su miktarını ölçebilmek amacı ile vana bir hacim değişimi ölçere bağlanmıştır. Hacim değişim ölçer aygıtı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Böylece belirli zaman aralıklarında numune içerisine giren su miktarı hacim değişimi ölçer ile, çıkan su miktarı da A vanasına bağlı bulunan büret vasıtası ile ölçülmüştür. Her bir zaman aralığında numune içerisine giren ve çıkan su miktarları geçen zamana bağlı olarak çizilmiştir. Deney kararlı su akımının olduğu ana kadar yani giren ve çıkan su miktarlarının zamana göre dağılımları birbirine paralel olana kadar devam ettirilmiştir. Kararlı akım koşullarına ulaşılması için geçen süre yaklaşık 6 saat ile 12 saat sürmüştür. Bazı durumlarda kararlı akım koşullarının olduğundan emin olmak için deney 24 saat kadar devam ettirilmiştir. Permeabilite deneyinde ölçülen birim zamandaki akım miktarı ( $q$ ) 4.6 eşitliğinde yerine konularak belirli bir düşey gerilme altında numunenin düşey permeabilite katsayısı hesaplanmıştır. Düşey yönlü permeabilite deneyleri için çizilmiş olan Q-t grafikleri eklerde gösterilmiştir.

Böylece barajın kademeli inşaa programı dikkate alınarak yapılan numerik analizler sonucunda hesaplanmış olan ve Çizelge 4.2a ve Çizelge 4.2b'de verilmiş olan gerilmeler, 7.50m derinlikte yer alan yeşil kil ve19.0m derinlikte yer alan siyah kil elemanları (Şekil 4.2) üzerine etkilerek, bu gerilmeler altında önce düşey yönlü konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiş, birincil konsolidasyonun tamamlanmasından hemen sonra ise düşey yönlü permeabilite deneylerine geçilmiştir. Bu şekilde barajın kademeli olarak inşaatı modellenmeye çalışılarak, her bir yükleme kademesi sonundaki düşey permeabilite katsayısı elde edilmiştir.

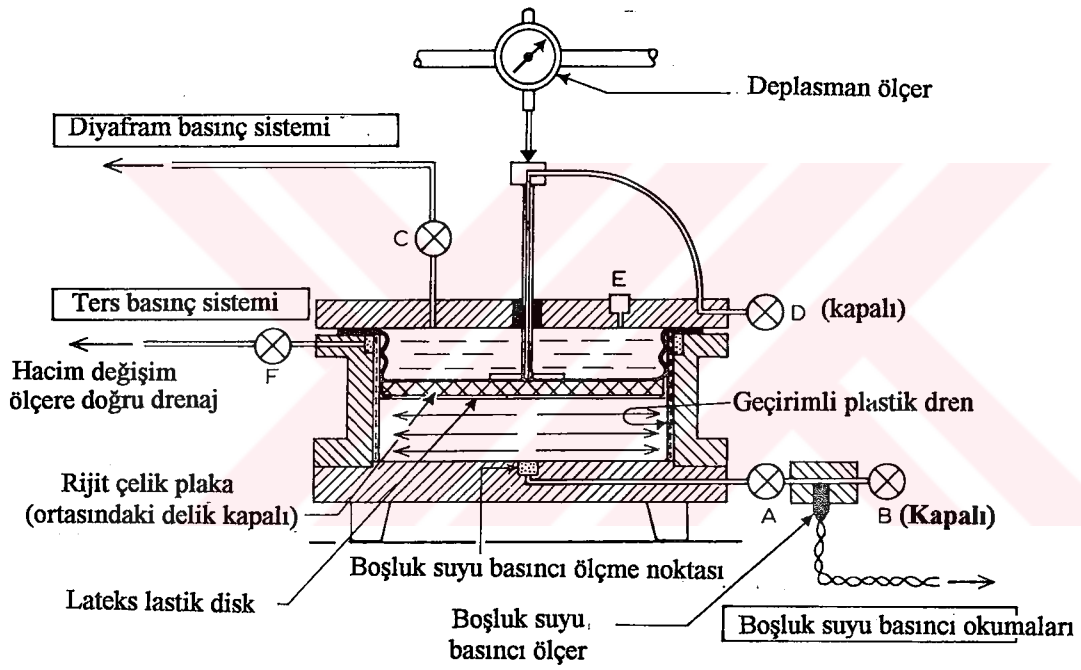


Şekil 4.8 Hacim değişim ölçer

#### 4.8 Dışarı Yönlü Yatay Drenajlı Konsolidasyon Deneyleri

Baraj temel zeminin radyal (yatay) yöndeki permeabilite katsayısının kademeli yükleme altındaki değişimini belirleyebilmek için, örselenmiş numunelerden bulamaç (slurry) kıvamında hazırlanan yeşil kil ve siyah kil numuneleri üzerinde arazideki düşey jeolojik efektif gerilmeye kadar dışarı yönlü yatay drenajlı konsolidasyon deneyleri (Şekil 4.3f) gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Sistemin dışarı yönlü yanal drenajlı konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali Şekil 4.9'da gösterildiği gibidir. Bu deneyi gerçekleştirebilmek için hazırlanan numune hücreye aktarılmadan önce radyal akımı sağlayan yanal dren Rowe hücresi çeperine yerleştirilmiştir. Hücre tabanına, tabanda yer alan poroz taşın tıkanmasını engellemek amacı ile iki kat poroz kağıt yerleştirilmiştir. Yanal drenin ve poroz kağıtların yerleştirilmesinin ardından yaklaşık likit limitinin 1.1 katı kıvamda hazırlanan karışım hücreye boşaltılmıştır. Karışım Rowe hücresine yerleştirildikten sonra, numune üzerine düşey drenajı engellemek amacı ile, numune çapına göre kesilmiş geçirimsiz bir membran ve onun üzerine de numuneye eşit şekil değiştirme yapma imkanı tanıyan rijit plaka yerleştirilmiştir. Rijit plakanın ortasında yer alan delik ise herhangi bir su çıkışı engellemek amacı ile kapatılmıştır. Düşey yönlü konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi, deney Rowe hücresi gövdesi üzerine ikinci bir gövde eklenmek sureti ile gerçekleştirilmiştir. Rowe hücresi üst başlığı kapatıldıktan sonra üst başlıkta yer alan lastik membranın içi su ile doldurulmuştur. Sisteme basınç Şekil 4.9'da gösterildiği gibi C vanasından uygulanarak slurry kıvamındaki zemin örneğinin konsolide olması sağlanmıştır. Konsolidasyonun radyal (yatay) yönlü olarak gerçekleşebilmesi amacı ile sistemin düşey drenajı sağlayan vanaları (Dve B vanaları) kapalı tutulmuş sadece yatay drenajı sağlayan F vanası açık tutulmuştur. Böylece numunenin yatay yönlü olarak arazideki jeolojik efektif gerilmeye kadar konsolide olması sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak yapılan deneme deneyleri sonucunda radyal yönlü konsolidasyon deneylerinin özellikle büyük hacimlerdeki numuneleri konsolide edebilmek için uygun bir yöntem olmadığı görülmüştür. Çünkü radyal drenaj numunede uniformsuzluklara neden olmaktadır. Bu durumun özellikle bulamaç halindeki numunelerin konsolidasyonu sırasında önemli bir dezavantaj olduğu Sills(1983) tarafından da belirtilmiştir. Numunede oluşan uniformsuzluğun nedeni aşağıdaki şekilde açıklanabilmektedir:

Sistemin yatay drenaja izin verilmesiyle birlikte numune çevresindeki boşluk suyu basıncı hızla düşmekte ve bu da numune çevresindeki efektif gerilmelerin hızlı bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda ise, numunenin yanal drenlere yakın olan ve temas eden kısımları daha hızlı katılırken, numune ortası ve civarları efektif gerilmelerin daha az olması



Şekil 4.9 Rowe hücresinin dışarı yönlü radyal konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali

nedeni ile yeterince katılaşamamaktadır . Bu durum ise radyal permeabilite deneyleri için numune ortasına kum drenin yerleştirilebilmesini zorlaştırmaktadır. Radyal konsolidasyon deneyi sırasında karşılaşılan bu sorunu çözebilmek ve radyal permeabilite deneyleri için elverişli bir numune elde edebilmek için, aşağıdaki yol izlenmiştir.

Hazırlanan numune hücreye aktarılmadan önce, radyal akımın oluşmasını sağlayan yanal dren Rowe hücresine yerleştirilmiştir. Numune daha önceki kısımlarda anlatıldığı gibi hücre içerisine boşaltılmıştır. Numune üzerine düşey drenajın sağlanabilmesi için poroz disk yerleştirilmiş ve Rowe hücresinin üst başlığı kapatılmıştır. Sistemin deney için hazır hale getirilmesinden sonra, numune arazideki jeolojik efektif gerilmeye kadar kademeli olarak konsolide edilmiştir. Konsolidasyon sırasında yatay drenaja izin verilmeyerek sadece alttan ve üstten çift yönlü olarak konsolide edilmesi sağlanmıştır. Böylece radyal permeabilite deneyi için yeterli kıvamda numune elde edilmiştir.

Konsolidasyon aşamasında numunelere uygulanan nihai gerilmeler, daha önceden de belirtildiği gibi, baraj temel zemininde dolgu inşaatına başlanmadan önceki durumda zemin tabakalarının kendi ağırlıklarından dolayı oluşan ve Kılıç (2000) tarafından nümerik analiz sonucunda hesaplanmış düşey jeolojik efektif gerilmelerdir. Analizden belirlenmiş gerilmeler Çizelge 4.2a'da ve 4.2b'de görüleceği gibi yeşil kil için 7.50m derinlikte 77 kPa, siyah kil için ise 19.0m derinlikte 170 kPa değerindedir.

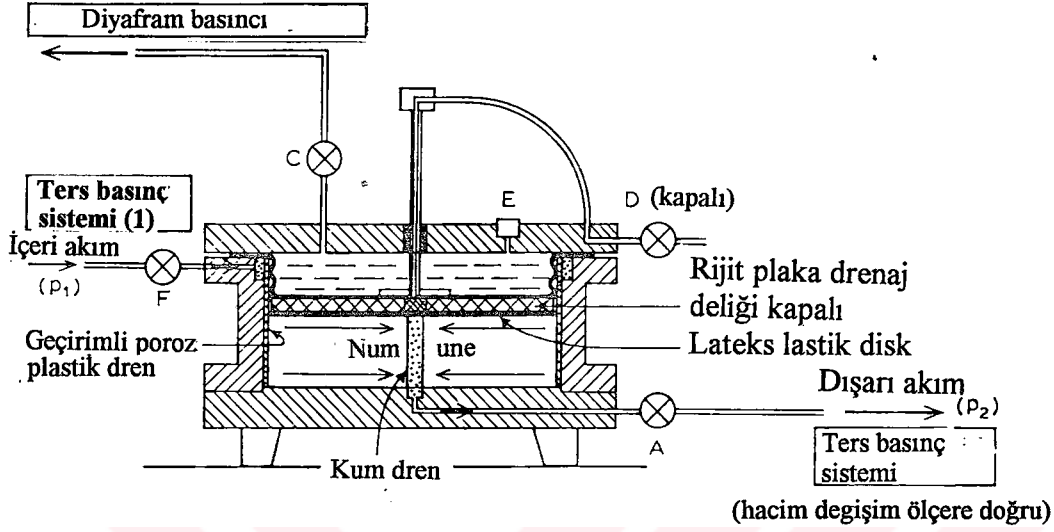
Bulamaç halindeki zemin örneğinin konsolidasyonunun kontrollü bir şekilde yapılabilmesi amacı ile, nihai gerilmeye aşamalar halinde yükleme yapılarak ulaşılmıştır. Bu amaçla siyah kil 25, 50, 100, 170 kPa'lık gerilme adımlarında, yeşil kil ise 25, 50, 77 kPa'lık gerilme adımlarında konsolide edilmiştir. Yapılan deneyler sırasında oluşan düşey deplasmanlar deformasyon ölçer vasıtası ile ölçülmüştür. Konsolidasyon sırasında uygulanan gerilmeler altında zeminin düşey deformasyonu ve çıkan su hacmi kontrol edilmiştir. Numunenin belirli bir konsolidasyon basıncı altında birincil konsolidasyonunu tamamladığına karar verebilmek için konsolidasyon sırasında ölçülen deformasyonlardan oturma- log zaman grafikleri çizilmiştir. Her bir gerilme kademesi için radyal konsolidasyon deneylerinden elde olunan oturma-zaman grafikleri eklerde gösterilmiştir.

#### **4.9 Radyal Permeabilite Deneyleri**

Baraj temel zemininde yer alan yeşil kil ve siyah kil tabakalarının yatay permeabilite katsayılarında barajın kademeli olarak inşa edilmesi sırasında meydana gelen değişimi belirlemek amacı ile, yeşil kil ve siyah kil numuneleri üzerinde radyal permeabilite deneyleri

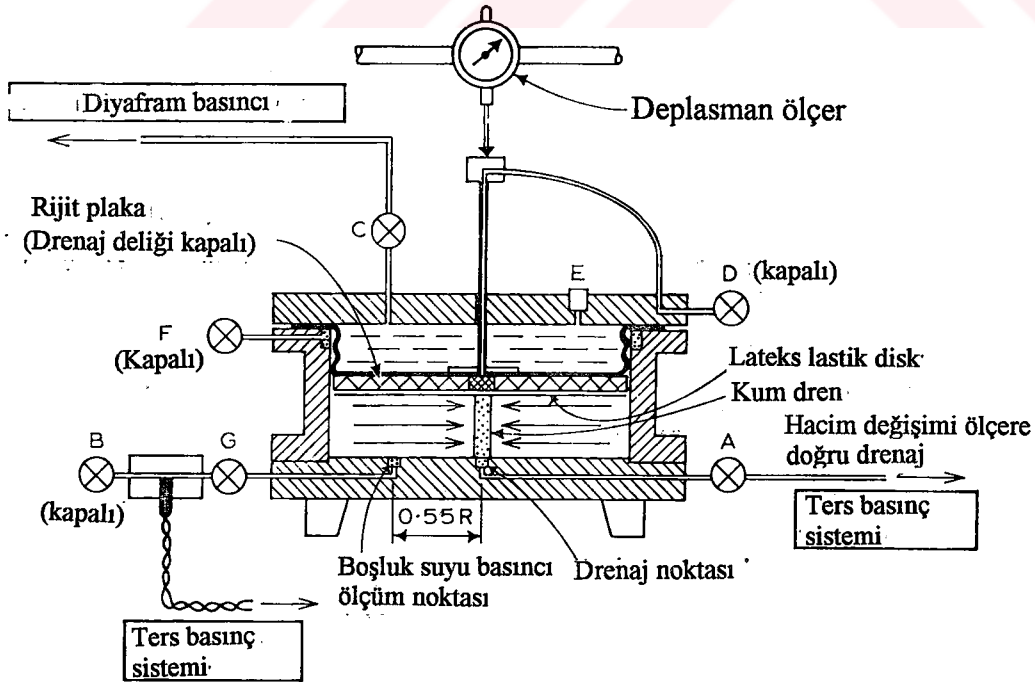
gerçekleştirilmiştir. Daha önceden de belirtildiği gibi, deneyler sırasında uygulanan gerilmeler Kılıç (2000) tarafından barajın kademeli olarak inşa programı dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda elde edilen ve Çizelge 4.2a ve Çizelge 4.2b'de verilmiş olan gerilmelerdir. Böylece yeşil kil ve siyah kil numunelerinin laboratuarda yanal permeabilite katsayısını belirlemek için numuneler önce belirli bir gerilme altında konsolide edilmiş, daha sonra ise yine o gerilme altında radyal permeabilite deneyi gerçekleştirilerek radyal permeabilite katsayısı belirlenmiştir. Radyal permeabilite deneylerinde aşağıdaki yol izlenmiştir.

Numunenin radyal permeabilite deneyleri için hazır hale getirilmesinden sonra, gerekli drenaj sınırlarının oluşturulması için numune ortasında bir kum dren oluşturulmuştur. Kum drenin numune ortasına yerleştirilmesinin ardından, numune üst yüzeyi herhangi bir su akımını engellemek amacı ile geçirimsiz bir plastik bir membranla kapatılmış ve üzerine de numuneye eşit şekil değiştirme imkanı sağlayan rijit bir plaka yerleştirilmiştir. Rijit plakanın ortasındaki delik kapalı tutulmuştur. Hücrenin üst başlığı kapatılarak tüm bağlantılar sıkıca vidalanmıştır. Rowe hücresinin radyal permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Daha sonra C vanasından numuneye konsolidasyon basıncı uygulanmıştır. Deney sırasında D vanası kapalı tutulmuştur. Permeabilite deneyinin gerçekleştirilebilmesi için numune içerisinde oluşturulması gereken hidrolik yük farkı ve dolayısı ile oluşacak akım ise F ve A vanaları arasında bir basınç farkı oluşturulmak sureti ile sağlanmıştır. Bunun için sabit basınç kaynağı hacim değişim ölçere bağlanmış, hacim değişim ölçer ise F vanasına bağlanarak numune içerisine belirli bir basınçta ( $p_1$ ) su girişi sağlanmıştır. Numune içerisine giren suyun numune içerisinden Şekil 4.10'da görüldüğü gibi yanal olarak kum drene doğru yönelmesi ve A vanasına bağlanan atmosfere açık bir bürete ( $p_2=0$ ) doğru hareket etmesi sağlanmıştır. Numune içerisine giren su miktarı bilgisayara bağlı olan hacim değişim ölçer (Şekil 4.8) vasıtası ile ve numuneden dışarı çıkan su miktarı ise büretten alınan düzenli okumalarla belirlenmiştir. Her bir zaman aralığında numune içerisine giren ve numuneden çıkan su miktarları geçen zamana bağlı olarak çizilerek, kararlı akım koşulları oluşana kadar deney devam ettirilmiştir. Kararlı akım koşullarının oluşup oluşmadığına ise akım miktarlarının zamana göre dağılımlarının birbirlerine paralel olup olmadığına bakılarak karar verilmiştir. Genel olarak, her bir basınç kademesinde numunelerde kararlı akım koşullarının oluşması için geçen süre, en fazla 24 saat olmuştur. Permeabilite deneyi sonucunda Q: t grafiğinin eğiminden o basınç kademesi altında zeminden birim zamanda geçen su miktarı (q) elde edilmiştir. Elde edilen q değeri yatay permeabilite katsayısını veren eşitlikte kullanılarak, her bir gerilme aşamasında zeminin yatay permeabilite katsayısı belirlenmiştir.



Radyal olarak içeri yönlü akım için  $p_1 > p_2$   
 Radyal olarak dışarı yönlü akım için  $p_2 > p_1$

Şekil 4.10 Rowe hücresinin radyal permeabilite deneyleri için düzenlenmiş hali



Şekil 4.11 Rowe hücresinin kum drene doğru radyal drenajlı konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali



Radyal yönlü permeabilite deneyleri sırasında her bir gerilme aşamasında elde edilen Q-t grafikleri eklerde gösterilmiştir.

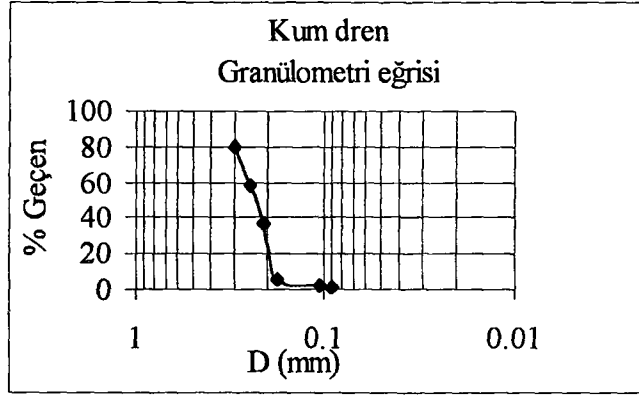
Radyal permeabilite deneyleri sırasında, dolgu kademelerini modellemek amacı ile uygulanan gerilmeler altında zeminin konsolidasyonu, numune merkezinde düşey bir kum drenin olduğu radyal konsolidasyon deneyleri ile sağlanmıştır. Şekil 4.11'den görüleceği gibi bu deneyler sırasında D ve F vanaları kapalı tutularak, drenaj A vanasından sağlanmıştır.

#### 4.9.1 Kum Drenin Oluşturulması

Literatürde radyal permeabilitenin deneysel olarak belirlenebilmesi için önerilen bir çok farklı yöntem rastlanılmaktadır. Üç eksenli deney aletinde yatay permeabilite katsayısının belirlenebilmesi için kullanılan yöntem haricinde, bir çok deney tekniğinde radyal permeabilitenin belirlenebilmesi için numune ortasında geçirimli bir sınır oluşturularak, su akımının yatay olarak yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Numune ortasında oluşturulacak geçirimli ortam için genellikle granülometrik ve geçirimlilik nitelikleri belirli özelliklerde olan kum kullanılmakla beraber, geotekstil materyaller ve geçirimli özellikteki farklı malzemeler de kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışmada ise, araştırmada incelenen yeşil kil ve siyah kil numunelerinin yatay permeabilite katsayısını belirleyebilmek için, Rowe hücresinde jeolojik efektif gerilmeye kadar konsolide edilen numunelerin ortasına kum dren yerleştirilmiştir. Yerleştirilen kum drenin granülometrik ve geçirimlilik özelliklerini belirlemek amacı ile granülometri analizi ve sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Gibson ve Shefford (1968) kum dreni oluşturacak kumun, dane çapı dağılımı  $90\mu$ - $300\mu$  arasında, yıkanmış temiz kum olmasını önermektedir. Araştırmacıların bu önerisi göz önünde tutularak, çalışma için alınan kum numunesi açıklık boyutu 0.3mm olan 50 no'lu elekten yıkanarak geçirilmiştir. 50no'lu elek altına geçen kısım açıklık boyutu 0.09 mm olan 170 no'lu elekten geçirilerek 170 no'lu elek üzerinde kalan kısım kum dren malzemesi olarak ayrılmıştır. Kum dren malzemesi üzerinde yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda ise permeabilite katsayısı  $2.71 \times 10^{-6}$  m/s olarak belirlenmiştir. Dren oluşturmak için kullanılacak kum kaynatılarak boşluklarının tamamen suya doymun olması sağlanmıştır. Kum dren numunesi üzerinde yapılan granülometri analizinden elde edilen dane çapı dağılımı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Kum drenin deney sırasında dren özelliklerini kaybetmemesi için ve kil danelerinin akım sırasında kum dren içine nüfuz etmesini engellemek amacı ile, kum dren ile kil numunenin arasına geotekstil konulmuştur. Geotekstilin geçirimliliğinin yüksek ve kum drene yönelebilecek kil danelerini tutabilecek kadar da yeterli filtrasyon özelliklerine sahip olması



Şekil 4.12 Kum drenin dane çapı dağılımı

gerektiği düşünülmüştür. Konulacak geotekstil tipinin belirlenebilmesinde filtrasyon ve tıkanma kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Geotekstillerin filtrasyon amaçlı kullanımı için yapılan daha önceki araştırmalar filtrasyon için iki ana kriterin dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir. Bunlar zemini tutma (soil retention) ve hidrolik geçirgenlik kriterleridir. Zemini tutma kriteri geotekstilin içsel erozyona ve tıkanmaya karşı olan güvenilirliğini göstermektedir. Filtrasyon için yapılan çalışmalarda hidrolik geçirgenlik kriterinin zemin içindeki danelerin %15'nin daha küçük olduğu çap değeri olan  $D_{15}$  ile ilgili olduğunu, borulanma sınırlarının ise ortalama dane çapı  $D_{50}$ ,  $D_{85}$  veya  $D_{90}$  ile ilgili olduğunu göstermektedir. Eğer zemin-geotekstil ile ilgili ayrıntılı bir bilgi yok ise aşağıda verilen kriterlerin kullanılabilmesi de önerilmektedir. Hidrolik geçirgenlik ve zemini tutma (soil retention) kriterleri için çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilmiş ilişkiler aşağıdaki gibidir.

$$k_n > 0.1 k_{\text{zemin}} \quad (\text{Giroud, 1982}) \quad (4.7)$$

$$O_{90} > D_{15} \quad (\text{Hidrolik geçirgenlik kriteri}) \quad (4.8)$$

$$O_{90} \leq D_{85} \quad (\text{zemini tutma kriteri}) \quad (4.9)$$

Siyah kil ve yeşil kil için yapılan hidrometre analizleri sonucunda yeşil kil ve siyah kil numunelerine ait  $D_{15}$ ,  $D_{85}$  değerleri Çizelge 4.4' te verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen kriterler dikkate alınarak ve farklı geotekstil tipleri kullanılarak yapılan deneme deneyleri sonucunda, FIBERTEX ürünü F32M tipi geotekstilin kullanımına karar verilmiştir. Seçilen geotekstile ait özellikler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Deneyde kullanılan killere ve geotekstile ait özellikler

	D <sub>15</sub> (mm)	D <sub>85</sub>	O <sub>90</sub> (mm)	K <sub>Darcy</sub> (m/s)
Yeşil kil	-	0.027	-	<10 <sup>-9</sup>
Siyah kil	0.008	0.06	-	<10 <sup>-9</sup>
F32-M geotekstili	-	-	0.11	37x10 <sup>-4</sup>

## 5. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirliğe sahip Alibey barajı temel zemininin aşamalı dolgu yükü altındaki permeabilite davranışının deneysel olarak incelenmesi hakkındaki araştırmanın sonuçları sunulmaktadır.

Alibey Barajı menba batardosu altında yer alan normal konsolide yeşil kil ve siyah kil tabakalarının permeabilite karakteristiklerini belirlemek amacı ile Rowe hücreleri olarak bilinen konsolidasyon aletinde düşey ve yatay permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle temel zemininde yer alan 10.0-14.5 m kalınlığındaki siyah kil ve 6.0-11.0 m kalınlığındaki yeşil kil tabakalarından alınan örselenmiş zemin numuneleri, su muhtevaları likit limitlerinin 1.5 katı olacak şekilde sulu çamur kıvamında hazırlanarak ve numune ortasına bir kum dren yerleştirilerek, arazide bu tabakalar üzerinde etkiyen düşey jeolojik efektif gerilmeye kadar konsolide edilmiştir. Farklı derinliklerde yer alan her iki kil tabakasından arazideki çökme koşullarını modelleyecek şekilde hazırlanan örnekler, daha sonra Kılıç(2000) tarafından nümerik analizler sonucu kademeli baraj inşaatı sırasında maruz kaldıkları belirlenen efektif asal gerilmeler altında önce konsolide edilmiş ve aynı gerilme değerleri altında yatay ve düşey permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen deneyler sonucunda yeşil kil ve siyah kil tabakalarının, barajın kademeli dolgu inşaatı sırasında uygulanan gerilmeler altındaki, yatay ve düşey permeabilite katsayılarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Temel zeminini oluşturan yeşil kil ve siyah kil tabakalarının permeabilite karakteristiklerinin kademeli dolgu yükleri altında konsolidasyona bağlı olarak değişiminin belirlenebilmesi için, her iki kilin düşey ve yatay permeabilitesinin boşluk oranı ile olan değişimi ve permeabilite anizotropileri incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen bulgular, Kılıç (2000) tarafından barajın kademeli yükleme sırasındaki gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışını araştırmak için yürütülen çalışmalarda kullanılan temel zeminine ait permeabilite ile ilgili parametrelerle karşılaştırılmıştır.

### 5.1 Permeabilite Katsayıları ve Konsolidasyon Katsayılarının Kademeli Yükleme Altında Değişimi

Yapılan düşey ve yatay permeabilite deneyleri sonucunda her bir gerilme kademesi için inceleme konusu yeşil kil ve siyah kil tabakalarının yatay ve düşey permeabilite katsayıları ile yine her bir gerilme kademesi için yatay ve düşey konsolidasyon katsayıları belirlenmiştir. Yeşil kil için ve siyah kil için belirlenen bu değerler sırası ile Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2' de

verilmiştir. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'den de görüleceği gibi yeşil kil ve siyah kil olarak nitelendirilen bu zeminlerin yatay ve düşey permeabilite katsayıları genel olarak sıkışma ile birlikte azalmaktadır. Yeşil kil tabakasından hazırlanan numunelerde ölçülen düşey permeabilite katsayılarında son iki gerilme kademesinde meydana gelen sapmanın deney sırasında meydana gelen yanlışlıklardan kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, her iki kil için elde edilen yatay permeabilite katsayısının genellikle, düşey permeabilite katsayısından biraz daha büyük olduğu gözlenmektedir.

Alibey barajı temel zeminine 1966 yılında farklı kesitler altında değişik derinliklerde çok sayıda piezometre yerleştirilmiştir. Fakat, piezometrelerden uzun süreli olarak ölçülen su basınçlarının tam olarak sağlıklı sonuçlar vermemesi nedeni ile, baraj dolgusunun kademeli olarak inşa edilmesi sırasında permeabilite katsayısının arazideki davranışı hakkında yeterli bilgi elde edilememiştir. Bununla birlikte, inşaat programında ilk olarak gerçekleştirilen menba batardosu altına yerleştirilen hidrolik piezometrelerden ilk bir yıl içinde alınan okumalardan yeşil kil tabakası için eşdeğer permeabilite katsayısının  $2 \times 10^{-8}$  m/s, siyah kil tabakası için ise  $3 \times 10^{-9}$  m/s olduğu belirlenmiştir (Soydemir,1970). Bu değerleri, barajın inşasına başlanmadan önceki duruma, yani arazideki düşey jeolojik efektif gerilmeler altında laboratuarda ölçülmüş eşdeğer permeabilite katsayıları ile karşılaştırabilmek için, laboratuarda ölçülmüş yatay ve düşey permeabilite katsayıları aşağıdaki eşitlik yardımı ile eşdeğer permeabilite katsayısına çevrilmiştir.

$$k = \sqrt{k_v k_h} \quad (5.1)$$

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilen deneysel sonuçlar kullanılarak (5.1) eşitliğinden yeşil kil için eşdeğer permeabilite katsayısı  $4.0 \times 10^{-9}$  m/s, siyah kil için ise  $1.5 \times 10^{-9}$  m/s olarak belirlenebilmektedir. Bu değerlerin siyah kil için arazi gözlemlerine dayanan değer ile çok iyi uyum gösterdiği, yeşil kil için ise deneysel sonuçların 5 kat daha küçük olduğu gözlenmektedir.

Deneysel olarak ölçülen konsolidasyon katsayıları karşılaştırıldığında ise, yatay konsolidasyon katsayısı ( $c_h$ ) ve düşey konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) belirgin olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum deneyler sırasında numune ortasına yerleştirilen kum drenin kilin konsolidasyon hızını önemli derecede arttırdığını göstermektedir.

Aynı çalışmada (Soydemir, 1970) arazideki boşluk suyu basıncı sönümlenmelerinden ve oturma okumalarından zeminin normal konsolide olmuş kısmı için düşey konsolidasyon katsayısı  $1.2 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s olarak tahmin edilmiştir. Arazi okumalarından bulunan değer temel zemininin tamamı için ortalama bir değer olarak verilmiştir. Temel zemininin sıkışabilirlik

özelliklerini belirlemek için laboratuarda yapılan ödometre deney sonuçlarından ortalama düşey konsolidasyon katsayısı ise  $c_v=2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  olarak belirlenmiştir. Rowe hücresi düşey konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilen  $c_v$  değerleri ise  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ile  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  arasında değiştiği görülmektedir. Laboratuvar ödometre ve Rowe hücresinde yapılan düşey konsolidasyon deneylerinden elde olunan sonuçlar birbirine oldukça yakın iken arazide kil tabakaları arasında kum bantlarının bulunması nedeni ile arazi ölçümlerinden hesaplanan değer laboratuvar deneylerinden bulunan  $c_v$  değerlerinin 10 kat daha büyük olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 5.1 Yeşil kil için belirlenmiş permeabilite ve konsolidasyon katsayıları

Gerilme (kPa)	$k_v$ (m/s)	$k_h$ (m/s)	$c_v$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$c_h$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
77	$2.57 \times 10^{-9}$	$6.301 \times 10^{-9}$	$5.83 \times 10^{-7}$	$5.38 \times 10^{-6}$
92	$2.07 \times 10^{-9}$	$1.843 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-7}$	$1.08 \times 10^{-6}$
107	$4.09 \times 10^{-10}$	$1.305 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$3.48 \times 10^{-6}$
140	$1.08 \times 10^{-10}$	$6.528 \times 10^{-10}$	$2.07 \times 10^{-7}$	$3.37 \times 10^{-6}$
222	$3.88 \times 10^{-11}$	$2.914 \times 10^{-10}$	$1.30 \times 10^{-8}$	$5.15 \times 10^{-6}$
265	$1.96 \times 10^{-10}$	$1.789 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$4.03 \times 10^{-6}$
288	$1.14 \times 10^{-10}$	$1.486 \times 10^{-10}$	$5.17 \times 10^{-8}$	$1.90 \times 10^{-6}$

Çizelge 5.2 Siyah kil için belirlenmiş permeabilite ve konsolidasyon katsayıları

Gerilme (kPa)	$k_v$ (m/s)	$k_h$ (m/s)	$c_v$ ( $m^2/s$ )	$c_h$ ( $m^2/s$ )
175	$2.83 \times 10^{-10}$	$8.24 \times 10^{-9}$	$4.77 \times 10^{-7}$	$7.08 \times 10^{-6}$
182	$1.64 \times 10^{-10}$	$5.47 \times 10^{-9}$	$3.55 \times 10^{-7}$	$2.13 \times 10^{-5}$
215	$6.38 \times 10^{-11}$	$4.11 \times 10^{-9}$	$9.24 \times 10^{-8}$	$1.01 \times 10^{-5}$
258	$4.55 \times 10^{-11}$	$2.47 \times 10^{-9}$	$8.58 \times 10^{-8}$	$7.55 \times 10^{-6}$
314	$2.65 \times 10^{-11}$	$1.72 \times 10^{-9}$	$2.92 \times 10^{-7}$	$3.58 \times 10^{-6}$
348.5	$2.30 \times 10^{-11}$	$1.37 \times 10^{-9}$	$4.37 \times 10^{-8}$	$3.32 \times 10^{-6}$
375	$1.85 \times 10^{-11}$	$1.09 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^{-8}$	$6.97 \times 10^{-7}$

### 5.2 Permeabilitenin Boşluk Oranı ile Olan Değişiminin Formülasyonu

Alibey barajı temel zemininin dolgu yükü altındaki konsolidasyon davranışının incelenmesi için permeabilite katsayısının aşamalı yükleme ile birlikte olan değişimini dikkate alan bir konsolidasyon analizi yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel araştırmalarda konsolidasyon analizine temel oluşturan bu değişimin formu belirlenmeye çalışılmıştır.

Dolgu inşası süresince permeabilite katsayısının değişimini araştırmak için, temel zeminini oluşturan yeşil kil ve siyah kil tabakalarına ait numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen yatay ve düşey permeabilite katsayılarının boşluk oranı ile olan dağılımı incelenmiş ve Alibey barajı temel zeminin permeabilite davranışı için tekil bir ilişki araştırılmıştır. Bu dağılımı incelemek için çeşitli araştırmacılar tarafından doğal killerin permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini ifade etmek için önerilen ilişkiler kullanılmıştır. Böylece literatürde boşluk oranı ile permeabilite arasında kurulmuş olan çeşitli ilişkilerin doğruluğu ve uygulanabilirliği yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ilişkilerin doğruluğunu ve geçerliliğini araştırmak için ve Alibeyköy temel zemininin permeabilitesinin boşluk oranı ile olan değişimini tanımlayabilmek için deneylerden elde edilen permeabilite-boşluk oranı değişimlerinin Bölüm 2' de verilen (2.1), (2.2), (2.3) ilişkileri ile uyumlu olup olmadığı araştırılmıştır.

$$\log k = \log k_0 - \frac{(e_0 - e)}{C_k} \quad (\text{Taylor, 1948}) \quad (2.1)$$

$$\log k = A \log e + B \quad (\text{Mesri ve Olson, 1971}) \quad (2.2)$$

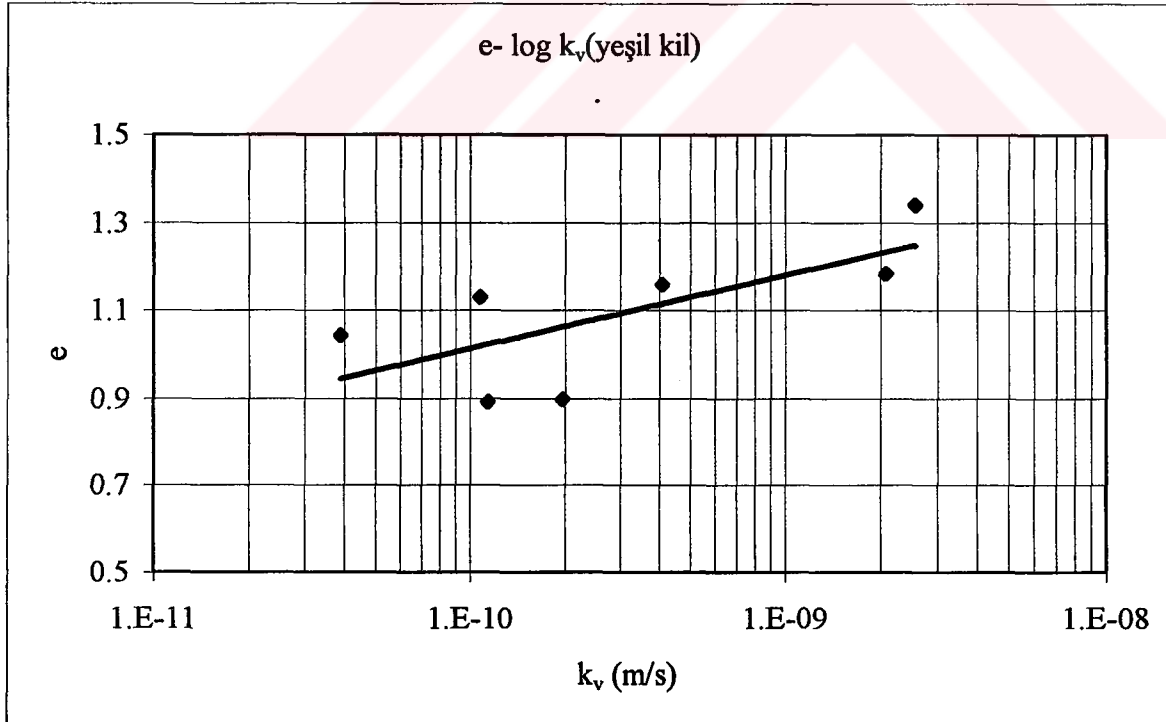
$$k = C \cdot (e^n / 1 + e) \quad (\text{Samarasinghe, vd., 1982}) \quad (2.3)$$

(2.3) eşitliği aynı zamanda aşağıdaki gibi de düzenlenebilmektedir.

$$\log k(1+e) = n \log e + \log C$$

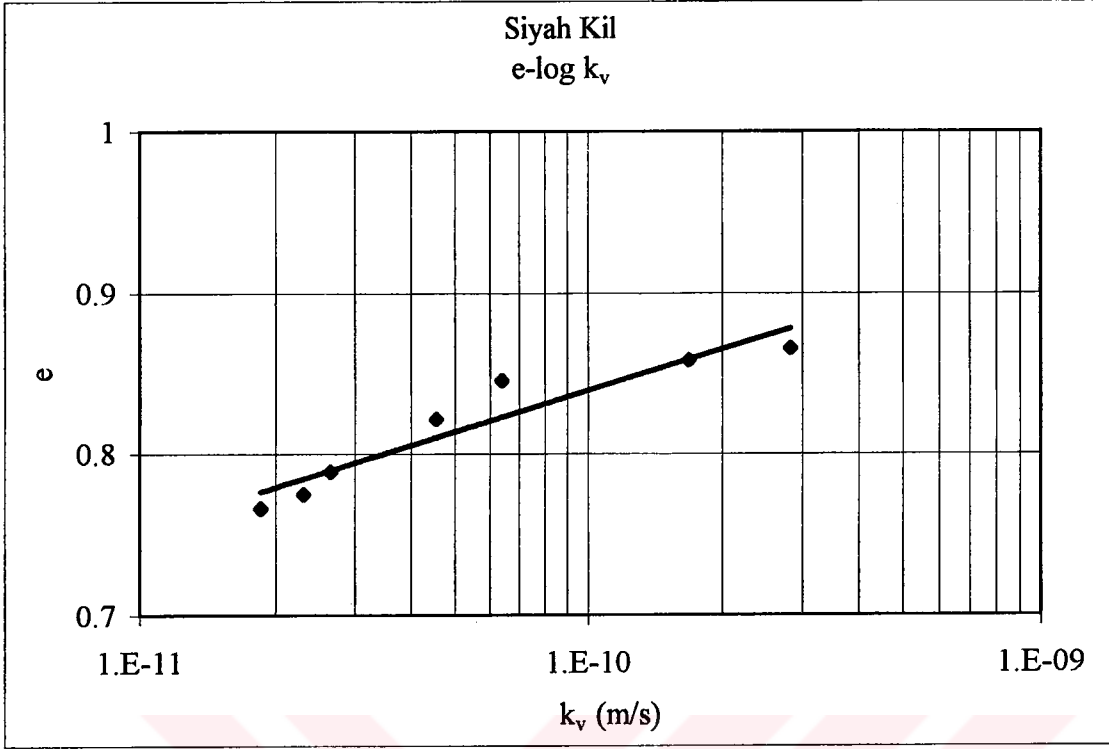
### 5.2.1 Düşey Permeabilitenin Boşluk Oranı ile Değişimi

Taylor (1948) tarafından killi zeminler için önerilen (2.1) eşitliğinin geçerliliğini sınamak için çizilen  $e$ - $\log k_v$  değişimi Şekil 5.1'de yeşil kil için, Şekil 5.2'de ise siyah kil için gösterilmiştir. Deney sonuçlarının incelenmesinden yeşil kil için bu ilişkinin tam olarak geçerli olmadığı, siyah kil için ise deneysel davranışı daha iyi temsil ettiği gözlenmektedir. Bu şekillerde gösterilen deney noktalarından geçirilen en yakın doğrunun eğiminden incelenen killer için, 2.1 eşitliğinde yer alan ve permeabilite değişim indeksi olarak nitelendirilen  $C_k$  parametresi belirlenmiştir.



