

**KİLİN KRİTİK DURUM PARAMETRELERİNİN
LABORATUARDA BELİRLENMESİ**

**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Aşlı KURTULUŞ
(501981151)**

101475

101475

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Haziran 2001

Tez Danışmanı :

Prof. Dr. Ergün TOĞROL

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)

Prof.Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında değerleri bilgileri ile bana yol gösteren ve destek olan danışmanım Prof.Dr. Ergün Toğrol'a teşekkür ederim. Çalışmam süresince bana gösterdikleri ilgi ve sabırları için Prof.Dr. Atilla Ansal'a, laboratuvar çalışanlarımız Müh. İsmail Cantekin, Semih Viç ve Serdar Gültürer'e, Y.Müh. Süha Aksoy'a, Y.Müh. Bülent Hatipoğlu'na, Y.Müh. Gökhan Çevikbilen'e, Doç.Dr. Recep İyisan'a ve Doç.Dr. Oğuz Tan'a , ihtiyacım olduğu her an yanımda olduğu için oda arkadaşım Y.Müh. Sebahat Gök'e müteşekkirim. Son olarak, her zaman ve her şekilde bana destek oldukları için aileme teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyuyorum.

Haziran, 2001

Aslı Kurtuluş



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kaynakların Değerlendirilmesi	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Düzeni	8
2. DENEYSEL YÖNTEM	9
2.1 Malzeme	9
2.2 Üç Eksenli Basınç Deneyleri	10
2.2.1 Alet	10
2.2.2 Numune hazırlanması	14
2.2.3 Üç eksenli deneyin kurulması	19
2.2.4 Test yöntemi	21
2.3 Ödometre	24
2.4 Bazı Deney Ayrıntıları Üzerine Notlar	24
2.4.1 Numune hazırlama yöntemi üzerine	25
2.4.2 Suya doygunluk ve B değerinin belirlenmesi	26
2.4.3 Deney hızı	27
2.4.4 Alt ve üst başlıklardaki sürtünme etkileri	29
2.4.5 Üç eksenli hücrede su ve hava kaçakları	31
2.4.6 Yerleştirme hataları	33
2.5 Hesaplamalar	34
2.5.1 Düzeltmeler	34
2.5.2 Numune koşulları	43
2.5.3 Şekil değiştirmelerin hesabı	45
2.5.4 Gerilmelerin hesabı	45
2.5.5 Spesifik hacimlerin hesabı	46
2.5.6 Ödometre hesapları	47
3. DENEYSEL SONUÇLAR	49
3.1 Normal Sıkışma Eğrisi	50
3.2 Kabarma Eğrisi	52
3.3 Kritik Durum Eğrisi	53
3.4 Referans Spesifik Hacimler	57
4. SONUÇLAR	59

KAYNAKLAR	60
EK A KALİBRASYONLAR	66
EK B DENEY EĞRİLERİ	72
ÖZGEÇMİŞ	99



KISALTMALAR

KD	: Kritik Durum
ISE	: İzotropik Normal Sıkışma Eğrisi
KDE	: Kritik Durum Eğrisi
NSE	: Tek Yönlü Normal Sıkışma Eğrisi



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Speswhite Kaolini'nin fiziksel özellikleri
Tablo 2.2	Üç eksenli deney sisteminde kullanılan cihazların özeti
Tablo 2.3	Üç eksenli deney numunelerinin başlangıç koşulları
Tablo 2.4	Ödometre numunelerinin başlangıç koşulları
Tablo 2.5	Deviatör gerilmeye uygulanacak filtre dren düzeltmesi (Head, 1992)
Tablo 3.1a	Üç eksenli kesme deneyleri sonuçlarının özeti
Tablo 3.1b	Ödometre deneylerinin özeti
Tablo 3.2	Speswhite Kaolini'nin Kritik Durum Parametreleri

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Hvorslev' in kesme kutusu deneylerinden elde ettiği kırılma zarfı	2
Şekil 1.2 : Hvorslev akma yüzeyi (Roscoe, Schofield ve Wroth, 1958)	3
Şekil 1.3 : Kritik Durum Teorisi' nde varsayılan Sınır Yüzey Durumu	4
Şekil 1.4 : Geliştirilmiş Cam Kili modelinin (a) V-lnp' düzleminde, (b) q-p' düzleminde gösterimi	6
Şekil 2.1 : Üç eksenli deney sistemi şeması	11
Şekil 2.2a : Tablo 2.2 de tarif edilen üç eksenli deney sistemi	13
Şekil 2.2b : N1, N2, N4, N5 ve N6 nolu deneylerde kullanılan üç eksenli deney sistemi	14
Şekil 2.3 : Numune hazırlama düzeneği ve iki parçalı kalıp	16
Şekil 2.4 : Çalışmada kullanılan numune hazırlama düzeneği	17
Şekil 2.5 : Zemin çamurundan konsolide edilerek hazırlanan tipik bir numunenin su muhtevası dağılımı	18
Şekil 2.6 : Tipik bir numunenin kesme deneyi sonundaki su muhtevası dağılımı	23
Şekil 2.7 : Drenajsız deneylerde deney hızı ve farklı boşluk suyu basınç ölçme yerinin gerilme izine etkisi (Hight, 1982)	29
Şekil 2.8 : Hücre dışından gerçekleştirilen eksenel yer değiştirme ölçümlerinde hata sebepleri (Baldi ve diğ., 1988)	33
Şekil 2.9 : 38 mm çaplı numuneler için kılıf düzeltmesi eğrisi (Head, 1992)	36
Şekil 2.10 : Drenajsız üç eksenli basınç deney sonuçlarında alan düzeltmelerinin etkisi (Germaine ve Ladd, 1988)	41
Şekil 2.11 : Drenajsız üç eksenli basınç deney sonuçlarına çeşitli düzeltmelerin etkisi (Germaine ve Ladd, 1988)	42
Şekil 3.1 : Ödometre ve üç eksenli deneylerinden elde edilen normal sıkışma eğrileri	50
Şekil 3.2 : Speswhite Kaolini için çeşitli araştırmacıların elde ettiği tek yönlü normal sıkışma eğrileri (Al-Tabbaa, 1987)	51
Şekil 3.3 : 8 no'lu ödometre numunesine ait deney eğrisi	52
Şekil 3.4 : Ödometre deneylerinden elde edilen kabarma eğrisi	53
Şekil 3.5 : Kritik Durum Eğrisinin q-p' düzlemindeki izdüşümünün elde edilmesi	54
Şekil 3.6 : Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneylerinin efektif gerilme izleri	54
Şekil 3.7 : Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneylerinin konsolidasyon basıncı ile normalize edilmiş efektif gerilme izleri	55
Şekil 3.8 : Kritik Durum Eğrisinin V-lnp' düzlemindeki izdüşümünün elde edilmesi	55
Şekil 3.9 : N25 nolu numunenin drenajsız kesme deneyi eğrileri	56
Şekil 3.10 : Refereans spesifik hacimlerin şematik gösterimi	57

SEMBOL LİSTESİ

c	: “kohezyon”
c_u	: drenajsız kayma mukavemeti
c_v	: konsolidasyon katsayısı
e	: boşluk oranı
e_f	: deney sonundaki boşluk oranı
e_o	: başlangıç boşluk oranı
Δe	: boşluk oranındaki değişim
d	: diferansiyel operatörü
k	: permeabilite katsayısı
k_h	: yatay yönde permeabilite katsayısı
k_v	: düşey yönde permeabilite katsayısı
k_{fp}	: filtre kağıdının permeabilite katsayısı
m	: ağırlık
m_o	: deney numunesinin başlangıçtaki ağırlığı
m_f	: deney numunesinin deney sonundaki ağırlığı
p'	: ortalama efektif gerilme
p_o	: akma yüzeyinin ortalama efektif gerilme eksenini üzerindeki merkezi
p_c	: en büyük geçmiş konsolidasyon basıncı
p_e	: izotropik normal konsolidasyon eğrisi üzerinde, verilen bir spesifik hacime karşı gelen ortalama efektif gerilme
q	: deviatör gerilme
q_f	: kırılma anındaki deviatör gerilme
Δq	: deviatör gerilmeye uygulanan düzeltme
Δq_{dr}	: deviatör gerilmeye filtre drenler için uygulanan düzeltme
r	: yarıçap
t	: zaman
t	: lateks kılıfın kalınlığı
t_{100}	: 100% konsolidasyon süresi
t_f	: kesme deneyinde göçmeye kadar geçen süre
u	: ilave boşluk suyu basıncı
u_o	: başlangıçtaki ilave boşluk suyu basıncı
Δu	: ilave boşluk suyu basıncındaki değişim
v^e	: elastik hacimsel birim şekil değiştirme
v^p	: plastik hacimsel birim şekil değiştirme
w	: su muhtevası
w_o	: başlangıçtaki su muhtevası
w_f	: deney sonundaki su muhtevası
w_L	: likit limit
w_P	: plasitik limit
A	: kesit alanı
A	: Skempton' nın boşluk suyu parametresi

A_f	: kırılma anında Skempton 'nın boşluk suyu parametresi
A_c	: deney numunesinin konsolidasyon sonundaki kesit alanı
A_o	: deney numunesinin başlangıçtaki kesit alanı
B	: Skempton' nın boşluk suyu parametresi
D	: numune çapı
D_m	: lateks kılıfın çapı
E	: Young modülü
F	: eksenel yük
ΔF	: eksenel yüke uygulanan düzeltme
G_s	: dane özgül ağırlığı
H	: yükseklik
H_c	: deney numunesinin konsolidasyon sonundaki yüksekliği
H_f	: deney numunesinin deney sonundaki yüksekliği
H_o	: deney numunesinin başlangıçtaki yüksekliği
H_s	: eşdeğer zemin yüksekliği, $H_s = H_o / (1 + e_o)$
ΔH	: yer değiştirme
I_p	: plastisite indisi
K_o	: sükunetteki toprak basıncı
P_{fp}	: filtre kağıdının çevre uzunluğu
S	: doyumluk derecesi
S_f	: deney numunesinin deney sonundaki doyumluk derecesi
S_o	: deney numunesinin başlangıçtaki doyumluk derecesi
U	: geri dönebilen iş
V	: hacim
V_c	: deney numunesinin konsolidasyon sonundaki hacmi
V_o	: deney numunesinin başlangıçtaki hacmi
ΔV	: hacim değişimi
W	: geri dönmeyen iş
γ	: birim hacim ağırlık
γ_d	: kuru birim hacim ağırlık
γ_{df}	: deney sonundaki kuru birim hacim ağırlık
γ_f	: deney sonundaki birim hacim ağırlık
γ_o	: deney numunesinin başlangıçtaki birim hacim ağırlığı
γ_s	: dane birim hacim ağırlığı
γ_w	: suyun birim hacim ağırlığı
ε	: birim kayma şekil değiştirme
ε^e	: elastik birim şekil değiştirme
ε^p	: plastik birim şekil değiştirme
ε_a	: eksenel birim şekil değiştirme
ε_f	: kırılma anındaki birim şekil değiştirme
ε_r	: radyal birim şekil değiştirme
ε_v	: hacimsel birim şekil değiştirme
ε_{vc}	: konsolidasyon sonundaki hacimsel birim şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}$	: birim şekil değiştirme hızı
η	: gerilme oranı, q / p'
κ	: spesifik hacim- ortalama efektif gerilme düzleminde kabarma eğrisinin eğimi

λ	: spesifik hacim- ortalama efektif gerilme düzleminde normal sıkışma eğrisinin eğimi
ν	: Poisson oranı
σ_1, σ_1'	: en büyük toplam ve efektif asal gerilmeler
σ_3, σ_3'	: en küçük toplam ve efektif asal gerilmeler
σ_a, σ_a'	: eksenel toplam ve efektif gerilmeler
σ_r, σ_r'	: radyal toplam ve efektif gerilmeler
σ_f, σ_f'	: kırılma anındaki toplam ve efektif normal gerilmeler
$\Delta\sigma$	: hücre basıncındaki değişim
$\Delta\sigma_r$	: radyal gerilmeye uygulanan düzeltme
τ_f	: kırılma anındaki kayma gerilmesi, $1/2(\sigma_1 - \sigma_3)_f$
ϕ'	: efektif kayma mukavemeti açısı
ϕ_{cr}'	: Kritik Durum'da efektif kayma mukavemeti açısı
Γ	: Kritik Durum Eğrisi'nde $p'=1 \text{ kN/m}^2$ ye karşı gelen spesifik hacim değeri
M	: Kritik Durum Eğrisi'nin deviatör gerilme- ortalama efektif gerilme düzleminde eğimi
N	: izotropik normal sıkışma eğrisinde $p'=1 \text{ kN/m}^2$ ye karşı gelen spesifik hacim değeri
N_o	: tek yönlü normal sıkışma eğrisinde $p'=1 \text{ kN/m}^2$ ye karşı gelen spesifik hacim değeri

İndisler

1,2,3	: asal eksenler
a	: eksenel
cr	: Kritik Durum
e	: elastik
f	: kırılma, son
o	: başlangıç
p	: plastik
r	: radyal
v	: hacimsel

KİLİN KRİTİK DURUM PARAMETRELERİNİN LABORATUARDA BELİRLENMESİ

ÖZET

Modern zemin mekaniğinin büyük bir kısmı laboratuarda hazırlanmış veya yoğrulmuş zeminlerin özelliklerinin incelendiği ayrıntılı çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesiyle gelişmiştir. 1960'lı yıllarda Cambridge Üniversitesi Zemin Grubu tarafından formüle edilen Kritik Durum Zemin Mekaniği anlayışı daha önce ayrı ayrı ele alınan bir takım temel bulguları tek bir çerçevede açıklamaktaki başarısı nedeniyle önem kazanmıştır. Böylece, bu anlayış zeminlerin davranışlarının modellenmesinde basit ve güvenilir bir teori oluşturmuş, mühendislik problemlerinin çözümünde giderek daha çok uygulanmaya başlanmıştır. Kritik Durum Teorisi, zeminin kayma direncinin gerilme geçmişinden ve drenaj koşullarından bağımsız olarak yalnız boşluk oranı ve efektif gerilmenin bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceği varsayımına dayanır. Gerilme uzayında bu fonksiyon Kritik Durum Eğrisi verilen bir eğri ile temsil edilir. Bu teoriye uyan ideal bir zeminin davranışını tarifleyen ilk matematiksel model Cam Kili (*Cam Clay*) adı verilen zemin modelidir. Bu model Kritik Durum Parametreleri olarak da adlandırılan şu beş parametre ile tanımlıdır: Spesifik hacim-ortalama efektif gerilme düzleminde normal sıkışma eğrisinin eğimi; $-\lambda$, spesifik hacim-ortalama efektif gerilme düzleminde kabarma eğrisinin eğimi; $-\kappa$, deviatör gerilme-ortalama efektif gerilme düzleminde Kritik Durum Eğrisi'nin eğimi; M , spesifik hacim-ortalama efektif gerilme düzleminde Kritik Durum Eğrisi'nin ve normal sıkışma eğrisinin yerlerini belirlemek için $p'=1 \text{ kN/m}^2$ ye karşı gelen spesifik hacim değerleri, sırasıyla, N ve Γ . Bu çalışmada Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarında belli başlı uluslararası zemin mekaniği laboratuvarlarında kullanılan Speswhite Kaolin kilinden hazırlanmış suya doygun numuneler üzerinde bir seri üç eksenli basınç ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarından, incelenen kilin Kritik Durum Parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler, aynı kil ile çalışan çeşitli araştırmacıların yayınladıkları değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Böylece Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarında oluşturulan deney düzenin ve izlenen deneysel yöntemin uygunluğu kanıtlanmıştır.

LABORATORY DETERMINATION OF CRITICAL STATE PARAMETERS OF CLAYS

SUMMARY

Much of modern soil mechanics has developed from the results of comprehensive studies of the properties of remoulded and reconstituted natural or artificial soils. By far the most successful conceptual framework proposed for understanding the behaviour of soils is that known under the general name of Critical State Theory. The theory was developed originally in Cambridge University based on laboratory testing of reconstituted artificial clays (ie. Spestone kaolin). Although it has been modified and changed and some more sophisticated variations have been proposed, over the last three decades the classical theory has been widely taught and increasingly applied to the solution of engineering problems. The critical state framework, which was formulated by the Cambridge soil mechanics group under the leadership of Roscoe, derives its success from its ability of unifying the 'consolidation' and 'shearing', the 'drained' and 'undrained' behaviour of soils. In this way, the theory provides a logical and simple framework for mathematical modelling of soils. The very first mathematical model developed based on the concepts of Critical State Theory is known as Cam clay. Cam clay model requires five parameters for its full description. These are: $-\lambda$; the slope of the normal compression lines in specific volume-mean effective stress space, $-\kappa$; the slope of the swelling line in specific volume-mean effective stress space, M ; the slope of the critical state line in deviator stress-mean effective stress space, Γ and N ; value of specific volume at $p'=1 \text{ kN/m}^2$ on the Critical State Line and on the normal compression line, respectively. The work presented here describes the triaxial and odometer tests conducted on reconstituted saturated samples of Speswhite Kaolin and the determination of critical state parameters from the results of these tests. The parameters obtained are compared to those published by various researchers who worked on the same soil and are found to be compatible. In this way, the accuracy of the apparatus used as well as the adequacy of the experimental procedure applied has been confirmed.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada laboratuarda hazırlanmış suya doymun Speswhite Kaolin numunelerinin gerilme şekil değıştirme davranışını incelenmiştir.

Speswhite Kaolini, belli başlı zemin mekaniğı laboratuvarlarında zeminlerin mekanik davranışının incelenmesinde kullanılan yapay bir kildir. Bu tür ideal zeminlerin gerilme şekil değıştirme davranışını deneysel ve teorik olarak incelenerek kurulan zemin modelleri, doğal zeminlerin davranışını ile ilgili gerçekçi tahminlerin yapılmasına imkan vermektedir.

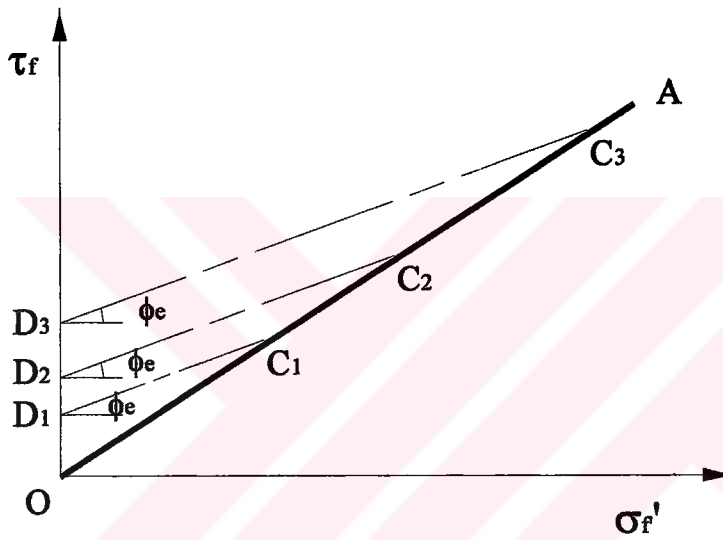
1.1 Kaynakların Değerlendirilmesi

Modern zemin mekaniğinin büyük bir kısmı laboratuarda hazırlanmış veya yoğrulmuş zeminlerin özelliklerinin incelendiğı detaylı çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesiyle gelişmiştir. Bu çalışmalardan belki de en dikkat çekici olanları Hvorslev'e, Rendulic'e ve Peynircioğlu'na ait üçü de 1930'lu yılların sonlarında ayrı yerlerde gerçekleştirilen araştırmalardır. Bugün Kritik Durum Zemin Mekaniğı adı ile bilinen anlayış, bu sözü edilen çalışmalardan yola çıkarak geliştirilmiştir. 1960'lı yıllarda Cambridge Üniversitesi Zemin Grubu tarafından formüle edilen Kritik Durum Zemin Mekaniğı anlayışı, daha önce ayrı ayrı ele alınan bir takım temel bulguları tek bir çerçevede açıklamaktaki başarısı nedeniyle önem kazanmıştır. Böylece bu anlayış, zeminlerin davranışlarının modellenmesinde basit ve güvenilir bir teori oluşturmuş, mühendislik problemlerinin çözümünde giderek daha çok uygulanmaya başlanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde Kritik Durum Teorisi'nin prensipleri kısaca özetlenmekte, bu teoriyi esas alarak geliştirilen, ve özellikle normal, az aşırı konsolide kil zeminlerin gerilme şekil değıştirme davranışlarını tanımlamakta son derece başarılı bulunan Cam Kili (*Cam Clay*) modelinin parametreleri tanıtılmaktadır.

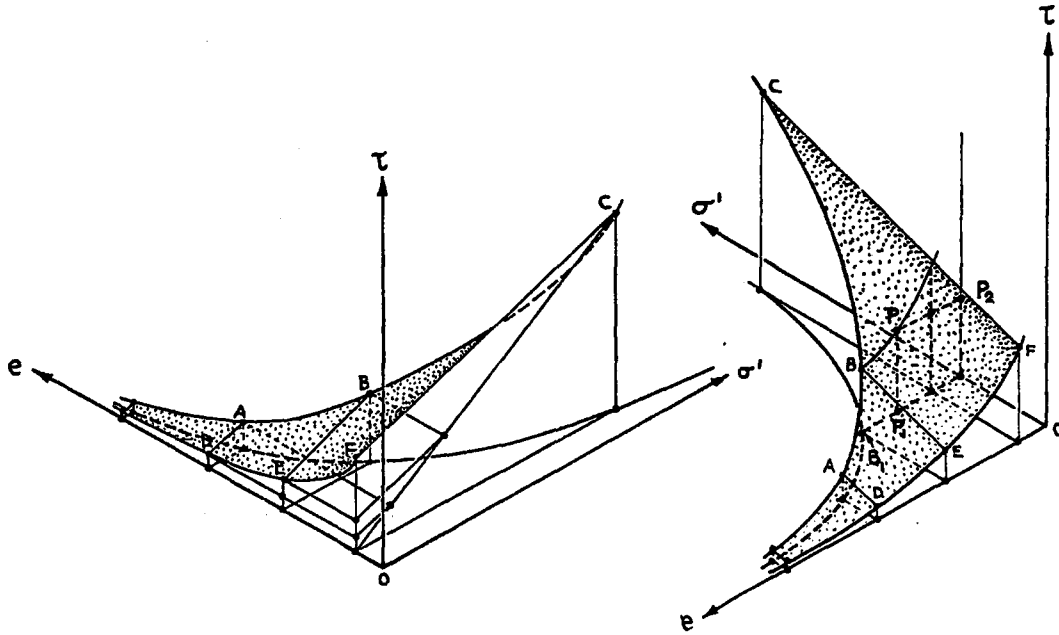
Kritik Durum Teorisi, en basit şekilde ifade etmek gerekirse, zeminin kayma direncinin gerilme geçmişinden ve drenaj koşullarından bağımsız olarak yalnız boşluk oranı ve efektif gerilmenin bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceği varsayımına dayanır. Teorinin en önemli yanı zeminlerin yalnız kayma gerilmeleri altında da hacim değiştirdiklerini, zemin davranışının efektif gerilme kadar boşluk oranı ile de ilişkili olduğunu ortaya koymuş olmasıdır.

İlk kez, Hvorslev doktora çalışmasında Mohr Coulomb kırılma hipotezindeki kohezyon, c , değerinin aşırı konsolidasyon oranının bir fonksiyonu olduğunu deneysel olarak göstermiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Hvorslev' in kesme kutusu deneylerinden elde ettiği kırılma zarfı

Roscoe, Schofield ve Wroth, Hvorslev'in çalışmalarını genişletmiş, efektif gerilme-boşluk oranı- kayma gerilmesi uzayında Hvorslev yüzeyi adını verdikleri tek bir akma yüzeyinin varlığını deneysel olarak kanıtlamışlardır (Şekil 1.2). Hvorslev ve Peynircioğlu çalışmalarında normal konsolide killler kesilirken dışarıya su çıktığını, her konsolidasyon durumunda zeminin farklı bir malzeme gibi farklı mukavemet özellikleri gösterdiğini gözlemişlerdir (Toğrol, 1962).



Şekil 1.2 Hvorslev akma yüzeyi (Roscoe, Schofield ve Wroth, 1958)

Bu ilk çalışmaları sonraki yıllarda Roscoe ve diğerlerinin (Roscoe, Schofield ve Thuraiajah, 1964, Roscoe ve Burland, 1968) Kritik Durum adını verdikleri teoriyi geliştirdikleri bir dizi çalışma izlemiştir. Schofield ve Wroth (1968) ile Atkinson ve Bransby (1978) nin çalışmaları ile son haline gelen Kritik Durum Teorisi, esas olarak üç eksenli deneylerden elde edilen sonuçlarla geliştirilmiş olduğu için teori içerisinde zeminin durumu şu üç değişken ile tanımlanmaktadır:

$$\text{Spesifik hacim} \quad V = 1 + e \quad (1.1)$$

$$\text{Ortalama efektif gerilme} \quad p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3') / 3; \quad (\sigma_1 > \sigma_3) \quad (1.2)$$

$$\text{Deviatör gerilme} \quad q = \sigma_1' - \sigma_3' = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (1.3)$$

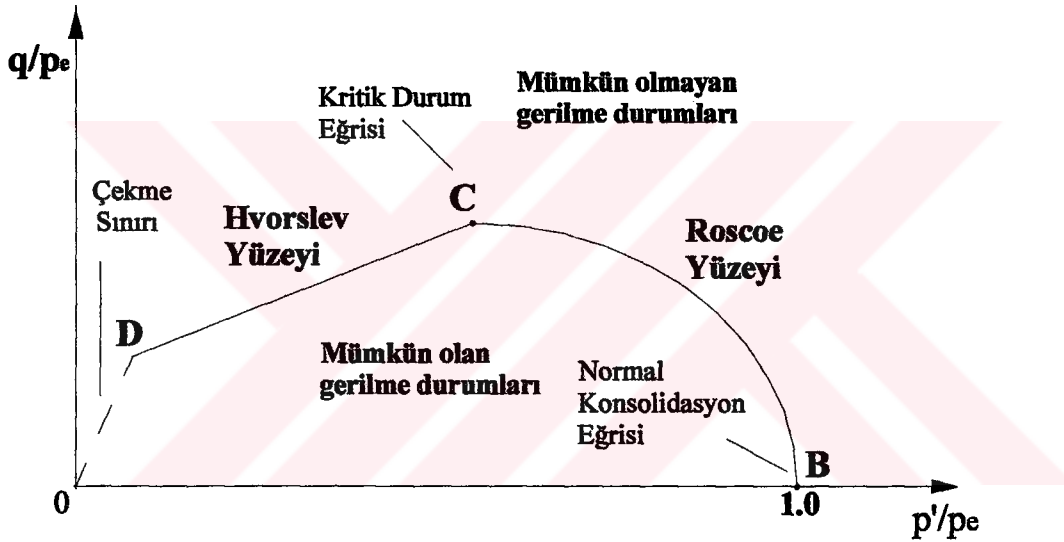
Birim zemin elemanın şekil değişirmesi ise ,

$$\text{Birim hacimsel şekil değişirme} \quad \delta v = \delta V / V \quad (1.4)$$

$$\text{Birim kayma şekil değişirmesi} \quad \delta \varepsilon = \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (1.5)$$

ile ifade edilmektedir.

Kritik Durum Teorisi'ni normalize edilmiş gerilme düzleminde Şekil 1.3' te verilen gösterim yardımıyla şu şekilde özetlemek mümkündür. Aynı boşluk oranına sahip zeminler, gerilme geçmişi ne olursa olsun bu normalize edilmiş gerilme düzleminde Kritik Durum Noktası ile temsil edilen tek bir gerilme durumunda kırılırlar. Zeminin mümkün olan ile mümkün olmayan gerilme durumlarını birbirinden ayıran tek bir Sınır Durum Yüzeyi vardır. Gerilme düzleminde Sınır Durum Yüzeyi'ni temsil eden eğrinin şekli zeminin Kritik Durum Noktası'nın ıslak tarafında veya kuru tarafında olmasına göre belirlenmektedir. Gerilme izi, Sınır Durum Yüzeyi'ne ulaştığında akma başlar ve bundan sonra zeminin gerilme durumu Kritik Durum Noktası'na ulaşmaya kadar bu yüzey üzerinde kalır.



Şekil 1.3 Kritik Durum Teorisi'nde varsayılan Sınır Yüzey Durumu

Kritik Durum Teorisi'ne uyan ideal bir zeminin davranışını tarifleyen ilk matematiksel model Cam Kili (*Cam Clay*) adı verilen zemin modelidir. Bu ilk modelin geliştirilmiş bir hali Geliştirilmiş Cam Kili (*Modified Cam Clay*) adı ile bilinmektedir. İki model arasındaki tek fark varsayılan akma yüzeyinin geometrisi ile ilgilidir. Orjinalinden daha yaygın olarak kullanıldığı için bu çalışmada Geliştirilmiş Cam Kili'nden bahsedilecektir.

Geliştirilmiş Cam Kili modeli bir zemin elemanında birim gerilme artışına karşı gelen birim şekil değiştirmeleri tahmin etmektedir. Birim gerilme artışının zemin elemanı üzerinde yaptığı iş,

$$\delta E = p' \delta v + q \delta \varepsilon \quad (1.6)$$

ile ifade edilmektedir. Birim iş iki bileşenden oluşmaktadır, gerilme boşaltığında geri dönen kısım; δU ve geri dönmeyen kısım; δW . Birim şekil değiştirmeler de benzer şekilde geri dönen (elastik) ve geri dönmeyen (plastik) olarak iki kısma ayrılabilir. Böylece birim işi

$$\delta U = p' \delta v^e + q \delta \varepsilon^e \quad (1.7)$$

$$\delta W = p' \delta v^p + q \delta \varepsilon^p \quad (1.8)$$

ile ifade etmek mümkündür. Modelin bütün kabullerini ve matematiksel ifadelerini Roscoe ve Burland (1968) ayrıntılı olarak anlatmaktadır.

Kritik Durum Teorisi'nde varsayılan Kritik Durum Eğrisi'nin q - p' düzlemindeki izdüşümü :

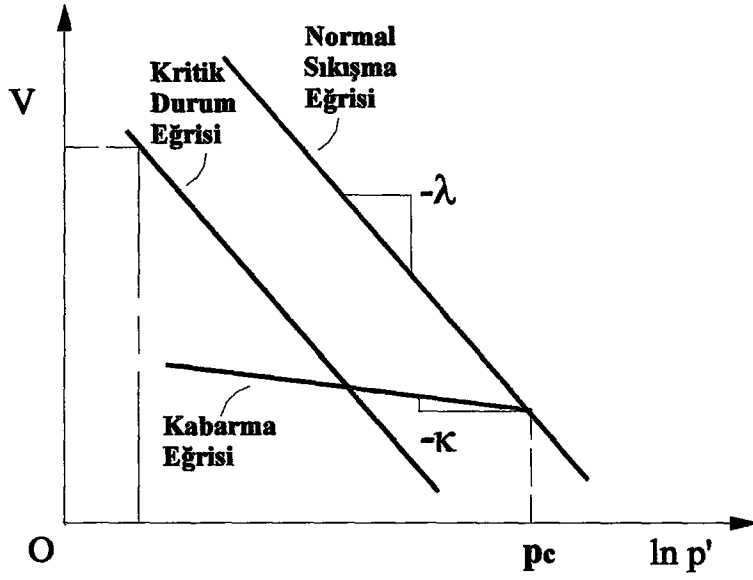
$$q = Mp' \quad (1.9)$$

ile belirli bir doğrudur. Diğer bir deyişle Kritik Durum'da gerilme oranı q/p' , M değerine eşittir (Şekil 1.4b). Kritik Durum Eğrisi'nin V - $\ln p'$ düzlemindeki izdüşümü ise normal sıkışma eğrisine paraleldir ve eğimi, $-\lambda$, ile belirlidir (Şekil 1.4a). Gerilme durumu Kritik Durum Eğrisi'nin sağında ve solunda olan zeminler sırasıyla ıslak tarafta ve kuru tarafta olarak adlandırılmaktadır (Schofield ve Wroth, 1968).

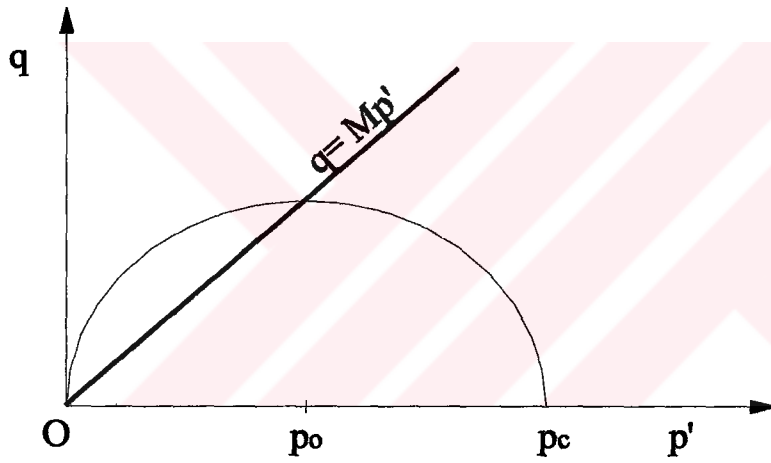
Gerilme boşaltıldığı zaman geri dönebilen hacimsel şekil değiştirme,

$$\delta v^e = \frac{\kappa}{Vp'} \delta p' \quad (1.10)$$

ile ifade edilmektedir. Burada, κ , V - $\ln p'$ düzleminde kabarma eğrisinin eğiminin mutlak değeridir (Şekil 1.4a).



(a)



(b)

Şekil 1.4 Geliştirilmiş Cam Kili modelinin (a) $V-\ln p'$ düzleminde, (b) $q-p'$ düzleminde gösterimi

Plastik şekil değiştirmelerin akma yüzeyine paralel olduğu (“normalite” kanunun geçerli olduğu) varsayılmaktadır. Buna göre akma yüzeyi üzerindeki bir gerilme durumunda plastik hacimsel ve kayma şekil değiştirmelerin birbirine oranı

$$\frac{dv^p}{d\varepsilon^p} = -\frac{dq}{dp'} \quad (1.11)$$

ifadesinden belirlenmektedir.

Zeminin kesme sırasında konsolide olarak mukavemetinin artması davranışını modellemek için akma yüzeylerinin boyutu ile zeminin normal sıkışması arasındaki ilişki,

$$\delta v^p = \frac{(\lambda - \kappa)}{V} \frac{\delta p_c'}{p_c'} \quad (1.12)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada p_c , o andaki gerilme durumu için geçerli olan akma yüzeyinin boyutunu belirlemektedir (Şekil 1.4b). Roscoe ve Burland (1968) geri dönmeyen iş için varsayımlar yaparak ve (1.8) ve (1.11) nolu denklemleri birleştirerek, akma yüzeyinin bir elipsle temsil edilebileceği sonucuna varmışlardır. Buna göre akma yüzeyleri,

$$\frac{p'}{p_c'} = \frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \quad (1.13)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Böylece plastik şekil değiştirmeler:

$$\begin{bmatrix} \delta v^p \\ \delta \varepsilon^p \end{bmatrix} = \frac{(\lambda - \kappa)}{V p' (M^2 + \eta^2)} \begin{bmatrix} (M^2 - \eta^2) & 2\eta \\ 2\eta & 4\eta^2 / (M^2 - \eta^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

ifadesi ile belirlenmektedir.

Bu durumda Cam Kili modeli şu beş parametre ile tanımlanabilmektedir: λ , κ , M ve Kritik Durum Eğrisi ve Normal Sıkışma Eğrisi'nin sıkışma düzleminde yerleşimini belirlemek için $p'=1 \text{ kN/m}^2$ e karşı gelen spesifik hacim değerleri, sırasıyla, Γ ve N .

1.2 Çalışmanın Amacı ve Düzeni

Bu çalışmanın amacı belli başlı uluslararası zemin mekaniği laboratuvarlarında kullanılan Speswhite Kaolini'ne ait Kritik Durum Parametreleri'nin Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarı'nda mevcut deney sistemi ile elde edilmesi, elde edilen sonuçların kaynaklarda var olanlarla karşılaştırılması ve deney düzeninin geliştirilmesi için öneriler getirilmesidir.

Bu amaçla Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarı'nda bir seri üç eksenli basınç deneyi ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden Speswhite Kaolini'nin Kritik Durum Parametreleri elde edilmiştir. Bunlar,

- a) Spesifik hacim- ortalama efektif gerilme, $V - \ln p'$, düzleminde normal sıkışma eğrisinin eğimi; $-\lambda$.
- b) Spesifik hacim- ortalama efektif gerilme, $V - \ln p'$, düzleminde kabarma eğrisinin eğimi; $-\kappa$.
- c) Deviatör gerilme- ortalama efektif gerilme, $q - p'$, düzleminde Kritik Durum Eğrisi'nin eğimi; M .
- d) Spesifik hacim- ortalama efektif gerilme, $V - \ln p'$, düzleminde normal sıkışma ve Kritik Durum Eğrisi'nin yerlerini belirlemek için $p'=1 \text{ kN/m}^2$ ye karşı gelen spesifik hacim değerleri, sırasıyla N ve Γ .

Çalışmanın düzeni aşağıda kısaca anlatılmaktadır.

