

175295

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNCE DANELİ ZEMİNLERDE GERİLME BOŞALMASINDAN
KAYNAKLANAN ÖRSELENMENİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Hüseyin Suha AKSOY
(501962012)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Şubat 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Mayıs 2004**

**Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU

Prof. Dr. Atilla ANSAL (B.Ü.)

Prof. Dr. Gökhan BAYKAL (B.Ü)

Prof. Dr. Mete İNCECİK (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında değerli bilgileri ile bana yol gösteren, destek olan danışmanım Prof. Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bana gösterdikleri ilgi ve sabırdan dolayı bütün laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederim. Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY'a, Dr. Recep ÖZAY'a, Yük. Müh. Gökhan ÇEVİKBİLEN'e, Yük.Müh. Sebahat GÖK'e, Yük. Müh. Aslı KURTULUŞ'a, ve Yük. Müh. Atila SEZEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca beni her zaman yüreklendiren eşim Elif AKSOY'a ve hayatımın her anında beni desteklemiş olan sevgili anneme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs, 2004

Hüseyin Suha AKSOY



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. İNCE DANELİ ZEMİNLERDE ÖRSELENMENİN ETKİSİ	4
2.1 Giriş	4
2.2 Örselenme ve Gerilme Boşalmasının Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar	4
2.3 Maksimum kayma modülünün belirlenmesi ile ilgili çalışmalar	22
2.4 Sonuç	25
3. KULLANILAN MALZEME DENEY SİSTEMİ VE DENEYLER	26
3.1 Giriş	26
3.2 Malzeme	26
3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyleri	26
3.3.1 Numune hazırlanması	30
3.3.1.1 Rowe hücresi	30
3.3.2 Üç eksenli deneyin kurulması	33
3.3.2.1 Üç eksenli hücrede su ve hava kaçakları	35
3.3.2.2 Anizotropik konsolidasyon	37
3.3.2.2 Ölü yük hesapları	38
3.3.3 Deney yöntemi	39
3.3.4 Hesaplamalar	41
3.4 Burulmalı Üç Eksenli Deney Sistemi	43
3.4.1 Deney Yöntemi	46
3.4.2 Hesaplamalar	48
3.4.2.1 Dalga denklemi	48
3.4.2.2 Kayma Modülünün Hesaplanması	51
3.4.2.3 Deformasyonların hesaplanması	53
3.4.3 Sistemin kalibrasyonu	55
3.4.4 Serbest titreşim deneyi üzerine düşünceler	56
3.5 Deney sonuçları	59
3.5.1 Birinci grup deneyler	60
3.5.2 İkinci grup deneyler	65
3.5.3 Üçüncü grup deneyler	69
3.5.4 Yapılan diğer deneyler	72
3.3 Sonuç	72

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	74
4.1 Giriş	74
4.2 Birinci Gurup Deneyler	74
4.2.1 Birinci gurup arazi eşdeğeri numunelerin özellikleri	74
4.2.2 Birinci gurup laboratuvar numunelerinin özellikleri	82
4.2.2 Birinci gurup arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması	87
4.3 İkinci Gurup Deneyler	89
4.3.1 İkinci gurup arazi eşdeğeri numunelerin özellikleri	91
4.3.2 İkinci gurup laboratuvar numunelerinin özellikleri	93
4.3.3 İkinci gurup arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması	97
4.4 Üçüncü Gurup Deneyler	100
4.4.1 Üçüncü gurup arazi eşdeğeri numunelerinin özellikleri	101
4.4.2 Üçüncü gurup laboratuvar numunelerinin özellikleri	105
4.4.3 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması	108
4.5 Maksimum Kayma Modülü ve Etki Eden Faktörler	112
4.6 Sonuç	116
5. SONUÇLAR	118
KAYNAKLAR	125
EKLER	132
EK A. Kalibrasyonlar	133
EK B. Kullanılan Yardımcı Programlar	139
EK C. Deney Grafikleri	141
ÖZGEÇMİŞ	203

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. : Üç eksenli deney sisteminde kullanılan cihazların özellikleri.....	29
Tablo 3.2. : Üç eksenli deney numunelerinin başlangıç koşulları.....	34
Tablo 3.3. : Anizotropik yükleme ve boşaltma adımları.....	40
Tablo 3.4. : Alüminyum çubuğun özellikleri.....	55
Tablo 3.5. : Birinci grup deneylerin sonuçları.....	61
Tablo 3.6. : İkinci grup deneylerin sonuçları.....	65
Tablo 3.7. : Üçüncü grup deneylerin sonuçları.....	69
Tablo 3.8. : Kayma modülünün değişimi için yapılan deneyler.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Numunelerin gerilme şekil değiştirme ilişkileri (a) normal konsolide (b) aşırı konsolide (Broms ve Ratnam, (1963).....	5
Şekil 2.2 : Humpries ve Wahls'ın (1968) kaolin ve bentonit numunelerde elde ettikleri deney sonuçları.....	7
Şekil 2.3 : G_{50}/S_u oranının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi (Ladd ve Edgers, 1972).....	7
Şekil 2.4 : Konsolidasyon sırasında kayma modülünün değişimi (Drnevich ve Massarsch 1979).....	10
Şekil 2.5 : Kayma modülünün gerilme boşalması ve şişme nedeniyle azalımı (Drnevich ve Massarsch 1979).....	10
Şekil 2.6 : Normalize kayma mukavemeti aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).....	11
Şekil 2.7 : Normalize kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).....	12
Şekil 2.8 : Plastik killer için konsolidasyon basıncı ve gerilme tarihçesine bağlı olarak kayma modülünün değişimi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).....	13
Şekil 2.9 : Birim kayma ve AKO değerlerine bağlı olarak normalize edilmiş kayma modülünün değişimi. (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).....	13
Şekil 2.10 : Kaolin ve illit numuneler için su muhtevası drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Kirkpatrick ve Khan, 1984).....	15
Şekil 2.11 : Anizotropik şartlarda konsolide edilmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı değişimleri (a) normal konsolide (b) aşırı konsolide (Graham ve Li, 1984).....	16
Şekil 2.12 : Aşırı ve normal konsolide numuneler için boşluksuyu basıncı-zaman ve oturma-zaman ilişkisi (Shogaki ve Kaneko 1994).....	18
Şekil 2.13 : Lacasse'ın (2001) izotropik (CIUC) ve anizotropik (CAUC) üç esenli deneylerinin sonuçları.....	21
Şekil 2.14 : Lacasse'ın (2001) "tam" (18 artımlı) ve basitleştirilmiş (2 artımlı) K_0 üç eksenli deneylerinin sonuçları	22
Şekil 2.15 : Normal konsolide ve aşırı konsolide numunelerin kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi (Viggiani ve Atkinson, 1995).....	24
Şekil 3.1 : Burulmalı üç eksenli deney sistemi şeması.....	27
Şekil 3.2 : Eskişehir kilinin granülometri eğrisi.....	28
Şekil 3.3 : Data logger (ADU).....	29
Şekil 3.4 : Numune hazırlamada kullanılan Rowe hücresi.....	31
Şekil 3.5 : Tipik bir Rowe hücresi konsolidasyonunun oturma-zaman ilişkisi.....	32

Şekil 3.6 :	Çalışmada kullanılan Rowe hücresinin fotoğrafı.....	32
Şekil 3.7 :	Zemin karışımından Rowe hücresinden konsolide edilerek hazırlanan tipik bir numunenin su muhtevası dağılımı.....	33
Şekil 3.8 :	Kalıp yardımıyla numune boyunun kısaltılması.....	35
Şekil 3.9 :	Helezon biçiminde yan drenler sarılmış tipik bir numune.....	35
Şekil 3.10 :	Rulmanlı makara	38
Şekil 3.11 :	Kesme deneyi sonunda numunelerin su muhtevası dağılımı.....	42
Şekil 3.12 :	Zeevaert (1967) tarafından kullanılan burulmalı üç eksenli sistemi.....	44
Şekil 3.13 :	Üst başlık, hücre pistonu ve bağlama parçası.....	45
Şekil 3.14 :	Alt ve üst başlıklar ve bu başlıklara eklenen metal tırnaklar.....	45
Şekil 3.15 :	Deney sisteminin genel görünüşü.....	46
Şekil 3.16 :	Piston ile eylemsizlik kirişinin beraber hareket etmesini sağlayan vidalı sistem.....	47
Şekil 3.17 :	Serbest titreşim hareketini ölçmekte kullanılan hassas deplasman ölçer ve verniyerli kompas.....	48
Şekil 3.18 :	Tipik bir serbest titreşim hareketi.....	48
Şekil 3.19 :	Tek serbestlik dereceli sistem.....	49
Şekil 3.20 :	Periyodun ve yerdeğiştirmelerin belirlenmesi.....	52
Şekil 3.21 :	Analitik olarak polar kütle eylemsizlik momentlerinin hesabı için kabul edilen giriş geometrisi.....	53
Şekil 3.22 :	Kayma deformasyonunun belirlenmesi.....	55
Şekil 3.23 :	Alüminyum kalibrasyon çubuğu.....	56
Şekil 3.24 :	Alüminyum kalibrasyon çubuğu kullanılarak elde edilen eğriler..	57
Şekil 3.25 :	Y14 deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.....	63
Şekil 3.26 :	YT19 deneyinin gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.....	64
Şekil 3.27 :	YAO32Y deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.....	66
Şekil 3.28 :	YAO35 deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.....	67
Şekil 3.29 :	YAO32Y deneyinin boşluk suyu basıncı değişimi.....	68
Şekil 3.30 :	YAO35 deneyinin boşluk suyu basıncı değişimi.....	68
Şekil 3.31 :	Y8K deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ,gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.....	70
Şekil 3.32 :	Y12K deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ,gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.....	71
Şekil 3.33 :	Maksimum kayma modülünün hücre basıncı ile değişimi.....	73
Şekil 4.1 :	Arazi eşdeğeri numuneler için kayma mukavemetinin boşluk oranı ile ilişkisi.....	75
Şekil 4.2 :	Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-deney sonu su muhtevası ilişkisi.....	75
Şekil 4.3 :	Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.....	76
Şekil 4.4 :	Arazi eşdeğeri numunelerde normalize edilmiş kayma mukavemetinin boşluk oranı ile değişimi.....	76
Şekil 4.5 :	Normalize kayma mukavemeti ile K katsayısı ilişkisi.....	77
Şekil 4.6 :	Deviatorik gerilme ile normalize edilmiş boşluk suyu basıncının oktaedral gerilme ile değişimi.....	78

Şekil 4.7 :	Maksimum kayma modülü ile oktaedral gerilmenin ilişkisi.....	78
Şekil 4.8 :	Kayma mukavemeti ile normalize edilmiş kayma modülünün boşluk oranı ile değişimi.....	79
Şekil 4.9 :	Arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma modülleri ile Hardin'in denklemi kullanılarak elde edilen maksimum kayma modüllerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 4.10 :	İzotropik olarak yüklenmiş arazi eşdeğeri numunelerinden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.....	80
Şekil 4.11 :	Anizotropik olarak yüklenmiş ve $K=0.75$ olan arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.....	81
Şekil 4.12 :	Anizotropik olarak yüklenmiş ve $K=0.6$ olan arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.....	81
Şekil 4.13 :	Anizotropik olarak yüklenmiş ve $K=0.56$ olan arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.....	81
Şekil 4.14 :	Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	82
Şekil 4.15 :	Normalize edilmiş kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	83
Şekil 4.16 :	Normalize kayma mukavemeti ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.....	85
Şekil 4.17 :	Kayma mukavemeti kıvam indisi ilişkisi.....	84
Şekil 4.18 :	Deviatorik gerilme ile normalize edilmiş boşluk suyu basıncının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi ve Craig (1992) tarafından aynı ilişkinin verilşi.....	85
Şekil 4.19 :	Laboratuvar numunelerinin G_{maks} konsolidasyon basıncı ilişkisi..	85
Şekil 4.20 :	Laboratuvar numunelerinde G_{maks} boşluk oranı ilişkisi.....	86
Şekil 4.21 :	Normalize kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.....	86
Şekil 4.22 :	Normal ve aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma gerilmelerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	87
Şekil 4.23 :	Normal ve aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	88
Şekil 4.24 :	Arazi eşdeğeri numuneler için kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	90
Şekil 4.25 :	Arazi eşdeğeri numunelerde normalize kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	91
Şekil 4.26 :	Kayma mukavemeti aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.....	91
Şekil 4.27 :	Normalize kayma mukavemeti-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.	92
Şekil 4.28 :	Kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.....	92
Şekil 4.29 :	Maksimum kayma modülü-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.....	93
Şekil 4.30 :	Normalize kayma modülü-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi	93
Şekil 4.31 :	Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	94
Şekil 4.32 :	Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.....	95
Şekil 4.33 :	Laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti boşluk oranı ilişkisi.....	95
Şekil 4.34 :	Laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.....	96
Şekil 4.35 :	Laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	97

Şekil 4.36 :	Laboratuvar numunelerinin normalize kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	97
Şekil 4.37 :	Arazi ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti oranının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	98
Şekil 4.38 :	Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kırılma anındaki boşluk suyu basıncı değerleri.....	99
Şekil 4.39 :	Normalize boşluksuyu basıncının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	99
Şekil 4.40 :	Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma modülü oranının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	100
Şekil 4.41 :	Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	101
Şekil 4.42 :	Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.....	102
Şekil 4.43 :	Arazi eşdeğeri numunelerde normalize kayma mukavemeti boşluk oranı ilişkisi.....	102
Şekil 4.44 :	K_0 şartlarında normal konsolide olmuş numuneler için Mohr daireleri.....	103
Şekil 4.45 :	Farklı K değerleri için hesaplanmış kayma mukavemeti açısı değerleri.....	103
Şekil 4.46 :	Maksimum kayma modülü ile oktaedral gerilme ilişkisi.....	104
Şekil 4.47 :	Maksimum kayma modülü ile boşluk oranı ilişkisi.....	104
Şekil 4.48 :	Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	105
Şekil 4.49 :	Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.....	106
Şekil 4.50 :	Laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.....	106
Şekil 4.51 :	Laboratuvar numunelerinin deney sonuçları kullanılarak çizilen Mohr diyagramları.....	107
Şekil 4.52 :	Laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülü ile oktaedral gerilme ilişkisi.....	108
Şekil 4.53 :	Laboratuvar numunelerinin kayma modülü boşluk oranı ilişkisi...	108
Şekil 4.54 :	Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kırılma anındaki boşluk suyu basınçları.....	109
Şekil 4.55 :	Normalize boşluksuyu basıncının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.....	110
Şekil 4.56 :	Normalize kayma mukavemeti ile boşluk oranı ilişkisi.....	110
Şekil 4.57 :	Normalize kayma modülü-boşluk oranı ilişkisi.....	111
Şekil 4.58 :	Kayma mukavemeti oranının oktaedral gerilme ile değişimi.....	111
Şekil 4.59 :	Arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin maksimum kayma modülü oranı ile oktaedral gerilmenin değişimi.....	112
Şekil 4.60 :	A rijitlik katsayısının boşluk oranı ile değişimi.....	114
Şekil 4.61 :	Normalize başlangıç kayma modülü efektif çevre basıncı ilişkisi.	114
Şekil 4.62 :	Aşırı konsolide numuneler için normalize başlangıç kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.....	115
Şekil 4.63 :	(4.8) bağıntısının literatürdeki diğer bağıntılarla karşılaştırılması.	116

SEMBOL LİSTESİ

A	:Numune kesit alanı
ADU	:Dijital veri toplama birimi
AK	:Aşırı Konsolide
C	:Viskoz sönüm katsayısı
C_c	:Kritik sönüm oranı
c	:Kohezyon
D	:Sönüm oranı
d	:Zemin numunesinin çapı
e	:Boşluk oranı
ε	:Eksenel birim şekil değiştirme
E	:Elastisite modülü
φ	:Kayma mukavemeti açısı
G_{max}	:Başlangıç kayma modülü
G₅₀	:Sekant kayma modülü
γ	:Kayma birim şekil değiştirmesi
γ_n	:Doğal birim hacim ağırlık
γ_k	:Kuru birim hacim ağırlık
γ_s	:Dane birim hacim ağırlık
I_p	:Zemin numunesinin polar eylemsizlik momenti
J	:Eylemsizlik kirişi ve ölü ağırlıkların polar eylemsizlik momenti
K	:Dönel rijitlik
K₀	:Yatay toprak basıncı katsayısı
L	:Zemin numunesinin yüksekliği
m	:Kütle
NK	:Normal konsolide
OCR	:Aşırı konsolidasyon oranı
PI	:Plastisite indisi
S_u	:Kayma mukavemeti
σ_h	:Hücre basıncı
σ_v	:Düşey basınç
σ_o	:Oktaedral gerilme
T	:Serbest titreşim hareketinin periyodu
τ_{max}	:Maksimum kayma gerilmesi
t	:Zaman
u	:Boşluk suyu basıncı
u_f	:Kırılma anındaki boşluk suyu basıncı
ω_n	:Sönümsüz doğal radyal frekans
w_{başl}	:Konsolidasyon başı su muhtevası
w_{son}	:Deney sonu su muhtevası
z	:Deplasman
z'	:Hız
z''	:İvme

İNCE DANELİ ZEMİNLERDE GERİLME BOŞALMASINDAN KAYNAKLANAN ÖRSELENMENİN İNCELENMESİ

ÖZET

İnce daneli zeminlerde numune örselenmesinin, numunenin alındığı zemini temsil etmemesine neden olduğu bilinmektedir. Numune örselenmesi özellikle yumuşak zeminlerde deney sonuçlarını daha fazla etkilemektedir. Bu nedenle zeminlerin özelliklerinin laboratuvar deneyleriyle daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi zemin projelerinin hem hassasiyetini artıracak hem de daha ekonomik olmalarını sağlayacaktır.

Zemin mühendisliği açısından ince daneli zeminlerde numune örselenmesinin iki ana sebebi olduğu kabul edilmektedir. İlki numune alımı işleminden (delme, numune alma, saklama, çıkartma vs.) kaynaklanan mekanik örselenme, ki belli dikkat gösterildiği takdirde bu tip örselenme miktarının kabul edilebilir düzeyin altında kaldığını kabul edilmektedir, ikincisi ise numunenin üzerinde gerilme boşalması sebebiyle meydana gelen örselenmedir.

Aşırı konsolide killerin, normal konsolide killere göre çok daha karmaşık bir gerilme geçmişine sahip oldukları bilinmektedir. Bu çalışmada, aşırı konsolide killere üzerinde gerilme boşalması nedeniyle meydana gelen örselenmenin etkilerinin ortadan kaldırılmasına yardımcı olacak bir yöntemin bulunması amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmada, zeminin örselenmesi neticesinde özellikle mukavemet parametrelerinin ve -gerilme boşalmasından en fazla etkilendiği bilinen – kayma modülünün değişimi incelenmiştir.

Çalışmanın giriş bölümünde, zeminlerde numune örselenmesinin nedenleri ve örselenme olayının doğası tanımlanmaya çalışılmıştır. Numune örselenmesi olayının iki bileşeni olduğu bu bileşenlerin ilkinin kısaca mekanik örselenme olarak isimlendirilebilecek numune alıcı, taşıma, numune çıkartma gibi sebeplerle meydana gelen örselenme olduğu ve ikinci bileşenin ise numune üzerindeki gerilmelerin kalkması nedeni ile oluşan örselenme olduğu anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca numune alıcı ile numune alımı işleminin laboratuvarda nasıl modellendiği ve bu modelleme için yapılan kabuller anlatılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan deney sisteminden ve deneylerden ana hatları ile bahsedilmiştir.

İkinci bölümde ise literatürde yer alan örselenmenin etkileri üzerine yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Örselenmenin etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış ilk çalışmalardan biri olan Bishop ve Henkel (1957) numune örselenmesinin normal konsolide ve düşük plastisiteli killerde daha fazla etkili olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlara göre az miktarda meydana gelen örselenme sonucunda bile gerilme şekli değiştirme eğrisi değişmekte ve artan örselenme miktarı ile drenajsız mukavemet önemli miktarda yanlış ölçülebilmektedir. Kaolin ve illit numuneler üzerinde deneyler yapan Kirkpatrick ve Khan (1984) ise illit numunelerin çok daha düşük

mukavemete sahip olduğunu ve arazideki gerilme şartlarında (K_0) yeniden konsolidasyonun gerilme boşalmasının etkilerini azaltmak için en iyi yöntem olduğunu belirtmişlerdir. İkinci bölümde ayrıca gerilme boşalması neticesinde maksimum kayma modülünün değişiminin incelendiği çalışmalara da yer verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde bu çalışmada kullanılan malzeme ve deney sistemi tanıtılmıştır. Kullanılan malzeme Eskişehir bölgesinden toz halinde getirtilen plastisite indisi $PI=19\%$ olan kildir. Deneylerde bu kilden üretilmiş karışımın Rowe hücresinde konsolide edilmesi neticesinde elde edilen numuneler kullanılmıştır.

Kullanılan deney sistemi standart bir üç eksenli hücrenin modifiye edilmesi neticesinde üretilen burulmalı üç eksenli sistemdir. Bu sistem daha önce Zeevaert (1967), Özüdoğru (1981), Van Impe (1988) tarafından kullanılan sistemler ile benzerlik göstermektedir. Bu sistemle numuneye 10^{-4} büyüklüğünde kayma birim şekil değiştirmeleri uygulanabilmekte ve bu sayede maksimum kayma modülü belirlenebilmektedir. Sistem numunelerin, anizotropik ($K<1$) gerilme şartlarında konsolide edilebilmelerine de olanak sağlamaktadır. Bu sayede numuneler arazideki (K_0) şartlarında ve daha farklı anizotropik gerilme şartlarında konsolide edilebilmiştir. Numunelere üç eksenli deney uygulanırken eksenel birim boy değişimi, boşluk suyu basınçları ve deviatorik gerilmeler ölçülmekte ve dijital olarak kayıt edilmektedir. Sistemde kayıt birimi olarak ELE marka dijital datalogger kullanılmıştır. Tezin bu bölümünde burulmalı üç eksenli deney sisteminin nasıl kalibre edildiği ve deneyin yapılışı detaylı olarak anlatılmıştır.

Deneyler üç grup halinde yapılmıştır. Birinci grup deneylerde, numuneler farklı gerilme koşullarında (izotropik ve anizotropik) konsolide edilmiş ve kesilmiştir. Bu numuneler arazide normal konsolide olmuş numuneler olarak kabul edilmiştir. Farklı $K=\sigma_v/\sigma_h$ oranına sahip numuneler üzerinde deneyler yapılmış ve her bir K oranı için kayma mukavemeti parametreleri (c, ϕ) belirlenmiştir. Birinci grup deneylerde normal konsolide numuneler için belirlenen kayma mukavemeti açıları, azalan K oranı ile artmış ve en büyük değeri olan $\phi=18.4^\circ$ değerine $K=0.5$ değerinde ulaşmıştır. İzotropik konsolidasyon ($K=1$) durumunda ise $\phi=12.5^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Anizotropik konsolide edilmiş normal konsolide numuneler genellikle küçük eksenel birim şekil değiştirme değerlerinde ($1-5\%$) maksimum deviatorik gerilme değerlerine ulaşmışlardır.

Ortalama çevre basıncı ile normalize edilmiş kayma mukavemetinin (S_u/σ_o) ise neredeyse sabit bir değerde ($S_u/\sigma_o=0.35$) olduğu belirlenmiştir. Serbest titreşim deneyi yapılarak bulunan maksimum kayma modülleri kayma mukavemeti ile normalize edilmiş ve bu oranın yaklaşık sabit bir değer olduğu ($G_{maks}/S_u=950$) görülmüştür.

Ardından araziden alınıp laboratuvara getirilerek kesilen laboratuvar numunelerini modellemek için, aynı numuneler üç eksenli hücrede yeniden üretilmiş aynı şartlarda yeniden konsolide edilmiş ve üzerindeki gerilmeler tamamen kaldırılmıştır. Bu şekilde 24 saat bekleyen numuneler daha düşük izotropik gerilme şartlarında yeniden konsolide edilmiş ve kesilmiştir. Bu şekilde aşırı konsolidasyon oranları 1 ile 4.5 arasında değişen numuneler elde edilmiştir. Maksimum deviatorik gerilmeye ulaşılan eksenel birim şekil değiştirme miktarı gerilme boşalması neticesinde oldukça artış göstermiş ve $7-12\%$ değerlerine ulaşmıştır. Her üç eksenli kesme deneyinden önce numunenin maksimum kayma modülü belirlenmiştir.

Aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma modülleri ve kayma mukavemetlerinde-beklenildiği gibi- azalmalar meydana gelmiştir. Birinci grup aşırı konsolide zeminlerin, normalize edilmiş kayma mukavemetinin (S_u/σ_o) sabit bir değer olmayıp artan aşırı konsolidasyon oranı ile arttığı belirlenmiştir. Normalize kayma modülü (G_{maks}/S_u) değerlerinin ise artan aşırı konsolidasyon oranı ile azaldığı belirlenmiştir.

Eskişehir kili için aşırı konsolide numunelerin kayma mukavemetlerinden, normal konsolide numunelerin kayma mukavemetlerinin tahmin edilmesi amacı ile aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$\frac{\tau_{maks-nk}}{\tau_{maks-ak}} = 0.23 \times OCR + 0.79 \quad (1)$$

Aşırı konsolide numunelerin kayma modüllerinden, normal konsolide numunelerin kayma modüllerini tahmin edilebilmek amacı ile aşağıdaki bağıntı önerilmiştir..

$$\frac{G_{maks-nk}}{G_{maks-ak}} = 0.19 \times OCR + 0.80 \quad (2)$$

İkinci grup numunelerde arazide doğal şartlarla aşırı konsolide olmuş numuneler modellenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla numuneler K_o şartlarında konsolide edilmiş ve ardından üzerlerindeki bütün gerilmeler kaldırılmadan izotropik daha düşük bir gerilme ile yüklenmiş ve kesilmişlerdir. Bu numuneler arazi eşdeğeri numuneler olarak kabul edilmiştir. Bu numunelerin numune alıcı ile alınıp laboratuvarda kesilmesini modellemek için aynı numuneler yeniden K_o şartlarında konsolide edilip yine daha düşük bir izotropik gerilmelerle yüklenilmiş ve ardından bütün gerilmeler kaldırılıp 24 saat beklenerek, numune alma işlemi modellenmeye çalışılmıştır. Gerilme boşalmasından sonra numune yeniden izotropik olarak yüklendiği yüklerle yüklenip konsolide edildikten sonra kesilmiştir. ikinci tip numuneler laboratuvar numunesi olarak isimlendirilmiştir. Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin hepsi aşırı konsolidedir. Ancak aynı aşırı konsolidasyon oranına sahip numunelerde bile davranış farkları gözlenmiştir. Laboratuvar numunelerinin mukavemetleri ve maksimum kayma modülleri daha düşüktür. Ayrıca deneyler sırasında gözlenen boşluk suyu basıncı davranışları da tamamen birbirinden farklıdır.

İkinci grup arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerini karşılaştırıldığında, arazi eşdeğeri numunelerinin kayma mukavemetlerinin yaklaşık %20 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu ilişki aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir.

$$\frac{\tau_{maks-arazi}}{\tau_{maks-laboratuvar}} = 1.2 \quad (3)$$

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri arasında ise aşağıdaki ilişki vardır.

$$\frac{G_{maks-arazi}}{G_{maks-laboratuvar}} = 1.2 \quad (4)$$

Üçüncü grup deneylerde arazide K_o şartlarında konsolide olmuş numunelerin laboratuvarda yeniden K_o şartlarında konsolide edilmesi neticesi meydana gelebilecek farklılıklar gözlenilmeye çalışılmıştır. Arazi eşdeğeri numunelerini modelleyebilmek için numuneler üç eksenli hücrede K_o şartları olarak kabul edilen gerilme şartlarında konsolide edilip kesilmiştir. Laboratuvar numunelerini

modelleyebilmek için, üç eksenli hücrede K_0 şartlarında konsolide edilen numuneleri üzerlerindeki bütün gerilmeler kaldırılmış 24 saat beklenildikten sonra tekrar K_0 şartlarında konsolide edilip kesilmiştir. Sonuç olarak, laboratuvar numunelerinde gerilme boşalması sırasında yumuşamalar meydana gelmiştir. Bu yumuşama nedeni ile laboratuvar numuneleri yeniden K_0 şartlarında konsolide edilirken bir miktar istenmeyen sıkışmalar meydana gelmiştir. Normal konsolide arazi eşdeğeri numunelerine göre biraz daha fazla sıkışan laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetleri ve maksimum kayma modülleri biraz daha yüksek olarak elde edilmiştir. Ancak önlenemeyen bu ekstra sıkışmalar çok önemli mukavemet ve davranış farkları yaratmamıştır.

Normalize kayma mukavemeti değeri arazi eşdeğeri numuneler için $S_u/\sigma_o=0.40$ olarak elde edilirken, laboratuvar numuneleri için $S_u/\sigma_o=0.43$ olarak elde edilmiştir. Kayma mukavemeti açısı arazi eşdeğeri numuneler için $\phi=18.4^\circ$ olarak elde edilirken laboratuvar numuneleri için $\phi=18.9^\circ$ olarak elde edilmiştir. Meydana gelen ekstra sıkışmalar nedeni ile laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri biraz yüksek olarak elde edilse de arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri arasındaki fark ihmal edilecek kadar azdır.

Normal konsolide arazi eşdeğeri numuneler ile gerilme boşalması yaşamış laboratuvar numuneleri hemen hemen aynı mukavemet parametrelerine, aynı maksimum kayma modüllerine ve benzer gerilme şekil değiştirme özelliklerine sahiptirler. Bu nedenle laboratuvarda deney yapılırken numuneler ancak, arazideki gerilme şartlarında yeniden konsolide edilirse gerilme boşalması nedeniyle meydana gelen örselenmenin etkilerinden tam olarak kurtulmak mümkün olabilecektir.

Üç grup halinde yapılan deneylere ek olarak maksimum kayma modülünün gerilme artış ve azalışlarına bağlı olarak değişimini gözlemlemek için 12 serbest titreşim deneyinden oluşan bir seri deney yapılmıştır bu deneylerin sonuçları üçüncü bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. Yapılan bu deneyler ve birinci bölümde yapılan deneyler yardımı ile kullanılan kil ve benzeri kiler için;

$$G_{maks} = 145 \frac{(6.0 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_o^{0.65} OCR^{0.17} \text{ (kPa)} \quad (5)$$

Bağıntısı önerilmiştir.

INVESTIGATION OF THE DISTURBANCE DUE TO STRESS RELEASE IN THE FINE GRAINED SOILS

SUMMARY

In fine grained soils; due to the sample disturbance the specimen can't represent the soils which exist at the field. Sample disturbance effects test results especially on soft soils. If researchers determine the soil properties with higher precision this will reduce all costs of the geotechnical projects.

From the viewpoint of geotechnical engineering, sample disturbance consists of two components; one associated with mechanical disturbance caused by the sampler, handling etc. and the other is the stress relief. Elimination of the mechanical disturbance is inevitable. If technicians show enough care to the sample, geotechnical engineers can ignore the effect of mechanical disturbance.

It is known that overconsolidated soils show more complex behavior than the normally consolidated soils. The aim of this work is to find a method which can reduce the effect of stress relief.

In the first chapter the subject of sample disturbance is described. Cause of sample disturbance and the nature of specimen disturbance are reported. Modeling of the sampling phenomenon in the laboratory is described. Some assumptions are made and these assumptions are described in this chapter. A short description of the test apparatus and sample material are given.

In the second chapter of the study a literature survey has been made on the subject of sample disturbance. One of the first studies in this subject, made by Bishop and Henkel (1957) is pointing out that sample disturbance effects test results especially at normally consolidated and low plasticity clays. Overconsolidated soils are less affected by the stress relief. According to the writers, a small amount of disturbance caused a general change in stress-strain relationship. Undrained shear strength can be measured very inaccurately as sample disturbance increases. Kirkpatrick and Khan (1984) investigated sample disturbance on kaolin and illite samples. They found that samples suffered considerable loss of strength and increase in failure strain, if samples were reconsolidated isotropically. They compared anisotropically (to in-situ stresses) reconsolidated samples with in-situ soil conditions and found that similar stress strain behavior and stress paths For clay soils they recommend reconsolidation of the samples under in-situ stresses. Maximum shear modulus changes due to the stress release are also reviewed in the second chapter.

In the third part of the study the test apparatus is described in detail. The sample material is a low plasticity ($PI=19\%$) clay which is brought from Eskişehir. To provide the clay for testing, blocks of clay were consolidated from slurry at 110% water content in Rowe consolidation cell.

A standard type triaxial test system is modified for determination of initial shear modulus. Some similar test systems have been used earlier by Zeevaert (1967), Özüdoğru (1981) and Van Impe(1988). By means of this test system, shear strains, magnitude of which is 10^{-4} can be applied to the soil sample. Anisotropic ($K < 1$) or isotropic ($K = 1$) consolidation can be applied to the soil specimen. Thus a soil specimen can be consolidated under in-situ stresses (K_0) and different anisotropic stresses. When specimens are sheared, axial deformations, axial loads and pore pressures are digitally measured and stored to the personal computer. An ELE brand digital data logger is used for data measuring and storage. Calibration of test system and test process is also described in this chapter.

The three groups of experiments were conducted to evaluate sample disturbance of fine grained soils. In the first group experiments samples were consolidated isotropically or anisotropically, after consolidation samples were sheared. These samples were assumed as normally consolidated soils at the site. $K = \sigma_h / \sigma_v$ ratio of anisotropic samples varies from 0.5 to 1. Shear strength parameters (c, ϕ) are determined for every $K = \sigma_h / \sigma_v$ ratio. In the first group experiments shear strength angle (ϕ) increases as K ratio decreases. When K is assumed to be 0.5, shear strength angle (ϕ) is obtained as 18.4° . When isotropic consolidation performed ($K = 1$), shear strength angle (ϕ) is obtained as 12.5° . Anisotropically consolidated samples have reached maximum deviatoric stresses at very small axial deformations. Normalized shear strength (S_u / σ_o) is obtained as constant value ($S_u / \sigma_o = 0.35$). Normalized maximum shear modulus is obtained as constant value ($G_{max} / S_u = 950$)

Other samples are consolidated at isotropic or anisotropic conditions, after this all loads were released. After one day the sample is loaded with a lower isotropic pressure and sheared in undrained conditions. These samples are assumed as laboratory samples. Over consolidation ratio of laboratory samples varied from 1 to 4.5. Over consolidated samples have reached maximum deviatoric stresses at higher axial deformations than normally consolidated samples. Before triaxial test, shear modulus of every soil sample was determined by using torsional test apparatus.

Shear strength and maximum shear modulus of over consolidated samples decreased due to stress release. Normalized shear strength (S_u / σ_o) of over consolidated samples was not a constant value. It increased as over consolidation ratio increased. Normalized maximum shear modulus of over consolidated samples (G_{max} / S_u) decreased as over consolidation ratio increased. To calculate shear strength of normally consolidated samples from shear strength of over consolidated samples the equation which shown below is proposed

$$\frac{\tau_{max-nc}}{\tau_{max-oc}} = 0.23 \times OCR + 0.79 \quad (1)$$

To calculate maximum shear modulus of normally consolidated samples from maximum shear modulus of over consolidated samples an equation which is shown below, is proposed

$$\frac{G_{max-nc}}{G_{max-oc}} = 0.19 \times OCR + 0.80 \quad (2)$$

Second group experiments were performed to modeling the behavior of naturally over consolidated samples. For this purpose all samples were K_0 consolidated and axial loads and some of the cell pressures released. Samples were loaded with a

lower isotropic cell pressure, after this half of the samples were sheared. These samples were assumed as field samples. To modeling laboratory behavior of over consolidated samples, cell pressure of the other samples was completely released, after one day the isotropic cell pressure was applied to the sample and samples were sheared. These samples were called laboratory samples. Field and laboratory samples are over consolidated. Even if the samples had same over consolidation ratio, the behavior of field samples was completely different from that of laboratory samples. Shear strength and maximum shear modulus of laboratory samples were lower than of field samples. Pore pressure behaviors of field and laboratory samples are completely different from each other.

The relation between shear strength of field and laboratory samples is shown below,

$$\frac{\tau_{max-field}}{\tau_{max-laboratory}} = 1.2 \quad (3)$$

The relation between maximum shear modulus of field and laboratory samples is shown below,

$$\frac{G_{max-field}}{G_{max-laboratory}} = 1.2 \quad (4)$$

The third group experiments were performed to modeling the laboratory behavior of K_0 consolidated soils. For this purpose all samples were K_0 consolidated and half of them sheared. Stress release was applied to the other samples and re-consolidated to the K_0 conditions. After re-consolidation the samples were sheared. As a result of stress release some softening occurs at the laboratory samples. Due to this softening, during re-consolidation to the K_0 stress conditions some extra consolidation settlements are observed at laboratory samples. Thus laboratory samples have lower void ratio than of field samples. Maximum shear modulus and shear strength of laboratory samples are obtained higher than field samples. These inevitable settlements change the strength and maximum shear modulus, but these changes are very small so they can be neglected.

In the third group experiments normalized shear strength is obtained as $S_u/\sigma_o=0.40$ for field samples. For laboratory samples normalized shear strength is obtained as $S_u/\sigma_o=0.43$. For field samples shear strength angle is obtained as $\phi=18.4^\circ$. For laboratory samples shear strength angle is obtained as $\phi=18.9^\circ$. The difference between maximum shear modulus of field samples and maximum shear modulus of laboratory samples is very small so it can be neglected.

K_0 consolidated field samples and K_0 consolidated laboratory samples have approximately same strength parameters and same maximum shear modulus, for this reason, when a triaxial test is performed, sample must be consolidated at K_0 conditions.

An other series of experiments is performed on Eskişehir clay. On these experiments, maximum shear modulus of samples obtained depends on stress changes. Using this test data and the first group test data a new equation is suggested for maximum shear modulus.

$$G_{max} = 145 \frac{(6.0 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_o^{0.65} OCR^{0.17} \text{ (kPa)} \quad (5)$$

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde geoteknik bilim dalında, sayısal yöntemlerle hesap yapan bilgisayar programlarının artmasına paralel olarak geoteknik mühendisleri tarafından bilgisayar kullanımı oldukça artmıştır. Bu programlardan elde edilen sonuçların doğruluğu doğaldır ki, programa girdi olarak verilen bilgilerin doğruluk derecesine bağlıdır. Geoteknik bilim dalı kurulduğundan beri araziden numune alıcılar ile alınan zeminin, numune alırken yapılan hatalar ve numune alma olayının doğası nedeniyle asıl zemini temsil etmediği ve laboratuvar deney sonuçlarının yanıltıcı olabileceği bilinmektedir. Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan stabilite problemlerinin çözümü, arazideki zeminin gerilme şekil değiştirme, mukavemet özelliklerinin doğru tahminine bağlıdır. Bu nedenle arazideki zeminin davranışlarını gerçekçi olarak tahmin edebilmek geoteknik mühendisliği biliminde çok önemlidir.

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan zemin problemlerinin araştırılmasına, araziden numune alma ile başlanır ve bu numuneler laboratuvara taşınarak laboratuvar deneyleri yapılır. Alınan zemin numunesi üzerine, genellikle, bulunduğu derinliğe bağlı olarak anizotropik gerilmeler etmektedir. Numune alınması ile zeminin üzerinde bulunan jeolojik gerilmeler kaldırılmaktadır. Anizotropik gerilmelerin yerini, yükün kaldırılması ile zemin boşluklarında gelişen negatif boşluk suyu basıncına eşit hidrostatik efektif gerilmeler almaktadır. Bu gerilme durumundaki değişimin ardından numune, numune alıcıdan çıkartılarak üç eksenli deney hücresine yerleştirilmekte ve genellikle izotropik gerilmeler altında kesilmektedir. Bütün bu olaylardan sonra numunenin araziye temsil edip etmediği veya ne derecede temsil ettiği geoteknik mühendisi için tam bir bilinmeyen olarak kalmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde güvenlik katsayılarının bu denli büyük olarak kullanılmasının sebeplerinden biride, yukarıda bahsedildiği şekilde örselenen numuneleri kullanarak yapılan laboratuvar deneylerinin araziye tam olarak temsil etmemesidir. Zeminin arazideki davranışının, laboratuvar da tam olarak belirlenememesi ve genel bir malzeme modelinin bulunmayışı gibi sebepler nedeniyle geoteknik mühendisliği alanında bir çok konuda belirsizlikler vardır. Bu belirsizlikler nedeniyle geoteknik konusunda araştırma yapan araştırmacılar son yıllarda çok miktarda veriyi kullanarak analiz yapabilen veritabanı uygulamalarına

(Baykal ve diğ. 1992) ve insanların kişisel bilgi ve deneyimlerinin de modellenebildiği yapay zeka uygulamalarına yönelmişlerdir.(Hatipoğlu, Sağlamer, İncecik ve Özkan 1996)

Araziden numune alınarak gerçekleştirilen bütün laboratuvar deneylerinde numune örselenmesinin etkileri görülür. Numune örselenmesini azaltmak, zor numune alma yöntemleri uygulamak ve karmaşık deney yöntemleri uygulamak gerektirmektedir. Bütün bunlara rağmen elde edilen sonuçlar tatmin edici olmamaktadır. Bu sebeple bazı geoteknik mühendisleri laboratuvar deneylerini yetersiz bulmakta ve arazi deneylerini tercih etmektedirler. Ancak zeminin gerilme – şekil değiştirme ilişkisinin belirlenebildiği arazi deneyleri (presyometre deneyi, plaka yükleme deneyi vs..) oldukça pahalı ve yapılması zahmetli deneylerdir.

Araziden alınmış zemin numunelerinin örselenmesi zeminin hassaslığına, cinsine, zeminin gerilme geçmişine, numune alma ve taşıma sırasındaki tekniklere bağlıdır. Numune örselenmesi olayının doğasının iki önemli bileşeni olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir (Skempton ve Sowa,1693) (Noorany ve Seed, 1965). İlk bileşen numune alıcı, taşınma, numune çıkartma işlemi gibi sebeplerle meydana gelen mekanik örselenmedir. İkincisi ise gerilme boşalması nedeni ile oluşan gerilme örselenmesidir. Örselenmemiş numune terimi mekanik olarak örselenmemiş ancak sadece gerilme boşalmasına maruz kalmış zeminler için kullanılmaktadır.

Numune örselenmesinin en fazla normal konsolide ve düşük plastisiteli zeminlerde etkin olduğu, aşırı konsolide zeminlerin örselenme nedeniyle daha az mukavemet kaybettikleri bilinmektedir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi az bir örselenme ile bile değişmekte, daha fazla örselenme durumunda ise drenajsız mukavemet önemli oranda hatalı ölçülmektedir (Bishop,1957).

Yapılan konsolidasyonlu drenajsız deneylerde numunelerin maksimum kayma modüllerinin belirlenebilmesi için standart bir üç eksenli deney aleti modifiye edilerek, daha önce Zeevaert (1967), Özüdoğru (1981), Van Impe (1988) tarafından üretilmiş, burulmalı titreşim aleti haline getirilmiştir. Bu deney sistemi sayesinde numunelerin maksimum kayma gerilmeleri ölçülebilmektedir. Ayrıca bu deney sistemi numuneler üzerinde anizotropik gerilme şartlarının oluşturulabilmesine de imkan vermiştir.

Bu çalışmada gerilme boşalmasının etkilerinin belirlenmesi ve bu etkilerin giderilmesi için laboratuvarında Rowe konsolidasyon hücresinde homojen numuneler elde edilmiş ve bu numunelerin bir kısmı anizotropik olarak yüklenerek istenilen gerilme düzeyinde drenajsız olarak kesilmiş, geri kalanı ise yine anizotropik olarak

konsolide edilmiş ancak kesilmeden önce üzerindeki bütün gerilmeler kaldırılarak 24 saat bekletilmiş ardından, aşırı konsolide numuneler elde etmek için, daha düşük bir gerilme düzeyinde yeniden yüklenerek drenajsız olarak kesilmiştir. Bütün numunelerin kesilmeden önce, burulmalı titreşim deney sistemi vasıtası ile maksimum kayma modülleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan numunelerde fiziksel örselenme oluşmadığı sadece gerilme boşalması nedeniyle örselenme meydana geldiği kabul edilmiştir.

İkinci grup numuneler ise arazideki anizotropik şartlarda (K_0) konsolide edildikten sonra daha düşük izotropik gerilme seviyelerinde, gerilmeler tamamı ile kaldırılmadan, yeniden yüklenmiş ve kesilmiştir. Ardından tekrar aynı numuneler üretilmiş K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra daha aynı izotropik gerilmeler ile yüklenmiş ve üzerlerindeki bütün gerilmeler kaldırılarak gerilme boşalmasına maruz bırakılmışlardır. Bir gün sıfır gerilmeler altında bekletildikten sonra yeniden izotropik şartlarda konsolide edilmiştir. Bu grup deneylerde, arazide zaten aşırı konsolide olan zeminlerin gerilme boşalması neticesinde maksimum kayma modüllerinde ve kayma mukavemeti parametrelerinde meydana gelecek değişimlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Üçüncü grup numuneler arazideki (K_0) gerilme şartlarında konsolide edilmiş ve kesilmiştir. Daha sonra aynı numuneler yeniden üretilmiş K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra üzerlerindeki bütün gerilmeler boşaltılmış ve yine arazideki gerilme şartlarında konsolide edilerek gerilme boşalmasının K_0 şartlarında konsolide edilen numunelerdeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan üç grup deneyin dışında zemin numunelerinin değişen çevre basınçları ile maksimum kayma modüllerindeki artışlar incelenmiş maksimum kayma modülünün, çevre gerilmesi ve gerilme boşalmasından nasıl etkilendiği belirlenmeye çalışılmıştır.

2. İNCE DANELİ ZEMİNLERDE ÖRSELENMENİN ETKİSİ

2.1 Giriş

Geoteknik mühendisi, numune alma tekniklerindeki gelişmelere ve gösterilen bütün özene rağmen gerilme boşalmasının zemin davranışı üzerindeki etkilerinden kurtulamamaktadır. Bu nedenle numune örselenmesinin etkilerini ortadan kaldırmak veya en aza indirebilmek için 1960'lı yıllardan beri pek çok araştırmacı çeşitli yöntemler önermiştir. Örselenmenin kayma mukavemeti parametreleri ve maksimum kayma modülü üzerinde etkili olması nedeniyle pek çok araştırmacı bu parametreler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu amaçla laboratuvar da yeniden oluşturulmuş numuneler üzerinde yapılan deneylerin fazlalığı dikkat çekicidir. Bu durumun sebebi laboratuvar da yeniden oluşturulan homojen numuneler üzerinde istenilen gerilme şartlarının tekrar tekrar oluşturulabilmesi ve numune bitmesi veya özelliklerinin değişmesi gibi sorunların yaşanmamasıdır. Sayılan nedenlerle bu çalışmada da yeniden oluşturulmuş numuneler kullanılmıştır.

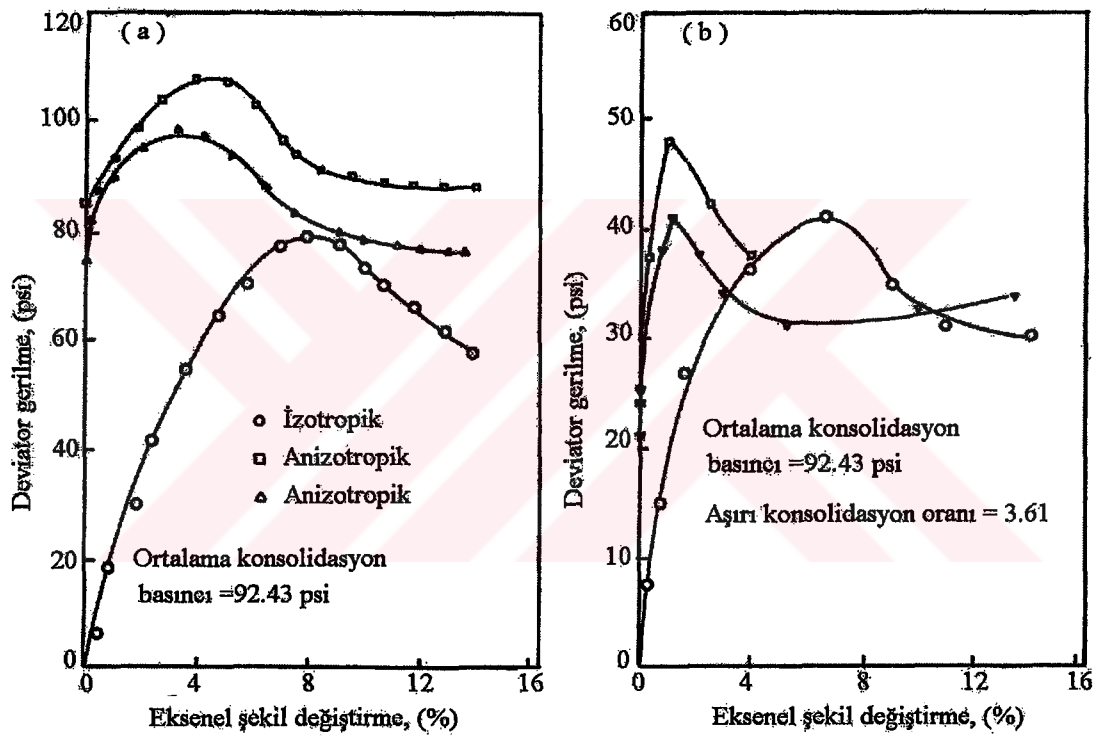
Maksimum kayma modülünün belirlenmesi için daha önce elde edilmiş bağıntılarda gözden geçirilmiş bu bağıntıların maksimum kayma modülünün hesabında genellikle, boşluk oranı, ortalama konsolidasyon basıncı ve aşırı konsolidasyon oranını kullandıkları belirlenmiştir.

2.2 Örselenme ve Gerilme Boşalmasının Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bishop ve Henkel (1957) Numune örselenmesinin en fazla normal konsolide ve düşük plastisiteli zeminlerde etkili olduğu, aşırı konsolide zeminlerin örselenme nedeniyle daha az mukavemet kaybettiklerini, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin az bir örselenme ile bile değiştiğini daha fazla örselenme durumunda ise drenajsız mukavemetin önemli oranda hatalı ölçülebildiğini belirtmişlerdir. Bununla beraber efektif gerilme parametrelerinin (c' ve ϕ') örselenme sonucu büyük değişimler göstermediğini ifade etmişlerdir.

Broms ve Ratnam (1963) izotropik ve anizotropik şartlarda konsolide ettikleri normal konsolide ve aşırı konsolide, yoğrulmuş kaolin numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajsız deneyler yapmışlardır. Numuneleri anizotropik olarak

konsolide edebilmek için, önce izotropik olarak konsolide etmişler, ardından düşük gerilme küçük (3.45 kPa) artışlarla istenen değere getirilmiştir. Maksimum deviatorik gerilmeye anizotropik olarak konsolide edilen numunelerde çok daha küçük şekil değiştirme değerlerinde ulaşıldığını belirlemişlerdir (Şekil 2.1). Efektif kayma mukavemeti açısı (ϕ') anizotropik olarak konsolide edilmiş numunelerde daha yüksek elde edilmiştir. Deney sonrası su muhtevasının, numunenin ortasında daha yüksek değerlerde olduğunu belirlemişlerdir. Konsolidasyon şartlarının gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, boşluk suyu basıncı oluşumunu, kayma mukavemeti parametrelerini ve deney sonu su muhtevalarını etkilediğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.1. Numunelerin gerilme şekil değiştirme ilişkileri (a) normal konsolide (b) aşırı konsolide (Broms ve Ratnam, 1963).

Skempton ve Sowa (1963) gerilme boşalmasının drenajsız şartlarda zemin davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada gerilme boşalmasının örneklendiği numunelerin üzerinden sadece deviatör gerilme bileşeni kaldırılmış, hidrostatik gerilme bileşeni kaldırılmamıştır. Numunede gerilme boşalması sonucu gelişen negatif boşluk suyu basınçlarının getirdiği problemler incelenmemiştir.

Ladd ve Lambe (1963) yaptıkları deneysel çalışmada gerilme boşalması sonucunda numunelerde negatif boşluk suyu basınçlarının oluştuğunu ve ölçülen negatif boşluk suyu basıncı kaldırılan gerilme miktarından daha az ise bu değişimin kil parçacık

yapısının örselenmesi sonucu meydana geldiğini, ölçülen ve olması beklenen boşluk suyu basıncı oranının kilin örselenme derecesinin bir ölçüsü olduğunu belirtmişlerdir.

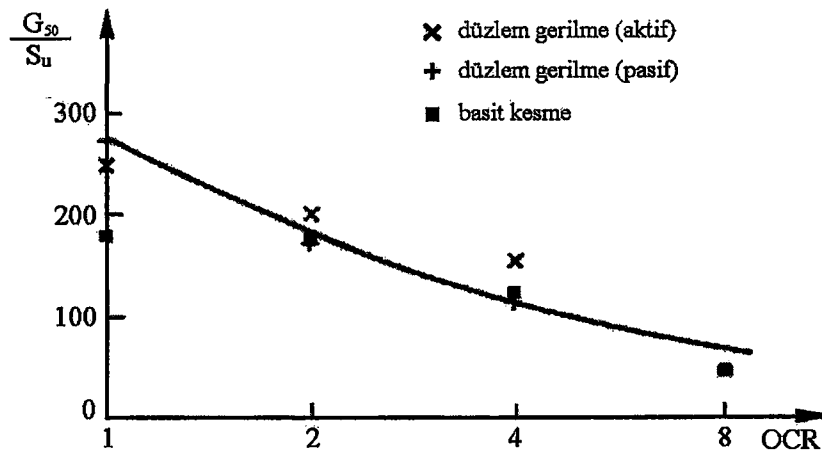
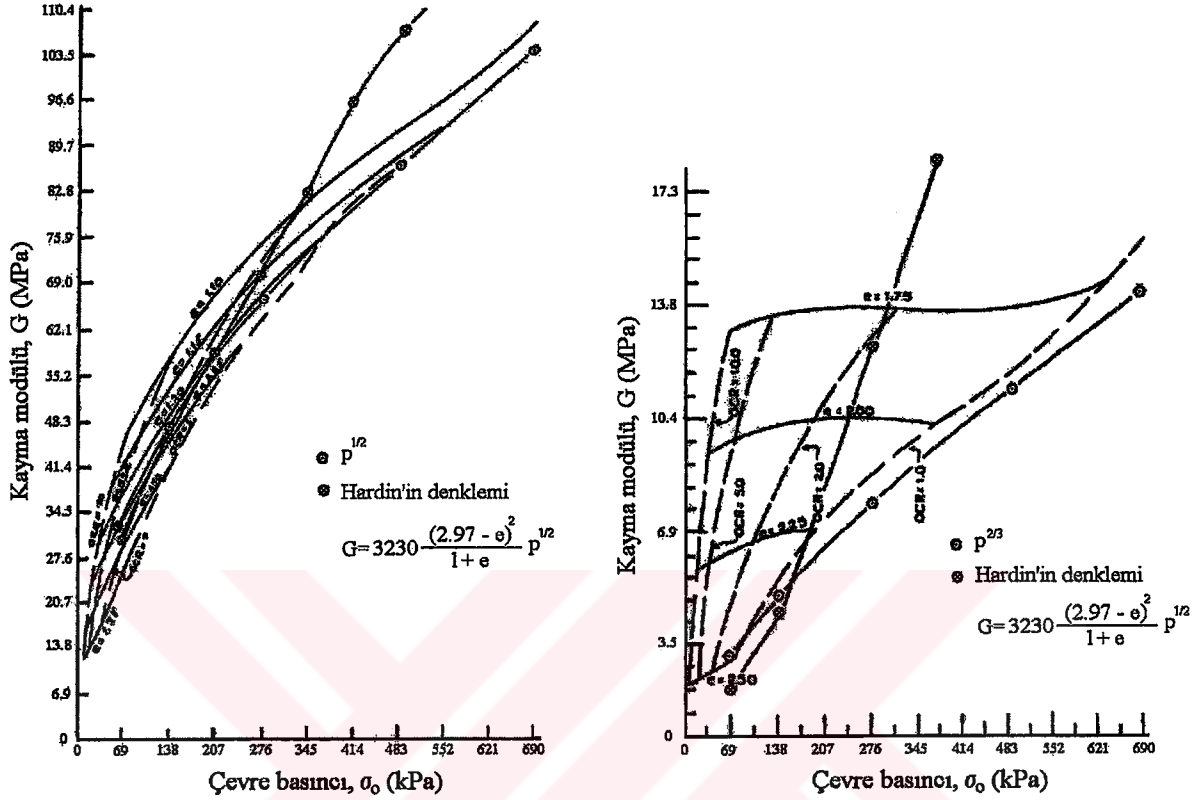
Davis ve Poulos (1967) anizotropik şartlarda konsolide edilmiş numuneler üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlar, gerilme boşalmasının kaolin numunelerin drenajsız mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Anizotropik konsolidasyon koşullarında yaptıkları üç eksenli deney sonuçlarına göre arazideki göçme koşullarını modelleyen numunelerin drenajsız mukavemetinin, araziden numune alınarak gerilme boşalmasının etkilerini örnekleyen numunelerin mukavemetinden %18 daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Yapılan deney sayısının azlığı nedeniyle bu çalışma genel bir sonuç olarak değerlendirilmemiştir.

Humpries ve Wahls (1968) gerilme geçmişinin kayma modülü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Rezonans kolon deney aleti kullanarak Kaolin ve bentonit numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarını özellikle Hardin'in kayma modülü için önerdiği bağıntının sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Kaolin numunelerin kayma modülleri daha yüksek bulunmuştur. Kaolin bentonite göre daha düşük boşluk oranına ve daha düşük sıkışabilirliğe sahiptir. Her iki malzemenin kayma modüllerinin de çevre basıncının artışı ve boşluk oranının azalışı ile arttığını belirlemişlerdir. Yazarlara göre kaolin için boşluk oranı ve efektif çevre basıncı, kayma modülünün tahminin için mutlaka gereklidir. Kaolin numunelerde aşırı konsolidasyon oranının etkisi ihmal edilebilir. Bentonit numunelerde ise aşırı konsolidasyon oranının, çevre basıncından çok daha büyük bir önemi vardır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi kaolin numunelerin kayma modülü değerleri çevre basıncının karekökü ile orantılıdır. Bentonit numunelerin kayma modülü değerleri ise çevre basıncının $2/3$ üssü ile orantılıdır. Ayrıca Hardin'in kayma modülü için önerdiği bağıntının düşük ve orta çevre basıncı değerleri için kaolin için geçerli olduğunu fakat bentonit için geçerli olmadığını belirtmişlerdir.

Okumura (1971) değişik tipteki kesme deneyleri ile killerdeki örselenme derecesinin belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Drenajsız mukavemetteki azalmanın örselenme oranı ($R = \sigma_p / \sigma_s$) ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Ayrıca her bir zemin için R ve E_{50} / σ_{1C} oranları arasında özel bir ilişki olduğunu belirtmiştir (E_{50} Sekant modülü, σ_{1C} asal konsolidasyon basıncıdır.). Okumura yaptığı çalışmada bu ilişkiyi Boston mavi kili ve Honmoku kili için vermiştir. Örselenme neticesinde sekant modülündeki azalmanın mukavemetteki azalımdan çok daha fazla olduğunu da belirtmiştir.

Ladd ve Edgers (1972) Boston mavi kili üzerinde deneyler yapmışlardır. Basit kesme deney aleti ile gerçekleştirdikleri deneylerde bu kil için sekant kayma

modülünün kayma mukavemetine oranının (G_{50}/S_u) aşırı konsolidasyon oranı ile değişimini Şekil 2.3 deki gibi bulmuşlardır.



Ladd ve Foott (1974) tarafından yapılan çalışmada numune, arazi ön konsolidasyon basıncının en az iki, ideal olarak ise dört katı bir basınç altında izotropik olarak konsolide edilmesi tavsiye edilmektedir. Bu gerilmeler altında konsolide edilen zemin numunesi üzerindeki yükler arazi gerilmeleri seviyesine kadar düşürülmekte ve ardından numune drenajsız şartlarda kesilmektedir. Bu yöntem SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties) olarak anılmaktadır.

Geçmişte maruz kaldığı gerilmelerin 2-4 katı gerilmelere maruz kalan numunenin iç yapısında değişimler meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu yöntem normal konsolide zeminlere uygulandığında bile, numune aşırı konsolide hale getirilmekte, bu sayede zemin numunesinin mukavemet, boşluk suyu basıncı değişimi gibi özellikleri gerçekte olduğundan çok farklılaşmaktadır. Özellikle doğal olarak çimentolaşmış zeminler özel bir çatıya sahiptir, ön konsolidasyon basıncından yüksek basınçların uygulanması varolan bu çatının bozulmasına ve dolayısı ile drenajsız mukavemet ve kayma modülünün daha düşük değerlerde ölçülmesine sebep olabilmektedir. Ayrıca SHANSEP yönteminin kullanılabilmesi için arazideki ön konsolidasyon basıncının doğru bir şekilde bilinmesi şarttır. Sıkı ve sert killerde laboratuvarında bulunan ön konsolidasyon basıncı gerçek değerinden oldukça düşük olabilmektedir. Bunun nedeni numune alıcı ile numune alınırken meydana gelen örselenmedir.

Kirkpatrick ve Rennie (1975) Rowe hücresinde numuneler hazırlamışlardır. Kil numuneler üzerinde CD, CU, UU deneylerini yapmışlardır. Numunelerin ölçülen özelliklerini tahmin edilen özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Numune bekletme süresince oluşan negatif boşluk suyu basıncındaki değişimin permeabilite ve konsolidasyon katsayılarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Davis ve Poulos (1967) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre elde edilen mukavemet kayıplarından çok daha fazla kayıplar meydana geldiğini ve bu kayıpların numune bekletme süresi attıkça arttığını belirtmişlerdir.

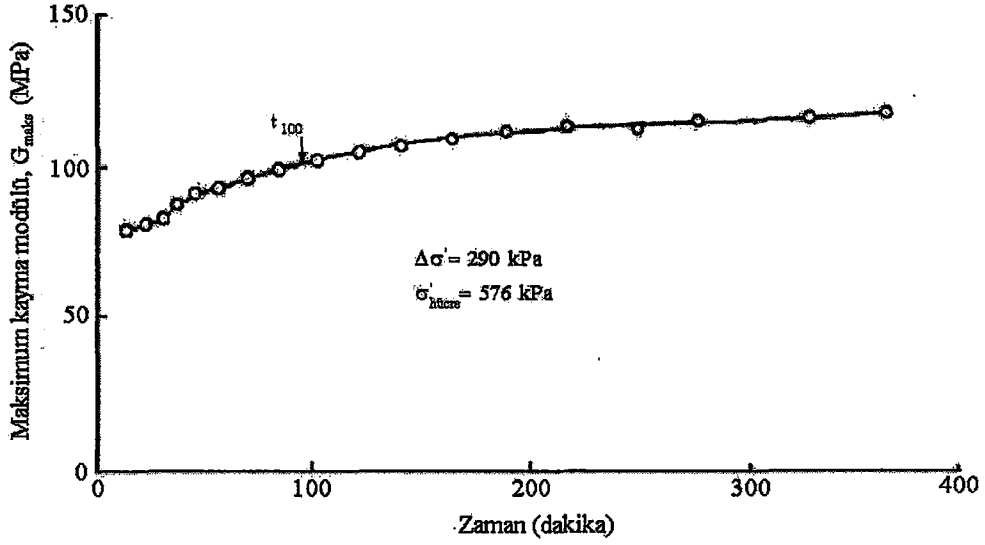
Arazide numune üzerinde σ_v ve σ_h ($u=0$) varken, numune alınması işleminden sonra atmosferik basınç altında numunede bir genişleme eğilimi oluşur. Bu şişme boşluksuyu basıncı ($-u$) ve kapiler kuvvetler tarafından sınırlandırılır. Bunun nedeni numune üzerindeki toplam gerilmenin sıfır olmasıdır. Numune üzerindeki efektif gerilme $-(-u)$ 'dur yani pozitifdir. Anizotropik gerilme durumu izotropik gerilme durumuna dönüşmüştür. Yazarlar, 50 gün sonraki boşluk suyu basıncı numune alımından hemen sonraki negatif boşluk suyu basıncından %10-%20 daha az olabileceğini belirtmişlerdir. Arazide numune üzerinde anizotropik (K_0) Basınçlar varken numune alıcıdan çıktıktan sonra numune üzerinde bu basınçlar izotropik hale getirilmektedir. Numuneler K_0 şartlarında yeniden konsolide edilerek kesilmiştir. K_0

şartlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda $\phi'=23.7^\circ$ olarak bulunurken, izotropik konsolidasyon neticesinde $\phi'=20.5^\circ$ olarak bulunmuştur. Statik deneylerde göçmeye ulaşılan deformasyon değeri K_0 deneylerde %2 olurken, izotropik konsolidasyon uygulanmış numunelerde %8 olarak gerçekleşmiştir.

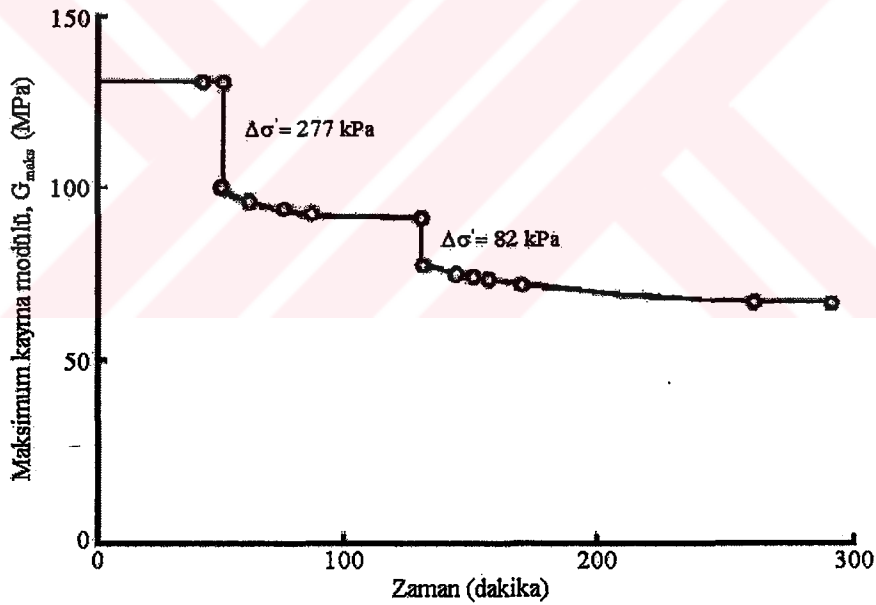
Anderson ve Woods (1976) rezonans kolon deney aleti kullanarak 9'u örselenmemiş 2'si örselenmiş 11 adet kil ve silt numunelerin çevre basıncı ile maksimum kayma modülünün zaman içerisinde değişimini incelemişlerdir. İkincil konsolidasyon sırasında kayma dalgası hızının dolayısı ile kayma modülünün artmasının sadece bazı zeminlerde görülmediğini bütün kohezyonlu zeminlerde görüldüğünü belirlemişlerdir. İkincil konsolidasyon nedeniyle kayma modülündeki artışın, zemin cinsine bağlı olarak, %0.5 ile %25 arasında değişen değerlerde artışlar meydana gelmektedir. Bütün zemin tipleri için ikincil konsolidasyon sırasında kayma modülündeki artış hızının, kayma mukavemeti azaldıkça ve boşluk oranı arttıkça, arttığını belirlemişlerdir. İkincil konsolidasyon sırasında görülen bu artışın genellikle zeminin yapısında meydana gelen tiksotropik değişimlerle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Arazide kayma dalgası ölçümleri ile elde edilen maksimum kayma modülü değerlerine yakın değerleri laboratuvarında elde edebilmek için, numunelerin ikincil konsolidasyonu sırasında yeterince beklenilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Drnevich ve Massarsch (1979) Değişik gerilme durumlarında maksimum kayma modülünün değişimini incelemişlerdir. Numunenin konsolidasyonu esnasında maksimum kayma modülünün değişiminin Şekil 2.4'de görüldüğü gibi olduğunu belirtmişlerdir.

Yazarlar, Konsolide edilmiş numunelerin kayma modüllerinin, gerilme boşalması neticesinde Şekil 2.5'de görüldüğü gibi değiştiğini belirtmişlerdir. Numune üzerinden gerilmelerin boşaltılmasının kayma modülünün ani bir şekilde düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle kohezyonlu zeminlerde, numune alma işlemi sırasında zeminin şişmesine engel olmanın çok zor olduğunu, dolayısıyla numunede maksimum kayma modülünün düşmesinin kaçınılmaz olduğunu belirtmişlerdir. Bu şişme sonucu meydana gelen yumuşamanın etkisini, bir miktar azaltmak için numunenin yeniden konsolide edilmesi gerektiğini ve kısmen ikincil konsolidasyonun tamamlanmasının beklenilmesini önermişlerdir.



Şekil 2.4 Konsolidasyon sırasında kayma modülünün değişimi (Drnevich ve Massarsch 1979).



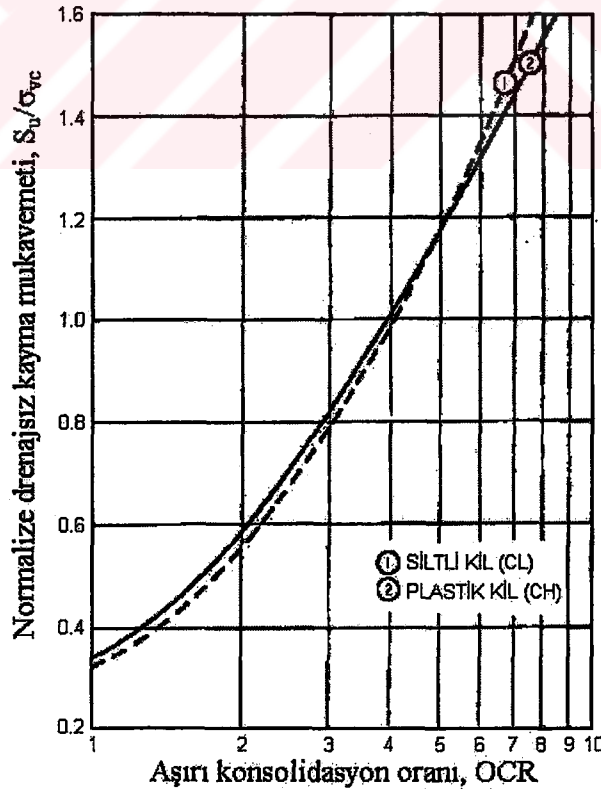
Şekil 2.5 Kayma modülünün gerilme boşalması ve şişme nedeniyle azalımı (Drnevich ve Massarsch 1979).

Broms (1980) numune örselenmesinin, kayma mukavemetini azalttığını ve dolayısı ile tasarımı yapılan binayı da etkilediğini belirtmiştir. Yazara göre statik yükler altındaki taşıma gücü %30 az hesaplanabilmekte, oturmalar ise özellikle katı killerde üç ile altı kat fazla hesaplanabilmektedir. Anizotropik olarak konsolide edilmiş numunelerin maksimum kayma modülü, gerilme boşalmasından izotropik olarak konsolide edilmiş numunelere göre çok daha fazla etkilendiğini belirtmiştir. Ayrıca

numune alıcının cidarları boyunca istenmeden de olsa bir yoğrulma meydana geldiğini ve bu sebeple numune içerisindeki suyun yoğrulmuş kenar bölgelerden, örselenmemiş merkez bölgelere doğru hareket ettiğini ve bu etkiden kurtulmak için numunenin, numune alma işleminden hemen sonra numune alıcıdan çıkarılması gerektiğini belirtmiştir.

Yazara göre örselenme nedeniyle geoteknik parametreler değişmektedir. Bu parametrelerin en fazla değişenden en az değişene göre sıralamasını ise 1) maksimum kayma modülü, elastisite modülü, 2) ön konsolidasyon basıncı, 3) sıkışabilirlik, 4) kayma mukavemeti, 5) permeabilite, 6) su muhtevası, boşluk oranı, zeminin birim ağırlığı, 7) likit limit, plastik limit, 8) dane çapı dağılımı olarak belirtmiştir.

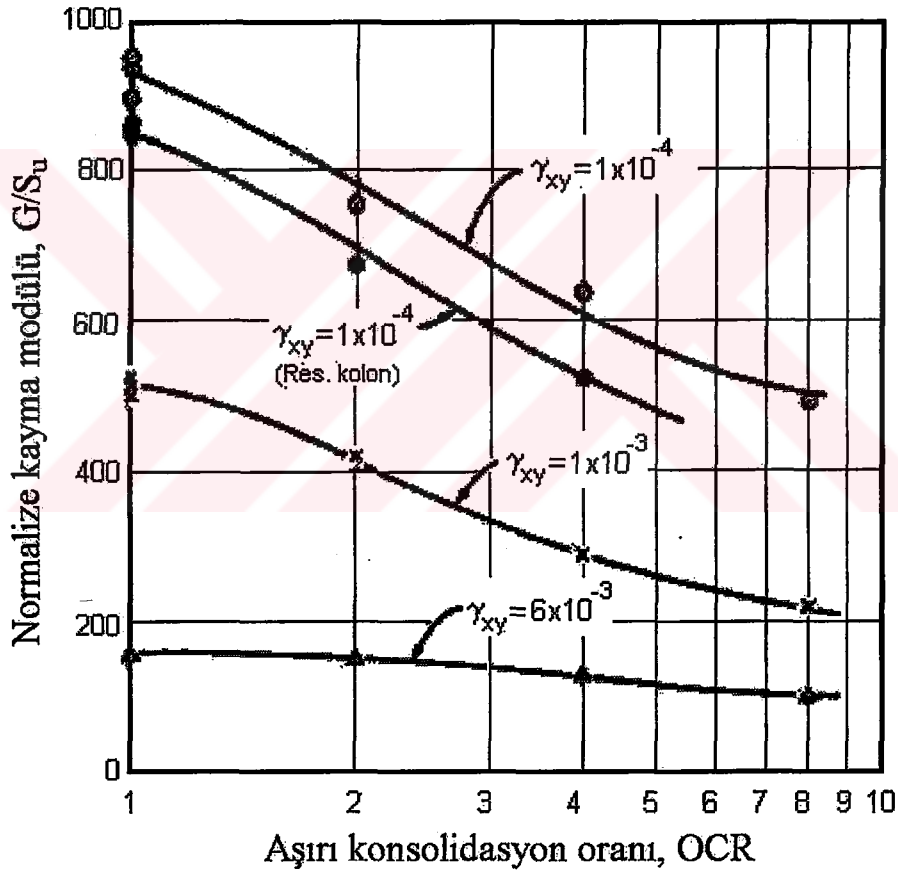
Koutsoftas ve diğerleri (1980) dinamik üç eksenli ve Resonans frekansı deney aletlerinde plastik kıvamda olan örselenmemiş iki tür deniz kili üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalardan her iki tür kilde de kayma modüllerinin ve kayma mukavemetlerinin gerilme geçmişinden oldukça fazla etkilendiğini belirtmişlerdir. Yazarlar kayma mukavemetlerini çevre basıncı ile normalize ederek Şekil 2.6'da görülen ilişkiyi elde etmişlerdir.



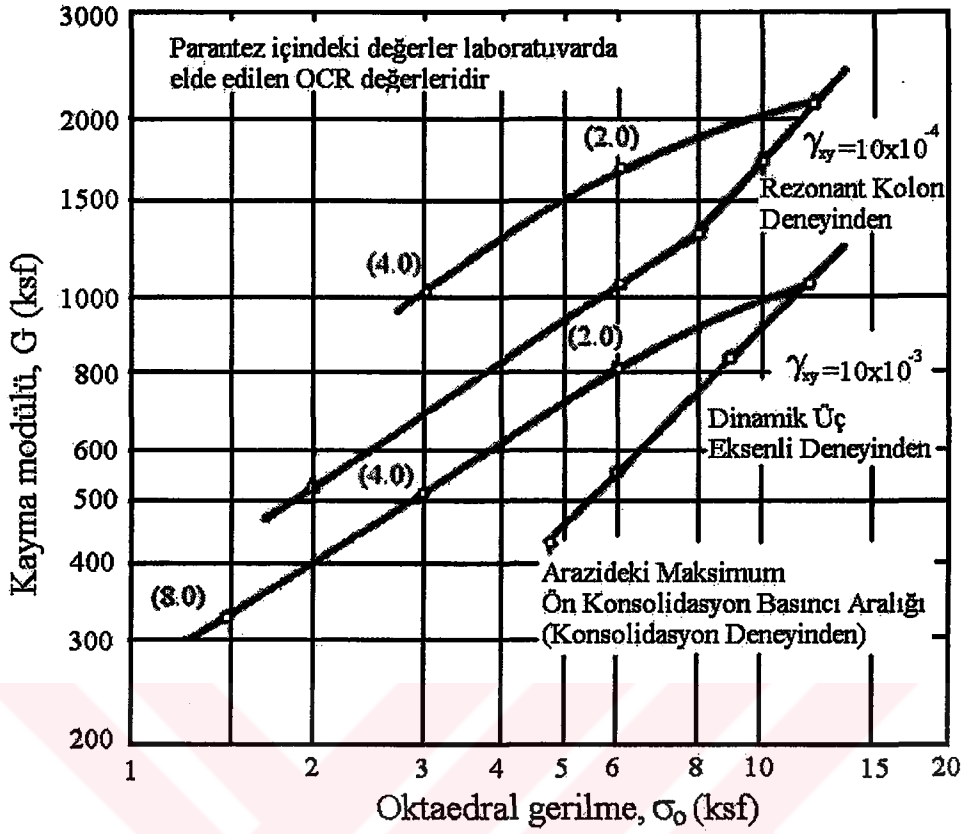
Şekil 2.6 Normalize kayma mukavemeti aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).

Yazarlar kayma mukavemeti ile normalize edilmiş maksimum kayma modülü –aşırı konsolidasyon oranı ilişkisini Şekil 2.7’deki gibi vermişlerdir. Bu eğrinin başlangıç noktasının uygulanan birim kayma genliği değeri yükseldikçe düşmesinin nedeni olarak ölçülebilen kayma modülünün düşük olması gösterilmiştir.

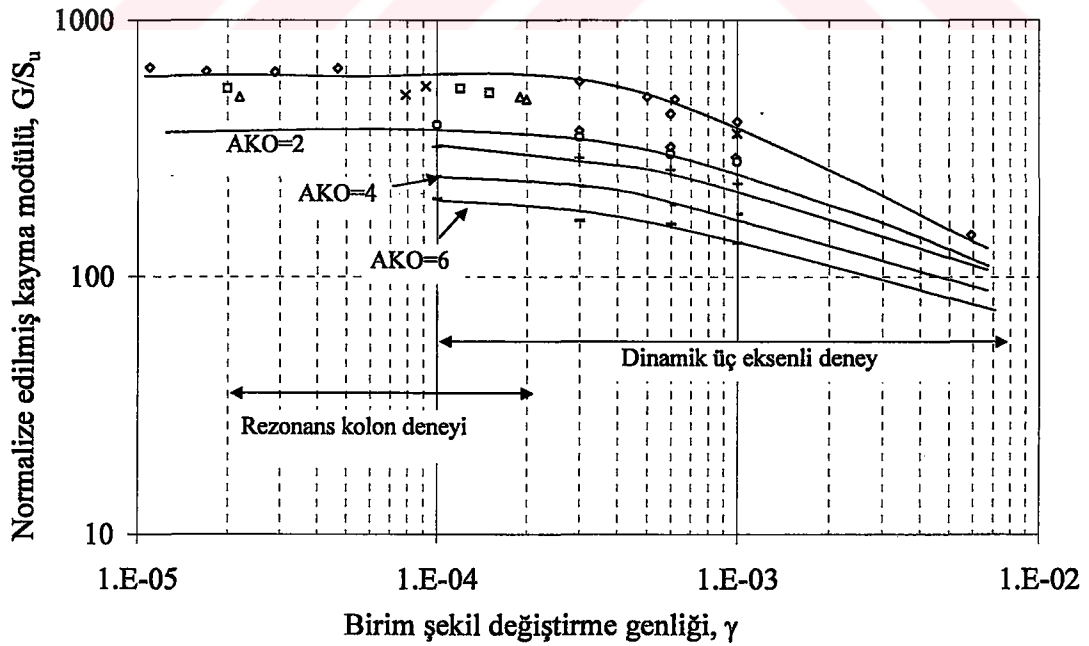
Aynı birim kayma, ve konsolidasyon basıncı altında aşırı konsolide numunelerin normal konsolide numunelere oranla daha yüksek kayma modülüne sahip olduklarını Şekil 2.8 ve 2.9’da göstermişlerdir. Yazarlara göre geçmişte aynı ön konsolidasyon basıncına maruz kalmış, aşırı konsolide numunelerde maksimum kayma modülü ile logaritmik ölçekte çizilmiş aşırı konsolidasyon oranı lineer bir ilişki vardır. Aşırı konsolidasyon oranı da maksimum kayma modülü ile doğru orantılıdır.



Şekil 2.7 Normalize kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).



Şekil 2.8 Plastik killer için konsolidasyon basıncı ve gerilme tarihçesine bağlı olarak kayma modülünün değişimi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).



Şekil 2.9 Birim kayma ve AKO değerlerine bağlı olarak normalize edilmiş kayma modülünün değişimi. (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).

Athanasopoulos ve Richart (1983) yoğrulmuş kaolin ve doğal haldeki siltli kil üzerinde çalışmışlar, gerilme boşalması nedeni ile özellikle maksimum kayma modülü değerlerinde düşüşler belirlemişlerdir. Drenajlar kapalı olarak gerçekleştirilen gerilme boşalmasından sonra aynı gerilmeler yeniden numunenin üzerine uygulanmış ve bir süre sonra maksimum kayma modülü değerlerinin yaklaşık aynı değerlere döndüğünü belirlemişlerdir. Yazarlar numuneye uygulanan gerilme boşalmasının yarattığı örselenmenin, numunenin yüksek amplitüdlü dinamik yük etkisinde kalmasıyla benzer bir örselenme doğurduğunu iddia etmişlerdir. Arazide elde edilen kayma modülü değerlerinin laboratuvardaki kayma modülü değerlerinden yüksek olmasının nedenini ikincil konsolidasyon için geçen sürenin azlığına bağlayan yazarlar yeteri kadar uzun süre beklenmesi halinde, laboratuvar da arazideki kayma modülü değerlerine yakın değerler elde edileceğini savunmuşlardır.

Kirkpatrick ve Khan (1984) kaolin ve illit numuneler üzerinde çalışmışlar; normal konsolide killerin, araziye göre mukavemetlerinin düşük olduğunu ve göçme anında ulaşılan deformasyonların yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Boşluk suyu basıncı oluşumu aşırı konsolide killeri andırmıştır. Bu aşırı konsolide gibi davranma olayı daha yüksek permeabiliteye sahip kaolin killerde çok daha belirgin olarak gözlenmiştir. Üç ayrı şekilde numuneler yeniden yüklenerek gerilme-şekil değiştirme özellikleri incelenmiştir.

a) Arazideki gerilmelerle yeniden konsolidasyon (anizotropik)

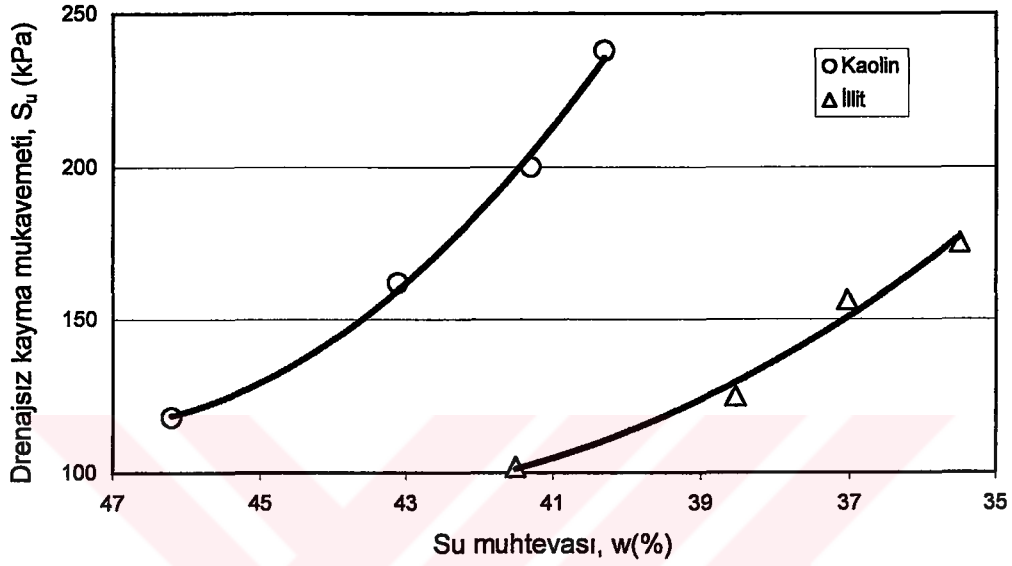
b) Arazideki düşey basınca eşit izotropik yeniden konsolidasyon

c) $\sigma_{ps}' = (-u_{ri})$ (u_{ri} gerilme boşalması anındaki teorik boşluk suyu basıncı) gerilmesi altında izotropik yeniden konsolidasyon

Arazideki numune ile karşılaştırıldığında a) oldukça iyi sonuçlar vermiş ve benzer gerilme izleri oluşturmuşlardır. Ancak b) ve c) sırası ile yüksek ve düşük mukavemet değerlerine ulaşmışlardır. Yazar bu şekilde yüklemelerin arazideki numuneyi laboratuvar da temsil etmek için yeterli olduğunu ve SHANSEP gibi karmaşık yöntemlere gerek olmadığını ifade etmektedir.

Anizotropik yeniden konsolide edilen killeri iki adımda yeniden konsolide edilmiştir. Önce numuneler izotropik olarak konsolide edilmiş ardından arazideki düşey yükle yüklenmişlerdir. Bu yöntem K_0 oranında artışlarla anizotropik olarak yükleme yönteminden çok daha basit ve daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Araştırmacılar arazideki yükleri $K_0=0.95\sin\phi'$ formülü ile belirlemişlerdir.

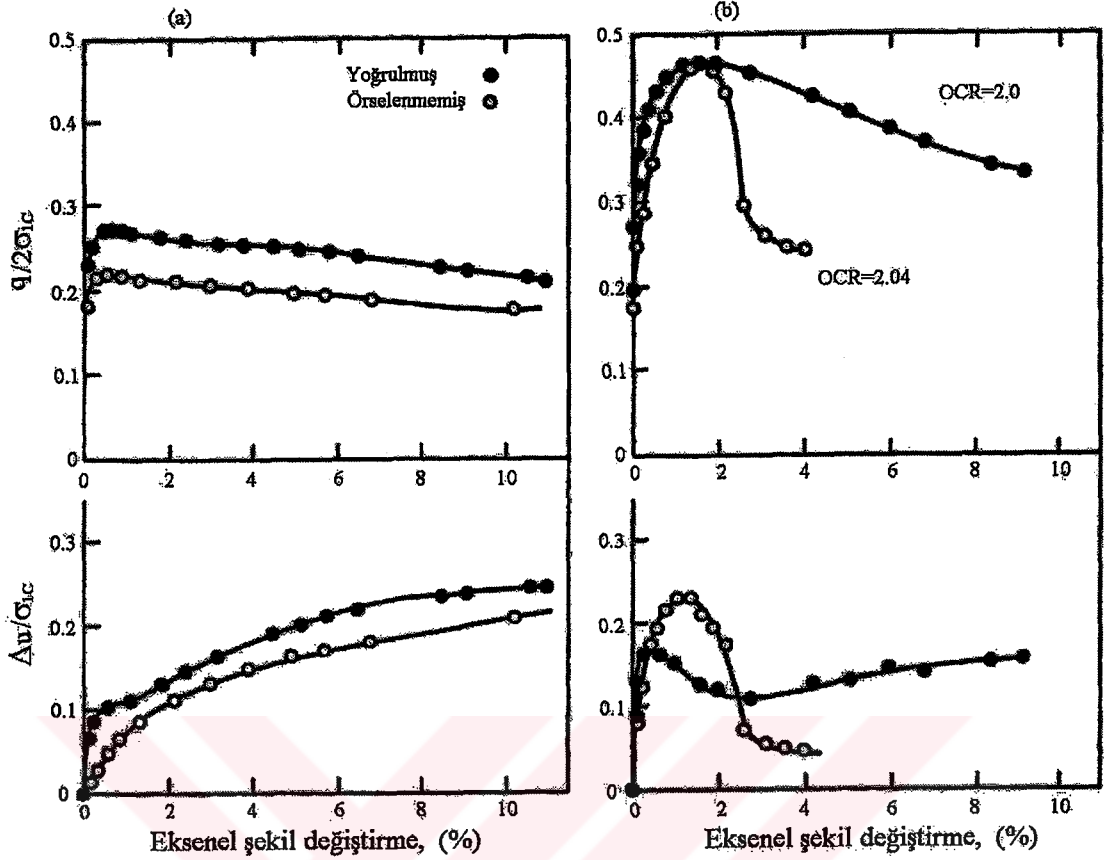
Yazarlar kaolin numunelerin mukavemetlerinin illit numunelere göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. K_0 şartlarında normal konsolide edilmiş killerde kayma mukavemeti açısı kaolin numuneler için 21° olarak elde edilirken illit numunelerde bu değer 16° olarak elde edilmiştir. Şekil 2.10'da görülebileceği gibi aynı su muhtevsındaki numunelerde bile oldukça büyük mukavemet farkı vardır.



Şekil 2.10 Kaolin ve illit numuneleri için su muhtevası drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Kirkpatrick ve Khan, 1984).

Graham ve Li (1984) doğal ve yeniden hazırlanmış haldeki plastik bir kil üzerinde deneyler yapmışlar, diğer araştırmacıların bulgularından farklı olarak, Şekil 2.11'de de görüldüğü gibi gerilme şekil değiştirme davranışlarının benzer olduğunu belirlemişlerdir. İki tip numunedeki normal konsolidasyon eğrileri ve kritik durum eğrileri birbirine paralel ve eşit uzaklıkta olduğunu belirlemişlerdir. Yeniden hazırlanmış numuneler biraz daha yüksek mukavemetli olarak elde edilmiştir. Yeniden hazırlanmış numunelerin sıkışma modülü ve kayma modülü örselenmemiş numunelere göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Boşluk suyu basınçları örselenmemiş aşırı konsolide numunelerde daha yüksek olarak ölçülmüştür.

Ricceri ve diğerleri (1985) çamur konsolidasyon aletinde yeniden konsolide ettikleri numunelerle, bu numunelerin elde edildiği örselenmemiş numunelerin konsolidasyon parametrelerini karşılaştırmışlardır. Kullandıkları numunelerin plastisite indeksi değerleri %10-%30 arasında değişmektedir. Plastisite düştükçe örselenmenin arttığını ve laboratuvar deneyleri ile belirlenen ön konsolidasyon basıncı değerinin güvenilir olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 2.11 Anizotropik şartlarda konsolide edilmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı değişimleri (a) normal konsolide (b) aşırı konsolide (Graham ve Li, 1984).

Nakase, Kusakabe ve Nomura (1985) örselenmenin drenajsız mukavemet üzerindeki etkilerini giderebilmek için değişik plastisitelere sahip numunelerden üç eksenli deneyler yapmışlar, K_0 konsolidasyona bırakılan numuneler konsolidasyondan sonra üzerlerindeki kayma gerilmeleri kaldırılmış ve daha fazla örselenme oluşturabilmek için numunelere dinamik yükler uygulamışlardır. Deney sonuçları göstermiştir ki düşük plastisiteli numunelerde gerilme boşalması ile boşluk suyu basıncı artmaktadır. Gerilme izlerinin karşılaştırarak gerilme boşalmasının dinamik yüklemeyle aynı etkiyi oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Belli bir miktar eksenel deformasyon uygulandığı zaman meydana gelen örselenme miktarının düşük plastisiteli numunelerde daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Kirkpatrick, Khan ve Mirza (1986) kaolin ve illit aşırı konsolide numuneler üzerinde gerilme boşalmasının etkilerini araştırmışlardır. Gerilme boşalmasına maruz kalan numuneleri “numune”, gerilme boşalmasına maruz kalmayan numuneleri ise “arazi (insitu)” olarak isimlendirmişlerdir. Gerilme boşalması drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiştir. Aşırı konsolide numunelerin gerilme boşalması sonucu

davranışları genel olarak normal konsolide numunelere benzemektedir. Kayma mukavemetinde ve artık boşluksuyu basıncı değerlerinde önemli kayıplar meydana gelmektedir. Maksimum deviatorik gerilmeye ulaşılan şekil değiştirme miktarı artmakta ve gerilme izleri değişmektedir. Daha yüksek permeabiliteye sahip olan kaolin gerilme boşalmasından daha fazla etkilenmektedir. Ayrıca yazarlara göre 100 kPa değerinden daha düşük seviyelerden gerilme boşalması neticesi aşırı konsolide edilen numunelerde gerilme boşalmasının önemli bir etkisi görülmemektedir..

Graham ve diğ. (1987) deniz dibi numunelerini laboratuvarında çamur konsolidasyon aletinde yeniden hazırlanarak ön yükleme yapmışlar ve konsolidasyonun tamamlanmasından sonra yükleri kaldırmışlardır. Üç değişik konsolidasyon durumu seçmişlerdir. Arazideki düşey gerilmede izotropik konsolidasyon, Arazideki düşey gerilmenin %50-75'i seviyesinde izotropik konsolidasyon ve anizotropik K_0 konsolidasyonu. Gerilme boşalmasından sonra bekleme süresinin numune davranışını üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Gerilme boşalması olayından sonra geçen sürede numunenin sürekli su emmesine izin verilmezse veya belli bir miktar su emmesine izin verilirse, yeniden arazideki anizotropik K_0 gerilmeleri ile yüklenen numunenin aşırı bir davranış farkı göstermediğini belirlemişlerdir. Ayrıca su emmesine izin verilmeyen numunelerde bekleme süresinin pek bir önemi olmadığını belirtmişlerdir. K_0 konsolidasyonu, gerilme şekil-değiştirme davranışı, açısından oldukça iyi sonuçlar verse de sıkışma modülü (E_{50}), gerilme boşalmasına maruz kalmış numunelerde yaklaşık %50 oranında düşük olarak ölçülmüştür.

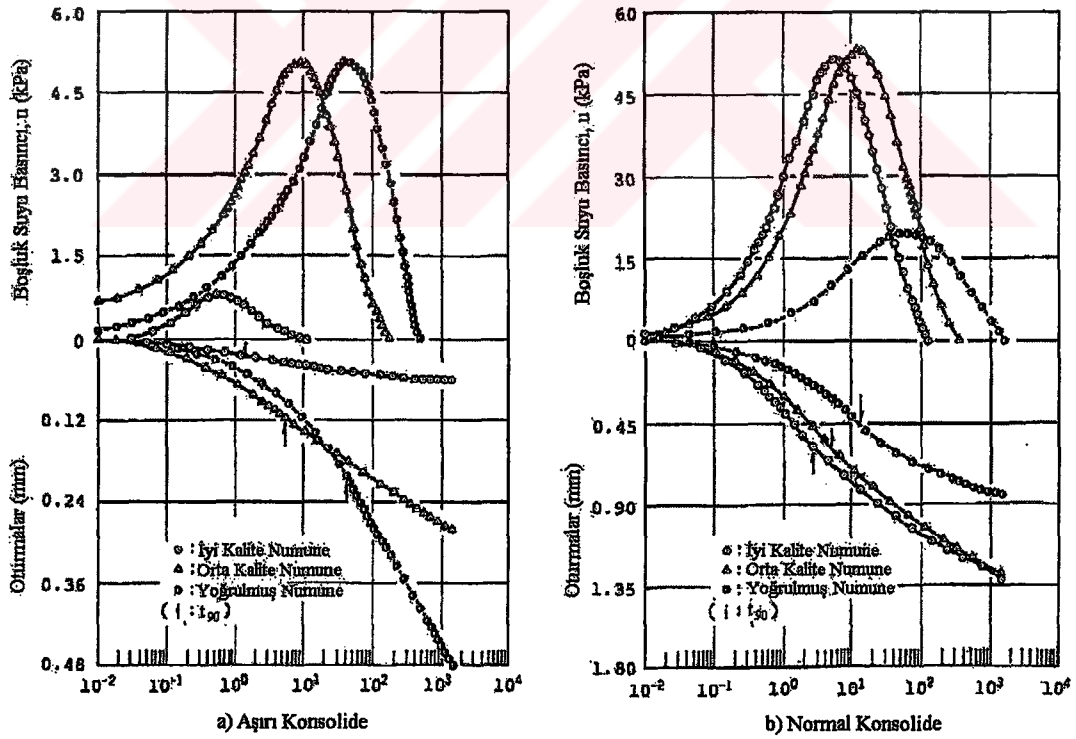
Baligh ve diğ. (1987) Boston mavi kili üzerine deneyler yapmışlar, yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak yapılan bu çalışmada, arazideki in-situ gerilmelerle yeniden konsolide edilen örselenmiş numunelerin drenajsız mukavemeti, örselenmemiş numunelerin drenajsız mukavemetinden yüksek ölçülmüştür. SHANSEP deney yönteminin kullanılmasını ve drenajsız mukavemetin konsolidasyon basıncı ile normalize edilmesini tavsiye etmişlerdir.

Matsuo ve Shogaki (1988) mekanik örselenmenin ve plastisitenin kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlar plastisite indeksi 15'den küçük numunelerin UU ve serbest basınç mukavemetlerinin neredeyse aynı olduğunu, plastisite indeksi 15'den büyük numunelerde ise UU deneyinden elde edilen mukavemetin her zaman serbest basınç deneyinden elde edilenden büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. Zemin numunelerini mekanik örselenmeye maruz bıraktıklarında ise q_u değerinin küçüldüğünü belirlemişlerdir.

Day (1990) yaptığı çalışmada göçebilen zeminler üzerinde numune örselenmesini incelemiş ve özellikle tüple numune alımı esnasında özellikle düşük su

muhtevastaki numunelerin boşluk oranının arttığını gözlemlemiştir. Bu olayın nedeninin numune alım sırasında oluşan mikro ve makro çatlaklar olduğunu belirtmiş ve bu çatlakların numunenin gerilme-şekil değiştirme, konsolidasyon davranışlarını değiştirdiğini gözlemlemiştir. Bu tip zeminlerde tüple numune alınmasının hatalı olduğunu, blok numuneler alınmasının daha doğru olacağını belirtmiştir.

Shogaki ve Kaneko (1994) yoğrulmuş numunelerin konsolidasyon özelliklerini incelemişler ve normal konsolide zeminlerde yoğrulma işleminin konsolidasyon katsayısında (c_v) %70, hacimsel sıkışma katsayısında (m_v) %40 ve permeabilitede (k) %80 azalmaya sebep olduğunu göstermişlerdir. Şekil 2.12'de de görüldüğü gibi, aşırı konsolide zeminlerde örselenme fazla miktarda ise oturmalar ve boşluk suyu basıncı oluşum süresinin artacağını belirtmişlerdir. Normal konsolide zeminlerde örselenme az bir miktarda ise oturmaların büyük değerlere ulaştığını belirtmişlerdir. Yazarlar bu davranışın sebebini zeminin yapısının bozulması ile açıklamışlardır. Numune örselenmesi ile konsolidasyon parametreleri arasındaki ilişki serbest basınç mukavemetinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir.



Şekil 2.12 Aşırı ve normal konsolide numuneler için boşluksuyu basıncı-zaman ve oturma-zaman ilişkisi (Shogaki ve Kaneko 1994).

Kılıç (1995) gerilme boşalmasının etkilerini kaolin ve İstanbul yeşil kili numuneler kullanarak araştırmıştır. Numuneler konsolidometrede normal konsolide olarak hazırlamıştır. Üç eksenli deney aleti kullanarak konsolidasyonlu drenajsız deneyler yapmıştır. Deneyler sonucunda, laboratuvar numunelerinde arazi numunelerine göre daha küçük drenajsız kayma mukavemeti, daha büyük göçme birim şekil değiştirmeleri ve daha fazla boşluk suyu basınçları olduğu gözlenmiştir. Yazar, doğa örneklerine yakın bir davranışı laboratuvarında modelleyebilmek için oktaedral gerilmede izotropik tekrar konsolidasyon yöntemi kullanmıştır. Belli numune bekletme sürelerinden sonra yapılan izotropik konsolidasyonlu drenajsız deneylerinden numune bekletme süresinin deney sonuçlarına çok fazla etkisi olmadığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar arazi numuneleri ile karşılaştırıldığında, gerilme şekil değiştirme davranışlarının göçme birim şekil değiştirme değerlerinin ve boşluk suyu basıncı değişimlerinin farklı ancak göçme anında ölçülen deviatorik gerilmelerin birbirine çok yakın değerlerde olduğunu belirlemiştir.

