

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİSMİ DOYGUN KUMLARIN TEKRARLI YÜKLER
ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Barış ELİBOL**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ ve GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2005

**KİSMİ DOYGUN KUMLARIN TEKRARLI YÜKLER
ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Barış ELİBOL
(501011552)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Haziran 2005**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ayfer ERKEN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. M.Atilla ANSAL (B.Ü.)
Doç.Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü)**

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında büyük sabır ve ilgi ile beni yönlendiren, desteğini ve bilgi birikimini esirgemeyen sevgili hocam Sayın Doç.Dr.Ayfer ERKEN'e, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına, manevi desteklerine her zaman ihtiyaç duyacağım sevgili babaannem Müberra ELİBOL ve halam Kadriye ELİBOL'a teşekkür ederim.

Haziran, 2005

Barış ELİBOL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. KUMLARIN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI	3
2.1 Giriş	3
2.2 Sıvılaşma ve Doygun Kumaların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı	3
2.2.1 Sıvılaşmayı etkileyen zemin özellikleri	7
2.2.2 Sıvılaşmanın etkileri	12
2.3 Kısmi Doygun Kumlar ve Tekrarlı Yükler Altında Davranışları	13
2.3.1 Kısmi doygun zemin nedir ve nasıl oluşur?	13
2.3.2 Kısmi doygun zeminlerde efektif gerilme yaklaşımları	15
2.3.3 Kısmi doygun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışı	22
2.4 Sonuçlar	24
3.DENEY SİSTEMİ, DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİ ve DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYİN YAPILIŞ AŞAMALARI	26
3.1 Giriş	26
3.2 Kullanılan Deney Sistemi	26
3.2.1 Deney hücresi	27
3.2.2 Basınç sistemi	30
3.2.3 Yükleme düzeneği (Dinamik ve statik yükleme düzenekleri)	30
3.2.4 Ölçüm ve kayıt sistemi	32
3.2.5 Deney sisteminin kalibrasyonu	32
3.3 Deneylerde Kullanılan Malzeme Özellikleri	34
3.4 Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminde Numune Hazırlanması	36
3.5 Dinamik Üç Eksenli Deney Kayıtlarının Değerlendirilmesi	43

3.6 Sonuçlar	45
4. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEY SİSTEMİNDE YAPILAN DENEYLER ve DENEY SONUÇLARI ARASINDA KURULAN İLİŞKİLER	47
4.1 Giriş	47
4.2 Yapılan Deneyler ve Özellikleri	47
4.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	51
4.3.1 Doygun ve yarı doygun numunelerin dinamik deney sonuçlarının karşılaştırılması	51
4.3.2 En büyük elastisite modülünün belirlenmesi ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	60
4.3.3 Kuru numunelerin dinamik deney sonuçlarının karşılaştırılması	67
4.4 Hacimsel Sıkışma Modülü Ölçümleri ve Yapılan Deneylerin Özellikleri	70
4.5 Sonuçlar	74
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	78
EKLER	82
ÖZGEÇMİŞ	131

KISALTMALAR

DKGO	: Dinamik kayma gerilme oranı
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
NCEER	: Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
NSF	: Ulusal Bilim Kuruluşu
SPT	: Standard Penetrasyon Deneyi
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
JICA	: Japon Uluslar arası Yardımlaşma Ajansı

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Akma sıvılaşmasının oluşumu [5].....	5
Şekil 2.2 : Devri oynaklığın oluşumu [5].....	6
Şekil 2.3 : Zemin numunesinde var olan doğal statik ve üç eksenli tekrarlı yük ile uygulanan kuvvetlerin gösterimi [3, 6].....	7
Şekil 2.4 : Dinamik kayma gerilme oranı ile D_r arasındaki ilişki [3, 7].....	8
Şekil 2.5 : Numune hazırlama yönteminin dinamik dayanıma etkisi [3, 11].....	10
Şekil 2.6 : Aşırı konsolidasyon oranının dinamik kayma gerilme oranına etkisi [3, 13].....	11
Şekil 2.7 : Zeminde bulunan suyun sınıflandırılması [21].....	14
Şekil 2.8 Doygunluk yüzdesi, χ ilişkisi[22].....	17
Şekil 2.9 : (a) Su içinde ve yüzeyindeki su molekülüne etkiyen kuvvetler (b) İki boyutlu sistemde su yüzeyinde oluşan basınç ve yüzey çekme kuvvetleri[26].....	19
Şekil 2.10 :(a) Kılcal boruda menisküs etkisi ile oluşan kuvvetler (b) idealleştirilmiş zemin taneleri arasında oluşan menisküs ve kuvvetler[14].....	21
Şekil 3.1 : Dinamik üç eksenli deney sistemi.....	27
Şekil 3.2 Hücre alt tablası.....	28
Şekil 3.3 : Hücre üst başlığı.....	29
Şekil 3.4 : (a) Dinamik yük ayar panosu, (b) Dinamik yük pistonu.....	31
Şekil 3.5 : Statik yükleme ünitesi.....	32
Şekil 3.6 : Ölçüm sistemi dijital panosu.....	33
Şekil 3.7 : Deney numunesi dane dağılımı.....	35
Şekil 3.8 : Dinamik üç eksenli deneyi kurulurken kullanılan aparatlar.....	38
Şekil 3.9 :Numune kalıbına vakum uygulanması ve membranın kalıba takılması	38
Şekil 3.10 : Üst başlığı takılmış numune kalıbının çıkarılmasına ve vakumun üst pistondan uygulanmasına sistem.....	39

Şekil 3.11	: Numunenin hazırlanışı tamamlanmış ve üst pistondan uygulanan vakum ile ayakta durmakta.....	40
Şekil 3.12	: Dinamik üç eksenli tipik deney sonucu ($B=1.00$ $D_r=\%50$).....	46
Şekil 4.1	: Skempton-B parametresi doygunluk ilişkisi [40].....	48
Şekil 4.2	: Eksenel boy değişimi çevrim sayısı ilişkisi $B=0.53$	52
Şekil 4.3	: $B=0.53$ sağlayan deneyler için $\Delta u/\sigma_c$ 'nin N' 'le değişim ilişkisi..	52
Şekil 4.4	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisinin $B=0.53$ olduğu durumda şekil değiştirme oranına etkisi.....	53
Şekil 4.5	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisinin $B=0.53$ olduğu durumda boşluk suyu basıncı oranı üstündeki etkisi.....	53
Şekil 4.6	: ε - N ilişkisinin $B=1.00$ özellikteki deneyler için gösterimi.....	54
Şekil 4.7	: $B=1.00$ sağlayan deneyler için $\Delta u/\sigma_c$ 'nin N' 'le değişim ilişkisi..	54
Şekil 4.8	: Eksenel boy değişimi çevrim sayısı ilişkisi.....	54
Şekil 4.9	: Boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile olan ilişkisi.....	55
Şekil 4.10	: $\pm\%2.5$ çift genlikli eksenel boy kısalmasının olduğu çevrim sayısı ile $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ arasındaki ilişki.....	56
Şekil 4.11	: $\pm\%2.5$ çift genlikli eksenel boy kısalmasının olduğu çevrim sayısı ile $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ arasındaki ilişki.....	56
Şekil 4.12	: Deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.13	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$, $0.00 < B < 1.00$ aralığında değerlere sahip olan numunelerin tekrarlı yükler altındaki ortalama şekil değiştirme çevrim sayısı ilişkisi.....	58
Şekil 4.14	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$, $0.00 < B < 1.00$ aralığında değerlere sahip olan numunelerin tekrarlı yükler altındaki $\Delta u/\sigma_c$ - N ilişkisi.....	58
Şekil 4.15	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ ile yüklenmiş $0 < B < 1$ aralığında doygunlukta $N=10$ 'de B parametresi eksenel boy değişim ilişkisi.....	59
Şekil 4.16	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ ile yüklenmiş $0 < B < 1$ aralığında doygunlukta $N=20$ 'de B parametresi eksenel boy değişim ilişkisi.....	59
Şekil 4.17	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ ile yüklenmiş $0 < B < 1$ aralığında doygunlukta $N=10$ 'de B - $\Delta u/\sigma_c$ ilişkisi.....	60
Şekil 4.18	: $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ ile yüklenmiş $0 < B < 1$ aralığında doygunlukta $N=20$ 'de B - $\Delta u/\sigma_c$ ilişkisi.....	60
Şekil 4.19	: (a)En büyük elastisite modülü ölçümü tüm çevrimleri (b)1-5 çevrim aralığı (c)20-25 çevrim aralığı (d) 30-35 çevrim aralığı....	63
Şekil 4.20	:Elastisite modülünün eksenel boy kısalması ile değişimi $D_r=\%51-52$ $B \geq 0.97$	64
Şekil 4.21	: (62, 71 ve 75) numaralı deneylerin elastisite modülünün azalım ilişkisinin karşılaştırılması.....	64

Şekil 4.22	:Doygun, yarı doygun ve kuru deneylerde ölçülen elastisite modüllerinin karşılaştırılması.....	65
Şekil 4.23	:Elastisite modülünün eksenel boy kısalması ile değişimi $D_r = 32-33$ $B = 1.00$	65
Şekil 4.24	:Yarı doygun $D_r = 28-32$ sıklığa sahip kum numunenin en büyük elastisite modülü değerleri.....	66
Şekil 4.25	:(29, 76 ve 77) numaralı deneylerin elastisite modülünü azaltım ilişkisi.....	67
Şekil 4.26	:Doygun, yarı doygun ve kuru deneylerde ölçülen elastisite modüllerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.27	:(23) numaralı deneyin eksenel boy kısalması çevrim sayısı ilişkisi.....	68
Şekil 4.28	: $\pm \sigma_d / 2\sigma_o = 0.40$ $B = 0.00$ 'da Eksenel boy kısalması çevrim sayısı ilişkisine relatif sıklığın etkisi.....	68
Şekil 4.29	: $\pm \sigma_d / 2\sigma_o = 0.50$ $B = 0.00$ 'da Eksenel boy kısalması çevrim sayısı ilişkisine relatif sıklığın etkisi.....	69
Şekil 4.30	:Kuru deneylerde ε -N ilişkisine çevre basıncı etkisi.....	69
Şekil 4.31	:Kuru numunelerin tekrarlı yükler altındaki davranışına drenajın etkisi.....	70
Şekil 4.32	:Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme hacim değişim ilişkisi.....	72
Şekil 4.33	:Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme boşluk oranı değişim ilişkisi.....	73
Şekil 4.34	:Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme relatif sıklık değişim ilişkisi.....	73
Şekil 4.35	:Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme hacimsel sıkışma modülü değişim ilişkisi.....	74
Şekil A 1	: (89)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	80
Şekil A 2	: (88)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	81
Şekil A 3	: (64)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	82
Şekil A 4	: (1)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	83
Şekil A 5	: (5)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	84
Şekil A 6	: (9)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	85
Şekil A 7	: (10)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	86
Şekil A 8	: (11)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	87
Şekil A 9	: (12)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	88
Şekil A 10	: (14)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	89
Şekil A 11	: (16)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	90
Şekil A 12	: (27)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	91
Şekil A 13	: (2)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	92
Şekil A 14	: (3)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	93
Şekil A 15	: (53)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	94

Şekil A 16	: (90)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	95
Şekil A 17	: (91)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	96
Şekil A 18	: (92)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	97
Şekil A 19	: (69)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	98
Şekil A 20	: (70)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	99
Şekil A 21	: (73)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	100
Şekil A 22	: (25)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	101
Şekil A 23	: (29)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	102
Şekil A 24	: (30)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	103
Şekil A 25	: (31)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	104
Şekil A 26	: (32)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	105
Şekil A 27	: (24)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	106
Şekil A 28	: (17)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	107
Şekil A 29	: (18)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	108
Şekil A 30	: (19)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	109
Şekil A 31	: (20)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	110
Şekil A 32	: (21)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	111
Şekil A 33	: (22)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	112
Şekil A 34	: (23)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	113
Şekil A 35	: (40)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	114
Şekil A 36	: (41)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	115
Şekil A 37	: (42)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	116
Şekil A 38	: (44)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	117
Şekil A 39	: (48)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	118
Şekil A 40	: (51)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	119
Şekil A 41	: (52)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	120
Şekil A 42	: (33)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	121
Şekil A 43	: (34)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	122
Şekil A 44	: (35)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	123
Şekil A 45	: (36)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	124
Şekil A 46	: (37)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	125
Şekil A 47	: (38)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	126
Şekil A 48	: (39)numaralı dinamik deneyin sonuç grafikleri.....	127

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Zeminler için kılcal yükseklikler[21].	20
Tablo 3.1. Malzeme fiziksel özellikleri.	36
Tablo 3.2. Malzemenin $D_r = 55\%$ ve 38% sıklıklarındaki geçirgenlik katsayıları.	36
Tablo 3.3. Tipik deney ham verisinin ilk 5 adımının gösterimi.	44
Tablo 3.4. Deney ham verilerinin kullanılabilir hale dönüştürülmesi örneği.	45
Tablo 4.1. $50-52$ aralığında relatif sıklıkta $B = 1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri.	49
Tablo 4.2. $48-52$ aralığında relatif sıklıkta $B = 0.53$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri.	49
Tablo 4.3. $47-52$ aralığında relatif sıklıkta $0 < B < 1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri.	50
Tablo 4.4. $32-33$ aralığında relatif sıklıkta $B = 1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri.	50
Tablo 4.5. $30-36$ aralığında relatif sıklıkta $B = 0.53$ ve 0.63 olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri.	50
Tablo 4.6. $46-56$ ve $30-39$ relatif sıklıklarda kuru olarak hazırlanmış numunelerin dinamik deneyler verileri.	51
Tablo 4.7. En büyük elastisite modülü ölçümü yapılan deneyler ve özellikleri.	62
Tablo 4.8. Elastisite Modülü azalmasının belirlendiği deneyler.	62
Tablo 4.9. $D_r = 27\%$ sıklıktaki numunede yükleme çevrimlerinde elde edilen veriler ve hesaplanan bulk modülü, K .	71
Tablo 4.10. $D_r = 50\%$ sıklıktaki numunede yükleme çevrimlerinde elde edilen veriler ve hesaplanan bulk modülü, K .	71

SEMBOL LİSTESİ

σ'	: Düşey efektif gerilme
σ	: Düşey normal gerilme
u	: Boşluk suyu basıncıdır
τ'	: Efektif kayma gerilmesi
σ_v	: Toplam düşey zemin gerilmesi
ϕ	: Efektif içsel sürtünme açısı
σ_d	: Tekrarlı gerilmenin
σ_0	: Çevre basıncı
D_r	: Relatif Sıklık
e	: Boşluk Oranı
D	: Dane çapı büyüklüğü
$(N_1)_{30}$	: Düzeltilmemiş SPT vuruş sayısı
$(N_1)_{60}$	: Düzeltilmiş SPT Vuruş Sayısı
S_r	: Doygunluk
B	: Skempton doyumluk parametresi
u_w	: Boşluk suyu basıncı
β'	: Çekme gerilmesi altında meydana gelen bağlantı (bond) sayısıdır, bağlantı (bonding) faktör olarak tanımlanır.
χ	: Malzememin doyumluğuna bağlı olan bir katsayıdır ve tam doyumlukta “1”, kuruda “0” değerini alır.
ψ	: Doyumluğa bağlı olarak 0-1 aralığında değer alan bir parametre
p''	: Boşluk suyu basınç tanımlaması
β	: Deneysel olarak ölçülmüş istatistiksel faktör
p''	: Pozitif kabul edilen negatif boşluk suyu basıncı
χ_m	: Matris emme için efektif gerilme parametresi
h_m	: Matris emme
χ_s	: Çözünen emme için efektif gerilme parametresi
h_s	: Çözünen emme

p''_m	: Matris emme, $(u_a - u_w)$
p''_s	: Çözünen emme
χ_m, χ_s	: Gerilme doğrultusunda bağımlı, 0-1 aralığında değer alan bir zemin parametresidir.
T_s	: Yüzey çekme gerilmesi
R_s	: Menisküsün olduğu daire çapı
Ψ	: Toplam emme olarak tanımlanır
Π	: Osmotik emme
F_C	: Kuvvetinin tüp duvarında düşey sıkıştırma kuvvetleri,
D_{10}	: Efektif tane çapı
D_e	: Efektif boşluk çapı
P	: P dalgası tanımlaması
G	: Kayma modülü
G_s	: Tane birim hacim ağırlığı
C_U	: Uniformluk katsayısı
C_C	: Derecelenme katsayısı
γ_{mak}	: En büyük kuru birim hacim ağırlığı
γ_{min}	: En küçük kuru birim hacim ağırlığı
$CH_{0,1..}$	: Kanal sıfır, bir...
W	: Su muhtevası
N	: Çevrim Sayısı
Δu	: Boşluk suyu basıncındaki artış
$\pm \sigma_d / 2\sigma_0$	: Dinamik kayma gerilme oranı
E	: Elastisite modülü
$\Delta \epsilon$	: Bir çevrimde oluşan en büyük en küçük eksenel boy kısalması farkı

KISMİ DOYGUN KUMLARIN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

ÖZET

Yapılan tez çalışması kapsamında kısmi doygun kumların tekrarlı yükler etkisi altında davranışları incelenmiştir. Bu doğrultuda orta-ince temiz kum numunesi kuru yağmurlama yöntemiyle dinamik üç eksenli deney sisteminde hazırlanmış, çeşitli doygunluk derecelerine ulaşıncaya kadar numuneden karbondioksit ve su geçirilmiş, çeşitli dinamik kayma gerilme oranlarında tekrarlı yük ile yüklenmiş ve daha sonra deney sırasında kayıt edilen veriler yorumlanmaya çalışılmıştır.

Deney sonuçları karşılaştırıldığında temiz kumların tekrarlı yükler altında davranışını etkileyen en önemli parametrenin Skempton-B parametresi olduğu sonucuna varılmıştır. Karşılaştırılması yapılan $Dr=50\%$ sıklığa sahip B değeri 0.53 numunenin sıvılaşmaya karşı olan direnci B değeri 1.00 olan numunelerin direncinden yaklaşık %23 daha fazla olduğu görülmüştür. Aynı durum $Dr=30\%$ civarında sıklığa sahip numunelerde de kontrol edilmiş ve doygun numunelerin sıvılaşmaya karşı olan dirençleri $B=0.53$ olanlardan yaklaşık olarak %22 daha az olarak elde edilmiştir. Boşluk suyu basıncı ölçümlerinin aynı çevrim sayılarındaki değerleri karşılaştırıldığında da doygunluğun azalmasıyla boşluk suyu basıncı önemli miktarda azaldığı deneyler sonucunda elde edilmiştir. Ek olarak deneylerde en büyük elastisite modülü ölçümleri ve azalım ilişkileri sonucunda elastisite modüllerinin değişimi gözlemlenmiştir. $Dr=50\%$ sıklıkta $B=1.00$ olan numunede en büyük elastisite modülü 285MPa olarak elde edilirken %30 sıklıktaki numunede yaklaşık olarak 275MPa olarak elde edilmiştir. Azalım ilişkileri sonucunda da bu sıklıktaki numunelerin $B=0.00$, 0.53 ve 1.00 değerlerini sağladığı durumlardaki ve 0.01mm eksenel boy kısalması oranında elastisite modülleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarakta %50 sıklıktaki numunede doygun okuru olan numunelerin yarı doygundan %20, yarı doygunun da tam doygundan %32 daha büyük elastisite modülü, %30 sıklıktaki numunede de yarı doygun olan kurudan %32, doygunda yarı doygundan yaklaşık

olarak %22 daha düşük elastisite modülü değerlerine sahip olduğu görölmüştür. Kuru numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda da numunenin tekrarlı yük etkisi altındaki davranışını etkileyen en önemli zemin indeks özelliğinin relatif sıkılık olduğu görölmüştür. Ayrıca drenajlı ve dreanajsız olarak da kuru numunelerde deneyler yapılmış ve havanın drene olabilmemesinin eksenel boy ksalmasında önemli etkisi olduğu görölmüştür.

Özetle, yapılan çalışmada deneysel olarak zemin fiziksel özelliklerinin ve yükleme koşullarının kısmi doymun kumların davranışına olan etkileri araştırılmıştır.

BEHAVIOR of PARTIALLY SATURATED SAND UNDER CYCLIC LOADING

SUMMARY

In this study, the examination of partially saturated sand behavior under cyclic loading is done. By this aim medium-fine sand specimen prepared by dry deposition method in different relative densities and with different saturation degrees for to be tested in dynamic triaxial test apparatus. Then specimens loaded under different cyclic stresses, and then collected test data tried to be interpreted.

When the test results examined, it is obvious that the most important parameter, which affects the behavior of sand under cyclic load, is saturation. In addition to that, when the comparison made between specimens have same relative density of %50 and saturation degrees $B=0.50$ - $B=1.00$, the saturated specimens liquefaction resistance is 23% less than partially saturated one. Same situation is checked for the specimens with relative density 30%, and the liquefaction resistance of partially saturated one is 22% more than full saturated specimen. Then tests conducted on specimens which have different B values under same loading conditions. When the results compared for the same loading cycle, pore water pressure build up rapidly in high degree of saturated specimens and saturation occurred on specimen which have B value of 0.73. On the other hand, specimen which has B value of 0.33 the pore water pressure built up to value of 0.26kg/cm^2 . In addition, determination of the elasticity modulus from the dynamic test results and degradation tests are conducted. By this way, the comparison of elasticity modulus for saturated and partially saturated specimens made. According to the test results, the specimen, which has B value of 0.50 and relative density of 50%, has elasticity modulus of 285MPa, and the specimen with relative density 30% has elasticity modulus approximately 275MPa. By the degradation tests, the variation of elasticity modulus compared for specimens with B value of 0.00-0.53-1.00. When value comparison made for the strain differences 0.01mm, the specimen with relative density %50 and with B value 0.00

has the greatest value. The same comparison made for specimen with $Dr=30\%$, and same result obtained. Another research topic is the examination of dry specimens behavior under cyclic loads. It is obtained that the most important soil property is relative density and the drainage condition of air is effective on strain behavior of dry clean sand specimens.

In brief, the effect of index properties of soils and loading conditions are interpreted for partially saturated soils in this study.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Modern zemin mekaniğinin 1925’lerde kuruluşundan bu yana mühendisler ve araştırmacılar zeminlerin gerilme-deformasyon davranışı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. 1950’li yıllarda da statik yüklemelerin yanında zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışları incelenmeye başlanmış ve günümüzde halen devam etmektedir. Özellikle depremler sırasında oluşan ani kuvvetler sonucunda kohezyonsuz zeminlerde meydana gelen boşluk suyu basıncı zaman ilişkisi ve deformasyon gerilme ilişkileri temel olarak araştırma konularını oluşturmaktadır. Çalışmalarda genel olarak arazi ölçümleri ve laboratuvar deneyleri birlikte kullanılamaya çalışılsa da, arazi verilerine ulaşmanın zorlukları nedeniyle çalışmalar laboratuvar çalışmalarıyla sınırlı kalmaktadır.

Deneyisel çalışmalar genel olarak laboratuvarda hazırlanmış ya da mümkün olmuşsa araziden alınmış örselenmemiş numunelerin dinamik deney aletlerinde tekrarlı olarak yüklenmesini ve sonuçlarının yorumlanmasının içermektedir. Bu çalışmalar sonucunda arazi koşullarındaki doğal zemin tiplerinin özellikleri de dikkate alınarak korelasyonlar ve abaklar oluşturulmuştur.

Doğal koşullarında tüm zeminlerin doygunluk kriterlerini sağladığı ya da tamamen kuru olduklarından söz edilemez. Bu düşünce doğrultusunda belirlenen tez çalışmasının konusu kapsamında laboratuvar ortamında temiz, orta-ince kum çeşitli sıklık ve doygunluk değerlerinde kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış ve tekrarlı yükle dinamik üç eksenli deney sisteminde yüklenmiştir. Bu şekilde hazırlanan ve yüklenen numunelerin deney sonuçları kullanılarak temiz kumların tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışına doygunluk, Skempton-B parametresi, uygulanan tekrarlı yükün büyüklüğü, drenaj koşullarının ve relatif sıklığın etkisinin araştırılması bu çalışmada amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında oluşturulan bölümlerin ikincisinde kısaca doymuş zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, sıvılaşma, sıvılaşmanın oluşmasına etkisi olan zemin özellikleri ve sıvılaşmanın etkilerinden bahsedilmektedir. Daha sonra kısmi doymuş kumlar, oluşumuna sebep olan etmenler ve kısmi doymuş zeminlerdeki efektif gerilme yaklaşımları kısaca anlatılmış. Bölüm sonunda da kısmi doymuş zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışları konusunda yayınlanmış olan çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde çalışma kapsamında kullanılan dinamik üç eksenli deney sistemi detaylı bir şekilde tanıtılmış, sistemin kalibrasyon yöntemi ve sistemde deney numunesinin hazırlanması anlatılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan kum numunesinin fiziksel özellikleri verilmiş ve deney sırasında alınan ham kayıtların hesaplarda kullanılması için hazırlanmış olan tablolar gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde de yapılan deneylerin listesi, sonuçları arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmış ve sonuçları grafikler yardımıyla gösterilmiştir.

Son bölüm olan sonuçlar kısmında da diğer bölümlerdeki bilgiler doğrultusunda dördüncü bölümdeki deney sonuçları arasında kurulan ilişkiler yorumlanmaya çalışılmıştır.

2. KUMLARIN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

2.1 Giriş

Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışları, oluşabilecek şekil değiştirmeler düşünüldüğünde çok büyük önem taşımaktadır. Tekrarlı yükün etkisi ile boşluk suyu basıncında meydana gelen artış ve deprem süresinin kısa olması sebebiyle drenaj koşullarının sağlanamaması ile oluşan sıvılaşma ve oturma olayları kohezyonsuz zeminlerin deprem etkisi altında kaldıklarında karşılaştıkları en büyük sorunlardan biridir. Bu konuda yapılan çalışmaların amacı ise genel hatlarıyla sıvılaşmanın oluşabileceği bölgeleri belirlemek ve sıvılaşmaya karşı olan direnci arttırmaktır. Bu çalışmada ise, kısmi doymuş kumların tekrarlı yükler altında davranışları incelenmiştir. Bu nedenle bu bölüm, genel hatlarıyla kohezyonsuz zemin tiplerinin doymuş ve doymuş olmadıkları hallerde tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışları, bu davranışa etkisi olan etmenler, doymuş olmayan zemin tanımı, bu tip zeminlerin oluşumu biçimleri ve efektif gerilme yaklaşımları hakkında yapılan çalışmalar için ayrılmıştır.

2.2 Sıvılaşma ve Doymuş Kumların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

Güçlü deprem kuvvetleri altında gevşek yerleşimli kum ve çakıllar sıkışmalar ve zemin içinde boşluklarda bulunan yeraltı suyunda basınç artışı meydana gelir. Boşluk suyu basıncındaki bu artış da, zeminlerde ani dayanım ve içsel dengeyi sağlayan kesme kuvvetlerinde azalmalara ve kayıplara neden olur. Böylelikle zemin doğal denge durumunu kaybeder ve taşıma gücü kayıpları, oturmalar, farklı yönlerde şekil değiştirmeler, hareketler, deprem kuvveti etkisi ile sıkışmalar meydana gelebilir. Tekrarlı yüklemeler altında, zeminin tam doymuş olması durumunda, boşluk suyu basıncı düşey zemin gerilmesine eşit olduğu durumda Terzaghi (1923, 1939)'nin doymuş zeminler için tanımladığı bağıntı (2.1)'de de görüldüğü üzere efektif gerilme sıfır olur ve zemin taşıma gücünü tamamıyla kaybeder.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

σ' : Düşey efektif gerilme,

σ : Düşey normal gerilme,

u : Boşluk suyu basıncıdır.

Bağıntı (2.1)'de tanımlanan durum, kohezyonsuz zeminde oluşan kayma gerilmesi için de bağıntı 2.2'deki gibi açıklanabilir [1];

$$\tau' = (\sigma_v' - u) \tan \phi' \quad (2.2)$$

τ' : efektif kayma gerilmesi

σ_v' : toplam düşey zemin gerilmesi

ϕ : efektif içsel sürtünme açısı

u : boşluk suyu basıncıdır

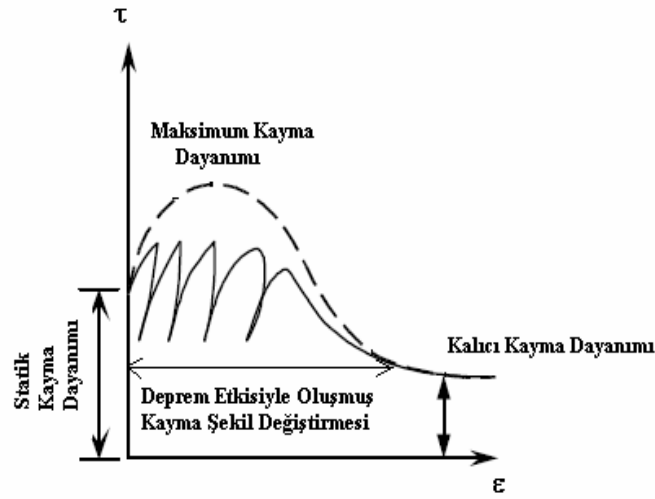
Yukarıda verilen bağıntılarda boşluk suyunda oluşan artış sebebiyle efektif gerilmenin sıfıra eşit olması hali sıvılaşma olarak tanımlanır. Sıvılaşma temel olarak zemin taneleri arasında bulunan sürtünme kuvvetinin kaybolması ile oluşmaktadır ve temel özelliği drenajsız yükleme koşullarında oluşan aşırı boşluk suyu basıncıdır [2]. Eğer zemin ince taneler içeriyor ya da ince taneli ise taneler arasında oluşan kohezyon tanelerin birbirinden ayrılmasını zorlaştırmaktadır [3]. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmaya yatkınlığı, şekil değiştirmelere karşı taneler arasında çevre basıncı etkisi altında oluşan sürtünme kuvvetinde azalmayla meydana gelmektedir. Suyu doymun kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yüklemeye maruz kalması durumunda, zeminde sıkışma ve ani yükleme durumuna bağlı olarak drenajın yeterli düzeyde sağlanamaması ile boşluk suyu basıncının artmasıyla dayanım yeteneğini kaybeden zeminde, su yüzeye doğru harekete geçer ve içinde silt, kum tanelerininide taşıyarak zemin yüzeyinde çatlakların, kum konilerinin oluşmasına neden olur. Sıvılaşan zeminde direnç önemli miktarda azalır ve yapılan çalışmalar göstermiştir ki zemin tam bir sıvı gibi davranır [4]. Bu çalışmalarda sıvılaşan zeminin davranışını anlayabilmek ve modelleyebilmek için sıvılaşan zeminin doğrusal olmayan viskoz özellik gösterdiği kabul edilmiş ve Bingham modelleri kullanılmıştır. Artan boşluk suyu basıncı ile efektif gerilmede meydana gelen azalma ile gelişen sıvılaşma olayı iki ana gruba ayrılabilir;

- Akma sıvılaşması

- Devri oynaklık

Akma sıvılaşmasının arazide oluşum sıklığı devri oynaklıktan daha azdır, fakat etkileri bakımından daha yıkıcıdır. Devri oynaklık ise daha geniş alanda etkili olabilmekte ve etkileri kademeli olarak artabilmektedir [2].

Akma sıvılaşması bir zemin kütlesinin statik dengesi için gerekli olan kayma gerilmesinin, zeminin sıvılaşmış durumdaki kayma dayanımından büyük olduğu durumda gelişir. Şekil 2.1'den de görüldüğü üzere maksimum kayma gerilmesi değeri deprem nedeniyle oluşmuş olan kayma dayanımından büyüktür ve kalıcı kayma dayanımı da deprem sonucunda oluşan gerilmekten büyüktür. Oluşan deformasyonları nedeni ise tetiklemeden sonraki statik kayma gerilmeleridir [2].

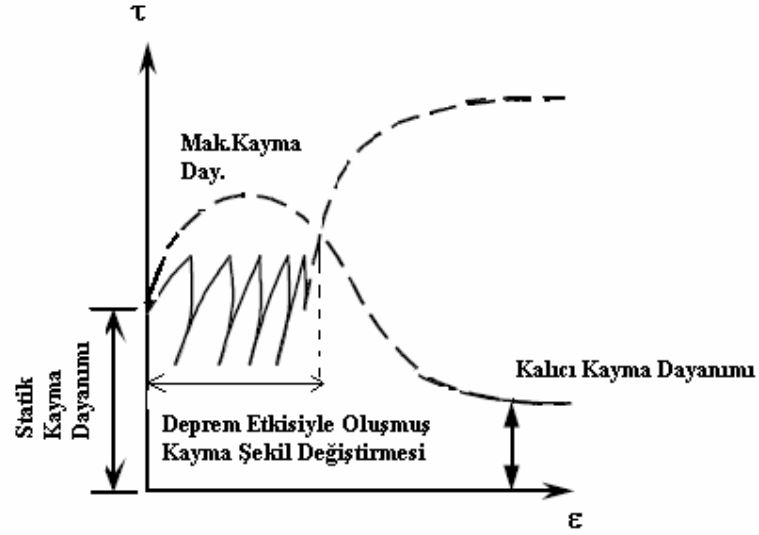


Şekil 2.1 Akma sıvılaşmasının oluşumu [5]

Devri oynaklık ise akma sıvılaşmasının aksine, statik kayma gerilmesinin sıvılaşmış zeminin kayma dayanımından küçük olduğu Şekil 2.2'de de gösterildiği gibi oluşmaktadır. Devri oynaklıkta deformasyonların nedeni hem statik kuvvetler hem de devrinsel kuvvetlerdir. Bu deformasyon türü yanal yayılma olarak adlandırılır ve çok küçük eğimlere sahip yamaçlarda ya da su kütlelerine komşu düzlüklerde meydana gelmektedir. Bu durum yapıların bulunduğu bölgelerde önemli miktarda hasara neden olabilmektedir [2].