Şekil 5.1 Yeşil kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen  $e$ -  $\log k_v$  ilişkisi



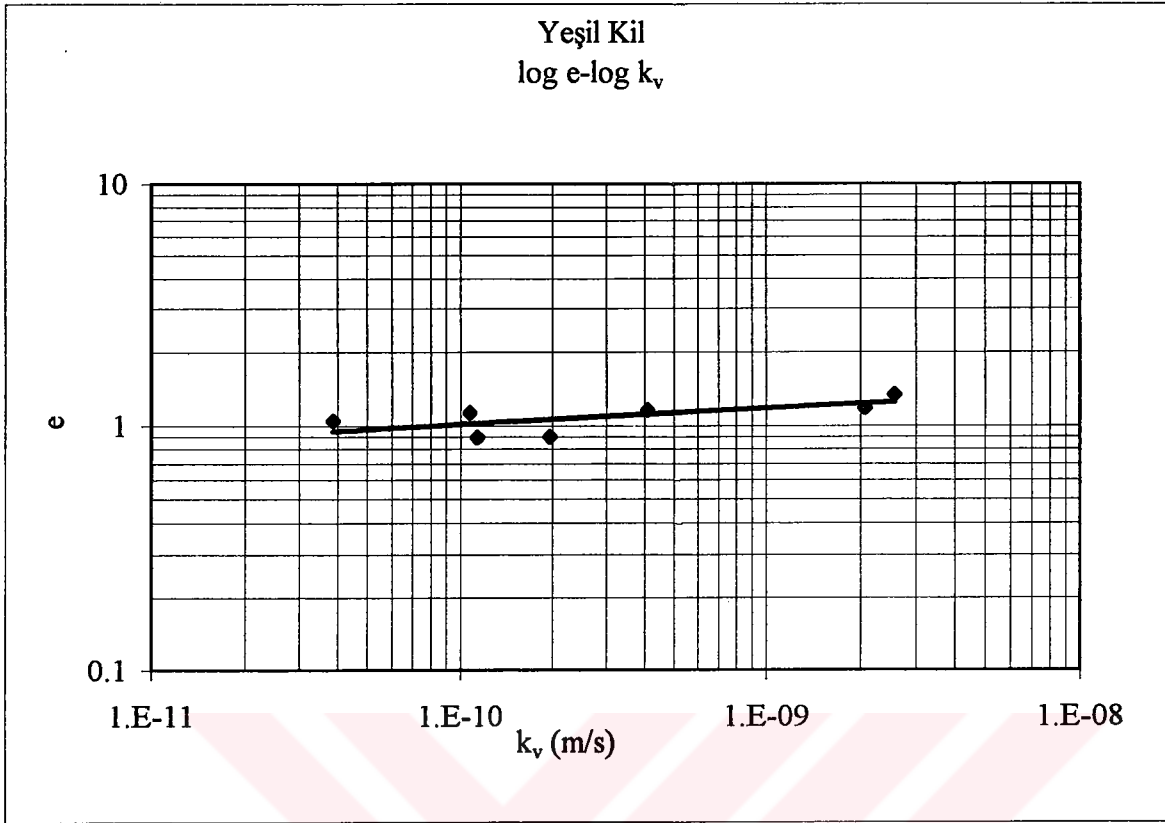


Şekil 5.2 Siyah kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen e- log  $k_v$  ilişki

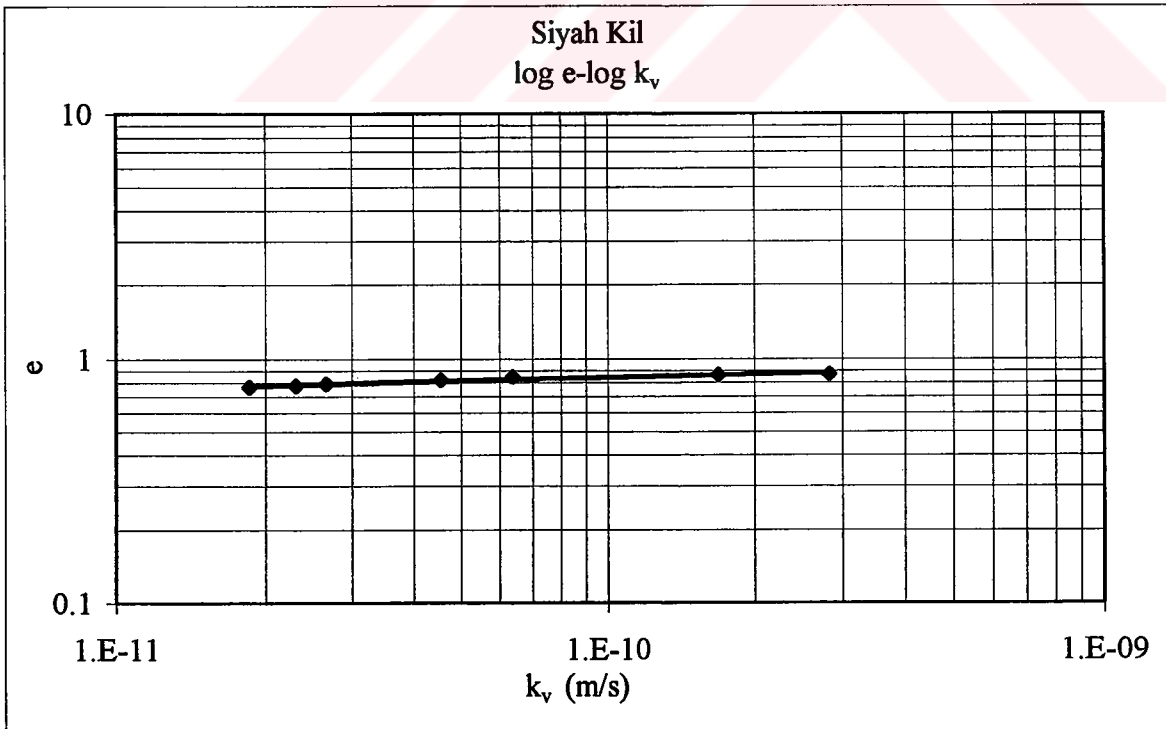
Mesri ve Olson (1971) tarafından, killi zeminler için önerilen (2.2) eşitliğinin geçerliliğini sınamak için log e-log  $k_v$  arasındaki değişim yeşil kil için Şekil 5.3' te, siyah kil için ise Şekil 5.4' te gösterilmiş ve deneysel davranışın bu ilişki ile oldukça iyi temsil edildiği gözlenmiştir. Deneysel noktalarından geçirilen en yakın doğrunun eğiminin tersinden (2.2) eşitliğinde geçen A parametresi ve düşey eksenini kestiği noktanın (-A) ile çarpımından ise B parametresinin değeri belirlenmiştir.

Samarasinghe vd.,(1982) tarafından normal konsolide killer için önerilen (2.3) eşitliğinin geçerliliğinin sınamak için ise Şekil 5.5' te yeşil kil için, Şekil 5.6' ta siyah kil için log e ile log  $k_v(1+e)$  değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu ilişkinin de deneylerde gözlenen davranışı oldukça iyi tanımladığı gözlenmektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' da gösterilen deney noktalarından geçirilen en yakın doğrunun eğiminin tersi alınarak n parametresi, doğrunun düşey eksenini noktanın (-n) ile çarpımından ise C parametresi belirlenmiştir.

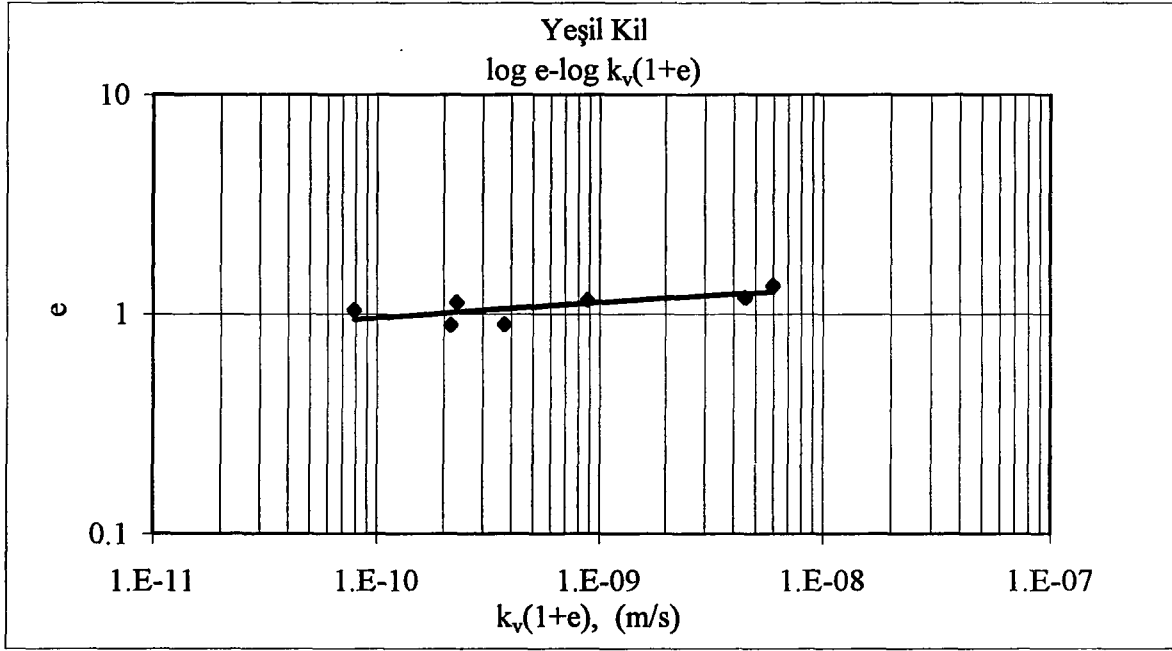
Şekillerde gösterilen deney sonuçlarının toplu olarak değerlendirilmesinden, incelenen killer için düşey permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimini genel olarak bütün eşitliklerin tanımladığı söylenebilir.



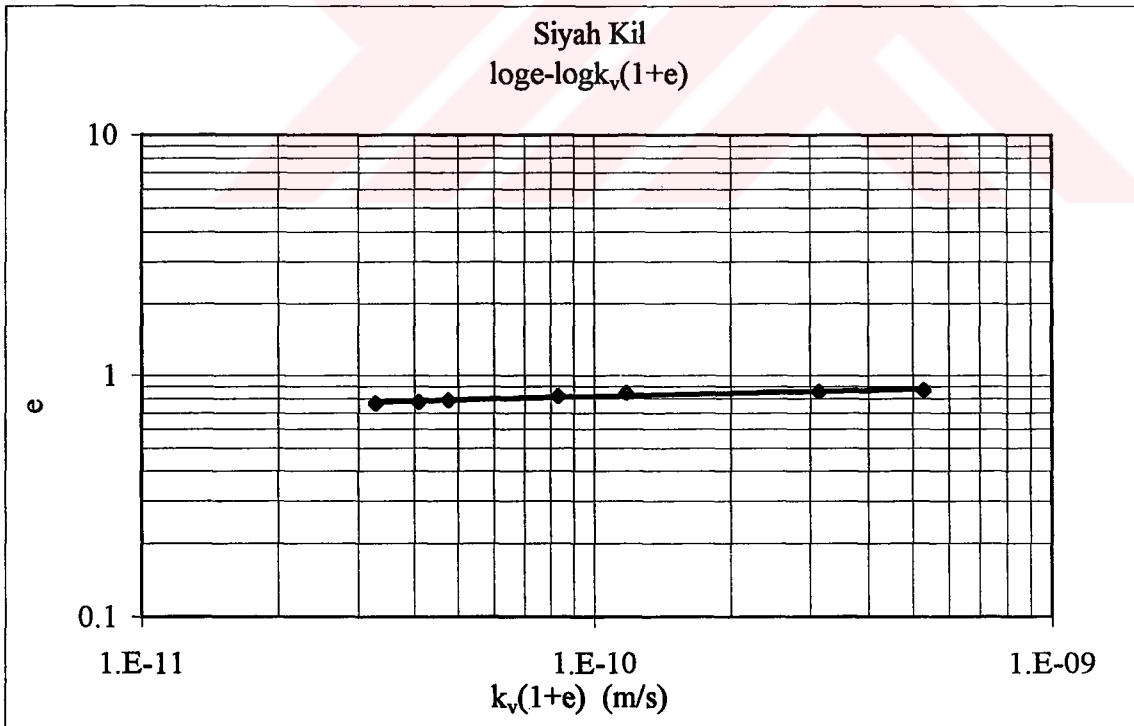
Şekil 5.3 Yeşil kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen log e-log  $k_v$  ilişkisi



Şekil 5.4 Siyah kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen log e-log  $k_v$  ilişkisi



Şekil 5.5 Yeşil kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen log e-log  $k_v(1+e)$  ilişkisi



Şekil 5.6 Siyah kil için düşey permeabilite deneylerinden elde edilen log e-log  $k_v(1+e)$  ilişkisi

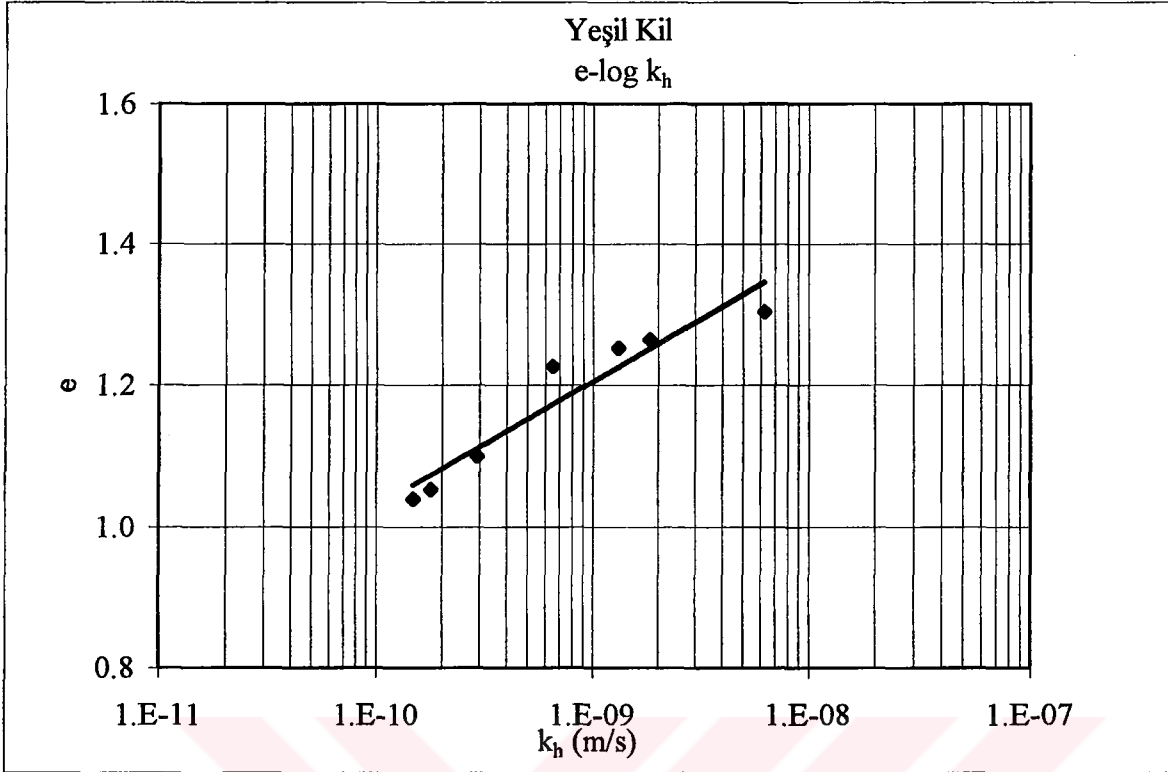
### 5.2.2 Yatay Permeabilitenin Boşluk Oranı ile Olan Değişimi

Düşey permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini tanımlayabilmek için kullanılan (2.1), (2.2), (2.3) ilişkileri bu çalışmada yatay permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini tanımlamak için de kullanılmıştır.

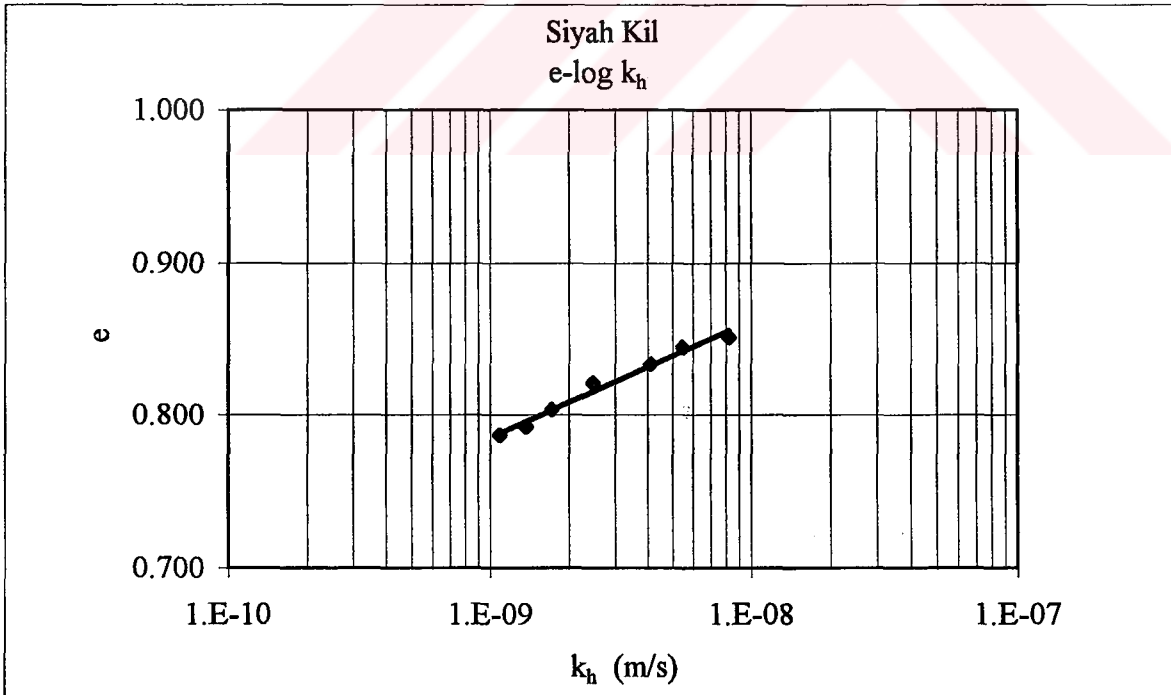
Taylor (1948) tarafından önerilen (2.1) eşitliğinin geçerliliğini araştırmak amacı ile çizilen  $e$ -log  $k_h$  arasındaki değişim yeşil kil için Şekil 5.7' de ve siyah kil için Şekil 5.8' de gösterilmiştir. Bu ilişkinin siyah kilin davranışını daha iyi tanımladığı gözlenmektedir. Deney noktalarından geçirilen en yakın doğrunun eğiminden yeşil kil ve siyah kil için (2.1) eşitliğinde geçen  $C_k$  değeri belirlenmiştir.

Mesri ve Olson (1971) tarafından önerilen (2.2) eşitliğinin geçerliliğini sınamak için log  $e$ -log  $k_h$  arasındaki değişim yeşil kil için Şekil 5.9'da ve siyah kil için ise Şekil 5.10' da gösterilmiş ve bu ilişkinin davranışını oldukça iyi tanımladığı gözlenmektedir. Deney noktalarından geçirilen en yakın doğrunun eğiminin çarpmaya göre tersi alınarak A parametresi ve düşey eksenini kestiği noktanın (-A) ile çarpımından ise B parametresinin değerleri belirlenmiştir.

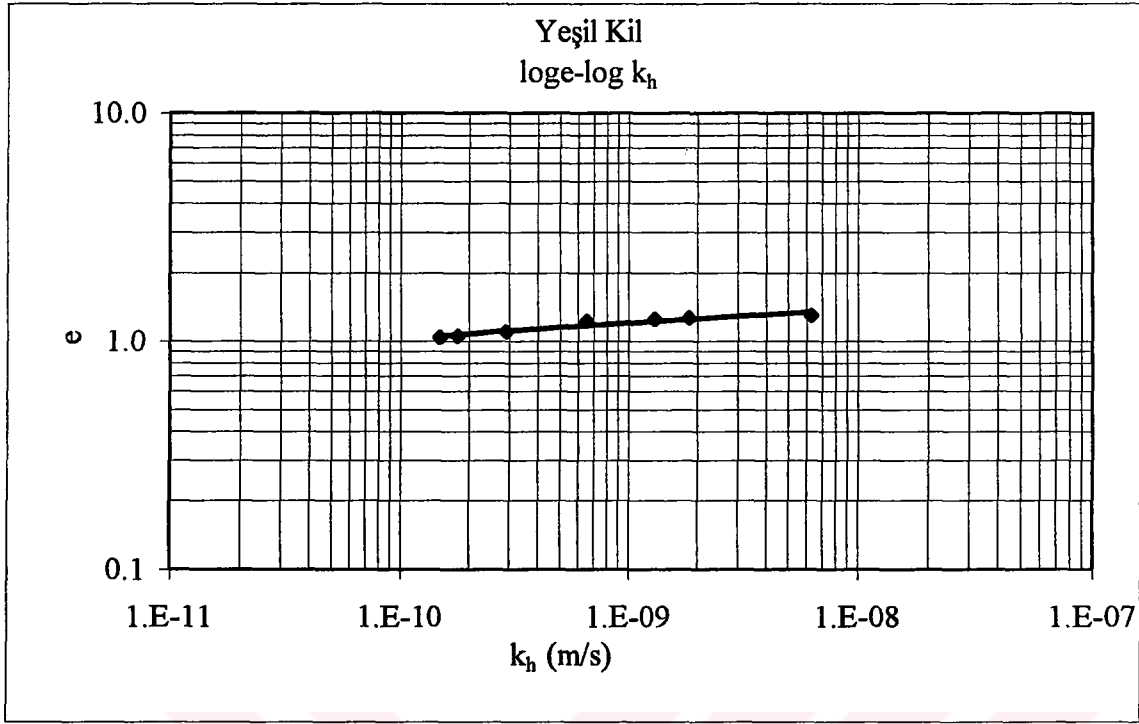
Yatay permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişiminin Samarasinghe tarafından önerilen (2.3) eşitliği ile olan uyumunu araştırmak için ise, loge ile  $\log k_h(1+e)$  arasındaki değişim yeşil kil için Şekil 5.11' de, siyah kil için ise Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Bu ilişkinin de deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir. Deney noktalarından geçirilen en yakın doğrunun eğiminin tersi alınarak eşitlikte geçen n parametresinin değeri ve düşey eksenini kestiği noktanın (-n) ile çarpımından ise C parametresinin değeri belirlenmiştir.



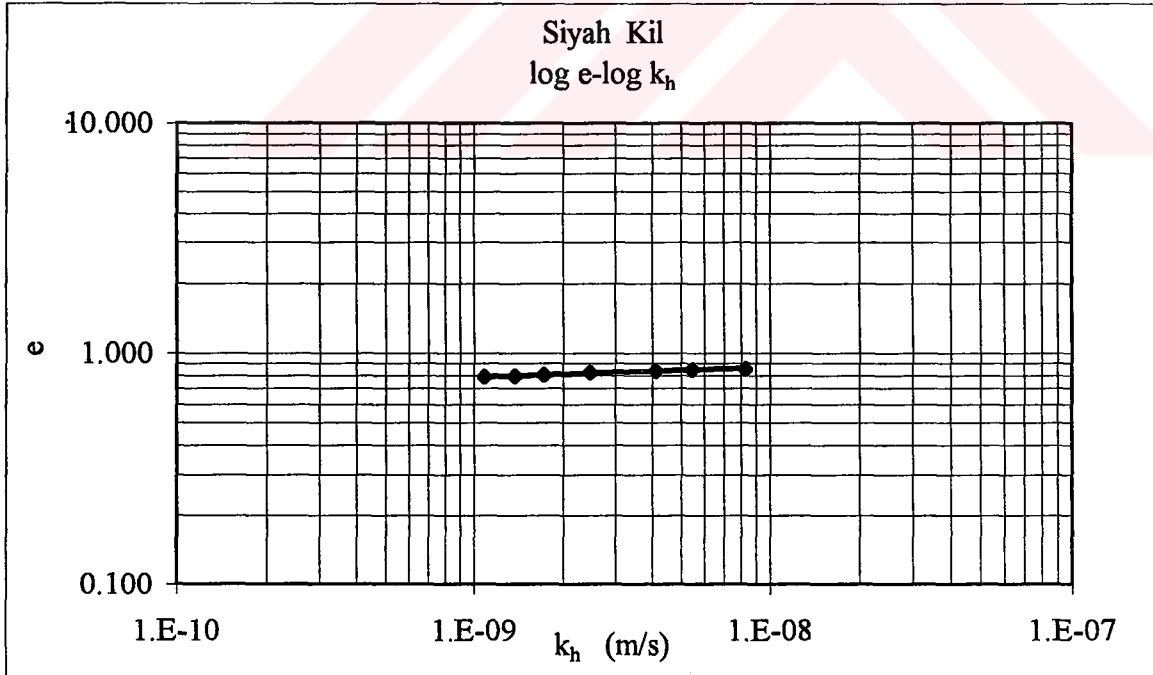
Şekil 5.7 Yeşil kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen e-log  $k_h$  ilişkisi



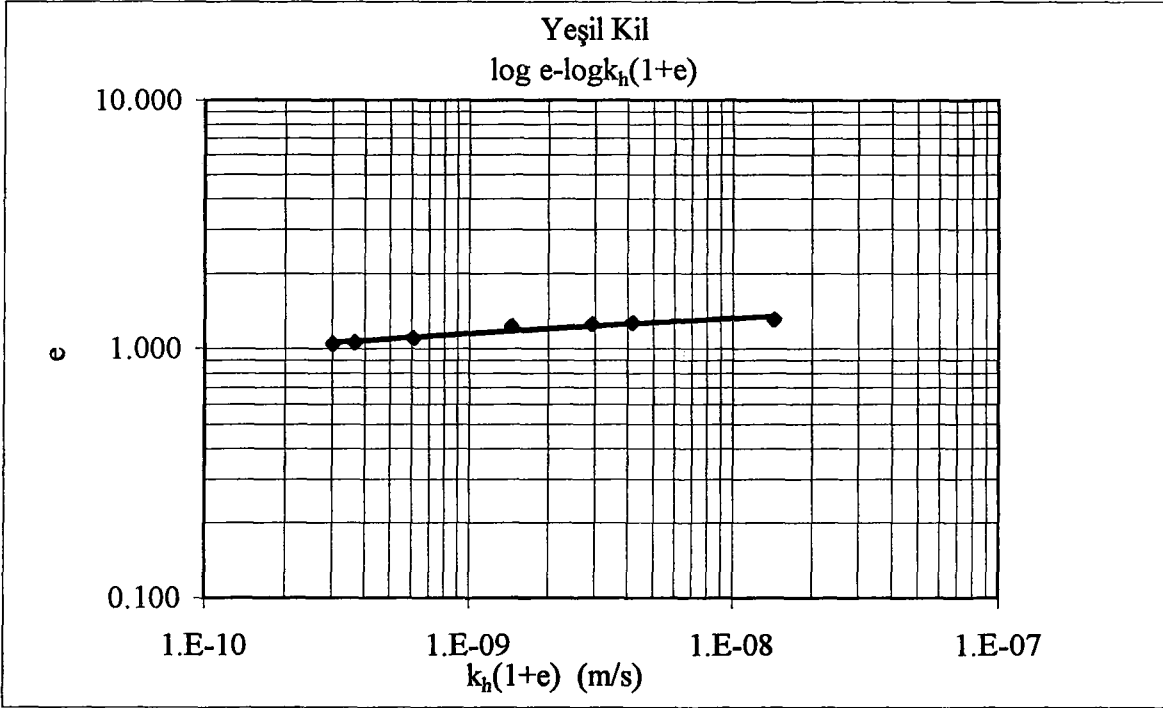
Şekil 5.8 Siyah kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen e- log  $k_h$  ilişkisi



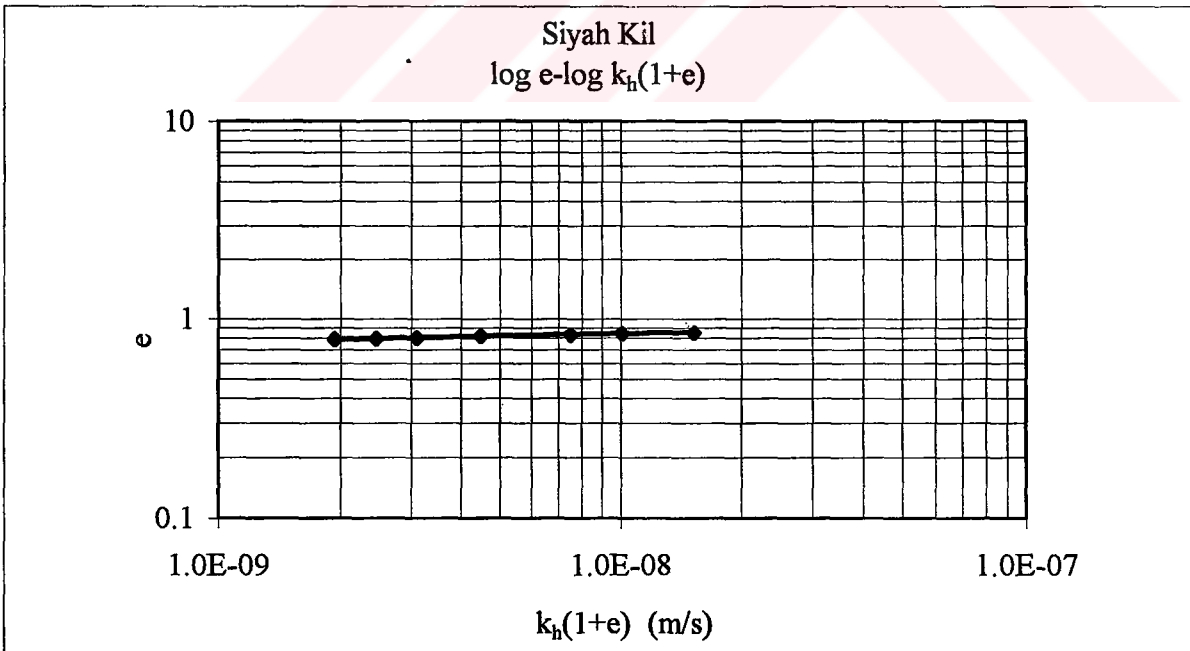
Şekil 5.9 Yeşil kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen log  $e$ -log  $k_h$  ilişkisi



Şekil 5.10 Siyah kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen log  $e$ - log  $k_h$  ilişkisi



Şekil 5.11 Yeşil kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen log e-log  $k_h(1+e)$  ilişkisi



Şekil 5.12 Siyah kil için yatay permeabilite deneylerinden elde edilen log e-log  $k_h(1+e)$  ilişkisi

Yatay permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini tanımlamak için Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12' de gösterilen deney sonuçlarının değerlendirilmesinden, araştırmacılar tarafından önerilen (2.1), (2.2) ve (2.3) ilişkilerinin tümünün yatay permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini tanımlamak için geçerli olduğunu göstermekte ve düşey permeabilite katsayısında olduğu gibi lineer bir dağılım vermektedir.

Çizelge 5.3' te yukarıda deneysel sonuçlarla uyumu incelenen (2.1), (2.2) ve (2.3) eşitliklerinde yer alan katsayıların değerleri toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 Permeabilite parametreleri

	Yatay					Düşey				
	A	B	C	n	C <sub>k</sub>	A	B	C (m/s)	n	C <sub>k</sub>
Yeşil Kil	13.15	-10.07	1.59x10 <sup>-10</sup>	13.88	0.19	7.14	-9.77	3.11x10 <sup>-9</sup>	2.25	0.17
Siyah Kil	38.75	-5.28	2.29x10 <sup>-4</sup>	59.61	0.12	10.76	-9.41	8.3x10 <sup>-10</sup>	11.60	0.09

Deneylerde gözlenen davranışın (2.1), (2.2) ve (2.3) ilişkileri ile oldukça iyi bir şekilde tanımlayabildiği gözlenmekle birlikte, çizilen doğruların eğimleri ve yukarıdaki tabloda verilen C<sub>k</sub>, A ve n parametrelerinin değerleri, permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı olarak oldukça az değiştiğini göstermektedir. Bu durumun incelenen konsolidasyon basıncı ve boşluk oranı değişiminin, arazi yükleme programına uygun olarak oldukça dar bir aralık içinde kalmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak daha önceki çalışmalarda permeabilite ile boşluk oranı arasında kurulmuş olan ve bu çalışmada da kullanılan bu eşitliklerin genel olarak doğrusal bir ilişki vermeleri nedeni ile Alibey barajı dolgusunun kademeli inşası sırasında yeşil kil ve siyah kil tabakasının yatay ve düşey permeabilitesindeki değişimi temsil edecek pratik ve basit bir eşitliğin belirlenmesinin daha uygun ve daha doğru bir yaklaşım olacağı düşünülmüştür. Bu anlamda her iki kil zemin için de e-log k<sub>v</sub> ve e-log k<sub>h</sub> dağılımlarının lineer bir dağılım gösterdiği düşünülerek ve permeabilite davranışını başlangıç koşullarını (e<sub>0</sub>,k<sub>0</sub>) ve permeabilite değişim indeksini (C<sub>k</sub>) gözönünde bulundurarak tanımladığı için Taylor(1948) tarafından önerilen (2.1) eşitliğinin bu çalışma için mantıklı ve pratik bir yaklaşım olduğu düşünülmüştür. Sonuç olarak, Alibey barajı menba batardosu altında yer alan siyah kil ve



yeşil kil tabakalarının dolgunun kademeli olarak inşası sırasında yatay ve düşey permeabilitelerindeki değişimin literatürde kabul edildiği gibi doğrusal bir e-log k dağılımı verdiği görülmüştür. Elde edilen bu sonuç, Kılıç(2000) tarafından yapılan konsolidasyon analizlerinde kabul edilen doğrusal e-log k ilişkisini de deneysel olarak doğrulamaktadır.

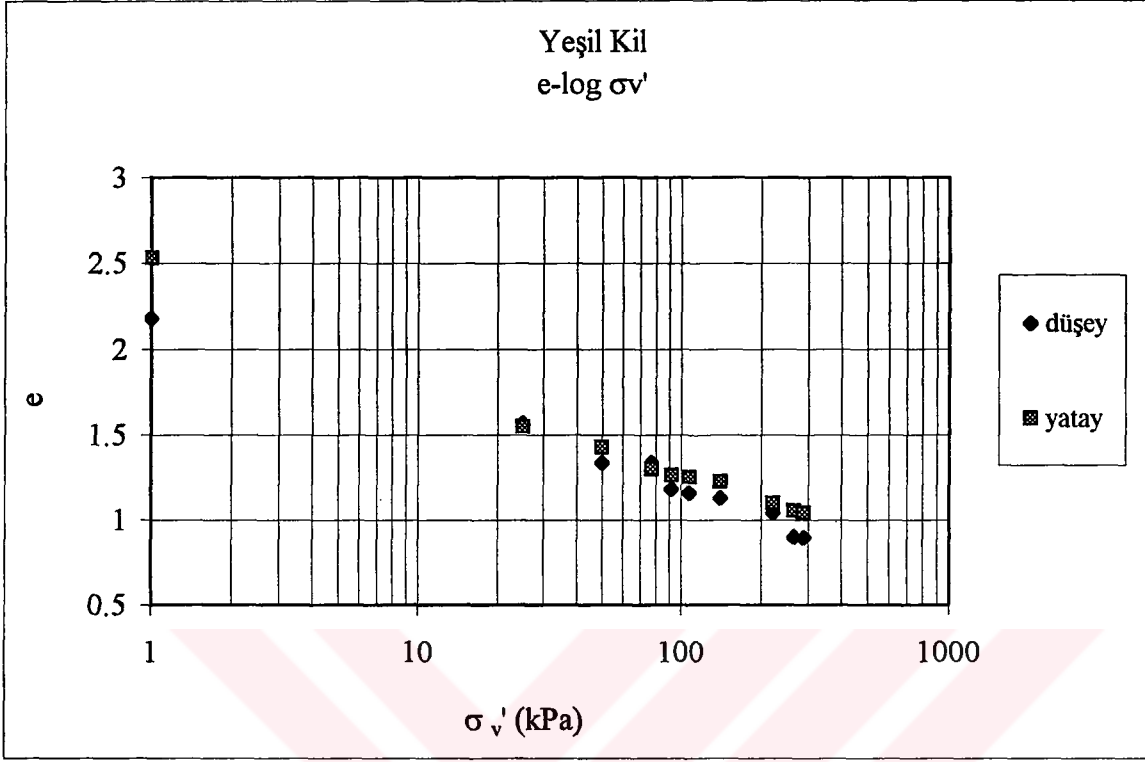
Tavenas(1983a) tarafından doğal killerin permeabilite katsayısı değişimi için önerilen  $C_k=0.5e_o$  ilişkisinin geçerliliği bu çalışma için de incelenmiştir. Literatürde diğer doğal killer için yapılan çalışmalardan belirlenen ve Alibey barajı temel zeminini oluşturan yeşil kil ve siyah kil numuneleri üzerinde yapılan permeabilite deney sonuçlarından belirlenen  $C_k$ ,  $e_o$  ilişkisi Şekil 5.16'da gösterilmiştir.  $C_k$  değeri olarak e-log  $k_v$  doğrusunun eğimi  $C_{k_v}$ , e-log  $k_h$  doğrusunun eğimi olarak ise  $C_{k_h}$  tanımlanmıştır. Şekilden de görüleceği gibi yapılan deneyler sonucunda yeşil kil ve siyah kil için elde edilmiş  $C_{k_v}$ ,  $C_{k_h}$  ve  $e_o$  dağılımları literatürde diğer doğal killer için belirlenen  $C_k$  ve  $e_o$  dağılımlarının içerisinde kalmamaktadır. Bununla birlikte, bu çalışma için elde edilmiş  $C_{k_v}$  ve  $C_{k_h}$  değerleri kendi aralarına uyumlu olup dağılımları  $C_k=0.13e_o$  ilişkisini vermektedir. Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalar, bu ilişkinin hem düşey permeabilitenin hem de yatay permeabilitenin boşluk oranı ile olan değişimi için geçerli olduğunu ve permeabilite değişim indeksi ( $C_k$ )'nın başlangıç boşluk oranının bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilmiş  $C_k$  değerlerinden ortalama olarak geçirilen  $C_k=0.13e_o$  doğrusu Şekil 5.15' te gösterilmiştir.

Alibey Barajı'nın Kılıç(2000) tarafından iki boyutlu bileşik gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon analizlerinde deneysel bir veri olmadığı için  $C_k$  parametresi sıkışma indeksi olan  $C_c$ 'e eşit olarak alınmıştır.

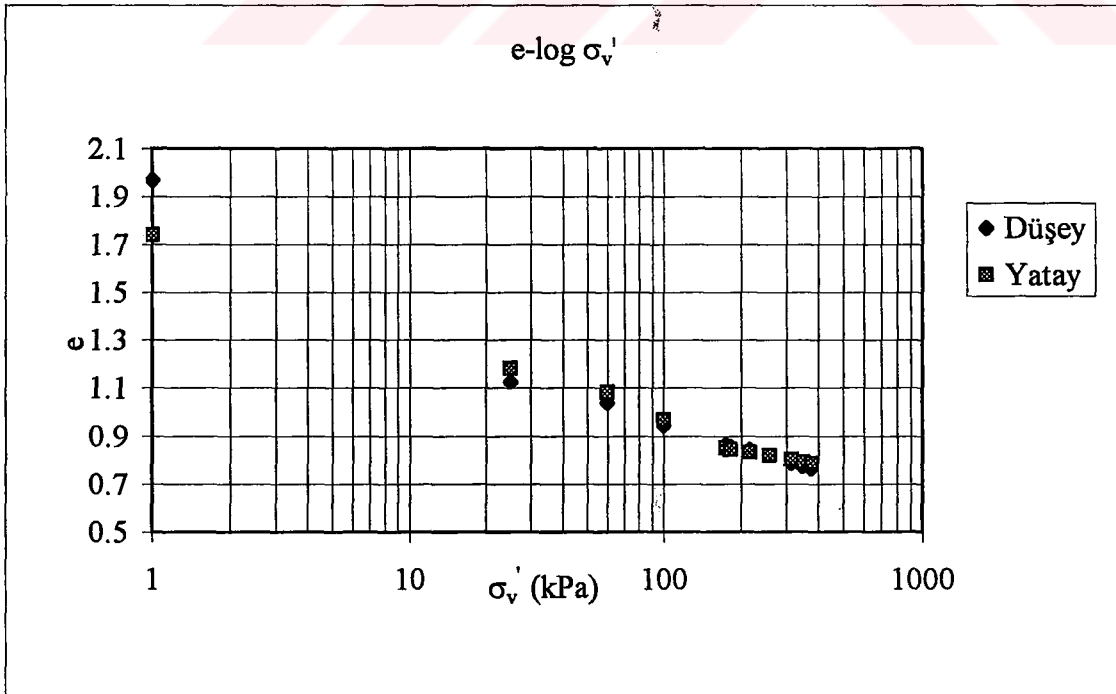
Yeşil kil ve siyah kil tabakasından alınmış numuneler üzerinde yapılan düşey ve radyal konsolidasyon deneyleri için çizilen e-log  $\sigma'_v$  eğrileri yeşil kil için Şekil 5.13' te ve siyah kil için ise Şekil 5.14' te gösterilmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te görüleceği üzere her iki kil de sulü çamur kıvamından itibaren konsolide edildikleri için sıkışma eğrileri bakir sıkışma eğrisine benzer şekilde doğrusallık göstermektedir. Yeşil kil ve siyah kil için radyal ve düşey konsolidasyon deneylerine göre çizilen e-log  $\sigma'_v$  eğrilerinden elde edilen sıkışma indeksi  $C_c$  değerleri Çizelge 5.4' te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Yeşil kil ve siyah kil için sıkışma indeksleri

	$C_c$ (Yatay konsolidasyon)	$C_c$ (Düşey konsolidasyon)
Yeşil Kil	0.45	0.50
Siyah Kil	0.19	0.17



Şekil 5.13 Yeşil kil için düşey ve radyal konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-log  $\sigma_v'$  eğrileri



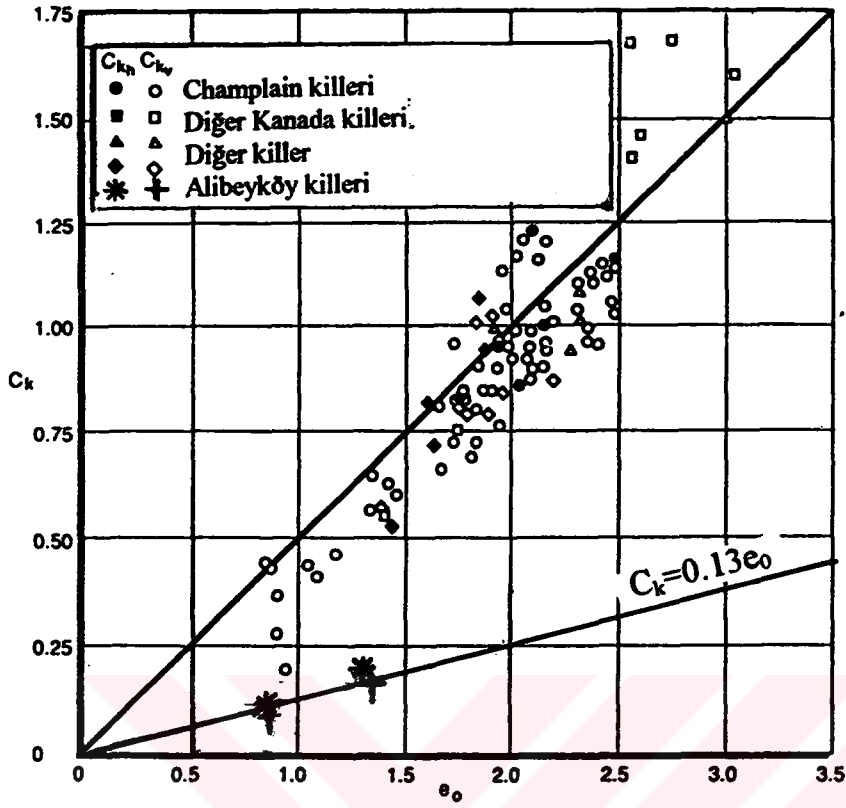
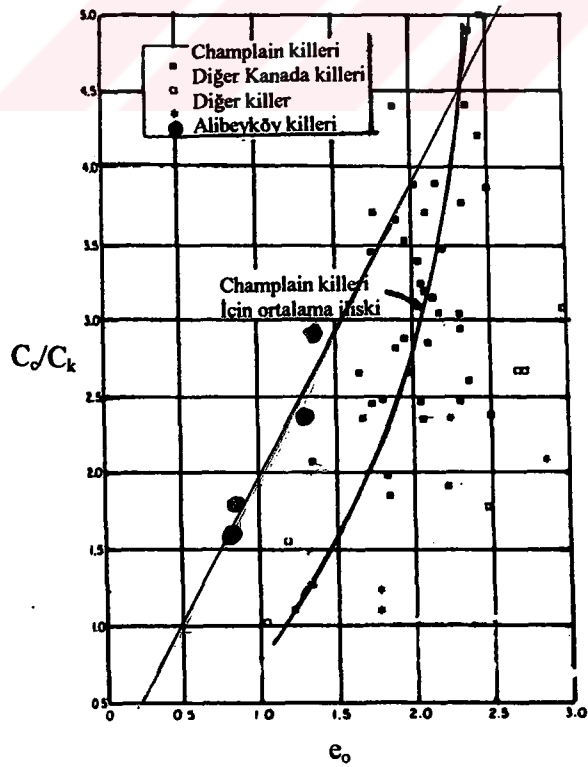
Şekil 5.14 Siyah kil için düşey ve radyal konsolidasyon deneylerinden elde edilen e-log  $\sigma_v'$  eğrileri

Mesri ve Rokhsar (1974) tarafından permeabilite değişim indeksi ( $C_k$ ) ile sıkışma indeksi ( $C_c$ ) arasında bir korelasyon aranmıştır ve  $C_c/C_k$  oranının boşluk oranının da bir fonksiyonu olarak 0.5 ile 5 arasında değiştiğini belirtmişlerdir.  $C_c/C_k$  ile başlangıç boşluk oranı arasındaki ilişki bu çalışma kapsamında da araştırılmış ve  $C_c/C_k-e_o$  dağılımı literatürdeki diğer araştırma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16). Şekil 5.16' dan görüleceği üzere  $C_c/C_k-e_o$  ilişkisi oldukça geniş bir dağılım göstermektedir. Ancak, Alibey Barajı temel zeminin oluşturan killer için  $C_c/C_k-e_o$  arasında  $(C_c/C_k)= 1.94e_o$  şeklinde bir ilişki olduğu görülmektedir. Fakat,  $C_c$ 'nin numune örselenmesi, yükleme artış oranı gibi faktörlerden etkilenebileceği düşünöldüğünde bu ilişkinin her zaman için çok sağlıklı ve güvenilir bir ilişki olmadığı söylenebilir. Dolayısı ile  $C_k$  ile başlangıç boşluk oranı arasında önerilen direkt ilişkinin pratik amaçlar için daha uygun ve daha güvenilir bir ilişki olduğu düşünölmektedir.