Onitsuka ve Hong (1995) beş doğal kil üzerinde yaptıkları çalışmada, örselenmeden dolayı hatalı ölçülen serbest basınç mukavemeti değerini, (q_u) düzeltilmiş akma gerilmesi (p_{yf}) değeri ile normalize etmişlerdir. Düzeltilmiş akma gerilmesi değerini elde etmek için; konsolidasyon deneyinden elde ettikleri boşluk oranı konsolidasyon basıncı ($e - \ln p$) eğrisinin, en fazla eğrilığe sahip olduğu noktadan dik çizmişler ve e_0 olarak adlandırabileceğimiz en büyük boşluk oranı değerini gösteren yatay doğru ile bu dikin kesiştiği noktayı düzeltilmiş akma gerilmesi olarak kabul etmişlerdir. Elde edilen düzeltilmiş akma gerilmesi değeriyle serbest basınç mukavemetini normalize etmişler ve bu normalize değer in örselenme derecesi arttıkça doğrusal olarak azaldığını belirlemişlerdir. Regresyon analizi neticesinde belirlenen serbest basınç dayanımı düzeltme faktörü ile serbest basınç mukavemetlerini düzeltilmişlerdir. Aynı zemin için, blok numunelerden elde edilmiş deney sonuçları ile tüp numunelerden elde edilen deney sonuçlarını önerdikleri yöntemle göre normalize ederek karşılaştırmış ve sonuçların aynı olduğunu belirtmişlerdir.

Lunne, Berre ve Strandvik (1997) çeşitli çaplarda numune alıcılarla alınmış numuneler ve blok numuneler üzerinde deneyler yapmışlar, arazi gerilme durumunda konsolide ettikleri numunelerden örselenmenin etkilerine en açık olanlarının düşük plastisiteli killeri olduğunu belirtmişlerdir. Bender elemanlar kullanılarak yapılan kayma dalgası hızı ölçümleri sonucunda örselenme ile kayma dalgası hızı değişimlerinin çok tutarlı olmadığını belirtmişlerdir. İki ayrı laboratuvarında yapılan deneylerde bazı farklar ortaya çıkmıştır. Norveç'ten Japonya'ya taşınan numunelerin CAUC deneylerinde S_u %20 daha yüksek olarak

elde edilmiştir. Yazarlar bu olayın nedenini Japonya'daki deneylerde kesme hızının Norveç deki kesme hızından 10 kat daha yüksek olması ile açıklamışlardır.

Rampello ve Castillo (1998) yaptıkları çalışmada Piza Kulesinin zeminini incelemişler, standart t p numune alıcılarla ve geniş çaplı numune alıcılarla alınmış numuneleri karşılaştırmışlardır. Yumuşak, aşırı konsolide üst zeminin örselenmeye karşı daha hassas olduğunu ve geniş çaplı numune alıcı ile alınarak laboratuvar deneyleri yapılan numunelerden elde edilen sıkışma indeksi değerinin, t p numune alıcılarla alınan numunelere göre 1.5 kat daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

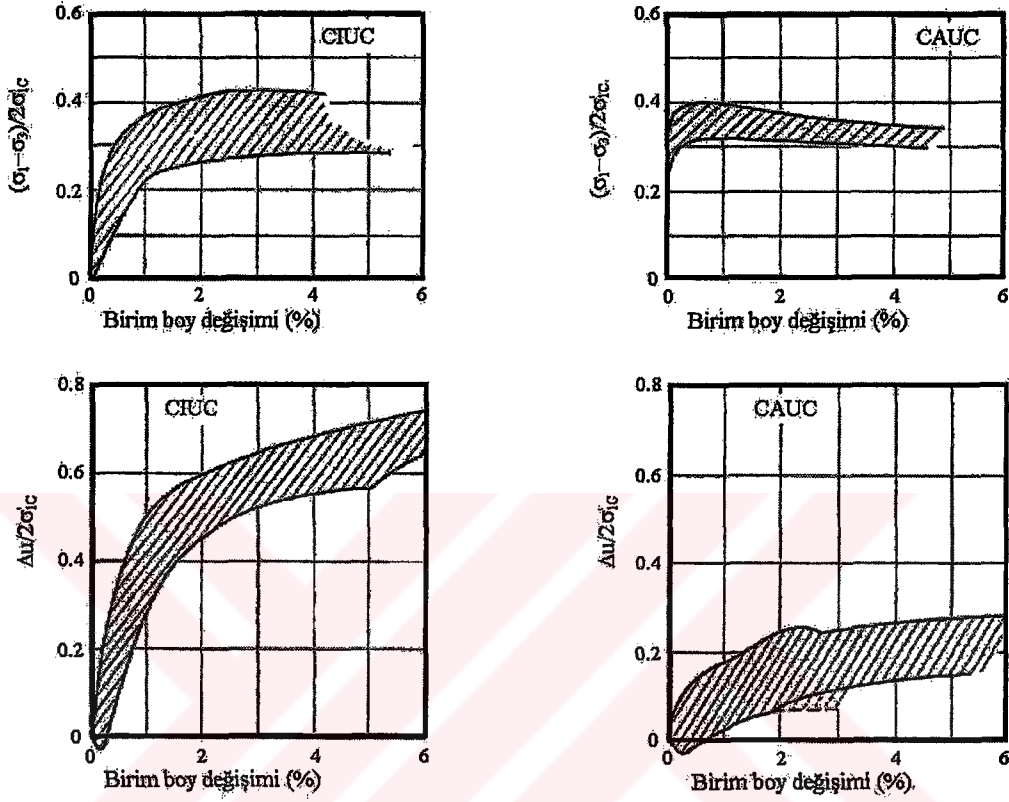
Bray, Riemer ve Gookin (1999) araziden yüksek kalitede numuneler almışlar, bu numuneleri en az arazide etkisinde kaldıkları jeolojik gerilmeye veya daha büyük gerilmelerde konsolide edilirse laboratuvar ortamında bulunan maksimum kayma modüllerinin arazideki değerlere yaklaşılabildiğini belirlemişlerdir.

Hoeg, Dyvik ve Sandbakken (2000)  rselenmemiş ve yeniden hazırlanmış silt numuneler üzerinde örselenmenin gerilme-şekil değiştirme davranışları üzerindeki etkilerini araştırmak için K_0 şartlarında üç eksenli deneyler yapmışlardır. Deneylerde  rselenmemiş numunelerin daha mukavemetli olduğunu ve örselenmemiş numunelerde maksimum deviatör gerilmeye %8-10 deformasyon seviyelerinde ulaşılrken yeniden hazırlanmış numunelerde bu değer %0.1-0.3 değerlerine kadar düşmüştür. Yeniden hazırlanmış numunelerin kayma modüllerinin, örselenmemiş numunelere göre %25 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Bütün deneylerde örselenmemiş numuneler genişleyen (dilative) davranış gösterirken, yeniden hazırlanmış numuneler büzülen (contractive) davranış göstermişlerdir.

Siddique, Farooq ve Clayton (2000) yeniden hazırlanmış numuneler üzerinde deneyler yapmışlar, numune alma işlemi sonucunda, drenajsız mukavemet ve elastisite modülünde azalım gözlenirken kırılma anındaki eksenel deformasyon değerinin arttığını gözlemişlerdir. Üç eksenli deneye tabii tutulacak numunelerde hücre basıncının arazideki düşey basıncın 1.5 ve 2.5 katı K_0 şartlarında konsolidasyona tabii tutulmasının en iyi sonucu verdiğini belirtmişlerdir.

Lacasse (2001) değişik çaptaki numune alıcılarla alınmış kil numuneler üzerinde deneyler yapmış ve numune örselenmesinin etkilerini gidermek için arazi deki gerilme koşullarında (K_0) numuneleri yeniden konsolide edilmesini önermiştir. Şekil 2.13'de yapılan 31 anizotropik (CAU) ve izotropik (CIU)    eksenli deneylerin sonuçları özetlenmiştir. Bu deneylerde maksimum deviatör gerilmeye ulaşılan deformasyon miktarları ortalama olarak anizotropik deneyler için % 0.7 olurken izotropik deneylerde %5.2 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde $\Delta u/\sigma'_{v0}$ değeri

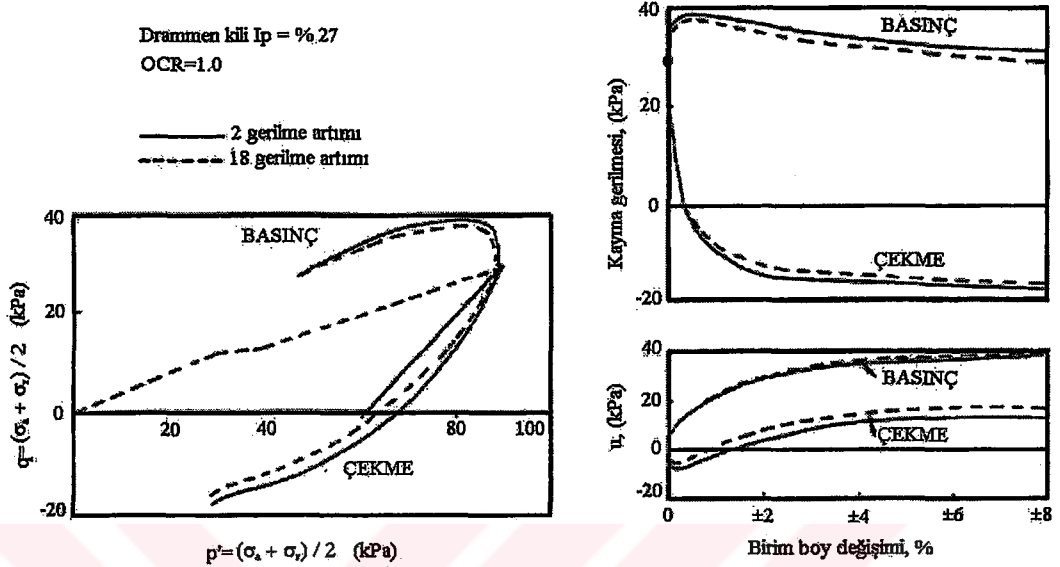
ortalama olarak anizotropik deneyler için % 0.10 olurken izotropik deneylerde % 0.65 olarak gerçekleşmiştir. S_u/σ'_{vc} mukavemet parametresi her iki tipteki deney için de hemen hemen aynı bulunmuştur. Ancak gerilme-şekil değiştirme eğrileri tamamen birbirinden farklıdır.



Şekil 2.13 Lacasse'ın (2001) izotropik (CIUC) ve anizotropik (CAUC) üç eksenli deneylerinin sonuçları.

K_0 konsolidasyonu yapılırken konsolidasyon basıncındaki artışların sayısının üç eksenli deney sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.14'de örselenmemiş Drammen kili üzerinde yapılmış iki seri üç eksenli deneylerin sonuçları görülmektedir. Birinci seride K_0 gerilme durumuna 18 artımda ulaşılmış ve K_0 çizgisi tam olarak takip edilmiştir. İkinci seride ise sadece iki gerilme artışı gerçekleştirilerek K_0 gerilme durumuna ulaşılmıştır. Üç eksenli basınç deneylerinde, pratik olarak yakın, gerilme-şekil değiştirme, boşluk suyu basıncı davranışı ve efektif gerilme izi elde edilmiştir. Üç eksenli çekme deneylerinde, iki artışla konsolide edilmiş deneylerde, kayma gerilmeleri ve boşluk suyu basınçları negatif olarak biraz yüksek elde edilmiştir. Yazar aşırı konsolidasyon oran 1.5'den küçük olan killi malzemelerde iki gerilme artışı gerçekleştirilerek K_0 gerilme durumuna ulaşılmasının, konsolidasyon sonrası daha az hacim değiştirmesi (%2'den daha az) beklenen malzemelerde ise bir adımda, yani önce arazideki yatay basınca (σ'_{ho}) eşit

bir hücre basıncı verilip ardından da düşey basıncın arazi değerine (σ'_{vo}) getirilmesinin uygun olacağını belirtmiştir. Bu yöntemin tek olumsuz yanı bir miktar istenmeyen numune boyu kısaltmalarının oluşmasıdır.



Şekil 2.14 Lacasse'ın (2001) “tam” (18 artımlı) ve basitleştirilmiş (2 artımlı) K_o üç eksenli deneylerinin sonuçları.

Attom, Zreig ve Obaidat (2001) değişik şekillerde kompaksiyonla (dinamik, statik ve yoğurarak) killi zeminlerden numune hazırlamışlar ve bu numunelerin şişme ve mukavemet özelliklerini, örselenmemiş numunelerle karşılaştırmışlardır. Örselenmemiş numunelerin şişme basınçları ve mukavemetleri kompaksiyonla hazırlanmış numunelerden daha yüksek bulunmuştur. maksimum su muhtevasının bütün numunelerin şişme basınçlarını ve mukavemetlerini etkilediğini belirlemişlerdir. Örselenmemiş numunelerin, serbest basınç mukavemetleri dinamik, statik ve yoğrularak kompakte edilmiş numunelerden sırası ile 1.35, 1.6 ve 2.5 kat daha yüksek olarak bulmuşlardır.

2.3 Maksimum kayma modülünün belirlenmesi ile ilgili çalışmalar

Maksimum kayma modülünün tahmini için geliştirilen ifadelerin bazıları bu kısımda verilmiştir.

Hardin ve Black (1968) yaptıkları çalışmada Rezonans kolon deney aleti kullanmışlardır. Orta ve katı kıvamdaki kaolin killeri için;

$$G_{maks} = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_o^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (2.1)$$

şeklinde bir ifade önermişlerdir.

Marcuson ve diğerleri (1972) rezonans kolon aleti kullanarak yüksek plastisiteli killeri üzerinde yaptıkları deneylerde aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$G_{maks} = 450 \frac{(4.4 - e)^2}{1 + e} \sigma_o^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (2.2)$$

Ansal ve Yıldırım (1987) dinamik basit kesme aleti kullanarak haliç kili üzerinde farklı frekanslarda ve genliklerde dinamik deneyler yapmışlardır. Kullanılan kil yüksek plastisiteli, organik içerikli ve normal konsolide haldedir. Yazarlar kayma modülünün belirlenmesi için yapılan deneylerde tekrarlı gerilme frekansının (f) ve kayma birim şekil değiştirmesinin (γ) maksimum kayma modülü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda maksimum kayma modülü için aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$G_{maks} = (531.9 + 97.6x \ln(f)) \cdot \gamma^{(-0.383 + 0.79x \ln(f))} \cdot \sigma_v^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (2.3)$$

Weiler (1988) altı adet doğal kilin kayma modülleri üzerinde aşırı konsolidasyon oranının ve çevre basıncının etkilerinin incelemiş ve kayma modülü için aşağıdaki formülü önermiştir.

$$G_{maks} = K \cdot \sigma_c^{0.86} \cdot OCR^{0.60} \text{ (kPa)} \quad (2.4)$$

Bu formülde K'nın artan plastisite indisi ile azaldığını, bunun beklenmeyen bir şey olmadığını zira düşük plastisiteli killerin daha yüksek kayma modülüne sahip olduklarının bilindiğini belirtmiştir.

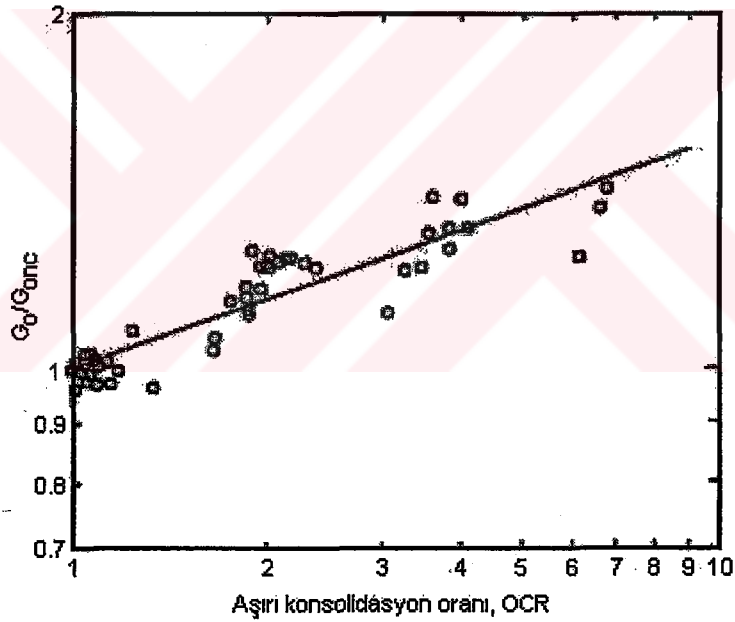
Viggiani ve Atkinson (1995) ince daneli zemin numuneleri üzerinde üç eksenli deney aletinde, bender eleman kullanarak, küçük boy değişimleri seviyesinde ölçümler yaparak bunu etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Deney sonuçlarından maksimum kayma modülünün, plastisiteye, aşırı konsolidasyon oranına ve gerilme tarihçesine bağlı değişik ampirik bağıntılarını elde etmişlerdir. Bu bağıntıların diğer araştırmacıların bağıntılarından en önemli farkı sadece gerilmeye ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı ifadeler içermeleridir. Araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde ve laboratuvarında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları ayrı ayrı gösterilmiştir.

Anizotropik şartlarda konsolide edilmiş numunelerin maksimum kayma modülleri de incelenmiş; dalga yayılımı olan yöndeki gerilme bileşeni ile bu yöne dik yöndeki gerilme bileşeninin, maksimum kayma modülü üzerinde farklı etkileri olması

gerektiği düşünölmüştür. Ancak deney sonuçları göstermiştir ki; maksimum kayma modöölü eksenel ve radyal gerilme bileşenlerine hemen hemen eşit oranda bağımlıdır. Yazarlar, maksimum kayma modöölü için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir. (A, n ve m için tablolar makalede verilmiştir. P_r , referans basıncı sembolize etmektedir.)

$$G_{maks} = A \left(\frac{P'}{P_r} \right)^n OCR^m \quad (2.5)$$

Yazarlar, speswhite kaolini kullanarak yeniden hazırladıkları numunelerin normal konsolide ve aşırı konsolide haldeki maksimum kayma modööllerini karşılaştırmışlar ve Şekil 2.15'deki grafiği elde etmişlerdir. Bu grafik incelenirken, kayma modöölünün oranı alınan numunelerin aynı gerilme seviyesinde yüklenilmiş olduğu unutulmamalıdır. Zira ilk bakışta aşırı konsolide numunelerin normal konsolide numunelere göre daha yüksek kayma modöölüne sahip oldukları düşünölmektedir.



Şekil 2.15 Normal konsolide ve aşırı konsolide numunelerin kayma modöölünün aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi (Viggiani ve Atkinson, 1995).

Kallioglou ve diğerleri (1999) Yunanistan'ın değişik bölgelerinden alınan orta ve yüksek plastisiteli kil numuneler üzerinde rezonans kolon deneyi yapmıştır. Kohezyonlu zeminlerin maksimum kayma modöölü için basit korelasyon yapılarak aşağıdaki (4.6) bağıntısı önerilmiştir.

$$G_{maks.} = 1421e^{-1.504} \sigma^{0.623} \text{ (kPa)} \quad (2.6)$$

Vrettos ve diğerleri (1999) düşük ve orta plastisiteli killerin maksimum kayma modülünü rezonans kolon deney aleti kullanarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar (2.5) bağıntısında özetlemişlerdir.

$$G_{maks} = 9600 \frac{1}{1 + 1.2e^2} \sigma_o^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (2.7)$$

2.4 Sonuç

İnce daneli zeminlerde örselenmenin etkilerinin incelenmesinde 1960' lı yıllarda başlayan günümüze kadar devam eden deneysel çalışmalarda, oluşan örselenmenin zeminin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini etkilediği, oturmaları arttırdığı, mukavemeti düşürdüğü, boşluk oranı ve su muhtevası gibi endeks özelliklerinde yanılmalara sebep olduğu araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Maksimum kayma modülünün belirlenmesi amacı ile yapılan çalışmalarda genellikle rezonans kolon deney aleti kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, numunelerin alındığı zemin tipine ve deney sisteminin hassaslığına bağlı olarak, birbirinden oldukça farklı ifadeler elde edilmiştir.

3. KULLANILAN MALZEME DENEY SİSTEMİ VE DENEYLER

3.1 Giriş

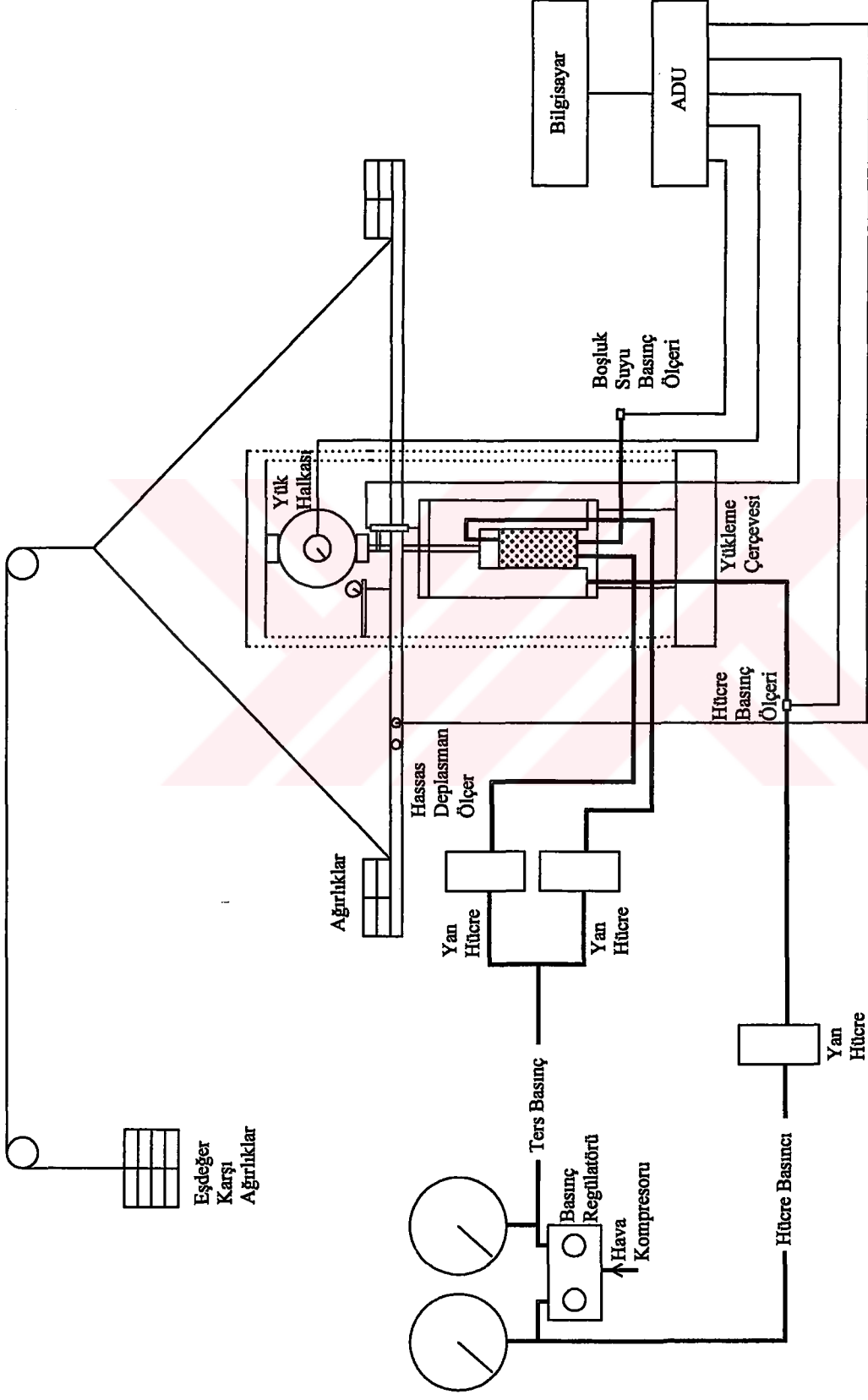
Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan aletler, numune hazırlama yöntemi ve deneylerin yapılışında izlenen yöntem anlatılmaktadır. Çalışmada malzemenin endeks özelliklerinin belirlendiği sınıflandırma deneyleri dışında iki ana deney grubu planlanmıştır: konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyleri ve burulmalı serbest titreşim deneyleri. Bütün deneyler toz halindeki Eskişehir kilinin %110 su muhtevasında damıtık su ile karıştırılmasından elde edilmiş karışımın Rowe hücresinde tek yönde konsolide edilmesiyle hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneylerin hepsi İstanbul Teknik Üniversitesi Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.2 Malzeme

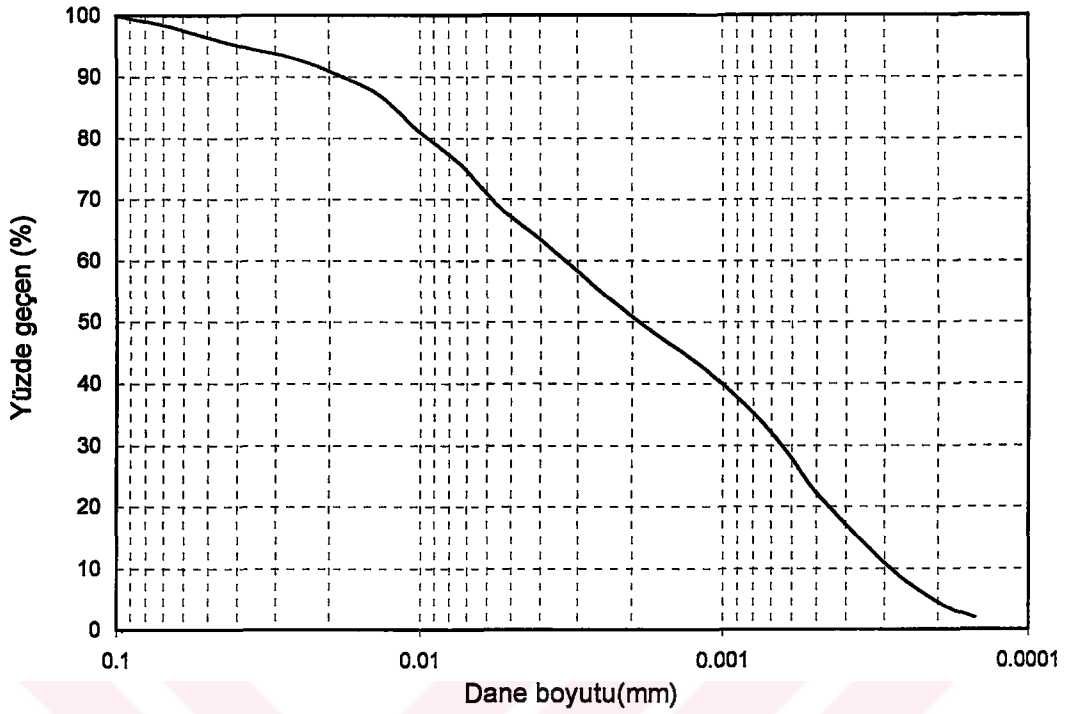
Bütün deneylerde Eskişehir yöresinden hazır olarak getirtilen kil kullanılmıştır. Bu kilin laboratuvar deneyleri ile belirlenen dane özgül ağırlığı 2.70, likit limiti %44, plastik limiti %25 olarak bulunmuştur. Dolayısı ile bu kilin plastisite indisi %19 dur. Yapılan hidrometre analizi sonucunda, çapı 0.002 den küçük dane çapına sahip malzemelerin oranının yaklaşık % 50 olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre kilin aktivitesi 0.38 civarındadır. Bu malzeme üzerinde yapılmış spektral analize göre kil, illit kaolin karışımından oluşmaktadır. Kullanılan kilin granülometrisi Şekil 3.2'de görülmektedir.

3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Üç eksenli deneylerin hepsinde 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 halkası, iki basınç ölçer (*pressure transducer*), anizotropik yüklemelerin yapılabilmesi için bir kiriş ve bu kirişin ağırlığını dengelemek için kullanılan bir eşdeğer karşı ağırlık sistemi (*counter balance*) kullanılmıştır. Deney sisteminin şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Burulmalı üç eksenli deney sistemi şeması

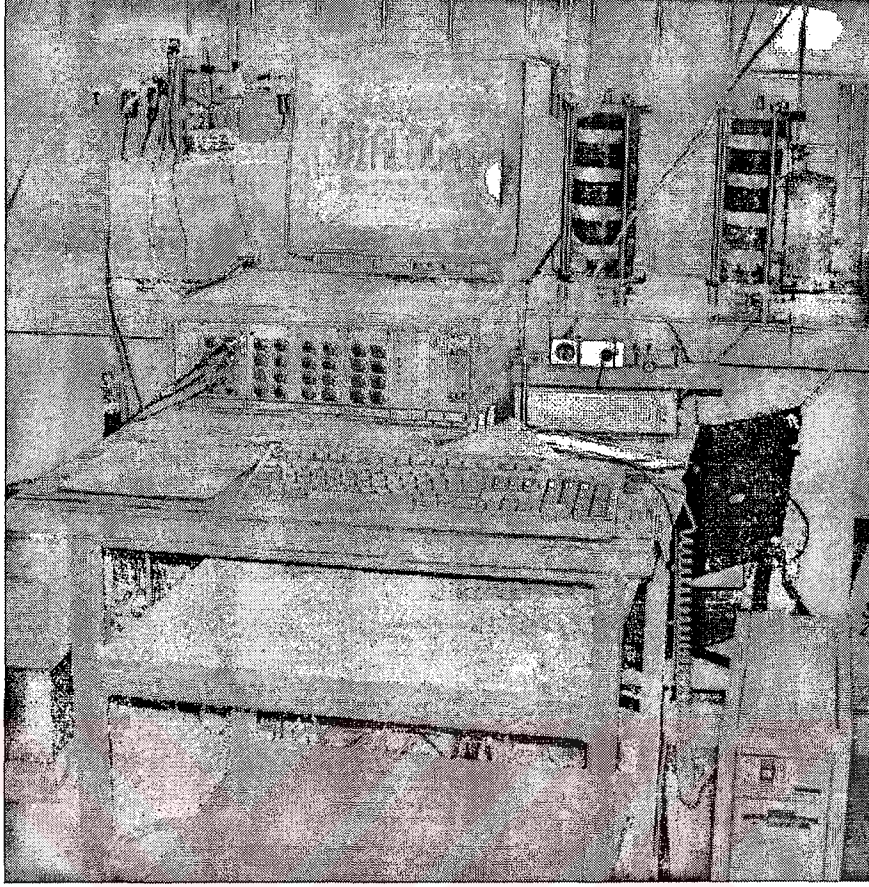


Şekil 3.2 Eskişehir kilinin granülometri eğrisi.

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 3.1) görülen panoya gelen basınçlı hava, hücre basıncı ve ters basınç regülatörlerinden yan hücrelere ulaşmaktadır.

Sistemin ihtiyacı olan güç, elektronik ölçme cihazları için 10V, yükleme birimi, dijital data logger (ADU) (Şekil 3.3) ve verilerin toplandığı bilgisayar için 220 Volttur. Hava kompresörü normal elektrik şebekesinden beslenmektedir. Deney aletleri için gerekli güç ise normal şebekeden gelen elektriğin 200A kapasiteli kesintisiz güç kaynağı üzerinden geçirilmesi ile sisteme sağlanmaktadır. Bu şekilde şebekedeki voltaj değişikliğinin deney sistemini etkilemeyeceği düşünülmüştür. Elektrik kesintisi olması halinde güç kaynağı yaklaşık yarım saat süreyle gerekli gücü sağlayabilmektedir. Hava kompresörü ise yaklaşık bir saat boyunca -basınçlar çok yüksek olmadığı sürece (300-350kPa)- basınçları sabit tutabilmektedir.

Eksenel yük bir yük halkası vasıtası ile ölçülmüştür. Yük halkasının üretici firma tarafından belirtilmiş çalışma aralığı 0-2 kN dur. 50 mm çaplı numune üzerinde bu aralık yaklaşık 0-1000 kN/mm² gerilmeye karşılık gelmektedir. Yük halkasının kalibrasyon eğrisi EkA1 de verilmiştir. Kalibrasyon için gerçek ağırlıklar kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Data logger (ADU).

Hücre basıncı ve boşluk suyu basınçları Wykham Farrance marka basınç ölçerlerle ölçülmüştür. Her iki basınç ölçerin de üretici firma tarafından bildirilmiş çalışma aralığı ± 1000 kPa dır. Boşluk suyu basıncı sadece alt başlıkta ölçülmüştür. Basınç ölçerlerin kalibrasyon eğrisi EkA2 de verilmiştir.

Eksenel yer değiştirme hücre dışından ± 25 mm aralığında düşey hareketleri ölçebilen ELE marka bir deplasman ölçer (*displacement transducer*) ile yapılmıştır. Deplasman ölçerin kalibrasyon eğrisi EkA3 de görülmektedir.

Tablo 3.1.'de bütün cihazların çalışma aralıkları ve çözünürlükleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Üç eksenli deney sisteminde kullanılan cihazların özellikleri.

Fonksiyon	Cihaz	Kapasite	Çözünürlük
Eksenel yük	Yük Halkası	0-2000 N	0.002 N
Boşluk suyu basıncı	Basınç ölçer	± 1000 kPa	0.015 kPa
Hücre basıncı	Basınç ölçer	± 1000 kPa	0.015 kPa
Eksenel yerdeğiştirme	Deplasman ölçer	± 25 mm	0.1 mm
Burulma kirişinin yerdeğiştirmesi	Deplasman ölçer	± 5 mm	0.001 mm

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.

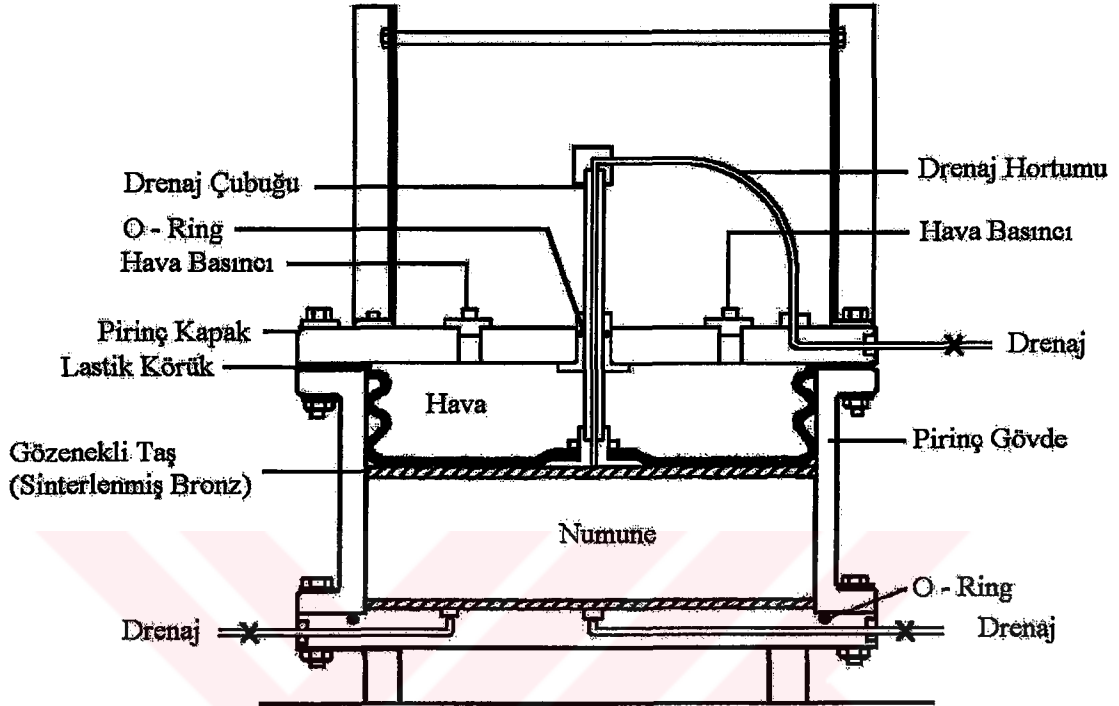
3.3.1 Numune hazırlanması

3.3.1.1 Rowe hücresi

Bu hücre Rowe tarafından geliştirilmiş bir ödometredir (Şekil 3.4). Normal ödometrelerden temel farkı düşey yükü ağırlık olarak değil basınç olarak vermesi ve yükleme plakasının rijit değil fleksibl olmasıdır. Bu iki özelliğin getirdiği üstünlükleri şöyle sıralayabiliriz: Ödometrelerde numunenin alanı büyüdükçe, üzerine konması gereken ölü yük ağırlığı hızla artar ve bu alanın bir ölçüden fazla büyümesini hemen hemen imkansız kılar. Oysa düşey yük Rowe hücresinde doğrudan basınç cinsinden uygulanmaktadır, dolayısıyla numune alanı istenildiği kadar büyütülebilir. Deneylerde kullandığımız Rowe hücresinin çapı 25.4 cm dir. Yine normal ödometrelerde gerek yükleme başlığının gerekse en önemlisi zeminin yan duvarlara sürtünmesi yüzünden uygulanan düşey yük tam olarak zemine aktarılamamaktadır. Bu durumun yarattığı belki de en önemli mahzur sürtünme kuvvetlerinin taşıdığı düşey yük miktarının bilinmemesi fakat miktarının büyüyen çevre/alan oranı ile artmasıdır. İşte fleksibl yükleme başlığı bu mahzuru ortadan kaldırmaktadır, çünkü yükleme başlığı fleksibl olduğu için çeperlerdeki sürtünme kuvveti yine çeperlerdeki basıncın bir kısmına karşı koymakta ancak ortadaki geniş bir alanda numune tamamen verdiğimiz basınç ile yüklenmektedir. Rowe hücresinin bu fleksibl başlığı bir lastik körük ve ortasındaki su tahliye milinden ibarettir. Numune çamur kıvamından başlayarak sıkıştırıldığı için çok deformasyon yapmakta ve körüğün yapabileceği maksimum deformasyon buna yetmemektedir. Bu yüzden 170 mm yüksekliğindeki esas gövdenin üzerine 80 mm yüksekliğinde 1 adet yaka parçası ilave edilmiştir. Bu yaka parçası hazır olarak bulunamadığından özel olarak döktürülmüş ve tornada imal edilmiştir. Şekil 3.5’de görülen Rowe hücresinin alt ve üst yüzeylerinden drenaj imkanı vardır.

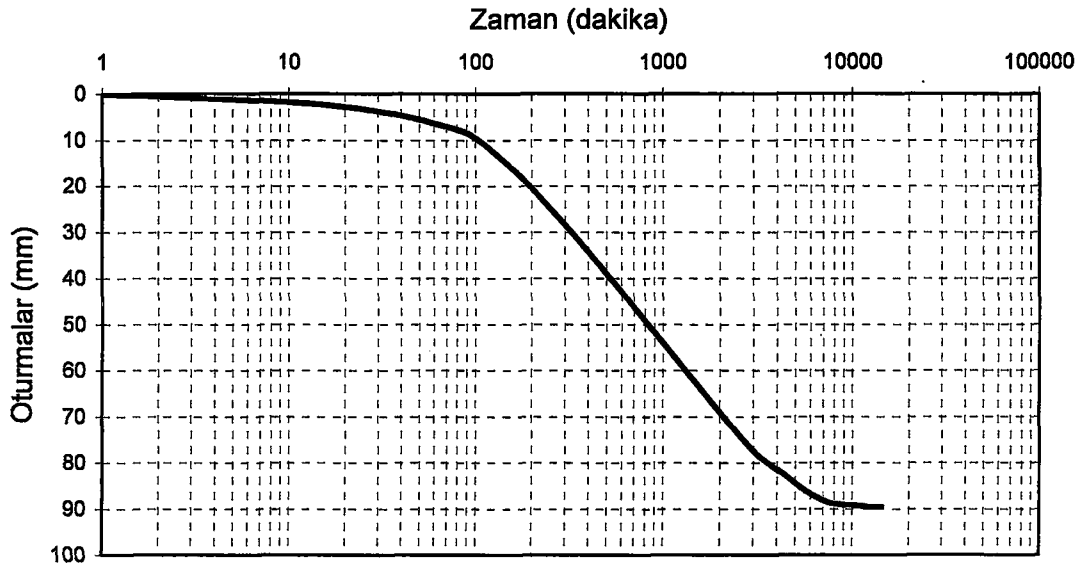
Bütün numuneler toz halindeki Eskişehir kilinden üretilmiştir. Bu kilin seçilmesinde likit limitinin oldukça düşük (%44) olması etkili olmuştur. Numune hazırlanmasından bir gün önce ağzı kapalı plastik kapta saklanan toz halindeki Eskişehir kilinden bir miktar alınıp 105° etüvde kurutulmuştur. Ertesi gün bu toz halindeki kuru kilden belli miktarda alınıp tartılmış, yaklaşık olarak likit limitin 2.5 katı su muhtevasında damıtık su dikkatle tartılıp eklenerek iki gün boyunca bir

emaye kovaya konulmuş ve kuru malzemenin suyu iyice emmesi sağlanmıştır. Ardından 45 dakika bir matkabın uç kısmına takılı bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır (Bütün numuneler aynı miktarda kil ve aynı miktarda su kullanılarak hazırlanmıştır).

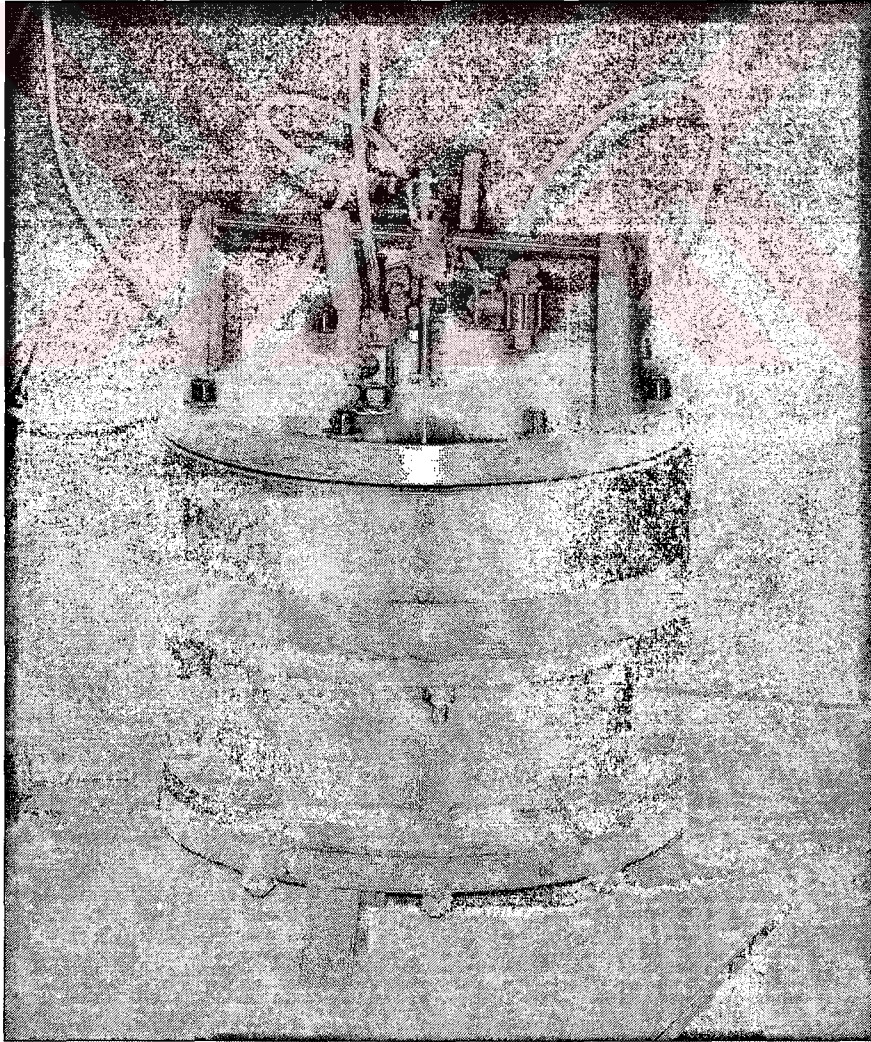


Şekil 3.4 Numune hazırlamada kullanılan Rowe hücresi.

Rowe hücresinin altına filtre kağıtlar yerleştirilmiş ve üzerine körük ve üst kapağı kapatılmış körüğün içerisine 30 kPa basınç verilip 24 saat beklenmiştir. İlk gün numunenin düşük bir basınç altında bekletilmesinin nedeni çok cıvık kıvamda olan numunenin körüğün kenarlarından fışkırmasını engellemektir. İkinci gün basınç 100 kPa'a yükseltilmiştir. Zemin yeteri kadar deformasyon yapınca üst kapak, körük ve yaka parçası çıkarılmış ardından üst kapak ve körük yerine yeniden takılmıştır. Su çıkışının durması ile konsolidasyonun tamamlandığı kabul edilmiştir. Konsolidasyonun tamamlanma süresi yaklaşık 1.5 haftadır. Bu süre sonunda yaklaşık 120 mm yüksekliğinde ve su muhtevası $w \cong \%40$ olan bir zemin keki elde edilmiştir. Şekil 3.6'de Rowe hücresinde yapılan tipik bir konsolidasyonun oturma zaman grafiği görülmektedir. Bu grafik, konsolidasyonun başlamasından 24 saat geçtikten sonra konsolidasyon basıncı 100 kPa değerine yükseltildikten sonraki oturmaların zamanla değişimini göstermektedir.

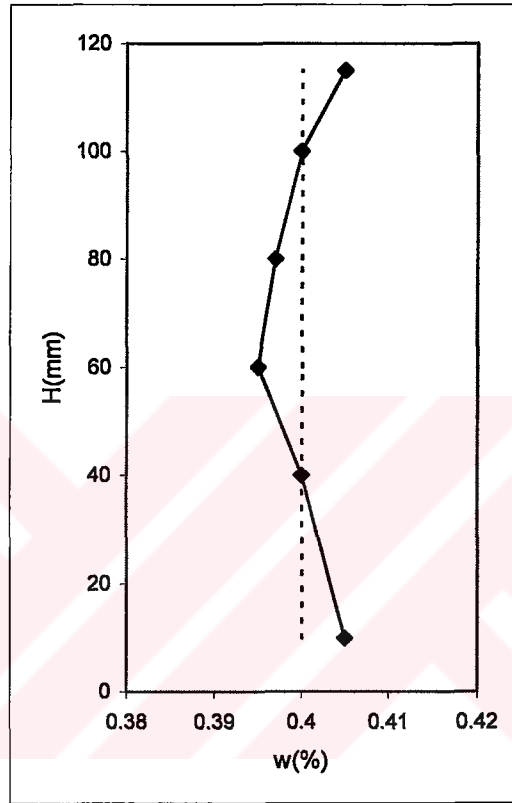


Şekil 3.5 Tipik bir Rowe hücresi konsolidasyonunun oturma-zaman ilişkisi.



Şekil 3.6 Çalışmada kullanılan Rowe hücresinin fotoğrafı.

Bu zemin kütlesinden üç eksenli deney numunesi almak için hücrenin üst başlığı sökülüp 50 mm çapında ELE marka standart bir numune alıcı ile numuneler alınmıştır. Her Rowe hücresiyle numune hazırlamasından yaklaşık 10 adet numune elde edilebilmiştir. Tablo3.2.'de yukarıda anlatıldığı şekilde hazırlanmış üç eksenli deney numunelerinin başlangıç koşulları özetlenmiştir. Şekil 3.7'de tipik bir zemin numunesinin su muhtevasının dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.7 Zemin karışımından Rowe hücresinden konsolide edilerek hazırlanan tipik bir numunenin su muhtevası dağılımı.

3.3.2 Üç eksenli deneyin kurulması

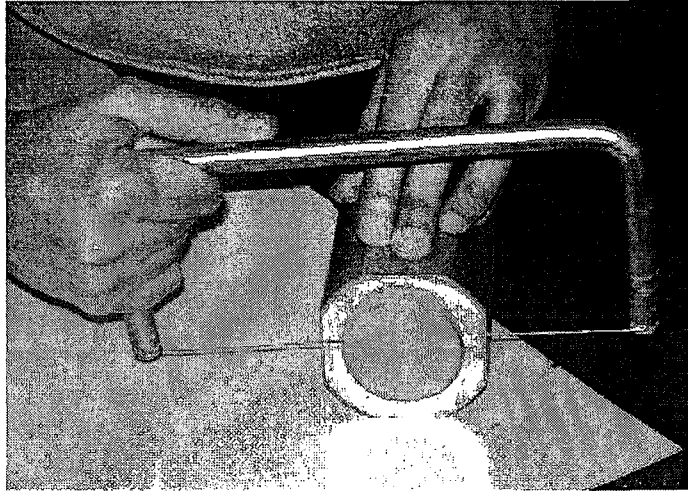
Rowe hücresinde 100 kPa basınç altında konsolide edilen kil numuneler, numune alıcıdan çıkarıldıktan sonra su muhtevalarını kaybetmemeleri için streç film ve alüminyum folyo ile kaplanmış ve desikatöre yerleştirilmiştir.

Numune üzerinde deney yapılacağı gün üç eksenli deney aletindeki bütün drenaj kanallarından basınçlı su geçirilerek hava kabarcıklarından arındırılır. Numune desikatörden alınarak, boyu 100 mm olacak şekilde Şekil 3.8'de görülen kalıp yardımıyla kesilir, daha sonra basınçlı su ile hava kabarcıklarından arındırılmış olan poroz taşların üzerine nemli filtre kağıtları ile beraber yerleştirilir. Yan drenler, deney

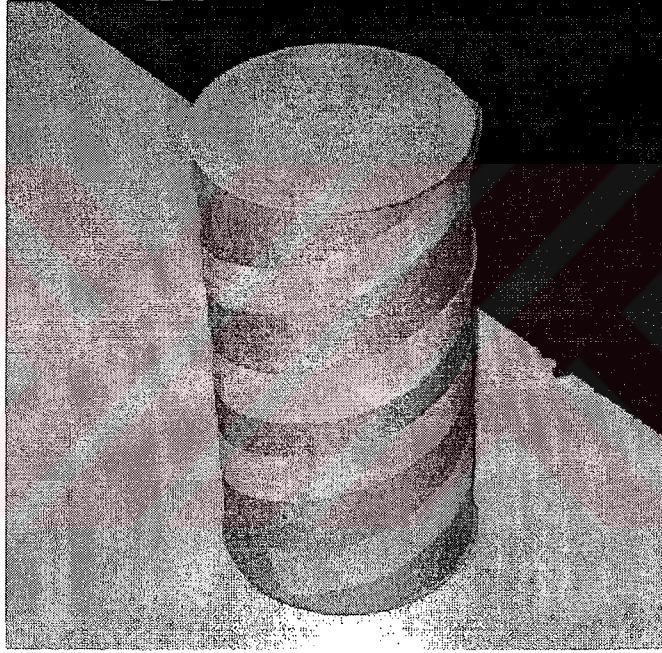
sonuçlarında yan dren düzeltilmesi yapmak gerekmemesi için, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi 1:1.4 eğimle spiral şeklinde numuneye sarılır (Head, 1997). Bu şekilde yerleştirilen yan drenler üst ve alt poroz taş ile temas halindedir. Daha önceden kaçaklara karşı kontrol edilmiş bir lateks membran, bir kılıf gerdirici yardımıyla numuneye geçirilir. Numune üç eksenli hücresindeki yerine oturtularak kılıf gerdiriciden çıkarılır, bundan sonra membran, alt ve üst başlıklara ikişer O-ring yardımıyla sabitlenmiştir. Bu işlemleri yaparken numune ile membran, numune ile poroz taş ve poroz taş ile başlıklar arasında hava kalmamasına çalışılmıştır. Alt ve üst başlıkların kenarlarına su sızıntılarını önlemek için silikon gresi sürülmüştür. Ardından üst başlık ters basınç kanalı düzgün bir şekilde üst başlığa vidalanmış ve hücrenin pleksiglas dış çeperi yerine yerleştirilmiştir. Hücreye, her deney öncesi kaynatılarak havası alınmış damıtık su türbülans oluşturmada doldurulmuştur. Bir miktar su hücre tavanındaki hava tahliye deliğinden akıtıldıktan sonra hücreye su alınan vana kapatılmıştır. Bu durumda numune deneye hazır hale gelmiştir.

Tablo 3.2. Üç eksenli deney numunelerinin başlangıç koşulları.

Deney Adı	Ağırlık m_o (gr)	Birim hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Su Muhtevası (%)	Deney Adı	Ağırlık m_o (gr)	Birim hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Su Muhtevası (%)
Y1	353.3	17.41	0.41	YT3B	356.7	17.57	0.39
Y4	356.0	17.54	0.40	YT4B	355.2	17.50	0.39
Y5	356.8	17.58	0.39	YT5B	353.7	17.43	0.41
Y6	355.2	17.50	0.40	YT6B	356.4	17.56	0.40
Y9	353.8	17.43	0.41	YT9B	358.7	17.67	0.39
Y14	355.9	17.54	0.40	YT10B	357.8	17.63	0.39
Y15	356.7	17.57	0.40	YT12B	356.1	17.55	0.39
Y16	356.9	17.58	0.40	YT15B	361.2	17.80	0.38
YT18	356.6	17.57	0.40	YT2	357.2	17.60	0.40
YT20	356.5	17.57	0.40	YAO27	354.0	17.44	0.41
YT22	353.7	17.43	0.40	YAO28	356.2	17.55	0.40
YT2A	357.1	17.59	0.39	YAO29	355.0	17.49	0.40
YT3A	357.0	17.59	0.39	YAO30	355.1	17.50	0.40
YT4A	354.2	17.45	0.41	YAO32Y	354.8	17.48	0.40
YT7A	357.9	17.63	0.39	YAO34	355.0	17.49	0.40
YT8A	354.8	17.48	0.40	YAO35	353.0	17.39	0.41
YT11A	356.0	17.54	0.39	YAO36	355.4	17.51	0.40
YT14A	361.4	17.81	0.38	YAO26	355.5	17.52	0.40
YT15A	363.2	17.90	0.39	YAO31	354.3	17.46	0.41
YT32	358.6	17.67	0.39	YAO33	355.0	17.49	0.40
YT33	357.5	17.61	0.40	Y7K	352.6	17.37	0.41
Y2	355.5	17.52	0.41	Y8K	353.2	17.40	0.41
Y3	356.5	17.57	0.40	Y10K	353.0	17.39	0.42
Y15Y	357.2	17.60	0.40	Y10K2	355.9	17.54	0.40
Y17	353.3	17.41	0.40	Y11K	353.3	17.41	0.41
YT19	357.1	17.59	0.40	Y14K	353.8	17.43	0.42
YT21	355.0	17.49	0.41	Y12K	353.5	17.42	0.41
YT23	354.7	17.48	0.40	Y13K	357.9	17.63	0.41
YT1B	354.8	17.48	0.39	Y15K	354.3	17.46	0.41
YT2B	359.0	17.69	0.40				



Şekil 3.8 Kalıp yardımıyla numune boyunun kısaltılması.



Şekil 3.9 Helezon biçiminde yan drenler sarılmış tipik bir numune.

3.3.2.1 Üç eksenli hücrede su ve hava kaçakları

Numune hazırlanması sırasında dikkat edilen en önemli nokta hücre içinden ve dışından basınç kaçaklarıdır. Drenajsız deneylerde deney sisteminde oluşabilecek su kaçakları numunenin boşluk suyu basıncının dolayısı ile 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 değişmektedir. Bu tip kaçaklar, bağlantı yerlerini o-ringlerle sızdırmaz hale getirmek, lateks kılıfın yüzeyinde delik olup olmadığının önceden belirlenmesi ve alt ve üst başlıkların lateks kılıf ile temas edecek yüzeylerine çok hafif bir tabaka silikon gresi sürerek sızdırmazlığı sağlamak sureti ile engellenmiştir. İkinci tip kaçaklar ise hücrenin dışarısındaki bağlantı yerlerinde oluşabilecek kaçaklardır. Bu tip kaçakların önlenmesi için küresel vanalar vb. bağlantı elemanları kullanılmıştır. Germaine ve Ladd (1988) hücreye numune yerine boşluklu bir taklit numune yerleştirip boşluk suyu basıncındaki değişimi izlemek yolu ile hücre ve bağlantılarda kaçak olup olmadığının varsa bunun miktarının belirlenmesinin periyodik olarak yapılması gereken bir kontrol olduğunu belirtmişlerdir. Bunun dışında her deneyde, kesme testine başlamadan birkaç saat önce ve kesme deneyinden hemen sonra drenajları kapatıp boşluk suyu basıncındaki değişim izlenerek kontrol yapılması gerektiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada kaçakları tespit amacı ile taklit bir numune kullanılarak test yapılmamıştır. Ancak her deney öncesi lateks kılıf deliklere karşı içine su doldurulup el ile sıkıştırılarak kontrol edilmiş ve deneylerden yaklaşık bir saat önce drenajlar kapatılarak boşluk suyu basıncının değişimi gözlenmiştir. Deneyler sırasında karşılaşılan en büyük problem üst drenaj kanalının numune üst başlığındaki ve hücre içindeki bağlantı yerlerinde oluşmuştur. Bu bağlantılar çok aşırı sıkılınca uygulanan basıncı iletmemekte, az sıkıldığı zaman ise sızıntıların önüne geçilememektedir. Bu bağlantı noktalarının sızdırmazlığını sağlamak için bağlantı yerlerine çok küçük o-ringler yerleştirilmiş ve bu o-ringlerin belirli aralıklarla değiştirilmesi gerekmiştir. Yinede bağlantının ne kadar sıkılacağı sorun olmuş ve belli bir el alışkanlığının kazanılması 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 geçirirliliğinin hemen hemen su ile eşit olduğunu, hücre içerisindeki 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 bildirmişlerdir.

Yaklaşık olarak on gün süren deneylerin yapıldığı bu çalışmada önceleri yan hücrelerde hava-su temas yüzeylerinin varlığı sorunlar yaratmış sebepsiz yere boşluk suyu basıncı artışları gözlenmiştir. Bunun sonucunda numuneler kullanılamamış ve zaman kaybedilmiştir. Ancak hava-su temas yüzeyleri engellendikten sonradır ki daha doğru bir şekilde boşluk suyu basıncı ölçmek mümkün olmuştur. Bu çalışmada anlatılan deneysel sistemde havası alınmış su kullanma imkanı olmadığından deneylerde hücre suyu olarak kaynatılıp soğutulmuş arıtılmış su kullanılmış ve deney sistemi içerisinde hiçbir yerde hava-su temas yüzeyine izin verilmemiştir. Kullanılan yan hücrelerin içerisinde geçirimsiz bir balon bulunmaktadır. Basınç kaynağından gelen basınçlı hava bu balonun içine dolmakta, balon şiştikçe tamamen dolu olan yan hücre içindeki suya, uygulanan basıncı aktarmaktadır. Bu şekilde üç yan hücreden biri hücre basıncı, diğer ikisi alt ve üst başlıklardan numuneye ters basınç sağlamakta kullanılmıştır.

3.3.2.2 Anizotropik konsolidasyon

Anizotropik konsolidasyon, düşey gerilmenin (σ_v) hücre basıncı vasıtası ile oluşturulan yatay basınçtan (σ_h) farklı olması halidir. Standart bir üç eksenli deney sisteminde düşey basınçları, yatay basınçtan yüksek olduğu ($\sigma_v > \sigma_h$) haller için anizotropik konsolidasyon şartları oluşturulabilmektedir.

Standart bir üç eksenli deney hücresi anizotropik konsolidasyon oluşturmak için kullanılmıştır. Eksenel yük, hücre pistonuna ölü yük sistemi kullanılarak küçük artışlarla numuneye uygulanmıştır. Eksenel boy değişimleri bir deplasman ölçer vasıtası ile ölçülmüştür. Zemin numunesi konsolidasyona bırakıldığında kirişin ve ölü ağırlıkların, ağırlıkları eylemsizlik kirişini taşıyan eşdeğer karşı ağırlık sistemiyle dengelenmektedir. Eşdeğer karşı ağırlık sisteminin sürtünmelerden etkilenmemesi için yük aktarımında kullanılan çelik halat Şekil 3.10 'da görülen rulmanlı makaralar vasıtası ile taşınmıştır.

Anizotropik konsolidasyon için hücre basıncı ve eksenel gerilme, istenilen K oranında, birlikte adım adım artırılarak numune anizotropik olarak konsolide edilebilir. Ancak adım adım anizotropik konsolidasyonun çok uzun zaman alması ve zor bir yöntem olması nedeniyle iki adımlı anizotropik konsolidasyon yöntemi kullanılmıştır. Odeh (1980) tarafından yapılan deneysel çalışmada iki adımlı anizotropik konsolidasyon ile adım adım anizotropik konsolidasyon deney sonuçları arasında çok büyük farklar olmadığı belirtilmiştir. Bu çalışmada $K < 1$ durumu için iki adımlı anizotropik konsolidasyon metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde $K = \sigma_v / \sigma_h$ ifadesindeki yatay bileşen (σ_h) numuneye bir kerede uygulanmış ve numune izotropik olarak konsolide edilmiştir. Ardından eksenel gerilme bileşeni, ölü yük

sistemi ile yavaş yavaş uygulanmış ve numune anizotropik gerilmeler altında konsolide edilmiştir. Genellikle izotropik konsolidasyon aşaması 1 gün, eksenel gerilme bileşeni ise 4 kademedeki yüklenerek her bir adım yüklemeye 1 gün beklenmiş ve toplam 4 gün devam etmiştir.



Şekil 3.10 Rulmanlı makara.

3.3.2.3 Ölü yük hesapları

Hesaplar sırasında Head'in (1997) verdiği hesap yöntemi takip edilmiştir. Hesaplamalarda aşağıdaki semboller kullanılmıştır:

L_c = Konsolide edilen numunenin boyu (mm)

A_c = Konsolide edilen numunenin alanı (mm²)

a = Hücre pistonunun alanı (mm²)

P = Yük hücresi tarafından karşılanan kuvvet (N)

ϵ = Eksenel şekil değiştirme (%)

A = Numune kesit alanı (mm²)

σ_h = Hücre basıncı (kPa)

F = Üst başlıktan numuneye uygulanan kuvvet (N)

$Q =$ Piston ve üst başlığın efektif ağırlığı (N)

$m_h =$ Ölü yük askı sisteminin ağırlığı (g)

$m =$ Ölü yüklerin ağırlığı (g)

Pistonun ve üst başlığın ağırlığı genellikle diğer ağırlıklardan oldukça küçük olduğu için ihmal edilebilir. Eğer ihmal edilmek istenmiyorsa düşey gerilme değerine aşağıdaki ifade eklenmelidir.

$$\frac{(m_p - m_w) \times 9.81}{1000} (kPa) \quad (3.1)$$

Burada m_p üst başlığın ve pistonun ağırlığıdır (g). m_w ise üst başlığın ve pistonun suya batan kısmının hacmidir (cm^3).

Numuneye etkiyen kuvvetler aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F = \left[\frac{m_h + m + (m_p - m_w)}{1000} \right] \times 9.81 - \frac{\sigma_h a}{1000} (N) \quad (3.2)$$

Eksenel gerilme (σ_v) ise;

$$\sigma_v = \left(\frac{F}{A \times 1000} \right) + \sigma_h (kPa) \quad (3.3)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır.

Tüm bu formüller, her bir numuneye uygulanacak yatay ve düşey basınçları belirlemek için Microsoft Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.3 Deney yöntemi

Normal konsolide numuneler üzerinde yapılan deneyler beş aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir:

- a) Numunenin suya doygun hale getirilmesi
- b) Numunenin istenilen çevre basıncı altında izotropik olarak konsolide edilmesi
- c) Numunenin istenilen düşey basınç altında anizotropik olarak konsolide edilmesi
- d) Burulmalı sistem ile numunenin maksimum kayma modülünün belirlenmesi

e) Numunenin deformasyon kontrollü drenajsız kesilmesi

Aşırı konsolide numuneler ise anizotropik olarak konsolide edildikten sonra üzerlerine etkiyen bütün yükler kaldırılarak 24 saat beklenmiş ve daha sonra izotropik olarak konsolide edildiği gerilme seviyesinde yeniden konsolide edilerek drenajsız olarak kesilmiştir.

Her numune üç eksenli alete yerleştirilip hücre su ile doldurulduktan sonra ters basınç 150 kPa değerine hücre basıncıda 175 kPa değerine getirilmiştir. Bu anda hücrenin bütün vanaları kapalıdır. Hücre basınç ölçerinin blok üzerindeki tahliye vidası hafifçe açılarak içinde hava kalmaması sağlanmıştır. Daha sonra hücre basıncı ve ters basınç vanaları açılmıştır. Bu basınçlar altında numune 1 gün bekletilmiş ve ardından numune izotropik gerilme düzeyinde yüklenmiştir. 24 saat sonra, konsolidasyon tamamlanınca çevre basıncı 50 kPa artırılarak B kontrollü yapılmıştır. Numunelerin hepsi $B > 0.96$ doygunluk şartlarında kesilmişlerdir.

Numuneleri anizotropik olarak yükleyebilmek için düşey yük 5-10 kPa artış adımlarıyla artırılarak numunelerin göçmesi engellenmiştir. Bu sayede yüksek anizotropik gerilmelere çıkabilmek için gereken süre 4-5 güne varmaktadır. Tablo 3.3.'de tipik bir yükleme ve boşaltma işlemi özetlenmiştir.

Kesme deneyine başlamadan 2 saat önce drenajlar kapatılarak boşluk suyu basınçlarında bir değişim olup olmadığı gözlenmiştir. Boşluk suyu basınçlarında genellikle bir değişim gözlenmemiştir. Birkaç deneyde vanalar kapatıldıktan sonra 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 azalmaların mevcut ters basınçlara oranı 0.01-0.02 civarındadır. Boşluk suyu basınçlarında artış gözlemlenen numuneler sökülmüş ve yerine yeni bir numune deneye tabi tutulmuştur.

Tablo 3.3. Anizotropik yükleme ve boşaltma adımları.

σ_c (kPa)	σ_v (kPa)	τ (kPa)	24 saat sonunda eksenel boy değişimi (mm)
150	150	0	3.25
150	220	35	4.99
200	300	50	6.41
250	390	70	10.3
250	450	100	14.29
0	0	0	9.23
150	150	0	10.00

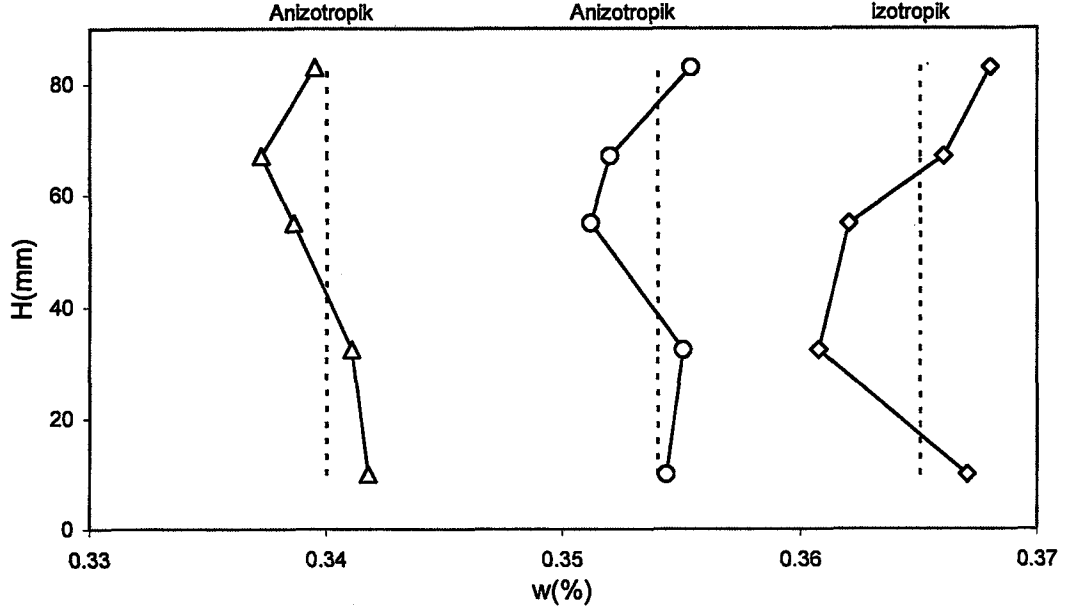
Kesme deneylerinin hepsi 0.05 mm/dakika deformasyon hızında yüklenmişlerdir. Anizotropik olarak yüklenen numunelerin boyları 5-14 mm kısaldığından, hücre piston boyu kısa kalmaktadır ve dolayısı ile her numunede %20 deformasyon seviyesine kadar deneyi sürdürmek mümkün olmamıştır. Bu sebeple deneyler yaklaşık olarak 4-6 saat sürmüştür. Kesme deneyleri esnasında 30 saniyede bir okuma alınmış ve ortalama olarak her deneyde 600 data alınmıştır.

Bu şekilde bir deneyin tamamlanması yaklaşık on gün sürmüştür. Kesme deneyinin tamamlanmasının ardından hücre basıncı sıfıra indirilmiş ve numune mümkün olduğunca kısa bir sürede üç eksenli deney hücresinden alınarak tartılmıştır. Numunelerin bazıları kıl testere ile numune eksenine dik yönde beş parçaya ayrılmış su muhtevası dağılımı belirlenmiştir. Numunelerin bu şekilde belirlenen su muhtevaları ortalama su muhtevasından $\pm\%1$ değişmektedir. Daha sonra etüvde kurumaya bırakılmış ve etüvde kurummasının ardından kuru ağırlığı belirlenmiştir. Şekil 3.11’de izotropik ve anizotropik numunelerin konsolidasyonlu drenajsız deney sonundaki su muhtevası dağılımları görülmektedir.

Her deney numunesinde yapılmamasına karşın kıl testere ile beş parçaya bölünen numunelerde kesilme numunenin hangi bölgesinde meydana geldiyse o bölgelerde su muhtevasının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Anizotropik numunelerin su muhtevası dağılımları daha az değişim gösterirken izotropik numunelerde daha değişken bir dağılım görülmektedir. Bu olayın sebebinin uzun süren konsolidasyon süresi boyunca su muhtevalarının dengelenmesi ve genel olarak deney sırasında izotropik numunelerde meydana gelen eksenel deformasyon miktarının anizotropik numunelere göre daha fazla olması dolayısı ile boşluklarda bulunan su, kesilme sırasında yer değiştirmek zorunda kalmaktadır. Oysa anizotropik numunelerde eksenel deformasyonun bir kısmı konsolidasyon sırasında meydana geldiğinden bu sırada boşluk suyu hareketi olsa bile zamanla su muhtevaları dengelenmektedir.

3.3.4 Hesaplamalar

Dijital data logger (ADU) ile toplanıp bilgisayara kaydedilen veriler eksenel yük (kN), boşluk suyu basıncı (kPa) ve eksenel yer değiştirmelerdir (mm). Bu veriler yardımı ile üç eksenli deney sonuçlarından geoteknik parametreler belirlenecektir.



Şekil 3.11 Kesme deneyi sonunda numunelerin su muhtevası dağılımı.

Eksenel yer değiştirme(%),

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (3.4)$$

Kesme deneyi sırasındaki alan,

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (3.5)$$

Boşluk oranı,

$$e = \frac{w\gamma_s}{S\gamma_w} \quad (3.6)$$

Deviatorik gerilme (F yük halkasından okunan kuvvet olmak üzere),

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$

Numunenin birim hacim ağırlığı,

$$\gamma_n = \frac{m_0}{V_0} \quad (3.8)$$

Gerilme izi parametreleri,

$$q = \frac{1}{2}(\sigma'_a - \sigma'_r) \quad (3.9)$$

$$p = \frac{1}{2}(\sigma'_a + \sigma'_r) \quad (3.10)$$

ifadelerinden hesaplanmıştır(Özaydın, 1989).

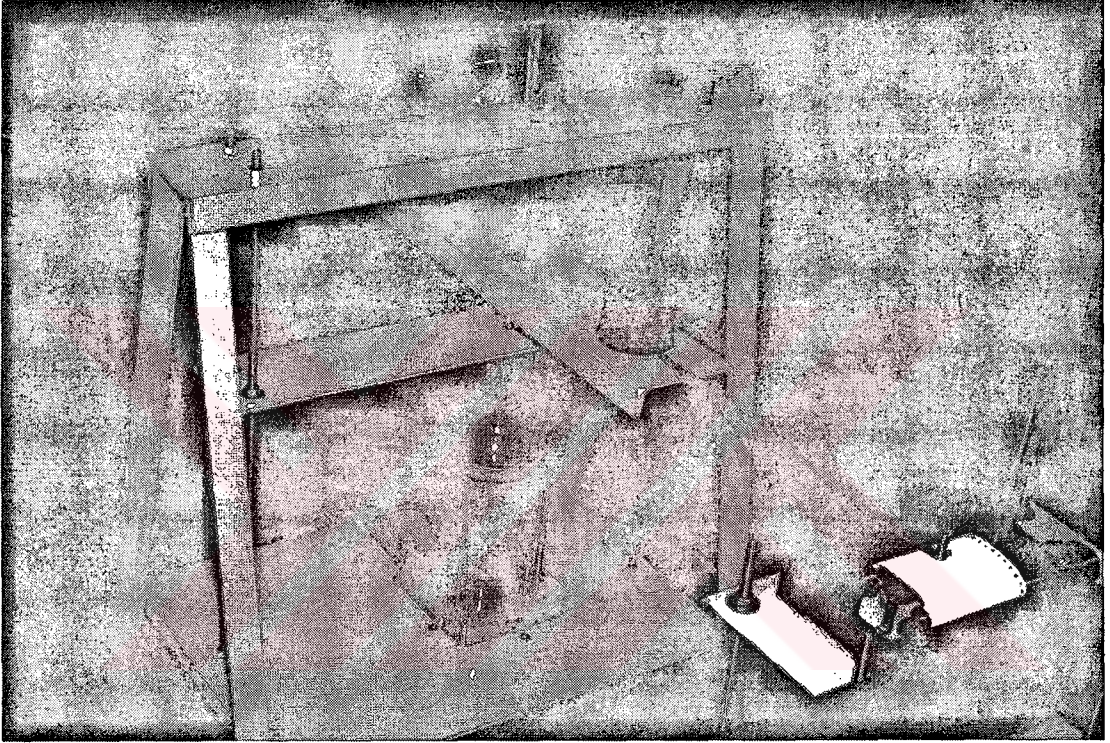
Elektriksel değişimlerden dolayı dijital data logger (ADU)'dan elde ettiğimiz deney datalarında parazitler görülmüştür. Bu parazitlerin giderilmesi için dijital data logger (ADU)'nun kesintisiz güç kaynağı gibi daha stabil bir elektrik kaynağından beslenilmesinin sorunu çözeceği düşünülmüştür. Ancak dijital data logger (ADU)'nun kesintisiz güç kaynağından beslenmesi bile parazitleri engellemeye yetmemiştir. Bu sebeple Ek.B.1 da görülen bilgisayar programı yazılmıştır. Bu program sayesinde deney dataları filtre edilmiş ve analizi daha kolay olmuştur.

3.4 Burulmalı Üç Eksenli Deney Sistemi

Daha önceki araştırmacılar (Zeevaert (1967), Özüdoğru (1981), Van Impe (1988)) 1960'lı yılların ortalarından itibaren burulmalı üç eksenli deney sistemini, zeminlerin başlangıç kayma modülünü belirlemek için, kullanmışlardır. Kullanılan sistemler aynı prensiplere dayanmaktadır. Gerekli eylemsizlik momentine sahip bir giriş zemin numunesi ile birlikte titreşmekte ve bu titreşim hareketinden, elastisite teorisi yardımı ile, zeminin başlangıç kayma modülü hesaplanmaktadır. Şekil 3.12'de Zeevaert'in (1967) kullandığı burulmalı üç eksenli deney sistemi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi bu sistem elektronik hiçbir kayıt sistemi içermemekte serbest titreşim hareketi girişin uç tarafına tutturulmuş bir kalem vasıtası ile direkt olarak kağıda aktarılmaktadır. Hücreye verilen hidrostatik basınç ile izotropik olarak konsolide edilen numuneye bağlı bulunan sarkaç girişine uygulanan küçük bir itme ile sistem titreşmektedir. Daha sonra kaydedilen bu titreşim hareketi yardımı ile başlangıç kayma modülü hesaplanabilmektedir. Yeni tasarlanan burulmalı üç eksenli sistemde ise eylemsizlik girişinin hareketleri sayısal olarak bilgisayara kaydedilebilmekte ve numunelere anizotropik konsolidasyon uygulanabilmektedir.

Bu amaçla klasik bir üç eksenli deney sistemi istenilen deney şartlarını oluşturacak şekilde modifiye edilmiştir. 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde numuneler üzerinde, Wykham Farrance marka hücre ve üç eksenli çerçevesi kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Deneylerde kullanılacak numunelerin başlangıç kayma modülünü belirleyebilmek için özel bir üst başlık ve bu başlığa uygun bir üç eksenli deney hücresi pistonu yaptırılmıştır. Üst başlık ile piston arasında herhangi bir hareket oluşmaması gerektiği için pistonun ucundaki kama, bir kalıba yerleştirilmiş ve bu kalıba uygun kimyasal bileşimde sıvı polyester dökülerek bu maddenin kuruması beklenmiş ve daha sonra kama eksenine tam dik olacak şekilde tornalanarak pistonun ucundaki kamanın tam olarak oturacağı bir yuvası olan üst başlık elde edilmiştir. Şekil 3.13'de üst başlık, hücre pistonu ve kiriş ile hücre pistonunun birlikte hareket etmesini sağlayan bağlama parçası görülmektedir.

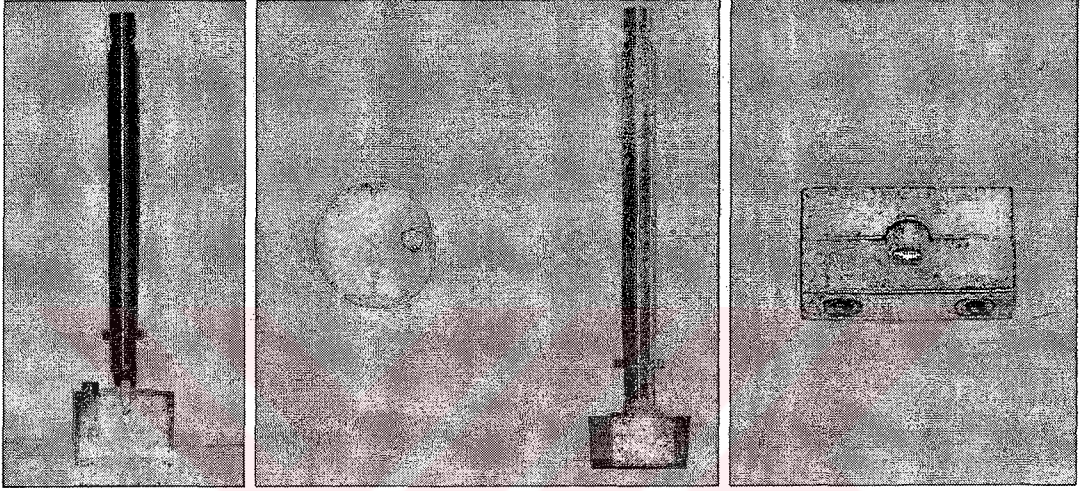


Şekil 3.12 Zeevaert (1967) tarafından kullanılan burulmalı üç eksenli sistemi.

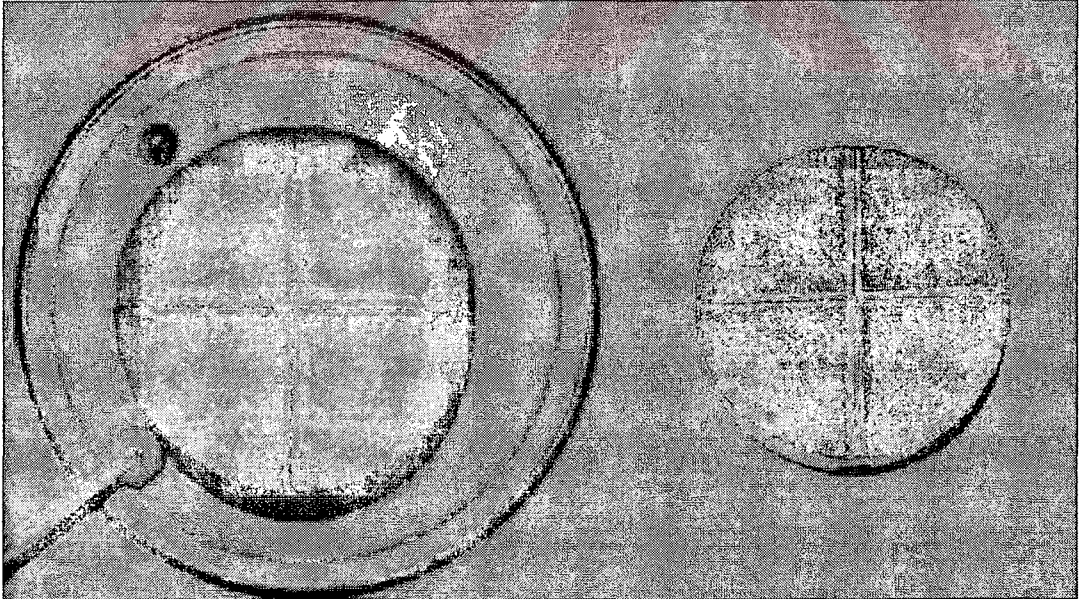
Numune ile başlık arasında kaymalar oluşmaması için, alt ve üst başlıklara küçük metal tırnaklar ilave edilmiştir. Bakır levhalardan kesilen bu tırnaklar, daha önceden ince testere ile poroz taş üzerinde açılan yarıklara yerleştirilerek epoksi reçinesi ile yapıştırılmıştır. Bakır tırnaklı bu poroz taşlar alt ve üst başlıklara gene epoksi reçinesi kullanarak yapıştırılmıştır. Bu malzemeler Şekil 3.14'de görülmektedir. Bu şekilde yerine oturduğu zaman, uygulanan bir burulma hareketini hiç bir kayıp olmaksızın numuneye ileten bir piston, başlık sistemi geliştirilmiştir. Bu başlık ve piston sistemi ile zemin numunelerine çok küçük genlikli burulma deformasyonları uygulayabilmek için bir sarkaç kiriş imal edilmiştir. Aynı zamanda bu kirişin ağırlığını dengeleyen eşdeğer karşı ağırlık sistemi sayesinde anizotropik düşey gerilmeler numuneye uygulanabilmıştır. Uygulanmak istenen anizotropik

gerilmelere göre eşdeğer karşı ağırlık sistemindeki ağırlıklar azaltılmakta ve kirişin ağırlığının numune üzerine etkimesi sağlanmaktadır. Elde edilen deney sistemi burulmalı üç eksenli deney sistemi olarak adlandırılmıştır.

Eylemsizlik kirişi, çelik U80 profilinden imal edilmiştir. Her iki ucunda merkezden 93,5 ve 80,5 mm uzaklıkta iki delik bulunmakta bu deliklere ölü ağırlıklar monte edilmektedir. Ölü ağırlıkların miktarı yapılan deneylerde izotropik ve anizotropik konsolidasyon için seçilen düşey gerilmeyi oluşturabilmek amacı ile artırılıp azaltılabilmektedir. Bütün sistem Şekil 3.15'de görülmektedir.



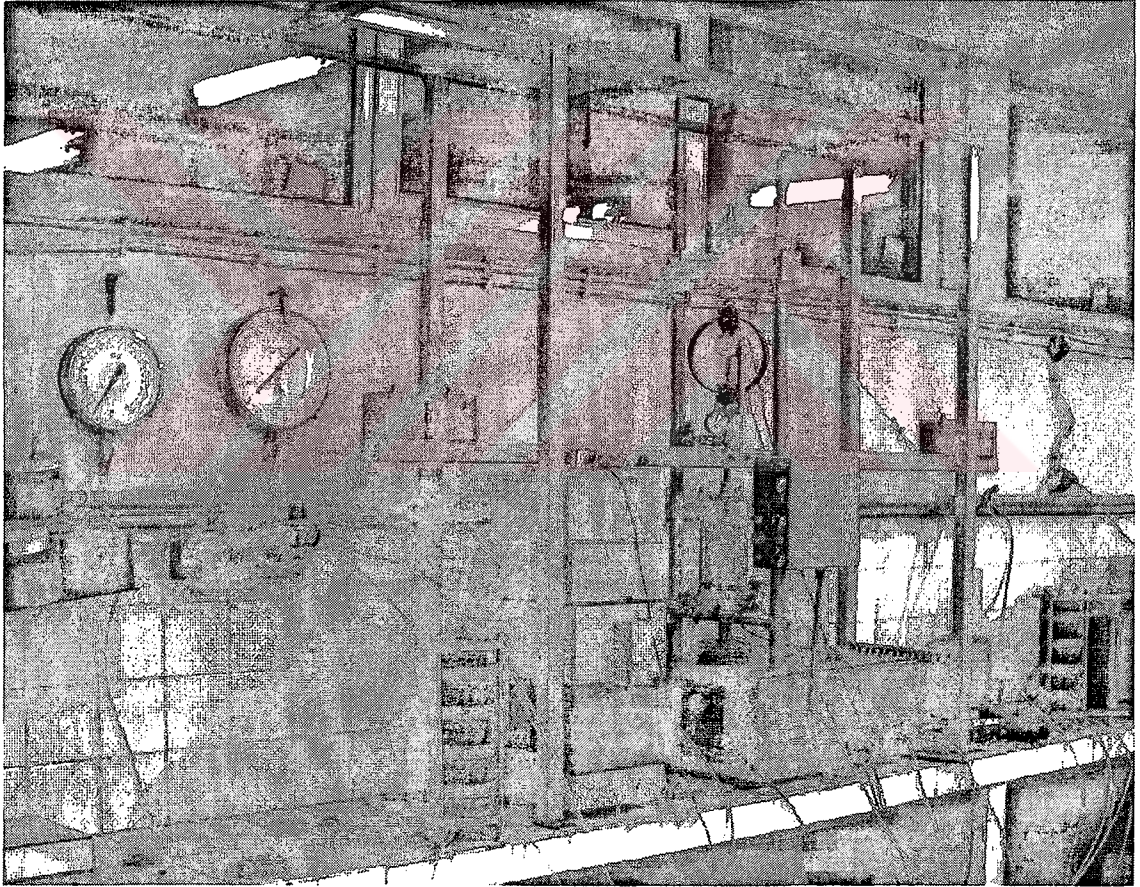
Şekil 3.13 Üst başlık, hücre pistonu ve bağlama parçası.



Şekil 3.14 Alt ve üst başlıklar ve bu başlıklara eklenen metal tırnaklar.

3.4.1 Deney Yöntemi

Basit olarak, sarkaç kirişinin merkezinden 0.5 m uzaklıkta bulunan hassas deplasman ölçer sayesinde, numuneye uygulanan 10^{-4} mertebesindeki kayma deformasyonları ölçülebilmekte ve bu sayede başlangıç kayma modülü hesaplanabilmektedir. Deplasman ölçerin numuneden bu kadar uzağa konulmasının sebebi uygulanan kayma deformasyonlarının daha hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamaktır. Bütün deneylerde aynı deformasyonları uygulayabilmek için eylemsizlik kirişine her seferinde aynı başlangıç hareketi uygulanması gerekmektedir. Bu sebeple hassas verniyerli kompas ile eylemsizlik kirişinin hareketinin nümerik olarak kaydedilmesini sağlayan deplasman ölçer, aynı platforma monte edilmiş ve bu sayede her deneyde eylemsizlik kirişinin aynı başlangıç deformasyonunu yapması sağlanmıştır.

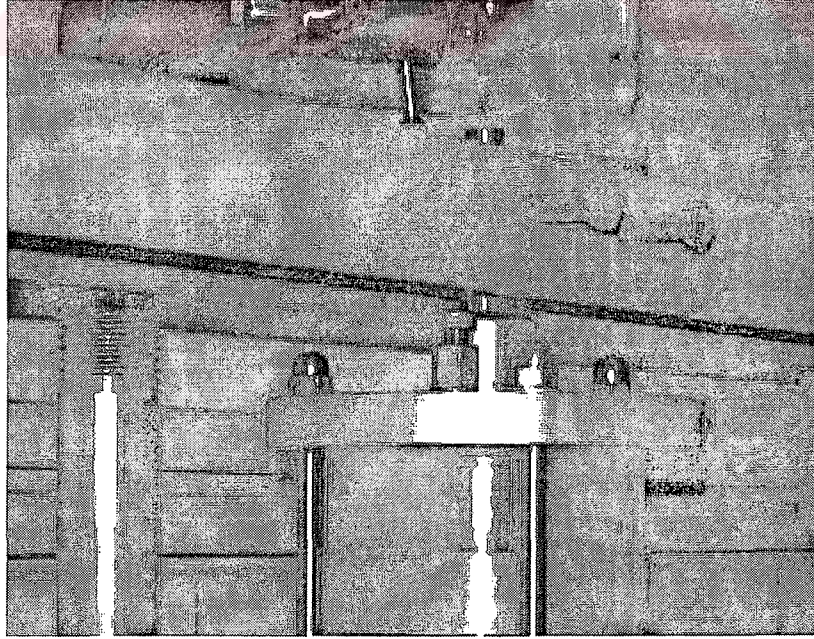


Şekil 3.15 Deney sisteminin genel görünüşü.

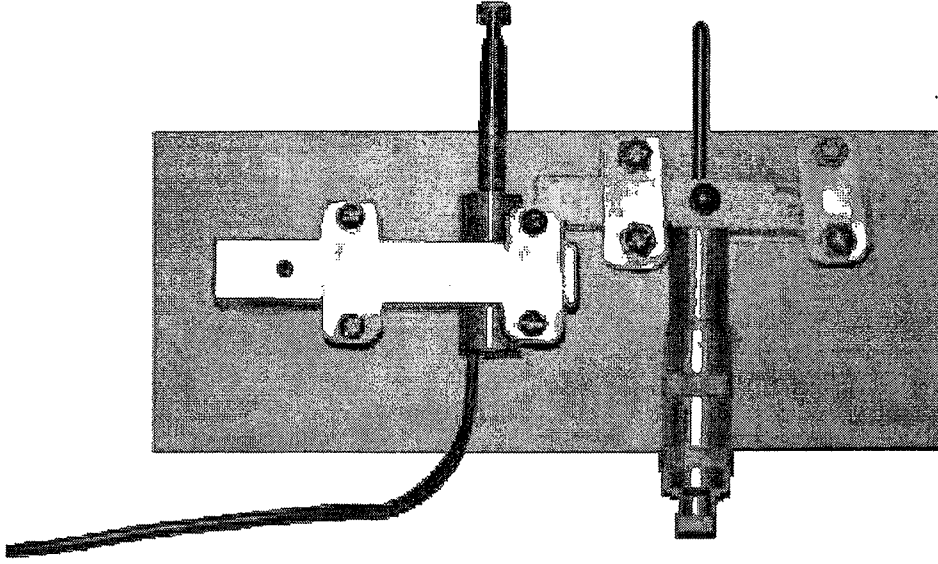
Konsolidasyonunu tamamlamış numunenin başlangıç kayma modülünün belirlenmesi için, şekil 3.16'da görülen, burulma kirişinin üzerindeki vidalar sıkılarak burulma kirişi ve numune-piston ikilisi beraber hareket eden bir sistem haline getirilir. Ardından şekil 3.17'de görülen hassas deplasman ölçer ve verniyerli

hassas kompas, bir platform üzerinde, burulma kirişinin merkezine 50 cm uzaklığa hassas kompas sıfır (0) gösterecek şekilde yerleştirilir. Hassas deplasman ölçerin ölçü çubuğunun ucuna eklenen bir mıknatıs yardımı ile eylemsizlik kirişinin hareketlerini daha kolay bir şekilde ölçmek mümkün olmuştur. Verniyerli kompas 5 mm geri çekilir. Yapılacak serbest titreşim hareketinin datalarını kaydedecek olan dijital data logger (ADU) çalıştırılarak sıfırlanır ve datalar alınmaya başlanır ve burulma kirişi yavaşça hareket ettirilip, 5mm geri çekilmiş olan, hassas verniyerli kompas dokundurulur ve serbest bırakılır. Bu sayede sistem serbest titreşim hareketine başlamış olur. Şekil 3.18'de tipik bir serbest titreşim hareketi görülmektedir.

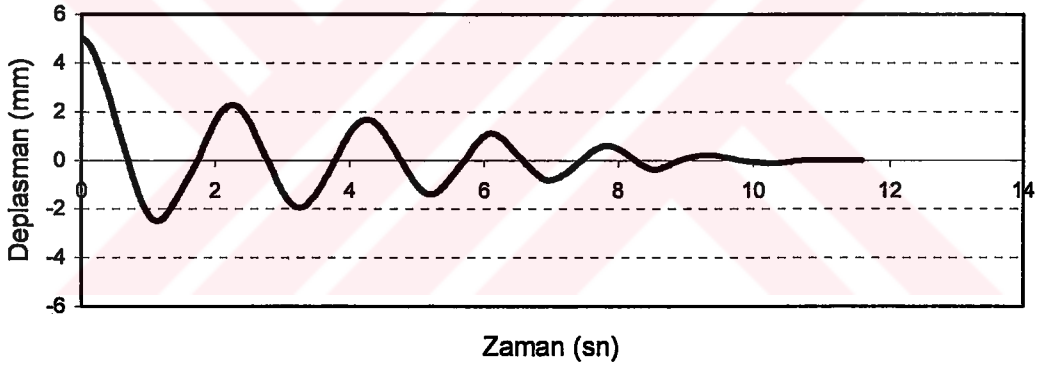
Serbest titreşim hareketi esnasında saniyede 100 okuma alınmıştır. Hareketin sönümlenmesi yaklaşık olarak 10-15 saniye sürdüğünden her serbest titreşim deneyinden ortalama 1500 data elde edilmektedir. Serbest titreşim hareketi datalarını analiz ederken, meydana gelen ikinci tam titreşim hareketinin gerçekleşmesi için geçen süre periyot olarak alınmıştır. Eylemsizlik kirişi serbest bırakıldıktan sonra zemin numunesi ve eylemsizlik kirişi, tek serbestlik dereceli bir sistem gibi davranmakta ve zeminin kayma modülü, periyot ölçümü ile bulunabilmektedir. Deformasyon ölçümleri için Tablo2.1'de özellikleri verilen ELE marka 10 mm toplam açılımlı deplasman ölçer kullanılmıştır. Bu deplasman ölçerin kalibrasyon dataları EkA4'de verilmiştir.



Şekil 3.16 Piston ile eylemsizlik kirişinin beraber hareket etmesini sağlayan vidalı sistem.



Şekil 3.17 Serbest titreşim hareketini ölçmekte kullanılan hassas deplasman ölçer ve verniyerli kompas.



Sekil 3.18 Tipik bir serbest titreşim hareketi.

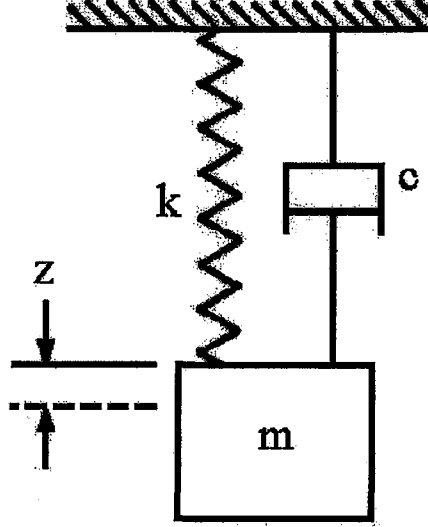
3.4.2 Hesaplamalar

Yapılan hesaplardaki formüller ve semboller Özüdoğru (1981)'den alınmıştır.

3.4.2.1 Dalga denklemi

Zemini viskoz sönümlü bir sistem olarak düşünürsek serbest titreşim kayıtlarından, zeminin rijitliği yani kayma parametreleri elde edilebilir.

Zemin-eylemsizlik kirişi sistemi tek serbestlik dereceli bir sistem olarak düşünülebilir. Şekil 3.19 'daki tek serbestlik dereceli sistem için Newton'un hareket kanunu kullanılarak aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilebilir.



Şekil 3.19 Tek serbestlik dereceli sistem.

$$mz'' + cz' + kz = 0 \quad (3.11)$$

Bu denklemin çözümü Richard, Hall ve Woods (1971) tarafından

$$z = C_1 e^{\beta_1 t} + C_2 e^{\beta_2 t} \quad (3.12)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2m} \left[-c + \sqrt{c^2 - 4km} \right] \quad (3.13)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2m} \left[-c - \sqrt{c^2 - 4km} \right] \quad (3.14)$$

olarak verilmiştir.

Burada

z = Deplasman (m)

z' = Hız (ms^{-1})

z'' = İvme (ms^{-2})

C_1, C_2 = Rasgele sabitler

c = Viskoz sönüm katsayısı

m = Kütle (kg)

e = Doğal logaritma tabanı

$c^2 < 4km$ durumu için

$$\beta_1 = \omega_n \left[-D + \sqrt{1 - D^2} \right] \quad (3.15)$$

$$\beta_2 = \omega_n \left[-D - \sqrt{1 - D^2} \right] \quad (3.16)$$

Burada

$D = \text{Sönüm Oranı}, D = C/C_c$

$C_c = \text{Kritik Sönüm oranı}$

$\omega_n = \text{Sönümsüz doğal radyal frekans (s}^{-1}\text{)}$

böylece

$$z = e^{(-\omega_n D t)} \left[C_3 \sin \omega_n + \sqrt{1 + D^2} + C_4 \cos \omega_n + \sqrt{1 - D^2} \right] \quad (3.17)$$

Burada

$C_3, C_4 = \text{Rasgele sabitler}$

$t = \text{zaman (s)}$

Viskoz lineer dönel sistemler için (3.10) nolu denklem

$$JZ'' + CZ' + KZ = 0 \quad (3.18)$$

Burada

$J = \text{Eylemsizlik kütle momenti (m}^2 \text{ kg)}$

$K = \text{Dönel rijitlik (m}^2 \text{ kg s}^{-2}\text{)}$

3.16 nolu eşitlik aynı zamanda 3.17 nolu eşitliğin de çözümüdür. 3.16 nolu eşitlik çözülürse görülür ki serbest titreşim hareketinin frekansı, sönümsüz doğal radyal frekansdan küçüktür. Bunun sonucu olarak $D \approx 1$ olurken frekans sıfıra yaklaşır yani hareket meydana gelmez. Sönümlü hareketin doğal radyal frekansı, sönümsüz doğal radyal frekans cinsinden aşağıdaki gibi verilir:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \quad (3.19)$$

Serbest titreşim hareketinde birbirini takip eden her bir tepe için 3.16 nolu eşitlikten:

$$\frac{z_1}{z_2} = e^{\left(\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}\right)} \quad (3.20)$$

veya

$$\delta = \ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (3.21)$$

3.4.2.2 Kayma Modülünün Hesaplanması

Zemin numunesi bir ucu serbest bir ucu tutulu elastik bir çubuk olarak düşünülebilir. Zamana bağlı gerilme-şekil değiştirme davranışları aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \varpi_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (3.22)$$

Bu denklemde;

$$K = \frac{GI_p}{h} \quad (3.23)$$

$$J = mR^2 \quad (3.24)$$

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (3.25)$$

Bu denklemleri birleştirirsek;

$$G = \frac{8\pi.J.h}{r^4.T^2} \quad (3.26)$$

$$T = \frac{2\pi}{\varpi_n} \quad (3.27)$$

Burada

G= Zeminin kayma modülü (N/m²)

I_p= Zemin numunesinin polar eylemsizlik momenti (m⁴)

J= Bütün sistemin polar kütle eylemsizlik momenti (N.m.sn²)

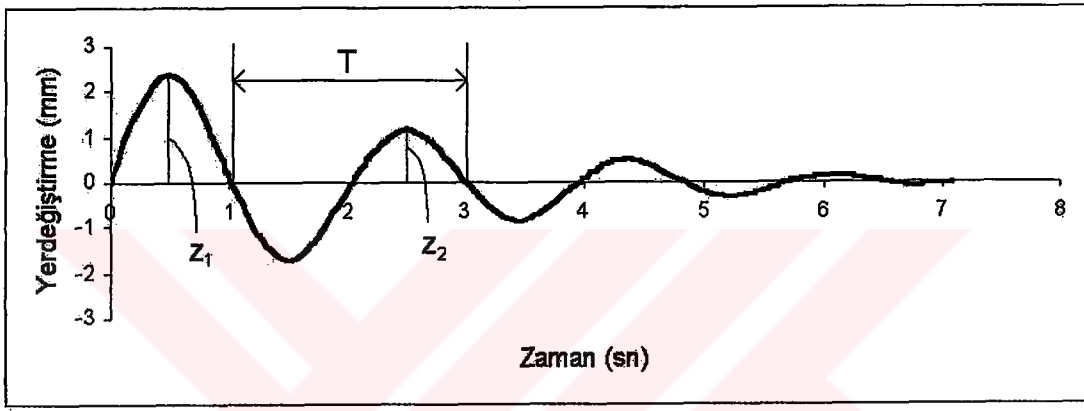
d = Zemin numunesinin çapı (m)

r = Zemin numunesinin yarıçapı(m)

T = Serbest titreşimin periyodu (s)

h = zemin numunesinin yüksekliği (m)

Böylece görülür ki zeminin kayma modülünün belirlenebilmesi için gerekenler sadece sönümlenen serbest titreşim hareketinin periyodu ve polar eylemsizlik momentleridir. Periyot değerinin belirlenmesi Şekil 3.20 den görülebilir.