Devri oynaklık için özel bir durumda yüzey sıvılaşmasıdır. Bu durumda yatay deformasyonlar üretebilecek kayma gerilmelerinin mevcut olmadığından, düz yüzey sıvılaşması bir deprem sırasında zemin dalgalanması olarak bilinen büyük boyutlu ve

düzensiz karakterli hareket oluşturmakta fakat küçük kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır.

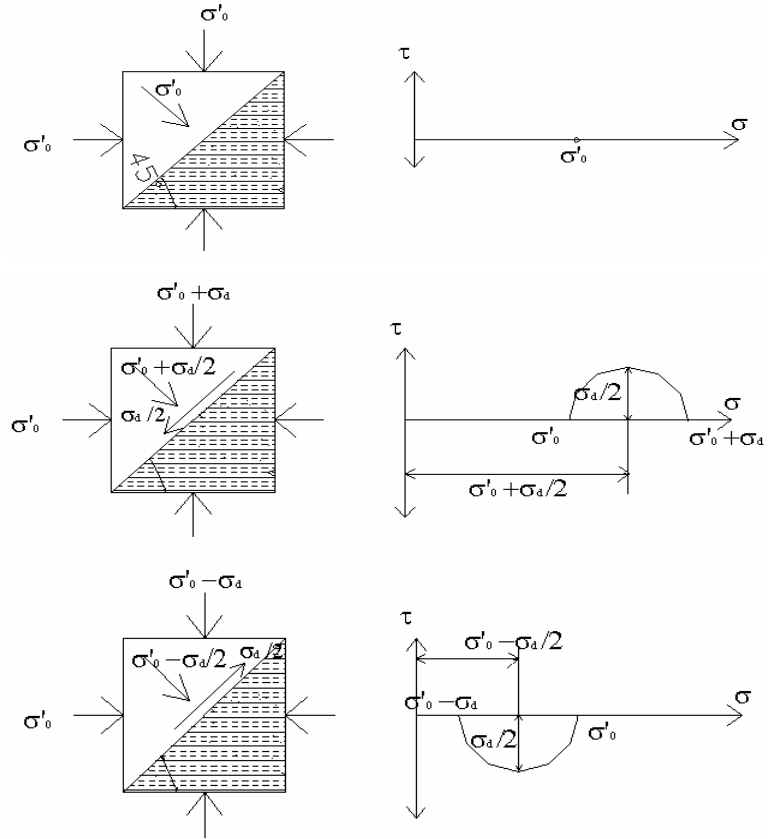


Şekil 2.2 Devri oynaklığın oluşumu [5]

Yatay zemin tabakalarının sıvılaşmasında asıl neden deprem nedeni ile oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi sırasında suyun yukarı yönlü hareketidir. Hidrolik olarak denge sağlanana kadar sıvılaşma meydana gelebilir ki burum deprem sona erdikten sonra da sıvılaşma oluşturabilir [2].

Sıvılaşmanın belirlenmesi için ilk çalışmalar Seed ve Lee (1966) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmada dinamik üç eksenli basınç sistemi kullanılarak, doymun durumdaki kumlar çevre basıncı uygulanarak konsolide edilmiş, daha sonra drenajsız koşulda tekrarlı gerilme uygulanmış ve en büyük eksenel şekil değiştirme oranları elde edilen kadar tekrarlı yükleme sürdürülmüştür. Bu yükleme durumu sonucunda Şekil 2.3’de de görüldüğü üzere, numune içinde 45^0 ’lik açıda kayma yüzeylerinin oluştuğu gözlemlenmiştir [3, 6].

Gevşek kumlar için başlangıç sıvılaşması yumuşama başlangıcı olarak kabul edilir, çünkü bu durumda boşluk suyu basıncı oranı %100’e ulaştığından tüm dayanım gücü kaybolur ve çok büyük şekil değiştirmeler oluşabilir. Orta sıkılıktaki kumlar içinse %100 boşluk suyu basıncı oranı oluşumu yanında %5’lik çift genlikte deformasyon oranı da oluşmalıdır.



Şekil 2.3 Zemin numunesinde var olan doğal statik ve üç eksenli tekrarlı yük ile uygulanan kuvvetlerin gösterimi [3, 6]

2.2.1 Sıvılaşmaya etkileyen zemin özellikleri

Bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi sıvılaşmanın temel nedeni deprem kuvvetlerinin kısa sürede etkili olması nedeni ile kumlu zeminlerin drenaj imkanı bulamaması ve artan boşluk suyu basınçları altında zeminin direncini kaybederek sıvı gibi davranmasıdır. Bu açıklamadan anlaşıldığı üzere boşluk suyu basıncının sönümlenmesinde etkili olan zemin parametreleri, geçirgenlik ve drenaj koşulları, zemin taneleri arasındaki sürtünmeyi etkileyen kohezyon gibi özellikler sıvılaşmaya karşı zeminin direncini etkilemektedir.

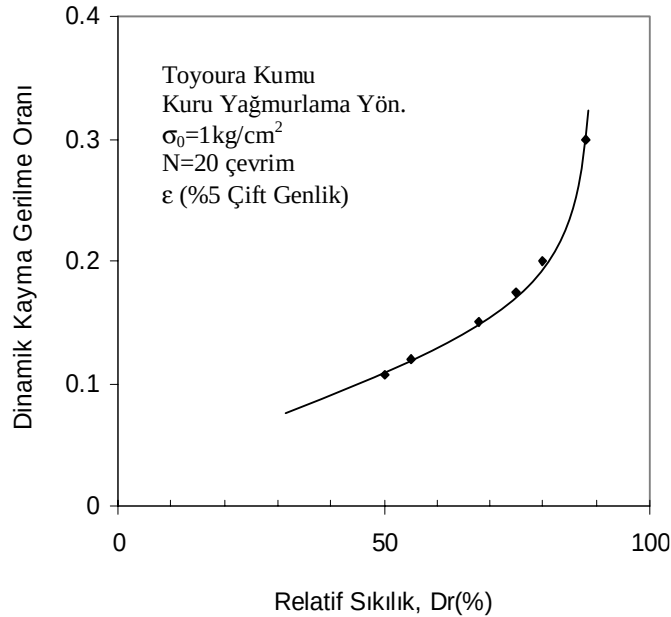
Zeminin sıvılaşmaya karşı olan direnci zemin özellikleri, çevresel faktörler ve deprem özelliklerine bağlıdır. Sismik yükleme esnasında sıvılaşma direncini etkileyen çevresel faktörler sırası ile

- Relatif sıkılık
- Boşluk oranı

- Zemin yapısı, bileşenleri ve laboratuvarında numune hazırlama metodlarının etkisi
- Zemin geçirgenliğinin etkisi
- Drenaj özellikleri
- Aşırı konsolidasyon oranı
- Başlangıç çevre basıncı ve tabakalaşma etkisi
- Jeolojik yaş
- Zeminin geçmişte maruz kaldığı dinamik yüklerin etkisi
- Zeminin maruz kaldığı dinamik kuvvet büyüklüğü
- Zeminin dinamik olarak yüklenme süresi ve yüklenme frekansı

Bağıntı (2.3)'den de görüldüğü gibi tekrarlı gerilmenin (σ_d) yarısının, çevre basıncına (σ_0) oranı olarak tanımlanan dinamik kayma gerilme oranı (DKGO) değeri Şekil 2.4'de de gösterildiği üzere relatif sıkılıkla (D_r) artmakta ve D_r %70 değerine ulaşıncaya kadar doğrusal artan DKGO, %70'i geçen D_r değerlerinde keskin bir artış göstermektedir.

$$DKGO = \frac{\sigma_d}{2\sigma_0} \quad (2.3)$$

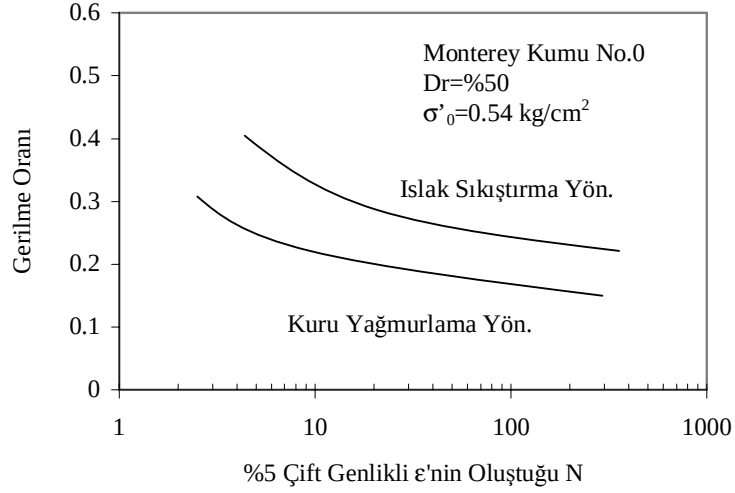


Şekil 2.4 Dinamik kayma gerilme oranı ile D_r arasındaki ilişki [3, 7]

Relatif sıklığın boşluk oranının, e , bir fonksiyonu olduğu düşünülürse, relatif sıklıkla DKGO arasındaki ilişkiye benzer bir ilişki de e ile DKGO arasında da bulunmaktadır.

Zeminin yapısal bileşenlerinin, tabakalaşmanın ve laboratuvar da numune hazırlama metodu da sıvılaşma direncini direk olarak etkilemektedir. Kumlu zemin içerisinde bulunan kohezyon sıvılaşma direnci üzerinde önemli etkiye sahiptir. %30'dan fazla ince tane oranına sahip, kohezyonlu, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre "kil" olarak tanımlanmış ve plastisite indisi %30'dan fazla olan zeminlerin genel olarak sıvılaşmaya karşı direnci yüksektir. Dolayısıyla ince tane oranı ve plastisite özellikleri sıvılaşma direncini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Yapılan dinamik üç eksenli deneyler sonucunda, temiz kum numunelerin yüksek relatif sıklılarda bile örselenmemiş, düşük plastisiteli malzeme içeren kumlardan daha düşük dinamik mukavemet gösterdiği belirlenmiştir [8]. Genel olarak ince dane oranı %15 den fazla ($D < 0.005\text{mm}$), likitlik indisi %35 den büyük ve doğal su muhtevası likitlik indisinin 0.9 katı olan zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin az olduğunun göstergesidir [9]. Ek olarak kumlu ve siltli zeminler ve bazı çakıllar sıvılaşma riski taşımaktadırlar. Bazı iri taneli, çakıllı zeminler yüksek geçirgenlik özelliğine sahiptirler ama boşlukların ince tane ile dolmuş olması ve bu özellikteki zemini çevreleyen daha az geçirgen tabakaların bulunması yükleme sonucunda boşluk suyu basınçlarının oluşmasına neden olabilir. Böylelikle boşluk suyu basıncının yok olması zaman alır ve bu koşullardaki çakıllı zeminlerde sıvılaşma potansiyeline sahip olarak tanımlanabilir. Birçok çakıl sıvılaşması örneğinde zemin tipinin kum ve çakıldan oluştuğu görülmektedir, ama çakıl oranındaki artış sıvılaşma direncinde, relatif sıklık sabit tutulduğunda, artışa yardımcı olur.

Aynı D_r değerlerinde laboratuvar da farklı metotlarla hazırlanmış numuneler farklı değerlerde CSR değerleri göstermektedir, Şekil 2.5' de hazırlama metotları ve numunelerin tekrarlı yükleme oranları görülmektedir [3]. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda oluşan maksimum ivme değerinin artması ile sıvılaşan tabakaların kalınlıklarının arttığı deneysel çalışmalar yardımıyla belirlenmiştir [10].

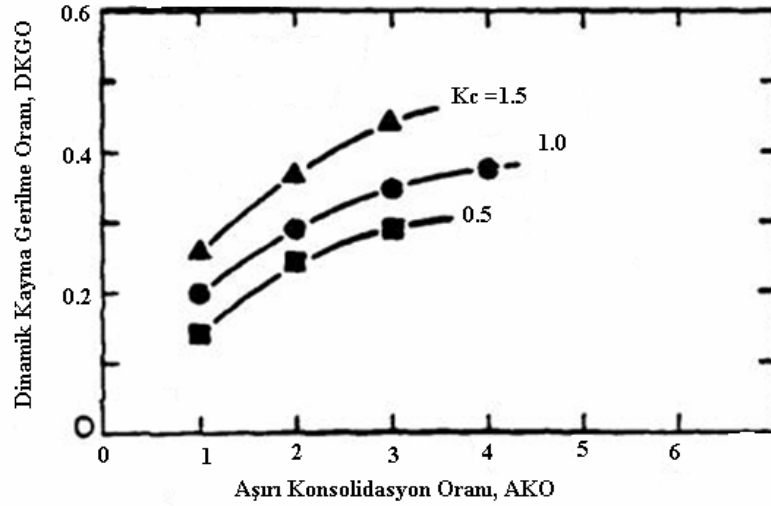


Şekil 2.5 Numune hazırlama yönteminin dinamik dayanıma etkisi [3, 11]

Sıvılaşmanın etkisinin derinlikle azaldığı kabul edilmektedir ancak geçmiş depremlerde elde edilen veriler sonucunda zemin yüzeyinden 30m derinlikteki kum tabakalarına oturan derin temellerin de sıvılaşma riski olduğu raporlanmıştır. Genel olarak yüzeysel temellerin, yüzeyden 15m derinlikteki sıvılaşma olaylarından etkilenmediği belirtilmektedir [9]. Yapılan bir diğer çalışmada da tabaka kalınlığı fazla, yüzeyden derinlerde bulunan sıvılaşan zeminin, yüzeye etkisi az olduğu, ancak yüzeye yakın ve tabaka kalınlığı ince sıvılaşabilen zeminlerin etkisi yüzeye daha fazla olabildiği gösterilmiştir. Bunlara ek olarak tabakanın genişliği de oturmalar ve yüzeye olan etkiler üzerinde önemli rol oynar. Yapılan arazi çalışmaları sonucunda 20m derinlik altında sıvılaşan tabakanın yüzeye etkisi az ya da hiç olmamıştır [12].

Okamura ve diğerlerinin (2001) yaptıkları çalışma sonucunda kum zeminlerde geçirgenliğinin düşmesi ile sıvılaşma daha derinlerde etkili olduğu sıvılaşan tabaka kalınlıklarının arttığı ve boşluk suyu basıncının geçirgenliği düşük olan numunelerde yok olmasının diğerlerine göre geç olduğu gözlemlenmiştir [10].

Aşırı konsolidasyon oranının da sıvılaşma direnci üzerinde etkisi bulunmaktadır. Ishihara ve Takatsu' nun (1979) yaptıkları çalışmalar sonucuna göre Şekil 2.6'da da gösterildiği gibi aşırı konsolidasyon oranının artması ile sıvılaşma direnci artmaktadır [3, 13].



Şekil 2.6 Aşırı Konsolidasyon oranının dinamik kayma gerilmesine oranına etkisi [3, 13]

Bunlara ek olarak efektif çevre basıncının artması boşluk suyu basıncı oluşumuna karşı direncin artmasına yardımcı olur. Yüzeye yakın su seviyesine sahip zeminler daha derinlerde su seviyesine sahip zeminlerde daha çok sıvılaşma riski taşımaktadır [14].

1996 yılında Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (NCEER) tarafından ve 1998 yılında Ulusal Bilim Kuruluşu (NSF) ve NCEER tarafından ortak olarak yayınlanan raporda da sıvılaşma direncinin yaş ile doğru orantılı olduğu konusunda birçok bilim adamı uzlaşmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda da 100 günlük numuneler ile yeni hazırlanmış numuneler arasındaki sıvılaşma direnç farkı yaklaşık olarak %25 olarak belirlenmiştir [15]. Genel olarak, genç kumlu yapıdaki zeminler sıvılaşmaya yatkın olarak tanımlanmaktadır. Genç zemin tipleri (0-10000 yıl arası yaşa sahip) doğal drenaj kanalları olduğu kabul edilir ve sıvılaşmaya yatkındır, bunun yanında yaşlı zeminlerin (10000 - 1810000 yıl aralığında yaşa sahip) sıvılaşma riski taşımadığı kabul edilmiştir [14, 16]. Bu duruma rağmen zemin ve yeraltı suyu şartları değişmediği zaman sıvılaşmanın aynı yerde tekrarladığı Youd (1984) tarafından yapılan arazi incelemelerinde elde edilmiştir [2, 17].

Meißner ve diğerleri (1995) yaptıkları araştırmalar sonucunda malzeme dinamik davranışının yükleme geçmişinden etkilenmediği ve yıkılma anına düşük basınçlardan yüksek basınçlara çıkılsa da, direk olarak yüksek basınçlarda numuneler

denense de yaklaşık olarak aynı noktalarda ulaşıldığını saptamışlardır [18]. Dickenson ve diğerlerinin (2002) yaptıkları çalışmanın sıvılaşma risk değerlendirilmesi bölümünde ise tekrarlı yükleme geçmişinin sıvılaşma direncini olumlu yönde etkileyeceğini belirtmişlerdir [14].

Yukarıda anlatılan özellikler düşünüldüğünde deprem sırasında zeminin maruz kaldığı kuvvet büyüklüğü ile zeminin sıvılaşma direnci de ters orantılı olduğu ortaya çıkmaktadır. Ek olarak uygulana kuvvetin periyodu ne kadar küçükse ve etki süresi ne kadar uzunsa etkisi dolayısıyla o kadar fazla olmaktadır.

Laboratuvarda incelenen zemin numunelerinin sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesinin yanında arazi deneylerinin de sonuçları kullanılarak zeminlerin sıvılaşma potansiyeli taşıyıp taşımadığı belirlenebilir. Seed ve İdris'in yaptıkları çalışma sonucunda standart penetrasyon deneyi (SPT) sonucu elde edilen vuruş sayısının, $(N_1)_{30}$ düzeltilmesi ile elde edilen düzeltilmiş vuruş sayısı $(N_1)_{60}$ 22 değerinden, Marcuson ve diğerlerine göre 30 değerinden büyük olduğu durumlarda sıvılaşma riskinin düşük değerlerdeki zeminlere göre çok azaldığını göstermişlerdir[9, 19]. Koni penetreasyon deneyi (CPT) içinde Shibata ve Teparaska uç direnç olarak 15MPa'dan az direnç gösteren zeminlerin sıvılaşma riski taşıdığını belirtmiştir [9, 19].

2.2.2 Sıvılaşmanın etkileri

Ani yüklemeler sonucunda oluşan boşluk suyu basıncı sebebiyle oluşan sıvılaşma olayı sonucunda başta taşıma gücü kayıplarının oluşması gibi temel sorunlarla birlikte aşağıda sıralanmış ve büyük hasarların oluşmasına neden olabilecek oluşumlar gerçekleşebilir.

- Taşıma kapasitesi kayıpları
- Önemli miktarda oturmalar
- Zeminde yanal yayılma ve zemin deformasyonları
- Dayanma yapılarındaki yanal basınçlarda artışlar
- Ankrajlı sistemlerde pasif direnç kayıpları ve
- Şev düzlemlerinde ya da serbest yüzeylerde zemin akmaları oluşur.

Doygun zeminlerde oluşan boşluk suyu basıncının sönmelenmesi zemin yüzeyi yönünde gerçekleşmekte ve bu durum sırasında özellikle kumlu zeminlerde depremler sonrasında tekrar konsolidasyona uğramaları sebebiyle hacim

değişimlerine neden olmaktadır. Böylelikle oluşan hacim değişimi yüzeye oturma olarak yansımaktadır [20]. Bu durumda sismik oturma olarak adlandırılır. Tüm doygun ve olmayan kumlar deprem sarsıntılarına maruz kalmalarından sonra yoğunluluğunda artmasıyla oturmaya uğrar. Eğer kum doygun ise ve drenaj imkânı yok ise hacim sabit kaldığından boşluk suyu basıncı artışı meydana gelir. Bu durumdan sonra boşluk suyu basıncının yok olması ile oturmalar meydana gelir. Diğer yandan doygun olmayan kumlarda oturmalar deprem sallanması sırasında sabit efektif düşey gerilme sırasında meydana gelebilir [9].

Belli derinlikte oluşan sıvılaşma üst tabakalarda akımların oluşmasına neden olur, ama bu akımlar sıvılaşma oluşturmazabilirler. Sonucunda ise alt tabakaların bu etkisi, yüzeyde taşıma kapasitesi azalmasına neden olabilir.

Eğer sıvılaşma olasılığı var ise dinamik kompaksiyon, kimyasal yöntemlerle zemin iyileştirilmesi, derin kazıklı temeller gibi yöntemler uygulanarak zemin iyileştirilip, istenmeyen oturmalar ve temele olan olumsuz etkiler engellenebilir.

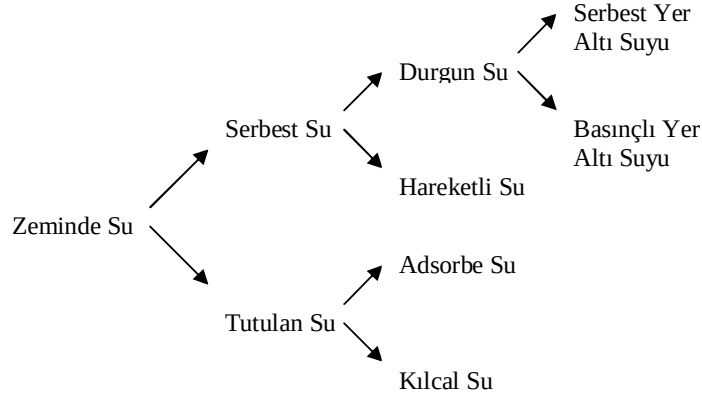
Zeminin tam doygun olmadığı durumlarda da sıvılaşma oluşur, ancak bu durumda sıvılaşmayı tetikleyen kuvvet miktarı artmaktadır. Yani kısmi doygun zeminlerin doygun olanlara göre sıvılaşma durumu değerlendirildiğinde doğal bir avantajları bulunmaktadır.

2.3 Kısmi Doygun Kumlar ve Tekrarlı Yükler Altında Davranışları

2.3.1 Kısmi doygun zemin nedir nasıl oluşur?

Zemin ortamında boşluklarda bulunan suya zemin suyu denilmektedir. Zemin içinde bulunma durumuna göre Şekil 2.7’de açıklandığı şekliyle sınıflandırılabilir.

Yer çekimi etkisi ile serbestçe akabilen su serbest su olarak tanımlanır ve içinde serbest su bulunan zemin doygun olarak düşünülür. Serbest su durgun (hareketsiz) veya hareketli (akış durumunda) bulunabilir. Bunun yanında zemin taneleri arasında bazı kuvvetlerce tutulan suya ise tutulan su denir ve adsorbe ya da kılcal durumlarda zemin içinde bulunabilir. Adsorbe su hidroskopik olarak da tanımlanmaktadır ve zemin tanelerinin dış yüzünü film şeklinde kaplayan sudur. Kılcal özellik ise doygun olmayan zeminlerde efektif gerilme yaklaşımı hakkındaki bölümde detaylı olarak anlatılacaktır [21].



Şekil 2.7 Zeminde bulunan suyun sınıflandırılması [21]

Genel olarak kabul edildiği şekli ile yeraltı su seviyesi yani yukarıda serbest su olarak tanımlanan su seviyesinin altındaki birçok zemin, doygunluk kriterlerini sağlayamayabilir. Temelde negatif boşluk suyu basıncı oluşan zeminler doygun olmayan zeminler olarak tanımlanır [22]. Ancak doygunluk (S_r) ve Skepton B parametresi dikkate alındığında da %100 değerinden düşük S_r ya da 0.95 den küçük B değerleri sağlayan zeminler tam doygun olmayan zemin olarak tanımlanabilir. Kısmi doygunluğa temel olarak yeraltı su seviyesindeki doğal ya da dış etkiler sebebiyle oluşan değişimler, kılcallık, yağışlar sonucunda oluşan su akımlarının zeminden geçmesi ya da buharlaşma olayları sonucunda oluşabilir. Dolayısıyla bölgesel iklim özellikleri zemindeki doygunlukta önemli etkiye sahiptir. Zeminde oluşan kısmi doygunluk zeminin kayma dayanım parametrelerini etkilediğinden zeminin yüklenmesi sırasında oluşan şekil değiştirme davranışını direk olarak etkilemektedir ve tekrarlı yükleme etkisi altında kaldığında da yüksek boşluk suyu basıncı oluşumları doğal olarak doygun zeminlere göre daha yavaş meydana gelse de etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Kısmi doygun zeminler maddenin hava, gaz ve sıvı fazlarını içerdiğinden temel mekanik özellikleri doygun olan zeminlere göre farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte dikkate alınması gereken diğer bir faz olarak ta hava-su etkileşim bölgeleri dikkate alınmalıdır. Kılcallığın temel nedeni olan bu bölge zemin taneleri arasındaki boşluklardan suyun yükselmesine ve kısmi doygun bölgelerin oluşmasında ve kayma dayanımının artmasında etkilidir.

2.3.2 Kısmi doymun zeminlerde efektif gerilme yaklaşımları

Kısmi doymun kumlarda efektif gerilme olayı doymun olanlara göre daha karmaşıktır. 1950'li yıllarda kısmi doymunlarda efektif gerilme yaklaşımını inceleyen birçok araştırmacı boşluk suyu basıncını ve boşluktaki havayı birbirinden ayrı değerlendirmişler, tanımlamalarını ise temel olarak doymunluk parametrelerine bağlamışlardır [23]. Temel olarak doymun zeminlerde efektif gerilme tanımlamaları Terzaghi (1923, 1936) ve Skempton (1961) tarafından deneysel olarak ispatlanmış ve kabul görmüştür. Terzaghi' nin efektif gerilme için yaptığı yaklaşımlar iki temel üzerine oturmaktadır;

- Zemin sıkışma, dönme ve kayma direncindeki değişim gibi gerilme değişimlerinin ölçülebilir etkileri temel olarak efektif gerilme sonudur. 1960 yılında da Skempton'ın yaptığı efektif gerilme tanımında Terzaghi'nin yaptığı tanıma benzer şekildedir ve hacim, zemin dayanımında değişimleri kontrol eden gerilme efektif gerilmedir şeklindedir.
- Diğer bir tanımlama biçimi de boşluk suyu basıncından büyük olan toplam gerilme şeklindedir.

Yukarıdaki tanımlamalar dikkate alındığında ve konunun ilerleyen kısımları incelendiğinde Terzaghi'nin doymun zeminler için geliştirdiği efektif gerilme yaklaşımının kısmi doymun zeminlerdeki yaklaşımların iskeletini oluşturduğu ancak farklılıkların kısmi doymun zeminlerin yapısından kaynaklanan hava basıncı etkilerinin dikkate alınmasından oluştuğu görülecektir.

Klasik yaklaşıma uygun olarak hava basıncı ve boşluk suyu basıncı farkı emme olarak tanımlanmış ve belli doymunluk dereceleri altında zemin iskeleti içine yerleşmiş hava taneciklerinin bulunabileceği, zemin yapısının üst kısmındaki boşluk hava basıncının sistemin tamamından farklı olabilmektedir [23]. Jennings ve Burland (1962) tarafından gerçekleştirilen odometre ve üç eksenli basınç deneyleri sonucunda kum, silt ve killi zeminlerin belli doymunluk değerleri altında temel efektif gerilme yaklaşımlarına uymadığı anlaşılmıştır. Bu kritik değer kumlar için %50 doymunluk seviyesi altı, killerde ise %90 doymunluk seviyesidir. Bu değerlerin altında doymunluk elde edildiğinde efektif gerilme hesaplanmasında Terzaghi'nin önerdiği bağıntı kullanılamaz [24]. Ek olarak doymunluk parametresi B zemin içinde bulunan hava kabarcıklarının çapından etkilenmektedir ve hava kabarcığının çapı

0.005mm'den küçük olduğu durumlarda B parametresindeki artışa olumlu etkisinin olduğu Tamura ve diğerleri tarafından yapılan çalışma ile belirlenmiştir [25].

Doygun olmayan zeminlerde efektif gerilme yaklaşımlarından ilkinin Croney(1958) yapmıştır. Ona göre efektif gerilme bağıntısı aşağıdaki gibidir [26].

$$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad (2.4)$$

σ', σ : efektif ve normal düşey gerilmeler

u_w :boşluk suyu basıncı

β' :çekme gerilmesi altında meydana gelen bağlantı sayısıdır, bağlantı faktör olarak tanımlanır.

1959'da Bishop'da doygun olmayan zeminlerde meydana gelen efektif gerilmenin hesaplanması için bir bağıntı önermiştir ve bu bağıntı 1960 yılında İngiltere'de düzenlenmiş olan Boşluk Basıncı ve Emme adlı konferansta geniş kitlelerce kabul görmüştür [24, 26]. 1962 yılında Bishop ve Donald'ın yaptıkları bir diğer çalışmada kısmi doygun zeminlerde meydana gelen efektif gerilme hesaplamaları için kullanılmasının önerildiği (2.5) bağıntısının doğruluğunu üç eksenli basınç deneyleri ile kanıtlamışlardır [27].

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.5)$$

χ : Malzememin doygunluğuna bağlı olan bir katsayıdır ve tam doygunlukta "1", kuruda "0" değerini alır. χ ile doygunluk derecesi arasındaki ilişki Bishop, Donald ve Escario ve Juca'nın yaptıkları çalışmalar doğrultusunda Şekil 2.8' de olduğu gibi elde edilmiştir.

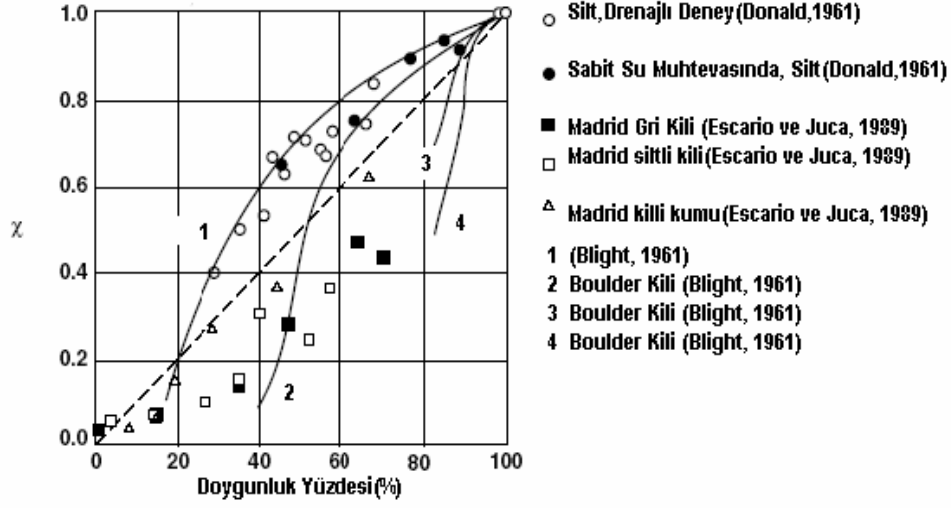
u_a : Hava basıncı

Aitchison(1961) doygun olmayan zeminlerde efektif gerilme olayı için (2.6) numaralı bağıntıyı, Jennings'de (1961) Aitchison'nun yaptığı tanımlamaya benzer olarak (2.7) numaralı bağıntıyla farklı bir yaklaşım önermişlerdir.

$$\sigma' = \sigma + \psi p'' \quad (2.6)$$

ψ : doygunluğa bağlı olarak 0-1 aralığında değer alan bir parametre

p'' : boşluk suyu basınç tanımlaması



Şekil 2.8 Doygunluk yüzdesi, χ ilişkisi[22]

$$\sigma' = \sigma + \beta p'' \quad (2.7)$$

β : deneysel olarak ölçülmüş istatistiksel faktör

p'' : pozitif kabul edilen negatif boşluk suyu basıncı

1966 yılında Richards da doymun olmayan zeminlerde efektif gerilme yaklaşımına çözünen(solute) emme bileşenini eklemiş ve (2.8) numaralı bağıntıyı önermiştir.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a) \quad (2.8)$$

χ_m : Matris emme için efektif gerilme parametresi

h_m : Matris emme

χ_s : Çözünen emme için efektif gerilme parametresi

h_s : Çözünen emme

u_a : Hava basıncı

u_w : Su basıncı

Yukarıda tanımladığımız efektif gerilme bağıntılarına ek olarak 1973 yılında Aitchison Richardsons(1966) denklemini geliştirerek;

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m p''_m + \chi_s p''_s \quad (2.9)$$

bağıntısını önermiştir.

p''_m : Matris emme, $(u_a - u_w)$

p''_s : Çözünen (Solute) emme ve

χ_m, χ_s : gerilme doğrultusunda bağımlı, 0-1 aralığında değer alan bir zemin parametresidir.