### 5.3 Permeabilite anizotropisi

Baraj temel zeminini oluşturan yeşil kil ve siyah kil tabakalarından alınan zemin numuneleri sulu çamur kıvamda hazırlanarak konsolide edilmiş ve arazide doğal çökeltme koşullarına benzer olarak normal konsolide kil durumuna getirilmiştir. Arazi başlangıç gerilmesine ulaşıldıktan sonra arazideki yükleme kademelerine benzer koşullarda düşey yük arttırılmıştır. Bu yüklemeler altında konsolidasyondan sonra yatay ve düşey permeabilite ölçümleri ayrı ayrı yapılmıştır. Bu deneylerde, aynı düşey gerilme altında yapılan konsolidasyondan sonra belirlenen yatay ve düşey permeabilite değerleri karşılaştırıldığında, yatay permeabilite değerinin düşey permeabilite değerinden yeşil kilde yaklaşık 2-7 kat, siyah kilde ise 29-54 kat kadar daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, zeminin normal konsolide hale gelmesi sırasında kil partiküllerinin yatay olarak dizilmesi sonucu su hareketinin yatay yönde daha kolay bir şekilde olmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak, düşey yöndeki permeabilite katsayısının yatay yöndeki permeabilite katsayısından daha küçük olmasına neden olmuştur.

Permeabilite anizotropisini belirlemek için yapılan radyal (yatay) permeabilite deneyleri ve düşey permeabilite deneyleri örselenmiş zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirildiği için arazideki doğal koşulları tam olarak örneklediği söylenemez. Çünkü zeminin iç yapısı permeabilite anizotropisini oldukça fazla etkilemektedir. Bununla birlikte örselenmemiş numuneler üzerinde yapılacak deneysel çalışmalar arazideki zemin elemanını daha iyi örnekeleyeceğinden, oturma analizlerinde kullanılacak permeabilite parametrelerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak verecektir.

Şekil 5.15  $C_k$ 'nin  $e_0$  ile dağılımıŞekil 5.16  $C_0/C_k$ 'nin  $e_0$  ile dağılımı

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Permeabilite, mühendislik pratiğinde karşılaşılan zeminlerde drenaj, yeraltı suyu kontrolü, zeminlerin uygulanan yükler altında konsolidasyon davranışının incelenmesi ve kum drenler kullanılarak zemin iyileştirilmesi gibi problemlerde en önemli zemin parametresi olarak yer almaktadır. Bu problemlerden en önemlilerinden birisi dolgu yükleri altında temel zeminin konsolidasyon davranışının incelenmesidir.

Yumuşak killer üzerine inşa edilen dolguların tasarımı son yıllarda geoteknik mühendisliğinin önemli problemleri arasında yer almaktadır. Dolgu gibi büyük mühendislik yapıları temel zeminine oldukça büyük gerilmeler aktardıkları için zeminde düşey ve yanal deformasyonlara neden olabilmektedir. Meydana gelen bu deformasyonların aşırı boyutlara ulaşması durumunda ise stabilite sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle dolgu inşaatına başlamadan önce dolgunun inşa edileceği yumuşak temel zemininin oturma ve deformasyon davranışının modellenmesi gerekmektedir. Temel zemininin oturma ve deformasyon davranışının ve davranışının incelenmesi için sıkışabilirliğe ve permeabiliteye dayalı bir analize ihtiyaç duyulmaktadır. Temel zemininin davranışını modellemek için son yıllarda sıkça kullanılan sonlu elemanlar analizlerinde zeminin mukavemet ve sıkışabilirliği ile ilgili parametrelerin yanı sıra, konsolidasyon hızını kontrol eden permeabilite parametrelerinin büyük rol oynadığı bilinmektedir.

Bu çalışmada düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirliğe sahip Alibey barajı temel zemininin aşamalı dolgu yükü altında konsolidasyon analizleri için gerekli olan ve permeabilite parametrelerinin laboratuarda deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Alibey barajı temel zemininin kademeli dolgu inşaatı sırasında dolgu yükü altındaki permeabilite davranışını deneysel olarak incelemek amacı ile Alibey barajı altında farklı derinliklerde yer alan yeşil kil ve siyah kil tabakalarından alınan ve laboratuarda sulu çamur konsolidasyonu ile hazırlanan numuneler üzerinde bir seri düşey ve radyal (yatay) permeabilite deneyi yapılmıştır. Yapılan yatay ve düşey permeabilite deneyleri sonucunda temel zeminini oluşturan siyah ve yeşil kil tabakalarının yatay ve düşey permeabilitesinin boşluk oranı ile olan değişimi ve permeabilite anizotropisi incelenmiştir.

Yapılan düşey ve yatay permeabilite deneyleri sonucunda yeşil kil ve siyah kil tabakalarından hazırlanan numunelerde yatay ve düşey permeabilite katsayılarının sıkışma ile birlikte azaldığı ve her iki kil numunesi için de aynı gerilme kademesinde ölçülen yatay permeabilitenin düşey permeabiliteden büyük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, zeminin

normal konsolide hale gelmesi sırasında kil danelerinin yatay olarak dizilerek düşey yöndeki permeabilitenin yatay permeabilite katsayısından daha küçük olmasına neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Alibey barajı dolgusunun kademeli olarak inşası sırasında permeabilite katsayısının arazideki değişimi hakkında yeterli bilgi elde edilememiştir. Fakat, barajın inşasına başlanmadan önce menba batardosu altına yerleştirilen piezometreler yardımı ile permeabilite katsayıları belirlenmiştir. Araziden belirlenen bu değerler, siyah kil için laboratuarda ölçülen eşdeğer permeabilite ile uyum gösterirken yeşil kil için arazideki değerinden daha düşük değerler elde edilmiştir. Ayrıca; daha önceden yapılmış laboratuvar odometre deneylerinden elde edilen  $c_v$  değerleri ve bu çalışmada Rowe hücresinde yapılan düşey konsolidasyon deneylerinden elde edilen  $c_v$  değerleri birbirine oldukça yakın iken, arazide boşluk suyu basıncı sönmülemelerinden ve oturma okumalarından elde olunan  $c_v$  değerleri laboratuvar deneylerinden bulunan  $c_v$  değerlerinden 10 kat daha büyük bulunmuştur.

Alibey barajı menba batardosu altında yer alan yeşil kil ve siyah kil tabakalarının kademeli dolgu inşaatı sırasında permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini araştırmak için farklı araştırmacılar tarafından önerilen ilişkiler kullanılmış ve bu ilişkilerin her iki kil için de yatay ve düşey permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişimini tanımlamak için geçerli olabileceği belirlenmiştir. Alibey barajı dolgusunun kademeli inşası sırasında permeabilite davranışını başlangıç koşullarını ve permeabilite değişim indeksini göz önünde bulundurarak tanımladığı için Taylor (1948) tarafından önerilen eşitliğin yeşil kil ve siyah kilin permeabilite davranışını temsil etmek için en uygun eşitlik olduğuna karar verilmiştir. Permeabilite ile boşluk oranı arasında değişimden permeabilitenin boşluk oranına bağlı olarak oldukça az değiştiği görülmüştür. Bu durumun ise incelenen konsolidasyon basıncı ve boşluk oranı değişiminin arazi yükleme programına uygun olarak oldukça dar bir aralık içinde kalmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Tavenas(1983a) tarafından doğal killerin permeabilite katsayısının değişimi için önerilen  $C_k=0.5e_0$  ilişkisinin bu çalışmadaki deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı gözlenmiş ve bu çalışma için permeabilite değişim indeksi olan  $C_k$ 'nin boşluk oranının fonksiyonu olarak yaklaşık  $0.13e_0$  değerine eşit olduğu görülmüştür. Bununla birlikte  $C_v/C_k$  ile boşluk oranı arasındaki ilişki bu çalışma için de araştırılmış ve aralarındaki ilişkinin  $1.94e_0$  olarak elde edilmiştir. Fakat, bu ilişki  $C_v$ 'nin örselenmeden ve yükleme artış oranından etkilendiği düşünüldüğünde güvenilir bir ilişki olmadığı düşünülmüştür.

Sonuç olarak, dolgu altında yer alan killi zeminlerin konsolidasyon davranışının incelenmesinde permeabilite katsayısının değişiminin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bununla birlikte dolgu altında yer alan zeminlerin permeabilite anizotropisinin varlığı da konsolidasyon analizlerinde oldukça önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle zeminin permeabilite karakteristiklerinin belirlenmesi için laboratuarda yapılacak deneysel çalışmanın örselenmemiş örnekler üzerinde yapılması daha doğru ve gerçekçi olacaktır. Bununla birlikte düşey permeabilite katsayılarını belirleyebilmek için oldukça fazla seçenek olmasına rağmen yatay permeabilite katsayısının belirlenebilmesi için gerekli olan imkanlar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma radyal (yatay) permeabilitenin laboratuvar koşullarında belirlenebilmesi için Rowe hücresinin oldukça elverişli bir deney sistemi olduğunu göstermiştir. Özellikle büyük numuneler üzerinde çalışma imkanı tanınması da sistemin diğer bir avantajı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu anlamda, Rowe hücresinin zeminlerin konsolidasyon ve permeabilite davranışının daha iyi anlaşılması bakımından daha doğru ve arazi ile daha uyumlu sonuçlar vereceği açıktır. Bununla birlikte yapılan bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları laboratuarda yapılacak diğer deneylerin sonuçları ile ve arazide ölçülmüş permeabilite sonuçları ile karşılaştırılmak daha doğru ve daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır.

**KAYNAKLAR**

- Al – Tabbaa, A., Wood, D.M., (1991), “ Horizontal Drainage During Consolidation: Insights Gained From Analyses of a Simple Problem”, *Geotechnique*, 41(4), pp. 571-585.
- Al-Tabbaa, A., Wood, D.M., (1987), “ Some Measurements of the Permeability of Kaolin”, *Geotechnique*, 37(4), 499-503.
- Cedergren, H.R., (1977), “ Seepage, Drainage and Flow Nets”, John Wiley and Sons.
- Chandler, R.J., Leroueil, S., Trenter, N.A.,(1990), “ Measurements of the Permeability of London Clay Using a Self-Boring Permeameter”, *Geotechnique*, 40(1),113-124.
- Das, M.B., (2000), “ Fundamentals of Geotechnical Engineering”, Brooks/Cole.
- Escario, V., Uriel, S.,(1961), “ Determining the Coefficient of Consolidation and Horizontal Permeability by Radial Drainage”, *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conference of Soil Mechanics & Foundation Engineering, Paris. Vol.1*, pp 83-87.
- Gibson, R.E., Shefford, G.C., (1968), “ The Efficiency of Horizontal Drainage Layers For Accelerating Consolidation of Clay Embankments”, *Geotechnique*, 18(3), 327.
- Gorman, C.T., Hopkins, T.C., Deen, R.C., Drnevich, V.P.,(1978),” Constant- Rate of Strain and Controlled- Gradient –Testing”, *Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., Vol. 1*, pp. 3-15.
- Head, K.H.,(1982), “Manual of Soil Laboratory Testing”, Vol.2, Pentech Press.
- Head, K.H.,(1998), “Manual of Soil Laboratory Testing”, Vol.3, John Wiley and Sons.
- Kılıç, H., (2000), “ Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Nümerik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi”, *Doktora Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Koç, S.A., (1996), “ Normal Konsolide Kilerde Geoteknik Parametrelerin Belirlenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Leroueil, S., Diene, M., Tavenas, F., Kabbaj, M., Rochelle, L.P.,(1987), “ Direct Determination of Permeability of Clay Under Embankment”, *ASCE*, 114(6), 645-657.
- Leroueil, S., Lerat, P., Hight, D.W., Powell, J.J.M., (1992), “ Hydraulic Conductivity of a Recent Estaurine Silty Clay at Bothkennar”, *Geotechnique*, 42(2), 275-288.
- Leroueil, S., Bouclin, G., Tavenas, F., Bergeron, L., Rochelle, L.P.,(1990), “ Permeability Anisotropy of Natural Clays as a Function of Strain”, *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 568-579.
- Little, J.A., Wood, D.M., Paul, M.A., Bouazza, A., (1992), “ Some Laboratory Measurements of Permeability of Bothkennar Clay in Relation to Soil Fabric”, *Geotechnique*, 42(2), 355-361.
- Lo, K.Y., Bozozuk, M., Law, K.T.,(1976), “ Settlement Analysis of the Gloucester Test Fill”, *Canadian Geotechnical Journal*, 13, 339.
- Loudon, A.G.,(1953), “ The Computation of Permeability from Simple Soil Tests”, *Geotechnique, Institution of Civil Engineers, London, England, Vol. III*, PP. 1965-183.
- Mangan, J.P., Mieussens, C., Queyrai, D., (1983), “Étude d'un Remblai Sur Sols Compressibles”, *Le Remblai B du site Expérimental de Cubzac-les-ponts, Paris Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC 127*.



McGrown, A., Barden, L., Lee, S.H., Wilby, P., (1974), " Sample Disturbance in Soft Alluvial Clyde Estuary Clay " Canadian Geotechnical Journal, 11, 651.

Mesri, G., vd.(1994), " Settlement of Embankments on Soft Clay", Proc. Spec. Conf. On Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments", ASCE, College Station, Texas, Vol.1,pp. 8-56.

Michaels, A.S., Lin, C.S.,(1954), " The Permeability of Kaolinite" Industrial and Engineering Chemistry, American Chemical Society, Easton, Pa., Vol.46., pp. 1239-1246.

McKinlay, D.G.,(1961), " A Laboratory Study of Rates of Consolidation in Clays With Particular Reference to Conditions of Radial Porewater Drainage", Proc.5<sup>th</sup> Int. Conference of Soil Mechanics& Foundation Eng., Vol.1, paper 1/38, Dunod, Paris.

Özaydın, K.,Yıldırım,S.,Uzel,T.,Özçoban, M.Ş., Berilgen, M.M., Hoşbaş, G., Kılıç, H.,(1998), " Yumuşak Zeminlere Oturan Dolguların Davranışı", DPT Araştırma Projesi, İstanbul.

Raymond, G.P., (1966), " Laboratory Consolidation of Some Normally Consolidated Soils", Canadian Geotechnical Journal, National Research Council of Canada , Ottawa, Canada, Vol. IV., No.4, pp. 217-234.

Rowe, P.W., (1959), "Measurement of the Coefficient of Consolidation of Lacustrine Clay", Geotechnique, 9(3), pp.107.

Rowe, P.W., Shields, D.H.,(1965), " The measured horizontal coefficient of consolidation of laminated layered or varved clays", Proc.6<sup>th</sup> Int. Conference of Soil Mechanics& Foundation Eng., Vol.1, pp 2-44.

Rowe, P.W., Barden, L., (1966), "A New Consolidation Cell", Geotechnique, 16( ), pp. 162-170.

Rowe, P.W., (1968), " The Influence of Geological Features of Clay Deposits On The Design and Performance of Sand Drains", Proc.I.C.E.Supplementary Paper No. 7058S.

Rowe, P.W., (1972), " The Relevance of Soil Fabric to Site Investigation Practice", Twelfth Rankine Lecture. Geotechnique, 22(2), pp.195.

Samarasinghe, M.A., Huang, H.Y., Drnevich, P.V., (1982), " Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", ASCE, 108(6), 835-849.

Singh,G., Hattab, T.N.,(1979), " A Laboratory Study of Efficiency of Sand Drains in Relation to Methods of Installation and Spacing" Geotechnique, 19(1), pp.140.

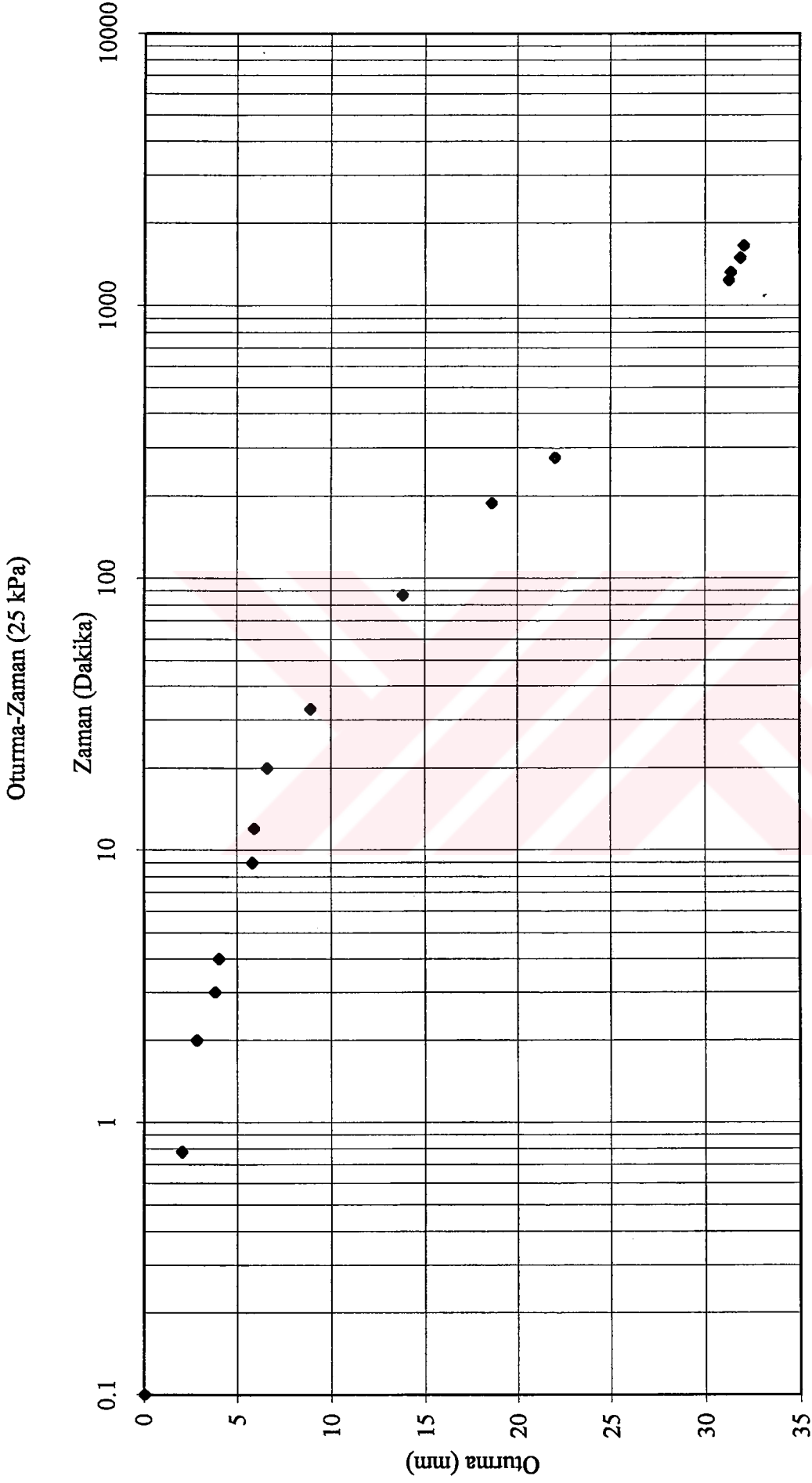
Shofield, A.N., Wroth, C.P., (1968), Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London, 369-403.

Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., Leroueil, S., (1983), " The Permeability of Natural Soft Clays. Part I: Methods of Laboratory Measurement", Canadian Geotechnical Journal, 20, 629-644.

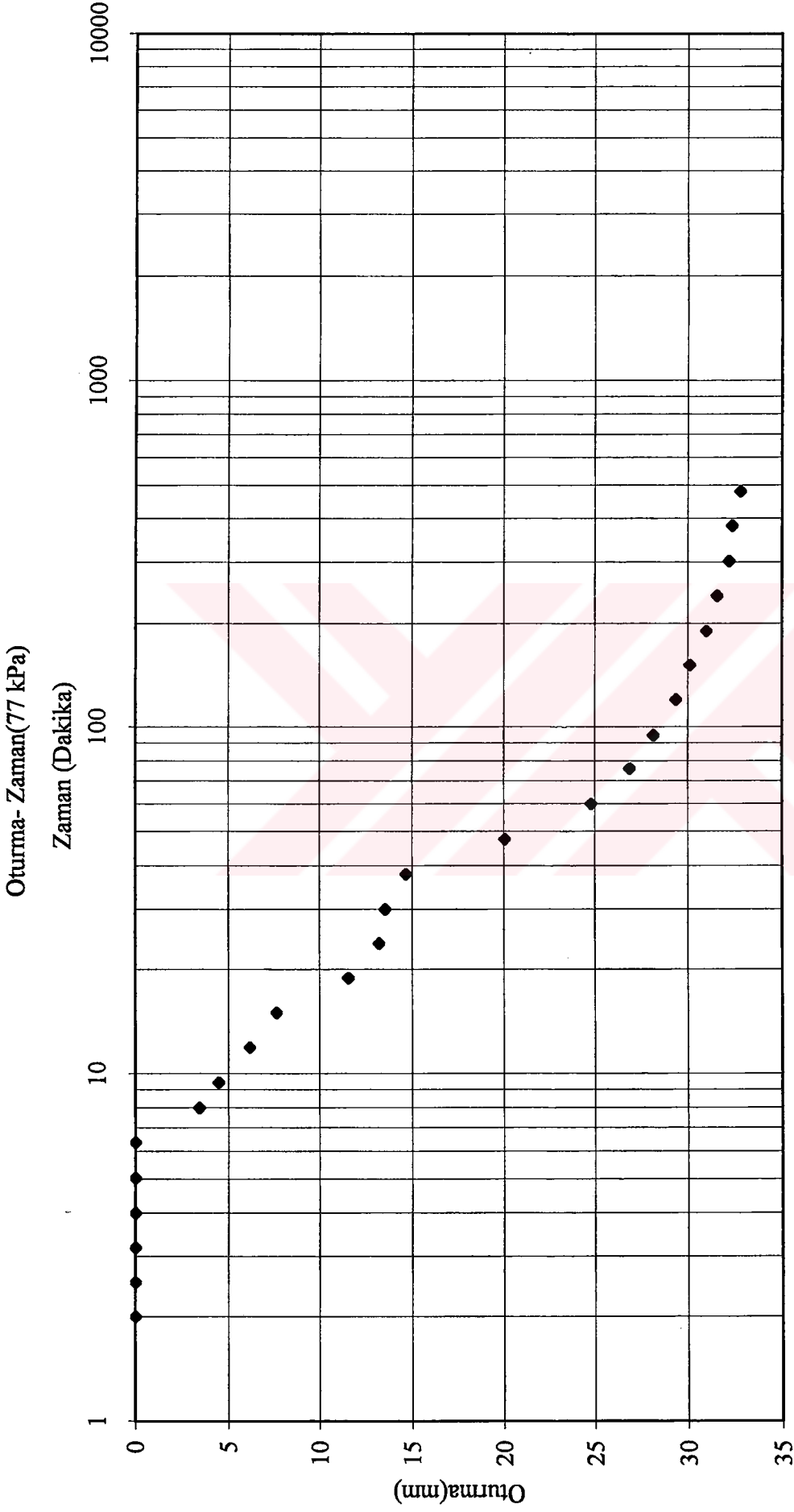
Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., Leroueil, S., (1983), " The Permeability of Natural Soft Clays. Part II: Permeability Characteristics", Canadian Geotechnical Journal, 20, 645-660.

Walker, L.K., Raymond, G.P., (1968), " The Prediction of Consolidation Rates in a Cemented Clay" , Canadian Geotechnical Journal, National Research Council of Canada, Vol.V, No. 4, pp.192-215.

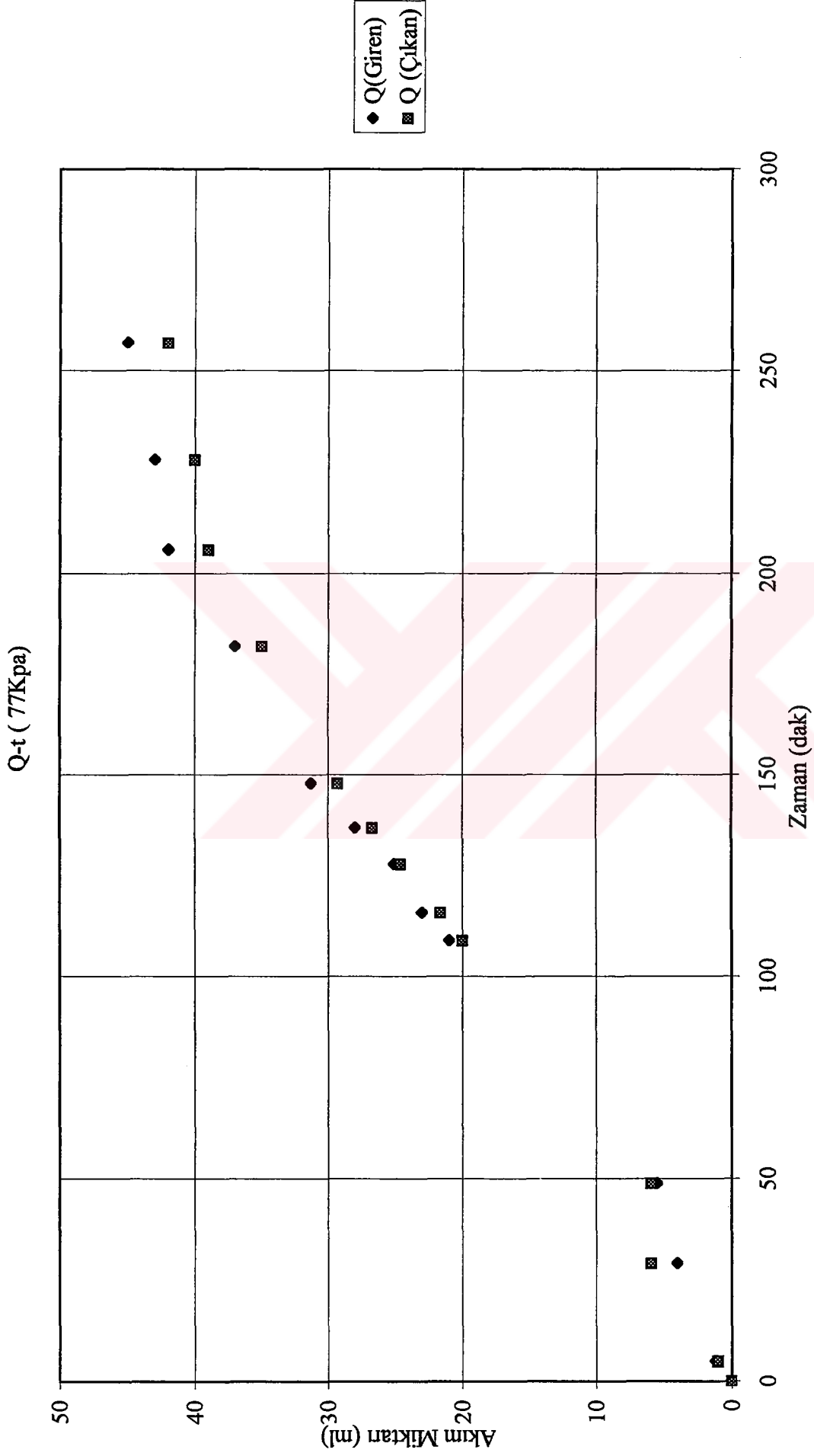
Yıldırım, S., (1995), " Kazıkların Taşıma Gücü", 20-66



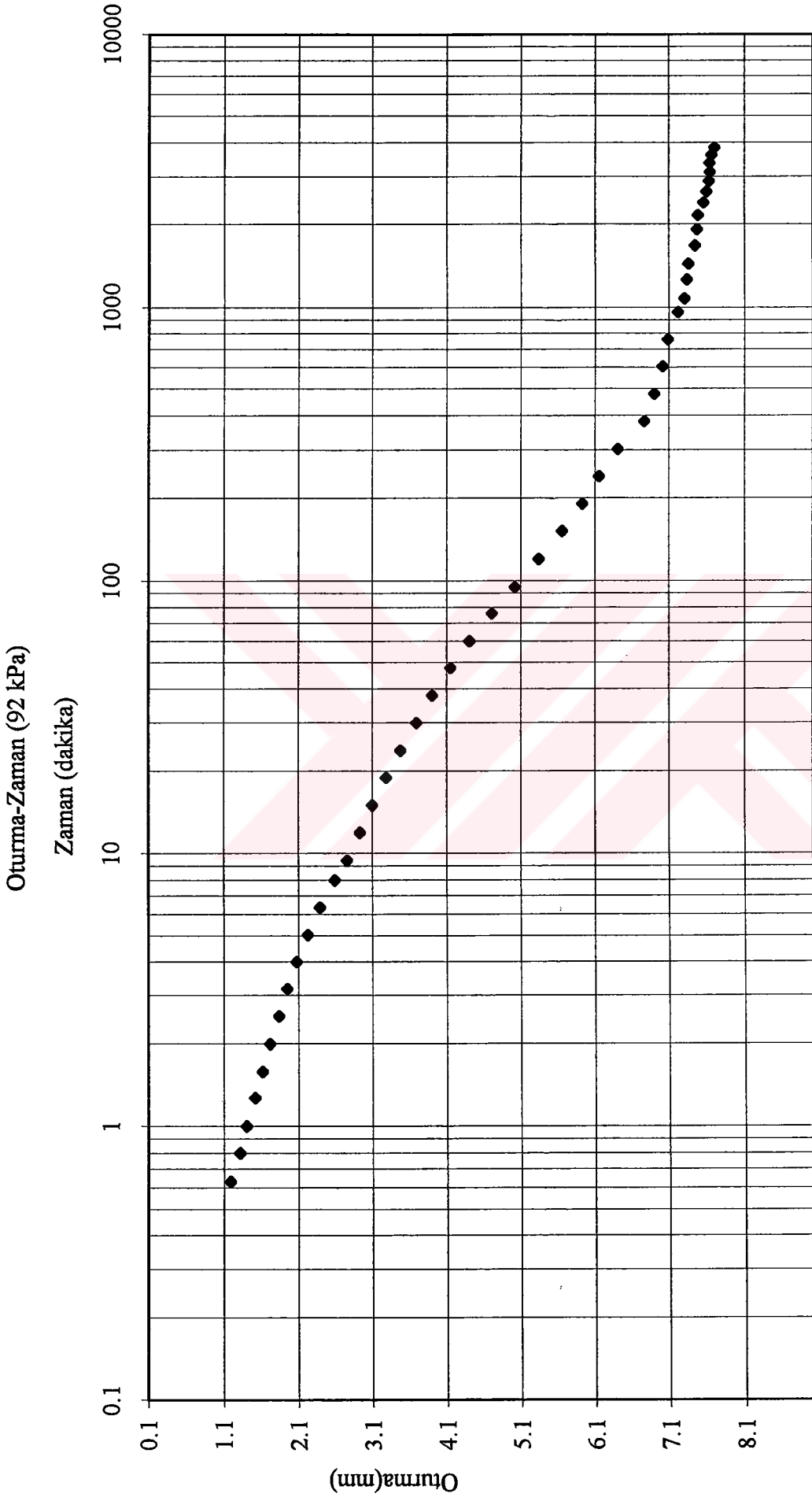
Şekil Ek-4.1a Yeşil kil için 25 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



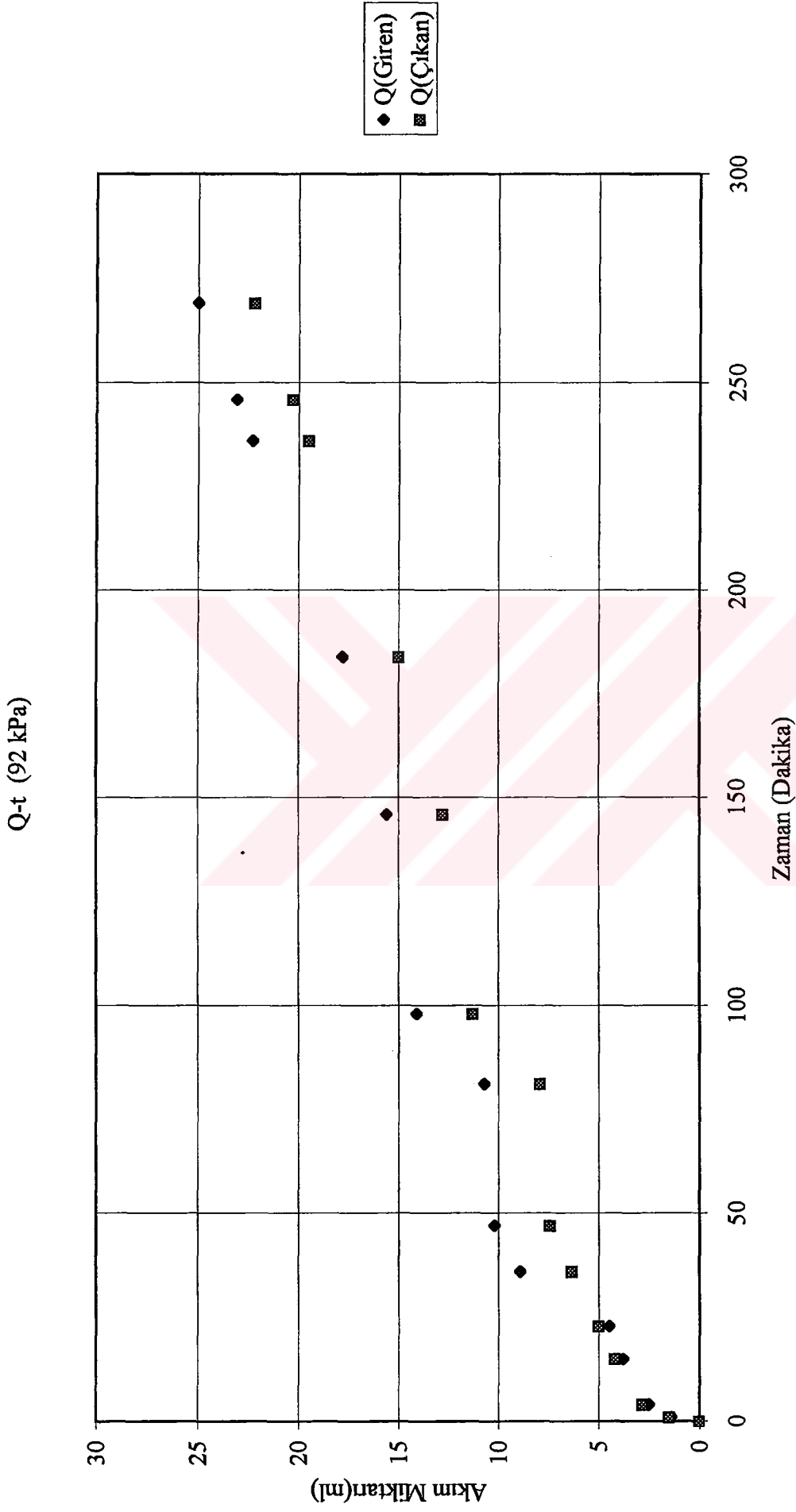
Şekil Ek-4.1b Yeşil kil için 77kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



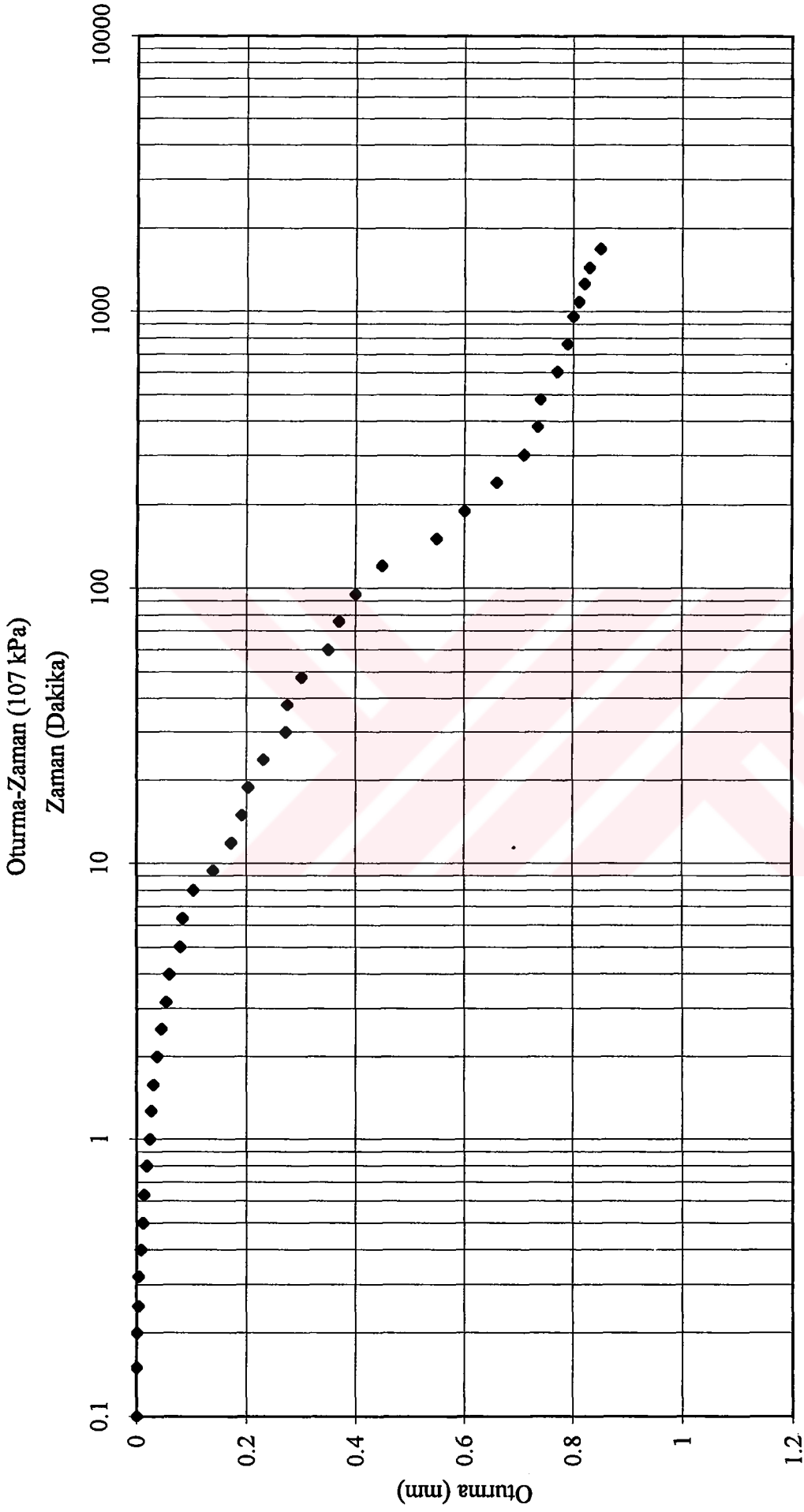
Şekil Ek-4.1c Yeşil kil için 77 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



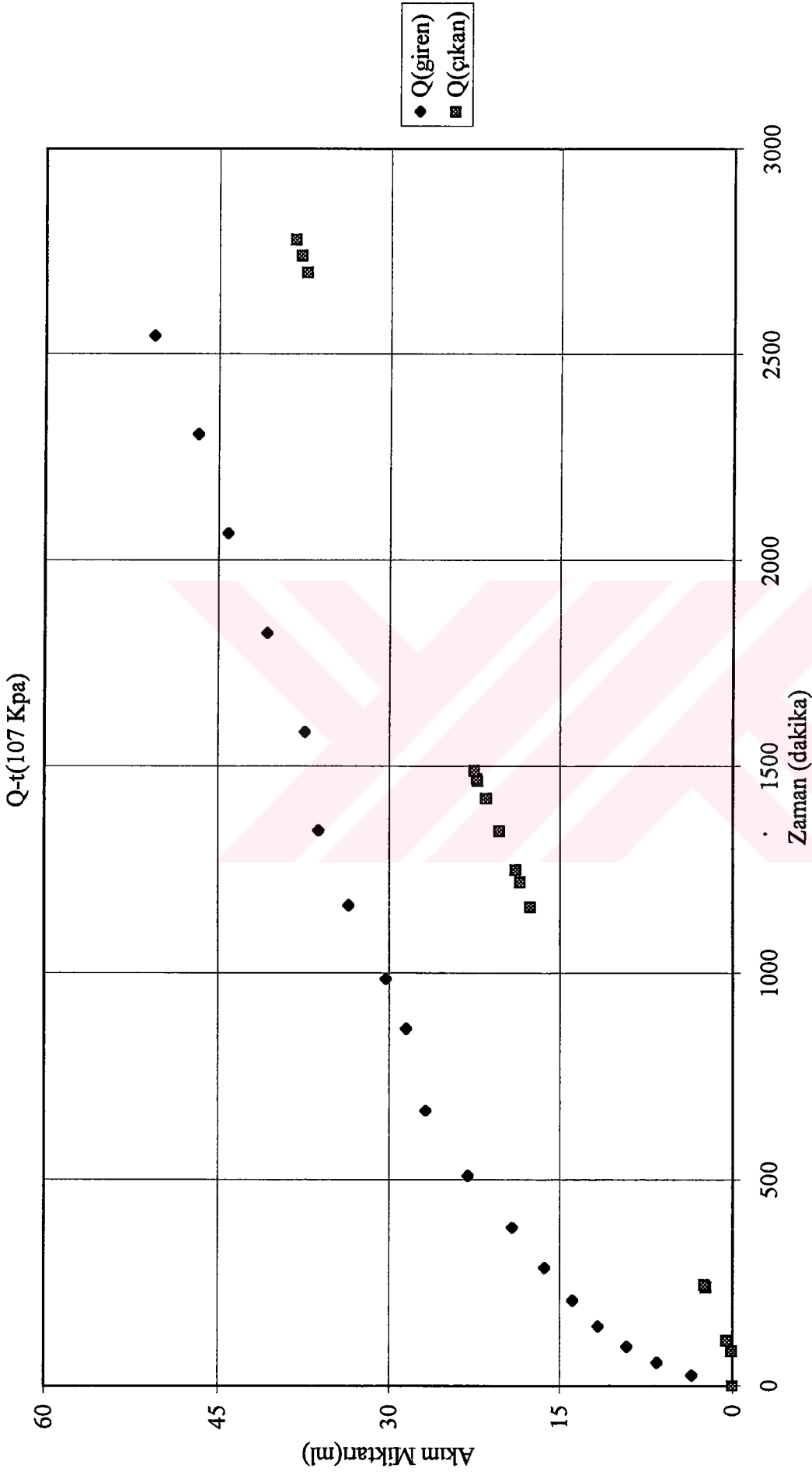
Şekil Ek-4.1d Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