Bölüm 2'de, kullanılan deney malzemesi ve deney aletleri ile ilgili bilgi verilmiş izlenen deneysel yöntem detaylı olarak anlatılmış, deney verilerinin analizi ve yapılan hesaplamalardan bahsedilmiştir. Bölüm 3'te, elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve başka araştırmacılar tarafından yayınlanmış sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'te ise çalışmadan elde edilen sonuçların bir değerlendirmesi yapılmıştır. Son olarak ekler kısmında üç eksenli deney sistemindeki ölçüm cihazlarının bu çalışmanın başında yapılan kalibrasyonları anlatılmış, elde edilen kalibrasyon eğrileri verilmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan aletler, numune hazırlama yöntemi ve deneylerin yapılışında izlenen yöntem anlatılmaktadır. Çalışmada, malzemenin endeks özelliklerinin belirlendiği sınıflandırma deneyleri dışında iki deney grubu planlanmıştır: üç eksenli izotropik konsolidasyonlu drenajsız basınç deneyleri ve ödometre deneyleri. Bütün deneyler toz halindeki Speswhite Kaolini'nin 150% su muhtevasında damıtık su ile karıştırılmasından elde edilmiş zemin çamurunun tek yönde konsolide edilmesiyle hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneylerin hepsi İstanbul Teknik Üniversitesi Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışma süresince yapılan gözlemlerden laboratuvar sıcaklığının $20\pm2^\circ$ civarında olduğu bulunmuştur.

2.1 Malzeme

English China Clay International firmasından bu çalışma için özel olarak getirtilen toz halindeki Speswhite Kaolini'nin bu çalışmanın başında yapılan standart laboratuvar deneyleri ile belirlenen dane özgül ağırlığı 2.62, likit limiti 65%, plastik limiti 33%, 2μ 'dan daha küçük danelerin yüzdesi 84% dir. Buna göre malzemenin plastisite indisi 32%, aktivitesi ise 0.38 dir. Bu değerler Speswhite Kaolini'nin yayımlanmış değerleri ile uyum içerisindedir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Speswhite Kaolinin fiziksel özellikleri

Kaynak	Likit Limit w_L (%)	Plastik Limit w_P (%)	Plastisite İndisi I_P (%)	Kil yüzdesi $\%<2\mu$	Dane özgül ağırlığı G_s
Yazar	65	33	32	84	2.62
Rosatto (1992)	63	33	30	82	2.61
Richardson (1988)	65	35	30	-	2.60
Al-Tabbaa (1987)	69	38	31	80	-

2.2 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

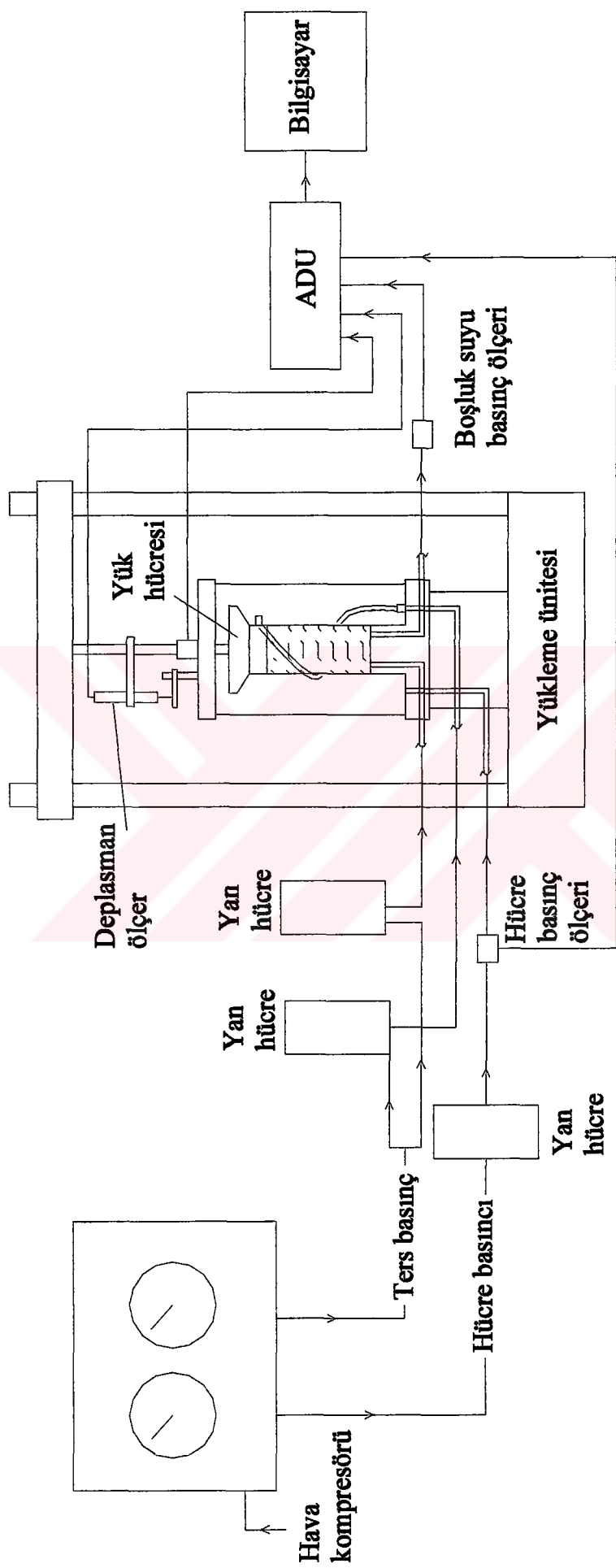
Üç eksenli deneylerin tamamı deformasyon kontrollü isotropik konsolidasyonlu basınç deneyleridir. Bütün deneyler normal konsolide suya doymun Speswhite Kaolin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerin büyük çoğunluğunda bilgisayarla kontrol edilen bir otomatik veri toplayıcı birimi ile birlikte kullanılan üç eksenli deney düzeni kullanılmıştır. Üç eksenli deney aletinin tasarım ve çalışma prensiplerini Bishop ve Henkel (1962) ayrıntılı olarak anlatmaktadır. Aşağıda bu tezin konusu olan deneysel çalışma ile ilgili ayrıntılara yer verilmiştir.

2.2.1 Alet

Üç eksenli basınç deneylerinin büyük bir kısmında ADU (dijital veri toplama birimi) donanımlı bir üç eksenli deney sistemi kullanılmıştır. Sistem, 1700 kPa kapasiteli bir üç eksenli hücre, bir yükleme birimi, 1000'er kPa kapasiteli üç hava torbalı (*air/bladder type*) yan hücre, bir yük hücresi (*submersible load cell*), iki basınç ölçer (*pressure transducer*) ve bir yerdeğiştirme ölçerden (*displacement transducer*) oluşmaktadır. Deney sisteminin bir şeması Şekil 2.1 de verilmiştir.

Hücre ve ters basınçları sağlamak için sisteme gerekli olan basıncın kaynağı laboratuvarın ana kompresöründen gelen basınçlı havadır. Deney aletinin bulunduğu yerde bir basınç kontrol vanasından geçerek sistem şemasında (Şekil 2.1) görülen panoya gelen basınçlı hava hücre basıncı ve ters basınç regülatörlerinden yan hücrelere ulaşmaktadır. Bu şekilde üç eksenli deney hücresine maksimum 800 kN/m² basınç sağlanabilmektedir.

Sistemin ihtiyacı olan güç, elektronik ölçme cihazları için 10V, yükleme birimi, ADU ve verilerin toplandığı bilgisayar için 240V voltur. Hava kompresörü normal elektrik şebekesinden beslenmektedir. Deney aletleri için gerekli güç ise normal şebekeden gelen elektriğin 220A kapasiteli kesintisiz güç kaynağı üzerinden geçirilmesiyle sisteme sağlanmaktadır. Bu şekilde şebekedeki voltaj değişikliğinin deney sistemini etkilemesinin engelleneceği düşünülmüştür. Elektrik kesintisi olması halinde kesintisiz güç kaynağı yarım saat süreyle gerekli gücü sağlayabilmektedir. Hava kompresörü de yaklaşık yarım saat boyunca -basınçlar çok yüksek olmadığı sürece (300-350 kPa)- basınçları sabit tutabilmektedir.



Şekil 2.1 Üç eksenli deney sistemi şeması

Eksenel yük bir yük hücresi ile hücre içinde üst başlık üzerinden ölçülmüştür. Böylece yük ölçümleri piston ve hücre arasındaki sürtünmeden bağımsızdır. Yük hücresinin üretici firma tarafından bildirilmiş çalışma aralığı 0-2kN dur. 50 mm çaplı numune üzerinde bu aralık yaklaşık 0-1000 kN/m² gerilmeye karşı gelmektedir. Yük hücresinin çalışma başında elde edilen kalibrasyon eğrisi EkA3 de verilmiştir. Kalibrasyon yine bu çalışma içerisinde kullanılmış 2 kN kapasiteli bir yük halkası ile yapılmıştır. Yük halkasının kalibrasyon eğrisi EkA2 de verilmiştir.

Hücre basıncı ve boşluk suyu basıncı basınç ölçerlerle ile ölçülmüştür. Her iki basınç ölçerin de üretici tarafından bildirilmiş çalışma aralığı ± 1000 kPa dır. Basınç ölçerlerin kalibrasyon eğrileri EkA1 de verilmiştir. Boşluk suyu basıncı yalnız numune alt başlığından ölçülmüştür.

Eksenel yerdeğiştirme hücre dışından ± 25 mm aralığında düşey hareketleri ölçebilen bir yerdeğiştirme ölçer (*displacement transducer*) ile yapılmıştır. Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyon eğrisi EkA4 de verilmiştir.

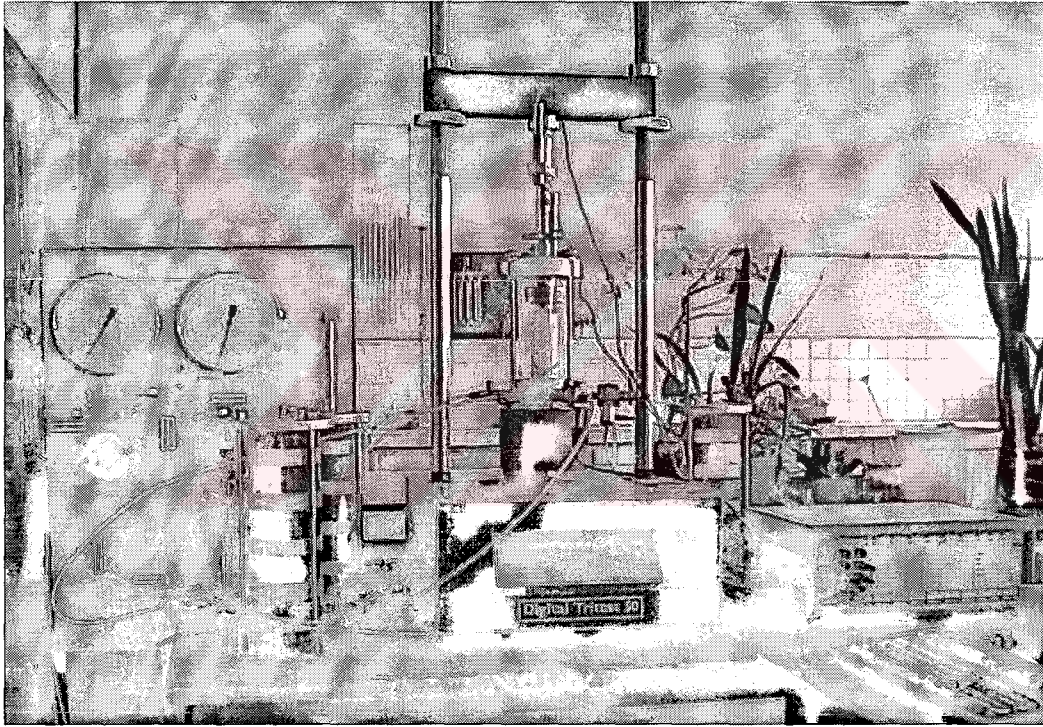
Mevcut sistemde hacim değişimi ve radyal şekil değiştirmeleri ölçmek mümkün olmamıştır. Bunun yerine numunenin düzgün bir silindir olarak şekil değiştirdiği varsayılarak bu değerler ölçülen eksenel yerdeğiştirmeler kullanılarak hesapla elde edilmiştir. Tablo 2.2' de bütün cihazların çalışma aralıkları ve hesaplanan çözünürlükleri verilmiştir.

Tablo 2.2 Üç eksenli deney sisteminde kullanılan cihazların özeti

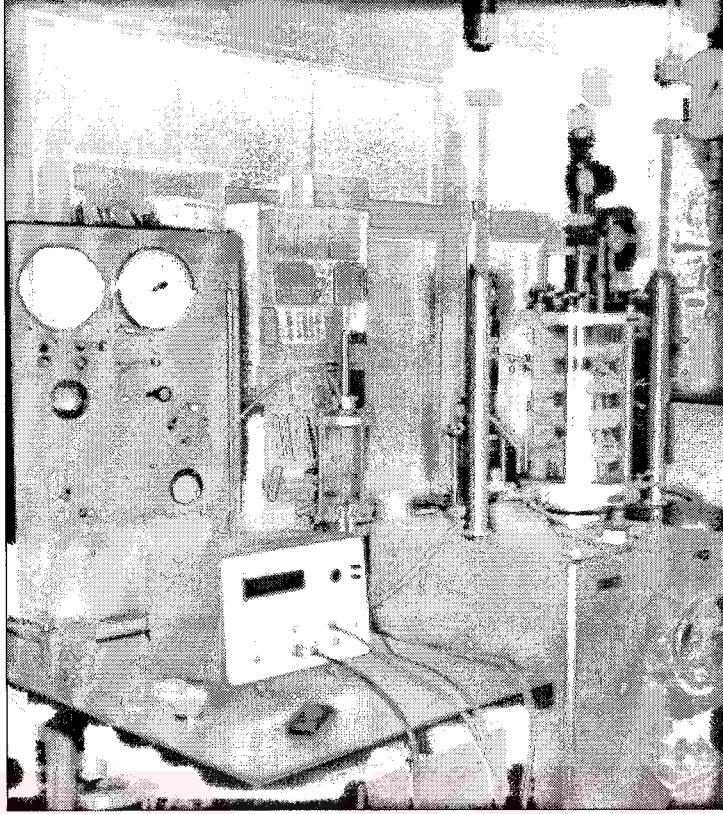
Fonksiyon	Cihaz	Kapasite	Çözünürlük
Eksenel yük, F	Yük hücresi "Nonlinerite" $\pm 8\%$	0-2000N	0.002 N
Boşluk suyu basıncı, u	Basınç ölçer "Nonlinerite" $\pm 1\%$ "Histerisis" $\pm 2\%$	± 1000 kPa	0.015 kPa
Hücre basıncı, σ_3	Basınç ölçer "Nonlinerite" $\pm 1\%$ "Histerisis" $\pm 1\%$	± 1000 kPa	0.015 kPa
Eksenel yerdeğiştirme, ΔH	Yerdeğiştirme ölçer "Nonlinerite" $\pm 1\%$	± 25 mm	0.01 mm

Deneyler süresince termal dengeyi sağlamak açısından sistem -şebekedeki uzun süreli elektrik kesintileri hariç- sürekli açık tutulmuştur.

N1, N2, N4, N5 ve N6 no'lu deneyler yukarıda bahsedilen sistemde gerçekleştirilmemiştir. Bu deneylerde, laboratuarda çalışır durumda olan bir üç eksenli deney düzeni kullanılmıştır. Bu düzen, bir üç eksenli hücre, bir yükleme tesisi, bir yük halkası, bir basınç ölçer ve bu basınç ölçere bağlanan bir dijital okuma birimi ile üç hava/su yüzeyli yan hücreden oluşmaktadır. Bu düzende bütün okumalar elle alınıp deney föylerine kaydedilmekteydi. Yükleme tesisi elektrikli motor/vites kutusu sistemi ile çalıştığından uygulanabilir yükleme hızları sınırlıydı. Şekil 2.2 de kullanılan her iki deney düzeni de fotoğrafla gösterilmiştir.



Şekil 2.2a Tablo 2.2'de tarif edilen üç eksenli deney sistemi



Şekil 2.2b N1, N2, N4, N5 ve N6 nolu deneylerde kullanılan üç eksenli deney sistemi

2.2.2 Numune hazırlanması

Bütün numuneler toz halindeki Speswhite Kaolini'nin 150% su muhtevasında damıtık su ile karıştırılmasından elde edilmiş zemin çamurunun tek yönde konsolide edilmesiyle hazırlanmıştır. Yalnız ilk iki deneyde (N1 ve N2 nolu deneyler) 130% ve 145% su muhtevaları musluk suyu kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra 150% su muhtevasının işlenebilirlik ve sonunda elde edilecek numune yüksekliği açısından uygun olduğuna karar verilmiştir. Cambridge Üniversitesi'nde aynı malzeme ile benzer çalışmalar için 160% su muhtevasının kullanılmasının gelenek haline geldiği bildirilmektedir (Wood, 1974). Yine aynı malzeme ile City Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada başlangıç su muhtevası 150% seçilmiştir (Richardson, 1988). Gens (1982) ve Wood (1974), numunelerin başlangıç su muhtevasının deney davranışını etkilediğini bildirmektedirler.

Üç eksenli deney numunelerini hazırlamak için çalışmanın başında iki yöntem düşünülmüştür. Birinci yöntemde zemin çamuru büyük çaplı bir kalıpta konsolide edildikten sonra deney numunesinin bu zeminden kesilerek elde edilmesi

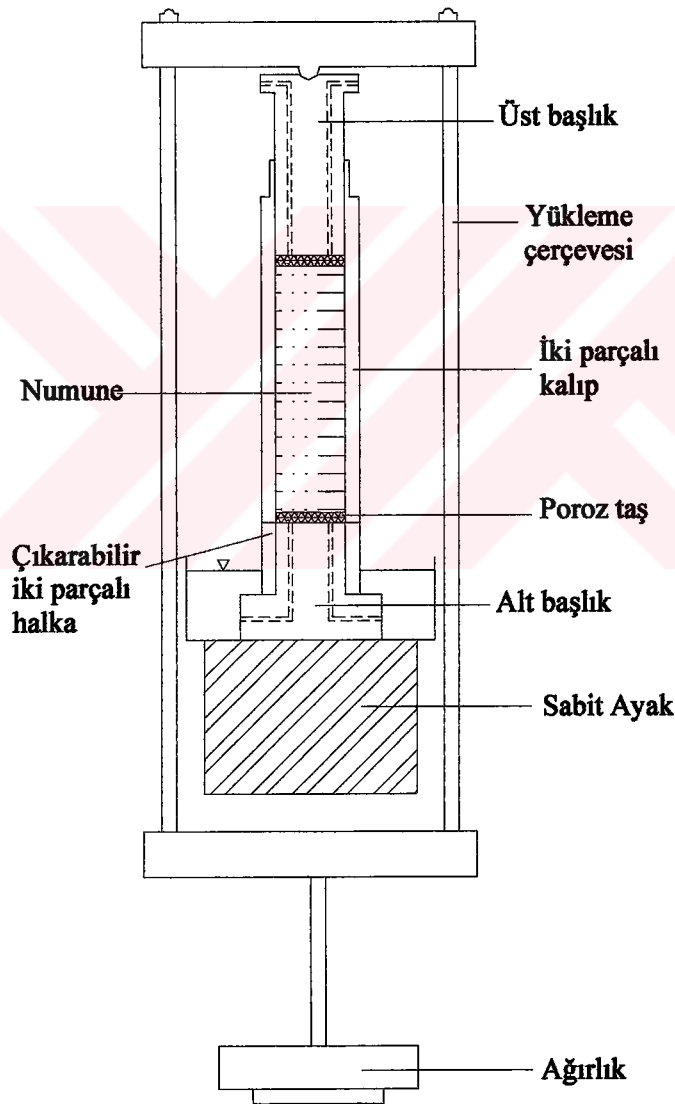
tasarlanmıştır. İkinci yöntemde ise, zemin çamurunun numune ile aynı çapta iki parçalı bir kalıpta konsolide edilmesi, deney numunesinin bu kalıptan çıkan zemin silindirin altından ve üstünden kesilmesi ile elde edilmesi düşünülmüştür. Bu amaçla laboratuarda mevcut Rowe hücresi kullanılmak istenmiş, ancak Rowe hücresinin yüksekliğinin yeterli olmadığı gözlenmiştir. Bunun üzerine özel alüminyum malzemeden iç çapı 38 mm, uzunluğu 200 mm olan iki parçalı, ayrılabilir bir silindir, alt ve üst başlıklardan oluşan bir kalıp yaptırılmıştır. Bu kalıpta numune basit bir yükleme askısı ile eksenel yüklenmektedir. Alt başlıktaki sonradan çıkarılabilir parçalar sayesinde sıkışma iki yönlü olmaktadır. Bu düzenin bir şeması Şekil 2.3'de verilmiştir. Ancak numune hazırlama aşamasında bu iki parçalı kalıbın pratik olmadığı, 38 mm çaplı numunelerin kolayca örselendiği görülmüş ve 50 mm numuneler üstünde deney yapmak gerekliliğine karar verilmiştir.

Bunun üzerine, numuneler 51 mm iç çaplı 200 mm yüksekliğinde bir pleksiglas boru, bir yükleme başlığı, basit bir yükleme çerçevesi ile kesme kutusu deney düzenin masası kullanılarak elde edilmiştir. Malzeme olarak pleksiglas silikon gresi ile birlikte kullanıldığında sürtünme etkisinin daha az olması ve şeffaf, dayanıklı olması nedeniyle tercih edilmiştir. Sonuç olarak bütün üç eksenli deney numuneleri aşağıda anlatıldığı şekilde hazırlanmıştır.

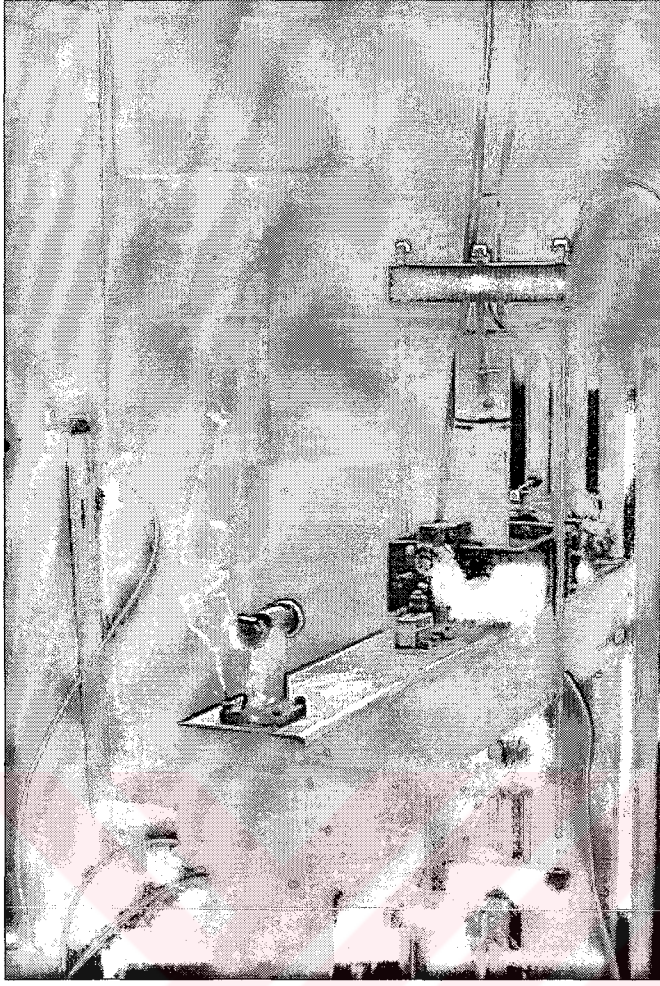
Numune hazırlanmasından bir gün önce, ağzı kapalı plastik torbada saklanan toz halindeki Speswhite Kaolini'nden bir miktar alınıp 105° etüvde kurutulmuştur. Ertesi gün bu toz halindeki kuru kaolinden belirlenmiş miktarda alınıp tartılmış, 150% su muhtevasında damıtık su dikkatle tartılıp eklenerek 20 dakika bir mutfak mikseri ile karıştırılmıştır (bütün numuneler aynı miktarda kil ve aynı miktarda su kullanılarak hazırlanmıştır). Havası alınmış su (*deaired water*) laboratuarda üretilemediğinden gerekli su kaynatılıp kapalı bir kaptaki bekletildikten sonra kullanılmıştır. Damıtık su kullanılmasının sebebi şebeke suyun aşırı kireçli olduğunun gözlenmiş olmasıdır.

Yukarıda bahsedilen ve Şekil 2.4'te görülen 51 mm çaplı yaklaşık 200 mm yüksekliğindeki içi silikon gresi ile sıvanmış pleksiglas tüp, üzerine zeminle tıkanmaması için nemlendirilmiş filtre kağıdı koyulmuş geniş bir poroz taş üzerine oturtulmuş halde kesme kutusunun içine yerleştirilmiştir. Bu esnada kesme kutusu poroz taşın üst yüzeyine kadar su ile doludur. Hazırlanan zemin çamuru bu tüpün içine bir huni yardımı ile hava kalmamasına özen gösterilerek dikkatle

yerleştirilmiştir. Tüp zeminle dolduğunda nemlendirilmiş filtre kağıdı ile birlikte 50 mm çaplı üst poroz taş yerleştirilmiş, üzerine iki drenaj deliği olan üst başlık oturtulmuştur (poroz taşlar her numune hazırlama öncesi en az 10 dakika damıtık su ile kaynatılmıştır). Bundan sonra yükü uygulamak için düşünülmüş basit bir askı ve bu askıya vidalanmış piston üst başlığın üzerine yerleştirilmiştir. Zemin çamuru bu şekilde askıya gerekli ağırlıkların kademeli olarak yüklenmesi ile konsolide edilmiştir (piston ile üst başlık arasında yerleştirilen bir küre mafsallı görevi görmektedir). Bu sistemde askı ağırlığını dengeleyen bir düzen düşünülmüştür (askının kendi ağırlığı da zemine yük olarak etmektedir).



Şekil 2.3 İki parçalı kalıp ve yükleme askısından oluşan numune hazırlama düzeninin şeması



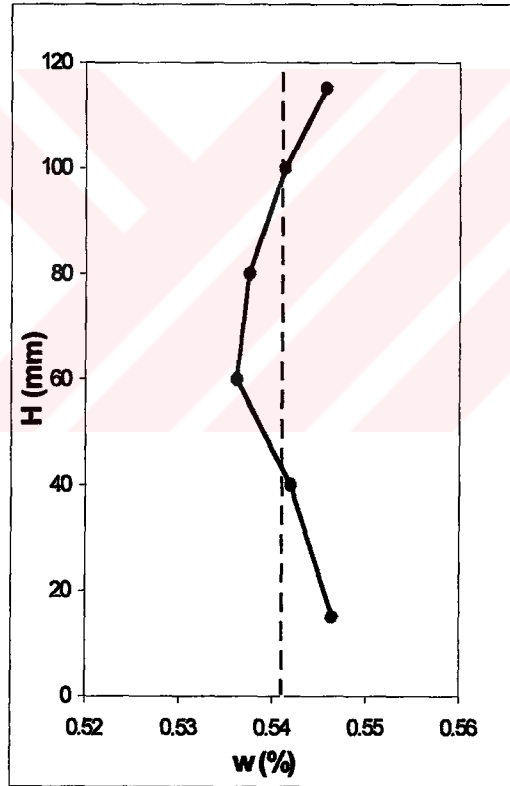
Şekil 2.4 Çalışmada kullanılan numune hazırlama düzeni

Yükleme kademeleri aşağıdaki gibidir. Her kademede yaklaşık 24 saat beklenilmiştir.

Kademe 1 (askı+1.350g)	= 6 kg	yaklaşık 29 kPa
Kademe 2 (12 kg ek)	=18 kg	yaklaşık 88 kPa
Kademe 3 (12 kg ek)	=30 kg	yaklaşık 147 kPa

Bu sürenin sonunda, ilave boşluk suyu basıncının tamamen sönmüldüğü sürtünmelerden dolayı yük kayıpları olmadığı kabul edilirse numunedeki düşey efektif gerilme 147 kPa, ortalama efektif gerilme 118 kPa' dır ($K_0=0.7$ alınmıştır. Al-Tabbaa (1987) normal konsolide Speswhite Kaolin'i için sükunetteki toprak basıncı katsayısının 0.69 olduğunu belirlemiştir). Yüklem aşamaları süresince tüpün alt tarafı ve üst başlık su altındadır. Böylece numunenin kurumasını engellenmiş, suya doygun kalmasını sağlanmıştır.

Yükleme tamamlandığında zemin numunesi mümkün olduğu kadar kısa sürede, tüpten (itilerek) çıkarılıp bir kıl testere ile yüksekliği çapının iki katı (103 mm) olacak şekilde alt ve üstünden kesilip düzlenerek deneye hazır hale getirilmiştir. Bu aşamada numunenin alt ve üst yüzeylerinin paralelliğın sağlanmasına dikkat edilmiştir. Kesilen parçalar su muhtevasının belirlenmesinde kullanılmıştır. Tüpten çıkan zemin silindirleri 51 mm çapında, 116 ± 3 mm yüksekliğinde ve ortalama $55 \pm 1\%$ su muhtevasıdır. Şekil 2.5'te tüpten çıkan tipik bir zemin silindirinin su muhtevası dağılımı verilmiştir. Bundan sonra üç eksenli deney için hazır olan numune tartılarak boyutları ve ağırlığı not edilmiştir. Bütün bunlar yapılırken numunenin örselenmesini en aza indirmek için mümkün olduğu kadar dikkatli davranılmıştır. Tablo 2.3'te yukarıda anlatıldığı şekilde hazırlanmış üç eksenli deney numunelerinin başlangıç koşulları özetlenmiştir.



Şekil 2.5 Zemin çamurundan konsolide edilerek hazırlanan tipik bir numunenin su muhtevası dağılımı

Tablo 2.3 Üç eksenli deney numunelerinin başlangıç koşulları

Numune No	Su muhtevası w_o (%)	Yükseklik H_o (mm)	Çap D (mm)	Ağırlık m_o (gr)	Birim hacim ağırlık γ_o (kN/m ³)
N1	56	103	51	343.3	16.00
N2	55	103	51	364.0	16.97
N4	56	100	51	359.8	17.27
N5	56	103	51	352.8	16.44
N6	55	103	51	364.3	16.98
N11	54	101	51	364.3	17.32
N13	55	103	51	362.3	16.89
N14	55	103	51	366.1	17.06
N17	55	103	51	366.1	17.06
N18	55	103	51	365.1	17.02
N19	54	103	51	366.9	17.10
N20	55	103	51	364.5	16.99
N21	55	103	51	365.5	17.04
N22	55	100	50	334.5	16.71
N23	55	100	50	331.3	16.55
N25	55	100	50	333.1	16.64
N26	55	103	51	359.7	16.76
N27	55	100	50	333.8	16.67
N28	55	103	51	365.5	17.04
N29	55	100	50	334.0	16.68
N30	55	100	50	331.8	16.57
N31	54	100	50	335.6	16.76
N32	56	103	51	364.9	17.01

2.2.3 Üç eksenli deneyin kurulması

Drenaj kanallarının ve sistemin basınçlı su ile hava kabarcıklarından arındırılması, olası kaçakların kontrol edilmesi her deney öncesi yapılan rutin kontrollerdir. Bu ayrıntılardan bölüm 2.4'te kısaca bahsedilecektir. Bölüm 2.2.2'de anlatıldığı şekilde hazırlanmış deney numunesi mümkün olduğu kadar kısa sürede üç eksenli deney aletine yerleştirilmiştir.

Numune yerleştirilmeden hemen önce bütün drenaj kanalları yeteri kadar basınçlı su geçirilerek hava kabarcıklarından arındırılmıştır. Daha sonra, bir poroz taş nemlendirilmiş bir filtre kağıdı diski ile birlikte alt başlık üzerine arada hava kalmamasına özen gösterilerek yerleştirilmiştir. Numune, bu filtre kağıdı diski üzerine oturtulmuş, üzerine yine nemlendirilmiş bir filtre kağıdı ile birlikte poroz taş ve üst başlık yerleştirilmiştir. Poroz taşlar her deney öncesi on dakika kaynatılmış ve deney anına kadar su altında bekletilmiştir. Nemlendirilmiş filtre kağıdından 1 cm genişlikli yan drenler 1:1.4 eğimde spiral olarak numuneyi deforme etmeden ama arada hava kalmaması için de parmaklarla hafifçe bastırarak numunenin etrafına sarılmıştır. Bu şekilde yerleştirilen yan drenler üst ve alt poroz taş ile temas halindedir. Bundan sonra kaçaklar için önceden test edilmiş bir lateks kılıf numune etrafına bir kılıf gerdirici yardımıyla geçirilmiş, alttan ve üstten O-ringlerle başlıklara sabitlenmiştir. Bu işlemler yapılırken kılıf, numune, poroz taşlar ve başlıklar arasında hava kalmamasına dikkat edilmiştir. Önceleri olası sızıntılara karşı alt ve üst başlık yanları ile kılıf arasına çok hafif silikon gresi sürülmesi, aralarına silikon gresi sürülmüş çift kılıf kullanılması gibi bir takım önlemler düşünülmüş ise de yapılan gözlemler bu önlemlere gerek olmadığı yolunda olduğundan bunların başka sakıncalar yaratabileceği düşünülerek vazgeçilmiştir.

Bundan sonra pleksiglas hücre gövdesi hücre içinde kalacak üst başlık drenaj kanalının doğru yerleştirilmesine dikkat edilerek numunenin üzerine geçirilmiş ve sabitlenmiştir. Yük hücresinin üst başlık merkezine rahat yerleşimi numunenin doğru hizalandığını göstermektedir. Bundan sonra hücre türbülans oluşmayacak bir hızda su ile doldurulmuştur. Bir miktar su hücre tavanındaki hava tahliye deliğinden akıtıldıktan sonra hücreye su alınan vana kapatılmıştır. Bu durumda numune deneye hazır hale gelmiştir. Hücre tamamen su ile dolu ve hücre tavanındaki hava tahliye deliği açık (hücre içindeki su basıncı atmosfer basıncına eşit) iken basınç ölçer okumaları sıfırlanmış ve bu andan itibaren konsolidasyon aşamasının sonuna kadar basınç ölçerlerden gelen veriler ADU ile 60 saniyede bir toplanıp bilgisayarda kaydedilmiştir (sistemde her zaman damıtık su kullanılmıştır).

2.2.4 Test yöntemi

Test üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir:

- a) Numunenin suya doygun hale getirilmesi
- b) Numunenin istenilen çevre basıncında izotropik olarak konsolide edilmesi
- c) Numunenin deformasyon kontrollü drenajsız kesilmesi

Tipik bir numune üç eksenli alete yerleştirildikten, hücre su ile doldurulduktan sonra ters basınç 290 kPa ve hücre basıncı saati 300 kPa' a getirilmiştir. Bu anda hücrenin bütün vanaları kapalıdır. Hücre basınç ölçerinin blok üzerindeki tahliye vidası açılarak bir miktar su akmasına izin verilmiş, basınç ölçer bu şekilde hava kabarcıklarından arındırıldıktan vida sıkıca kapatıldıktan sonra hem hücre hem de ters basınç vanaları (alt ve üst drenajlar) açılmıştır. Bir süre bekledikten sonra boşluk suyu basınç ölçerinden de benzer şekilde su geçirilerek ölçüm cihazında hava kalmaması sağlanmıştır.

Yukarıda anlatıldığı şekilde boşluk suyu basınç ölçerinin havası alındıktan, yine bir süre bekleyip boşluk suyu basıncı ile ters basıncın eşitlendiği görüldükten sonra ters basınç vanaları tekrar kapatılmış, hücre basıncı ters basınç regülatörü üzerinden 330 kPa'a arttırılmıştır. Bu andan itibaren boşluk suyu basınç ölçerinin okumaları takip edilmiştir. Yaklaşık on dakika sonra okunan boşluk suyu basıncı not edilmiştir. Bundan sonra ters basınç vanaları açılarak okunan değer not edilmiştir. Bu iki değer birbirine oranı başlangıç $B (= \Delta u / \Delta \sigma)$ değerini vermektedir (kullanılan düzende hücre basıncı bağımsız olarak arttırılabileceği gibi ters basınçtaki artışa eşit olarak da arttırılabilmektedir). Numunelerin büyük çoğunluğunda başlangıç B değeri 0.8 civarındadır. Black ve Lee (1973) çok yumuşaktan çok sert kadar değişen sertlikteki zeminler için farklı doygunluk derecelerine karşı gelen teorik B değerlerini göstermişlerdir. Onların çalışmasına göre Speswhite Kaolini'ne benzer özellikteki killer için 0.8 B değeri 97% doygunluk derecesine karşı gelmektedir.

Başlangıç doygunluk derecesi belirlendikten sonra ters basınç 10 kPa daha arttırılarak numune 300 kPa ters basınç, 330 kPa hücre basıncı altında bir gün bekletilmiştir. Bu bekleme süresince üst başlığa bağlı ters basınç yan hücresi, alt başlığa bağlı yan hücreden yaklaşık 50 cm aşağı bir seviyeye yerleştirilerek

numunenin içinden alttan üste doğru su geçmesi sağlanmıştır. Bu düzenin numunenin daha çabuk suya doygun hale gelmesinde etkili olduğu gözlenmiştir.