Yukarıda tanımlanan bağıntıların nerdeyse tamamında hava basıncı ve su basıncı arasındaki ilişkiler dikkate alınmıştır. Matris emme olarak efektif gerilme bağıntılarında bulunan terim aslında sadece su ve hava etkileşiminden kaynaklanmaktadır ve kılcallık, menisküs oluşumunda temel nedendir. Bu ilişki genel olarak yüzey çekme gerilmesi ile tanımlanır ve su içinde, su yüzeyinde olmak üzere ayrılır. Yüzeyde hava su etkileşiminin olduğu bölgede sadece havanın etkisi ile su moleküllerine Şekil 2.9 (a)' da olduğu gibi oluşurken, su içindekilere ise 2.9 (b)' deki gibi her yönden uygulanan kuvvetler etkimektedir. İçerde moleküller kuvvetler dengesindedir, ancak yüzeyde dengede olmayan kuvvetler mevcuttur. Bu kuvvetlerin dengeye ulaşması su-hava birleşim yüzeyinde çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olur ve yüzey çekme gerilmesi, T_s , olarak tanımlanır ve bağıntı (2.10)'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Kuvvetin oluşma şekli ise R_s çapına sahip bir daireye Şekil 2.9 (a)'daki gibi teğettir ve su yüzeyinden kap kenarına doğrudur. Su sıcaklığının 20°C civarında olduğu durumda, Kaye ve Laby'in (1973) yaptığı çalışmalar sonucunda bu kuvvetin 72.75mN/m olduğu tahmin edilmiştir. Durum iki boyutlu değerlendirilip, düşeyde denge denklemi çözüldüğünde oluşan su basıncı denklem (2.11)'da gösterilmiştir [26].

$$2T_s \sin \beta = 2(\Delta u)R_s \sin \beta \quad (2.10)$$

Denklem sadeleştirildiğinde, oluşan fazlalık su basıncı ise;

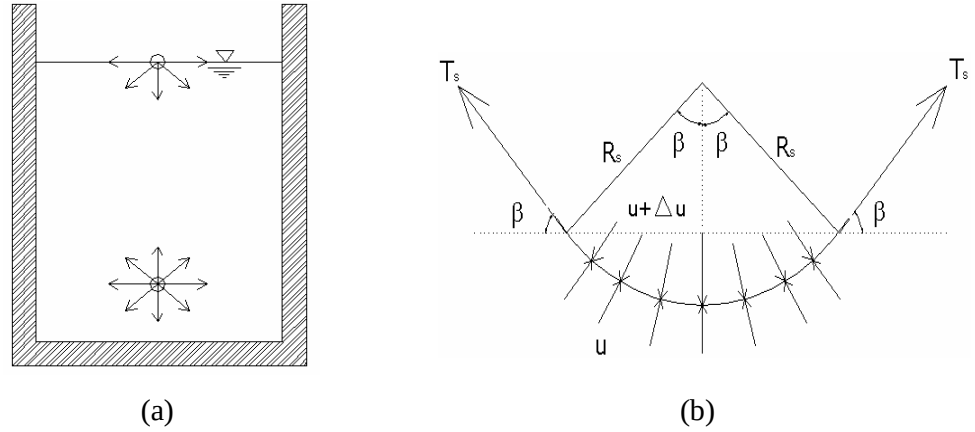
$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.11)$$

şeklini alır. Sistem üç boyutlu düşünüldüğünde ise (2.11) numaralı bağıntı (2.12) numaradaki şekli alır, eğer çaplar her yönde aynı ise (2.13) numaralı bağıntıya dönüşür.

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.12)$$

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.13)$$

Doygun olmayan zeminlerin laboratuvar ortamında test edilmesi durumunda, su yüzeyi zemin içindeki su basıncından daha yüksek bir hava basıncına maruz kalacaktır. İşte bu gerilme farkı efektif gerilme yaklaşımlarında da dikkate alınan terim matris emme olarak tanımlanır ve bağıntı (2.13) ile verilir;



Şekil 2.9 (a) Su içinde ve yüzeyindeki su molekülüne etkiyen kuvvetler (b) İki boyutlu sistemde su yüzeyinde oluşan basınç ve yüzey çekme kuvvetleri[26].

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.14)$$

Oluşan bu etki sonucunda su yüzeyinde dıştan içe doğru bir eğim oluşur ve bu oluşumda bilindiği üzere menisküs olarak adlandırılır.

Bununla birlikte doymun olmayan zeminlerde oluşan boşluk suyu basıncı atmosferik basınçtan düşüktür ve atmosferik basınç referans olarak kabul edildiğinde su basıncı negatif değer alır. Bu değer de toplam emme olarak tanımlanır, Ψ . Aslında toplam emme olarak tanımlanan terim matris emme ve osmotik emme, Π , birleşiminden oluşur. Genel olarak osmotik emme su içindeki kimyasalların etkisinden, özellikle tuz varlığıyla oluşur ve geoteknik problemlerinde etkisi dikkate alınmaz [22].

$$\Psi = (u_a - u_w) + \Pi \quad (2.15)$$

Kılcallık direkt olarak su-hava etkileşim yüzeyinde oluşan basınç farkından oluşmaktadır. Suyun menisküs oluşturmada, su ile çevresinde bulunan malzemenin etkileşimine bağlıdır ve bu oluşan kuvvetin doğrultusunu etkilemektedir. İnce bir borunun su dolu kaba daldırıldığında yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile suyun yükselmesi durumu zemin içinde boşluklarda bulunan suyun taneler arasında yükselmesine benzer ve bu oluşum kılcallık olarak adlandırılır. Bu durum için denge denklemi yazılırsa;

$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho_w g \quad (2.16)$$

elde edilir, oluşan yükseklik çekilirse;

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} = \frac{2T_s}{\rho_w g r} \quad (2.17)$$

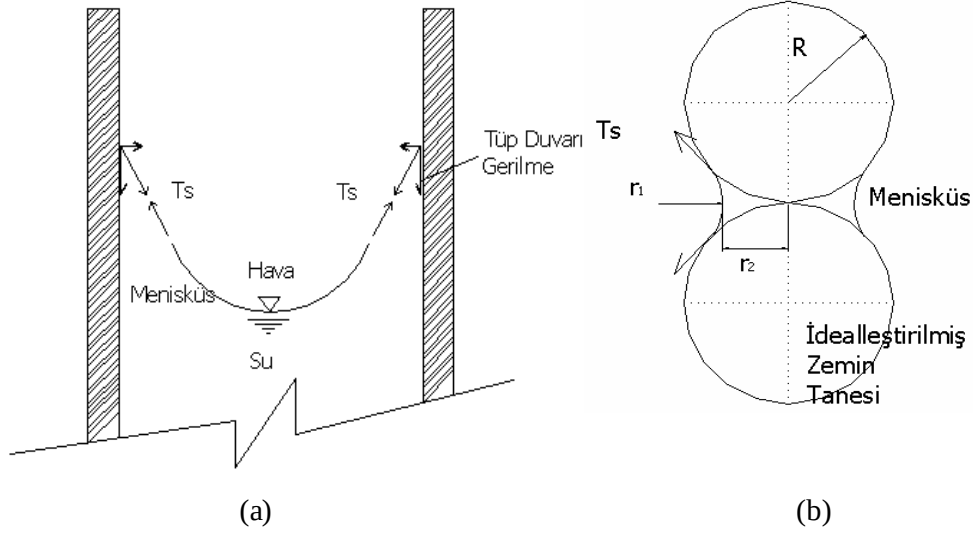
İkinci eşitlikte tanımlanan r tüpün çapıdır ve görüldüğü üzere boşluk çapı küçüldüğünde oluşan kılcal yükseklik artmaktadır. Dolayısıyla zeminlerde de tane çapı küçüldükçe kılcal su yüksekliği artmaktadır [26]. Zemin tiplerine göre oluşabilecek genel kılcal su yükseklikleri Tablo 2.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Zeminler için kılcal yükseklikler[21]

Zemin Türü	Kılcal Yükseklik(cm)
Çakıl	–
Kum	10 – 100
Silt	100-1000
Kil	> 1000

Şekil 2.10’ dan görüldüğü üzere oluşan T_s kuvvetinin tüp duvarında düşey sıkıştırma kuvvetleri, F_C , oluşturmaktadır. Bu durum kılcallık etkinin olduğu zeminler düşünüldüğünde zemin içinde düşey sıkışma gerilmelerini arttırmakta, sonuç olarak matris emme zeminin kayma direncini arttırmaktadır. Ek olarak kohezyonsuz zemin numunelerinde yapılan rezonant kolon deneyleri sonucunda kılcallığın düşük genliklerde ölçülen kayma modülü üzerindeki olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Efektif tane çapının (D_{10}) küçülmesi ile bu etki artmakta, buna ek olarak çevre basıncı düşük olanlar kılcallıktan oldukça fazla etkilenmektedirler. Deneyleri yapılan numunelerin kılcallıklarının %5 ve %20 aralığında su muhtevalarında önemli

derecede etkili olduğu görülmüştür. Denenen numunelerden en küçük efektif tane çapına sahip olan numunenin, deneylerin sonucunda aynı çevre basıncı etkisi altında oluşan kayma modülünün kuru olanların yaklaşık iki katı değerinde olduğu gözlemlenmiştir [28].



Şekil 2.10 (a) Kılcal boruda menisküs etkisi ile oluşan kuvvetler (b) idealleştirilmiş zemin taneleri arasında oluşan menisküs ve kuvvetler[14]

Kapiler kuvvetin idealleştirilmiş iki küresel zemin tanesi arasında oluşumu Şekil 2.10' da gösterilmiştir. Bu şekildeki geometri ve kuvvetler dengesi çözüldüğünde oluşan gerilme, σ_c , aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{(2R)^2} = \frac{\pi T_s}{2R} \left(1 - \frac{3}{2}\alpha\right) \quad (2.18)$$

$$\alpha = \frac{r_2}{R} \quad (2.19)$$

Bağıntıda α ile tanımlanan oluşan yüzey çekme gerilmesi ile malzeme düzlemi arasındaki açıdır, doygunluktan ve su muhtevasından etkilenmektedir.

Fakat doğal ortamda bu tanımlamalar geçersiz kalmaktadır, çünkü doymun olmayan zeminlerde kılcallık etkisi ne düzgün bir boru içinde yükselmeye ne de ideal şekle sahip taneler arasında oluşmaktadır. Eğer efektif boşluk çapı, D_e , olarak efektif tane

çapının yüzde yirmisi kabul edilirse (2.17) numaralı denklem kullanılarak oluşabilecek kılcal yükseklik belirlenebilir [26].

2.3.3. Kısmi doymun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışı

Genel olarak sıvılaşma amaçlı yapılan çalışmalarda temel alınan nokta sıvılaşmaya karşı olan direncinin artırılmasıdır. Bu amaçla zeminlerde yapılması öngörülen işlemlerden ilki yeraltı su seviyesinin düşürülerek doymunluğun azaltılması, bir diğeri gene doymunluğu azaltma amaçlı olarak zemin taneleri arasına yapılan hava kabarcıkları enjeksiyonudur [29].

Yoshimi ve diğerlerinin(1989) de yaptıkları çalışmanın amacı, doymunluğun azaltılmasının sıvılaşma direnci üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Kısmi doymun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışı hakkındaki ilk çalışmalardan birini sayılan Yoshimi ve diğerlerinin çalışmasının çıkış noktası, doğal zeminlerin her zaman tam doymun durumda olmadıkları ve sıvılaşma direncini etkileyen en önemli parametrenin doymunluk olduğunun sonucuna varmalarıdır. Genel olarak burulmalı dinamik aletle gerçekleştirilen deneyler sonucunda %70 doymunluğa sahip gevşek kum zeminlerin tam doymun olanlarına nazaran 3 misli daha fazla sıvılaşma direnci gösterdiği belirlenmiş ve drenajsız koşulda deformasyon davranışlarının doymun olanlara göre daha düzenli bir karakteristik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanında yapılan deneyler sonucunda Skempton-B parametresinin artışı ile beklendiği gibi sıvılaşma direncinin azaldığı ve kısmi doymun kumun sıvılaşma direncinin birim hacim ağırlığı daha fazla olan doymun kum dirençleri seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir [29]. B parametresi de özellikle üç fazlı sistemlerde sistem içinde bulunan hava kabarcıklarının çapından direk olarak etkilenmektedir. Hava kabarcığı çapı küçüldükçe B parametresi değeri artmakta ancak çap 0.005mm değerinden daha küçükse etkisi daha fazla meydana çıkmaktadır [25]. 1977 yılında Sherif ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri de aynı sonuçları vermiştir. Genel olarak %80 doymunluktaki ince temiz kumlarda gerçekleştirilen deneylerde sıvılaşma direncinin doymunluğun azalması ile arttığı gözlemlenmiştir [29]. Benzer çalışmaları Yoshimi, Chaney, Sherif ve Yang kısmi doymun bölgelerin arazide belirlenmesi amacıyla B parametresi ile P-dalga hızı arasındaki ilişkiyi araştırmaları sırasında yapmışlardır. Çalışma içeriğinde yapılan deneyler sonucunda sıvılaşma direncinin büyük ölçüde B katsayısı tarafından etkilendiği ve bu değerin sıvılaşma oluşturacak

yükleme çevrimi sayısının B değerinin azalması ile arttığı gözlemlenmiştir. Yang ve diğerleri de aynı amaçla yaptıkları çalışma sırasında doygun ve doygun olmayan zeminlerin Sherif (1977), Yoshimi (1989), Xia ve Hu (1991) ve Ishihara (2001)'a ait dinamik deney sonuçlarını kullanmışlardır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde ise (2.20) ile verilen bağıntı elde edilmiştir. Bağıntıda e boşluk oranı ve α olarak verilen değer kendi yaptıkları çalışma sonucunda 0.710 olarak belirlenmiştir, ancak bu sonuç kullanılan malzeme özelliklerine göre farklılık göstermektedir [30].

$$(DKGO)_{KısmiDoygun} = (DKGO)_{TamDoygun} * e^{[\alpha(1.0-B)]} \quad (2.20)$$

Kısmi doygunluğa sebep olabilen diğer bir faktörde yağışlardır. Yağışlar sonucunda oluşan kısmi doygunluk ve negatif boşluk suyu basıncı etkisi sonucunda potansiyel kırılma düzlemine etkiyen efektif normal gerilmenin azalmasına neden olur, böylelikle oluşan kesme gerilmeleri şevlerde tekrar denge durumuna ulaşamaz. Drenajlı üç eksenli deneylerinin sonuçlarına dayanılarak, doygunluk derecesi yüksek olan Kumona çakıllı kumunda düşük olana göre yıkılma daha erken olmakta ve yüksek boşluk suyu basınçlarına da çabuk ulaşmaktadır. Sıklık azaldıkça göçmenin olduğu deformasyon oranı azalmaktadır. Ayrıca hacimsel olarak küçülme kapasitesi yüksek olan zeminlerde kesme etkisi ile oluşan sıkıştırma kuvvetleri nedeniyle boşluk suyu basıncı oluşumu daha hızlı olmaktadır. Genişleme özelliği gösterenlerde ise boşluk suyu basıncı oluşumu kesme direncini arttırmakta, böylelikle göçme daha yavaş oluşmaktadır [31].

Yukarıda bahsedilen Yoshimi, Chaney, Sherif, Yang'ın çalışmalarına ek olarak B parametresi P-dalga hızı ilişkisini arazide doygunluk belirlenmesinde kullanmak üzere Tsukumato (2002)'da bir çalışma yapmış ve B parametresinin 0'dan 1'e doygunluğa ulaştığı durumlarda P dalga hızı 500m/sn' den 1800m/sn' ye ulaştığını belirlemiştir. Yapılan çalışmalar P dalga hızının doygun zeminlerde, sudaki hızının %10-15 arasında daha fazla olduğunu göstermiştir. Tekrarlı gerilme altında sıvılaşma direncinin B parametresi ve doygunluk değerinin azalması ile arttığı gözlemlenmiştir. B değerinin doygunluğun 0.90 olduğu durumdan 0'a düşmesi ile sıvılaşma direncinde doygun olanlara nazaran 2 kat arttığı belirlenmiştir [32]. Kokusho'da 2000 yılında yaptığı çalışmada P dalgasının hızını ve sıvılaşma direncini etkileyen en önemli parametrenin B parametresi olduğu sonucuna varmıştır [33].

Yapılan rezonant kolon deneyleri sonucunda kılcal etkinin kısmi doygun malzemelerde kesme dayanımını önemli miktarda etkilediği ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında maksimum kayma dayanımı ile boşluk oranı arasında lineer bir ilişki olduğu ve optimum doygunluk derecesinin boşluk oranının artması ile arttığı belirlenmiştir. Doygun malzeme davranışı ile doygun olmayan arasında kılcallık etkisi nedeniyle önemli farklar oluşmaktadır. Kılcallık etkisi ile oluşan menisküs nedeniyle malzemeye ek efektif çevre gerilme etkisi gelmekte ve sonuç olarak kesme modülünde önemli artış olmaktadır. Daha çok düşük boşluk oranına sahip numuneler için kılcallık etkisi daha geçerli bir yaklaşımdır. Kuru numunelerde ve kısmi doygun numunelerde farklı çevre basıncı altında yapılan deneyler sonucunda çevre basıncının artması ile G/G_{kuru} oranında azalma olmaktadır. Bu durum arazi için yorumlandığında ise zeminde derinlik arttıkça oluşan çevre basıncında ki artışla beraber kılcallık etkisinin yüzeye yakın derinliklerde daha etkili olduğu sonucuna varılır. Bu duruma ek olarak kayma modülünü etkileyen diğer bir faktörde zemin tanesinin geometrik şeklidir. Yuvarlak şekle sahip kum danelerin mukavemetleri açısından genel olarak köşeli olanlara göre daha düşüktür [34].

Yang ve diğerlerinin (2001, 2002) yaptıkları çalışma sonucunda sıvılaşma direncinde artış meydana gelmesine yardımcı olan kısmi doygunluğun olumsuz etkisi de ortaya çıkmıştır. Bu olumsuz etkiyi araştırmak için yapılan çalışmada 1995 Kobe depremi sonuçları değerlendirilmiş ve kısmi doygun zeminlerin düşey yöndeki büyütme etkilerinin doygun olanlara göre daha büyük olduğu görülmüştür [35]. Çalışmalar sonunda doygun derecesindeki farklılıklar yüzeyde yansıyan sismik dalgaların genliklerinde önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Zeminlerdeki kısmi doygunluk durumu, dalga hareketinin özellikle geliş açısının küçük olduğu durumlarda genel olarak düşeyde ve yatayda tam doygunluk sağlananlara göre daha büyük oranlarda dalga hareketinin olduğu belirlenmiştir. Analitik ve nümerik modellerde de düşey zemin hareketinin kısmi doygunluktan olumsuz etkilendiğini göstermiştir. Bunun yanında düşük geliş açılarında yatayda zeminde meydana gelen genliklerin düştüğü gözlemlenmiştir [36].

2.4 Sonuçlar

Hazırlanmış olan bölüm içinde genel hatlarıyla sıvılaşmanın oluşum mekanizması, sıvılaşmayı etkileyen zemin özellikleri, sıvılaşma sonucundaki oluşumlar ve doygun

zeminlerin davranışlarından bahsedilmiştir. Ayrıca çalışma konusunu oluşturan kısmi doymun zeminler tanıtılmış, oluşum nedenlerinden ve kısmi doymun zeminlerdeki efektif gerilmeler ve kısmi doymun zeminlerin dinamik özelliklerini konu alan çalışmalardan bahsedilmiştir.

3.DENEY SİSTEMİ, DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİ ve DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYİN YAPILIŞ AŞAMALARI

3.1 Giriş

Yapıların inşa edileceği zemin özelliklerinin incelenmesi inşaat mühendisliğinin önemli konularından birisidir. Temel olarak mekanik özellikleri incelenen zeminlerde, tekrarlı yükler altındaki davranışının da incelenmesi gerekliliği 1960'lı yıllarda geoteknik deprem mühendisliğinin gelişmeye başlamasıyla ortaya çıkmıştır. Özellikle bu yıllarda Amerika ve Japonya'da yapılan ve enerji üretimi amacıyla kullanılan çeşitli santrallerin nehir yataklarına yakın yerlerde kurulması zeminlerde dinamik özelliklerin incelenmesine hız kazandırmıştır. Bu bölgelerde zeminlerin temel bileşenlerini kumlu, siltli ve killi zeminlerin oluşturması özellikle bu malzemelerin dinamik özelliklerinin incelenmesine araştırmacıları yöneltmiştir.

Yapılan çalışmalar sonunda son yıllarda arazi deneylerinde önemli yol kat edilmesine ve büyük gelişme sağlanmasına rağmen laboratuvar deneyleri mutlak önceliğini hiçbir zaman kaybetmemiştir. Bu çalışma kapsamındaki dinamik deneyler dinamik üç eksenli deney sisteminde gerçekleştirilmiş ve numune olarak orta-ince dane boyutuna sahip temiz kum seçilmiştir. Kapsam dâhilinde doymuş, kısmi doymuş ve kuru kum numunelerin çeşitli dinamik yükler altında davranışları incelenmiştir. Bu bölüm içinde dinamik üç eksenli deney aletinin temel özellikleri, numune özellikleri ve deney sisteminin kurulup, dinamik deneyin yapılma adımları ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.2 Kullanılan Deney Sistemi

Dinamik üç eksenli deney sistemi temel özellikleri bakımından daha yaygın olarak bilinen statik üç eksenli deney sistemi düzeneğine benzemektedir. Temel farklılık

yükleme aşamasında göze çarpmaktadır. Çalışmalarımızda kullanılan deney sistemi Japon SEIKEN firması tarafından geliştirilmiş olan ve İstanbul Teknik Üniversitesi zemin dinamiği laboratuvarına, ortak yürütülen bir proje kapsamında Japonya Uluslararası İşbirliği Kuruluşu (JICA) tarafından getirilmiş olan DTC-311 modelidir.

Sistem esas olarak

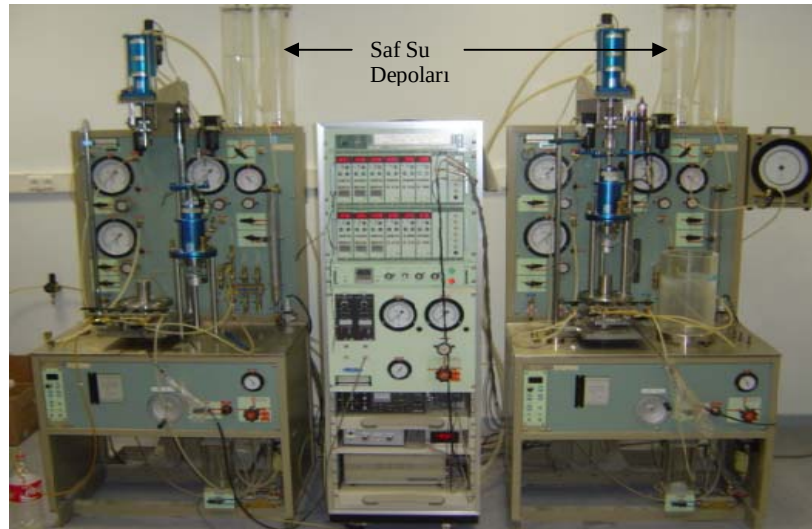
- i) Deney hücresi
- ii) Basınç sistemi
- iii) Yükleme düzeneği (Dinamik ve statik düzenekleri)
- iv) Ölçüm ve kayıt sistemi

bölümlerinden oluşmaktadır. Sistemin ana görünüşü Şekil 3.1’ de görülmektedir [37, 38].

3.2.1 Deney hücresi

Deney hücresi 100mm kalınlığında mika silindir çerçeve, alt tabla, üst başlıktan ve bu sistemlere bağlı olan ölçüm aletleri, kanallardan oluşmaktadır.

Alt tabla statik yükleme düzeneği üzerinde bulunmaktadır ve dinamik deneylerin yanında statik deneylerin yapılmasına da olanak sağlamaktadır. Alt tabla Şekil 3.1’ de görüldüğü üzere zemin numunesinin oturtulduğu ya da üzerinde hazırlandığı alt piston başlığı, bu pistonun üst kısmında bulunan poroz taşı, gene aynı yere bağlı olan ve numune altından su almaya ve drenaja imkan sağlayan iki adet kanal, boşluk suyu



Şekil 3.1 Dinamik üç eksenli deney sistemi

basıncı ölçümüne imkan veren bir ucu sabit piston içinde diğer ucu basınç ölçere bağlı olan kanal, numunenin üzerinden su almaya ya da drenaja yarayan kanal,

hücreye su almaya ve boşaltmaya yarayan kanal ve alt tablanın kaydırılmasına yardımcı olmak için tablanın altına hava basıncı vermeye yarayan kanal ve bunların vanalarından oluşmaktadır.



Şekil 3.2 Hücre alt tablası

Alt piston başlığı poroz taşının yerleştirildiği yuva, içinden geçen kanaldan oluşmakta ve alt tabladan ayrılabilir. Numune poroz taş üzerine yerleştirildiğinde bu kanaldan su girişi ve çıkışı tabla kenarına monte edilmiş vanalar yardımıyla sağlanır.

Su alma kanallarının bir ucu yukarıda anlatıldığı gibi pistonun diğer ucu ise Şekil 3.1’de yükleme düzeneğinin yanında bulunan depolara ve ters basınç vermeye yarayan bürete bağlıdır. Ayrıca bu bürer ve bir alıcı yardımıyla deney sırasında meydana gelen hacim değişimi de ölçülebilmektedir. Depodan su kanallara cazibe ile akmakta, bürerden ise ters basınç uygulanarak numune içine girmektedir. Drenaj vanalarının açık olduğu durumda da numune içinden çıkan su da aynı bürerde toplanmaktadır. Boşluk suyu basıncı ölçümü için kullanılan kanalın diğer ucu ise su basıncındaki değişimi belli oranlarda dirence çeviren ve elektrik akımı cinsinden okumaya olanak sağlayan basınçölçerine bağlıdır. Basınçölçer elastik bir diyaframla, bu diyaframda hareketi ölçen deformasyon ölçerden oluşmaktadır. Oluşan su basıncı diyaframı şişirmekte, bu davranış deformasyon ölçer tarafından algılanmakta ve sonuç olarak da bu değer akım cinsinden panoda görülebilmekte ve kayıt edilebilmektedir. Hücreye su almaya yarayan kanalın diğer ucu da sistemin arkasında bulunan büyük su deposuna bağlıdır ve su alma işlemi bu depoya uygulanan basınç yardımıyla yapılmaktadır.



Şekil 3.3 Hücre üst başlığı

Yukarıda anlatılan tabla üzerine numune yerleştirilip üst piston monte edilerek sistemin düşey yönde yük alması sağlanmaktadır. Üst piston bölümünde düşey deformasyonun ölçümüne olanak sağlayan hassas algılayıcılar sayesinde yapılmaktadır. Algılayıcılardaki veri üst başlıkta bulunan kanallardan geçen kablolar aracılığı ile veri toplama düzeneğine ulaştırılır. Burada iki tip deformasyon algılayıcı bulunmaktadır. Bu algılayıcılardan birinin hassaslığı 10^{-5} - 10^{-3} mertebesinde diğeri ise 10^{-3} ten büyük değerlerin ölçümüne olanak sağlar. Ayrıca maksimum ölçüm kapasitesi değerleri ise küçük deformasyon ölçer (mikro deplasman ölçer) için $\pm 1\text{mm}$, düşey deformasyon ölçer içinse $\pm 20\text{mm}$ 'dir. Ek olarak, pistonun düşey yönde yük uygulaması sağlayan basınç girişi ve cam çerçeve içindeki suya basınç uygulayarak numuneye çevre basıncı uygulamada kullanılan basınç girişleri bulunmaktadır [38,39].

Alt piston başlığının yerinden çıkarılabilir olması sistemde denenebilecek numune boyutlarının değiştirilebilmesine olanak vermektedir. Çapları 50-60-75mm olan boyları ise 100-120-150mm olan numuneler sistemde denenebilmektedir. Bu sistemlerin tamamı dinamik üç eksenli aletin hücre kısmını oluşturmaktadır.

3.2.2 Basınç sistemi

Sistem uyguladığı basınçları kompresörden gelen basınçlı havanın düzenlenmesiyle elde eder. Kompresörden gelen basınç G regülatöründe düzenlenmekte, değeri alete zarar vermeyecek kullanılabilecek maksimum değere indirgenir ve sisteme borularla giriş yapar. Bu basınç deney sisteminin panosu içindeki regülatörler yardımıyla deney sırasında uygulanacak basınçlar düzeyinde ayarlanır ve çevre basıncı, düşey basınç, ters basınç ve dinamik yük uygulamada kullanılır.

Çevre basıncının uygulanması kompresörden gelen basınçlı havanın G regülatöründen geçtikten sonra sırasıyla sisteme girişi, ikinci regülatöre gelişi, burada istenen düzeye basıncın indirgenmesi ve ardında da hücre üst başlığındaki kanallardan girmesi ile tamamlanır. Kompresörden gelen basınçlı havanın diğer bir kullanım amacı da numuneye ters basınç uygulamasıdır. Burada da sistemden gelen basınçlı hava panodaki regülâtörde düzenlendikten sonra önce 25ml kapasiteli büret içindeki suya, su ile beraber hücre alt tablasındaki kanallara, oradan da numune altından iki kanalla ve üstten de bir kanalla giriş yapar. Sistemde çevre basıncı 0-10kgf/cm² ve ters basıncın da 0-10kgf/cm² yük uygulanması mümkündür [39].

Sisteme giren basınçlı hava, sistemin dinamik yükleme yapması sırasında da kayıt biriminde ki regülatörle ayarlanıp oradan üst başlıktaki pistonla basınç uygulayan yükleme düzeneğine ulaşır.

3.2.3 Yükleme düzeneği (Dinamik ve statik yükleme düzenekleri)

Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı üzere basınçla beslenen kayıt panosu üzerinden ayarlanan yükleme dinamik yükleme sisteminin temel özellikleri yükleme miktarının ve yükleme frekansının belirlenebilmesidir.

Dinamik yükleme Şekil 3.4.(a)' da görülen ayar panosunda yük miktarı, frekansı belirlendikten sonra bu ayarlara uygun olarak pistonla basınç uygulanmakta ve Şekil 3.4 (b)' de görülen piston bu ayarlara uygun yüklemeyi hücre üst başlığına iletmektedir. Böylelikle istenen periyot aralığında ve miktarında numunenin tekrarlı olarak yüklenmesi mümkün olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.4 (a) Dinamik yük ayar panosu, (b) Dinamik yük pistonu

Yükleme kapasitesi 200kgf ile sınırlıdır ve gerilme kontrollü olarak uygulanabilir, sistemin frekansı ise 0.001-2Hz aralığında değişebilmektedir. Bu arada sistemin tekrarlı olarak yüklenmesi esnasında meydana gelen çevrim sayısı da yükleme ayar panosu üzerindeki düzenden izlenebilmektedir [39].

Statik yükleme düzeneği ise hücre bölümünün oturtulduğu masanın altındadır ve yüklemeyi hücrenin alt tablasını yukarı yönde hareketlendirerek uygulamaktadır. Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi sisteme numune kurulduktan sonra üst piston sabitlenir ve statik yükleme çalıştırıldığında hücre bütün olarak yukarı yönde harekete geçer böylelikle statik yükleme uygulanmış olunur. Statik yükleme düzeneği ve yükleme panosu Şekil 3.5’de görülmektedir. Statik yükleme kapasitesi 500kgf’ tir ve elektrikli deformasyon kontrol ünitesinin çalışma aralığı da 0.002-2mm/dakika’ dır [39].



Şekil 3.5 Statik yükleme ünitesi

3.2.4 Ölçüm ve kayıt sistemi

Temel olarak ölçüm sistemi deneyler sırasında numunelerde meydana gelen deformasyonların, oluşan basınçların ve kuvvetlerin ölçülmesidir. Kayıt sistemi de bu verilerin sonradan değerlendirilmeye alınması için fiziksel verilerin sayısal değerler olarak saklanmasıdır.

Ölçüm sistemi olarak Seiken firması tarafından üretilmiş olan EA-610 dijital voltmetreli, ayarlı deformasyon amplifikatörüdür. Sistem giriş olarak aldığı sinyali büyütme ve çıkışı volt olarak vermektedir. Sistemin giriş olarak aldığı veri deformasyon yada başka bir fiziksel özellikteki değişimin sistemde voltaj değişimine sebep olmasıdır. Ölçüm sistemindeki anahtarlarının özellikleri kalibrasyonların anlatıldığı bölümde detaylı şekilde anlatılacaktır.

Kayıt sistemi de temel olarak ölçüm sisteminden alınan verilerin bir program aracılığı ile sayısal değere çevrilmesinden ibarettir. Deney düzeneği ölçüm panosundan çıkan veriler bilgisayara giriş yapar ve burada National Instruments firması tarafından üretilmiş Virtuel-Bench Logger adlı program aracılığı volt değerleri sayısal olarak metin formatında kayıt edilir. Program 15 kanala kadar kayıt imkanı vermektedir [38].

3.2.5 Deney sisteminin kalibrasyonu

Deneyisel çalışmalar yapıldığında ölçülen verilerin doğruluk derecesinin belirlenmesi için sistemlerin düzgün çalışmasının yanında alınan verilerin kontrol edilerek çalışmalarda kullanılması, çalışmanın sağlıklı şekilde yürütmesi ve geçerlilik

kazanması için gerekli bir işlemdir. Bu kontroller çeşitli veri alma tekniklerinin birbiri ile karşılaştırılmasıyla ve ölçüm cihazlarının çeşitli yollardan kontrolü ile sağlanabilir.

Dinamik üç eksenli deney aletinde kalibrasyonlar dijital panodaki deformasyon verilerinin karşılaştırılması ve panodaki değerlerin kontrolleri ile sağlanmaktadır. Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri Şekil 3.6’ da görülmektedir.