Şekil Ek-4.1e Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

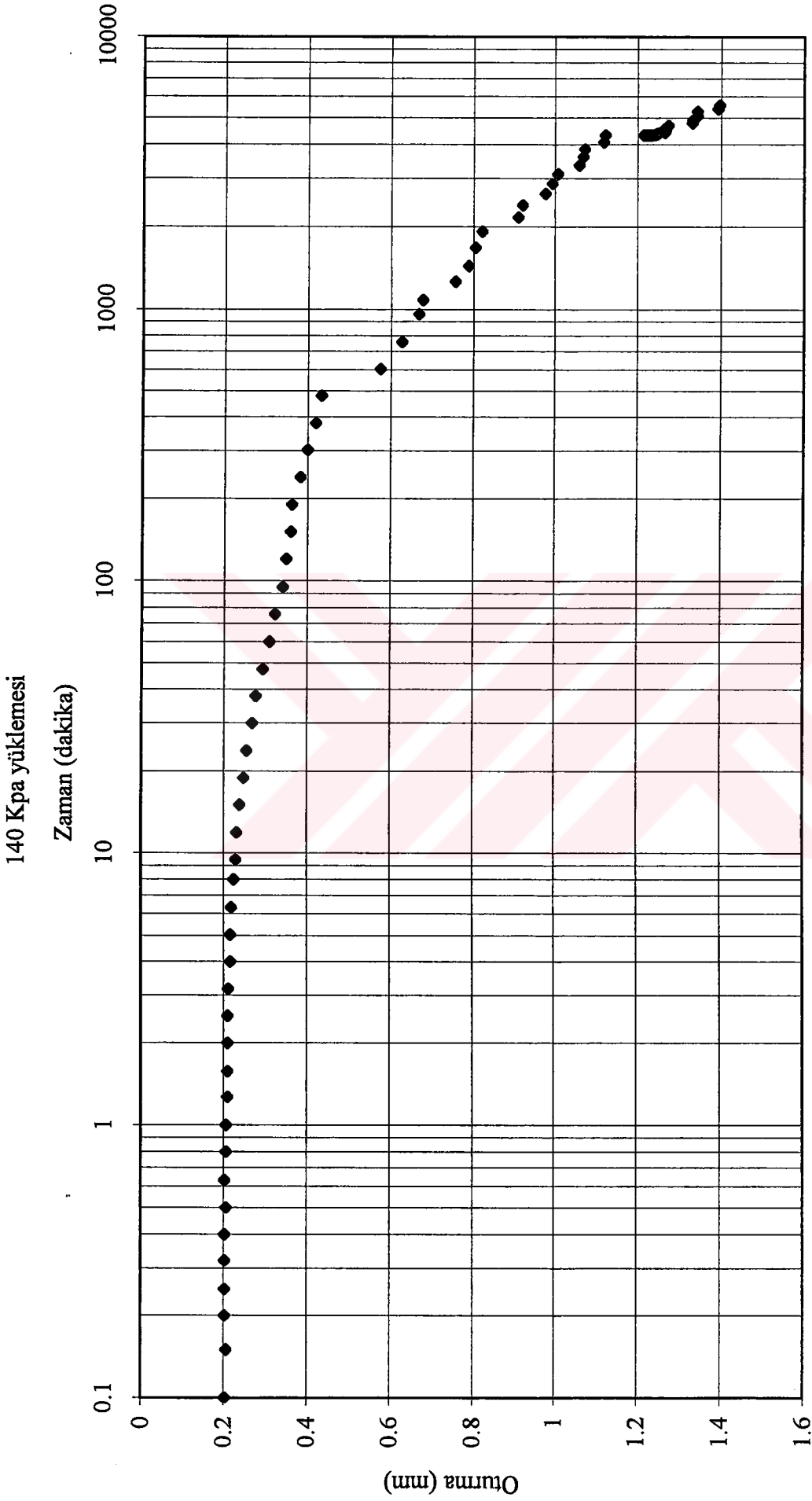


Şekil Ek-4.1f Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

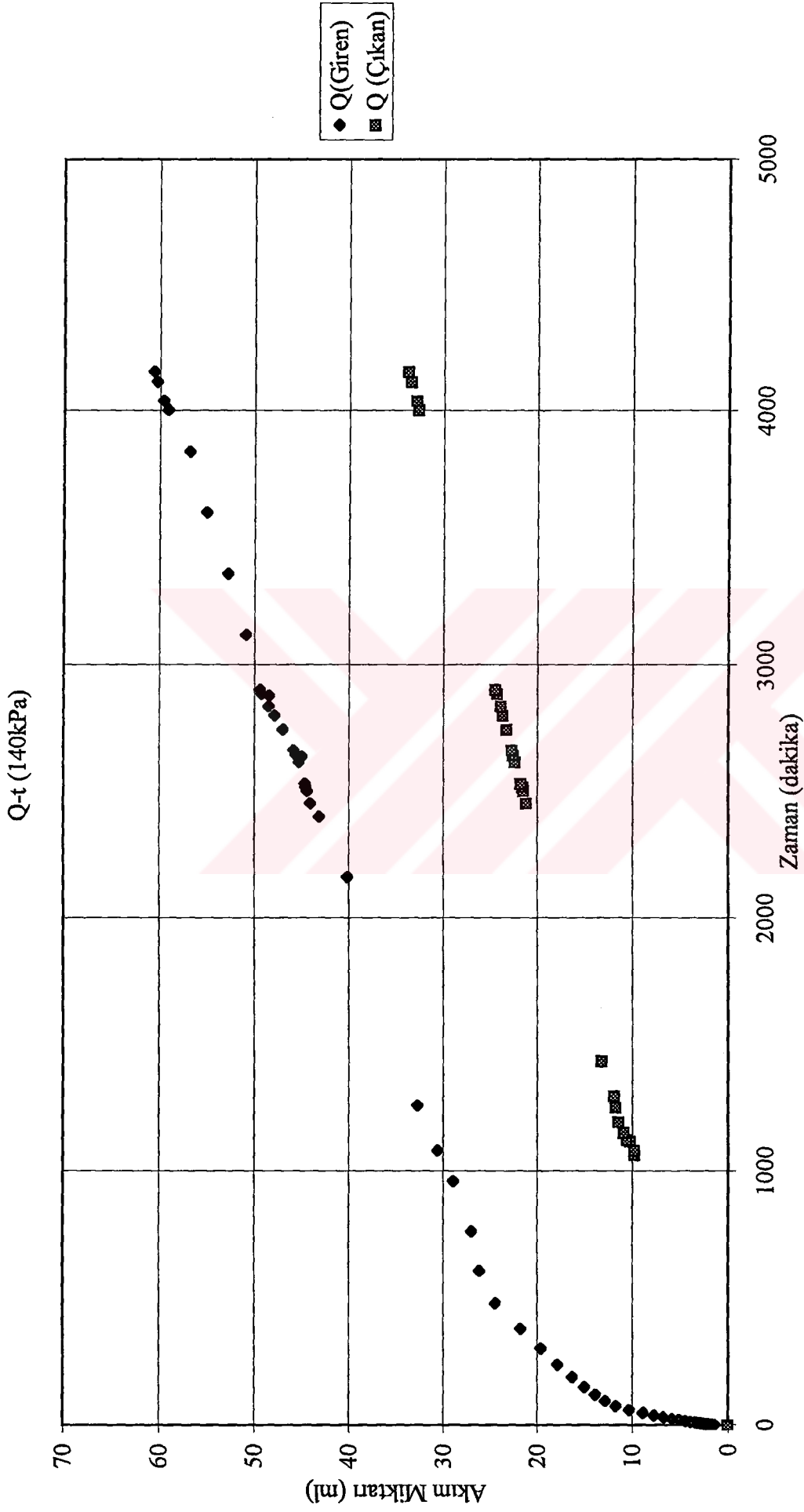


Şekil Ek-4. 1g Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

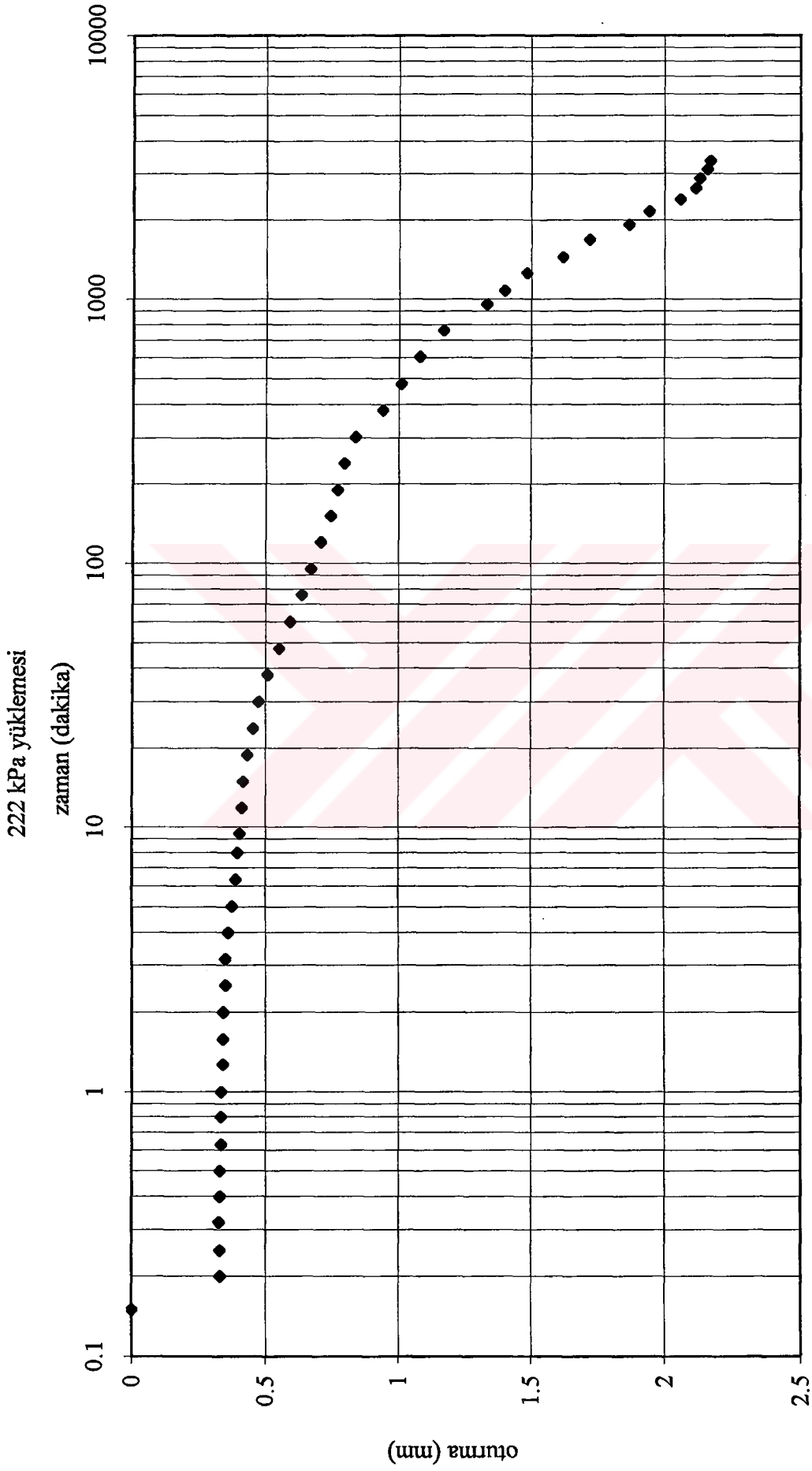




Şekil Ek-4.1h Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

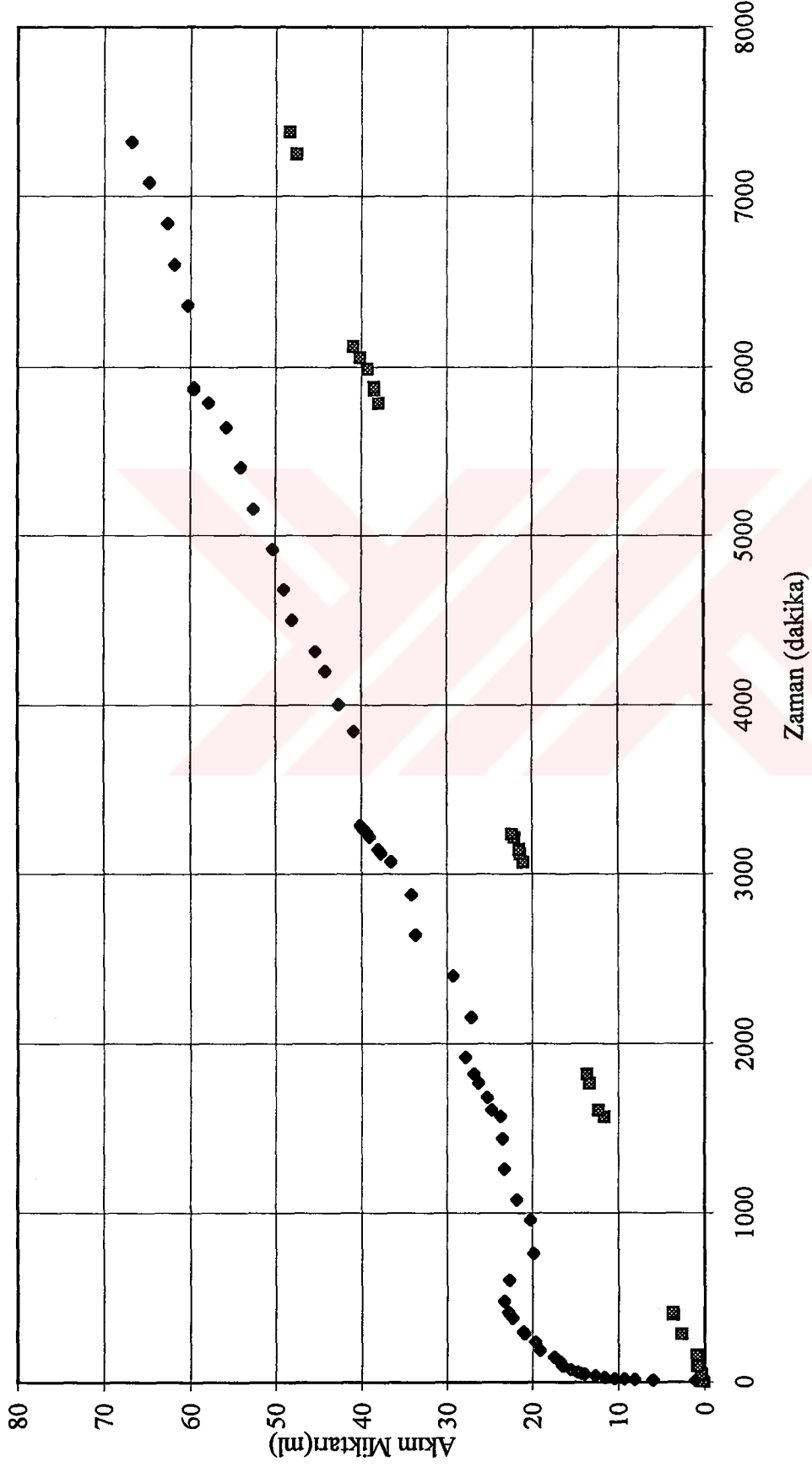


Şekil Ek-4.11 Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

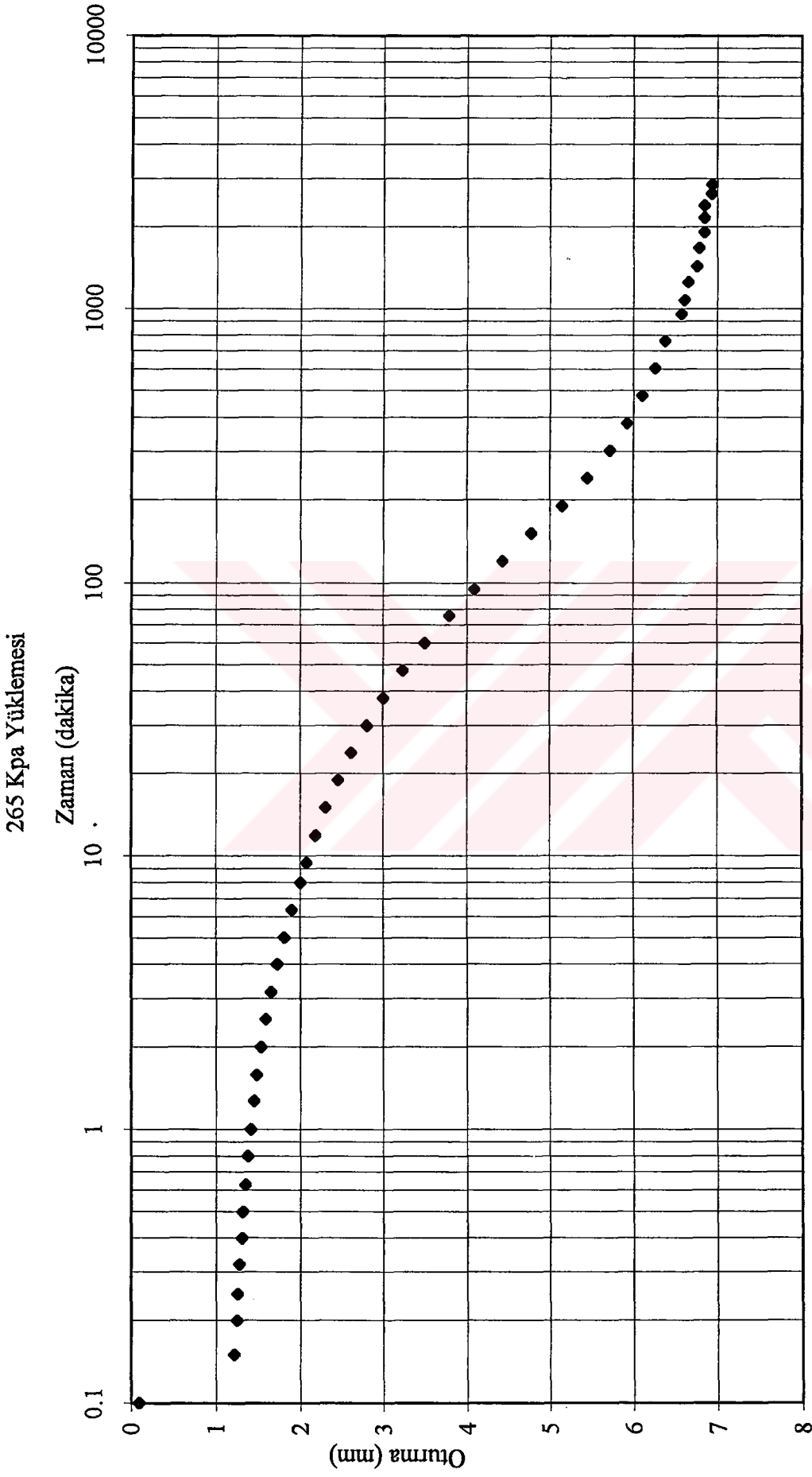


Şekil Ek-4.1i Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

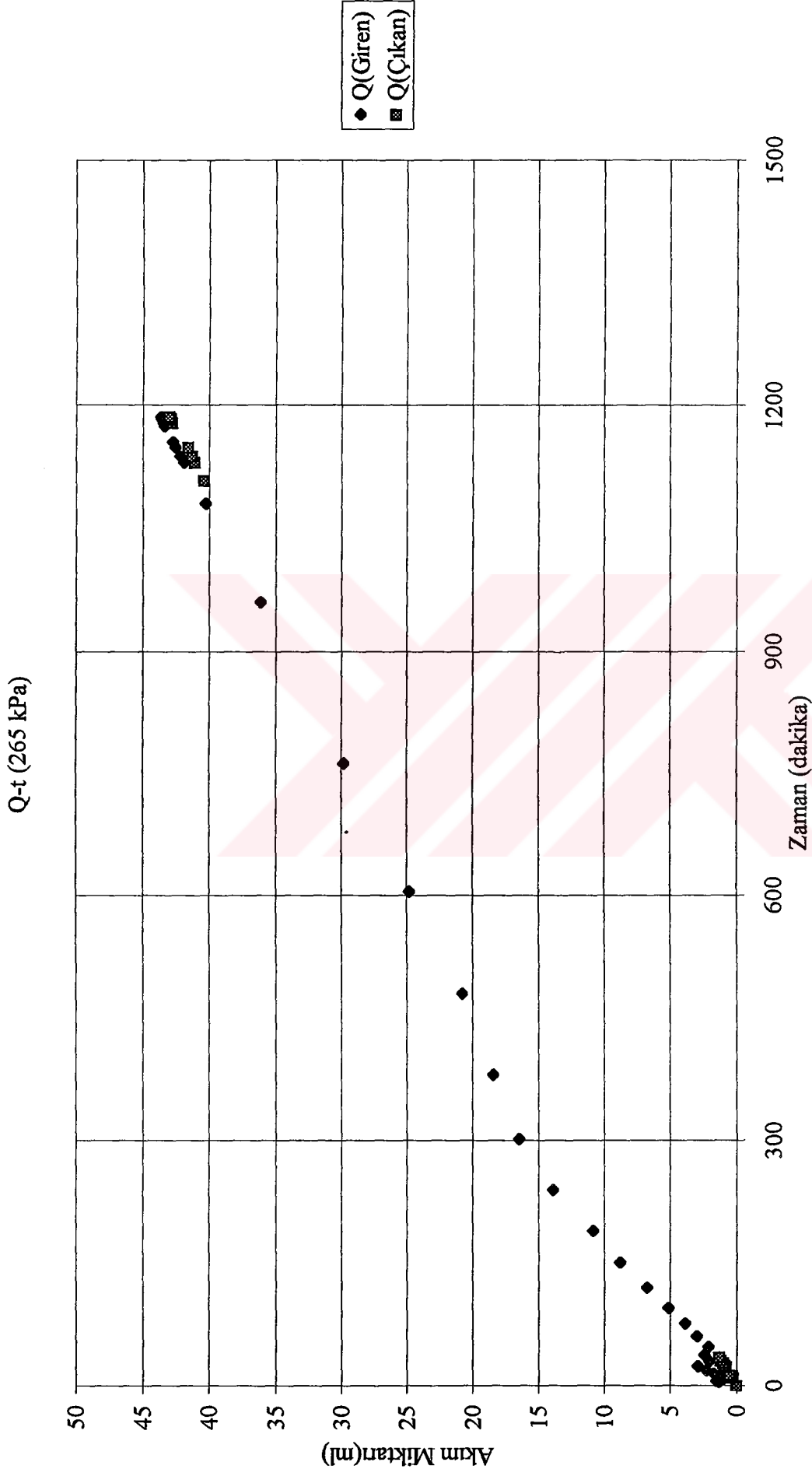
Q-t (222 Kpa)



Şekil Ek-4.1j Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

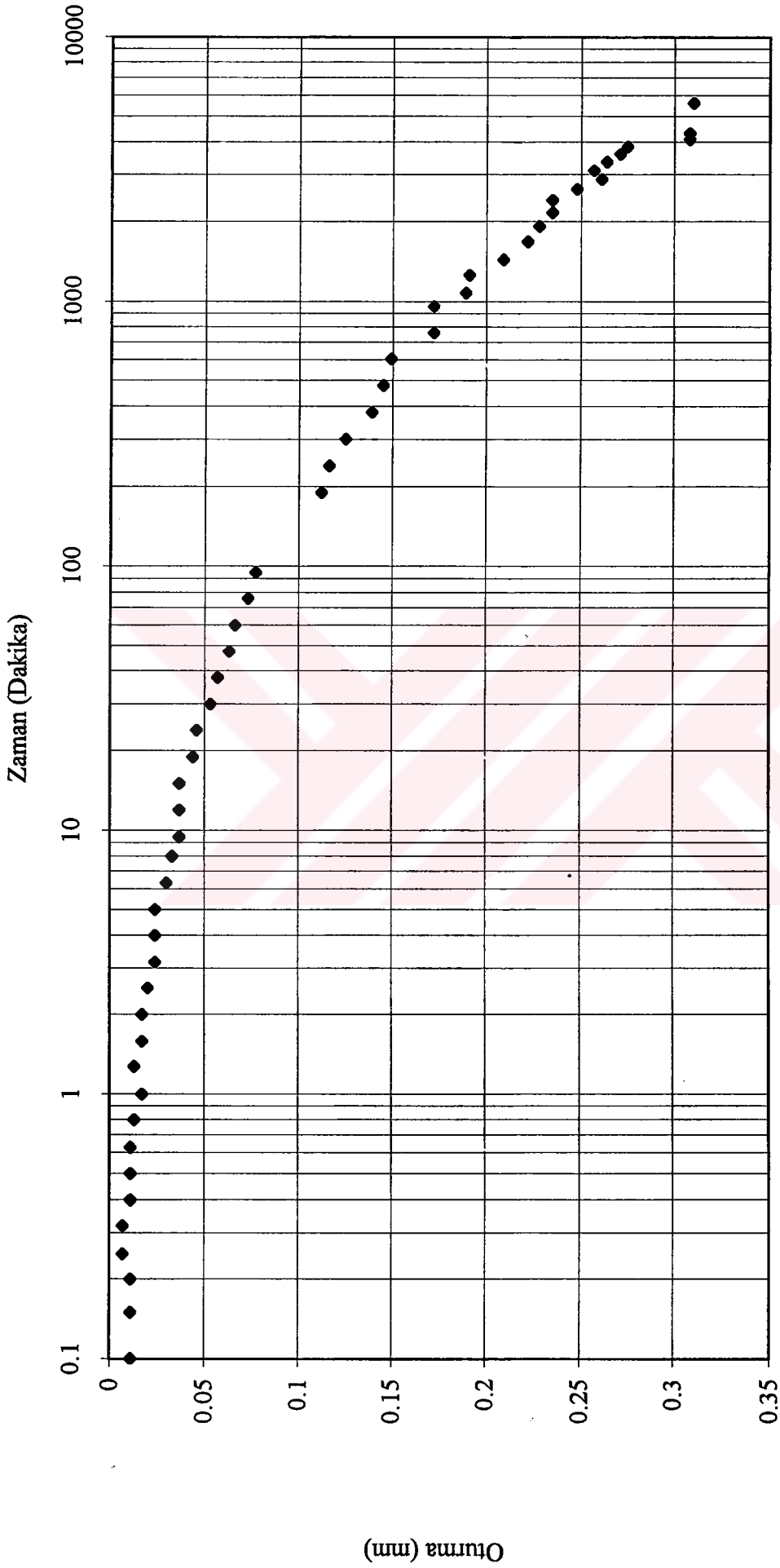


Şekil Ek-4.1k Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

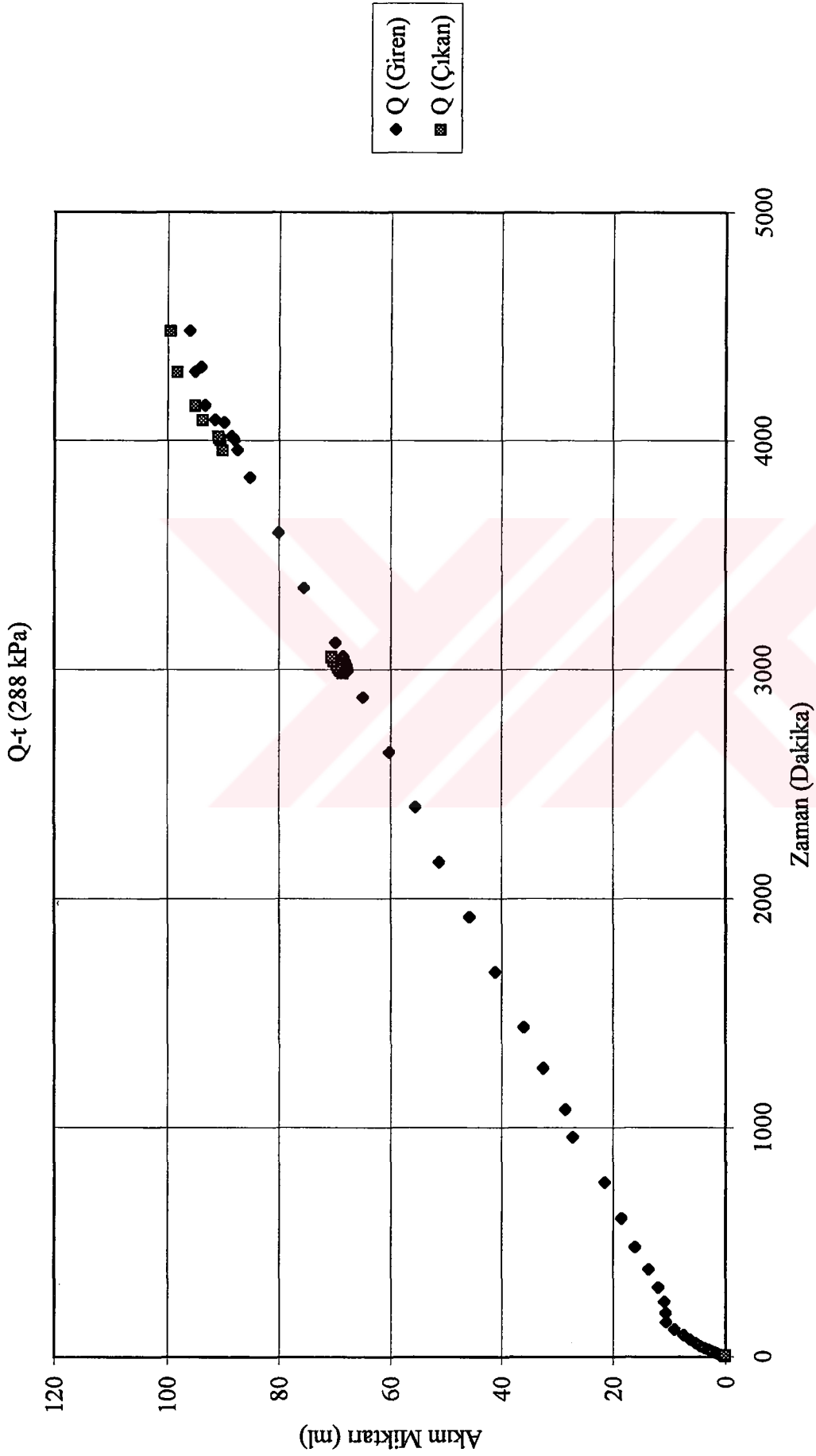


Şekil Ek-4.1 | Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

## 288 kPa Yükleme

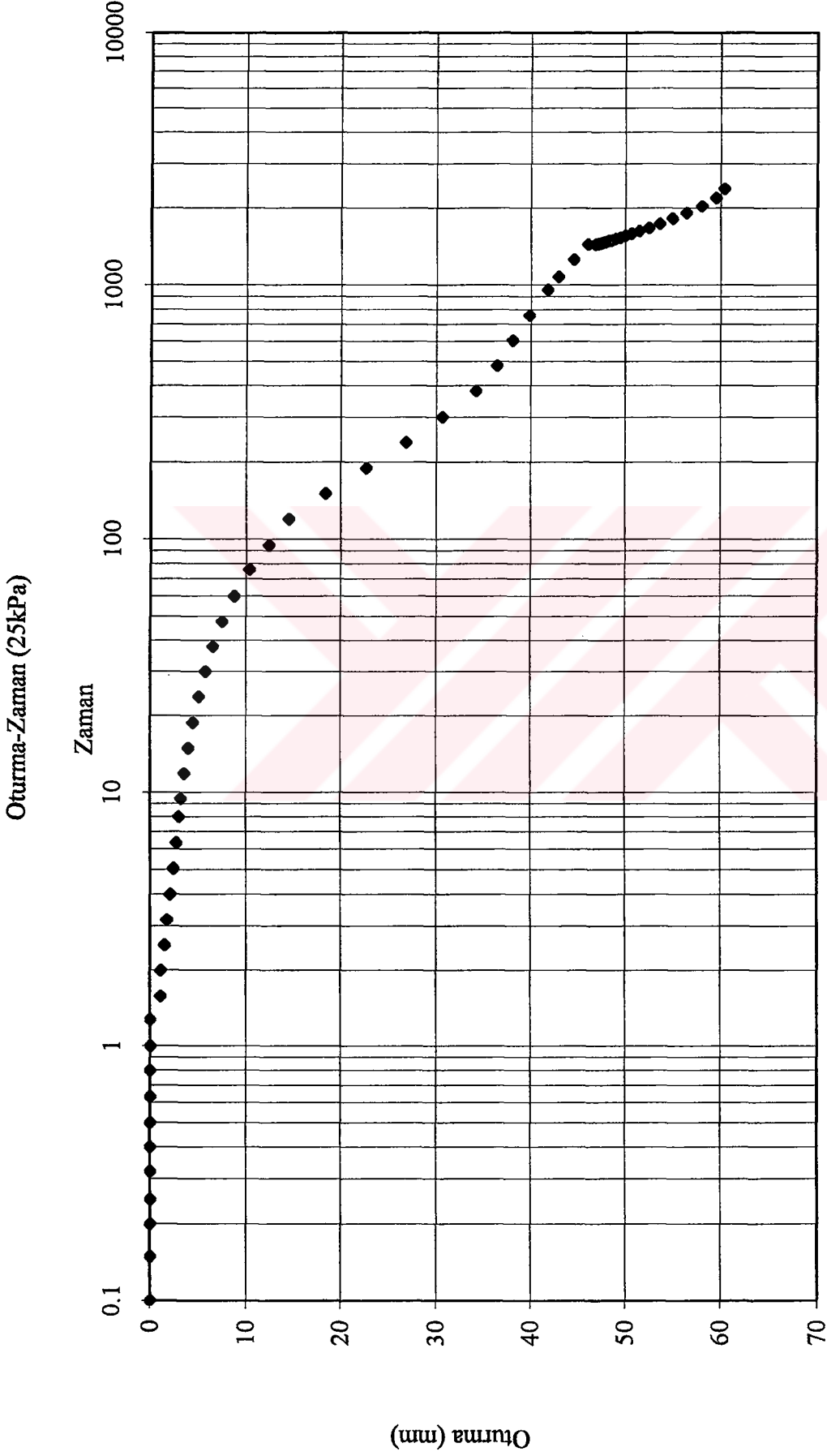


Şekil Ek-4.1m Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

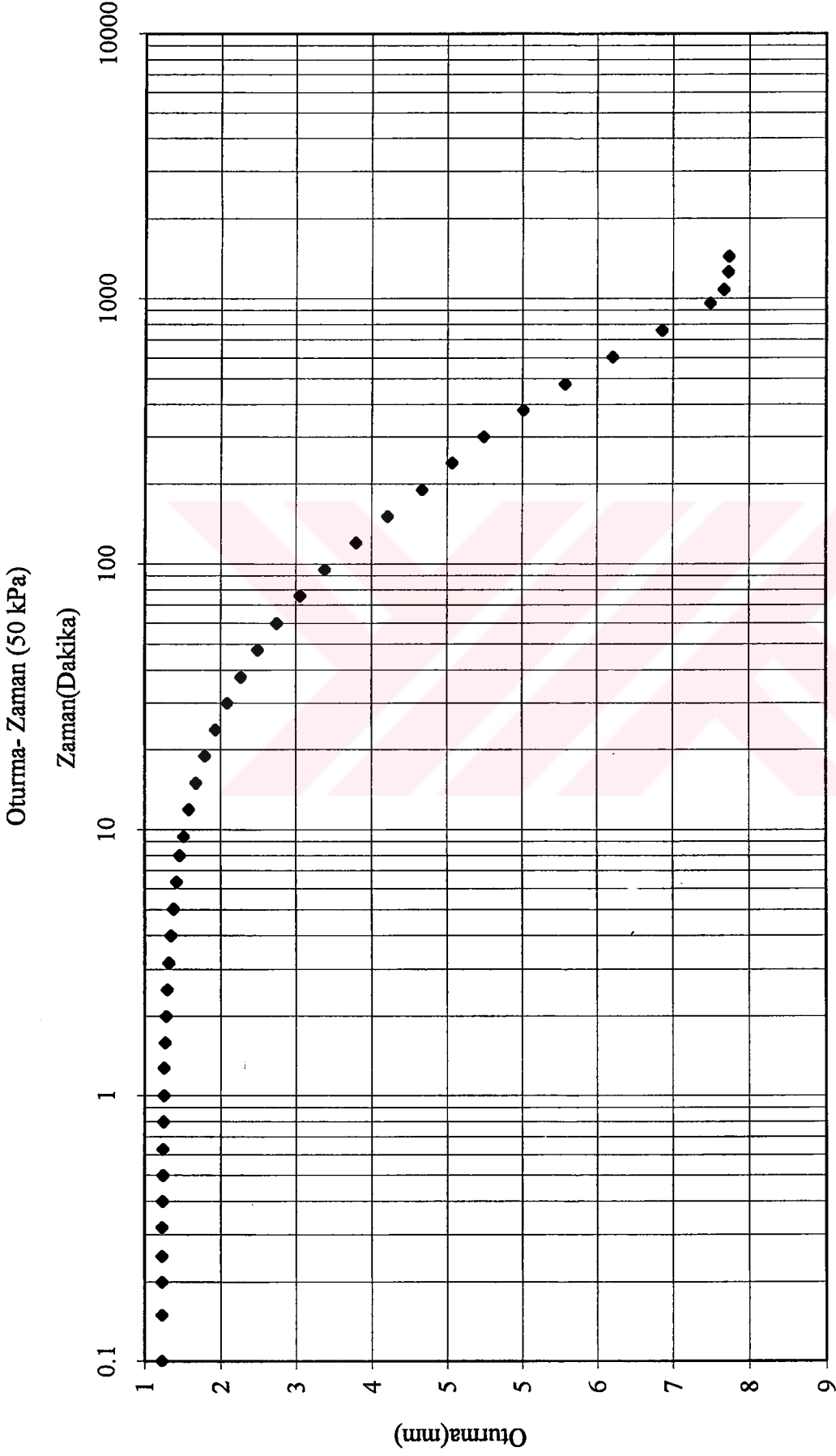


Şekil Ek-4.1n Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

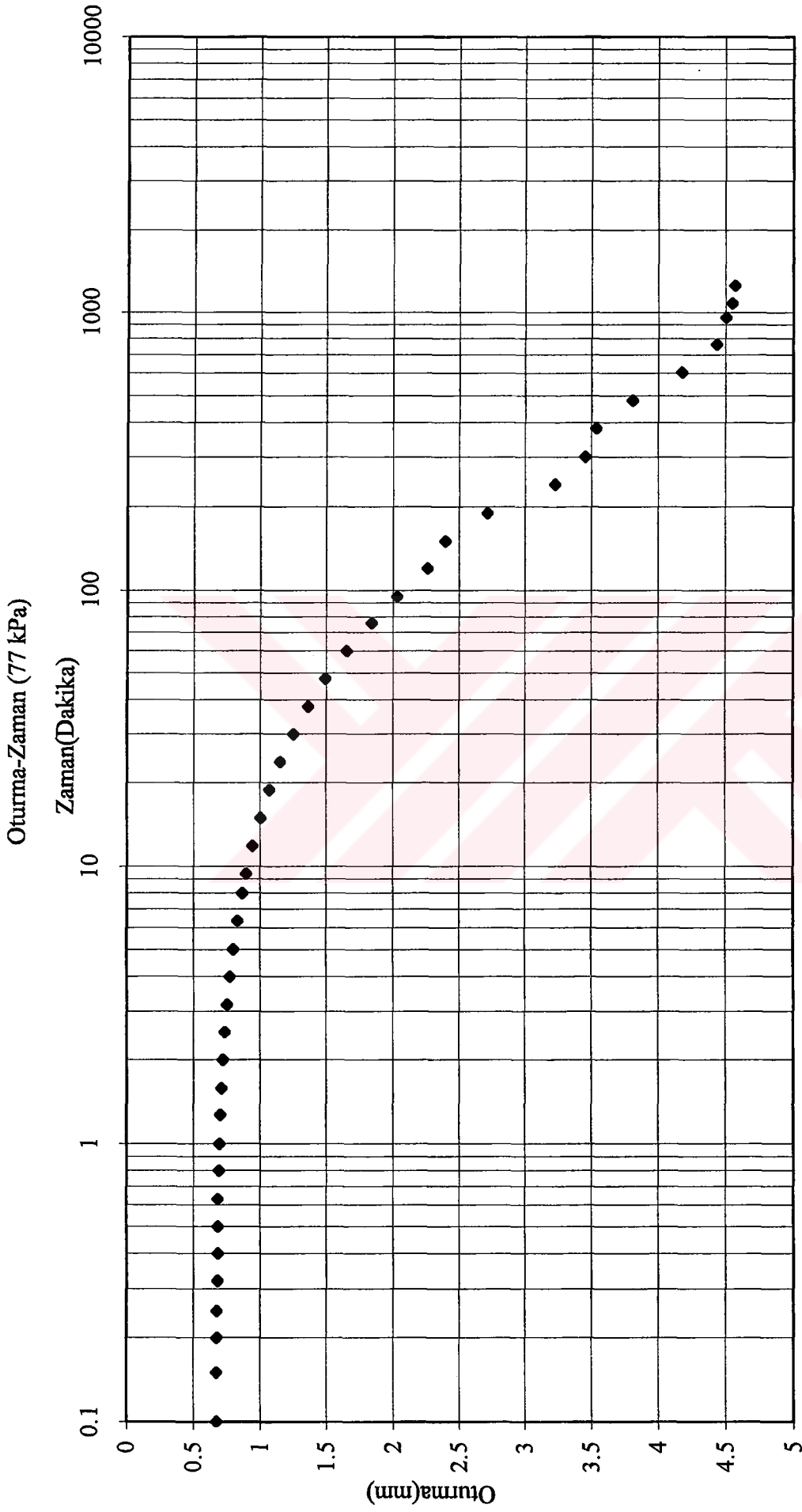




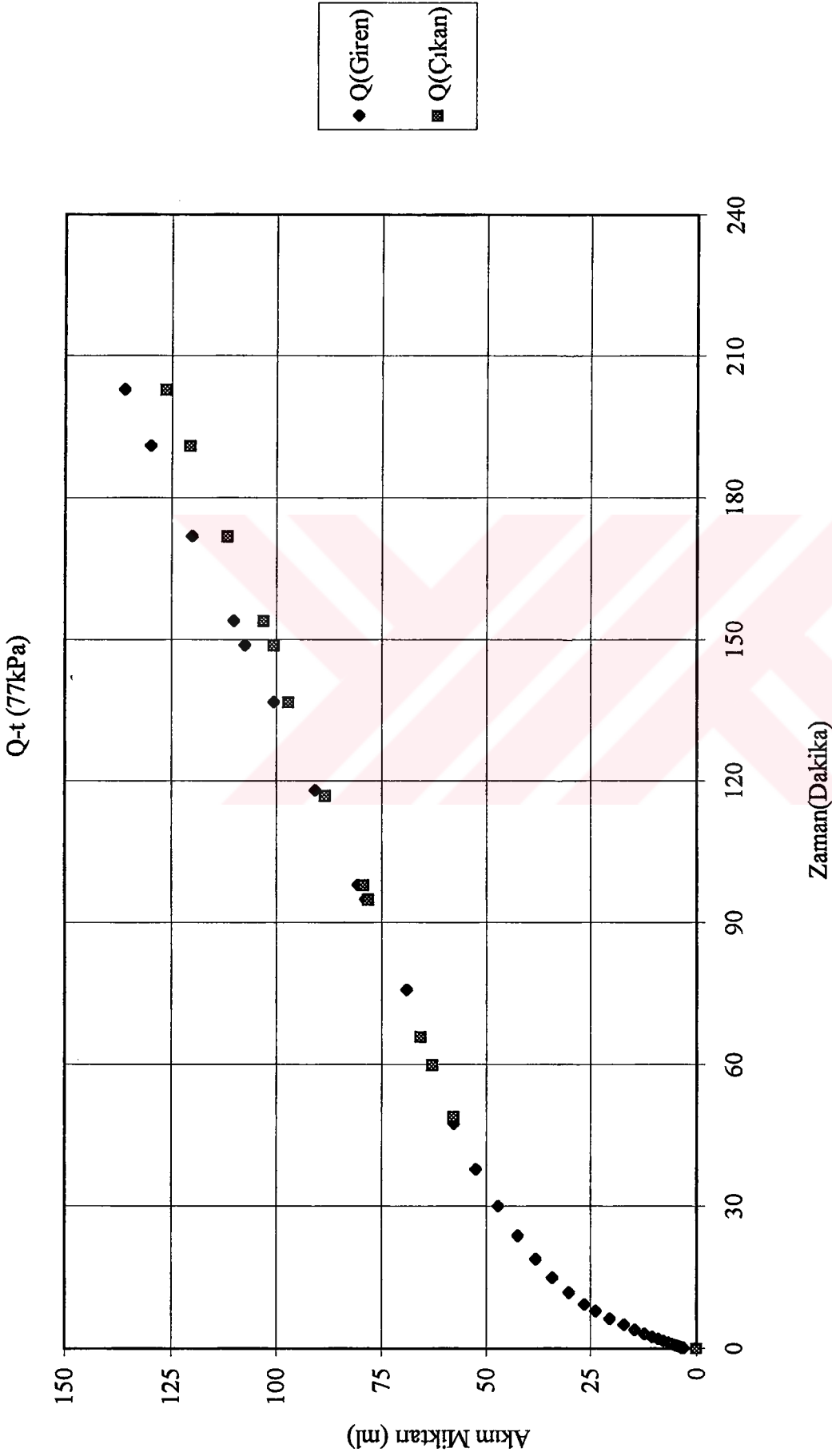
Şekil Ek-4.2 a Yeşil kil için 25 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