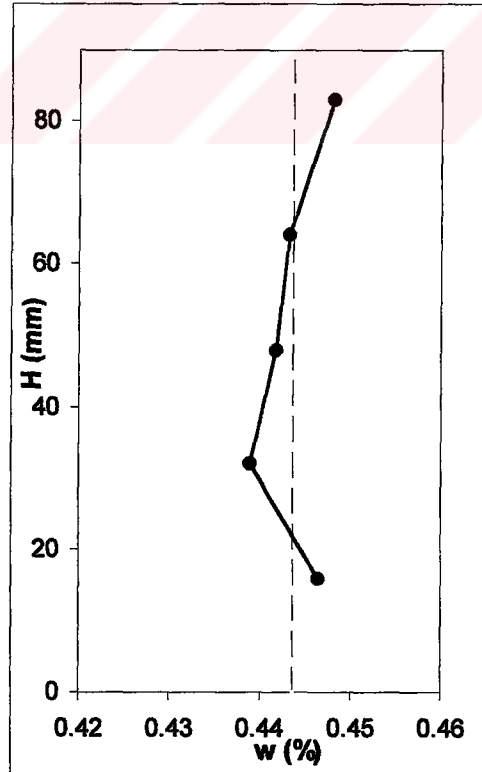
Yaklaşık 24 saat sonra B testi aynı şekilde 30 kN/m² lik basınç artışı ile tekrar edilmiş istenilen doygunluk sağlandığı takdirde konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Numunelerin büyük çoğunluğunda bu aşamada B değeri 1 yani suya doygunluk 100% olmuştur. Bazı istisna durumlarda da ters basınç 400 kPa kadar arttırılıp bir süre daha beklenerek istenilen doygunluk sağlanmıştır.

Suya doygunluk sağlandıktan sonra numune hücre basıncı iki veya üç kademedede arttırılarak kesme deneyinin yapılacağı çevre basıncına konsolide edilmiştir. Deneyler 150, 200, 250, 300, 350 ve 400 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta her kademedede 24 saat beklenmesi planlamışsa da daha sonra malzemenin özelliklerinden dolayı numunedeki ilave boşluk suyu basıncının bu süreden çok daha kısa sürede dağıldığı gözlemlendiğinden kademeler arasında yaklaşık 4 saat beklemenin pratik olduğu sonucuna varılmıştır. Bu şekilde tipik bir numunenin istenilen çevre basıncına konsolide olması bir gün sürmüştür. Son konsolidasyon kademesi uygulandıktan yaklaşık 18 saat sonra B testi bir kez daha tekrarlanmış ve numunenin kesmeye hazır olduğuna karar verilmiştir (her B testinden önce boşluk suyu basınç ölçerinin havasının alınması işlemi tekrar edilmiştir). Numunelerin hepsi B=1 (100% suya doygun) koşullarda kesme deneyine tabii tutulmuştur. Konsolidasyon süresinin numunenin davranışına etkisi bilindiğinden her deneyde yukarıda anlatılan düzene uyulmasına özellikle dikkat edilmiştir (Bjerrum ve Lo, 1963).

Kesme deneyine başlamadan en az üç saat önce drenajlar kapatılmış boşluk suyu basınç ölçerinde bir değişim olup olmadığı gözlenmiştir. Böylece sistemde bir kaçak olup olmadığı kontrol edilmiştir. N14 ve N13 nolu deneylerde vanalar kapatıldıktan ilk yarım saat içinde boşluk suyu basıncında çok küçük azalmalar kaydedilmiştir. Ancak bu azalma sonraki birkaç saat boyunca sabit kaldığından bu durumun kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmış ve kesme deneyinin başlatılmasında bir sakınca görülmemiştir. Bahsedilen bu azalmaların mevcut çevre basınçlarına oranı 0.03-0.04 takip eden kesme deneylerinde ölçülen maksimum boşluk suyu basınçlarına oranı ise 0.05-0.06 civarındadır.

Kesme deneylerinin büyük çoğunluğunda numuneler 0.017 mm/dakika sabit deformasyon hızı ile yüklenmiştir. Bu hız 103 mm boyundaki numune için saatte yüzde bir deformasyona (1%/saat) karşı gelmektedir. Numunelerin çoğu yaklaşık 20% deformasyona kadar yüklenmiştir. Bu şekilde tipik bir deney 20 saat kadar sürmüştür. Okumalar 12 saniyede bir kaydedilmiştir. Böylece bir deneyde yaklaşık 6000 okuma alınmış olmaktadır.

Bu şekilde bir deneyin tamamlanması yaklaşık bir hafta sürmüştür. Kesme deneyi tamamlanınca yükleme durdurulmuş, hücre basıncı sıfıra indirildikten sonra numune mümkün olduğu kadar kısa sürede üç eksenli aletten çıkarılıp tartılmış, boyutları ölçülerek göçme şekli çizilmiştir. Deneylerin hepsinde numunelerin orta kısmından kalınlaşarak fiçı şeklinde, belirgin bir kayma yüzeyi oluşmaksızın göçtüğü gözlenmiştir. Numune bir kıl testere ile düşey yönde altı parçaya ayrılmış, su muhtevası dağılımı belirlenmiştir. Numunelerin bu şekilde elde edilen deney sonu su muhtevası dağılımları ortalama su muhtevası değerinden $\pm 1\%$ değişmektedir. Şekil 2.6' da tipik bir numunenin deney sonu su muhtevası dağılımı gösterilmiştir. Hesapların anlatıldığı bölümde de bahsedileceği gibi numunenin orta 2/3'üne karşı gelen parçaların ortalaması numunenin son su muhtevası olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.6 Tipik bir numunenin kesme deneyi sonundaki su muhtevası dağılımı

2.3 Ödometre

Ödometre deneyleri laboratuarda mevcut 5 ayrı ödometre aletinde gerçekleştirilmiştir. Aletlerin hepsi sabit halka tipli ödometrelerdir.

Toplam 5 adet ödometre deneyi yapılmıştır. Numunelerden ikisi 50×19 mm, ikisi 70×19 mm, biri 75×20mm boyutlu ödometre halkaları ile test edilmişlerdir. Numuneler, 150% su muhtevastaki zemin çamurunun 254 mm çaplı Rowe hücresinde 150 kPa gerilmeye kadar kademeli olarak tek yönlü konsolide edilmesiyle elde edilmiş zemin pastasından traşlanarak hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanmış ödometre numuneleri ortalama $57 \pm 1\%$ su muhtevastadır. Tablo 2.4 te numunelerle ilgili ayrıntılar verilmiştir.

Tablo 2.4 Ödometre numunelerinin başlangıç koşulları

Numune No	Su muhtevası w_o (%)	Yükseklik H_o (mm)	Çap D (mm)	Birim hacim ağırlık γ_o (kN/m ³)
OD3	0.56	19	70	16.2
OD6	0.58	20	50	15.3
OD7	0.58	19	50	17.1
OD8	0.57	19	70	16.1
OD9	0.57	19	70	16.0

Hazırlanan numuneler tartılıp ödometre aletine yerleştirilmiş, deformasyon saati sıfırlanıp ilk yük uygulanmıştır. Yük altında numunenin sıkışması 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30' 1saat 2 saat.... aralıklarla okunup not edilmiştir. Yük kademeleri 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00 ve 8.00 olarak uygulanmıştır. Boşaltma yine aynı kademelerle yapılmıştır. Yükleme ve boşaltma kademelerinin herbirinde 24 saat beklenmiştir. Son yük kademesi boşaltıldıktan sonra numune ödometre hücresinden halka ile birlikte çıkarılıp tartılmış ve su muhtevası belirlenmiştir. Bu şekilde bir deney yaklaşık iki hafta sürmüştür.

2.4 Bazı Deney Ayrıntıları Üzerine Notlar

Bu bölümde üç eksenli deney yöntemi ile ilgili önemli olduğu düşünülen bazı ayrıntılardan bahsedilmektedir.

2.4.1 Numune hazırlama yöntemi üzerine

Bu tezin amaçları doğrultusunda numune hazırlama aşamasında gözetilecek en önemli husus birbirine benzer homojen numuneler elde etmek olmalıdır. Aksi takdirde deney sonuçlarının anlamlı bir değerlendirmesini yapmak mümkün olmayacaktır. Uygulanan numune hazırlama yönteminden Bölüm 2.2.2'de ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Zemin çamurunun su muhtevası homojen bir karışım elde edilecek şekilde 150% (likit limitin yaklaşık 2.3 katı) olarak seçilmiş (daha yüksek su muhtevalarında numune hazırlama düzeninin pratik olmaması, daha düşük su muhtevalarında ise numuneyi iyi karıştırılamama ve yerleştirirken hava kalmasının önlenememesi problemleri gözlenmiştir), bütün deneylerde zemin çamuru hep aynı sürede aynı yöntem ile karıştırılmıştır. Bu şekilde kolay ve hızlı bir şekilde birbirine benzer numune hazırlamak mümkün olmuştur.

Ancak anizotropik gerilme geçmişisi olan bu numunelerin üç eksenli deneyde izotropik konsolidasyonlu basınç deneyine tabii tutulması bir sakınca olarak görülmektedir. Numune hazırlama aşamasında numunenin maruz kaldığı en büyük düşey efektif gerilmenin 147 kPa, ortalama efektif gerilmenin ise 118 kPa olduğu Bölüm 2.2.2'de belirtilmişti. Bir numunenin, gerilme geçmişini unutulabilmesi için maruz kaldığı en büyük gerilmenin en az 2 veya 3 katına konsolide edilmesi gerektiği bildirilmektedir (Burland, 1990, Lacasse ve Berre, 1988, Ladd, 1985). Bu çalışmada kullanılan numuneler için bu eşik 236-354 kPa değerlerine karşı gelmektedir. Ancak laboratuarda mevcut sistem maksimum 800 kPa basınca izin vermektedir. Numuneleri suya doymun hale getirmek için 300-350 kPa ters basınç kullanıldığı göz önüne alınırsa (daha düşük ters basınçlar kullanıldığında numune pratik süreler içerisinde suya doymun hale getirilememiştir) uygulanabilecek çevre basıncı aralığı daralmaktadır. Oysa Kritik Durum Eğrisi'nin deviatör gerilme-ortalama efektif gerilme ile spesifik hacim-ortalama efektif gerilme düzlemlerindeki izdüşümleri olan doğruları sağlıklı olarak elde edebilmek için mümkün olduğu kadar geniş bir aralıkta değişen çevre basınçlarında deney yapmak gerekmektedir.

Sonuç olarak numuneler 150, 200, 250, 300, 350 ve 400 kPa çevre basınçlarında kesilmişlerdir. Burada uygulanan en küçük konsolidasyon basıncı 150 kPa'dır ve numunenin geçmişte maruz kaldığı en büyük gerilmenin yaklaşık 1.3 katına karşı gelmektedir. Elbette bu hesapta kullanılan geçmişteki maksimum efektif gerilme

değeri zemin çamurunun konsolidasyonu aşamasında sürtünme kayıpları olmadığı varsayımına dayanarak elde edilmiştir.

Gerçekte -her ne kadar pleksiglas tüpün iç yüzeyi oldukça pürüzsüz ve sürtünmelerin azaltılması için silikon gresi ile sıvanmış ise de- zemin çamuru konsolide olurken çeperlerde sürtünmeler oluşacaktır. Bu koşullarda zemin kesitinde çevreden merkeze doğru gidildikçe yapısal özellikler değişecektir. Benzer şekilde düşey yönde de farklılıklar olabilir. Bu etkiye zemin silindirin itilerek pleksiglas tüpten çıkarılması da eklenmektedir.

Rowe hücresinde hazırlanan ödometre numuneleri ise 254 mm çaplı bir zemin pastasının sürtünme etkilerinden uzak orta kısmından traşlanarak elde edildiğinden üç eksenli deney numunelerine göre daha homojen olduğu düşünülebilir. Ancak bu yöntemde de traşlama aşamasında numunenin örselenmesi önlenememektedir. Örselenmenin derecesinin belirsizliği ise benzer numuneler hazırlanması amacı ile çelişmektedir.

Numune hazırlama yöntemi üzerine söylenecek bir başka husus ise karıştırma suyunun havası alınmış su olmasının ve karıştırma, yerleştirme işlemlerinin vakum altında yapılmasının zemin çamuru içinde hava kalmaması için gerekliliğidir. Böylece başlangıç doygunluk derecesi çok daha yüksek numuneler elde etmek dolayısıyla 100% doygunluğa daha çabuk sürede daha düşük ters basınçlarla ulaşmak mümkün olacaktır. Ancak laboratuarda bu şekilde bir hazırlama yöntemi uygulama imkanı olmamıştır.

2.4.2 Suya doygunluk ve B değerinin belirlenmesi

Numunelerin suya doygunluğu konsolidasyon öncesi ve sonrasında B testi ile belirlenmiştir. Bu testler hücre basıncı drenajlar kapalı iken 30 kN/m² arttırılarak yapılmıştır. Hücre basıncındaki bu artıştan dolayı boşluk suyu basıncında oluşacak artış numunenin suya doygunluk derecesine bağlı olacaktır. 100% suya doygunluk derecesine karşı gelen $B (= \Delta u / \Delta \sigma)$ değeri 1 dir. Numunelerin hepsinde kesme deneyine başlamadan önce yapılan son B testi 1 değerini vermiştir.

Bir standart oluşması açısından bütün B testlerinde hücre basıncı hep 30 kN/m² arttırılmış ve B değeri drenajlar kapatıldıktan 10 dakika sonra ölçülen boşluk suyu

basıncındaki değişim esas alınarak hesaplanmıştır. B testlerinin hepsinde boşluk suyu basıncındaki toplam değişimin 95%'i yarım dakikadan daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

2.4.3 Deney hızı

Deney hızı numunenin boşluk suyu basıncının doğru olarak ölçülebilmesi açısından önemlidir. Bishop ve Henkel (1962) deney hızının numune içersinde boşluk suyu basıncı dağılımında 95% eşitlik sağlanması kriterinden yola çıkarak uygun deney hızlarını veren bir yöntem önermektedir.

Uygun deney hızı seçimi için Bishop ve Henkel (1962)'in verdiği hesap yöntemini Head (1992) drenajsız deneyler için şu şekilde özetlemiştir ;

Göçmeye kadar geçen süre;

$$\text{Filtre yan dren kullanılmışsa,} \quad t_f = 0.53 \times t_{100} \text{ dak} \quad (2.1)$$

$$\text{Filtre yan dren kullanılmamışsa,} \quad t_f = 1.8 \times t_{100} \text{ dak} \quad (2.2)$$

ifadelerinden hesaplanacaktır. Burada t_{100} (dak), birincil konsolidasyonun tamamlanması için geçen süredir ve üç eksenli deneyin konsolidasyon verilerinden karekök zaman metodu ile elde edilecektir. Hesaplanan t_f (dak) zamanı 120 dakikadan az ise hesaplarda $t_f = 120$ dak kullanılacaktır.

İzin verilen en yüksek deformasyon hızı,

$$\frac{\varepsilon_f H}{100 t_f} \text{ mm/dak} \quad (2.3)$$

ifadesinden hesaplanacaktır. Burada $\varepsilon_f (= \varepsilon_f \% / 100)$ kırılma anındaki birim şekil değiştirme, H (mm) numune yüksekliğidir. Germaine ve Ladd(1988) izotropik konsolidasyonlu drenajsız basınç deneyine tabii normal konsolide killer için tipik kırılma birim şekil değiştirmelerinin 20%-25% aralığında olduğunu bildirmektedir.

Deney hızının gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerinde etkili olduğu artık bilinen bir gerçektir. Killer üzerinde yapılan drenajsız deneylerin hepsinde deney hızı

artıkça numunenin mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Drenajsız deneylerde deney hızının her on kat artışına karşılık numune mukavemetinin 5% ile 10% arasında arttığı Richardson ve Whitman (1963)' dan beri pek çok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır (Berre ve Bjerrum, 1973, Ladd ve diğ. 1977, Tavenas ve Leroueil, 1977, Saada ve Townsend, 1981, Wroth and Houlsby 1985).

Ladd (1985) deformasyon hızı azaldıkça numunenin direncinin artmasının boşluk suyu basıncındaki artıştan kaynaklandığını bildirmekte ve düşük hızlı deneylerde boşluk suyu basıncındaki bu artışın en önemli iki sebebini basınç dağılımının eşitlenmesi ve numunede oluşan yapısal değişiklikler olarak göstermektedir.

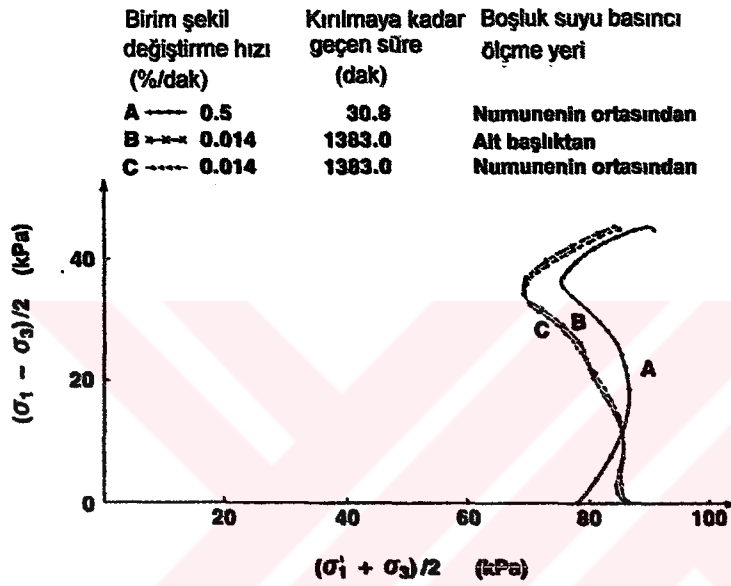
Ladd (1985) genel olarak deformasyon hızı ile numunenin drenajsız mukavemetinin değişimi ilişkisinin $\chi = \Delta c_u / \Delta \log \dot{\epsilon}$ ifadesiyle tanımlandığını, normal konsolide killeri için izotropik konsolidasyonlu drenajsız basınç deneylerinde bu ilişkinin $\chi = 0.01 \pm 0.005$ olarak ifade edilebileceğini bildirmektedir. Ayrıca, ABD, Norveç ve Kanada da bir çok ticari ve araştırma laboratuvarlarında 0.5-1%/saat deformasyon hızının drenajsız konsolidasyonlu deneyler için bir standart sayıldığını belirtmektedir.

Bu çalışmada kullanılan Speswhite Kaolini'nin izotropik konsolidasyonda t_{100} zamanı Richardson (1988) tarafından 37.2 dakika olarak elde edilmiştir. Kırılma anındaki birim deformasyon 20% olarak alınırsa (2.3)'ten, 103 mm numune yüksekliği için izin verilen en büyük hız 0.017 mm/dak olarak elde edilmektedir. Bu 1%/saat deformasyon hızına karşı gelmektedir. Deneylerde bu hız kullanılmıştır.

Germaine ve Ladd (1988) deney hızı seçiminde göz önüne alınacak en önemli kriterin belirlenen drenaj şartları altında numunedeki boşluk suyu basıncının numune yüksekliği boyunca eşitlenmesi için yeterli zamanın bulunması olduğunu bildirmektedir. Drenajsız deneylerde numunenin boşluk suyu basıncı dağılımındaki eşitsizlik alt ve üst başlıklardaki sürtünmelerden kaynaklanmaktadır.

Şekil 2.7 de Hight (1982)'a ait bir çalışmanın sonucu görülmektedir. Burada farklı deney hızlarının ölçülen boşluk suyu basıncına etkisi suya doymuş kil ($c_v=1-2 \text{ m}^2/\text{yıl}$) numuneler üzerinde incelenmiştir. Şekil 2.7 den görüldüğü üzere 0.014 mm/dak hızla birinde yalnız alt başlıktan diğerinde numunenin ortasından ölçülen boşluk

suyu basıncı yapılan iki testin gerilme izleri üst üste düşmektedir. Speswhite Kaolini'nin bu çalışmada yapılan ödometre deneylerinden elde edilen (100-400 kPa aralığında) ortalama konsolidasyon katsayısı, $c_v=0.4 \text{ mm}^2/\text{sn}$ 'dir. Al-Tabbaa (1987), (200-800 kPa aralığında) $c_v=0.35 \text{ mm}^2/\text{sn}$ değerini elde etmiştir. Speswhite Kaolini'nin Hight (1982)'ın incelediği kilden çok daha hızlı konsolide olduğu (katsayıların oranı >10) göz önüne alınırsa bu çalışmada seçilen deney hızının yeterince yavaş olduğu söylenebilir.



Şekil 2.7 Drenajsız deneylerde deney hızı ve farklı boşluk suyu basınç ölçme yerlerinin gerilme izine etkisi (Hight, 1982)

2.4.4 Alt ve üst başlıklardaki sürtünme etkileri

Standart üç eksenli deney sisteminde alt ve üst başlıklar ile numune arasındaki sürtünmelerden dolayı gerilme ve şekil değiştirmelerin üniform kalamayacağı böylece deney analizi için kullanılan numunenin birim zemin elemanı olduğu varsayımından uzaklaşılacağı uzun süredir bilinen ve kabul edilen bir gerçektir. Başlıklardaki sürtünme kuvvetleri numunenin serbestçe şekil değiştirmesine engel olmakta dolayısıyla numune içersinde birim şekil değiştirmeler üniform olamamaktadır. Roscoe ve Poorooshab (1963) ve Kirkpatrick ve Younger (1970) kumlar, Balasubramaniam (1976) killer üzerinde X-Işını tekniği ile üç eksenli basınç ve çekme deneylerinde birim şekil değiştirmelerin üniform olmadığını

gözlemişlerdir. Rowe ve Barden (1964) sürtünmesi azaltılmış bir uç düzeni (*lubricated ends*) önermiş ve bu düzenin deney sonuçlarına etkileri pek çok araştırmacı tarafından hem killer hem de kumlar üzerinde ayrıntılı olarak incelenmiş ve tartışılmıştır (Lee ve Seed, 1965, Bishop ve Green, 1965, Barden ve McDermot, 1965, Duncan ve Dunlop, 1968, Roy ve Lo, 1971, Lee, 1978).

Bishop ve Green (1965) killer, Barden ve McDermot (1965) kumlar üzerinde yaptıkları araştırmalarda sürtünmesi azaltılmış uç koşullarının numune içerisindeki düşey ve radyal boşluk suyu dağılımını iyileştirdiğini ancak yüksekliği çapının 2 katı olan ve yeterli hızda test edilen numuneler için efektif gerilme parametrelerinin değişmediği sonucunu elde etmişlerdir. Duncan ve Dunlop (1968) örselenmemiş killer üzerinde yaptıkları deneylerde aynı sonuca ulaşmış, kumların hacim değişimlerinin ölçüldüğü drenajlı deneyler dışında sürtünmesi azaltılmış uçlar kullanmanın gerek olmadığı sonucuna varmışlardır. Roy ve Lo (1971) kohezyonsuz zeminler üzerinde benzer deneyler yürütmüş ve uç koşullarının gerilme şekil değiştirme davranışını önemli bir şekilde değiştirdiğini gözlemişlerdir. Lee (1978) bu konuda yapılan çalışmaları ayrıntılı bir şekilde gözden geçirmiş ve drenajsız test edilen killer için şu sonuçları çıkarmıştır: numunenin drenajsız mukavemeti sürtünmesi azaltılmış uçlarla biraz daha düşük bulunmaktadır; normalden 50 kez daha hızlı test edilmediği sürece her iki tip uç düzeninde de benzer boşluk suyu ve efektif gerilme parametreleri elde edilmektedir.

Andersen ve diğ. (1980) Drammen kili üzerinde yaptıkları çalışmada sürtünmesi azaltılmış uç düzeni uygulamanın deney sonuçlarına etkisinin fazla olmadığını bildirmişlerdir. Lacasse ve Berre (1988), NGI (*Norway Geotechnical Institute*) 'da yapılan testlerde normal ve hafif aşırı konsolide yumuşak killer için uç sürtünmelerinin etkisinin önemsiz olduğunu gözlemlendiğini ve bu tip killerin her zaman sürtünmeli uçlara test edildiğini bildirmektedirler (Aşırı konsolide sert killer ise her zaman sürtünmesi azaltılmış uçlarla test edilmektedir). Sürtünmesi azaltılmış uç düzeni kullanmanın en önemli sakıncası, uygulama tekniğinin zor oluşu ve numune uçlarındaki bu düzenin sıkışabilirliğinin yanlış deformasyon ölçümlerine sebep olmasıdır (Sarsby ve diğ., 1982, Lacasse ve Berre, 1988).

Bu çalışmada bahsedilen deneylerde başlıklar ile numune arasındaki sürtünmeleri engelleyici bir düzen kullanılmamıştır. Uygulanan deney hızının yeterince yavaş,

test edilen numunelerin normal konsolide olduğu gözönüne alınırsa bu düzenin deney sonuçlarında önemli bir hataya sebep olmadığı sonucuna varılabilir.

2.4.5 Üç eksenli hücrede su ve hava kaçakları

Her deney öncesi üç eksenli deney hücresinin olası su ve hava kaçaklarına karşı kontrol edilmesi gereklidir. Drenajsız deneylerde deney sisteminde oluşabilecek su kaçakları numunenin boşluk suyu basıncının dolayısıyla efektif gerilme parametrelerinin değişmesine neden olmaktadır. Germaine ve Ladd (1988) sistemdeki olası su kaçaklarını iki kısma ayırmaktadır. Birinci tip kaçaklar, hücre içindeki suyun numunenin içine sızmasına neden olmaktadır. Bunlar hücre basıncı altında alt ve üst başlık drenaj kanallarının hücre içindeki bağlantı yerlerinde, lateks kılıfın numune alt ve üst başlığına O-ringlerle sabitlendiği yerlerde veya kılıf yüzeyinde oluşabilmekte ve daima boşluk suyu basıncında artışa sebep olmaktadır. Sızma hızı, radyal efektif gerilmenin değerine, bağlantıların şekline ve durumuna, lateks kılıfın özelliklerine göre değişecektir. Bu tip kaçaklar bağlantı yerlerini O-ringlerle sızdırmaz hale getirmek, hücre sıvısı olarak yağ (*castor-oil*, *silicon oil*) kullanmak, lateks kılıfın yüzeyinde delik olup olmadığını önceden test etmek, alt ve üst başlıkların lateks kılıf ile temas edecek yan yüzlerine çok hafif bir tabaka silikon gresi sürerek sızdırmazlığı sağlamak gibi önlemler ile engellenebilmektedirler. İkinci tip kaçaklar ise hücrenin dışarısındaki bağlantı yerlerinde oluşabilecek kaçaklardır ve her zaman boşluk suyu basıncında azalmaya neden olurlar. Bakır borular, küresel valfler vb. bağlantı düzenleri ile önlenebilirler. Germaine ve Ladd (1988), hücreye numune yerine boşluklu bir taklit numune(*dummy*) yerleştirip boşluk suyu basıncındaki değişimi izlemek yoluyla hücre ve bağlantılarında kaçak olup olmadığının varsa bunun miktarının tespit edilmesinin periyodik olarak yapılması gereken bir kontrol olduğunu belirtmektedir. Bunun dışında her deneyde, kesme testine başlamadan bir kaç saat önce ve kesme testinden hemen sonra drenajları kapatıp boşluk suyu basıncındaki değişimi izlenerek kontrol yapılması gerektiğini bildirmektedir (eğer boşluk suyu basıncındaki değişim sadece ikincil konsolidasyon veya drenajsız sünme nedeniyle oluşuyorsa du/dt hızı zamanla azalmalıdır, Germaine ve Ladd, 1988).

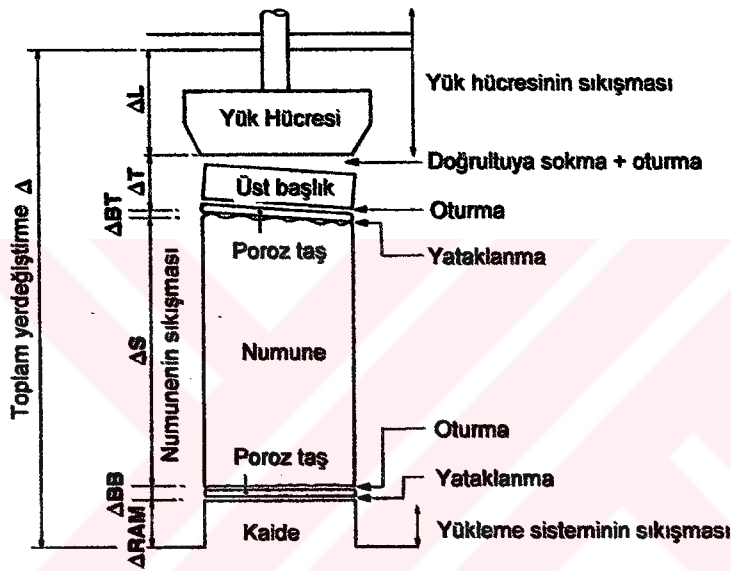
Bu çalışmada anlatılan deneysel çalışma süresince kaçakları tespit için bir taklit numune ile test yapılmamıştır. Ancak her deney öncesi lateks kılıf arızalara karşı

test edilmiş, her kesme deneyinden üç-dört saat önce drenajlar kapatılıp boşluk suyu basıncı değişimi izlenmiştir. Ayrıca, yalnız hücre içindeki ve dışındaki bağlantılar değil tüm sistemdeki bağlantılar (yan hücreler bunların basınç kaynağı ve hücre ile bağlantıları, vb.) her deney öncesinde, sırasında ve sonrasında olası problemlere karşı dikkatle gözlenmiş ve gerekli hallerde önlem alınmıştır. Deneyler sırasında karşılaşılan en büyük problem üst drenaj kanalının numune üst başlığındaki ve hücre içindeki bağlantı yerlerinde oluşmuştur. Bu bağlantı noktaların sızdırmazlığını sağlamak için bağlantı yerlerine çok küçük O-ringler yerleştirilmesi ve bu bağlantıların her deney öncesi dikkatle kontrol edilip çoğu zaman yenilenmesi gerekmiştir.

İkinci bir problem numune içine gaz (hava) sızmasıdır. Numune içine gaz hücre sıvısından (difüzyon yoluyla lateks kılıf yüzeyinden içeri girerek) veya ters basınç drenaj kanallarından girebilmektedir. Pollard ve diğ. (1977) lateks kılıfların hava geçirimsizliğinin hemen hemen su ile eşit olduğunu, hücre içindeki sudan numunenin içine nüfuz edecek gazın (havanın) boşluk suyu basıncında -bir günden daha az bir sürede dahi- ihmal edilemeyecek artışlara sebep olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Deney sisteminde hava-su temas yüzeylerinden kaçınmak gerektiğini veya en azından bu tip yüzeylerin hücreden uzakta (bir yan hücrede) tutulmasının faydalı olacağını, hücre sıvısı olarak havası alınmış su kullanmanın bu etkiyi bir günden fazla geciktirdiğini bildirmektedirler. Bu çalışmada anlatılan deneysel sistemde havası alınmış su kullanma imkanının olmadığından daha önce de bahsedilmişti. Ancak hücre ve ters basınçlar için kullanılan hava torbalı yan hücreler ile sistemde hava su temas yüzeyi tamamen engellenmiştir. Bu hücrelerin içinde geçirimsiz bir balon bulunmaktadır. Basınç kaynağından gelen basınçlı hava bu balonun içine dolmakta, balon şiştikçe tamamen dolu olan yan hücre içindeki suya basınç yapmaktadır (bu hücreler üst başlıklarındaki konik bir hava tahliye deliği sayesinde kolaylıkla hava kabarcıkları kalmaksızın su ile doldurabilmekte, basınçlı su çıkışı ise hücre alt başlığından olmaktadır). Bu şekilde üç yan hücreden biri hücre basıncı, diğer ikisi alt ve üst başlıklardan numuneye ters basınç sağlamakta kullanılmıştır.

2.4.6 Yerleştirme hataları

Deneyler sırasında meydana gelebilecek en önemli hatalardan biri de yük hücresi ile üst başlık, başlıklar ile poroz taşlar, poroz taşlar ve numune arasındaki yerleşim hatalarıdır. Bu hatalar bu elemanların yüzeylerinin düzgün olmamasından, bunları yerleştirirken arada boşluk kalmasından, deney aletlerinin ve/veya numunenin ekseninde olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.8'de Baldi ve diğ.(1988)'den alındığı şekilde, ölçülen yerdeğiştirmelere etkiyen bu tip hataların şematik bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.8 Hücre dışından gerçekleştirilen eksenel yerdeğiştirme ölçümlerinde hata sebepleri (Baldi ve diğ., 1988)

Bu hatalardan kaçınmak için numunenin alt ve üst yüzeyinin pürüzsüz ve paralel olmasına, benzer şekilde başlıkların ve poroz taşların da yüzeylerinin düzgünlüğünün ve paralelliğinin kontrol edilmesine, numune üç eksenli deney aletine yerleştirilirken numunenin, başlığın ve poroz taşların doğru ve ekseninde yerleştiğine dikkat etmek gerekmektedir. Yüklemenin ve bu yükleme altında yapılan ölçümlerin doğru olabilmesi için deney boyunca yük hücresi ile üst başlığın düzgün bir temas içinde olması önemlidir. Bu çalışmada kullanılan yük hücresinin sıkışabilirliğini test etmek için alt ve üst yüzeyleri tam olarak paralel bir çelik silindir poroz taşlar, alt ve üst başlıklar olduğu halde eksenel olarak sıkıştırılmıştır. Bu test sırasında artan yük karşısında yerdeğiştirme sabit kalmıştır. Buradan, kullanılan başlıklar ve poroz taşlar

arasında yerleşim problemi olmadığı sonucuna varılabilir. Numune alt ve üst yüzeyleri paralel olacak şekilde hazırlanır ve düzgün olarak alete yerleştirilirse oturma ve yerleşme hatalarını en aza indirmek mümkün olacaktır. Bütün bunlara dikkat edilmesine rağmen yine de deney eğrilerinin bazılarında bu tür hatalar gözlenmiştir.

2.5 Hesaplamalar

ADU ile toplanıp bilgisayarda kaydedilen veriler eksenel yük (kN), boşluk suyu basıncı (kPa) ve eksenel yerdeğiştirmelerdir (mm). Ölçüm cihazlarının kalibrasyon katsayıları bu mühendislik birimlerini verecek şekilde deney başında bilgisayar aracılığıyla veri toplayıcıya tanımlanmıştır. Ancak bu verilerden gerilme ve şekil değiştirmeler hesaplanırken bir takım düzeltmeler yapmak gerekecektir.

Bu bölümde üç eksenli deney sırasında kaydedilen verilere uygulanan düzeltmeler ve düzeltilmiş bu verilerden gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin hesaplanması anlatılacaktır. Ödometre deney sonuçlarının hesaplanmasından da ayrıca bahsedilecektir.

2.5.1 Düzeltmeler

Standart bir üç eksenli deney verilerine uygulanması gerekebilecek tipik düzeltmeler şunlardır: sistemin sıkışabilirliği için düzeltme, lateks kılıf düzeltmesi, filtre dren düzeltmesi ve alan düzeltmesi.

Sistem sıkışabilirliği için düzeltme,

Üç eksenli deneylerde yerdeğiştirmeler hücre dışından ölçülüyor ise piston veya yük hücresi gibi deney düzenin parçası olan cihazların sıkışabilirliği ölçülen yerdeğiştirmelere etkiyecektir. Bu durumda bu cihazların yerdeğiştirme (*deflection*) kalibrasyonlarının elde edilmesi ve ölçülen yerdeğiştirmelerin buna göre düzeltilmesi gerekmektedir. Çalışma başında yük hücresinin sıkışabilirliğini test etmek için numune yerine aynı boyutlarda çelik bir silindir hazırlanmış, bu silindir üst ve alt başlıklar olduğu halde üç eksenli deney aletine yerleştirilmiş ve yüklenmiştir. Yük 1.5 kN'a kadar üç kez artılıp azaltılmış ancak yük ve yerdeğiştirmeler arasında

-yerdeğiştirme ölçerin ölçüm hasaslığı dahilinde- bir ilişki gözlenmemiştir. Bu nedenle yük hücresinin sıkışabilirliği için bir düzeltme yapılmamıştır.

Lateks kılıf düzeltmesi ;

Numuneyi çevreleyen lateks kılıf numune boşluk suyu ile hücre sıvısı arasında bir sınır oluşturması için gerekmektedir. Ancak kılıf aynı zamanda numunenin serbestçe şekil değiştirmesini engellemektedir. Kılıfın göstereceği bu direnç ölçülen eksenel gerilmeleri arttıracaktır. Henkel ve Gilbert (1952)'in ilk kez formülle ettiği (ASTM D2850'de de tavsiye edilen) daha sonra Bishop ve Henkel(1962) ve Duncan ve Seed (1967)'in geliştirdiği kılıf düzeltmesi kabuk teorisine ve kılıf malzemesinin elastik izotropik olduğu, Poisson oranının 0.5 olduğu, deney süresince numune ve kılıfın birlikte şekil değiştirdiği varsayımlarına dayanmaktadır. Germaine ve Ladd (1988) drenajsız basınç deneylerinde eksenel yüke ve radyal gerilmeye uygulanacak düzeltmeleri yukarıda bahsedilen kaynaklara dayanarak şöyle vermektedir:

$$\Delta F_a = -\pi D_{im} t E \left(\varepsilon_a + \frac{2}{3} \varepsilon_v \right) \quad (2.4)$$

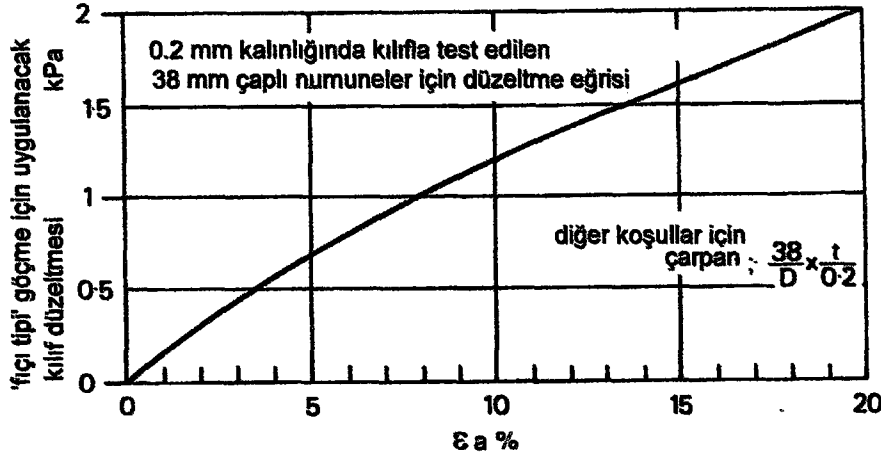
$$\Delta \sigma_r = 2tE \left(\frac{D_i - D_{im}}{D_i D_{im}} \right) - \frac{4tE}{3D_i} \varepsilon_v \quad (2.5)$$

burada t (mm), kılıfın kalınlığı, E (≈ 1400 kPa) lateks malzemenin Young modülü, D_i (mm), numune çapı, D_{im} (mm), kılıfın çapıdır.

Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar Bishop ve Henkel (1962) ile Duncan ve Seed (1967)'in kılıf düzeltmesi için önerdikleri formülün gereğinden yüksek değerlerler verdiğini ortaya koymuştur (Gens, 1982, La Rochelle ve diğ., 1988). Belli bir noktadan sonra kılıfın buruşması sebebiyle numune etrafında bir kabuk olarak düşünülmesinin gerçekçi bir varsayım olmayacağı dolayısıyla hesaplanan düzeltmenin bu noktadan itibaren gerçekçi olmayacağı belirtilmiştir.

Buna rağmen yine de kılıf düzeltmesi Head (1992) tarafından tavsiye edilmekte, fiçı tipi göçme (*barrelling type failure*) için BS 1377:Part 8:1990 standartlarında da yer almakta olan şekil 2.9'da gösterilen düzeltme eğrisi önerilmektedir. Bu eğri 0.2 mm

kalınlığında kılıfla çevrelenmiş 38 mm çaplı numuneler için elde edilmiştir. Head (1992), farklı numune çapı ve farklı kılıf kalınlıklarında eğriden bulunacak düzeltme miktarının $38/D \times t/0.2$ ile çarpılacağını not etmektedir.



Şekil 2.9 38 mm çaplı numuneler için kılıf düzeltmesi eğrisi (Head, 1992)

Bu çalışmanın başında, bir kaç deney için (N14, N18, N26 ve N28) yukarıdaki eğri kullanılarak, ölçülen aksenal yükten çıkarılması gereken kılıf düzeltmeleri hesaplanmış ancak bunun deney sonuçlarına etkisinin az olduğu görülmüştür ($\Delta q/q_{ölçülen} < 1\%$). Ayrıca, yukarıda da bahsedildiği gibi belli bir yerden sonra kılıfın sınırlayıcı etkisi azalmaktadır, kılıfın nereden itibaren buruştuğu doğru olarak belirlenenemediği sürece düzeltme uygulamanın anlamlı olmadığına karar verilmiştir. Sonuç olarak hiç bir test verisine kılıf düzeltmesi yapılmamıştır.

Kılıf kullanımının bir takım başka sakıncaları olduğu da bilinmektedir. Öncelikle kılıf numune etrafına yerleştirilirken ne kadar dikkatli davranılsa da yine de bir miktar havanın hapsolmesi engellenememektedir. Suyu doygunluk aşamasında ters basınç kullanılması bu sıkışmış havanın çözünmesinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada bahsi geçen deneylerde yüksek sayılabilecek -300 ile 350 kPa arasında- bir ters basınç kullanıldığı için bu etkinin azaltıldığı düşünülmektedir. Bunun dışında lateks kılıf hava ve suya karşı da tamamen geçirimsiz değildir. Özellikle hava geçirimsizliğinin oldukça yüksek olduğu bilinmektedir (Head, 1992). Hücre sıvısı içinde çözünmüş hava olması halinde kılıftan numuneye sızacak hava boşluk suyu ölçümlerinde -özellikle uzun süren deneylerde- ihmal edilemeyecek hatalara sebep olabilmektedir (Pollard ve diğ., 1977). Deney sisteminde havası alınmış su kullanılmasının özellikle tavsiye edilmesinin önemli bir nedeni budur.

Laboratuarda bu sistem bulunmadığından deneylerde kullanılamamıştır. Ancak test süresinin çok uzun olmadığı düşünülerek bu etkinin göz ardı edilmesinin deney sonuçlarına etkisinin çok büyük olmayacağına sonucuna varılmıştır. Head (1992) lateks bir kılıfın geçirimsizliğinin yaklaşık olarak 5×10^{-18} m/sn olduğu ancak bunun malzeme kalitesine göre değişeceği bildirmektedir. Bishop ve Henkel (1962) 8 saatten az süreler için bu etkinin önemsiz olduğunu, bu süreyi aşan test sürelerinde ise kılıftan içeri bir günde nüfuz eden su miktarının numune hacminin 0.02%'sinden daha az olacağını ve bunun da ihmal edilebilir olduğunu belirtmektedirler. Kılıftan numuneye içine su sızmasının engellenmesi için aralarına bir miktar silikon gresi sürülmüş çift kılıf kullanılması, kılıfın kullanılmadan önce bir kaç gün suda bekletilmesi tavsiye edilmektedir (Head, 1992, Leroueil ve diğ., 1988, Berre, 1981).

Bu çalışmada, yalnız bir kez çift kılıf kullanılması denenmiş ancak bu durumda da iki kılıf arasında hava kalmasına neden olduğu düşünülüp vazgeçilmiştir. Benzer şekilde kılıfları suda bekletmek fikrinden de ıslak kılıfın numune etrafına düzgün bir şekilde yerleştirilmesinin pratik olmayışı sebebiyle vazgeçilmiştir.

Yukarıda bahsedilen sakıncalar sebebiyle kılıf kullanımına alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Örnek olarak, Iversen ve Moum (1974) tarafından geliştirilen parafin yöntemi ile deneylerde hücre sıvısı olarak parafin kullanarak kılıf ihtiyacını ortadan kaldırmak özellikle yumuşak zeminlerde başarıyla uygulanan ve tavsiye edilen bir yöntemdir (Berre, 1981).

Filtre dren düzeltilmesi;

Üç eksenli deneylerde filtre drenler konsolidasyon süresini kısalttığı, drenajsız kesme sırasında boşluk suyu basıncı eşitlenmesini hızlandığı için kullanılmaktadır. Bishop ve Gibson (1964) filtre drenlerin etkinliğinin filtre kağıdının drenaj kapasitesi ile zeminin drenaj kapasitesi arasındaki orana bağlı olduğunu analitik olarak göstermişlerdir. Burada bahsedilen drenaj kapasitesi permeabilite katsayısının kesit alanı ile çarpımına eşittir. Leroueil ve diğ. (1988)'nin farklı zeminler (başlangıç boşluk oranlarındaki permeabiliteleri 10^{-7} - 5×10^{-7} cm/sn arasında, plastisiteeleri 6-41 arasında değişen dört ayrı zemin) ve farklı özellikte drenaj kağıtları ile deneysel olarak bu konuyu incelemişler ve normal konsolide zeminlerde filtre kağıdının sınırlı bir etkisinin olduğu, konsolidasyon süresini beklediği kadar kısaltmadığı sonucuna

varmışlardır. Öte yandan, Saada ve Townsend (1980) state-of-art makalelerinde permeabilitesi 10^{-6} cm/sn' den büyük zeminler için filtre drenlerin drenajı hızlandırmakta bir etkisinin olmadığını bildirmektedirler. Aynı bilgi Head(1992) tarafından da verilmektedir (Germaine ve Ladd (1988) filtre drenlerin tam etkili olabilmesi için zemin permeabilitesinin 10^{-8} cm/sn den büyük olması gerektiğini bildirmektedirler). Speswhite Kaolini'nin permeabilitesini deneysel olarak inceleyen Al-Tabbaa (1987) tek yönlü gerilme geçmişi olan normal konsolide Speswhite Kaolini için permeabilite ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi şu şekilde elde etmiştir:

$$k_v = 0.53e^{3.16} \times 10^{-6} \text{ mm / sn} \quad (2.6)$$

$$k_h = 1.49e^{2.09} \times 10^{-6} \text{ mm / sn} \quad (2.7)$$

Bu çalışmada yapılan üç eksenli deneylerin başlangıç koşullarından (su muhtevası $55 \pm 1\%$, dane özgül ağırlığı 2.62, B testinden elde edilen başlangıç doygunluk derecesi yaklaşık 97%) yukarıdaki bağıntı ile deney başında düşey permeabilite, $k_{vo} = 1.5 \times 10^{-7}$ cm/sn, $k_{ho} = 2.9 \times 10^{-7}$ cm/sn olarak hesaplanmaktadır. Bütün bunlardan, filtre kağıtlarının drenaja etkisinin olduğu ancak Leroueil ve diğ.(1988)'in belirttiği gibi bunun yine de genel olarak kabul edilenden az olduğu sonucuna varılabilir. Richardson (1988) aralarında Speswhite Kaolini de olan bir grup zemin üzerinde araştırma yaptığı çalışmasında filtre drenlerin etkinliğinin genellikle 30%' dan düşük olduğunu belirtmektedir.

Çalışma süresince üç eksenli deneylerin konsolidasyon aşamasındaki gözlemler de bu sonucu desteklemektedir (Bazı deneylerde filtre dren kullanılmamış ancak bunların konsolidasyon sürelerinin filtre dren kağıdı olanlardan belirgin bir şekilde kısa olduğu gözlenmemiştir).

Filtre drenlerin numunenin direncine etkisi ise düzeltilmesi gereken bir faktör olarak kabul edilmektedir (Bishop ve Henkel, 1962, Duncan ve Seed, 1967, Saada ve Townsend, 1981, Germaine ve Ladd, 1988, Head, 1992). Düşey olarak yerleştirilmiş filtre drenler için ölçülen eksenel yüke uygulanacak maksimum düzeltmeyi Germaine ve Ladd (1988) şöyle vermektedirler:

$$\Delta F = -k_{fp} P_{fp} \quad (2.8)$$

burada k_{fp} , birim çevre uzunluğundaki filtre kağıdının taşıdığı yük, P_{fp} , filtre kağıdının toplam çevre uzunluğudur.

Düşey filtre drenler için çeşitli çaplardaki numuneler için düzeltmeler, Head (1992) tarafından BS:1377:Part8:1990' dan alındığı şekilde deviatör gerilmeye uygulanmak üzere Tablo 2.5'teki gibi özetlenmiştir (Whatman No.54 ($k_{fp}=1.3-1.9$ N/cm) kağıdı standart kabul edilmektedir).

Tablo 2.5 Deviatör gerilmeye uygulanacak filtre dren düzeltmesi (Head, 1992)

Numune çapı	mm	38	50	70	100	150
Dren düzeltmesi	kPa	10	7	5	3.5	2.5

Bu düzeltmeler 2% ve üzerindeki eksenel deformasyonlar için geçerlidir. 2% deformasyona kadar düzeltme sıfırdan başlayıp doğrusal olarak arttırılacaktır. (Germaine ve Ladd, 1988, Head, 1992). Düşey yerleştirilmiş şerit filtre drenleri için radyal gerilmelere düzeltme uygulanmamaktadır (Bishop ve Henkel, 1962).

Spiral drenler kullanılması halinde, hiç bir düzeltme uygulanmasına gerek olmadığı araştırmacılar tarafından deneysel olarak gösterilmiştir (Berre, 1982, Gens 1982). Üç eksenli basınç deneylerinde filtre drenlerin eğimini Lacasse ve Berre(1988), 1:1.3(düşey:yatay), Gens(1982) 1:1.4 (düşey:yatay) olarak tavsiye etmektedirler.

Bu çalışmada yapılan üç eksenli basınç deneylerinin çoğunda filtre drenler Head (1992) tarafından önerildiği gibi 10 mm genişliğinde 3 adet şerit 1:1.4 eğimle spiral olarak yerleştirilmiştir. Bir kaç deneyde filtre kağıdı hiç kullanılmamıştır. Yalnız bir deneyde düşey filtre dren düzeni kullanılmış bunun için gerekli düzeltme ise yukarıda verilen Tablo 2'ten elde edilmiştir (Bu deneyde laboratuarda mevcut olan, Whatman No.54 kağıdından 50mm×100mm numuneler için uygun düzende kesilmiş dren kağıdı kullanılmıştır).

Alan düzeltmesi;

Kesme deneyi süresince numunenin şekil değiştirmesine bağlı olarak başlangıçtaki kesit alanı değişmektedir. Eksenel gerilmelerin doğru olarak hesaplanabilmesi için değişen ortalama numune kesit alanının bilinmesi gerekir. Ancak deney sırasında bunu doğrudan ölçmek mümkün değildir. Bunun yerine hesaplarda kullanılacak

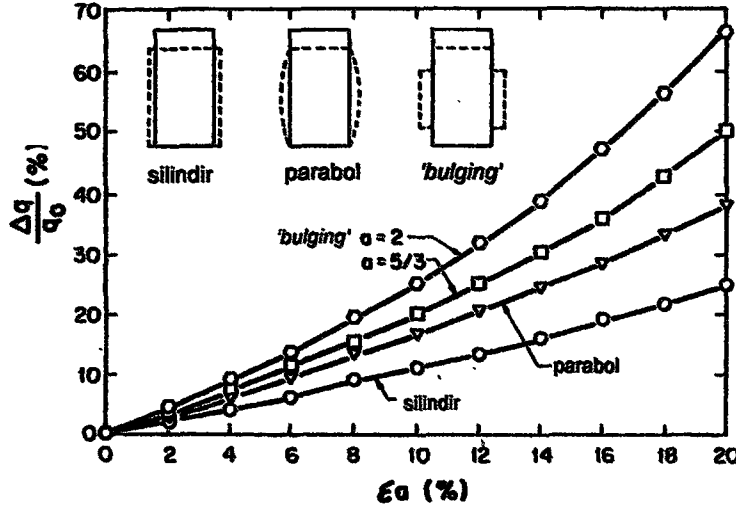
kesit alanı gözlenen numune şekil değiştirmesinin geometrik olarak idealleştirilmesine dayanarak hesaplanan bir takım düzeltmelerin başlangıç kesit alanına uygulanması ile elde edilmektedir. Üç eksenli basınç deneylerinde numunenin şekil değiştirmesi iki ayrı tip göçme şeklinden biri ile tanımlanmaktadır. Birincisi numunenin, kesitinin genişleyerek bir kayma yüzeyi oluşmaksızın plastik olarak göçmesi, ikinci ise belirgin bir kayma yüzeyi oluşarak kırılmasıdır. Birinci tip şekil değiştirme halinde ortalama kesit alanı artan deformasyonla büyürken, ikinci tipte efektif kesit alanının azaldığı kabul edilmektedir. Elbette çoğu zaman, numunede göçme esnasında veya büyük deformasyon değerlerine ulaşıldığında oluşacak gerçek durum bu ikisi arasında bir yerdedir.

Bu çalışmada yapılan üç eksenli deneylerin hepsinde birinci tipte yani plastik göçme şekli gözlenmiştir. Araştırmacılar, bu durumda numunenin düzgün bir silindir olarak şekil değiştirdiği -yüksekliği boyunca çapının sabit kaldığı- varsayılarak elde edilen aşağıdaki düzeltmenin uygulanmasında fikir birliğine varılmış olduğunu bildirmektedir (La Rochelle et al., 1988, Head, 1992, Gens, 1982, Richardson, 1988, Germaine ve Ladd, 1988). Buna göre drenajsız deney için düzeltilmiş kesit alanı,

$$A = A_c \left(\frac{100}{100 - \varepsilon_a \%} \right) \quad (2.9)$$

ifadesinden elde edilecektir. Burada A_c , konsolidasyon sonundaki, kesme deneyi başlangıçındaki kesit alanı, ε_a , eksenel birim şekil değiştirmeyi göstermektedir.

Öte yandan Germaine ve Ladd (1988), alt ve üst başlıklardaki sürtünmeyi azaltıcı önlem alınmadığı halde numunenin yüksekliği boyunca kesitinin sabit kalması varsayımının eksenel gerilmelerin olduğundan fazla hesaplanacağını bildirmektedir. Bu durumda iki farklı şekil değiştirme halinden bahsetmektedir; parabolik ve ortasından şişerek (*bulging*). Şekil 2.10'da Germaine ve Ladd (1988)'den alındığı şekilde farklı alan düzeltmelerinin etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Drenajsız üç eksenli basınç deney sonuçlarında alan düzeltmelerinin etkisi (Germaine ve Ladd, 1988)

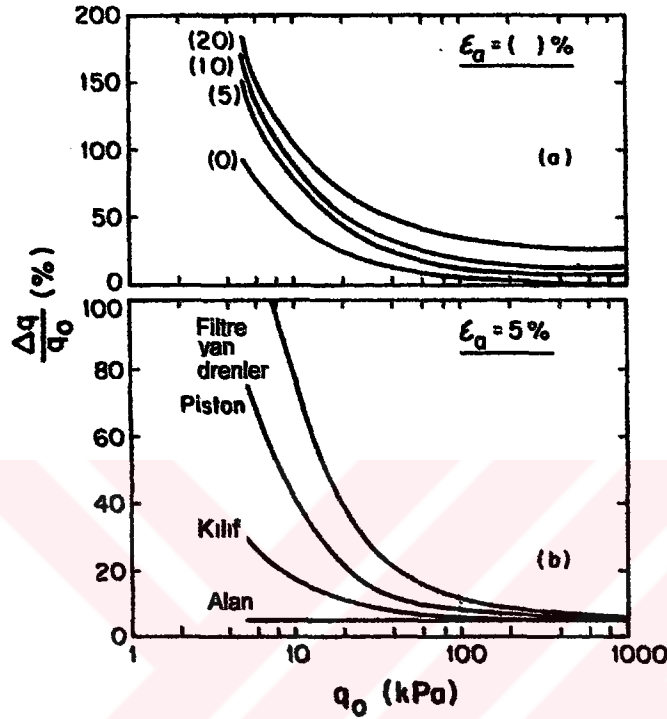
Bu çalışmada yapılan deneylerde gözlenen şekil değiştirmeler genellikle parabolik tipe uymaktadır. Germaine ve Ladd (1988) parabolik alan düzeltmesi için şu formülü önermektedir:

$$A = A_c \left[-\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{25 - 20\varepsilon_a - 5\varepsilon_a^2}}{4(1 - \varepsilon_a)} \right]^2; \quad \varepsilon_a = \frac{\varepsilon_a(\%)}{100} \quad (2.10)$$

Bir kaç deney (N21, N28, N29 ve N32) için alan düzeltmesi hem parabolik hem de düzgün silindir olarak hesaplanmış, 12-13% birim şekil değiştirmede deviatör gerilmelerdeki farkın 7-8% civarında olduğu görülmüştür. Fark gözardı edilemeyecek kadar fazla olmakla birlikte bu çalışmada hesapları mümkün olduğu kadar basit tutmanın ve sonuçların karşılaştırılacağı diğer araştırmacıların izlediğine benzer bir yöntem kullanmanın çalışmanın amaçları açısından gerekliliğine inanıldığından silindirik alan düzeltmesi uygulanmasına karar verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen tipik düzeltmelerin drenajsız üç eksenli deneylerde önemini Germaine ve Ladd (1988) Şekil 2.11 ile göstermişlerdir (Bu şekil, 5 N piston sürtünmesi, çift kılıf, Whatman No.54 kağıdından 0.6 cm genişlikli 8 düşey filtre dreni ile drenajsız basınç deneyine tabi tutulan 10 cm² lik numune için silindirik alan düzeltmesi kullanılması koşulları için elde edilmiştir). Şekil 2.11a, uygulanacak toplam düzeltmenin artan birim şekil değiştirmeler arttıkça arttığını göstermektedir.

Ölçülen gerilmeler 200 kPa'dan daha büyük olduğunda bu düzeltmelerin öneminin az olduğu, 10 kPa'dan küçük gerilmelerde ise düzeltmelerin öneminin fazlasıyla arttığı görülmektedir. Şekil 2.11b'de ise farklı düzeltmelerin göreceli önemi gösterilmiştir. Buna göre 200 kPa'n üzerindeki gerilmelerde alan düzeltmesinin önemli olduğu, küçük gerilmelerde ise diğerlerinin önem kazandığı görülmektedir.



Şekil 2.11 Drenajsız üç eksenli basınç deney sonuçlarına çeşitli düzeltmelerin etkisi (Germaine ve Ladd, 1988)

Özetlenirse, bu çalışmada sunulan deneysel sonuçlar elde edilirken, deviatör gerilmeler numunenin deney boyunca düzgün bir silindir olarak şekil değiştirdiği varsayılarak yapılmıştır. Lateks kılıfın direnci için düzeltme yapılmamıştır. Deneylerin büyük çoğunluğunda 1:1.4 eğimli spiral filtre drenler kullanılmıştır. Bu şekilde bir yerleşimin numunenin direncine bir etkisi olmadığı, dolayısıyla düzeltme uygulanmasının gerekmediği bir çok araştırmacı tarafından kabul edilmiştir (Berre, 1982, Gens, 1982, Head, 1992, Germaine ve Ladd, 1988). Yalnız bir tek deneyde filtre drenler düşey olarak yerleştirilmiştir. Bu deney için düzeltme Head(1992) tarafından verildiği şekilde BS:1377:Part 8:1990'na göre uygulanmıştır. Yük hücresinin sıkışabilirliği için bir düzeltme yapılmasına gerek olmadığı tespit edilmiş, eksenel şekil değiştirmeler hücre dışından ölçülen yerdeğiştirmeler kullanılarak hesaplanmıştır.

2.5.2 Numune koşulları

Numunenin boyutları üç eksenli deney aletine yerleştirilmeden önce verniyerli kumpas ile (mm) biriminde ölçülerek not edilmiştir. Başlangıç su muhtevası numune hazırlama sırasında zemin silindirin üstünden ve altından kesilen parçaların su muhtevelarının ortalaması olarak alınmıştır.

Numune üç eksenli alete yerleştirildiğinde,
kesit alanı,

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \text{ mm}^2 \quad (2.11)$$

hacmi,

$$V_0 = \frac{A_0 H_0}{1000} \text{ cm}^3 \quad (2.12)$$

birim hacim ağırlığı,

$$\gamma_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ t/m}^3 \quad (2.13)$$

kuru birim hacim ağırlığı,

$$\gamma_d = \frac{100}{100 + w_0} \gamma_0 \text{ t/m}^3 \quad (2.14)$$

boşluk oranı,

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (2.15)$$

doygunluk derecesi,

$$S_0 = \frac{w_0 \gamma_s}{e_0} \% \quad (2.16)$$

ifadelerinden elde edilmiştir.

Numunenin konsolidasyon aşamasının başında suya doygun olduğu, konsolidasyon sonunda drenajsız (hacim değişimine izin verilmeden) kesildiği gözönüne alınırsa, deney başı ve deney sonu ağırlıkları arasındaki fark ($\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3$) konsolidasyon aşamasındaki hacim değişimine eşittir,

$$\Delta V = m_0 - m_f \text{ cm}^3 \quad (2.17)$$

Böylece, konsolidasyon sonunda hacimsel deformasyon,

$$\varepsilon_{vc} = \frac{\Delta V}{V_0} \times 100\% \quad (2.18)$$

ifadesinden elde edilebilmektedir.

Suya doymun numunenin konsolidasyon sonundaki koşulları ise (elastisite teorisine dayanarak ve Poisson oranı 0.5 kabul edilerek)

konsolidasyon sonundaki hacmi,

$$V_c = V_0 - \Delta V \quad (2.19)$$

konsolidasyon sonundaki yükseklik,

$$H_c = H_0 \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{vc}}{100} \right) \text{ mm} \quad (2.20)$$

konsolidasyon sonundaki kesit alanı,

$$A_c = A_0 \left(1 - \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_{vc}}{100} \right) \text{ mm}^2 \quad (2.21)$$

kontrol olarak;

$$V_c = \frac{A_c H_c}{1000} = V_0 - \Delta V \quad (2.22)$$

ifadelerinden elde edilmiştir.

Konsolidasyon sonu numune yüksekliği, H_c , eksenel deformasyon hesabında, konsolidasyon sonu numune kesit alanı, A_c , ise eksenel gerilme hesabında kullanılmıştır.

2.5.3 Şekil değıştirmelerin hesabı

Şekil değıştirmeler(deformasyonlar) deney sırasında kaydedilen yerdeğıştirmelerden, ΔH (mm), elde edilmiştir.

Eksenel şekil değıştirme,

$$\varepsilon_a \% = \frac{\Delta H}{H_c} \% \quad (2.23)$$

ifadesinden hesaplanmıştır.

2.5.4 Gerilmelerin hesabı

Gerilmeler deney sırasında kaydedilen eksenel yük değeri, F (kN), kullanılarak elde edilmiştir.

Deviatör gerilme,

$$q = (\sigma_a - \sigma_r) = \frac{F}{A_c} \times \frac{100 - \varepsilon_a \%}{100} \times 10^8 \text{ kN/m}^2 \quad (2.24)$$

Daha önce de belirtildiği gibi ölçülen yük lateks kılıf ve spiral filtre drenler için düzeltilmemiş, yalnız silindirik alan düzeltilmesi uygulanmıştır.

Radyal efektif gerilme,

$$\sigma_r' = (\sigma_r - u) \text{ kN/m}^2 \quad (2.25)$$

Eksenel efektif gerilme,

$$\sigma_a' = (\sigma_a - \sigma_r) + \sigma_r' \text{ kN/m}^2 \quad (2.26)$$

Boşluk suyu parametresi (100 % suya doymun zeminlerde),

$$A = (u - u_0) / (\sigma_a - \sigma_r) \quad (2.27)$$

Gerilme izi parametreleri,

$$q = (\sigma_a' - \sigma_r') \text{ kPa} \quad (2.28)$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_a' + 2\sigma_r') \text{ kPa} \quad (2.29)$$

Gerilme oranı,

$$\eta = q' / p' \quad (2.30)$$

ifadelerinden hesaplanmıştır.

N13 nolu deneyde hesaplanan deviatör gerilme değerleri düşey filtre drenleri için düzeltilmiş değerler (2.31) ifadesiyle elde edilmiş, takip eden hesaplar bu düzeltilmiş değerlerle yapılmıştır.

$$q = (\sigma_a - \sigma_r) - \Delta q_{dr} \text{ kPa} \quad (2.31)$$

2% ve üzeri deformasyonlar için; $\Delta q_{dr} = 7.0 \text{ kPa}$

0-2% arasındaki deformasyonlar için; $\Delta q_{dr} = 3.5\varepsilon_a \% \text{ kPa}$ olarak alınmıştır (Bkz. Bölüm 2.5.1)

2.5.5 Spesifik hacimlerin hesabı

Kritik Durum modelinde numunenin durumunu tariflemek için spesifik hacminin belirlenmesi gerekmektedir.

Spesifik hacim,

$$V = 1 + wG_s \quad (2.32)$$

bağıntısından hesaplanmıştır. Burada w su muhtevası, $G_s (= \gamma_s / \gamma_w)$, dane özgül ağırlığıdır. Deneyler drenajsız yapıldığından kesme deneyi süresince su muhtevasının sabit kalmaktadır. Deney sonunda numune yüksekliği boyunca altı eşit parçaya ayrılmış her bir parçanın su muhtevası belirlenmiştir. Deney sonu su muhtevası değeri, bu altı parçadan ortadaki dört parçanın su muhtevası ortalaması olarak alınmıştır (drenajsız deneylerde deney sonu su muhtevasının numune

yüksekliğinin orta 2/3'ünün su muhtevası olarak alınması tavsiye edilmektedir, (Gens, 1982, Head, 1992).

2.5.6 Ödometre hesapları

Numunenin deney başındaki koşulları denklem (2.11-2.16) dan hesaplanmıştır.

Eşdeğer zemin yüksekliği,

$$H_s = \frac{H_0}{1 + e_0} \text{ mm} \quad (2.33)$$

Kademeki boşluk oranı değişimi,

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H_s} \quad (2.34)$$

Kademe sonundaki boşluk oranı,

$$e = e_0 - \Delta e \quad (2.35)$$

Numunenin deney sonundaki koşulları,

deney sonu numune yüksekliği,

$$H_f = H_0 - (\Delta H)_f \text{ mm} \quad (2.36)$$

deney sonu birim hacim ağırlığı,

$$\gamma_f = \frac{m_f}{AH_f} \times 1000 \text{ t/m}^3 \quad (2.37)$$

deney sonu kuru birim hacim ağırlığı,

$$\gamma_d = \gamma_f \times \frac{100}{100 + w_f} \text{ t/m}^3 \quad (2.38)$$

deney sonu boşluk oranı,

$$e_f = \frac{\gamma_s}{\gamma_{df}} - 1 \text{ veya kontrol olarak } e_f = e_0 - (\Delta e)_f \quad (2.39)$$

deney sonu doygunluk derecesi (suya doygunluğu kontrol olarak),

$$S_f = \frac{w_f \times \gamma_s}{e_f} \% \quad (2.40)$$

ifadelerinden hesaplanmıştır.



3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde Speswhite Kaolini'nin drenajsız üç eksenli basınç ve ödometre deneylerinden gözlenen gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve elde edilen Kritik Durum Parametreleri sunulmaktadır. Tablo 3.1a'da üç eksenli deneylerin, Tablo 3.1b'de ödometre deneylerinin sonuçları özetlenmiştir (üç eksenli deneylerde konsolidasyon basıncı kesme sırasındaki çevre basıncına eşittir).

Tablo 3.1a Üç eksenli kesme deneyleri sonuçlarının özeti

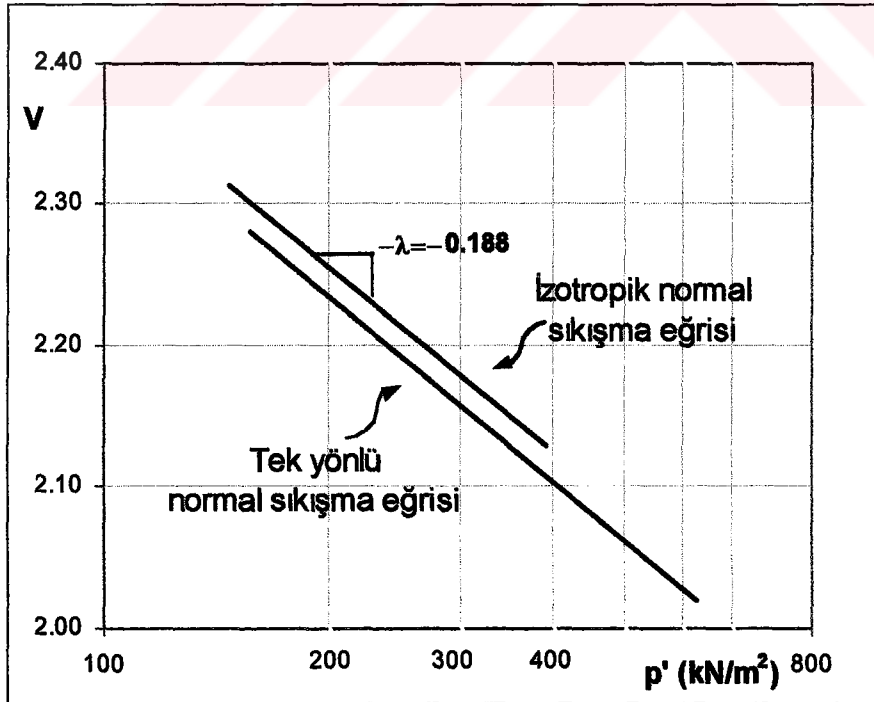
Numune No	Çevre basıncı σ_3 (kPa)	Su muhtevası w_r (%)	Deviatör gerilme q_r (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı u_r (kPa)	Ortalama efektif gerilme p_r (kN/m ²)	Boşluk suyu parametresi A_r
N1	196	0.49	85	125	99	1.5
N2	294	0.45	133	174	165	1.3
N4	196	0.50	100	134	96	1.3
N5	294	0.45	119	194	140	1.6
N6	294	0.45	122	198	137	1.6
N11	294	0.45	148	181	168	1.2
N13	300	0.46	126	179	163	1.4
N14	200	0.48	98	121	112	1.2
N17	392	0.43	191	239	217	1.3
N18	196	0.49	100	129	101	1.3
N19	329	0.45	153	195	134	1.3
N20	294	0.44	170	173	177	1.0
N21	294	0.44	159	171	176	1.1
N22	196	0.48	89	113	113	1.3
N23	196	0.48	93	113	114	1.2
N25	147	0.50	81	89	85	1.1
N26	245	0.46	122	150	136	1.2
N27	343	0.45	165	205	193	1.2
N28	147	0.50	85	89	86	1.0
N29	245	0.46	130	150	139	1.2
N30	343	0.44	170	205	195	1.2
N31	245	0.46	129	145	144	1.1
N32	392	0.44	193	244	212	1.3

Tablo 3.1b Ödometre deneylerinin özeti

Numune No	w_o (%)	w_f (%)	D (mm)	H_o (mm)	H_f (mm)	γ_o (kN/m ³)	γ_f (kN/m ³)
OD3	0.56	46	70	19.0	16.59	16.2	17.4
OD6	0.58	47	50	20.0	17.13	15.3	16.6
OD7	0.58	46	50	19.0	15.95	17.1	18.7
OD8	0.57	47	70	19.0	17.44	16.1	17.3
OD9	0.57	47	70	19.0	17.29	16.0	17.3

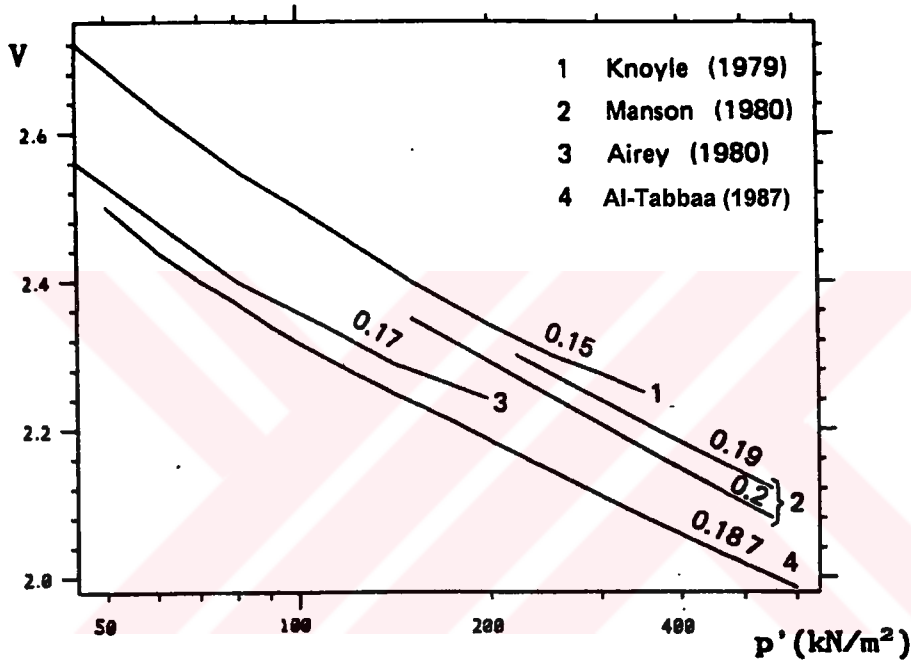
3.1 Normal Sıkışma Eğrisi

Speswhite Kaolini'nin ödometre deneylerinden elde edilen tek yönlü normal sıkışma eğrisi $V - \ln p'$ düzleminde Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu şekilde V ; spesifik hacmi, p' ; ortalama efektif gerilmeyi göstermektedir (ortalama efektif gerilme $K_o=0.7$ alınarak hesaplanmıştır. Al-Tabbaa (1987) normal konsolide Speswhite Kaolini için sükunetteki toprak basıncı katsayısının 0.69 olduğunu belirlemiştir). Bu eğri ödometre deneylerinden elde edilen ortalama eğriyi temsil etmektedir. Eğrinin eğimi, $-\lambda$ değerini vermektedir. Ortalama λ değeri $\lambda_o = 0.188$ olarak bulunmuştur. Yapılan beş ödometre deneyinin λ değerleri ortalama değerin $\pm 2\%$ si içinde yer almaktadır.