Panonun kalibrasyonu başlangıç olarak sistem çalıştırıldığında kazanç düğmesi, ATT5 düğmesi ve CAL.µε düğmelerinin ışıklarının yandığının kontrolü ile başlar. ATT düğmesi ölçümlerin hassalığını kontrol eden bu düğmelerden 5’e basıldığında sistem 5 kez hassalaşır. Hassaslık düzeyi ATT 2 ve 1 içinde aynı şekilde ayarlanabilir. CAL.µε anahtarı ise giriş kalibrasyon anahtarı olarak adlandırılır ve CALL.ON anahtarına basıldığında kalibrasyon başlar. AUTO anahtarına basılarak



Şekil 3.6 Ölçüm sistemi dijital panosu

voltmetredeki “0.00” okuması sağlanır ve CALL. ON düğmesine basılır GAIN kontrol düğmesi kullanılarak dijital voltmetre değeri “5.00” değerine ayarlanır. GAIN düğmesi amplifikatörün hassalığını kontrol eder ve ATT düğmesi ile birlikte çalışır. Ölçüm değişim anahtarı olan ZERO-C-BAL anahtarı ZERO pozisyonundayken köprü denge direnci ZERO CONTROLLER ayarı kullanılarak voltmetre göstergesi “0.00”değerine getirilir. ZERO-C-BAL anahtarı C-BAL pozisyonundayken sabit tutulur ve voltmetre göstergesi C-BAL kontrolü kullanılarak “0.00” değerine ayarlanmalıdır. Sistemde ZERO-C-BAL anahtarı her iki durumda da “0.00” değerini gösterene kadar yukarıda anlatılan adımlar tekrar edilmelidir. Bu arada ölçümün hassalığının ayarlanması için ATT1,2 ya da 5 anahtarlarından biri

seçilir ve kalibrasyon anahtarı olan CAL'ın MEAS yada GAIN durumunda olmasının önemi olmadan seçilen ATT ve altındaki anahtar devreye sokulmalıdır. GAIN anahtarı devrede iken voltaj çıkışını göstermektedir ve MEAS anahtarı da açıldığında ölçülen voltaj değeri başlangıçta ayarlanan gerçek büyüklüğü gösterecektir. Yani eğer yük hücresinde 5 volt 200kgf değerine ayarlanmışsa, gösterge GAIN konumunda 5 volt gösteriyor ise MEAS konumunda 200kgf göstermelidir. Örneğin ATT-1 anahtarına basıldığında CAL 10 anahtarına da basılmalıdır. AUTO anahtarına basılarak değerler "0.00" a ayarlanmalı ve CALL-ON anahtarına basılarak ve GAIN kontrolü kullanılarak voltmetre değeri "5.00" değerine getirilir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra AUTO anahtarına tekrar basılır ve değerlerin "0.00" a gelmesi sağlanır, daha sonra CAL anahtarı açılır ve GAIN kontrolü kullanılarak voltmetre değeri "5.00" a ayarlanır ve CAL anahtarı devreden çıkarılır. Böylelikle deneye hazır hale getirilen pano kayıt almaya hazır hale getirilmiş olur [37].

Dijital değerlerin kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçüm panosundaki dijital deformasyon okumalarının kalibrasyonu sistemin üzerine yerleştirilen mekanik deformasyon saatlerinden aynı anda alınan okumaların arasındaki bağıntının belirlenmesiyle yapılmaktadır. Mekanik saat okumaları sık okuma aralıkları belirlenir ve bu deformasyon miktarlarında düşey deformasyon ve küçük deformasyon okumaları dijital sayaçlardan kayıt edilir. Daha sonra bu verilerin mekanik saat verileri ile ilişkisi belirlenir ve kayıta alınan değerler bu katsayılarla çarpılarak deney sonuçlarının hazırlanması sırasında kullanılır [37].

3.3 Deneylerde Kullanılan Malzemenin Özellikleri

Çalışma konusu doğrultusunda dinamik deneylerde kum numune kullanılmış ve fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla geçmişten bugüne süregelen ve kabul gören temel deneyler yapılmıştır.

Kullanılan kum 200 numaralı elekten yıkanmış ve tane dağılımı en büyük çap olarak da 0.84mm yani 20 numaralı elek seçilmiştir. Malzemeye ait dane boyut dağılımı Şekil 3.7' de görülmektedir.

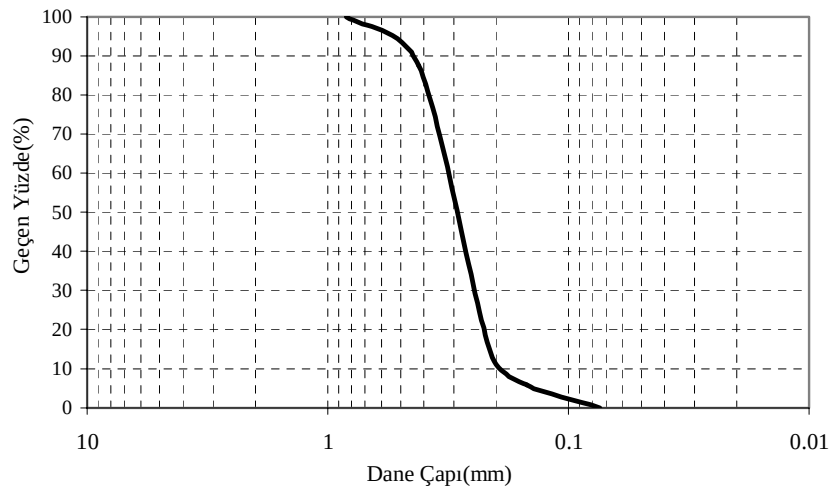
Kum numunenin en sıkı ve en gevşek hallerini de belirlemek amacıyla standart proktor deney kalıbına numune serbest olarak düşürülmüş ve bu sayede malzemenin en gevşek hali elde edilmeye çalışılmıştır. En sıkı durum içinse malzeme kalıp içine

gene serbestçe düşürülmüş anacak bu sefer kalıp ve numunenin tanelerinin kırılmasına izin vermeden tokmaklanarak en sıkı durumu elde edilmeye çalışılmıştır. Her iki deneyde 5'er kez, sonuçlarda çok fazla sapma olmadan elde edilene kadar tekrarlanmıştır. Sonuç olarak Tablo 3.1' gösterilmiş olan maksimum ve minimum boşluk oranları, birim hacim ağırlıklar elde edilmiştir.

Yapılan standart deneyler sonucunda da numunenin diğer fiziksel özellikleri belirlenmiş ve Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Ayrıca $D_r = \%38-55$ relatif sıkılıkları için geçirgenlik katsayıları Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Numuneler farklı relatif sıkılıklarda 10cm yüksekliğinde 5cm çapında silindir şeklinde kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanarak dinamik deneylere tabi tutulacaktır. Kuru yağmurlama yönteminde etüvde kurutulmuş numune 12mm çapa sahip ağzı olan silindir huni yardımıyla yaklaşık 5cm yükseklikten serbest düşürülerek numune kalıba doldurulur ve istenen sıklık için de kalıbın çevresine vurularak enerji uygulanır [3]. Numune daha alçaktan düşürülürse çok gevşek olmakta, yüksekte düşürülürse de sıklık artmaktadır bu nedenle yapılan ön çalışmalar sonucunda 5cm optimum değer olarak belirlenmiş ve tez kapsamında hazırlanan numunelerin tamamında bu yükseklik korunmaya çalışılmıştır. Numune hazırlama esnasında, numunenin istenen sıklığı belirlenen maksimum ve minimum boşluk oranları kullanılarak aşağıda gösterilen (3.1) bağıntısıyla hesaplanacaktır.

$$D_r = \frac{e_{maksimum} - e}{e_{maksimum} - e_{minimum}} \quad (3.1)$$



Şekil 3.7 Deney numunesi dane dağılımı

Tablo 3.1 Malzeme fiziksel özellikleri

G_s	C_u	C_c	D_{50}	γ_{mak}	γ_{min}	$e_{maksimum}$	$e_{minimum}$
2.64	1.6	0.97	0.29	1.69	1.44	0.83	0.56

Tablo 3.2 Malzemenin $Dr=55$ ve 38 sıklıklarındaki geçirgenlik katsayıları

Relatif Sıklık (%)	Geçirgenlik Katsayısı(cm/sn)
38	0.03622
55	0.01628

3.4 Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminde Numune Hazırlanması

Yapılan kuru, yarı doygun ve tam doygun deney sistemindeki aparatların yardımıyla çeşitli sıklıklarda hazırlanmış kum numunelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Aşağıda tüm bu numune tipleri için, numunenin hazırlanmasından yüklemenin sonuna kadarki deney adımları anlatılmaktadır.

Numunenin kurulması;

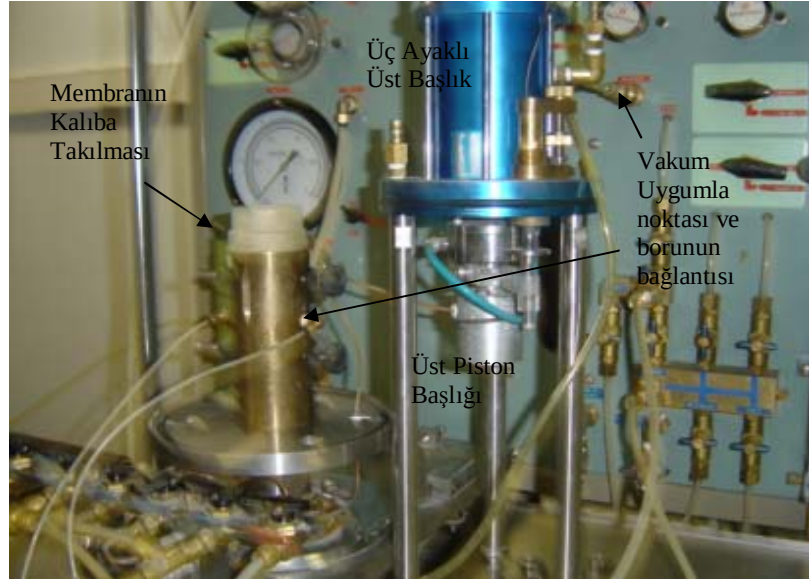
1. Öncelikle sistemin Şekil 3.2’de gösterilen alt pistonuna ve Şekil 3.3’de gösterilmiş olan üst başlık pistonuna giriş yapan su boruları, kanallar ve poroz taşlar doyurulur. Bu sayede sistemde yarı ya da tam doygun numuneler denenirken numune içine fazladan hava girişi önlenmiş ve doygunluğun daha hızlı gerçekleşmesine yardım etmiş olunur. Kuru numunelerde deney yapılacaksa bu anlatılanlara gerek duyulmaksızın diğer adıma geçilir.
2. Alt pistonu Şekil 3.8’de 5 numarayla gösterilmiş membran geçirilir ve o-ring takılarak sabitlenir. Daha sonra numunenin içinde hazırlanacağı Şekil 3.8’de 12 numarayla gösterilmiş kalıp, pistonu ve membranı kavrayacak şekilde Şekil 3.8’de 13 numarayla gösterilmiş kelepçeleri yardımıyla takılır. Membranın kalıp üzerinde kalan kısmı kıvrılarak kalıba takılır ve kalıba yapışması ve istenen iç çapı sağlaması için kalıba, kalıbın dışında bulunan hava kanalları ile sistemin regülatör panosunda bulunan vakum kanalı özel bir boru ile Şekil 3.9’da gösterildiği gibi bağlanarak vakum uygulanır (0.3 kg/cm^2). Sonuç olarak iç çapı 5cm yüksekliği 10cm olan bir silindir elde edilmiş olur.

3. Oluşturulan bu silindirin tabanında bulunan poroz taş üzerine Şekil 3.8’de 10 numara ile gösterilmiş 1 numaralı silindir yardımıyla hazırlanmış filtre kağıtlarından, kağıtlar ıslatıldıktan sonra konulur. Daha sonra 11 numaralı kalıp yakası malzemenin etrafa sıçramaması ve malzeme kaybını önlemek için kalıp üzerine yerleştirilir. Daha sonra 4 numara ile gösterilmiş laboratuvar ortamındaki olanaklarla hazırlanmış numune hazırlayıcıya hazırlanacak numunenin $1/3$ ’ ü konulur ve yaklaşık 5cm’den kalıp içine serbest düşürülür ve sonra numune bu seviyede kalıba dışarıdan vurularak sıkışması sağlanır. Bu işlem kalan numune için iki kez daha tekrarlanır ve istenen relatif sıklığa karşılık gelen ağırlıkça malzemenin tamamının kalıba yerleşmesinden sonra üst kısım tıraşlanır. Tıraşlanan yüzeye filtre kağıdı yerleştirilir ve üst başlığın bağlanması aşamasına geçilir.
4. Numunenin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra üzerine filtre kâğıdı ıslatılarak konulur, kalıbın üstü, çevresi 9 numara ile gösterilmiş fırça ya da benzeri işlevi görecek bir aletle temizlenir ve Şekil 3.10’da gösterildiği gibi üst başlık yerleştirilir. Bu aşamada üst başlıktaki piston numunenin üstüne degecek kadar yaklaştırılır ve bu noktada sabitlenir. Düşey basınç sistemi açılana kadar da piston serbest bırakılmaz. Numune kalıbının üst kısmına takılmış olan membranın fazla kısmı üst başlığa takılır ve o-ring ile sabitlenir. O-ringlerin su kaçırma olasılığına karşı Şekil 3.8’de 6 numara ile gösterilen membran parçaları ile de sarılır ve kalıba uygulanan vakum üst başlıktan uygulanır. Bu işleme başlarken öncelikle sistemin alt tablasından giriş yapan ve bağlantı borusu ile üst başlığa bağlanan borunun vanası açılır.

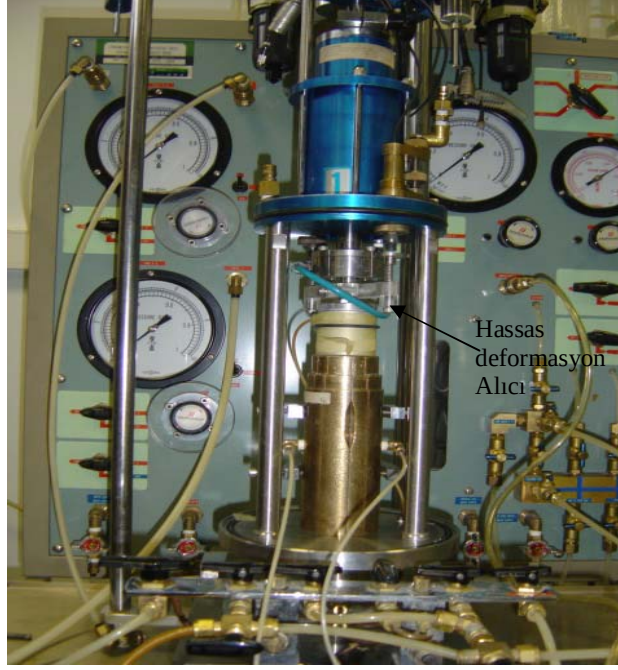
Daha sonra bu vananın sistemde bağlı olduğu vakum vanaları da açılır ve numune kalıbına bağlanan ek kablo yerinden çıkarılır. Bu sayede numunenin üstten uygulanan vakumla ayakta kalması Şekil 3.11’de görüldüğü gibi sağlanır. Bu vakum kohezyonsuz olan ve kendi başına ayakta duramayan kum numunenin ayakta durmasını sağlar. Daha sonra numune kalıbı da çıkarılır ve alt pistonda o-ringin üstüne 6 numaralı güvenlik amaçlı sarılan membran parçalarından sarılır.



Şekil 3.8 Dinamik üç eksenli deneyi kurulurken kullanılan aparatlar

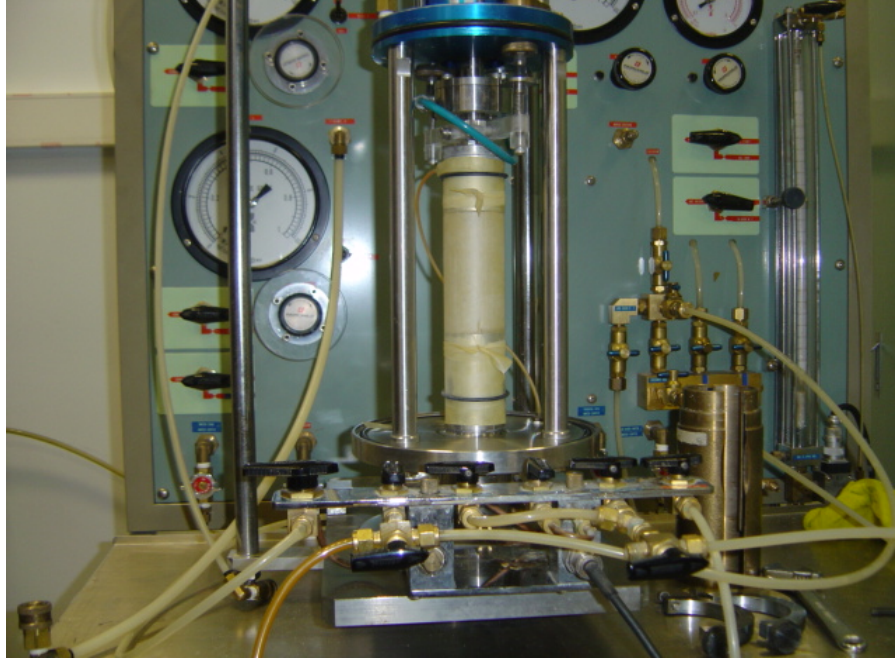


Şekil 3.9 Numune kalıbına vakum uygulanması ve membranın kalıba takılması



Şekil 3.10 Üst başlığı takılmış numune kalıbının çıkarılmasına ve vakumun üst pistondan uygulanmasına sistem.

5. Sistem Şekil 3.11’de ki duruma geldiğinde numunenin boyutları Şekil 3.8’de 7 numara ile gösterilmiş çap ölçerle ve 8 numara ile gösterilmiş cetvel ile belirlenir. Çap ölçümü numunenin altında ortasında ve üstünde olmak üzere 3 yerde, yüksekliği ise 2-3 farklı noktadan ölçülerek belirlenir.
6. Hücreyi oluşturan Şekil 3.8’de 14 numara ile gösterilen mika çerçeve alt tabladaki yuvasına oturtulur ve üstüne de 15 numara ile gösterilen başlık takılıp vidaları sıkılarak hücreyi dolduracak suyun kaçması engellenir. Bu aşamadan sonra hücreye su alma işlemine sıra gelmiştir. Sistem panosunun arkasında bulunan su tankına pano üzerindeki vanalar aracılığı ile 1kg/cm^2 basınç uygulanarak tanktaki suyun hücre içine alınması sağlanır. Bu esnada alt tabladaki delikten su girişi olur ama dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır. Borulardaki havanın etkisi ile tabladaki delikten çıkan suyun püskürmesi ve üst başlıktaki hassas deformasyon ölçerlere zarar vermemesine dikkat edilmelidir. Su alma işlemi hücre üzerindeki işaretli noktaya kadar yapılmalıdır. Hücreye su alma işlemi gerçekleştirilirken ana ayar panosundaki alıcıların temel kalibrasyonları bölüm 3.2.5’de anlatıldığı gibi temel olarak sıfırlama ve katsayıların sabitlenmesi olarak yapılır.



Şekil 3.11 Numunenin hazırlanışı tamamlanmış ve üst pistondan uygulanan vakum ile ayakta durmakta

7. Bu adımda, bu aşamaya kadar numune üzerinde bulunan ve numunenin içinden vakumla uygulanan 0.3kg/cm^2 'lik basınç üç eksenden, hücreyi dolduran su (yatayda iki eksen) ve üst pistonu uygulanan hava basıncı ile (düşeyde uygulanan basınç) sağlanacaktır. Öncelikle sistemin panosunda bulunan düşey ve çevre basıncı vanaları açılır ve basınç 0.1kg/cm^2 'ye ayarlanarak 4. adımda sabitlenen üst piston başlığı gevşetilir. Bu sayede basıncın düşeyde pistonu gelen hava ile uygulanması sağlanır. Vakumu vanadan kapatılmaya başlandığında çevre ve düşey basıncında aynı hızla artırılıp 3kg/cm^2 'ye ulaşması sağlanır. Bu sayede numune üzerindeki basıncın değişiklik göstermesi ve farklı yüklemeler altında kalması engellenir. Sonuç olarak bu adım sonunda numuneye vakumla uygulanan gerilme çevre ve düşey basınçla uygulanmış olmaktadır. Numune iç dengesini oluşturması için bu aşamada bir süre beklenir.

Numunenin doyurulması;

(Doyurma işlemi kuru numunelerde deney yapılırken atlanır.)

1. Tam doygun numune oluşturulmasında başvurulacak adımlardan ilki numune içinden karbondioksit(CO_2) geçirmek ve daneler arasındaki hava ile gazın yer değiştirmesini sağlamaktır. Bu sayede hava yerini alan CO_2 bir sonraki adımda

geçirilecek suyun içinde çözülerek malzemenin üç fazlı sistemden iki faza düşmesini ve doygunluk (S_r) değerinin artmasını sağlar.

2. Birinci adımın ardından sistem 0.3kg/cm^2 'lik gerilme altında iken numuneden su geçirme işlemi yapılır. Bu işlem sistemin üzerine monte edilmiş saf su tankından cazibe ile akan suyun alt tabladaki alt piston kanallarından girip, numuneyi geçip, üst pistona ulaşması ve buradan da borular yardımıyla tekrar alt tablaya ulaşp dışarı çıkmasından ibarettir. Başlangıçta numuneyi tazyikli suyun etkilememesi amacıyla su giriş vanaları kontrollü olarak açılır ve numuneden çıkan su kontrol edilerek giriş miktarı ayarlanır. Numuneden geçen suyun miktarı fazla oldukça %100 doygunluğa ulaşmak o kadar kolay olmaktadır ve kum numuneler için bu süre yaklaşık 1 saat, killi numuneler içinse çok daha fazla zaman alabilmektedir. Numunede tam doygunluk istenmiyorsa doyurma işlemi numuneden ilk su geçişi tamamlandıktan sonra kesilebilir ve bu esnada doygunluk kontrol edilebilir. Su geçişi tamamlandıktan sonra numune içinden kalan suyun süzülmesi ve dengenin oluşması için 10–15 dakika beklenir. Bu adım kısmi doygun kumların doyurulması işleminde son adımdır ve bir sonraki adım uygulanmadan B kontrolü yapılır.

Doygunluk kontrolü;

(Doygunluk kontrolü kuru numunelerde deney yapılırken atlanır.)

1. Bu adıma kadar açık olan vanalardan sadece boşluk suyu basıncına müsaade edecek vana açık kalacak şekilde diğerleri kapatılır ve sisteme alt tabladan giriş yapan boruların doygunlukları kontrol edilir.
2. Bu adımda öncelikle büretteki su miktarı kontrol edilir, yeterli su yoksa su alma işlemi tamamlandıktan sonra miktarı kayıt edilir. Numuneye su girişini sağlamak için vanalar tekrar açılır ve ters basınç kademeli olarak 2kg/cm^2 'ye kadar çıkarılır, bu esnada numune üzerindeki efektif gerilme korunur, çevre basıncıda ters basınçla beraber 2kg/cm^2 artar. Böylelikle çevre basıncı toplamda 2.3kg/cm^2 ye ulaşır. Ters basınç uygulaması bölüm 3.2.2'de anlatıldığı gibi büretteki suya uygulana basıncın numune içine hem alttan hem de üstten girişi ile sağlanır. Doygunluk derecesine bağlı olarak basınç altında bekletme süresi değişmektedir.
3. Vanalar tekrar kapatılır ve sistem ana panosundan boşluk suyu basıncı değişimini gösteren CH2 kanalı sıfırlanır ve ters basınç kademeli olarak 0.3kg/cm^2 arttırılır. Bu değer numune üzerinde bulunan efektif gerilmeden büyük

olmamalıdır. Büyük olduğu durumda numune efektif gerilmeden daha büyük değerde gerilme ile yüklenir ve daha sonra boşaltılır. Bu aşama numunenin bozulmasına sebep olmaktadır. Artım sonunda CH2 okuması tekrarlanır ve elde edilen değer 0.3 ile oranlanır. Oran 0.95 den büyük ise numunenin tam doygun olduğu kabul edilir. Eğer okuma değeri 0.25 ise numune %50 oranında doyduğu anlaşılmaktadır.

Eğer istenen doygunlu sağlanmadıysa sistem vanaları tekrar açılır ve sisteme ters basınç ile su girişine izin verilir. İstene düzeyde doygunluk sağlanana kadar 2 ve 3'üncü adımlar tekrarlanır. Sonuç olarak nihai durumda numune üzerinde ters basınç miktarı kadar negatif, uygulanan çevre basıncı (0.3 kg/cm^2) ile ters basınç kadarda pozitif basınç bulunmaktadır. Efektif gerilme ise uygulanan 0.3 kg/cm^2 'lik çevre basıncıdır.

Numunenin konsolidasyona bırakılması;

(Konsolidasyon aşaması kuru numunelerde deney yapılırken atlanır.)

1. İstenen doygunluk değeri sağlandıktan sonra vanalar tekrar kapatılır, sistem ana panosundaki dijital voltmetrelerden düşey yük, düşey deformasyon, boşluk suyu basıncı, hassas düşey deformasyon (sırasıyla; CH1, CH2, CH3, CH4) göstergeleri ve büretteki su yüksekliği kayıt edilir. Sistem basıncı arzu edilen konsolidasyon basıncına getirilir ve vanalar açılarak konsolidasyon başlatılır.
2. Konsolidasyon için yeterli süre geçtikten sonra vanalar tekrar kapatılır ve okumalar yenilenir. Bu sayede numunede bu süre zarfında meydana gelen boy, alan değişimleri belirlenir. Konsolisasyonun bitip bitmediği ise kumlarda yaklaşık 40 dakika killerde ise 24 saat sonunda drenajların kapatılıp, boşluk suyu basıncında artışı olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Eğer boşluk suyu basıncı oluşuyor ise konsolidasyon tamamlanmamıştır ve bir süre daha beklenmelidir.

Numunenin dinamik olarak yüklenmesi;

1. Vanaların kapalı durumda olduğu tekrar kontrol edilerek üst başlıktaki piston sabitlenir ve panodaki değerler herhangi bir kalibrasyon yapılmadan sadece AUTO anahtarı ile sıfırlanır. Bu arada bilgisayar açılır ve deney verilerini kayıt etmeye yarayan Virtuel-Bench Logger programı çalıştırılır.

2. Ana panodan dinamik yükü uygulamaya yarayan basınç vanası 4kg/cm^2 'yi gösterene kadar sıkılır ve üst başlığa dinamik yükü uygulayan ana yükleme pistonunun vidaları gevşetilir. Ana panodan statik yükleme ayar düğmesi kullanılarak yavaş bir şekilde yükleme pistonu üst başlığa değene kadar indirilir. Bu esnada düşey deformasyon saatinde değişme oluşmaması sağlanmalıdır. Piston başlığın üzerinde iken düşey basınç vanası yavaşça kapatılır, yine bu esnada düşey deformasyonda değişim olmamalıdır. Oluşabilecek deformasyonlar statik yük düğmesi ile tekrar "0.00" değerine getirilmelidir. Daha sonra üst başlık vanasında aynı şekilde açılır. Bu aşamada deformasyon oluşma olasılığı daha yüksek olduğundan, bu işlem diğerlerine nazaran daha hassas şekilde yapılmalıdır. Tüm bu işlemler bittiğinde düşey basınç üst başlık pistonundan yükleme pistonuna geçmiş olacaktır.
3. Tüm yukarıdaki adımlar gerçekleştirildiğinde ana panodan istenen yük değeri, frekans ayarlanır ve bilgisayarda verinin kayıt edilme aralığı, verinin saklanacağı dosya ismi belirlendikten sonra verilerin kaydını sağlayan programda başla butonu basılarak kayıt almaya başlanır. Hemen ardından sistem son kez kontrol edilir ve ana panodan yüklemeyi başlatmak için "Başla" butonuna basılarak yüklemenin başlaması sağlanır. Sistem başlatılana kadar kayıt edilen veri sonuçlar değerlendirilirken dikkate alınmaz.

3.5 Dinamik Üç Eksenli Deney Kayıtlarının Değerlendirilmesi

Deney verileri bilgisayara metin dosyası olarak kayıt edilmektedirler. Metin dosyası Microsoft Office Excel programı yardımıyla açılır ve sonuç olarak veriler Tablo 3.2'de olduğu gibi görüntülenir. Tabloda "CH0" olarak adlandırılan veriler uygulanan kuvvetin voltaj olarak karşılıklarıdır. Voltaj değerleri bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi belli katsayılarla çarpılarak "kg" birimine çevrilir. "CH1" verileri ise oluşan düşey şekil değiştirmeleri 10^{-3} mertebesinde büyük değerdeki ölçümleri almak için kullanılır ve voltaj cinsinden kayıt eder. Bu değerlerde yapılan kalibrasyonlar sonucunda oluşan katsayıyla çarpılarak "mm" cinsine çevrilir. Kalibrasyon işlemi sistemde kalibrasyon için kullanılan sert plastik malzemeden imal edilmiş olan silindirin yüklenmesi sırasında alınan mekanik saatle elektronik verinin karşılaştırılması ve aralarındaki bağıntının bulunmasıyla yapılmaktadır. Aynı işlem "CH4" kanalından alınan verilerin kalibrasyon katsayılarının belirlenmesinde de

kullanılmaktadır. “CH4” kanalıda bilindiği gibi düşey deformasyonların 10^{-3} - 10^{-5} mertebelerini okumak için kullanılmaktadır.

Tablo 3.3 Tipik deney ham verisinin ilk 5 adımının gösterimi

VIRTUALBENCH-LOGGER 1.0 REPORT NATIONAL INSTRUMENTS DATE CREATED 17:36:31 03/26/05 START COMMENT END COMMENT					
START DATA		Kuvvet	Boy Değişimi	Boşluk Suyu Bas.	Boy Değişimi
Date	Time	Ch0	Ch1	Ch2	Ch3
03/26/2005	05:36:39.20 PM	0.000305	0.002594	0.001831	0.000153
03/26/2005	05:36:39.40 PM	0.002136	0.007217	0.001373	0.000183
03/26/2005	05:36:39.60 PM	0.000916	0.002747	0.001373	0.000229
03/26/2005	05:36:39.80 PM	0.006409	0.002899	0.000916	0.000198
03/26/2005	05:36:40.00 PM	0.002136	0.003204	0.001526	0.000229

“CH3” verileri ise sistemde hazırlanmış olan numunenin boşluk suyu basıncını ölçmekte kullanılır ve alınan voltaj değerleri direk olarak kullanır, birimi “kg/cm²”dir.

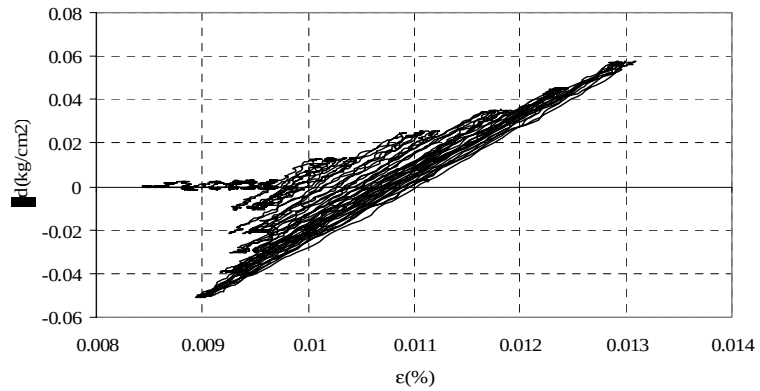
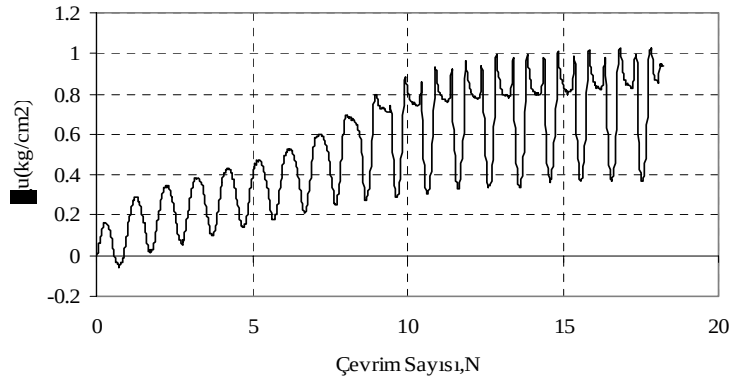
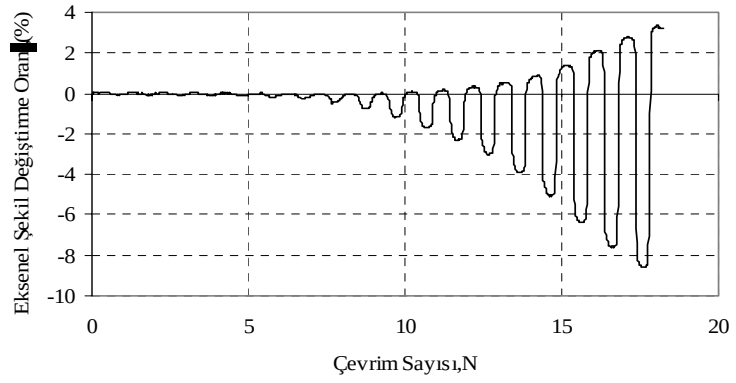
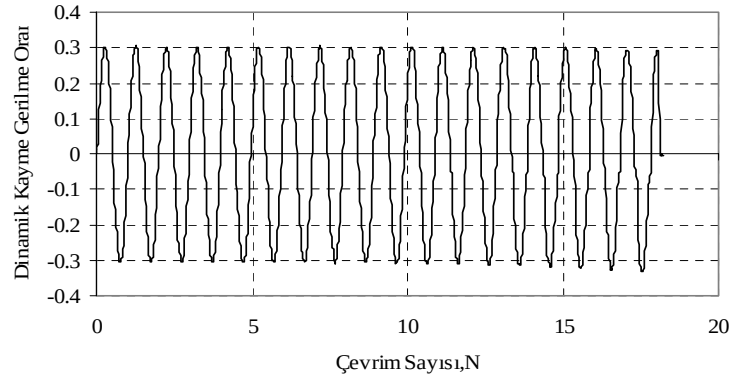
Tablo 3.3’deki zaman verilerine bakıldığında bu deney için veri kayıtları 0.2sn zaman aralığı ile alınmıştır ancak zaman aralığını değiştirmek mümkündür. Daha sık aralıkla (0.1sn) veri alınması genel olarak elastisite modülün bulunmasında kullanılmaktadır. Tablo 3.4’de ise ham verilerin kullanılabilir değerlere dönüştürülmesi görülmektedir. Çevrim sayısı ile dinamik kayma gerilme oranı, şekil değiştirme oranı ve boşluk suyu basınç grafikleri çizildiğinde Şekil 3.12’deki tipik deney sonuçları elde edilir. Şekildeki deney konsolidasyon basıncı 1kg/cm²’de yapılmıştır ve görüldüğü üzere 11’inci çevrimde boşluk suyu basıncı konsolidasyon basıncına eşit değere ulaşmış, sıvılaşma gerçekleşmiştir. Aynı zamanda şekil değiştirme grafiğinden de görüldüğü gibi 12’inci çevrimde ± 2.5 düşey şekil değiştirme elde edilmiş ve numune bu durumda göçmüştür. Ayrıca bu sistemde gap sensörler yardımıyla alınabilen 10^{-5} - 10^{-3} aralığındaki boy kısalması verileri ve kuvvet verilerinden gerilmeler elde edildikten sonra grafikte bulunan eğim değeri numunenin en büyük elastisite modülünü vermektedir.