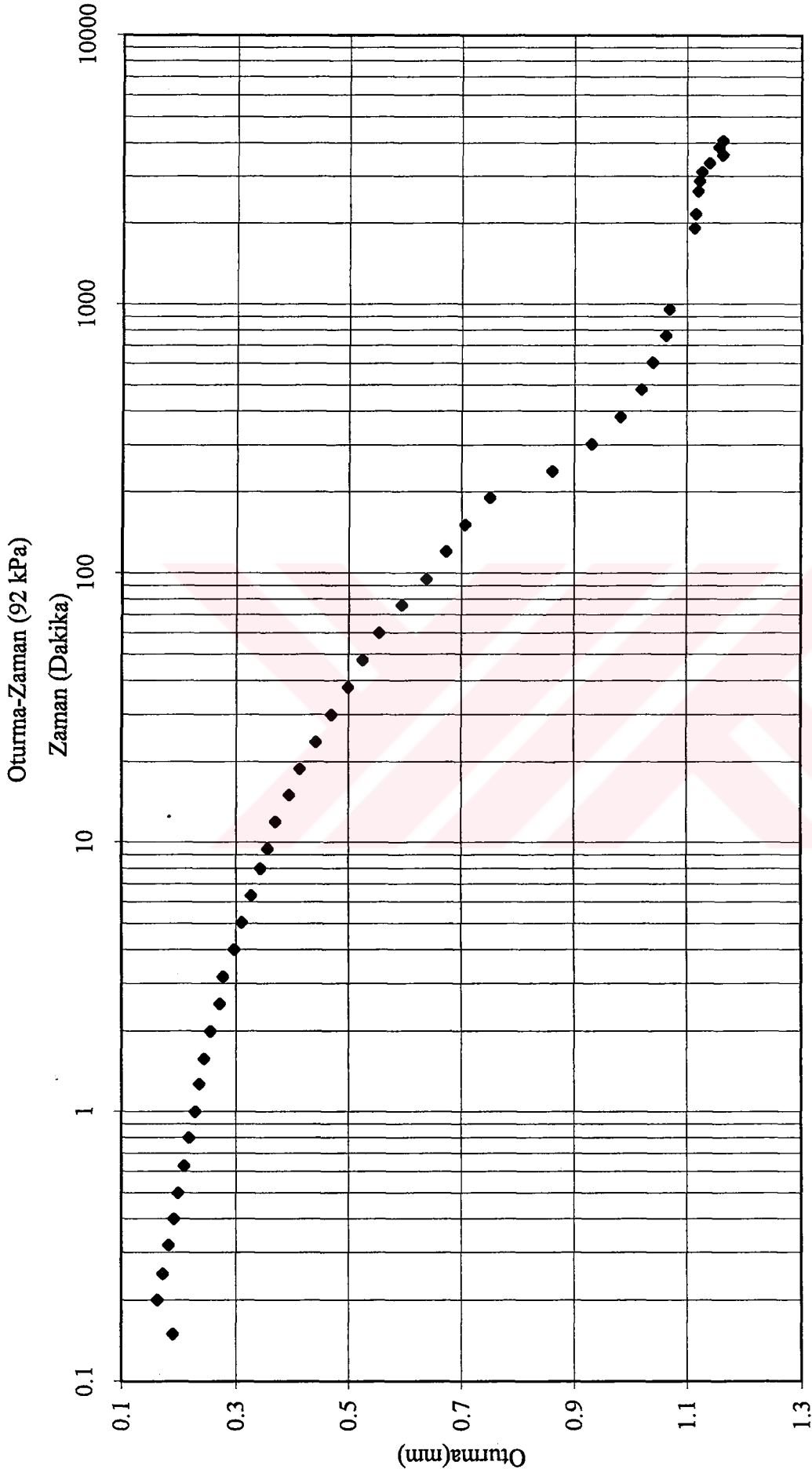
Şekil Ek-4.2 b Yeşil kil için 50 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



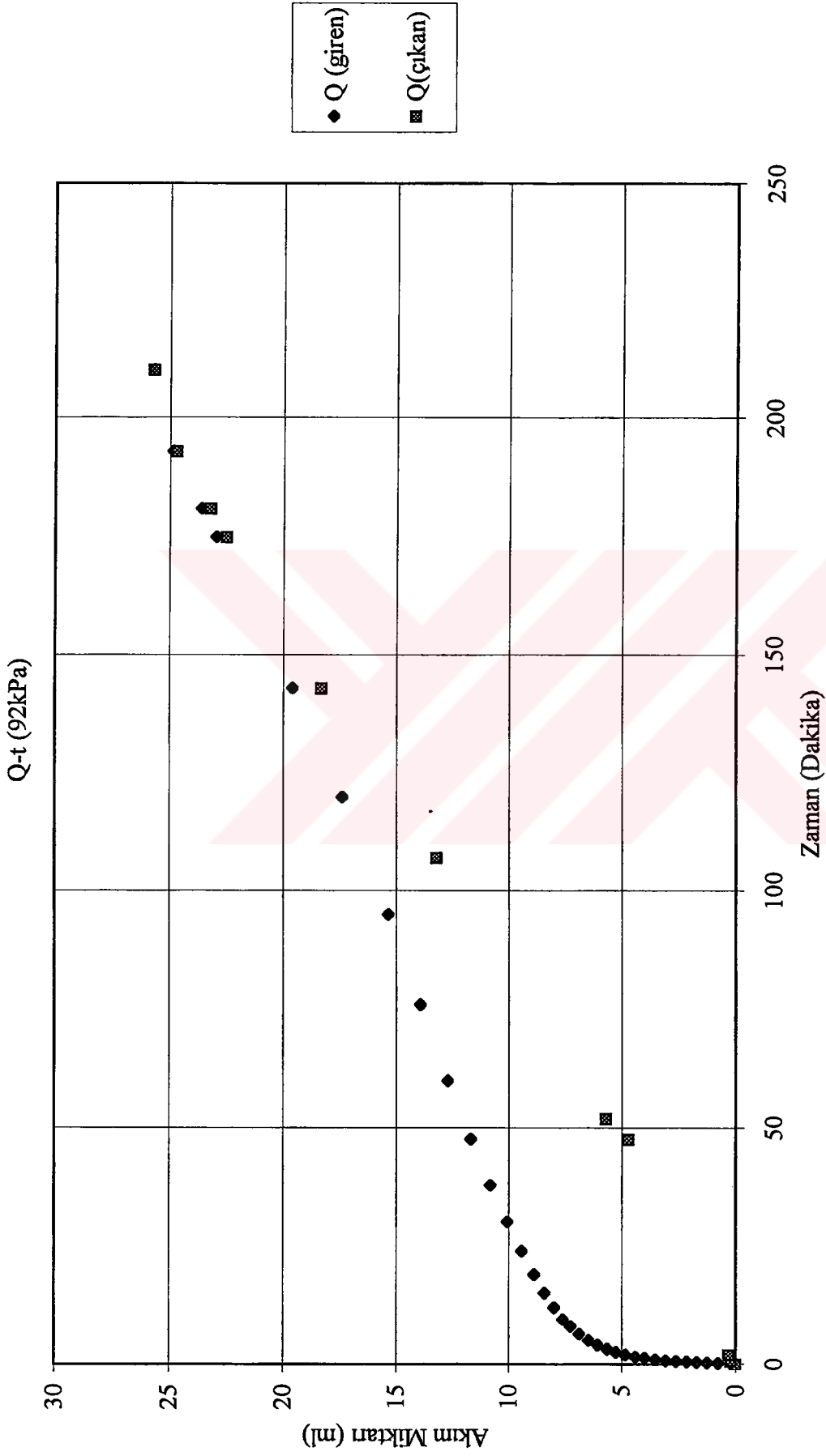
Şekil Ek-4.2 c Yeşil kıl için 77 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



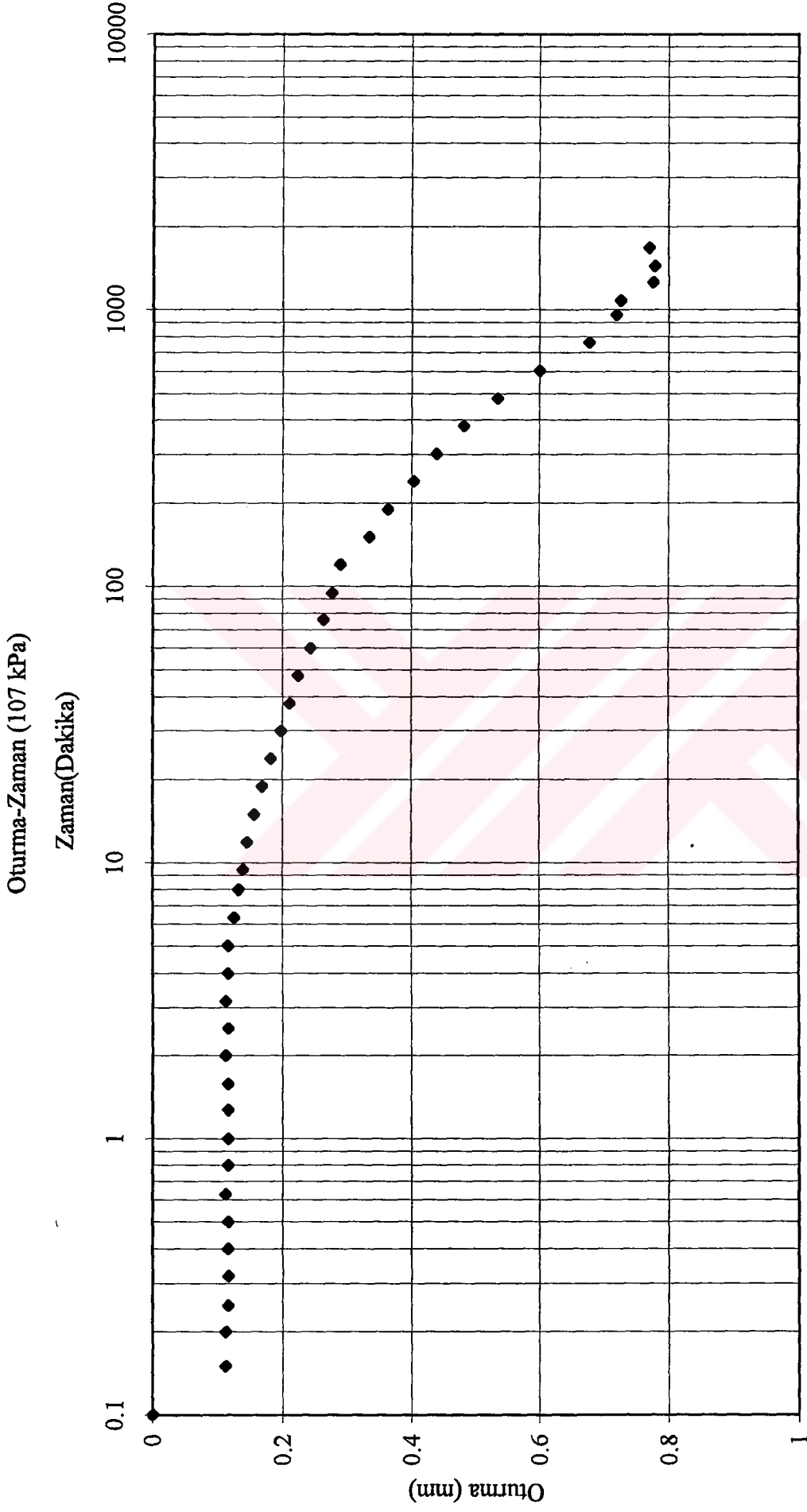
Şekil Ek-4.2d Yeşil kil için 77 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



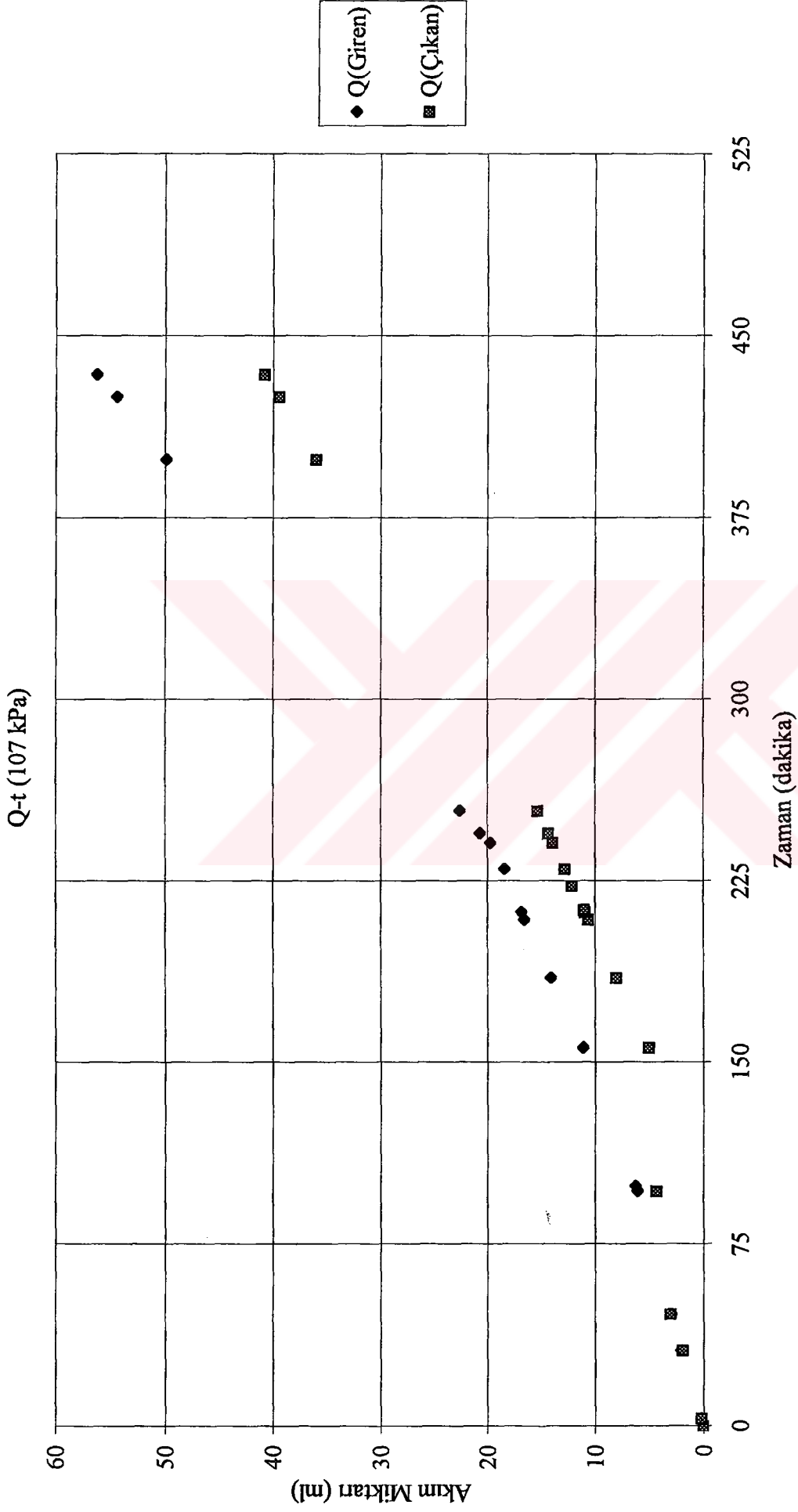
Şekil Ek-4.2e Yeşil kil için 92 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



Şekil Ek-4.2 f Yeşil kıl için 92 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı -zaman grafiği

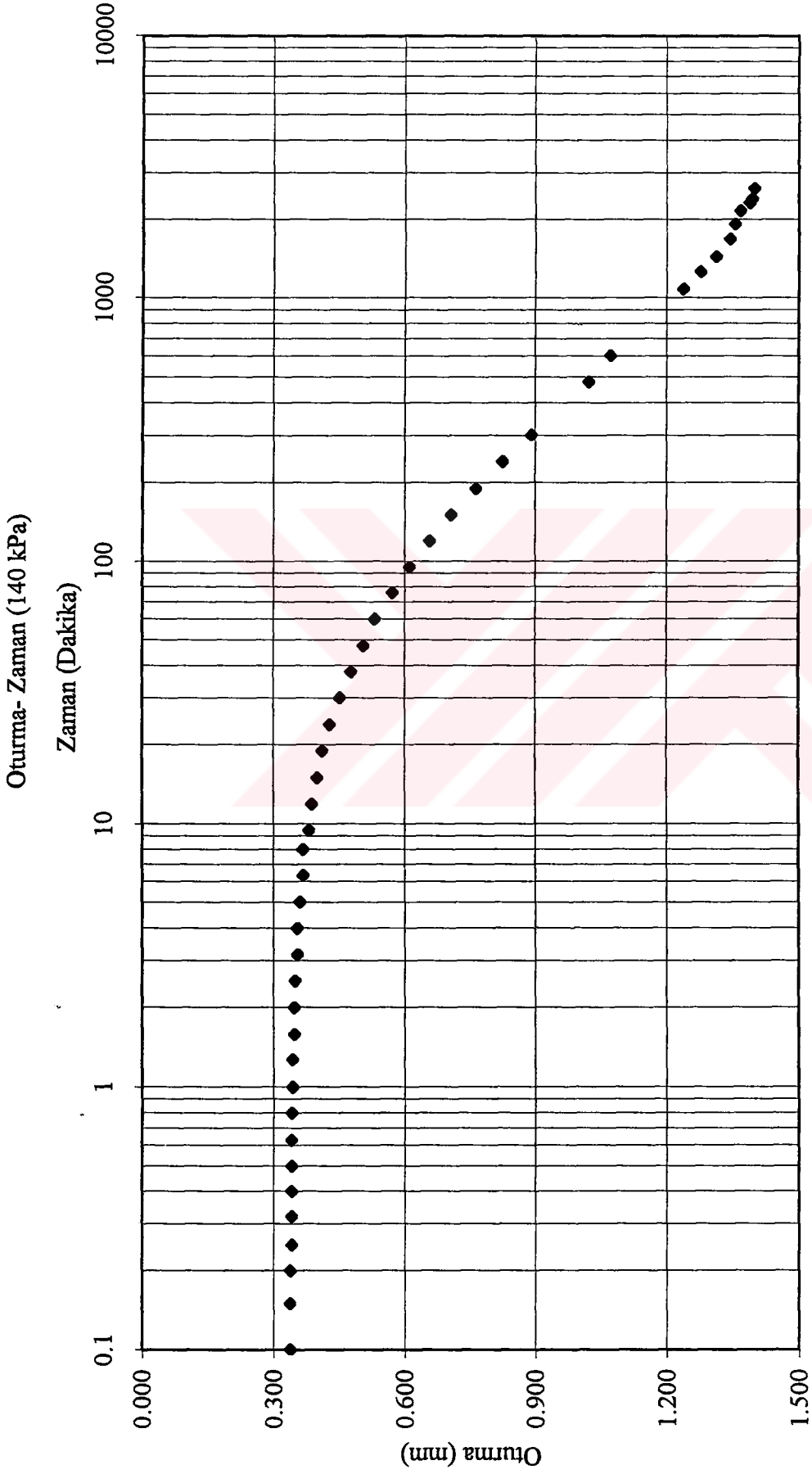


Şekil Ek-4.2 g Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

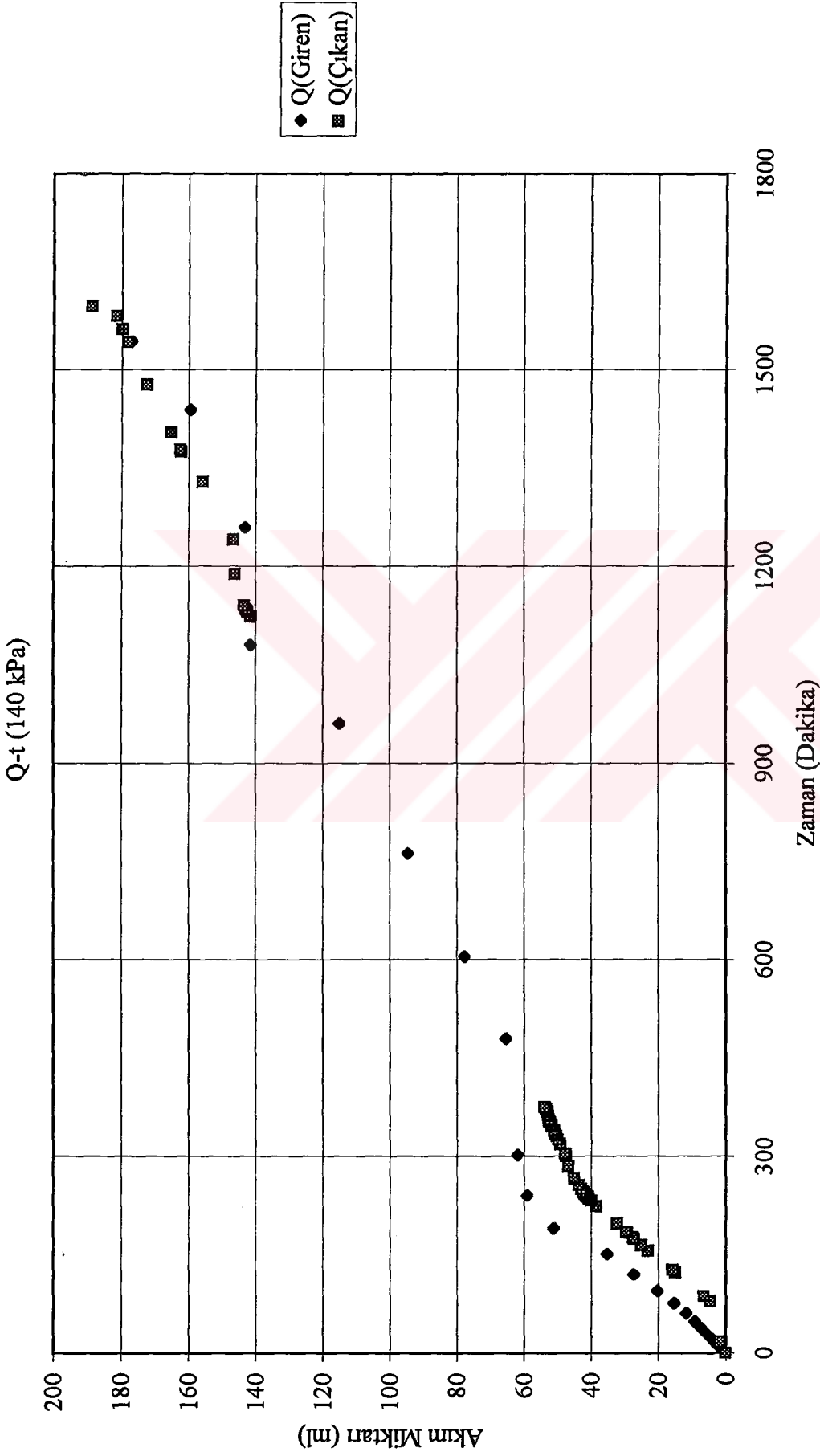


Şekil Ek-4.2 h Yeşil kil için 107 kPa gerilme kademesinde radyal yönü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



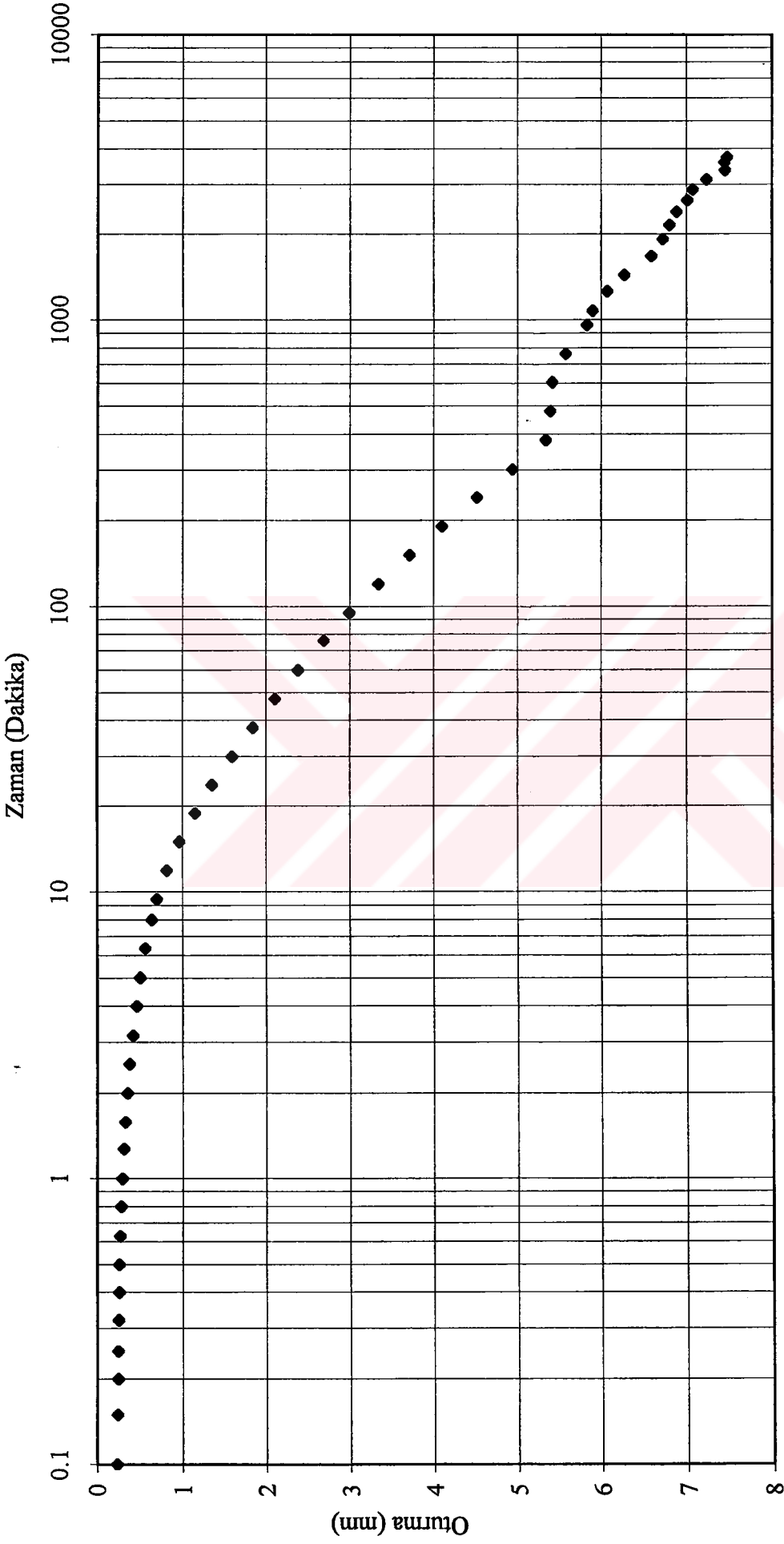


Şekil Ek-4.2 1 Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

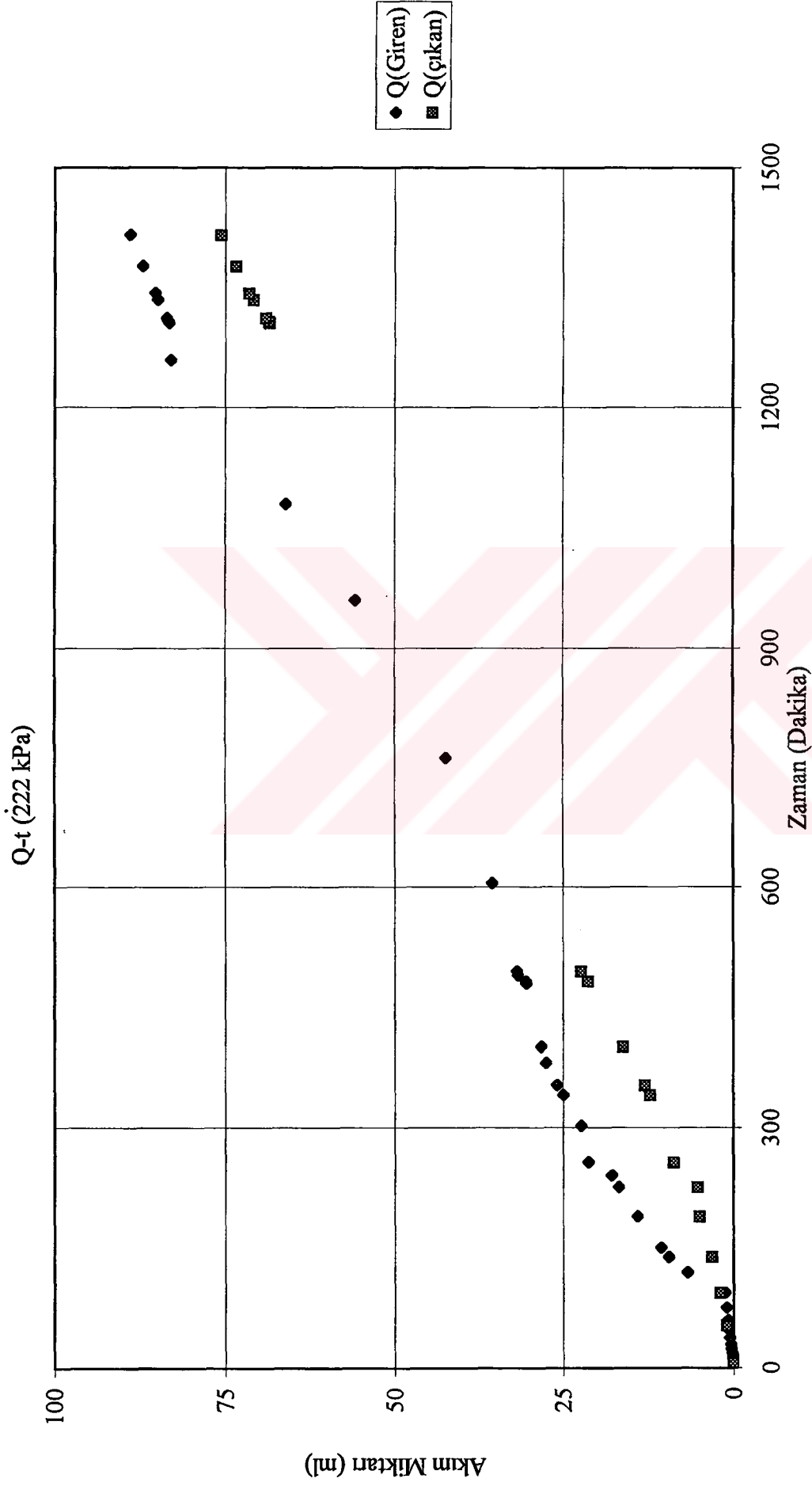


Şekil Ek-4.2 i Yeşil kil için 140 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

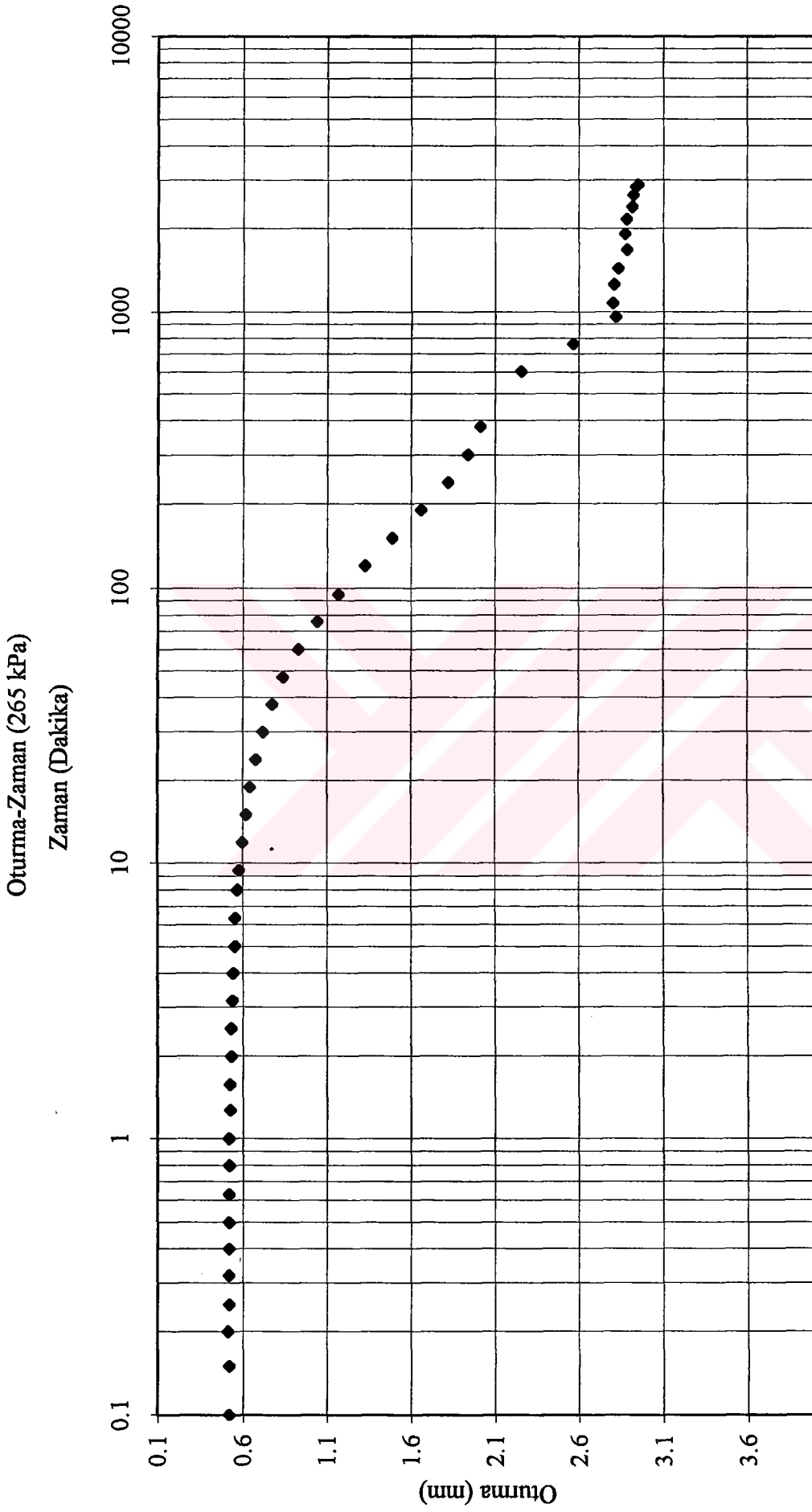
## Oturma-Zaman (222 kPa)



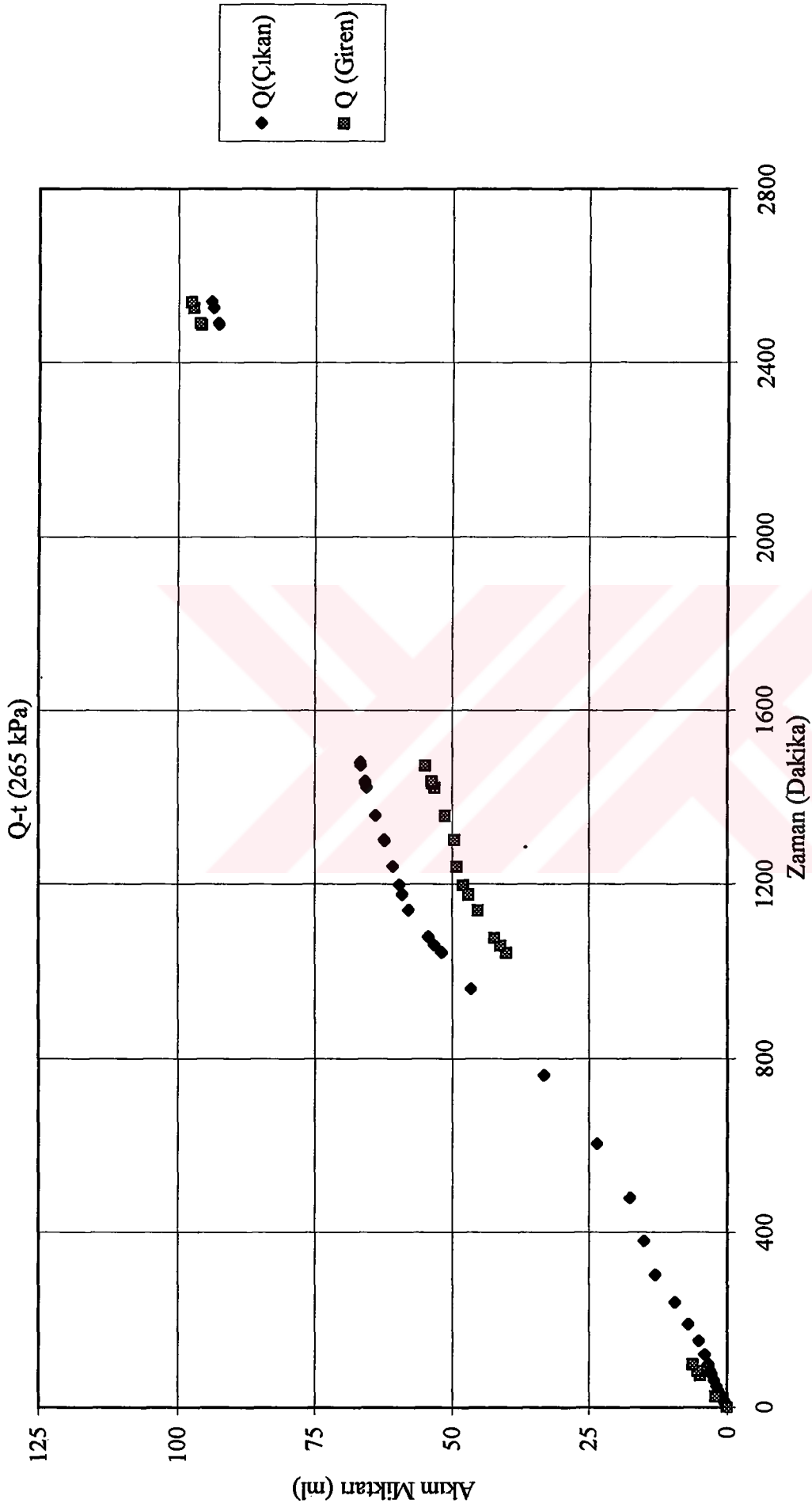
Şekil Ek-4.2 j Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



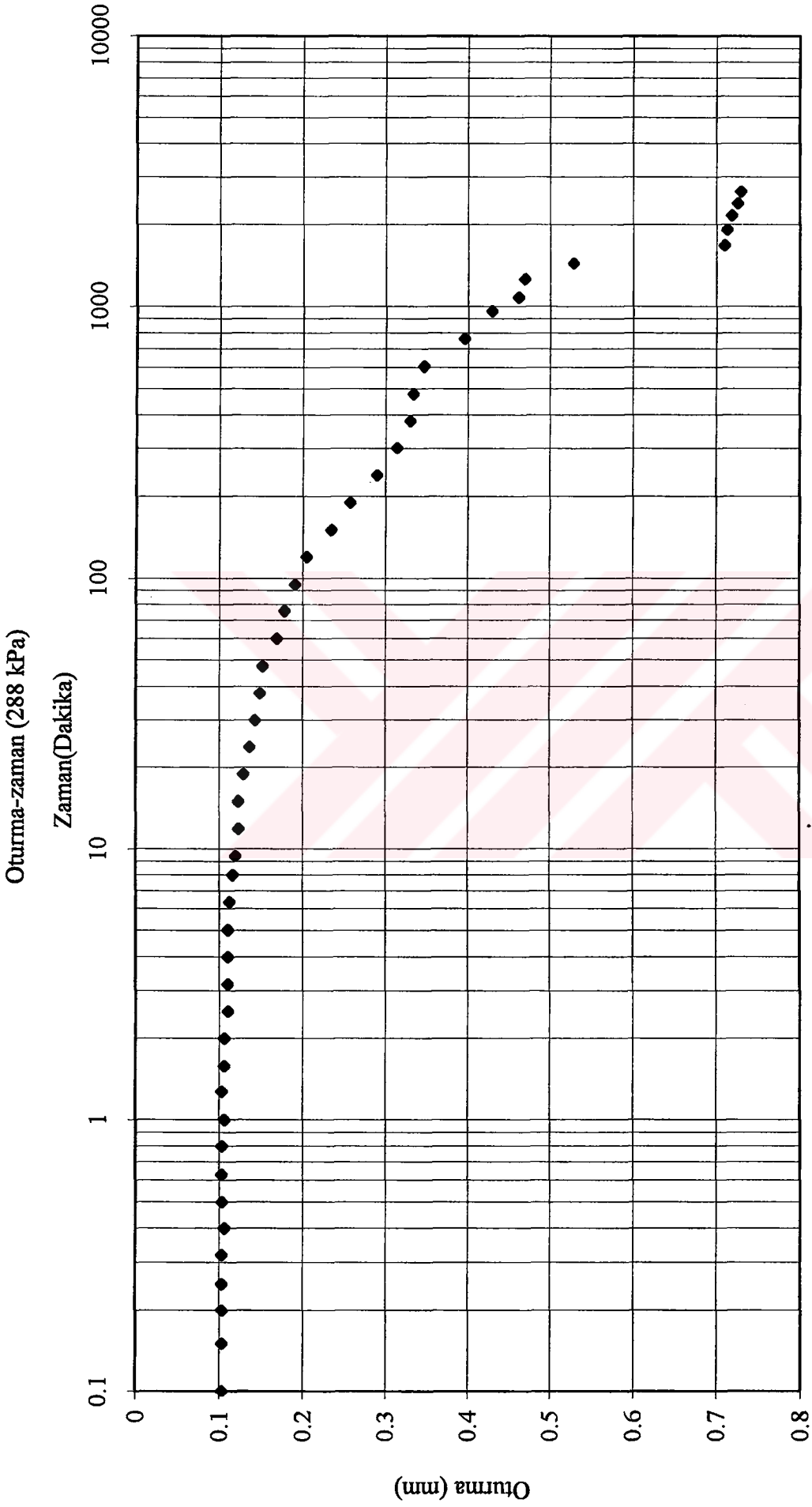
Şekil Ek-4.2 k Yeşil kil için 222 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