Şekil 3.1 Ödometre ve üç eksenli deneylerden elde edilen normal sıkışma eğrileri

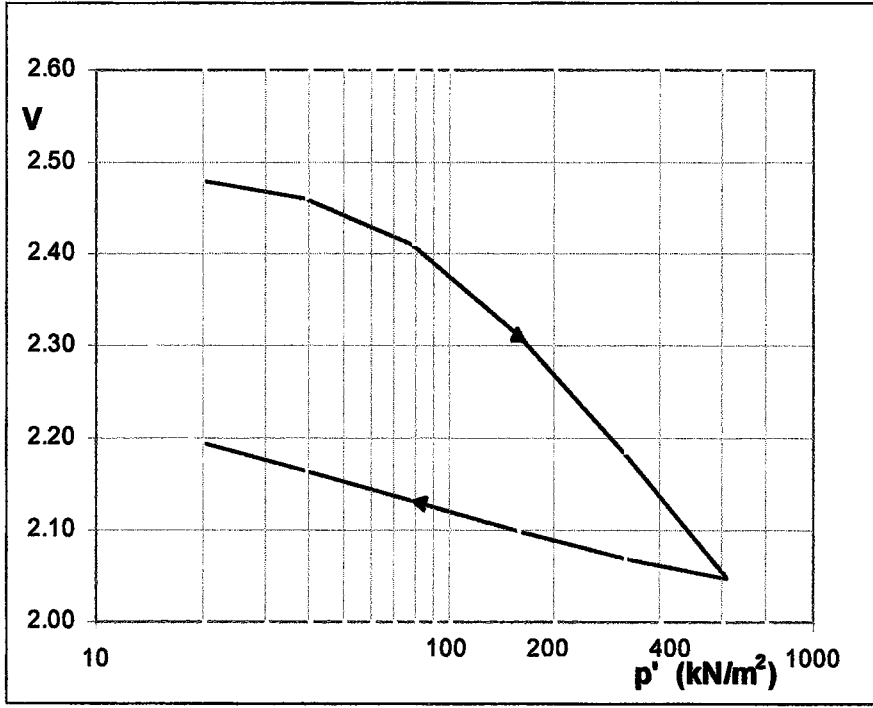
Şekil 3.2'de Al-Tabbaa (1987)' dan alındığı halde Cambridge Üniversitesi'nde çeşitli araştırmacılar tarafından Speswhite Kaolini'nin ödometre deneylerinden elde edilen normal sıkışma eğrileri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi λ değerleri birbirine benzemekte ancak eğrilerin V ekseninde yerleri değişmektedir. Al-Tabbaa (1987) 0.187, Knoyle (1979) 0.15, Manson (1980) 0.19 ve 0.20, Airey (1980) 0.17, Richardson (1988) 0.19, Robinson (Richardson, 1988) 0.19, Ng (Richardson, 1988) 0.18 değerlerini elde etmişlerdir. Elde edilen λ değeri Al-Tabbaa, Manson, Richardson ve Robinson ile aynıdır.



Şekil 3.2 Speswhite Kaolini için çeşitli araştırmacıların elde ettiği tek yönlü sıkışma eğrileri (Al-Tabbaa, 1987)

Şekil 3.3'te tipik bir ödometre deney eğrisi gösterilmiştir. Diğer deneylere ait eğriler EKB de verilmiştir.

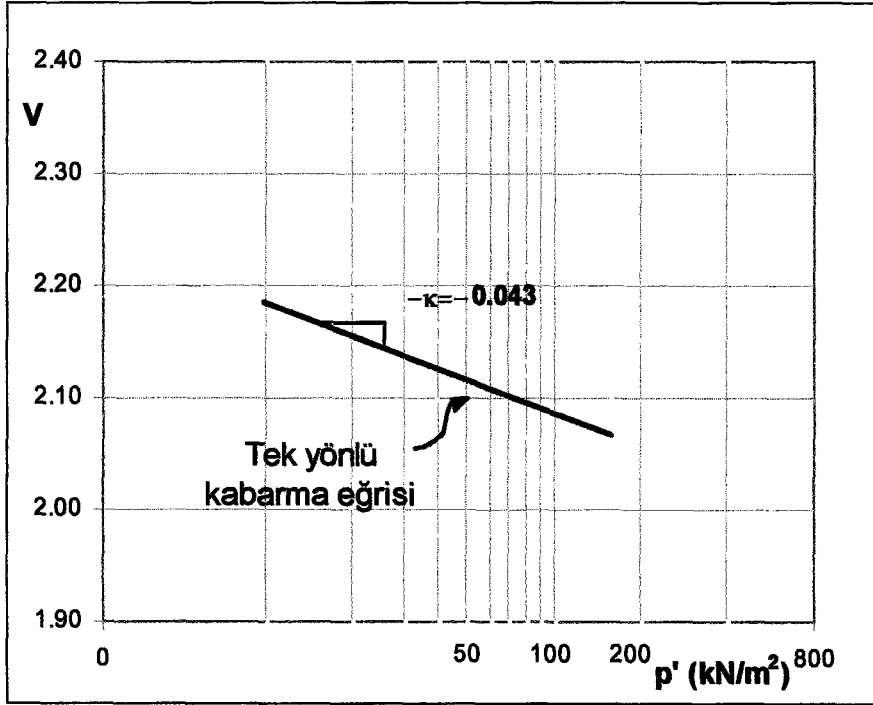
Şekil 3.1'de ayrıca drenajsız üç eksenli deneylerden elde edilen izotropik konsolidasyon eğrisi gösterilmiştir. İzotropik sıkışma eğrisinin eğimi $\lambda = 0.188$ olarak elde edilmiştir. Bu eğri tek yönlü konsolidasyon eğrisine paraleldir.



Şekil 3.3 8 no'lu ödometre numunesine ait deney eğrisi

3.2 Kabarma Eğrisi

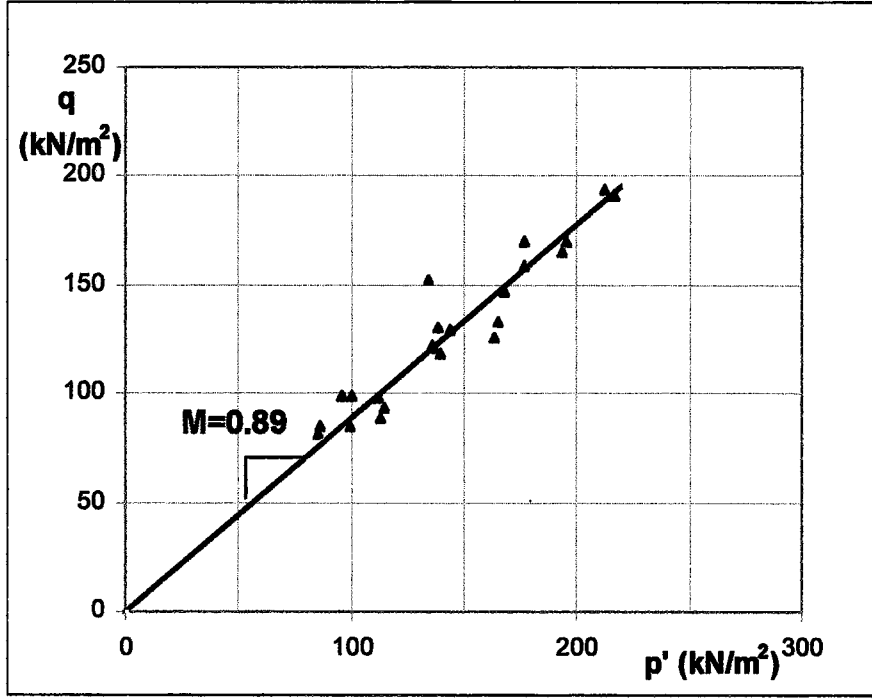
Speswhite Kaolini'nin ödometre deneylerinden elde edilen tek yönlü kabarma eğrisi Şekil 3.4'te $V - \ln p'$ düzleminde gösterilmiştir. Bu eğrinin eğimi $-\kappa$ değerini vermektedir. Ortalama κ değeri $\kappa = 0.043$ olarak bulunmuştur. Beş ödometre deneyinden elde edilen κ değerleri ortalama değerin $\pm 10\%$ u içinde yer almaktadır. Speswhite Kaolini'nin kabarma eğrisinin eğimi, κ , için Al-Tabbaa (1987) 0.028, Elmes (1986) 0.023, Richardson (1988) 0.056, Robinson (Richardson,1988) 0.05 değerlerini elde etmişlerdir. Al-Tabbaa ve Elmes'in elde ettiği değerlerin oldukça üstünde, Richardson ve Robinson'un buldukları değerlere yakın bir değer elde edilmiştir.



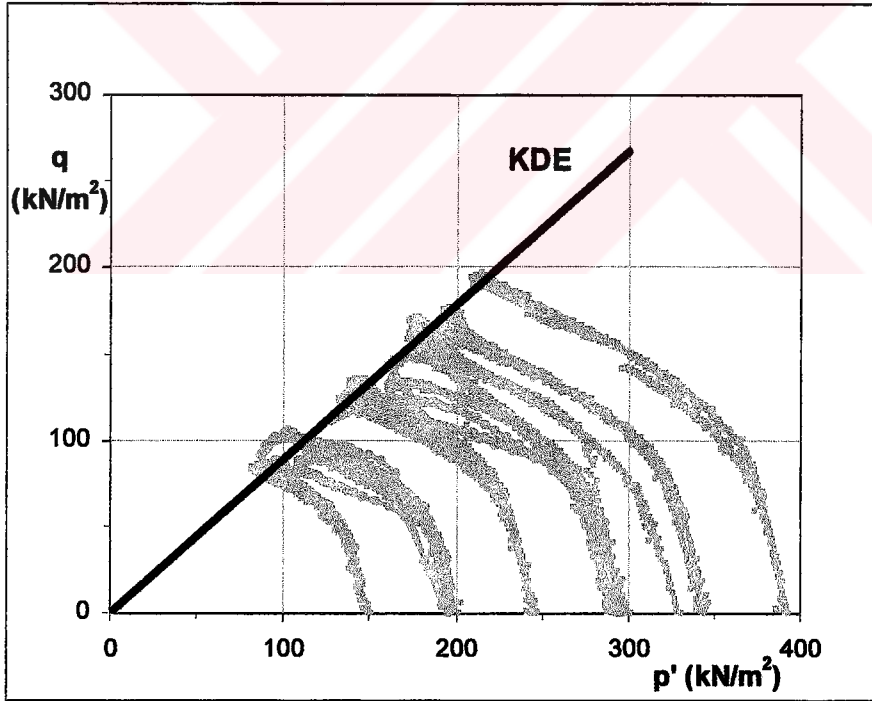
Şekil 3.4 Ödometre deneylerinden elde edilen kabarma eğrisi

3.3 Kritik Durum Eğrisi

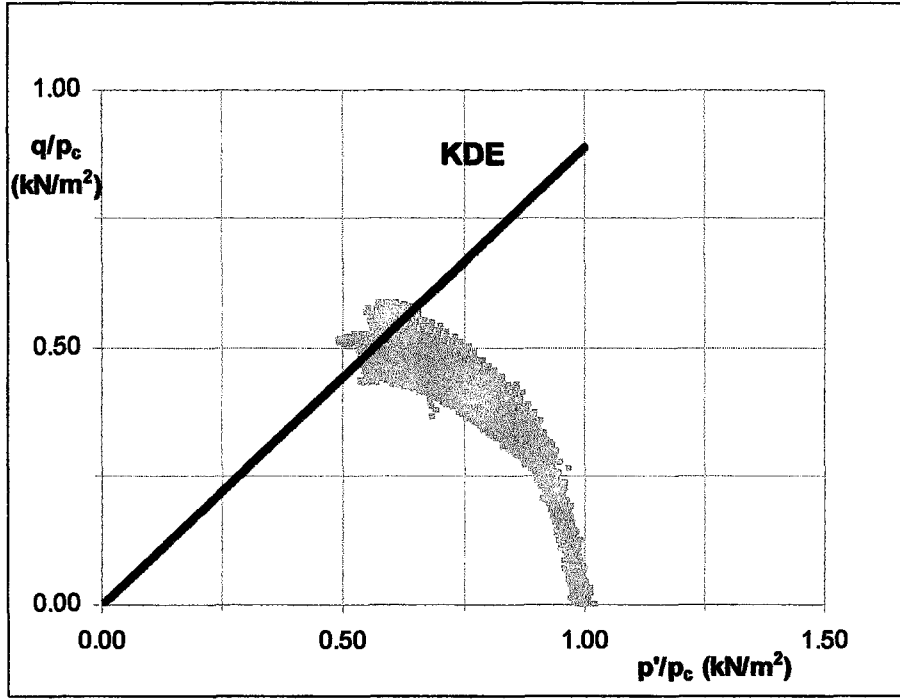
Kritik durum eğrisinin $q - p'$ düzlemindeki izdüşümünün eğimi, üç eksenli basınç deney sonuçlarından $M = 0.89$ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.5). Bu değer $\phi' = 22^\circ$ kayma mukavemeti açısına karşı gelmektedir. M değeri için Al-Tabbaa (1987) 0.9, Knoyle (1979) 0.8, Houlsby (1981) 0.88, Clegg (1981) 0.90, Elmes (1986) 0.82, Richardson (1988) 0.95, Robinson (Richardson, 1988) 0.95, Ng (Richardson, 1988) 0.97 ve ϕ_{cr}' değeri için Airey (1984) 21° , Rossatto (1992) 20° bulduklarını bildirmektedirler. Deneylerden elde edilen M değeri Al-Tabbaa, Houlsby ve Clegg ile aynıdır. Üç eksenli deneylerin gerilme izleri toplu olarak Şekil 3.6'da verilmiştir. İzotropik konsolidasyon basıncına göre normalize edilmiş gerilme izleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen Kritik Durum Eğrisi'nin $V - \ln p'$ düzlemindeki izdüşümünün eğimi ise $\lambda_{cr} = 0.188$ olarak bulunmuştur. Bu durumda Kritik Durum Eğrisi, izotropik ve tek yönlü normal sıkışma eğrilerine paraleldir. Şekil 3.8'de Kritik Durum Eğrisi'nin $V - \ln p'$ düzlemindeki izdüşümü, normal sıkışma eğrileri ile birlikte gösterilmiştir.



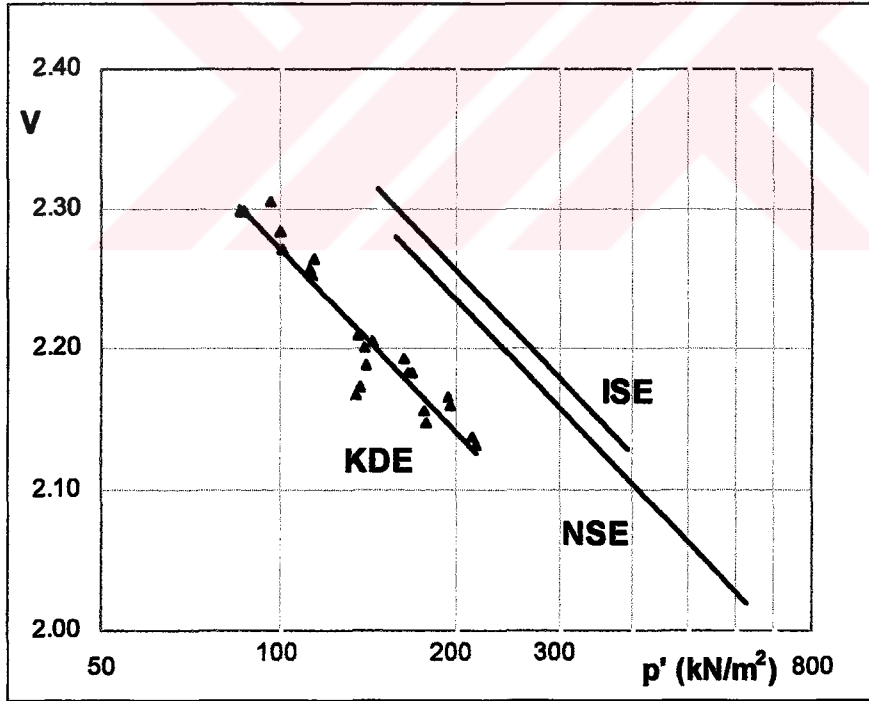
Şekil 3.5 Kritik Durum Eğrisi'nin q - p' düzlemindeki izdüşümünün elde edilmesi



Şekil 3.6 Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneylerinin efektif gerilme izleri

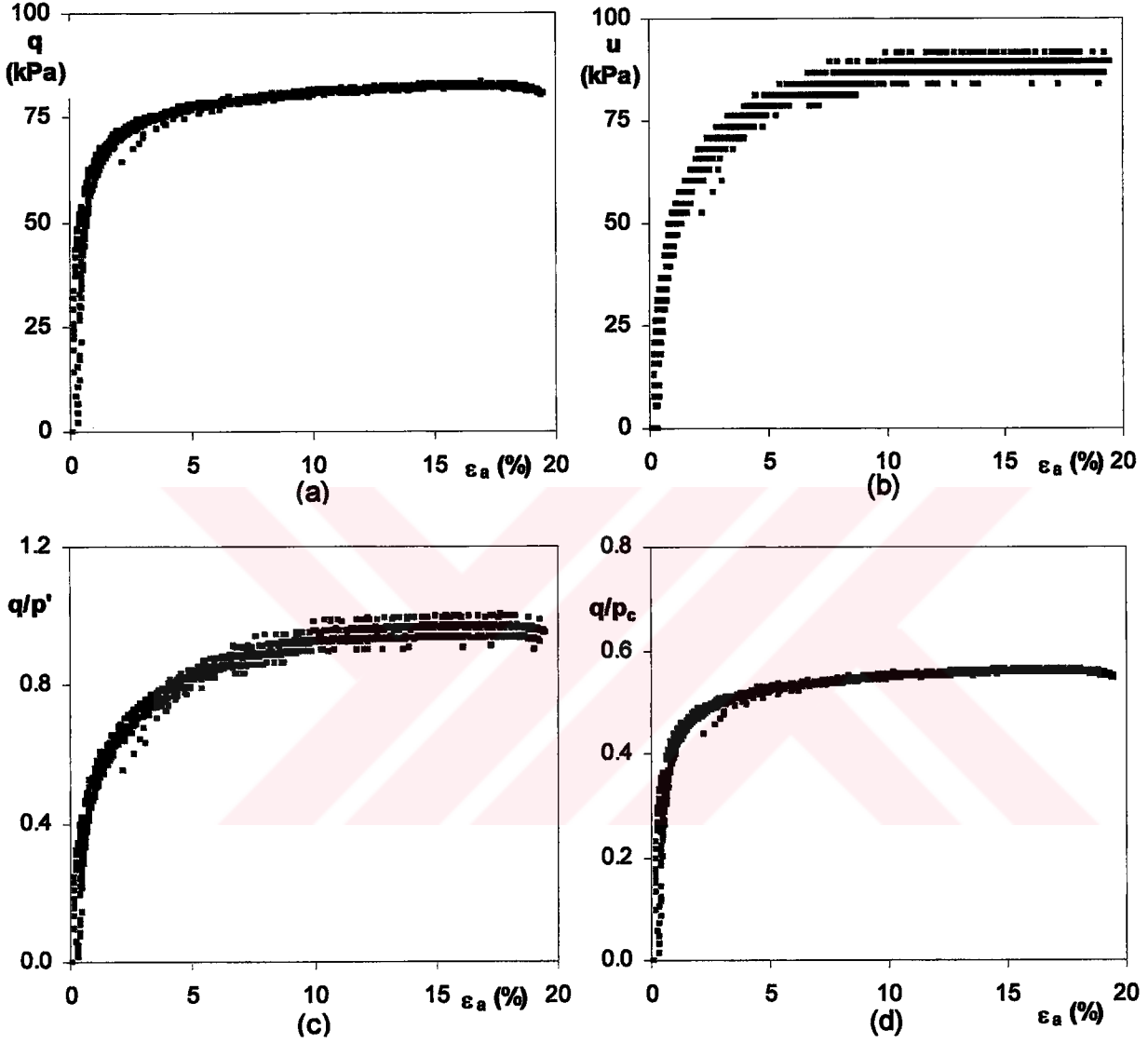


Şekil 3.7 Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneylerinin konsolidasyon basıncı ile normalize edilmiş efektif gerilme izleri



Şekil 3.8 Kritik Durum Eğrisi'nin $V-\ln p'$ düzlemindeki izdüşümünün elde edilmesi

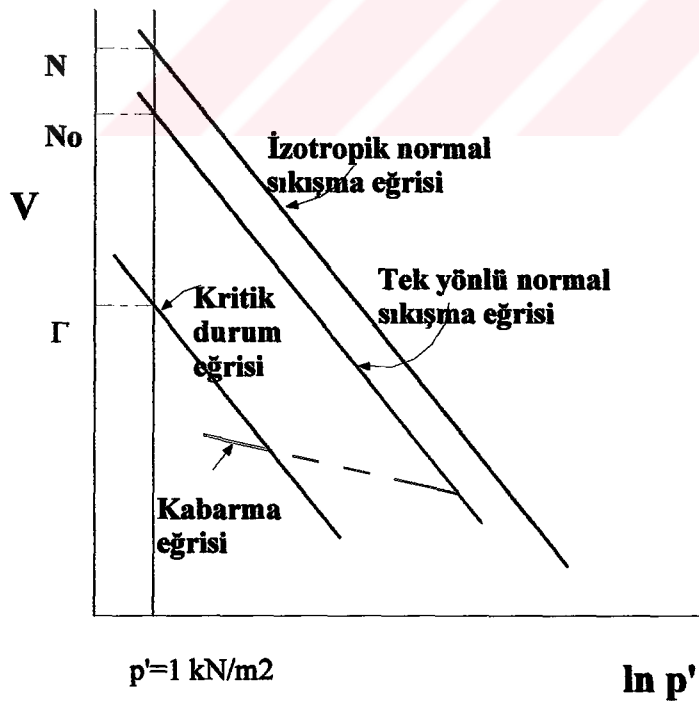
Tipik bir konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deney eğrisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Diğer deneylere ait eğriler EkB de verilmiştir. Eğriler $q - \varepsilon_a$, $u - \varepsilon_a$ ve $q/p' - \varepsilon_a$ düzlemlerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.9 N25 nolu numunenin (a) $q - \varepsilon_a$ (b) $u - \varepsilon_a$ (c) $q/p' - \varepsilon_a$ (d) $q/p_c - \varepsilon_a$ düzlemlerinde gösterilen drenajsız kesme deneyi eğrileri

3.4 Referans Spesifik Hacimler

Kritik Durum Teorisi'nde $V - \ln p'$ düzleminde birbirine paralel olan izotropik normal sıkışma, tek yönlü normal sıkışma ve Kritik Durum eğrilerinin V ekseninde $p'=1 \text{ kN/m}^2$ karşı gelen spesifik hacim değerleri, sırasıyla N , N_0 ve Γ , bu eğrilerin yerleşimini belirlemektedir (Şekil 3.10). Drenajsız üç eksenli deneylerden elde edilen izotropik normal sıkışma eğrisinden $N = 3.25$, ödometre deneylerinden elde edilen tek yönlü normal sıkışma eğrisinden $N_0 = 3.23 (\mp 4\%)$ olarak bulunmuştur. Drenajsız üç eksenli deneylerden elde edilen Kritik Durum Eğrisi'nden ise $\Gamma = 3.14$ olarak bulunmuştur. Al-Tabbaa (1987) $N = 3.20$, $N_0 = 3.13$, $\Gamma = 3.00$, Richardson (1988) $N = 3.19$, $\Gamma = 3.16$, Clegg (1981) $N = 3.65$, $N_0 = 3.58$, $\Gamma = 3.44$, Robinson (Richardson, 1988) $N = 3.26$, $\Gamma = 3.16$, Ng (Richardson 1988) $N = 3.22$, $\Gamma = 3.10$ değerlerini elde etmişlerdir. Diğer araştırmacılara ait bu sonuçlar için N/N_0 ve N/Γ değerleri sırasıyla 1.01-1.02 ve 1.03-1.07 arasında değişmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ise $N/N_0 = 1.01$, $N/\Gamma = 1.04$ değerlerini vermektedir.



Şekil 3.10 Referans spesifik hacimlerin şematik gösterimi

Bölüm 3' te sunulan deneysel sonuçları özetlemek gerekirse,

$V - \ln p'$ düzleminde,

izotropik sıkışma eğrisinin denklemi ,

$$V = 3.25 - 0.188 \ln p' \quad (3.1)$$

tek yönlü sıkışma eğrisinin denklemi,

$$V = 3.23 - 0.188 \ln p', \quad (3.2)$$

tek yönlü kabarma eğrisinin denklemi,

$$V = 2.28 - 0.043 \ln p' \quad (3.3)$$

Kritik Durum Eğrisi'nin izdüşümünün denklemi,

$$V = 3.14 - 0.188 \ln p', \quad (3.4)$$

$q - p'$ düzleminde,

Kritik Durum Eğrisi'nin izdüşümünün denklemi,

$$q = 0.89 p' \quad (3.5)$$

olarak elde edilmiştir. Bu değerler diğer araştırmacıların yayınladıkları değerler ile benzerlik içersindedir . Tablo 3.3'te Speswhite Kaolini'nin bu çalışmada elde edilen Kritik Durum Parametreleri ile diğer araştırmacıların yayınladıkları değerler özetlenmiştir.

Tablo 3.3 Speswhite Kaolinin Kritik Durum Parametreleri

Kaynak	λ	κ	N	N_0	M	Γ
Yazar	0.188	0.043	3.25	3.23	0.89	3.14
Rossatto (1992)	-	-	-	-	0.80 ($\phi=20^\circ$)	-
Richardson (1988)	0.19	0.056	3.19	-	0.95	3.16
Al-Tabbaa (1987)	0.187	0.028	3.20	3.13	0.9	3.00
Ng (Richardson, 1988)	0.18	-	3.22	-	0.97	3.10
Elmes (1986)	-	0.023	-	-	0.82	-
Robinson (Richardson, 1988)	0.19	0.05	3.26	-	0.95	3.16
Clegg (1981)	-	-	3.65	3.58	0.9	3.44
Houlsby (1981)	-	-	-	-	0.88	-
Airey (1984)	0.17	-	-	-	0.84 ($\phi=21^\circ$)	-
Manson (1980)	0.19 0.20	-	-	-	-	-
Knogle (1979)	0.15	-	-	-	0.8	-

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kil numunelerin Kritik Durum Parametreleri'nin Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarı'nda elde edilebilirliği tahkik edilmiştir. Bu amaçla belli başlı uluslararası zemin mekaniği laboratuvarlarında kullanılan ve bu çalışma için özel olarak getirtilen Speswhite Kaolini üzerinde üç eksenli konsolidasyonlu basınç ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:

1. Planlanan deneyleri gerçekleştirmek için uygun alet düzeneği oluşturulmuştur. Üç eksenli deneyler bilgisayarla kontrol edilen bir veri toplayıcı birimi ile birlikte kullanılan üç eksenli deney sisteminde gerçekleştirilmiştir. Ödometre deneyleri laboratuvarında mevcut sabit halka tipli aletler ile yapılmıştır.
2. Numune hazırlama yöntemi araştırılmış, birbirine benzer numuneler hazırlamak için uygun bir düzen seçilmiştir. Bütün numuneler, toz halindeki Speswhite Kaolini'nin 150% su muhtevasında damıtık su ile karıştırılarak hazırlanan zemin çamurunun tek yönlü konsolide edilmesi ile elde edilmiştir.
3. Suyu doymuş numuneler üzerinde standartlara uygun koşullarda 23 adet izotropik konsolidasyonlu üç eksenli basınç deneyi, 5 adet ödometre deneyi yapılmıştır. Üç eksenli deney sonuçlarının tamamı normal konsolide numunelerin deformasyon kontrollü kesilmeleri ile elde edilmiştir.
4. İncelenen Speswhite Kaolini'nin Kritik Durum Parametreleri:

$$\lambda = 0.188$$

$$\kappa = 0.043$$

$$M = 0.89$$

$$\Gamma = 3.14$$

$$N = 3.25$$

olarak elde edilmiştir. Bu değerler, çeşitli araştırmacıların aynı kil ile çeşitli laboratuvarlarda elde ettikleri sonuçlarla uyum içerisindedir. Böylece oluşturulan deney sisteminin ve uygulanan deney yönteminin uygunluğu kanıtlanmış olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Airey, D.W., 1984. Clays in circular simple shear apparatus, *PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge*.
- Al-Tabbaa, A., 1987. Permeability and stress, strain response of speswhite kaolin, *PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge*.
- Al-Tabbaa, A. and Wood, D.M., 1987. Some measurements of the permeability of kaolin, *Geotechnique* 37, No.4, 499-503.
- Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. and Rosenbrand, W.F., 1980. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106, No. GT5, 499-529.
- Atkinson, J.H. and Bransby, 1978. The mechanics of soils through critical state soil mechanics, Mc-Graw Hill, London.
- Atkinson, J.H., Richardson, D. and Robinson, P.J., 1987. Compression and extension of K_0 normally consolidated kaolin clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 113, No.12, 1468-1482.
- Balasubramaniam, A.S., 1976. Local strains and displacement patterns in triaxial specimens of a saturated clay, *Soils and Foundations*, 16, No.1, 101-106.
- Baldi, G., Hight D.W. and Thomas G.E., 1988. A re-evaluation of conventional triaxial test methods, in *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP, 977, 219-264, Eds. R.T. Donaghe, R.C. Chaney, M.L. Silver.
- Barden, L. and McDermott, R.J.W., 1965. Use of free ends in triaxial testing of clays, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 91, SM6, 1-23.

- Berre, T.**, 1979. Sources of error for undrained triaxial tests on soft and medium stiff clay, *NGI Internal Report, NGM-79*, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Berre, T.**, 1981. Triaxial testing at Norwegian Geotechnical Institute, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **5**, No.1/2, 3-17.
- Berre, T. and Bjerrum, L.**, 1973. Shear strength of normally consolidated clays, *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, vol 1, 39-49.
- Bishop, A.W. and Gibson, R.E.**, 1964. The influence of the provisions for boundary drainage on strength and consolidation characteristics of soil measured in the triaxial test, in *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM STP, **361**, pp. 435-451.
- Bishop, A.W. and Green, G.E.**, 1965. The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil, *Geotechnique*, **15**, No.3, 243-266.
- Bishop, A.W. and Henkel, D.J.**, 1962. The measurement of soil properties in the triaxial test, Edward Arnold, London.
- Bjerrum, L. and Lo, K.Y.**, 1963. Effect of aging on the shear strength properties of a normally consolidated clay, *Geotechnique*, **13**, No.2, 147-156.
- Black, D.K. and Lee, K.L.**, 1973. Saturating laboratory samples by back pressure, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **99**, SM1, 75-93.
- Burland, J.B.**, 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays, *Geotechnique*, **40**, No.3, 329-388.
- Burland, J.B. and Symes, M.**, 1982. A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus, *Geotechnique*, **32**, 62-65.
- Clegg, D.P.**, 1981. Model piles in stiff clay, *PhD Thesis, University of Cambridge*, Cambridge.
- Duncan, J.M. and Dunlop, P.**, 1968. The significance of cap and base restraint, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **94**, SM1, 271-290.

- Duncan, J.M. and Seed, H.B.**, 1967. Corrections for strength test data, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **93**, SM5, 121-137.
- Elmes, D.R.**, 1986. Creep and viscosity of two kaolin clays, *PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge*.
- Gens, A.**, 1982. Stress-strain and strength characteristics of a low plasticity clay, *PhD Thesis, University of London, London*.
- Germaine, J.T. and Ladd, C.C.**, 1988. Triaxial testing of saturated cohesive soils, in *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP, **977**, pp. 421-459, Eds. R.T. Donaghe, R.C. Chaney, M.L. Silver.
- Head, K.H.**, 1992, Manual of soil laboratory testing (Vol. 1, 2, 3), Pentech Press, London.
- Henkel, D.J. and Gilbert, G.D.**, 1952. The effect of the rubber membrane on the measured triaxial compression strength of clay samples, *Geotechnique*, **3**, No.1, 20-29.
- Hight, D.W.**, 1982. A simple piezometer probe for the routine measurement of pore pressure in triaxial tests, *Geotechnique*, **32**, No.4, 397-401.
- Houlsby, G.T.**, 1981. A study of plasticity theories and their applicability to soils, *PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge*.
- Iversen, K. and Moum, J.**, 1974. The paraffin method; triaxial testing without a rubber membrane, *Geotechnique*, **24**, No.4, 665-670.
- Kirkpatrick, W.M. and Belshaw, D.J.**, 1968. On the interpretation of the triaxial test, *Geotechnique*, **18**, 336-350.
- Kirkpatrick, W.M. and Younger, J.S.**, 1970. Strain conditions in compression cylinder, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **96**, SM5, 1683-1695.
- Knogle, D.S.**, 1979. The influence of pore-water tension on the undrained shear strength of kaolin, *Research Project Report, Cambridge University Engineering Tripos, Cambridge*.
- Lacasse, S. and Berre, T.**, 1988. Triaxial testing of soils, State-of-the-art paper in *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP, **977**, 264-290, Eds. R.T. Donaghe, R.C. Chaney, M.L. Silver.

- Ladd, C.C.**, 1985. Overview of clay behaviour, *Lecture 2 for Special Summer Course*, MIT, Cambridge, MA.
- Ladd, C.C., Foot R., Ishihara, K. and Poulos, H.G.**, 1977. Stress deformation and strength characteristics, State-of-the-art Report for Session 1, *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, vol 2, 421-495.
- La Rochelle P., Leroueil, S., Trak B., Blais-Leroux, L. and Tavenas, F.**, 1988. Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests, in *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP, 977, 715-732, Eds. R.T. Donaghe, R.C. Chaney, M.L. Silver.
- Lee, K.L.**, 1978. End restraint effects on undrained static triaxial strength of sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104, GT6, 687-704.
- Lee, K.L., and Seed, H.B.**, 1965. Discussion on 'Importance of free ends in triaxial testing' by P.W. Rowe and L. Barden, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90, SM6, 173-175.
- Leroueil, S., Tavenas F., La Rochelle, P. and Tremblay, M.**, 1988. Influence of filter paper and leakage on triaxial testing, in *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP, 977, 189-202, Eds. R.T. Donaghe, R.C. Chaney, M.L. Silver.
- Manson, S.M.**, 1980. An investigation of the strength and consolidation properties of speswhite kaolin, *Research Project Report*, Cambridge University Engineering Tripos, Cambridge.
- Pollard, W.S., Sangrey, D.A. and Poulos, S.J.**, 1977. Air diffusion through membranes in triaxial tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103, GT10, 1169-1173.
- Richardson, D.** 1988. Investigations of threshold effects in soil deformations, *PhD Thesis, City University, London*.
- Richardson, A.M. and Whitman, R.V.**, 1963. Effect of strain rate upon undrained shear resistance of a saturated remoulded fat clay, *Geotechnique*, 13, 310-324.

- Roscoe, K.H. and Burland, J.B.**, 1968. On the generalised stress-strain behaviour of 'wet' clay, *Geotechnique*, **13**, No.3, 211-240.
- Roscoe, K.H. and Poorooshasb, R.V.**, 1963. A theoretical and experimental study of strains in triaxial compression tests on normally consolidated clays, *Geotechnique*, **13**, 12-38.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A.**, 1964. Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, **13**, No.3, 211-240.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Wroth, C.P.**, 1958. On the yielding of soils, *Geotechnique*, **8**, 22-53.
- Rossato, G., Ninis, N.L. and Jardine R.J.**, 1992. Properties of some kaolin based model clay soils, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **15**, No.2, 166-179.
- Rossato, G., Ninis, N.L. and Jardine R.J.**, 1994. On stress-strain and strength properties of model clay soils, *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, 389-392.
- Rowe, P.W. and Barden L.**, 1964. Importance of free ends in triaxial testing, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **90**, SM1, 1-27.
- Roy, M. and Lo, K.Y.**, 1971. Effect of end restraint on high pressure tests of granular materials, *Canadian Geotechnical Journal*, **8**, 579-589.
- Saada, A.S. and Townsend, F.H.**, 1981. State-of-the-art: Laboratory strength testing of soils, in *Laboratory Shear Strength of Soils*, ASTM STP, **740**, 7-77, Eds. R.N. Yong, F.C. Townsend.
- Sarsby, R. and Kalteziotis, N. and Haddad E.H.**, 1982. Compression of 'free' ends during triaxial testing, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **108**, GT1, 83-107.
- Schofield A.N. and Wroth, C.P.**, 1968. Critical State Soil Mechanics, Mc Graw-Hill, London.

- Tavenas, F. and Leroueil, S., 1977.** Effects of stresses and time on yielding of clays. *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, vol 1, 319-326.
- Toğrol, E., 1962.** Kohezyonlu zeminlerde kayma gerilmesi, efektif basınç ve su muhtevası arasındaki bağlantı, *Doktora Tezi* , İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Wood, D.M., 1974.** Some aspects of the mechanical behaviour of kaolin under truly triaxial conditions of stress and strain, *PhD Thesis, University of Cambridge*, Cambridge.
- Wood, D.M., 1990.** Soil behaviour and critical state soil mechanics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wroth, C.P. and Houlsby, G.T., 1985.** Soil mechanics-Property characterisation and analysis procedure, *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, vol 1, 1-55.

EK A. KALİBRASYONLAR

Bu bölümde üç eksenli deney sisteminde kullanılan ölçme cihazlarının bu çalışma sırasında yapılan kalibrasyonları ile ilgili bilgi verilmiştir. Her cihazın üretici firma tarafından verilen standartlara uygun şekilde elde edilmiş bir kalibrasyon katsayısı bulunmaktadır. Burada yapılmak istenen, laboratuarda mevcut koşullar ve imkanlar dahilinde, bu cihazların kalibrasyon katsayılarını kontrol etmektir. Elde edilen kalibrasyon katsayılarının üretici firma tarafından verilenlerle çok benzer olduğu görülmüştür ($\pm 0.7\%$). Yalnız basınç ölçerlerin kalibrasyon sertifikası bulunamamış bu sebeple deneylerde aşağıda anlatıldığı elde edilen sabit kalibrasyon katsayıları kullanılmıştır.