Şekil 3.20 Periyodun ve yerdeğiştirmelerin belirlenmesi.

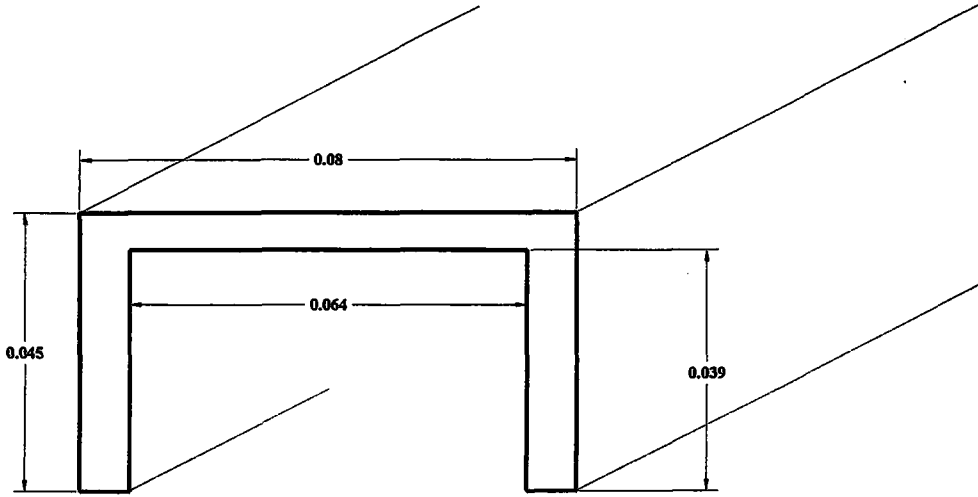
Kullanılan U80 kirişinin polar kütle eylemsizlik modülü hesaplanırken iki ayrı yöntem kullanılmıştır.:

a) Analitik yöntem;

Literatürde dikdörtgenler prizması şeklindeki bir elemanın ortasından geçen bir eksene göre polar kütle eylemsizlik momenti (dikdörtgenler prizmasının boyutları h, b, l ise)

$$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (l^2 + b^2) \quad (3.28)$$

olarak verilmektedir. U80 den imal ettiğimiz eylemsizlik kirişini 2, 0.08, 0.045 m boyutlarında bir dikdörtgen çubuktan 2, 0.064, 0.039 m boyutlarında bir dikdörtgenin çıkarılması ile polar kütle eylemsizlik momentinin bulunabileceği düşünülmüştür (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Analitik olarak polar kütle eylemsizlik momentlerinin hesabı için kabul edilen kiriş geometrisi.

Bu şekilde hesap yapıldığı zaman $J=5.82 \text{ Nmsn}^2$ olarak hesaplanmıştır.

b) Sayısal yöntem

Eylemsizlik kirişinin polar kütle eylemsizlik momenti, EkB.2’de görülen bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde polar kütle eylemsizlik momenti bulunurken kiriş bir boyutu diğer boyutlarına göre çok büyük olduğundan tek boyutlu çubuk olarak kabul edilmiştir. Bu program, kirişi sayısal olarak 5000 parçaya bölmüş ve her bir parçanın kütlesi kiriş orta noktasına olan uzaklığının karesi ile çarpmıştır. Bu işlemin sonucunda ise kirişin polar kütle eylemsizlik momenti $J=5.77 \text{ Nmsn}^2$ olarak bulunmuştur.

Konsolidasyon sırasında kirişin yeterli basıncı uygulayabilmesi için kiriş üzerine eklenen ağırlıkların kütleleri de hesaplar sırasında kirişin polar kütle eylemsizlik momentine, kirişin merkezinden olan uzaklıklarının karesi ile çarpılarak (mr^2) eklenmiştir.

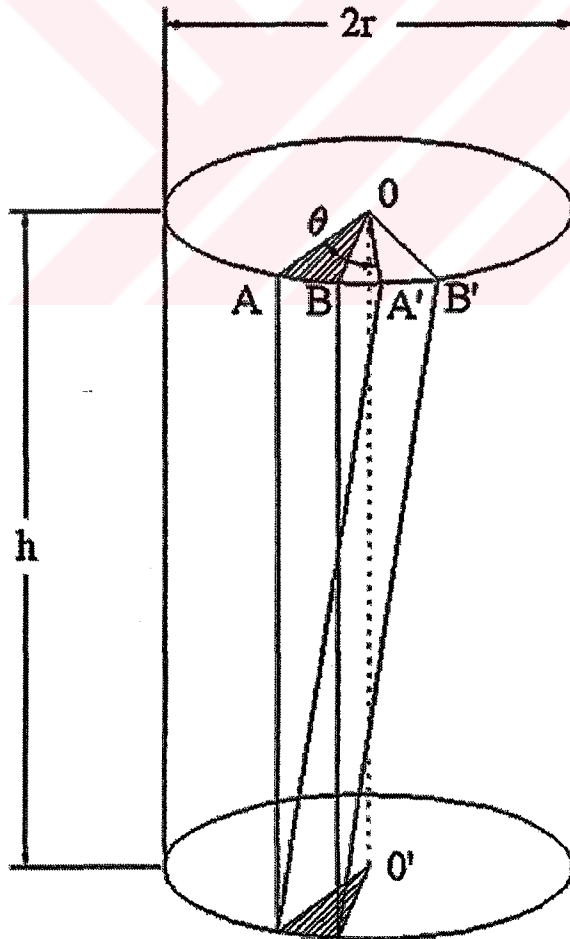
3.4.2.3 Deformasyonların hesaplanması

Burulma momentine maruz kalan bir silindirik numune kayma gerilmesinin, numunenin eksenine dik düzlem boyunca dağılımı lineer değildir. Oluşan kayma deformasyonları da, çap boyunca, merkez noktasında sıfır değerinden dış çeperde en büyük değerine kadar değişmektedir. Numunede meydana gelen deformasyonları hesaplarken merkez noktasından belirli bir uzaklıkta meydana gelen

deformasyonların numunenin yaptığı tüm deformasyonları temsil eden bir deformasyon olarak seçilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada, Şekil 3.22'de görülebileceği gibi numunenin dış çeperinde meydana gelen en büyük deformasyonların 2/3'ü, hesaplarda kullanılan kayma deformasyonu olarak seçilmiştir.

$$\gamma = \frac{2}{3} \gamma_{\max} = \frac{2}{3} \frac{r}{h} \theta \quad (3.29)$$

Deformasyonlar zemin numunesinin merkez noktasından 50 cm uzaklıkta ölçüldüğü için bu noktada ölçülen lineer deformasyon miktarı kullanılarak yapılan burulma hareketi sırasında burulma kirisinin, ne kadar bir açı ile döndüğü belirlenebilir. Hesaplanan bu açı ile yukarıda anlatıldığı gibi silindirik numunenin dış cidarında meydana gelen kayma deformasyonu ($\gamma_{\max}$) belirlenir. Belirlenen kayma deformasyonu ile sistemin hareketini temsil edecek olan kayma modülü (γ) belirlenir.



$$\gamma_{\max} = \frac{r}{h} \theta$$

$$\gamma = \frac{2}{3} \gamma_{\max}$$

Şekil 3.22. Kayma deformasyonunun belirlenmesi.

Örneğin numunenin ekseninden 50 cm uzaklıkta bulunan deplasman ölçer 2 mm ölçüm yaptığı andaki kayma deformasyonu değerini belirleyebilmek için öncelikle yapılan açisal hareketin miktarı belirlenmelidir.

$$\theta = \text{ArcTan} \frac{2}{500} = 4 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

Ardından verilen formülleri kullanarak maksimum kayma deformasyonu hesaplanır;

$$\gamma_{\max} = \frac{r}{h} \theta = \frac{2.5}{10} \times 4 \times 10^{-3} = 1 \times 10^{-3}$$

Maksimum kayma deformasyonundan sonra, kullanılacak kayma deformasyonu hesaplanır.

$$\gamma = \frac{2}{3} \times 1 \times 10^{-3} = 6.67 \times 10^{-4}$$

Görüldüğü gibi kayma modülü hesaplanırken kullanılan kayma deformasyonu miktarı 10^{-4} mertebelerindedir. Bu mertebedeki kayma deformasyonunun maksimum kayma modülü hesaplanmasına yetecek kadar küçük olduğu kabul edilmiştir.

3.4.3 Sistemin kalibrasyonu

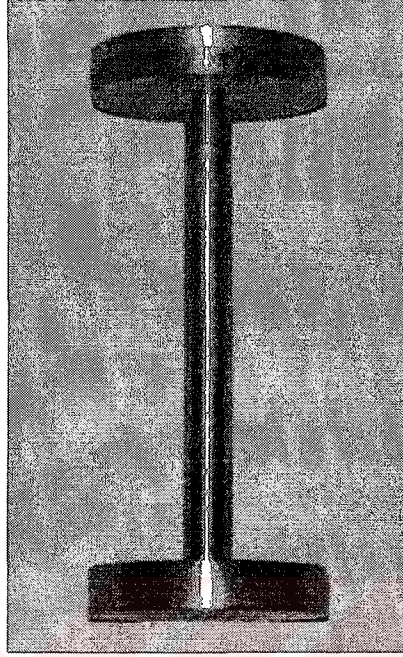
Özel olarak yaptırılan 10 cm uzunluğunda 1 cm çaplı alüminyum çubuk bütün özellikleri bilindiği için kalibrasyon amacı ile kullanılmıştır. Şekil 3.23'de görülen alüminyum çubuk, alt ve üst başlıklara çelik kelepçeler yardımı ile sabitlenmiş ve ardından, zemin numunesi ile deney yapılmış gibi deney yapılmıştır. Alüminyum kalibrasyon çubuğunun özellikleri Tablo 3.4.'de verilmiştir. Alüminyum kalibrasyon çubuğu ile değişik kiriş eylemsizliklerinde deneyler yapılmış aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3.4. Alüminyum çubuğun özellikleri.

Yoğunluk(kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Kayma modülü (kN/m ²)
26.6	6.95x10 ⁷	2.54x10 ⁷

Alüminyum kalibrasyon çubuğu ile kalibrasyon yapılırken önce kirişin üstünde toplam 16 kg ilave ağırlık varken deney yapılmıştır. Bu denemede periyot 1.77 sn olarak bulunmuştur. Aynı deney 24 kg ile tekrarlandığında periyot 1.99 sn ölçülmüştür. Daha sonra aynı deney 32 kg yük varken tekrarlanmış ve periyot 2.185 sn olarak ölçülmüştür. Şekil 3.24 de bu deneylere ait serbest titreşim hareketlerinin grafikleri görülmektedir. Kirişte ilave ağırlıklar varken kalibrasyon yapılmasının

sebebi üst başlık ile kalibrasyon çubuğunun birbirine kelepçe yardımı ile bağlansa bile oluşabilecek istenmeyen kaymaları engellemektir.

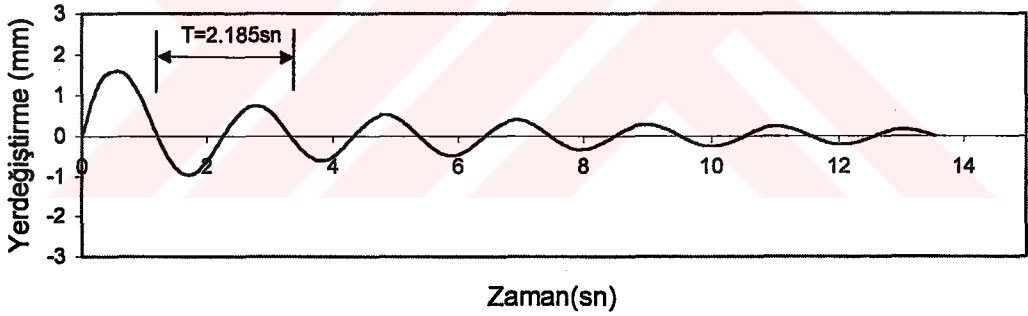
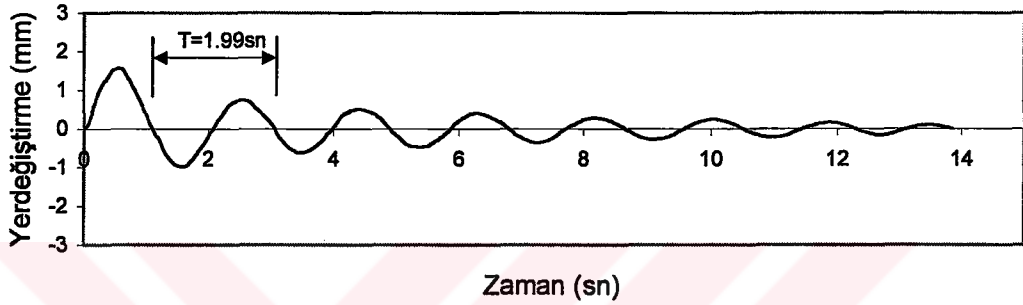
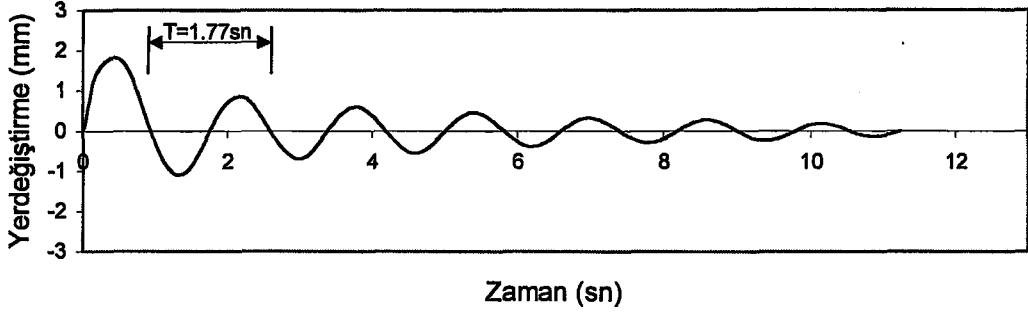


Şekil 3.23 Alüminyum kalibrasyon çubuğu.

3.4.4 Serbest titreşim deneyi üzerine düşünceler

Serbest titreşim deneyleri yapılırken ve sonrasında belirlenen bazı fikirler bu bölümde tartışılacak ve sistemin daha da iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için önerilerde bulunulacaktır.

Serbest titreşim deneyleri, numunelerin konsolidasyonunun sonunda uygulanmıştır. Bazı deneylerde numuneler tam olarak konsolide olmadan da (örneğin, konsolidasyon başlangıcından 12 saat sonra) serbest titreşim deneyi yapılmış ancak boşluk suyu basınçlarında artışlar gözlenmiştir. Bu artışlar çok büyük mertebelerde olmasalar bile (3-5 kPa) numunelerin hepsinde aynı miktarda örselenmenin var olduğunu kabul ettiğimiz için bu tip ara deneyler uygulanmamıştır. Yine aynı şekilde anizotropik konsolidasyonun her aşamasının bitiminde, serbest titreşim deneyinin uygulanmasından da numunelerde örselenme yaratma endişesi ile vazgeçilmiştir. Zira bu çok küçük genlikli kayma deformasyonları defalarca kez numunenin üzerine etkirse az da olsa bir miktar örselenme meydana getirilebilir diye düşünülmüştür. Sadece bir grup deneyde anizotropik konsolidasyonun her aşamasında serbest titreşim deneyi uygulanmış ve konsolidasyonun her adımının tamamlanmasından sonra maksimum kayma modülü belirlenmiştir. Bu deneylerin sonuçları bir sonraki bölümde görülebilir.



Şekil 3.24 Alüminyum kalibrasyon çubuğu kullanılarak elde edilen eğriler.

Deney sırasında yumuşak numunelerin başlangıç hareketi uygulandıktan sonra ilk çevrimde daha yüksek miktarda hareket ($z=2.5-3\text{ mm}$) gözlenirse de ardında kısa bir sürede (2-3 çevrim) hareket sönümlenmiştir. Daha sıkı numunelerde ise ilk çevrimde daha düşük bir hareket ($z=2-2.5\text{mm}$) gözlenmiş ancak hareket daha uzun ömürlü (4-5 çevrim) olmuştur. Bu olayın nedeninin zeminin sahip olduğu sönüm kapasitesi olduğu açıktır. Sönüm oranının belirlenmesinin burulmalı üç eksenli deney sisteminde mümkün olup olmadığı araştırılmış ancak meydana gelen sönüm olayının numunelerin sahip oldukları sönüm kapasitesinden mi yoksa sistem içi sürtünmelerden mi olduğu belirlenememiştir. Bu belirsizliğin ortadan kaldırılabilmesi için daha önceki araştırmacılar sürtünmeyi azaltma yoluna gitmişler

örneğin Özüdoğru (1981) hücre pistonu ile pistonun hücreye girdiği yer arasında bir silindirik rulman (*ball bearing*) kullanmıştır. Chan (1975) ise çok daha düşük sürtünmeye sahip bir piston hücre bileşimi önermiştir. Yinede daha önceki araştırmacılarda tamamen sürtünmesiz bir sistem oluşturamadıklarından belli şartlarda yapılmış deneylerden sistemin sönümünü (sürtünmeden dolayı oluşan sönüm) tahmin etmeye çalışmışlardır. Daha sonra hesaplanan sistem sönümünü numuneler için hesaplanan sönümden çıkararak numunelerin sönümünü elde ettiklerini kabul etmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan burulmalı üç eksenli sistemde ekonomik nedenlerle yukarıda bahsedilen şekilde bir değişiklik yapılması mümkün olmamıştır. sürtünmelerin azaltılması olayı başarmış olsaydı, serbest titreşim hareketinin kaydından, birbirini takip eden iki tepe noktasının yüksekliği (z_1 ve z_2) belirlenebilir. Bu değerlerden, (3.20) nolu eşitlikte sönüm oranı (D) çekilirse ve D^2 ihmal edilirse

$$D = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{z_1}{z_2} \quad (3.30)$$

olduğu teorik olarak söylenebilir. Ancak bu şekilde hesap yapan daha önceki araştırmacıların elde ettikleri sönüm oranı değerlerinin beklenenden daha yüksek olduğu görülmüştür. Yukarıda anlatılan sebeple ve yapılan çalışmanın amaçları arasında bulunmadığından sönüm oranı hesaplanmamıştır.

Kullanılan deney sistemi her ne kadar yeterli hassaslıkta ölçümler yapılmasında yetti ise de özellikle kayıt sisteminin geliştirilmesinin gerekli olduğu görülmüştür. Kullanılan kayıt sistemi saniyede 100 kayıt alma kapasiteli ELE marka data logger'dir. Serbest titreşim deneyi yapıldıktan sonra, bu deneye ait dataların deney yapılır yapılmaz analiz edilmesi gerekmektedir. Zira bazı durumlarda yapılan deney doğru şekilde yapılmasına rağmen birbirini takip eden periyotların eşit olmadığı gözlenmiştir. Bu durumda statik deney başlatılmadan önce serbest titreşim deneyinin tekrar edilmesi gerekmiştir. Serbest titreşim deneyi datalarında en az ilk iki periyodun birbirine eşit olması gerekmektedir. Saniyede 100 kayıt alabilen dataloggere ile kaydedilen bazı dataların yeterli hassaslıkta olmadıkları görülmüştür. Hassas bir şekilde belirlenemeyen datalar en yakın değerlere yuvarlatılarak kullanılmıştır.

Yukarıda anlatılan sebeple serbest titreşim datalarını kaydedebilmek için saniyede 1000 data okuyabilen bir data logger'in kullanılması gerekmektedir. Van Impe (1988) bu tip bir data logger kullanmıştır.

3.5 Deney sonuçları

Bu çalışmada yukarıda ayrıntılı olarak anlatılan deney sisteminde 59 adet üç eksenli deney yapılmıştır. Her bir üç eksenli deneyden önce de en az bir tane serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Ayrıca maksimum kayma modülünün çevre basıncı ve gerilme boşalması ile değişimini görebilmek için toplam 12 deneyden oluşan bir seri deney yapılmıştır. Deneyler üç grup halinde yapılmıştır. Bu deney gruplarında, farklı gerilme koşullarındaki zeminlerin farklı şekillerdeki gerilme boşalmasına gösterdiği reaksiyonlar modellenmeye çalışılmıştır.

Birinci grup deneylerde numuneler farklı gerilme şartları altında (izotropik ve anizotropik) konsolide edilerek kesilmişlerdir. Bu numuneler arazi eşdeğeri numuneler olarak kabul edilmişlerdir. Daha sonra araziden numune alıcı ile alınıp laboratuvara getirilen numuneleri modelleyebilmek için, aynı numuneler yeniden hazırlanmış, aynı gerilme şartlarında konsolide edilmiş, konsolidasyonun ardından numune üzerindeki bütün yükler kaldırılmış ve numune 24 saat boyunca bekletilmiştir. 24 saatin ardından numune, daha düşük bir gerilme seviyesinde yeniden izotropik olarak yüklenmiş ve yeniden konsolide edilmiştir. Konsolidasyonun ertesinde drenajsız olarak kesilmiştir. Bu numunelerde araziden laboratuvara getirilip gerilme geçmişi dikkate alınmadan kesilen numuneler olarak kabul edilmiştir. Bazı deneylerde numuneler, gerilme boşalmasının ardından aynı yüklerle yeniden yüklenmiştir. Normal konsolide numuneler arasında aynı $K=\sigma_c/\sigma_v$ oranına sahip numuneler üzerinde farklı gerilme seviyelerinde deneyler yapılmış ve bu sayede kayma mukavemeti parametreleri (c, ϕ) elde edilmiştir. Bu gruptaki deneyler Y harfi ile başlayan deney isimleri ile (Y4, YT18 gibi) isimlendirilmişlerdir.

İkinci grup deneylerde numuneler yüksek gerilme seviyelerinde anizotropik olarak K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra, numunelerin bir kısmı üzerindeki gerilmeler tamamen boşaltılmadan daha düşük izotropik gerilme seviyelerinde yüklenmişler ve 24 saat beklendikten sonra bu gerilme seviyelerinde kesilmişlerdir. Bu numuneler arazide aşırı konsolide olmuş zeminler olarak kabul edilmişlerdir. Ardından yine aynı şekilde yüksek gerilme seviyelerinde K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra, numunelerin üzerindeki gerilmeler tamamen boşaltılmadan düşük izotropik gerilme seviyelerine getirilmiş 24 saat beklendikten sonra ise tamamen boşaltılarak 24 saat daha beklenmiştir. Ardından boşaltmadan önceki izotropik gerilme seviyelerine yeniden yüklenip bu şartlarda konsolidasyonunu tamamlaması için 24 saat beklenerek kesilmişlerdir. Bu numuneler ile arazide aşırı konsolide olmuş zeminlerin laboratuvarında kesilmesi halinin modellendiği kabul edilmiştir. Bu

gruptaki deneyler YAO harfleri ile başlayan deney isimleri ile (YAO27, YAO33 gibi) isimlendirilmişlerdir

Üçüncü grup deneylerde arazide K_0 şartlarında konsolide olmuş numunelerin laboratuvar ve arazi gerilme şekil-değiştirme davranışları arasındaki farklar araştırılmak istenmiştir. Bu deneylerde numuneler K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra kesilmişlerdir. Bu numuneler arazide K_0 şartlarında konsolide olmuş numuneler olarak kabul edilmişlerdir. Daha sonra gene K_0 şartlarında konsolide edilen numuneler üzerlerindeki bütün gerilmeler kaldırılarak 24 saat bekletilmiş ve yeniden K_0 şartlarında yüklenerek kesilmişlerdir. Bu numuneler laboratuvar da K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra kesilen numuneler olarak kabul edilmişlerdir. Bu gruptaki deneyler deney adlarının son harfi K olacak şekilde (Y11K, Y7K gibi) adlandırılmıştır.

Deneylerde kullanılacak K_0 sükunetteki toprak basıncı katsayısının, laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi oldukça zordur. Ancak koni penetrometre, presyometre ve dilatometre gibi deney aletleri ile arazide yanal gerilmeler ölçülebilmektedir. Bu deneylerin Rowe hücresinde hazırlanan numunelere yapılması mümkün olmadığından, K_0 'ın tahmini için daha önceki araştırmacıların ortaya koyduğu amprik bağıntılardan yararlanılması gerektiği düşünülmüştür.

Plastisite indisine bağlı olarak K_0 değerinin belirlenmesi için önerilen iki bağıntı incelenmiş, Massarsch'ın (1979) verdiği $K_0=0.44+0.42PI$ ifadesine göre hesaplanınca $K_0=0.52$ civarında elde edilmiştir. Alpan (1967) tarafından önerilen bağıntı ise $K_0=0.19+0.233.PI$ şeklindedir. Bu ifadeden de $K_0=0.49$ olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak $K_0=0.5$ değerinin kullanılmasının pratik olacağına karar verilmiştir.

Normal konsolide ve aşırı konsolide üçüncü grup numuneler üzerinde, farklı gerilme seviyelerinde deneyler yapılmış ve bu sayede kayma mukavemeti parametreleri (c , ϕ) elde edilmiştir. Ayrıca her kesme deneyinden önce serbest titreşim aleti kullanılarak numunelerin maksimum kayma modülleride belirlenmiştir. Deney sonuçlarının ayrıntılı bir şekilde irdelenmesi bir sonraki bölümde yapılacaktır.

3.5.1 Birinci grup deneyler

Birinci gruptaki deneyler genel olarak Lacasse'ın (2001) belirtildiği gibi düşük eksenel boy değişimi seviyelerinde maksimum deviatorik gerilmeye ulaşmışlardır. Birinci grup deneylere ait deney sonuçları Tablo 3.5.'de görülmektedir.

Tablo 3.5. Birinci grup deneylerin sonuçları.

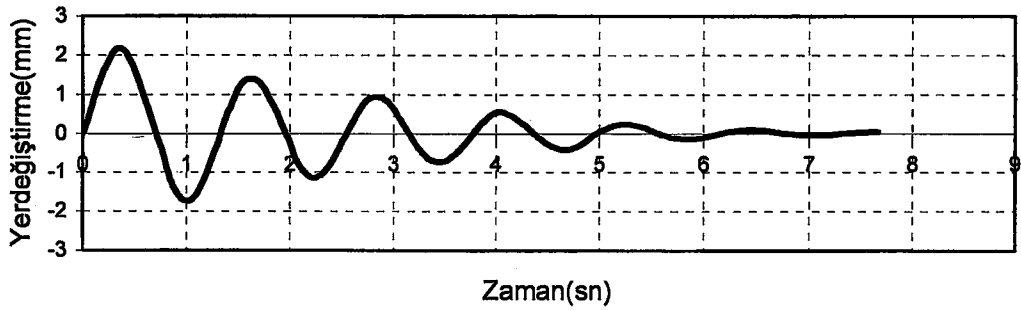
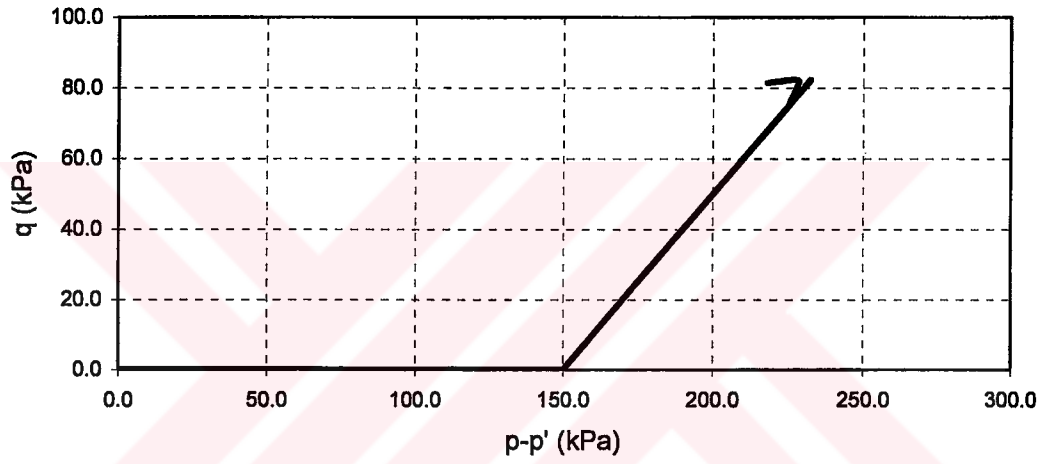
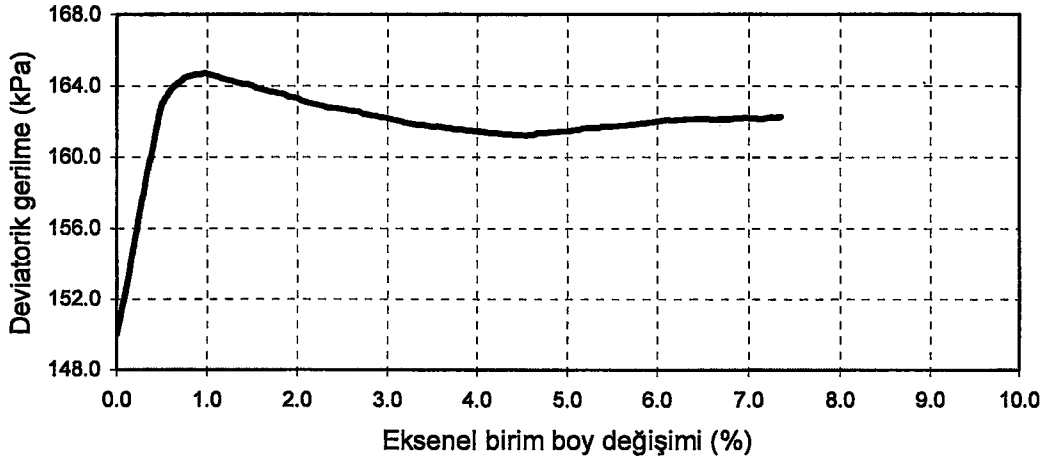
Deney Adı	W _{başı} (%)	W _{son} (%)	e	L(boy) (mm)	OCR	σ_h (kPa)	σ_v (kPa)	u _r (kPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_{maks}$ (kPa)	S _a (kPa)	G _{maks} (MPa)
Y1	41	33	0.948	92.11	NK	100	200	25.06	119.0	56.4	50.7
Y4	40	33	0.925	93.44	NK	150	200	71.3	100.1	49.1	51.1
Y5	39	32	0.902	93.18	NK	150	200	72.3	95.5	46.9	53.1
Y6	40	32	0.870	86.77	NK	100	200	5.36	116.4	55.2	53.9
Y9	41	31	0.846	83.18	NK	100	200	5.11	120.1	57.0	56.3
Y14	40	30	0.819	84.28	NK	150	300	9.00	164.7	78.1	75.4
Y15	40	36	1.006	98.85	NK	100	100	63.9	74.3	36.4	34.9
Y16	40	28	0.751	90.83	NK	350	450	150.2	283.8	139.3	115.2
YT18	40	35	0.995	97.45	NK	100	133	63.81	72.1	35.4	36.5
YT20	40	35	0.967	95.84	NK	100	166	50.04	100.7	48.5	40.7
YT22	40	34	0.962	95.08	NK	100	177	47.5	108.3	52.0	39.8
YT2A	39	33	0.936	95.3	NK	150	150	75.0	87.2	42.6	47.2
YT3A	39	32	0.904	93.12	NK	150	200	62.0	93.2	45.7	52.2
YT4A	41	33	0.905	91.25	NK	150	200	79.0	94.2	46.2	52.0
YT7A	39	32	0.868	90.79	NK	150	250	40.5	131.3	63.3	61.5
YT8A	40	31	0.865	89.52	NK	150	250	40.5	133.7	64.4	61.0
YT11A	39	29	0.799	85.69	NK	200	350	40.6	184.8	89.2	82.7
YT14A	38	33	0.923	95.5	NK	150	150	92.7	94.5	46.2	49.6
YT15A	39	29	0.774	85.71	NK	250	450	66.7	241.0	115.8	98.4
YT32	39	33	0.925	94.58	NK	150	150	83.4	101.9	49.8	47.9
YT33	40	33	0.936	95.29	NK	150	150	86.2	93.5	45.7	46.7
Y2	41	35	0.972	97.62	2	100	100	44.6	81.4	40.7	40.9
Y3	40	34	0.928	97.18	2	100	100	45.53	84.6	42.3	44.0
Y15Y	40	35	0.984	97.59	1	100	100	52.88	67.4	33.7	32.8
Y17	40	29	0.773	87.1	4.5	100	100	26.00	157.6	78.8	71.9

Tablo 3.5.'in devamı Birinci grup deneylerin sonuçları.

Deney Adı	W _{başl} (%)	W _{son} (%)	e	L(boy) (mm)	OCR	σ_h (kPa)	σ_v (kPa)	u _r (kPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_{maks}$ (kPa)	S _u (kPa)	G _{maks} (MPa)
YT19	40	35	0.981	97.49	1.33	100	100	52.82	74.2	37.1	36.5
YT21	41	34	0.968	95.2	1.66	100	100	54.2	80.0	40.0	38.7
YT23	40	35	0.973	96.28	1.77	100	100	52.82	81.1	40.5	38.6
YT1B	39	34	0.909	89.52	1.46	100	133	33.6	85.5	42.8	48.7
YT2B	40	34	0.937	94.43	1	150	150	74.1	88.2	44.1	45.7
YT3B	39	34	0.934	94.25	1.33	150	150	62.7	93.1	46.6	50.7
YT4B	39	33	0.905	93.33	1.33	150	150	58.7	90.7	45.4	49.6
YT5B	41	33	0.919	91.22	1.33	150	150	77.3	89.8	44.9	50.9
YT6B	40	33	0.941	94.71	1.33	150	150	58.2	96.6	48.3	48.6
YT9B	39	31	0.879	92.05	1.66	150	150	57.3	119.5	59.7	57.5
YT10B	39	32	0.872	90.66	1.66	150	150	63.4	115.1	57.5	58.2
YT12B	39	31	0.847	88.91	2.33	150	150	56.7	130.6	65.3	62.7
YT15B	38	30	0.819	90	3	150	150	50.0	150.2	75.1	68.1
YT2	40	33	0.937	95.02	1	150	150	83.6	92.4	46.2	44.5

Şekil 3.25'de Y14 deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve kesme deneyinden hemen önce yapılan serbest titreşim deneyinin grafiği görülmektedir. Bu deneyde düşey efektif konsolidasyon gerilmesi 300 kPa ve yatay efektif konsolidasyon gerilmesi 150 kPa dır. Bu deney için $K=\sigma_h/\sigma_v=0.5$ dir. Bu deney anizotropik gerilme şartlarında gerçekleştirildiği için deviatorik gerilme sıfırdan değil düşey ve yatay efektif konsolidasyon gerilmelerinin farkı olan 150 kPa değerinden başlamaktadır. Bu numune için serbest titreşim periyodu 1.34 sn olarak elde edilmiştir.

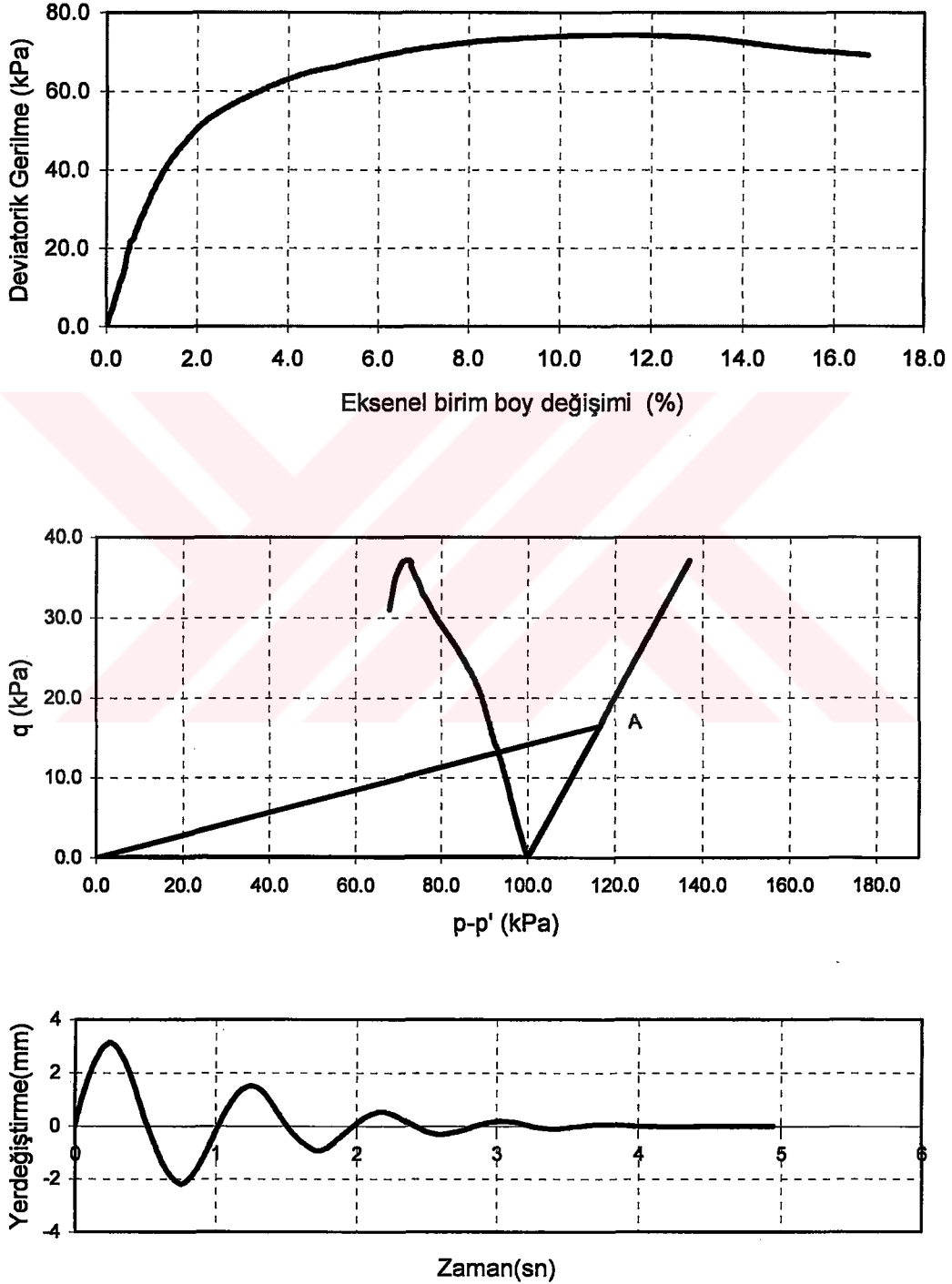
Y14 deneyine ait gerilme izi izotropik yükleme sırasında yatay olarak x-ekseni üzerinde hareket etmiş, anizotropik konsolidasyon sırasında ise q değerleri de artmaya başlamış ve kesme deneyi öncesine kadar $q=75$ ve $p=225$ değerlerine kadar yükselmiştir. Bu noktadan sonra kesme deneyi başlamıştır.



Şekil 3.25 Y14 deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.

Şekil 3.26'da ise yine birinci grup deneylerden olan anizotropik olarak konsolide edildikten sonra daha düşük gerilme seviyelerinde izotropik olarak yüklenerek aşırı konsolide edilen YT19 deneyinin gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve kesme deneyinden hemen önce yapılan serbest titreşim deneyinin grafiği görülmektedir. Bu deneyde numune 133 kPa düşey ve 100 kPa yatay efektif konsolidasyon gerilmesi altında konsolide edildikten sonra bütün gerilmeler sıfıra

düşürülmüş ve 24 saat beklenilmiştir. Bu sürenin ardından numune 100 kPa izotropik gerilme ile yüklenerek konsolide edilmiş ve numune kesilmiştir. Bu numune için aşırı konsolidasyon oranı $OCR=1.33$ dır. Kirkpatrick ve diğ. (1986) belirtildiği gibi maksimum deviatorik gerilmeye ulaşılan şekil değiştirme miktarı artmıştır. Bu deney için serbest titreşim hareketinin periyodu 0.995 sn dir.



Şekil 3.26 YT19 deneyinin gerilme-şekil değiştirme, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.

YT19 deneyinin gerilme izi, izotropik ve anizotropik konsolidasyon neticesinde A noktasına ulaşmıştır. Bu noktadan sonra bütün gerilmeler boşaltıldığı için gerilme izi orjin noktasına geri dönmüştür. Ardından yapılan izotropik konsolidasyon ile $q=0$ ve $p=100$ noktasında statik deney başlatılmıştır.

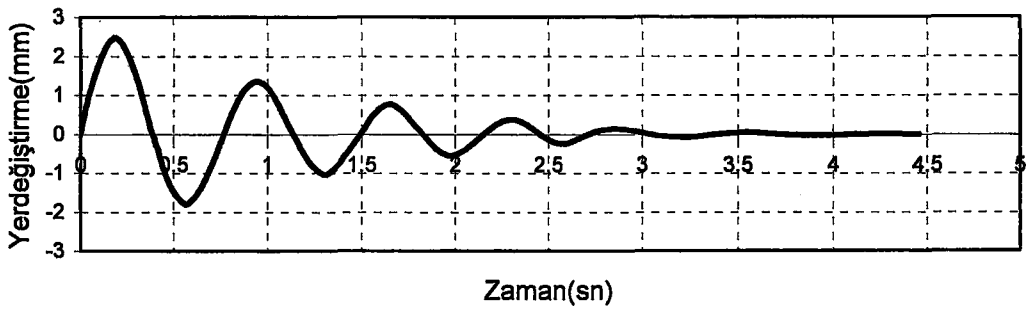
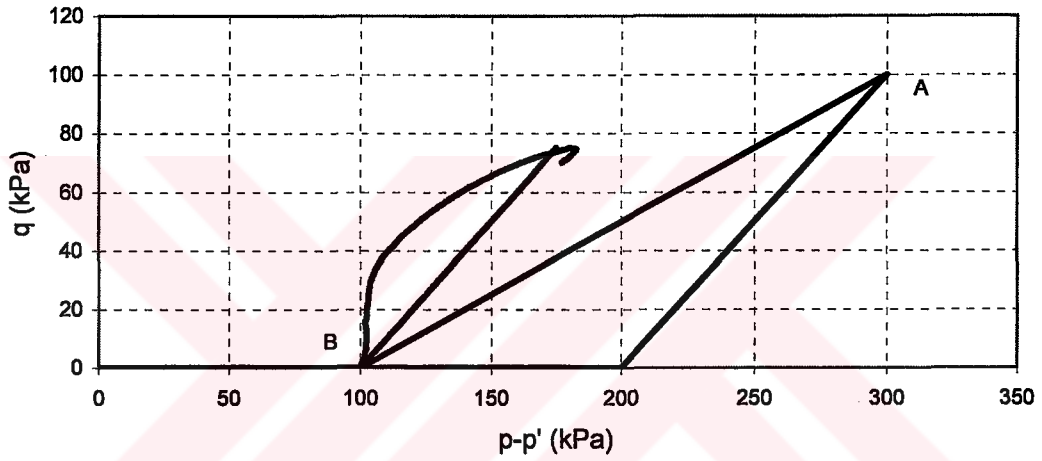
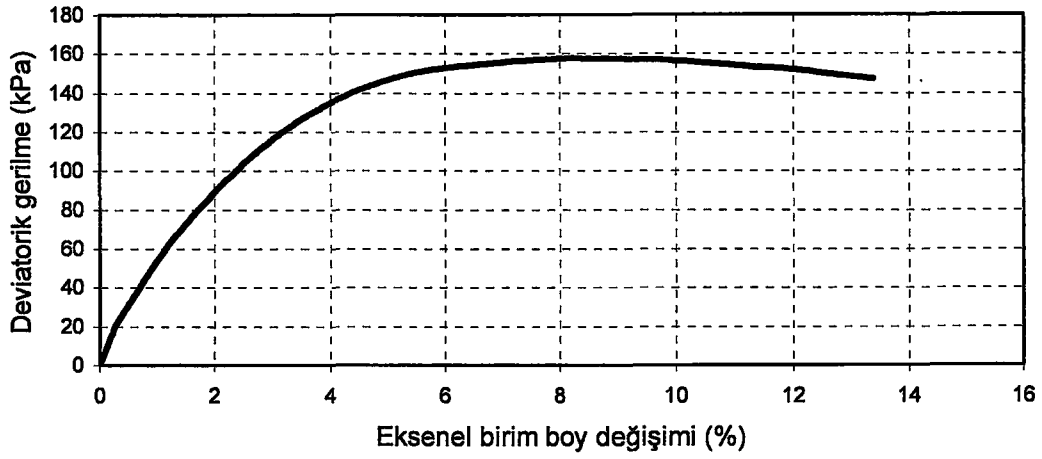
3.5.2 İkinci grup deneyler

İkinci grup deneylere ait sonuçlar Tablo 3.6.'da görülmektedir.

Tablo3.6. İkinci grup deneylerin sonuçları.

Deney Adı	$W_{başl}$ (%)	W_{son} (%)	e	$L(boy)$ (mm)	OCR	σ_h (kPa)	σ_v (kPa)	u_f (kPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_{maks}$ (kPa)	S_u (kPa)	G_{maks} (MPa)
YAO27	41	33	0.893	89.2	2	100	100	23.04	110.7	55.3	49.2
YAO28	40	32	0.864	89.52	3	100	100	11.18	136.2	68.1	54.5
YAO29	40	33	0.892	88.7	2	100	100	18.20	110.3	55.1	50.7
YAO30	40	32	0.863	89.5	3	100	100	13.77	134.2	67.1	53.8
YAO32Y	40	31	0.834	87.67	4	100	100	-6.80	157.6	78.8	60.1
YAO34	40	30	0.837	88.85	4	100	100	-0.23	159.3	79.6	58.5
YAO35	41	31	0.884	90.9	4	100	100	20.41	130.3	65.2	48.9
YAO36	40	31	0.882	90.77	4	100	100	29.07	126.3	63.2	51.3
YAO26	40	34	0.937	93	2	100	100	42.00	98.7	49.4	43.5
YAO31	41	32	0.911	91.74	3	100	100	27.67	114.6	57.3	47.1
YAO33	40	34	0.934	91	2	100	100	33.50	100.1	50.0	46.1

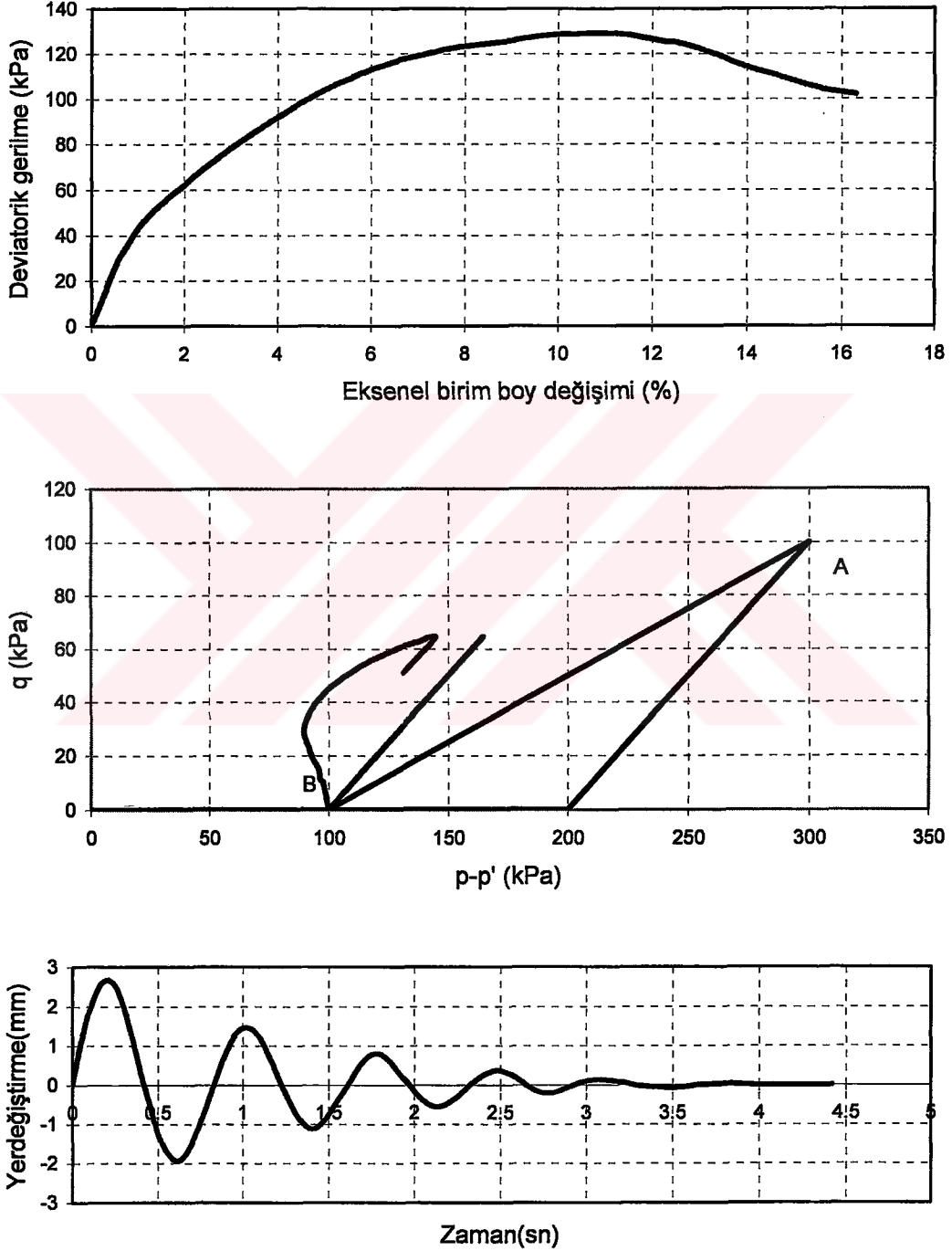
Şekil 3.27'de ise arazide aşırı konsolide olmuş zeminleri modellemek için yapılan ikinci grup deneylerden YAO32Y deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği görülmektedir. Bu numune düşey efektif konsolidasyon gerilmesi 400 kPa ve yatay efektif konsolidasyon gerilmesi 200 kPa altında konsolide edildikten sonra (A noktası) gerilmelerin yatay ve düşey bileşenleri düşürülmüş ve izotropik olarak 100 kPa basınç ile yüklü (B noktası) hale getirilmiştir. Bu işlemin sonucunda aşırı konsolidasyon oranı 4 olan bir numune elde edilmiştir. Bu deneyde dikkat çekici olan boşluk suyu basıncı değerinin deneyin sonuna doğru negatif değerlere ulaşmasıdır. Bu olay sadece bu şekilde yüklenmiş numunelerde görülmüştür. Kesme deneyinden hemen önce yapılan serbest titreşim deneyinden serbest titreşim periyodu 0.735 sn olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.27 YAO32Y deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.

Yukarıda anlatıldığı şekilde aşırı konsolide edilmiş ikinci grup deney numuneleri daha sonra üzerlerindeki tüm yükler kaldırılarak 24 saat boyunca bekletilmiş ve yeniden izotropik $\sigma_0 = 100$ kPa basınç altında konsolide edilmiştir. Yani daha önce gerilmeler “0” düzeyine düşürülmeden gerilme boşalmasına maruz bırakılmış numuneler bu işlemin ardından bu kez gerilmeler “0” a düşürülerek gerilme boşalması yaşamışlardır. Şekil 3.28’de görülen YAO35 deneyinde de numune düşey

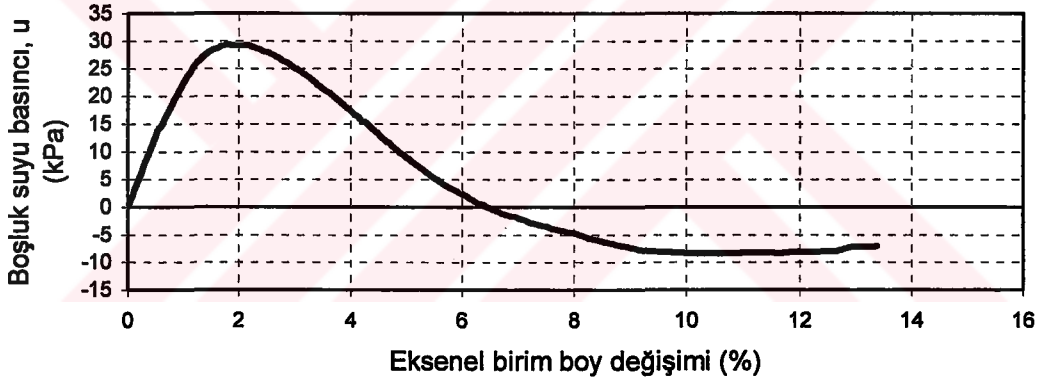
400 kPa ve yatay efektif konsolidasyon gerilmesi 200 kPa altında konsolide edildikten sonra gerilmelerin yatay ve düşey bileşenleri düşürülmüş ve izotropik olarak 100 kPa basınç ile yüklü hale getirilip 24 saat beklenilmiştir. Bu işlemin ardından üzerindeki bütün yükler kaldırılarak 24 saat beklenilmiş ve yeniden 100kPa yük ile yüklenerek kesilmiştir. Kesme deneyinden hemen önce yapılan serbest titreşim deneyinden serbest titreşim periyodu 0.83 sn olarak elde edilmiştir.



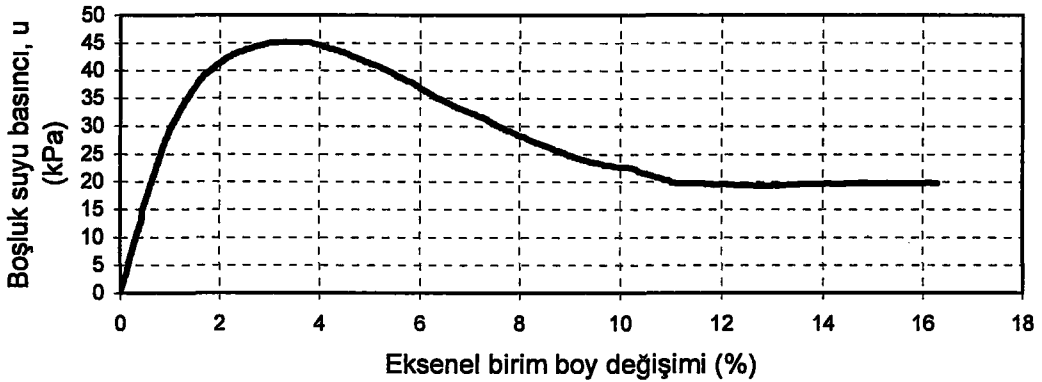
Şekil 3.28 YAO35 deneyinin gerilme-şekil değiştirme, gerilme izi , serbest titreşim grafiği.

YAO35 deneyinin gerilme izi incelendiğinde, izotropik ve anizotropik gerilme artışları ile A noktasına ulaşan gerilme izi bu noktadan, gerilmelerin $\sigma_0=100$ kPa değerine düşürülmesi ile B noktasına gerilemiştir. Bu noktadan sonra gerilmeler tamamen kaldırıldığı için gerilme izi orjin noktasından geçmiştir. Gerilme boşalmasından sonra izotropik olarak $\sigma_0=100$ kPa gerilmesi ile yüklenen numune tekrar B noktasına kadar konsolide edilmiş ve bu noktada kesme deneyi başlamıştır.

YAO32Y ve YAO35 numuneleri aşırı konsolide haldedir ve aşırı konsolidasyon oranları aynıdır (OCR=4). Ancak bu iki deney arasında ihmal edilemez farklar mevcuttur. Özellikle boşluk suyu basıncı değişimleri birbirinden tamamen farklıdır. Aşağıdaki şekillerden de görüleceği gibi numuneler sanki tamamen farklı numunelermişçesine farklı davranmaktadırlar. Meydana gelen bu farklı davranışın, ikinci kez gerçekleştirilen gerilme boşalmasının çok daha şiddetli olmasının (bütün gerilmeler kaldırıldığı için) numunenin doğasını tamamen değiştirdiği, numunenin bir daha eski haline dönemediği ve yapısal değişimler meydana gelmesi olduğu düşünülmüştür. Şekil 3.29 ve 3.30'da sırası ile YAO32Y ve YAO35 deneylerine ait boşluk suyu basıncı eksenel birim boy şekil değiştirme grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.29 YAO32Y deneyinin boşluk suyu basıncı değişimi.



Şekil 3.30 YAO35 deneyinin boşluk suyu basıncı değişimi.

3.5.3 Üçüncü grup deneyler

Arazide K_0 gerilme şartlarında konsolide olduğu kabul edilen zeminlerde gerilme boşalması neticesinde oluşan değişimleri incelemek için yapılan üçüncü grup deneylerin sonuçları Tablo 3.7.'de görülmektedir.

Tablo 3.7. Üçüncü grup deneylerin sonuçları

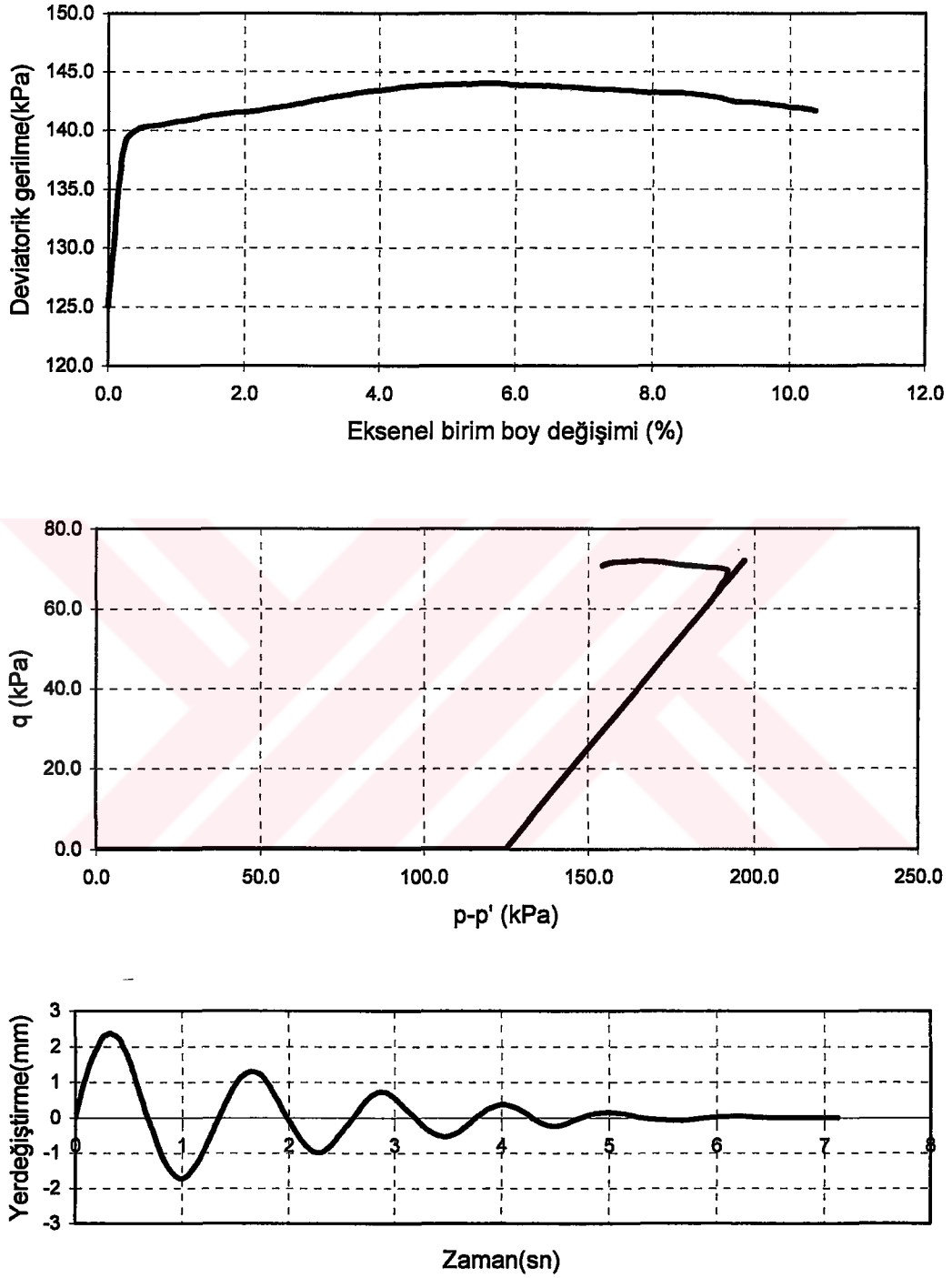
Deney Adı	$W_{başl}$ (%)	W_{son} (%)	e	$L(boy)$ (mm)	OCR	σ_h (kPa)	σ_v (kPa)	u_r (kPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_{maks}$ (kPa)	S_u (kPa)	G_{maks} (MPa)
Y7K	41	32	0.859	92.05	NK	100	200	32.00	120.8	57.3	52.0
Y8K	41	30	0.817	86.75	NK	125	250	32.00	144.0	68.3	63.3
Y10K	42	29	0.783	88.05	NK	150	300	30.58	161.8	76.8	73.7
Y102K	40	29	0.774	84.28	NK	150	300	10.00	164.4	78.0	76.5
Y11K	41	30	0.817	90.75	1	100	200	22.20	128.5	60.8	54.5
Y14K	42	30	0.814	87.54	1	100	200	9.20	130.7	61.8	55.5
Y12K	41	29	0.781	88.3	1	125	250	16.68	158.5	75.0	66.9
Y13K	41	28	0.750	88.2	1	150	300	16.68	180.6	85.4	77.7
Y15K	41	28	0.749	86.23	1	150	300	7.61	186.8	88.4	81.3

Üçüncü grup deneylerden olan Y8K deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği Şekil 3.31'de görülmektedir. Bu deneyde numune önce 125 kPa çevre basıncında izotropik olarak konsolide edilmiş ardından eksenel yükün küçük artışlarıyla, düşey efektif konsolidasyon gerilmesi 250 kPa değerine ulaşmıştır. Bu gerilme düzeyinde numune normal konsolide iken ve gerilme boşalması yaşamadan kesilmiştir. Kesme deneyinden hemen önce yapılan serbest titreşim deneyinden serbest titreşim periyodu 1.32 sn olarak elde edilmiştir.

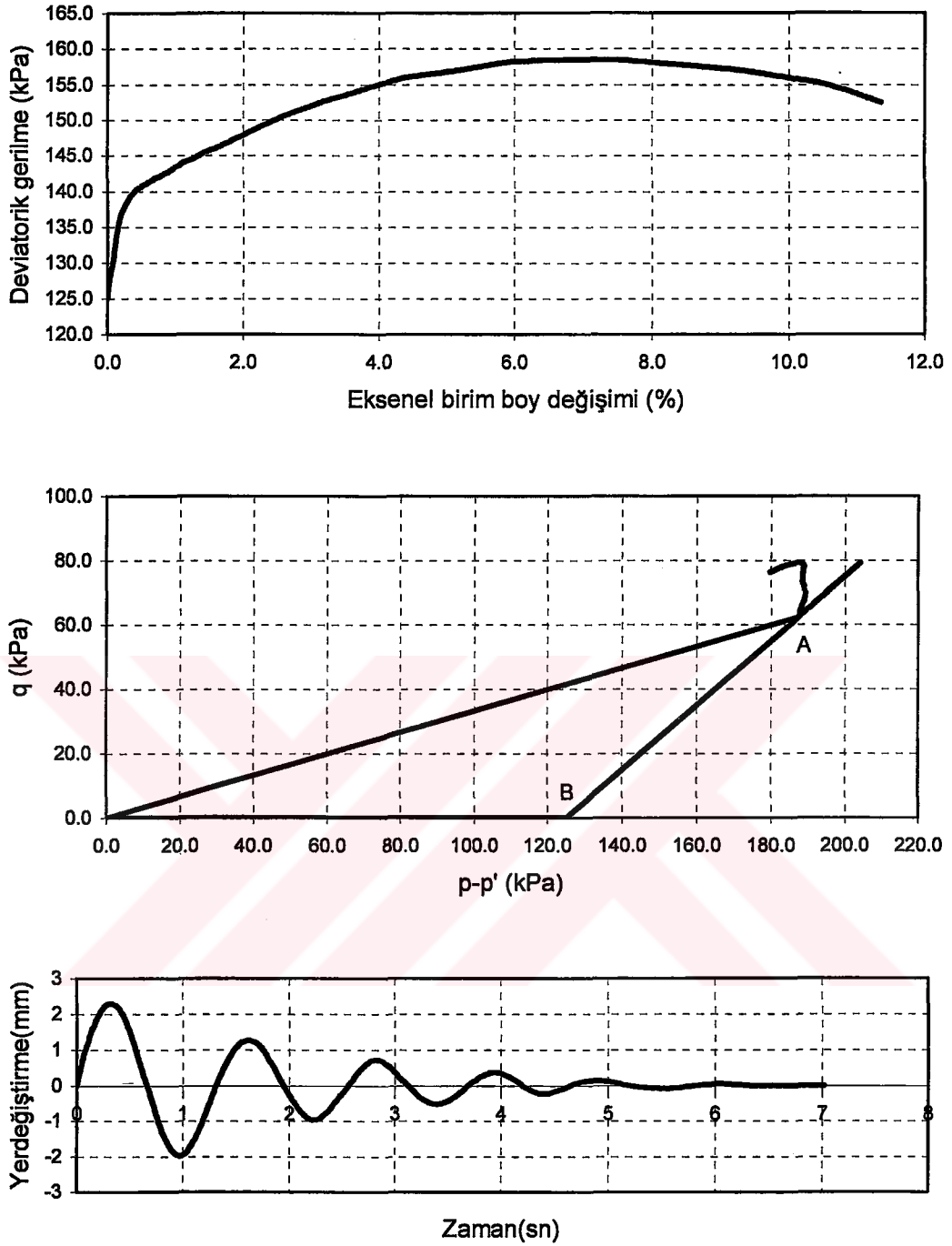
Y8K deneyinin gerilme izi incelendiğinde, gerilme izinin izotropik olarak yüklendiği $\sigma_0=125$ kPa değerine kadar x ekseninin takip ettiği, anizotropik yüklemenin başladığı andan itibaren ise eğimli olarak $q=62.5$ ve $p=187.5$ değerlerine kadar yükseldiği görülmektedir. Numune bu noktadan sonra drenajsız olarak kesilmiştir.

Üçüncü grup deneylerin ikinci kısmında ise yukarıda anlatıldığı gibi K_0 şartlarında konsolide edilmiş numunelerin üzerlerinden bütün yükleri kaldırılmış bu şekilde 24 saat beklenildikten sonra yeniden K_0 şartlarında konsolide edilip kesilmiştir. Şekil

3.32'de Y12K deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği görülmektedir.



Şekil 3.31 Y8K deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ,gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.



Şekil 3.32 Y12K deneyine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ,gerilme izi ve serbest titreşim hareketi grafiği.

Yukarıdaki numune $\sigma_v=250$ kPa ve $\sigma_h=125$ kPa altında konsolide edildikten sonra bütün yükleri boşaltılmış ve ardından aynı yüklerle yeniden yüklenmiştir. Kesme deneyinden önce yapılan serbest titreşim deneyinde periyot 1.295 sn olarak bulunmuştur.

Gerilme izi ise önce x eksenini boyunca hareket etmiş ve B noktasına ulaşmıştır. Anizotropik yükleme ile beraber A noktasına kadar ulaşmıştır. Gerilmeler

kaldırılınca orjine kadar geri çekilen gerilme izi yeniden B noktasından geçerek A noktasına ulaşmış ve bu noktada kesme deneyi yapılmıştır.

3.5.4 Yapılan diğer deneyler

Numuneleri gerilme boşalması neticesinde gerilme-şekil değiştirme davranışlarının incelenmesinin amaçlandığı deneyler dışında bir seri deney daha yapılmıştır. Bu deneylerde numuneler belli yükleme adımları ile artan bir şekilde yüklenmiş, her yükleme adımında numunenin maksimum kayma modülü belirlenmiştir. Gerilmeler 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 ve 400 kPa olacak şekilde seçilmiştir. Ardından gerilmeler boşaltılmış ve 24 saat beklendikten sonra numune bu sefer 100, 200, 300, 400 kPa basınçlarında konsolide edilerek yine her adımda maksimum kayma modülü belirlenmiştir. Bu deneylerle, kayma modülünün gerilme değişimlerinden ve gerilme boşalmasından nasıl etkilendiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneylerin sonuçları Tablo3.8.'de özetlenmiştir.

Tablo3.8. Kayma modülünün değişimi için yapılan deneyler.

DENEY ADI	L(boy) (mm)	OCR	σ_c (kPa)	G_{maks} (MPa)
GDEG05	97.11	NK	50	23.4
GDEG10	95.67	NK	100	36.2
GDEG15	94.49	NK	150	46.8
GDEG20	93.56	NK	200	56.3
GDEG25	92.79	NK	250	65.4
GDEG30	92.12	NK	300	73.8
GDEG35	91.7	NK	350	81.7
GDEG40	91.25	NK	400	95.5
GDEG10A	93.57	4	100	49.7
GDEG20A	92.79	2	200	67.3
GDEG30A	92.08	1.33	300	80.8
GDEG40A	91.42	1	400	92.6

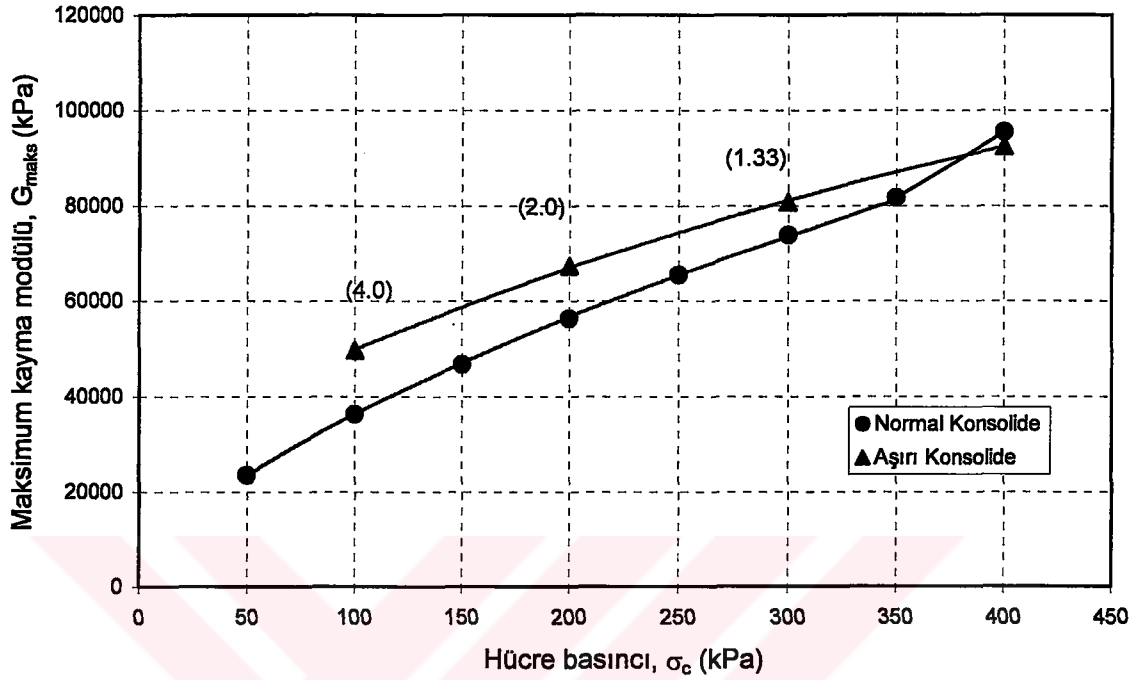
Yapılan deneylerin sonuçları Şekil 3.33'da görülmektedir.

Aşağıdaki şekilden de görülmektedir ki maksimum kayma modülü gerilme artışları ile artmakta ancak gerilme boşalması ile eski değerlerine dönmemektedir. Bu olay gerilme geçmişinin etkisinin tipik bir örneğidir. Ayrıca bu grafiğin ikinci bölümdeki Koutsoftas ve diğ., (1980).’den alınmış Şekil 2.28 ile benzerliğine de dikkat edilmelidir. Aşırı konsolide numuneleri temsil eden noktaların yanındaki rakamlar aşırı konsolidasyon oranlarıdır.

3.6 Sonuç

Eskişehir kili üzerinde yapılan deneyler üç grupta halinde yapılmıştır. İlk grupta deneylerde numuneler farklı $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranlarında yüklenerek kesilmiş ve aynı numuneler yeniden üretilerek aşırı konsolide hale getirilerek kesilmiştir. İkinci grupta deneylerde numuneler önce aşırı konsolide edildikten sonra kesilmiş ardından

gene aşırı konsolide numuneler gerilme boşalmasına maruz bırakıldıktan sonra kesilmiştir. Son grup numuneler K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra bir kısmı kesilmiş diğer bir kısmı ise üzerindeki gerilmeler boşaldıktan sonra yeniden K_0 şartlarında konsolide edilmiş ve ardından kesilmiştir.



Şekil 3.33 Maksimum kayma modülünün hücre basıncı ile değişimi.

Deneyler sırasında anizotropik numunelerin maksimum deviatorik gerilmeye ulaştıkları deformasyon miktarlarının oldukça düşük olduğu (%1-5) ve gerilme boşalması neticesinde bu deformasyon miktarının yükseldiği (%8-12) gözlenmiştir.

Arazide aşırı konsolide olmuş numunelerin modellendiği ikinci grup deneylerde tüm gerilmeler kaldırılmadan gerilme boşalması yaşayan numunelerin bazılarında ($OCR > 3$) boşluk suyu basınçları negatif gerilmelere ulaşırken, aynı numunenin tekrar üretilip gerilmeleri tamamen kaldırılmak sureti ile ikinci kez gerilme boşalmasına maruz bırakıldığında numune eski boşluk suyu basıncı davranışını göstermemiş ve boşluk suyu basıncı değerleri pozitif değerlerde kalmıştır. Boşluk suyu basıncındaki bu davranış farkı gerilme boşalması olayının numuneyi nasıl örselediğinin anlaşılması açısından önemlidir.

Deney numunelerinde, başlangıç su muhtevası %39-41 iken konsolidasyondan sonra %28-35 arasında değişen değerlere ulaşmışlardır. Aşırı konsolide numunelerin aşırı konsolidasyon oranı 1-4.5 arasında değişmektedir.

Her gruptan iki adet olmak üzere toplam altı adet deney grafiği bu bölümde verilmiştir. Geriye kalan deneylerin grafikleri EkC de görülebilir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Eskişehir bölgesinden elde edilen düşük plastisiteli kil üzerinde yapılan statik konsolidasyonlu - drenajsız üç eksenli deneylerin ve kayma modülü belirlenmesi için yapılan serbest titreşim deneylerinin, sonuçları bir önceki bölümde verilmişti. Bu bölümde deney sonuçlarından yararlanarak örselenmenin etkileri irdelenecektir. Aşırı konsolide hale getirilmiş (numune alıcı ile alınmış numune olarak kabul edilen) laboratuvar numuneleri ile, arazideki şartlarda konsolide edildiği kabul edilen normal konsolide arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti parametreleri ve başlangıç kayma modülleri karşılaştırılacaktır.

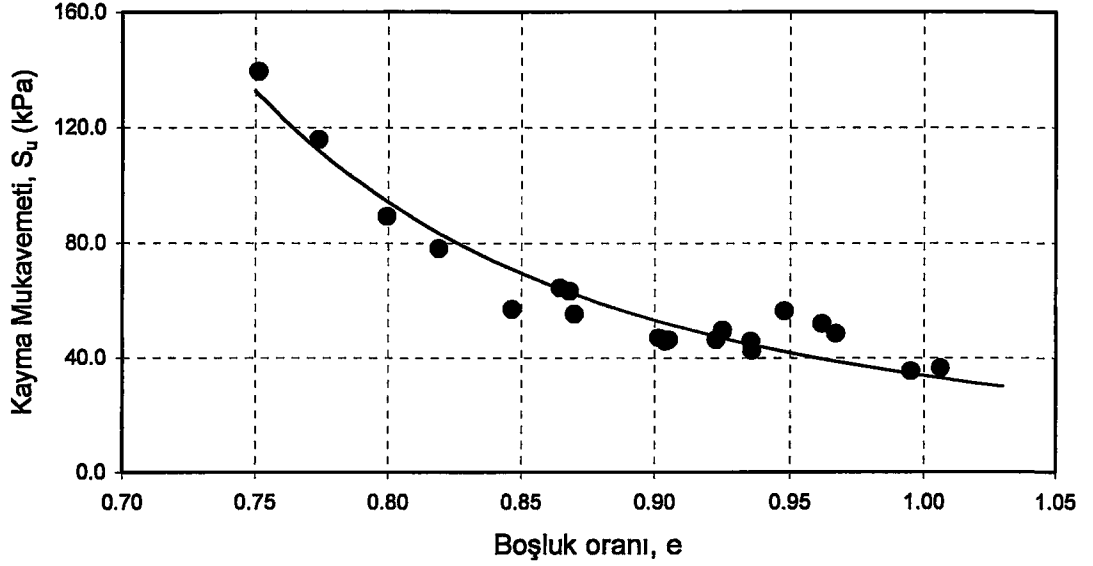
4.2 Birinci Gurup Deneyler

Birinci gurup deneylerde önce arazide farklı gerilme şartlarında (izotropik, anizotropik) konsolide olmuş numuneler modellenmiştir. Bu numuneler üç eksenli hücrede farklı gerilmeler ve farklı $K=\sigma_h/\sigma_v$ değerleri ile konsolide edildikten sonra önce serbest titreşim deneyi yapılmış ardından da drenajsız olarak kesilmiştir. Bu deneyler arazi eşdeğeri deneyler olarak isimlendirilmişlerdir. Ardından bu numuneler laboratuvar da daha düşük gerilmeler altında kesilince nasıl bir davranış göstereceklerini belirleyebilmek için, aynı numuneler üç eksenli hücrede yeniden aynı şartlarda konsolide edilmiş ve üzerlerindeki gerilmeler -numune alımı işlemini laboratuvar da modelleyebilmek için- kaldırılarak aşırı konsolide edilmişlerdir. Bu numuneler laboratuvar numunesi olarak isimlendirilmiştir. Laboratuvar numunelerinin de kesilmeden önce maksimum kayma modülleri serbest titreşim deneyi vasıtası ile belirlenmiştir.

4.2.1 Birinci gurup arazi eşdeğeri numunelerin özellikleri

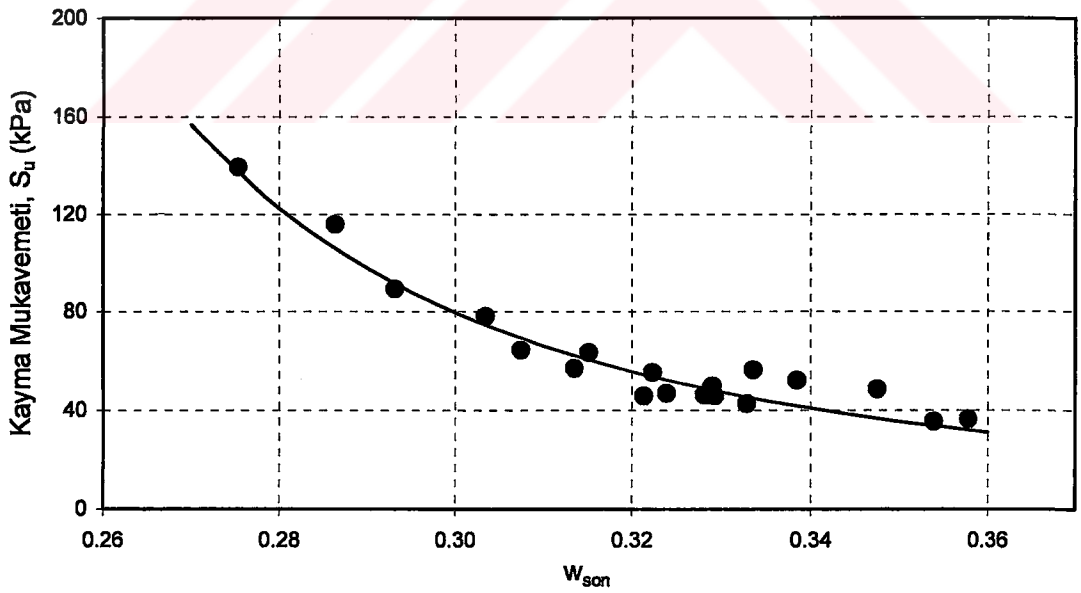
Arazi numunelerini örneklemek için yapılan deneylerde, aynı kilden Rowe hücresi kullanılarak üretilen numunelerin bir kısmı üç eksenli hücrede izotropik şartlarda konsolide edilip kesilirken diğer bir kısmı değişik $K=\sigma_h/\sigma_v$ değerlerinde anizotropik olarak konsolide edilmiştir. Arazi eşdeğeri numunelerinin hepsi normal

konsolidedir. Bu K değerleri için hesaplanan kayma mukavemeti (S_u) ile boşluk oranı arasındaki ilişki Şekil 4.1’de görülmektedir.



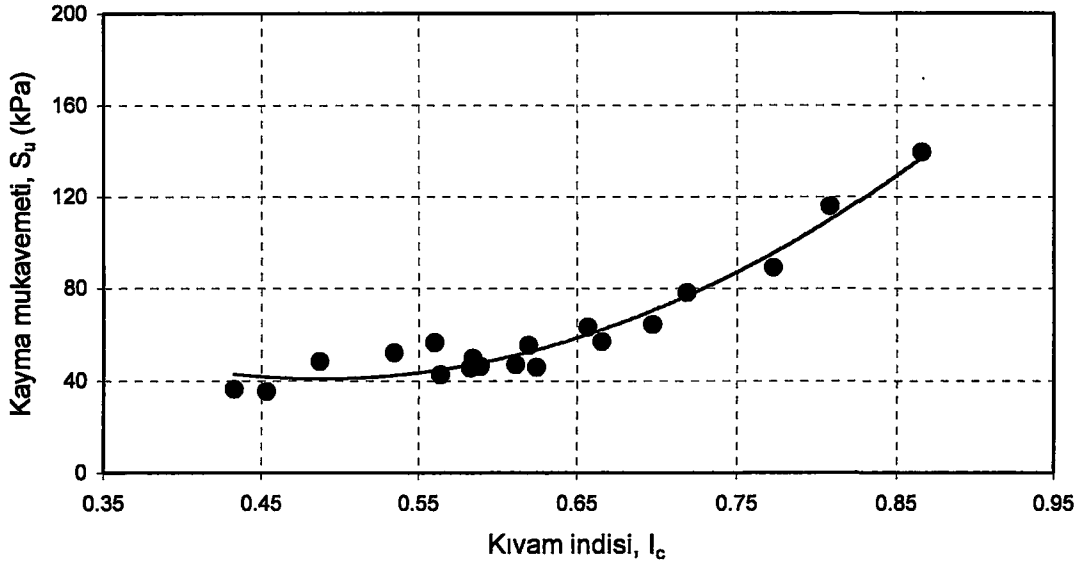
Şekil 4.1 Arazi eşdeğeri numuneler için kayma mukavemetinin boşluk oranı ilişkisi.

Arazi eşdeğeri numunelerin, deney sonu su muhtevaları ile kayma mukavemetleri arasında Şekil 4.2’de görülen ilişki vardır.



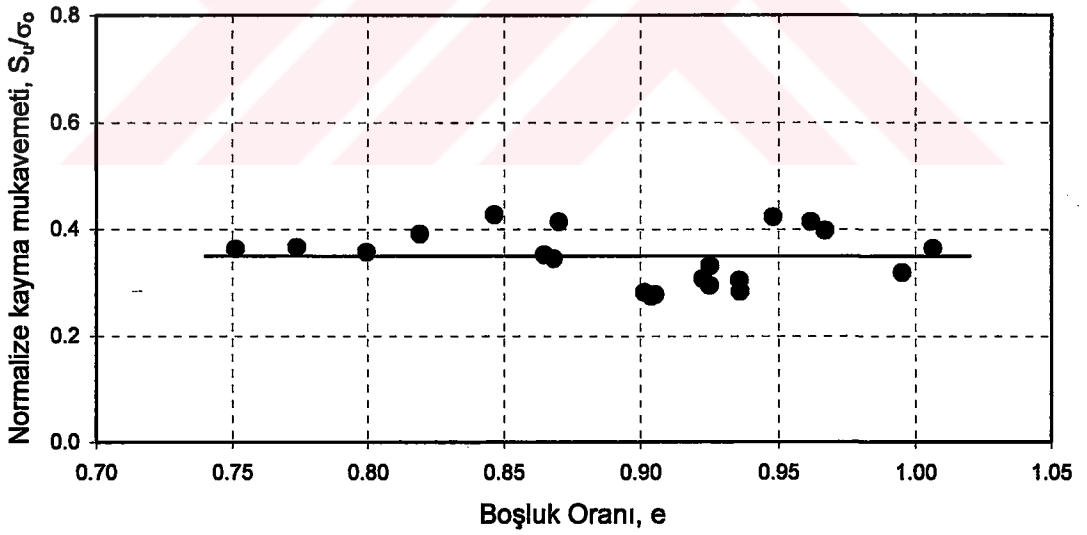
Şekil 4.2 Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-deney sonu su muhtevası ilişkisi.

Arazi numunelerini örneklemek için yapılan normal konsolide numunelerin kıvam indisleri ile kayma mukavemetleri arasındaki ilişki Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3 Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.

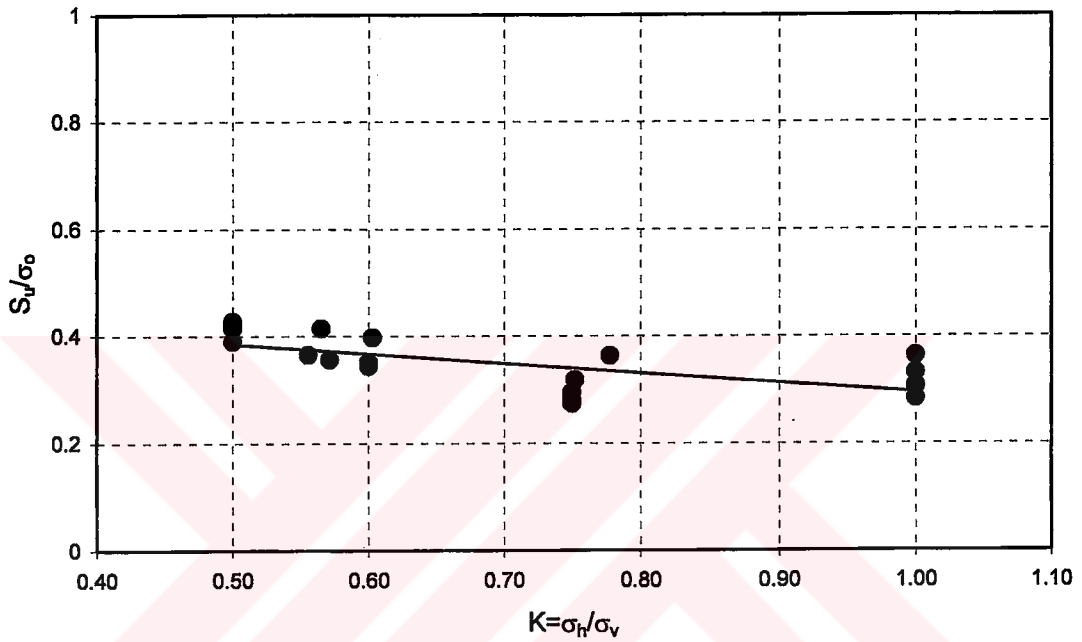
Arazi eşdeğeri numunelerin mukavemetleri oktaedral gerilme ($\sigma_o = (\sigma_v + 2\sigma_h)/3$) ile normalize edilince neredeyse sabit bir ilişkileri olduğu görülmüştür. Bu ilişki Şekil 4.4 de görülebilir.



Şekil 4.4 Arazi eşdeğeri numunelerin normalize edilmiş kayma mukavemetinin boşluk oranı ile değişimi.

Normalize edilmiş kayma mukavemetinin boşluk oranı ile değişimi için yukarıdaki grafikten $S_u/\sigma_o=0.35$ şeklinde bir ilişki elde edilebilir.

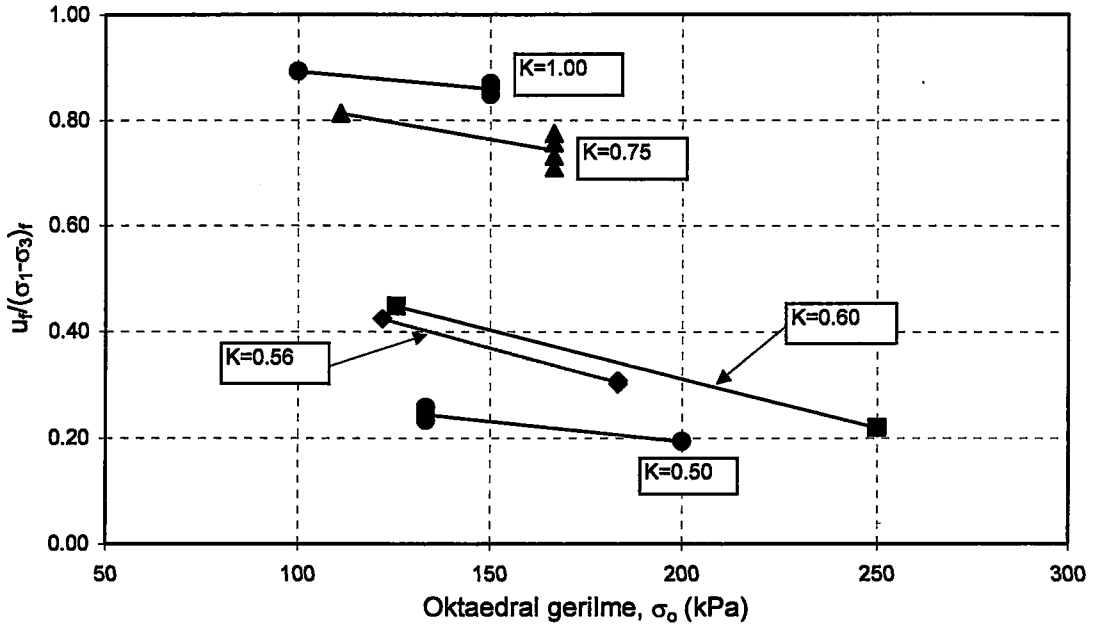
Normalize kayma mukavemetinin $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranı ile değişimi de incelenmiş ve normalize kayma mukavemetinin en büyük değerlerine $K=0.5$ değerinde ulaştığı görülmüştür. Normalize kayma mukavemeti ile $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranının ilişkisi Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5 Normalize kayma mukavemeti ile K katsayısı ilişkisi.

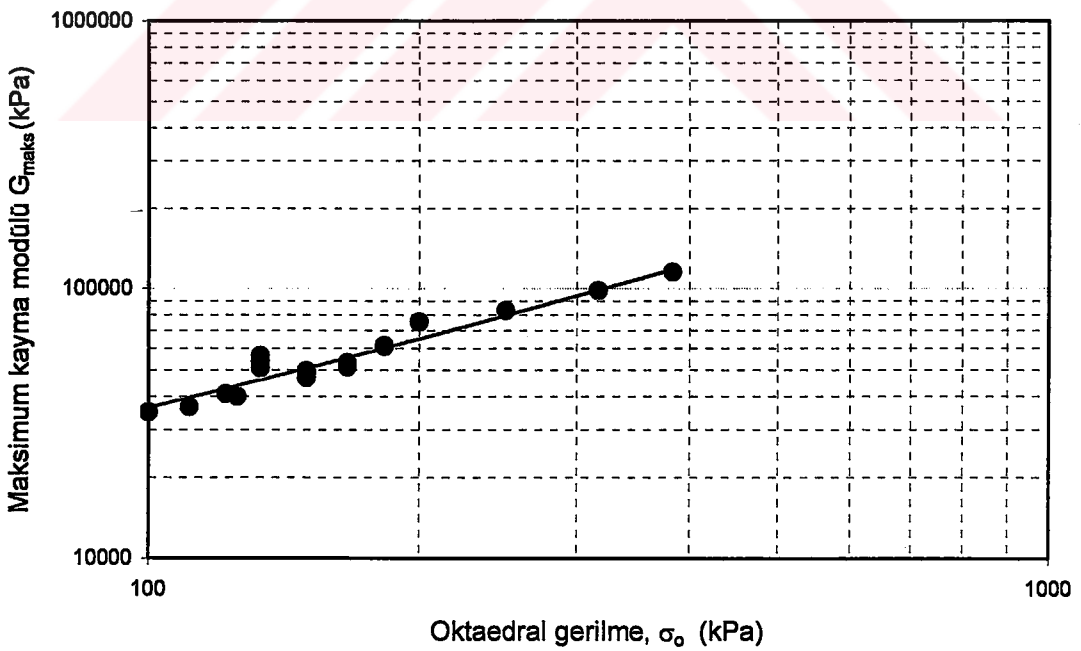
Tablo 3.5’de verilen deney sonuçlarından, kırılma anındaki boşluk suyu basıncı değerlerinin deviatorik gerilmeye bölünmesi ile elde edilen A_f katsayısının oktaedral gerilme ve $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranı ile değişimi Şekil 4.6’da görülmektedir.

Şekil 4.6’da aynı K oranına sahip deney numuneleri aynı renkte verilmiş ve aynı renkteki çizgi ile birleştirilmiştir. Bu grafikte $A_f=u_f/(\sigma_1-\sigma_3)_f$ değerinin azalan K oranı ile azaldığı ve aynı zamanda da artan oktaedral gerilme ile azaldığı görülmektedir. Bu ise beklenmedik bir olay değildir çünkü $A_f=u_f/(\sigma_1-\sigma_3)_f$ değerinin, deneye tabi tutulan zemin sıkılaştıkça azaldığı bilinmektedir. Oktaedral gerilme arttığı durumda da, K oranı küçüldüğü durumda da numune daha sıkı hale gelmekte ve bu sebeple A_f azalmaktadır.



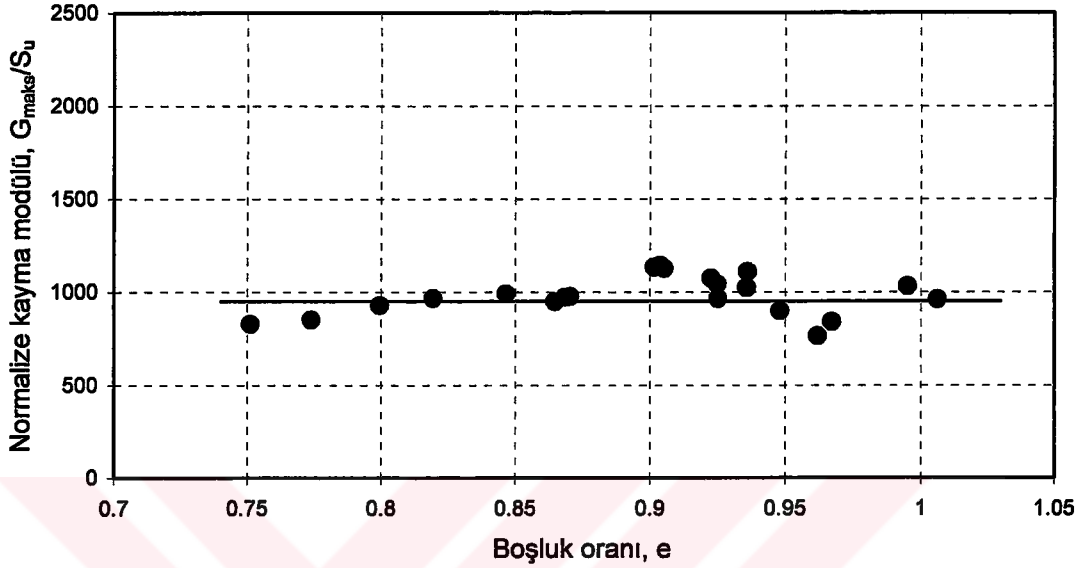
Şekil 4.6 Deviatorik gerilme ile normalize edilmiş boşluk suyu basıncının oktaedral gerilme ile değişimi.

Yapılan deneyler sonucunda arazi eşdeğeri numunelerin kayma modülleri de belirlenmiştir. bu numunelerin kayma modülleri ile uygulanan oktaedral gerilmeler arasında Şekil 4.7'de görülen ilişki vardır.



Şekil 4.7 Maksimum kayma modülü ile oktaedral gerilmenin ilişkisi.

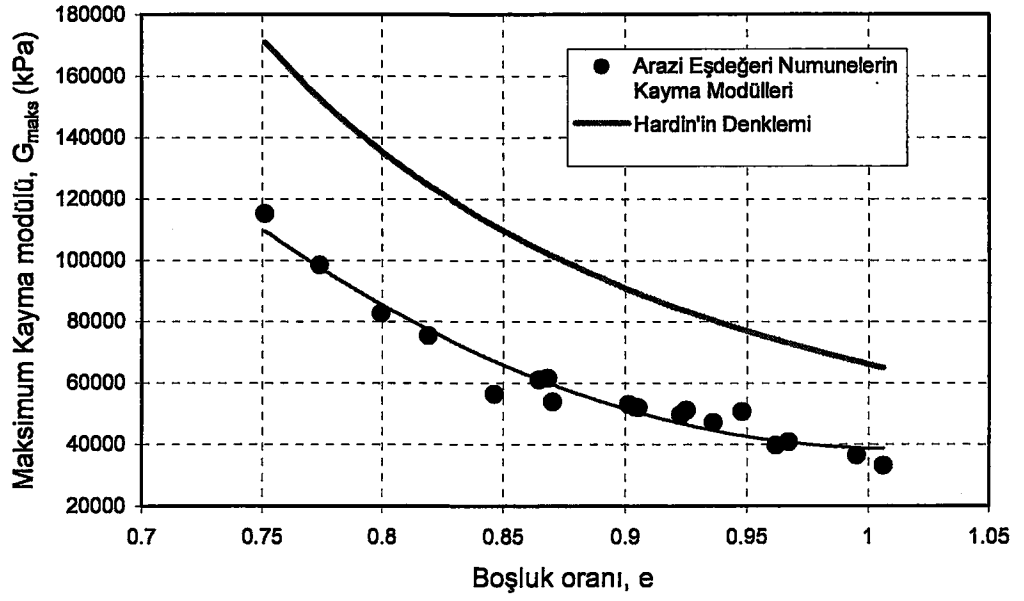
Serbest titreşim deneyi yardımı ile belirlenen kayma modülleri kayma mukavemeti ile normalize edilip boşluk oranı ile ilişkisi çizilince aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Kayma mukavemeti ile normalize edilmiş kayma modülünün boşluk oranı ile değişimi.