Şekil Ek-4.2.1 Yeşil kil için 265 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

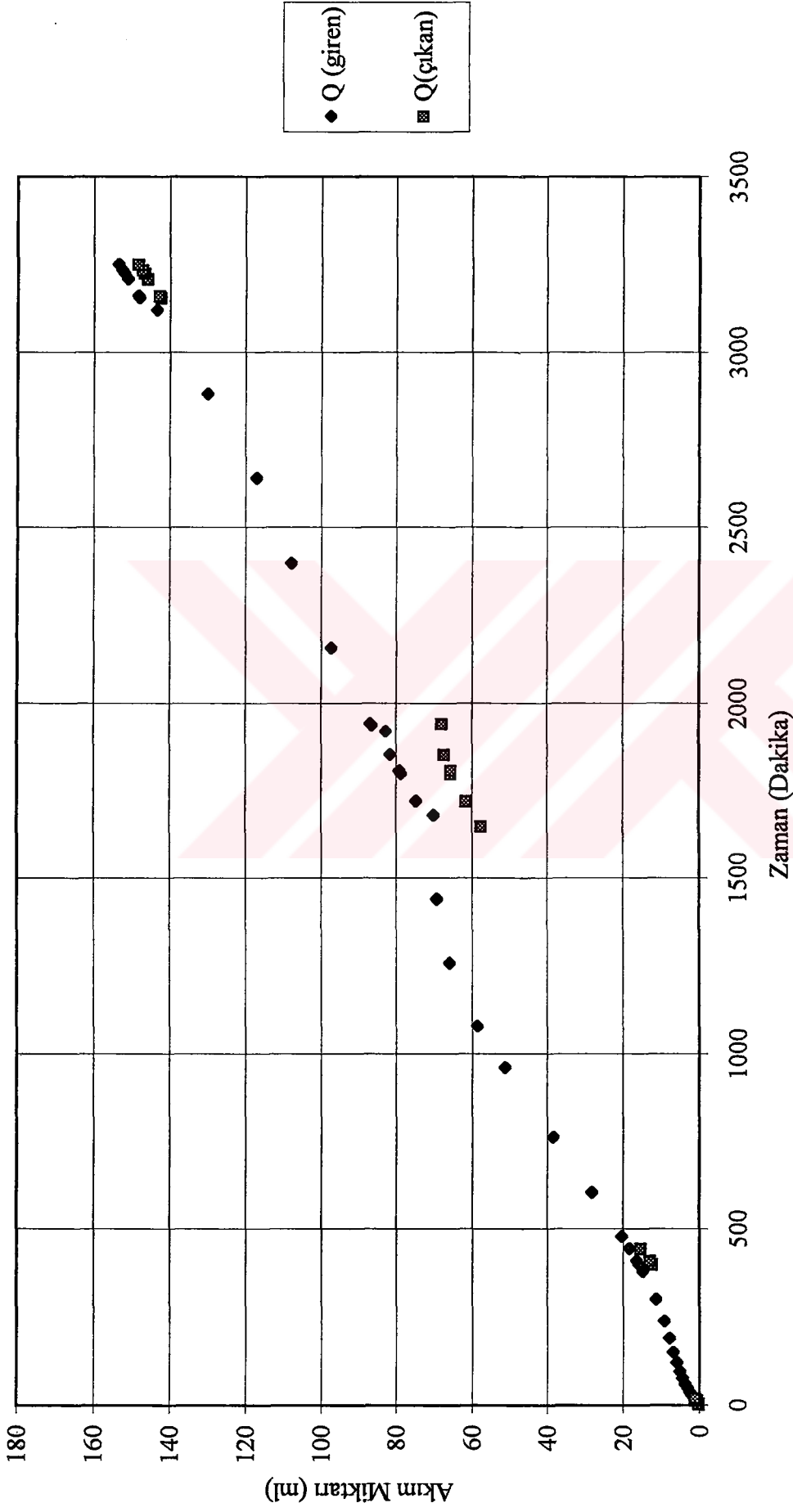


Şekil Ek-4.2 m Yeşil kıl için 265 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



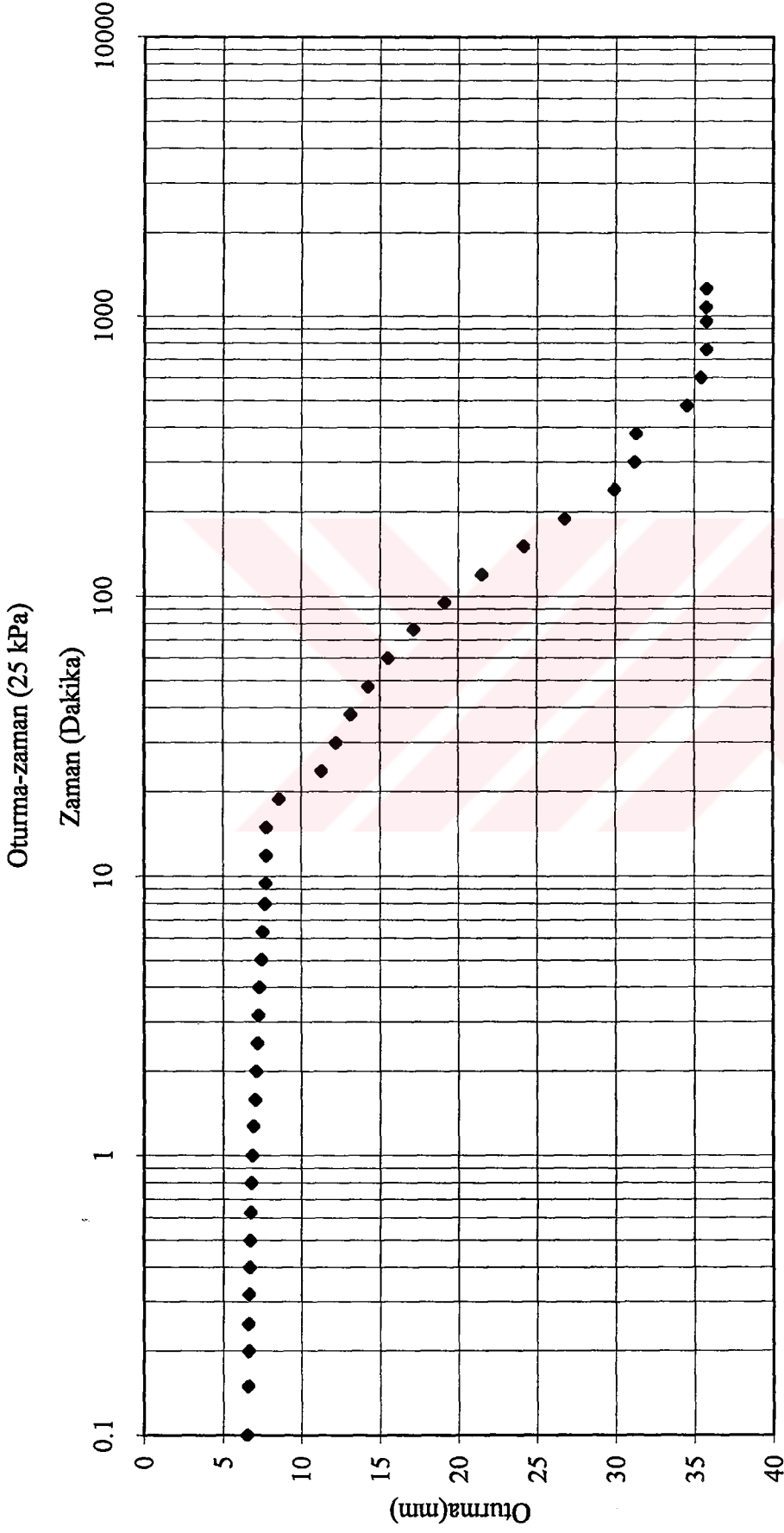
Şekil Ek-4.2 n Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

Q-t (288 kPa)

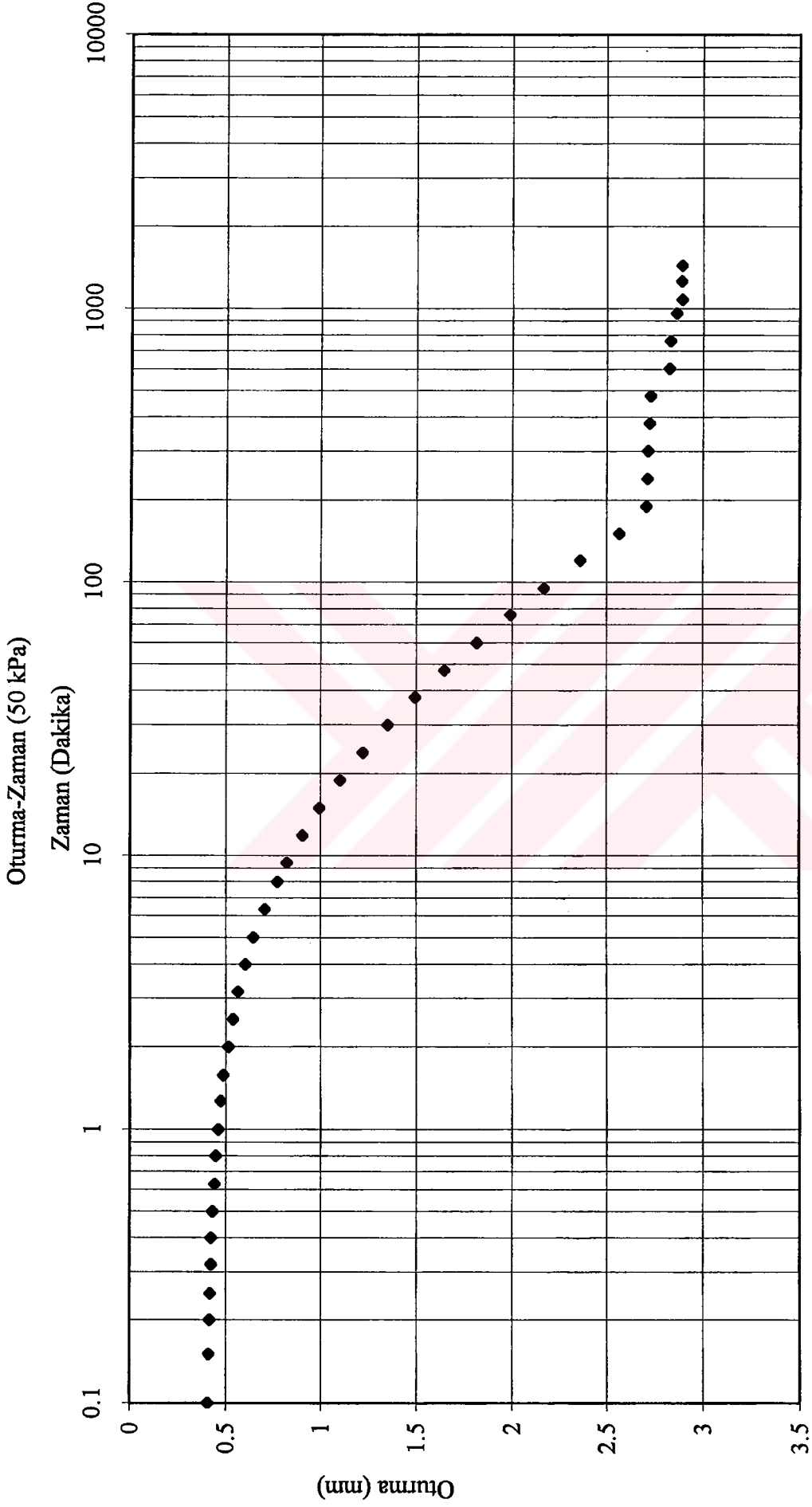


Şekil Ek-4.2 o Yeşil kil için 288 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

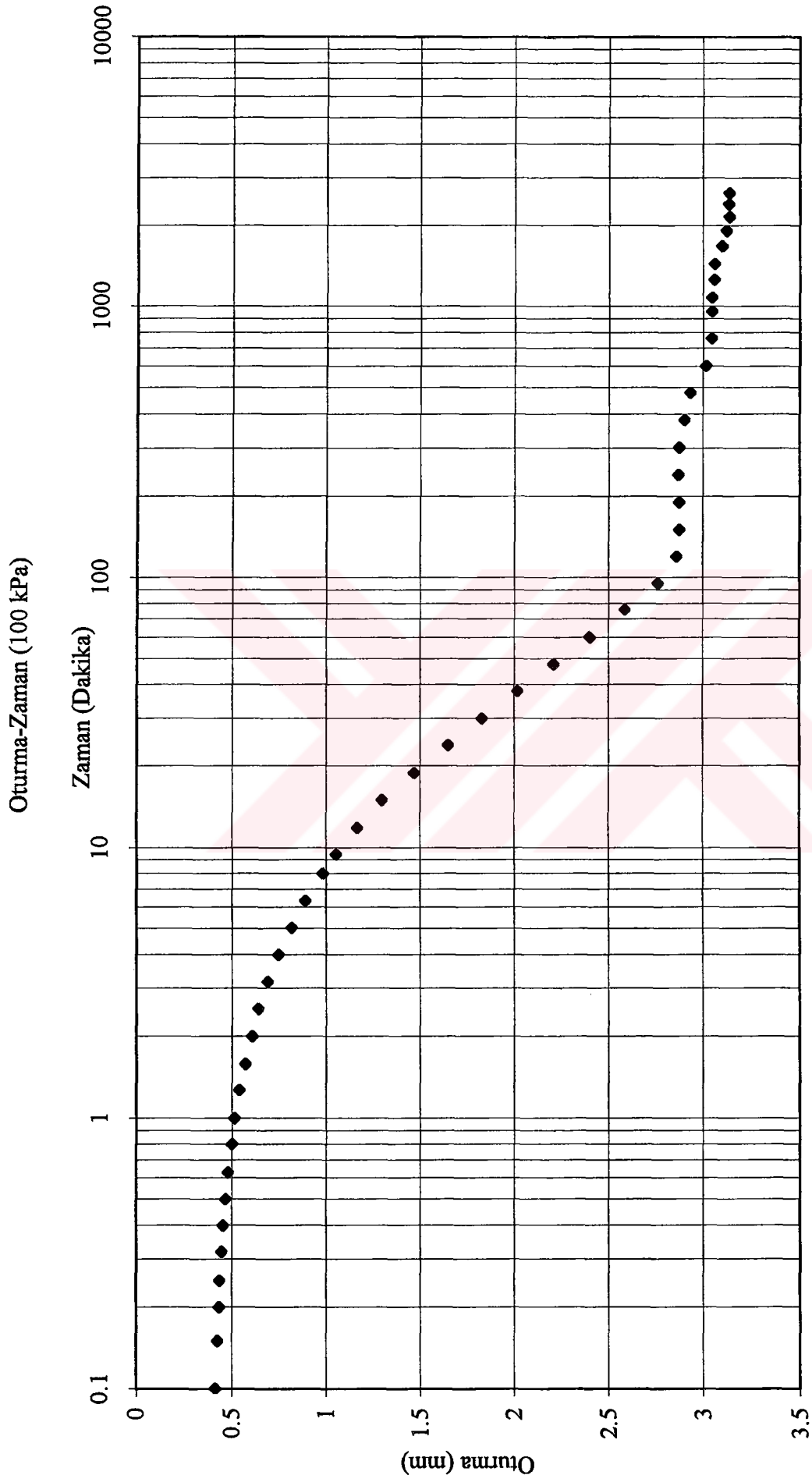




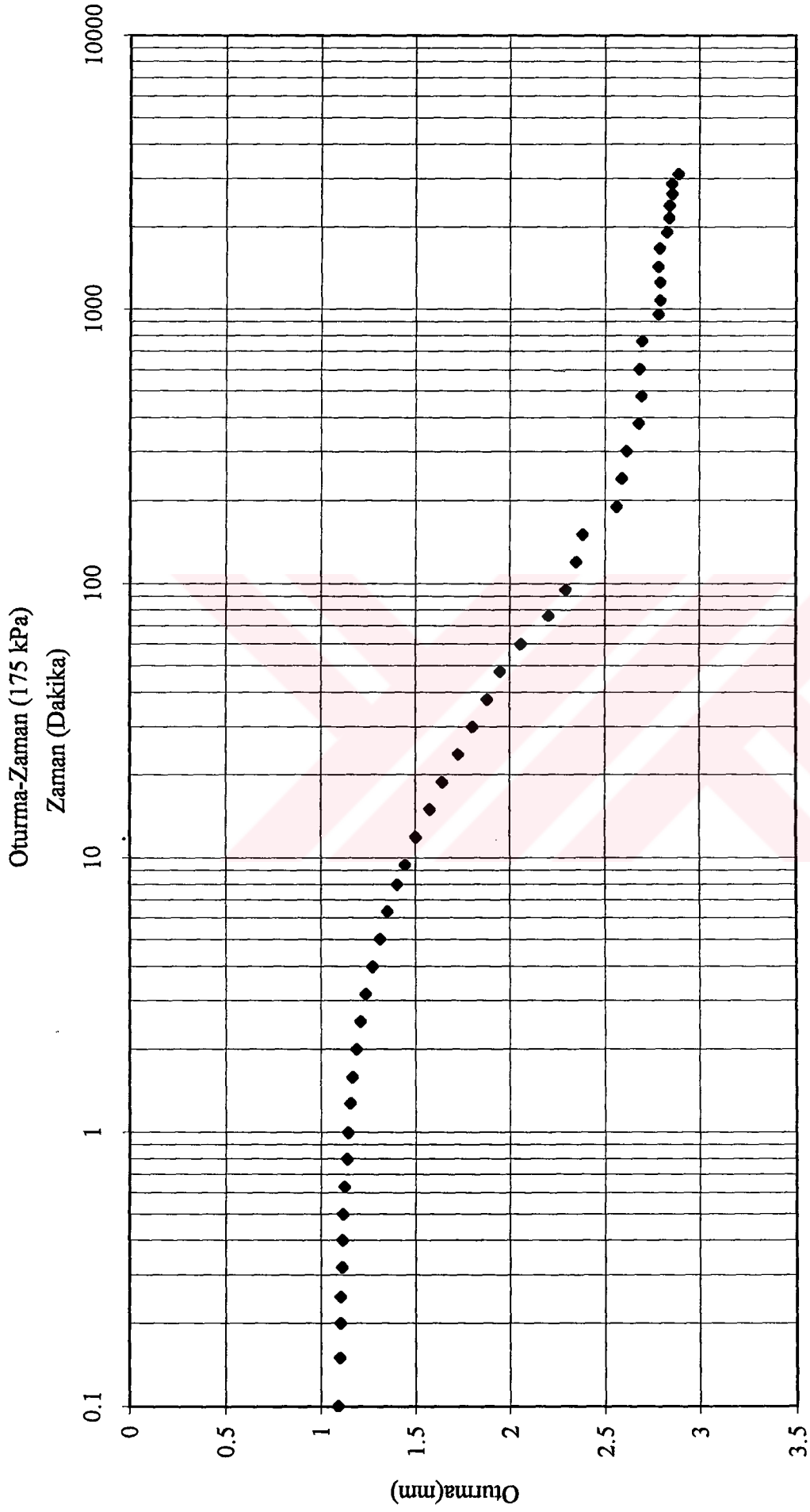
Şekil Ek-4.3 a Siyah kil için 25 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



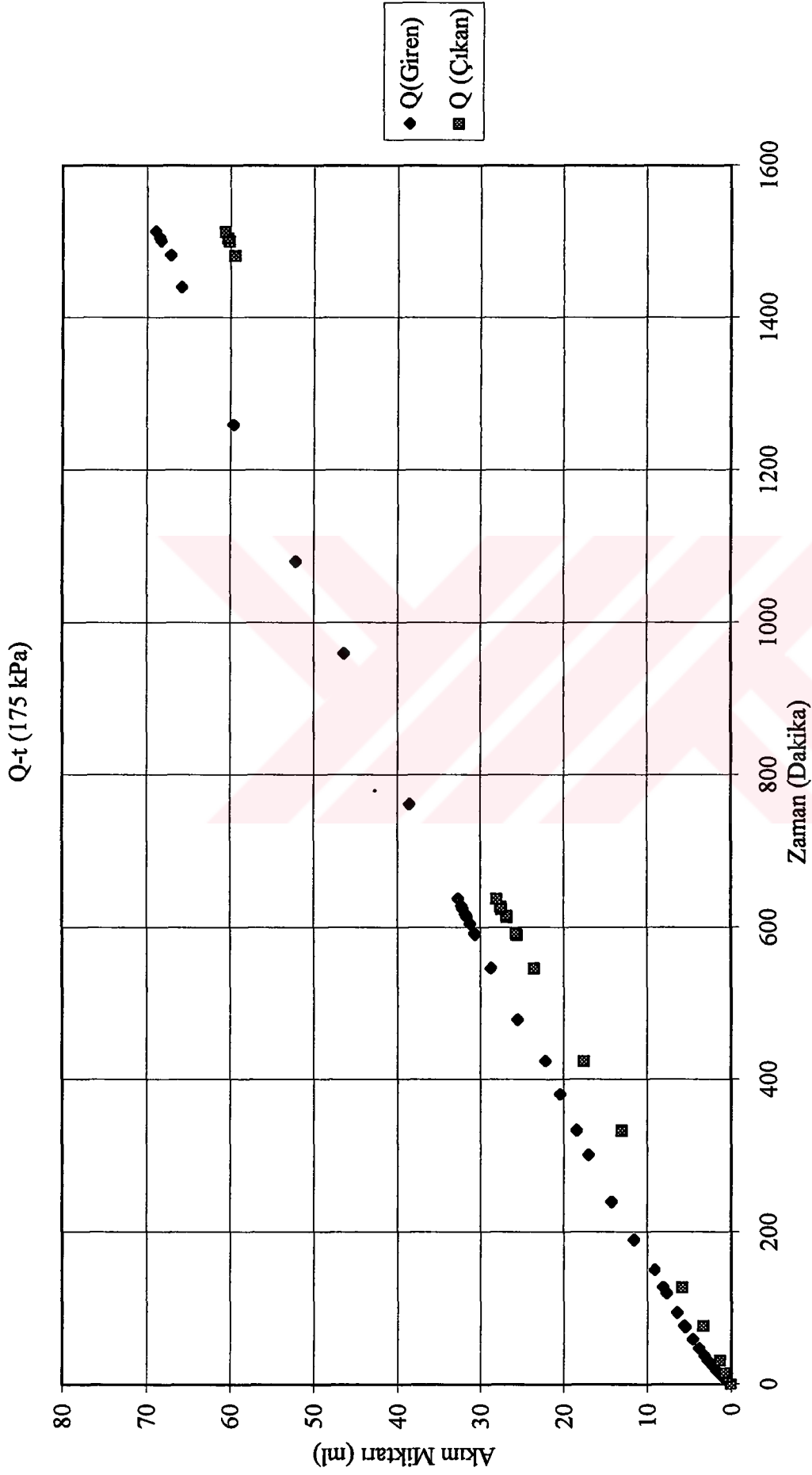
Şekil Ek-4.3 b Siyah kil için 50 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



Şekil Ek-4.3 c Siyah kil için 100 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



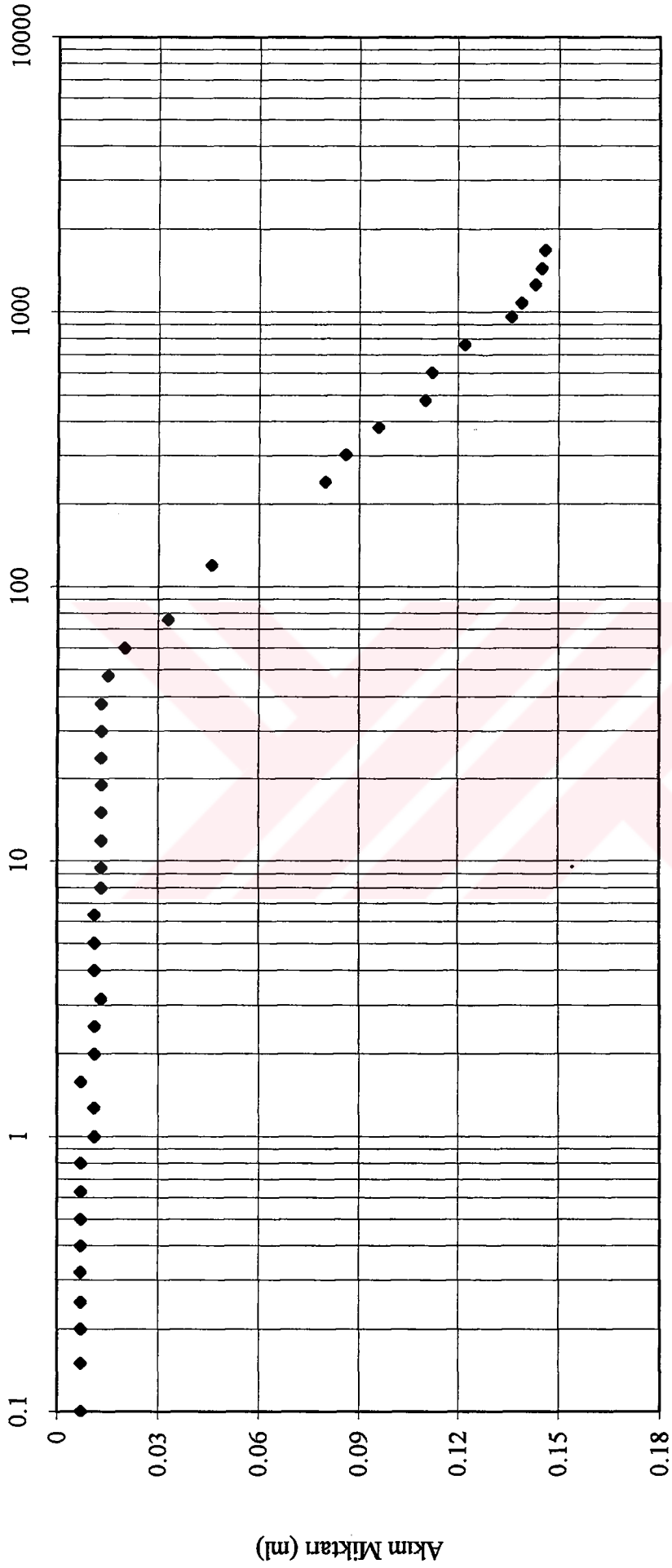
Şekil Ek-4.3 d Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



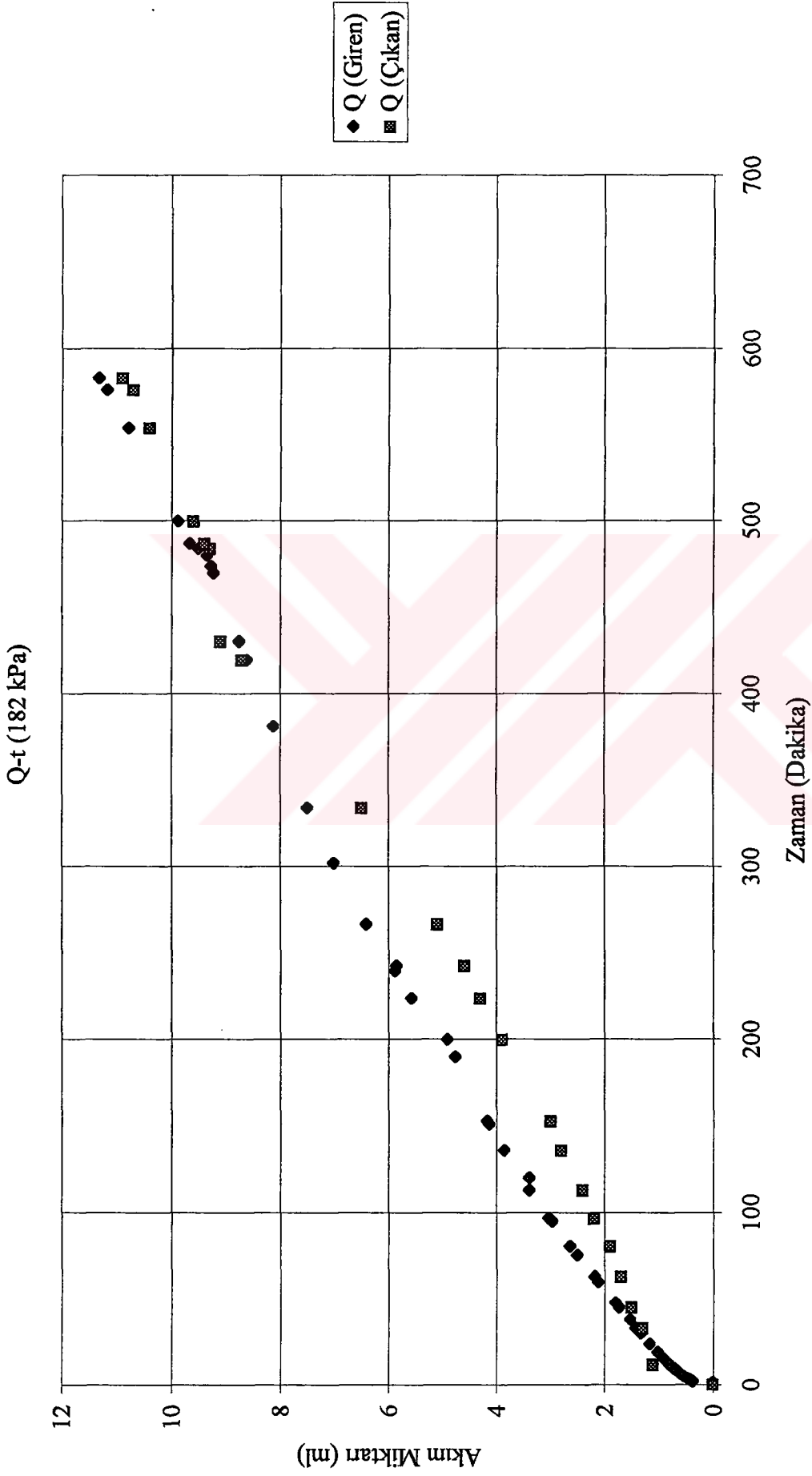
Şekil Ek-4.3e Siyah kıl için 175 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

Oturma-Zaman (182 kPa)

Zaman (Dakika)

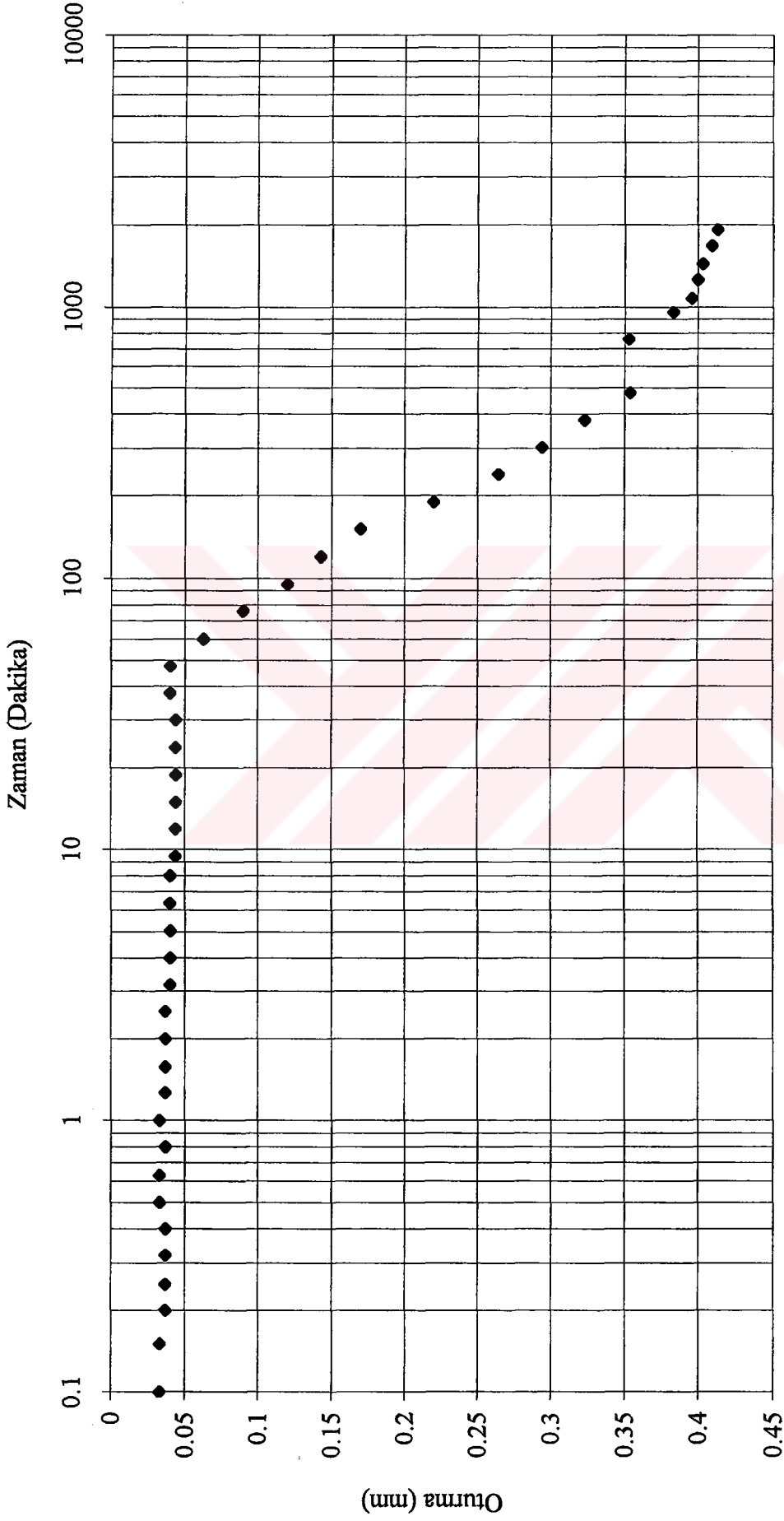


Şekil Ek-4.3f Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



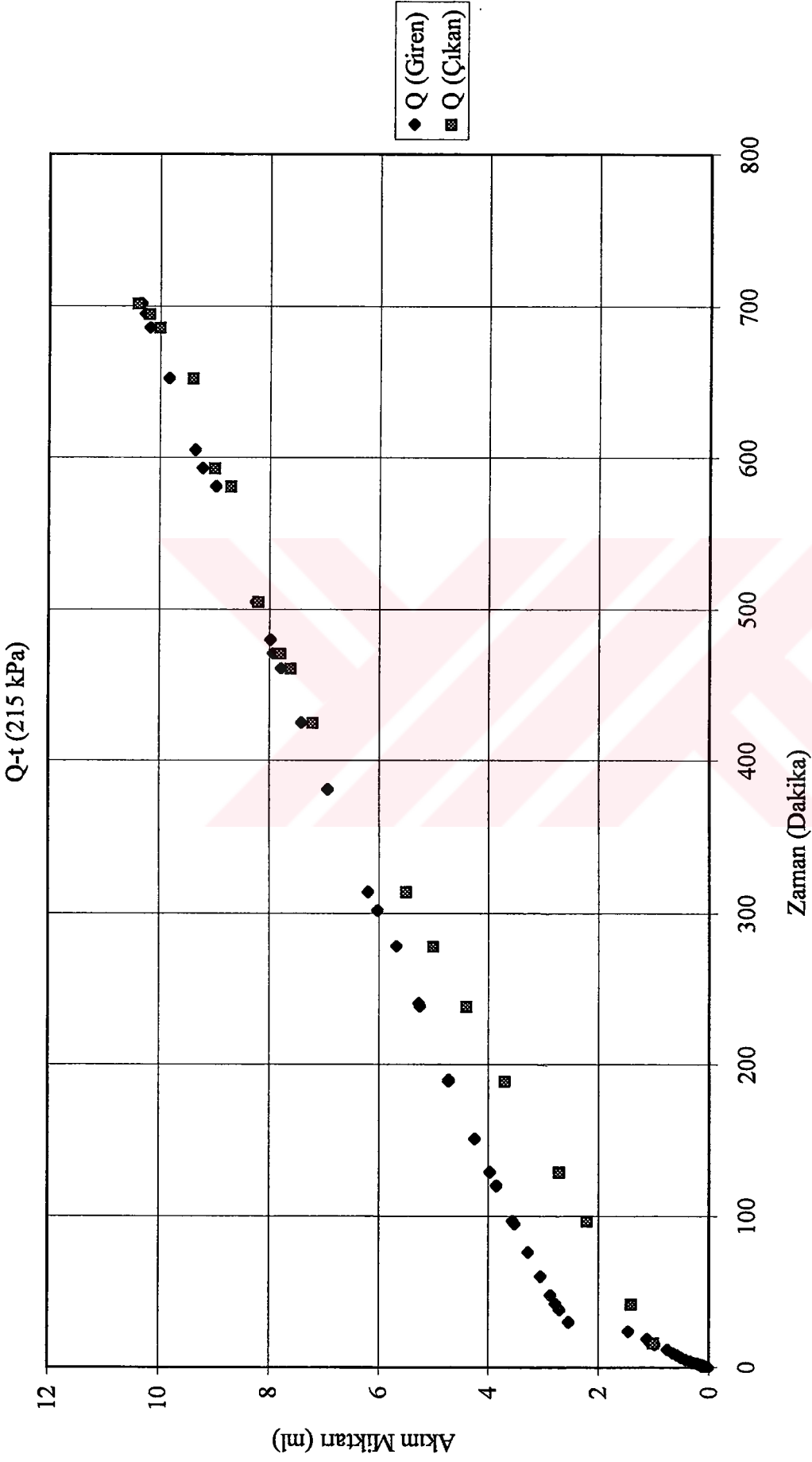
Şekil Ek-4.3g Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