3.6 Sonuçlar

Bu bölümde yapılan çalışma kapsamında deneylerde kullanılan sistem, numune özellikleri, deneyin sisteminde numunenin hazırlanması, alınan ham verilerin özellikleri ve ham verilerin kullanılmasına yönelik bilgiler verilmiştir. Bir sonraki bölümde de yapılan deneyler ve kurulan ilişkiler gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Deney ham verilerinin kullanılabilir hale dönüştürülmesi örneği

CH0	CH1	CH2	Zaman	Çevrim	Düşey Yük(kg)	Düşey Şekil Değ.(mm)	s	s(%)	Alan(cm ²)	Gerilme(kg/cm ²)	DKGO	BSB(kg/cm ²)
0.000305	0.002594	0.001831	0	0	0	0.0698	0.000703827	0.070382724	19.7725049	0	0	0
0.002136	-0.007172	0.001373	0.2	0.02	0.03662	0.027501601	0.000277311	0.027731097	19.76406926	0.001852857	0.000926429	-0.000468
0.000916	0.002747	0.001373	0.4	0.04	0.01222	0.070462674	0.000710509	0.07105093	19.77263711	0.000618026	0.000309013	-0.000468
0.006409	0.002899	-0.000916	0.6	0.08	0.12208	0.071121016	0.000717148	0.071714768	19.77276847	0.006174148	0.000670704	-0.002747
0.002136	0.003204	0.001526	0.8	0.1	0.03662	0.072442032	0.000730468	0.073046813	19.77303204	0.001852017	0.000926009	-0.000305
0.003367	0.003662	0.00061	1	0.12	0.06104	0.074425722	0.000750471	0.075047063	19.77342786	0.003086971	0.001543486	-0.001221
0.002747	0.00351	0.002136	1.2	0.14	0.04884	0.073767379	0.000743832	0.074383225	19.77329549	0.002469988	0.001234989	0.000305
0.003367	0.003367	-0.00412	1.4	0.16	0.06104	0.073104706	0.00073716	0.073716019	19.77316426	0.003087012	0.001543506	-0.005951
0.003662	0.003204	0.002441	1.6	0.18	0.06714	0.072442032	0.000730468	0.073046813	19.77303204	0.003395634	0.001697767	0.00061
0.003662	0.00351	0.00061	1.8	0.2	0.06714	0.073767379	0.000743832	0.074383225	19.77329549	0.003395488	0.001697744	-0.001221
0.003662	-0.003646	0.000468	2	0.22	0.06714	0.094110912	0.000343957	0.094394686	19.76538691	0.003396847	0.001698424	-0.002288
0.003667	0.00351	0.000916	2.2	0.24	0.07324	0.073767379	0.000743832	0.074383225	19.77329549	0.003703985	0.001851983	-0.000916
0.003367	0.00351	0.001526	2.4	0.26	0.06104	0.073767379	0.000743832	0.074383225	19.77329549	0.003086992	0.001543486	-0.000305
0.002136	0.003367	0.002289	2.6	0.28	0.03662	0.073104706	0.00073716	0.073716019	19.77316426	0.001852005	0.000926003	0.000468
0.004272	0.00351	0.001678	2.8	0.3	0.07934	0.073767379	0.000743832	0.074383225	19.77329549	0.004012482	0.002006241	-0.000153
0.004272	0.006188	0.001678	3	0.32	0.07934	0.081036133	0.000817117	0.081711663	19.77474674	0.004012188	0.002006094	-0.000153
0.004678	0.003052	0.001831	3.2	0.34	0.08546	0.07178369	0.00072363	0.072362974	19.77290068	0.004322077	0.002161039	0
0.005798	0.003667	0.001373	3.4	0.36	0.10886	0.075746738	0.000763791	0.076379108	19.77369144	0.005555687	0.002777934	-0.000468
0.005493	0.003667	0.001678	3.6	0.38	0.10376	0.075746738	0.000763791	0.076379108	19.77369144	0.005247376	0.002623688	-0.000153
0.005188	0.004425	0.001678	3.8	0.4	0.09766	0.077730427	0.000783794	0.078379368	19.77408727	0.004838787	0.002469393	-0.000153



Şekil 3.12 Dinamik üç eksenli tipik deney sonucu ($B=1.00$ $D_r=\%50$)

4. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEY SİSTEMİNDE YAPILAN DENEYLER ve DENEY SONUÇLARI ARASINDA KURULAN İLİŞKİLER

4.1 Giriş

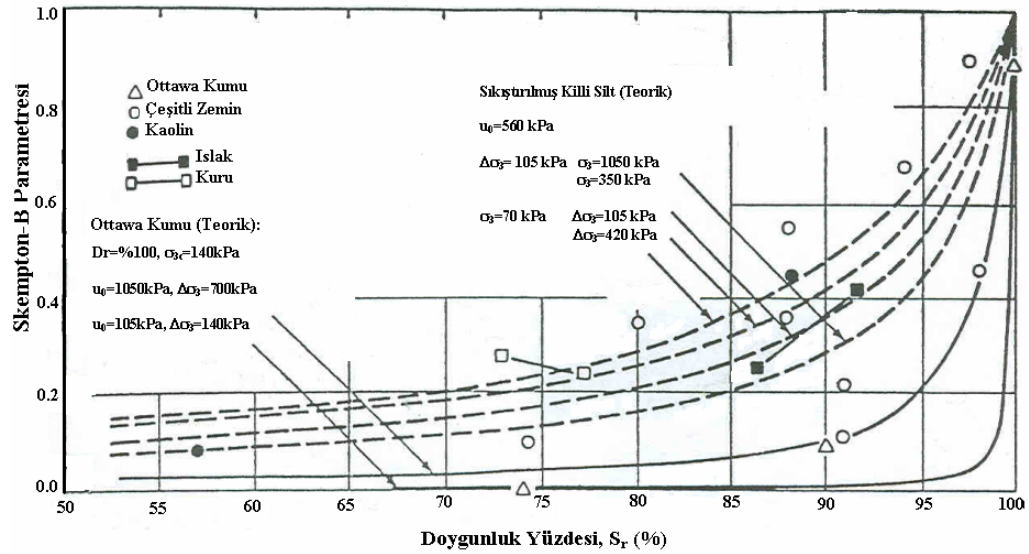
Yapılan çalışma kapsamında 3. bölümde özellikleri ve kullanılışı detaylı bir şekilde anlatılmış olan Dinamik Üç Eksenli Deney sisteminde çeşitli doygunluk derecelerinde, kuru ve %30, %50 relatif sıklığa sahip temiz kum numunelerin deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneyler bu bölüm içinde öncelikle doygunluk ve relatif sıklık değerlerine bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Bu özellikler doğrultusunda doygunluğun ve relatif sıklığın tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışa etkisi B ve S_r arasındaki ilişki incelenmiştir. Ek olarak hacimsel sıkışma modülü ve en büyük elastisite modülü ölçümlerinin ve farklı özellikteki numunelerin elastisite modülleri ile karşılaştırılması ve yapılan deneylerin özelliklerinin gösterildiği tablolar bu bölümün içeriğini oluşturmaktadır. Ayrıca yapılan kuru deney sonuçlarının karşılaştırılması, çevre basıncı, drenaj koşullarının kuru kum numunelerin davranışına olan etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerin kayıtları EK-1 de gösterilmiştir.

4.2 Yapılan Deneyler ve Özellikleri

Yapılan deneylerde numune temel olarak deneyde incelenmesi planlanan özelliklere bağlı olarak doyurulmakta, B parametresinin kontrolü yapılmakta, konsolidasyona bırakılmakta ve belli dinamik kayma gerilme oranları ($\pm\sigma_d/2\sigma_o$) altında tekrarlı olarak yüklenmektedir. Yapılan deneylerde numune kurulurken belirlenen relatif sıklık doğrultusunda numune miktarı kalıba konmakta, daha sonra yapılan boy ve çap ölçümleriyle elde edilen hacim değerleri kullanılarak konsolidasyon öncesi sıklık elde edilmekte, daha sonra numune doyurulmakta ve konsolidasyona

birakılmaktadır. Bu esnada numunede boy değişimi olmakta ve konsolidasyon sonunda yapılan ölçümlerle dinamik deney öncesi relatif sıklık belirlenmektedir. Yapılan deneyler hazırlandığı doygunluk değerlerine, relatif sıklıklarına bağlı olarak sınıflandırılmış ve aşağıdaki tablolarda özellikleri verilmiştir. Tablolarda deneylerin numaraları, relatif sıklıkları, boşluk oranları, dinamik deneyden önce ölçülmüş olan Skempton-B parametresi değerleri ve bu değerlere bağlı olarak Black ve Lee'nin (1973) çalışmalarında inceledikleri Ottawa kumu için hazırladıkları Şekil 4.1'de gösterilmiş olan doygunluk-Skempton B parametresi ilişkisi kullanılarak su muhtevası ve S_r değerleri belirlenmiş ve bu değerler deney özellikleri ile birlikte tablolarda gösterilmiştir [40].



Şekil 4.1 Skempton-B parametresi doygunluk ilişkisi [40]

Tablo 4.1'de %50-52 relatif sıklıkta $B=1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin özellikleri gösterilmiştir. Tablo 2'de de %48-52 sıklığa sahip $B=0.53$ olan deney verileri gösterilmiştir. Bu deney verileri kullanılarak doygun ve yarı doygun deneylerin şekil değiştirme davranışları karşılaştırılabilir. Bu düşünce doğrultusunda farklı doygunluklarda deneyler de yapılmıştır ($0 < B < 1.00$) ve Tablo 4.3'de deneylerin özellikleri gösterilmiştir. Deney sonuçları üzerinde relatif sıklığın etkisini de belirlemek amacıyla %30 sıklığa sahip numuneler üzerinde de farklı doygunluk derecelerinde ve farklı dinamik kayma gerilmesi, $\pm\sigma_d/2\sigma_o$, etkisi altında deneyler yapılmıştır. $B=1.00$ olan ve %32-33 sıklığa sahip deneylerin listesi Tablo 4.4'de

gösterilmiştir. $D_r = 50\%$ sıklığa sahip deneylerde olduğu gibi 30% sıklıklardaki deneyler içinde B 'nin 0.53 olduğu durumda olduğu durumlarda deneyler yapılmış ve özellikleri Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

Doygun ve kısmi doygun numunelere ek olarak çalışma kapsamında kuru numunelerde de dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerde de farklı relatif sıklıklarda numuneler hazırlanmış ve farklı $\pm \sigma_d/2\sigma_o$ değerleri uygulanmıştır. Yapılan deneylerin özellikleri Tablo 4.6'de gösterilmiştir. Yapılan tüm deneylerin kayıtları EK-1'de verilmiştir.

Ayrıca yapılan çalışma kapsamında giriş bölümünde de bahsedildiği gibi $D_r=50\%$ ve 30% sıklığa sahip numunelerde en büyük elastisite modülü azalış ilişkileri incelenmiş ve hacimsel sıkışma modülü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin özellikleri ilgili bölümde Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Tablo 4.1 $50-52$ aralığında relatif sıklıkta $B=1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri

Deney No	$D_r(\%)$	Konsolidasyon Öncesi $D_r(\%)$	e_0	Konsolidasyon Sonrası $D_r(\%)$	e_1	$W(\%)$	$S_r(\%)$	B	DKGO
89	50	50	0.70	52	0.69	26	100	1.00	0.30
88	50	50	0.70	50	0.69	26	100	1.00	0.35
60*	50	50	0.70	51	0.69	26	100	1.00	0.30
62*	50	50	0.70	52	0.69	26	100	1.00	0.35
64	50	50	0.70	52	0.69	26	100	1.00	0.25
66*	50	50	0.70	52	0.69	26	100	1.00	0.28

Tablo 4.2 $48-52$ aralığında relatif sıklıkta $B=0.53$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri

Deney No	$D_r(\%)$	Konsolidasyon Öncesi $D_r(\%)$	e_0	Konsolidasyon Sonrası $D_r(\%)$	e_1	$W(\%)$	$S_r(\%)$	B	DKGO
1	50	52	0.69	52	0.69	26	99.5	0.53	0.20
5	50	55	0.69	50	0.70	26	99.5	0.53	0.20
9	50	46	0.71	50	0.70	26	99.5	0.53	0.35
10	50	50	0.70	52	0.69	26	99.5	0.53	0.45
11	50	50	0.70	50	0.70	26	99.5	0.53	0.50
12	50	50	0.70	50	0.70	26	99.5	0.53	0.38
14	50	52	0.69	49	0.70	26	99.5	0.53	0.40
16	50	52	0.69	48	0.70	26	99.5	0.53	0.35
27	50	47	0.71	48	0.70	27	99.5	0.53	0.53

* Yalnızca elastisite modülü hesaplamalarında kullanılan deneyler.

Tablo 4.3 %47-52 aralığında relatif sıkılıkta $0 < B < 1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri

Deney No	$D_r(\%)$	Konsolidasyon Öncesi $D_r(\%)$	e_0	Konsolidasyon Sonrası $D_r(\%)$	e_1	W(%)	$S_r(\%)$	B	DKGO
2	50	55	0.68	52	0.69	26	99.8	0.73	0.18
3	50	55	0.69	52	0.69	26	99.9	0.88	0.17
53	50	50	0.70	48	0.70	26	99.3	0.36	0.35
90	50	50	0.70	51	0.70	26	99.7	0.70	0.35
91	50	50	0.70	53	0.69	26	99.8	0.75	0.35

Tablo 4.4 %32-33 aralığında relatif sıkılıkta $B=1.00$ olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri

Deney No	$D_r(\%)$	Konsolidasyon Öncesi $D_r(\%)$	e_0	Konsolidasyon Sonrası $D_r(\%)$	e_1	W(%)	$S_r(\%)$	B	DKGO
68*	30	30	0.75	33	0.74	28	100	1.00	0.27
69	30	30	0.75	32	0.74	28	100	1.00	0.20
70	30	30	0.78	33	0.74	28	100	1.00	0.23
73	30	30	0.75	32	0.74	28	100	1.00	0.18
92	30	30	0.75	32	0.75	28	100	1.00	0.27

Tablo 4.5 %30-36 aralığında relatif sıkılıkta $B=0.53$ ve 0.63 olarak hazırlanmış numunelerin deney verileri

Deney No	$D_r(\%)$	Konsolidasyon Öncesi $D_r(\%)$	e_0	Konsolidasyon Sonrası $D_r(\%)$	e_1	W(%)	$S_r(\%)$	B	DKGO
25	30	36	0.74	33	0.74	28	99.7	0.53	0.30
29	30	32	0.75	32	0.75	28	99.5	0.53	0.25
30	30	30	0.75	29	0.75	28	99.5	0.53	0.28
31	30	32	0.74	28	0.76	28	99.5	0.53	0.33
32	30	30	0.75	29	0.75	28	99.5	0.53	0.30
24	30	28	0.76	31	0.75	28	99.7	0.63	0.35

* Yalnızca elastisite modülü hesaplamalarında kullanılan deneyler.

Tablo 4.6 %46-56 ve %30-39 relatif sıklıklarda kuru olarak hazırlanmış numunelerin dinamik deneyler verileri

Deney No	Konsolidasyon Sonu $D_r(\%)$	e_0	$\pm\sigma_d/2\sigma_o$	B	σ_c (kg/cm ²)
17	56	0.68	0.50	0.00	1.00
18	56	0.68	0.70	0.00	1.00
19	46	0.71	0.60	0.00	1.00
20	46	0.71	0.55	0.00	1.00
21	51	0.69	0.55	0.00	1.00
22	53	0.69	0.45	0.00	1.00
23	48	0.70	0.40	0.00	1.00
40	52	0.69	0.28	0.00	1.00
41	47	0.71	0.20	0.00	2.00
42	58	0.68	0.40	0.00	2.00
44	48	0.70	0.40	0.00	0.50
48	48	0.70	0.40	0.00	1.50
51	50	0.70	0.40	0.00	1.00
52	50	0.70	0.35	0.00	1.00
33	30	0.75	0.50	0.00	1.00
34	39	0.73	0.40	0.00	1.00
35	34	0.74	0.35	0.00	1.00
36	30	0.75	0.45	0.00	1.00
37	34	0.74	0.30	0.00	1.00
38	34	0.74	0.50	0.00	1.00
39	33	0.74	0.40	0.00	1.00

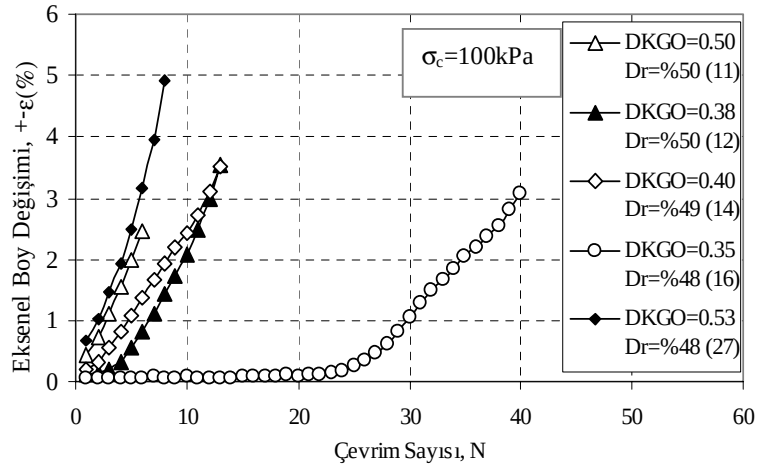
4.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.3.1 Doygun ve yarı doymuş numunelerin dinamik deney sonuçlarının karşılaştırılması

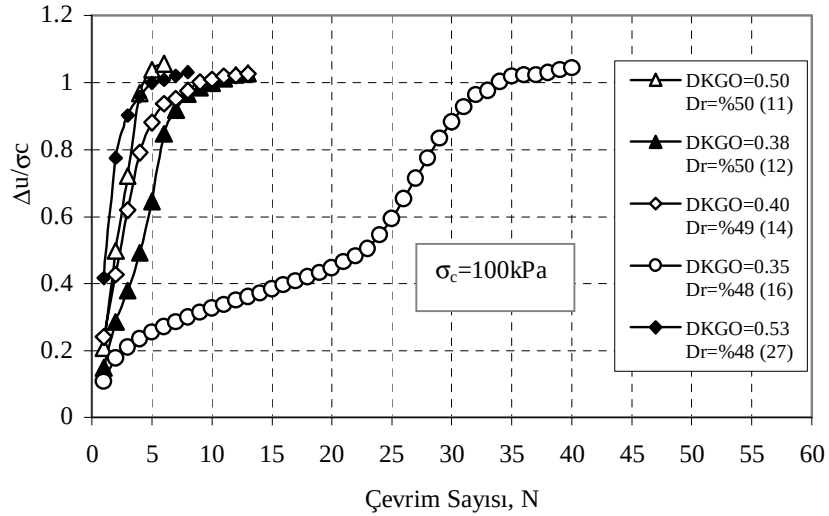
Yapılmış olan deneylerde göçme kriteri olarak ± 2.5 düşey şekil değiştirme kabul edilmiş ve deney sonuçları bu değer dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çeşitli gerilme oranları etkisi altında şekil değiştirmeleri karşılaştırıldığında relatif sıklığı %48-50 aralığında değişen, B değeri 0.53 olan numunelerin eksenel boy değişimi, $\pm e$ çevrim sayısı, N değişim grafikleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Grafik üzerindeki verilerden görüldüğü üzere $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ büyük olanların daha düşük gerilmelere maruz kalanlara göre göçme kriterine daha hızlı ulaştığı anlaşılmaktadır. Şekil değiştirme oranları için geçerli olan durum boşluk suyu basıncı oranının ($\Delta u/\sigma_c$) oluşum hızları içinde geçerlidir. Dolayısıyla aynı özelliklere sahip deney numunelerinde etkiyen $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ büyüdükçe Δu oluşum hızı artmakta ve daha kısa sürede Δu konsolidasyon basıncına eşit duruma gelmektedir. Bu durum sonucunda da efektif basınç “0”

olmakta ve sıvılaşma gerçekleşmektedir. Şekil 4.3' de de yukarıda sonuçları verilmiş olan deneylerin çevrim sayısı boşluk suyu basıncı oluşum ilişkileri gösterilmektedir.

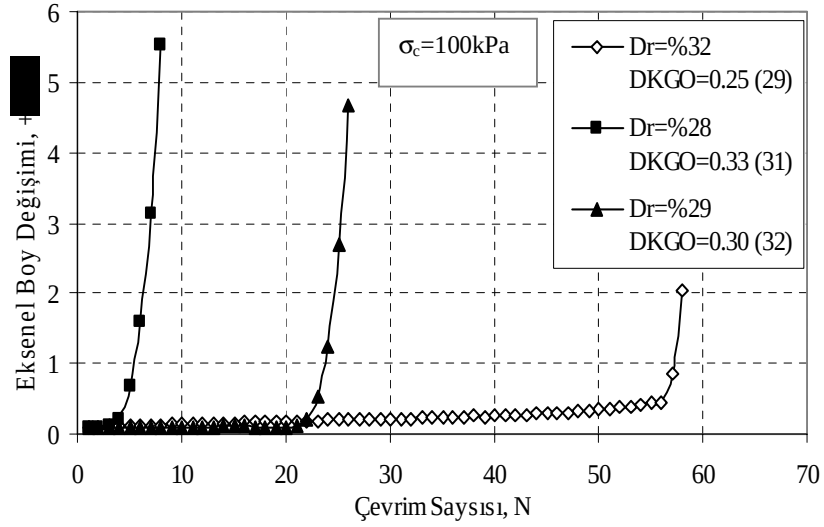
Şekil 4.4'de de $Dr=\%28-32$ olan ve $B=0.53$ değerine sahip numunelerde $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisi araştırılmış ve yüksek gerilme etkisi altındaki numunelerde diğerlerine göre şekil değiştirme daha hızlı gerçekleşmektedir. Boşluk suyu basınçları da beklendiği gibi yüksek $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisi altındakilerde konsolidasyon basınçlarına Şekil 4.5'de gösterildiği üzere daha az çevrim sayısı sonunda eşit olmaktadır.



Şekil 4.2 Eksenel boy değişimi çevrim sayısı ilişkisi B=0.53

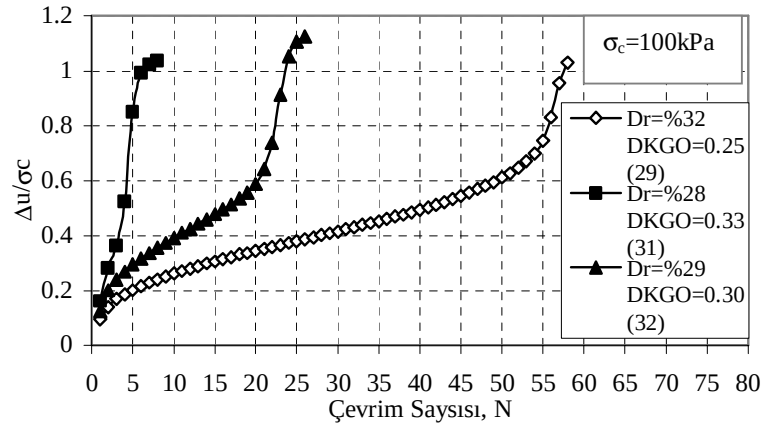


Şekil 4.3 B=0.53 sağlayan deneyler için $\Delta u/\sigma_c$ 'nin N'le değişim ilişkisi



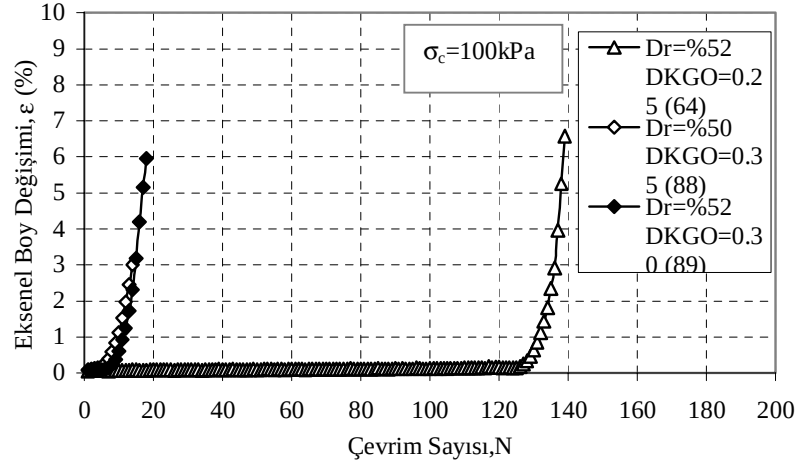
Şekil 4.4 $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisinin $B=0.53$ olduğu durumda şekil değiştirme oranına etkisi

Doygun ($B=1.00$) $Dr=\%50$ -52 sıklılığa sahip numunelerde de yapılan deneyler sonucunda kısmi doymunelerin deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlara benzer değerler elde edilmiştir. Δu ve ϵ değerlerinin uygulanan $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ 'nın artması ile daha hızlı arttığı Şekil 4.6 ve 4.7'de görülmektedir.

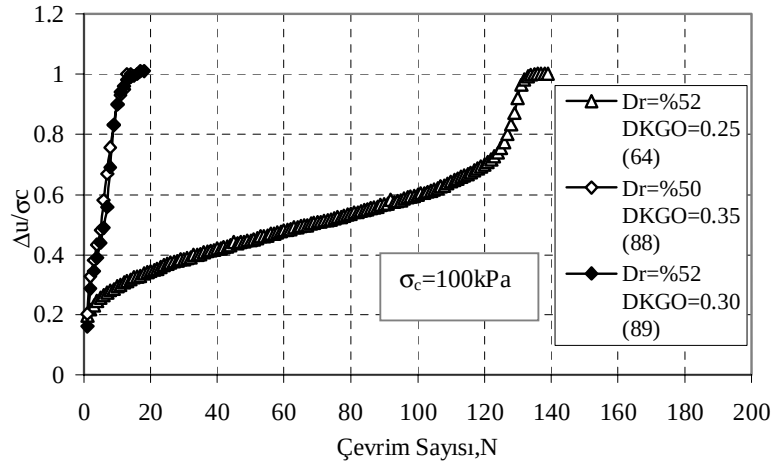


Şekil 4.5 $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisinin $B=0.53$ olduğu durumda boşluk suyu basıncı oranı üstündeki etkisi

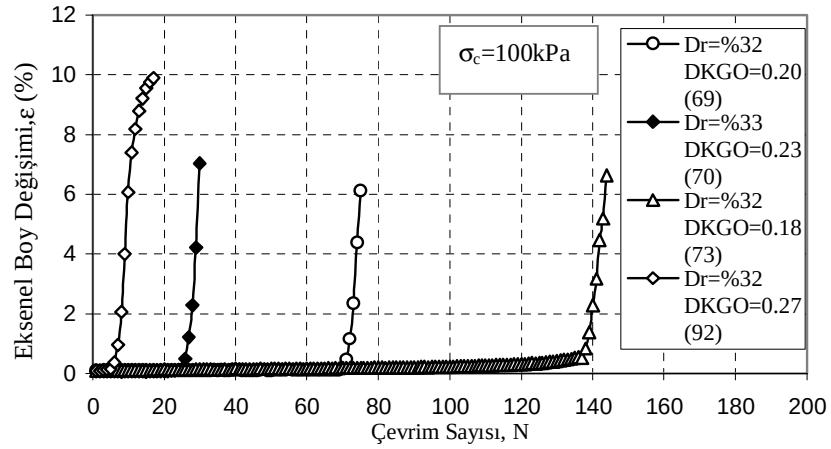
Aynı ilişki $Dr=\%32$ -33 sıklılığa sahip olan $B=1.00$ doymunluğa sahip olan numunelerin davranışında da doğal olarak görülmektedir. Eksenel boy değişimi ile çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı ile çevrim sayısı arasındaki ilişkiler Şekil 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir.



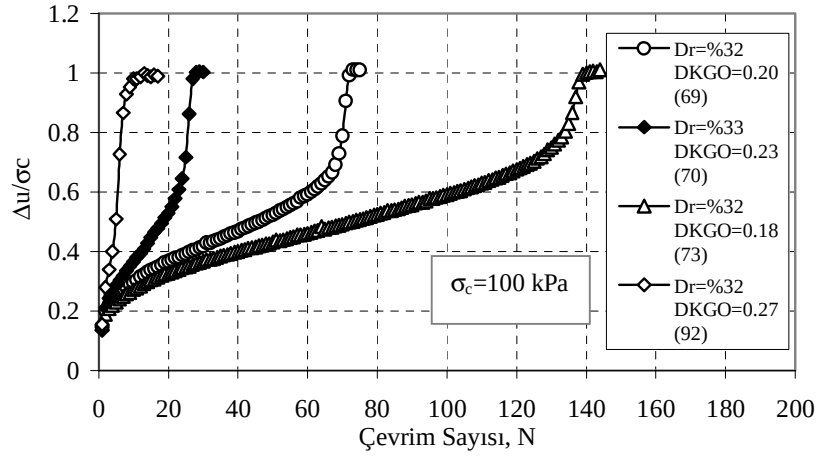
Şekil 4.6 ε -N ilişkisinin B=1.00 özellikteki deneyler için gösterimi



Şekil 4.7 B=1.00 sağlayan deneyler için $\Delta u/\sigma_c$ 'nin N'le değişim ilişkisi



Şekil 4.8 Eksenel boy değişimi çevrim sayısı ilişkisi

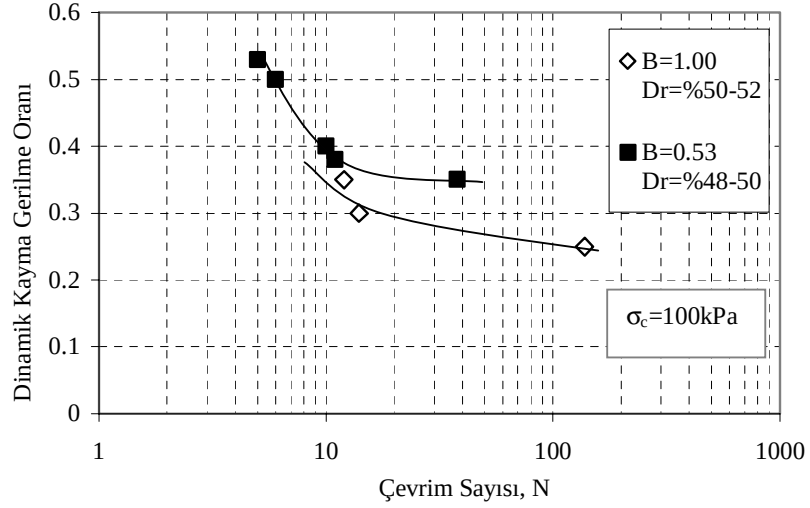


Şekil 4.9 Boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile olan ilişkisi

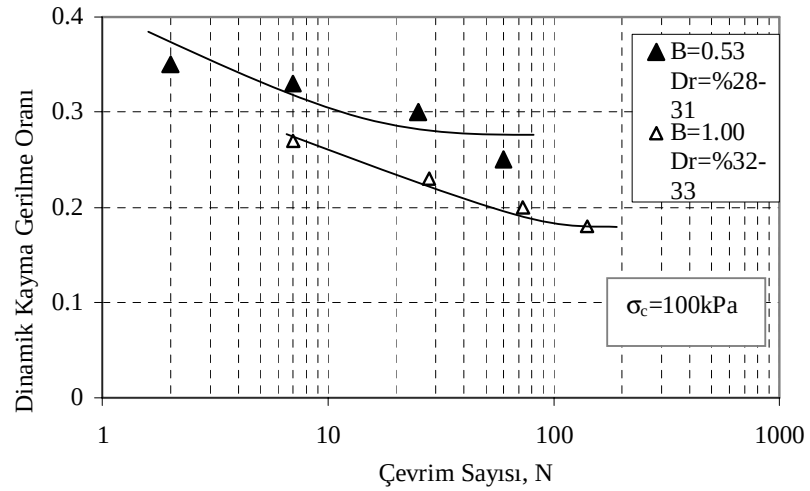
Şekil 4.10'da da yukarıda eksenel boy değişim oranı çevrim sayısı ilişkisi verilmiş olan relatif sıkılıkları %48 ile %52 olan deneylerde göçme kriteri olan ± 2.5 eksenel boy kısalmasının olduğu çevrim sayısı ile gerilme oranı ilişkisi B değerleri de 0.53 ve 1.00 olan 11, 12, 14, 16, 27, 64, 88, 89 numaralı deneyler için gösterilmiştir.