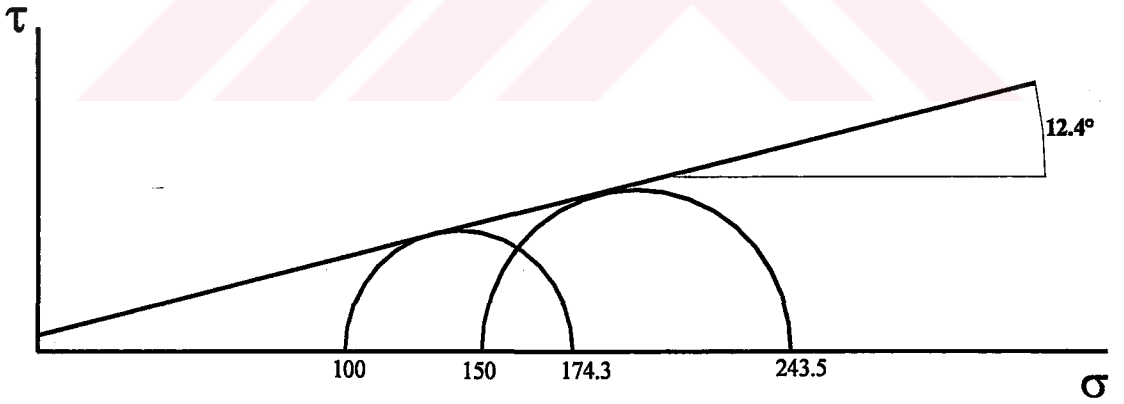
Bu grafikten de görülebileceği gibi bazı araştırmacılar tarafından (Houlsby ve Wroth 1991) rijitlik indisi olarak isimlendirilen G_{maks}/S_u oranı Eskişehir kili için 950 civarında elde edilmiştir. Rijitlik indisi konusunu rezonans kolon aleti kullanarak inceleyen Hardin ve Drnevich (1972) bu değerin 400 ile 1500 arasında değişebildiğini belirtmişlerdir.

Şekil 4.9'da ise Hardinin çok kullanılan formülü ile deneylerden elde edilen maksimum kayma modülleri karşılaştırılmıştır. Hardinin bu formülü laboratuvarda hazırlanmış katı kıvamlı kaolin numuneler kullanarak elde edildiği bilinmektedir. Deney sonuçları Hardinin deney sonuçlarından bir miktar küçük olsa da rijitlik indisi 950 civarında elde edildiğinden deneylerden hesaplanan kayma modüllerinin oldukça hassas bir şekilde elde edildiğini söyleyebiliriz. Bu bölümde daha sonraki sayfalarda elde edilen maksimum kayma modüllerinin, diğer araştırmacıların bulguları ile ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılması yapılmıştır.

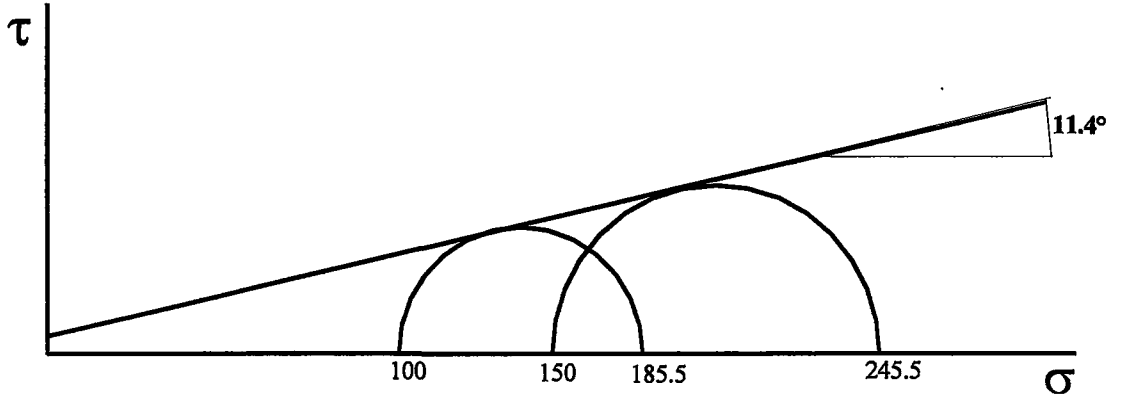


Şekil 4.9 Arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma modülleri ile Hardin'in denklemi kullanılarak elde edilen maksimum kayma modüllerinin karşılaştırılması.

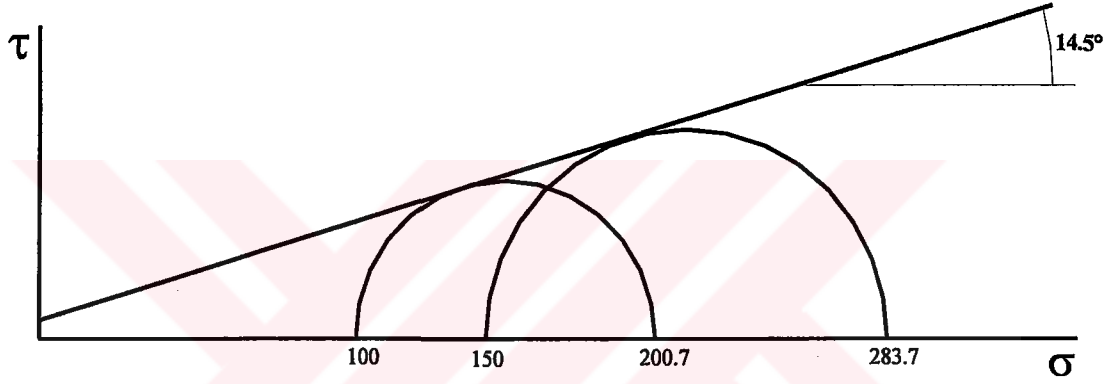
Yapılan deneylerden normal konsolide numunelere için, Mohr daireleri yardımıyla, kayma parametreleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.



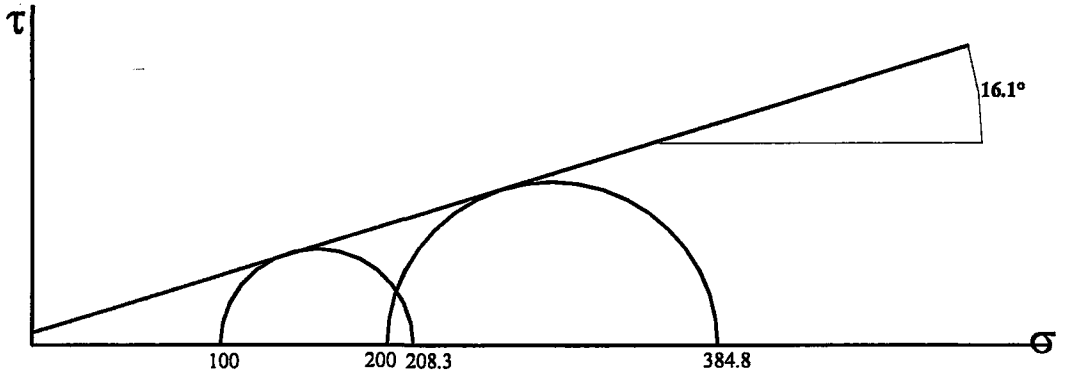
Şekil 4.10 İzotropik olarak yüklenmiş arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.



Şekil 4.11 Anizotropik olarak yüklenmiş ve $K=0.75$ olan arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.



Şekil 4.12 Anizotropik olarak yüklenmiş ve $K=0.6$ olan arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.



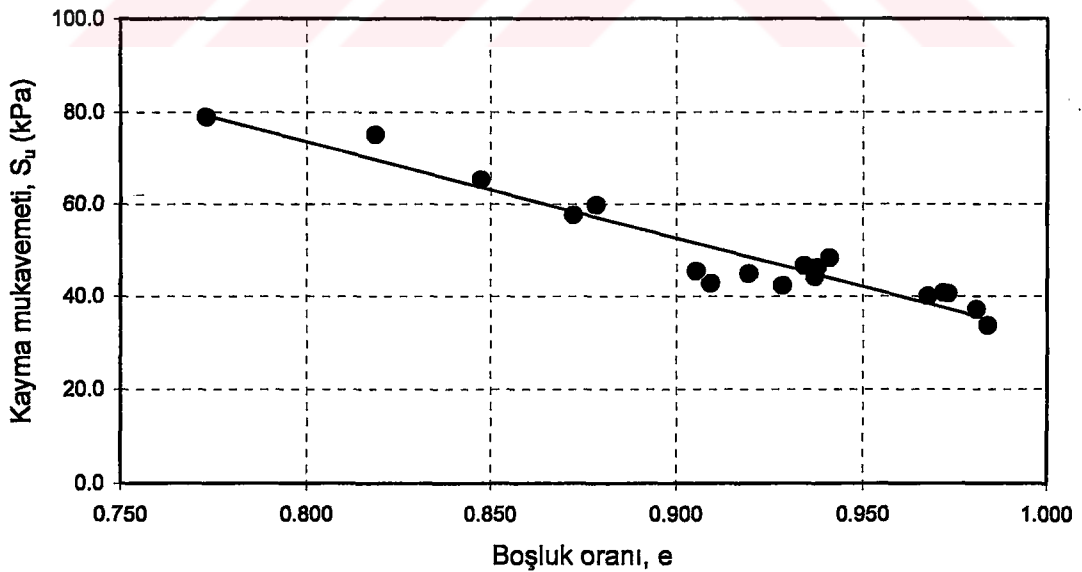
Şekil 4.13 Anizotropik olarak yüklenmiş ve $K=0.56$ olan arazi eşdeğeri numunelerden elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfı.

4.2.2 Birinci grup laboratuvar numunelerinin özellikleri

Rowe hücresinde üretilen numunelerin üç eksenli hücrede değişik gerilme şartlarında konsolide edilmesi ve ardından üzerlerindeki bütün gerilmelerin kaldırılarak yeniden daha düşük gerilme seviyelerinde yüklenerek aşırı konsolide edilen numunelerin laboratuvar numuneleri olarak anıldığını daha önce belirtilmişti. Bu numunelerin aşırı konsolidasyon oranları 1-4.5 arasındadır. Laboratuvar numunelerinin hepsi yeniden konsolide edilirken izotropik şartlarda konsolide edilmiştir. Bunun nedeni, genel olarak zemin mekaniği laboratuvarlarında araziden gelen anizotropik şartlarda konsolide olmuş numuneler deneye tabi tutulurken izotropik şartlarda yeniden konsolide edilmesidir.

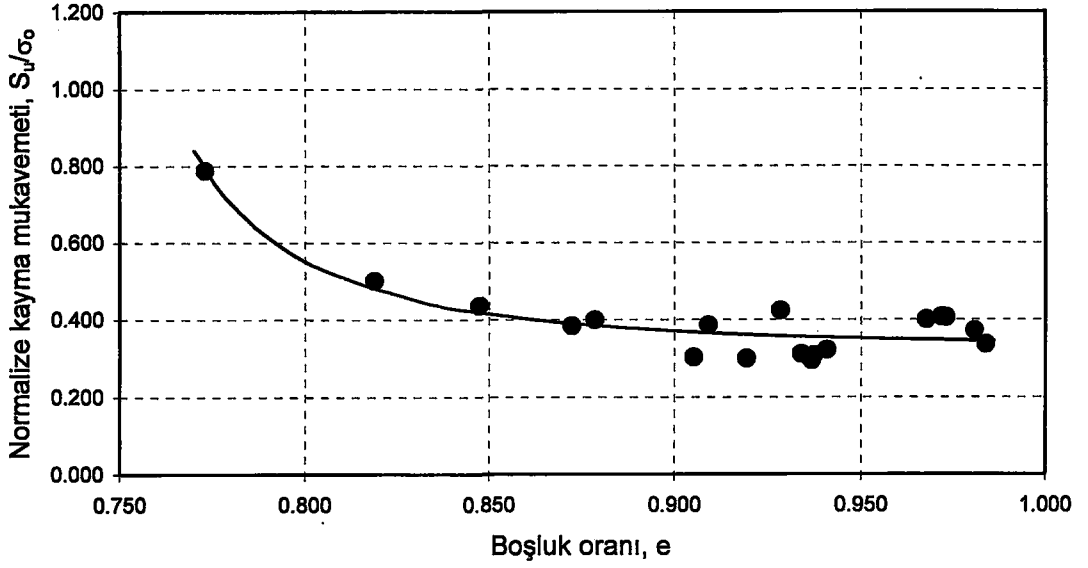
Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti olarak maksimum kayma gerilmeleri alınmıştır. Bu kabulün nedeni çok farklı gerilme geçmişine sahip numunelerden sağlıklı bir şekilde kayma mukavemeti parametreleri (c , ϕ) elde edilememiş olmasıdır. Daha önceki pek çok araştırmacıda aynı kabulü yapmıştır çünkü τ_{maks} değeri ile S_u değerinin geometrik ilişkilerinden dolayı birbirinden çok farklı olmadığı bilinmektedir.

Aşırı konsolide edilmiş laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetleri ile boşluk oranları arasında Şekil 4.14'deki ilişki vardır.



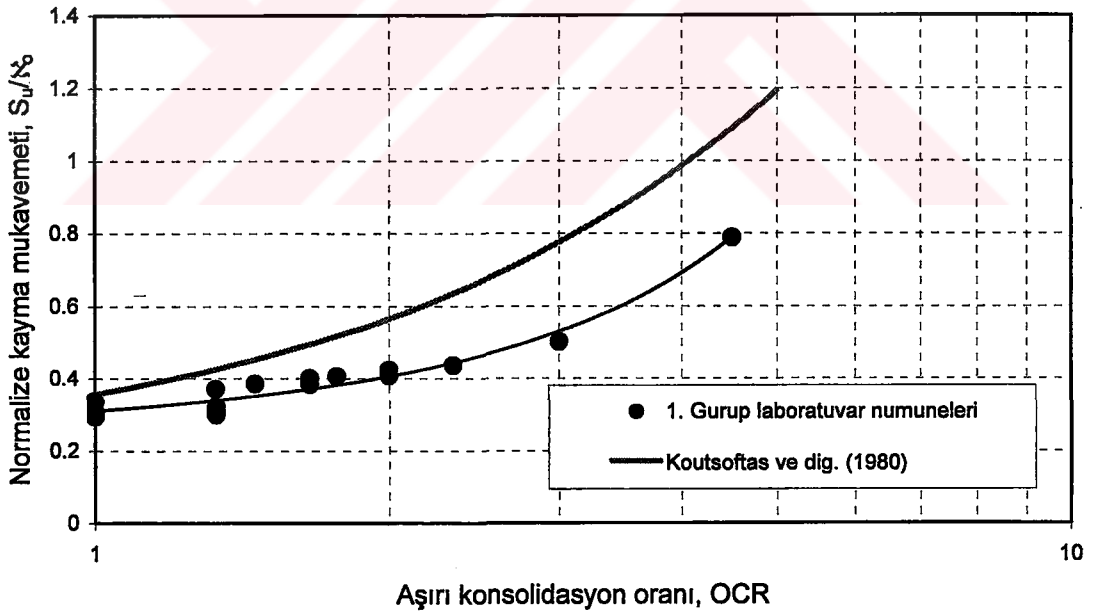
Şekil 4.14 Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetleri çevre basıncı ile normalize edilmiştir. Normalize edilmiş kayma mukavemetlerinin boşluk oranı ile değişimi Şekil 4.15'de görülmektedir.



Şekil 4.15 Normalize edilmiş kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

Yukarıda görüldüğü gibi aşırı konsolide numunelerde, normal konsolide numunelerin aksine, normalize edilmiş kayma mukavemeti değerleri sabit değildir. Bu olayın, numunenin gerilme geçmişi nedeni ile gerçekleştiği düşünülmüştür.

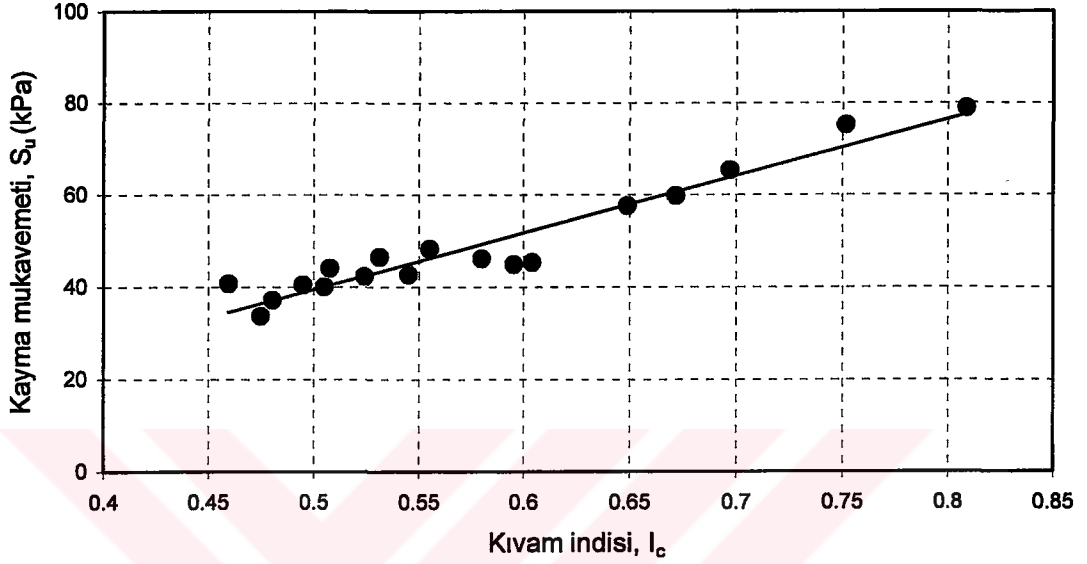


Şekil 4.16 Normalize kayma mukavemeti ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

Gerilme geçmişinin normalize edilmiş kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini görmek için Şekil 4.16'daki grafik çizilmiştir. Bu grafikte aşırı konsolidasyon oranı arttıkça normalize kayma mukavemetinin arttığını görmekteyiz. Aynı zamanda bu grafikte daha önce Koutsoftas ve dig. (1980) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları

da verilmiştir. Görülmektedir ki her iki çalışmanın sonuçları birbirine oldukça yakındır.

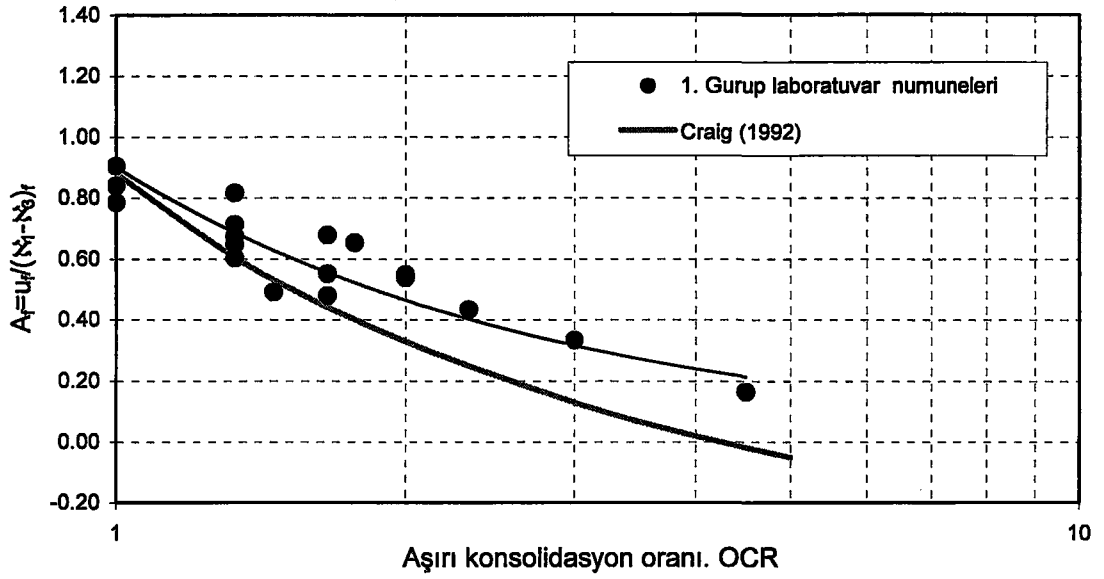
Kıvamın aşırı konsolide numuneler üzerindeki etkisi de araştırılmış ve kıvam indisi arttıkça kayma mukavemetinin arttığı görülmüştür. Bu ilişki Şekil 4.17’de görülmektedir.



Şekil 4.17 Kayma mukavemeti kıvam indisi ilişkisi.

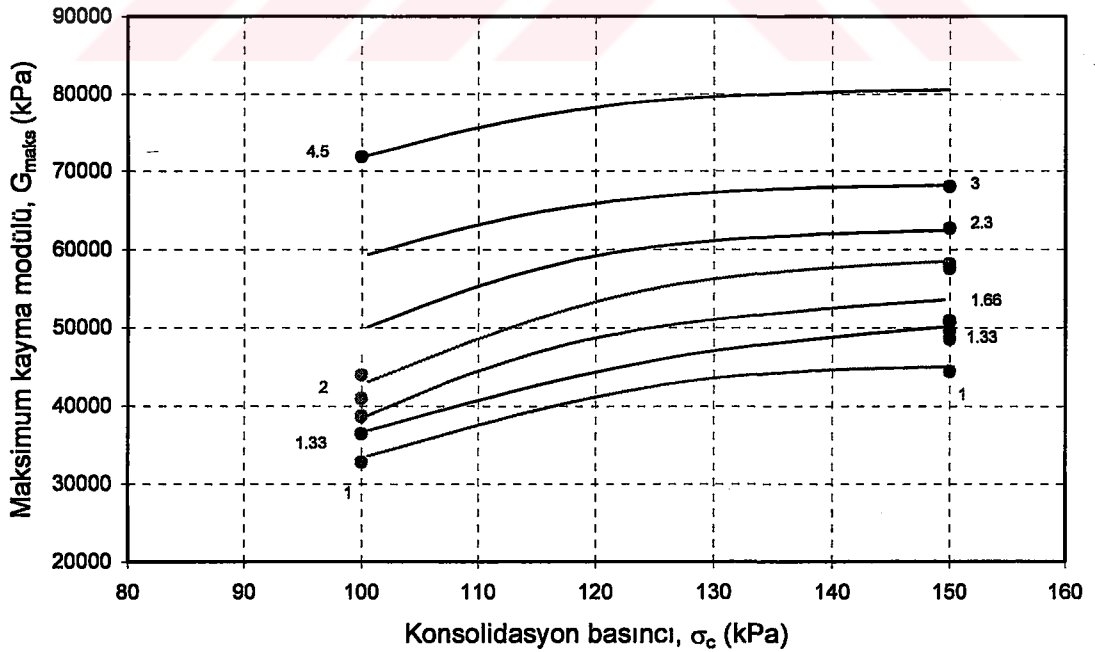
Şekil 4.18’de ise $A_f = u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ değerinin laboratuvar numuneleri için aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi görülmektedir. Bu grafikte dikkat çekici olan bu deneylerin hepsi gerilme boşalması yaşamadan önce çeşitli $K = \sigma_h / \sigma_v$ oranlarında konsolide edilmiş numunelerdir. Bu bölümde arazi eşdeğeri numunelerin A_f değerleri ile oktaedral gerilme arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 4.6 yeniden incelenirse, A_f değerinin K oranı ile ilintili olduğu görülebilir. Aşırı konsolide numunelerde ise A_f değerinin, aşırı konsolidasyon oranının bir fonksiyonu olmaya başladığını görmekteyiz. Aşırı konsolidasyon oranının bu etkisi, gerilme boşalması nedeniyle örselenen zemin numunelerinin yapısal değişime uğraması ile açıklanabileceği düşünülmüştür.

Aşırı konsolide gerilme boşalması yaşamış numunelerinde kayma modülleri serbest titreşim deneyi vasıtası ile belirlenmiştir. Bu deneylerin sonucunda aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma modülleri ile konsolidasyon basıncı arasında Şekil 4.19’daki gibi bir ilişki olduğu belirlenmiştir.



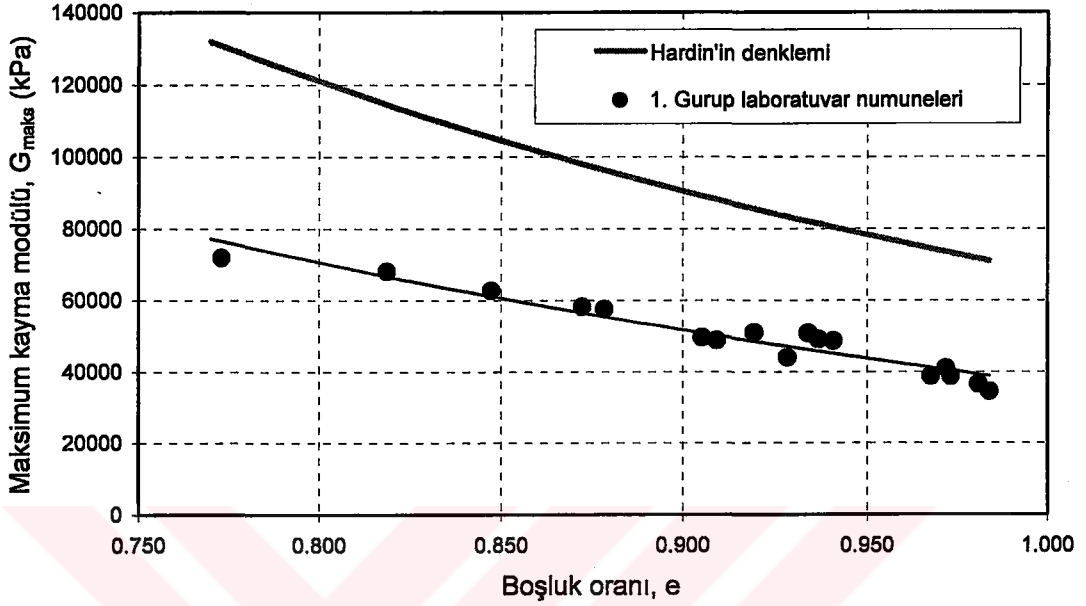
Şekil 4.18 Deviatorik gerilme ile normalize edilmiş boşluk suyu basıncının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi ve Craig (1992) tarafından aynı ilişkinin verilışı.

Aşağıdaki grafikte noktaların yanındaki rakamlar aşırı konsolidasyon oranını göstermektedir. Aynı aşırı konsolidasyon oranına sahip numuneleri temsil eden noktalar çizgi ile birleştirilmiştir. Burada, aşırı konsolide numunelerin sadece 100 kPa ve 150 kPa konsolidasyon basınçları altında yeniden konsolide edildikleri unutulmamalıdır.



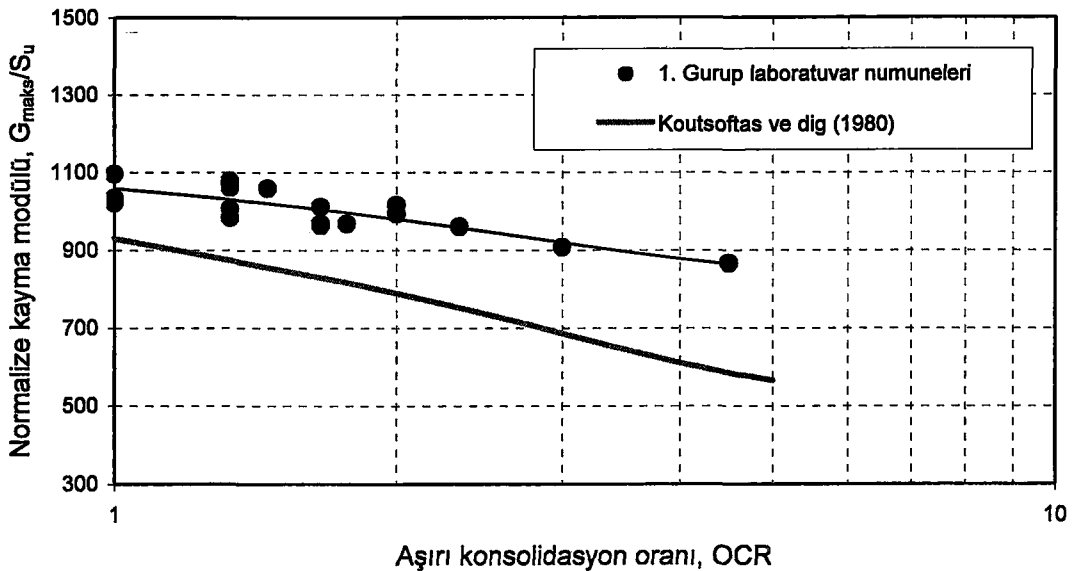
Şekil 4.19 Laboratuvar numunelerinin G_{maks} konsolidasyon basıncı ilişkisi.

Aşırı konsolide laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modüllerinin boşluk oranı ile değişimi Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi deneyler sonucu elde edilen G_{max} değerleri Hardin’in deney sonuçlarından küçüktür.



Şekil 4.20 Laboratuvar numunelerinde G_{maks} boşluk oranı ilişkisi.

Laboratuvar numunelerini örnekleyen numunelerin, maksimum kayma modülleri kayma mukavemetleri ile normalize edilmiş ve rijitlik indisi elde edilmiştir. Normalize edilmiş kayma modülünün (rijitlik indisi) aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi Şekil 4.21’de görülmektedir.



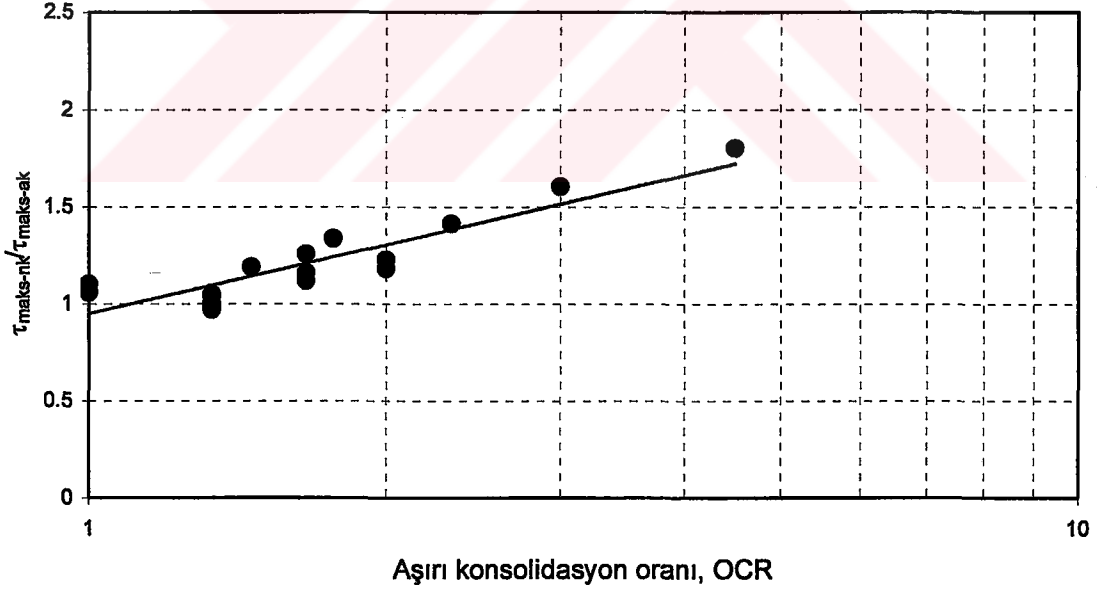
Şekil 4.21 Normalize kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

Normalize kayma modülü ile aşırı konsolidasyonun ilişkisini inceleyen diğer araştırmacıların çalışmalarından ilk bölümde bahsedilmişti. Bu araştırmacılardan Ladd ve Edgers (1972) ve Koutsoftas ve diğ. (1980) benzer sonuçlar elde etmişlerdi.

4.2.3 Birinci grup arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması

Yapılan deneylerde, gerilme boşalmasına maruz kalmış numunelerin bir miktar su emdiği ve bunun sonucu olarak biraz yumuşadıkları gözlenmiştir. Gerilme boşalması yaşayan numunelerle normal konsolide numunelerin mukavemet ve kayma modüllerinin karşılaştırılması, örselenmenin etkilerinin anlaşılması açısından çok önemlidir.

Normal konsolide numunelerin maksimum kayma gerilmeleri ile gerilme boşalması yaşamış numunelerin maksimum kayma gerilmeleri karşılaştırılması düşünülmüştür. Bu amaçla normal konsolide numunelerin maksimum kayma gerilmelerinin aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma gerilmelerine oranı ile gerilme geçmişini temsil eden aşırı konsolidasyon oranı arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu ilişki Şekil 4.22'de görülmektedir.



Şekil 4.22 Normal ve aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma gerilmelerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

Yukarıdaki grafikten de görülmektedir ki aşırı konsolidasyon oranı numunenin mukavemeti üzerinde birinci dereceden etkilidir. Grafikten de görüldüğü gibi numunenin aşırı konsolidasyon oranı arttıkça laboratuvar da elde edilen kayma

mukavemetinde yapılan hata miktarı da artmaktadır. Eğer kullanılan numunenin aşırı konsolidasyon oranı bilinmiyorsa yapılan deneyin ne kadar yanıltıcı olabileceğinin görülmesi açısından bu grafikler anlamlıdır. Grafikte verilen ilişkiyi matematiksel olarak ifade edersek

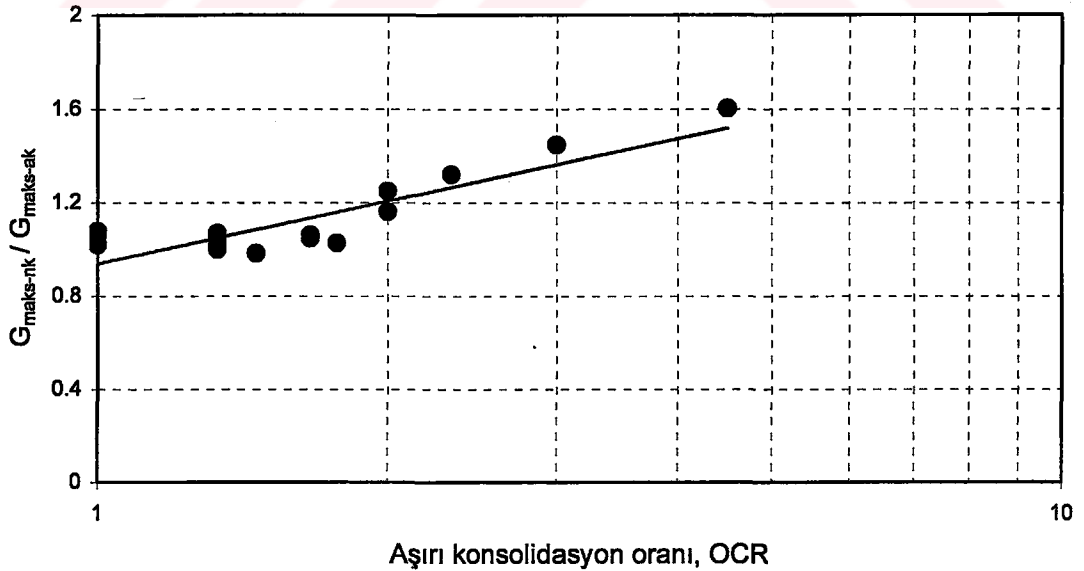
$$\frac{\tau_{maks-nk}}{\tau_{maks-ak}} = 0.23xOCR + 0.79 \quad (4.1)$$

şeklinde bir ifade elde ederiz. Bu ifade, düşük plastisiteli killerde, laboratuvarda aşırı konsolide olarak kesilmiş aşırı konsolidasyon oranı belli numunelerin normal konsolide durumdaki kayma mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilir.

Aynı şekilde maksimum kayma modüllerinin de karşılaştırılması düşünülmüştür. Kayma modüllerini karşılaştırabilmek için normal ve aşırı konsolide numunelerin kayma modülleri birbirlerine oranı ile aşırı konsolidasyon oranı arasındaki ilişki Şekil 4.23’de görülmektedir. Buradan

$$\frac{G_{maks-nk}}{G_{maks-ak}} = 0.19xOCR + 0.80 \quad (4.2)$$

şeklinde matematiksel bir ifade elde edilebilir. Bu matematiksel ifade, düşük plastisiteli killerde, aşırı konsolide haldeki maksimum kayma modülü değerinden, normal konsolide haldeki maksimum kayma modülü değerinin tahmini için kullanılabilir.



Şekil 4.23 Normal ve aşırı konsolide numunelerin maksimum kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

Yukarıdaki şekillerden de görülmektedir ki gerilme geçmişi zemin numunelerinin davranışlarını etkilemektedir. Gerilme geçmişi tam olarak bilinmeyen numuneler ile deney yapmak yanıltıcı olabilir. Ancak numunenin gerilme geçmiş bilirse bu yanıltıcı etkilere karşı önlem alınabilir.

Genel olarak gerilme boşalması yaşayan numunelerde bir miktar yumuşama meydana gelmektedir. Laboratuvar numunelerinde geçmişte maruz kaldığı en büyük gerilme ile yeniden yüklenmiş numunelerde ($OCR=1$) bile bir miktar mukavemet kaybı ve maksimum kayma modülü düşüşü görülmektedir. Bu olayın nedeninin numunenin gerilme boşalması sırasında emmiş olduğu suyu, yeniden konsolidasyon sırasında tamamı ile dışarı atamaması nedeni ile yumuşaması olduğu düşünülmüştür. Boşluk suyu basıncı davranışlarını incelediğimizde ise A_f katsayısının normal konsolide numunelerde, aşırı konsolide numunelere göre bir miktar düşük olarak elde edilmiştir bu olayın yumuşama ile ilgili olduğu düşünülmüştür.

4.3 İkinci Gurup Deneyler

İkinci gurup deneylerde arazide doğa olayları neticesi aşırı konsolide olmuş numunelerin gerilme boşalması neticesinde ki davranışlarının modellendiği daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu amaçla K_0 şartlarında konsolide edilmiş numuneler üç eksenli hücrede gerilmelerin tümü kaldırılmadan daha düşük izotropik gerilmelerde yüklenmiş ve 24 saat yeni gerilme şartlarında konsolidasyonunu tamamlaması beklenildikten sonra kesilmiştir. Bu numuneler arazide doğal şartlarla aşırı konsolide olmuş numuneler olarak kabul edilmiştir. Ardından aynı şekilde gerilmelerin tümü kaldırılmadan aşırı konsolide numuneler hazırlanmış ve bu numuneler düşük izotropik gerilme şartlarında 24 saat bekletildikten sonra bütün gerilmeler boşaltılmış ve bir 24 saat de bu şekilde bekletildikten sonra bir önceki izotropik şartlarda yeniden yüklenerek konsolidasyonun tamamlanması için 24 saat beklenildikten sonra kesilmiştir. Bu gruptaki numunelerde, ilk bahsedilen aşırı konsolide ancak gerilmeleri hiçbir zaman sıfır'a düşürülmeyen numuneler, arazi eşdeğeri numuneler olarak ve aynı numunelerin laboratuvarında kesilmiş halinin modellendiği numuneler ise laboratuvar numuneleri olarak isimlendirilmiştir. Birinci gurup aşırı konsolide laboratuvar deneylerinde olduğu gibi, bu deneylerde de kayma mukavemeti parametreleri belirlenemediğinden maksimum kayma gerilmeleri ($\tau_{maks}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$) kayma mukavemeti olarak kabul edilmiştir.

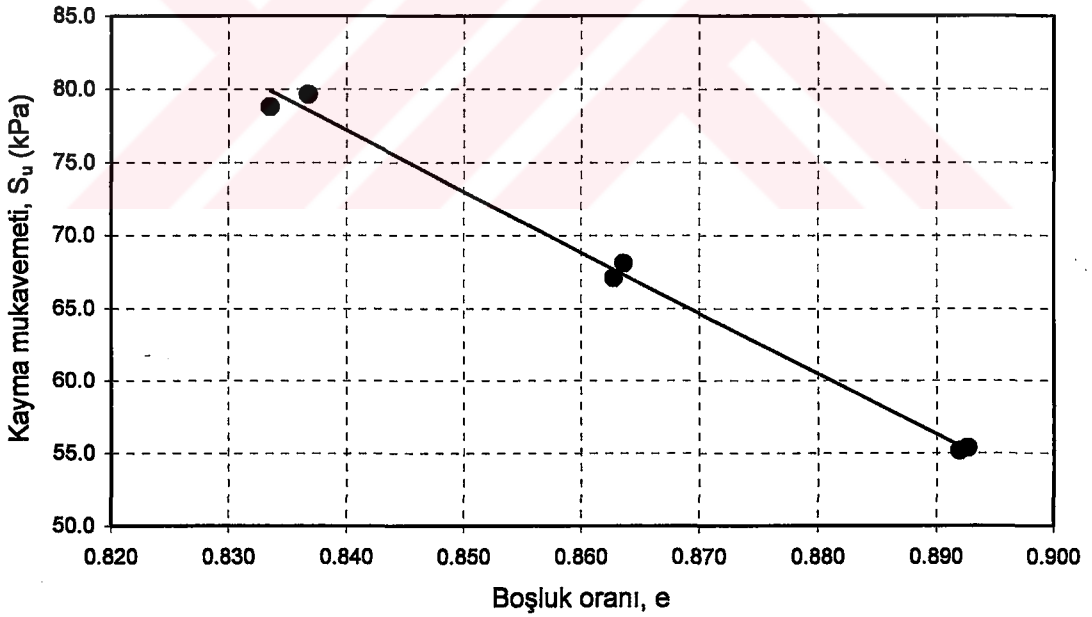
4.3.1 İkinci grup arazi eşdeğeri numunelerin özellikleri

İkinci grup deneylerde arazide aşırı konsolide olmuş numuneleri örneklemek için yapılan deneylerde, yukarıda anlatıldığı şekilde K_o şartlarında konsolide edilmiş numuneler üzerlerinden bütün gerilmeler kaldırılmadan daha düşük izotropik gerilme şartlarında yüklenmişler ve kesilmişlerdir. Örneğin $\sigma_v=400$ kPa ve $\sigma_h=200$ kPa ile konsolide edilmiş numune $\sigma_c=100$ kPa ile yüklü hale getirilmiştir. Bu sayede aşırı konsolidasyon oranı $OCR=4$ olan bir numune elde edilmiştir.

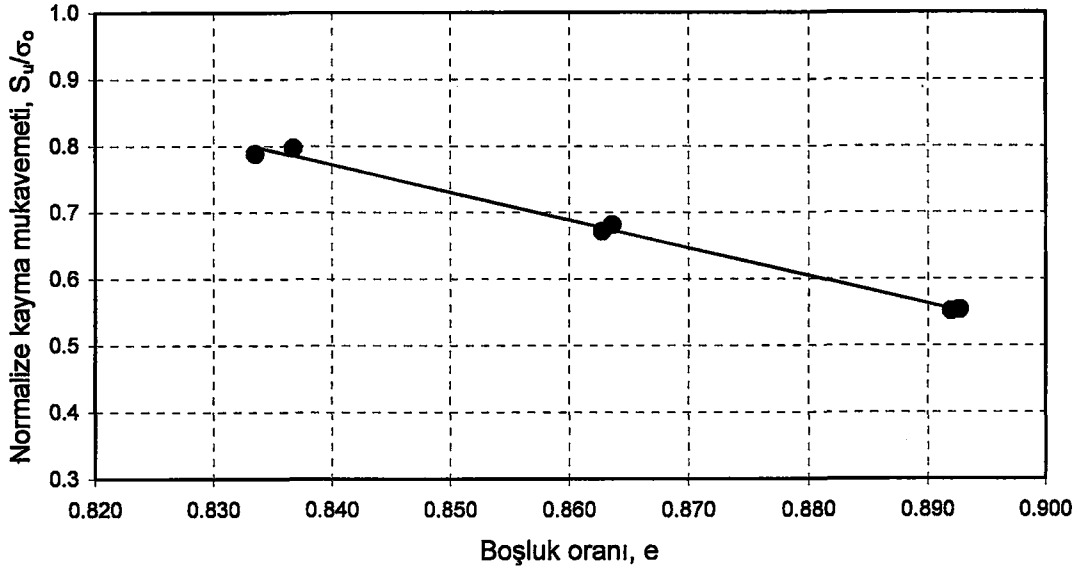
Birinci grup deneylerin aksine ikinci grup arazi eşdeğeri numunelerin hepsi aşırı konsolidedir. Bu numunelerin aşırı konsolidasyon oranları 2-4 arasındadır.

Arazi eşdeğeri numuneler için kayma mukavemeti boşluk oranı ilişkisi Şekil 4.24’de görülmektedir.

Aşırı konsolide arazi eşdeğeri numuneleri modellemek için yapılan deneylerde kayma mukavemetlerinin çevre basıncı ile normalize edilmiş hali ile boşluk oranının değişimi Şekil 4.25’de görülmektedir.



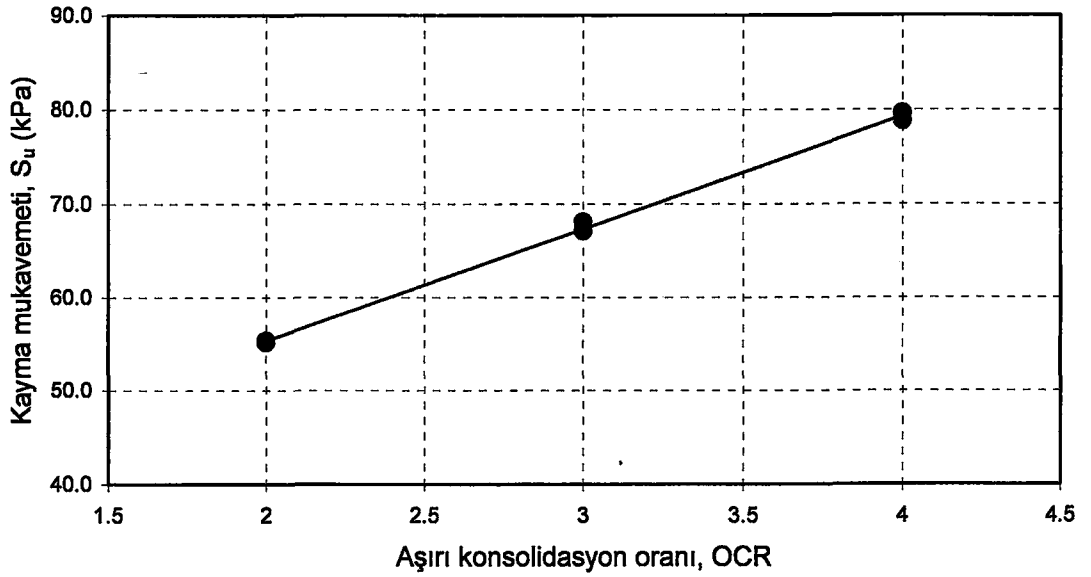
Şekil 4.24 Arazi eşdeğeri numuneler için kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.



Şekil 4.25 Arazi eşdeğeri numunelerde normalize kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

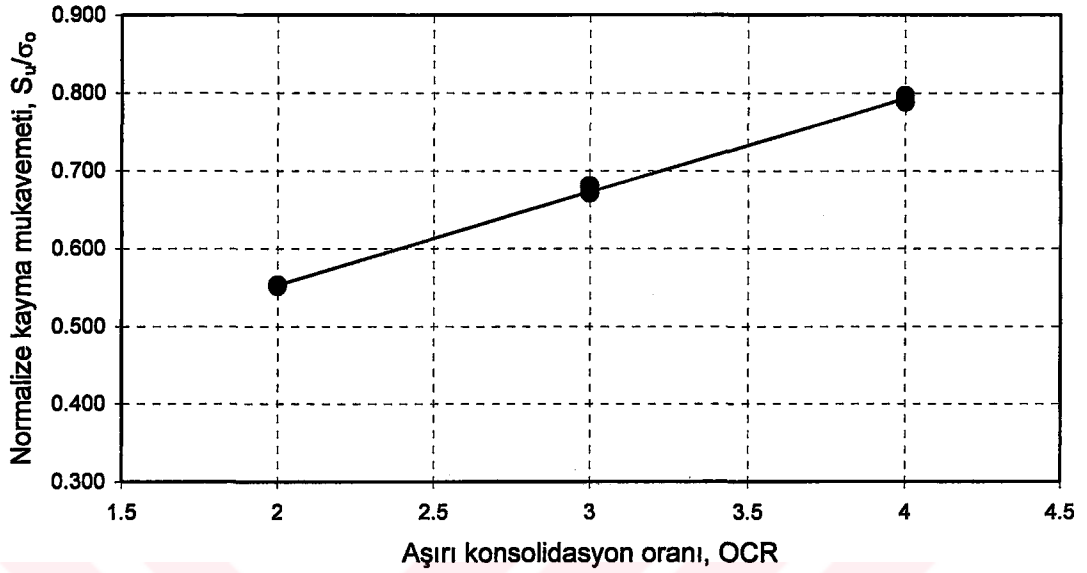
Yukarıda da görüldüğü gibi normalize kayma mukavemeti daha önceki aşırı konsolide numunelerde de olduğu gibi sabit bir ilişki göstermemiş, gerilme geçmişinin etkisiyle eğimli hale gelmiştir.

Gerilme geçmişinin kayma mukavemeti üzerindeki etkisini görmek için çizilen kayma mukavemeti ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi Şekil 4.26'da görülmektedir.



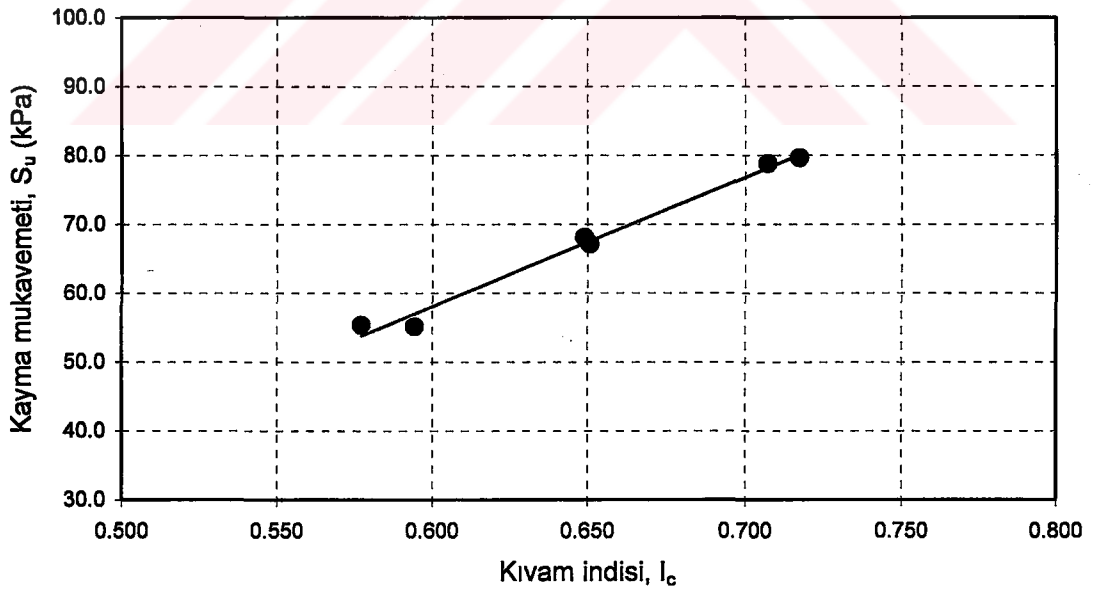
Şekil 4.26 Kayma mukavemeti aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

Gerilme geçmişinin etkisini görebilmek için çizilen, normalize kayma mukavemeti ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi Şekil 4.27’de görülmektedir.



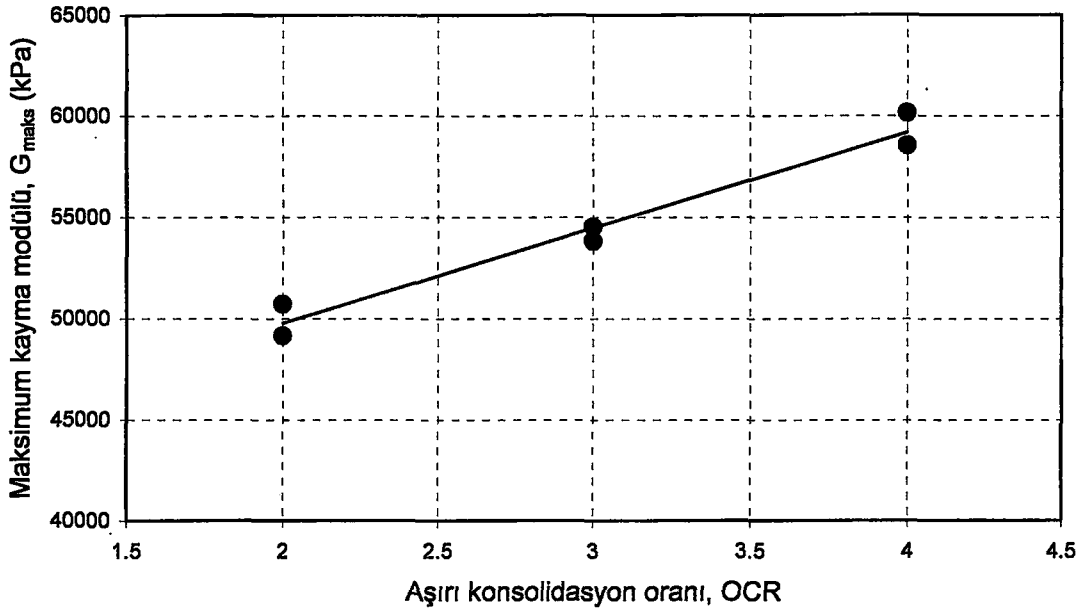
Şekil 4.27 Normalize kayma mukavemeti-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

Kıvamın kayma mukavemeti üzerindeki etkisi Şekil 4.28’de görülmektedir.



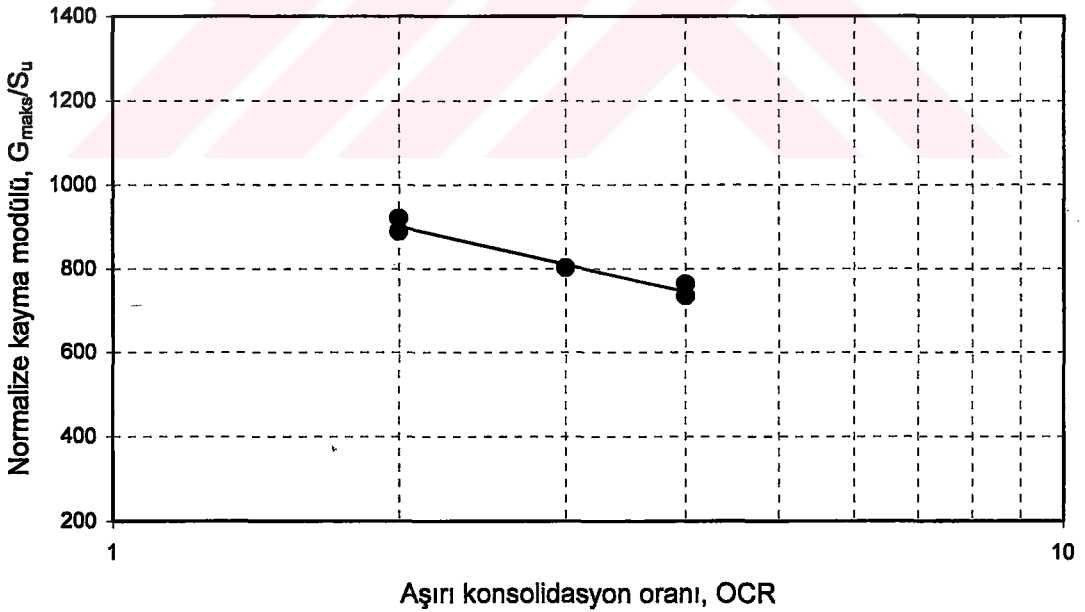
Şekil 4.28. Kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.

Aşırı konsolide arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma modülleri burulmalı titreşim aleti kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen maksimum kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi Şekil 4.29’deki gibidir.



Şekil 4.29 Maksimum kayma modülü-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

Normalize kayma modülünün (rijitlik indisinin) aşırı konsolidasyonu ile değişimi Şekil 4.30’da görülmektedir.



Şekil 4.30 Normalize kayma modülü-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

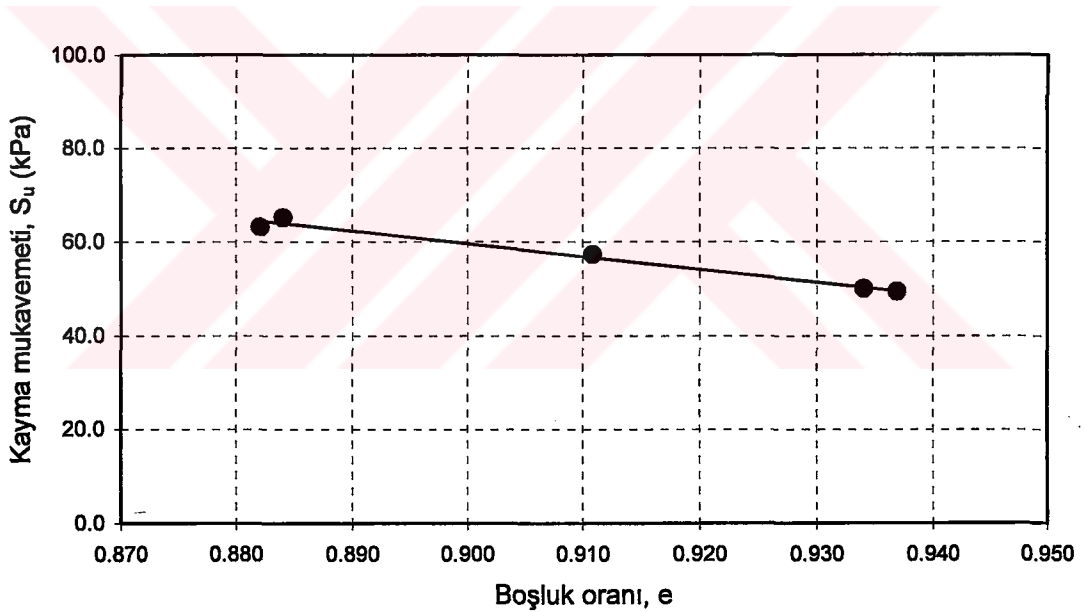
4.3.2 İkinci grup laboratuvar numunelerinin özellikleri

Arazi şartlarında aşırı konsolide olmuş numunelerin numune alıcı ile alınıp laboratuvarında deneye tabi tutuluncaya kadar sıfır gerilmeler altında bekletilmesini

modellemek amacıyla, arazide K_0 şartlarında konsolide olmuş numuneler izotropik şartlarda yüklenmiş ve ardından üzerlerindeki bütün gerilmeler kaldırılmıştır. Gerilmeler boşaltılıp 24 saat beklenildikten sonra yeniden izotropik şartlarda konsolide edilmiş ve kesilmişlerdir. Örneğin $\sigma_v=400$ kPa $\sigma_h=200$ kPa basınç altında konsolide edilen numune önce izotropik olarak $\sigma_c=100$ kPa ile yüklenmiş, 24 saat beklenildikten sonra bütün gerilmeler kaldırılmış, ve 24 saat daha beklenilmiştir. Ardından tekrar $\sigma_c=100$ kPa ile yüklenip 24 saat sonra kesilmiştir. Böylece aşırı konsolidasyon oranı $OCR=4$ olan bir numune elde edilmiştir.

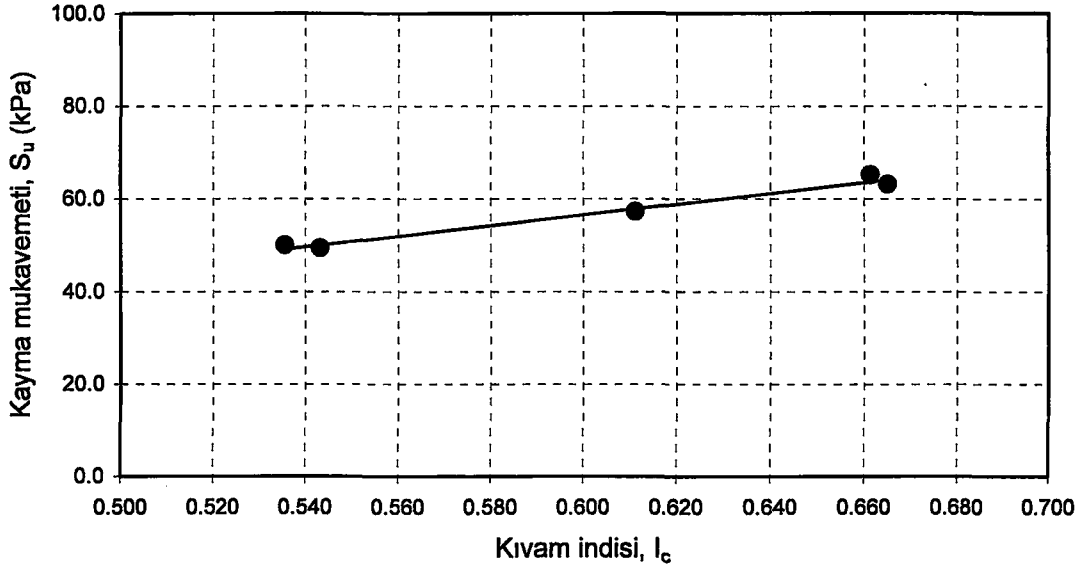
Bu numunelerin birinci grup aşırı konsolide numunelerden en büyük farkı iki defa gerilme boşalması yaşamaları ve daha fazla örselenmeleridir. Bu numuneler aşırı konsolidasyon oranları 2-4 arasında değişen numunelerdir.

Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetleri ile boşluk oranları arasında Şekil 4.31’de görülen ilişki vardır.



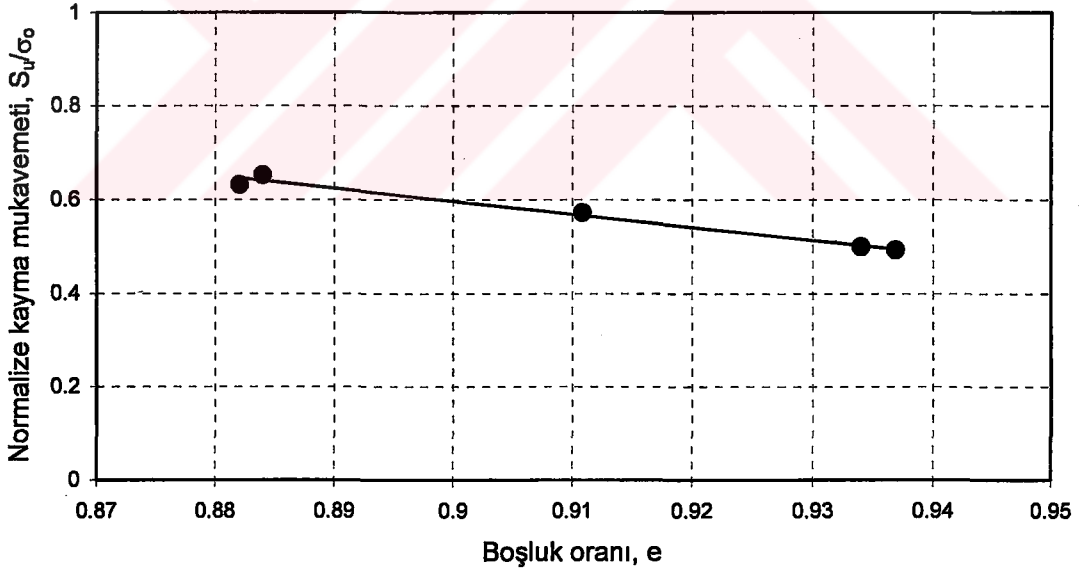
Şekil 4.31 Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

Kıvamın kayma mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 4.32’de görülen ilişki elde edilmiştir.



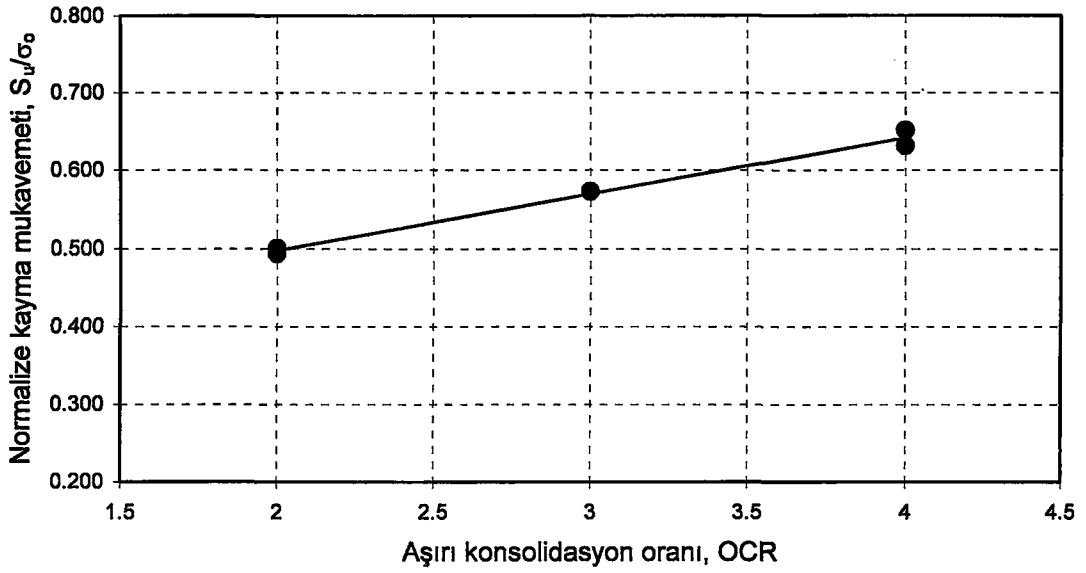
Şekil 4.32 Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.

Elde edilen kayma mukavemeti değerleri hücre basıncı ile normalize edilmiştir. Bu işlemin sonunda normalize edilmiş kayma mukavemeti değerleri ile boşluk oranı ilişkisi Şekil 4.33’de görülmektedir.



Şekil 4.33 Laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti boşluk oranı ilişkisi.

Normalize edilmiş kayma mukavemeti değerlerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi ise Şekil 4.34’deki gibidir.

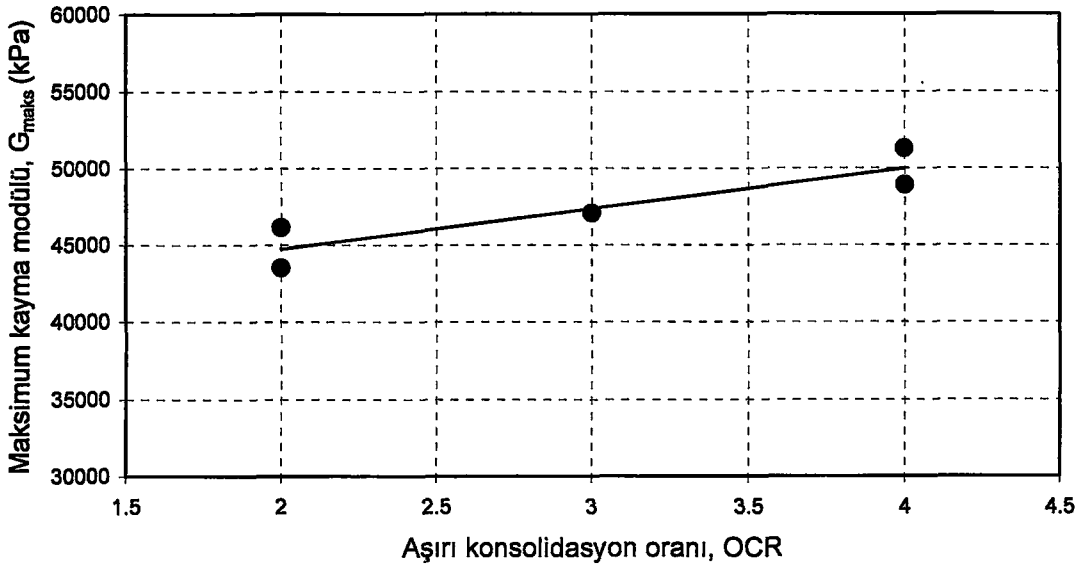


Şekil 4.34 Laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

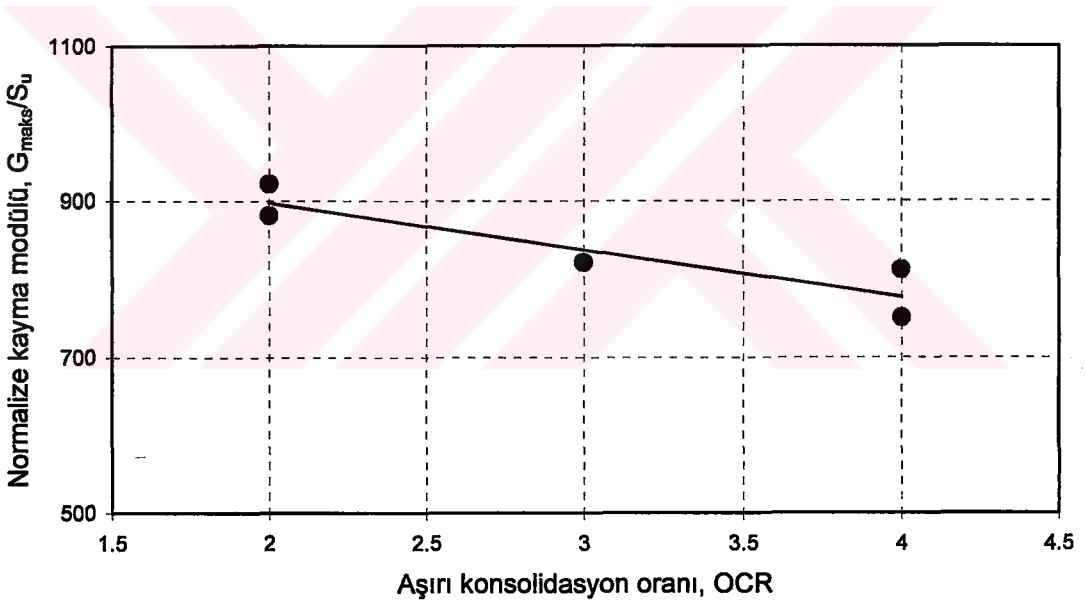
Normalize kayma mukavemeti değerlerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi, arazi eşdeğeri numunelerin aynı ilişkisi karşılaştırıldığında arazi eşdeğeri numunelerin aşırı konsolidasyon sonucunda daha fazla etkilendiğini görmekteyiz. Yani arazi eşdeğeri numunelerde normalize kayma mukavemeti-aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi daha yüksek eğimli olarak bulunmuştur. Üzerindeki yükler tamamen kaldırılmış olan laboratuvar numunelerinde bu ilişki daha az eğimlidir. Bu olayın gerilmelerin kaldırılması sırasında numunelerin yapısının bozulması ile açıklanabileceği düşünülmüştür.

Burulmalı titreşim aleti ile yapılan deneyler sonucunda ikinci grup deneylerinde maksimum kayma modülleri belirlenmiştir. Laboratuvar numunelerini maksimum kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi Şekil 4.35’de görülmektedir.

Aşırı konsolide zeminlerden alınmış laboratuvar numunelerini modellemek için üretilen ikinci grup laboratuvar numuneleri olarak isimlendirilen numunelerin maksimum kayma modülleri, kayma mukavemetleri ile normalize edilmiştir. Normalize kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile ilişkisi Şekil 4.36’da görülmektedir.



Şekil 4.35 Laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.



Şekil 4.36 Laboratuvar numunelerinin normalize kayma modüllerinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

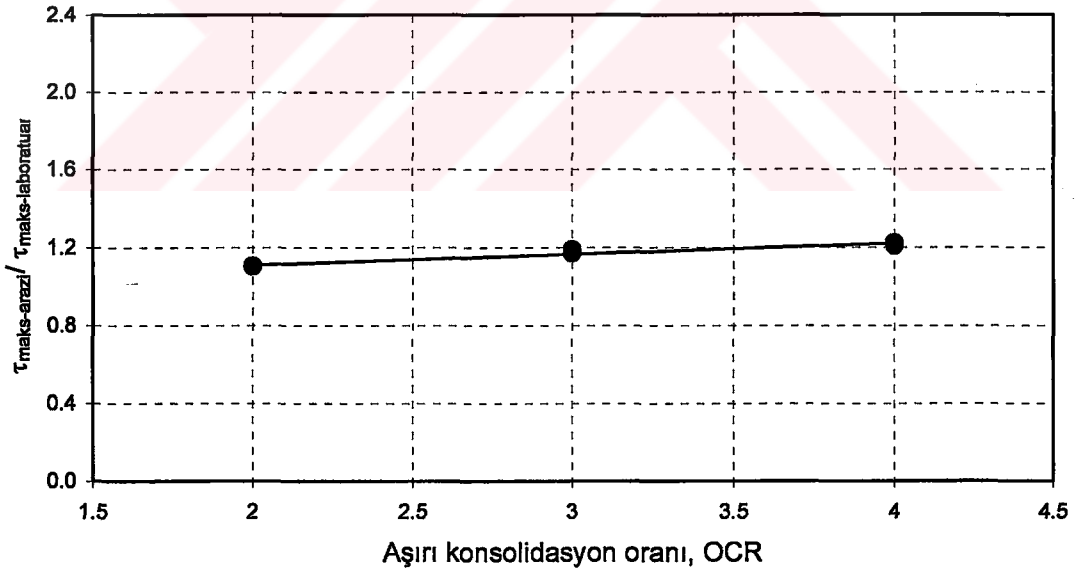
4.3.3 İkinci grup arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması

Yapılan deneylerde arazide doğal şartlarla aşırı konsolide olduğu kabul edilen numunelerin mukavemetlerinin daha yüksek olduğu ve daha rijit oldukları gözlenmiştir. Bu olayın sebebinin üzerlerinden bütün yükleri kaldırılan laboratuvar numunelerinin daha fazla su emmeleri olduğu düşünülmüştür.

Arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma gerilmeleri ile laboratuvar numunelerinin maksimum kayma gerilmelerinin karşılaştırılması düşünülmüştür. Maksimum kayma gerilmelerinin oranının gerilme geçmişi temsil eden aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi Şekil 4.37’de görülmektedir. Aşırı konsolidasyon oranları aynı olmasına rağmen sadece gerilme boşalması yaşamış olması numunelerin mukavemetlerinin düşmesine yetmiştir. Bu olayın nedeninin hem numunelerin su emmesi hem de numunelerin yapısal olarak bozulması ile açıklanabilir. Şekil 4.37’de görüldüğü gibi arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetlerinin birbirine oranı yaklaşık olarak sabit (1.2) elde edilmiştir. Bu ilişki aşırı konsolidasyon oranından bağımsız olarak

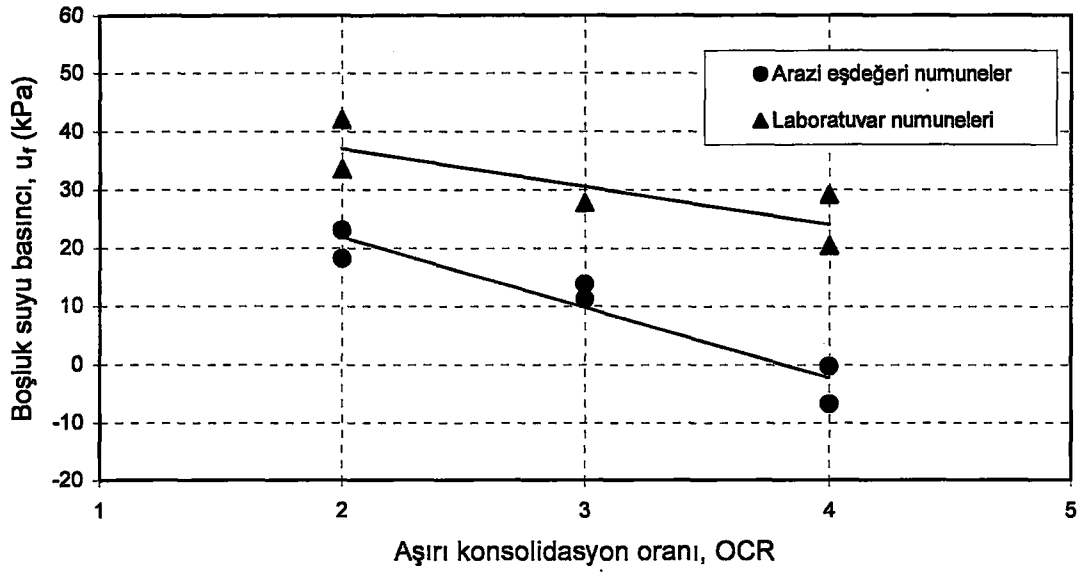
$$\frac{\tau_{maks-azazi}}{\tau_{maks-laboratuvar}} = 1.2 \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca dikkat edilirse arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin maksimum kayma gerilmeleri arasındaki fark aşırı konsolidasyon oranı ile artmaktadır. Yani aşırı konsolidasyon oranı arttıkça arazide doğal şartlarla aşırı konsolide olan numunelerin mukavemetleri hızla artarken laboratuvar numunelerinin mukavemetleri biraz daha az artış göstermiştir.



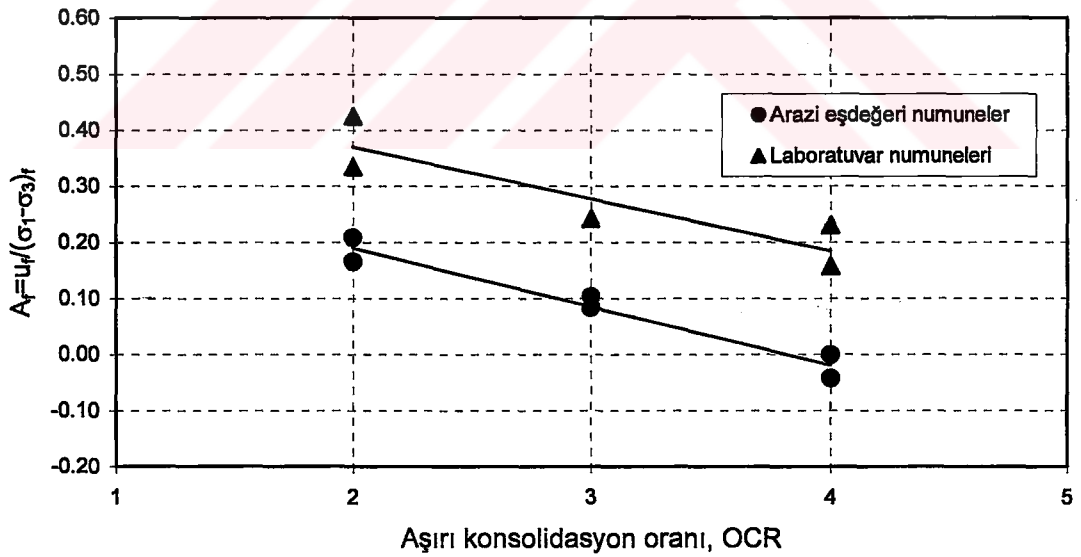
Şekil 4.37 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti oranının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin boşluk suyu basıncı davranışlarını karşılaştırmak için Şekil 4.38 çizilmiştir.



Şekil 4.38 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kırılma anındaki boşluk suyu basıncı değerleri.

Şekil 4.39'da ise arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin A_f katsayılarının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi görülmektedir.



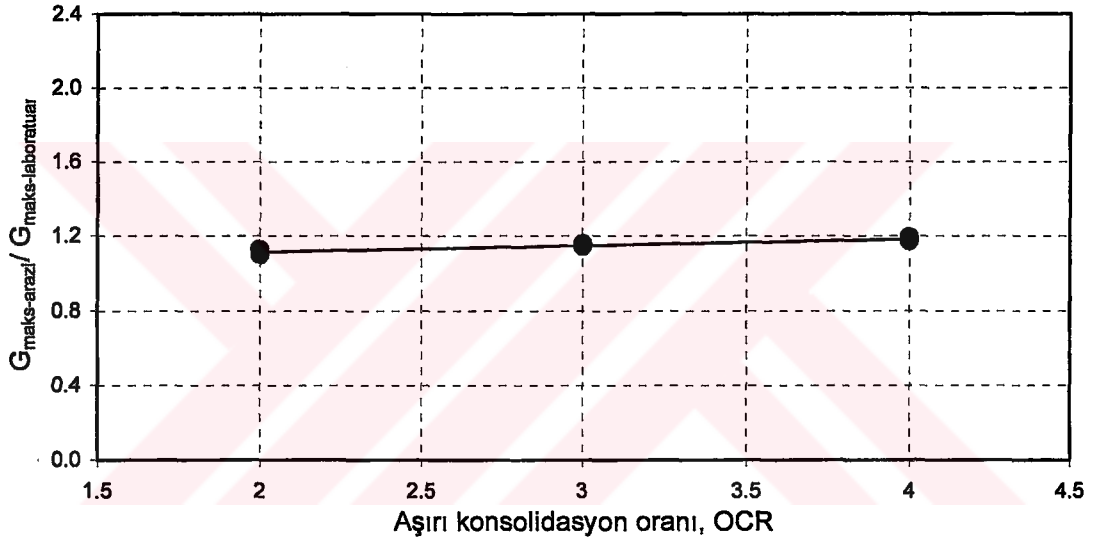
Şekil 4.39 Normalize boşluksuyu basıncının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

Yukarıdaki grafiklerden de görülmektedir ki iki kere gerilme boşalmasına uğramış laboratuvar numunelerinde daha yüksek boşluksuyu basıncı değerleri ölçülmüştür. Aynı zamanda bu numunelerin mukavemetleri de daha düşüktür. Bu olayın iki kere gerilme boşalması yaşayan numunelerin, yumuşamış olmaları sebebiyle meydana geldiği düşünülmüştür.

Benzer biçimde maksimum kayma modüllerinin de karşılaştırılması düşünülmüştür. Kayma modüllerini karşılaştırabilmek için arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin, kayma modüllerinin oranı ile aşırı konsolidasyon oranı arasındaki ilişki Şekil 4.40'da görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modüllerinin birbirine oranı yaklaşık olarak sabit (1.2) elde edilmiştir. Bu ilişki

$$\frac{G_{maks-arazi}}{G_{maks-laboratuvar}} = 1.2 \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.40 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma modülü oranının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi ilk bakışta aynı gerilme geçmişine sahipmiş gibi görünen aşırı konsolide arazi eşdeğeri ve laboratuvar numuneleri birbirinden farklı davranışlar göstermişlerdir. Her iki tip numunede gerilme boşalması yaşamış ancak ikinci tip numune gerilme boşalmasını iki kere, hem de ikincisinde, tümüyle yaşamıştır. Bu olayın sonucunda çok daha fazla örselenmiş, rijitliğini kaybetmiş ve iç yapısı bozulmuştur.

4.4 Üçüncü Grup Deneyler

Rowe hücresinde üretilen numuneler arazide normal konsolide olmuş numuneleri modellemek amacıyla K_0 şartlarında konsolide edildiği kabul edilen numuneler üretilmiş ve ardından kesilmiştir. Bu numuneler arazi eşdeğeri numuneler olarak

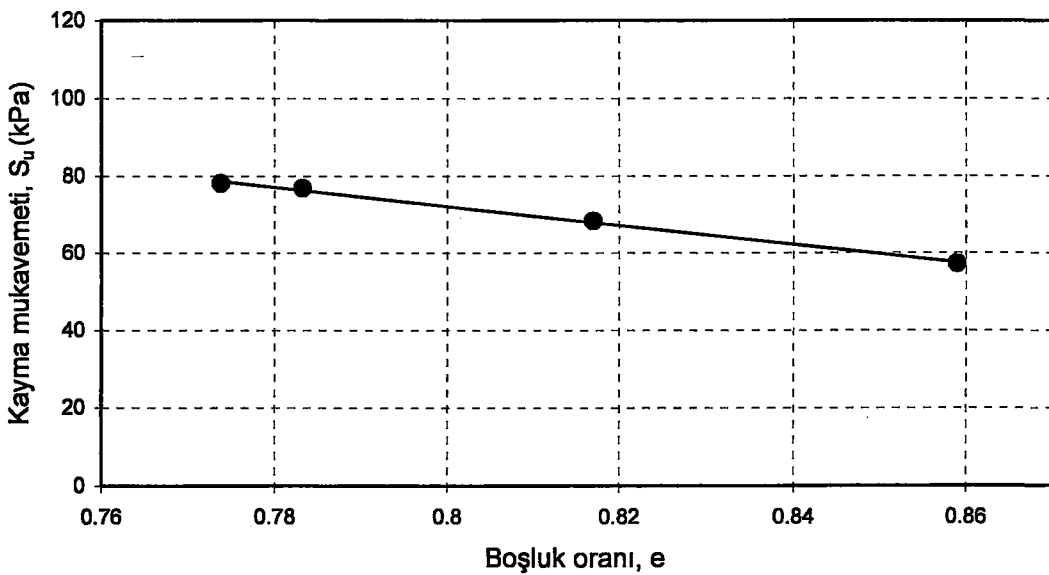
isimlendirilmişlerdir. Daha önce de bahsedildiği gibi $K_0=0.5$ olarak alınmıştır (Massarsch, 1979). Ancak üç eksenli deney sisteminde yanal deplasmanları ölçmek mümkün olmadığından bu numunelerin tam anlamı ile K_0 şartlarında konsolide olduklarını söyleyemeyiz. Arazi eşdeğeri deneylerden sonra, araziden numune alıcı ile alınmış laboratuvara getirilmiş ve K_0 şartlarında yeniden konsolide edilmiş numuneleri modellemek amacıyla, üç eksenli hücrede yine K_0 şartlarında konsolide edilmiş numuneler hazırlanmış ardından üzerlerindeki gerilmelerin tümü kaldırılarak 24 saat beklenilmiş ardından yeniden K_0 şartlarında konsolide edilerek kesilmiştir.

Arazi eşdeğeri numuneler normal konsolidedir. Laboratuvar numuneleri ise gerilme boşalması yaşamış ancak geçmişte maruz kaldığı en büyük yüklerle yeniden yüklenmiş durumdadır ($OCR=1$). Bütün kesme deneylerinden önce serbest titreşim aleti ile numunelerin maksimum kayma modülleri belirlenmiştir.

4.4.1 Üçüncü grup arazi eşdeğeri numunelerin özellikleri

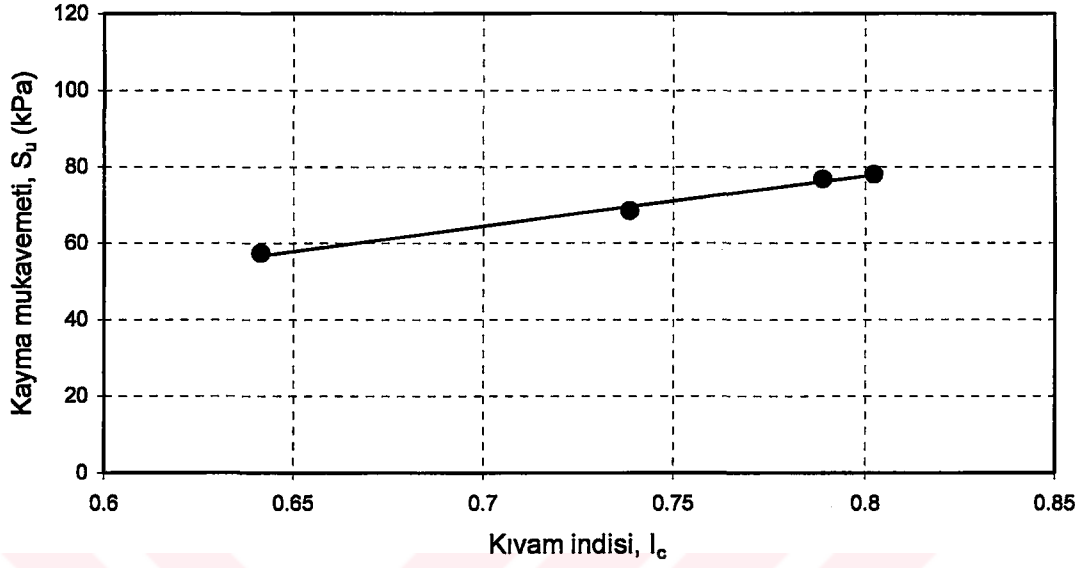
Arazi eşdeğeri numuneleri örneklemek için yapılan deneylerde aynı kilden Rowe hücresi kullanılarak üretilen numuneler üç eksenli hücrede K_0 şartlarında konsolide edilerek kesilmişlerdir.

Farklı gerilme seviyelerinde yapılan deneyler sayesinde Mohr dairelerinin çizilmesi mümkün olmuştur. Çizilen Mohr daireleri yardımıyla Numunelerin kayma mukavemetleri (S_u) belirlenebilmiştir. Kayma mukavemetinin boşluk oranı ile ilişkisi Şekil 4.41’de görülmektedir.



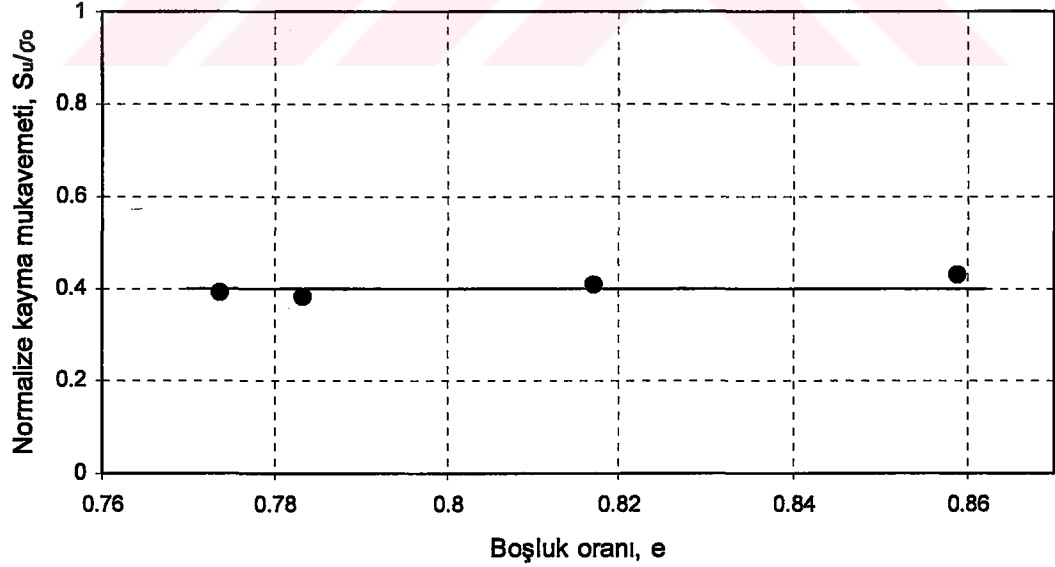
Şekil 4.41 Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

Arazi eşdeğeri numunelerde kıvamının kayma mukavemetine etkisi Şekil 4.42’de görülmektedir.



Şekil 4.42 Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.

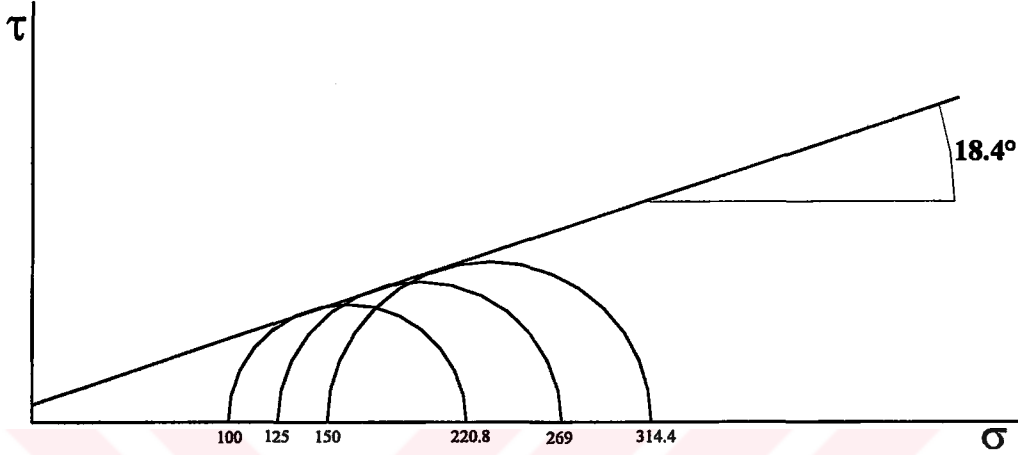
Oktaedral gerilme ile normalize edilmiş kayma mukavemeti değerlerinin boşluk oranı ile ilişkisi Şekil 4.43’da görülmektedir.



Şekil 4.43 Arazi eşdeğeri numunelerde norm. kayma muk. boşluk oranı ilişkisi.

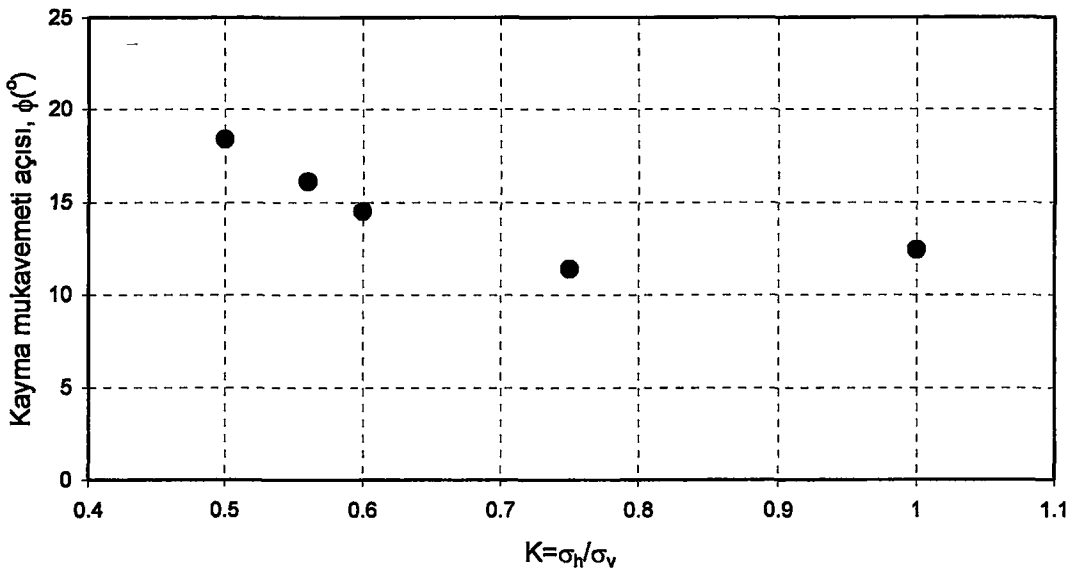
Yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi üçüncü grup normal konsolide numuneler ile birinci grup normal konsolide numunelerin normalize kayma mukavemeti boşluk oranı ilişkisi birbirine oldukça benzemektedir. Her iki ilişkide sabite yakındır ve K_0

şartlarında konsolide olmuş zeminler için $S_w/\sigma_o=0.4$ olduğu söylenebilir. Bu ilişki birinci bölümde $S_w/\sigma_o=0.35$ olarak bulunmuştu. Ancak S_w/σ_o oranının K 'ya göre değişimi incelendiğinde (Şekil 4.5) en yüksek S_w/σ_o değerine $K=0.5$ değerinde ulaşıldığı belirtilmişti. Bu sebeple S_w/σ_o değerleri arasındaki bu farklılık normaldir. Normal konsolide arazi eşdeğeri numuneler üzerinde yapılan drenajsız üç eksenli deneylerden Mohr daireleri Şekil 4.44'deki gibi elde edilmiştir.



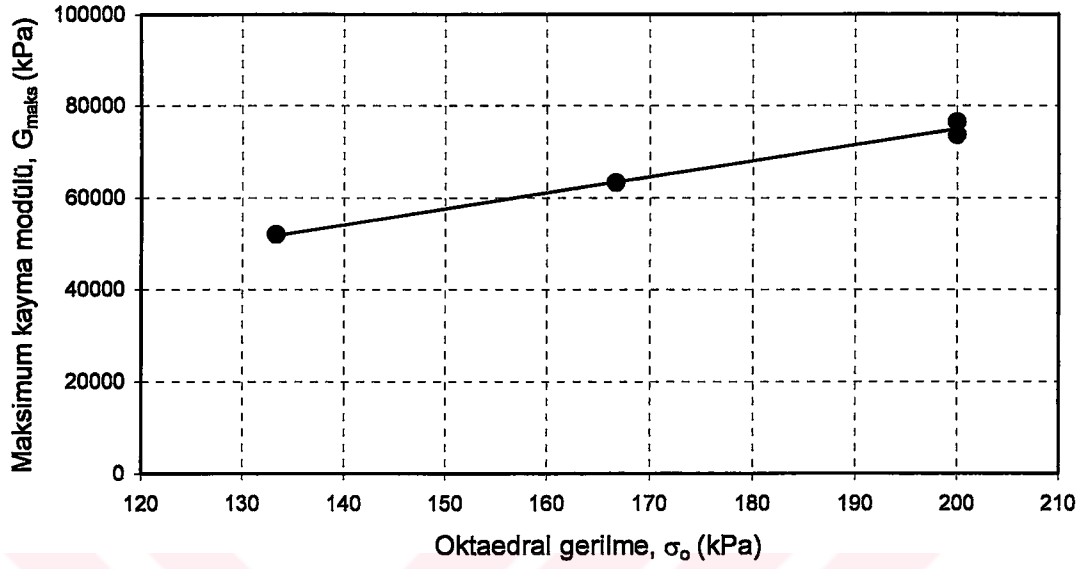
Şekil 4.44 K_o şartlarında normal konsolide olmuş numuneler için Mohr daireleri.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta elde edilen kayma mukavemeti açısının $K=0.5$ değeri için daha önceki K değerleri için elde edilen kayma mukavemeti açılarından daha yüksek olmasıdır. Şekil 4.45'de diğer K değerleri kullanılarak elde edilmiş kayma mukavemeti açılarının ve K değerlerinin değişimi görülmektedir.



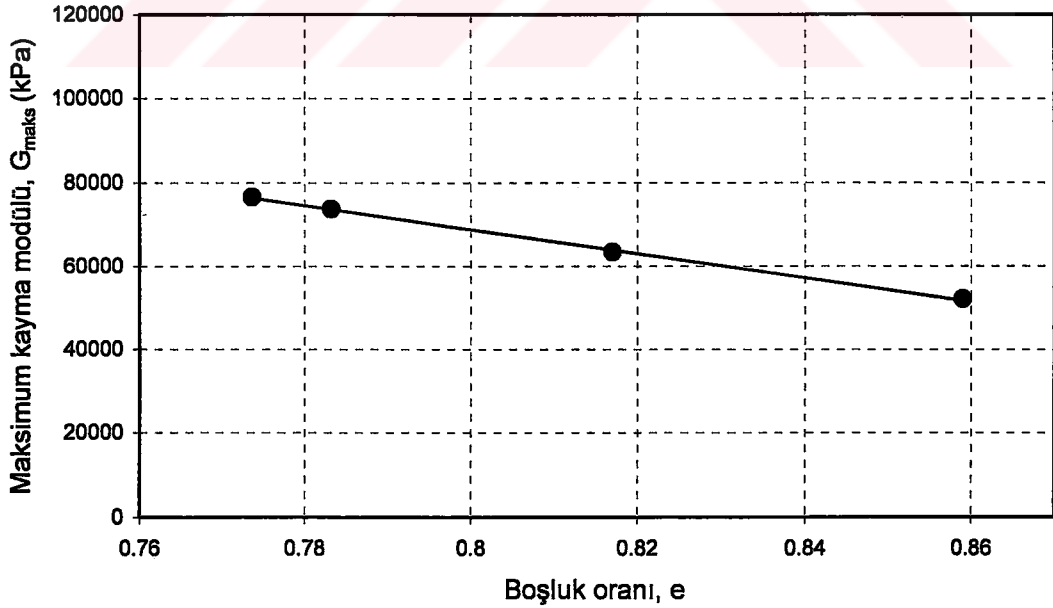
Şekil 4.45 Farklı K değerleri için hesaplanmış kayma mukavemeti açısı değerleri.

Yapılan serbest titreşim deneyleri ile belirlenen kayma modülleri ile oktaedral gerilme arasındaki bağıntı Şekil 4.46’da görülmektedir.



Şekil 4.46 Maksimum kayma modülü ile oktaedral gerilme ilişkisi.

Arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma modüllerinin boşluk oranı ile değişimi Şekil 4.47’ de görüldüğü gibidir.