## Oturma-Zaman (215 kPa)

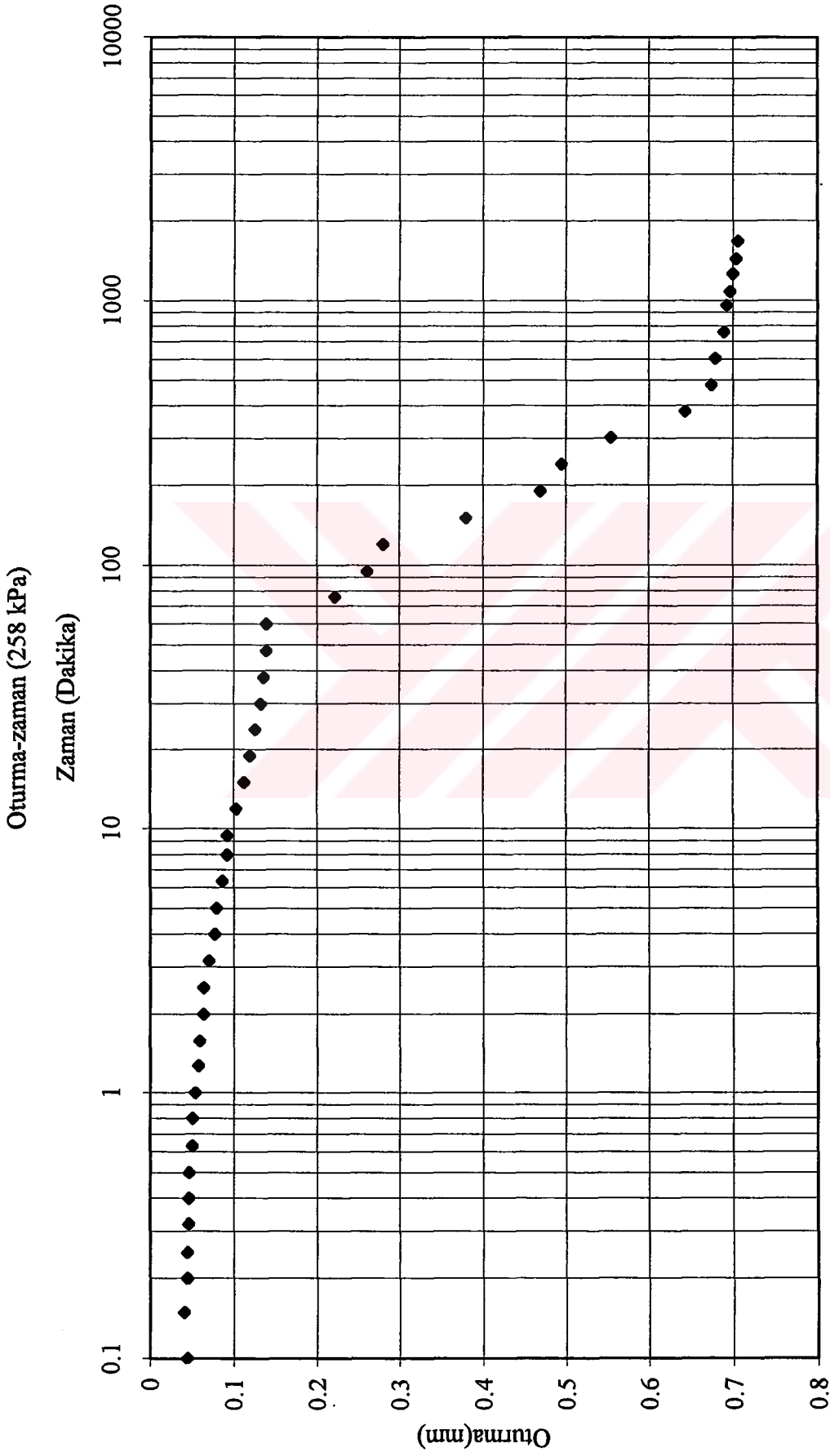


Şekil Ek-4.3 h Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

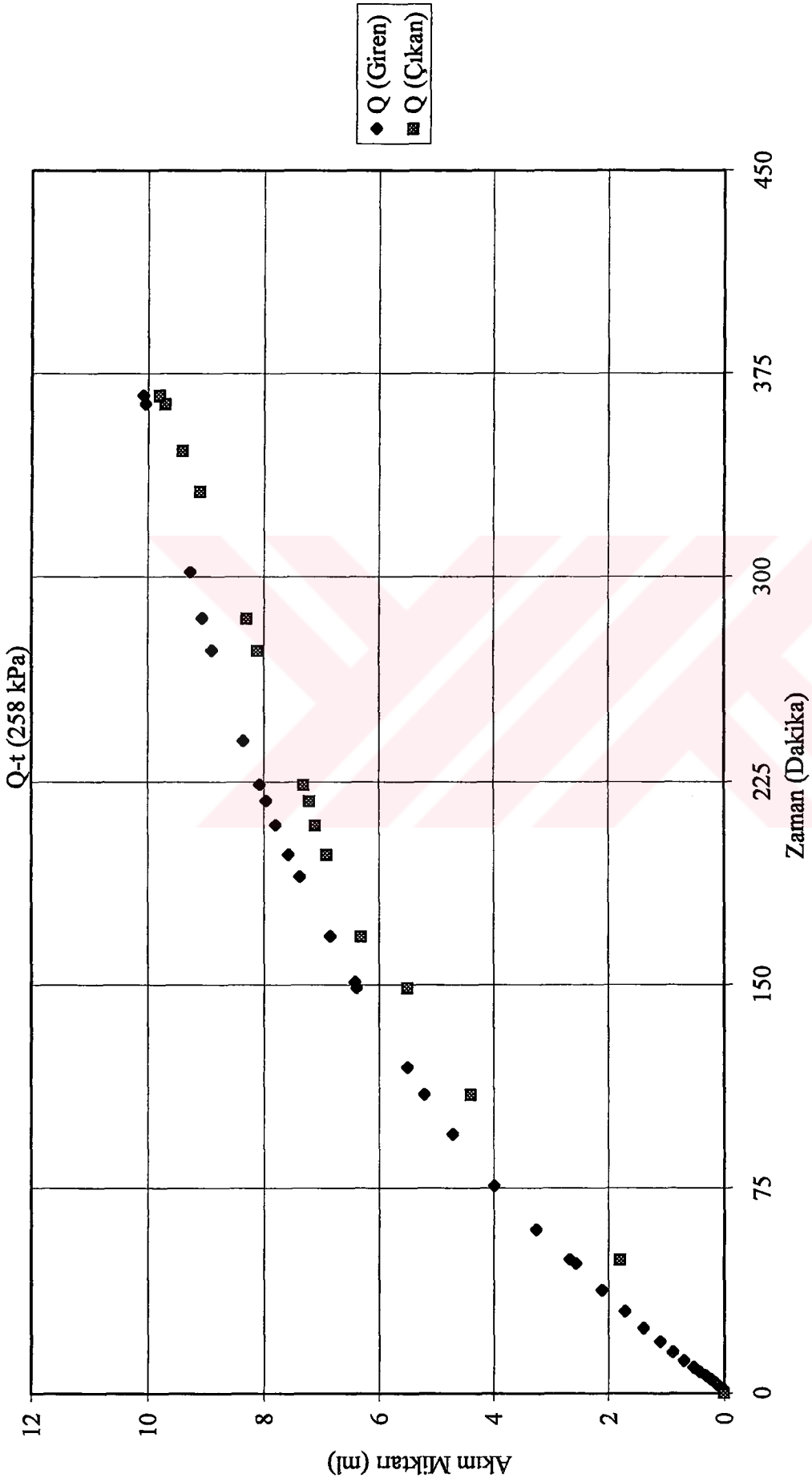




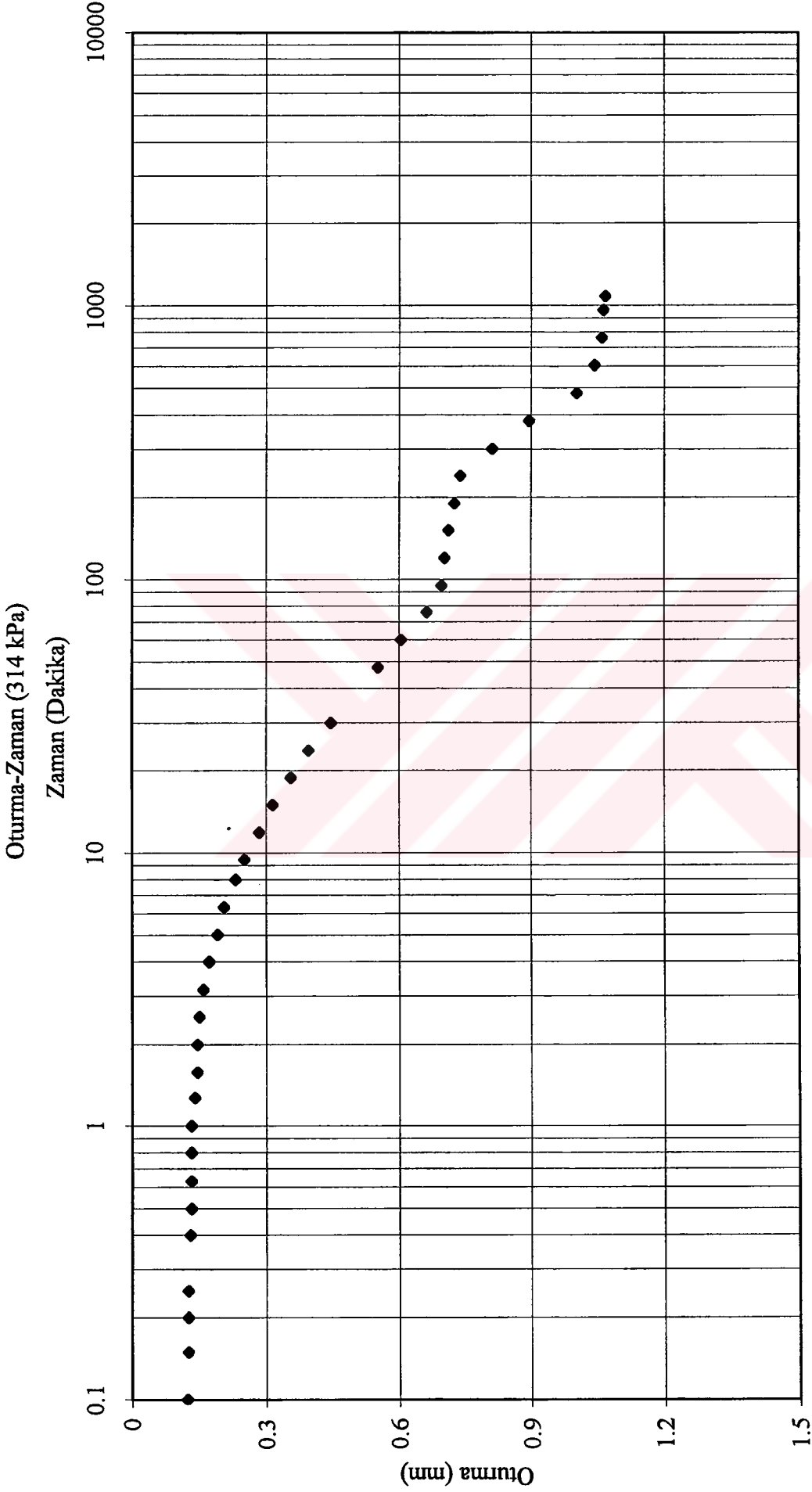
Şekil Ek-4.3 1 Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



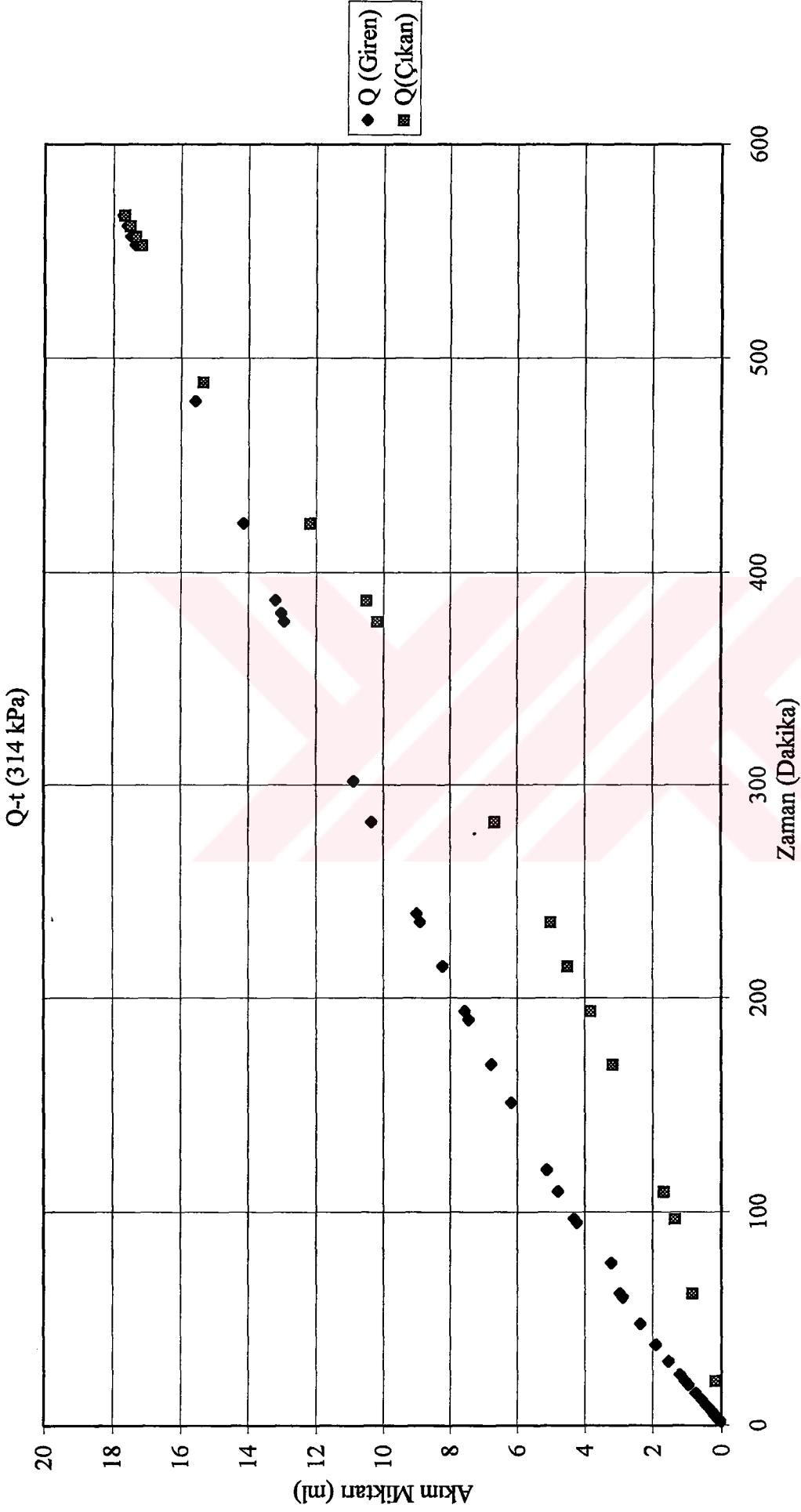
Şekil Ek-4.3 i Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



Şekil Ek-4.3 j Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

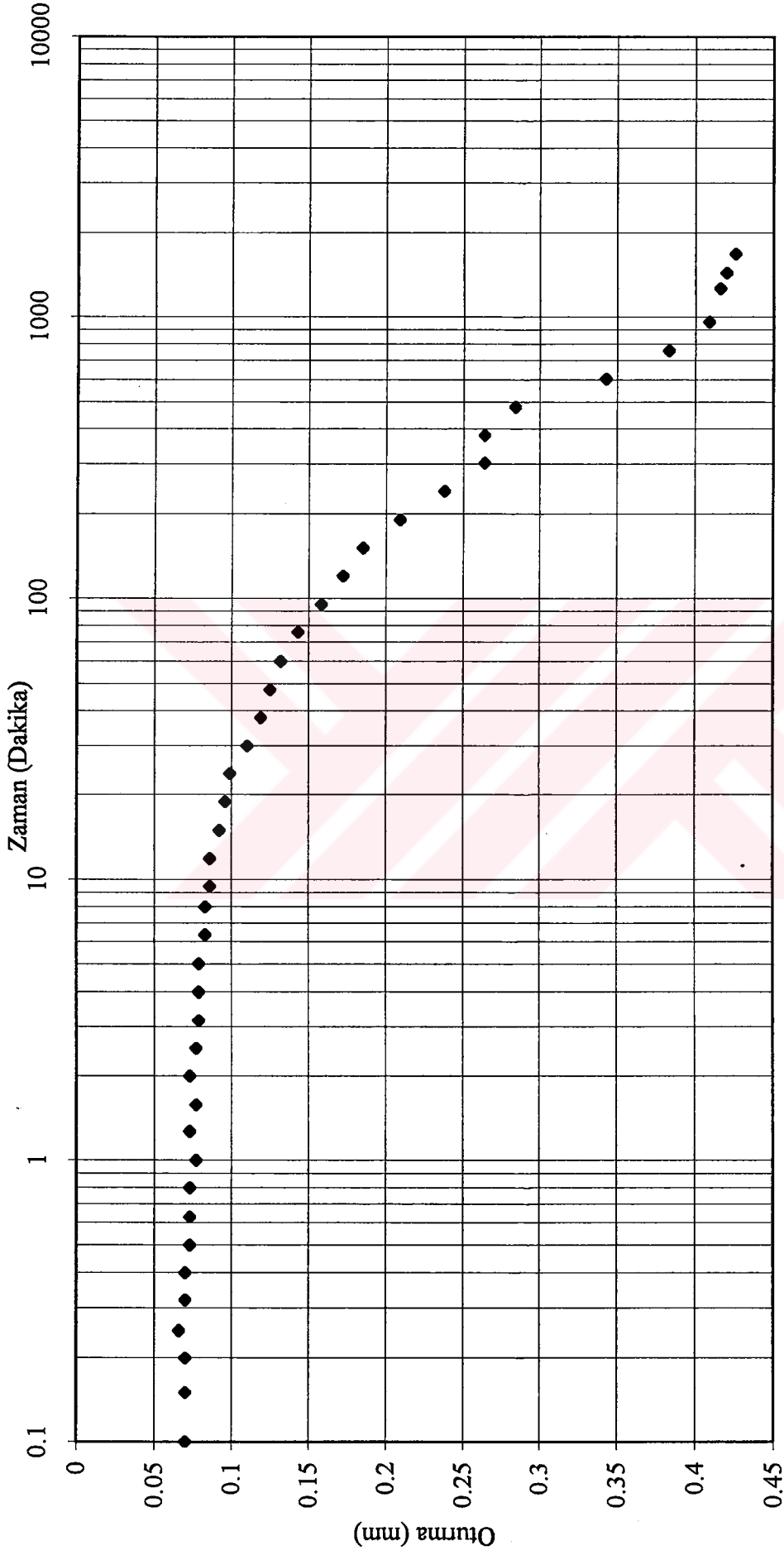


Şekil Ek-4.3 k Siyah kil için 314 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

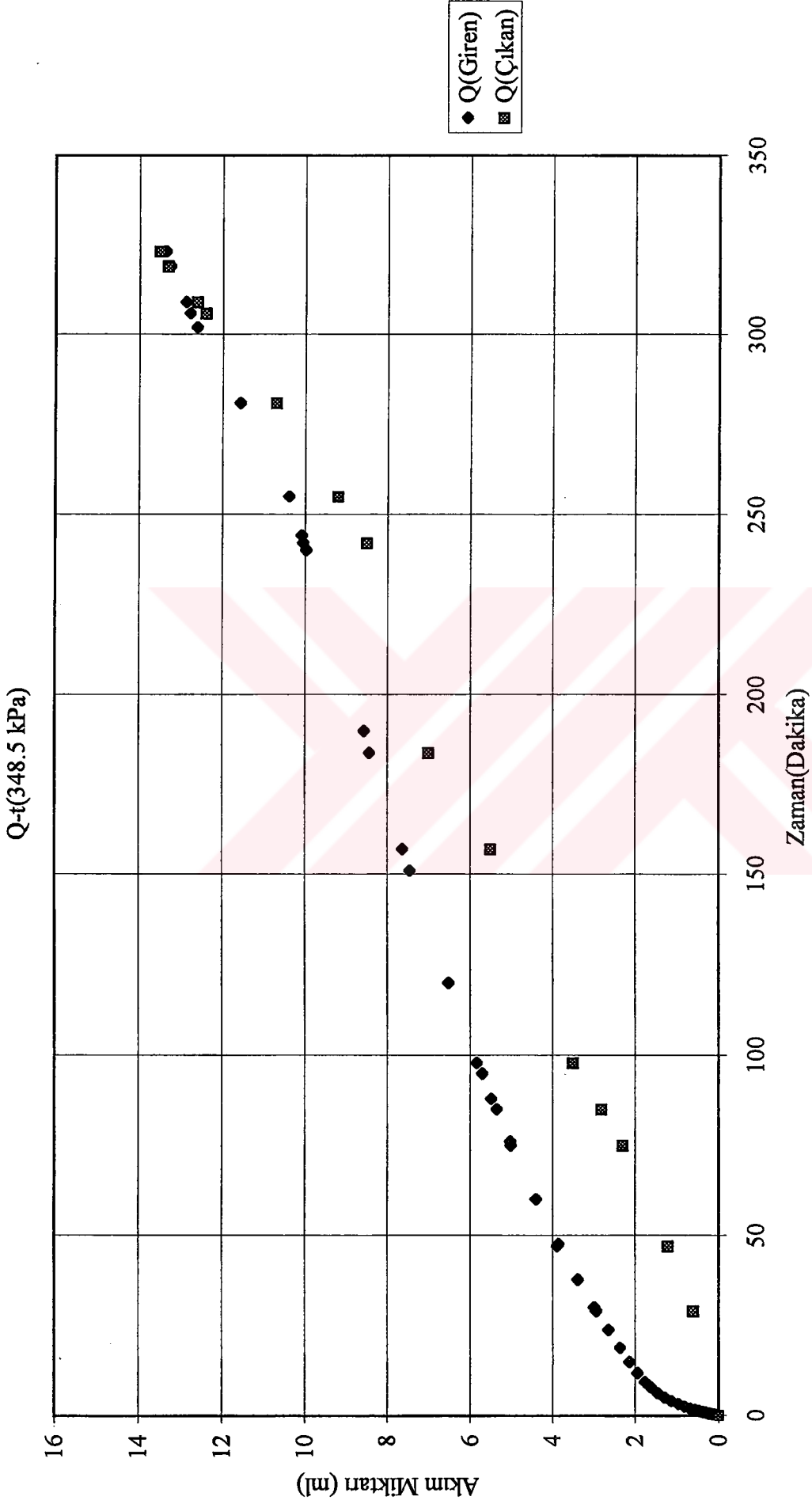


Şekil Ek-4.3 1 Siyah kil için 314kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

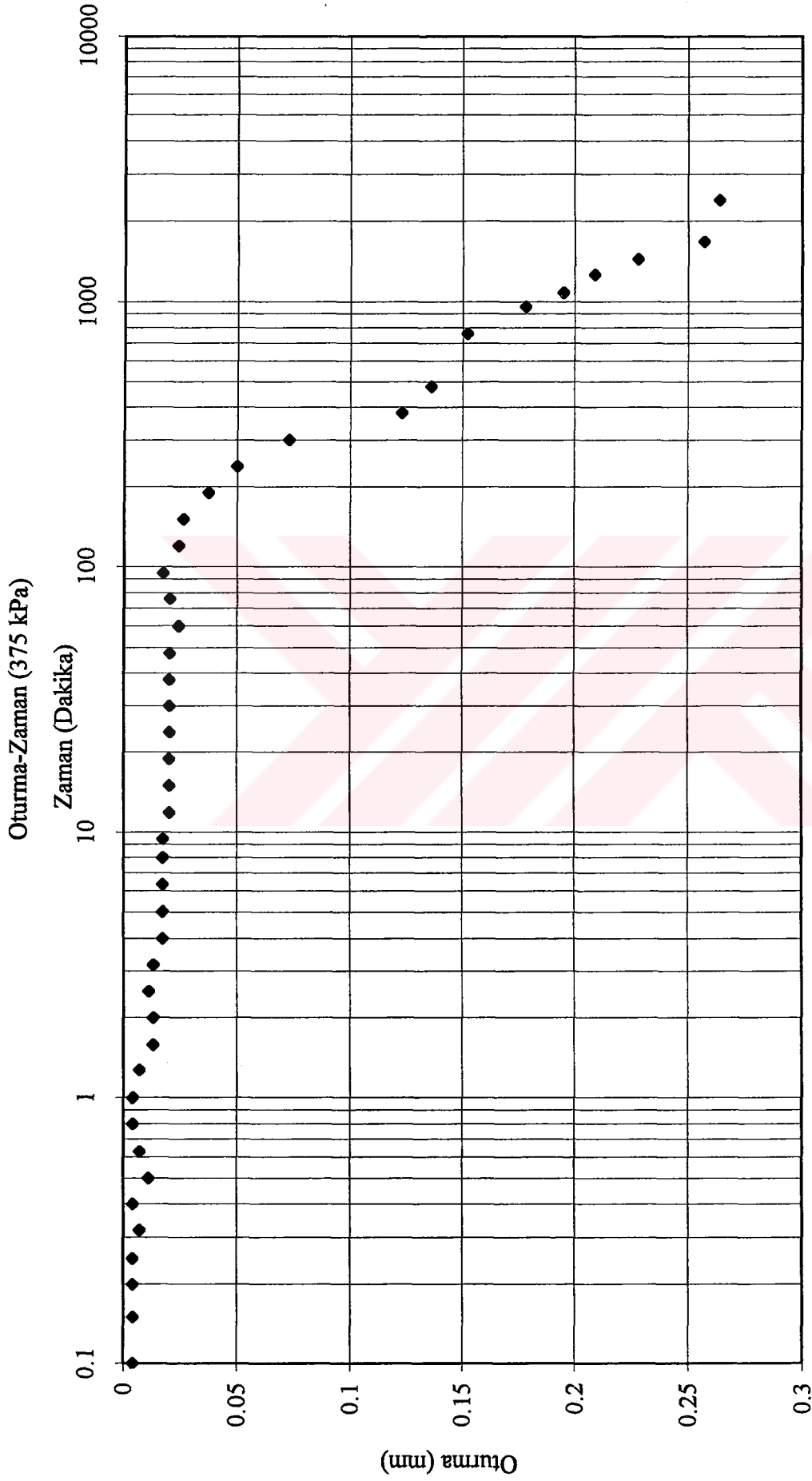
## Oturma-Zaman (348.5 kPa)



Şekil Ek-4.3 m Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

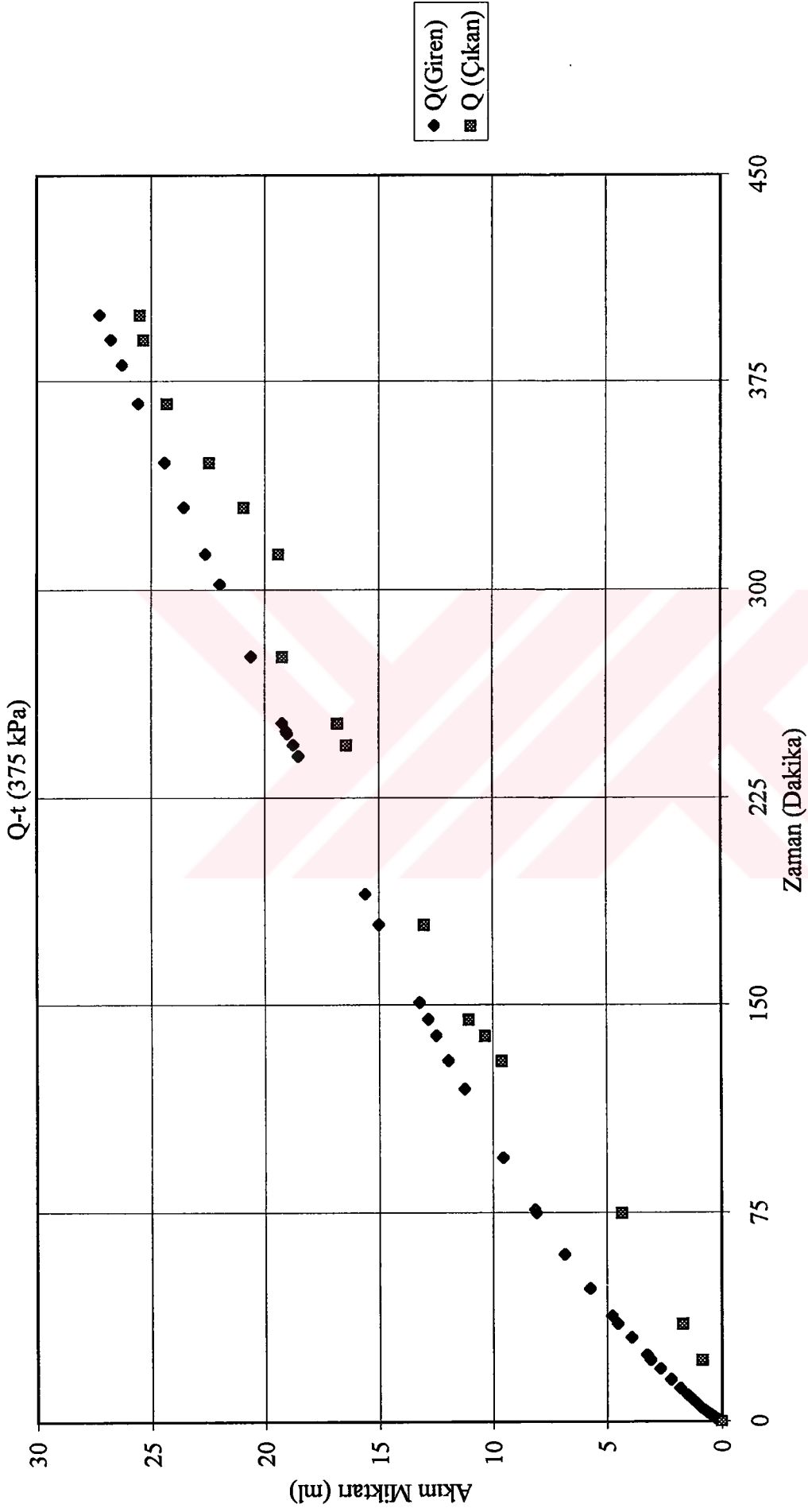


Şekil Ek-4.3 n Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

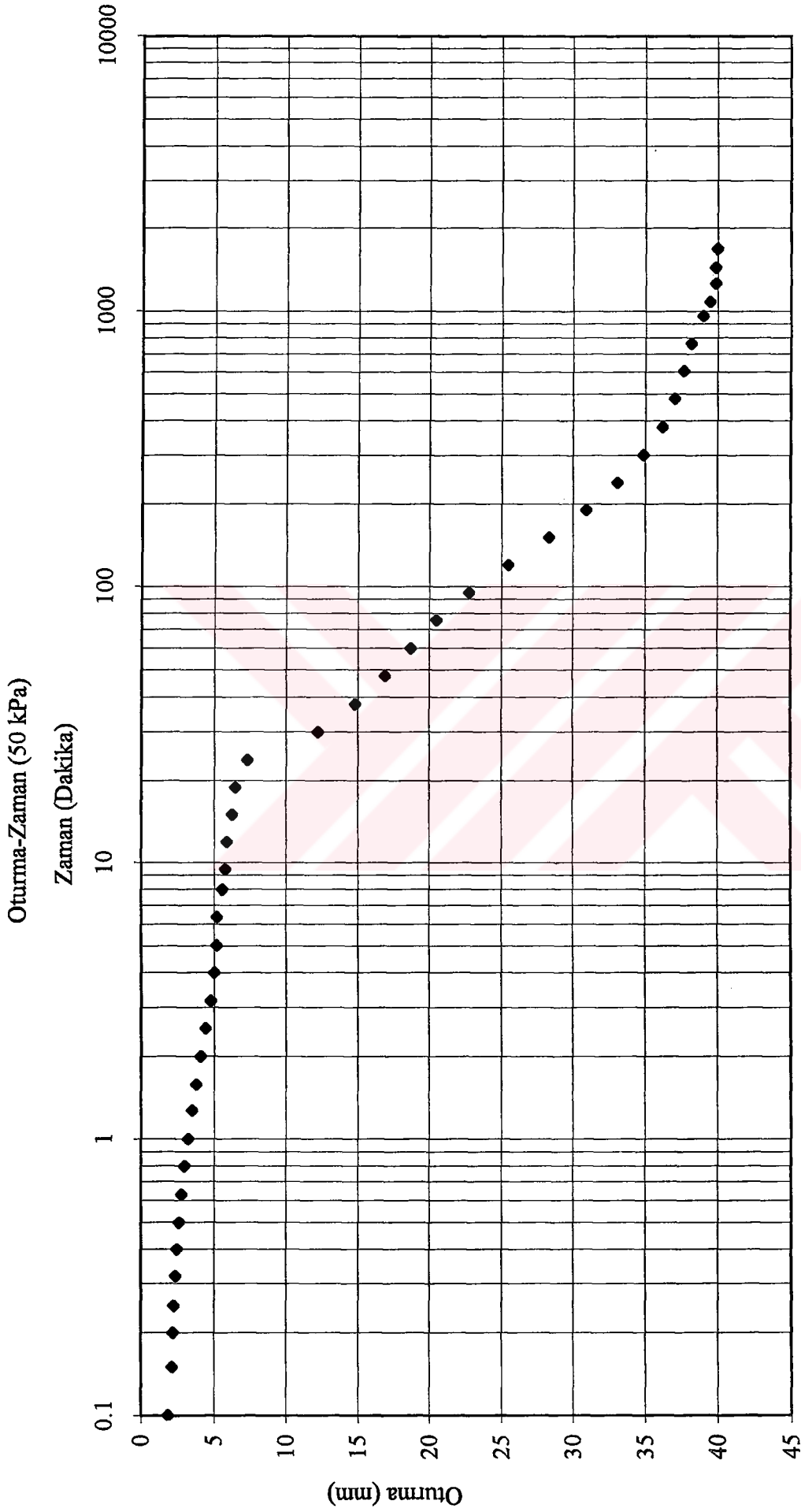


Şekil Ek-4.3 o Siyah kıl için 375 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

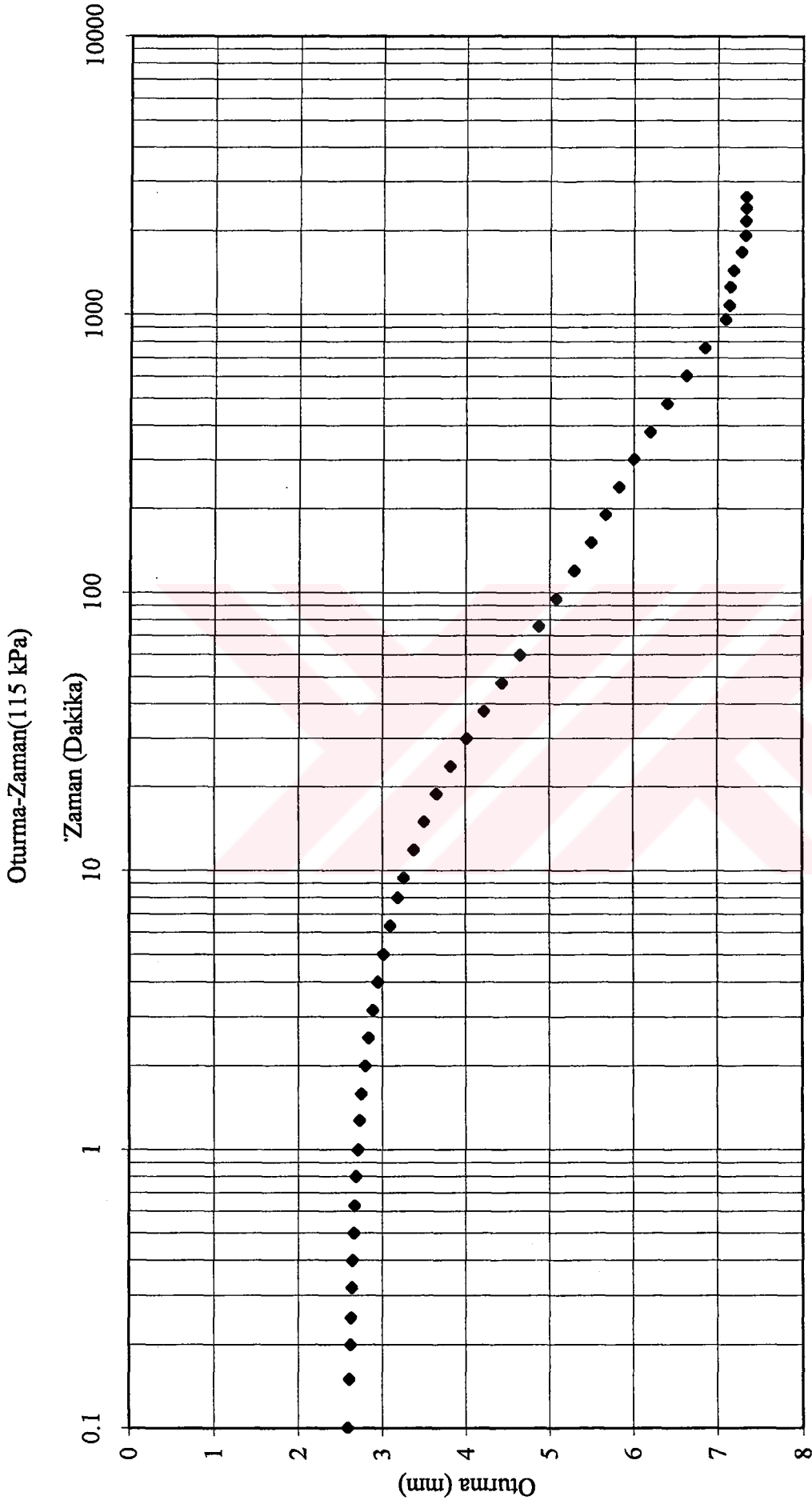




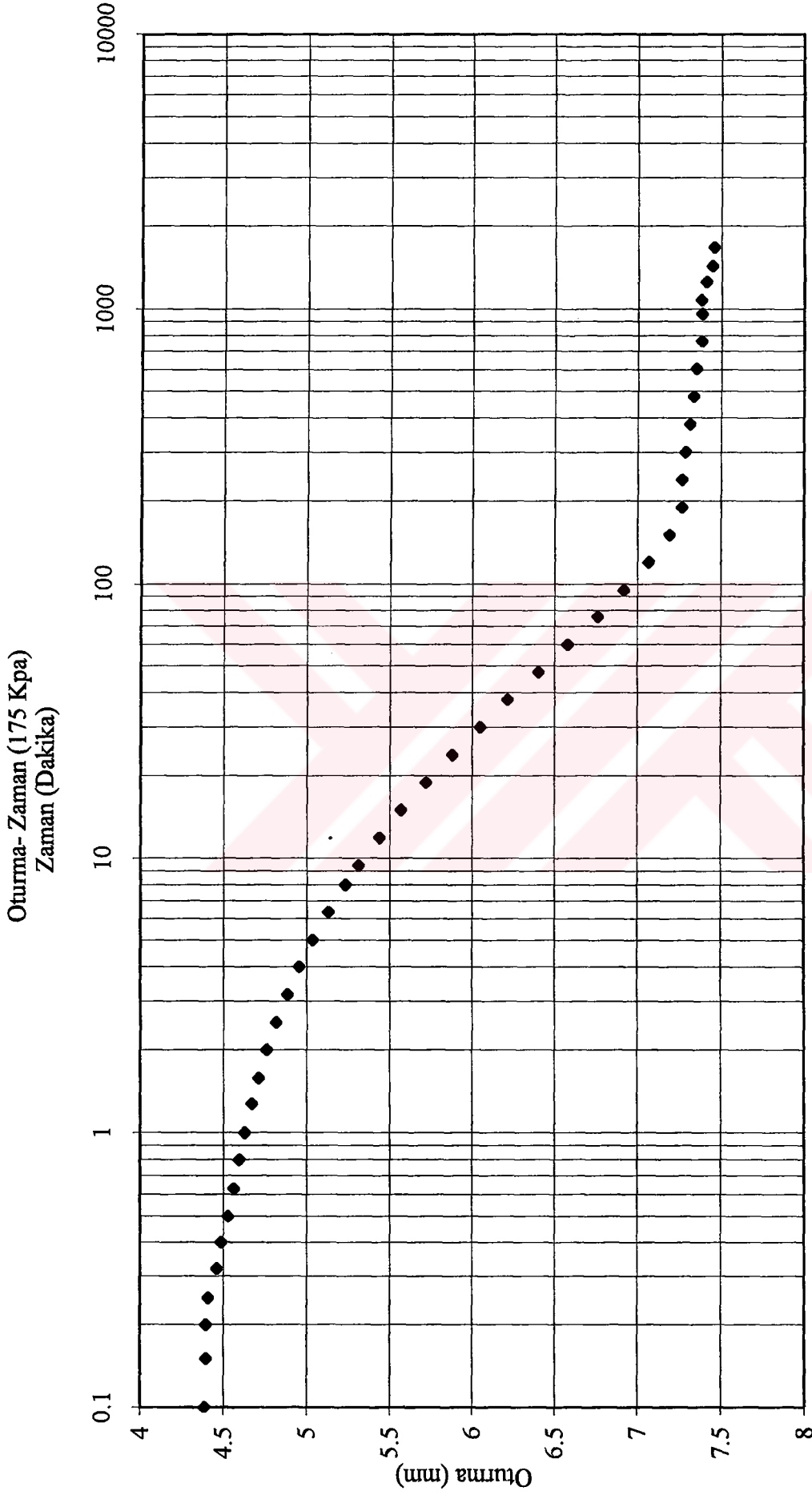
Şekil Ek-4.3 ö Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde düşey yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği



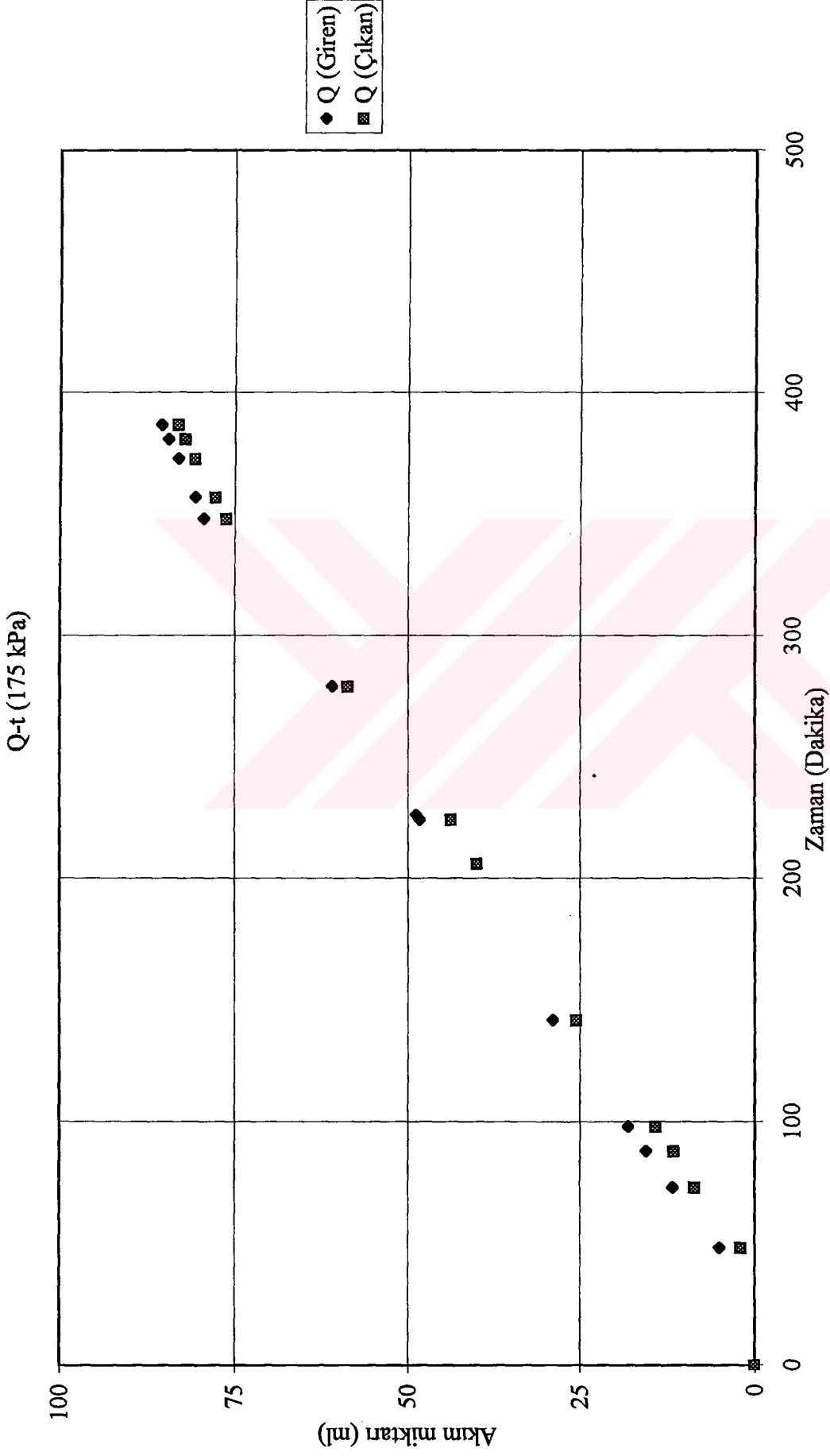
Şekil Ek-4.4 a Siyah kil için 50 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



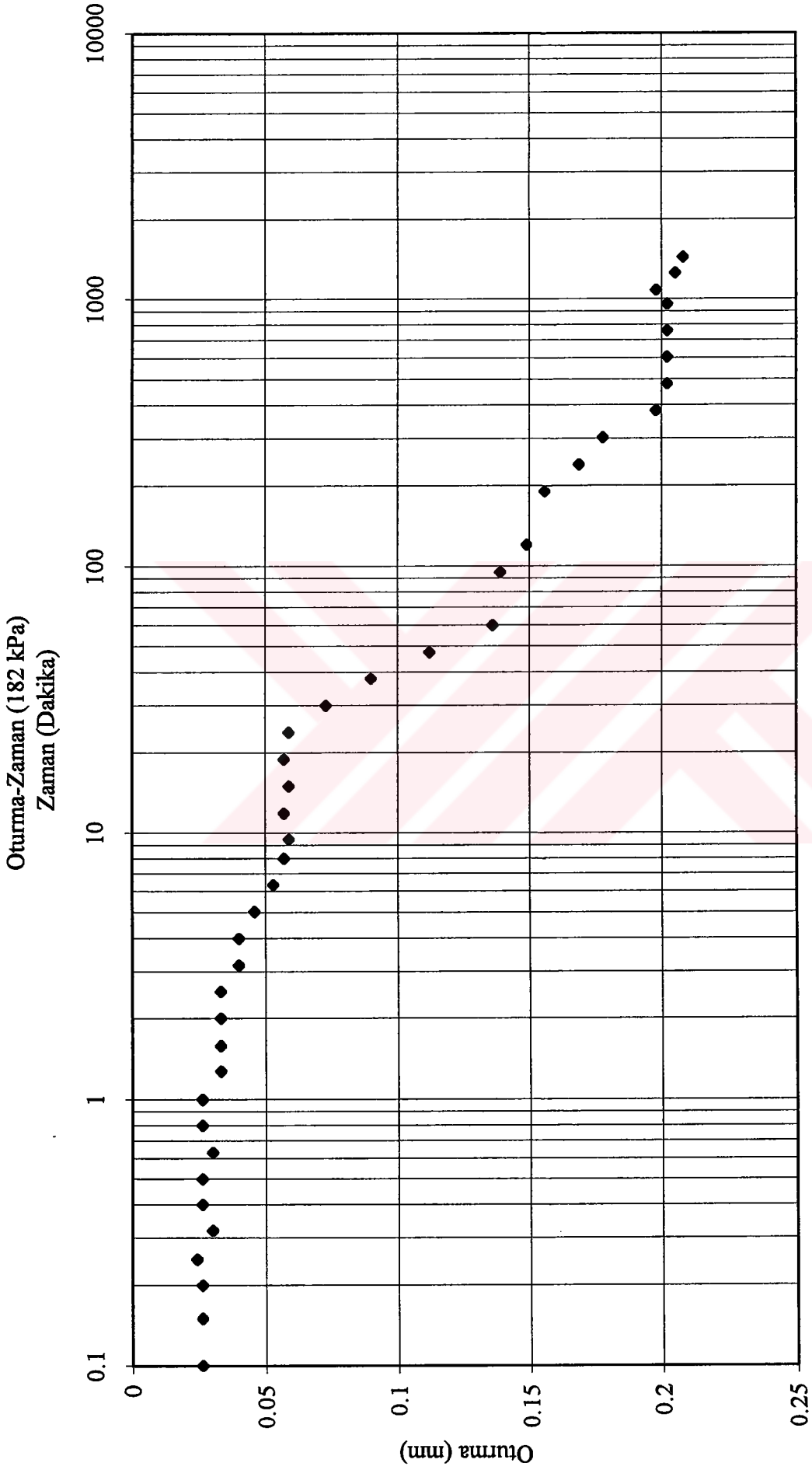
Şekil Ek-4.4 b Siyah kil için 115 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