A.1 Basınç Ölçerlerin (*Pressure Transducers*) Kalibrasyonları

Basınç ölçerler deney sisteminde kullanılan Budenberg basınç saatleri ile kalibre edilmiştir. İlk önce basınç ölçerler kapasitelerinin 80%' nine (800kPa) kadar okuma almaksızın üç kez yüklenip boşaltılmıştır. Yeterince beklendikten sonra basınç 300 kPa getirilmiş ve bu anda basınç ölçerin okuması sıfırlanmıştır. (Kesme deneyleri 300-350 kPa ters basınçta yapıldığı için kalibrasyonun buradan başlatılması uygun görülmüştür. Böylece kalibrasyon eğrisi basınç ölçerlerin ölçümlerinin doğrusallıktan uzaklaştığı küçük basınç değerlerinden etkilenmeyecektir). Basınç 10 kademede 800 kPa 'a kadar arttırılmış her kademede ortalama 24 okuma kaydedilmiştir. Boşaltma işlemi yine aynı şekilde yapılmıştır. Bu şekilde basınç ölçerler toplam üç kez yüklenip boşaltılmıştır. Her kademedeki 24 okumanın en büyük 6'sı ve en küçük 6'sı atılıp kalan 14 okumanın ortalaması o kademede okunan değer olarak alınmıştır. Kalibrasyon eğrileri 3 çevrimden elde edilen okumaların ortalamaları ile çizilmiştir. Bu şekilde elde edilen boşluk suyu basınç ölçerlerinin kalibrasyon katsayıları sırasıyla 2.62 kPa/okuma ve 1.50 kPa/okumadır. Kalibrasyon verilerinden her iki basınç ölçer için de “nonlinerite” (*nonlinearity*) $\pm 1\%$, “histerisis” (*hysteresis*) $\pm 2\%$ olarak elde edilmiştir.

Kalibrasyon verileri Tablo A.1'de, kalibrasyon eğrileri Şekil A.1'de verilmiştir. Şekil A.2' de ise kalibrasyon sonuçları okumalar ve karşı gelen kalibrasyon faktörleri ile gösterilmiştir.

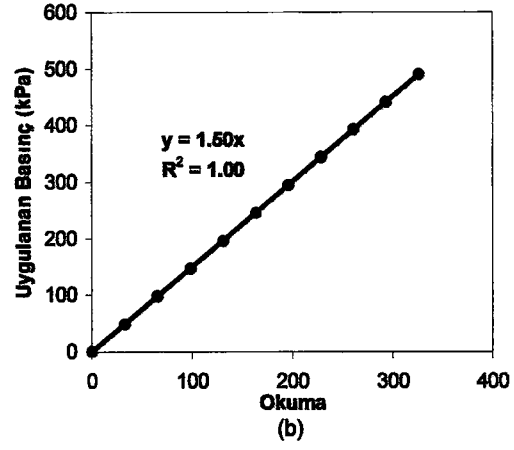
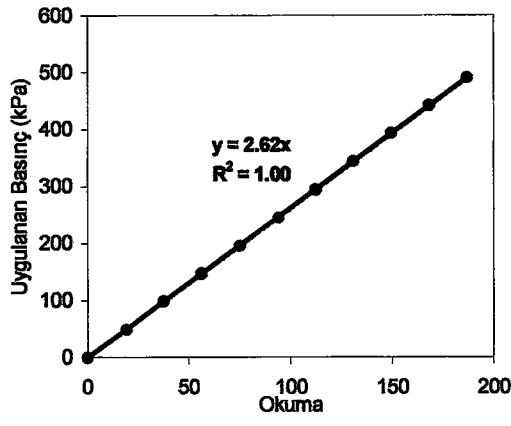
Basınç ölçerlerin üretici firma tarafından verilen katsayıları mevcut değildir. Deneylerde yukarıda anlatıldığı şekilde elde edilen sabit kalibrasyon katsayıları kullanılmıştır.

Tablo A.1a Boşluk suyu basınç ölçerinin kalibrasyon verileri

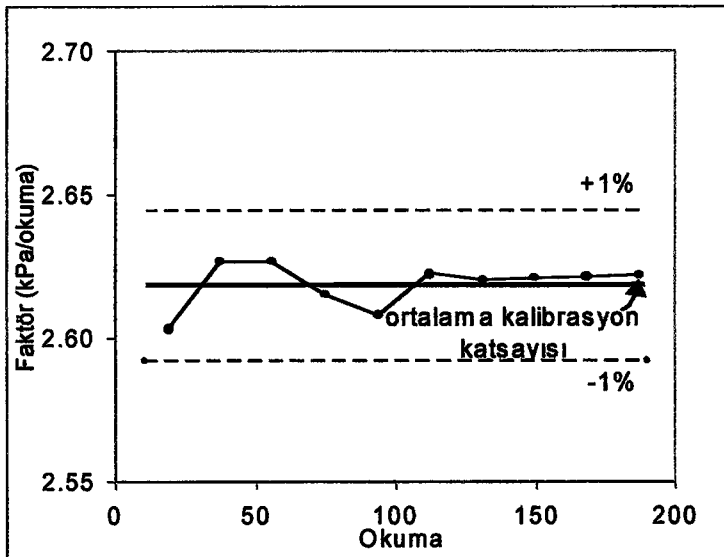
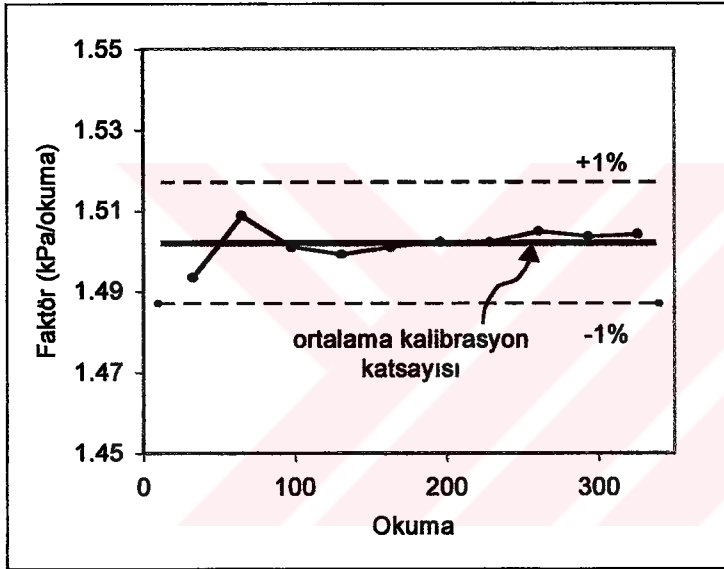
Uygulanan basınç	Basınç ölçer okuması							Faktör	"Nonlinerite"	"Histerisis"
	1.Çevirim		2. Çevirim		3. Çevirim		ortalama			
kPa	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma		kPa/okuma	%	%
0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0		
49	19	19	19	18	19	19	19	2.60	-0.6	1.8
98	37	37	38	37	38	37	37	2.63	0.3	1.8
147	56	56	56	56	56	56	56	2.63	0.3	0.0
196	75	75	75	75	75	75	75	2.62	-0.1	0.0
245	94	94	94	94	94	94	94	2.61	-0.4	0.0
294	112	112	112	112	113	112	112	2.62	0.2	0.3
343	131	131	131	131	131	131	131	2.62	0.0	0.0
392	150	149	150	149	150	150	150	2.62	0.1	0.4
441	168	168	169	168	168	169	168	2.62	0.1	0.0
490	187		187		187		187	2.62	0.1	
ortalama kalibrasyon katsayısı								2.62		

Tablo A.1b Hücre basınç ölçerinin kalibrasyon verileri

Uygulanan basınç	Basınç ölçer okuması							Faktör	"Nonlinerite"	"Histerisis"
	1.Çevirim		2. Çevirim		3. Çevirim		ortalama			
kPa	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma		kPa/okuma	%	%
0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0		
49	33	33	33	32	33	33	33	1.49	-0.6	1.0
98	65	65	65	64	65	66	65	1.51	0.4	0.0
147	98	98	98	98	98	98	98	1.50	-0.1	0.0
196	131	131	131	131	131	130	131	1.50	-0.2	0.3
245	163	163	164	164	163	163	163	1.50	-0.1	0.0
294	196	196	196	196	196	195	196	1.50	0.0	0.2
343	228	228	229	229	229	228	229	1.50	0.0	0.1
392	261	260	261	260	261	261	261	1.50	0.2	0.3
441	293	293	294	294	293	294	294	1.50	0.1	-0.1
490	326		326		326		326	1.50	0.1	
ortalama kalibrasyon katsayısı								1.50		



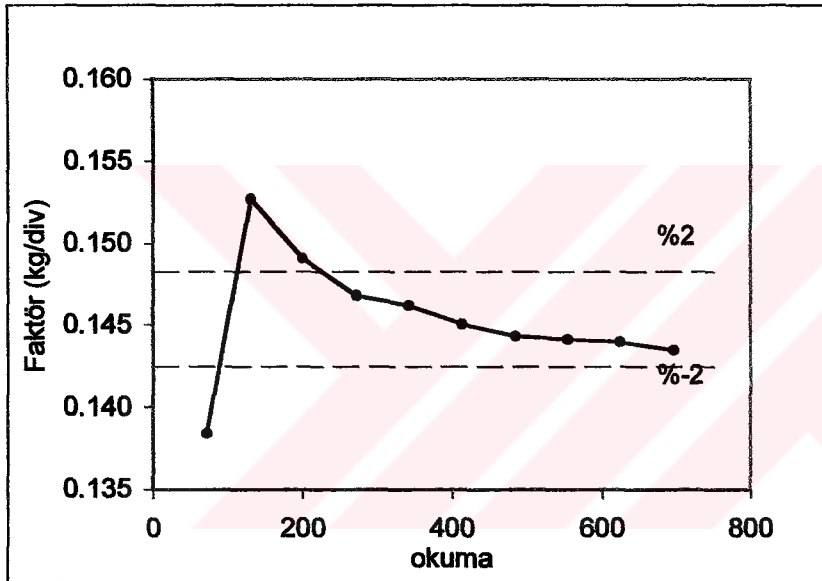
Şekil A1.(a) Boşluk suyu basınç (b) hücre basınç ölçerlerinin kalibrasyon doğruları



Şekil A.2 (a) Boşluk suyu basınç ölçerinin (b) hücre basınç ölçerinin kalibrasyonları

A.2 Yük Halkasının Kalibrasyonu

İlk beş deneyde kullanılan 2 kN kapasiteli yk halkası sabit ağrılıklarla kalibre edilmiştir. 100 kg yük 10 kg'lık kademelerle halkaya bir askı yardımıyla uygulanmıştır. Her kademedeki halkanın üzerindeki yük saati okunup kaydedilmiştir. Bu şekilde yk halkası iki kez yüklenip boşaltılmıştır. Kalibrasyon eğrisi iki çevirimden elde edilen ortalama değerlerle çizilmiştir. Bu şekilde elde edilen doğrusal kalibrasyon katsayısı -0.145 kg/div' dir. "Nonlinerite" $\pm 5\%$, "histerisis" $\pm 1\%$ dir. Yük halkasının kalibrasyonu şekil A.4' te gösterilmiştir. Elde edilen kalibrasyon katsayısı üretici firma tarafından verilen ile aynıdır.



şekil A.3 Yük halkasının kalibrasyonu

A.3 Yük Hücresinin (*Submersible Load Cell*) Kalibrasyonu

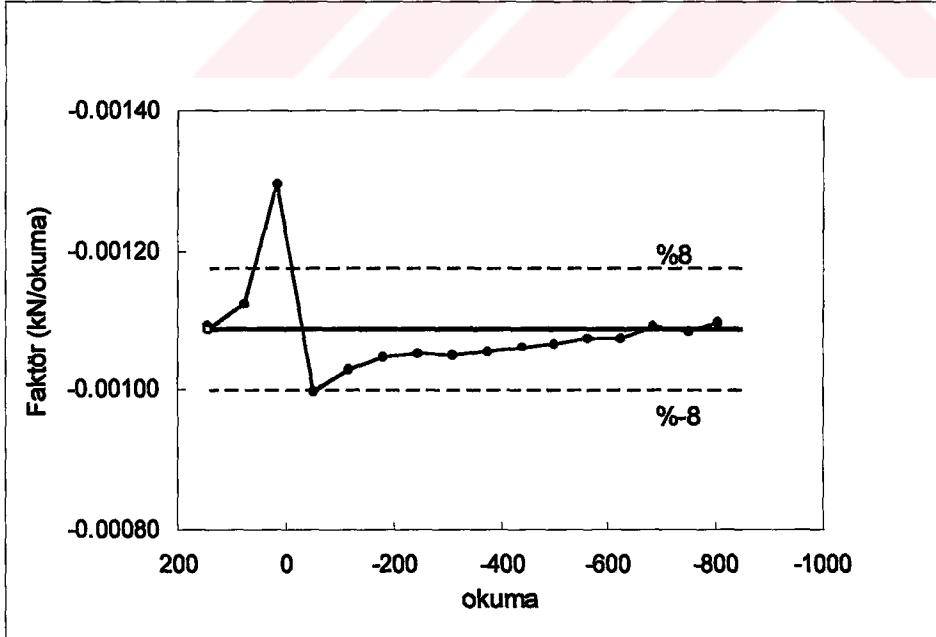
Yük hücresi yukarıda bahsedilen yk halkası kullanılarak  eksenli deney aletinde yüklenmiştir. Kapasitesi 2kN olan yk hücresi, önce yaklaşık 1 kN' a kadar beklemeden ve okuma almadan  kez yüklenip boşaltılmıştır. Sonra 16 kademedeki yüklenip boşaltılmış her kademedeki ortalama 24 okuma kaydedilmiştir. Kaydedilen okumaların istatistiksel ortalaması o kademedeki okuma olarak alınmıştır. Bu şekilde alınan yükleme ve boşaltma okumaları ile kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Kalibrasyon katsayısı -0.001089 kN/okuma olarak elde edilmiştir. "Nonlinerite"

$\pm 8\%$ olarak hesaplanmıştır. Yük hücresinin kalibrasyonu Şekil A.4'te gösterilmiştir. Üretici firmanın verdiği kalibrasyon katsayısı $-0.001087 \text{ kN/okuma}$ 'dır. Deneylerde üretici firmanın verdiği kalibrasyon katsayısı kullanılmıştır.

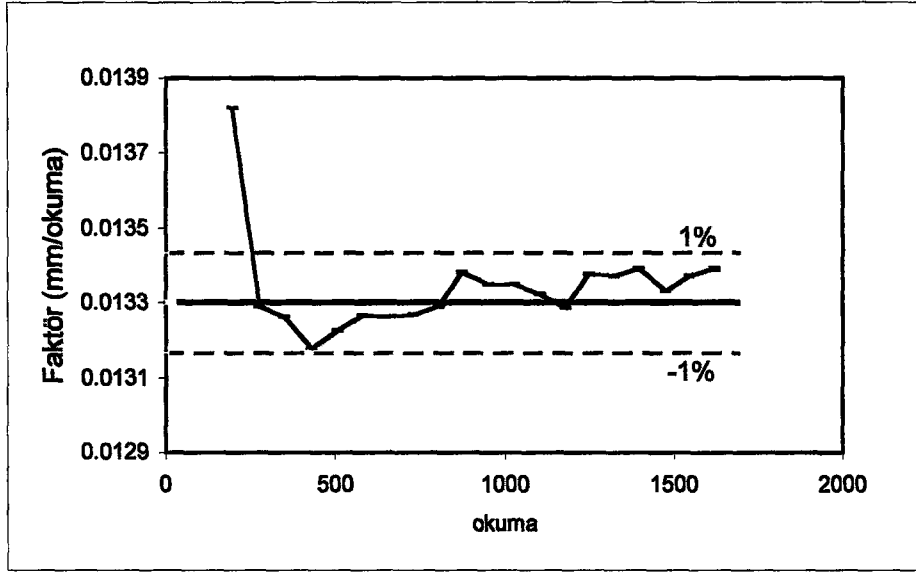
Yük hücresi ayrıca sıkışabilirliği için de test edilmiştir. Bunun için numune yerine aynı boyutlarda çelik bir silindir hazırlanmış, bu silindir üst ve alt başlıklar olduğu halde üç eksenli deney aletine yerleştirilmiş ve yüklenmiştir. Yük, 1.5 kN 'a kadar üç kez artırılıp azaltılmış ancak yük ve yer değiştirmeler arasında -yerdeğiştirme ölçerin ölçüm hassaslığı dahilinde- bir ilişki gözlenmemiştir.

A4. Yerdeğiştirme Ölçerin (*Displacement Transducer*) Kalibrasyonu

Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyonu yük halkasına takılan bir yerdeğiştirme saati yardımıyla üç eksenli deney aletinde yapılmıştır. 0.5 mm lik kademelerle 20 mm ye kadar okuma alınmış kalibrasyon eğrisi bu okumalara göre çizilmiştir. Kalibrasyon katsayısı 0.0133 mm/okuma olarak elde edilmiştir. "Nonlinerite" $\pm 1\%$ dir. Okumalar ve karşı gelen kalibrasyon faktörleri Şekil A.5' te gösterilmiştir. Üretici firmanın verdiği kalibrasyon katsayısı 0.0132 mm/okuma dır. Deneylerde üretici firmanın verdiği kalibrasyon katsayısı kullanılmıştır.

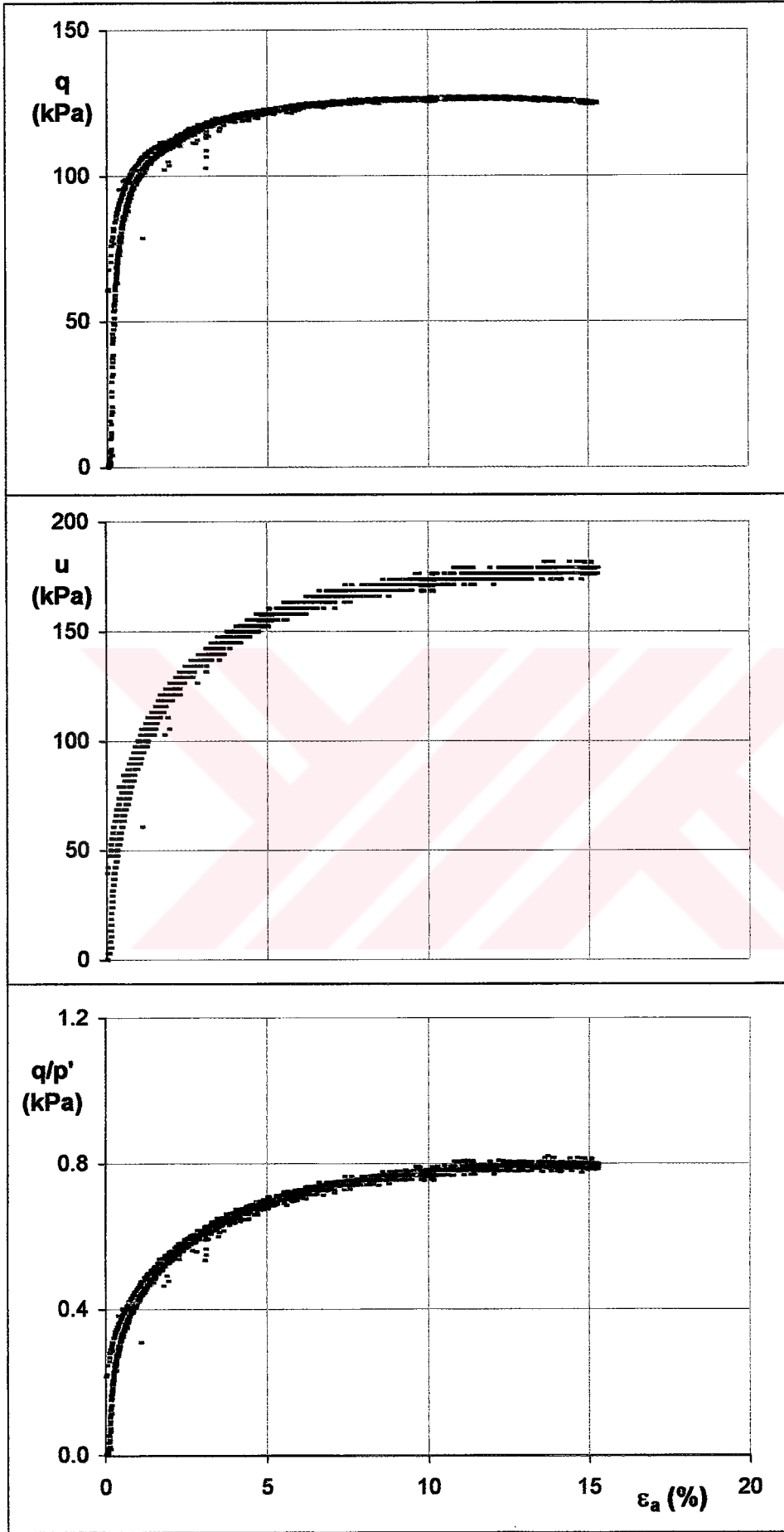


Şekil A.4 Yük hücresinin kalibrasyonu

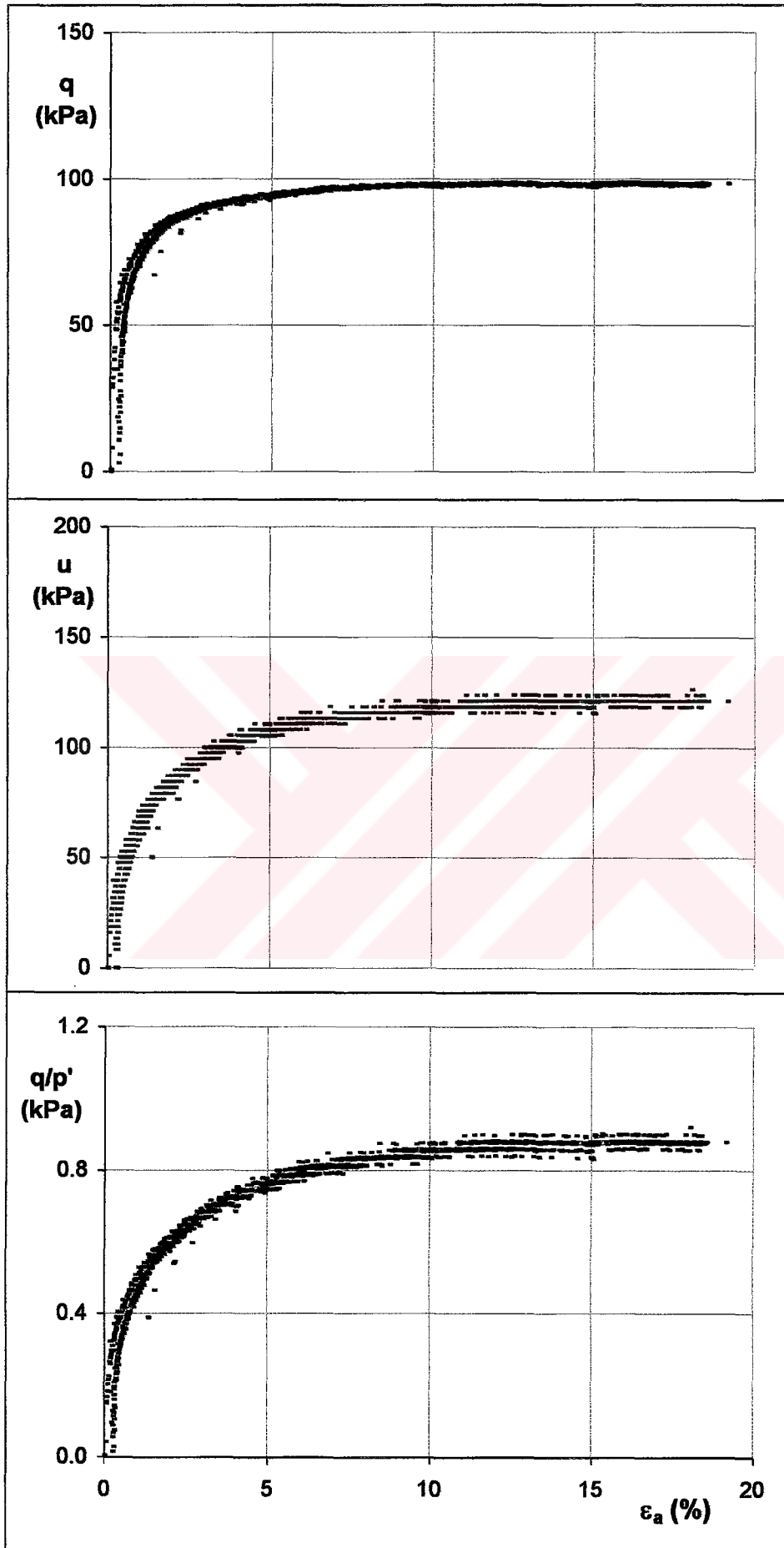


Şekil A5. Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyonu

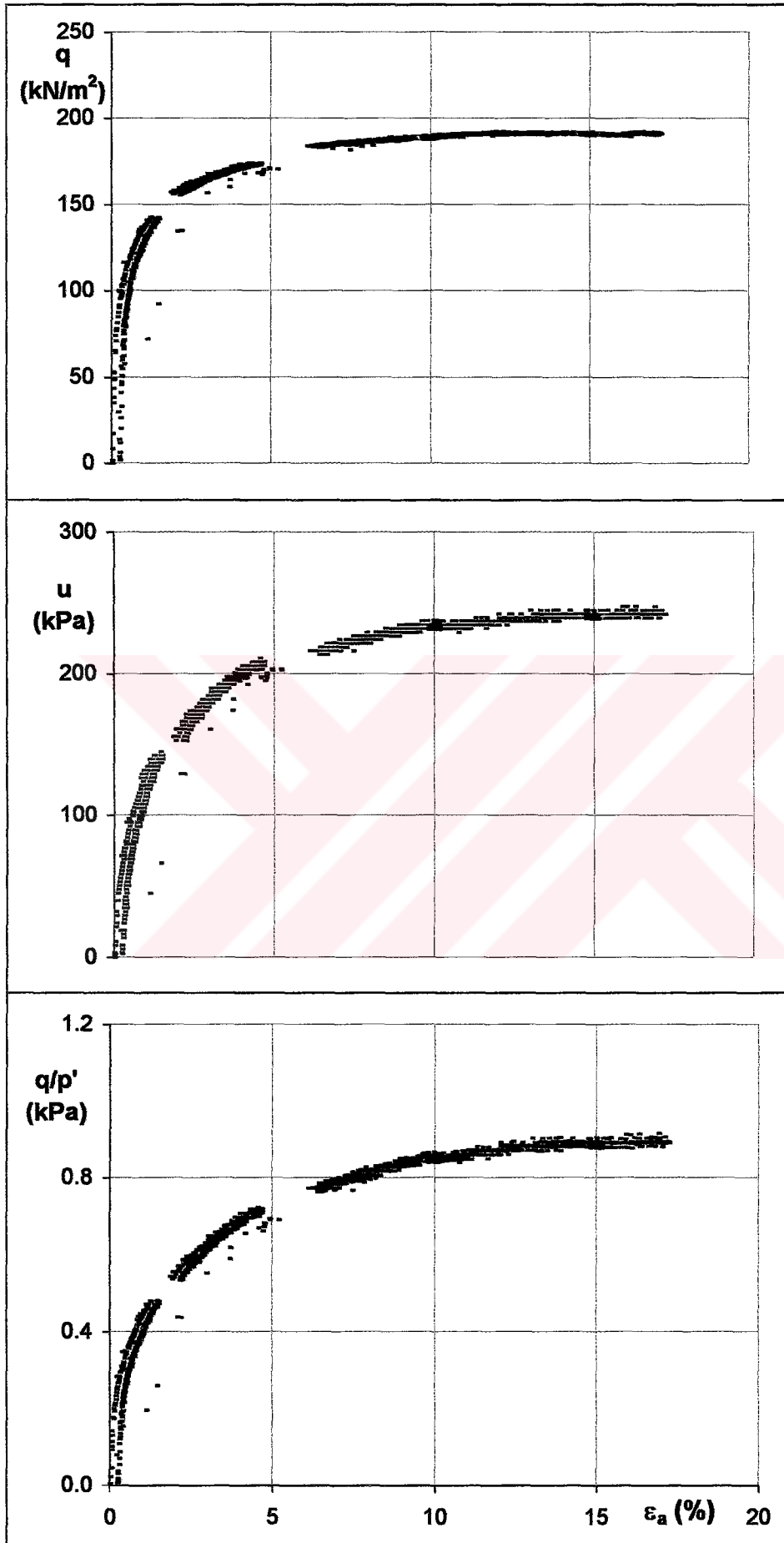
EK B DENEY EĞRİLERİ



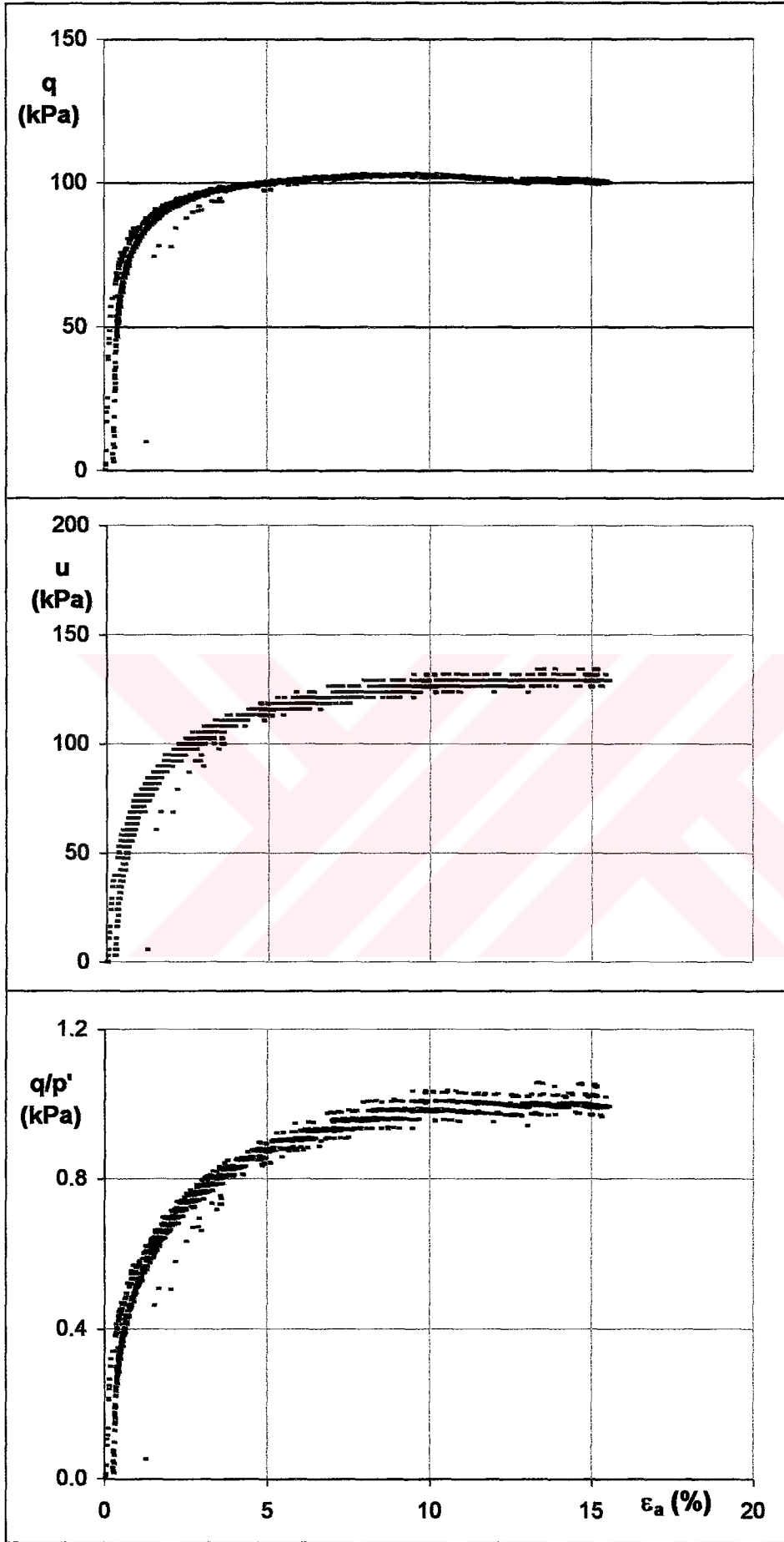
Şekil B.1 N13 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 300 kPa)



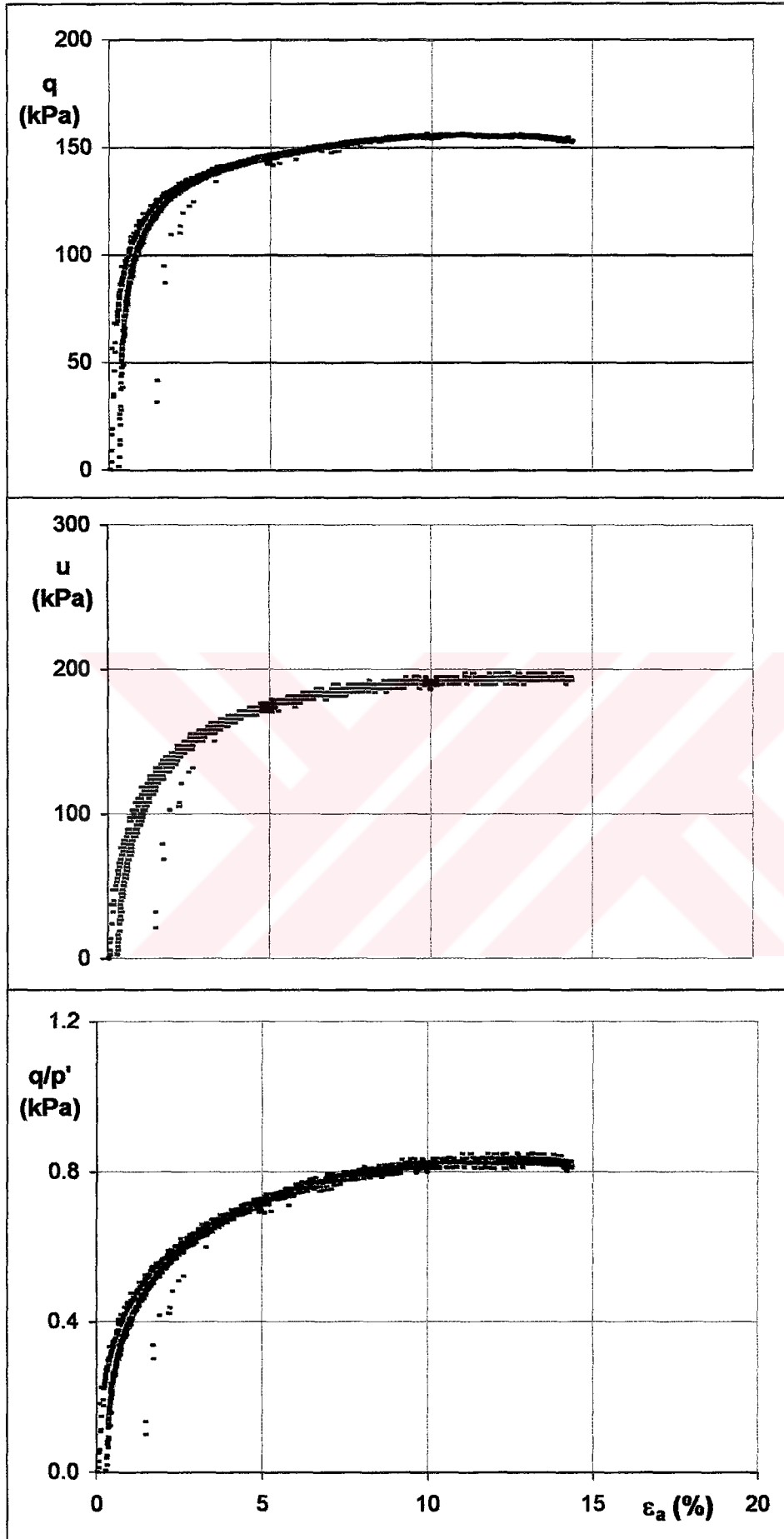
Şekil B.2 N14 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 200 kPa)



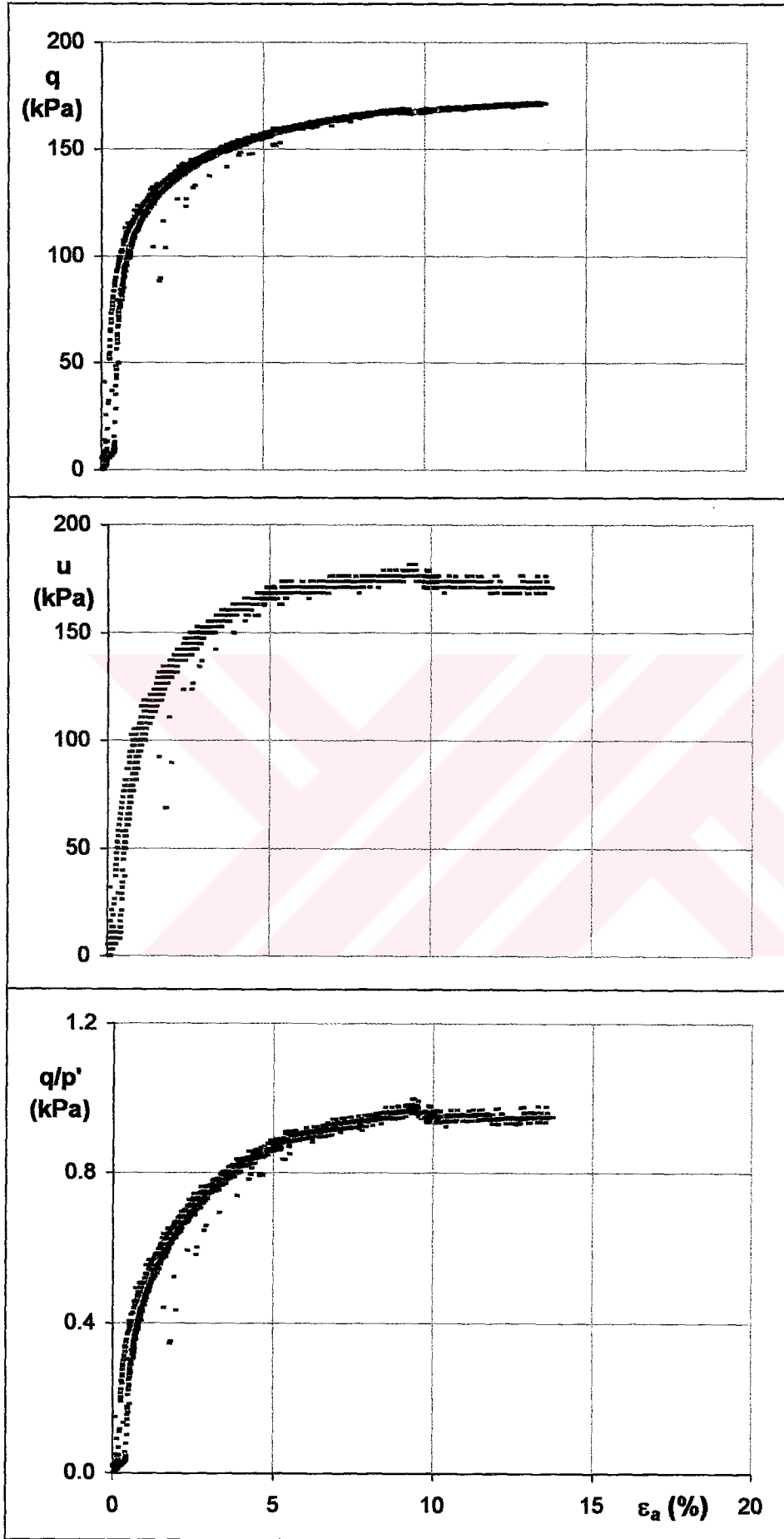
Şekil B.3 N17 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 392 kPa)