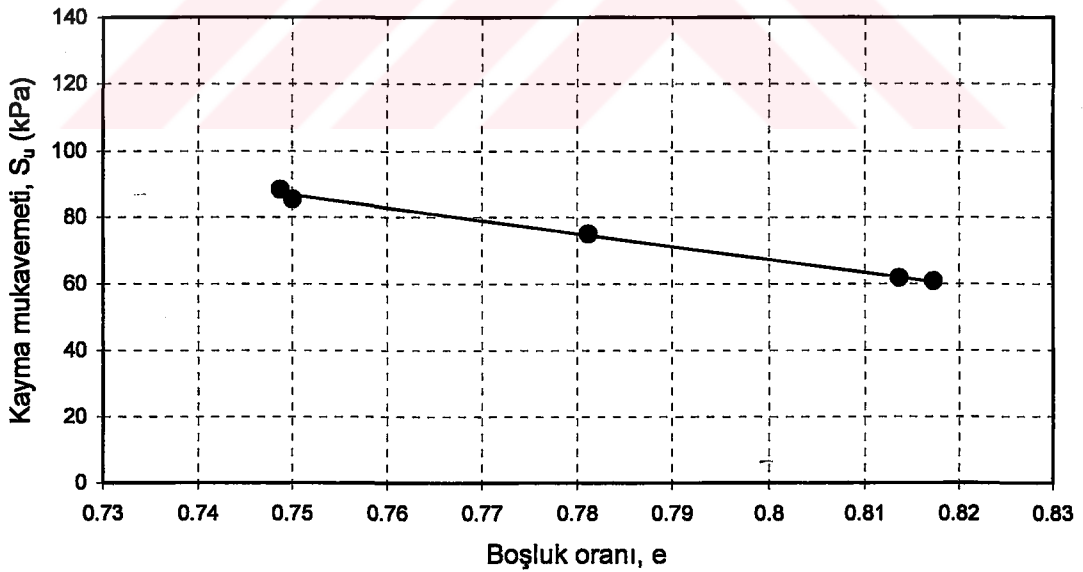
Şekil 4.47 Maksimum kayma modülü ile boşluk oranı ilişkisi.

4.4.2 Üçüncü grup laboratuvar numunelerinin özellikleri

Arazide K_0 şartlarında konsolide olmuş zeminlerin laboratuvar davranışını modellemek için, K_0 şartlarında konsolide edilmiş numuneler üç eksenli hücrede gerilme boşalmasına maruz bırakılmış ve üzerlerindeki bütün gerilmeler kaldırılmış olduğu halde 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin ardından numune yeniden K_0 şartlarında konsolide edilmiştir.

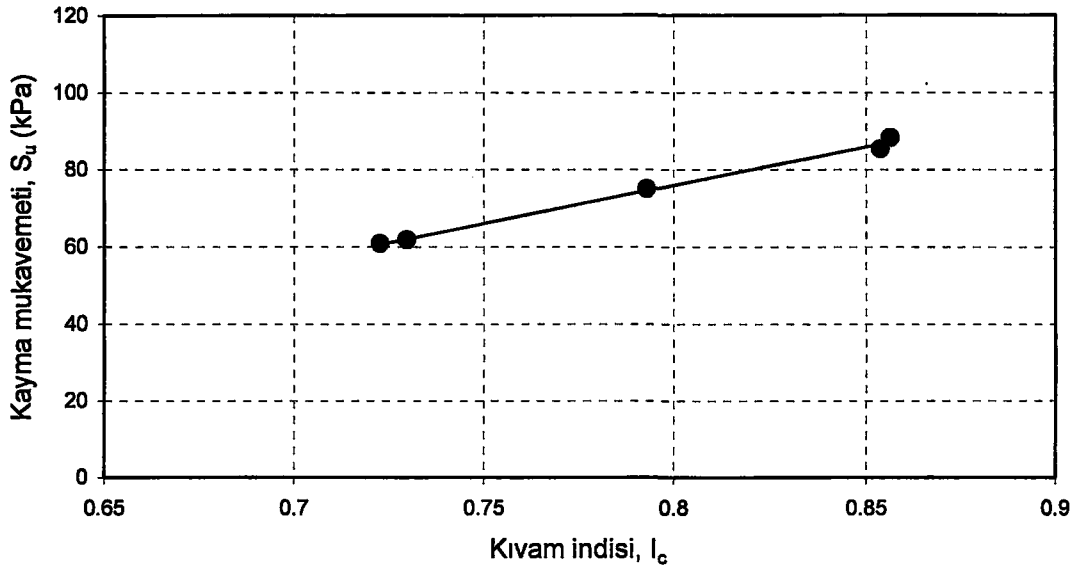
Gerilme boşalması sırasında su emmesine izin verilen numuneler yeniden konsolide edilirken ne kadar yavaş yüklenirse yüklensin daha önce K_0 konsolidasyonu neticesinde meydana gelen sıkışma miktarından daha fazla sıkışmışlardır. Yani numunelerin ikinci kez konsolide edildikten sonraki boyları, ilk konsolidasyondan sonraki boylarından biraz daha düşük olmuştur. Bu olay numunelerin daha fazla sıkışması demek olduğundan numunelerin mukavemetleri daha yüksek olarak ölçülmüştür. Benzer sonuçlar Lacasse (2001) tarafından da elde edilmiş, yazar yaptığı çalışmada da K_0 konsolidasyonu sonucunda numunelerde ekstra sıkışmalar meydana gelebildiğini belirtmiş, ancak bu sıkışmaların çok da önemli olmadığını ifade etmiştir.

Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetleri ile boşluk oranları arasında Şekil 4.48'de görülen ilişki vardır.



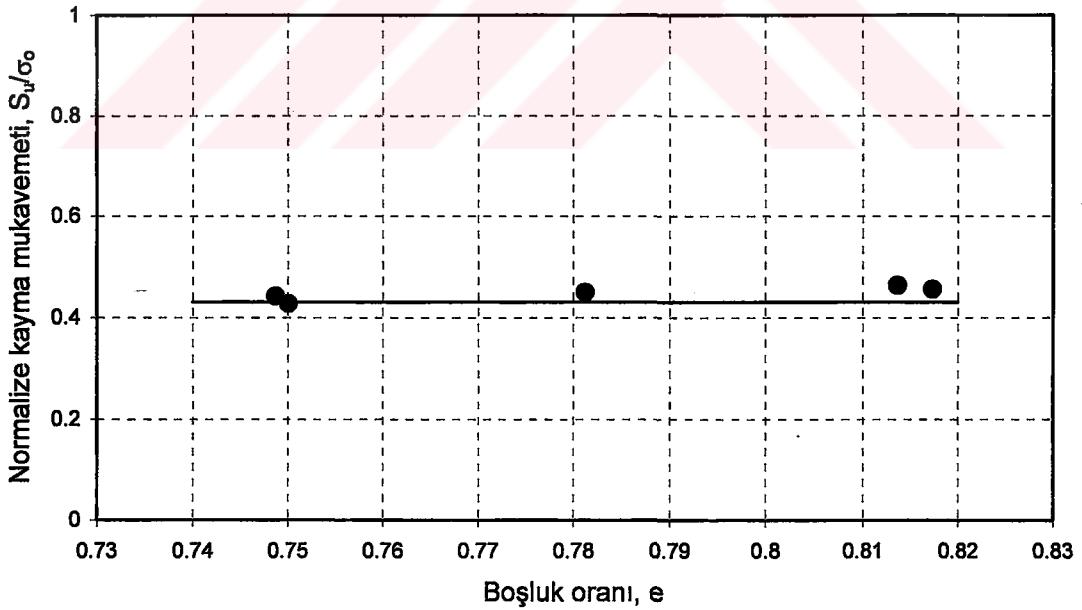
Şekil 4.48 Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetlerine kıvamın etkisini belirleyebilmek için Şekil 4.49'da görülen kayma mukavemeti kıvam indisi ilişkisi çizilmiştir.



Şekil 4.49 Laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti-kıvam indisi ilişkisi.

Kayma mukavemeti değerleri oktaedral gerilme değerlerine bölünmek sureti ile normalize edilmişlerdir. Normalize edilmiş kayma mukavemeti değerlerinin boşluk oranı ile ilişkisi Şekil 4.50’de görülmektedir

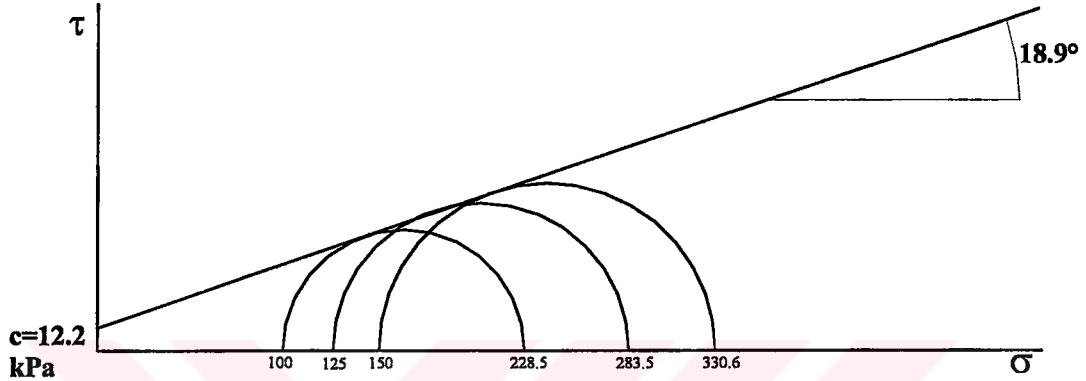


Şekil 4.50 Laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti-boşluk oranı ilişkisi.

Bu numunelerde de normalize kayma mukavemeti sabite yakın bir değerde elde edilmiştir. Bu numunelerin daha önce incelediğimiz birinci grup laboratuvar numunelerinden farkı, önceden yüklendikleri yüklerle yeniden yüklenmeleridir.

Hatırlanırsa gerilme boşalması yaşamış birinci grup numunelerde normalize kayma mukavemeti aşırı konsolidasyon oranı ile birlikte artan bir davranış göstermişti. Bu numunelerde ise aşırı konsolidasyon oranı her zaman $OCR=1$ dir. Bu sebeple gerilme geçmişinin etkisi görülmemektedir. Ancak dikkat edilirse daha önce sözü edilen sıkışma nedeniyle $S_v/\sigma_o=0.43$ civarındadır. Bu değer, normal konsolide numuneler için elde edilen değerden bir miktar yüksektir.

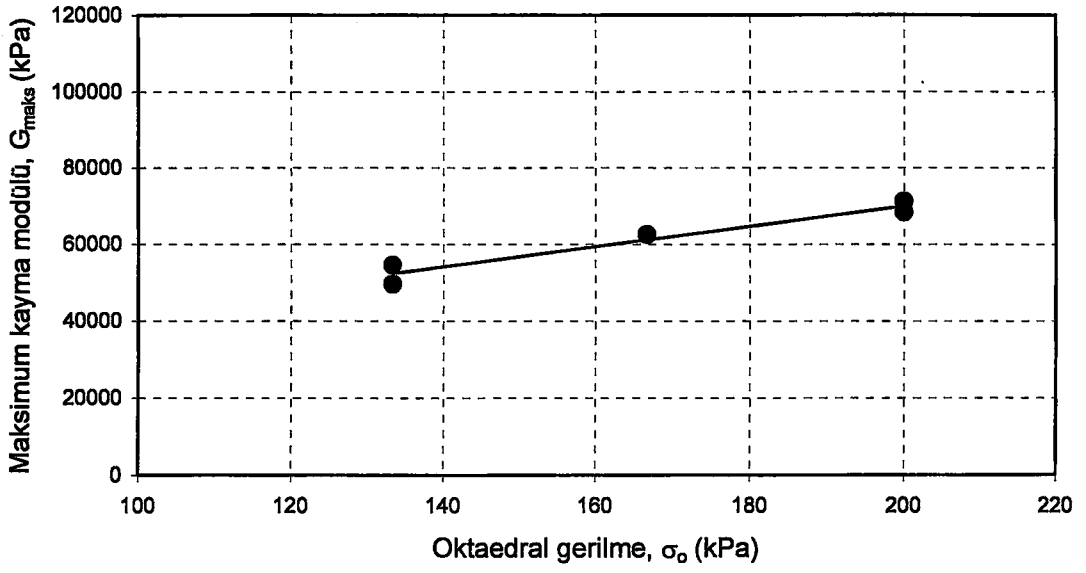
Şekil 4.51’da laboratuvar numuneleri için çizilen Mohr daireleri görülmektedir.



Şekil 4.51 Laboratuvar numunelerinin deney sonuçları kullanılarak çizilen Mohr diyagramları.

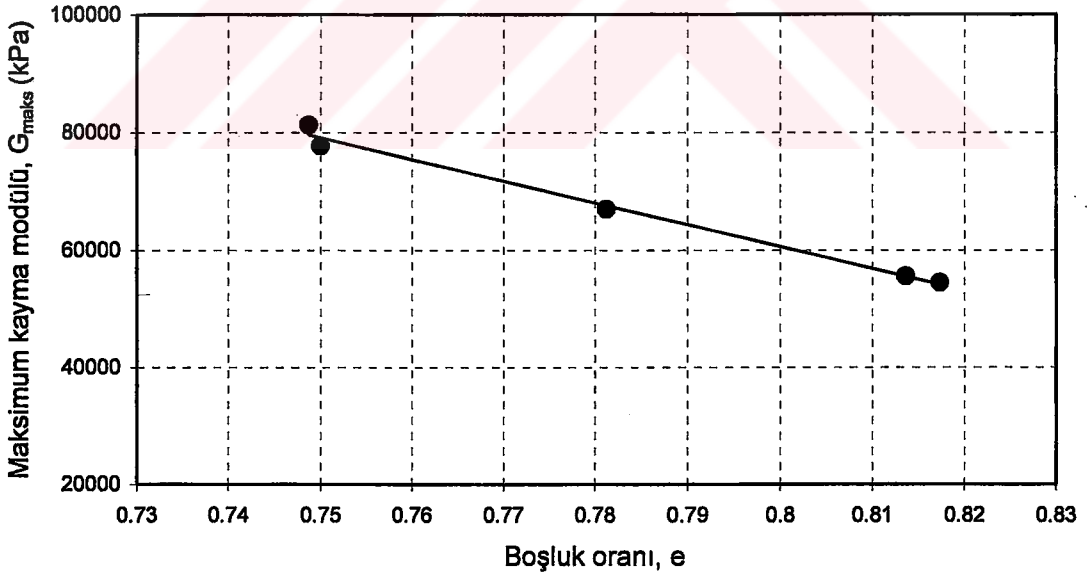
Laboratuvar numuneleri için çizilen Mohr daireleri incelendiğinde görülür ki bu numunelerin kayma mukavemeti parametreleri, gerilme boşalması yaşamamış numunelerden bile, daha yüksektir. Daha önce yapılan normal konsolide deneylerde 3-4 kPa civarında elde edilen ve sıfır olarak kabul edilen kohezyon (c) değeri bu deneylerde 12.2 kPa olarak elde edilmiştir. Arazi eşdeğeri numunelerde kayma mukavemeti açısı 18.4° olarak elde edilmişti. Laboratuvar numunelerinde ise daha önce bahsedilen sıkışma nedeniyle 0.5° daha yüksek olarak elde edilmiştir. Görülmektedir ki K_o şartlarına yeniden konsolide edilmiş numuneler arazi eşdeğeri numunelere oldukça yakın kayma parametrelerine sahiptirler. Bu noktadan hareketle laboratuvar da üç eksenli deney yapılacak numunelerin K_o şartlarında konsolide edilmesinin örselenmenin etkilerinden korunmanın en iyi yolu olarak görülmektedir.

Laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri ile oktaedral gerilmenin değişimi Şekil 4.52’da görülmektedir.



Şekil 4.52 Laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülü ile oktaedral gerilme ilişkisi.

Laboratuvar numunelerinin kayma modülü boşluk oranı ilişkisi Şekil 4.53'de görülmektedir.

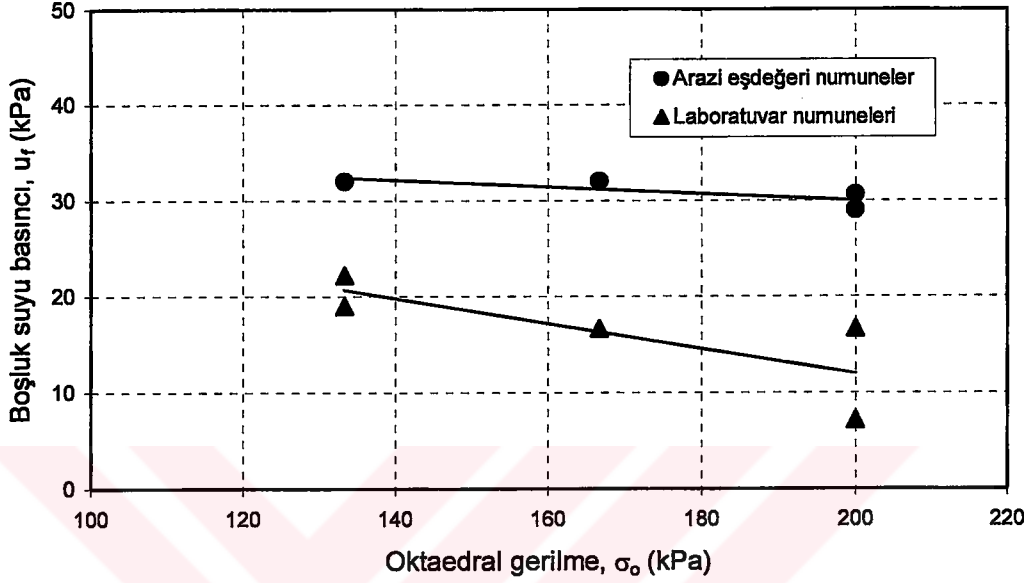


Şekil 4.53 Laboratuvar numunelerinin kayma modülü boşluk oranı ilişkisi.

4.4.3 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması

Üçüncü grup numunelerle yapılan deneylerde, gerilme boşalmasına maruz kalmış ve ardından tekrar arazi gerilmelerinde konsolide edilmiş, laboratuvar numunelerinin

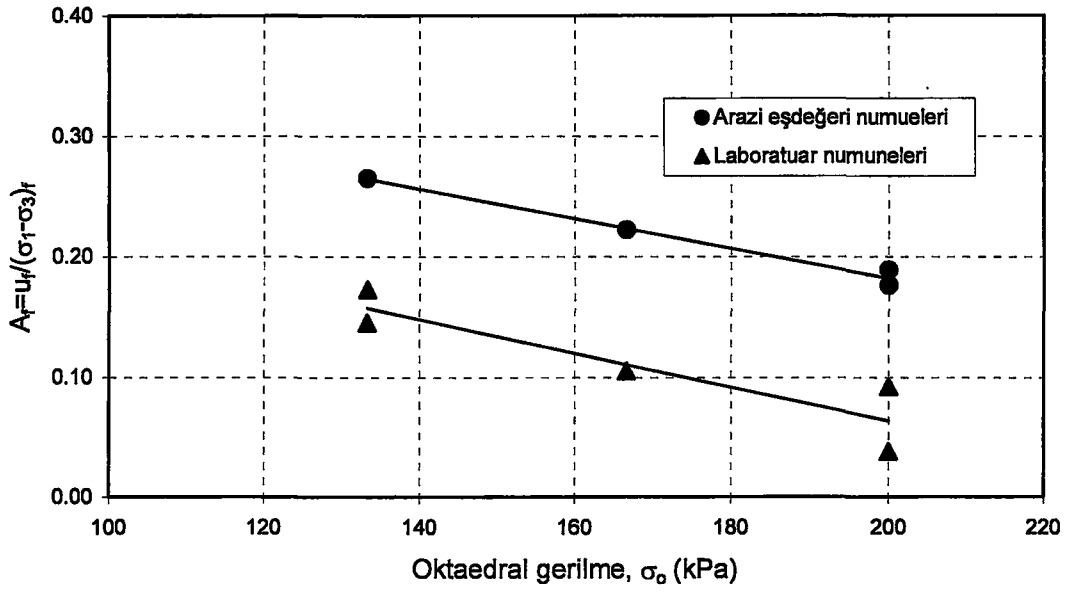
tekrar yükleme sırasında meydana gelen, ekstra sıkışmalar nedeniyle daha yüksek mukavemete sahip oldukları ve daha rijit oldukları gözlenmiştir. Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kırılma anındaki boşluk suyu basıncı davranışlarını karşılaştırmak için Şekil 4.54 çizilmiştir.



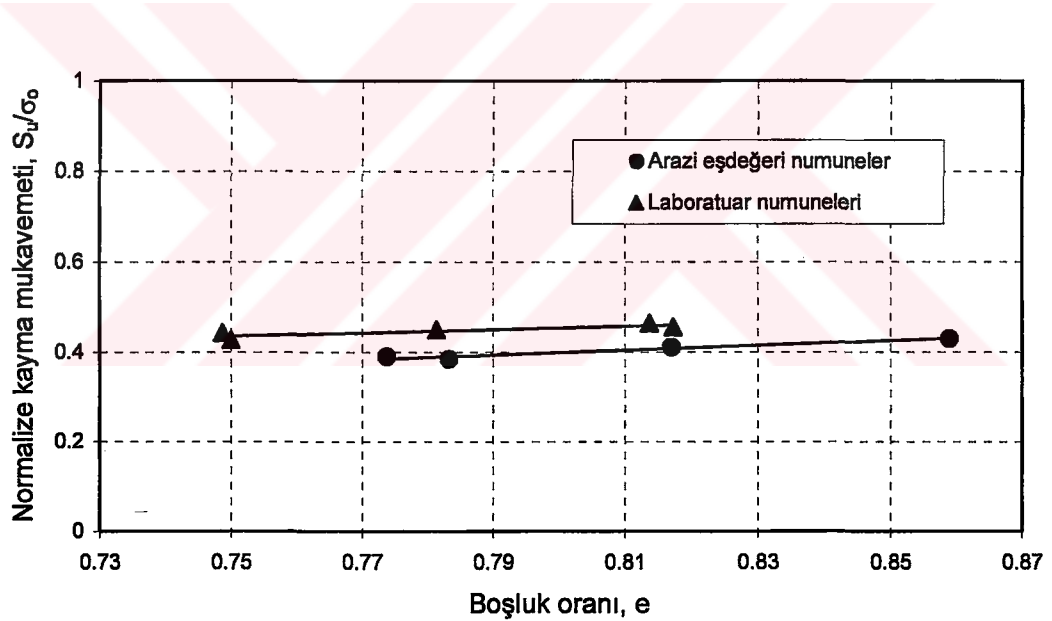
Şekil 4.54 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kırılma anındaki boşluk suyu basınçları.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin $A_f = u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ değerlerinin oktaedral gerilme ile değişimi Şekil 4.55’de görülmektedir. Bu grafikte daha önceki gördüğümüz davranışın tersine laboratuvar numunelerinin A_f değerleri daha düşük elde edilmiştir. bu durumun sebebi laboratuvar numunelerinin meydana gelen ekstra sıkışmalar nedeni ile daha yüksek mukavemete sahip olmalarıdır. Daha önceki deney gruplarında ise laboratuvar numunelerinin mukavemetleri her zaman daha düşük elde edilmişti.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerini karşılaştırmak için oktaedral gerilme ile normalize edilmiş kayma mukavemetinin boşluk oranı ile ilişkisi elde edilmiştir. Bu ilişki Şekil 4.56’da görülmektedir.



Şekil 4.55 Normalize boşluktan basıncının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi.

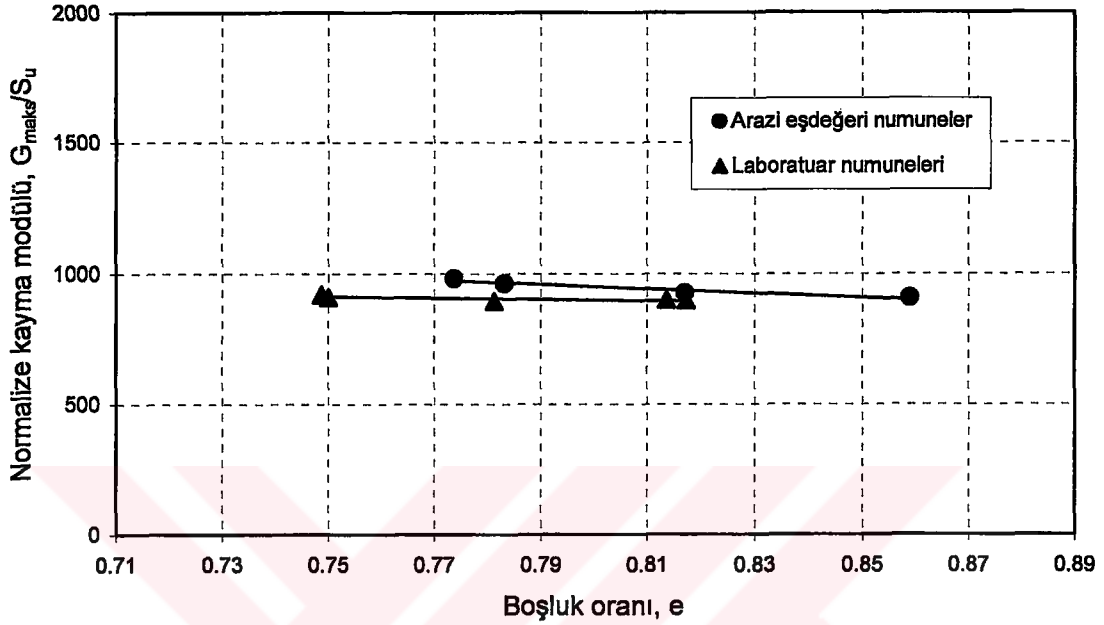


Şekil 4.56 Normalize kayma mukavemeti ile boşluk oranı ilişkisi.

Üçüncü grup numunelerin arazi ve laboratuvar davranışlarını karşılaştırırken maksimum kayma modülünün kayma mukavemetine bölünmesi ile elde edilen rijitlik indisinin boşluk oranı ile değişiminin incelenmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu ilişki Şekil 4.57'deki gibidir.

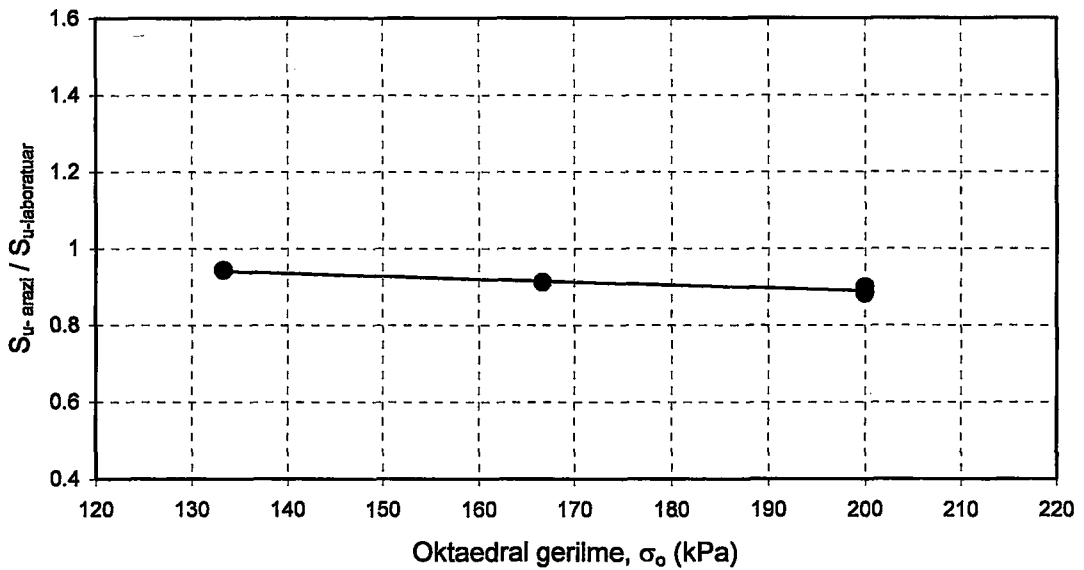
Aşağıdaki grafiklerden de görülebileceği gibi arazide K_o şartlarında konsolide olmuş numunelerin ve numune alımı işlemini modelleyebilmek için laboratuvarında gerilme boşalmasına maruz bırakılıp ardından, yeniden K_o şartlarında konsolide edilmiş numunelerin normalize kayma mukavemeti ve normalize kayma modülü değerleri

oldukça benzerdir. Her iki grafikte de, yaklaşık, sabit ilişkiler elde edilmiştir. Bu olayın nedeninin gerilme boşalması yaşamış olsa da laboratuvar numunelerinin gerilme geçmişinin arazi eşdeğeri numuneler ile aynı olması olarak tahmin edilmektedir.



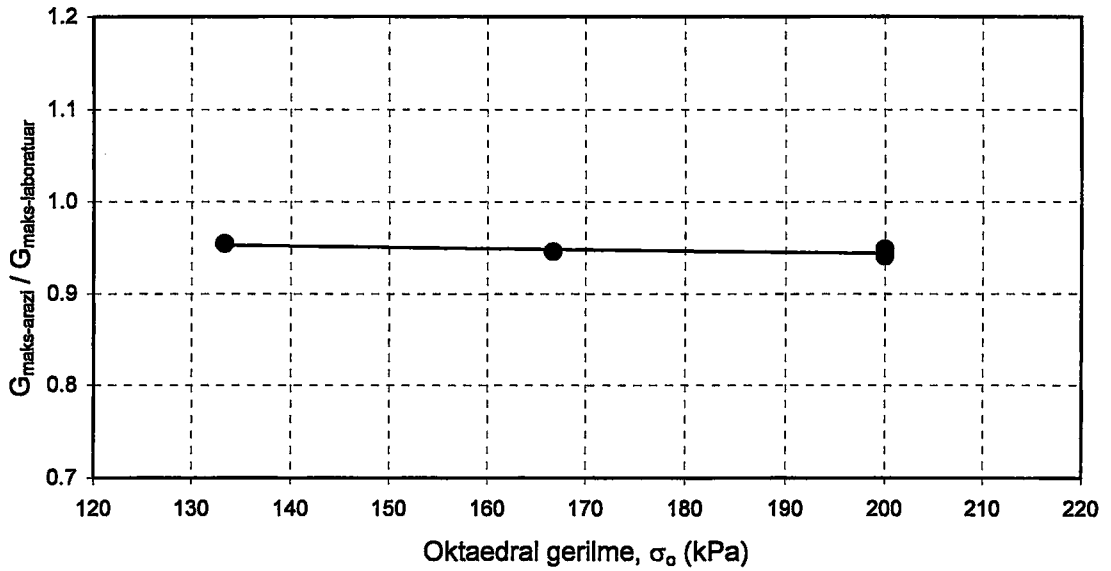
Şekil 4.57 Normalize kayma modülü-boşluk oranı ilişkisi.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetlerinin birbirine oranlarının oktaedral gerilme ile değişiminin incelenmesinin karşılaştırma açısından faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu ilişki Şekil 4.58’de görülmektedir.



Şekil 4.58 Kayma mukavemeti oranının oktaedral gerilme ile değişimi.

Aynı biçimde maksimum kayma modülleri oranının oktaedral gerilme ile ilişkisi Şekil 4.59'de görülmektedir.



Şekil 4.59 Arazi eşdeğeri ve laboratuvar deneylerinin maksimum kayma modülü oranı ile oktaedral gerilmenin değişimi.

Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi arazi şartlarında konsolide edilmiş laboratuvar numuneleri, arazi sonuçlarına en yakın neticeleri vermişlerdir. Ölenemeyen ekstra sıkışmalar yüzünden laboratuvar numuneleri biraz daha mukavemetli olarak elde edilse de aradaki farklar ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Örnek olarak kayma mukavemeti parametrelerini ele alacak olursak, K_o şartlarında konsolide edilmiş arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti açıları arasındaki fark 0.5° 'dir. Bu ise mühendislik bakış açısından pek önemli olmayan bir farktır.

4.5 Maksimum Kayma Modülü ve Etki Eden Faktörler

Dinamik gerilme şekil değiştirme özellikleri denildiğinde akla ilk gelen Maksimum kayma modülü, G_{maks} değeridir. Yapılan deneylerde boşluk oranı, çevre basıncı, aşırı konsolidasyon oranı etkileri incelenmiştir. Deneye tabi tutulan numunelerin boşluk oranları $e=0.75-1.01$, uygulanan düşey basınçlar $\sigma_v=100-450$ kPa, yatay basınçlar $\sigma_c=100-350$ kPa, aşırı konsolidasyon oranları $OCR=1.00-4.50$ arasında değişmektedir.

Kil zeminlerde, başlangıç kayma modülü ile ilgili Hardin ve Black (1968), Marcuson ve Wahls (1972), Kallioglou ve diğerleri (1999) ve daha pek çok

araştırmacı tarafından farklı deney sistemleri kullanılarak yapılan çalışmalarda, başlangıç kayma modülü, farklı plastisitelere sahip zeminler için, boşluk oranı ve çevre basıncının fonksiyonu olan ampirik bağıntılarla tanımlanmıştır.

Hardin ve Richart (1963) kayma dalgası hızının boşluk oranı ile lineer değişiminin sonucunu,

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (4.5)$$

şeklinde bir fonksiyon olarak tanımlamışlardır. Hardin ve Black (1968) benzer şekilde boşluk oranı fonksiyonunu,

$$F(e) = \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \quad (4.6)$$

şeklinde ve başlangıç kayma modülünü de genel bir denklemlerle,

$$G_{maks} = A F(e) \sigma_o^n OCR^m \quad (4.7)$$

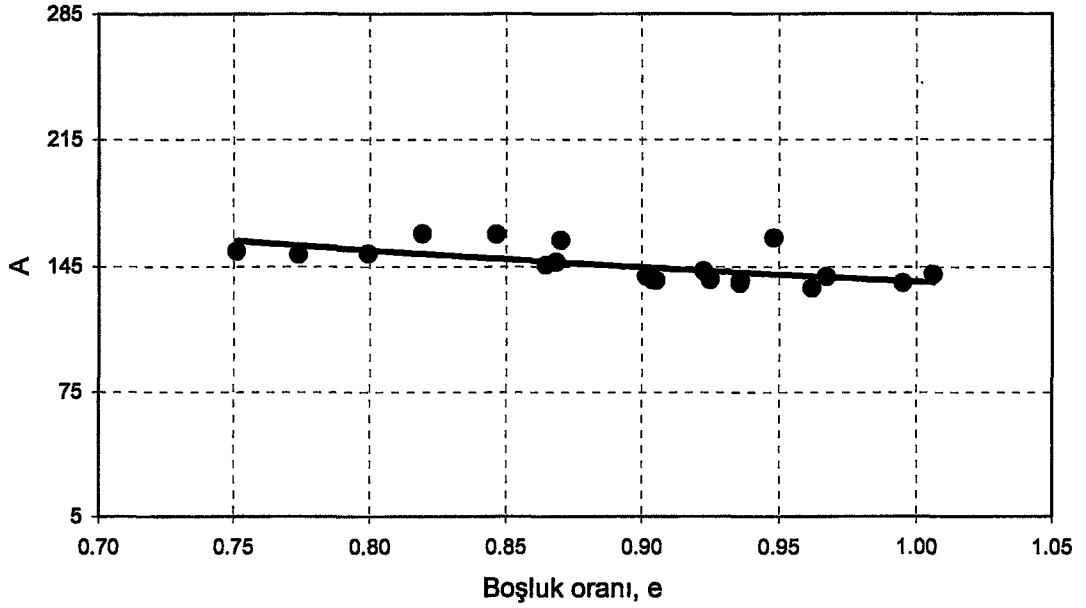
şeklinde ifade etmişlerdir. A zeminin rijitliğine bağlı bir sayı, $F(e)$ boşluk oranının bir fonksiyonu, σ_o (oktaedral gerilme), OCR aşırı konsolidasyon oranı, n ve m ise plastisiteye bağlı üssel sabitlerdir.

(4.7) bağıntısında, küçük birim kayma genliklerindeki dinamik kayma modülünün, zemin rijitliği (A katsayısı), çevre basıncı, gerilme geçmişi ve dolayısıyla n ve m katsayılarına bağlı olduğu görülmektedir. Yapılan deneylerden A katsayısının boşluk oranına göre değişimi Şekil 4.60'da verilmiştir.

Bu çalışmada, düşük plastisiteli Eskişehir kili için başlangıç kayma modülü, boşluk oranı, çevre basıncı ve aşırı konsolidasyon oranının bir fonksiyonu olarak

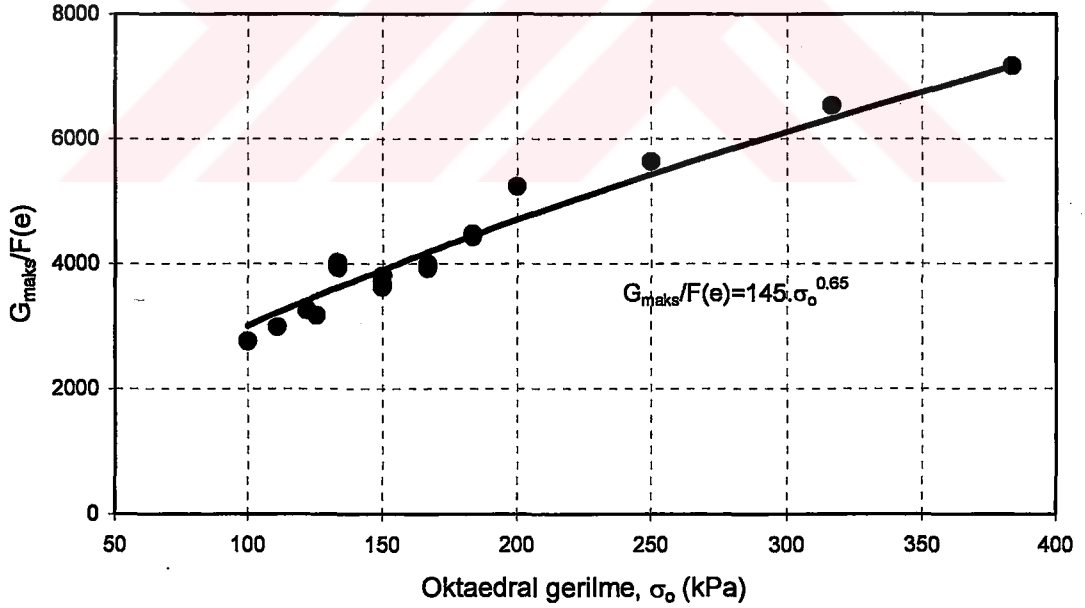
$$G_{maks} = 145 \frac{(6.0 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_o^{0.65} OCR^{0.17} \text{ (kPa)} \quad (4.8)$$

şeklinde bulunmuştur. Bu formül geliştirilirken birinci grup deney sonuçlarından ve maksimum kayma modülünün çevre basıncı ile değişimi incelenirken yapılan 12 deneyin sonuçlarından faydalanılmıştır.



Şekil 4.60 A rijitlik katsayısının boşluk oranı ile değişimi.

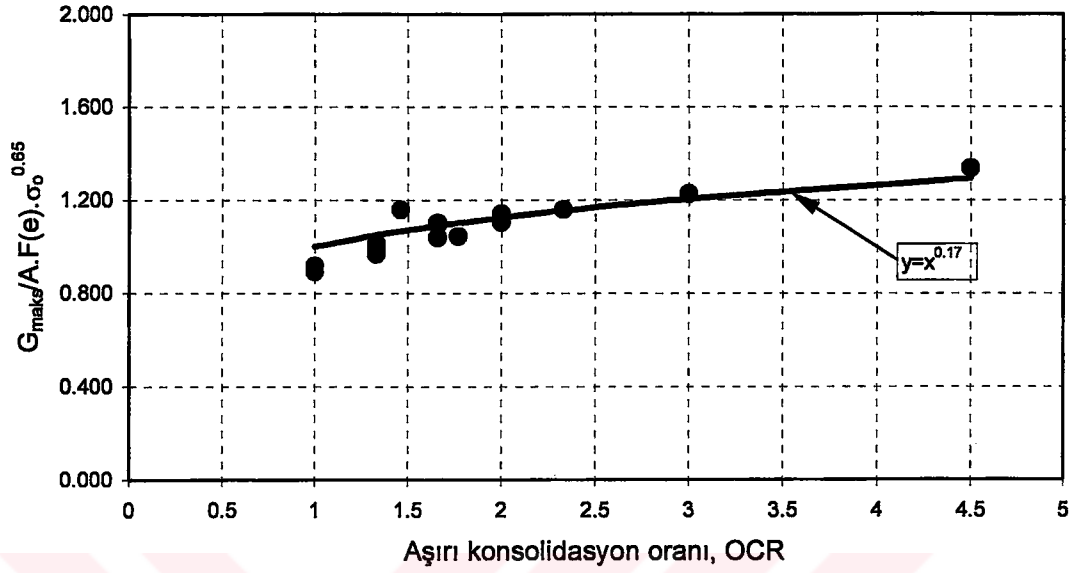
Şekil 4.61'de başlangıç kayma modülü, boşluk oranı fonksiyonu ile normalize edilmiş ve efektif çevre basıncına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.61 Normalize başlangıç kayma modülü efektif çevre basıncı ilişkisi.

Aşırı konsolide numunelerin kayma modüllerinin belirlenebilmesi için aşırı konsolidasyon oranının da formülde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla aşırı konsolide numunelerin kayma modülü, A katsayısına, $F(e)$ ifadesine ve $\sigma_o^{0.65}$ değerine bölünerek aşırı konsolidasyon oranının, kayma modülü üzerindeki etkileri

belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.62’de yukarıda bahsedilen ifadelerle normalize edilmiş kayma modülü ve aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi görülmektedir.



Şekil 4.62 Aşırı konsolide numuneler için normalize başlangıç kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi.

Şekil 4.63’de diğer bazı araştırmacılar tarafından önerilen bağıntıların, (4.8) bağıntısıyla karşılaştırması görülmektedir. Buna göre Hardin ve Black (1968), kaolin kili için geliştirdikleri

$$G_{maks} = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_o^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (4.9)$$

Bağıntısı katı kıvamlı kaolin numuneler için geçerlidir.

Kallioglou ve diğerleri (1999) Yunanistan’ın değişik bölgelerinden alınan orta ve yüksek plastisiteli kil numuneler üzerinde rezonans kolon deneyi yapmıştır Maksimum kayma modülü için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$G_{maks.} = 1421 e^{-1.504} \sigma_o^{0.623} \text{ (kPa)} \quad (4.10)$$

Marcuson ve diğerleri (1972) rezonans kolon aleti kullanarak yüksek plastisiteli killer üzerinde yaptıkları deneylerde.

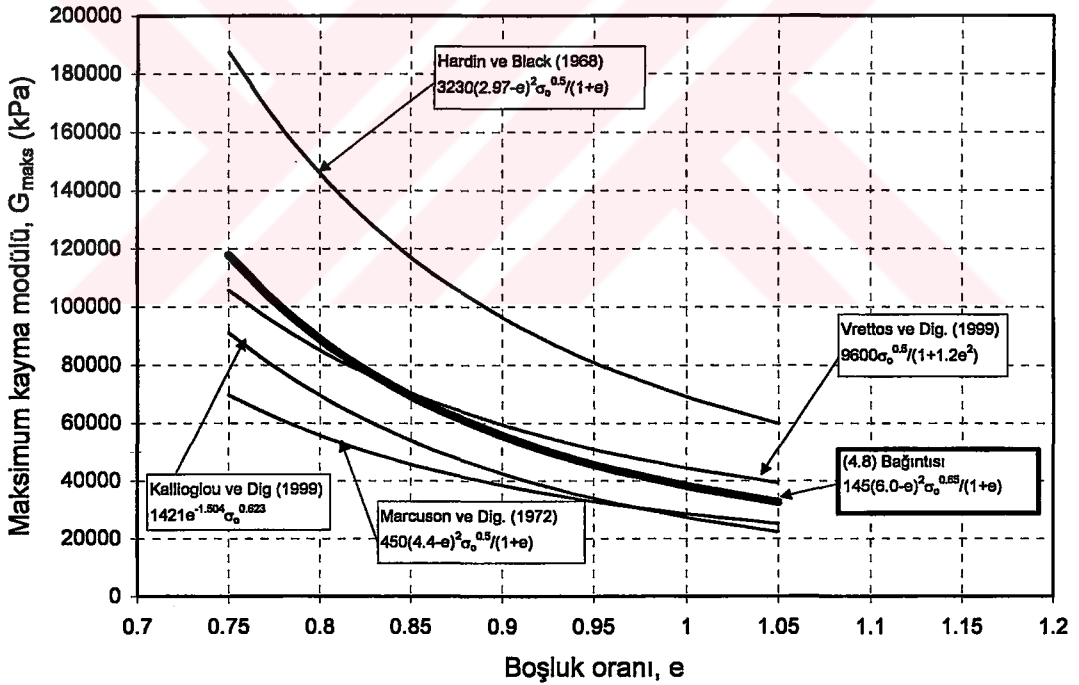
$$G_{maks} = 450 \frac{(4.4 - e)^2}{1 + e} \sigma_o^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (4.11)$$

bağıntısını elde etmişlerdir. Bu bağıntı Şekil 4.63’de de görülebileceği gibi yüksek plastisiteli killer için elde edildiğinden diğer bağıntılara göre oldukça düşük sonuçlar vermektedir.

Vrettos ve diğerleri (1999) düşük ve orta plastisiteli killerin maksimum kayma modülünü belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar (2.7) bağıntısında özetlemişlerdir.

$$G_{maks} = 9600 \frac{1}{1+1.2e^2} \sigma_o^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (4.12)$$

Bu bağıntıdan elde edilen sonuçlar deney bulgularına en yakın sonuçlardır. Yazarlar bu çalışmadaki gibi düşük ve orta plastisitedeki killerle çalışmışlardır. Yazarların kullandıkları sistem rezonans kolon sistemidir. Her iki deney sonucunda elde edilen maksimum kayma modülü değerlerinin birbirine bu kadar yakın olması, Serbest titreşim deney aletinin ve rezonans kolon deney aletinin, yaklaşık aynı hassaslıkta olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.63 (4.8) bağıntısının literatürdeki diğer bağıntılarla karşılaştırılması.

4.6 Sonuç

Üç grup halinde yapılan deneyler sonucunda, gerilme boşalmasının etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. İlk grup numunelerde önce çeşitli gerilme şartlarında konsolide edilmiş normal konsolide numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır.

konsolide edilmiş normal konsolide numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Ardından aynı numuneler tekrar üretilerek aşırı konsolide hale getirilmiştir. Aşırı konsolide numunelerde mukavemet kaybı ve kayma modülü düşüşü görülmüştür. Hatta geçmişte yüklendiği yüklerle yeniden yüklenen ($OCR=1$) numunelerde bile mukavemet kaybı ve kayma modülü düşüşü olmuştur. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça numunenin rijitliği ve mukavemeti artmaktadır. Birinci grup deneylerden elde edilen dalar yardımcı ile maksimum kayma modülünün belirlenmesi amacıyla bir bağlantı geliştirilmiştir.

İkinci grup numunelerde ise arazide kendiliğinden aşırı konsolide olmuş zeminlerden alınan numunelerin laboratuvar davranışları modellenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla K_0 şartlarında konsolide edilmiş numuneler üç eksenli hücre içerisinde (tüm gerilmeler kaldırılmadan) aşırı konsolide edilmiş ve kesilmiştir. Bu numuneler arazide doğal şartlarla aşırı konsolide olmuş numuneler olarak kabul edilmişlerdir. Aynı numuneler yeniden üretilmiş gene tüm gerilmeler kaldırılmadan aşırı konsolide edilmiş ve bu sefer tüm gerilmeler kaldırılarak ikinci kez gerilme boşalmasına maruz bırakılmış ve ardından kesilmiştir. Bu işlemin sonucunda, aynı gerilme geçmişine sahip numuneler olmalarına rağmen arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarının birbirinden oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Üzerinden tüm gerilmeler kaldırılan numuneler daha düşük mukavemete ve kayma modülüne sahiptirler. Bütün bu olayların sebebi olarak gerilme boşalmasının, numunenin örselenmesine sebep olduğu, içsel yapısını bozduğu ve numuneyi yumuşattığı belirlenmiştir.

Üçüncü grup numunelerde arazide K_0 gerilme şartlarında konsolide olmuş numunelerden alınan numunelerin laboratuvar davranışları modellenmek istenmiştir. Bu amaçla arazi şartlarında konsolide edilmiş numuneler üretilmiş ve kesilmiştir. daha sonra aynı numuneler yeniden üretilmiş ve üzerlerindeki bütün yükler kaldırılarak gerilme boşalması uygulanmıştır. Bu işlemde sonra numune yeniden arazi şartlarında (K_0) yüklenerek kesilmiştir. Bu işlemlerin sonucunda arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin birbirine oldukça yakın davranışlar gösterdikleri belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada ince daneli zeminlerde numune alımı sırasında meydana gelen örselenmenin etkileri incelenmiştir. Numune örselenmesi iki bileşenden oluşmaktadır. Numune örselenmesinin birinci bileşeni numune alıcı, taşınma, numune çıkartma gibi nedenlerle meydana gelen mekanik örselenmedir. İkinci bileşen ise gerilme boşalması nedeniyle meydana gelen örselenmedir. Mekanik örselenme yeterli dikkat ve titizlik gösterilirse kabul edilebilir düzeyde tutulabilmektedir. Buna karşın gerilme boşalması nedeniyle oluşan örselenmeyi engellemek mümkün değildir. Bu sebeple geoteknik mühendisliğinde, gerilme boşalmasının numune davranışlarında meydana getirdiği değişikliklerin anlaşılıp tahmin edilebilmesi çok önemli ve gereklidir.

Yapılan çalışmada, maksimum kayma modülü gerilme boşalmasının ve dolayısı ile örselenmenin ölçüsü olarak kullanılmıştır. Aynı şekilde gerilme boşalmasının kayma mukavemeti üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bu amaçla daha önce Zeevaert (1972), Özüdoğru (1981) ve Van Impe (1988) tarafında kullanılan burulmalı serbest titreşim aleti kullanılarak numuneye 10^{-4} birim kayma seviyelerinde kayma şekil değiştirmeleri uygulanmak sureti ile maksimum kayma modülleri belirlenmiş ve numuneler yine aynı sistemde drenajsız kesilerek kayma mukavemetleri belirlenmiştir.

Çalışmada Eskişehir yöresinden toz halinde getirilen kil kullanılmıştır. Bu kilin plastisite indisi %19, dane özgül ağırlığı 2.70, likit limiti %44 olarak elde edilmiştir. Rowe hücresinde 100 kPa basınç altında konsolide edilerek hazırlanan numuneler yaklaşık %40 tabii su muhtevasına sahiptir. Deneyler hazırlanan deney sisteminin uygun olması sayesinde izotropik ve anizotropik şartlarda yapılabilmektedir. Numunelerin suya doygunluğunu artırmak için 150-200 kPa arasında değişen ters basınç değerleri uygulanmıştır. Numune konsolidasyonunun sonunda, B değeri %96-100 aralığında değişmektedir.

Amaçları bakımından yapılan deneyler üç ana guruba ayrılmıştır. Birinci grup deneyler, araziden alınıp laboratuvarda izotropik şartlarda kesilen numuneleri modellemek amacı ile yapılmıştır. Arazi eşdeğeri numuneler olarak kabul edilen numuneler çeşitli $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranlarında konsolide edilip kesilmişler ve laboratuvar

numunesi olarak kabul edilen numuneler aynı şekilde anizotropik olarak konsolide edildikten sonra üzerlerindeki bütün yükler kaldırılmış ve daha düşük gerilme seviyelerinde yeniden izotropik olarak konsolide edilip kesilmiştir. Bütün numuneler kesilmeden önce serbest titreşim aleti ile numunelerin maksimum kayma modülleri belirlenmiştir.

Yapılan deneylerde anizotropik ve izotropik olarak konsolide edilmiş normal konsolide numunelerin, daha küçük eksenel birim deformasyon değerlerinde maksimum deviatorik gerilme değerlerine ulaştıkları belirlenmiştir. Aynı numuneler gerilme boşalması neticesi aşırı konsolide edildiklerinde ise maksimum deviatorik gerilmeye daha büyük eksenel birim deformasyon değerlerinde ulaşmışlardır. Bu şekilde elde edilen deney datalarını kullanarak normal konsolide numunelerin kayma mukavemeti boşluk oranı ilişkisi incelenmiş boşluk oranı arttıkça mukavemetin düştüğü görülmüştür. Kayma mukavemetinin, kıvam indisi arttıkça -başka bir deyişle numune katı kıvamlı hale geldikçe- arttığı gözlenmiştir. Oktaedral gerilme ile normalize edilmiş kayma mukavemetinin (S_u/σ_o) ise neredeyse sabit bir değerde ($S_u/\sigma_o=0.35$) olduğu belirlenmiştir. Yapılan konsolidasyonlu drenajsız deneylerin sonucunda çeşitli $K=\sigma_h/\sigma_v$ değerleri için farklı kayma mukavemeti açısı (ϕ) değerleri elde edilmiştir. K değerleri 0.5 ile 1 arasında değişmektedir ve elde edilen ϕ değerleri de K arttıkça azalmaktadır. En büyük (ϕ) değeri $K=0.5$ değeri için ($\phi=18.4^\circ$) elde edilmiştir. $K=1$ oranı için de $\phi=12.5^\circ$ olarak elde edilmiştir. Normal konsolide numunelerin A_f boşluk suyu parametreleri $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranı arttıkça azalmıştır.

Serbest titreşim deneyi ile belirlenen kayma modüllerinin oktaedral gerilme arttıkça arttığı, buna karşın kayma mukavemeti ile normalize edilmiş maksimum kayma modülünün yaklaşık sabit bir değer olduğu ($G_{maks}/S_u=950$) görülmüştür. Elde edilen bu sonuç literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılınca hesaplanan kayma modülü değerlerinin, umulduğu gibi, maksimum kayma modülü değerleri olduğuna karar verilmiştir.

Laboratuvar numunesi olarak adlandırılan aşırı konsolide numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarının analizi neticesinde, kayma mukavemetinin boşluk oranı ile ters orantılı olduğu, ve kıvam indisi arttıkça arttığı belirlenmiştir. Normal konsolide numunelerin aksine (S_u/σ_o) oranı sabit bir değer değildir ve aşırı konsolidasyon oranı arttıkça artmaktadır. Bu ilişki literatürle karşılaştırılmış ve sonuçların benzer olduğu görülmüştür.

Numunelerin serbest titreşim deneyi kullanılarak belirlenen maksimum kayma modülünün aşırı konsolidasyon oranı arttıkça arttığı belirlenmiştir. Maksimum

kayma modülü boşluk oranı ilişkisi incelenmiş ve G_{maks} ile boşluk oranının ters orantılı olduğu belirlenmiştir. Maksimum kayma modülü, kayma mukavemeti ile normalize edilmiştir. Elde edilen G_{maks}/S_u değerlerinin, artan aşırı konsolidasyon oranı ile azaldığı gözlenmiştir. Bu durum literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırılınca benzer ilişkinin daha önceki araştırmacılar tarafından da belirlendiği görülmüştür.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin davranışlarının karşılaştırılınca görülmüştür ki arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemetleri ile laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetleri arasında doğrusal bir ilişki vardır. Aynı zamanda aşırı konsolidasyon oranı, aşırı konsolide numunelerin davranışlarını büyük oranda etkilemektedir. O kadar ki sadece aşırı konsolidasyon oranının bilinmesi sayesinde, laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetlerinden, arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemetleri tahmin edilebilmektedir. Bu amaçla elde edilen (4.1) bağıntısı bir önceki bölümde görülmektedir.

Benzer şekilde arazi numunelerinin maksimum kayma modülleri ile laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri karşılaştırılınca, yine aynı şekilde sadece aşırı konsolidasyon oranına bağlı doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu ilişkide bir önceki bölümde (4.2) bağıntısı ile verilmiştir.

Deneyler sırasında numuneler gerilme boşalmasına maruz bırakılmıştır. Gerilme boşalması yaşayan numunelerde biraz yumuşama görülmektedir. Geçmişte maruz kaldığı yüklerle yeniden yüklenen ($OCR=1$) numunelerde bile bir miktar mukavemet kaybı ve maksimum kayma modülünde azalış görülmektedir. Bu olayın nedeninin gerilme boşalması sırasında numunenin su emmesi ile ilişkili olduğu düşünülmüştür.

Birinci grup deneylerin sonuçları kullanılarak maksimum kayma modülünün, (G_{maks}) oktaedral gerilme (σ_o), boşluk oranı (e) ve aşırı konsolidasyon oranına (OCR) bağlı amprik bir bağıntı yardımı ile belirlenebileceği düşünülmüştür. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ve bir önceki bölümde görülen (4.8) bağıntısının Eskişehir kili ve bu kil gibi düşük plastisiteli killerin maksimum kayma modüllerini tahmin etmek için kullanılabilir. (4.8), literatürde benzer kil zeminler için önerilen diğer amprik bağıntılarla karşılaştırıldığında, (4.8) bağıntısından elde edilen G_{maks} değerlerinin diğer bağıntılardan elde edilen G_{maks} değerleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

İkinci gurup deneylerde arazide doğal şartlarla aşırı konsolide olmuş zeminlerin arazi ve laboratuvar davranışları karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla arazi eşdeğeri numuneler K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra tüm gerilmeler kaldırılmadan daha düşük izotropik gerilme seviyelerine kadar gerilmeler boşaltılmış ve aşırı konsolide olmuş bu numuneler drenajsız şartlarda kesilmiştir. Laboratuvar numuneleri ise K_0 konsolidasyonun ardından daha düşük gerilme seviyelerinde izotropik olarak yüklendikten sonra bütün gerilmeler kaldırılmış 24 saat beklenildikten sonra aynı izotropik gerilmelerle yeniden yüklenerek kesilmiştir. Her zaman olduğu gibi kesilmeden önce serbest titreşim deneyi yapılarak, numunelerin maksimum kayma modülü belirlenmiştir

Arazi eşdeğeri numuneler üzerinde yapılan deneylerden, kayma mukavemetinin boşluk oranı ile ters, kıvam indisi ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Oktaedral gerilme ile normalize edilen kayma mukavemeti değerleri, aşırı konsolidasyon oranı arttıkça artmaktadır. Serbest titreşim aleti ile belirlenen maksimum kayma modülü değerleri de aşırı konsolidasyon oranı ile doğru orantılıdır. Kayma mukavemeti ile normalize edilmiş maksimum kayma modülü değerleri aşırı konsolidasyon oranı arttıkça azalmaktadır.

Laboratuvar numuneleri de benzer şekilde davranmakta, boşluk oranları arttıkça ve kıvamları azaldıkça kayma mukavemetleri azalmaktadır. Oktaedral gerilme ile normalize edilmiş kayma mukavemetleri, boşluk oranı arttıkça ve aşırı konsolidasyon oranı azaldıkça azalmaktadır. Yine aynı şekilde maksimum kayma modülleri de aşırı konsolidasyon oranı ile doğru orantılıdır. Daha önceki tüm aşırı konsolide numuneler gibi bu numunelerin kayma mukavemeti ile normalize edilmiş kayma modülleri artan aşırı konsolidasyon oranı ile azalmaktadır.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerini karşılaştırdığımızda, arazi eşdeğeri numuneler olarak kabul edilen ve ilk bakışta laboratuvar numuneleri ile aynı gerilme geçmişine sahip olan numunelerin daha mukavemetli ve rijit oldukları görülmüştür. Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemetinin, laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetinden yaklaşık olarak %20 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu ilişki (4.3) denkleminde de görülmektedir.

Arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma modülleri ile laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri karşılaştırıldığında ise arazi eşdeğeri numunelerin maksimum kayma modülleri, laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modüllerine göre, (4.4) eşitliğinde de görüldüğü gibi, %20 daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Laboratuvar numuneleri iki defa gerilme boşalması yaşadıkları için daha fazla örselenmiş ve iç yapıları bozulmuştur.

Üçüncü grup numuneler arazide K_0 şartlarında konsolide olduktan sonra laboratuvar da konsolide edilirken yine K_0 şartlarında konsolide edilerek kesilen numuneleri modellemek için yapılmıştır. $K_0=0.5$ olarak alınmıştır (Massarsch, 1979). Arazi eşdeğeri numuneler olarak kabul edilen numuneler üç eksenli hücre içerisinde K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra kesilmiştir. Laboratuvar numuneleri ise yine K_0 şartlarında konsolide edilmiş ve üzerindeki bütün gerilmeler kaldırılmış ve 24 saat beklenildikten sonra yeniden K_0 şartlarında konsolide edildikten sonra kesilmiştir.

Arazi eşdeğeri numunelerin kayma mukavemetleri boşluk oranı ile azalmakta kıvım indisi ile artmaktadır. Oktaedral gerilme ile normalize edilmiş kayma mukavemeti ise daha önce incelediğimiz normal konsolide killeri gibi yaklaşık sabit bir değerdir. ($S_u/\sigma_0=0.40$) Daha önce incelenen normal konsolide numunelerde bu oran yaklaşık olarak 0.35 civarındaydı, ortaya çıkan bu fark K_0 konsolidasyonu ile numunelerin daha mukavemetli olmaları ile açıklanabilir. Bir önceki bölümde normal konsolide numunelerin oktaedral gerilme ile normalize edilmiş kayma mukavemeti değerlerinin $K=\sigma_h/\sigma_v$ oranı ile değişimi incelenmiş ve en büyük normalize kayma mukavemeti değerlerine $K=0.5$ değerinde ulaşıldığı belirlenmişti. Normal konsolide numuneler için Mohr diyagramları çizilmiş ve kayma mukavemeti açısı $\phi=18.4^\circ$ olarak bulunmuştur. Bu (ϕ) değeri daha önce normal konsolide numuneler için elde edilen (ϕ) değerinden yüksektir. Örneğin $K=1$ için $\phi=12.4^\circ$, $K=0.75$ için $\phi=11.4^\circ$, $K=0.60$ için $\phi=14.5^\circ$ olarak elde edilmiştir. Genel olarak K arttıkça ϕ azalmıştır. $K_0=0.5$ değerinde en yüksek kayma mukavemeti parametrelerine ulaşılması K_0 konsolidasyonu neticesi numunelerin daha mukavemetli olması ile açıklanmıştır. Arazi eşdeğeri numunelerin serbest titreşim aleti kullanılarak belirlenen kayma

modüllerinin artan boşluk oranı ile azaldıkları, artan oktaedral gerilme ile arttıkları belirlenmiştir.

Gerilme boşalmasına uğrayıp tekrar K_0 şartlarında konsolide edilen laboratuvar numunelerinin de kayma mukavemetleri boşluk oranı ile artıp kıvam indisi ile azalmaktadır. Ancak kayma mukavemetleri arazi eşdeğeri numunelere göre çok az yüksek olarak elde edilmiştir. Bu olayın nedeninin yeniden K_0 konsolidasyonu sırasında meydana gelen ekstra sıkışmalar olduğu geçen bölümde anlatılmıştı. Oktaedral gerilme ile normalize edilen kayma mukavemeti değerleri bu sıkışmalar nedeni ile bir miktar artmıştır. Normalize kayma mukavemeti değerleri ($S_u/\sigma_0=0.43$) olarak elde edilmiştir. Daha önce incelenen gerilme boşalması yaşamış numunelerin tersine üçüncü grup laboratuvar numunelerinin normalize kayma mukavemeti değerleri sabit bir değerdedir. Normalize kayma mukavemeti değerlerinin bu numunelerde sabit olmasının nedeni numunelerin aşırı konsolidasyon oranlarının OCR=1 olmasıdır. Yani numuneler gerilme boşalması yaşamış olsalar bile yeniden aynı yüklerle yüklendikleri için gerilme geçmişinin numune davranışı üzerinde bir etkisi görülmemektedir.

Laboratuvar numunelerinin Mohr diyagramları çizildiğinde bu numunelerin kayma mukavemeti açıları ($\phi=18.9^\circ$) olarak elde edilmiştir. Bu (ϕ) değeri arazi eşdeğeri numunelerin (ϕ) değerinden biraz yüksektir. Laboratuvar numunelerinin mukavemetlerinin daha yüksek bulunduğu hatırlanırsa (ϕ)’deki bu farkın normal olduğu anlaşılabılır.

Laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modülleri belirlendiğinde görülmüştür ki G_{maks} değerleri, artan oktaedral gerilme değeri ile artmakta ve artan boşluk oranı ile azalmaktadır.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemeti ile normalize edilmiş maksimum kayma modülü değerleri sabit ve neredeyse birbirine eşittir. Bunun nedeni ise laboratuvar numunelerinde, sıkışma neticesinde kayma mukavemetinde de kayma modülünde de bir miktar artış olmasıdır.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin kayma mukavemetlerini birbirine oranı ile oktaedral gerilmenin değişimi incelenmiş ve bu oranın oktaedral gerilmeden

bağımsız bir şekilde 1'e yakın bir değer olduğu yani kayma mukavemetlerinin, her gerilme seviyesinde, birbirine neredeyse eşit olduğu görülmüştür.

Arazi eşdeğeri ve laboratuvar numunelerinin maksimum kayma modüllerinin birbirine oranı da her oktaedral gerilme seviyesi için sabit ve yaklaşık olarak 1 civarında elde edilmiştir. Yani K_0 şartlarında yeniden konsolide edilmiş ve normal konsolide numunelerin maksimum kayma modülleri yaklaşık olarak birbirine eşit bulunmuştur.

Tüm deneyler göstermiştir ki arazide K_0 şartlarında konsolide olmuş zeminlerden numune alıcı ile alınmış numunelerle laboratuvarda üç eksenli deney yapılırken, laboratuvar numunesinin araziye temsil edebilmesi için numune mutlaka yeniden arazi şartlarında konsolide edilmelidir. K_0 konsolidasyonu uzun, zahmetli ve her deney düzeneğinde uygulanamaz olmasına karşın deney sonuçlarının anlamlı olması için mutlaka gereklidir. K_0 konsolidasyonunun en fazla eleştirilen yanı, Lacasse (2001) tarafından da belirttiği gibi meydana gelebilecek ekstra sıkışmalardır. Bu çalışmanın sonuçları göstermiştir ki meydana gelen ekstra sıkışmalar numunenin davranışlarını fazlaca etkilememekte ve bu farklar ihmal edilebilir düzeyde olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alpan, I.**, 1967. The empirical evaluation of the coefficients K_0 and K_{or} , *Soils and Foundations*, **7**, 355-358.
- Ansal, A.M.**, 1981. Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İTÜ İnşaat Fak. İstanbul.
- Ansal, A.M., Yıldırım H.**, 1985. Killerin tekrarlı yükler altında kayma mukavemeti, *II. Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 24-27 Eylül, 329-341.
- Ansal, A.M., Erken, A.**, 1986. Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışları, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, **48**, 5-81.
- Anderson, D.G. and Richart, F.E.**, 1976. Effects of straining in shear modulus of clay, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, *ASCE*, **102**, 975-987.
- Anderson, D.G. and Woods, R.D.**, 1976. Time-dependent increase in shear modulus of clay, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, *ASCE*, **102**, 525-537.
- Athanasopoulos, G.A. and Richart, F.E.**, 1983. Effect of stress release on shear modulus of clays, *Journal of The Geotechnical Engineering*, *ASCE*, **109**, 1233-1245.
- Atom, M.F., Zreig, M.M.A. and Obaidat, M.T.**, 2001. Changes in clay swelling and shear strength properties with different sample preparation techniques, *Geotechnical Testing Journal*, *GTJODJ*, **24**, 157-163.
- Baligh, M.M., Azzouz, A.S. and Chin, C.T.**, 1987. Disturbances due to 'ideal' tube sampling, *Journal of the Geotechnical Engineering*, *ASCE*, **113**, 739-757.
- Baykal, G., Alpath, M., İnce, S. ve Mehmetoğlu, D.**, 1992. Geoteknik veri analizinde veri-tabanı uygulaması, *Zemin Mekaniği ve Temel Müh. IV. Ulusal Kongresi*, İTÜ, İstanbul, 21-23 Ekim, 152-157.
- Bishop, A.W. and Henkel, D.J.**, 1957. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Edward Arnold, London.
- Bowles, J.E.**, 1984. Physical and Geotechnical Properties of Soils, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Bowles, J.E.**, 1997. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Inc., Singapore.

- Bray, J.D., Riemer, M.E., Gookin, W.B., 1999.** On the dynamic characterization of soils, *Proceedings of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, June 21-25, 847-856.
- Broms, B.B. and Rantam, M.V., 1963.** Shear strength of an anisotropically consolidated clay *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **89**, 1-26.
- Brooker, E.W. and Ireland, H.O., 1965.** Earth pressures at rest related to stress history, *Canadian Geotechnical Journal*, **2**, 1-15.
- Broms, B.B., 1980.** Soil Sampling in Europa: State-of-the-art, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **106**, 65-98.
- Burland, J.B., 1990.** On the compressibility and shear strength of natural clays, *Geotechnique*, **40**, 329-378.
- Chan, C.K., 1975.** Low-friction seal system, *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **101**, 991-995.
- Craig, R.F., 1992.** Soil Mechanics, Chapman and Hall Inc., London.
- Das, B.M., 1993.** Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publ. Comp., Boston.
- Davis, E.H. and Poulos, H.G., 1967.** Laboratory investigations of the effects of sampling, *Civil Engineering Transactions, Institute of Engineering*, Australia, **9**, 86-94.
- Day, R.W., 1990.** Sample disturbance of collapsible soil, *Journal of The Geotechnical Engineering, ASCE*, **116**, 158-161.
- Drnevich, V.P., 1979.** Evaluation of sample disturbance on soils using the "reference strain" concept, *US Army Corps of Engineers Technical Report, DACW39-78-C-0046*, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Drnevich, V.P. and Massarsch, K.R., 1979.** Sample disturbance and stress-strain behavior, *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **105**, 1001-1016.
- Drnevich, V.P., 1981.** Normalized stress-strain for undrained shear tests, *American Society for Testing Materials*, **740**, 387-409.
- Germaine, J.T. and Ladd, C.C., 1988.** Triaxial testing of saturated cohesive soils, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM*, **977**, 421,459.
- Graham, J. and Lau, S.L.-K., 1988.** Influence of stress-release disturbance, storage and consolidation procedures on the shear behavior of reconstituted underwater clay, *Geotechnique*, **38**, 279-300.

- Graham, J., Kwok, C.K. and Ambrosie, R.W., 1987.** Stress release, undrained storage and reconsolidation in simulated underwater clay, *Canadian Geotechnical Journal*, **24**, 279-288.
- Güler, E.F., 1981.** Kohezyonlu zeminlerin dinamik davranışına boşluk suyu basıncının etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Hardin, B.O. and Black, W.L., 1968.** Vibration modulus of normally consolidated clay, *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **94**, 353-369.
- Hardin, B.O. and Drnevich, V.P., 1972.** Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves, *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **98**, 667-692.
- Hardin, B.O. and Richart, F.E., 1963.** Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, **89**, 33-65.
- Harr, M.E., 1966.** Foundations of Theoretical Soil Mechanics, McGraw-Hill Inc., Tokyo.
- Hatipoğlu, B., Sağlamer, A., İncecik, M. ve Özkan, M.T., 1996.** Bilgi tabanlı sistemlerin geoteknik mühendisliğindeki uygulamaları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği VI. Ulusal Kongresi*, DEÜ, İzmir, 24-25 Ekim, 553-562.
- Head, K.H., 1997.** Manual of Soil Laboratory Testing, John Wiley & Sons, Chichester.
- Hight, D.W. and Georgiannou, V.N., 1995.** Effects of sampling on the undrained behavior of clayey sands, *Geotechnique*, **45**, 237-247.
- Hoeg, K., Dyvik, R. and Sandbakken, G., 2000.** Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **126**, 606-617.
- Holtz, R.D., Jamiolkowski, M.B. and Lancellotta, R., 1986.** Lessons from oedometer tests on high quality samples, *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **112**, 768-792.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981.** An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Houlsby, G.T. and Wroth C.P., 1991.** The variation of shear modulus of a clay with pressure and over consolidation ratio, *Soils and Foundations*, **31**, 138-143.
- Humpries, W.K. and Wahls, E.W., 1968.** Stress history effects on dynamic modulus of clay, *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **94**, 371-389.

- Hvorslev, M.J.**, 1949. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes, ASCE Report for the Committee on Sampling and Testing, New York, USA.
- Ishihara, K.**, 1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Clarendon Press, Oxford.
- JGS T 542-1995**, 1995. Method for cyclic triaxial test to determine deformation properties of geomaterials, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan.
- JGS T 542-1995**, 1990. Practice for preparing triaxial test specimens, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan.
- Kallioglou, P., Tika, T. and Pitilakis, K.**, 1999. Dynamic characteristics of natural cohesive soils, *Proceedings 2nd International Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisboa, Portugal, June 21-25, 113-117.
- Kılıç, H.**, 1995. Normal konsolide killerde gerilme boşalmasının geoteknik parametrelere etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kirkpatrick, W.M. and Rennie, I.A.**, 1975. Stress relief effects in deep sampling operations, *Under Water Construction Conference*, University College, Cardiff, England, September 16-17, 166-178.
- Kirkpatrick, W.M. and Khan, A.J.**, 1984. The reaction of clays to sampling stress relief, *Geotechnique*, **34**, 29-42.
- Kirkpatrick, W.M., Khan, A.J. and Mirza, A.A.**, 1986. The effects of stress relief on some overconsolidated clays, *Geotechnique*, **36**, 511-525.
- Koutsoftas, C.D. and Fischer, J.A.**, 1980. Dynamic properties of two marine clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **106**, 645-657.
- Kramer, S.L.**, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall Press, New Jersey.
- Kumbasar, V. ve Kip, F.**, 1992. Zemin Mekanik Problemleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Lacasse, S.**, 2001. Parameters for design in clays, *International Jubilee Papers in Honour of Prof. Dr. Ergün TOĞROL*, 54-75, Eds. Gök, S. & Kurtuluş, A., İ.T.Ü. Press, İstanbul.
- Ladd, C.C. and Edgers, L.** 1972. Consolidated undrained direct simple shear tests on saturated clays, *M.I.T. Research Report*, **R72-82**, Massachusetts, MA.
- Ladd, C.C. and Foott, R.**, 1974. New design procedure for stability of soft clays, *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **100**, 763-786.

- Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S., 1997.** Sample disturbance effect in soft low plastic Norwegian clay, *Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, pp.81-102, Eds. Almeida, E., Balkema, Rotterdam.
- Marcuson, W.F. and Wahls, H.E., 1972.** Time effects of on dynamic shear modulus of clays, *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **98**, 1359-1373.
- Massarsch, K.R., 1979.** Lateral earth pressure in normally consolidated clay, *Proceedings of the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bridgton, England, September 11-15, 245-250.
- Matsuo, M. and Shogaki, T., 1988.** Effects of plasticity and sample disturbance on statistical properties of undrained shear strength, *Soils and Foundations*, **28**, 14-24.
- Nakase, A., Kusukabe, O. and Nomura, H., 1985.** A method for correcting undrained shear strength for sample disturbance, *Soils and Foundations*, **25**, 52-64.
- Noorany, I. and Seed, H.B., 1965.** In situ strength characteristics of soft clays, *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **91**, 49-80.
- Odeh, M.A., 1980.** The shearing behavior of kaolin and illite , *MSc Thesis*, University of Strathclyde, Glasgow, England.
- Okamura, T., 1971.** The variation of mechanical properties of clay samples depending on its degree of disturbance, *Proc. Special Session on Quality in Soil Sampling, IV.Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Singapore, August 26-30, 212-215.
- Onitsuka, K. and Hong, Z., 1995.** A new method of correcting unconfined compressive strength of natural clays for sample disturbance, *Soils and Foundations*, **35**, 95-105.
- Önalp, A., 1997.** Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği, Sakarya Üniversitesi Yayinevi, Sakarya.
- Özay, R., Okur, V., Erken, A., 2000.** Örselenmemiş killi zeminlerde kıvamın dinamik kayma modülü ve sönmeye etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği IIX. Ulusal Kongresi*, İ.T.Ü., İstanbul, 26-27 Ekim, 437-444.
- Özaydın, K., 1982.** Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Özaydın, K., 1989.** Zemin Mekaniği, Meya Matb. Yay., İstanbul.

- Özudoğru, K.G.**, 1979a. Depremlerle ilgili zemin parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan laboratuvar deneyleri, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, **25**, 57-69.
- Özudoğru, K.G.**, 1979b. Önceden yüklenmiş killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İTÜ İnşaat Fak., İstanbul.
- Özudoğru, K.G.**, 1981. Laboratory shear modulus and damping from torsional vibration soil tests, *Norwegian Geotechnical Institute Internal Report*, **51513-1**, Oslo, Norway.
- 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**, 1169-1173.
- Rampello, S. and Castillo, L.**, 1998. A study on the subsoil of the Tower of Pisa based on results from standart and high-quality samples, *Canadian Geotechnical Journal*, **35**, 1074-1092.
- Ricceri, G., Favaretti, M., Mazzucato, A., Simonini, P. and Soranzo, M.**, 1985. Effects of sampling on artificially reconstructed cohesive soils, *Proc. of The XI. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, USA, 12-16 August, 1035-1040.
- Shogaki, T. and Kaneko, M.**, 1994. Effects of sample disturbance on strength and consolidation parameters of soft clay, *Soils and Foundations*, **34**, 1-10.
- Siddique, A., Farooq, S.M. and Clayton, C.R.I.**, 2000. Disturbances due to tube sampling in coastal soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **126**, 568-575.
- Skempton, A.W. and Sowa, V.A.**, 1963. The behaviour of saturated clays during sampling and testing, *Geotechnique*, **13**, 269-290.
- Tanaka, H., Shiwakoti, D.R. and Tanaka, M.**, 2003. Applicability of SHANSEP method to six different natural clays, using triaxial and direct shear tests, *Soils and Foundations*, **43**, 43-55.
- Toğrol, E., Özudođru, K.G. ve Güler, E.**, 1977. Tekrarlı yüklerin zemin mukavemetine etkisi, *İ.T.Ü. İnşaat Fakóltesi Teknik Rapor*, **29** İstanbul, Türkiye.
- TS-1901**, 1987. İnşaat Mühendisliğinde sondaj yolları ile örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Van Impe, W.F. and Van den Broeck, M.**, 1988. Free torsion pendulum testing, *2nd Young Geotechnical Engineer's Conference*, Oxford, England, August 23-26, 131-137.
- Viggiani, G. and Atkinson, J.H.**, 1995. Stiffness of fine-grained soil at very small strains, *Geotechnique*, **45**, 249-265.

- Vrettos, C., Savidis, S., 1999.** Shear modulus and damping for Mediterranean Sea clays of medium plasticity, *Proceedings of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, June 21-25, 71-76.
- Vucetic, M. and Dobry, R., 1991.** Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of The Geotechnical Engineering, ASCE*, **117**, 89-107.
- Weiler, W.A., 1988.** Small -strain modulus of clay, *Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics Recent Advances in Ground - Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication, **20**, 331-345, Eds. Lawrence Von Thun J., ASCE, Park City, Utah.
- Yıldırım, H. ve Ansal, A., 1987.** Tekrarlı gerilme genlik ve frekanslarının killerin davranışlarına etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği İkinci Ulusal Kongresi*, BÜ, İstanbul, 11-13 Mayıs, 255-271.
- Zeevaert, L., 1967.** Free vibration torsion tests to determine the shear modulus of elasticity of soils. *Proceedings of The 3th Panamerican Conference on Soil Mech. and Foun. Engineering*, Caracas, Venezuela, September 14-18, 125-138.
- Zeevaert, L., 1972.** Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions. Van Nostrand, New York.

EKLER

EK A. KALİBRASYONLAR

EK B. KULLANILAN YARDIMCI PROGRAMLAR

EK C. DENEY GRAFİKLERİ

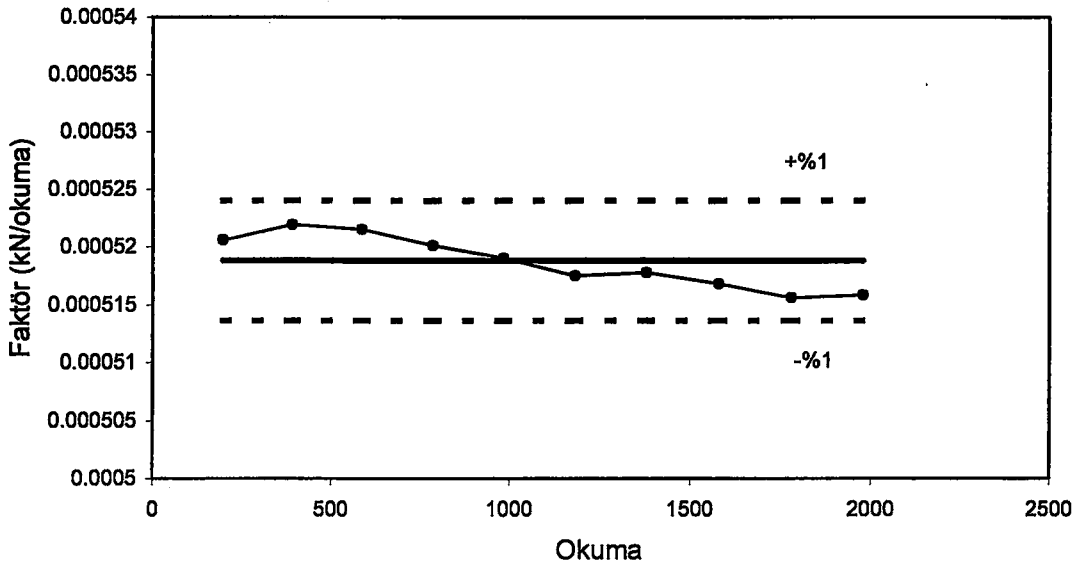


EK A. KALİBRASYONLAR

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 laboratuvarında mevcut koşullar ve imkanlar dahilinde bu cihazların kalibrasyonlarını kontrol etmektir. Elde edilen kalibrasyon katsayılarının çoğunlukla üretici firma tarafından verilenlere çok yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen kalibrasyon katsayıları ile üretici firmanın sağladığı kalibrasyon değerlerinin oldukça yakın olduğu bu gibi durumlarda, üretici firmanın verdiği kalibrasyon katsayıları kullanılmıştır. Sadece yük halkasının kalibrasyon değeri üretici firma tarafından verilenden farklı olarak bulunmuş ve firmanın verdiği değer yerine hesaplarla, bulunan değer kullanılmıştır. Ayrıca basınç ölçerlerin kalibrasyon sertifikası bulunamamış, bu sebeple deneylerde aşağıda anlatıldığı şekilde elde edilen sabit kalibrasyon katsayılarının kullanılması gerekmiştir.

A.1 Yük Halkasının Kalibrasyonu

Deneylerde kullanılan 2 kN kapasiteli yük halkası sabit ağırlıklar ile kalibre edilmiştir. 100 kg'lık yük 10 kg'lık kademelerle halkaya bir askı yardımıyla uygulanmıştır. Her kademede halkanın üzerindeki yük saati ve datalogger'dan okunan değer kaydedilmiştir. Bu şekilde yük halkası iki kez yüklenip boşaltılmıştır. Kalibrasyon eğrisi iki çevrimden elde edilen ortalama değerlerle çizilmiştir. Elde edilen değerler Tablo A.1'de görülmektedir. Bu şekilde elde edilen doğrusal kalibrasyon katsayısı -0.0005188 kN/okuma olarak elde edilmiştir. Yük halkasının kalibrasyonu Şekil A.1'de görülmektedir. Üretici firma tarafından verilen kalibrasyon katsayısı -0.00048 kN/okumadır. Görüldüğü gibi iki kalibrasyon katsayısı arasında %8 büyüklüğünde bir fark vardır. Firmanın verdiği kalibrasyon katsayısı ile hesaplanan kalibrasyon katsayısı arasındaki bu fark yük halkasının daha önceki kullanım veya saklanma şartlarından dolayı ortaya çıktığı düşünülmüştür. Deneylerde, hesaplamalarla bulunan kalibrasyon katsayısı kullanılmıştır.



Şekil A.1 Yük halkasının kalibrasyonu.

Tablo A.1 Yük halkasının kalibrasyon verileri.

Uygulanan Yük (kN)	1.Çevirim		2.Çevirim		ortalama	Faktör	Nonlinearite
	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma		kN/okuma	%
0.00	0	0	0	0	0	0	
0.10	195	196	197	196	196	0.0005206	0.37
0.20	390	393	388	393	391	0.0005219	0.63
0.31	587	588	586	587	587	0.0005215	0.54
0.41	783	787	785	784	784.75	0.0005201	0.28
0.51	983	985	982	982	983	0.000519	0.07
0.61	1181	1186	1184	1181	1183	0.0005175	-0.22
0.71	1381	1378	1378	1381	1379.5	0.0005178	-0.17
0.82	1577	1582	1578	1581	1579.5	0.0005168	-0.36
0.92	1782	1784	1780	1778	1781	0.0005156	-0.59
1.02	1980	1982	1981	1969	1978	0.0005159	-0.54
Ortalama kalibrasyon katsayısı						0.0005188	

A2 Basınç Ölçerlerin (Pressure Transducer) Kalibrasyonu

Basınç ölçerler deney sisteminde kullanılan ELE marka basınç saatleri ile kalibre edilmiştir. Önce basınç 100 kPa değerine getirilmiş ve bu anda basınç ölçerin okuması sıfırlanmıştır. Kesme deneyleri genellikle 150-200 kPa ters basınç ile yapıldığı için kalibrasyonun bu değerden başlatılması uygun görülmüştür. Ayrıca bu sayede basınç ölçerlerin doğrusallıktan uzaklaştığı küçük basınç değerlerinin kalibrasyonu etkilemesi engellenmiştir. Basınç 10 kademede 600 kPa değerine kadar artırılmıştır. Her kademede ortalama 20 okuma kaydedilmiştir. Bu okumaların en

büyük 5'i ve en küçük 5'i atılmış geri kalan 10 okumanın ortalaması bu basınç kademesi için okunan değer olarak alınmıştır. Bu işlem 2 kez tekrarlanmış ve bu iki okuma kullanılarak kalibrasyon eğrileri çizilmiştir. Bu şekilde hesaplanan kalibrasyon katsayıları boşluk suyu basınç ölçeri için 2.78kPa/okuma, Hücre basıncı ölçeri için 2.36 kPa/okuma olarak elde edilmiştir.

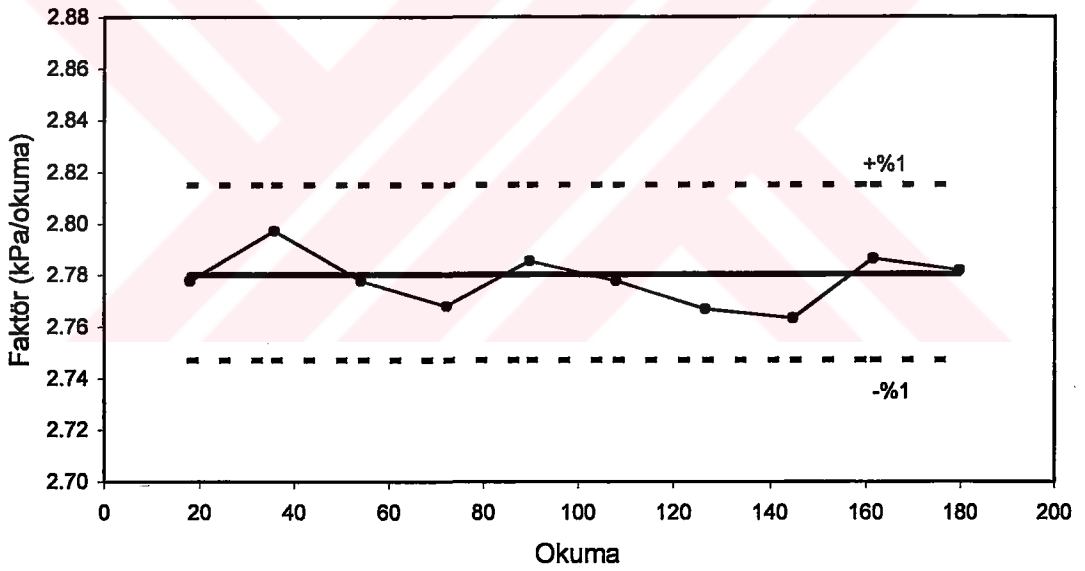
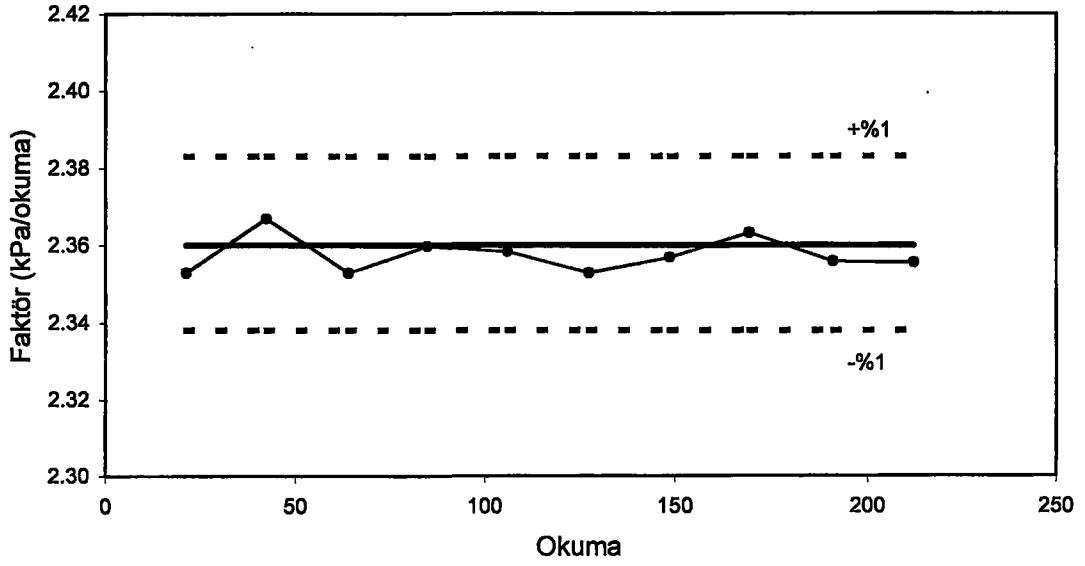
Kalibrasyon verileri Tablo A.2'de, kalibrasyon eğrileri ise Şekil A2'de görülmektedir.

Tablo A.2a Hücre basınç ölçerin kalibrasyon verileri.

Uygulanan Basınç (kPa)	1.Çevirim		2.Çevirim		ortalama	Faktör	Nonlinearite
	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma		kPa/okuma	%
0	0	0	0	0	0	0	
50	20	22	21	22	21.25	2.35	-0.20
100	42	42	43	42	42.25	2.37	0.39
150	63	65	63	64	63.75	2.35	-0.20
200	85	86	83	85	84.75	2.36	0.10
250	106	106	106	106	106	2.36	0.04
300	127	128	127	128	127.5	2.35	-0.20
350	148	149	149	148	148.5	2.36	-0.03
400	169	168	169	171	169.25	2.36	0.24
450	191	191	191	191	191	2.36	-0.07
500	20	22	21	22	21.25	2.35	-0.20
Ortalama kalibrasyon katsayısı						2.36	

Tablo A.2b Boşluk suyu basınç ölçerin kalibrasyon verileri.

Uygulanan Basınç (kPa)	1.Çevirim		2.Çevirim		ortalama	Faktör	Nonlinearite
	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma		kPa/okuma	%
0	0	0	0	0	0	0	
50	18	18	18	18	18	2.78	-0.02
100	36	35	36	36	35.75	2.80	0.68
150	54	53	54	55	54	2.78	-0.02
200	73	73	72	71	72.25	2.77	-0.36
250	91	90	88	90	89.75	2.79	0.26
300	108	108	108	108	108	2.78	-0.02
350	125	126	127	128	126.5	2.77	-0.41
400	145	144	146	144	144.75	2.76	-0.53
450	162	162	161	161	161.5	2.79	0.29
500	180	179	181	179	179.75	2.78	0.12
Ortalama kalibrasyon katsayısı						2.78	



Şekil A.2 (a) Hücre basınç (b) boşluk suyu basınç ölçerlerin kalibrasyon eğrileri.

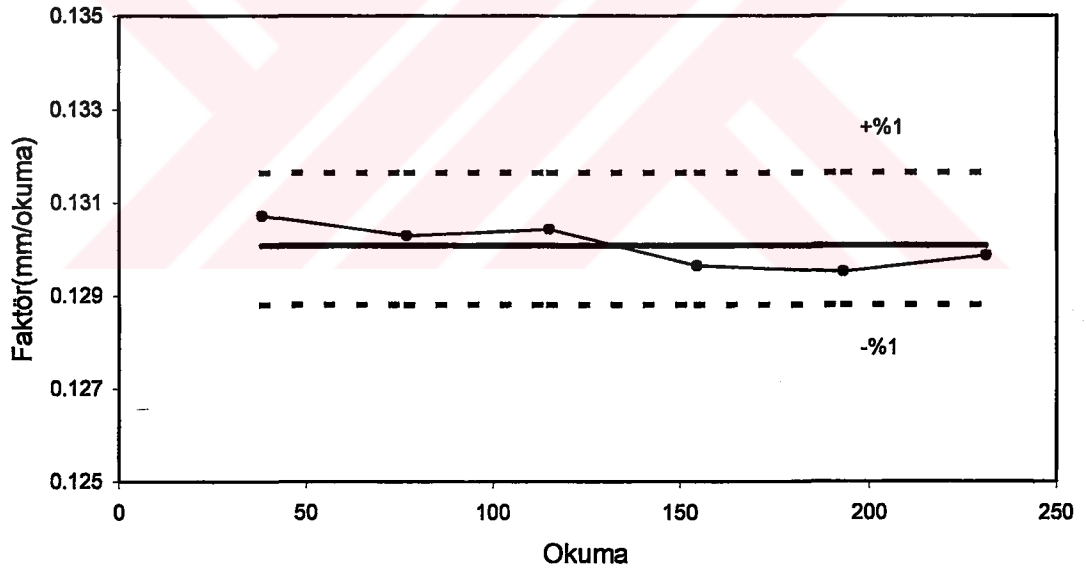
A.3 Yerdeğiştirme Ölçerin (Displacement Transducer) Kalibrasyonu

Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyonu yük halkasına takılan bir yerdeğiştirme saati yardımıyla üç eksenli deney aletinde yapılmıştır. 5 mm lik kademelerle 30 mm ye kadar okuma alınmış kalibrasyon eğrisi bu okumalara göre çizilmiştir.

Tablo A.3 Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyon verileri.

Uygulanan.	1. Çevirim		2. Çevirim		ortalama	Faktör	Nonlinearite
Yerd. (mm)	yüklleme	boşaltma	yüklleme	boşaltma		mm/okuma	%
0	0	0	0	0	0	0	
5	39	39	38	37	38.25	0.130719	0.49
10	77	76	78	76	76.75	0.1302932	0.16
15	115	116	115	114	115	0.1304348	0.27
20	155	156	152	154	154.25	0.1296596	-0.33
25	194	197	192	189	193	0.1295337	-0.42
30	231	232	230	231	231	0.1298701	-0.17
Ortalama kalibrasyon katsayısı						0.1300851	

Tablo A.3’de görüldüğü gibi ortalama kalibrasyon katsayısı 0.1300851 mm/okuma olarak bulunmuştur. Üretici firma kalibrasyon katsayısını 0.1292 mm/okuma olarak vermiştir. Deneylerde üretici firmanın verdiği kalibrasyon sayısı kullanılmıştır.



Şekil A.3 Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyonu.

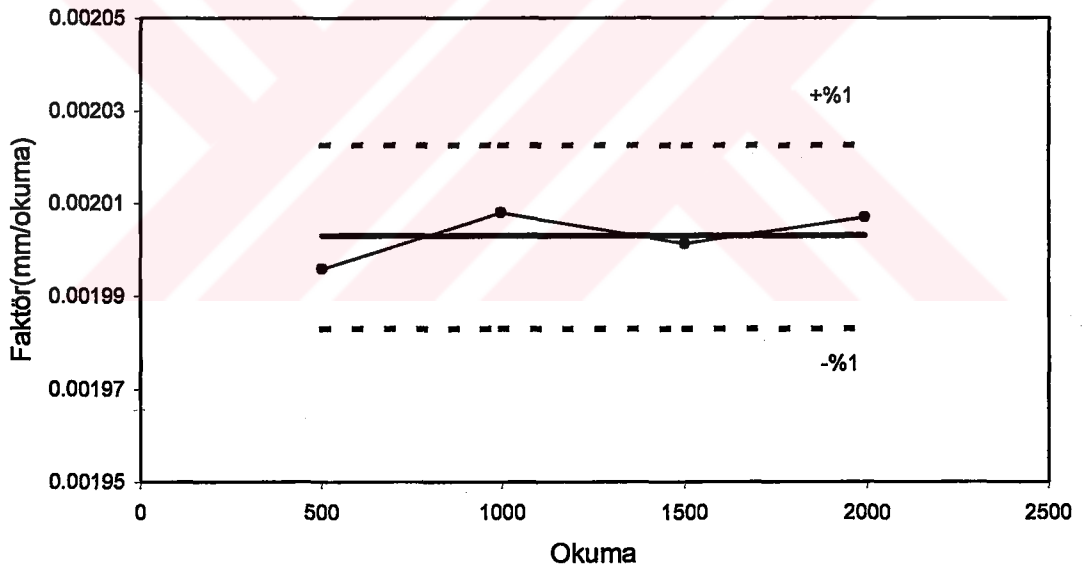
A.4 Hassas Yerdeğiştirme Ölçerin Kalibrasyonu

Serbest salınım hareketini ölçmede kullanılan yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyonu aynı platforma beraberce monte edildiği verniyerli kompas kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler 0 dan başlayarak 1'er mm artırılarak toplam 4 mm mesafe için yapılmıştır. Kalibrasyon eğrisi bu okumalara göre çizilmiştir

Tablo A.4 Hassas yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyon verileri.

Uygulanan	1. Çevirim		2. Çevirim		ortalama	Faktör	Nonlinearite
Yerd.(mm)	yükleme	boşaltma	yükleme	boşaltma		mm/okuma	%
0	0	0	0	0	0	0	
1	499	503	502	500	501	0.001996	-0.35
2	997	998	993	996	996	0.002008	0.25
3	1497	1492	1495	1502	1499	0.002001	-0.09
4	1993	1992	1991	1996	1993	0.002007	0.20
			Ortalama kalibrasyon katsayısı			0.002003	

Tablo A.4’de görüldüğü gibi ortalama kalibrasyon katsayısı 0.002003 mm/okuma olarak bulunmuştur. Üretici firma kalibrasyon katsayısını 0.001994 mm/okuma olarak vermiştir. Deneylerde üretici firmanın verdiğı kalibrasyon sayısı kullanılmıştır.



Şekil A.4 Hassas yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyonu.

EK B KULLANILAN YARDIMCI PROGRAMLAR

Bu bölümde hesaplamalarda kullanılan yardımcı programlar verilmiştir. İlk program ADU'dan alınan verilerdeki parazitleri temizlemek için kullanılan bir filtre programıdır. İkincisi ise Burulmalı üç eksenli deney sisteminde burulma kirişinin kütle eylemsizlik momentlerini hesaplarken kullanılmıştır.

B.1 Deney Verilerini Filtre Ederken Kullanılan Bilgisayar Programı

DEFINT I-N

'Bu program ortalama filtre algoritmasıdır

'sistem basta secilen pencere genisligine gore verileri filtre eder

'burada x: apsis, s:ordinat, d: filtre edilmiş veridir.

'x ve s okunacak veri , d ise hesaplanacak çıktı

'n : veri sayısı burada max 4000 alınmıştır

INPUT "pencere genisligi (tek sayi olmalı, 3,5,7,...)"; m

'\$DYNAMICs

DIM x(4000), s(4000), d(4000)

OPEN "book3.txt" FOR INPUT AS #1

OPEN "book3.out" FOR OUTPUT AS #2

n = 0

DO WHILE NOT EOF(1)

n = n + 1

INPUT #1, x(n), s(n)

PRINT x(n), s(n)

LOOP

CLOSE #1

k = (m - 1) / 2

FOR i = 1 TO n

nl = i - k

nu = i + k

IF nl < 1 THEN nl = 1

IF nu > n THEN nu = n

t = 0

ti = 0

FOR j = nl TO nu

t = t + s(j)

ti = ti + 1

NEXT

d(i) = t / ti

NEXT

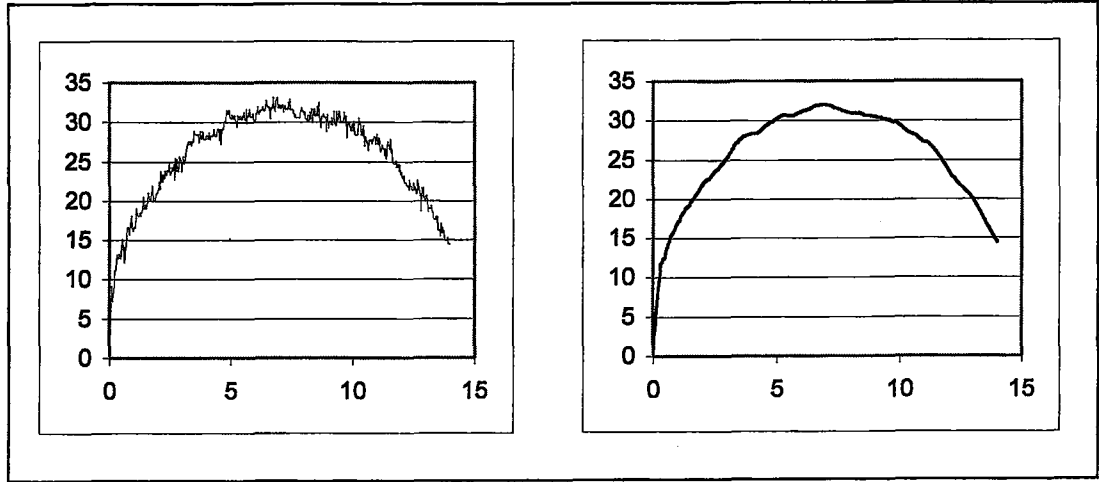
FOR i = 1 TO n

```

PRINT #2, x(i), s(i), d(i)
NEXT
CLOSE #2
END

```

Şekil A.4'de yukarıdaki program kullanılarak filtre edilmiş bir deney datası görülmektedir.