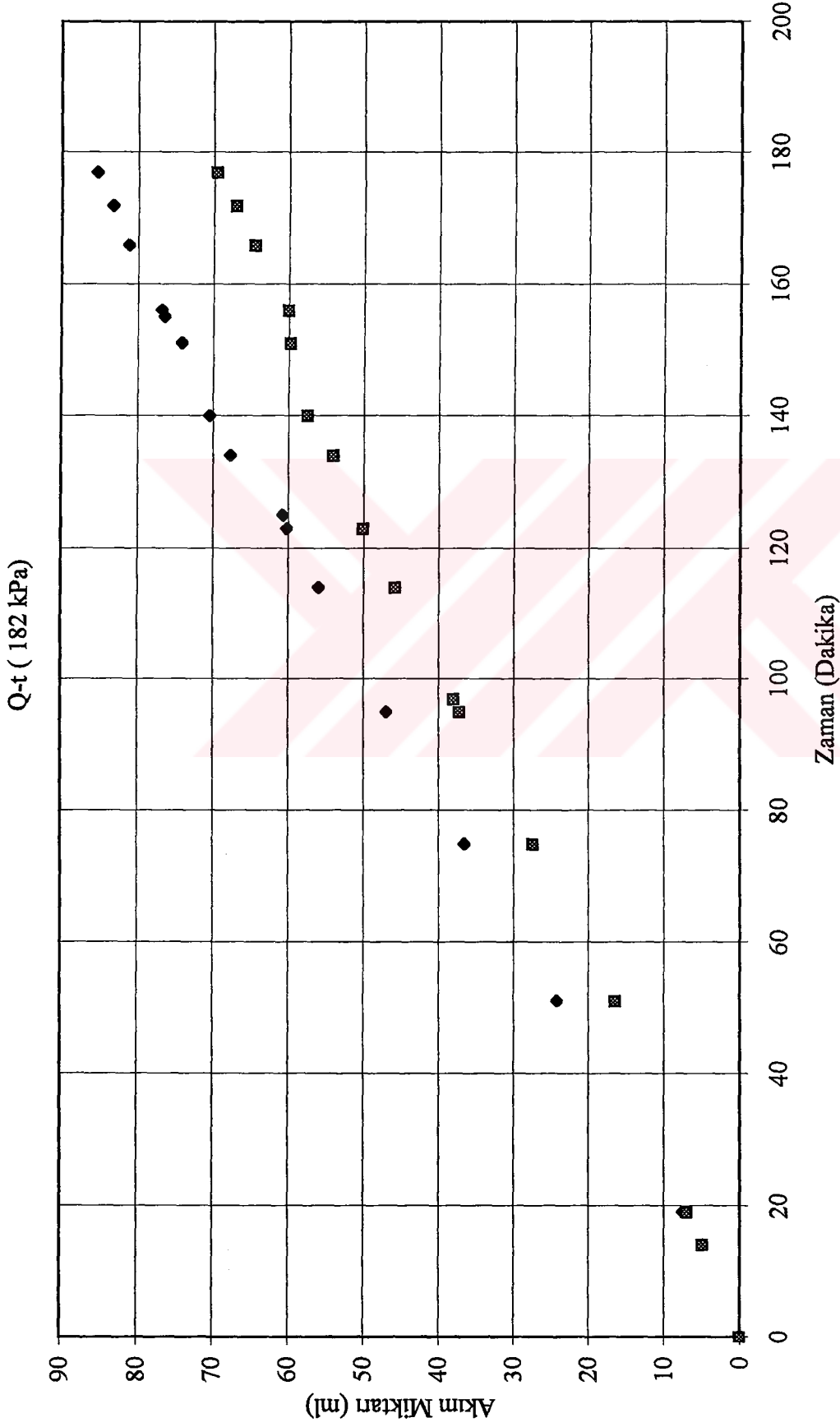
Şekil Ek-4.4 c Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



Şekil Ek-4.4 d Siyah kil için 175 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

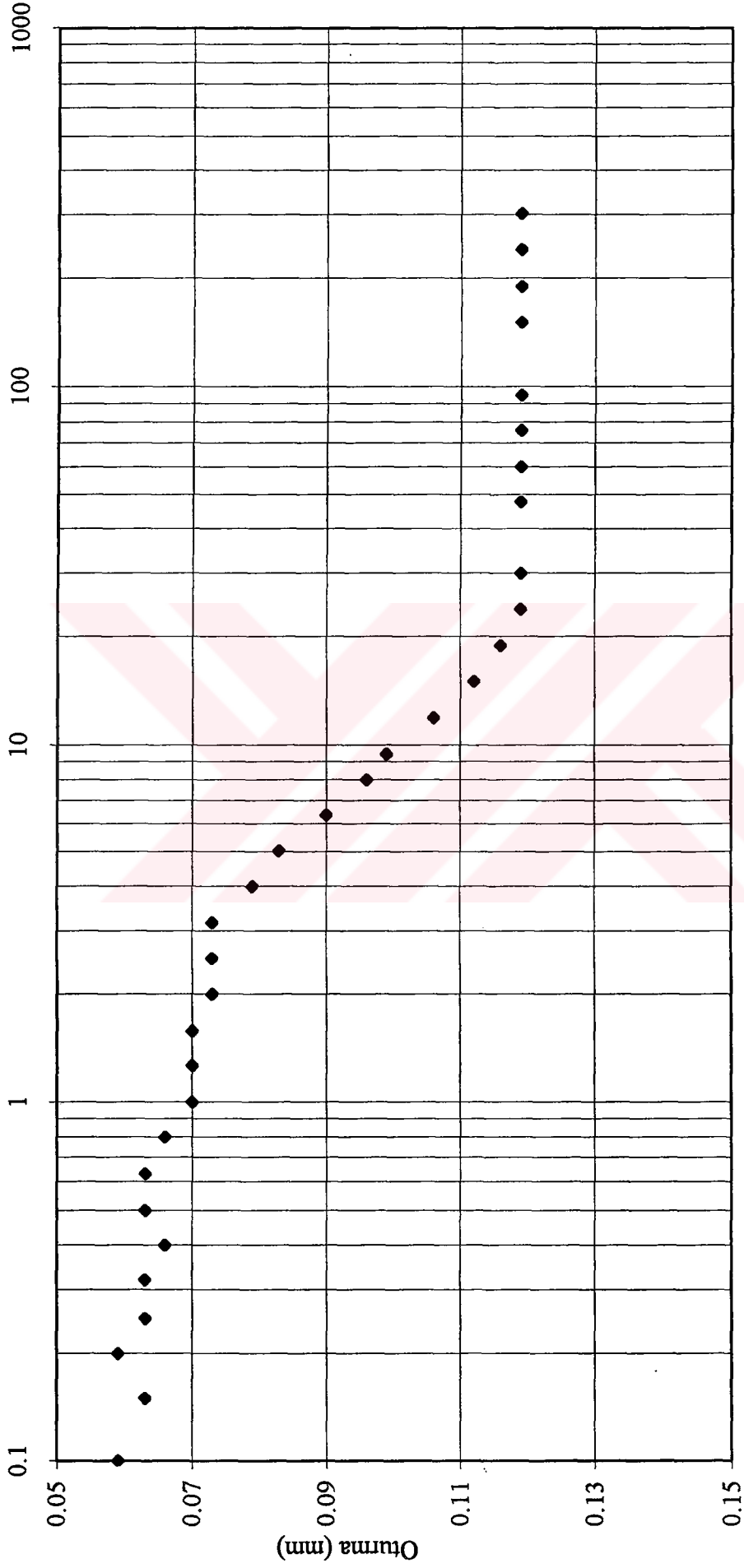


Şekil Ek-4.4 e Siyah kıl için 182 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



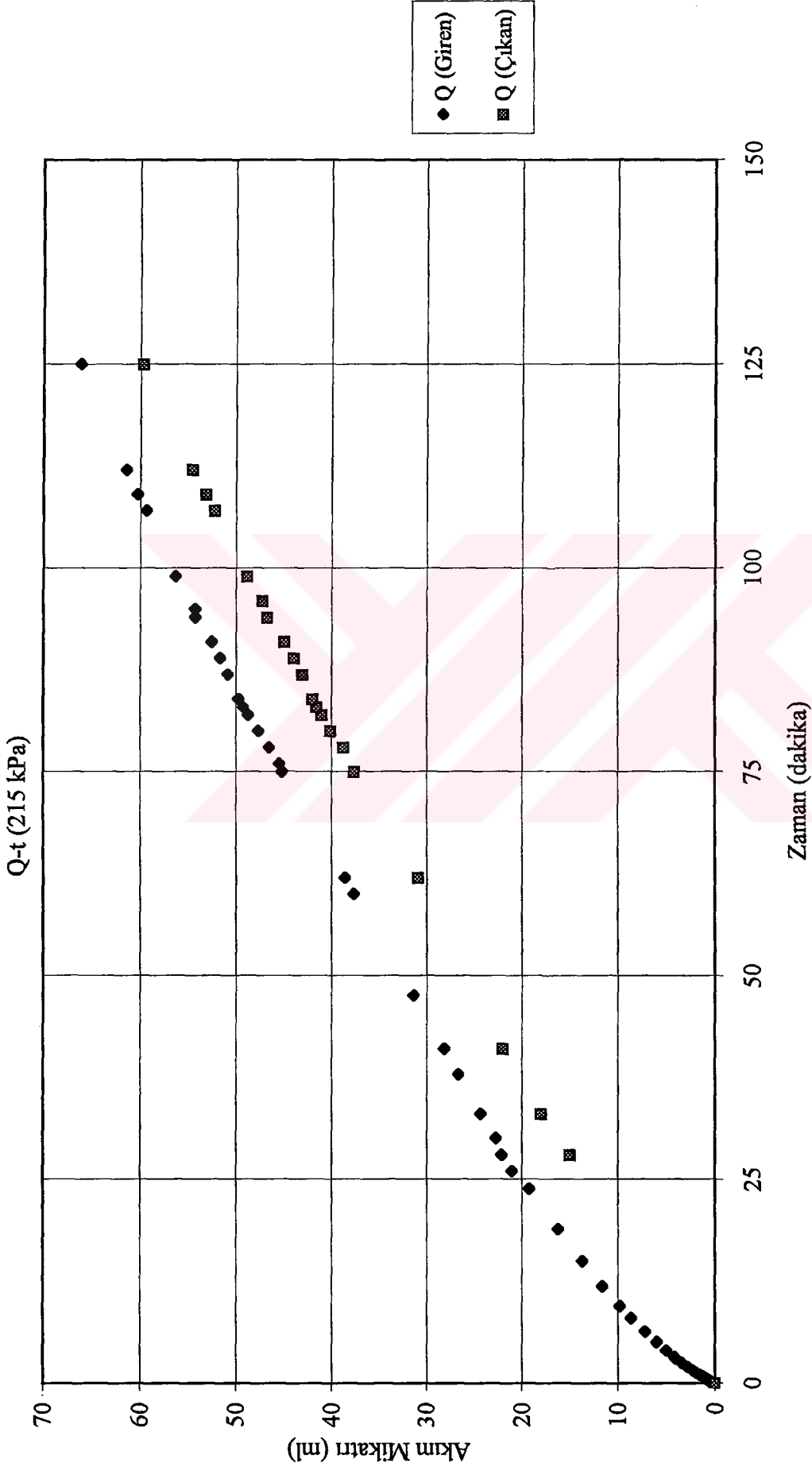
Şekil Ek-4.4 f Siyah kil için 182 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

Oturma- Zaman (215 kPa)  
Zaman (Dakika)

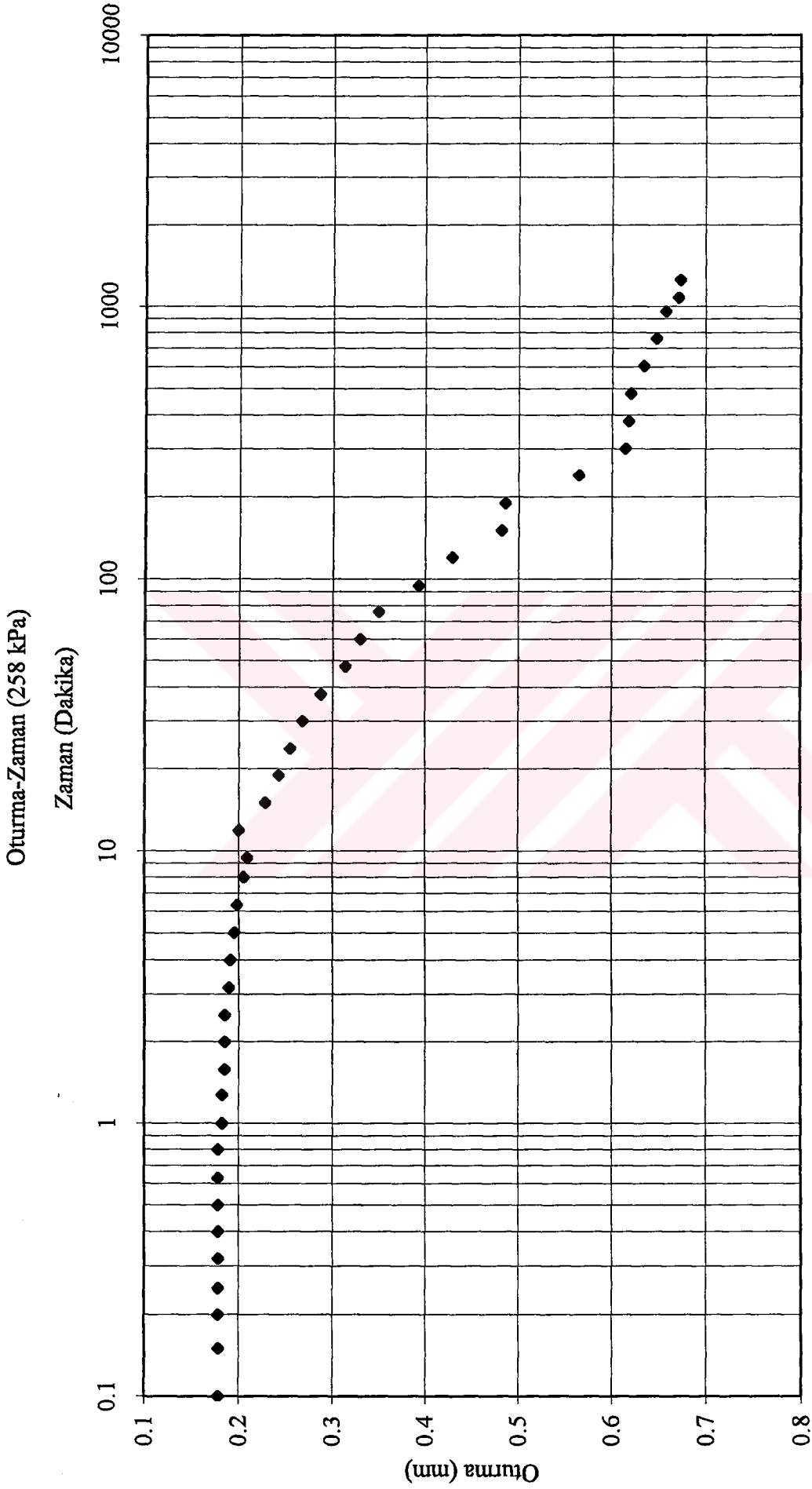


Şekil Ek-4.4 g Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

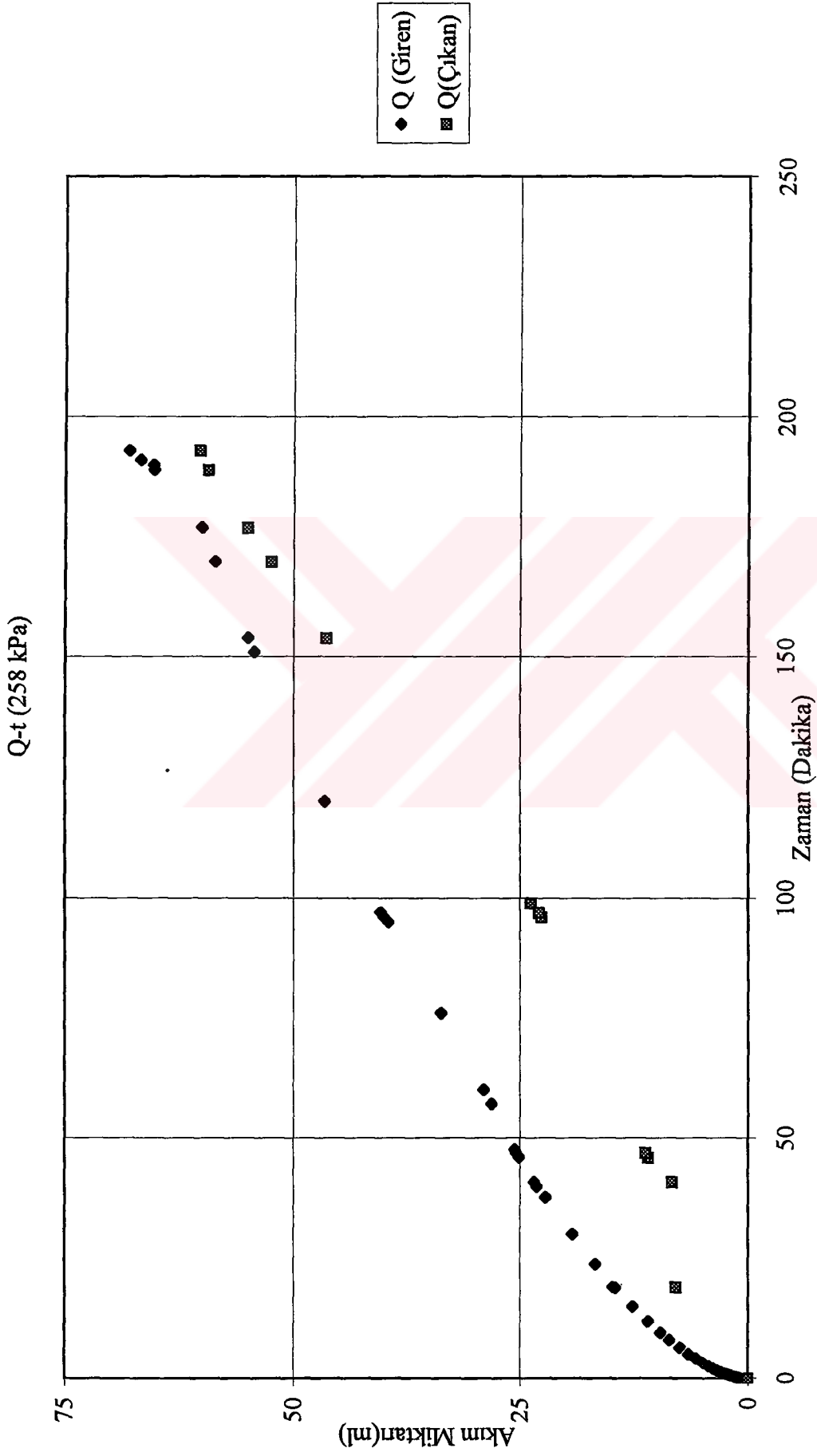




Şekil Ek-4.4 h Siyah kil için 215 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

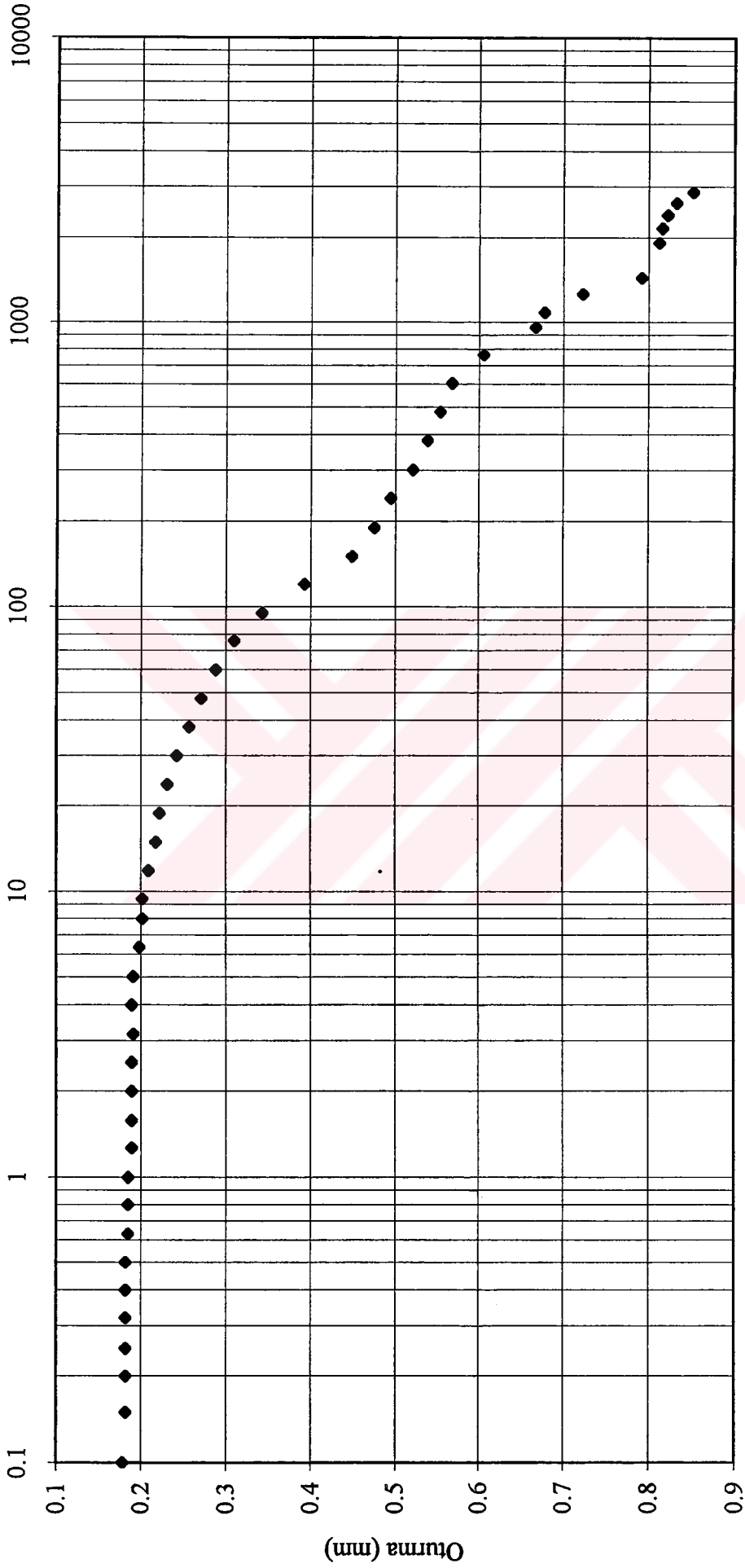


Şekil Ek-4.4 1 Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği

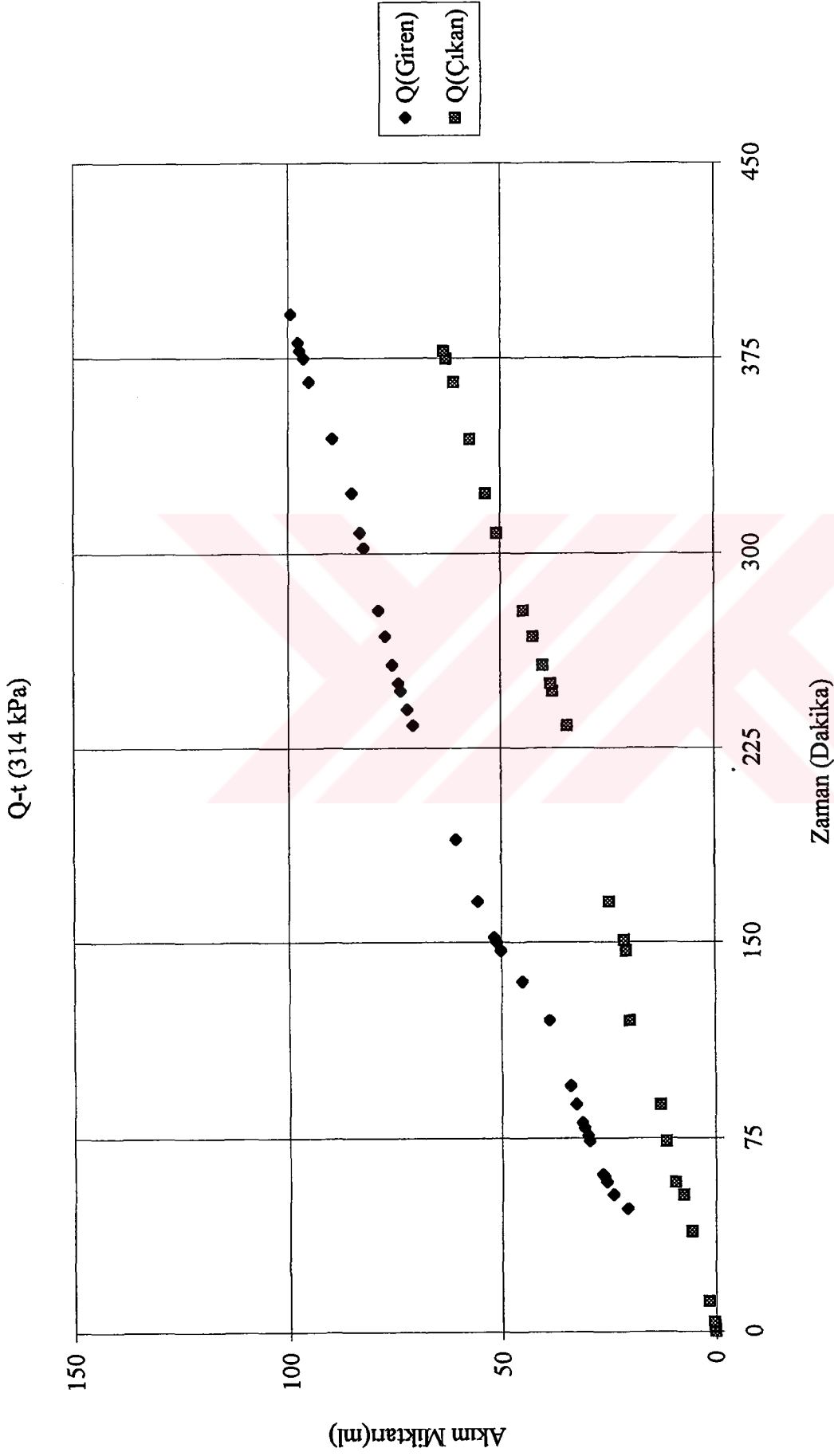


Şekil Ek-4.4 i Siyah kil için 258 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

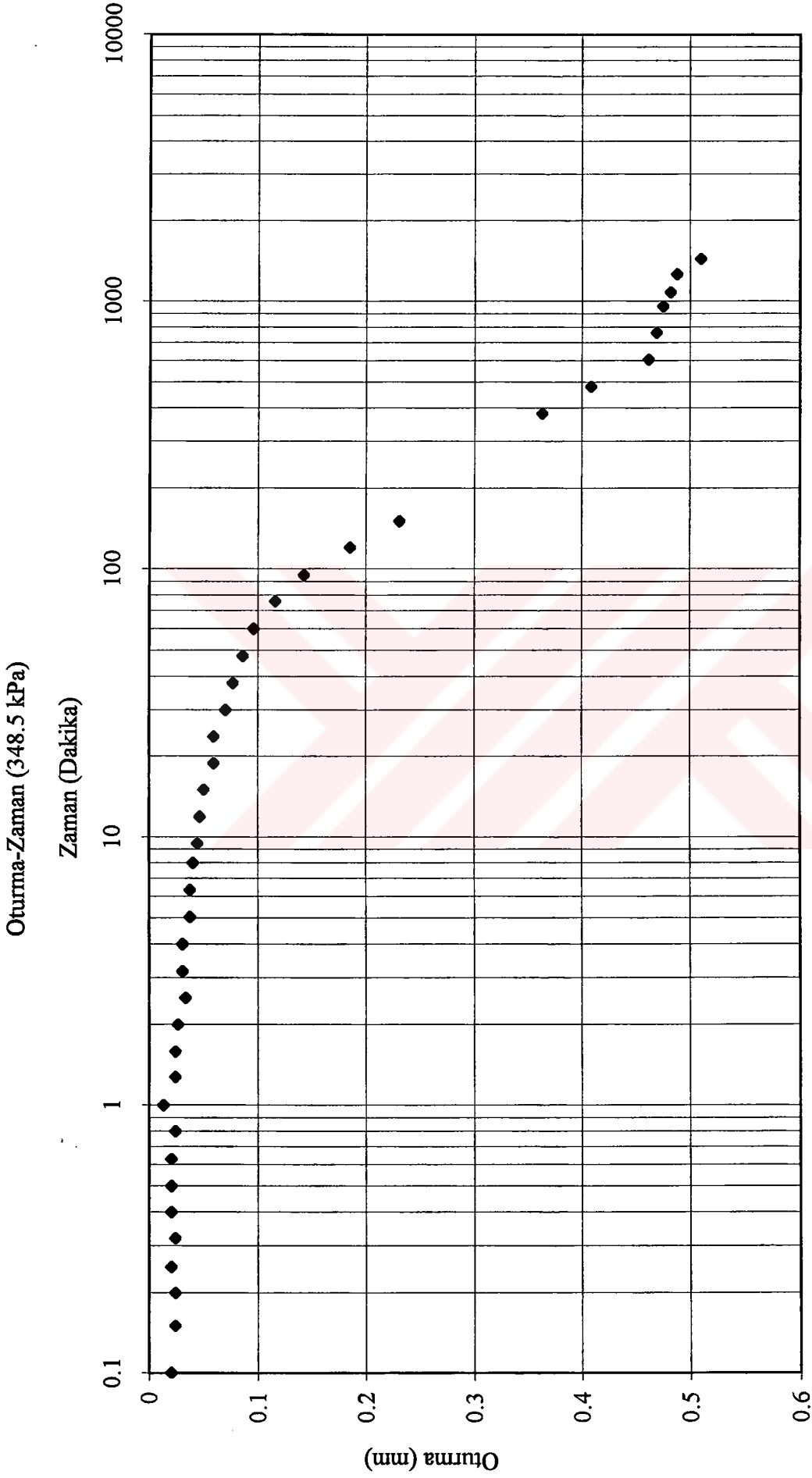
Oturma -Zaman (314 kPa)  
Zaman (Dakika)



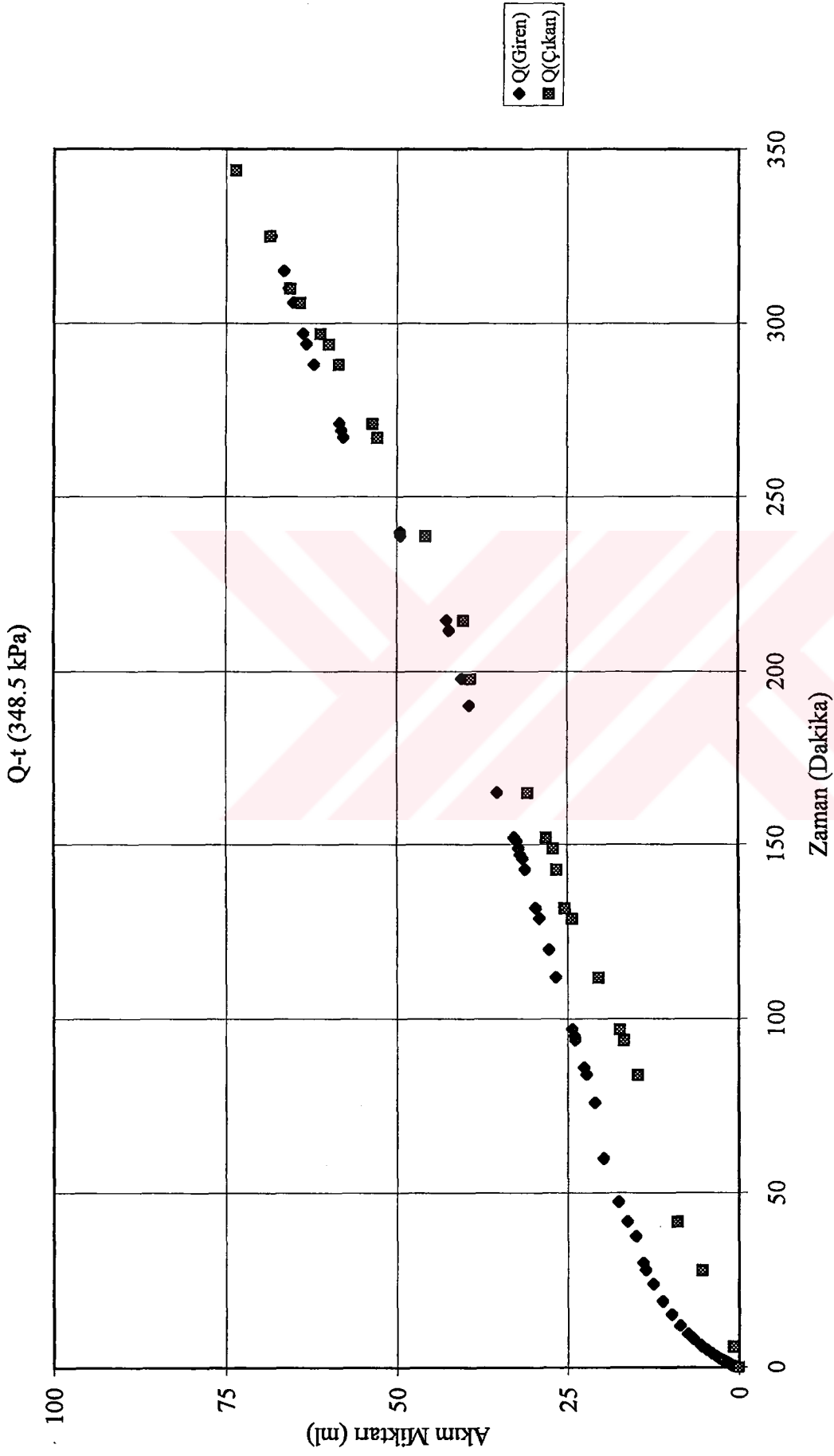
Şekil Ek-4.4 j Siyah kil için 314 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



Şekil Ek-4.4 k Siyah kil için 314 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

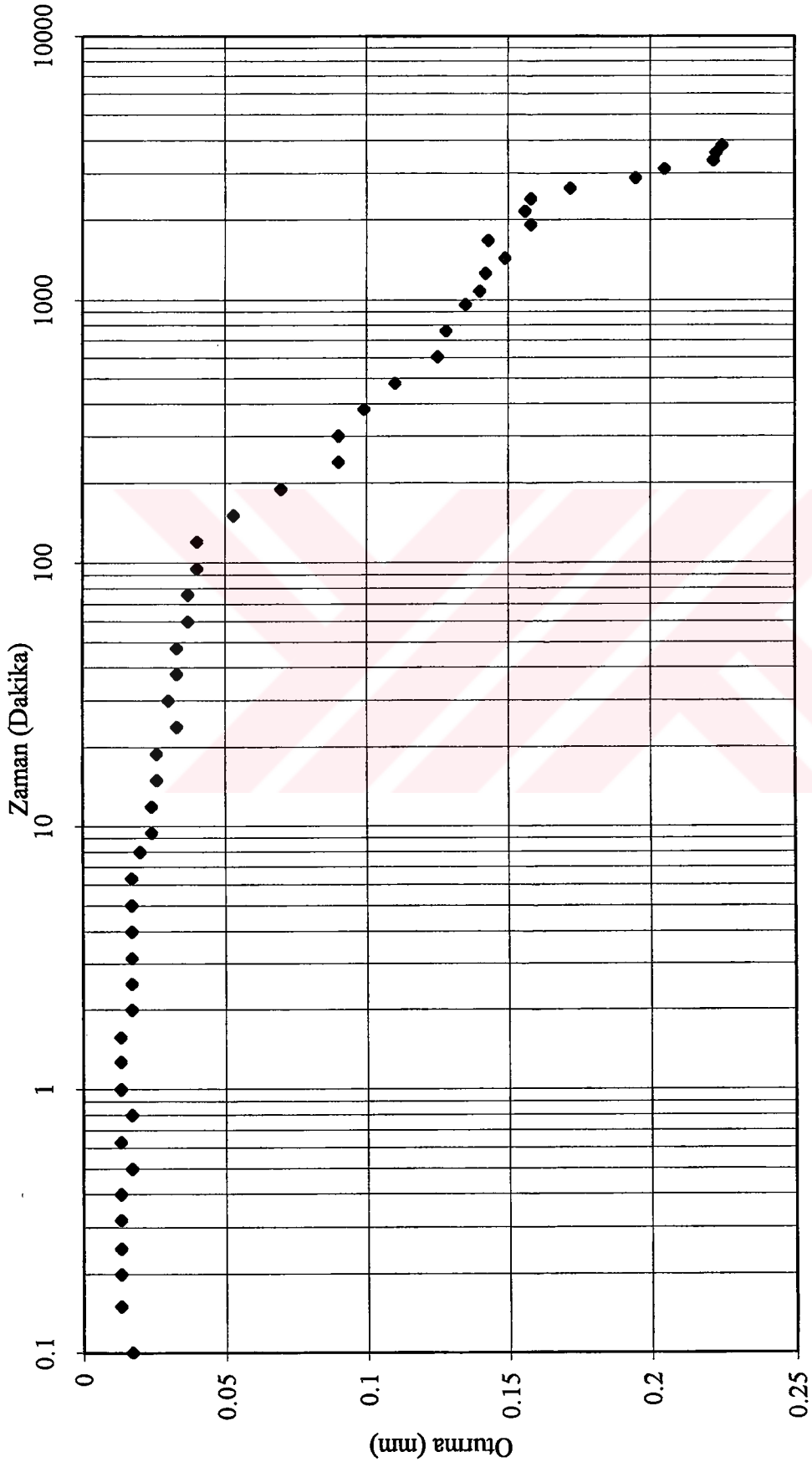


Şekil Ek-4.4.1 Siyah kili için 348.5 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği



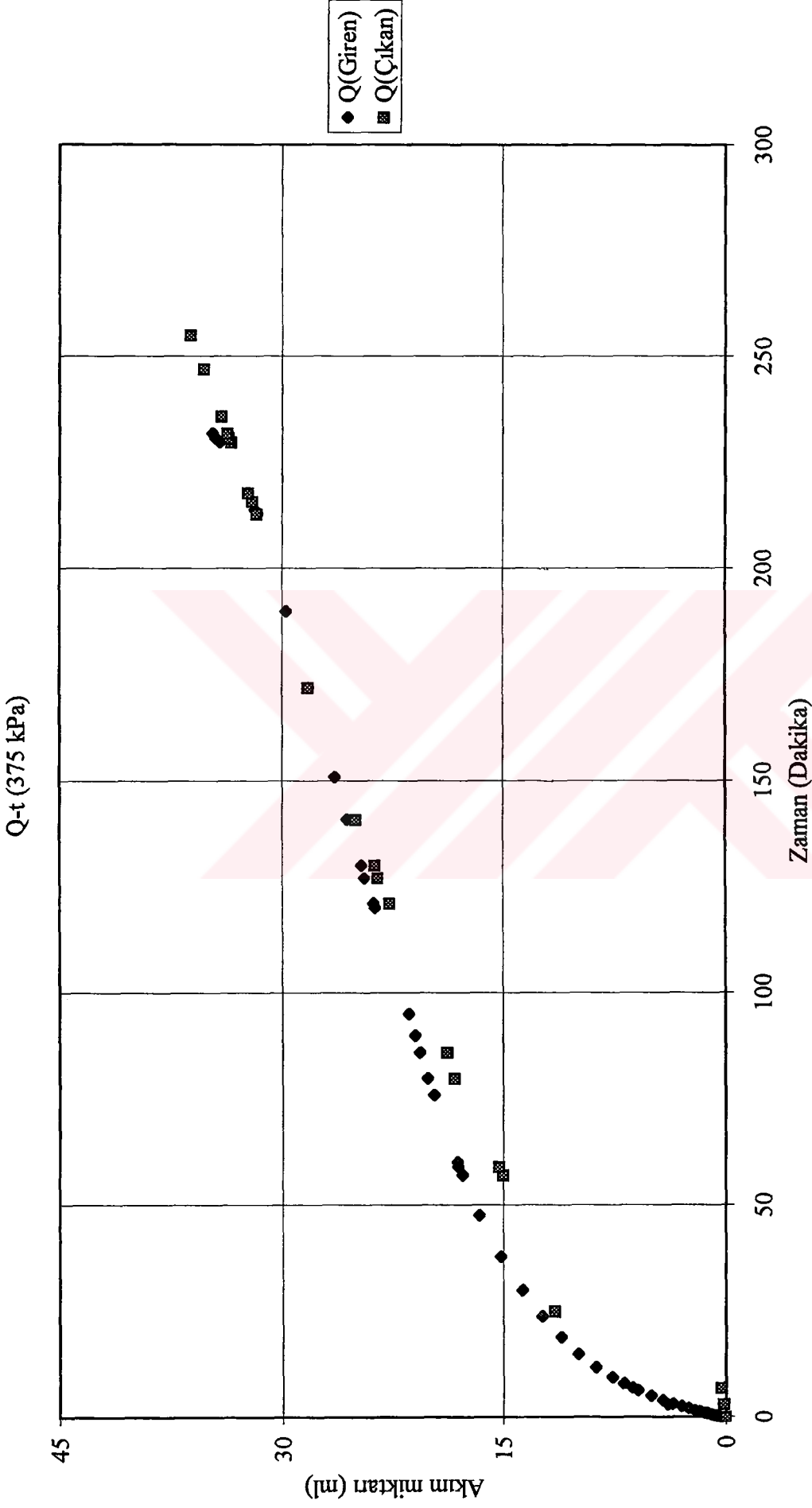
Şekil Ek-4.4 m Siyah kil için 348.5 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

## Oturma-Zaman (375 kPa)



Şekil Ek-4.4 n Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen oturma-zaman grafiği





Şekil Ek-4.4 o Siyah kil için 375 kPa gerilme kademesinde radyal yönlü permeabilite deneyinden elde edilen akım miktarı-zaman grafiği

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 03.02.1976

Doğum yeri Erzurum

Lise 1987-1992 Erzurum Anadolu Lisesi  
1992-1994 Antalya Anadolu Lisesi

Lisans 1994-1998 Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fak.  
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı

**Çalıştığı kurum**

1999-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik  
Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
KONKORDANLAMA MERKEZİ