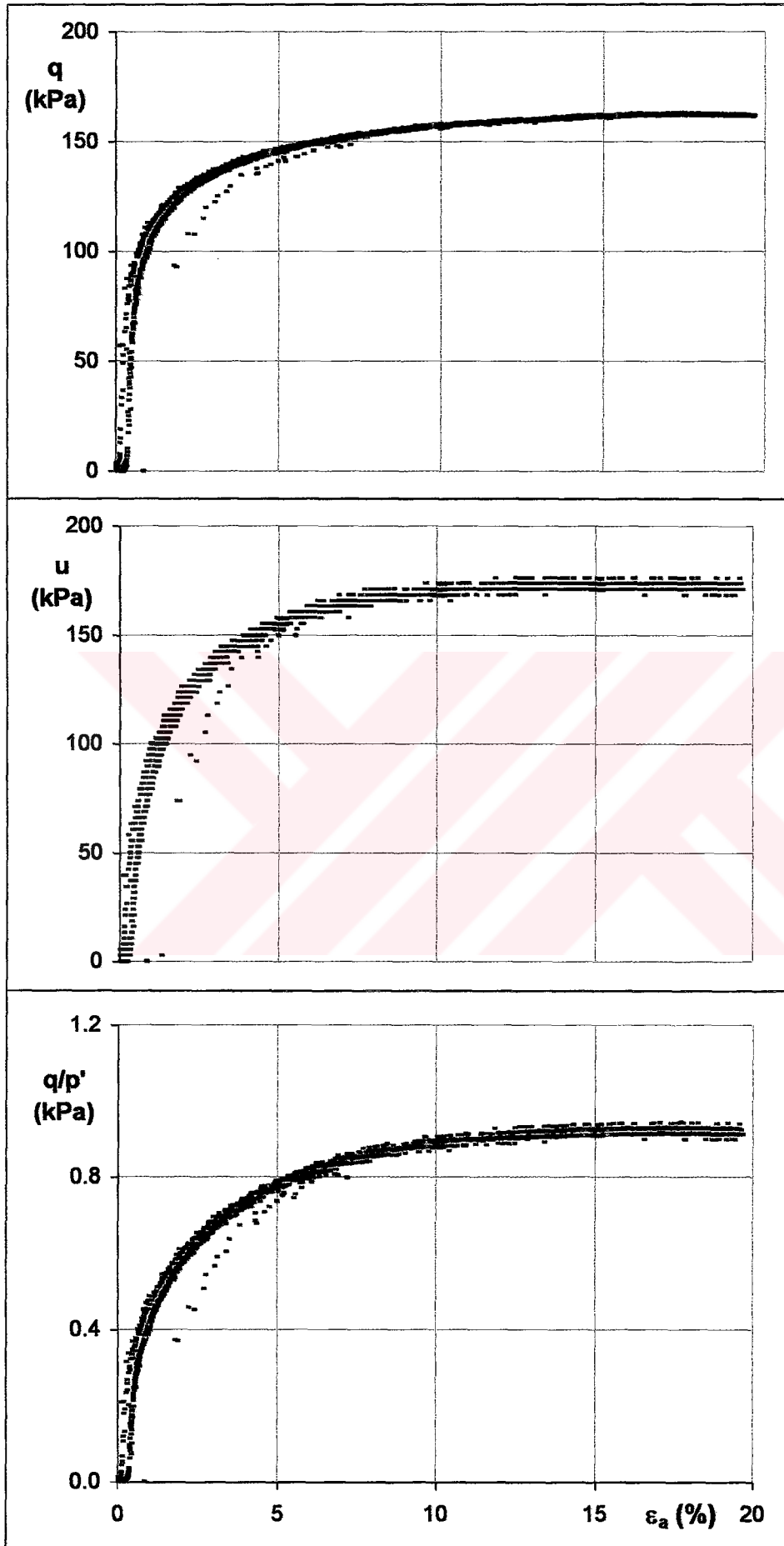
Şekil B.4 N18 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 196 kPa)



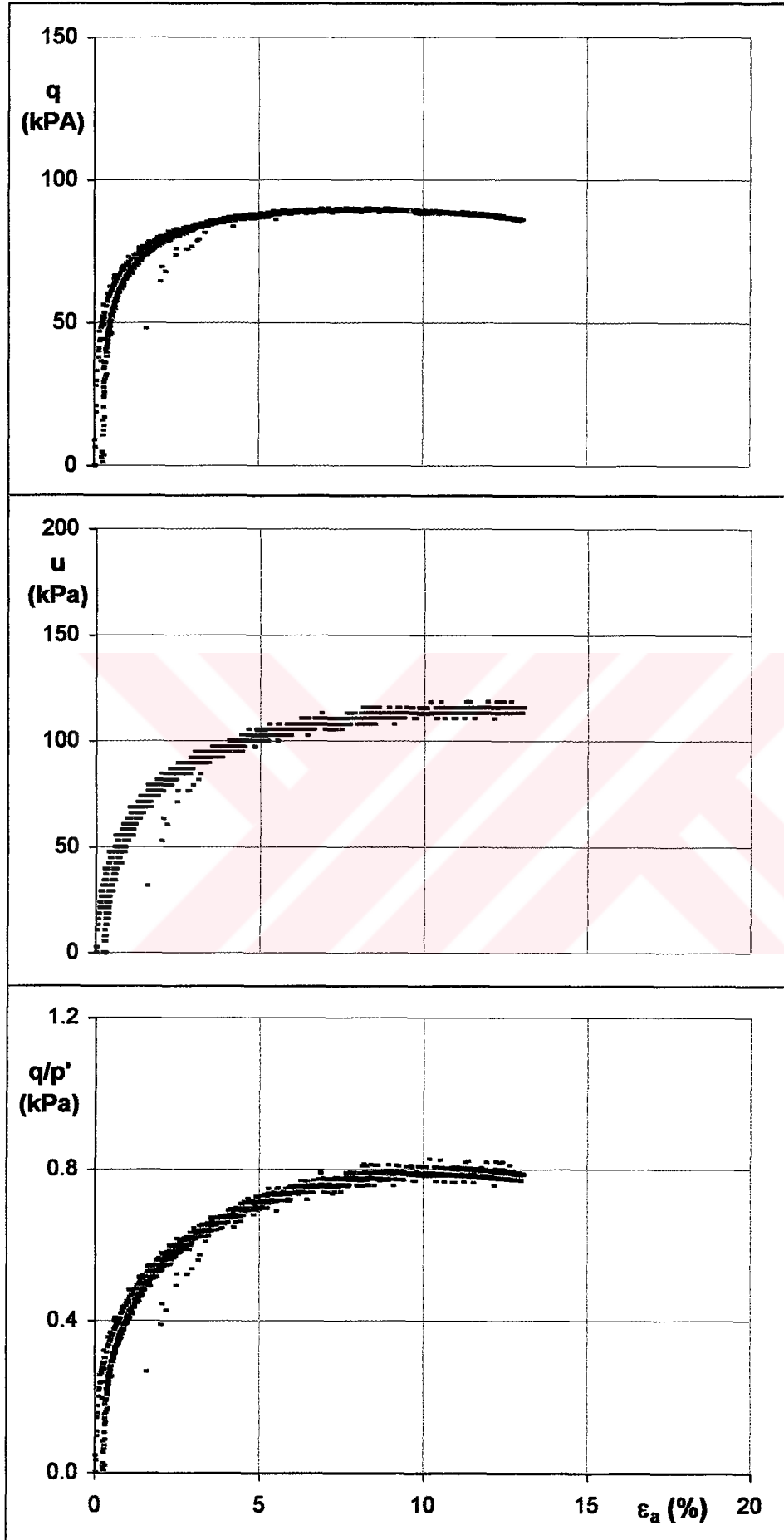
Şekil B.5 N19 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 329 kPa)



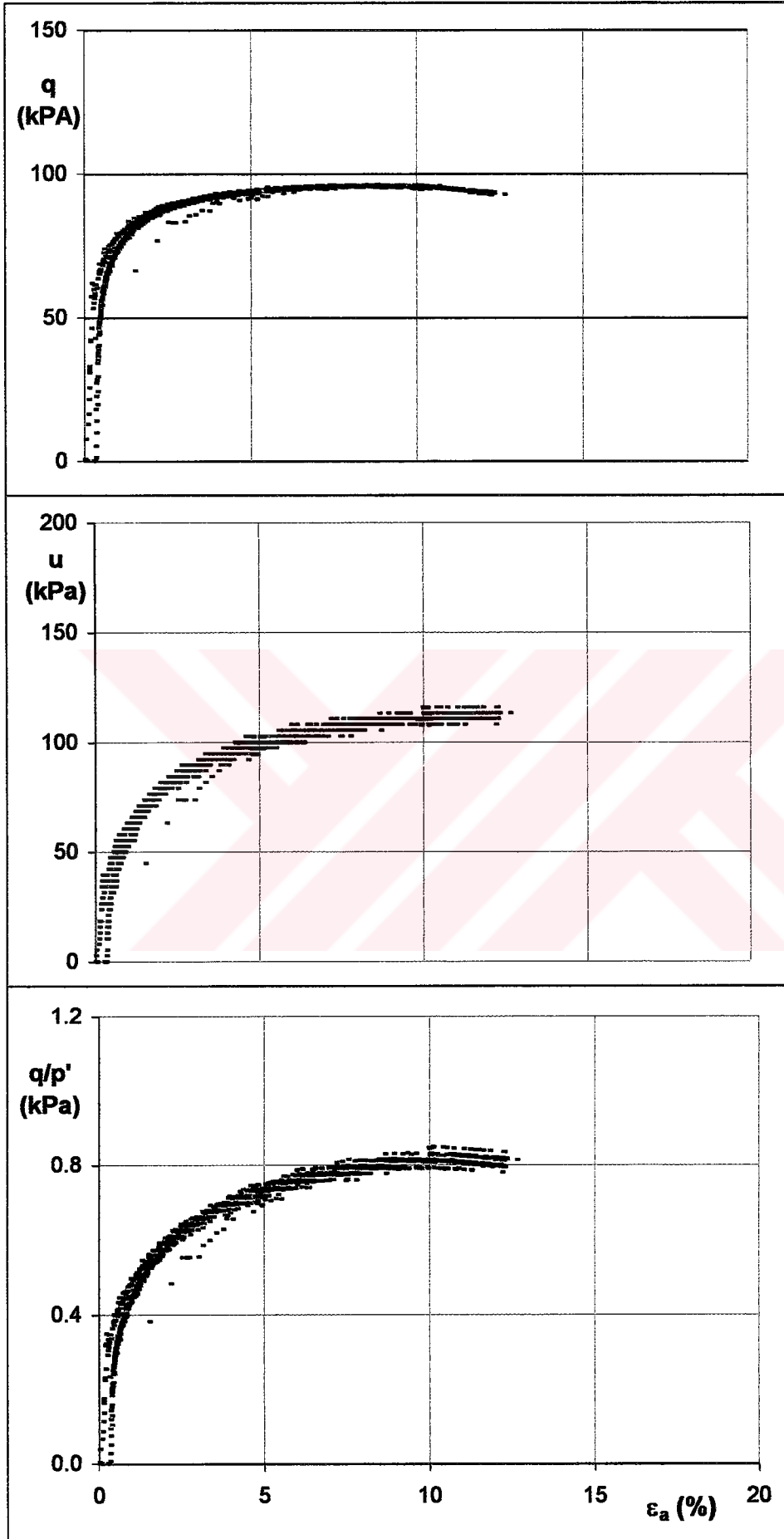
Şekil B.6 N20 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 294 kPa)



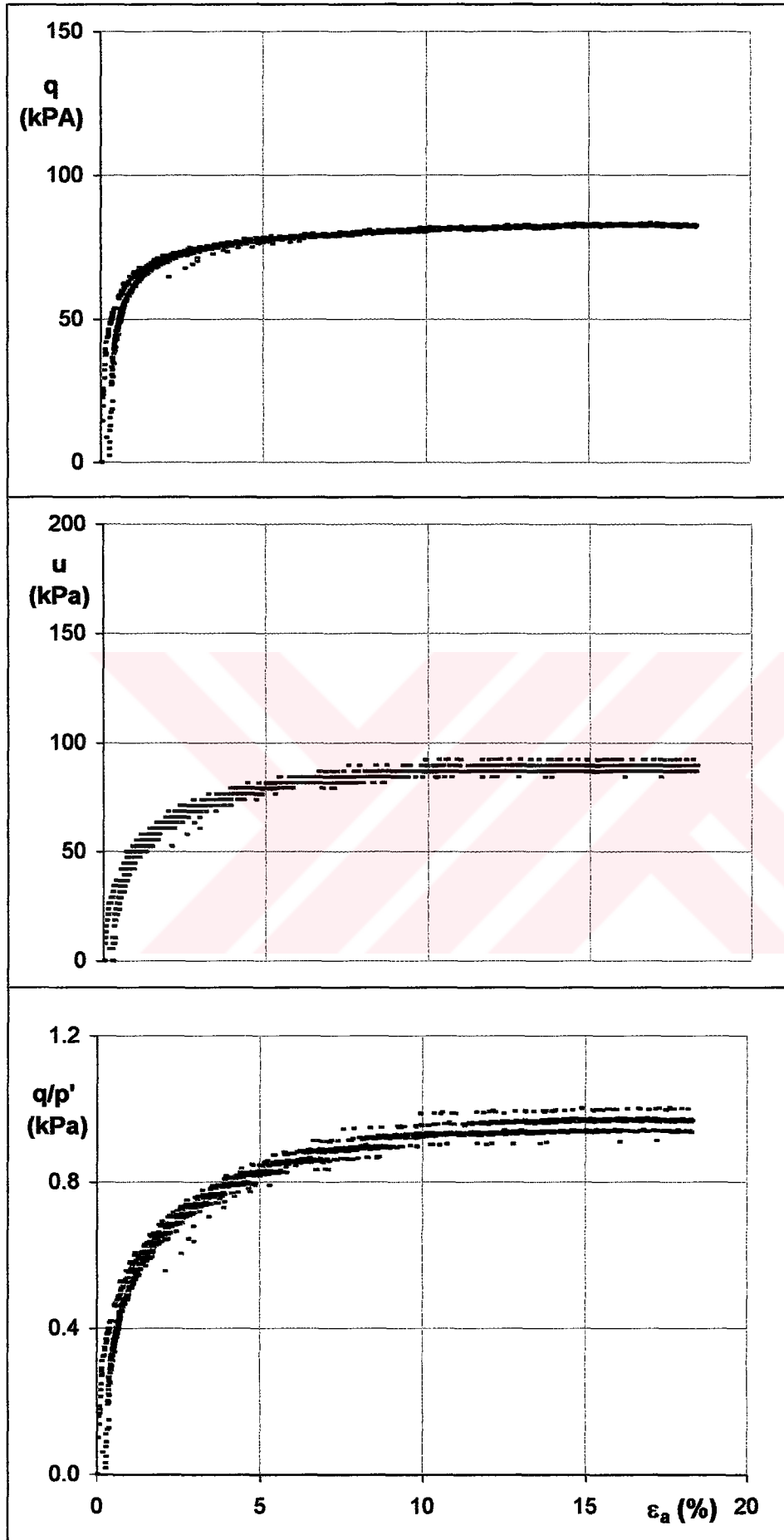
Şekil B.7 N21 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 294 kPa)



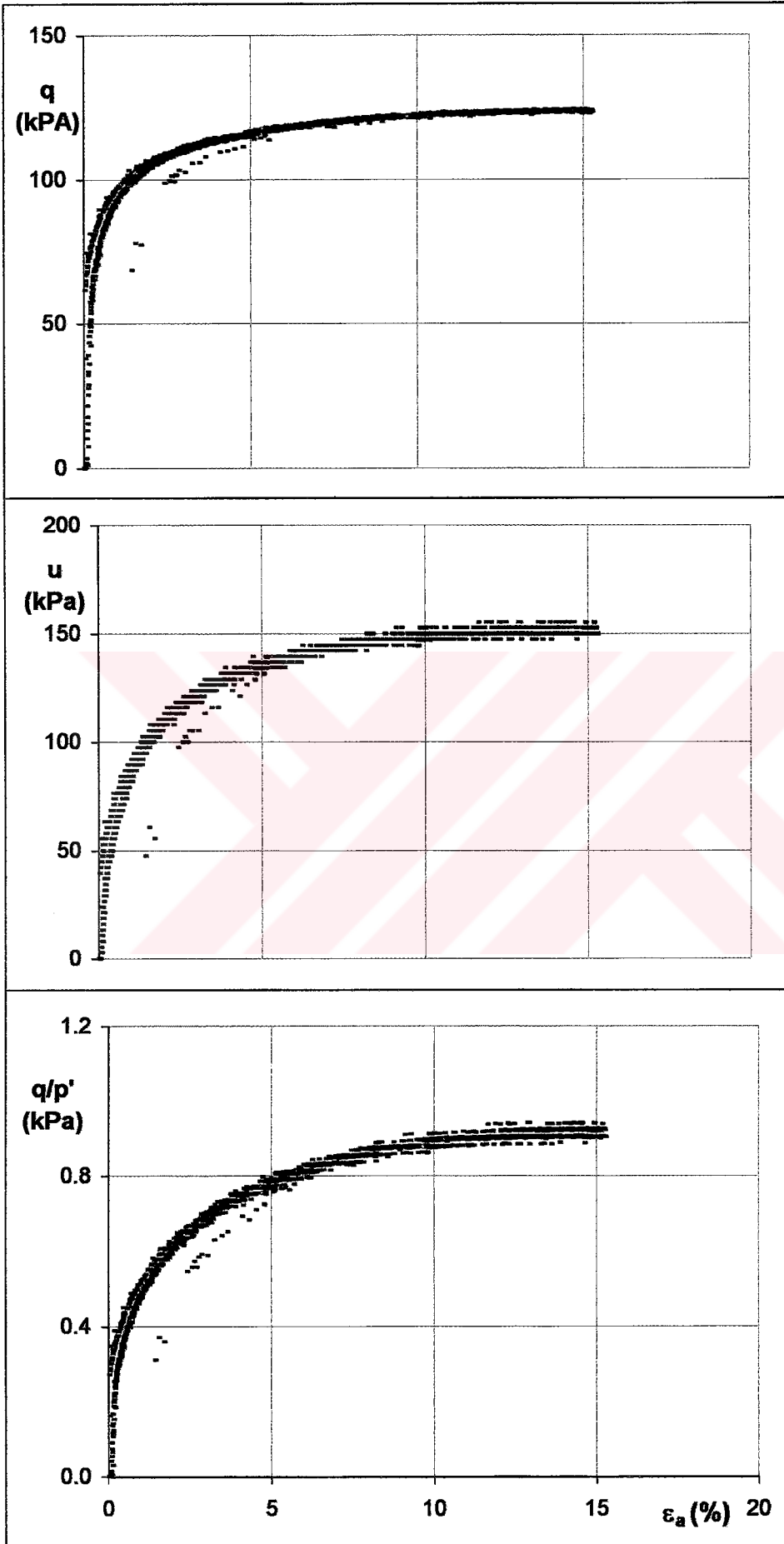
Şekil B.8 N22 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 196 kPa)



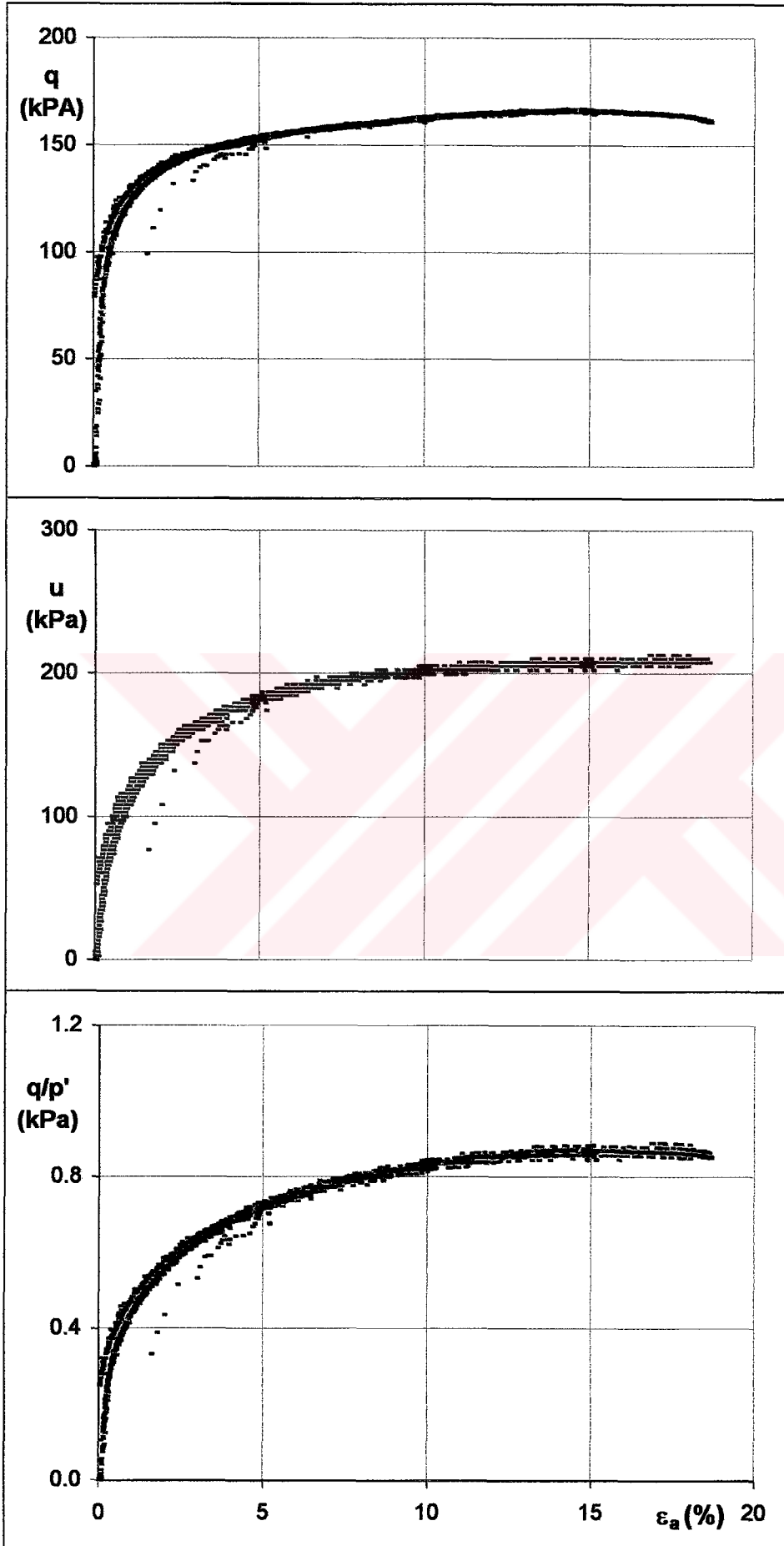
Şekil B.9 N23 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 196 kPa)



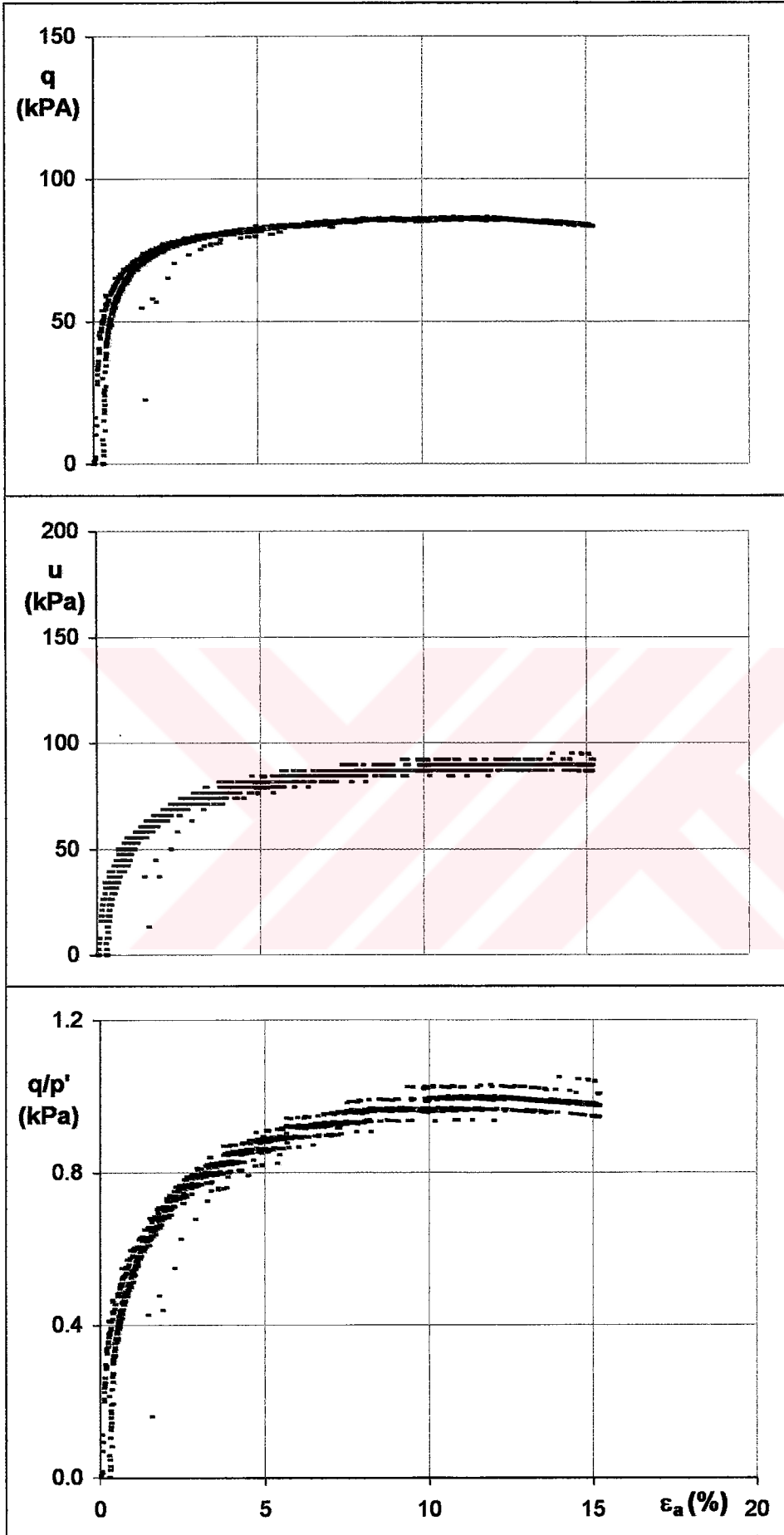
Şekil B.10 N25 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 147 kPa)



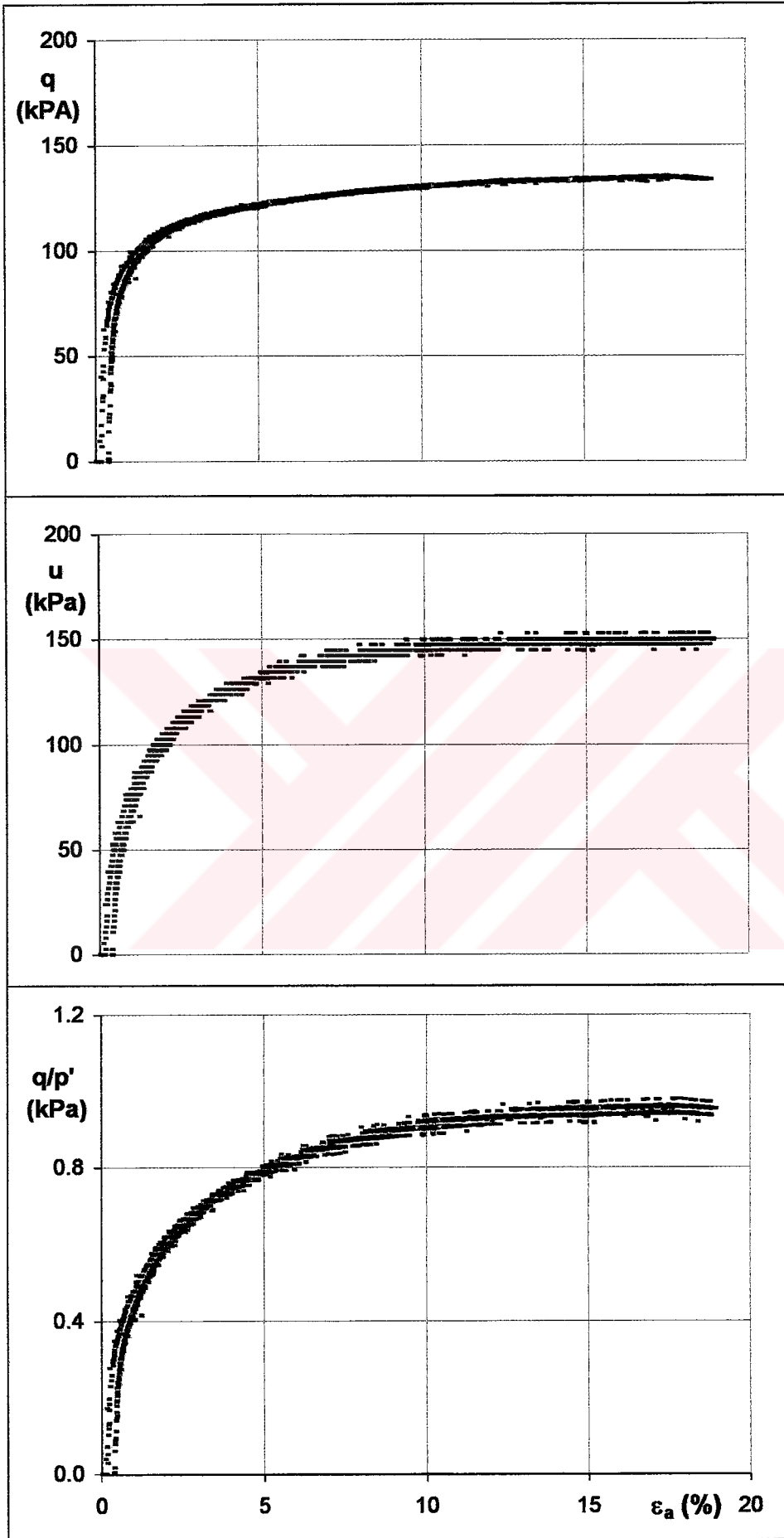
Şekil B.11 N26 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 245 kPa)



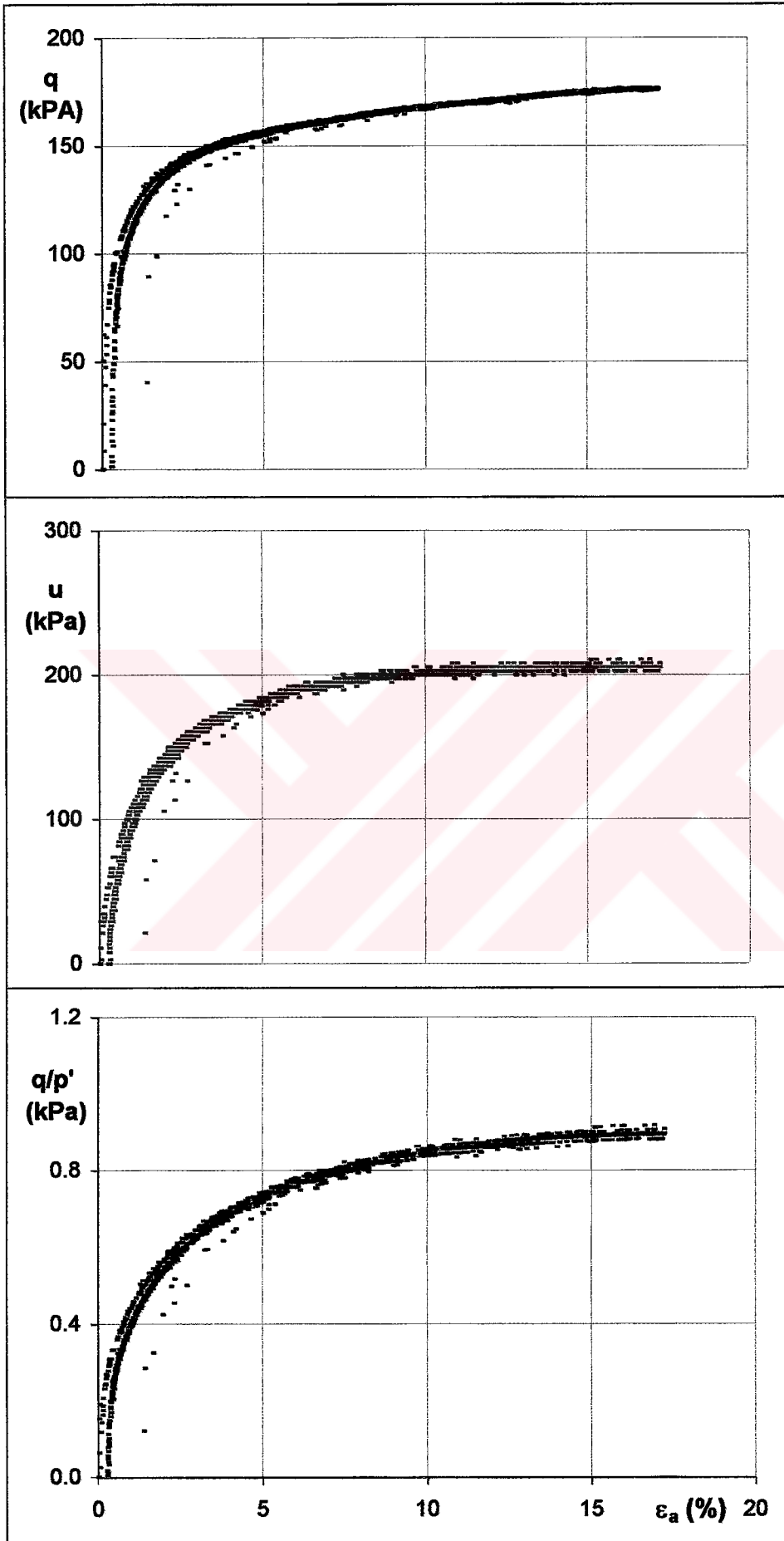
Şekil B.12 N27 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 343 kPa)