Şekilden de görüldüğü üzere numunelerin tekrarlı yüklere karşı dirençleri beklenildiği gibi doygunluk azaldıkça artmaktadır. Aynı grafik %28-32 aralığında relatif sıkılığa sahip numuneler için de hazırlanmış ve Şekil 4.11' den de görüldüğü üzere %50 sıkılıktaki numunelerin davranışına benzer ilişki elde edilmiştir.

4.10 ve 4.11 şekilleri karşılaştırıldığında %28-31 relatif sıkılığa sahip ve B değeri 0.53 olan numunelerin tekrarlı yükler altında göstermiş oldukları direncin %48-50 relatif sıkılığa sahip ve B=1.00 olan numunelerin gösterdiği dirence yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.10 ve 4.11'de verilen değerler incelendiğinde doygun ve yarı doygun numunelerin tekrarlı yük altındaki dayanımları aynı çevrim sayısına karşılık gelen $\pm \sigma_d / 2\sigma_o$ 'ları olarak kabul edilirse ve karşılaştırılırsa ilk şekilde bulunan yaklaşık Dr=%50 sıkılıktaki yarı doygun numunenin direncinin doygunundan yaklaşık %23 daha fazla olduğu görülmektedir.



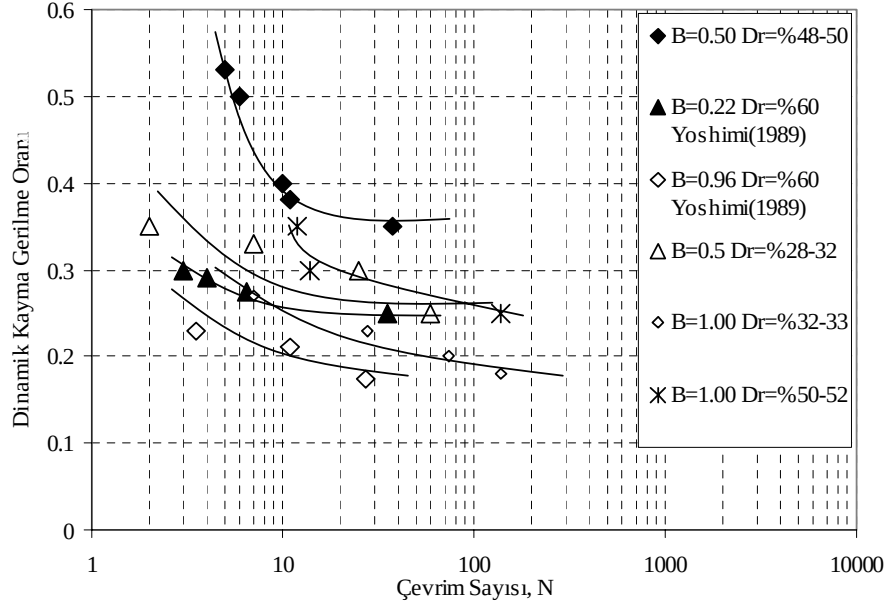
Şekil 4.10 $\pm\%2.5$ çift genlikli eksenel boy kısalmasının olduğu çevrim sayısı ile $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ arasındaki ilişki



Şekil 4.11 $\pm\%2.5$ çift genlikli eksenel boy kısalmasının olduğu çevrim sayısı ile $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ arasındaki ilişki

Dr=%30 sıklık içinde yukarıda bahsedilen ilişki kurulursa yarı doymun numunenin sıvılaşmaya karşı olan direnci doymun numunenin direncinden yaklaşık olarak % 22 fazladır. Yapılmış olan deneylerin sonuçlarının Yoshimi ve diğerlerinin (1989) yaptıkları deneylerin sonuçları ile uyumlu oldukları Şekil 4.10'dan çıkarılan sonuçlardan görülmektedir. Yoshimi ve diğerleri çalışmalarında Toyoura kumunu kullanmışlardır. Kullanılan kumun dane birim hacim ağırlığı 2.64, ortalama dane çapı 0.175mm ve uniformluk katsayısı ise 1.52'dir ve deneyleri tekrarlı burulmalı kesme deney aletinde gerçekleştirmişlerdir [29]. Sonuçları değerlendirildiğinde de B

değeri 0.22 olan deneyin doygun olana göre direncinde yaklaşık olarak %30'luk bir artış gözlemlenmektedir. Sonuç olarak bu deney sonuçları kullanılarak B değerinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi açık olarak gösterilebilmektedir.

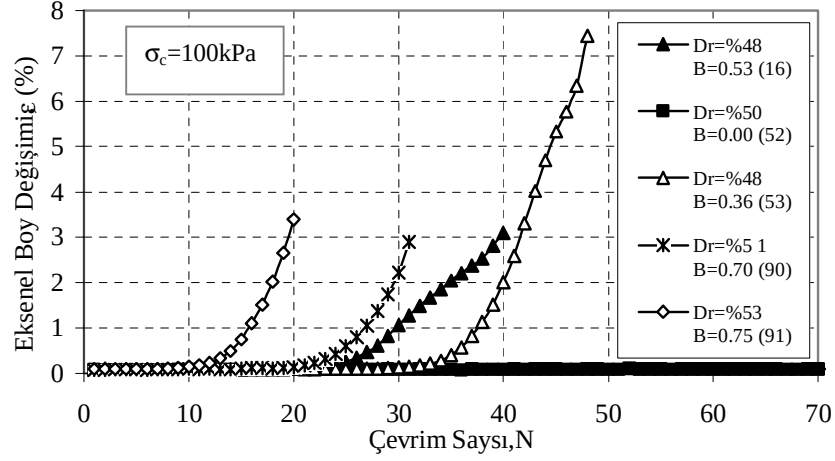


Şekil 4.12 Deney sonuçlarının karşılaştırılması

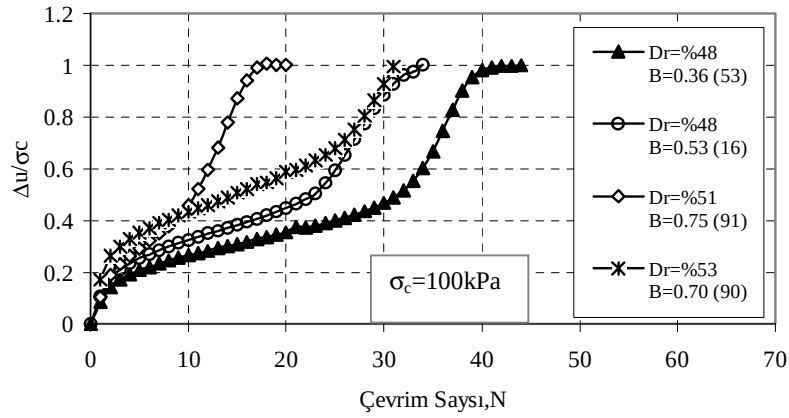
Şekil 4.10 de grafiği çizilmiş olan $B=0.50$ doygunluğuna sahip deneylerin 20 çevrime karşılık gelen $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ olarak kabul edilmiş ve bu gerilme seviyesi sabit tutularak B değerleri 0 ile 1 aralığında değiştirilmiş ve şekil değiştirme, boşluk suyu basıncı oluşumlarının çevrim sayısı ile olan ilişkileri Şekil 4.13 ve 4.14'de gösterilmiştir.

Şekil 4.13'den görüldüğü üzere relatif sıkılıkları hemen hemen aynı olan kum numunelerin tekrarlı gerilmeler altındaki davranışı direk olarak B değerinden etkilenmektedir.

Bunun yanında şekilde verilen kuru numunenin tekrarlı yük altındaki şekil değiştirme oranları B değeri 0.36 olan numuneye göre bile çok küçük seviyelerdedir. Özetle numune ıslandıktan sonra davranış kuru olana nazaran anormal şekilde değişmekte ve tekrarlı yükler etkisi altındaki direnci çok fazla düşmektedir. Boşluk suyu basıncındaki artışta, aynı $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ etkisi altındayken, dolayısıyla B değeri düşük olan numunelerde yüksek olanlara nazaran daha yavaş bir artış göstermektedir, Şekil 4.13'de davranışları gösterilmiştir.

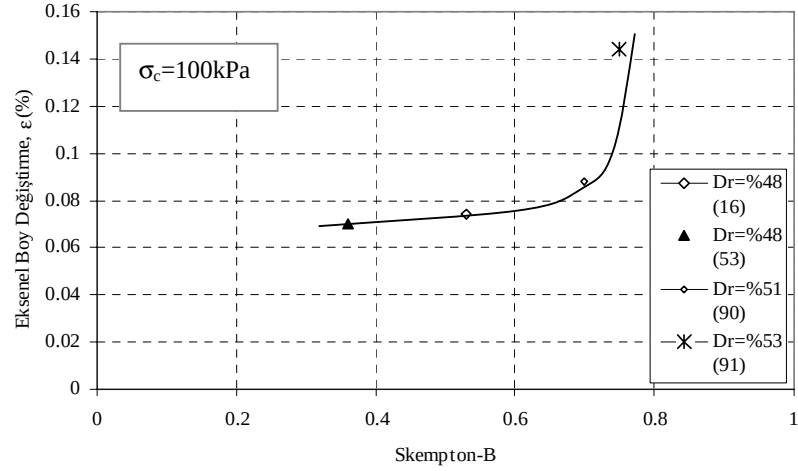


Şekil 4.13 $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$, $0.00 < B < 1.00$ aralığında değerlere sahip olan numunelerin tekrarlı yükler altındaki ortalama şekil değiştirme çevrim sayısı ilişkisi

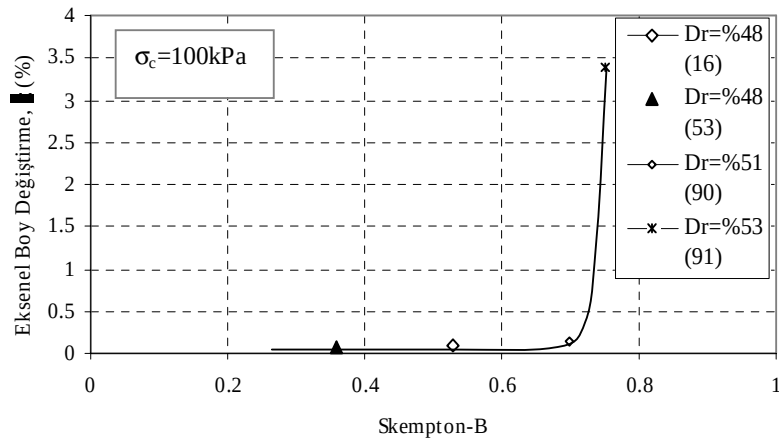


Şekil 4.14 $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$, $0.00 < B < 1.00$ aralığında değerlere sahip olan numunelerin tekrarlı yükler altındaki $\Delta u/\sigma_c$ -N ilişkisi

Şekil 4.15 ve 4.16'de 4.13'de verilmiş olan eksenel boy değişimi, ϵ , çevrim sayısı, N ilişkisinde 10 ve 20 çevrime denk gelen boy değişimleri B parametresi ile birlikte gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere aynı çevrim sayısında B değeri büyük olan numunelerde boy değişimi daha fazla oluşmakta ve göçme kriteri olan $\pm 2.5 \epsilon$ ortalama değerine ulaşması daha hızlı gerçekleşmektedir.



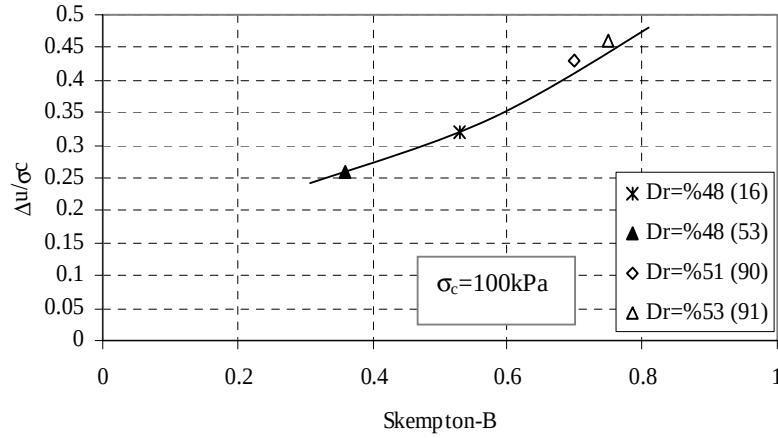
Şekil 4.15 $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ ile yüklenmiş $0 < B < 1$ aralığında doygunlukta $N=10$ 'de B parametresi eksenel boy değişim ilişkisi



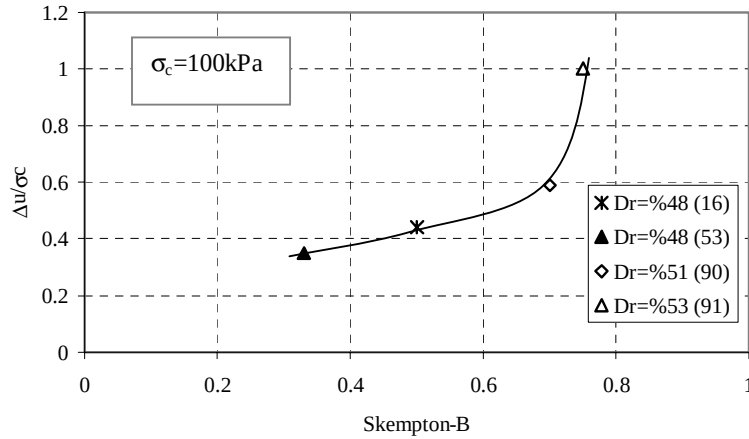
Şekil 4.16 $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.35$ ile yüklenmiş $0 < B < 1$ aralığında doygunlukta $N=20$ 'de B parametresi eksenel boy değişim ilişkisi

Şekil 4.17 ve 4.18'de de 4.14'de verilmiş olan boşluk suyu basıncı oranı, $\Delta u/\sigma_c$, çevrim sayısı, N ilişkisinde 10 ve 20 çevrime denk gelen boşluk suyu basıncı oranları B parametresi ile birlikte gösterilmiştir. Görüldüğü ve beklendiği üzere aynı çevrim sayısında B değeri büyük olan numunelerde boşluk suyu basıncı daha büyüktür ve $B=0.75$ olan 91 numaralı deneyde 20 çevrimde sıvılaşma gerçekleşmiştir. Buna karşın 53 numaralı deneyde ($B=0.36$) boşluk suyu basıncı konsolidasyon basıncı değerine eşit olması için ek olarak dinamik yükün yaklaşık 20 çevrime daha uygulanması gerekmiştir. Önceki bölümlerde de yapılan yorumlarda olduğu gibi, B

değerindeki azalma sıvılaşıma direncinde önemli miktarda direnç artışına yardımcı olmaktadır.



Şekil 4.17 $\pm\sigma_d/2\sigma_o=0.35$ ile yüklenmiş $0<B<1$ aralığında doygunlukta $N=10$ 'de
B- $\Delta u/\sigma_c$ ilişkisi



Şekil 4.18 $\pm\sigma_d/2\sigma_o=0.35$ ile yüklenmiş $0<B<1$ aralığında doygunlukta $N=20$ 'de
B- $\Delta u/\sigma_c$ ilişkisi

4.3.2 En büyük elastisite modülünün belirlenmesi ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Yapılmış olan dinamik deneylerde, dinamik yükleme öncesinde bir kısım numunede en büyük elastisite modülü ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Hazırlanmış olan numuneye sabit $\pm\sigma_d/2\sigma_o$ uygulanmadan önce numunede boşluk suyu basıncı ve plastik şekil değiştirmeler oluşturmayacak düzeyde gerilme oranları 5 çevrimde bir kademeli olarak arttırılarak uygulanmıştır. Daha sonra 3.Bölümde hesaplama

yöntemi anlatılan dinamik deney yöntemine benzer şekilde hesaplamalar yapılmış ve tekrarlı gerilme, σ , eksenel boy kısalması (gerçek değer), ϵ , grafiği çizilmiştir. Eksenel boy kısalması hesaplamalarında daha hassas sonuçlar vermesi açısından gap sensör ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen grafik incelenmiş ve elastik eksenel boy değişimi olan çevrimlere göre eğimler bulunmuştur. Bulunan değer en büyük elastisite modülü değerini vermektedir. Şekil 4.19'da 76 numaralı deneyde elde edilen en büyük elastisite modülü ölçümünün tüm çevrimlerini (a) ve ara çevrimleri (b, c) görülmektedir. Tablo 4.7'de en büyük elastisite modülü ölçümü yapılan deneylerin ve Tablo 4.8'de elastisite modülü yükleme adımlarına bağlı olarak azalım ilişkisi belirlenmiş olan deneylerin özellikleri gösterilmiştir. Tablo 4.7'deki en büyük elastisite modülü değerlerinden de görüldüğü üzere aynı sıklık ve aynı doygunluk değerlerinde sonuçlarda farklılıklar bulunmaktadır. Bu noktada numune hazırlamadaki hassasiyet kendini göstermekte ve aynı özellikte hazırlandığı düşünülen numunelerde homojenliğin sağlanmadığı düşünülebilir.

Numunenin hazırlanması sırasında kalıpta üst kısma gelindikçe sıklıkta değişim oluyor ve numunedeki homojenlik kayboluyorsa bu durum direk olarak ölçülen elastik şekil değiştirme miktarlarını değiştirmekte ve bu değerlerin küçülmesi de hesaplanan en büyük elastisite modülü değerinin büyümesine neden olmaktadır. Dinamik üç eksenli deney sisteminin dezavantajlarından biri olan belli noktadaki gerilme birikimleri elastisite modülü ölçümlerinde kendini önemli miktarda göstermektedir. Ancak Şekil 4.19'dan da görüldüğü üzere alınan sonuçlar birbirleri arasında tutarlıdır ve bu numune özellikleri için yaklaşık olarak en büyük elastisite modülü 285MPa olarak belirlenir. En büyük elastisite modülü değerinin ölçümü ve dinamik deney esnasındaki eksenel boy değiştirme farkı ile olan ilişkisi $B > 0.97$ ve $D_r = \%50$ civarındaki numuneler için Şekil 4.20'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi en büyük değerler bulunmuş ve oluşturulan eğrinin kalan kısmı dinamik deney verileri kullanılarak hesaplanmış ve şekilde gösterilmiştir.

Tablo 4.7 En büyük elastisite modülü ölçümü yapılan deneyler ve özellikleri

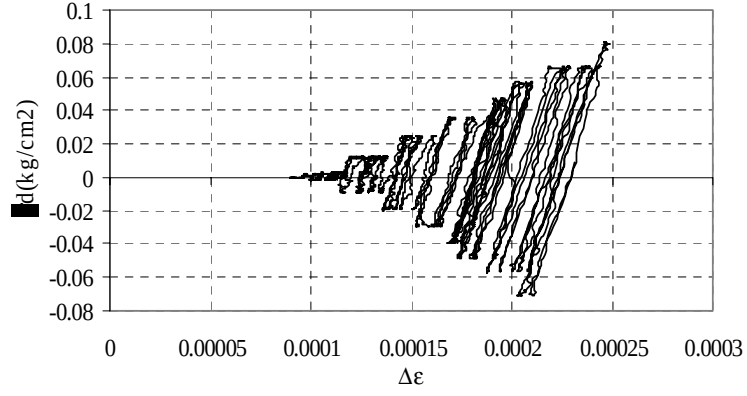
Deney No	Konsolidasyon Sonrası $D_r(\%)$	B	E(Mpa)
9	50	0.50	547
10	52	0.50	250
12	50	0.50	760
14	49	0.50	410
16	48	0.50	357
27	48	0.50	93
28	41	0.50	690
60	51	0.97	284
62	52	0.97	282
64	52	1.00	265
65	52	0.67	220
66	52	0.98	277
24	31	0.60	232
25	33	0.50	235
29	32	0.50	364
30	29	0.50	345
31	28	0.50	373
32	29	0.50	388
59	31	0.50	190
68	33	1.00	282
69	32	1.00	275

Tablo 4.8 Elastisite Modülü azalımının belirlendiği deneyler

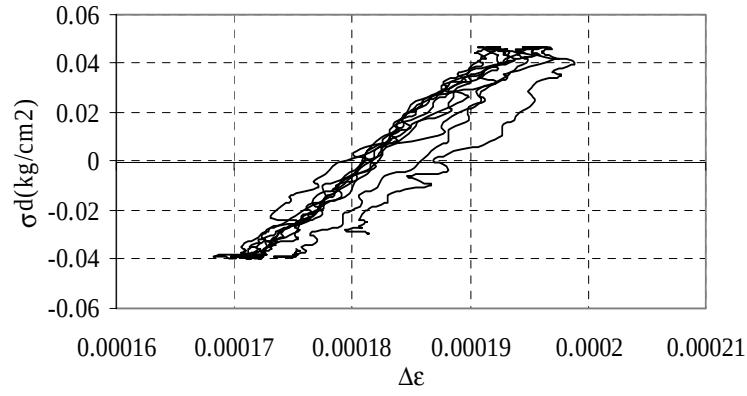
Deney No	$D_r(\%)$	Konsolidasyon Öncesi $D_r(\%)$	e_0	Kon. Sonrası $D_r(\%)$	e_1	W(%)	$S_r(\%)$	B
71	50	50	0.70	52	0.69	26	99.5	0.53
75	50	50	0.70	50	0.70	-	-	0.00
77	30	30	0.75	32	0.75	28	100	1.00
76	30	30	0.75	30	0.75	-	-	0.00

Şekil 4.21’de $D_r=\%52$ ve $\%50$ sıklığa sahip, B değeri 0.53 ve 0.00 olan numunelerde ölçülen en büyük elastisite modülü azalım ilişkisi gösterilmiştir.

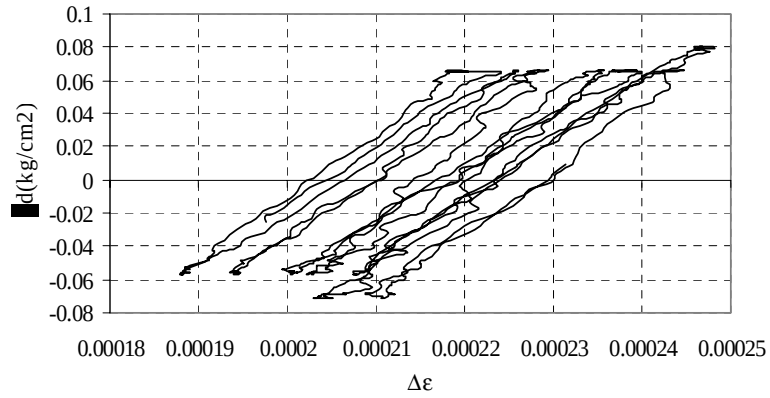
Şekilden de görüldüğü 62, 71 ve 75 numaralı deneyler için $D_r=\%50-52$ relatif sıklıkta numuneler kademeli olarak her 5 çevrimde artan değerlerde dinamik kayma gerilmeleri ile yüklenmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda gerilme eksenel boy değişiminden yıkılma oluşana kadar elastisite hesaplamaları yapılmıştır. Görüldüğü



(a)

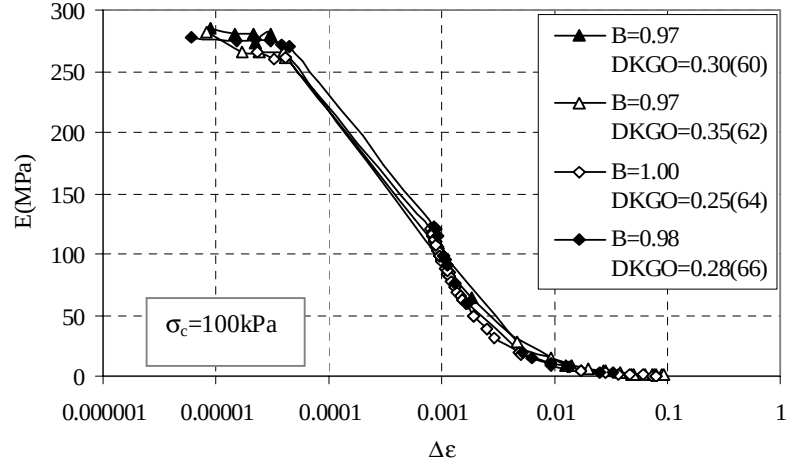


(b)



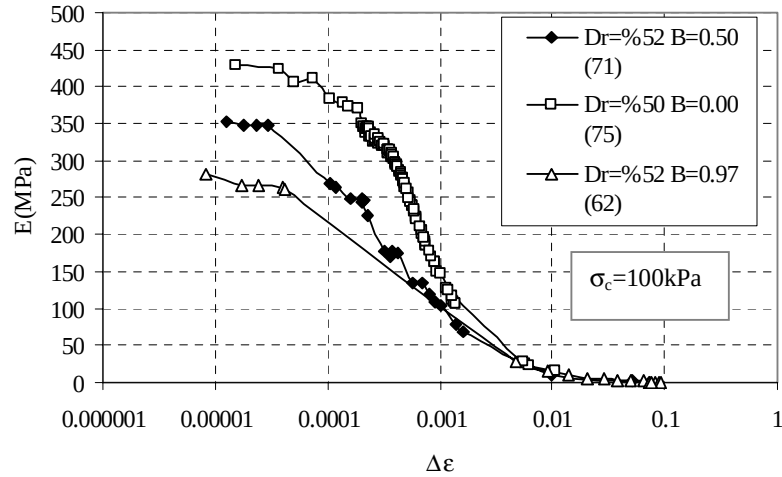
(c)

Şekil 4.19 (a)En büyük elastisite modülü ölçümü tüm çevrimleri (b) 20-25 çevrim aralığı (c) 30-35 çevrim aralığı



Şekil 4.20 Elastisite modülünün eksenel boy kısalması ile değişimi
Dr=%51-52 $B \geq 0.97$

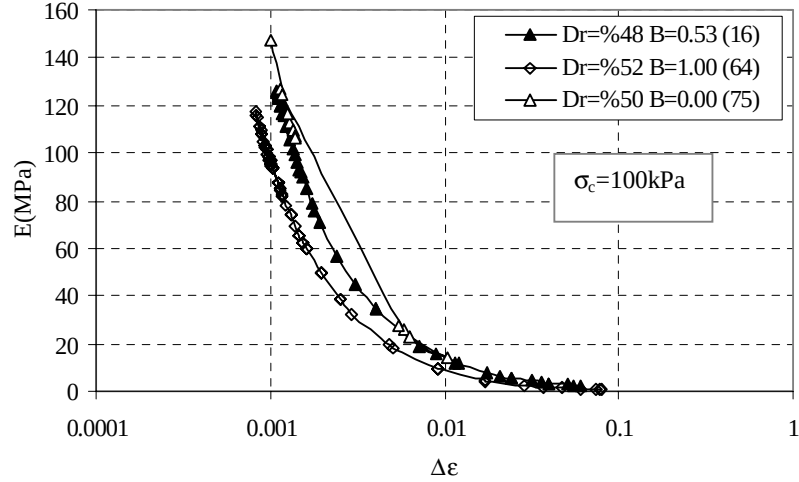
üzere kuru olarak hazırlanan numunenin elastisite modülü aynı eksenel boy kısalması değerlerinde $B=0.53$ olan numunenin elastisite modülü değerinden yaklaşık olarak %23 ve doymun olandan da %51 daha yüksektir, ama numune göçmeye yaklaşık olarak aynı eksenel boy kısalması farklarında ulaşmıştır. Deneylerin kayıtları EK-1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 (62,71 ve 75) numaralı deneylerin elastisite modülünün azalım ilişkisinin karşılaştırılması

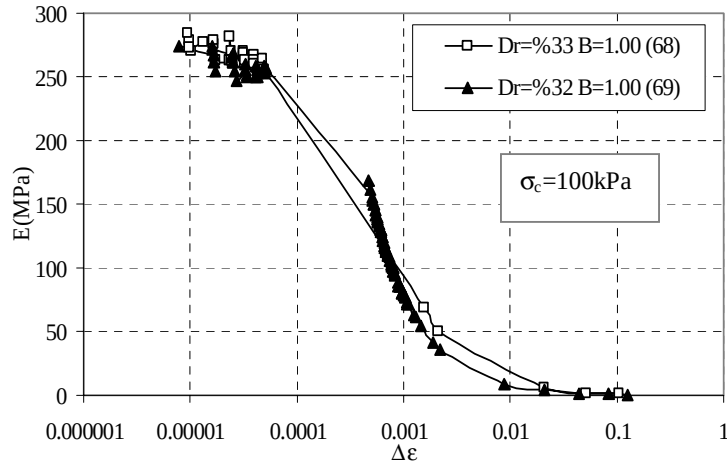
0.001-0.1 eksenel boy kısalması aralığında 71 ve 75 numaralı deneylere ek olarak karşılaştırmaya $Dr=\%52$ sıklığına sahip, B değeri 1.00 olan 64 numaralı deneyde eklendiğinde 0.001 eksenel boy kısalması değerinde, en küçük elastisite modülü değerine doymun numenin, en büyük değere de kuru numunenin sahip olduğu Şekil

4.20'dan görülmektedir. Oransal olarak karşılaştırıldığında yarı doymun numune doymundan %32 daha büyük, kuru olan numunede yarı doymun numuneden %20 daha büyük elastisite modülüne sahiptir.



Şekil 4.22 Doymun, yarı doymun ve kuru deneylerde ölçülen elastisite modüllerinin karşılaştırılması

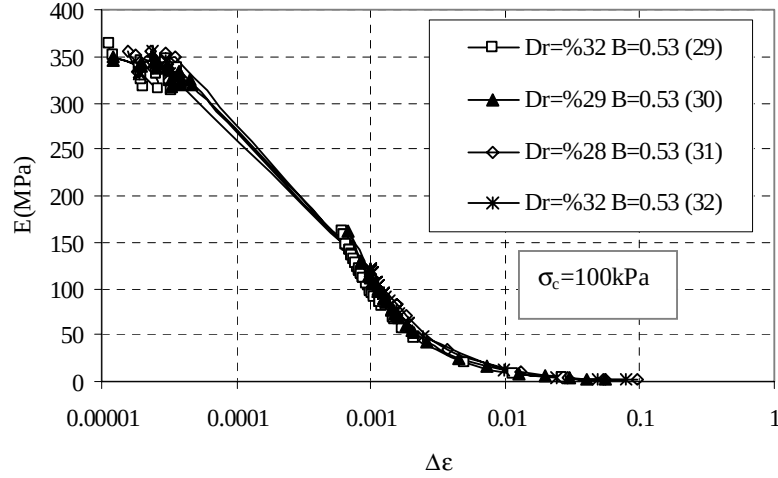
Yukarıda $Dr=50\%$ sıklık civarında hazırlanmış olan numuneler için yapılmış deneyler ve hesaplamalar $Dr=30\%$ civarı sıklığa sahip numuneler içinde yapılmıştır. Şekil 4.21'de dinamik deney öncesinde yapılmış olan en büyük elastisite modülü



Şekil 4.23 Elastisite modülünün aksenal boy kısalması ile değişimi
 $Dr=32-33$ $B=1.00$

ölçümü sonuçları $B=1.00$ değerindeki 68, 69 numaralı deneyler için gösterilmiştir. Görüldüğü üzere 275MPa civarında en büyük elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. $B=0.53$ ve $Dr=28-32$ özelliklerindeki numunelerde yapılan en büyük

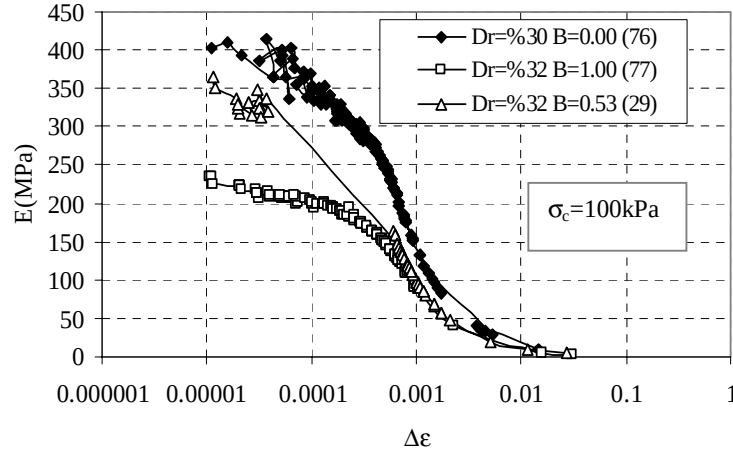
elastisite modülü ölçümlerinde de Şekil 4.24'den görüldüğü üzere yaklaşık olarak bu özelliklerde 340MPa civarında değerler elde edilmiştir. Karşılaştırması yapıldığında beklendiği gibi $B=1.00$ olan deneylerde edilmiş olan en büyük elastisite modülünden daha büyük değer elde edilmiştir.