Şekil A.4 Sonuçları ADU yardımıyla okunmuş bir deneyin datalarının a) filtre edilmeden önceki b) filtre edildikten sonraki hali.

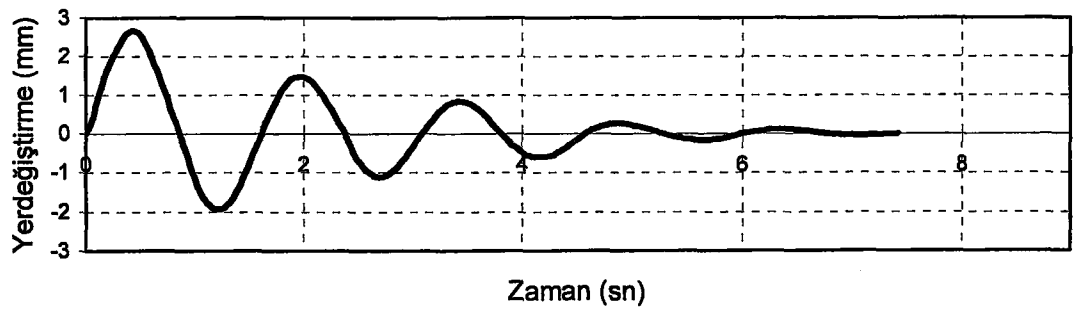
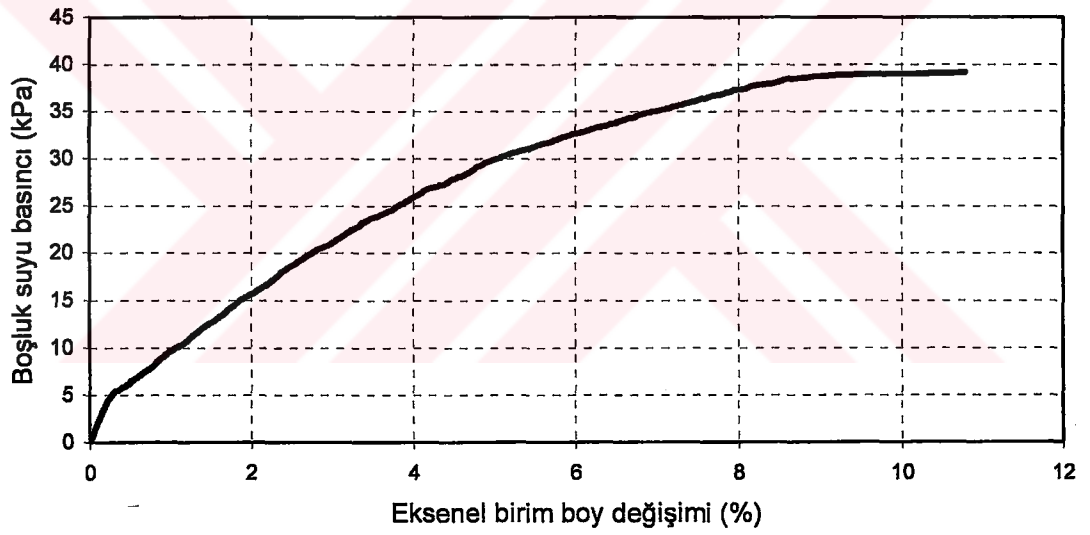
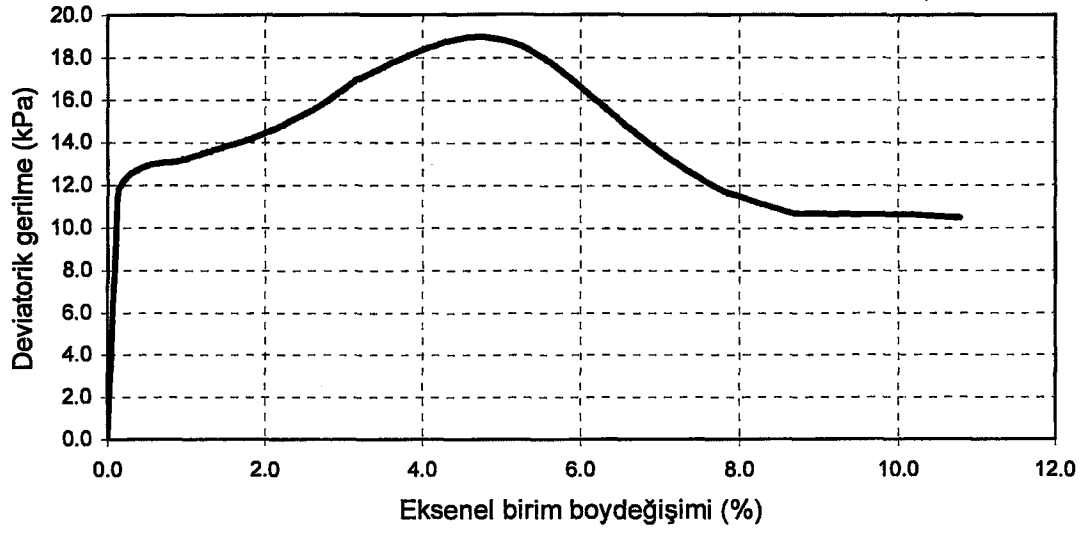
B.2 Burulma Kirişinin Eylemsizlik Momenti Hesaplanırken Kullanılan Bilgisayar Programı

```

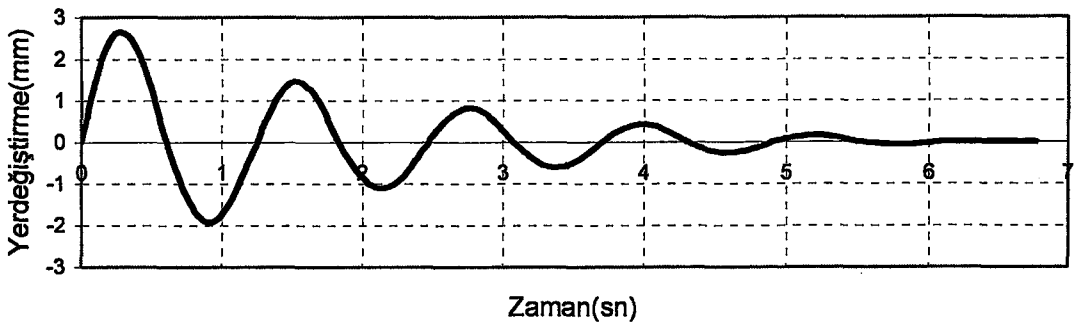
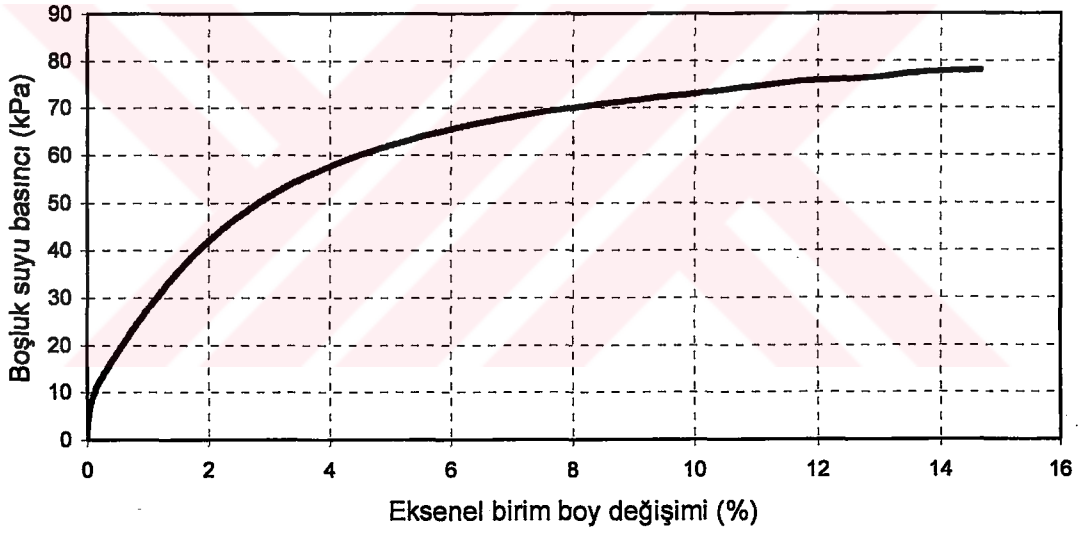
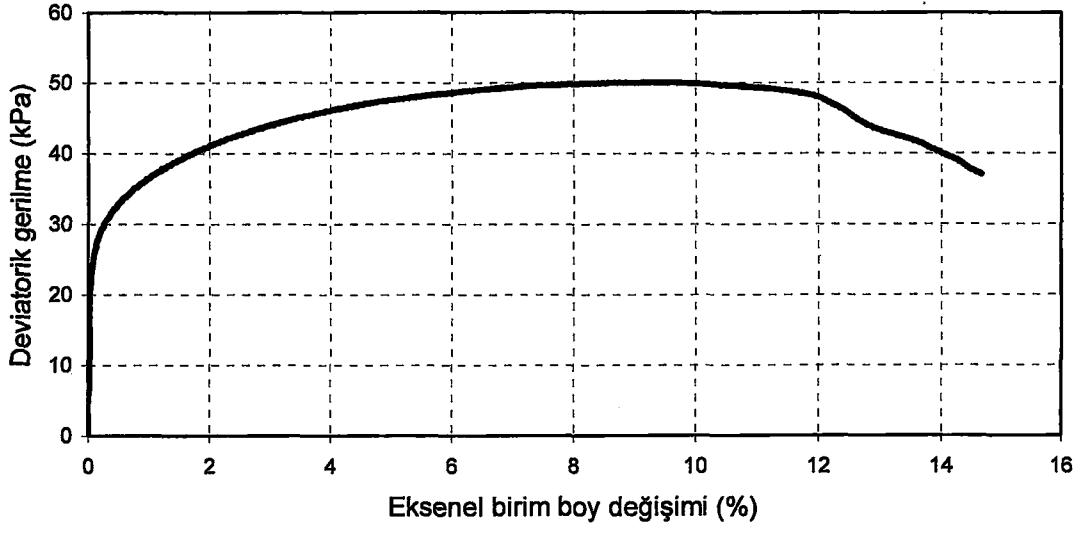
REAL*8 MI(50010),I,M
DX=0.0002
MII=0.
OPEN(2,FILE='C:\E.TXT',ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='UNKNOWN')
IAA=2
DO 1 I=1,5000
MI(I)=.881*DX*(1-((I-1)*DX))**2
M=M(I)+M(I-1)
WRITE(IAA,11) MI(I),M
1 CONTINUE
11 FORMAT(2X,2(F6.2,2X))
STOP'PRG BITTI'
END

```

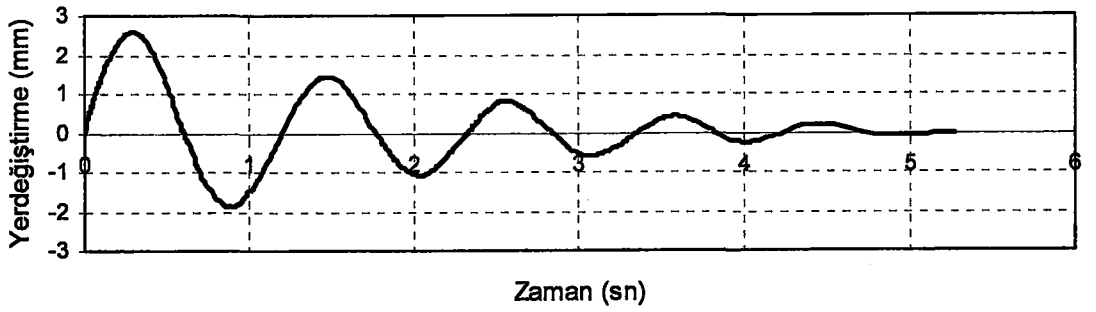
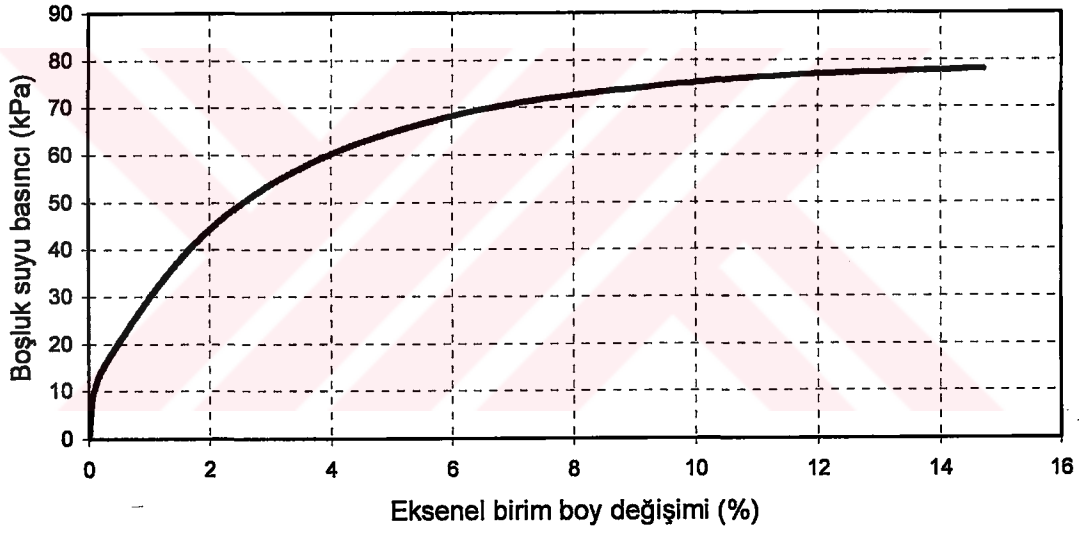
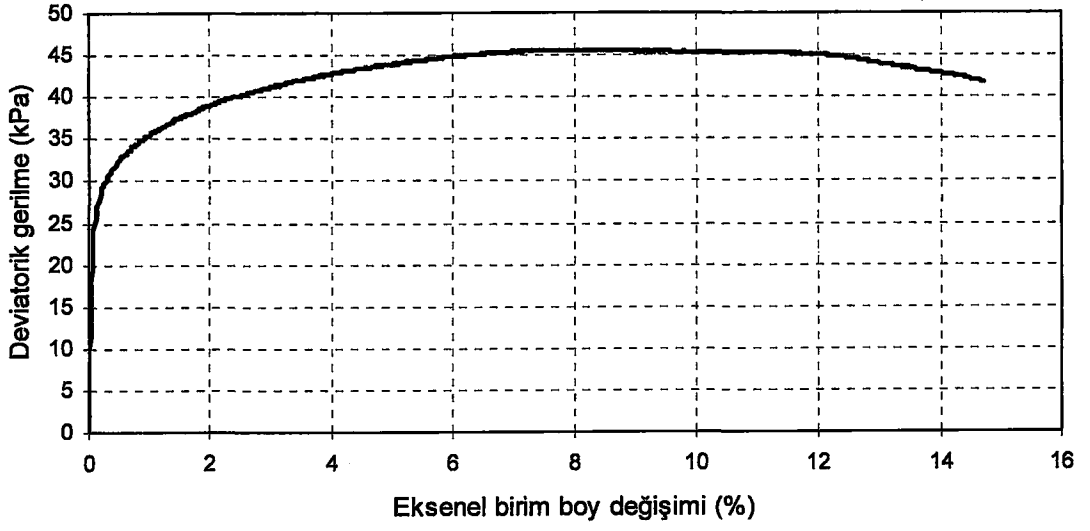
EK C. DENEY GRAFİKLERİ



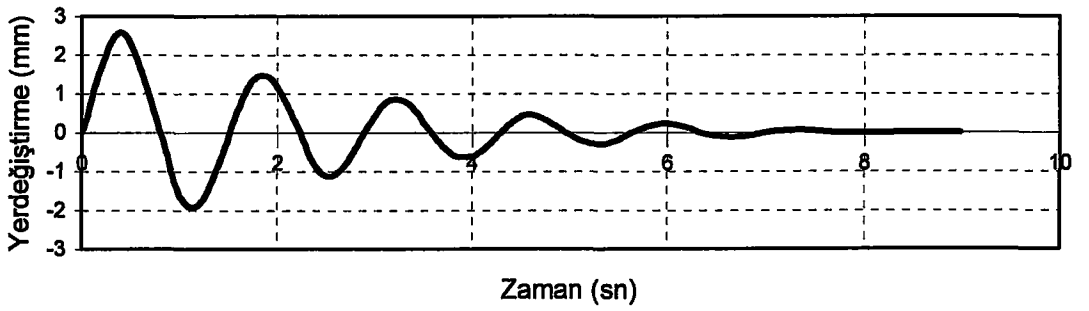
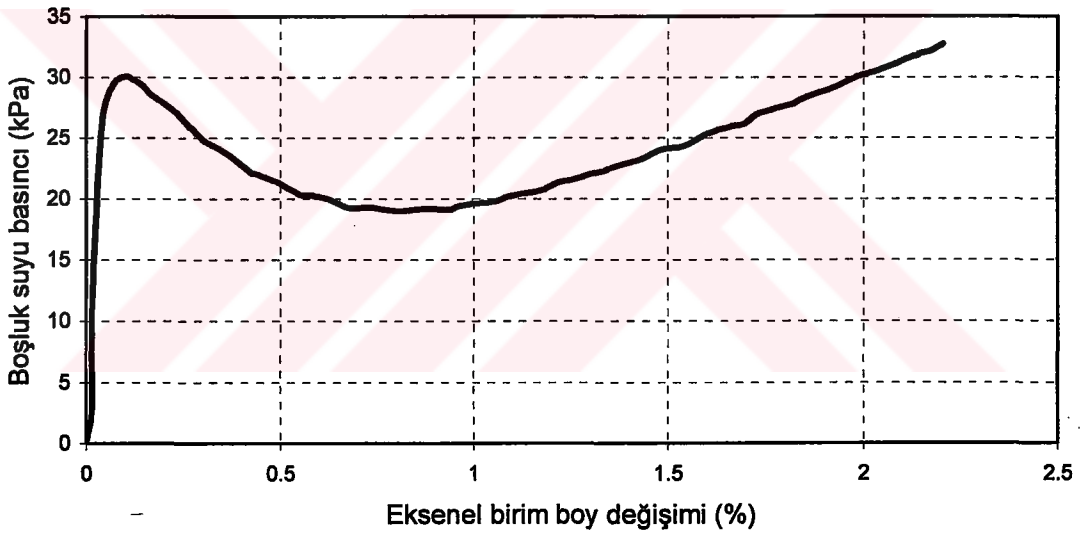
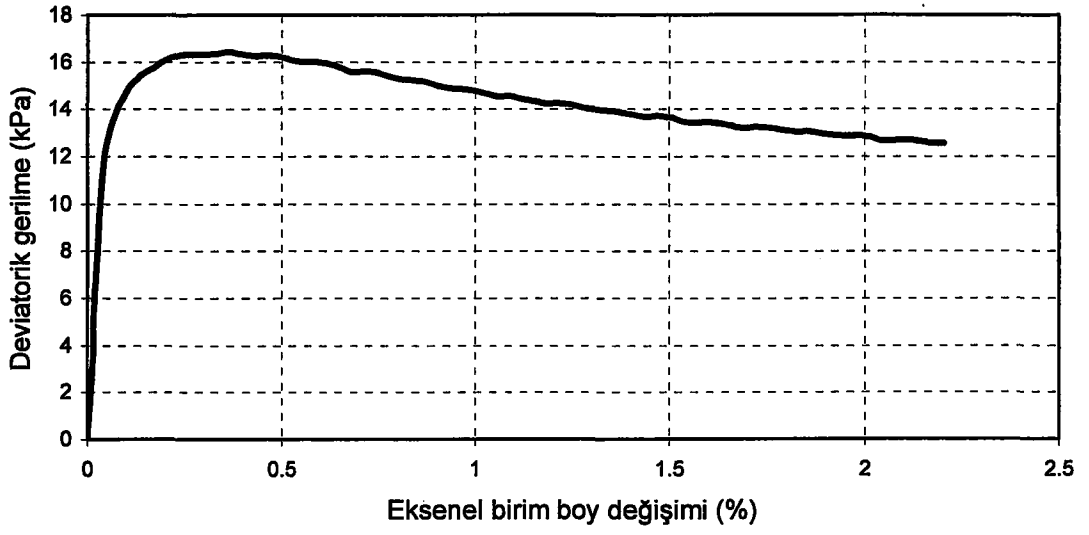
Şekil C1. Y1 deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri ($T=1.52$ sn).



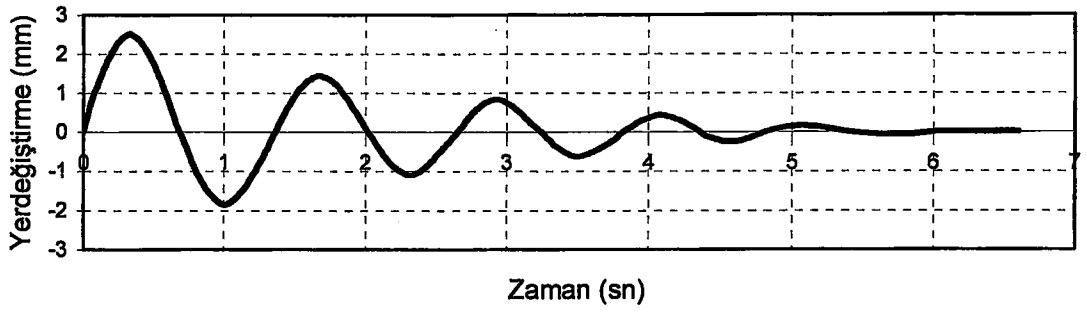
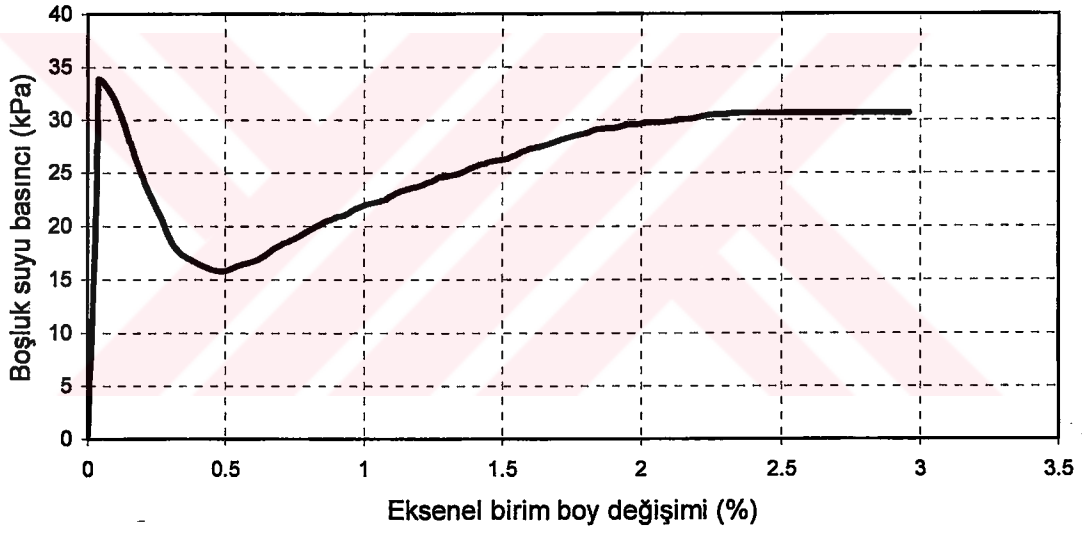
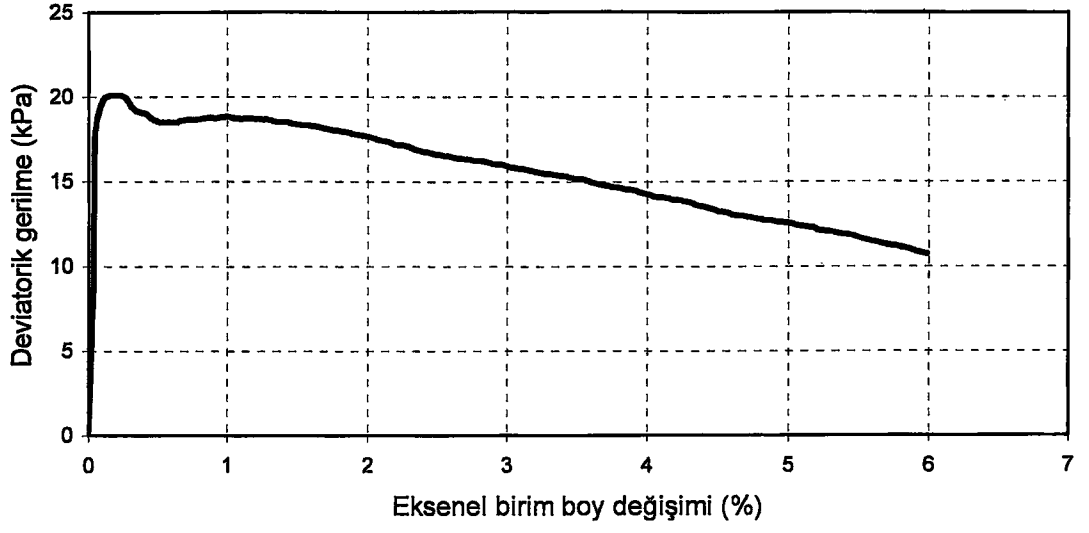
Şekil C2. Y4 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.225$ sn).



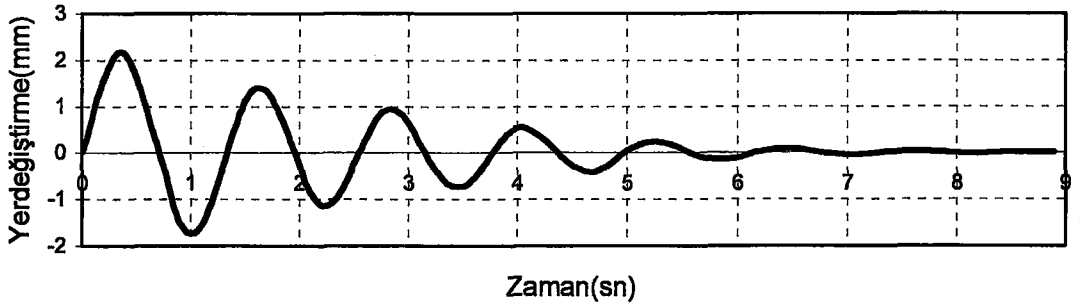
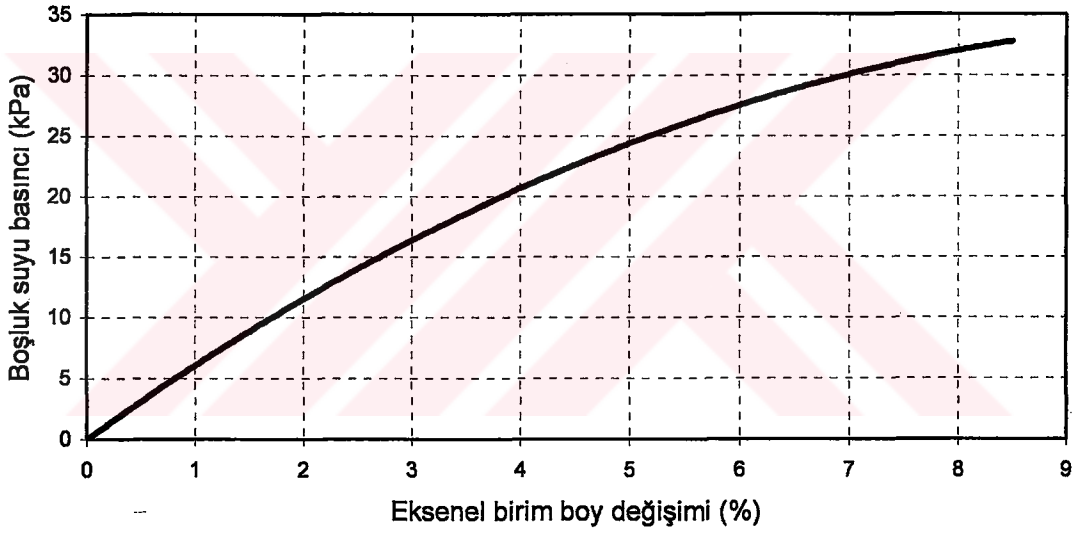
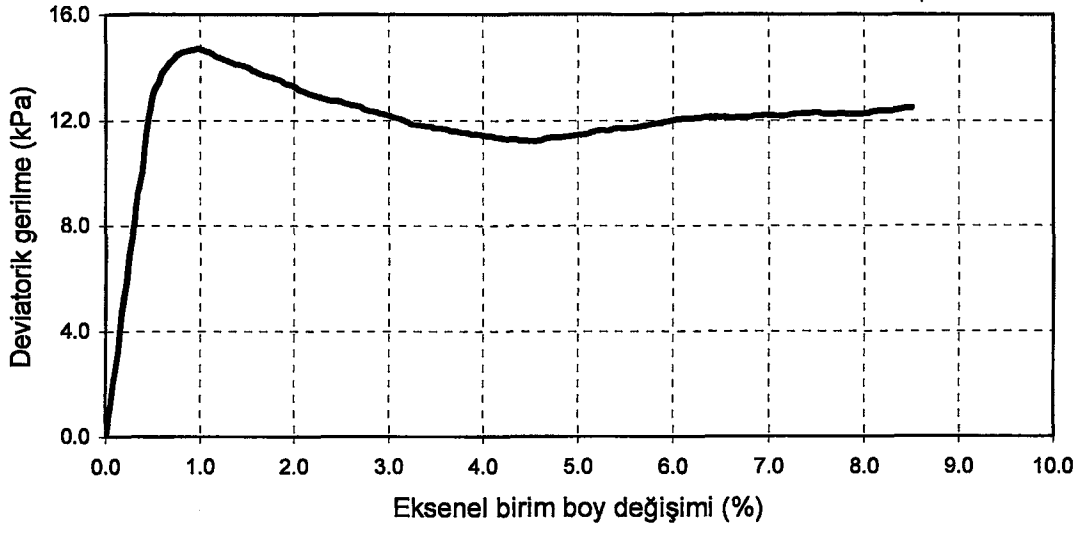
Şekil C3. Y5 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.2$ sn).



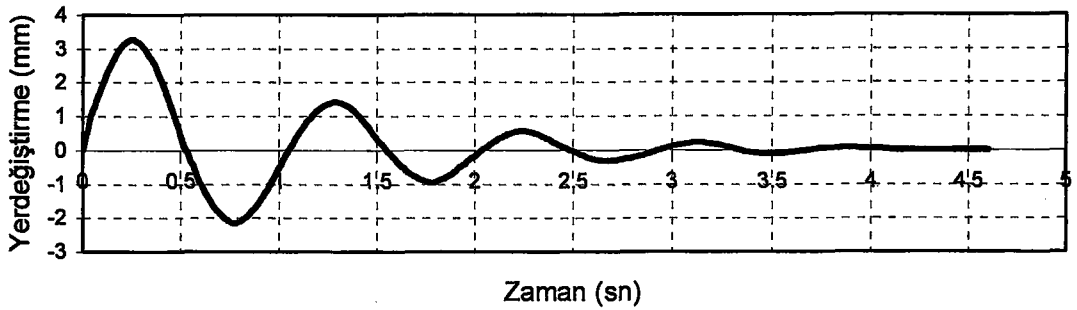
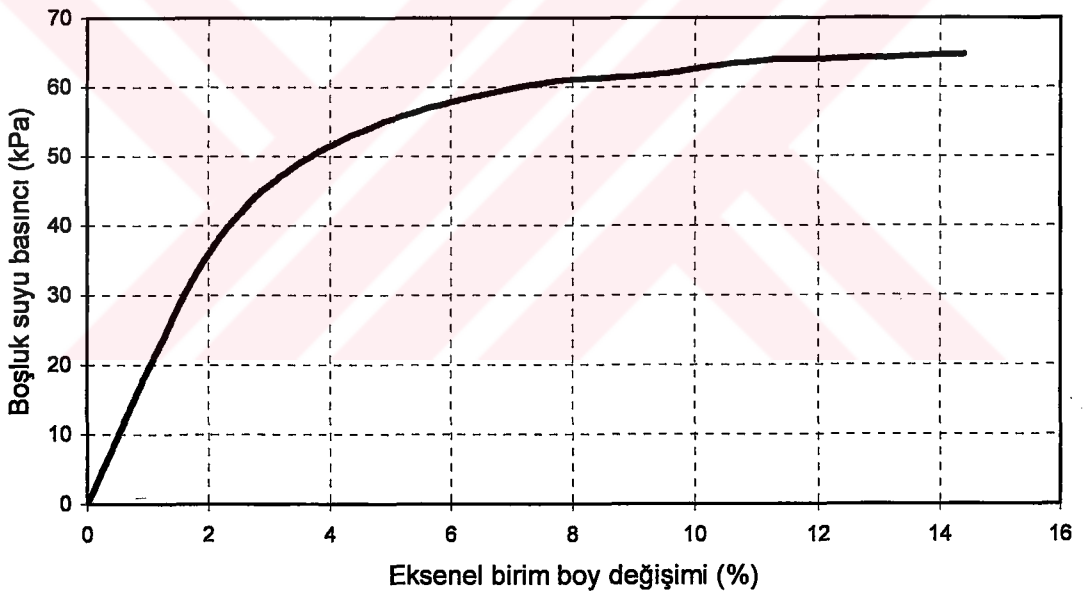
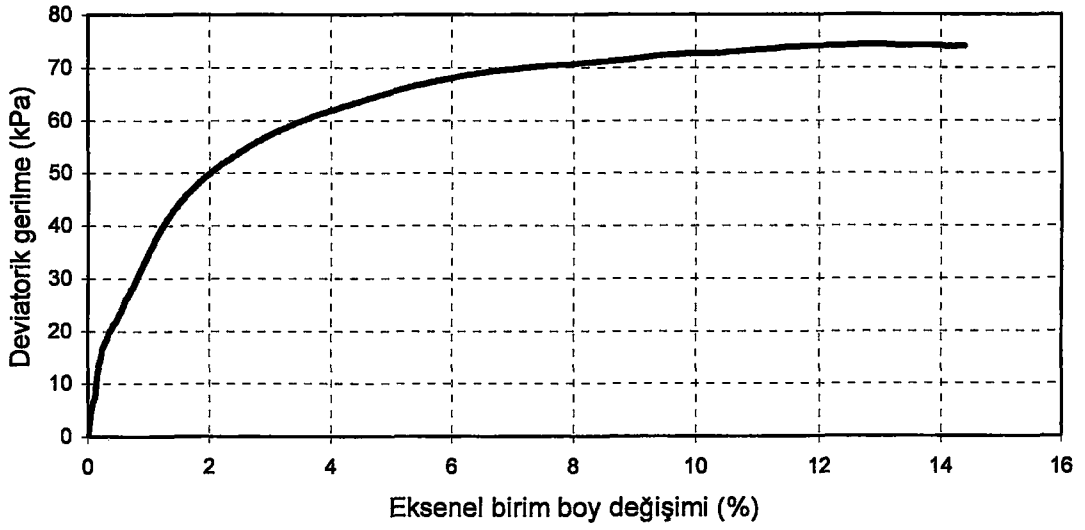
Şekil C4. Y6 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.43$ sn).



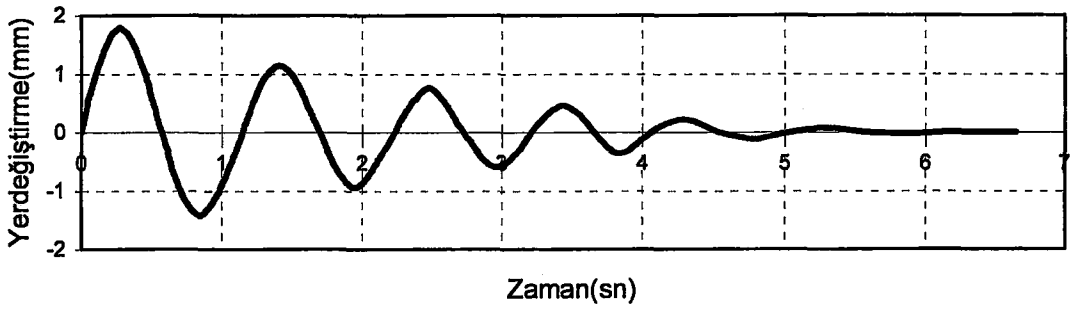
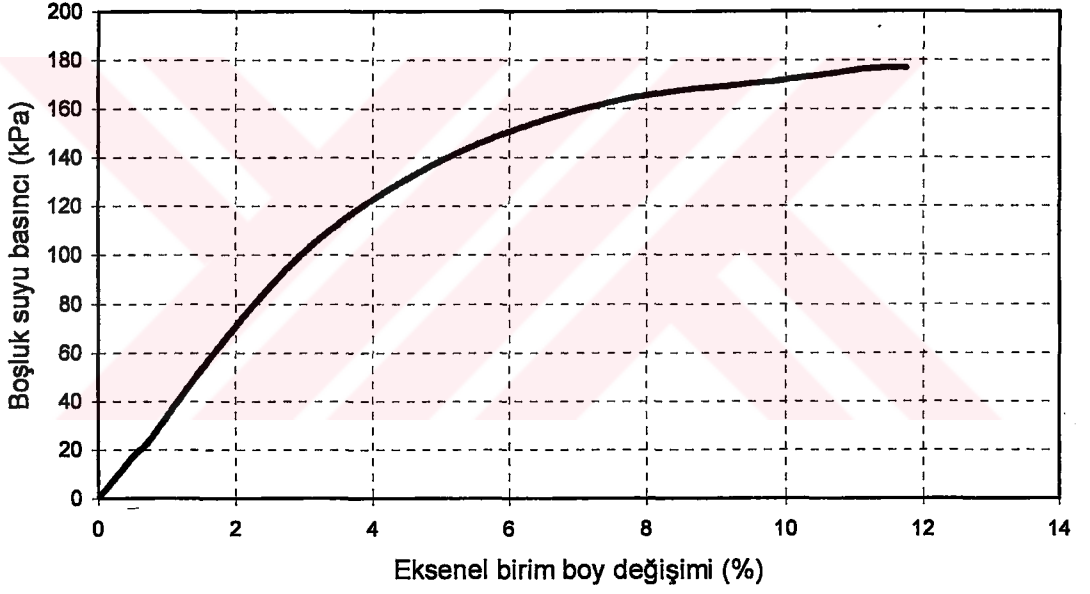
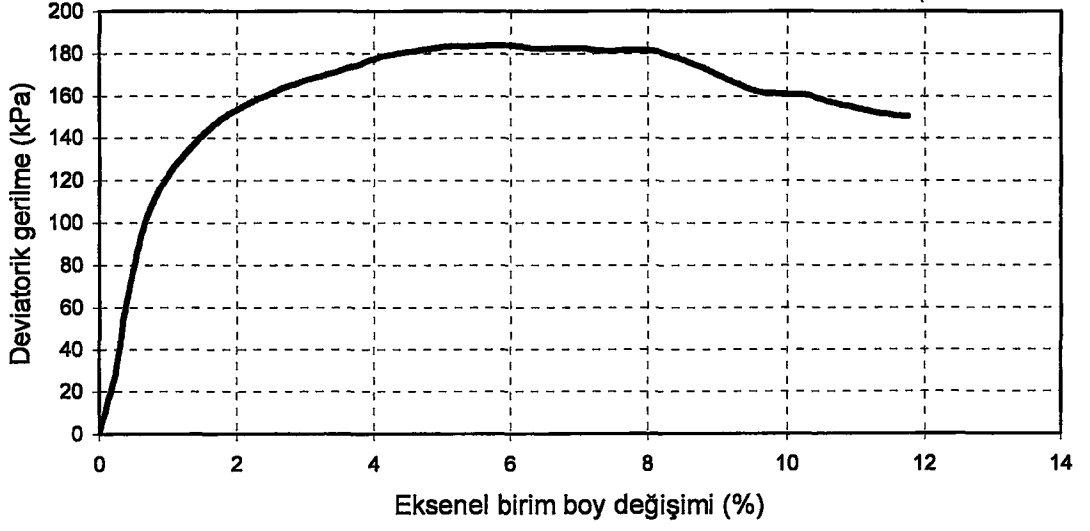
Şekil C5. Y9 deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.37$ sn).



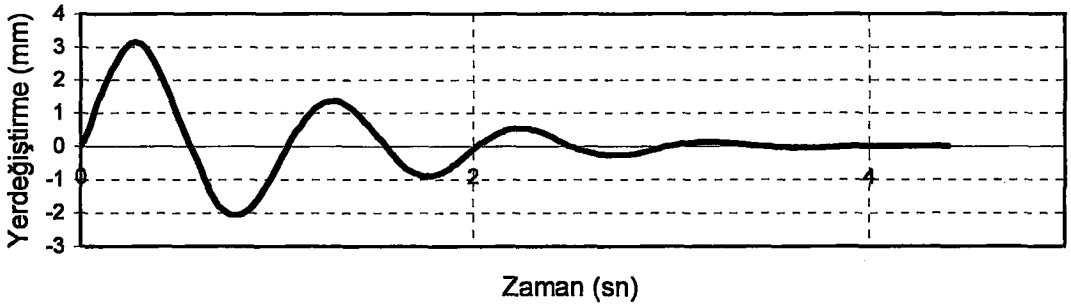
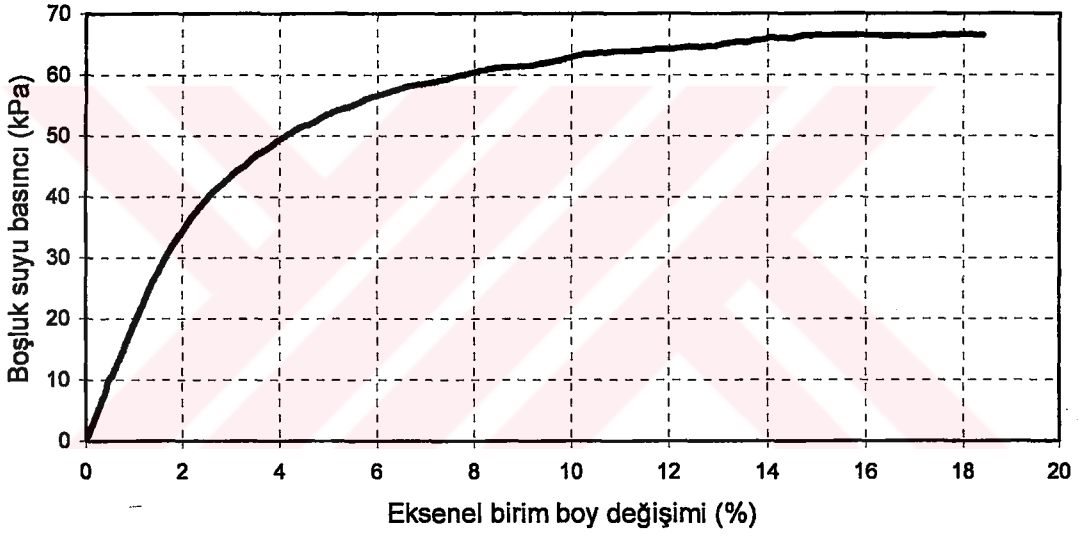
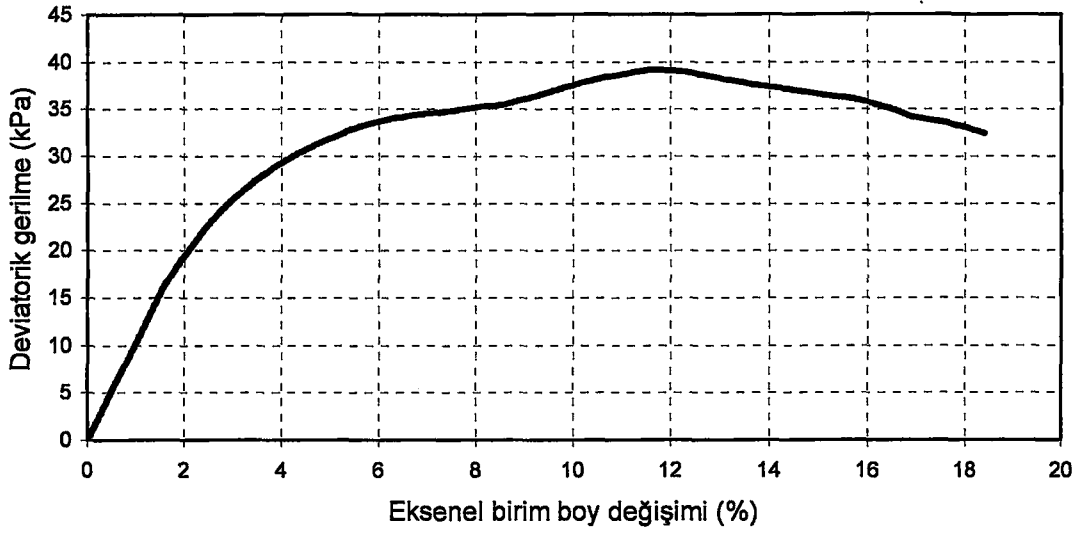
Şekil C6. Y14 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.34$ sn).



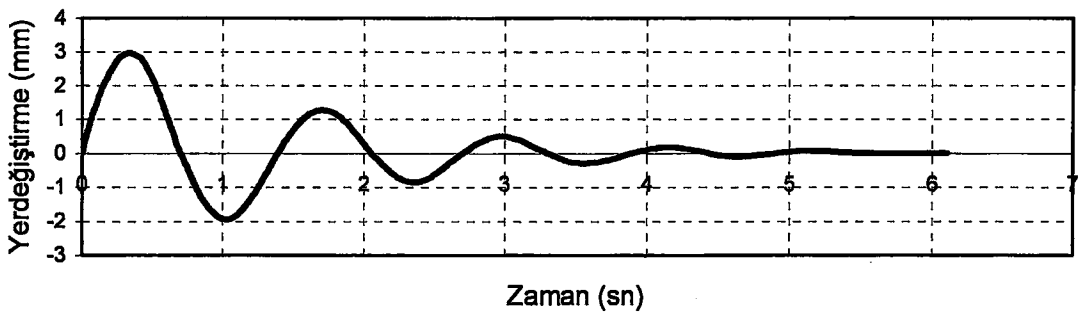
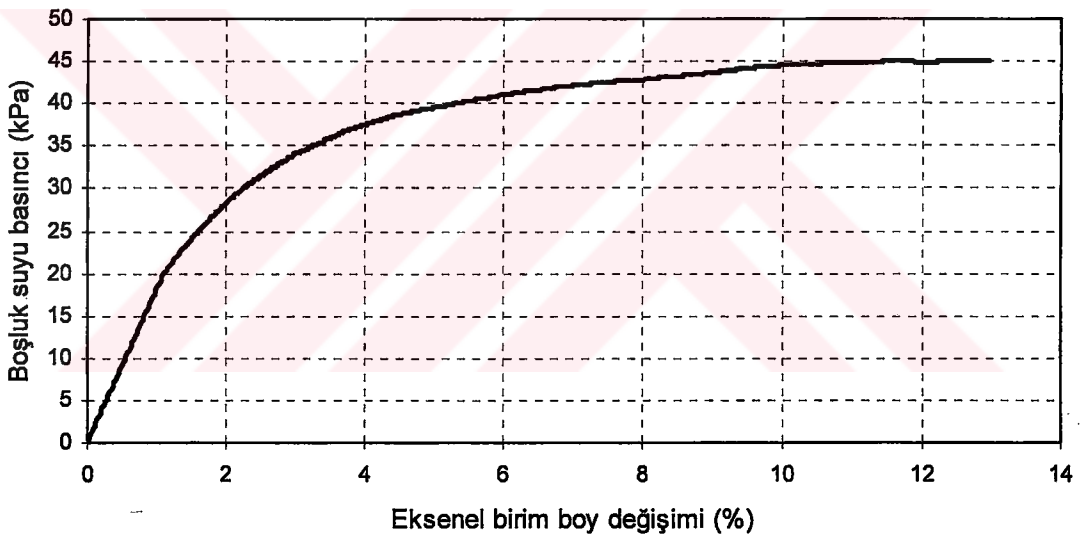
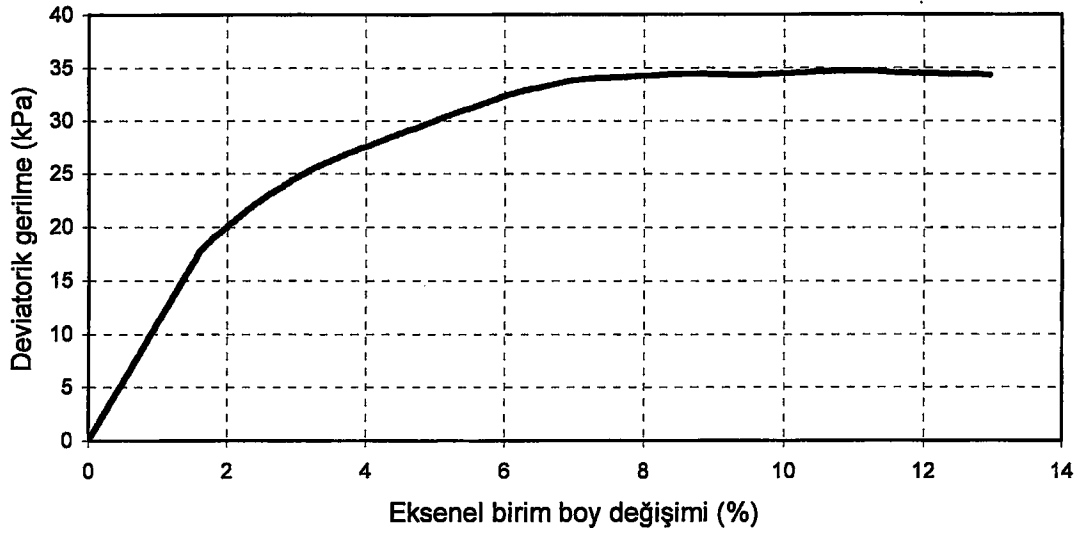
Şekil C7. Y15 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.025$ sn).



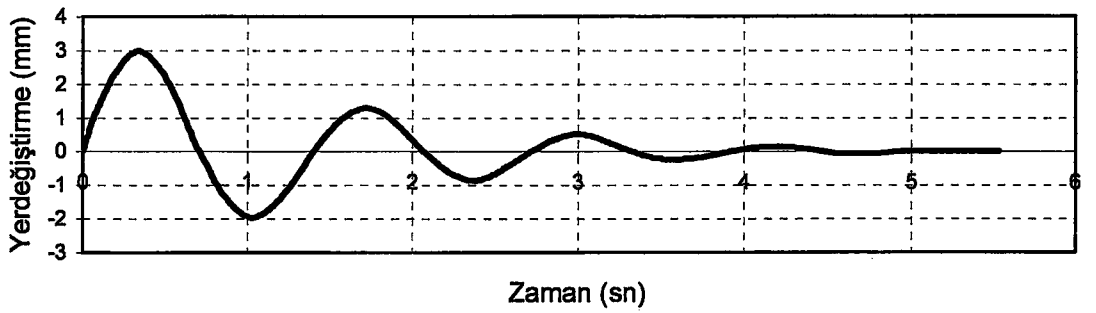
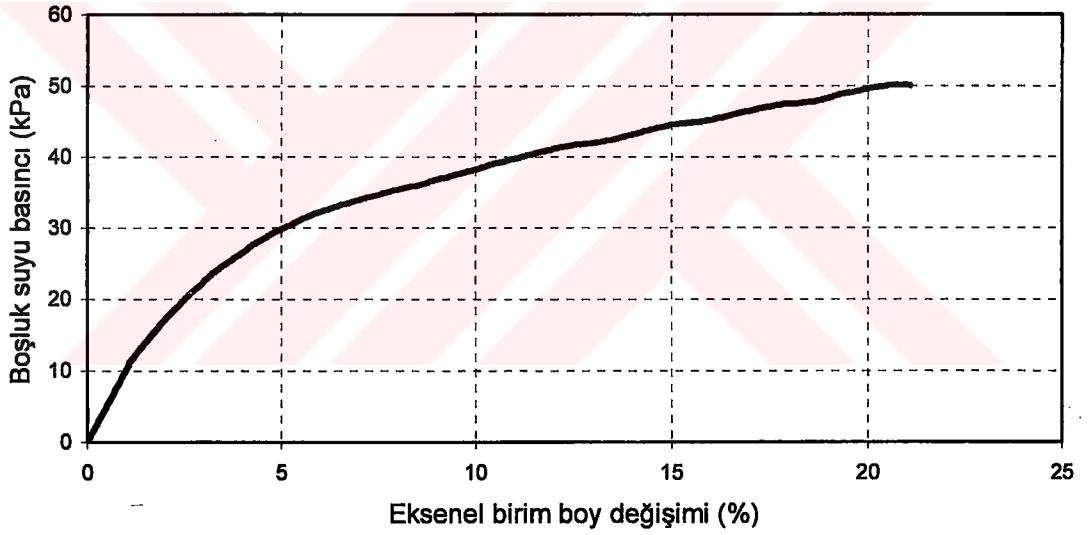
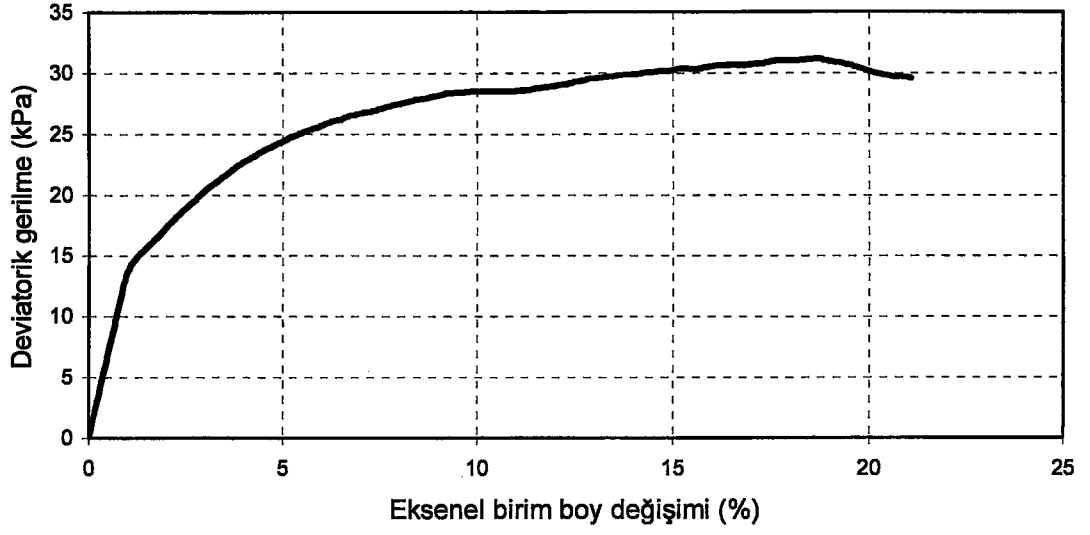
Şekil C8. Y16 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.125$ sn).



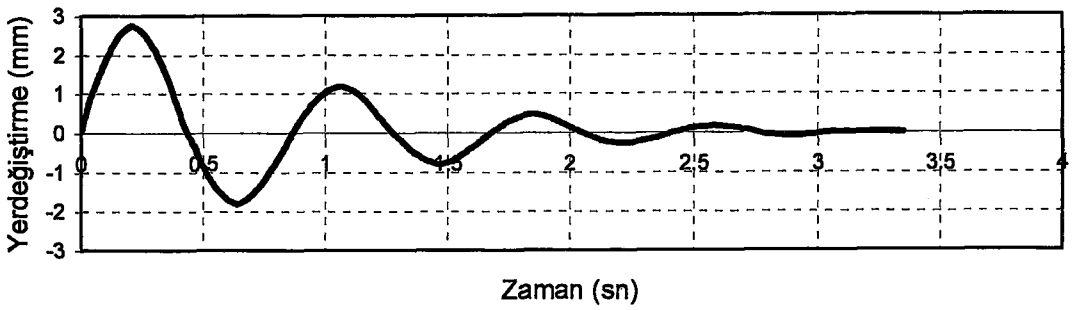
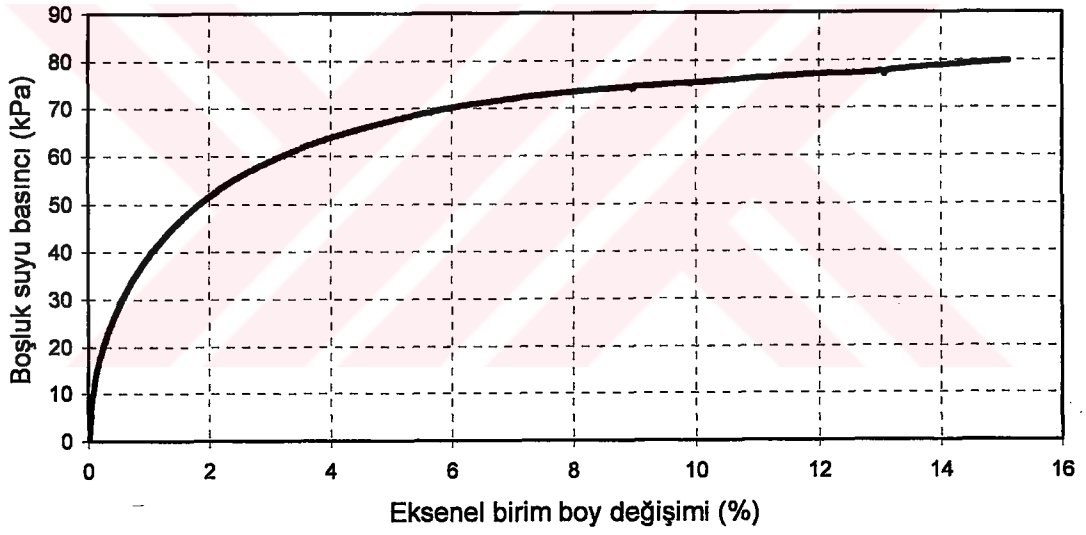
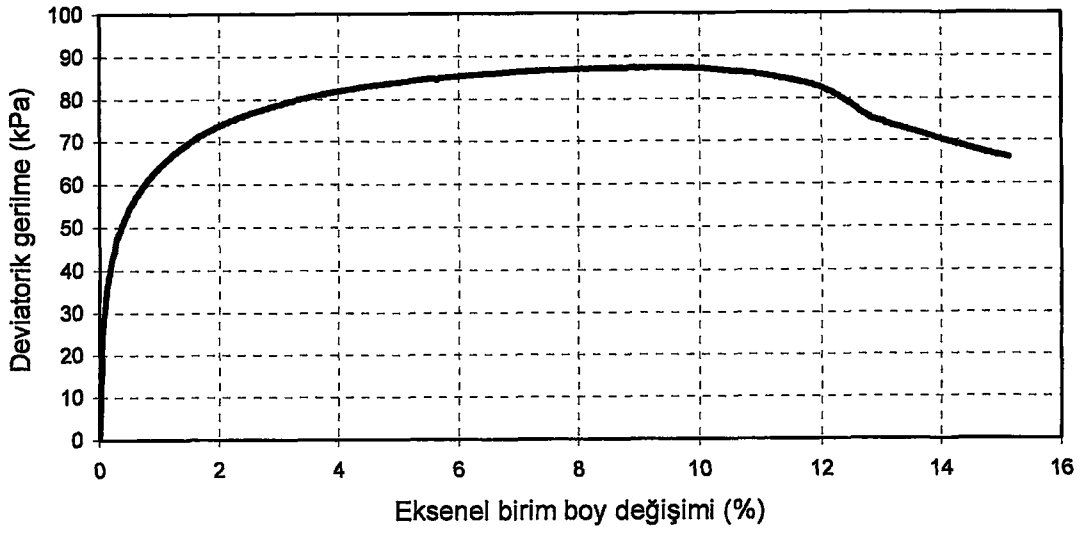
Şekil C9. YT18 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.995$ sn).



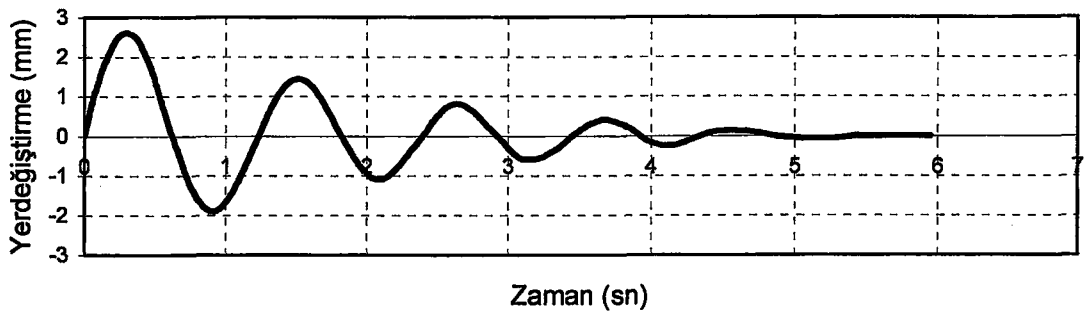
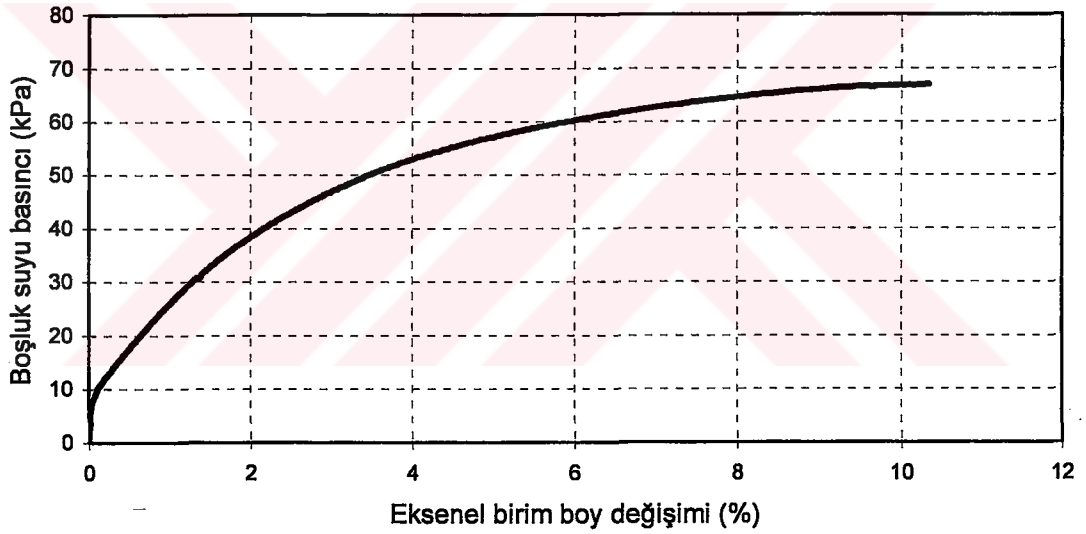
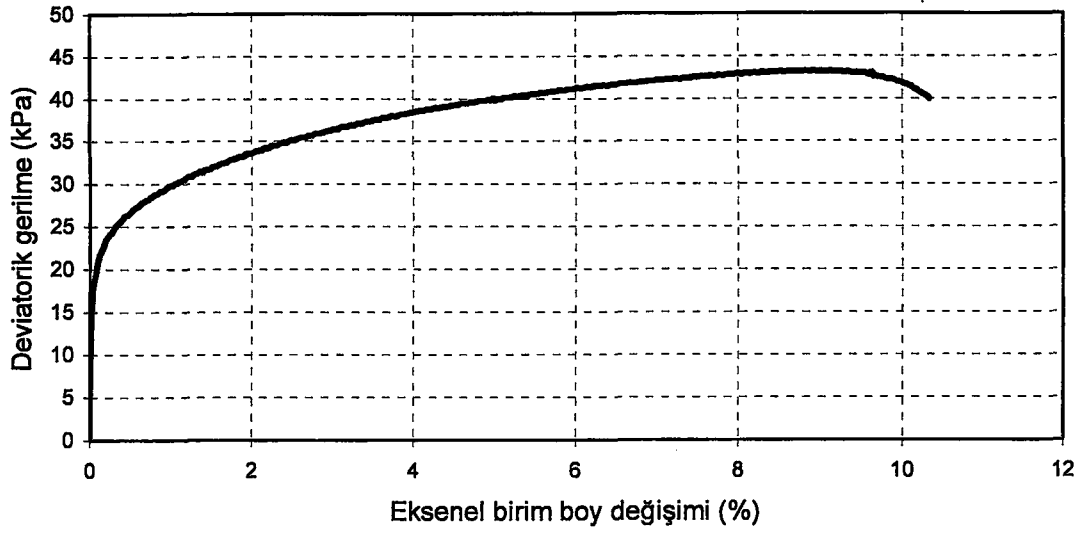
Şekil C10. YT20 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.39$ sn).



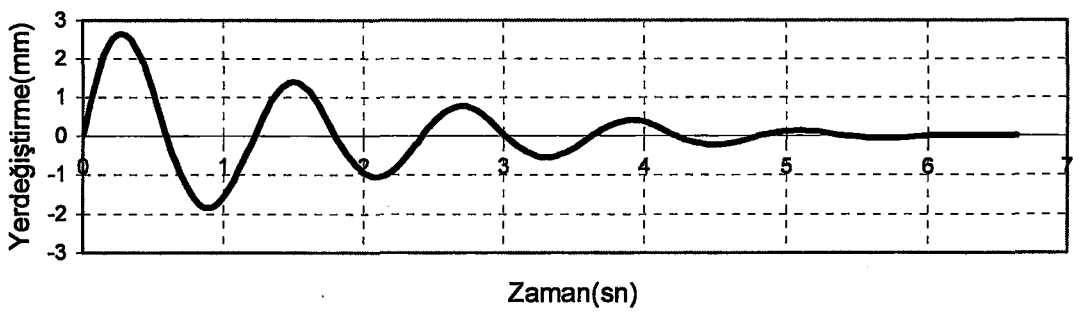
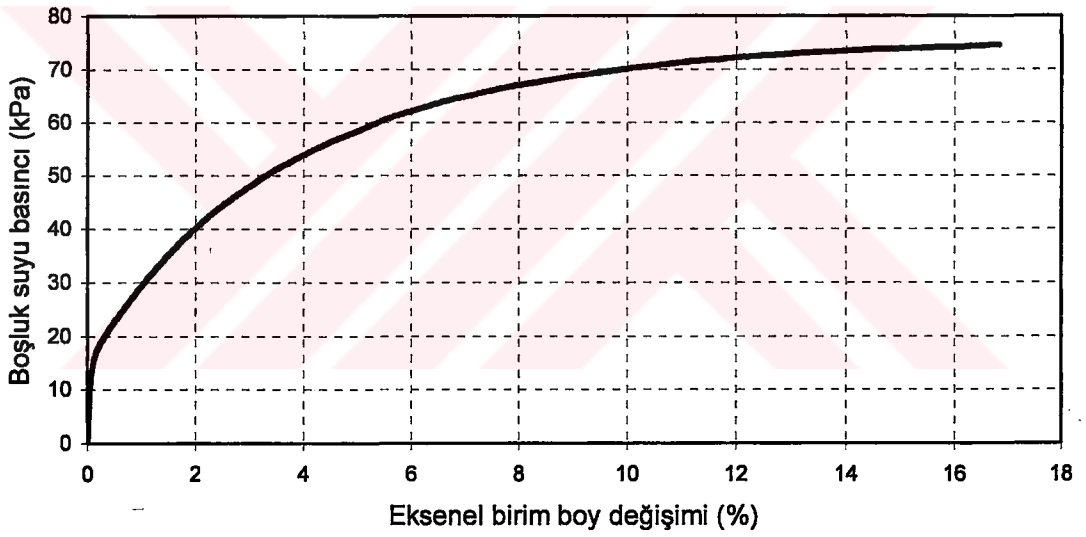
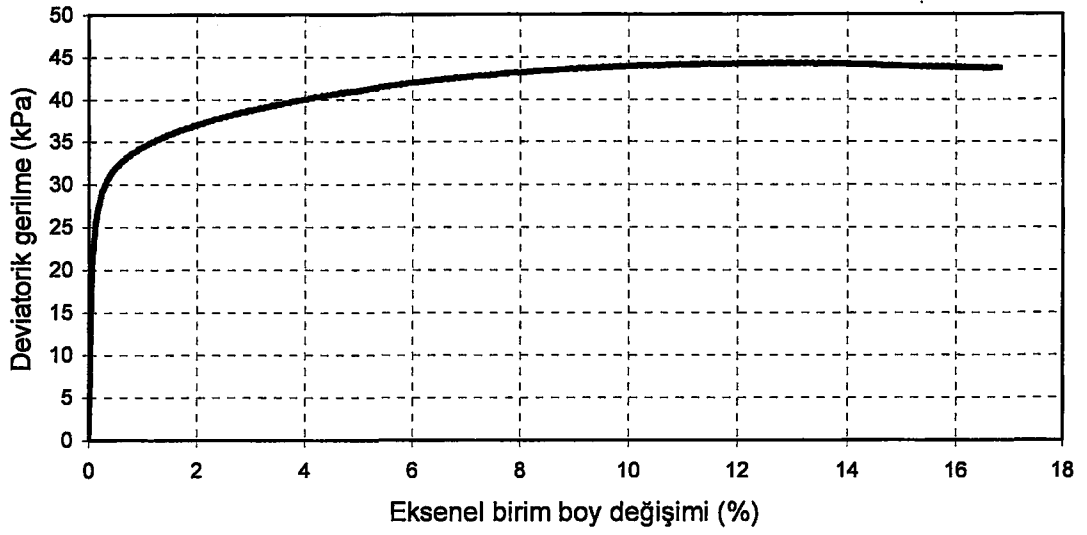
Şekil C11. YT22 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri(T=1.4 sn).



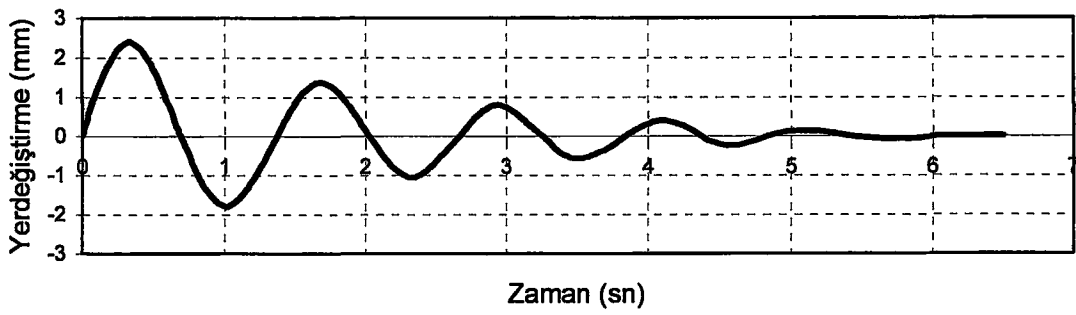
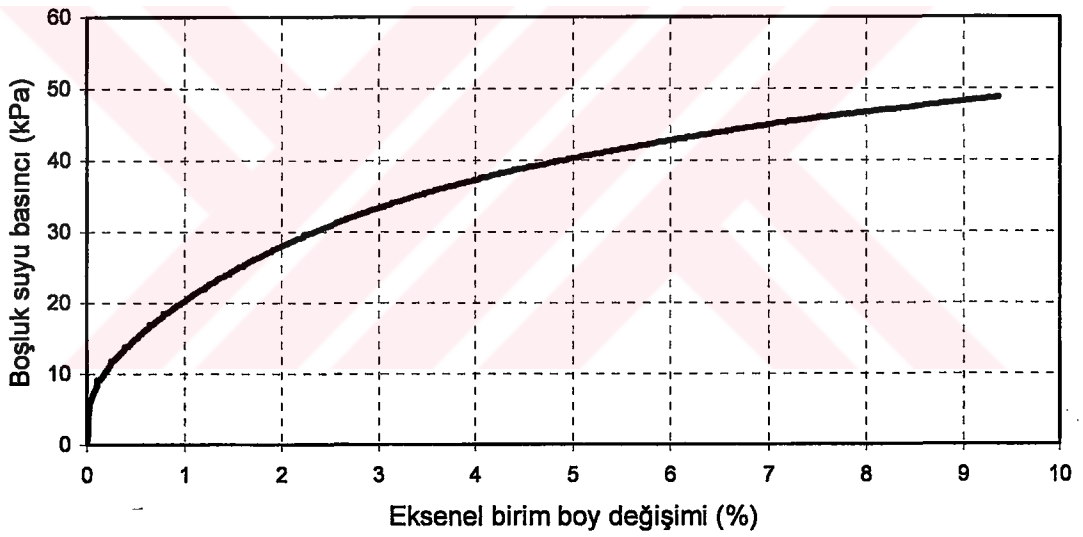
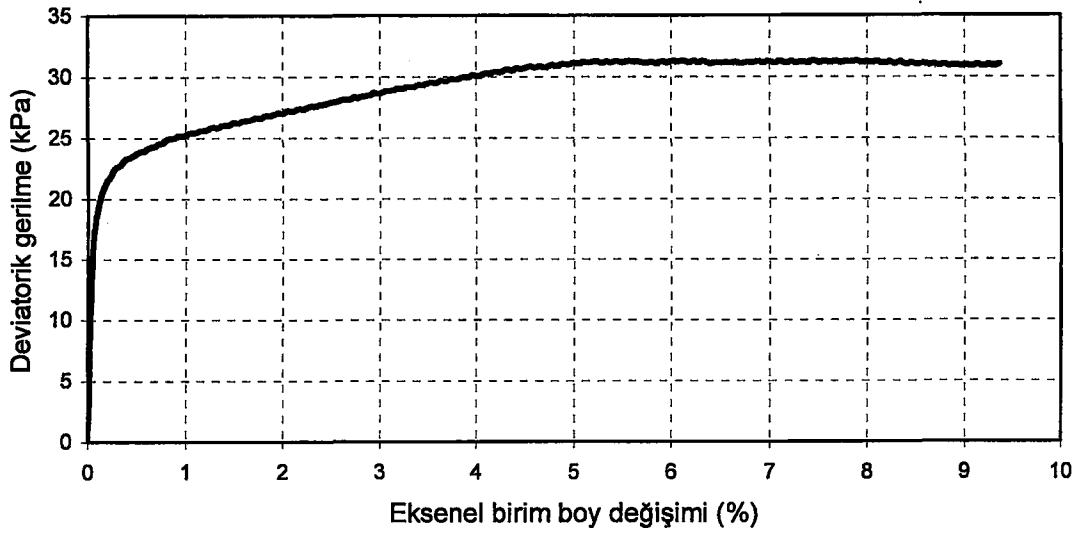
Şekil C12. YT2A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.865$ sn).



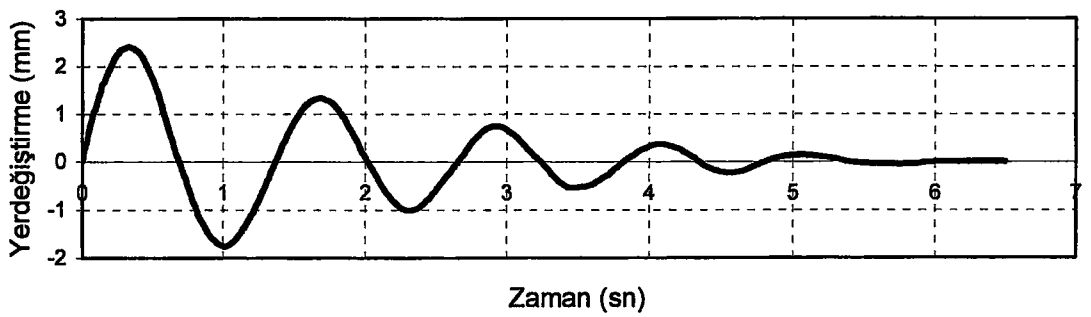
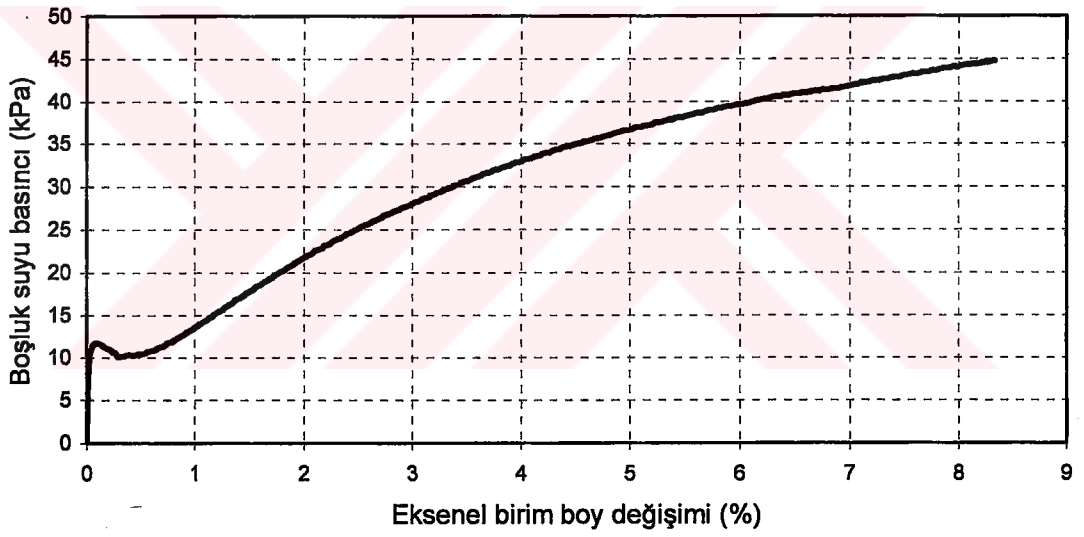
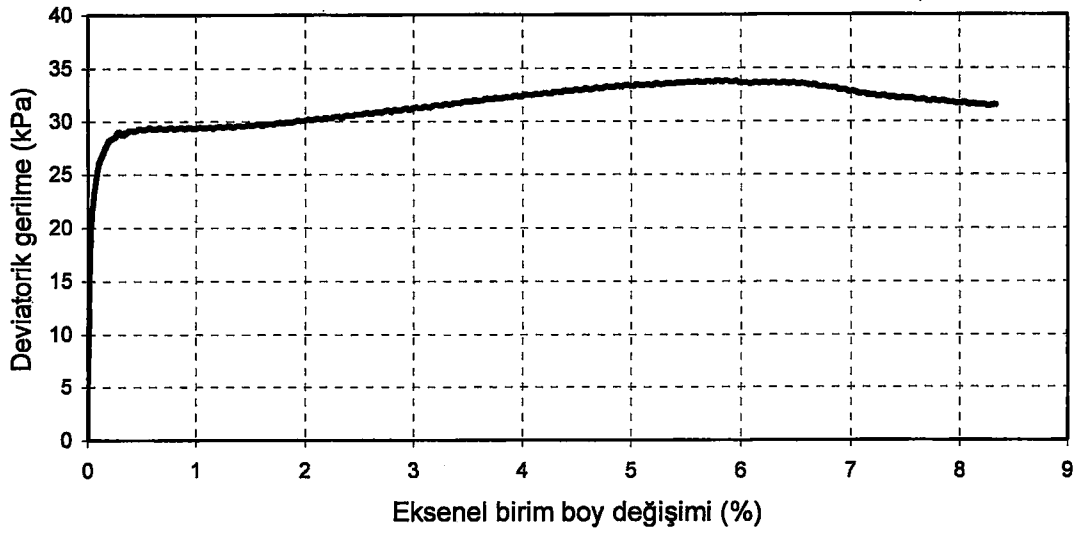
Şekil C13. YT3A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.21$ sn).



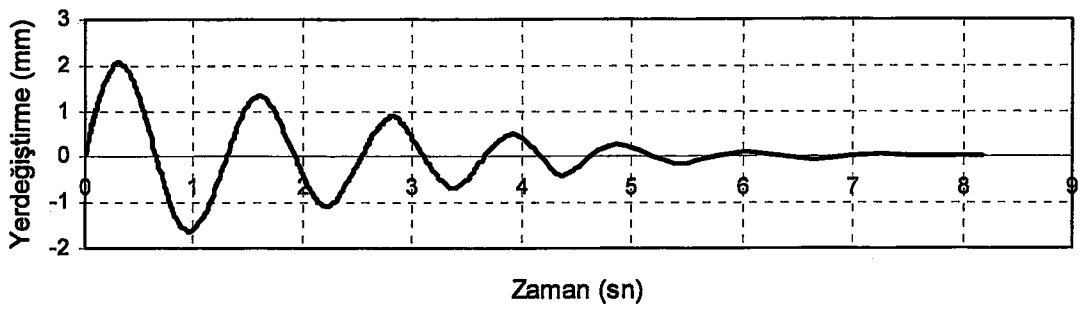
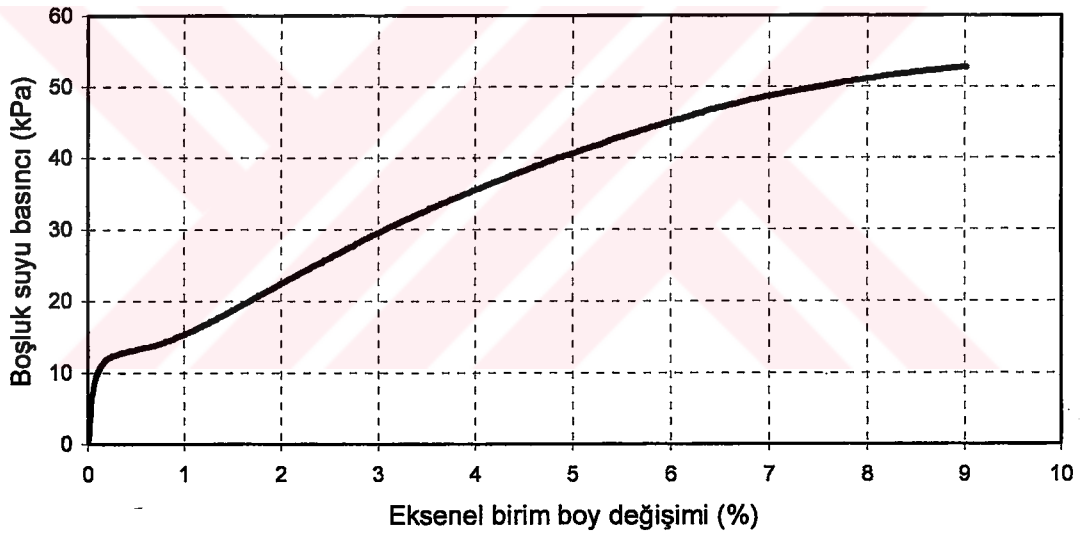
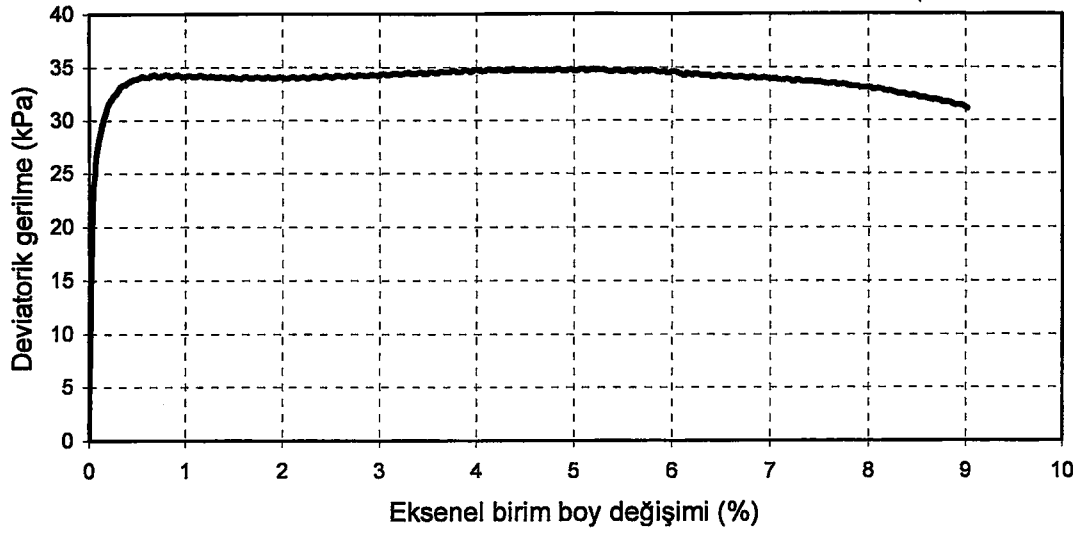
Şekil C14. YT4A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.2$ sn).



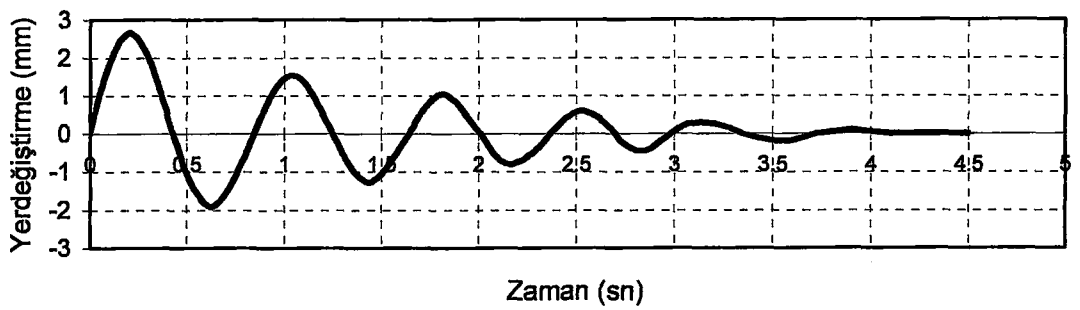
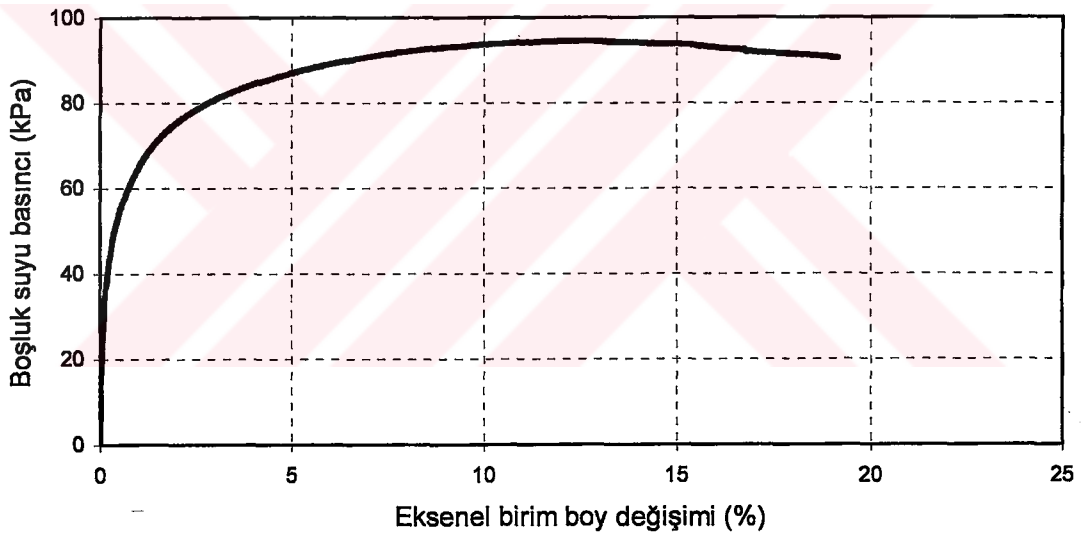
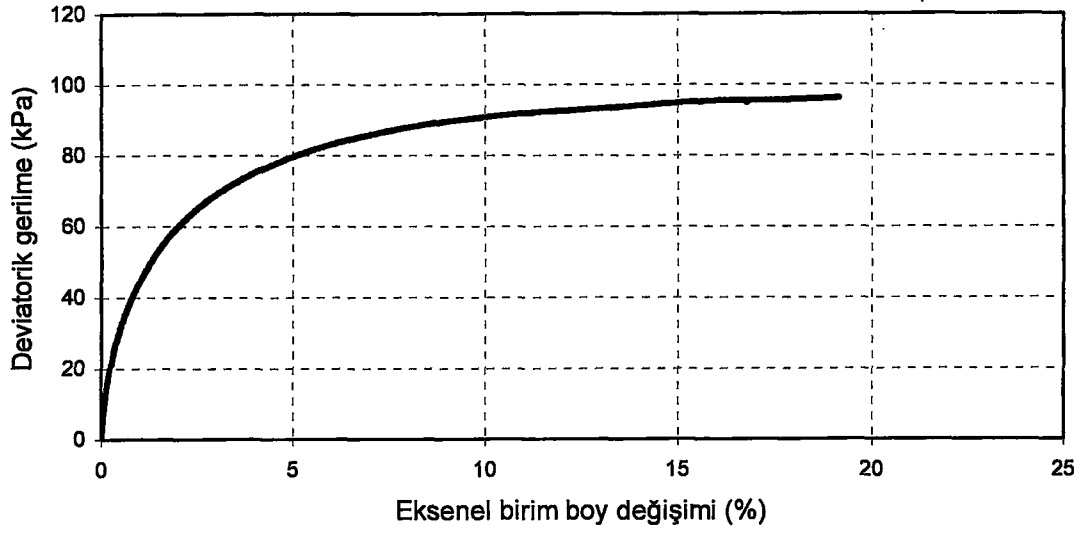
Şekil C15. YT7A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.37$ sn).



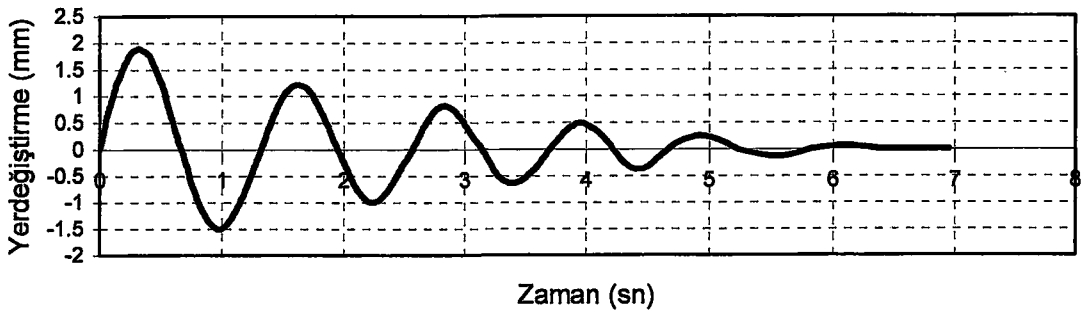
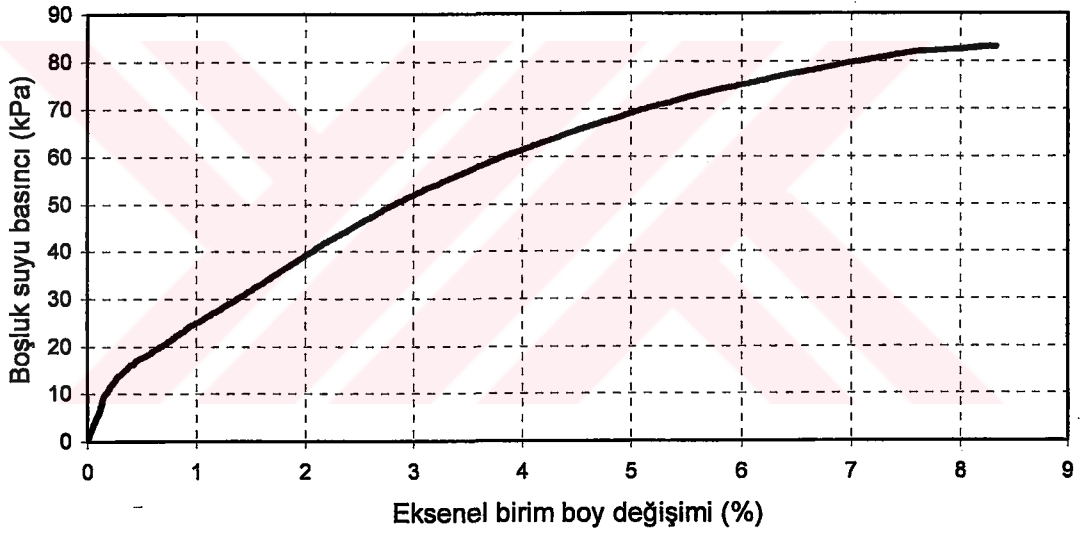
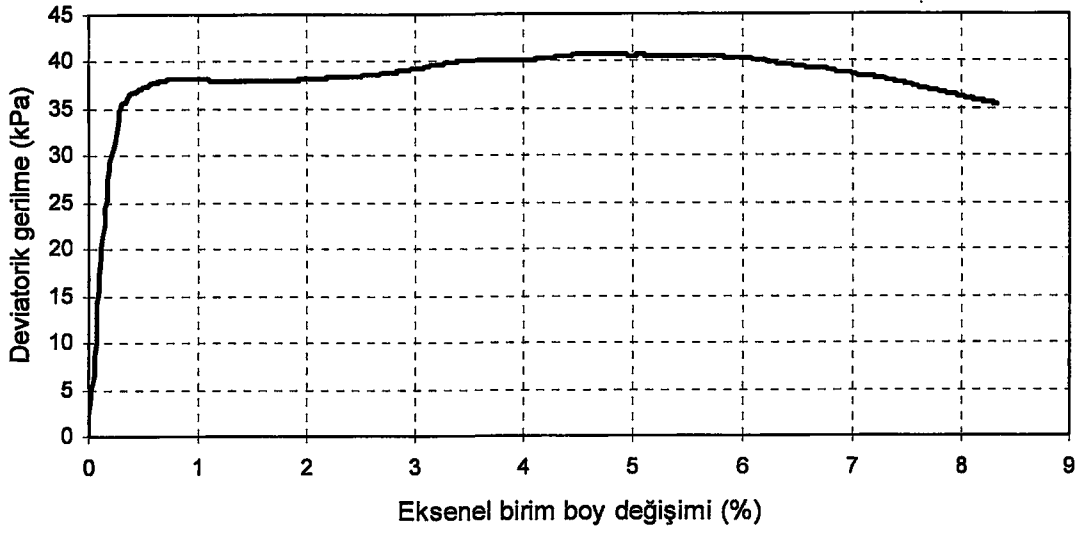
Şekil C16. YT8A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.365$ sn).



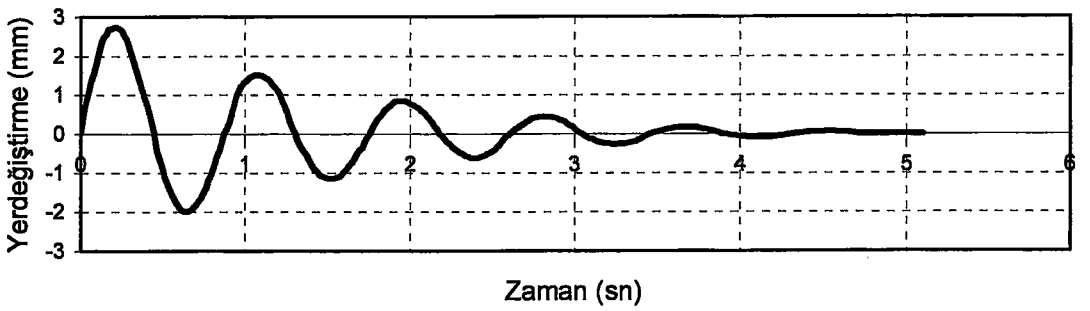
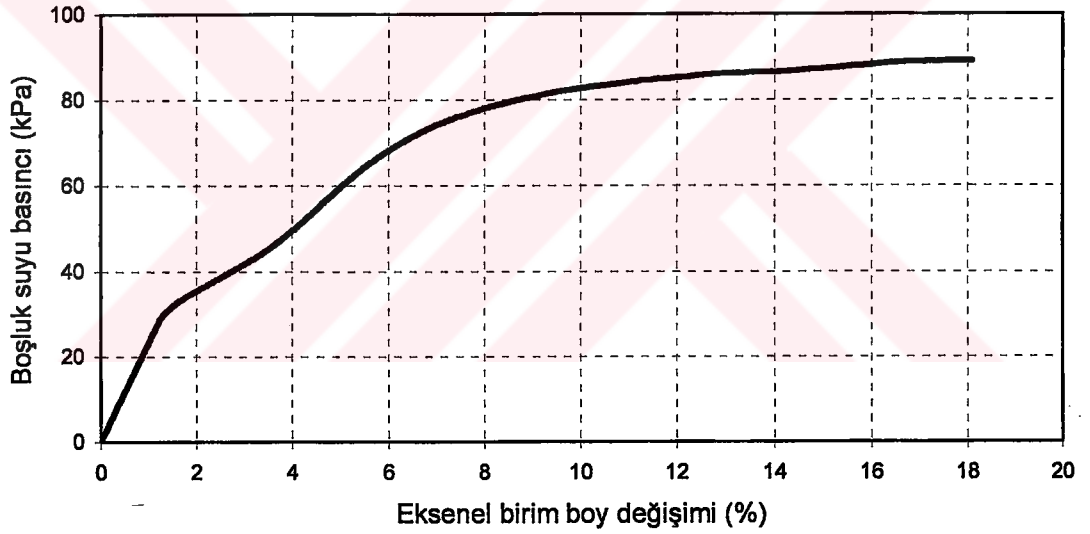
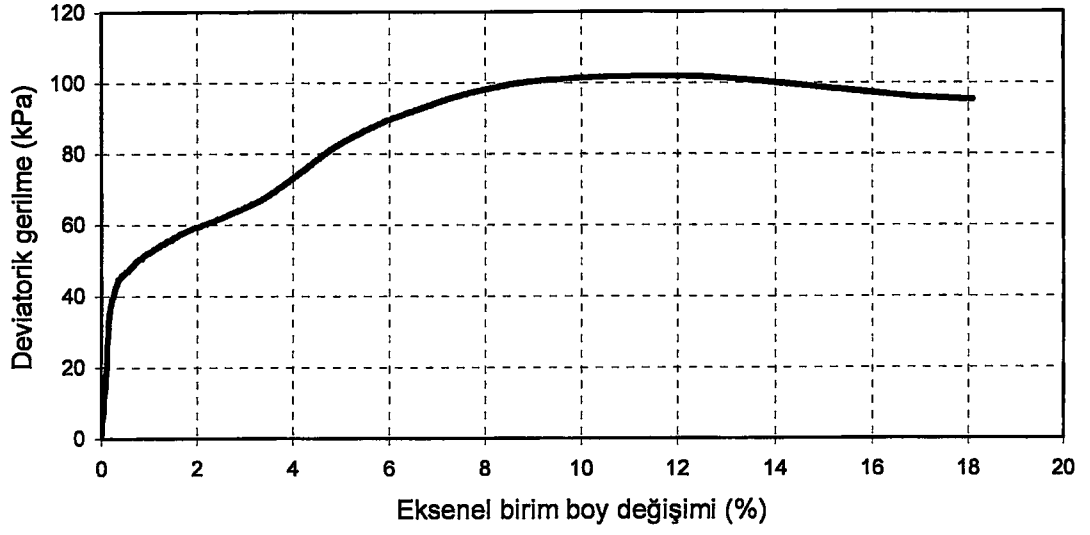
Şekil C17. YT11A deneyine ait gerilme şekil değışirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.29$ sn).