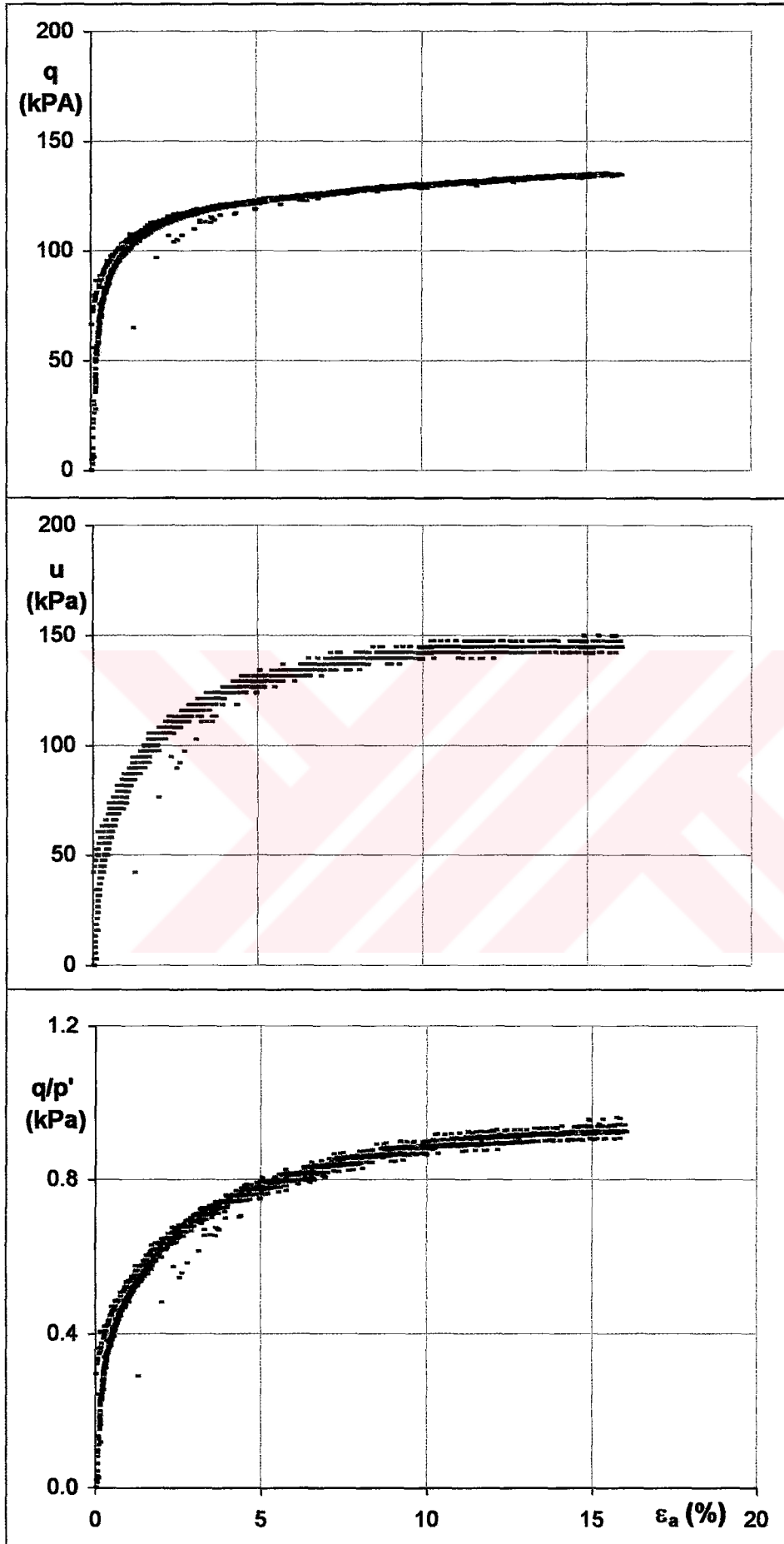
Şekil B.13 N28 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 147 kPa)



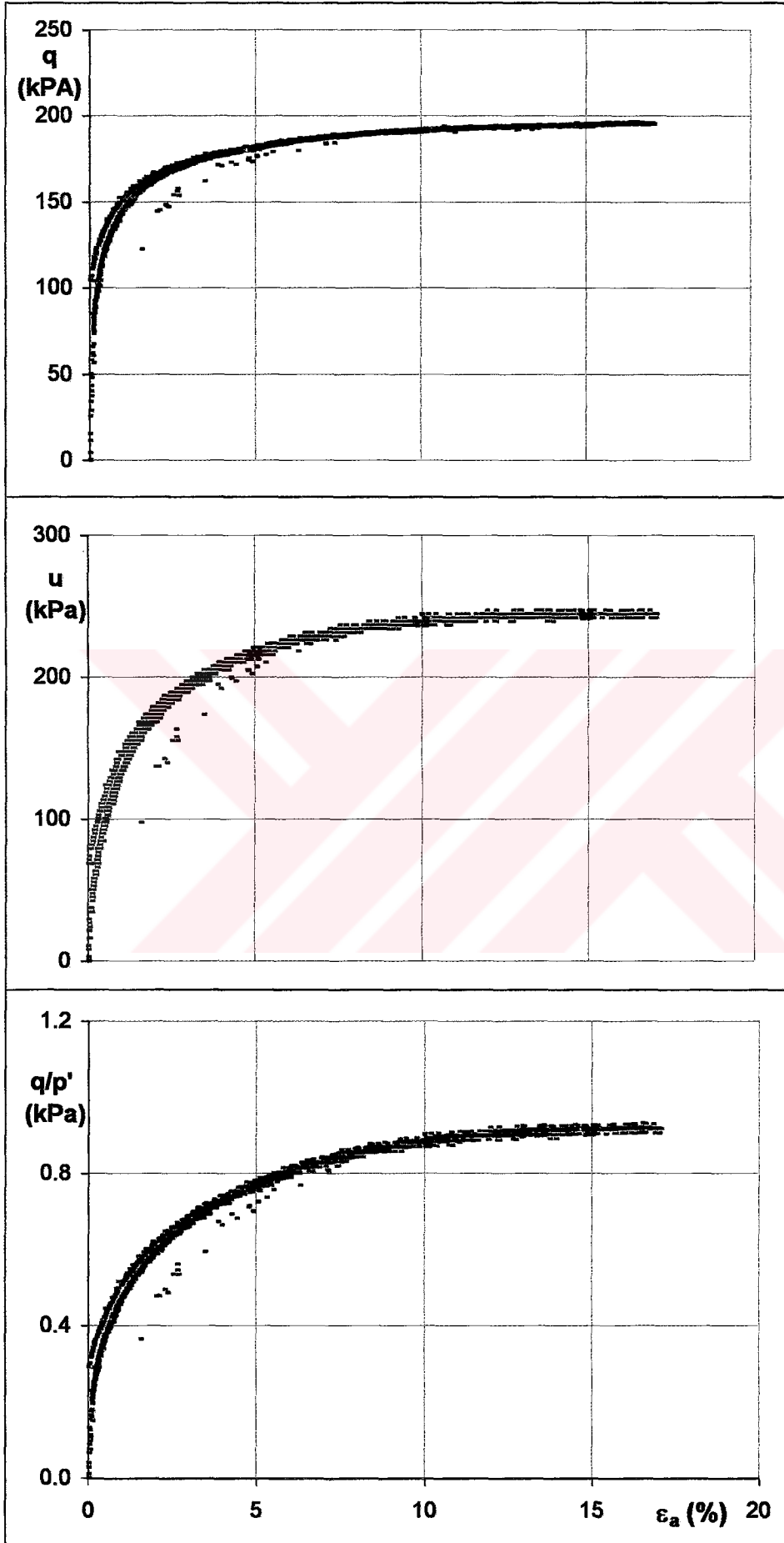
Şekil B.14 N29 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 245 kPa)



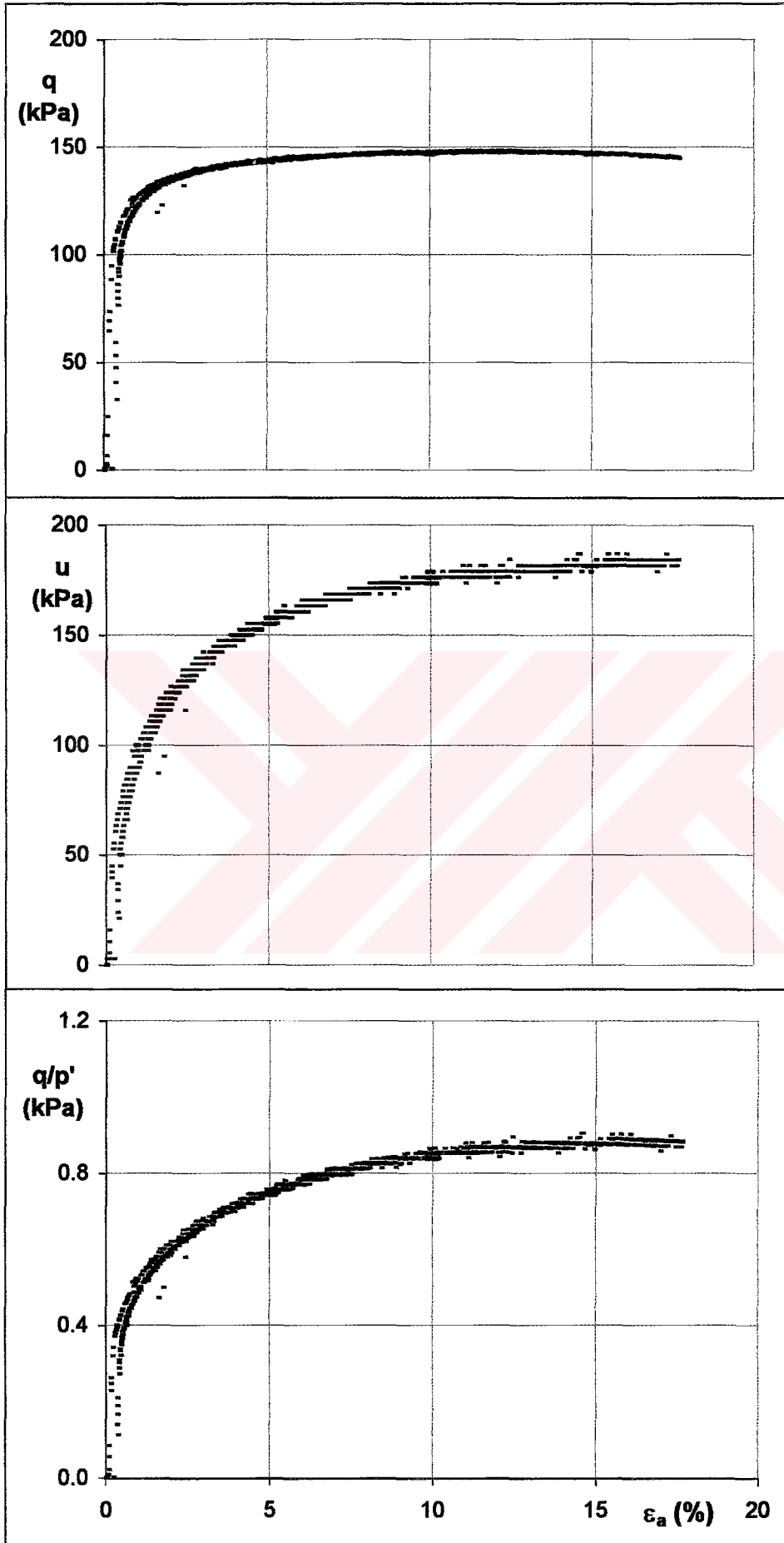
Şekil B.15 N30 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 343 kPa)



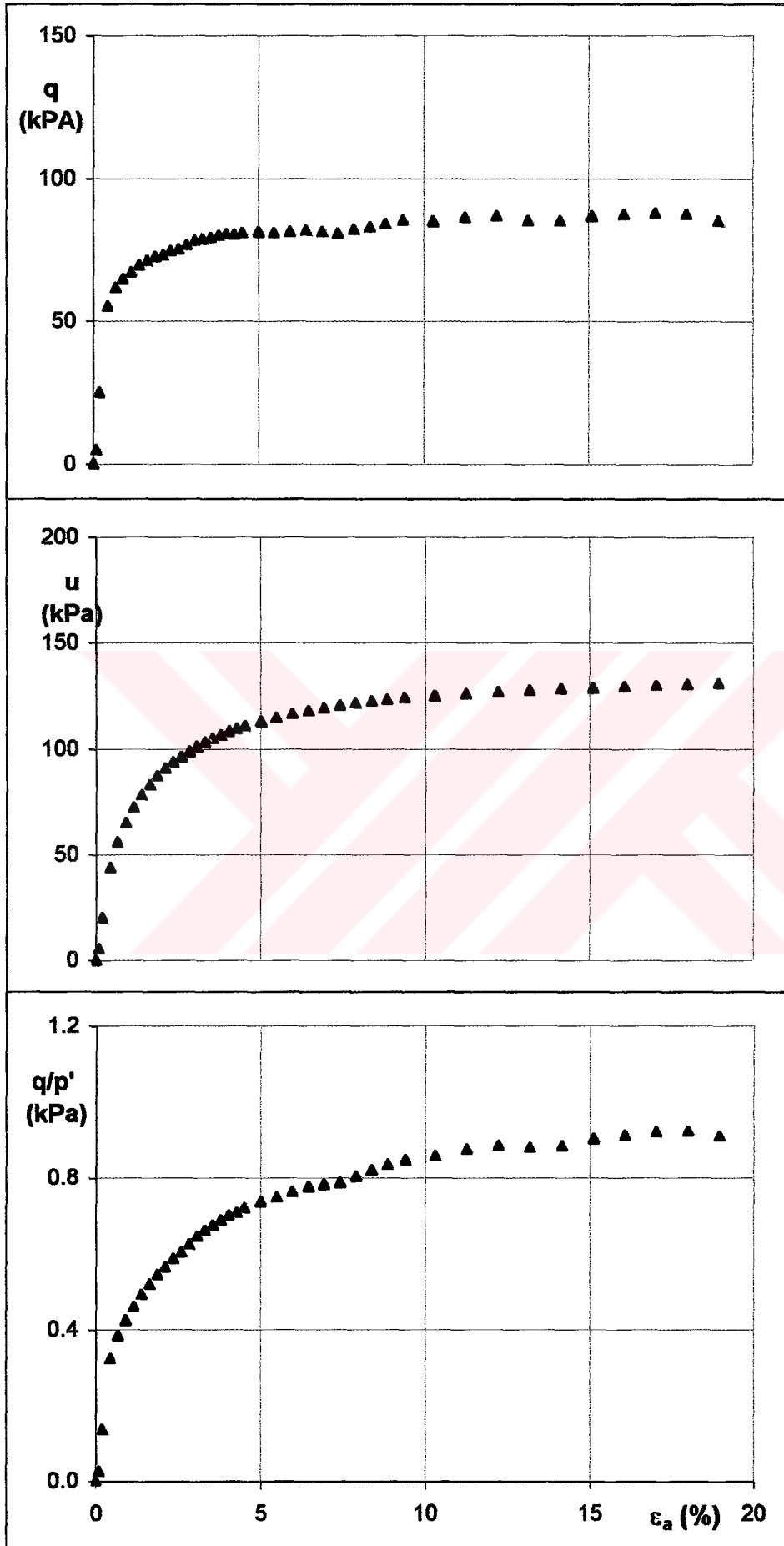
Şekil B.16 N31 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 245 kPa)



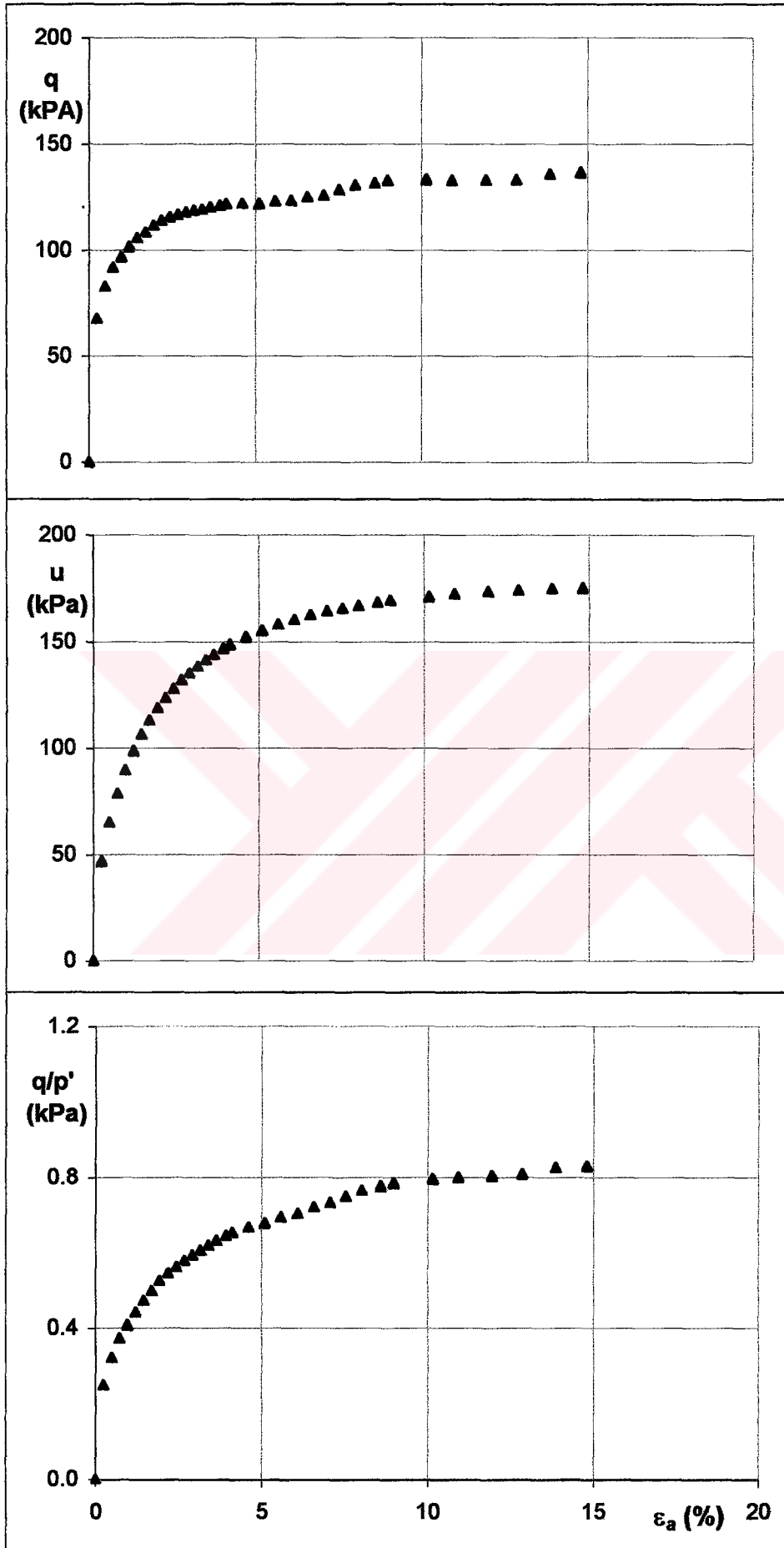
Şekil B.17 N32 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 392 kPa)



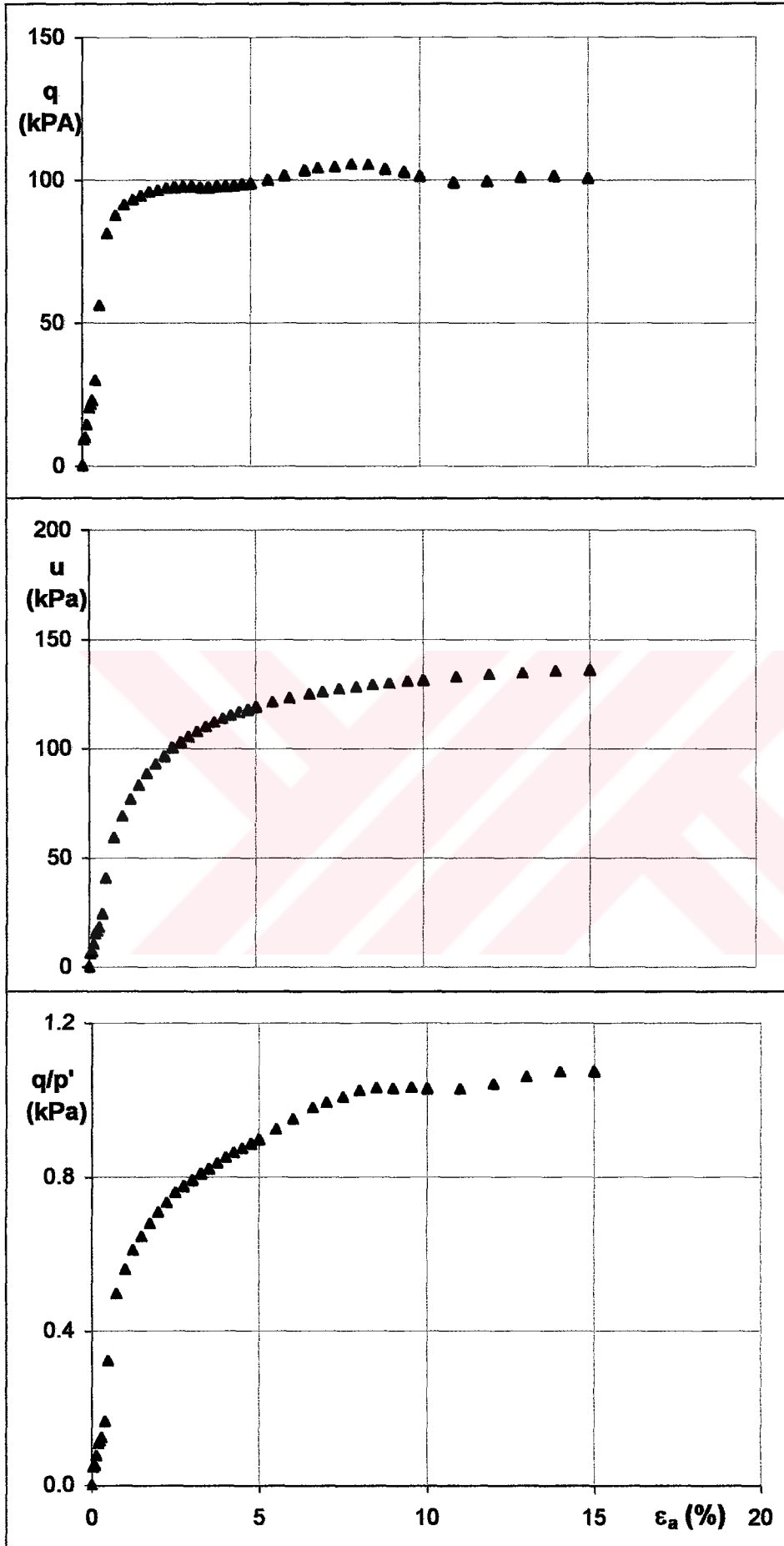
Şekil B.18 N11 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 294 kPa)



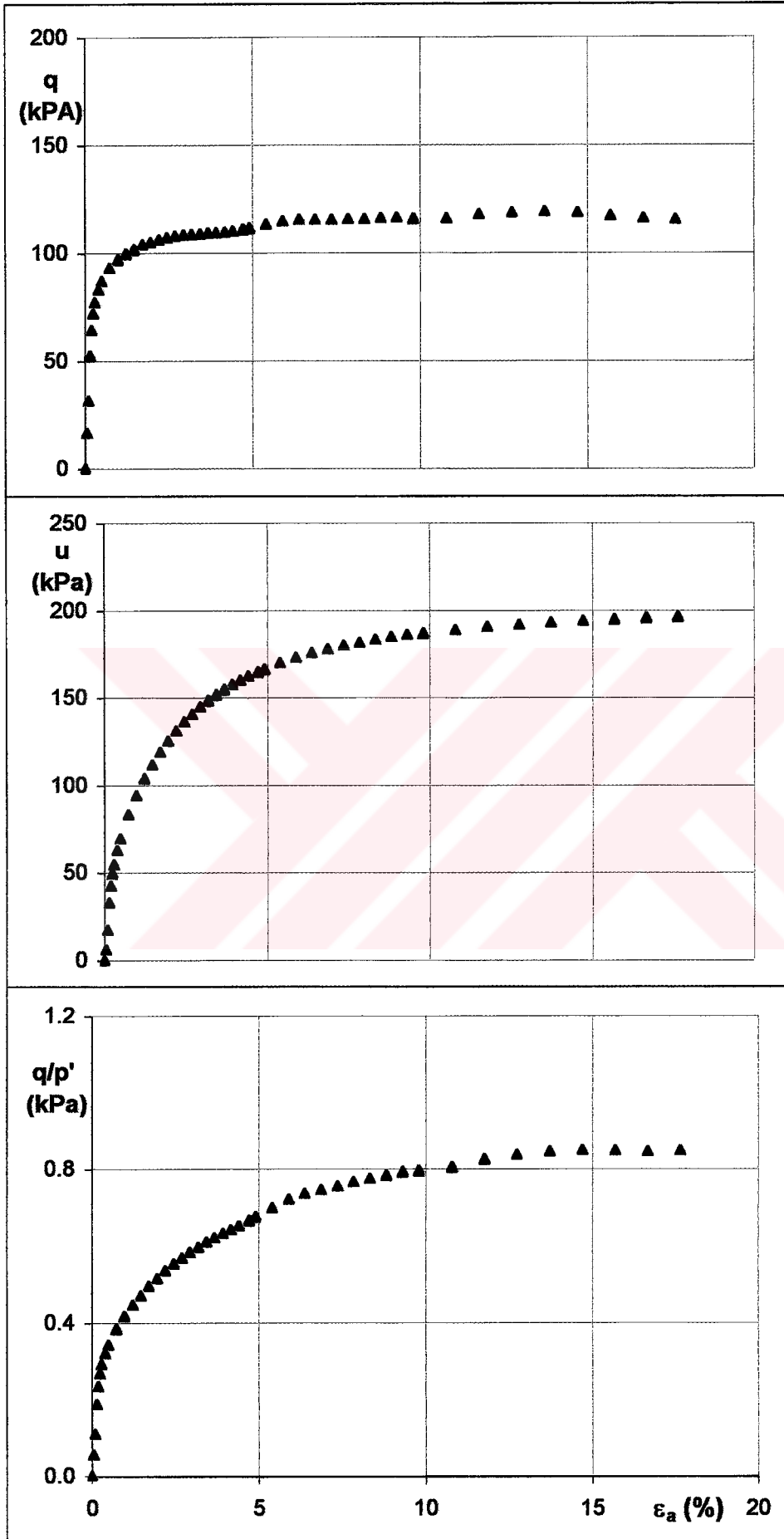
Şekil B.19 N1 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 196 kPa)



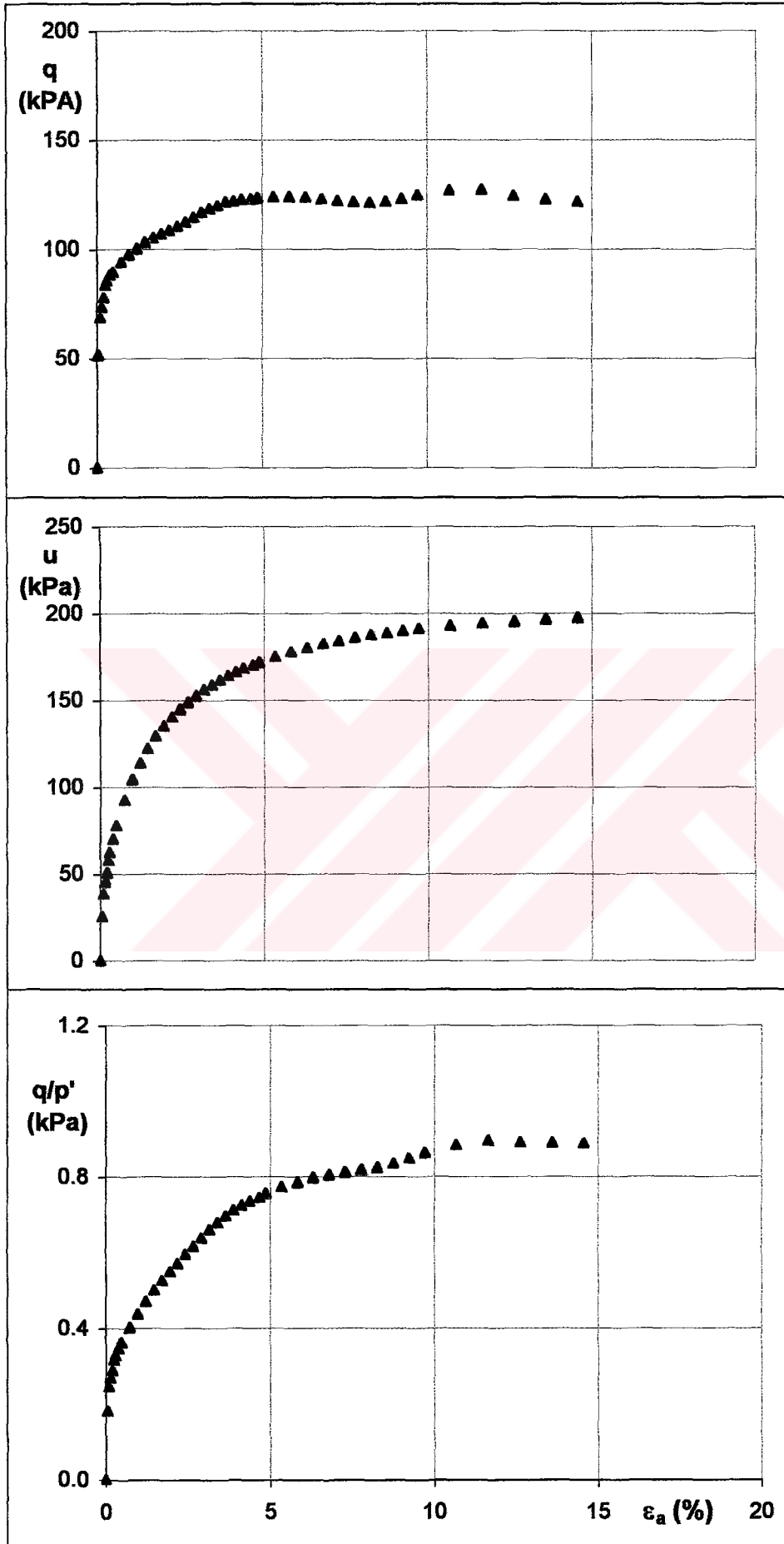
Şekil B.20 N2 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 294 kPa)



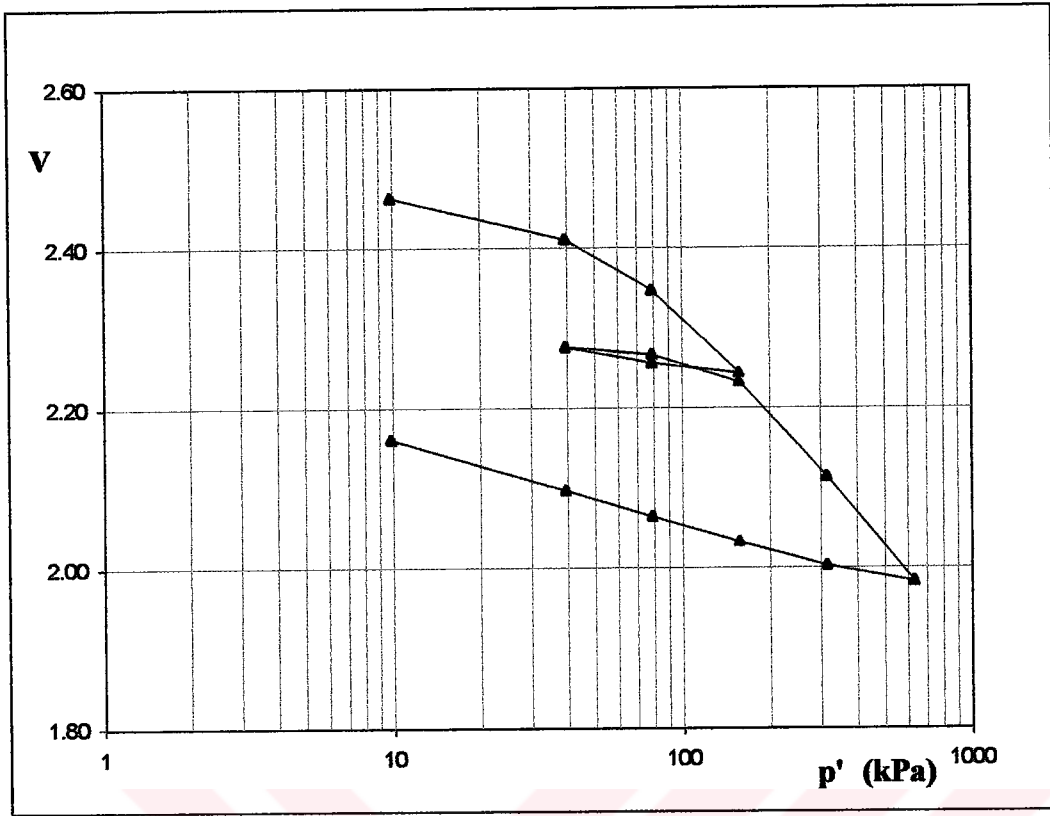
Şekil B.21 N4 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 196 kPa)



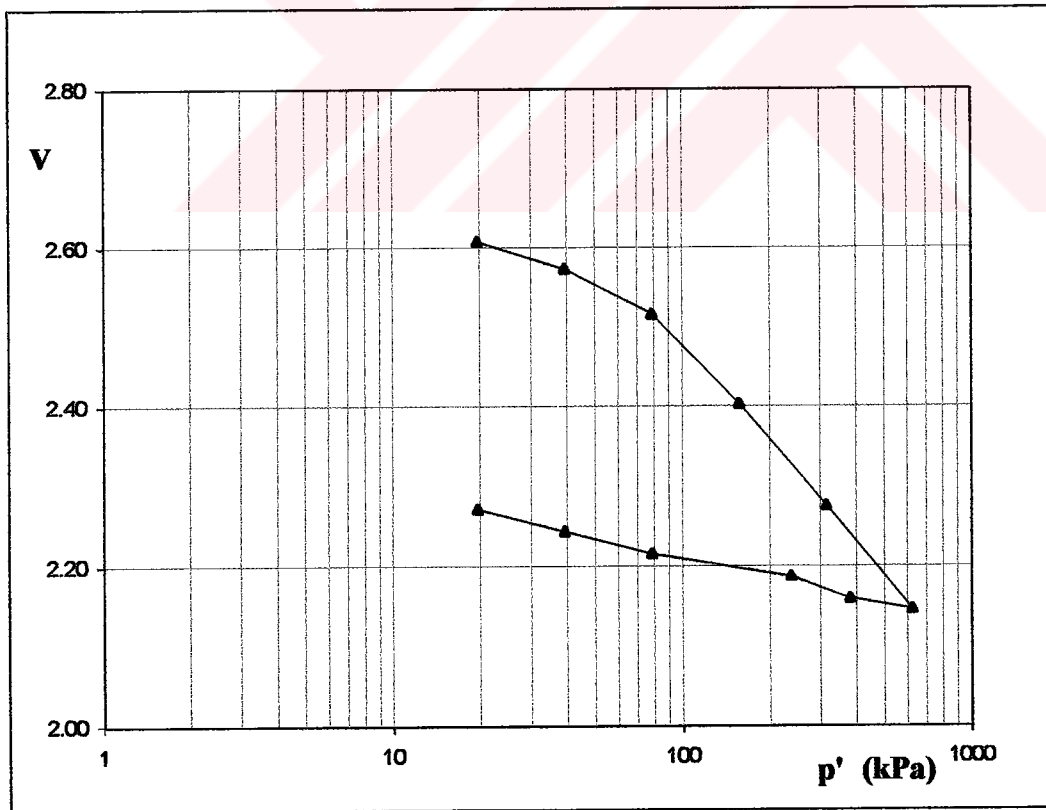
Şekil B.22 N5 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 294 kPa)



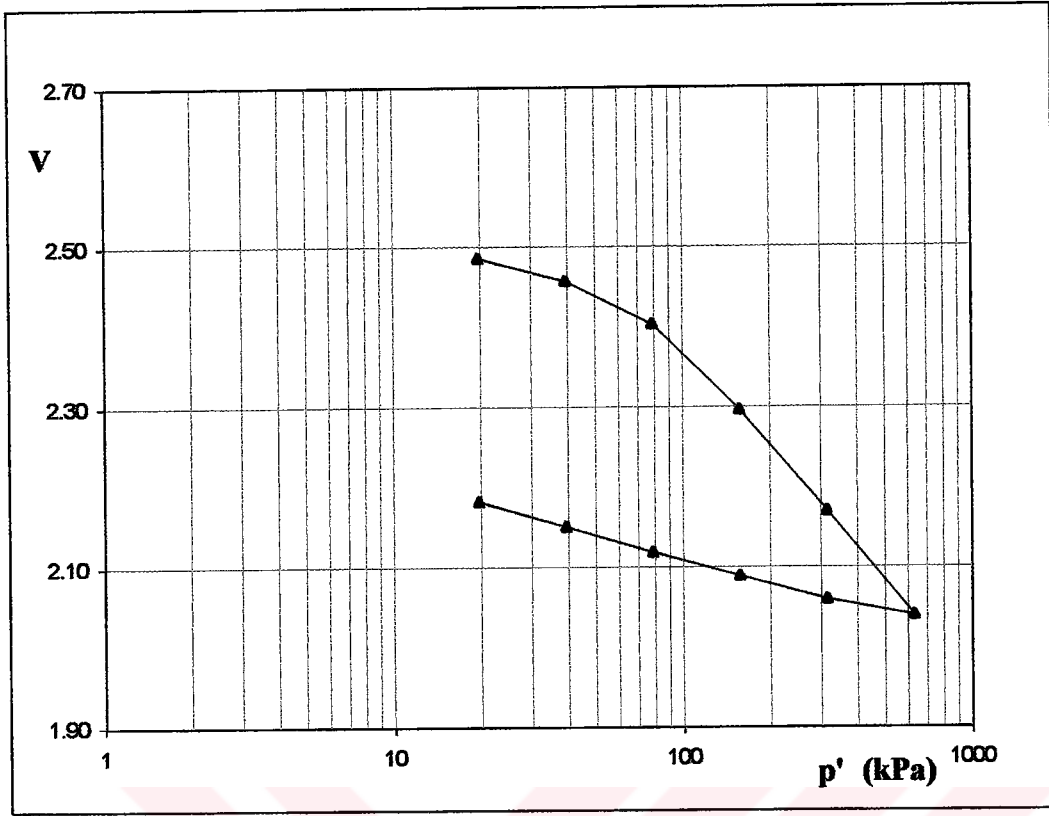
Şekil B.23 N6 nolu numuneye ait deney eğrileri
(çevre basıncı 294 kPa)



Şekil B.24 3 nolu ödometre numunesine ait deney eğrisi



Şekil B.25 6 nolu ödometre numunesine ait deney eğrisi



Şekil B.28 9 nolu ödometre numunesine ait deney eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Aslı Kurtuluş 1975 yılında İstanbul'da doğdu. 1993 yılında Kadıköy Anadolu Lise'sini bitirerek İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1997 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak inşaat mühendisi oldu. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik Programı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl Geoteknik Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak girdi. Halen bu göreve devam etmektedir.