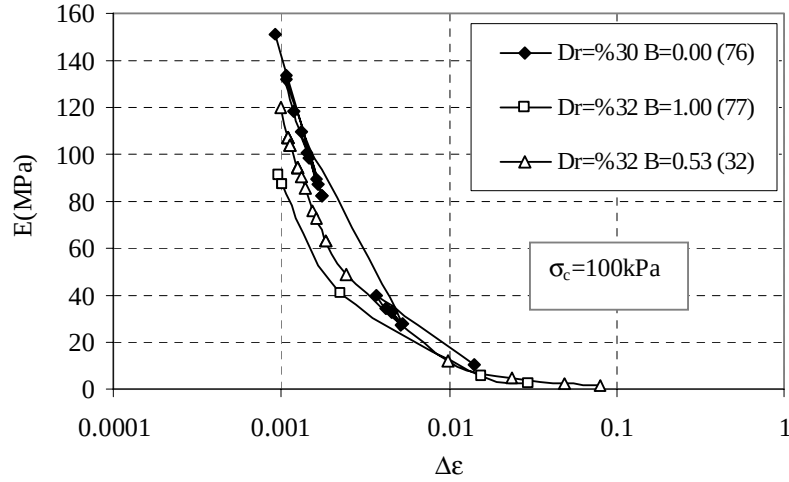
Şekil 4.24 Yarı doymuş $Dr=28-32$ sıklığa sahip kum numunenin en büyük elastisite modülü değerleri

Şekil 4.25'de de B değerleri 0.00, 0.53 ve 1.00 olan relatif sıklıkları %30-32 olan 29-76-77 numaralı deneylerin elastisite modülleri azalım ilişkisi gösterilmiştir. Beklendiği ve şekilden de görüldüğü üzere kuru olan numunenin elastisite modülü daha büyüktür. Aralarında oranlama yapıldığında doymuş numunenin azalım ilişkisi deneyinde elde edilen 0.0001 eksenel boy kısalması oranında elastisite modülü değeri kuru olan numuneninkinden yaklaşık olarak %72, kısmi doymuş olan numuneninde kurudan yaklaşık olarak %16 daha düşük değere sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak yapılan ölçümler sonucunda zemin daneleri arasında bulunan su numunenin elastik davranışı üzerinde önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.22'da $Dr=50$ sıklığa sahip numunelerin deney sonuçları için yapılmış olan karşılaştırma B değerleri 0.00, 0.53, 1.00 olan $Dr=30$ civarı sıklığa sahip numunelerde de eksenel boy kısalmanın 0.001 olduğu durumda yapılmış ve doymuş numunenin yarı doymuş $Dr=32$ oranında, yarı doymuş numunenin de kuruya göre %22 oranında daha düşük elastisite modülü değerlerine sahip olduğu Şekil 4.26 yardımıyla belirlenmiştir.



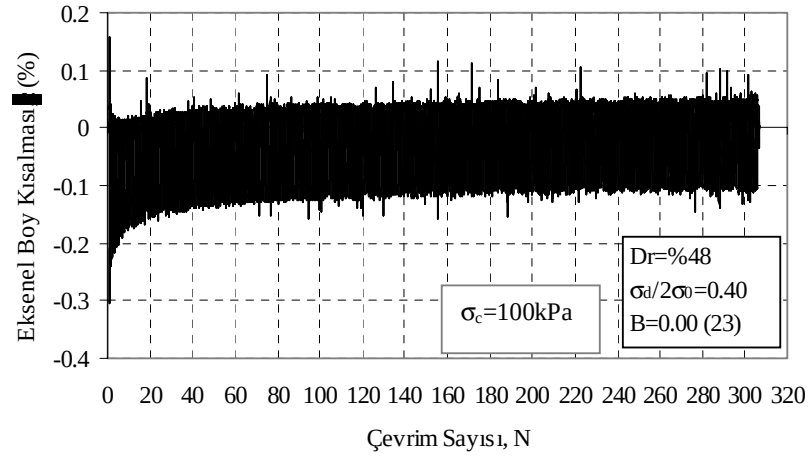
Şekil 4.25 (29, 76 ve 77) numaralı deneylerin elastisite modülünü azalım ilişkisi



Şekil 4.26 Doygun, yarı doymun ve kuru deneylerde ölçülen elastisite modüllerinin karşılaştırılması

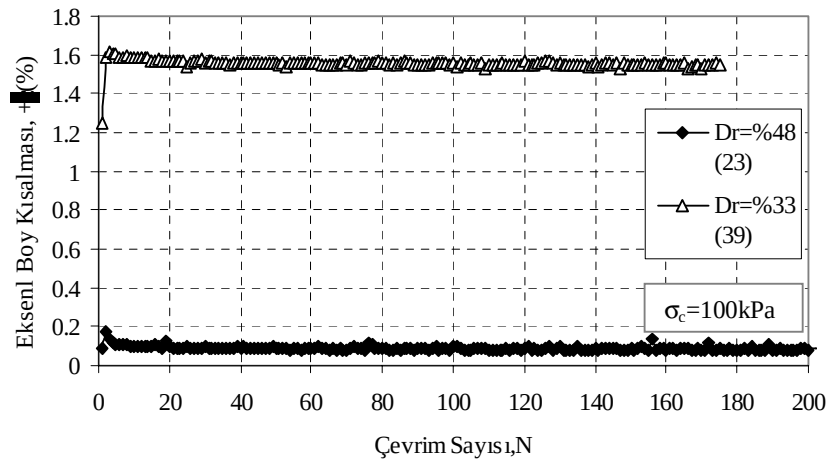
4.3.3 Kuru numunelerin dinamik deney sonuçlarının karşılaştırılması

Kuru numunelerde yapılan deneyler sonucunda aynı $\pm\sigma_d/2\sigma_o = 0.40$ ve 0.50 gerilme oranı etkisi altında relatif sıkılığın gerilme-şekil değiştirme ve çevrim sayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.27 'dan da görüldüğü üzere 23 numaralı deneyin eksenel boy kısalması ve çevrim sayısı ilişkisi verilmiştir. Numunde yükleme ile birlikte %0.3 düzeyine kadar oluşan boy değişimi sonraki çevrimlerde dengeye ulaşmış ve numunede ortalama olarak %0.1 plastik şekil değiştirme oluşmuştur. Elastik davranış ise % (+0.05) – (-0.1) aralığında kalmış ve 300 çevrim geçildiğinde deney sonlandırılmıştır. Diğer kuru numunelerde üzerinde de yapılan deneylerde benzer davranış elde edilmiştir.

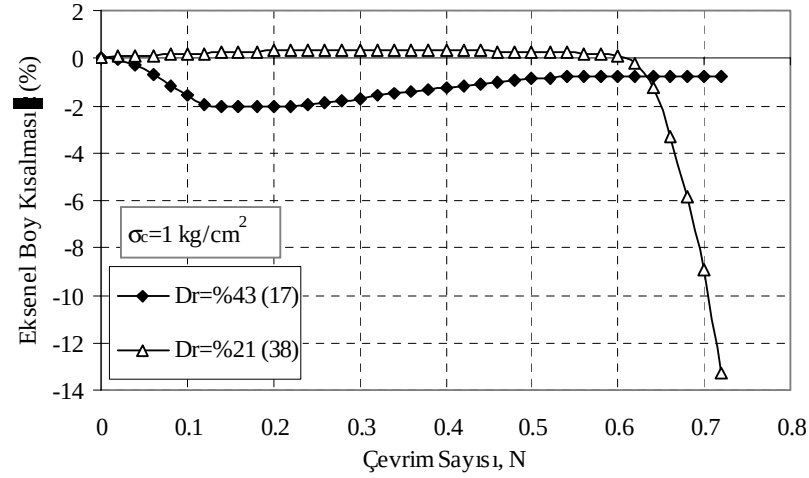


Şekil 4.27 (23) numaralı deneyin eksenel boy kısalması çevrim sayısı ilişkisi

Ortalama eksenel boy değişimi ile çevrim sayısı ilişkisi Şekil 4.28’de 4.29’da da çevrim sayısı ile eksenel boy değişimlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Beklendiği üzere relatif sıkılığı düşük olan kuru numunede boy kısalması daha fazla olmaktadır. Şekil 4.13’deki grafiklerden de görüldüğü üzere kuru olan deneylerde oluşan eksenel şekil değiştirmeler herhangi bir doygunluğa ulaştırılmış numunelere göre çok daha az olmaktadır. Bunun temel nedeni de ıslanma ile zemin taneleri arasında azalan sürtünme kuvvetidir. Kuru numunelerde bu değer daha fazladır ve deformasyonlar sınırlı düzeyde kalıp, çok küçük plastik şekil değiştirmeler sonunda tekrarlı yükler altında elastik davranış göstermeye başlamaktadır.

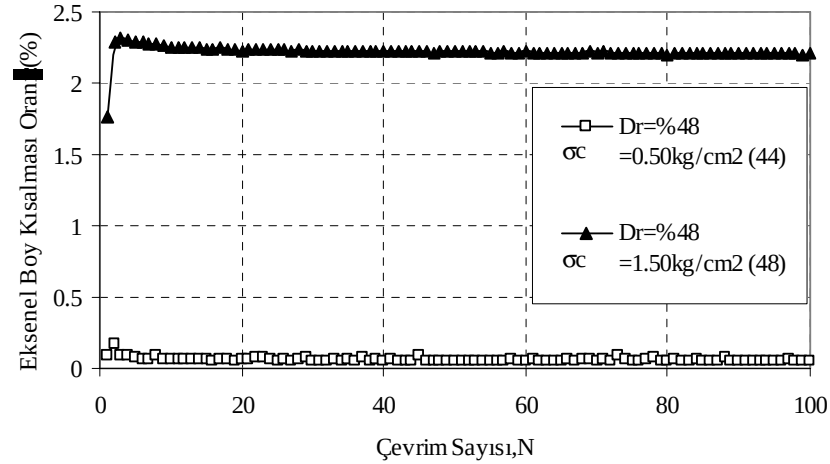


Şekil 4.28 $\pm\sigma_d/2\sigma_o=0.40$ $B=0.00$ ’da Eksenel boy kısalması çevrim sayısı ilişkisine
relatif sıkılığın etkisi



Şekil 4.29 $\pm\sigma_d/2\sigma_o=0.50$ $B=0.00$ 'da Eksenel boy kısalması çevrim sayısı ilişkisine ortam basıncının etkisi

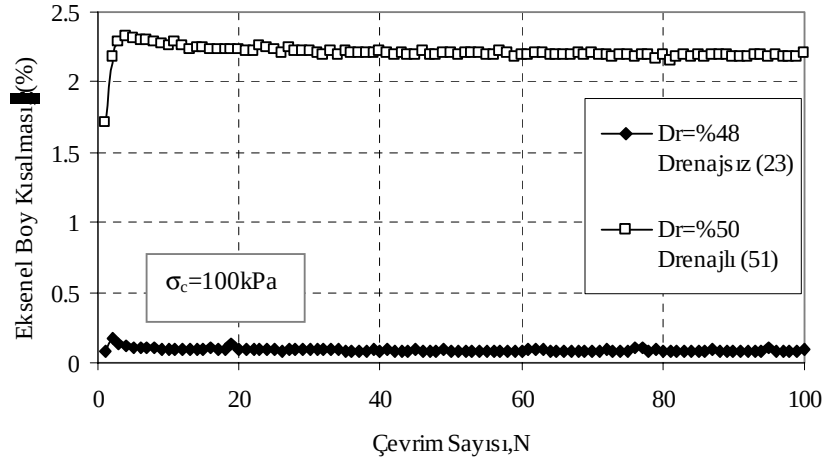
Yapılan çalışmalar kapsamında kuru numunelerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışına çevre basıncı etkisi de araştırılmıştır. Şekil 4.30'dan görüldüğü üzere çevre basıncındaki artış numuneyi daha fazla kırılğan hale getirmiş ve oluşan eksenel boy kısaltmaları çevre basıncı düşük olan kuru numunelere göre daha fazla oluşmuştur.



Şekil 4.30 Kuru deneylerde ε -N ilişkisine çevre basıncı etkisi

Kuru deneylerde incelenen diğer bir özellikte deney sırasında sistemin drenaj kanallarının açılması ve taneler arasındaki havanın çıkışına izin vermektir. Drenajlı ve drenajsız deney sonuçlarının çevrim sayısı-eksenel boy kısalması ilişkisi Şekil

4.31’da gösterilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü dinamik kayma gerilmesinin 0.40 olduğu durumda drenaja imkân sağlanan deneyde oluşan eksenel boy kısalması drenajsız koşulda yüklenene göre çok büyüktür. Numune içinde kalan havanın tekrarlı yükler altındaki kumların davranışına bu deneyler için etkisi açık olarak görülmektedir ancak deney sayısı artırılarak daha genel bir yargıya varılabilir.



Şekil 4.31 Kuru numunelerin tekrarlı yükler altındaki davranışına drenajın etkisi

4.4 Hacimsel Sıkışma Modülü Ölçümleri ve Yapılan Deneylerin Özellikleri

Yapılan çalışma kapsamında Dr=%27 ve %50 sıklıklarda hazırlanan numunelerde hacimsel sıkışma modülü, $\Delta\sigma/(\Delta V/V)$, ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde numunenin hazırlanması sonrasında 30kPa’lık vakumdan çevre basıncına geçilmiş, numune 200 kPa ters basınçta doyurulmuş ve 230 kPa’ye arttırılan ters basınçta doygunluk kontrolü yapılmış bu aşamadan sonra numunenin üzerindeki efektif basınç kademeli olarak izotropik olarak arttırılarak eksenel boy kısalması ve hacim değişimleri kayıt edilmiştir. Deney süresince alınan kayıtlarla ve başlangıç değerlerine bağlı olarak yükleme kademelerindeki efektif gerilmelere bağlı olarak sıklık, boşluk oranları ve hacimsel sıkışma modülleri hesaplanmıştır.

Yükleme kademelerinde elde edilen veriler Tablo 4.9 ve 4.10’de gösterilmiştir.

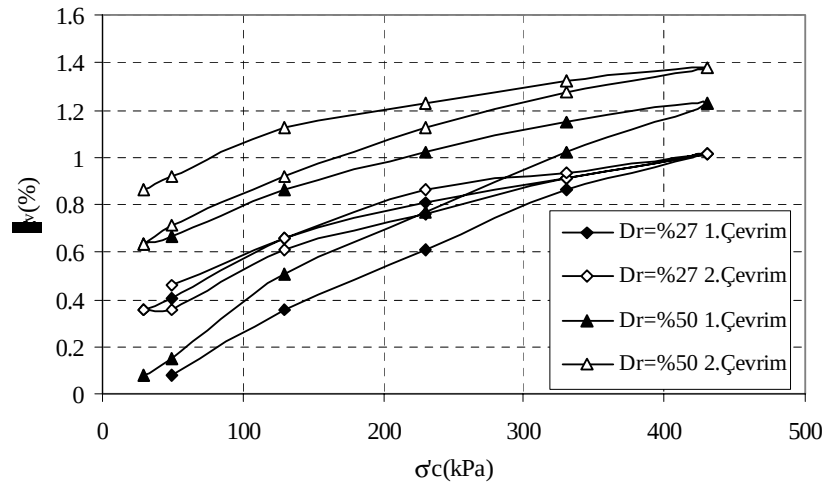
Tablo 4.9 Dr=%27 sıklıktaki numunede yükleme çevrimlerinde elde edilen veriler
ve hesaplanan hacimsel sıkışma modülü, K.

$\sigma'_c(\text{kPa})$	$\varepsilon_v(\%)$	e	Dr(%)	K(kPa)
30		0.75933	26.18	
50	0.0760529	0.75799	26.67	262.975
130	0.3549133	0.75308	28.49	281.75893
230	0.6084229	0.74862	30.14	328.71875
330	0.8619324	0.74416	31.79	348.05515
430	1.0140381	0.74149	32.78	394.4625
330	0.9126343	0.74327	32.12	328.71875
230	0.8112305	0.74506	31.46	246.53906
130	0.6591248	0.74773	30.47	151.71635
50	0.4056152	0.75219	28.82	49.307812
30	0.3549133	0.75308	28.49	0
50	0.3549133	0.75308	28.49	56.351786
130	0.6084229	0.74862	30.14	164.35937
230	0.7605286	0.74595	31.13	262.975
330	0.9126343	0.74327	32.12	328.71875
430	1.0140381	0.74149	32.78	394.4625
330	0.9379852	0.74283	32.29	319.83446
230	0.8619324	0.74416	31.79	232.03676
130	0.6591248	0.74773	30.47	151.71635
50	0.4563171	0.75130	29.15	43.829167
30				0

Tablo 4.10 Dr=%50 sıklıktaki numunede yükleme çevrimlerinde elde edilen veriler
ve hesaplanan hacimsel sıkışma modülü, K.

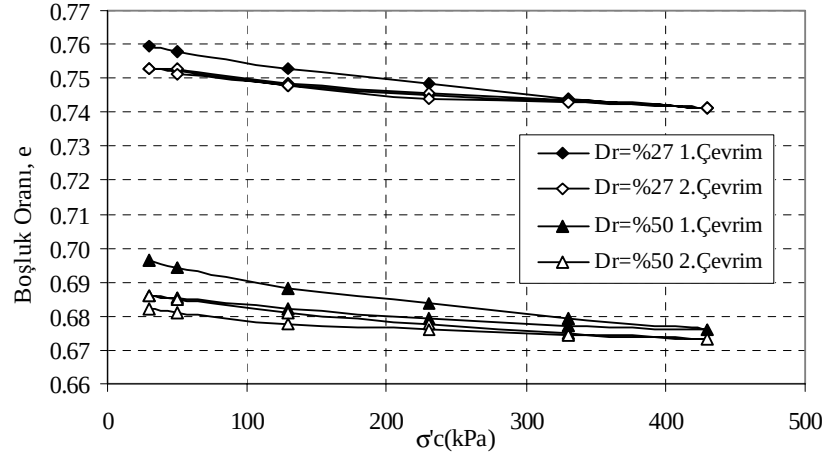
$\sigma'_c(\text{kPa})$	$\varepsilon_v(\%)$	e	Dr(%)	K(kPa)
30	0.0764916	0.69672	50.00	392.20
50	0.1529832	0.69413	50.32	326.83
130	0.5099439	0.68807	52.57	254.93
230	0.7649159	0.68374	54.17	300.69
330	1.0198878	0.67942	55.77	323.57
430	1.2238654	0.67596	57.05	351.35
330	1.1473738	0.67725	56.57	287.61
230	1.0198878	0.67942	55.77	225.52
130	0.8669046	0.68201	54.81	149.96
50	0.6629271	0.68547	53.53	75.42
30	0.6374299	0.68591	53.37	47.06
50	0.7139215	0.68461	53.85	70.04
130	0.917899	0.68115	55.13	141.63
230	1.1218766	0.67769	56.41	205.01
330	1.2748598	0.67509	57.37	258.85
430	1.3768485	0.67336	58.01	312.31
330	1.3258542	0.67423	57.69	248.90
230	1.2238654	0.67596	57.05	187.93
130	1.1218766	0.67769	56.41	115.88
50	0.917899	0.68115	55.13	54.47
30	0.8669046	0.68201	54.81	34.61

Yukarıda tablolarda gösterilen veriler kullanılarak aşağıdaki şekiller oluşturulmuştur. Şekil 4.32’de efektif gerilme değişimlerine bağlı olarak oluşan hacim değişimlerinin yükleme çevrimlerindeki değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere $D_r=50$ sıklığa sahip numunede başlangıç değerine göre 2.çevrim sonucunda %0.791’lik kalıcı hacim değişimi oluşmuştur. 1. çevrimde de yüklemeye başlama değeri ile boşaltma değerleri arasında da %0.23’lük hacimsel şekil değiştirme oranı oluşmuştur. Aynı özellik %27 sıklıktaki numunede incelendiğinde ise başlangıç değeri ile 2. çevrim sonucunda %0.38’lik bir hacimsel şekil değiştirme oranı farkı bulunmaktadır, ancak 1. ve 2. çevrim sonucundaki değişimi sadece %0.1 seviyelerinde kalmıştır. %50 sıklıktaki numuneyle karşılaştırıldığında %27 sıklıktaki numunede 1. ve 2. çevrim sonundaki hacim değişimi çok küçük olarak gerçekleşmiştir.



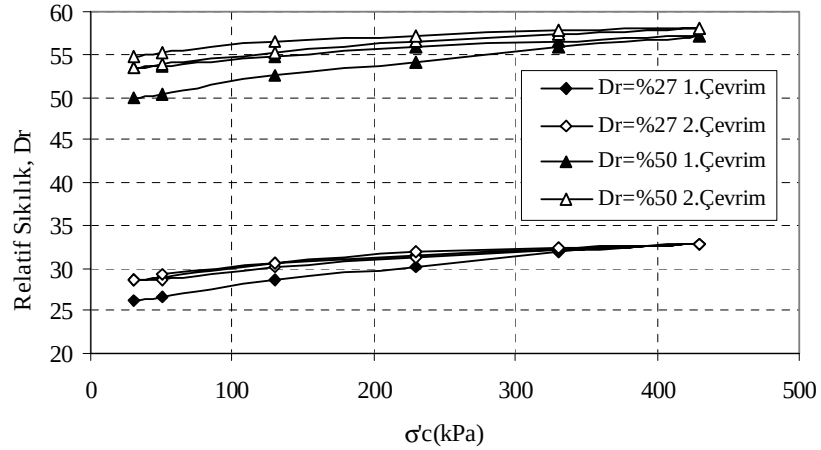
Şekil 4.32 Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme hacim değişim ilişkisi

Şekil 4.33’de de numunenin başlangıç boşluk oranının yükleme adımlarına bağlı olarak oluşan boy kısılması ve hacim değişimleri sonucunda hesaplanmış boşluk oranlarının efektif gerilme ile olan ilişkisi gösterilmiştir. %50 sıklıktaki numunenin ilk adımda boşluk oranı 0.696 iken ilk yükleme çevrimi sonunda 0.685’e 2. çevrim sonunda da 0.682’ye düşmüştür. Anlaşıldığı üzere numunede çevrimler sonucunda sıkışma oluşmuştur ve başlangıç 1. çevrim sonunda %1.55, 2.çevrim sonunda da yaklaşık olarak %2.11 boşluk oranında azalma meydana gelmiştir. Aynı ilişki %27 sıklıktaki numunede de oluşmuştur, ancak boşluk oranlarında %50 sıklığa nazaran, başlangıç ve 2. çevrim sonundaki değişim 0.01471, değişimi 0.00803 oluşmuştur.

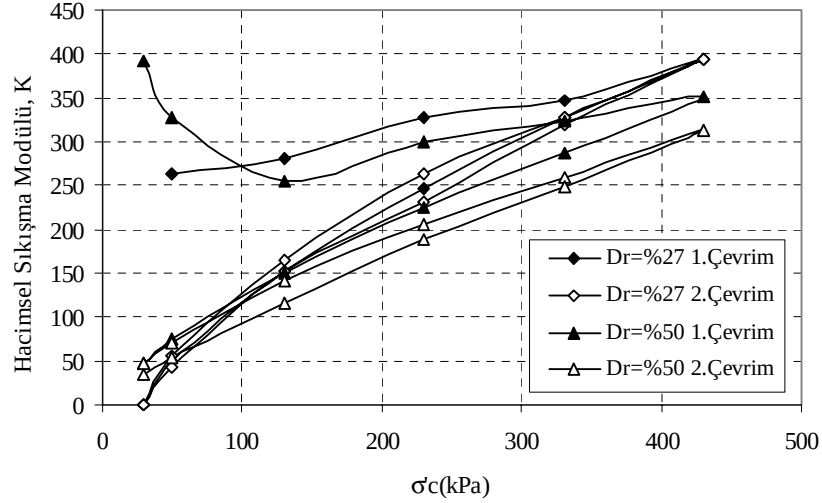


Şekil 4.33 Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme boşluk oranı değişim ilişkisi

Hacmin ve boşluk oranının bir fonksiyonu olan relatif sıkılık değerlerinin çevrimlere bağlı olarak hesaplanan değerlerinde de diğer sonuçlarda elde edilen değerlerle paralel sonuçlar elde edilmiştir. Ancak grafiklerden de görüldüğü üzere %27 sıkılıktaki numunenin 1. ve 2. çevrim sonuçlarında elde edilen değerler neredeyse aynı iken %50 sıkılıktaki numunenin her çevrimi sonunda hacim, boşluk oranı ve sıkılık değerleri ölçülebilir düzeyde değişmiştir. Hacimsel sıkışma modülü hesaplamalarında da yükleme ve boşaltma adımlarında ilerlendikçe %27 ve %50 sıkılıktaki numunelerin değerleri birbirine yaklaştığı Şekil 4.35’den görülmektedir.



Şekil 4.34 Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme relatif sıkılık değişim ilişkisi



Şekil 4.35 Kademeli izotropik yükleme kademelerinde efektif gerilme hacimsel sıkışma modülü değişim ilişkisi

4.5 Sonuçlar

Hazırlanmış olan bu bölüm çalışma kapsamında yapılmış olan deneylerin özelliklerinden ve sonuçlarından oluşmaktadır. Deneyler ilk olarak özellikleri doğrultusunda sınıflandırılmış, deney özellikleri hazırlanan tablolar yardımıyla açıklanmıştır. Daha sonra deney sonuçları sırasıyla doymuş ve yarı doymuş numune dinamik deney sonuçlarının karşılaştırılması, en büyük elastisite modülü ve hacimsel sıkışma modülü ölçümleri, sonuçlarının karşılaştırılması ve kuru numunelerin tekrarlı dinamik deney sonuçlarına yer verilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda aynı gerilme oranı etkisi altındaki kum numunelerin davranışlarının relatif sıklık ve doymuşluk değerlerinden önemli miktarda etkilendiği görülmüştür. Ayrıca boşluk suyu basıncı oluşumu ve şekil değiştirme miktarlarının da direk olarak bu özelliklerden etkilendiği yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Elastisite modülü ölçümlerinde de kuru olarak hazırlanmış numunenin en büyük, doymuş olan numunelerinde en düşük değerlere sahip olduğu deneyler yardımıyla belirlenmiştir. Kuru numunelerde gerçekleştirilen deneyler yardımıyla da çevre basıncı, drenaj etkisi ve relatif sıklık gibi temel fiziksel özelliklerin dinamik davranışa olan etkisi araştırılmıştır. Ek olarak hacimsel sıkışma modülü iki farklı sıklıktaki numunede belirlenmeye çalışılmış ve sonuçları son bölümde gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada kısmi doymuş kumların tekrarlı yük etkisi altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneylerde, Skempton-B parametresinin 0.00-1.00 aralığında $Dr=\%30-50$ sıklığında kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış olan temiz kum numuneler dinamik üç eksenli deney sisteminde tekrarlı olarak yüklenmiştir. Genel kapsamını, dinamik üç eksenli basınç sisteminde yapılmış olan deney sonuçlarının oluşturduğu bu çalışma 5 ana bölümden oluşturulmuştur.

Giriş bölümünde genel olarak yapılması planlanan çalışmanın amacı, özellikleri ve incelenmesi planlanan parametrelerden, ikinci bölümde de bu konu üzerinde geçmişte yapılmış diğer çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü ve dördüncü bölümler ise sırasıyla dinamik üç eksenli deney sisteminin kullanımından ve yapılan deneylerin sonuçlarından, karşılaştırmalardan oluşturulmuştur.

Dördüncü bölüm içinde de anlatıldığı gibi kumların tekrarlı yükler altındaki davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri Skempton-B parametresidir. Karşılaştırılması yapılan $Dr=\%50$ sıklığa sahip B değeri 0.50 numunenin sıvılaşmaya karşı olan direnci B değeri 1.00 olan numunelerin direncinden yaklaşık %23 daha fazladır. Aynı durum $Dr=\%30$ civarında sıklığa sahip numunelerde de kontrol edilmiş ve doymuş numunelerin sıvılaşmaya karşı olan dirençleri $B=0.50$ olanlardan yaklaşık olarak %22 daha azdır. Ayrıca aynı sıklığa ancak farklı doymuşluk değerlerine sahip deney sonuçları karşılaştırıldığında, B değeri büyük olan numunelerin hem yıkılma kriteri olan $\pm\%2.5$ eksenel boy kısalmasına, ϵ , hem de boşluk suyu basıncının, $\Delta u/\sigma_c$, konsolidasyon basıncına eşit duruma gelmesi sonucunda göçmenin oluşması daha küçük gerilme oranlarında meydana gelmiştir.

Skempton-B parametresi boşluk suyu basıncı ilişkisinden de görüldüğü üzere 20 çevrim sonucunda B değeri 0.75 olan 91 numaralı deney için Δu basıncı konsolidasyon basıncı olan 100 kPa'e ulaşmasına ve sıvılaşma gerçekleşmesine rağmen B değeri 0.36 olan 53 numaralı deneyde Δu değeri 35 kPa seviyelerindedir.

Çalışma kapsamında numunelere uygulanan dinamik kayma gerilmesi büyüklüğünün boşluk suyu basıncı ve eksenel boy kısalması oluşturmada açısında da incelenmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde beklendiği gibi büyük gerilme altında yüklenen numunelerde göçme ve boşluk suyu oluşumu diğerlerine çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Aynı sonuç relatif sıkılık değerinin değişiminde de elde edilmektedir. Relatif sıkılık değerindeki artış sıvılaşma direncinin arttırmaktadır.

Yapılan en büyük elastisite modülü ölçümlerinde yaklaşık $D_r = 50$ sıkılığa, $B \geq 0.97$ doygunluğa sahip numunelerin elastisite modülleri 285 MPa seviyelerinde elde edilmiştir. $B = 0.00$ ve 0.53 olduğu durumlar için elastisite modülü azalım deneyleri yapılmış, B - ϵ ilişkileri belirlenmiş ve yarı doygun olan numunenin kuruya nazaran %23 daha büyük elastisite modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı eksenel boy değiştirme oranlarında yapılan ölçümlerde yapılan karşılaştırmalarda yarı doygun numune doygunundan %32 daha büyük, kuru olan numunede yarı doygun numuneden %20 daha büyük elastisite modülüne sahip olduğu gözlemlenmiştir.

$D_r = 50$ için hesaplanan tüm elastisite modülü değerleri $D_r = 30$ civarında sıkılığa sahip numunelerde de ölçülmüş ve $B = 1.00$ olduğunda yaklaşık olarak en büyük elastisite modülü 275 MPa olarak elde edilmiştir. $D_r = 30$ sıkılığa, $B = 0.53$ doygunluğa sahip olan numunelerin elastisite modülü azalım ilişkisi incelendiğinde de en büyük elastisite modülü bu sıkılık değeri için 335 MPa seviyelerinde ölçülmüştür. B değerinin 0.00 olduğu durumda ise 400 MPa seviyelerinde ölçüm yapılmıştır. Beklendiği gibi doygunluğun azalması ile elde edilen en büyük elastisite modülleri artmaktadır ve aynı boy kısalması seviyesinde (0.001) yapılan ölçümlerde kuru numune deneyinde yarı doygun numuneye göre %32 daha büyük, doygunu göre de %61 büyük elastisite modülü ölçülmüştür.

Yapılan çalışma kapsamında kuru numunelerin de tekrarlı yükler etkisi altında ki davranışları incelenmiştir. Öncelikle aynı seviyede tekrarlı gerilme uygulanan farklı relatif sıkılık değerlerine sahip numunelerin eksenel boy kısalması değerleri karşılaştırılmış ve beklendiği üzere relatif sıkılık değeri büyük olan deney numunesinde daha küçük deformasyonlar oluşmuştur. Kuru numunelerin tekrarlı olarak yüklenmeleri sırasında uygulanan gerilme büyüklüğüne bağlı olarak başlangıçta eksenel şekil değiştirmeler oluşmakta, ilerleyen seviyelerde de deformasyon miktarı sabit bir hal almaktadır. Eğer gerilme seviyesi çok büyükse

numune ilk çevrim tamamlanmadan göçmekte, düşük gerilme seviyelerinde de numune ilk önce eksenel deformasyona uğramakta daha sonra davranış sabit bir karakter kazanmaktadır.

Kuru numunelerin davranışına drenaj etkiside araştırılmıştır. Karşılaştırılması yapılan $Dr=50\%$ sıklıktaki numunelerin aynı değerde dinamik gerilme altında yüklenmesi sonucunda (Şekil 4.30 23-51 numaralı deneyler) drenaja imkan sağlanan numunede eksenel boy kısalmasının drenaj kanalları kapalı olana göre daha büyük değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu davranış biçimi için açıklama ise numune içinden kaçışına izin verilmeyen havanın şekil değiştirme davranışına direk olarak etkisi olduğu şeklindedir. Ancak drenaj etkisi hakkında temel olarak bir fikir vermiş olan deneylerin sayısı artırılarak kesin sonuca varmak mümkün olacaktır.

Yapılan çalışmada kısmi doymuş kumların tekrarlı yükler etkisi altında davranışları incelenmeye çalışılmıştır ve yapılan literatür çalışması kısmında kısmi doymuşluğun oluşma sebeplerinden bahsedilmiştir. Temel olarak iklimsel etkiler ve kılcalıktan bahsedilmiş olmasına rağmen çalışmada hazırlanan numunelerde kısmi doymuşluk numuneden cazibe ile su geçirilmesiyle sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan numunenin kılcal yüksekliği zamana bağlı olarak hazırlanacak bir düzenele belirlenebilir ve hazırlanan bu sistem dinamik üç eksenli sistemine de bağlanarak tekrarlı olarak yüklenecek numune içinde kılcal olarak su yükselmesine izin verilebilir ve dikkate alınması gereken emme kuvvetleri ölçümleri yapılarak konu hakkında daha kesin yargılara varılabilir. İleride gerçekleştirilmesi planlanan çalışmalar yapılan öneri doğrultusunda düzenlenmesi konunun daha detaylı olarak anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Tezcan, S., Teri, L.,** (1996). Shear Wave Propagation and Liquefaction in Layered Soils, *Türkiye Deprem Vakfı*, TDV/TR 96-005, İstanbul.
- [2] **Kramer, S. L.,** 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, United States of America.
- [3] **Ishihara, K.,** 1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Clarendon Press, Oxford.
- [4] **Hadush, S., Yashima, A., Uzuoka, R.,** 2000. Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis, *Computers and Geotechnics*, Volume 27, Issue 3, pp. 199-224.
- [5] **Erken, A.,** 2003. Soil Dynamics Lecture Notes.
- [6] **Seed, H. B., Lee, K.L.,** 1966. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loadind, *Journal of ASCE*, V.92, SM6, pp.105-134
- [7] **Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S., Okamoto, M.,** 1986. Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Shear Strength of Sands for Different Sample Preparation Methods, *Soils and Foundation*, V.26, pp23-41.
- [8] **Özay, R., Erken, A., Ansal, A. Ekim,** 1998. Kumların Dinamik Mukavemeti, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [9] **National Highway Institute,** 1998. Training Course in Geotechnical And Foundation Engineering, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Geotechnical Earthquake Engineering, Publication No. FHWA HI-99-012.
- [10] **Okamura, M., Abdoun, T., Dobry, R., Sharp, M.K., Taboada, V.M.,** December 2001. Effects Of Permeability And Weak Aftershocks On Earthquake-Induced Lateral Spreading. *Soils And Foundation*, V.41, N.6.
- [11] **Tatsuoka, F., Toki, S., Miura, S., Kato, H., Okamoto, M., Yamada, S., Yasuda, S., Tanizawa, F.,** 1986. Some Factors Affecting Cyclic Undrained Triaxial Strength of Sand, *Soils and Foundation*, V.26, pp.99-116.