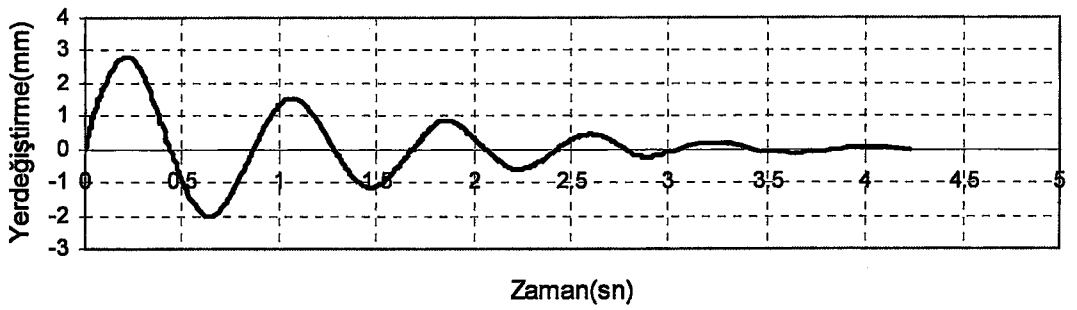
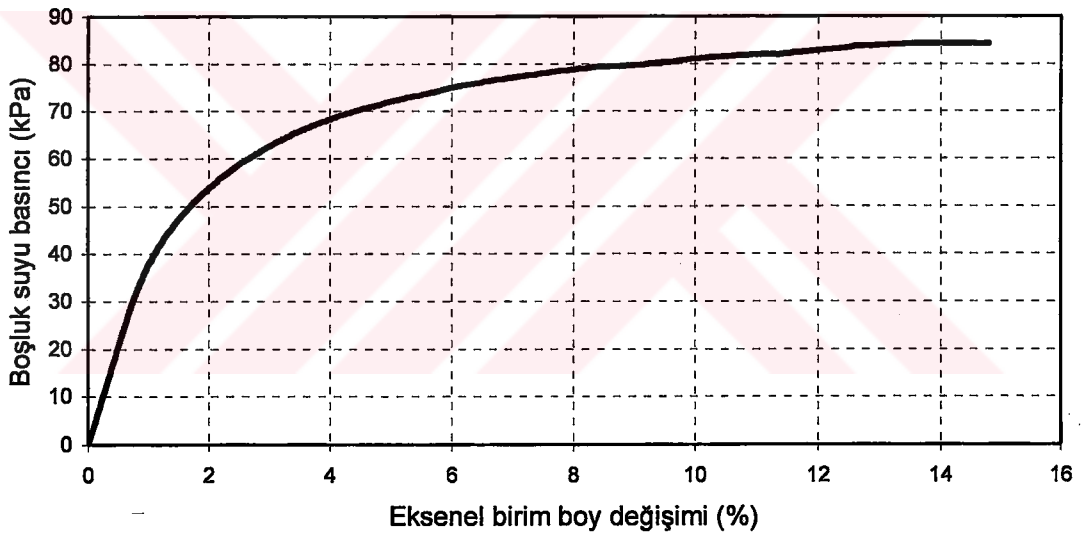
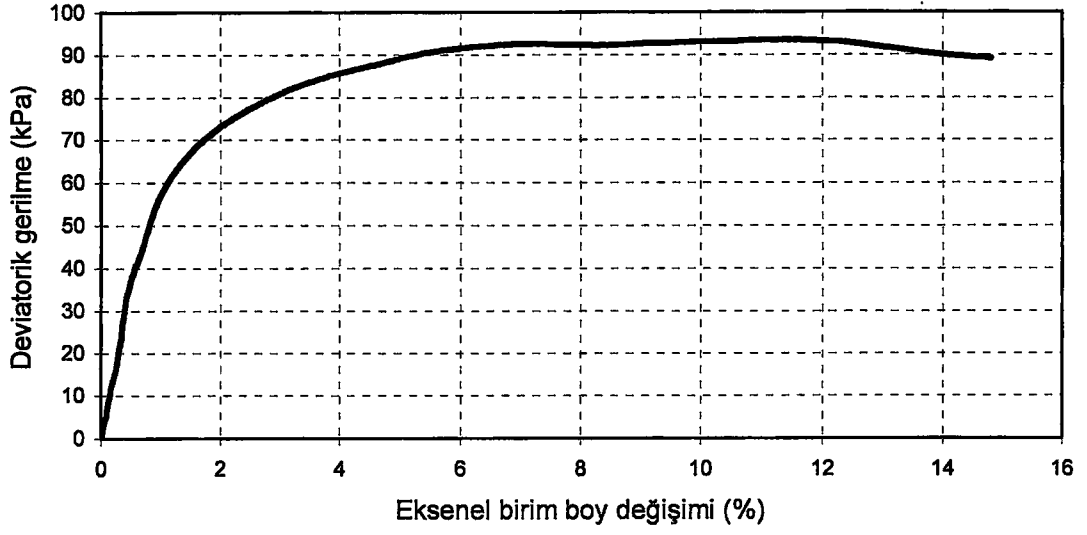
Şekil C18. YT14A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.845$ sn).



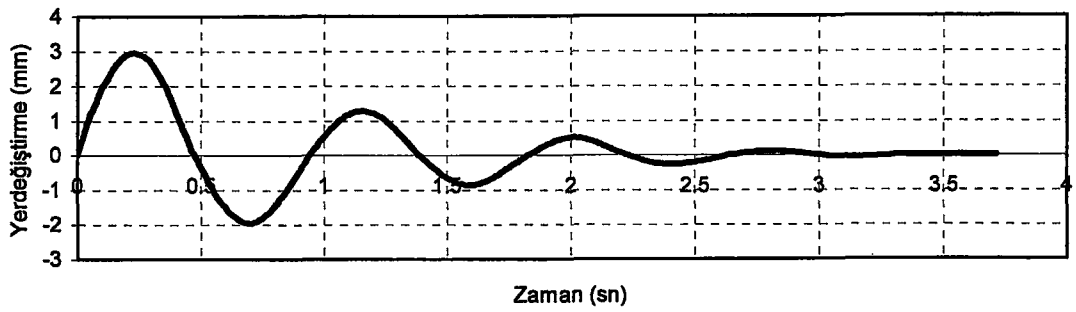
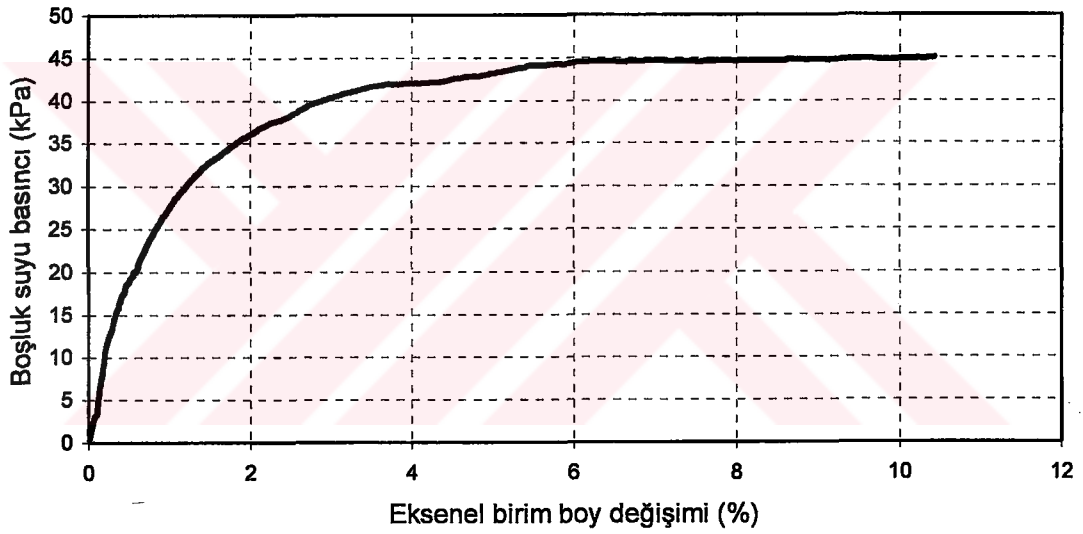
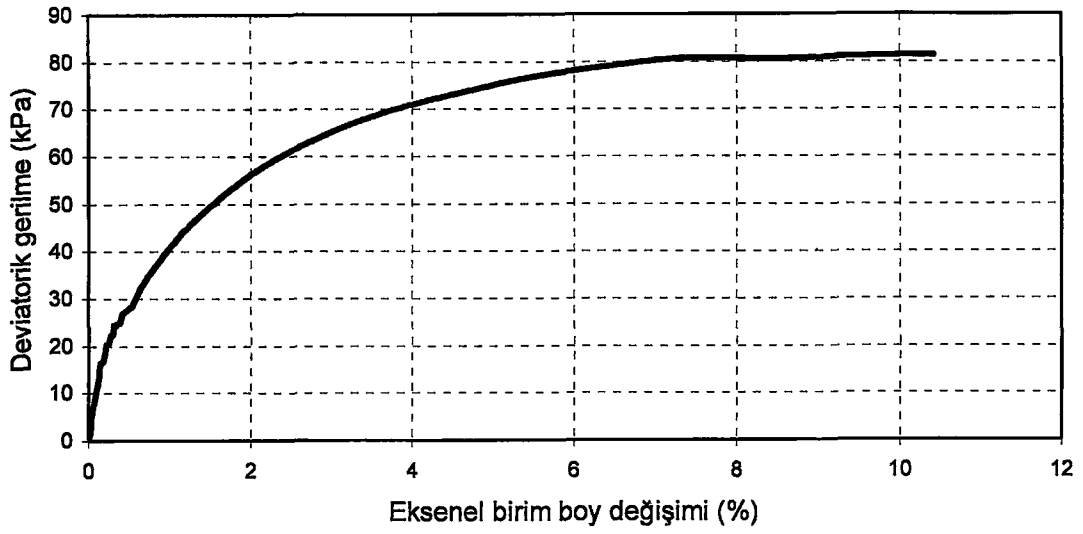
şekil C19. YT15A deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşlaksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.3$ sn).



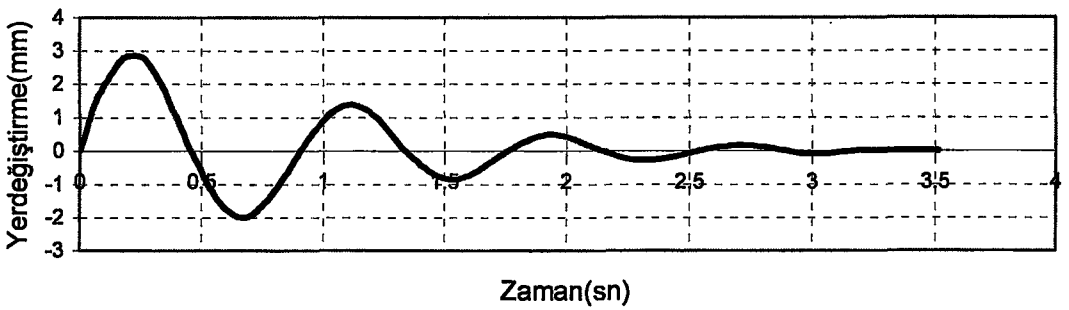
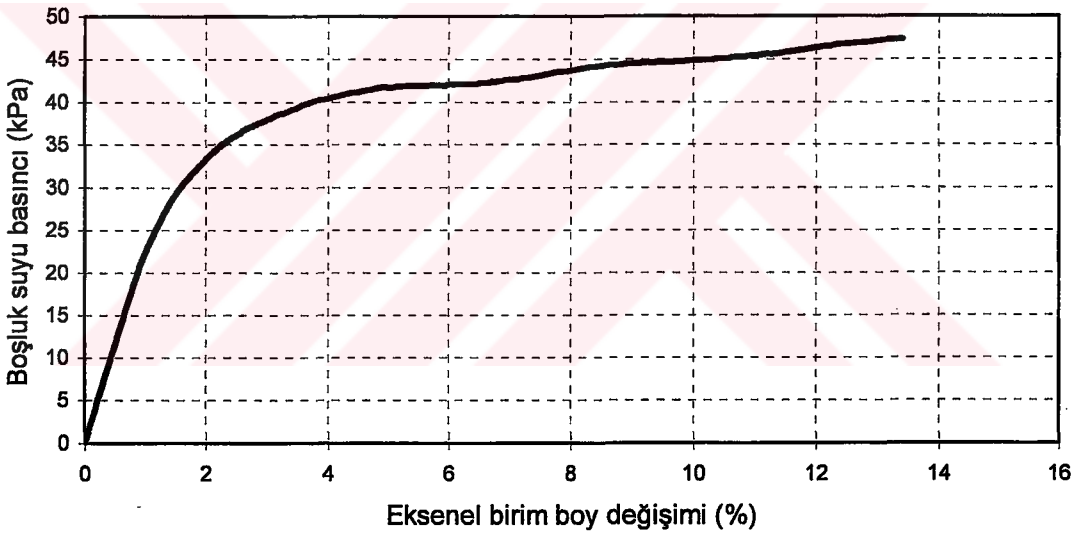
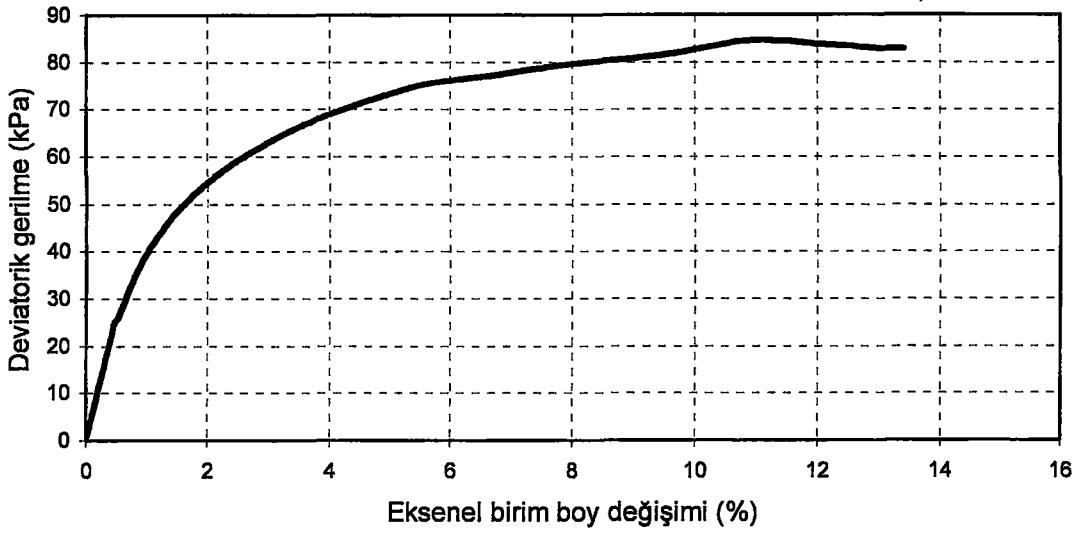
Şekil C20. YT32 deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.855$ sn).



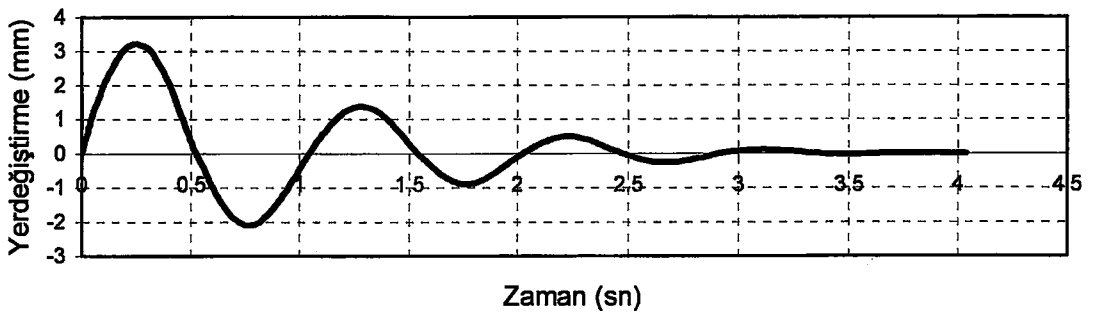
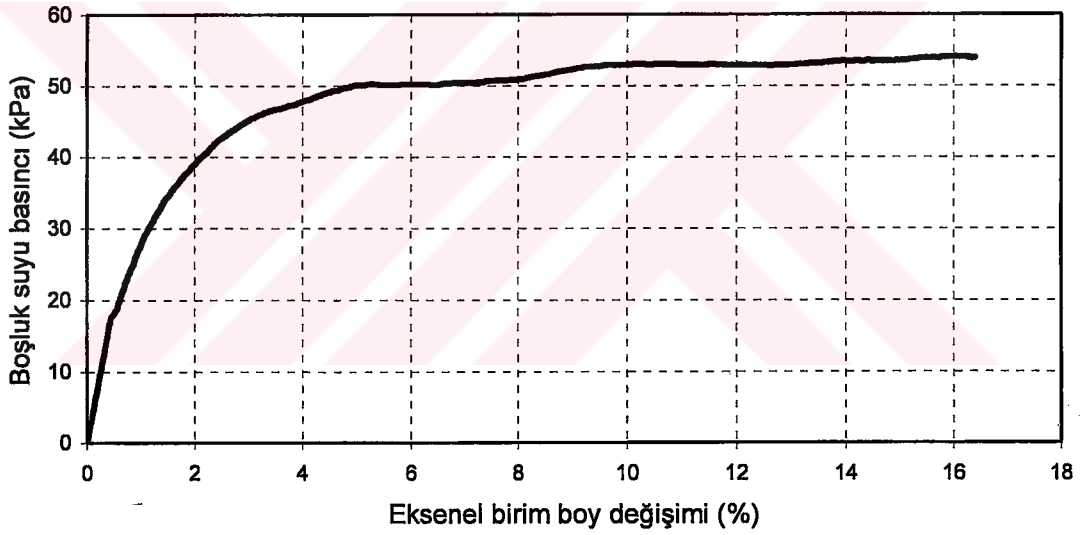
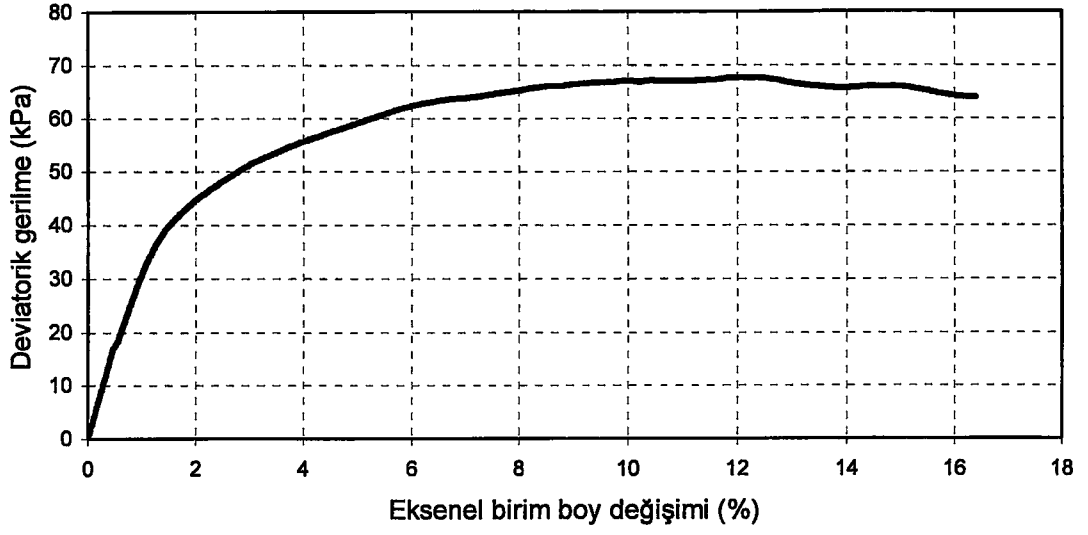
Şekil C21. YT33 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.87$ sn).



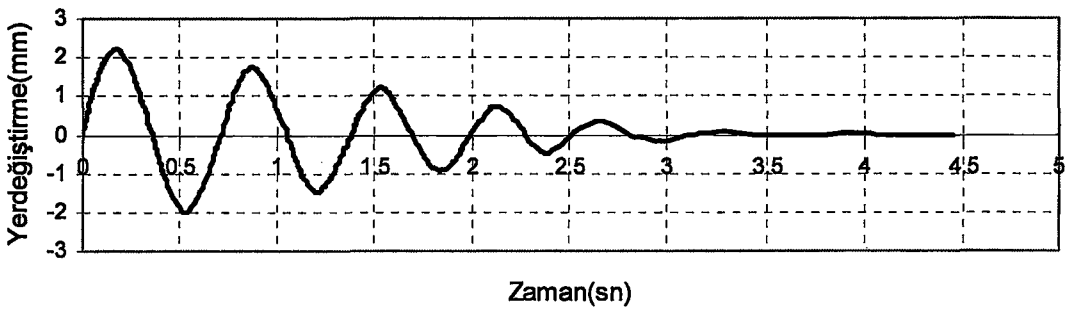
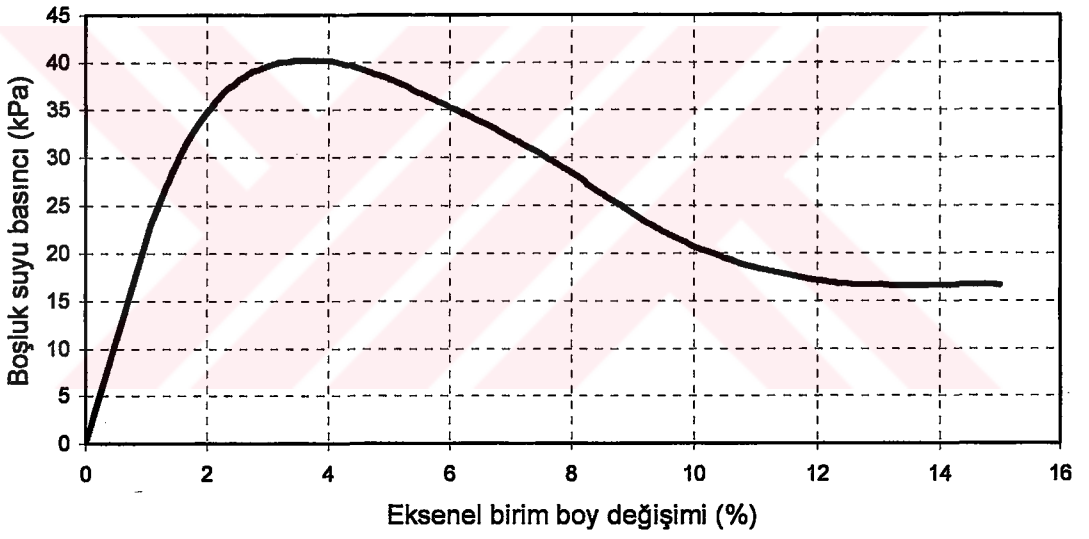
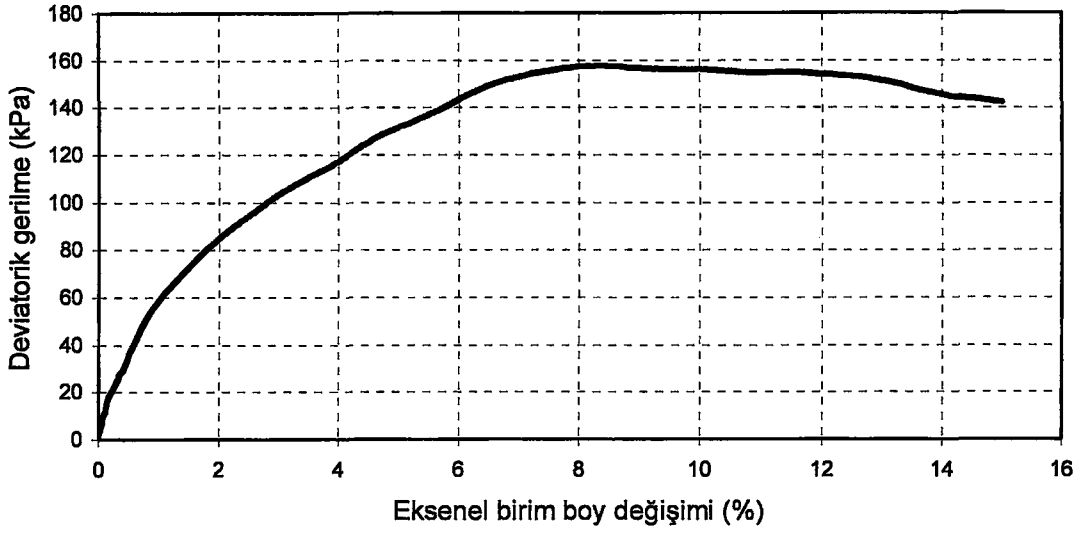
Şekil C22. Y2 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.94$ sn).



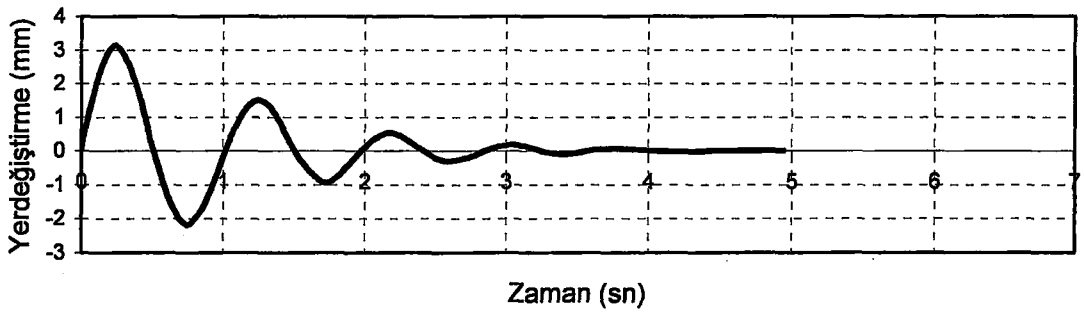
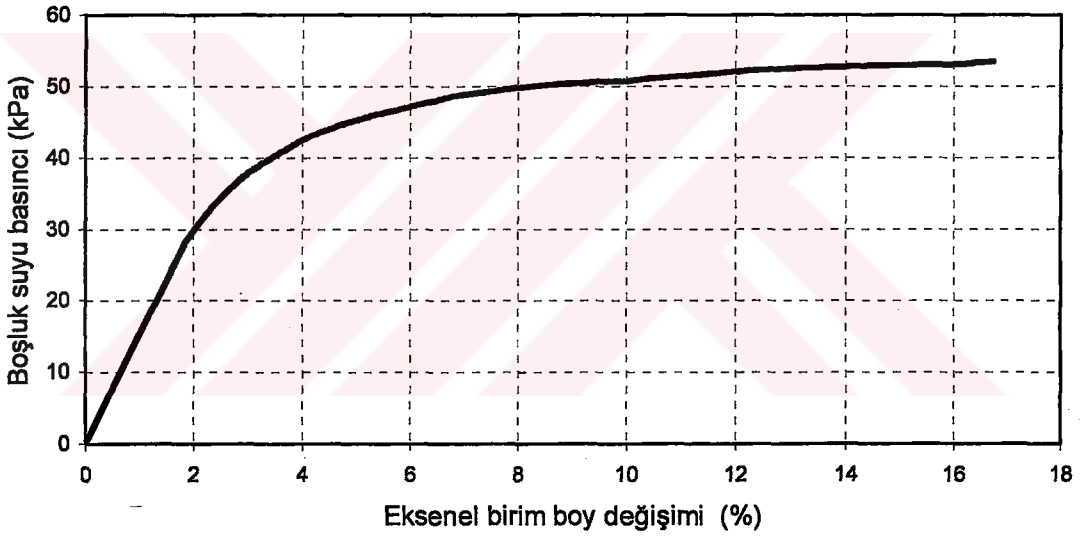
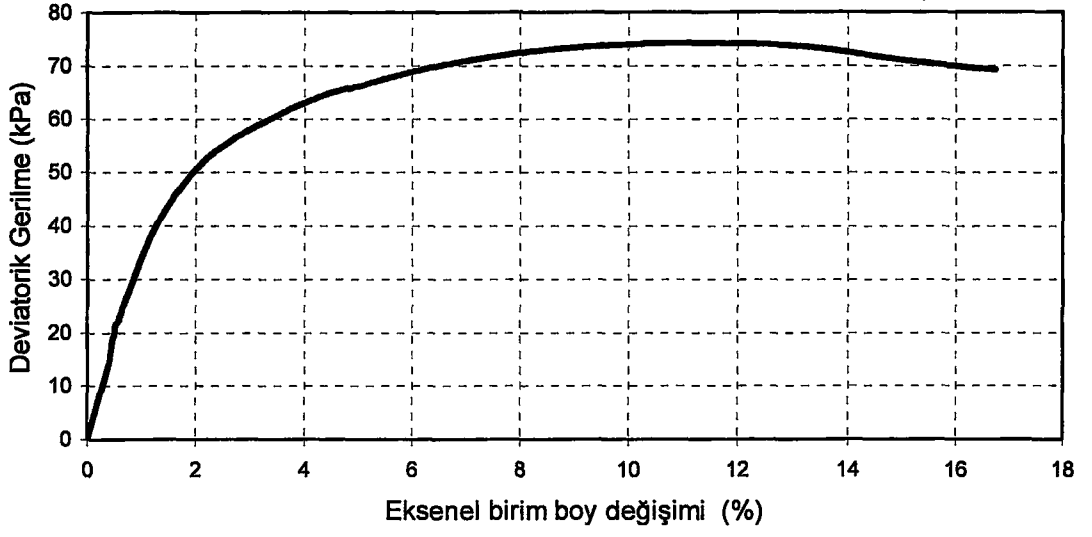
Şekil C23. Y3 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.905$ sn).



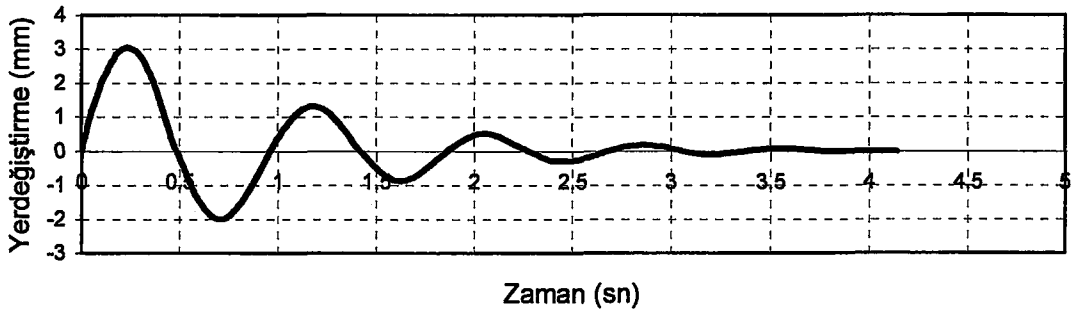
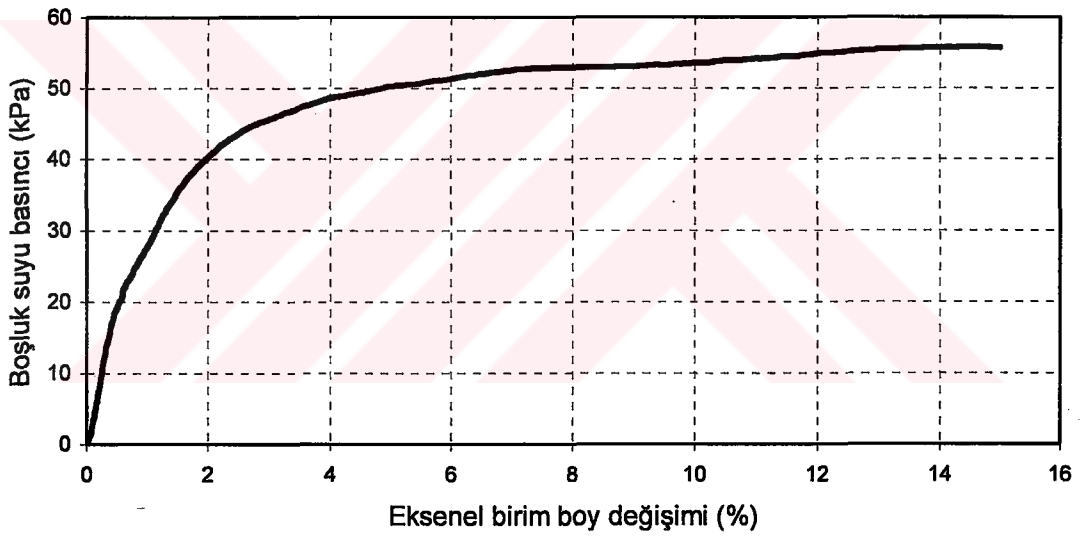
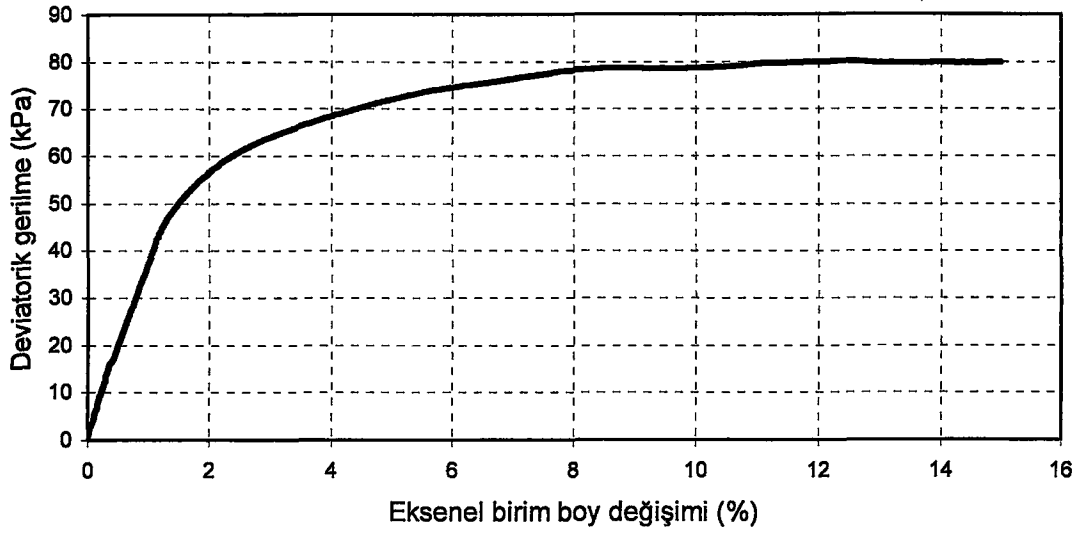
Şekil C24. Y15Y deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.05$ sn).



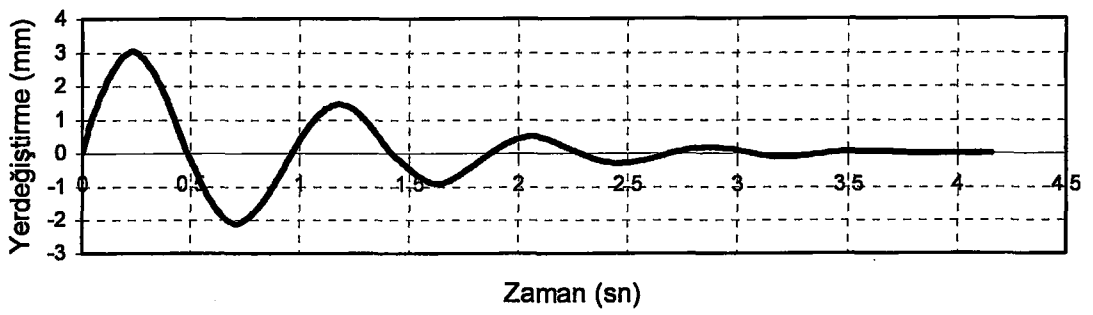
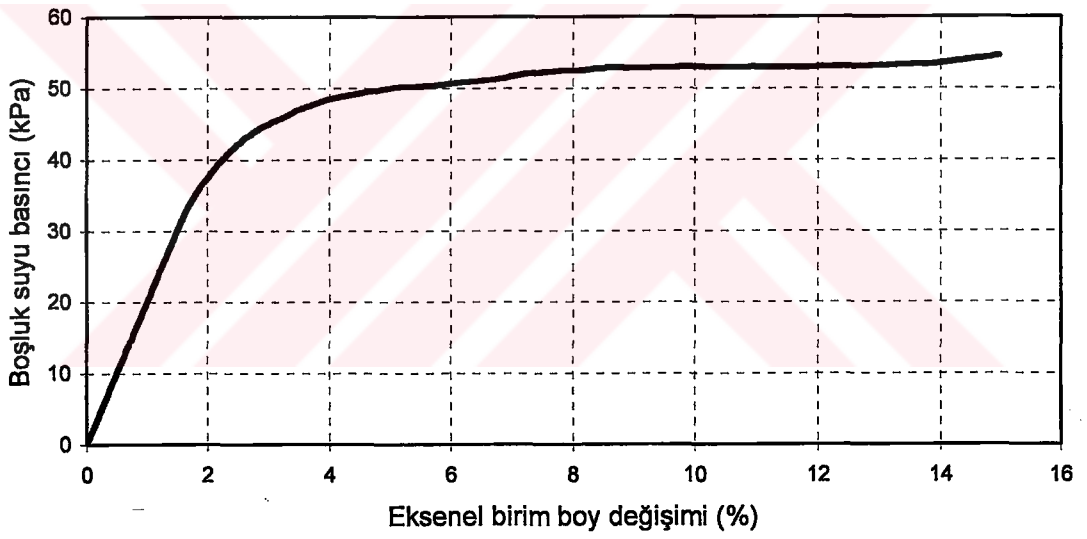
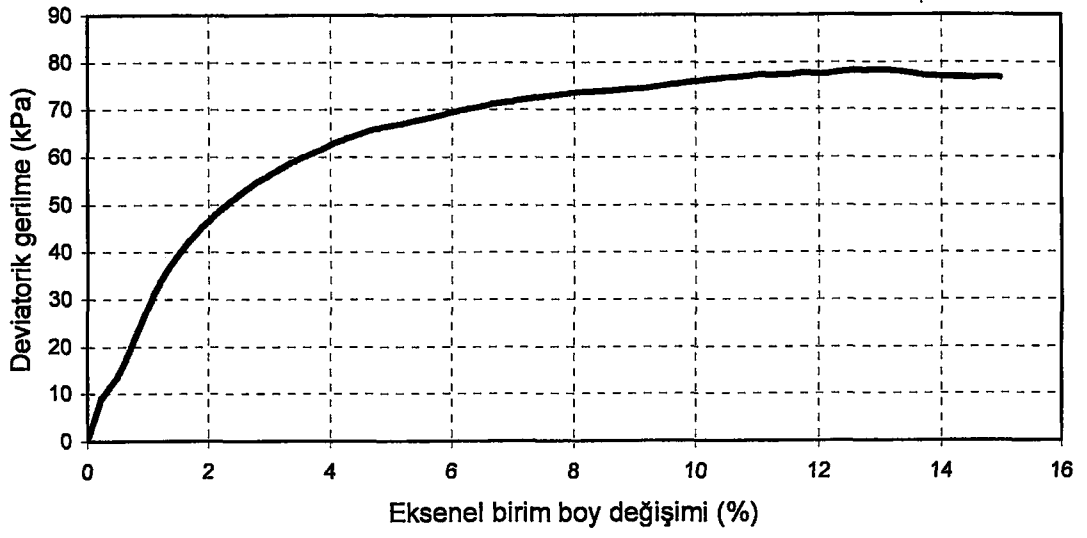
Şekil C25. Y17 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.67$ sn).



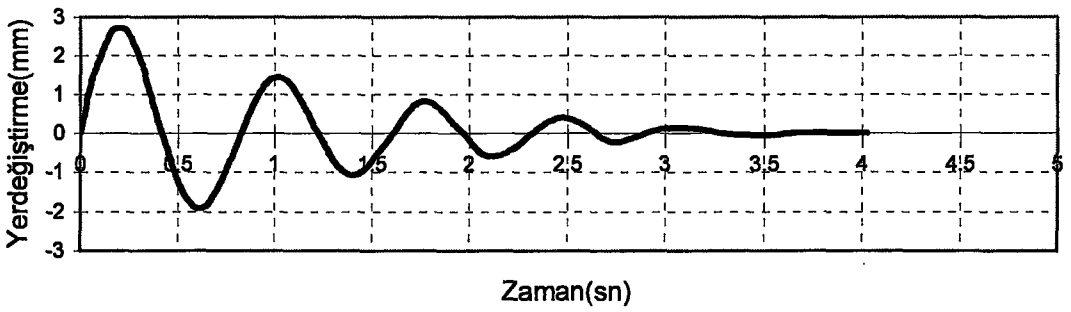
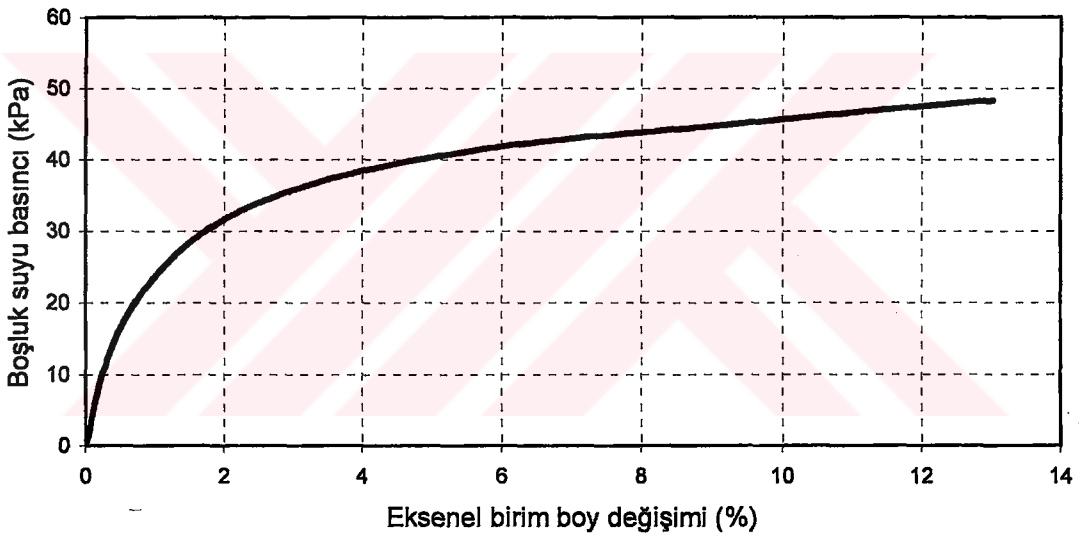
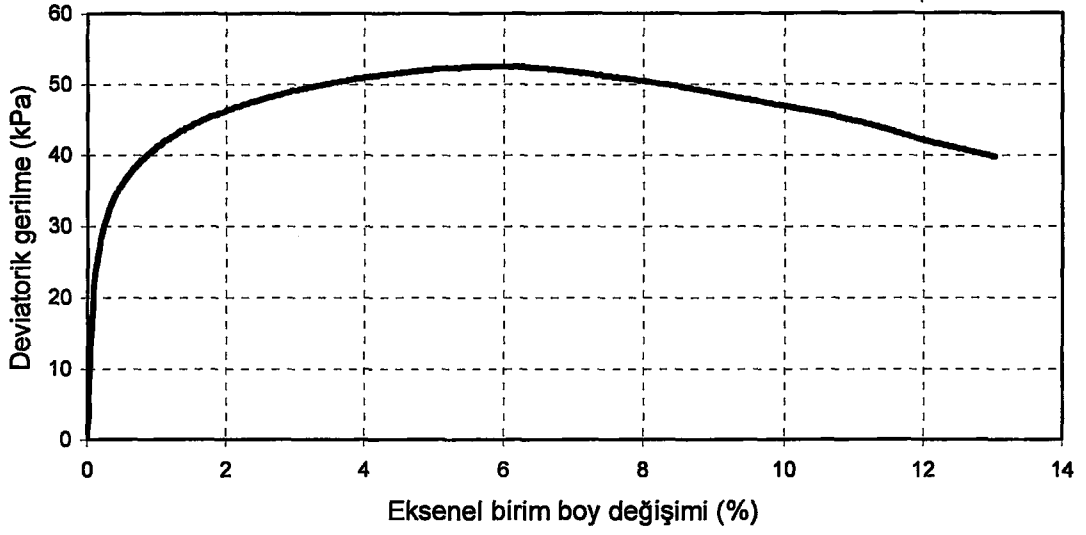
Şekil C26. YT19 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.995$ sn).



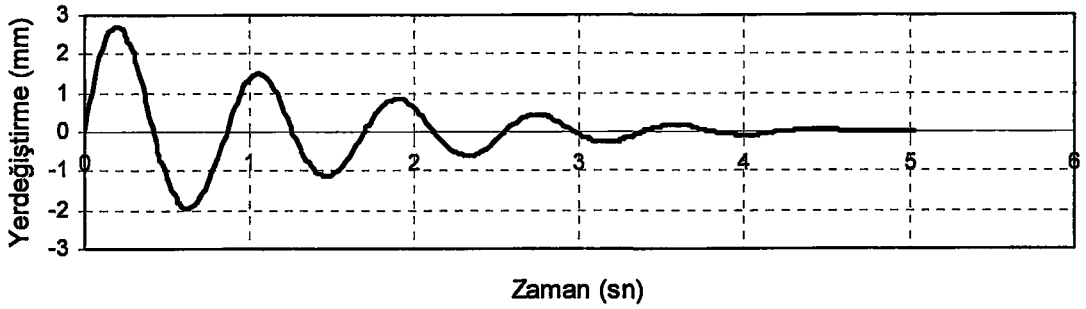
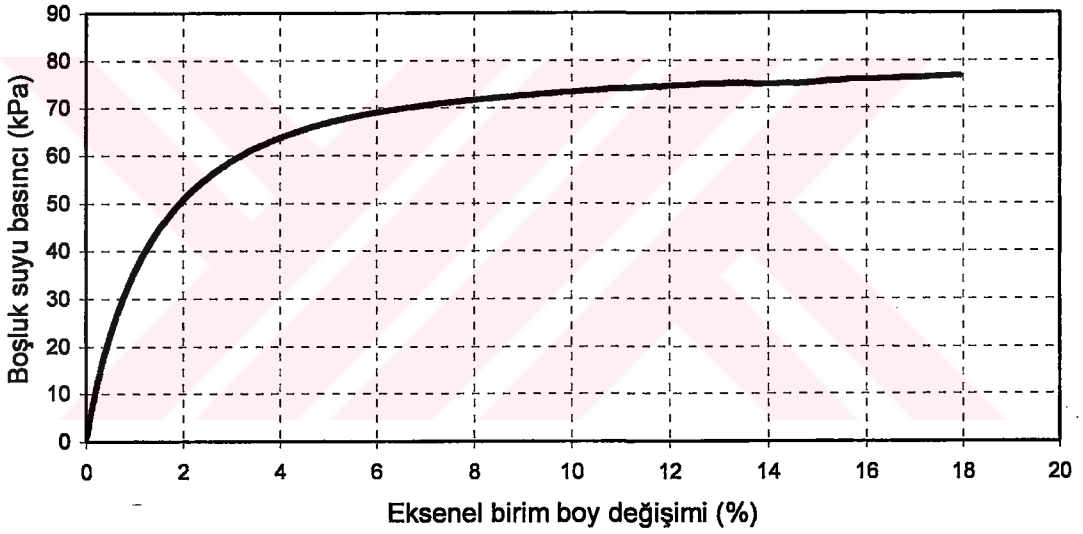
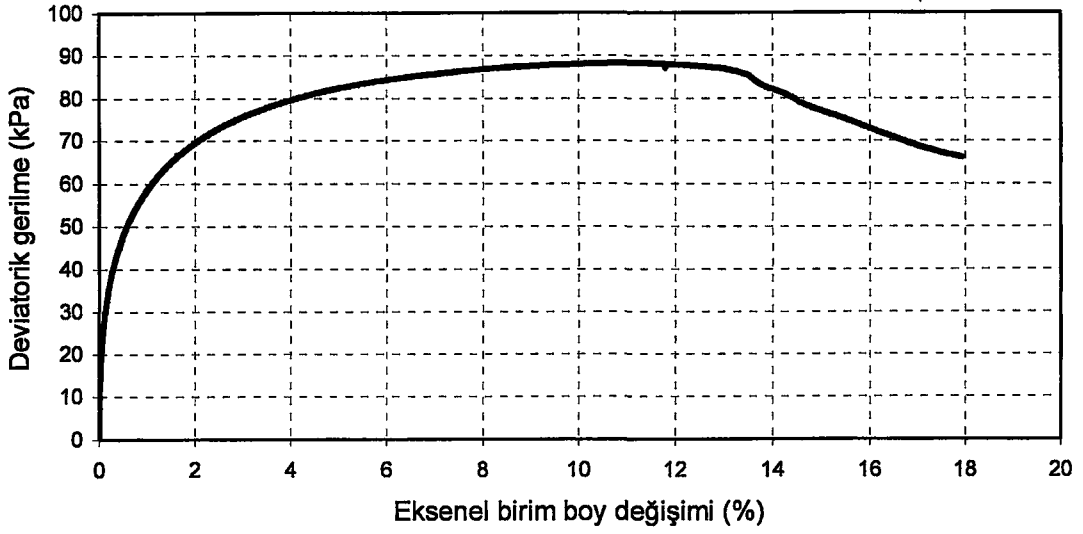
Şekil C27. YT21 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.955$ sn).



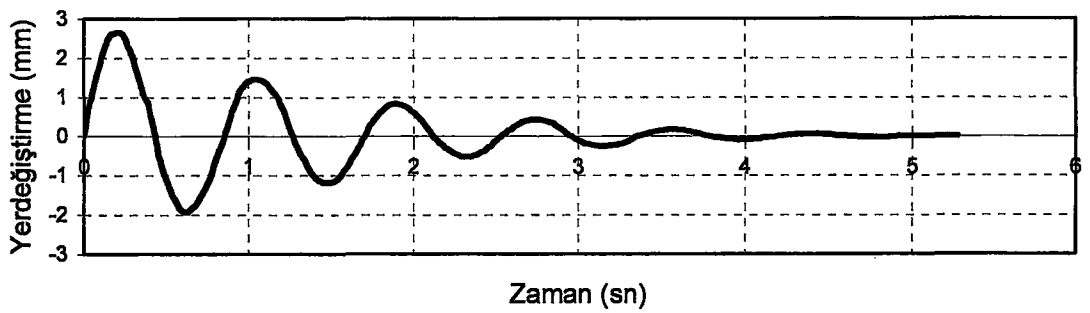
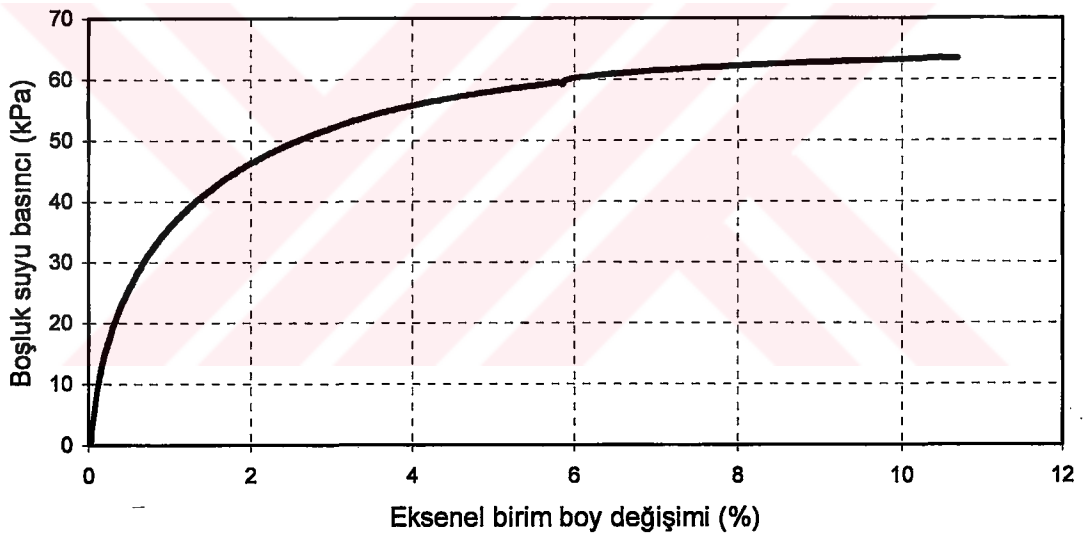
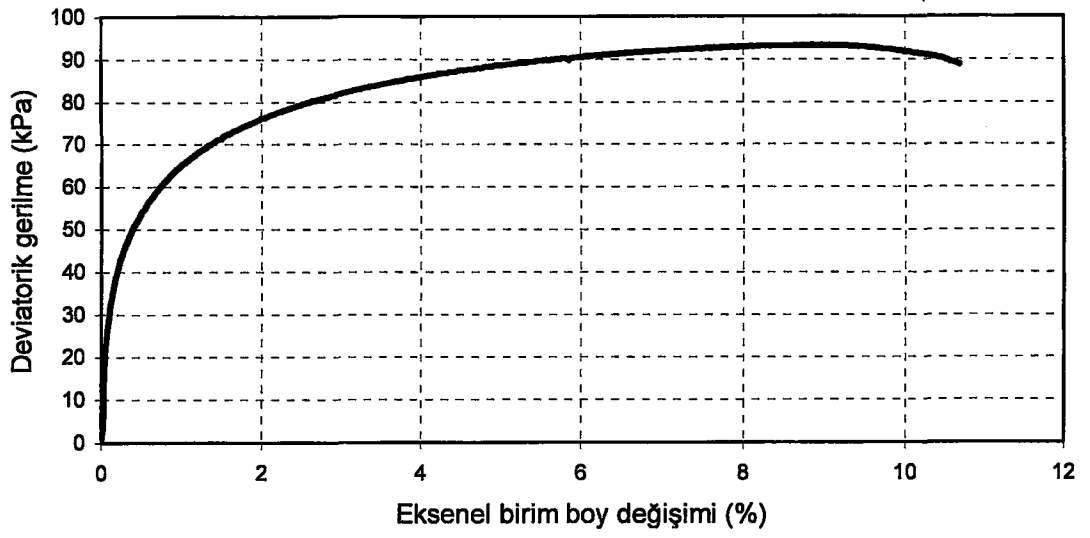
Şekil C28. YT23 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.96$ sn).



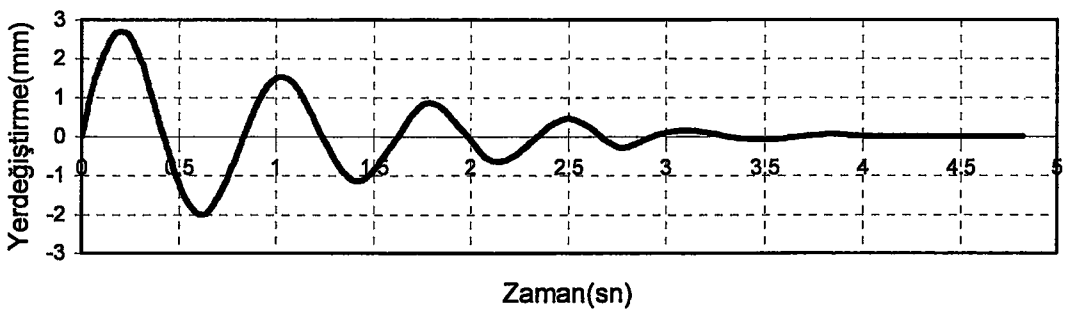
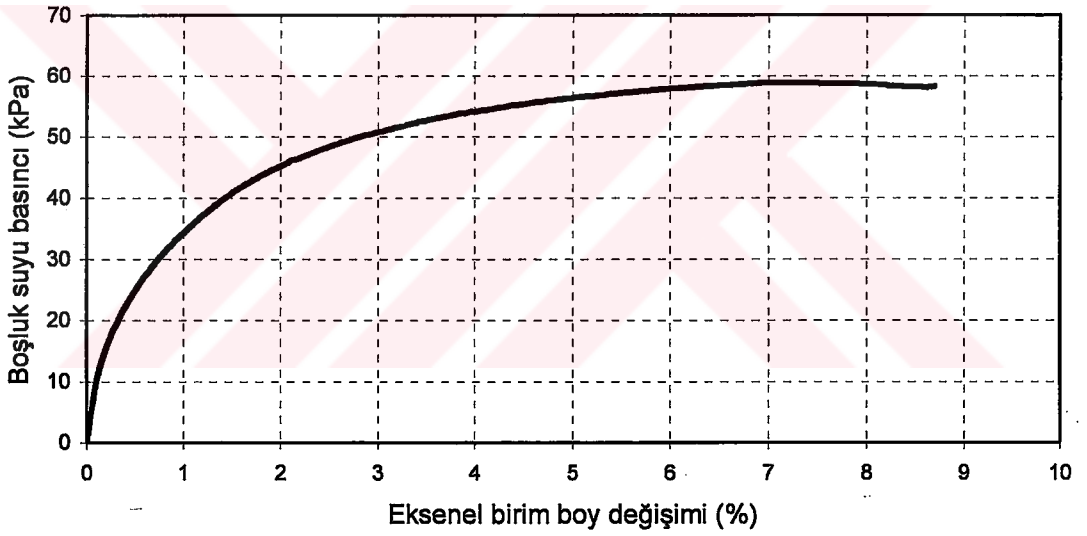
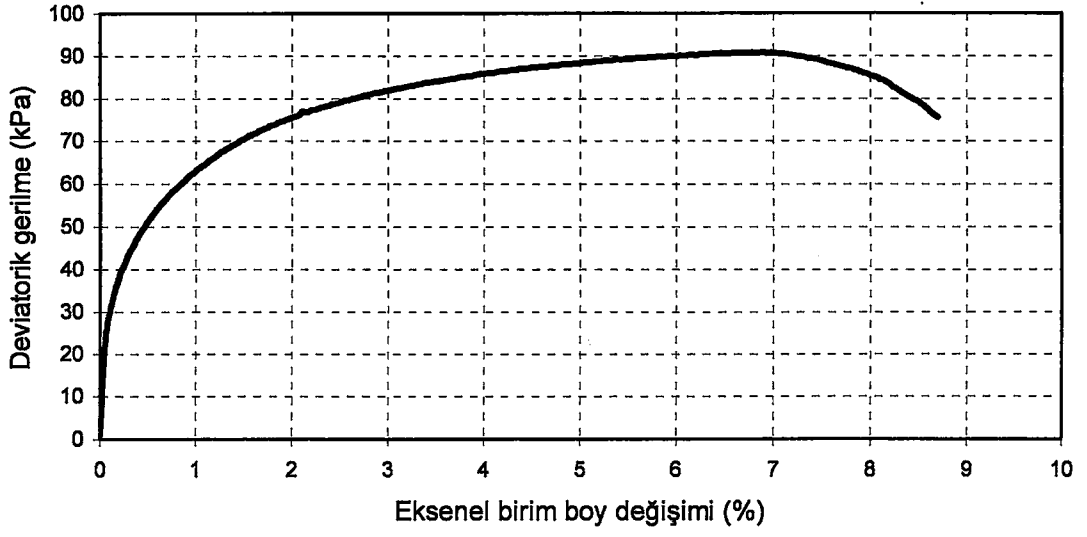
Şekil C29. YT1B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.825$ sn).



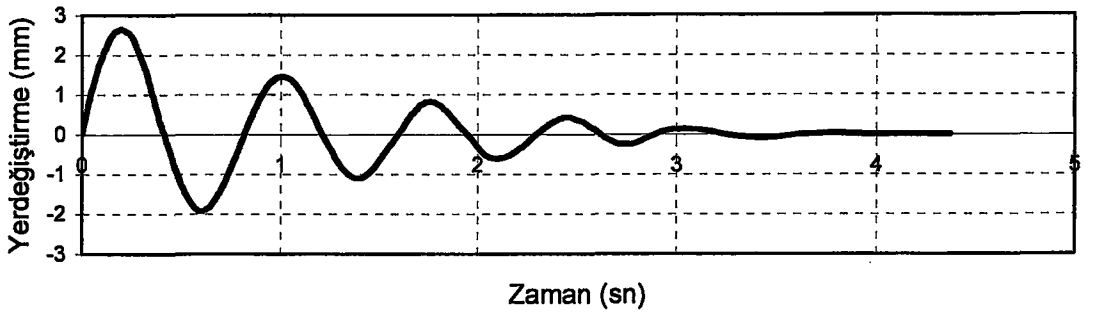
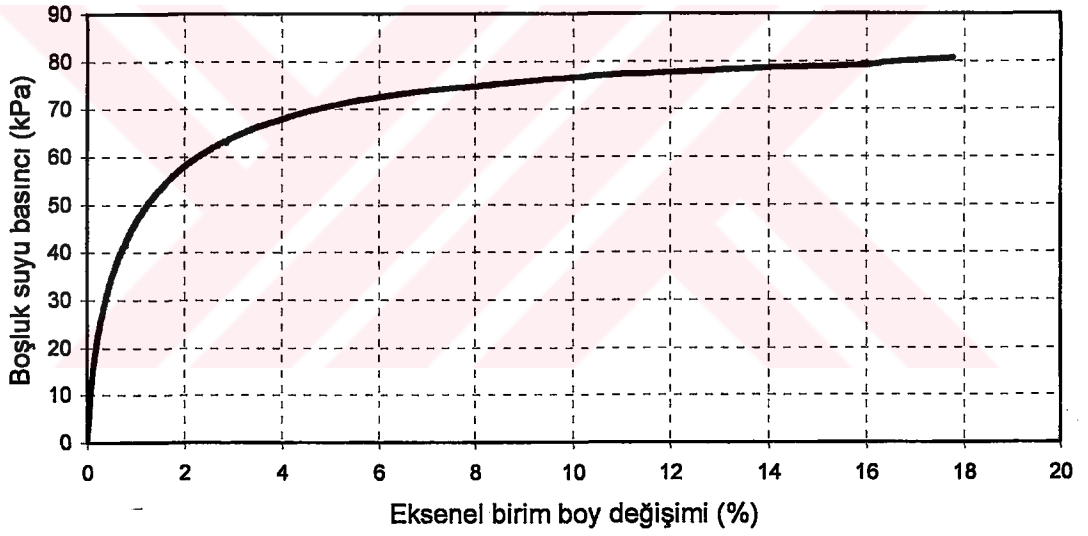
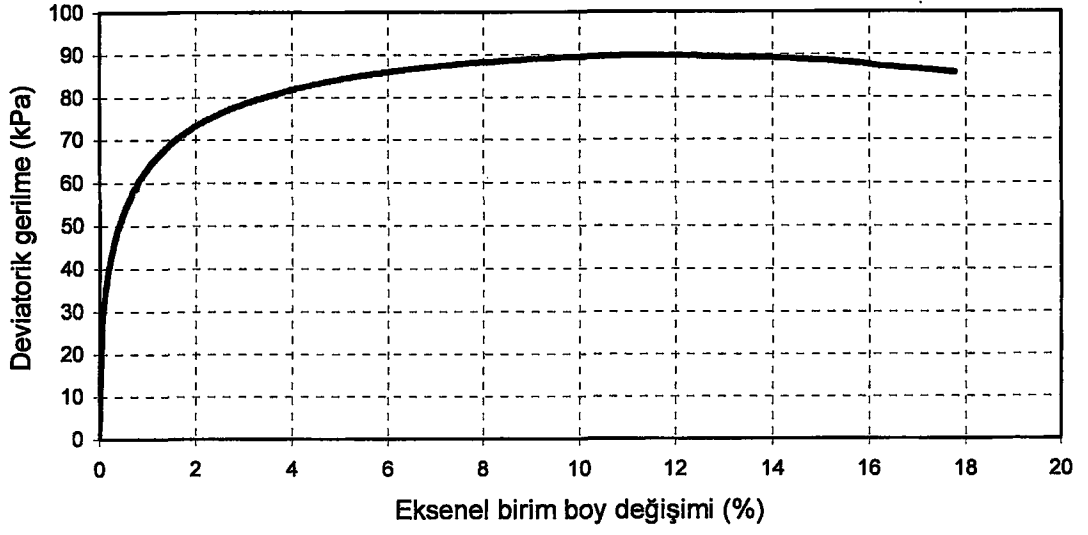
Şekil C30. YT2B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.875$ sn).



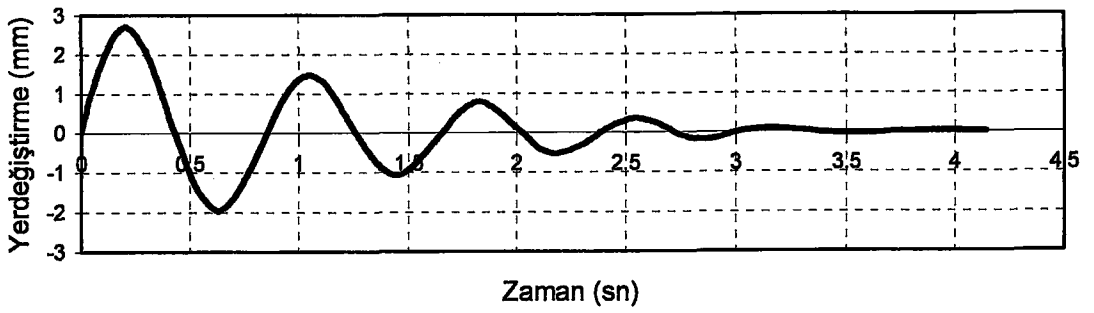
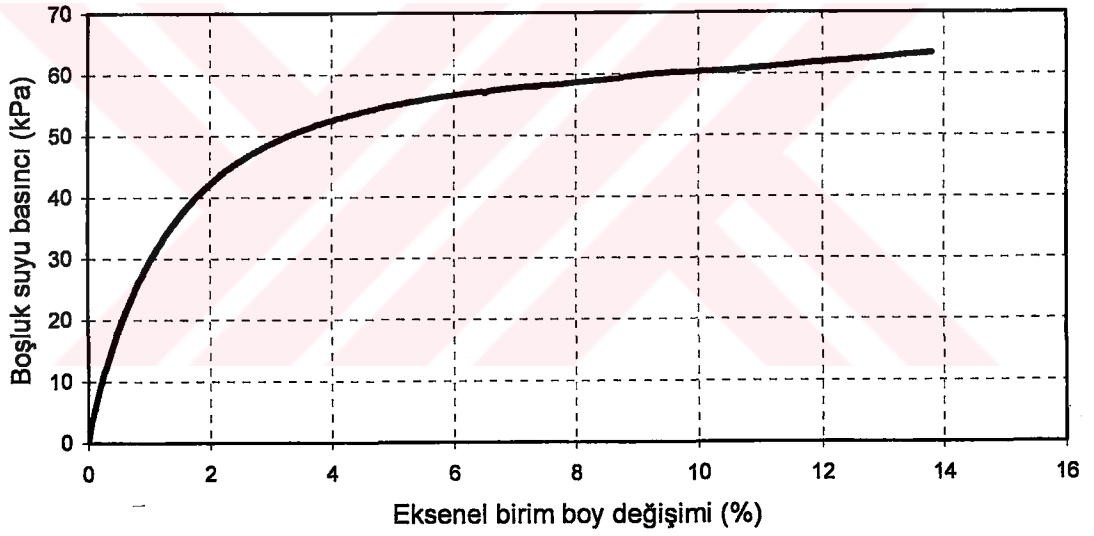
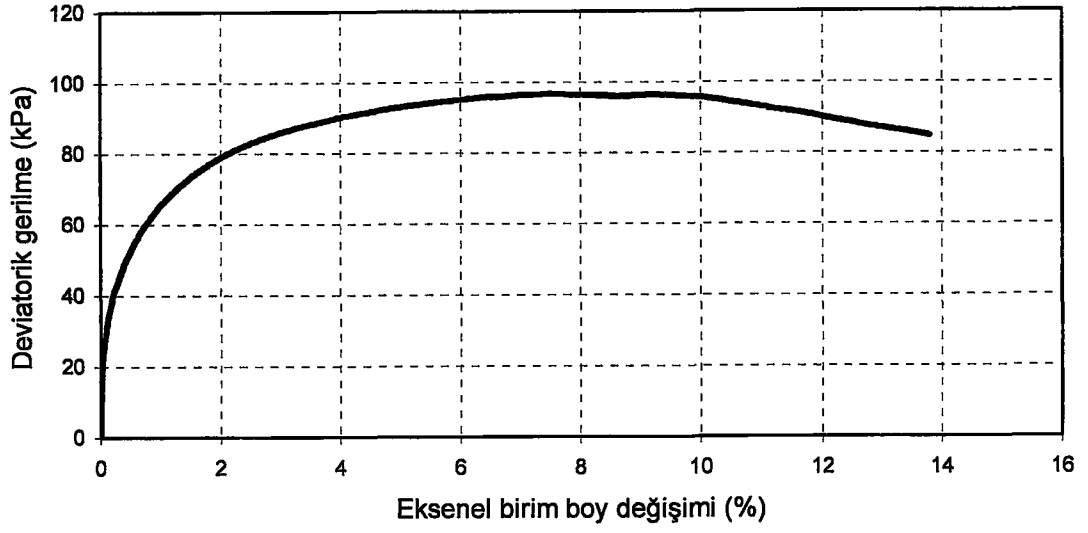
Şekil C31. YT3B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.83$ sn).



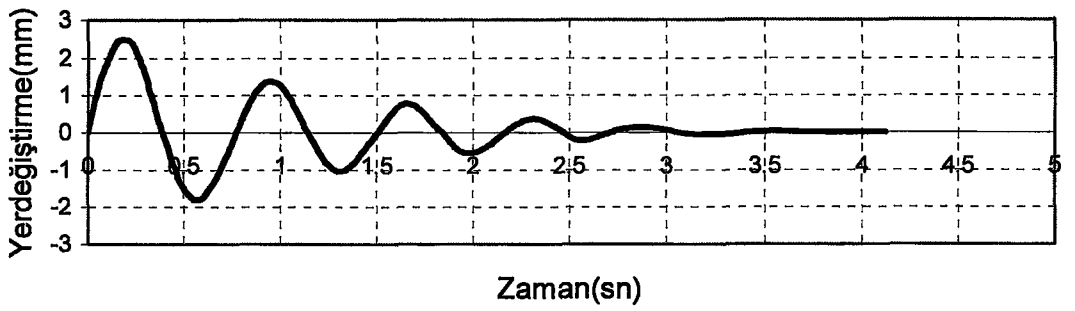
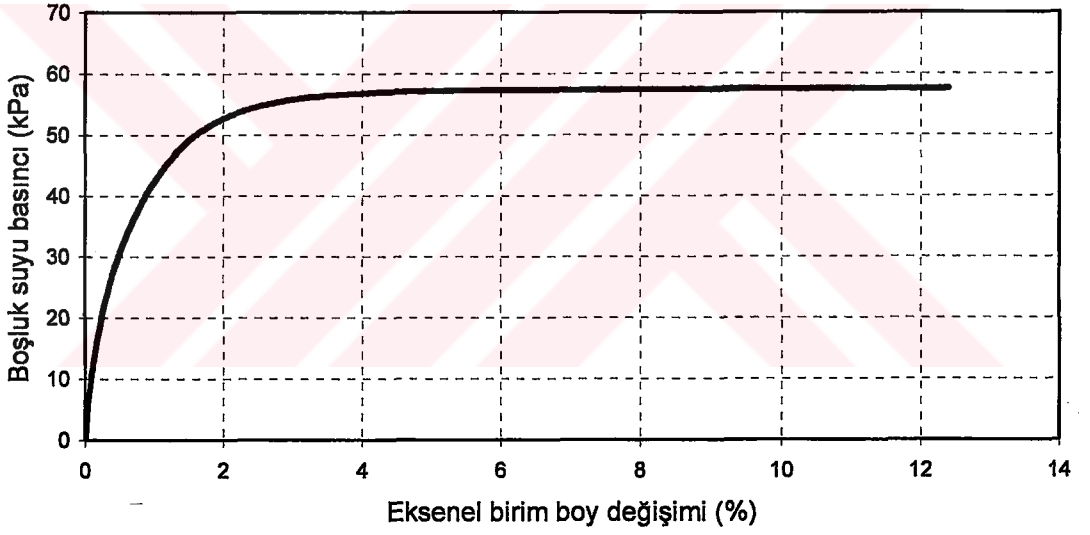
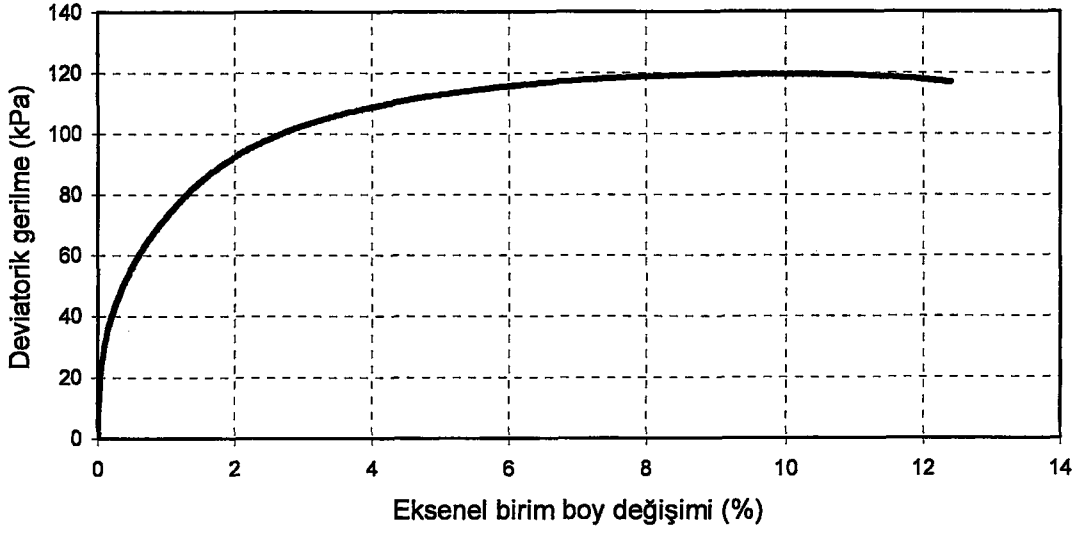
Şekil C32. YT4B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.835$ sn).



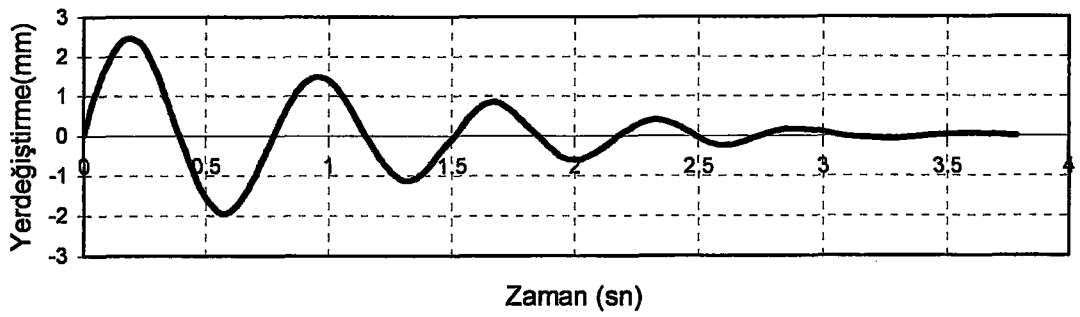
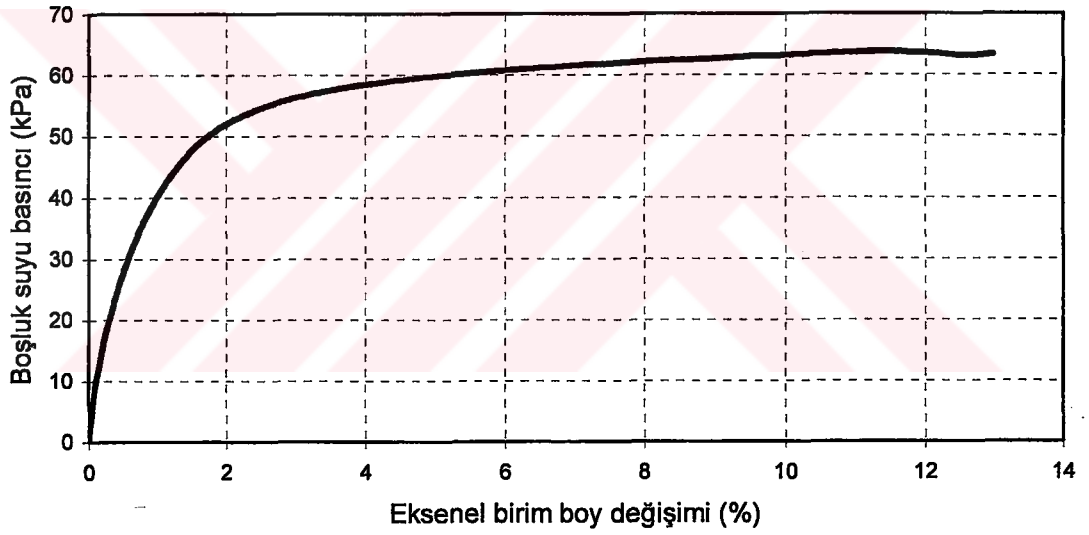
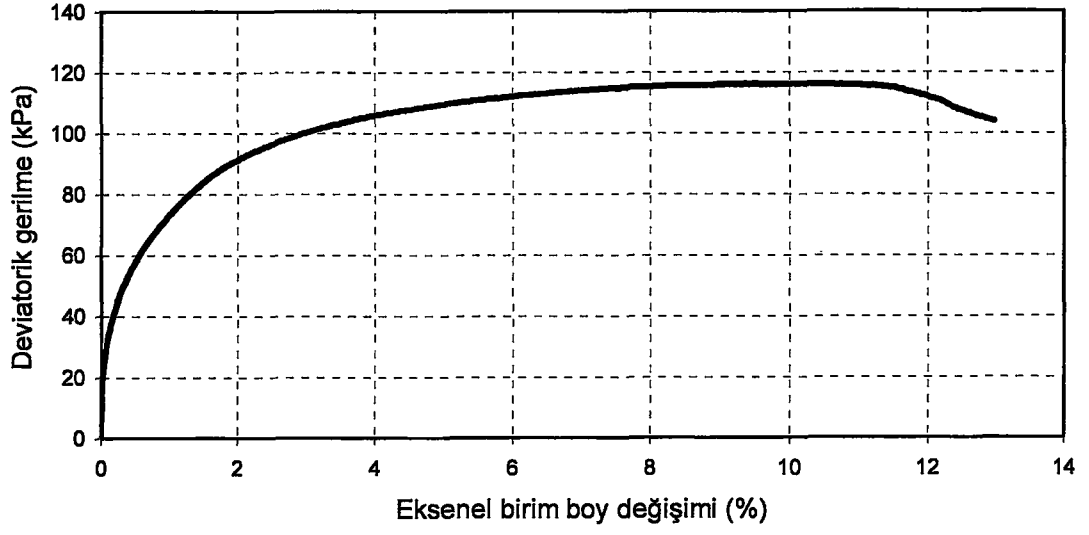
Şekil C33. YT5B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.815$ sn).



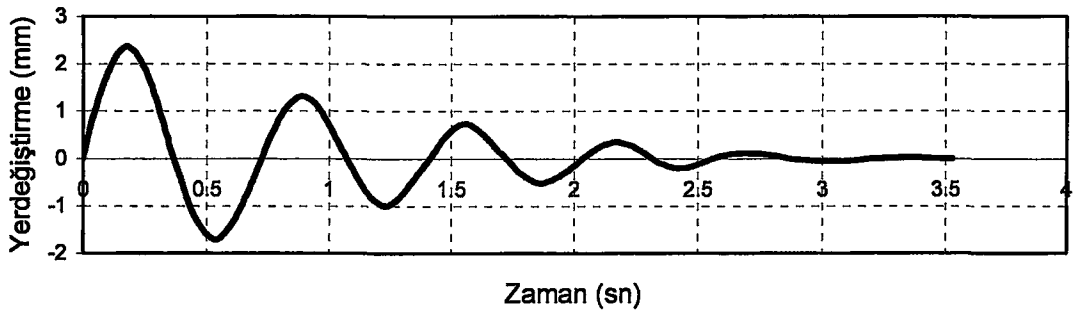
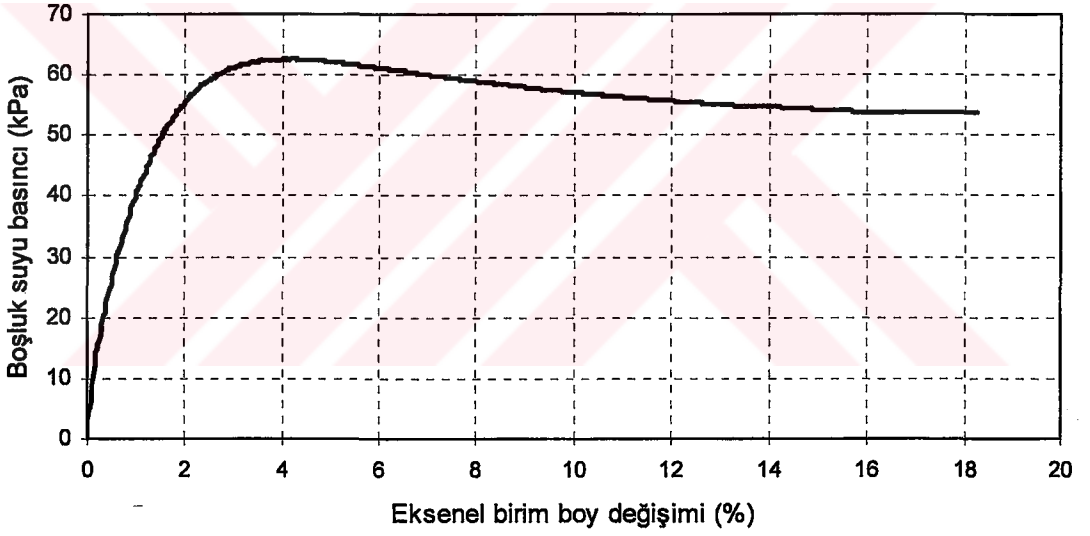
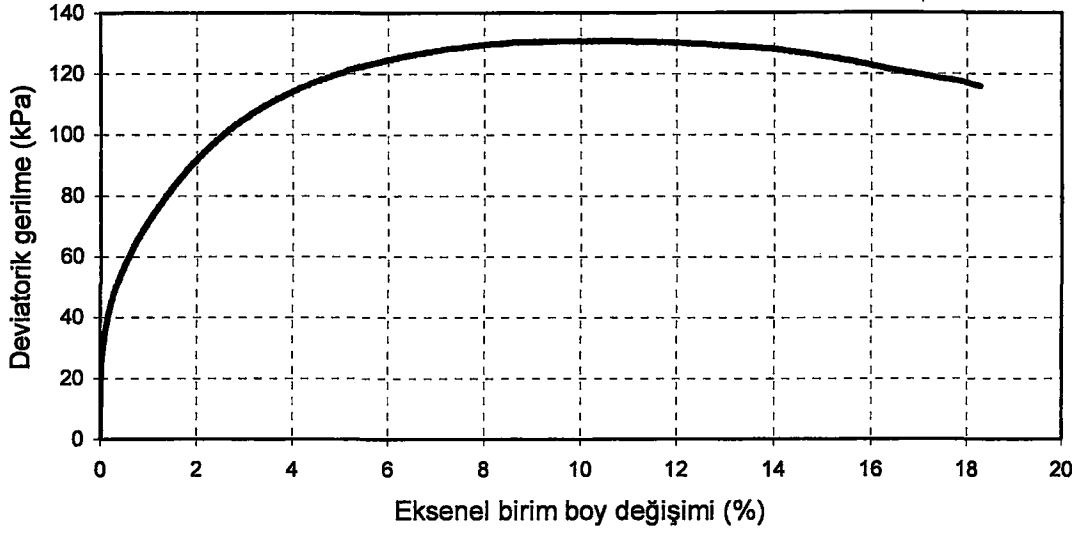
Şekil C34. YT6B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.85$ sn).



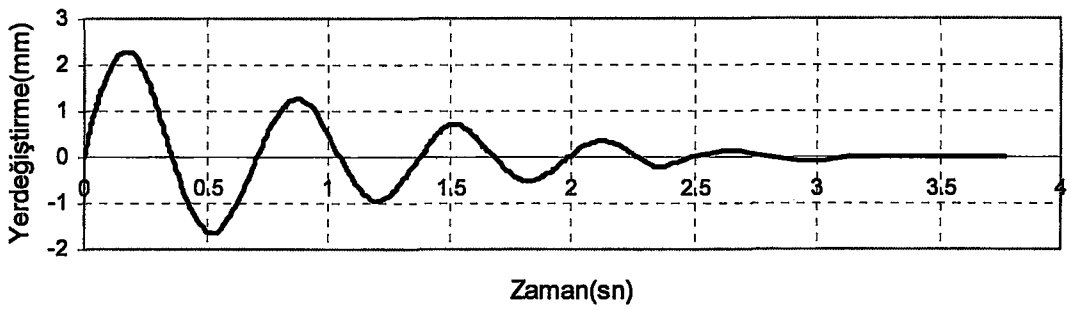
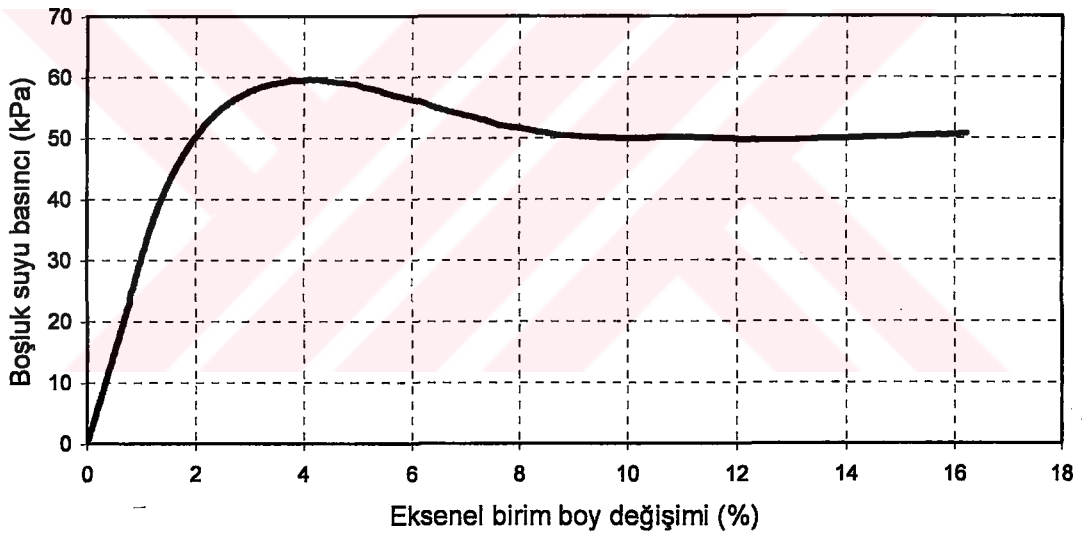
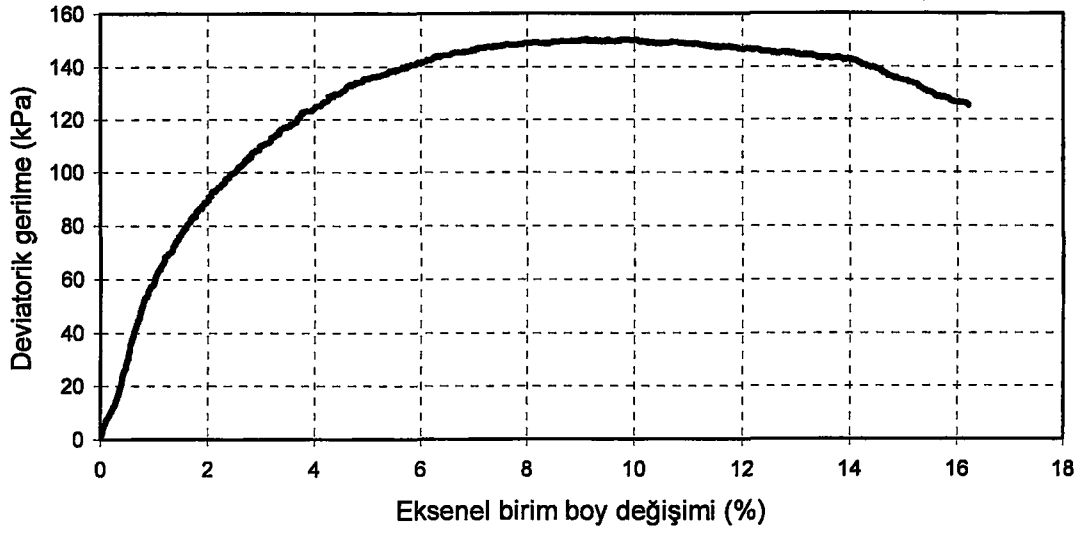
Şekil C35. YT9B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.77$ sn).



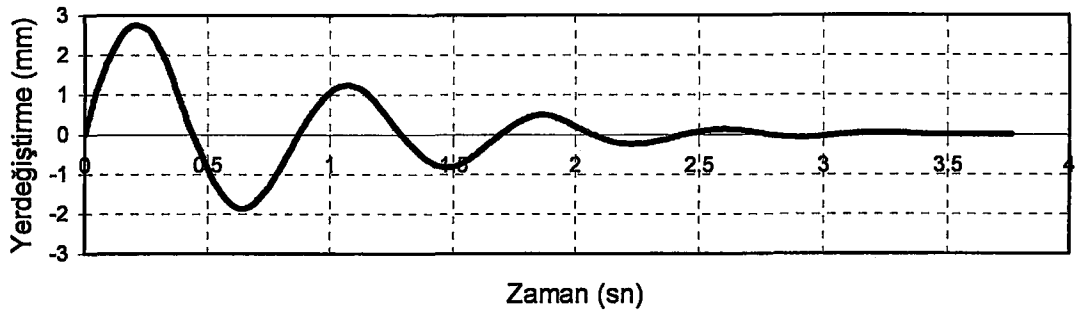
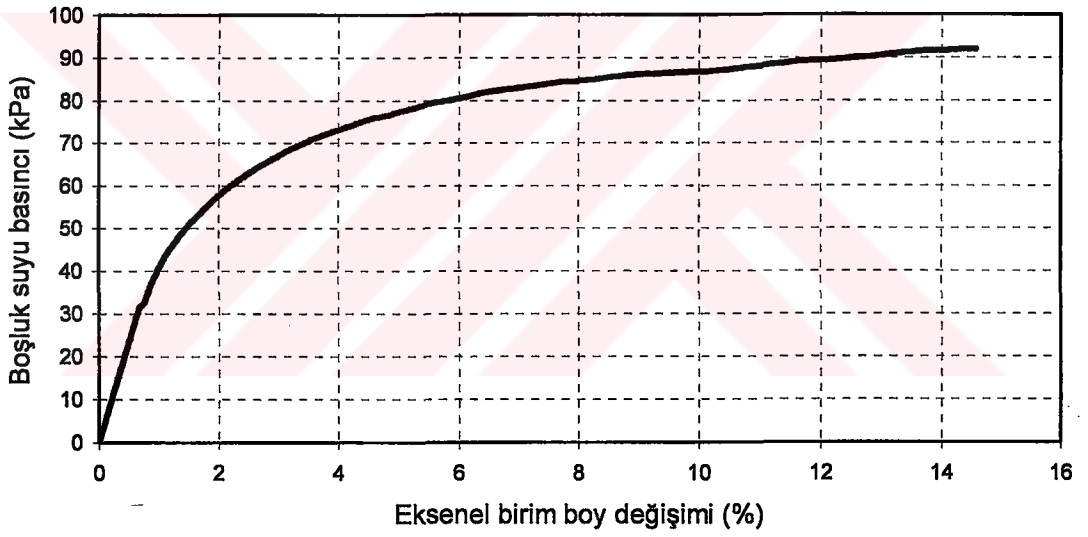
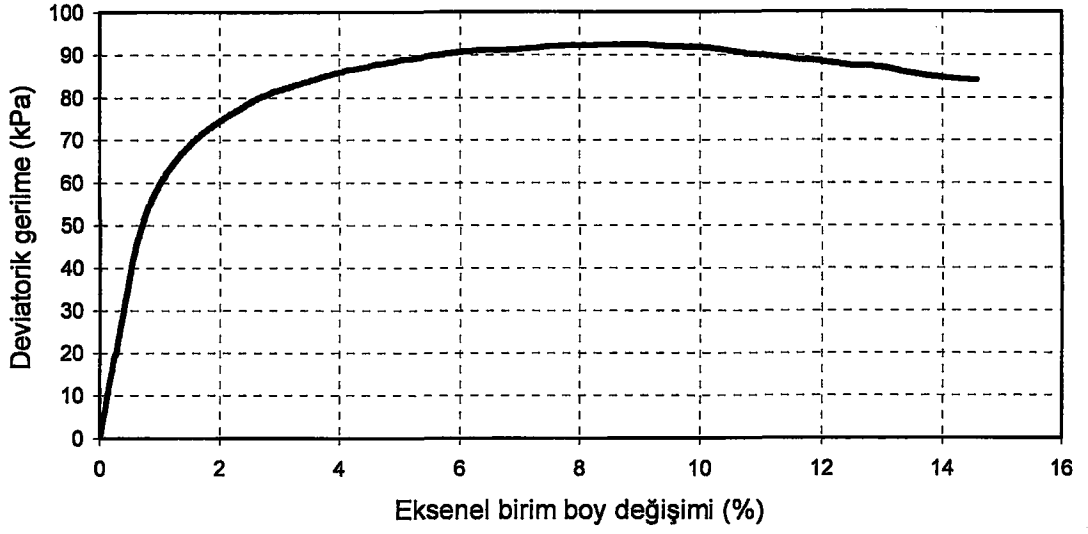
Şekil C36. YT10B deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.76$ sn).



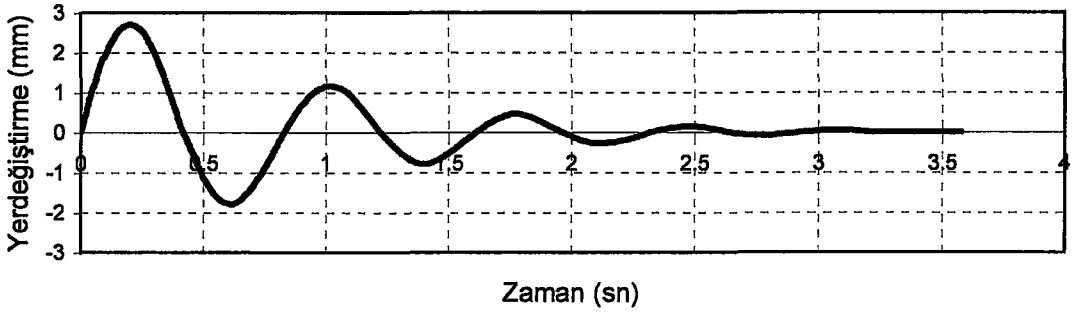
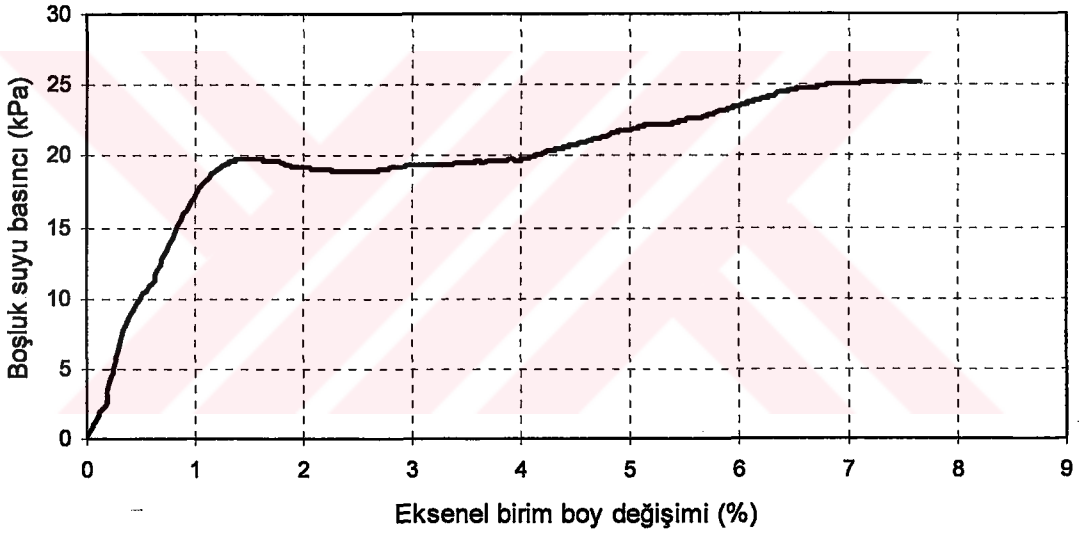
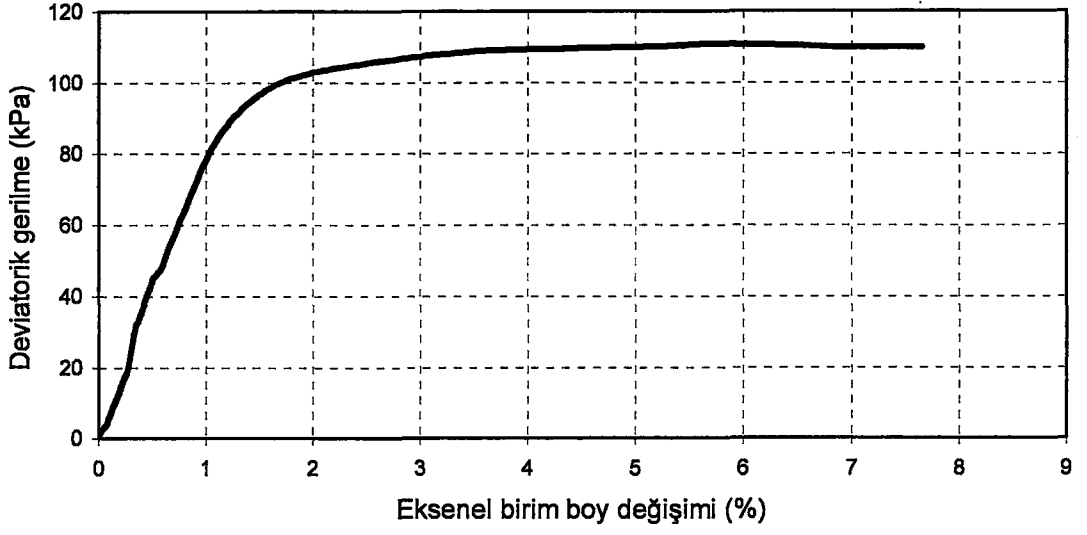
Şekil C37. YT12B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.725$ sn).



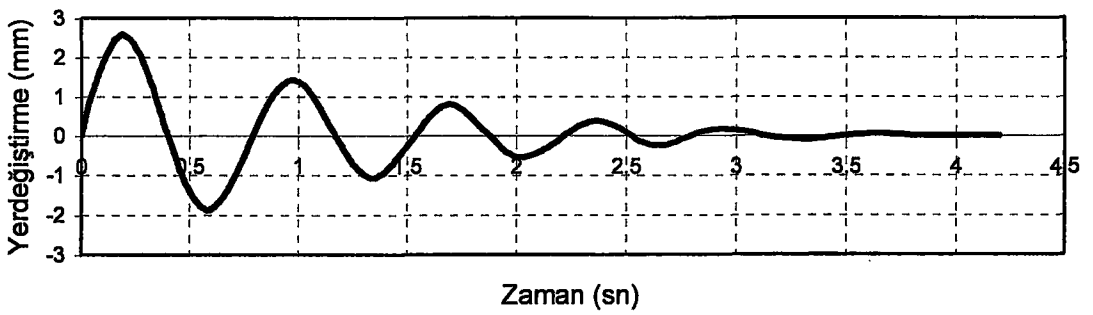
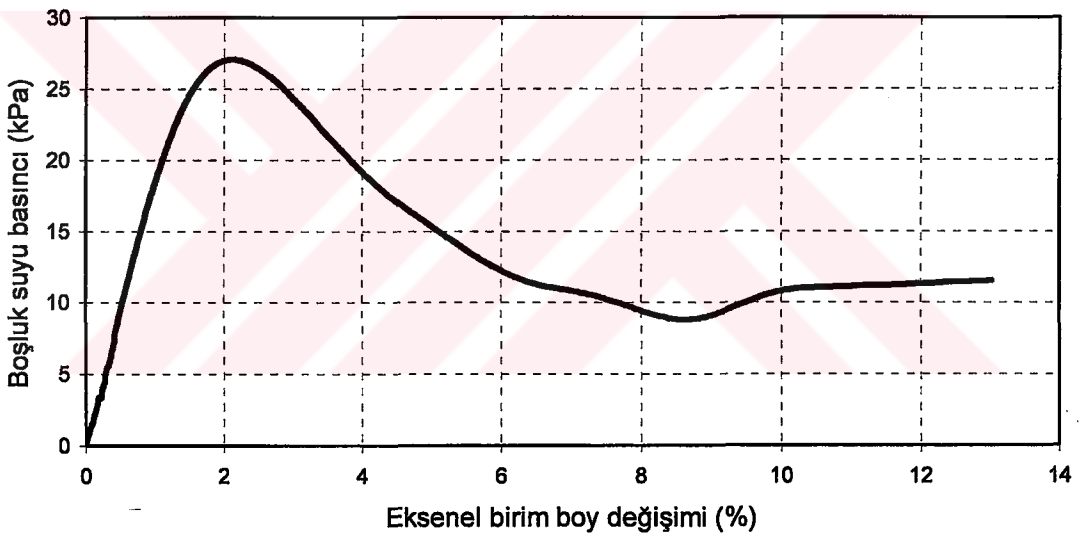
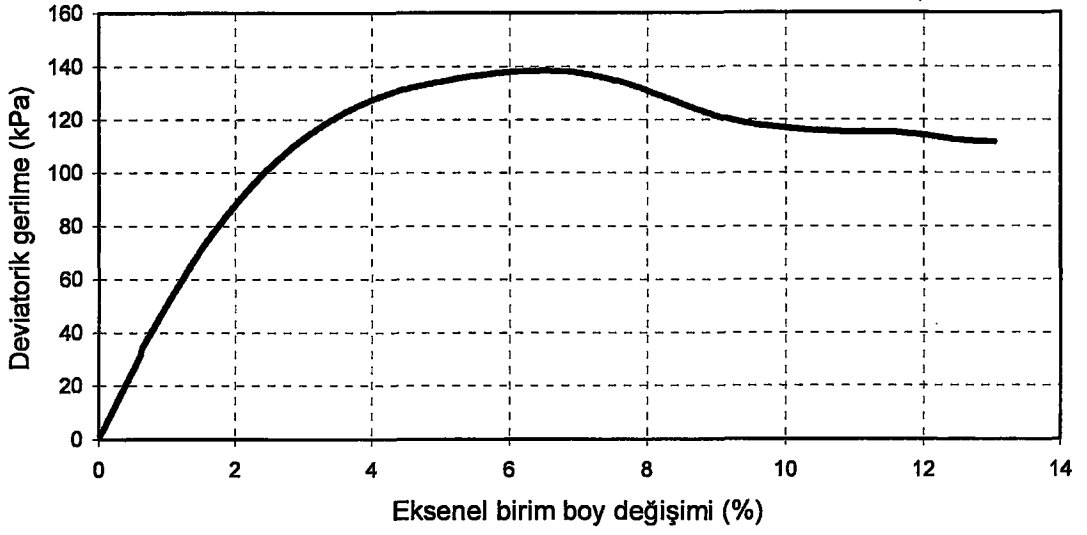
Şekil C38. YT15B deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.7$ sn).



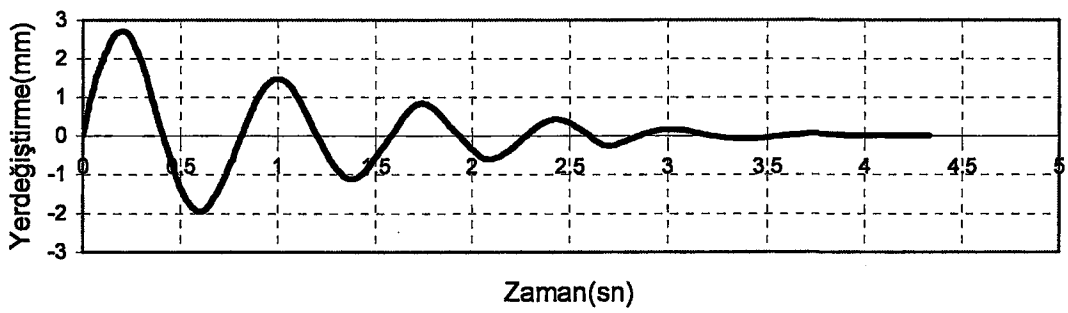
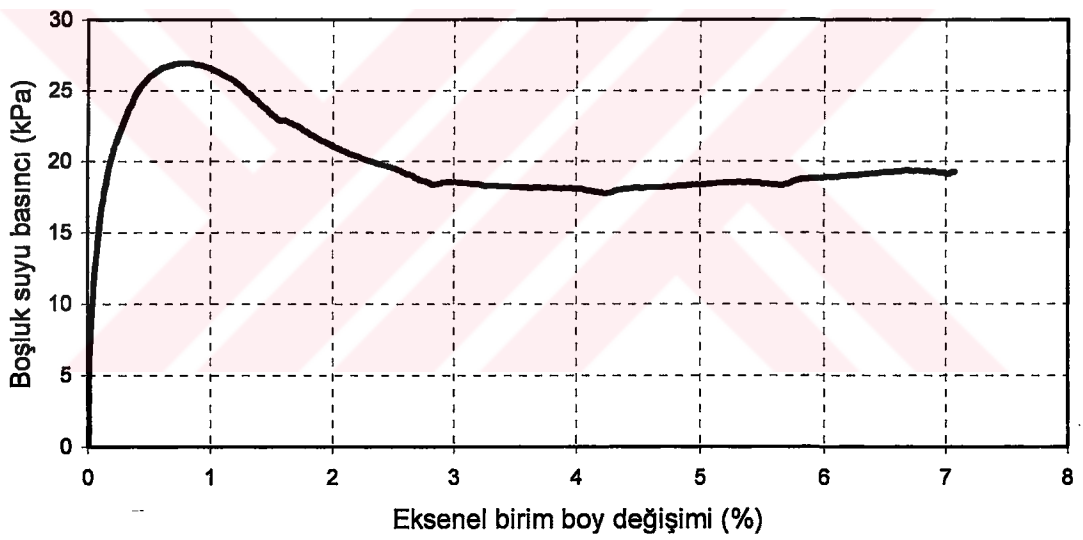
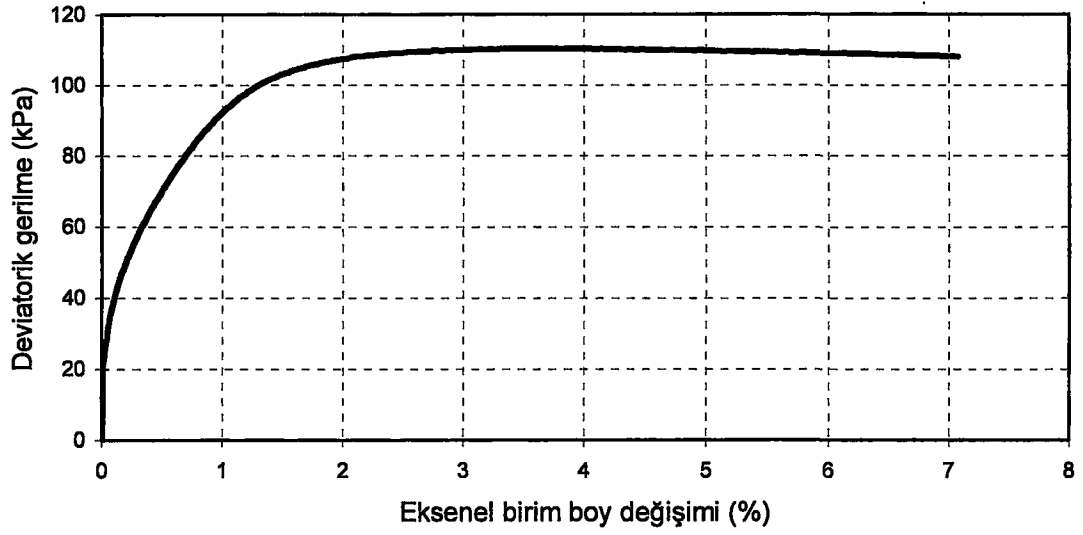
Şekil C39. YT2 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.89$ sn).



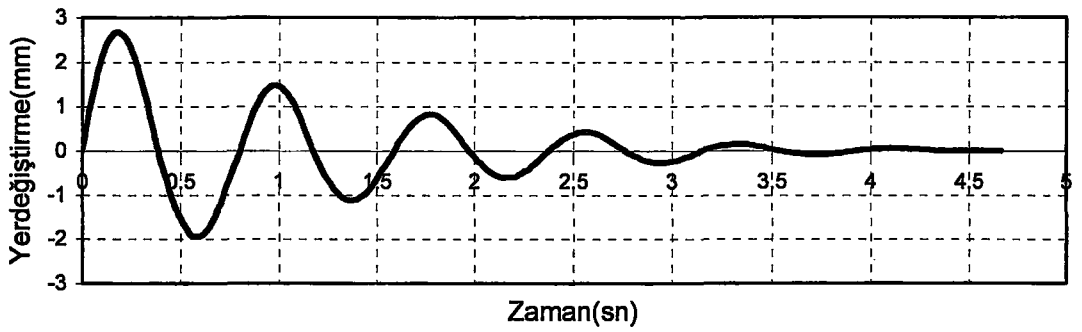
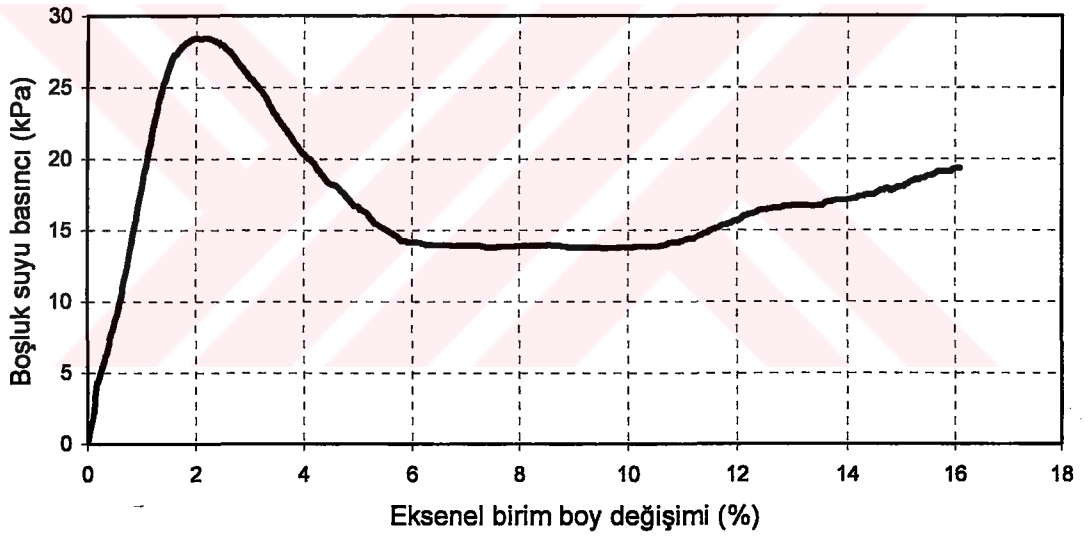
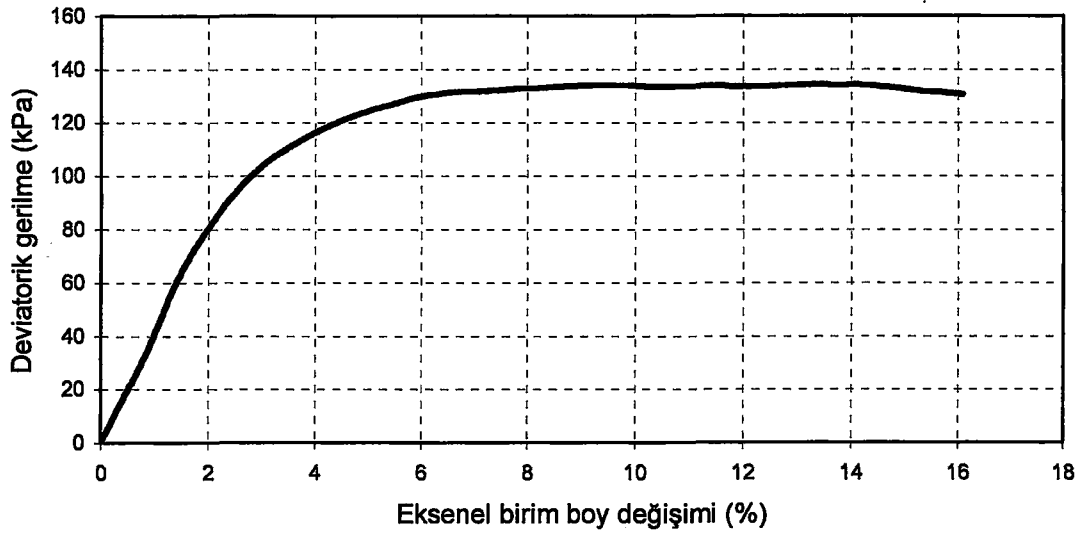
Şekil C40. YAO27 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.82$ sn).



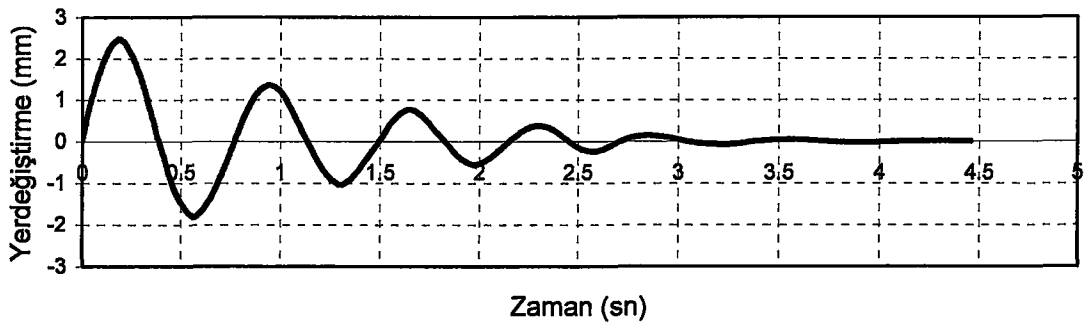
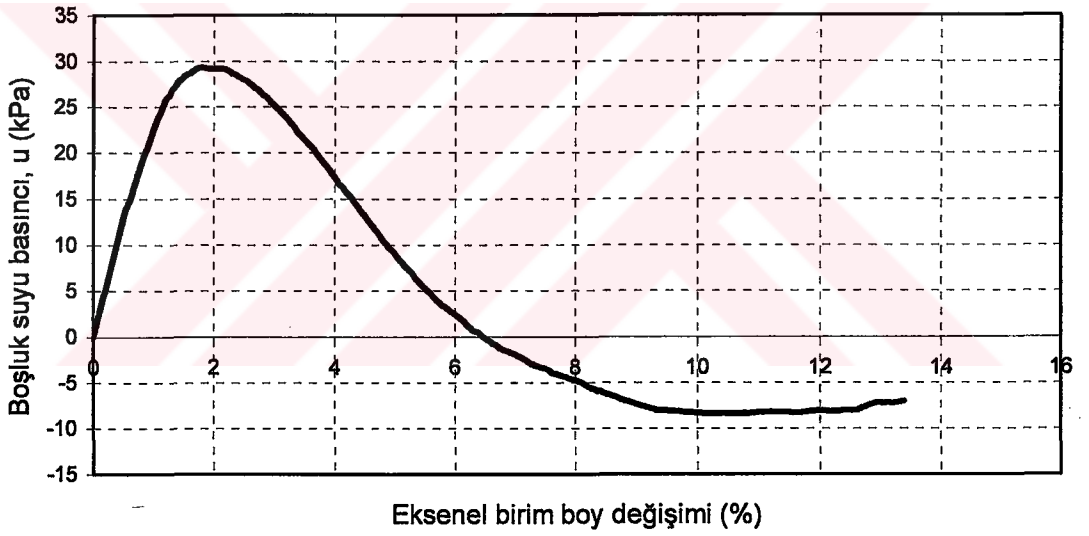
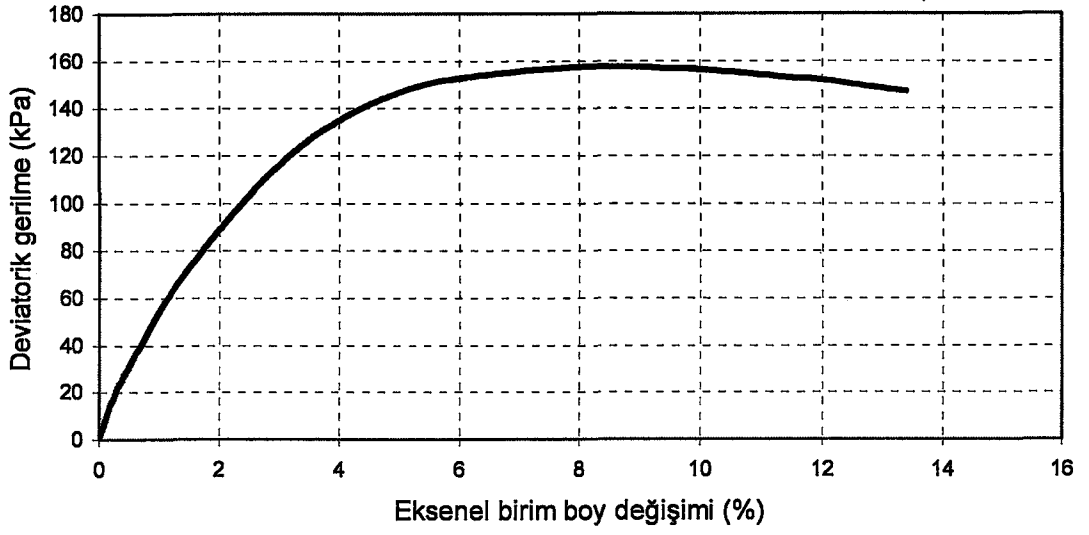
Şekil C41. YAO28 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.78$ sn).



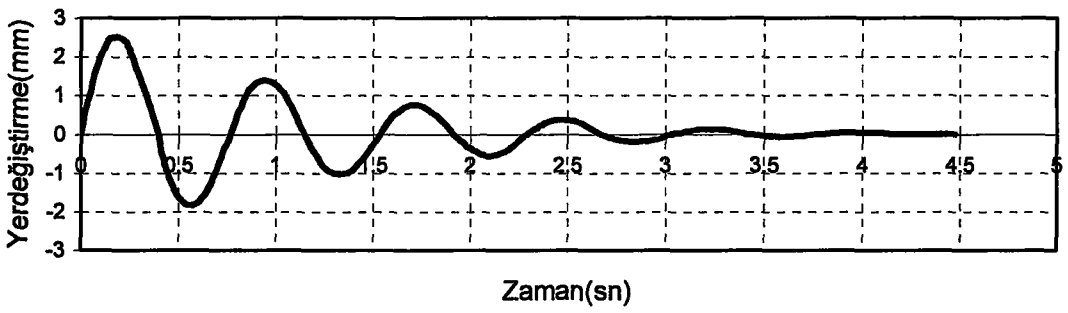
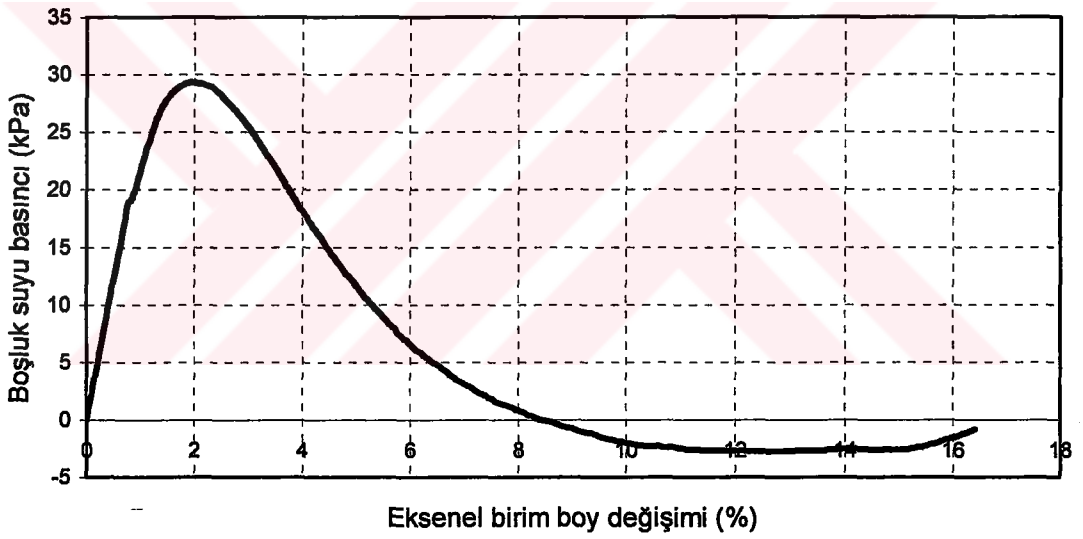
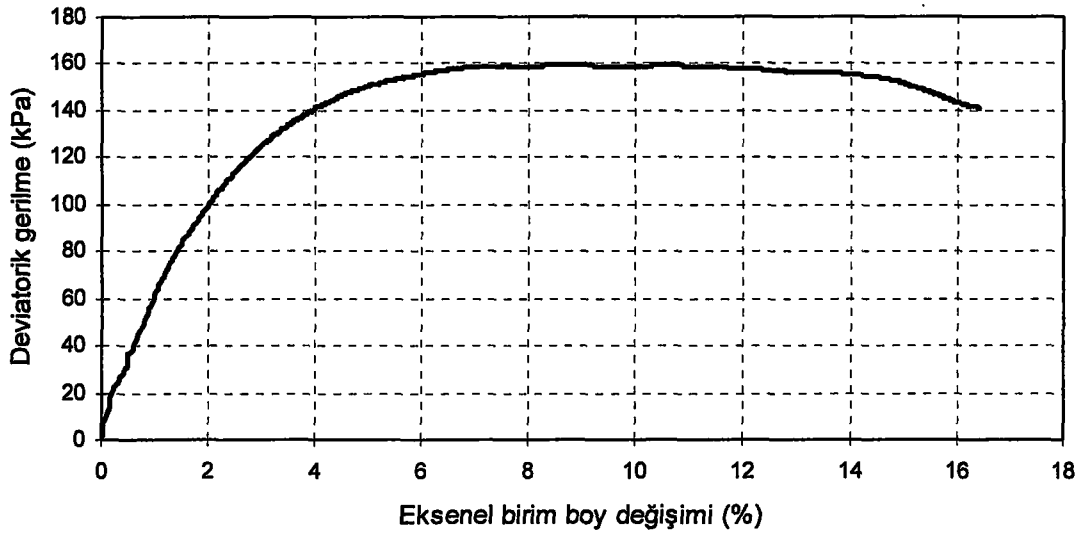
Şekil C42. YAO29 deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.805$ sn).



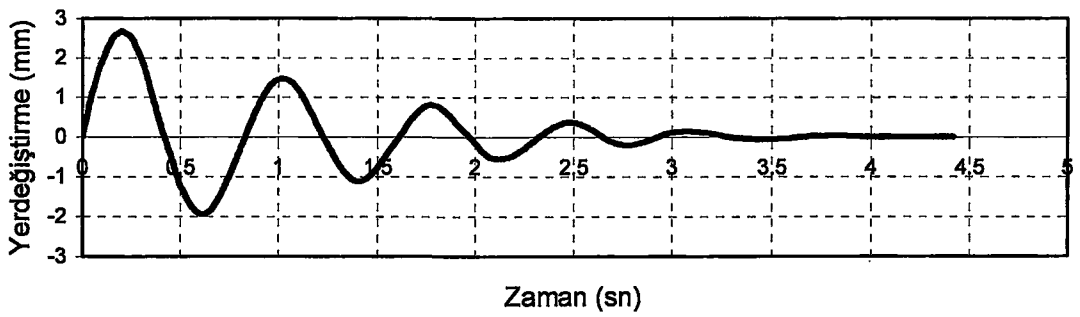
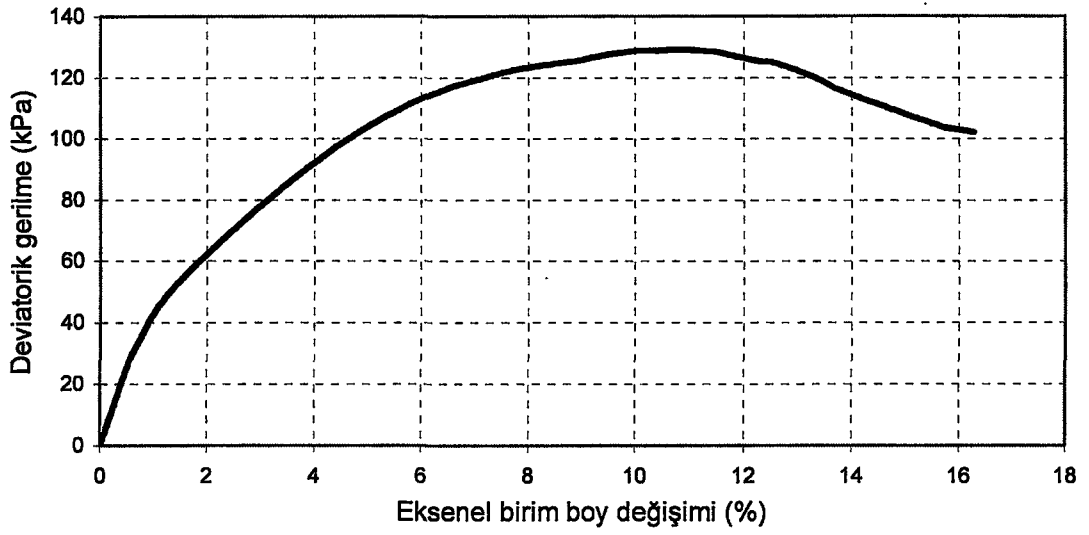
Şekil C43. YAO30 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.785$ sn).



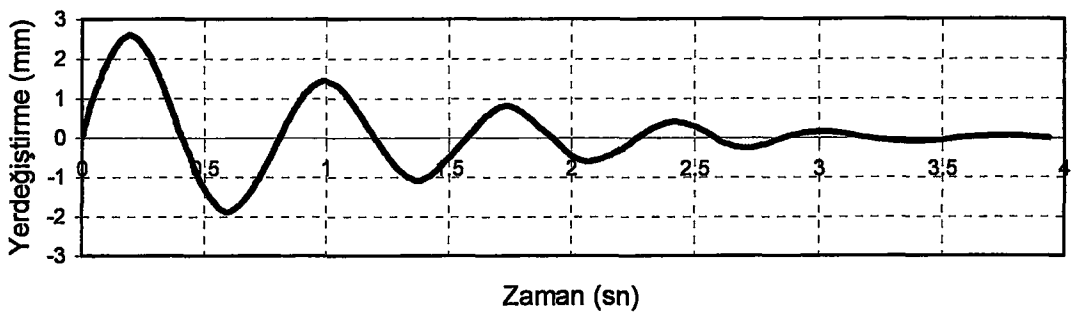
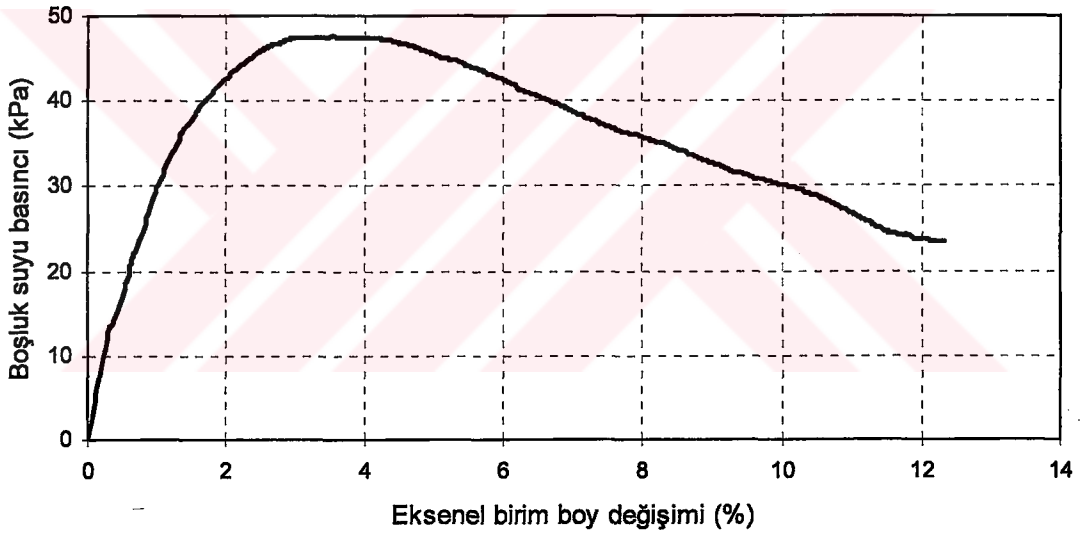
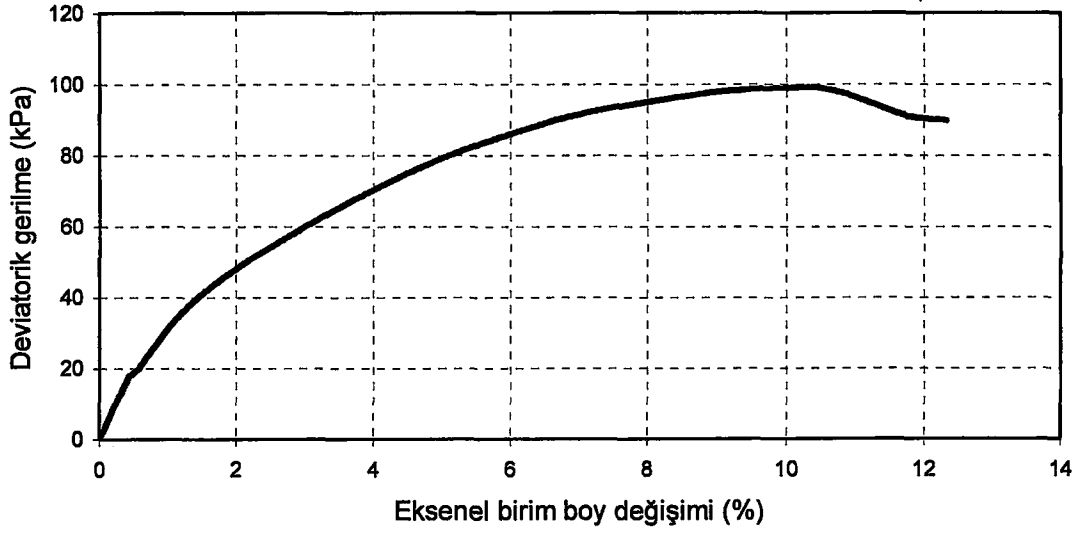
Şekil C44. YAO32Y deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.735$ sn).



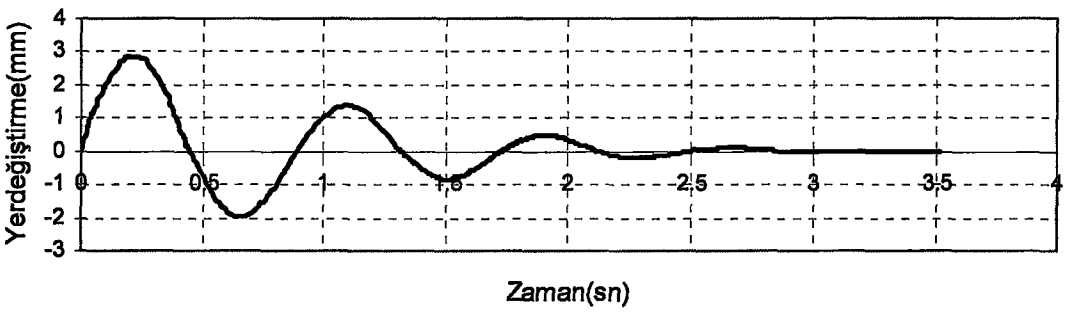
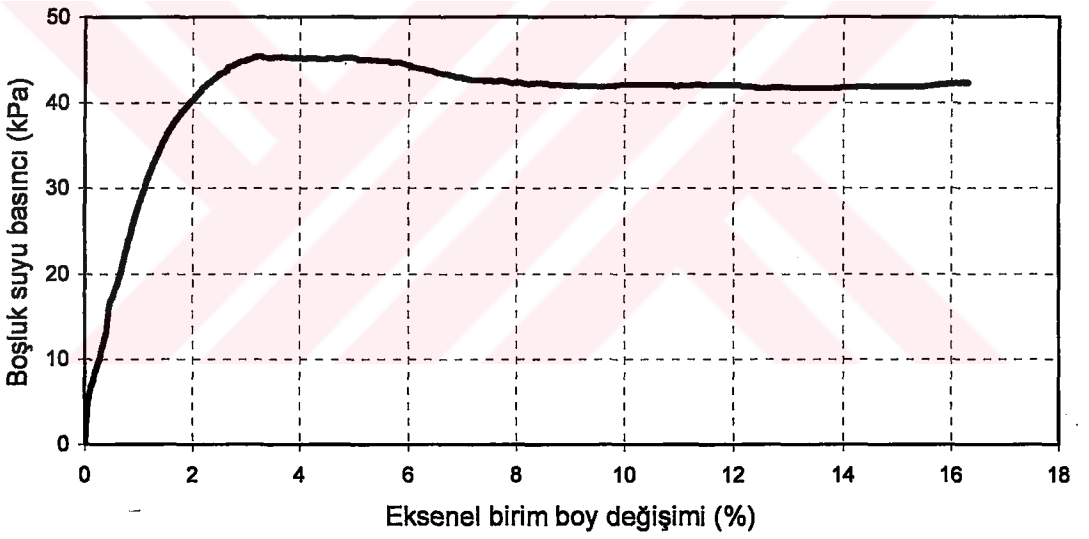
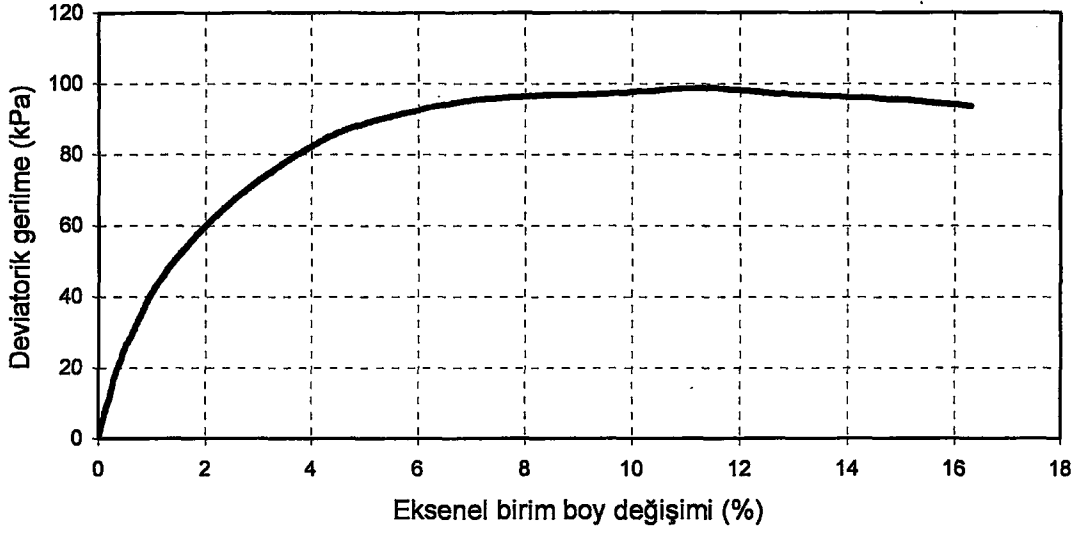
Şekil C45. YAO34 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.75$ sn).



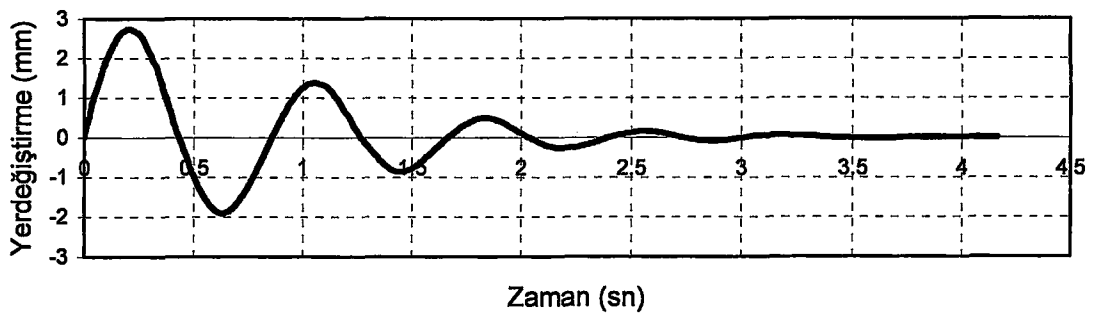
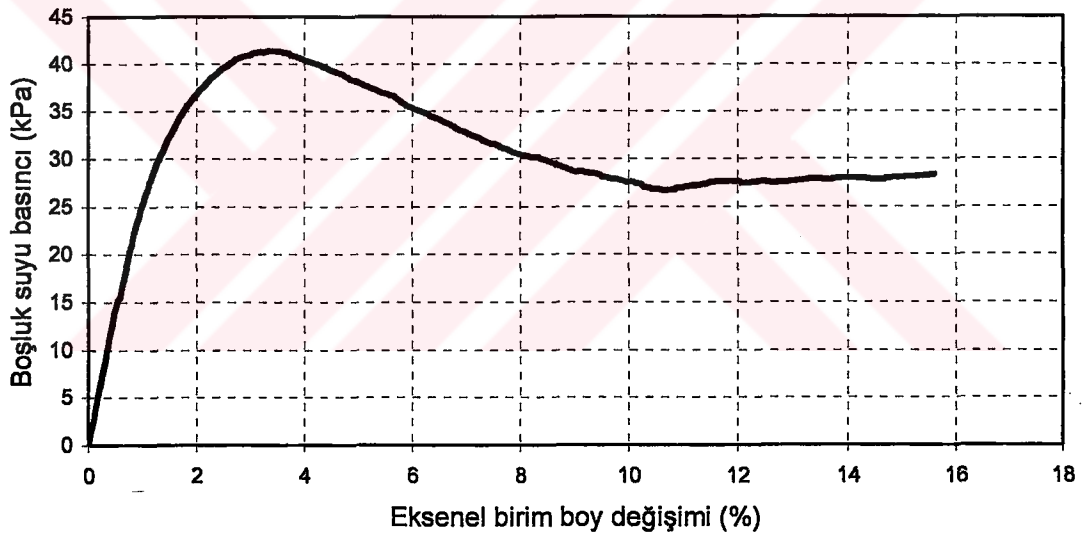
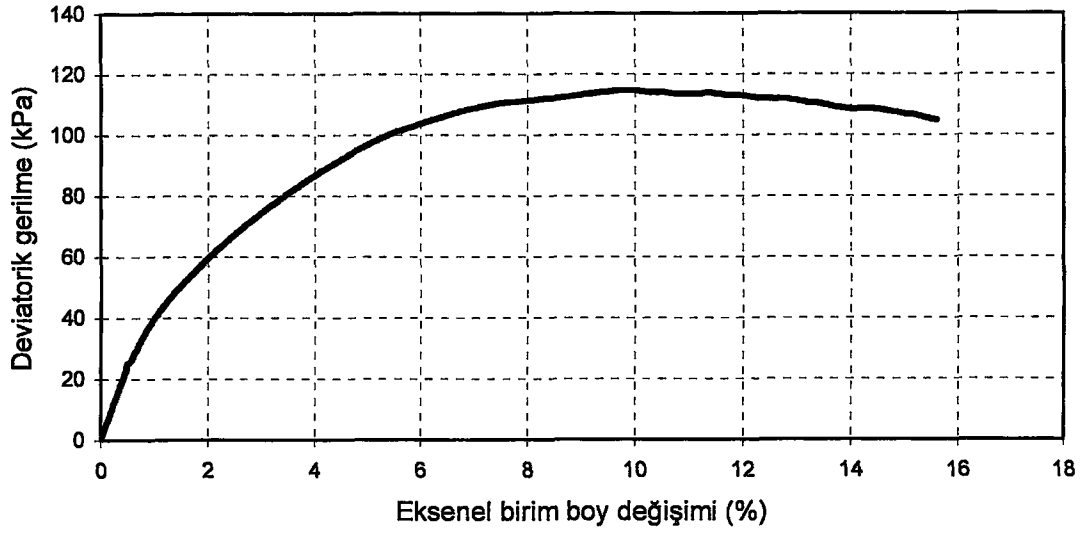
Şekil C46. YAO35 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.83$ sn).



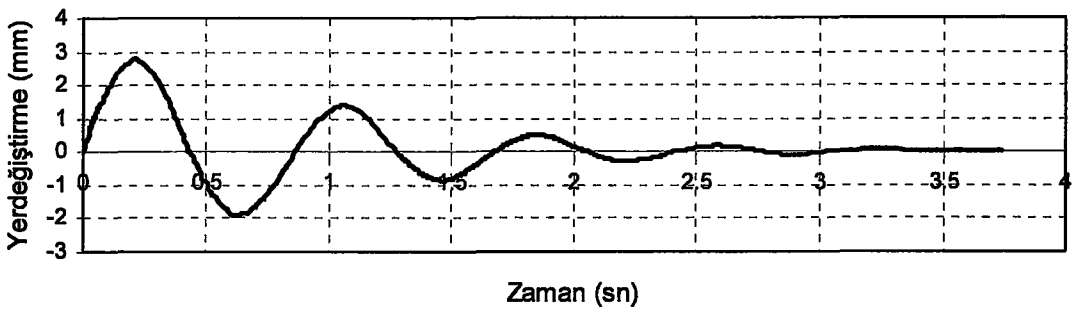
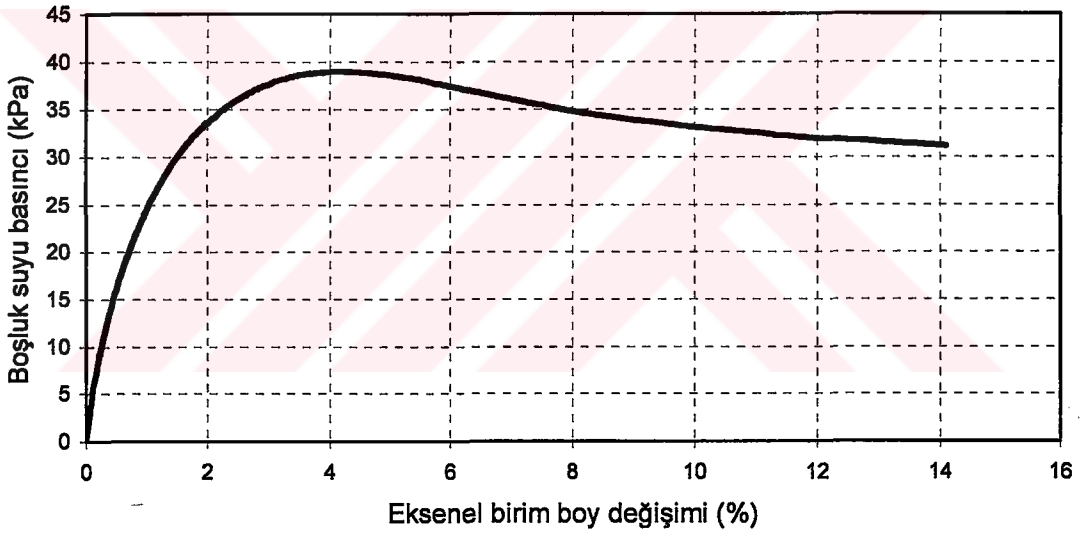
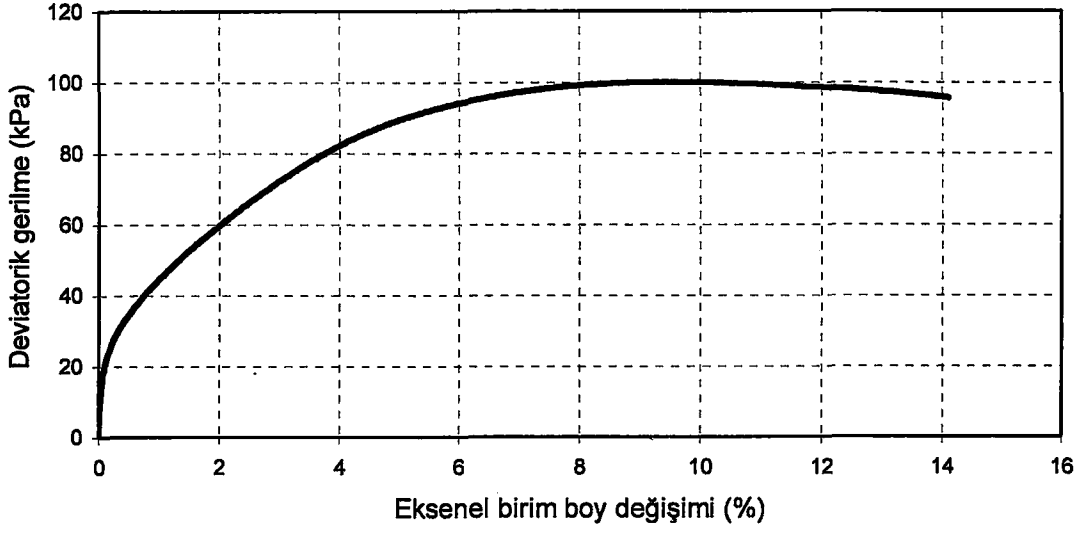
Şekil C47. YAO36 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.81$ sn).



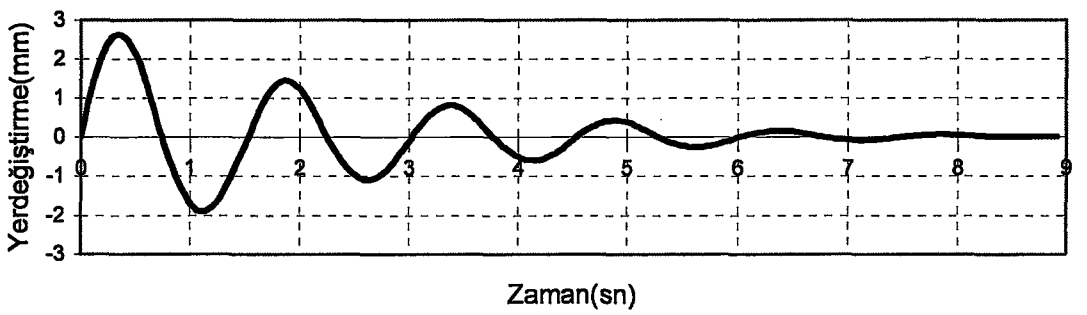
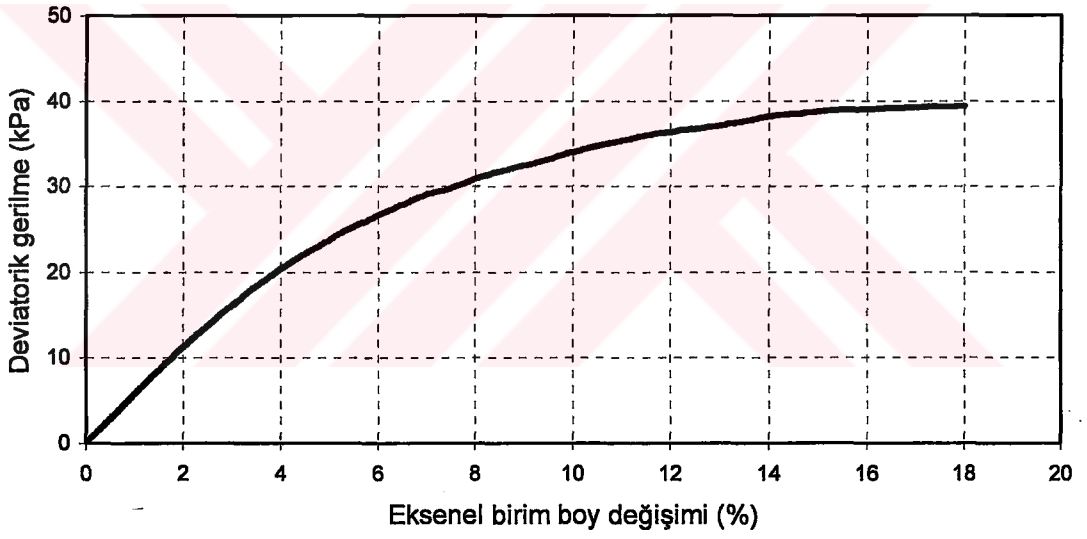
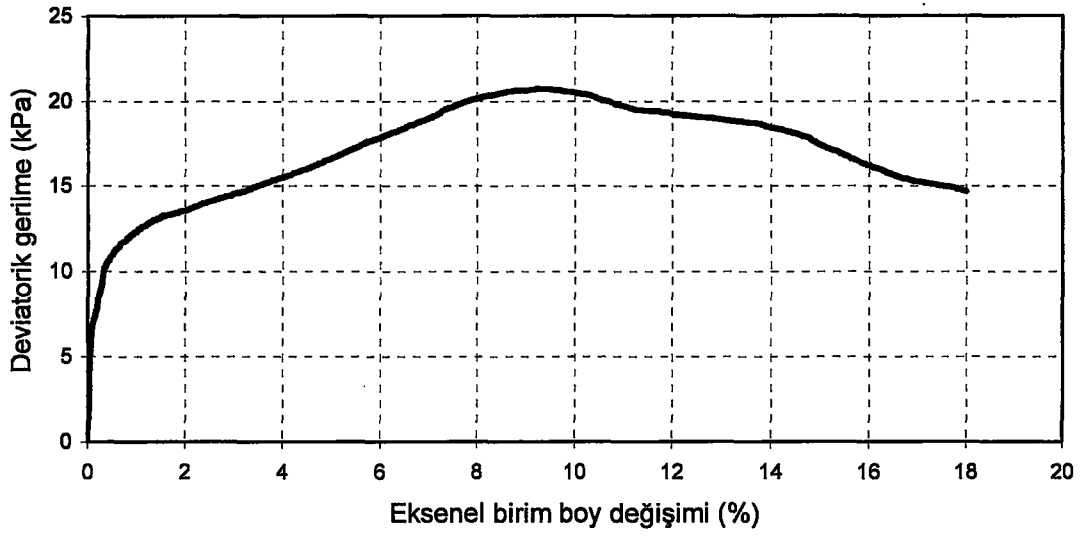
Şekil C48. YAO26 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.89$ sn).



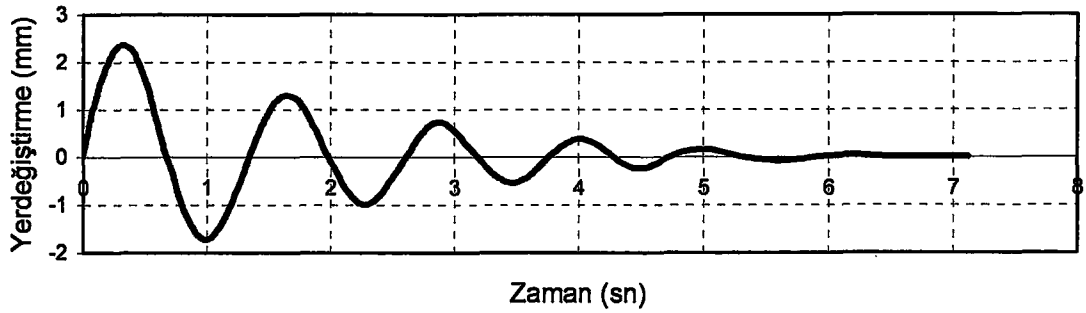
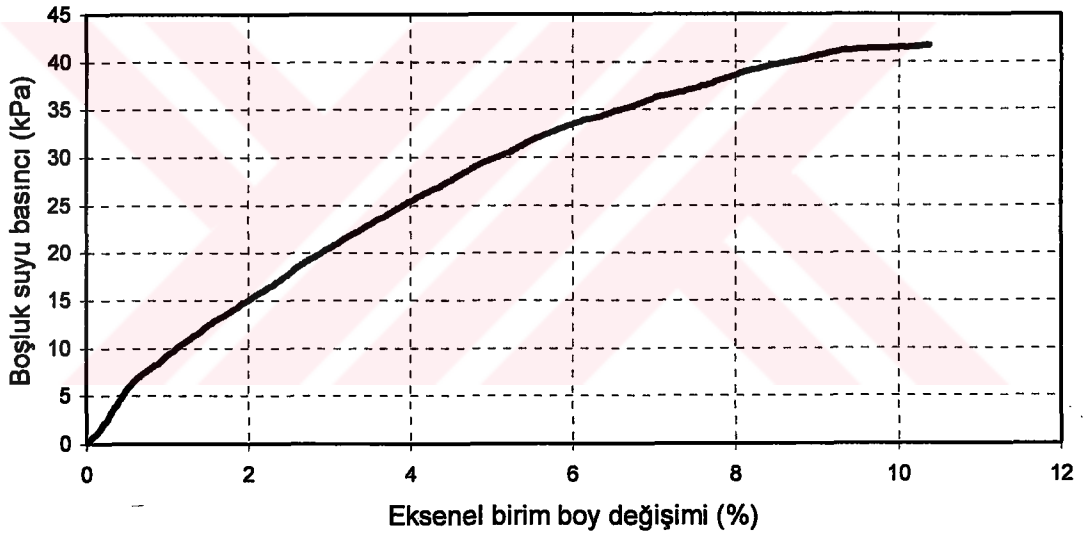
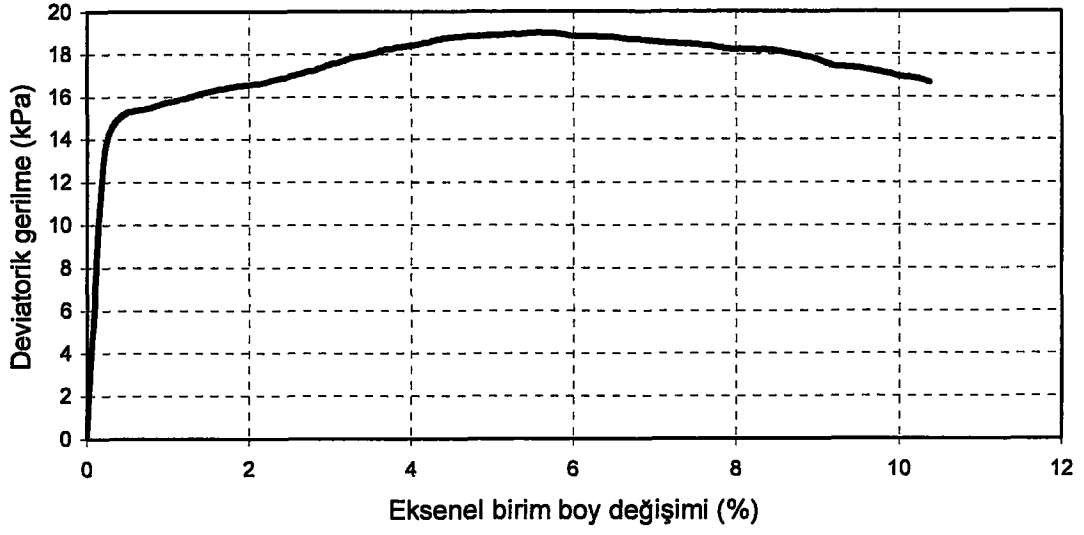
Şekil C49. YAO31 deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri(T=0.85 sn).



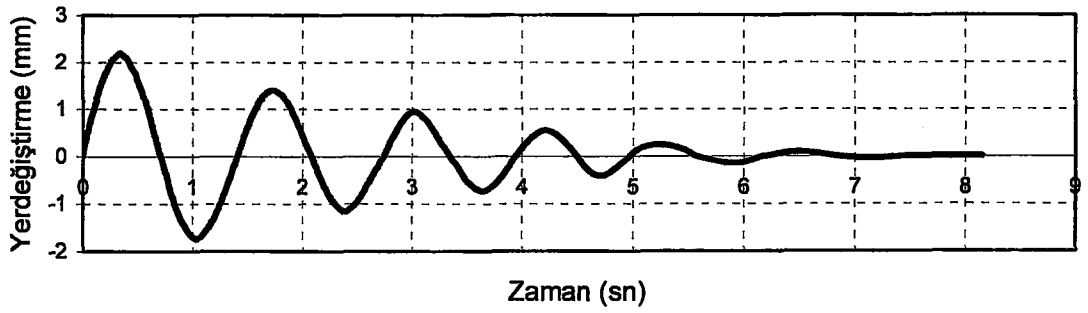
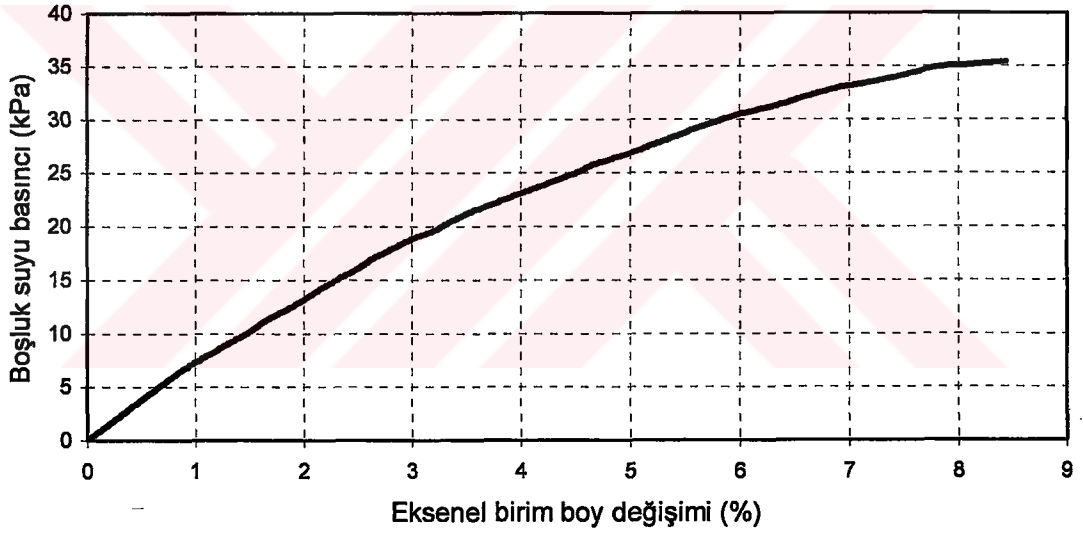
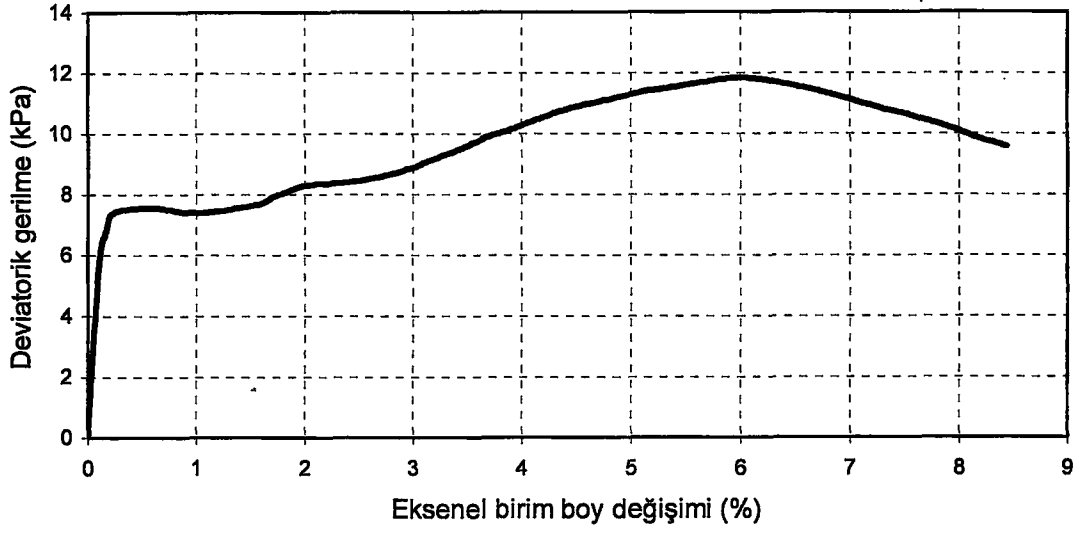
Şekil C50. YAO33 deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=0.855$ sn).



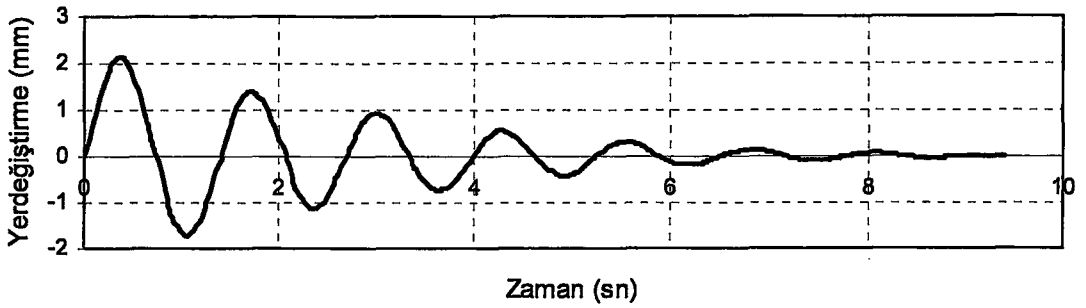
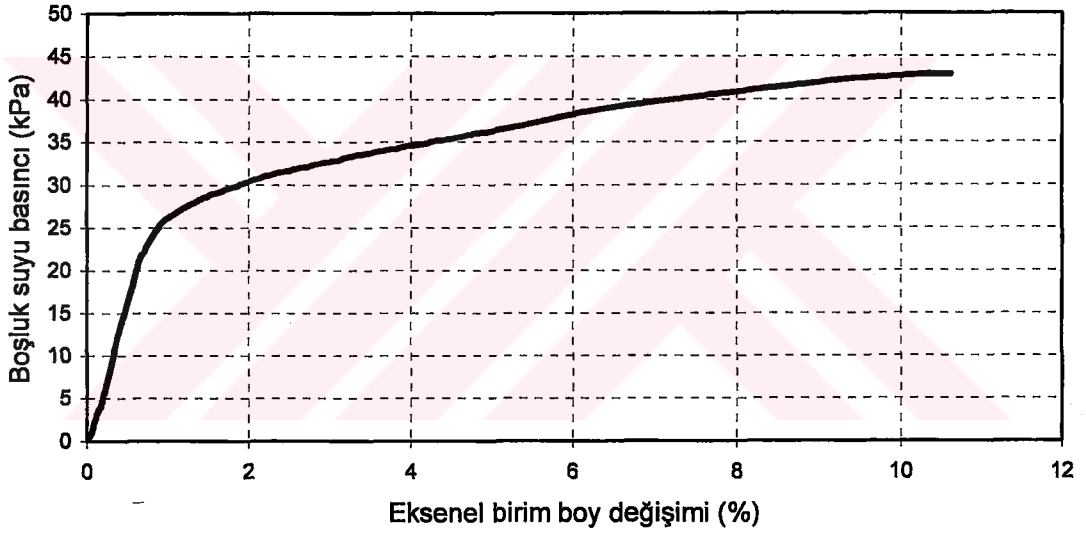
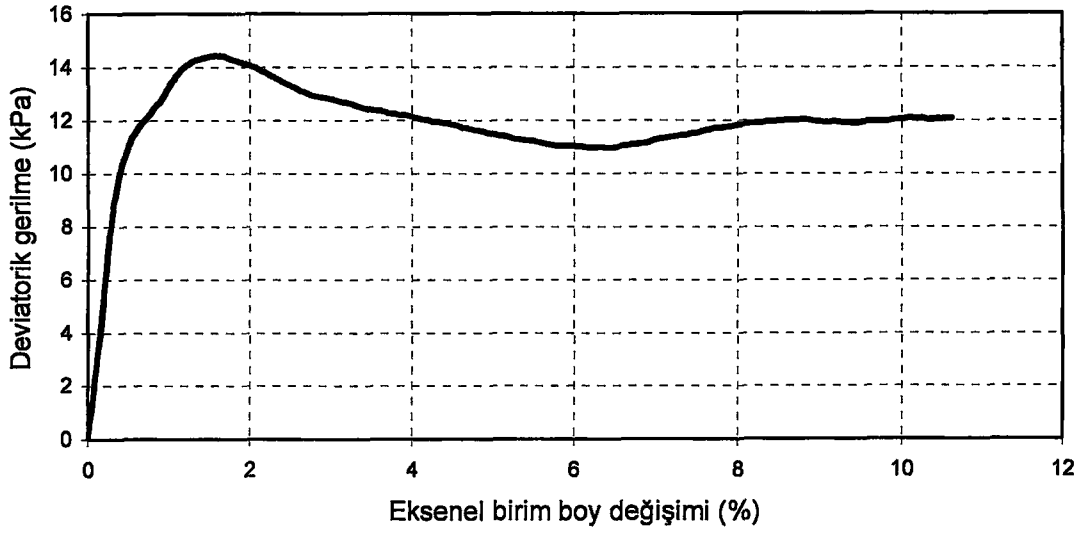
Şekil C51. Y7K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.5$ sn).



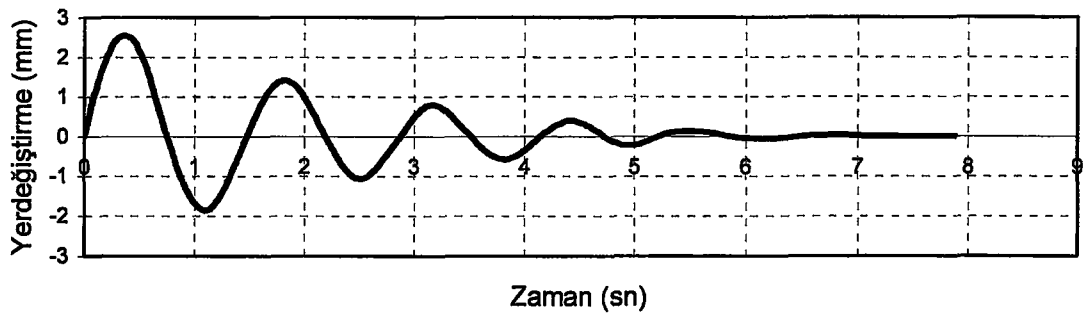
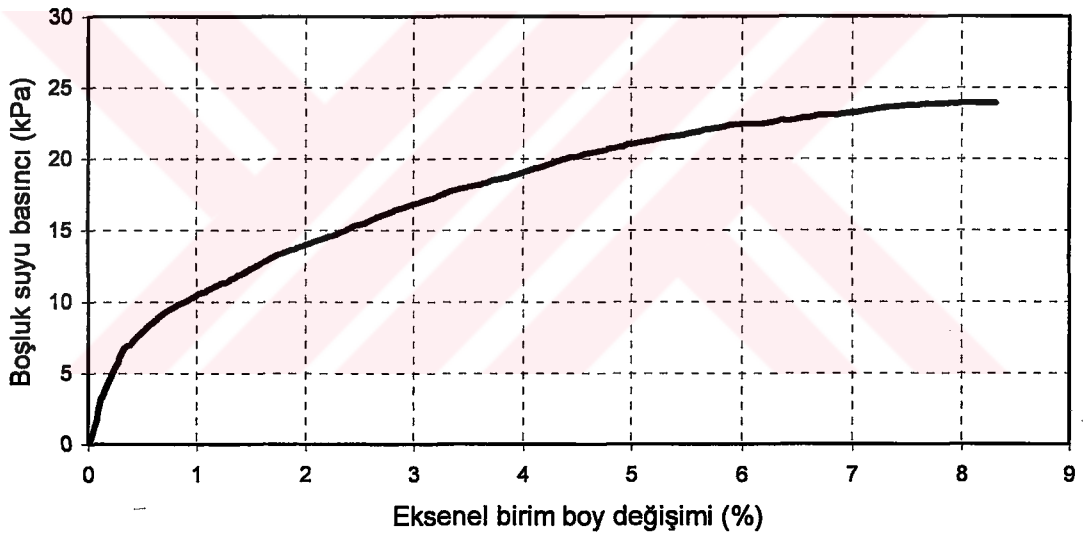
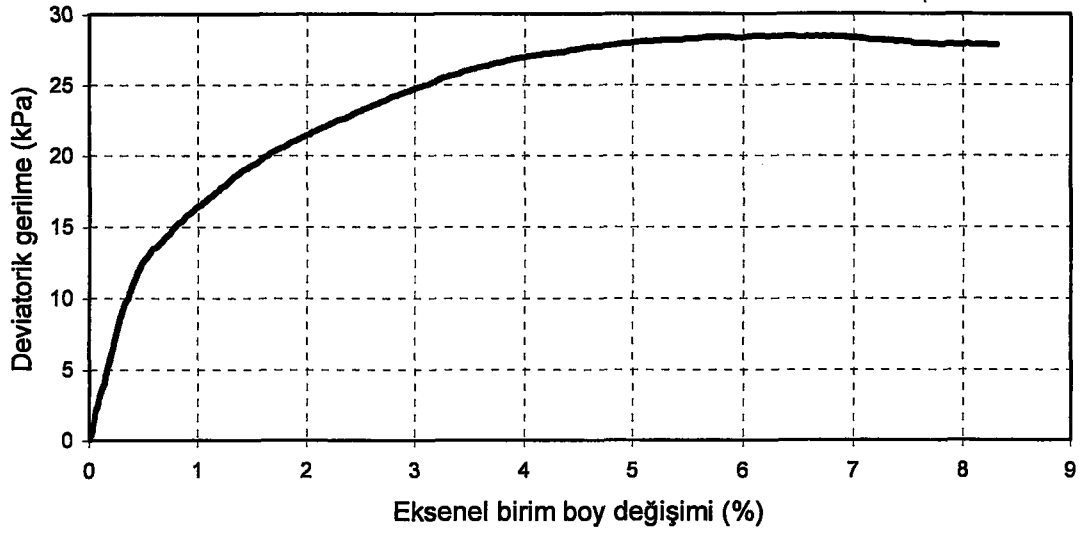
Şekil C52. Y8K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.32$ sn).



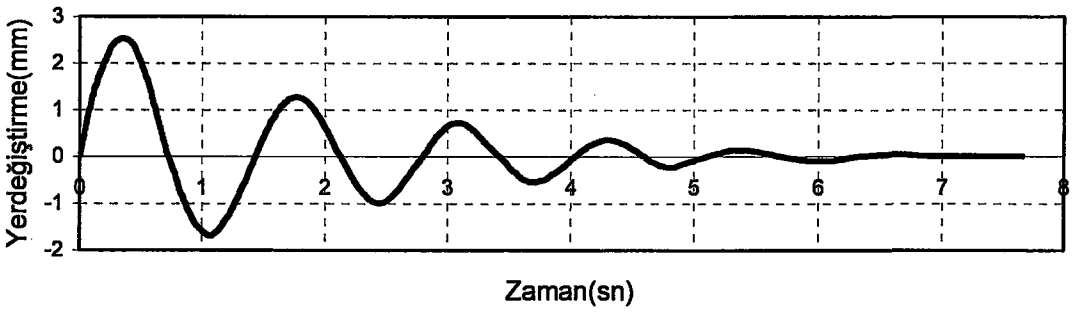
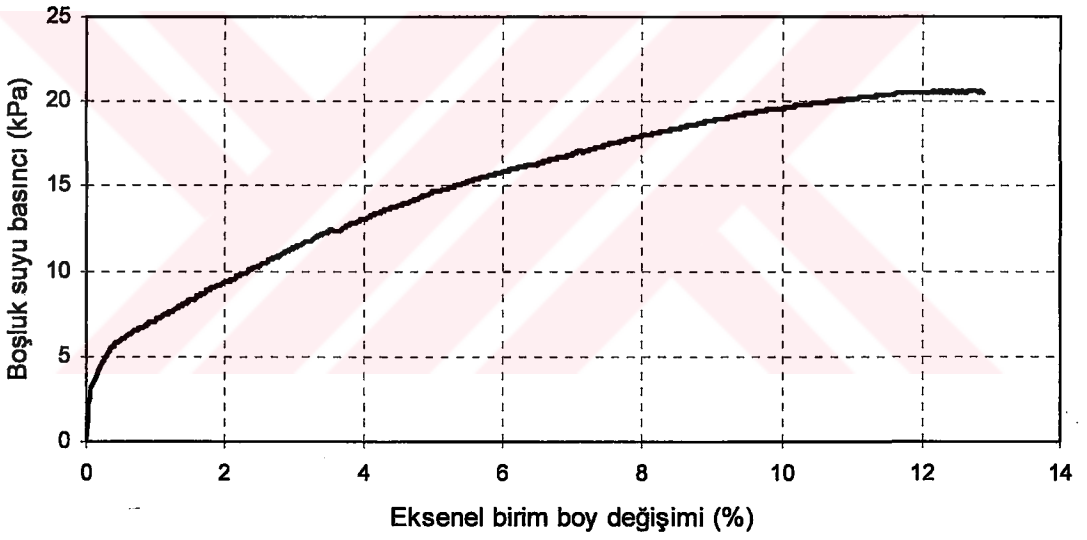
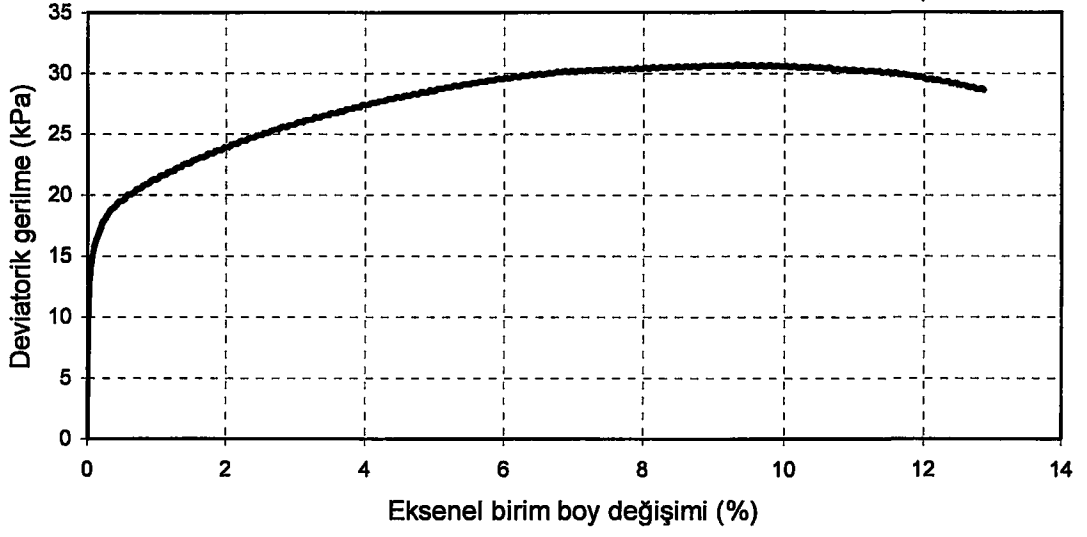
Şekil C53. Y10K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.385$ sn).



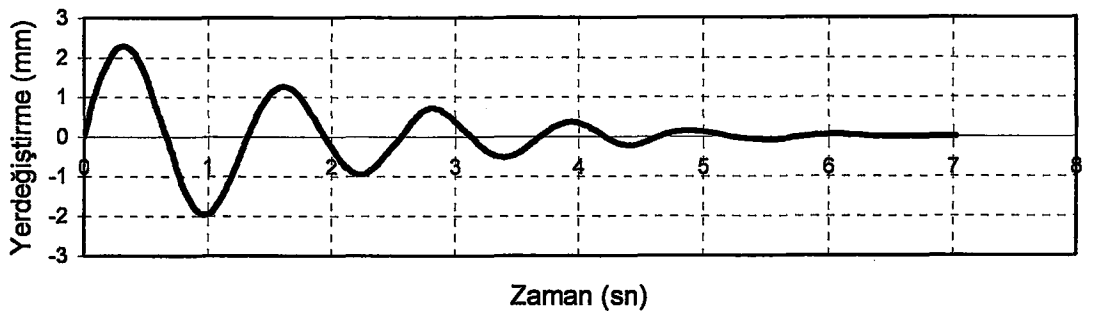
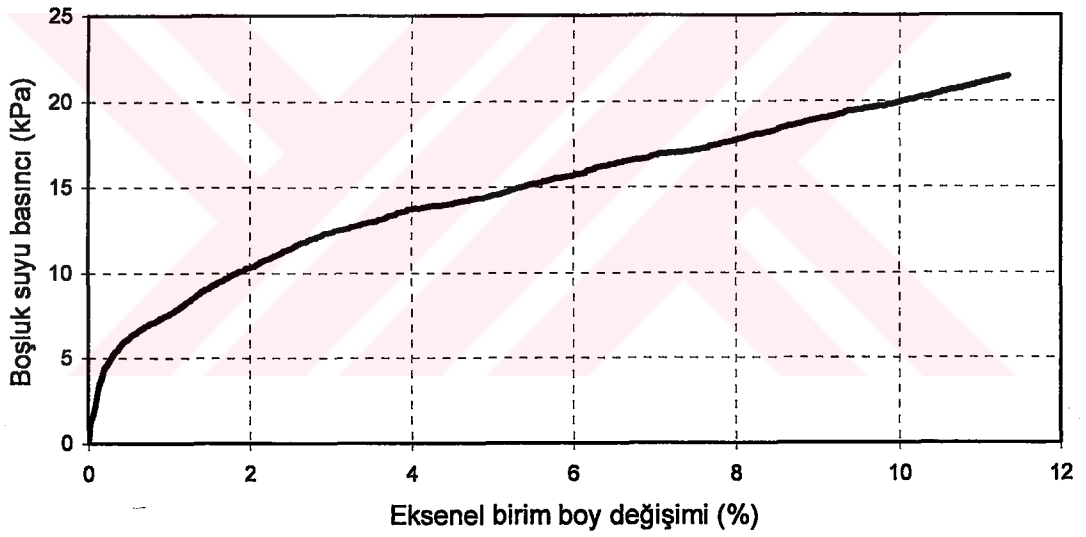
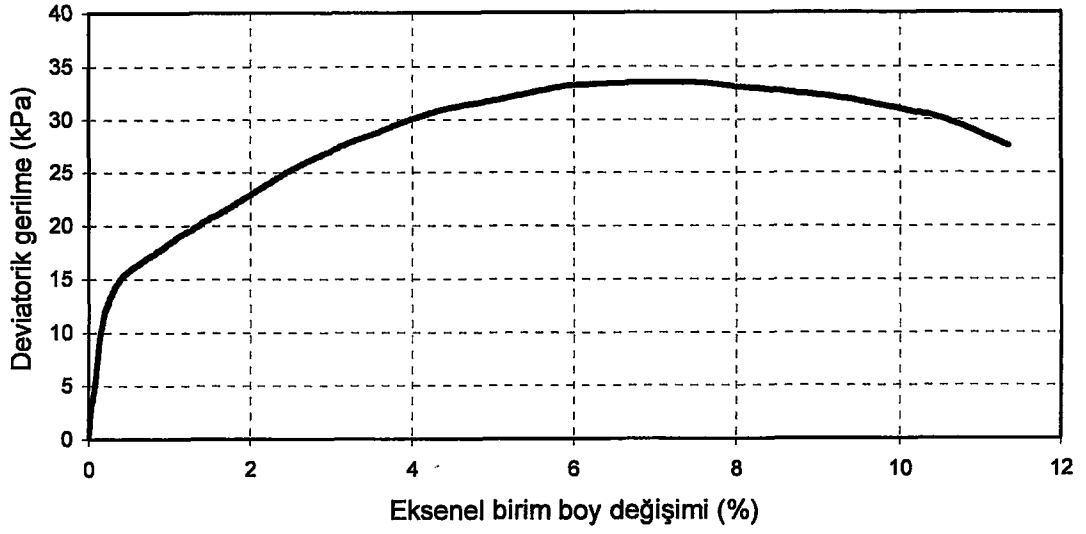
Şekil C54. Y102K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri(T=1.33 sn).



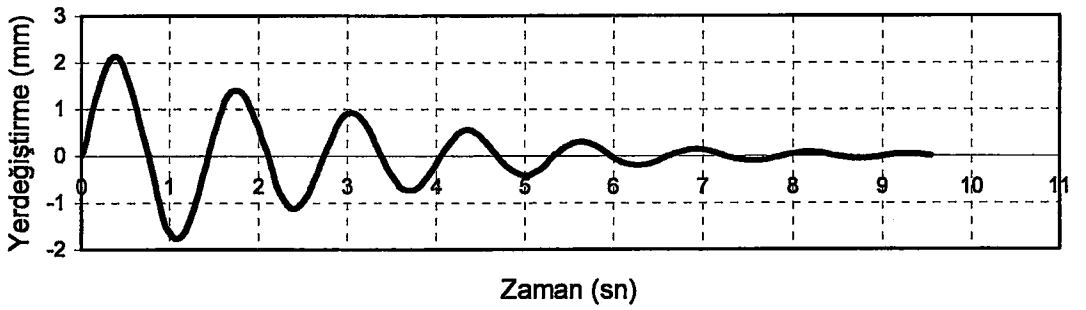
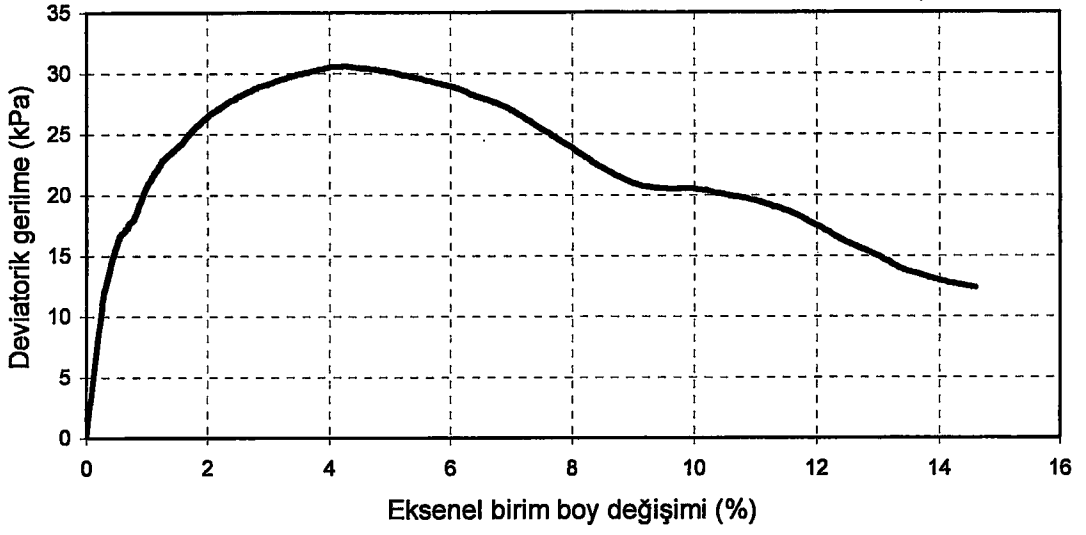
Şekil C55. Y11K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.455$ sn).



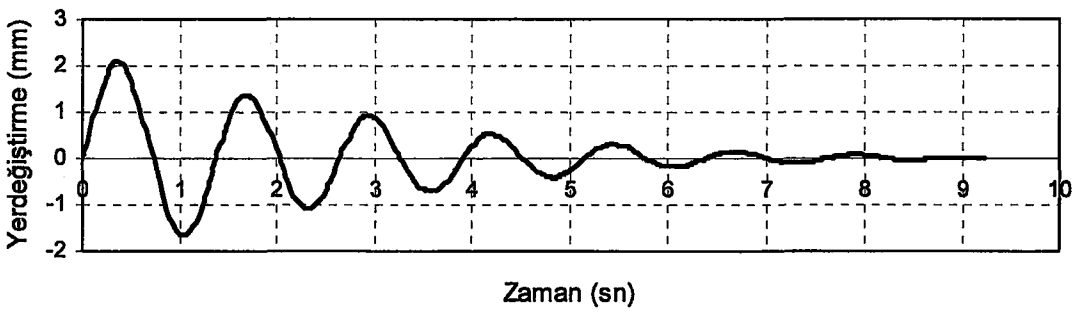
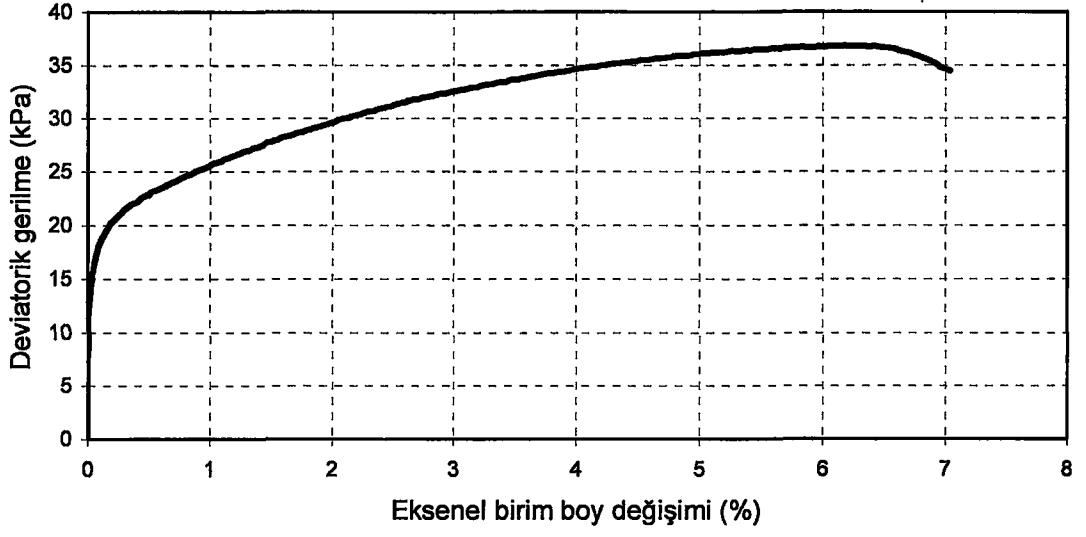
Şekil C56. Y14K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.415$ sn).



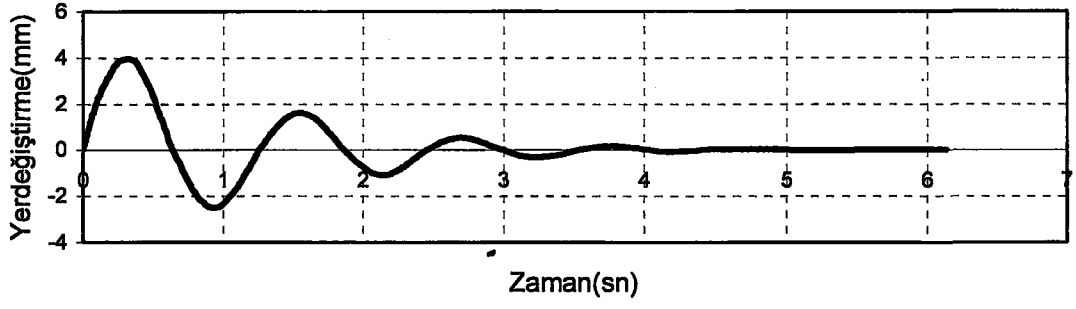
Şekil C57. Y12K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.295$ sn).



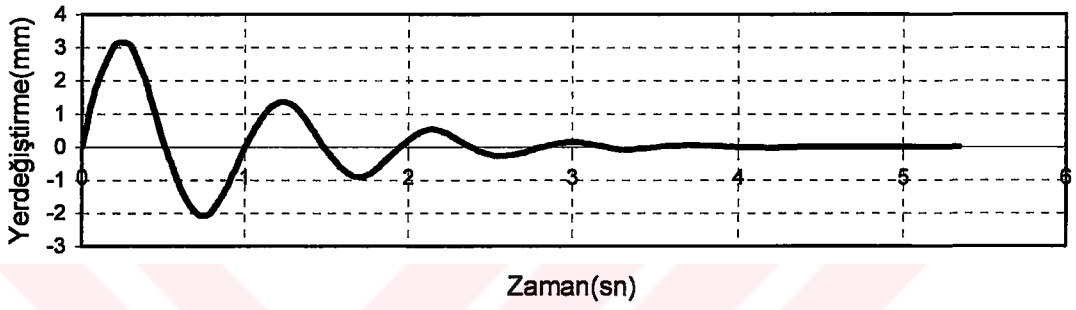
Şekil C58. Y13K deneyine ait gerilme şekil değıştirme boşluksuyu basıncı değışimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.35$ sn).



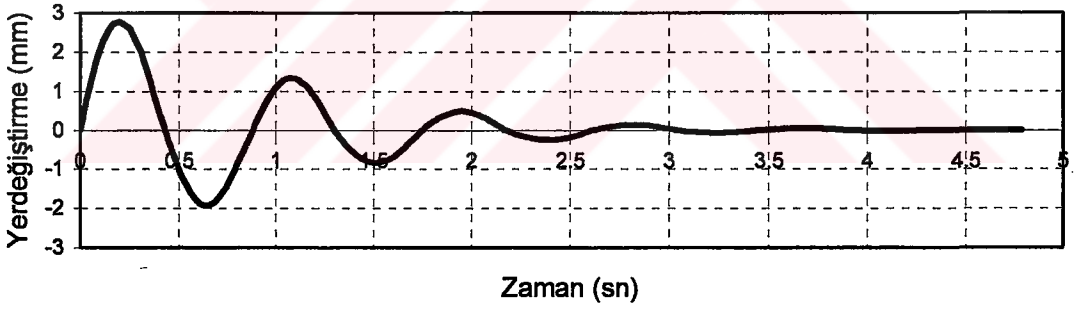
Şekil C59. Y15K deneyine ait gerilme şekil değiştirme boşluksuyu basıncı değişimi ve serbest titreşim deneyleri grafikleri($T=1.305$ sn).



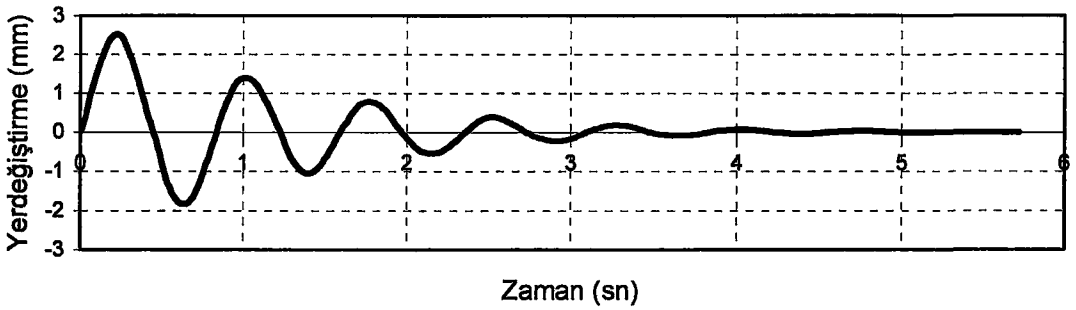
Şekil C60. GDEG05 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=1.24$ sn).



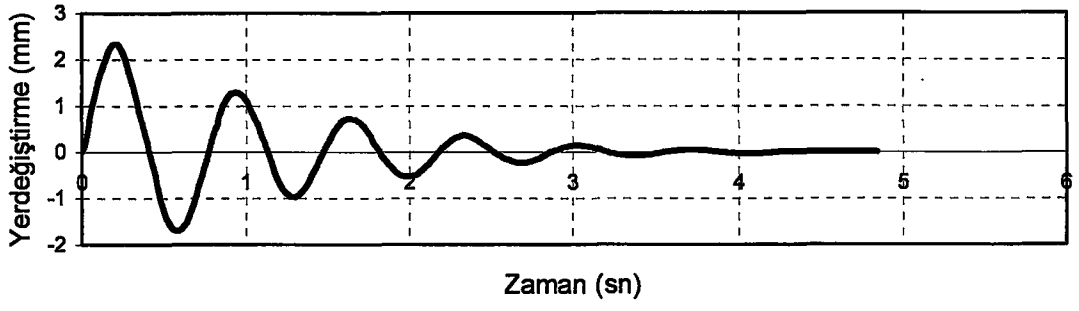
Şekil C61. GDEG10 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.99$ sn).



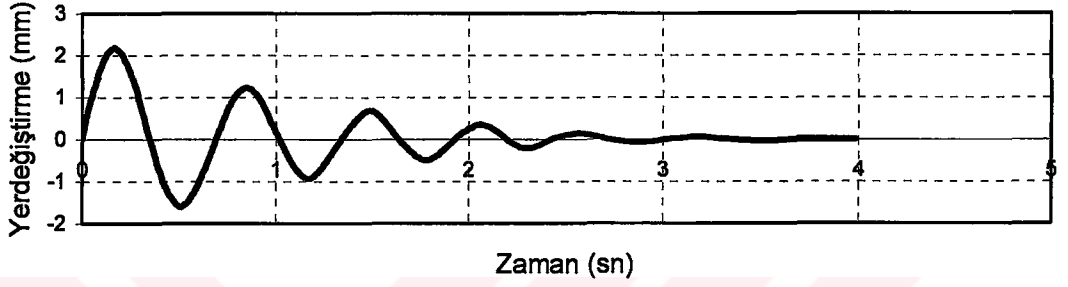
Şekil C62. GDEG15 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.865$ sn).



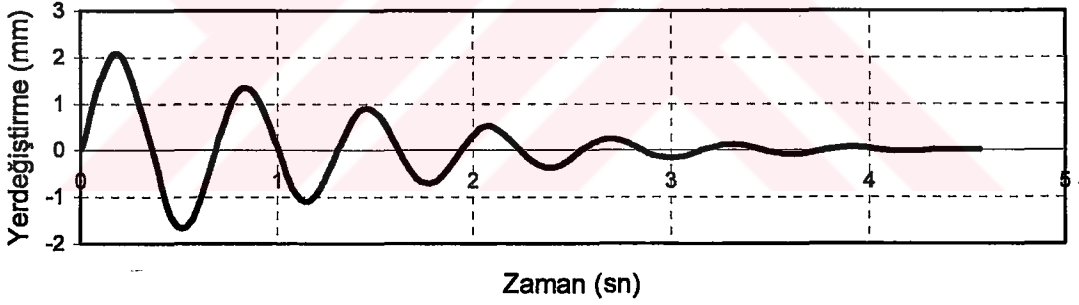
Şekil C63. GDEG20 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.785$ sn).



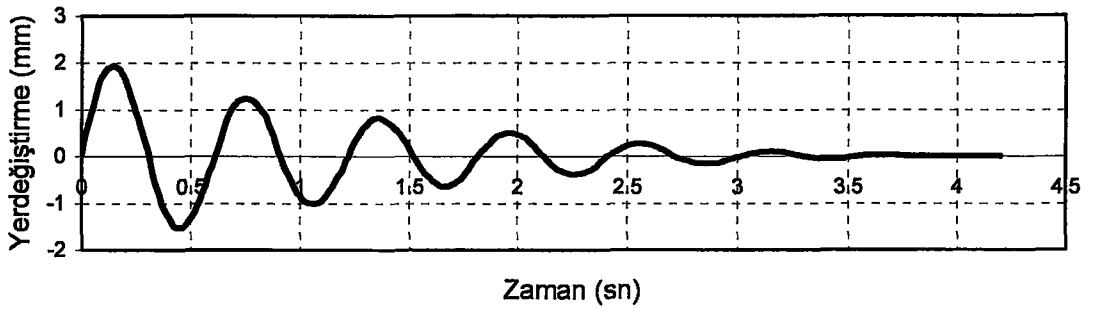
Şekil C64. GDEG25 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.725$ sn).



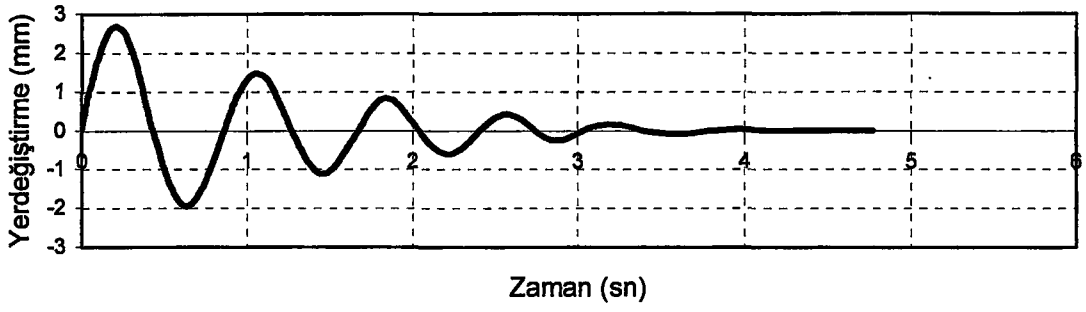
Şekil C65. GDEG30 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.68$ sn).



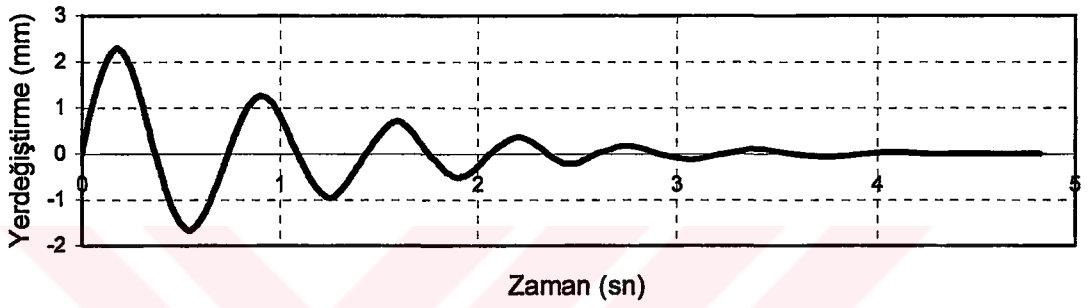
Şekil C66. GDEG35 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.645$ sn).



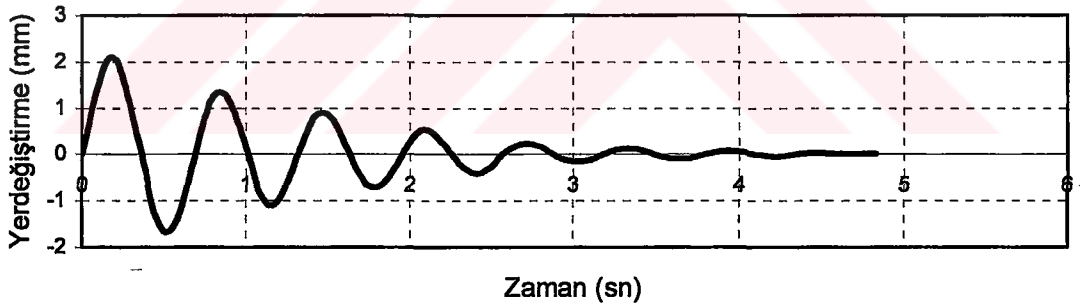
Şekil C67. GDEG40 deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.595$ sn).



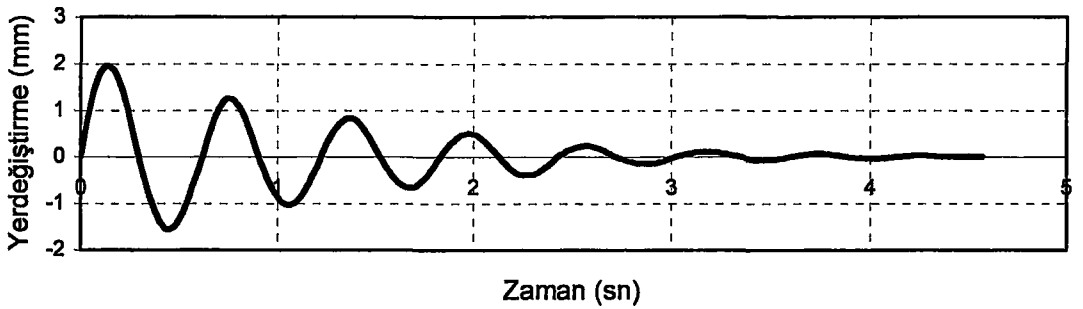
Şekil C68. GDEG10A deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.835$ sn).



Şekil C69. GDEG20A deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.715$ sn).



Şekil C70. GDEG30A deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.65$ sn).



Şekil C71. GDEG40A deneyine ait serbest titreşim deneyi grafiği ($T=0.605$ sn).

ÖZGEÇMİŞ

H. Suha Aksoy 1970 yılında Elazığ'da doğdu. 1987 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi'ne girdi. 1992 yılında lisans eğitimini tamamlayarak inşaat mühendisi oldu. 1993 yılında Fırat Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 1994 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik Programında doktora eğitime başladı. 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde geçici görevlendirme ile araştırma görevlisi olarak tayin oldu. Halen bu göreve devam etmektedir.