- [12] **Zhang, G., Robertson, P.K., Bracham, R.W.I.**, 2002. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, *Canadian Geotechnical Journal*, V.39, pp. 1168-1180.
- [13] **Ishihara, K., Takatsu, H.**, December, 1979. Effect of Overconsolidation and K_0 conditions on the Liquefaction Characteristics of the Sands, *Soils and Foundation*, V. 19, N. 4, pp.59-68.
- [14] **Dickenson, S.E., McCullough, N.J., Barkau, M.G., Wavra, B.J.**, 2002. Assesment And Mitigation Of Liquefaction Hazards To Bridge Approach Embankments In Oregon-*Final Report*.
- [15] **Stark, T.D., Olson, S.M.**, Decemver 1995. Liquefaction Resistance Using CPT And Field Case Histories, *Journal Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, V.121, N.12
- [16] <http://www.palaeos.com/Cenozoic/cztimescale.html> (03.2005)
- [17] **Youd, T. L.**, 1984. Recurrence of Liquefaction At the Same Site, *Proceeding, 8th World Conference on Earthquake Engineering*, V. 3, pp.231-238.
- [18] **Meißner, H., Becker., A.**, 1995. Dynamic Behaviour of Partially Saturated Sand, *Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. pp. 45-57.
- [19] **Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mithchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H.**, October 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V.127, N.10.
- [20] **Ishihara, K., Yoshimine, M.**, March, 1992. Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes, *Soils and Foundation*, V. 32, N. 1, pp.178-188.
- [21] **Uzuner, B. A.**, 1998. Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, 4. Baskı, Ankara.
- [22] **Fredlund, D.G., Rahardjo, H.**, 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, A Wiley-Interscience Publication, New York..
- [23] **Pappin, J. W., Brown, S. F., O'Reilly, M. P.**, 1992. Effective Stress Behavior of Saturated and Partially Saturated Granular Material Subjected to Repeated Loading. *Geotechnique* 42, N. 3, pp. 485-497.

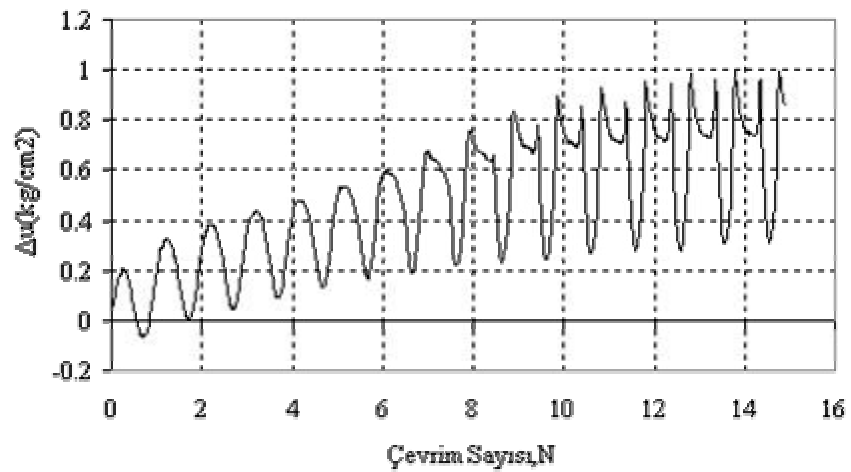
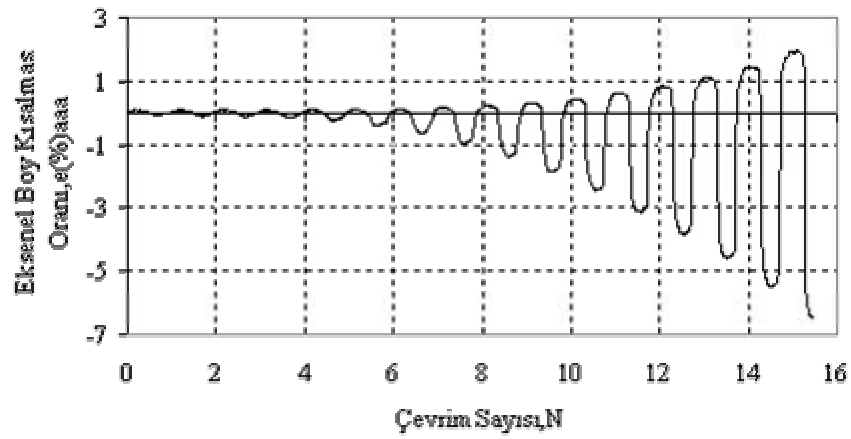
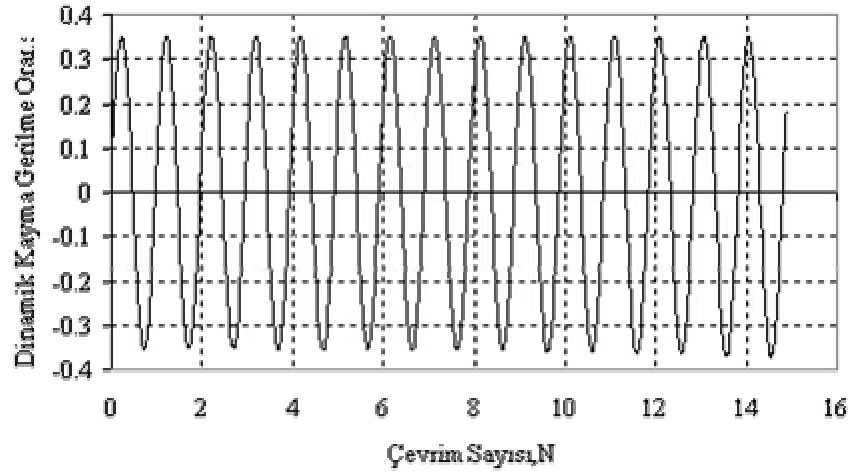
- [24] **Jennings, J. E. B., Burland, J. B.**, 1962. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Geotechnique, The International Journal of Soil Mechanics*, V.12, N.2, pp. 125-144.
- [25] **Tamura, S., Tokimatsu, K., Abe, A., Sato, M.** February 2002. Effects of Air Bubbles on B-value and P-wave Velocity of a Partly Saturated Sand. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Soils and Foundation* V.42, No.1, pp. 121-129.
- [26] **Hoyos, L. R.**, 1998. Experimental and Computational Modeling of Unsaturated Soil Behavior Under True Triaxial Stress State. *PHD Thesis*, Georgia Institute of Technology.
- [27] **Bishop, A. W., Donald, I.B.**, 1996. The Experimental Study of Partly Saturated Soil in Triaxial Apparatus, *Proceeding of 5th International Conference SMFE*, Paris, pp13-21.
- [28] **Wu, S., Gray, D. H., Richart, F. E.** September 1984. Capillary effects on Dynamic Modulus of Sand and Silts. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE., Vol. 110, No. 9, pp. 1188-1203.
- [29] **Yoshimi, Y., Tanaka, K., Tokimatsu, K.**, September, 1989. Liquefaction Resistance of Partially Saturated Sand. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Soils and Foundation* V.29, No.3, pp 157-162.
- [30] **Yang, J., Savidis, S., Roemer, M.** September 2004. Evaluating Liquefaction Strength Of Partially Saturated Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V.130, No.9.
- [31] **Farooq, K., Orense, R., Towhata, I.** April 2004. Response of Unsaturated Sandy Soils Under Constant Shear Stress Drained Condition. *Soils and Foundations*, V.44, N.2, pp.1-13 Japanese Geotechnical Society.
- [32] **Tsukumato, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., Huang, Y.** December, 2002. Resistance of Partly Saturated Sand to Liquefaction with Reference to Longitudinal and Shear Wave Velocities. *Soils and Foundations*, V.42, N.6, pp. 93-104, Japanese Geotechnical Society.
- [33] **Kokusho, T.**, August, 2000. Correlations of Pore-Pressure B-Value with P-Wave Velocity and Poisson Ratio for Imperfectly Saturated Sand or Gravel. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Soils and Foundation* V.40, No.4, pp 95-102
- [34] **Qian, X., Gray, D., Woods, R.** February, 1993. Voids and Granulometry: Effects on Shear Modulus of Unsaturated Sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, N. 2, pp.882.
- [35] **Yang, J., Sato, T.** 2001. Interpretation of Seismic Vertical Amplification at an Array Site, *Bull. Seismol. Soc.Am.*, 90, pp.275-285.

- [36] **Yang, J.** Aralık 2002. Saturation Effect of Subsoils on Ground Motion at Free Surface Due to Incident SV Waves. *Journal of Engineering Mechanics*, V.128, N. 12., pp. 1295-1303, ASCE.
- [37] **Okur, V.**, 2001. Farklı Dinamik Gerilme Genlikleri Altında İnce Daneli Zeminlerin Gerilme Şekil Değişirme ve Mukavemet Davranışları, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. *Doktora Tezi*.
- [38] **Özay, R.**, Mart, 2002. Örselenmemiş Killi Zeminlerin Statik Mukavemetine Deprem Yüklerinin Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. *Doktora Tezi*.
- [39] **Instruction Manual.** Pneumatic Cyclic Triaxial Test Apparatus, Two Unit Type, Model DTC-311.
- [40] **Black, D., Lee, K., Kenneth L.** Instruction Manual. Saturating Laboratory Samples By Back Pressure. American Society of Civil Engineers, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v 99, n SM1, Jan, 1973, N 9484, p 75-93

EKLER

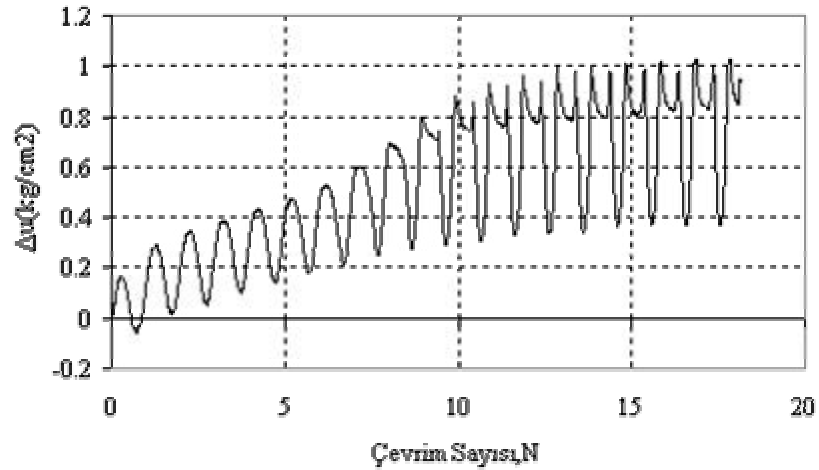
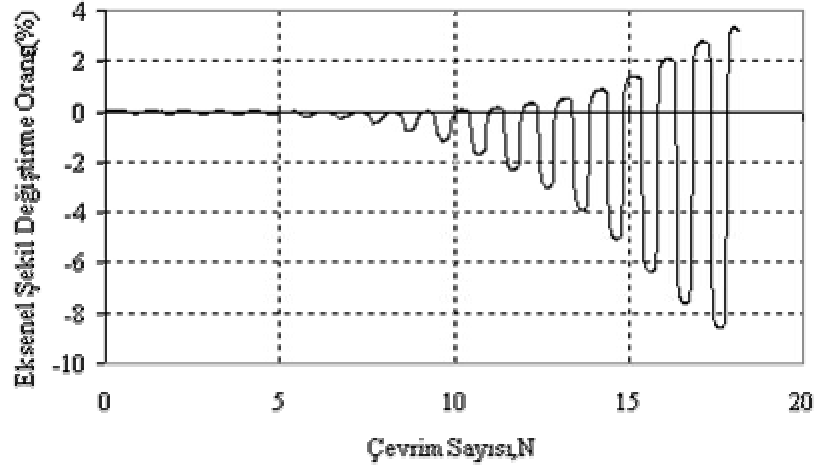
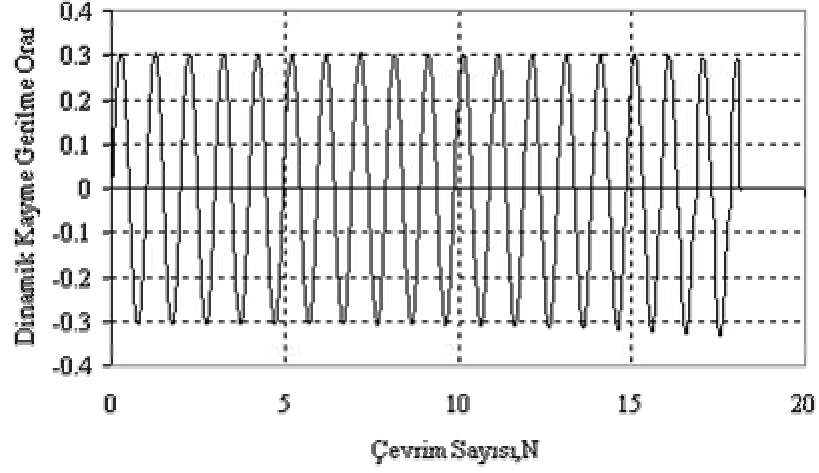
EK A : 4.Bölümde Tablo 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ‘de özellikleri verilmiş olan dinamik deneylerin grafikleri tabloda verilen sirayla gösterilmiştir.

Deney No	88	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.973
Tarih	18.06.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.629
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	50
R(cm)	5	δ_s (gr/cm3)	1.56
H(cm)	10	Sr(%)	100
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



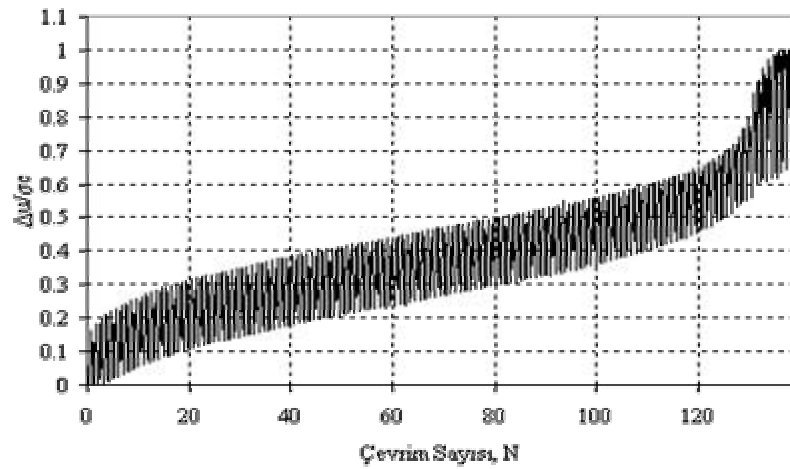
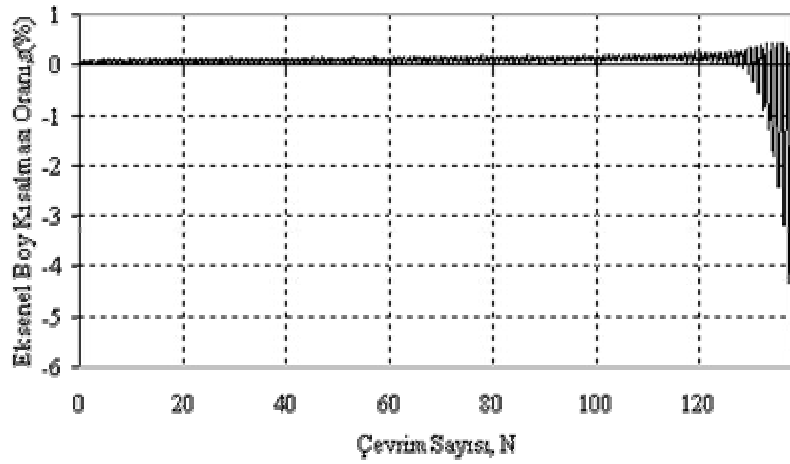
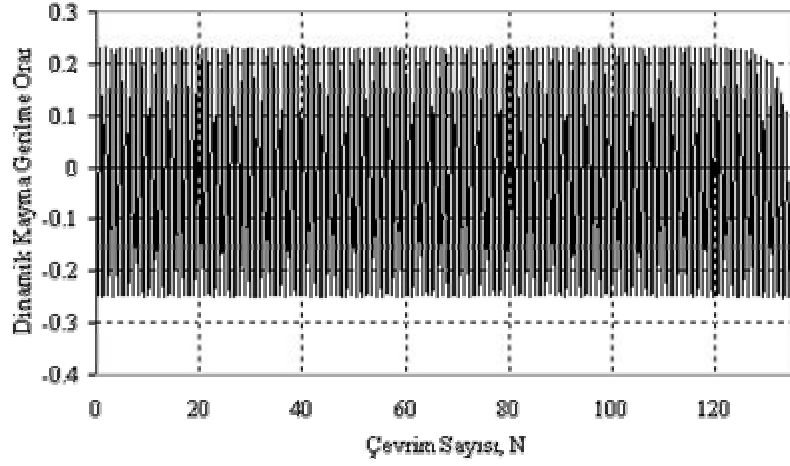
Sekil A-1 (88) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	89	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.969
Tarih	19.06.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.636
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	52
R(cm)	5	δ_k (gr/cm3)	1.56
H(cm)	10	Sr(%)	100
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



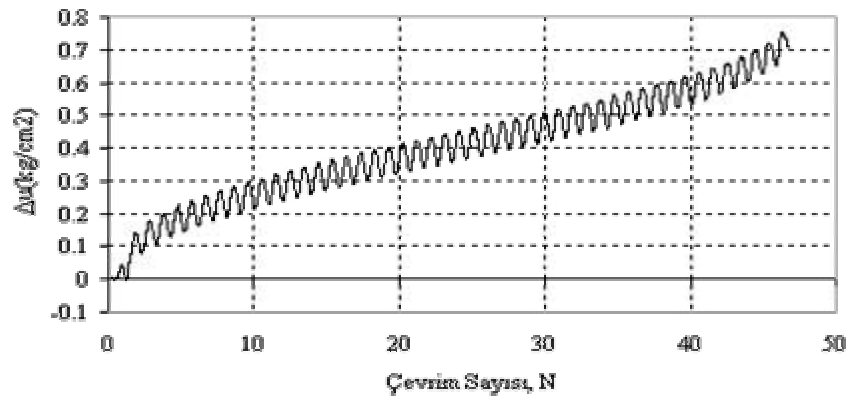
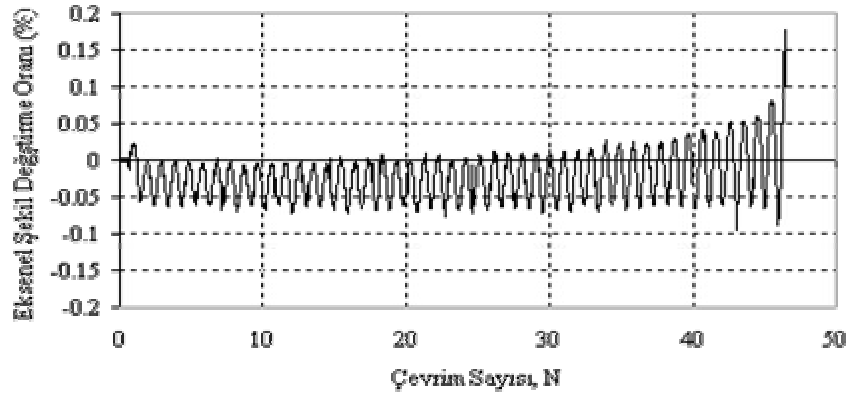
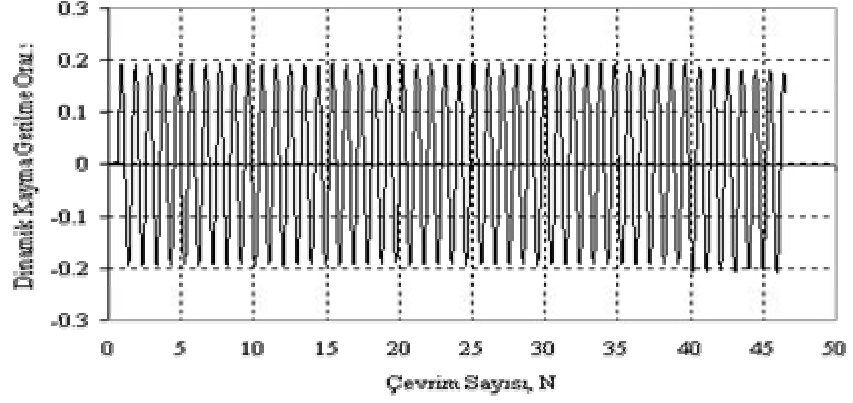
Sekil A-2 (89) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	64	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.922
Tarih	31.03.2005	Konsolidas.Son.A(cm ²)	19.710
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	52
R(cm)	5	dk(kg/cm ³)	1.56
H(cm)	10	Sr(%)	100
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



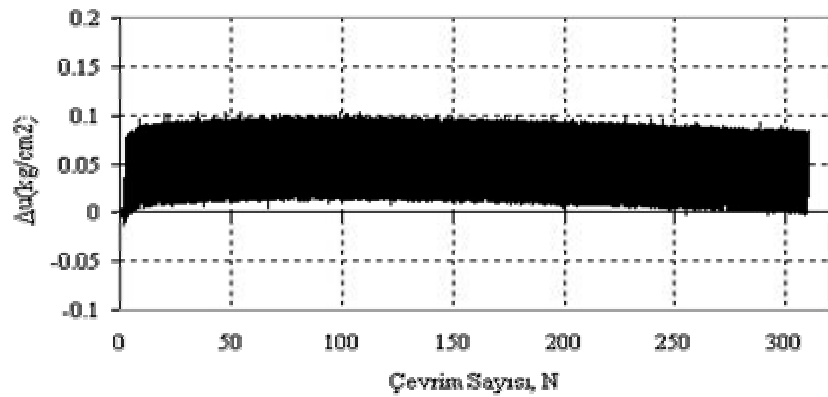
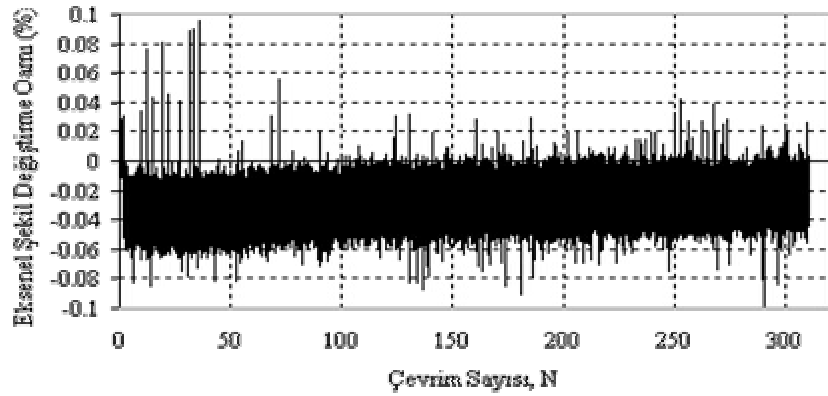
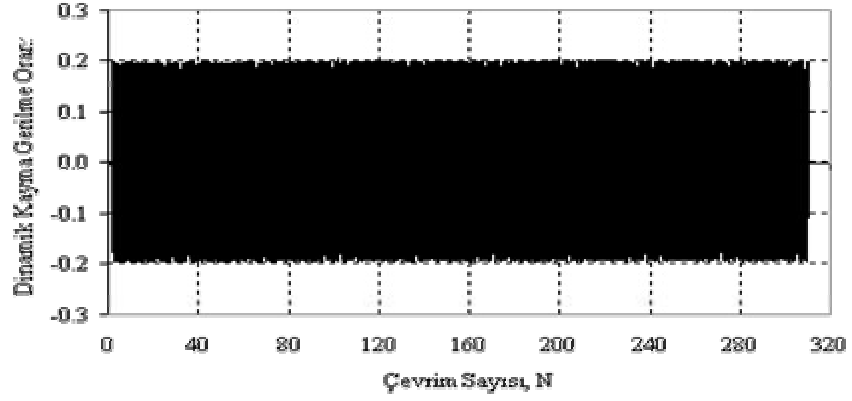
Sekil A-3 (64) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	1	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.996
Tarih	01.07.2004	Kons.Son.A(cm2)	19.589
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	52
R(cm)Baslangiç	4.99	δ_k (gr/cm3)	1.56
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



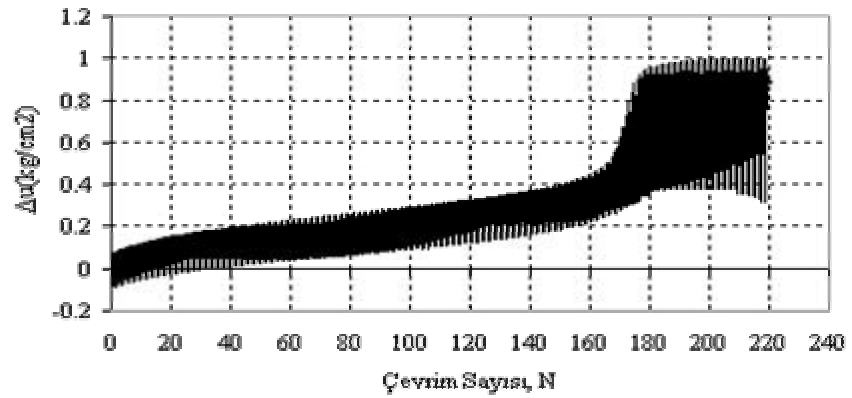
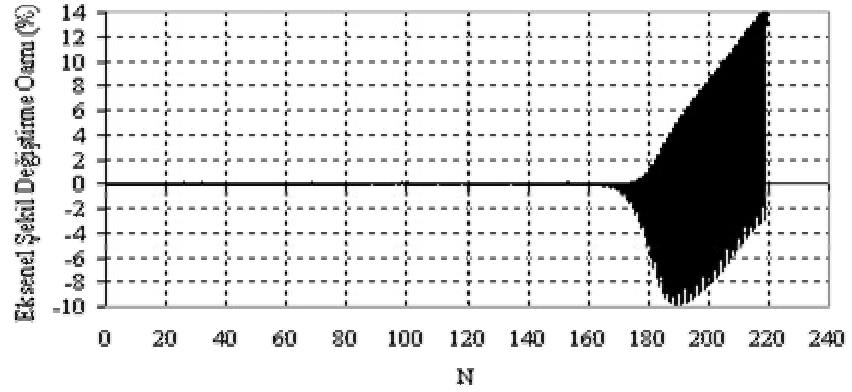
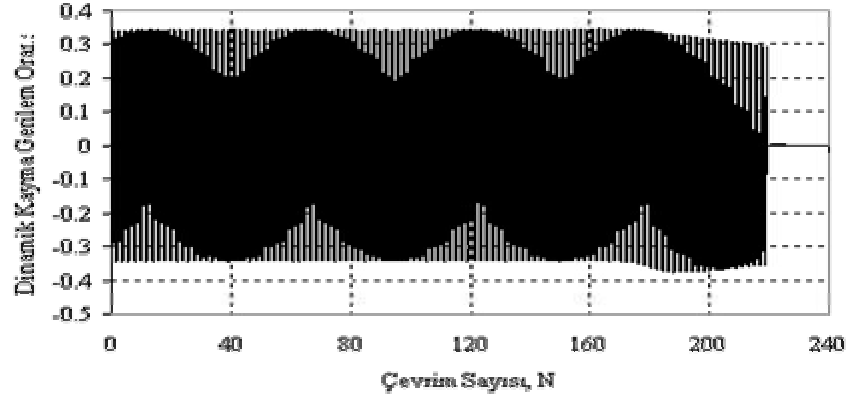
Sekil A-4 (1) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	5	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.998
Tarih	20.09.2004	Kons.Son.A(cm2)	19.629
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	50
R(cm)Baslangiç	4.98	δ_k (gr/cm3)	1.55
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



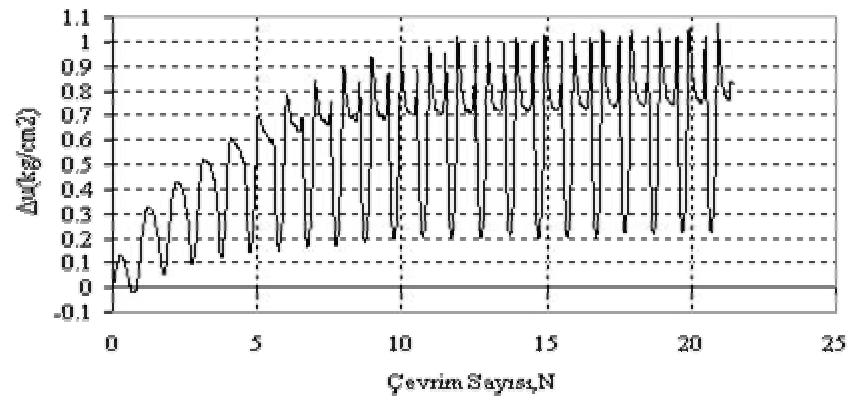
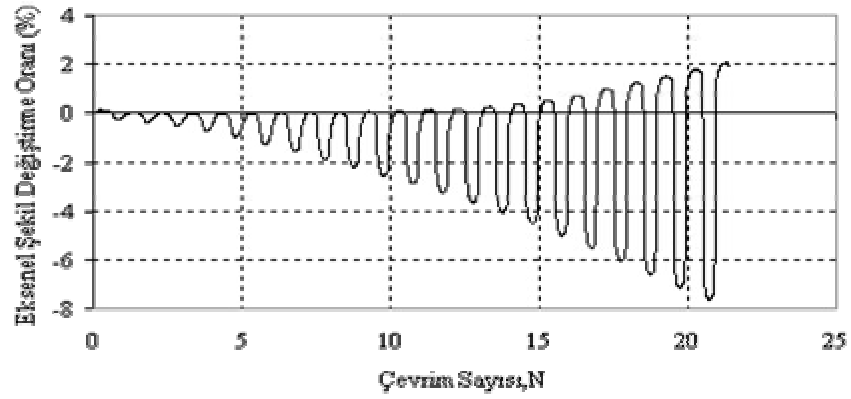
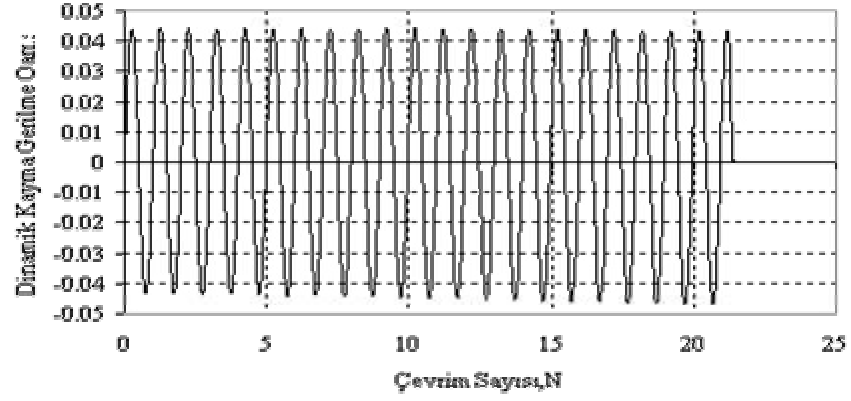
Sekil A-5 (5) numaralı dinamik üç eksenli deneyinin grafikleri

Deney No	9	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.998
Tarih	29.09.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.629
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	50
R(cm)Baslangiç	4.99	δ_r (gr/cm3)	1.56
H(cm) Baslangiç	10.1	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



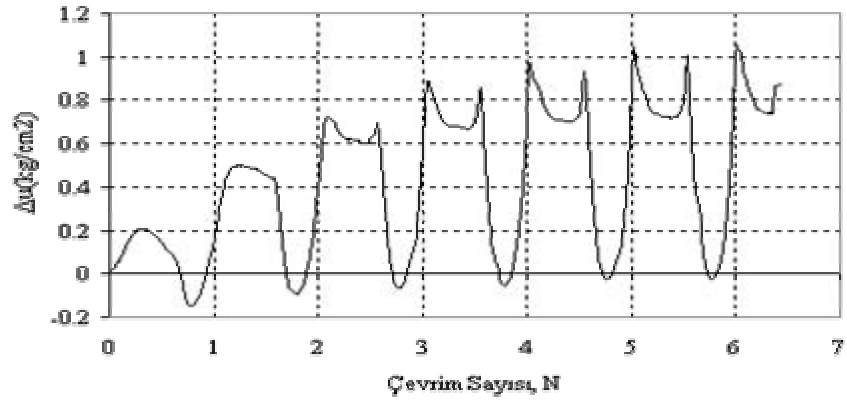
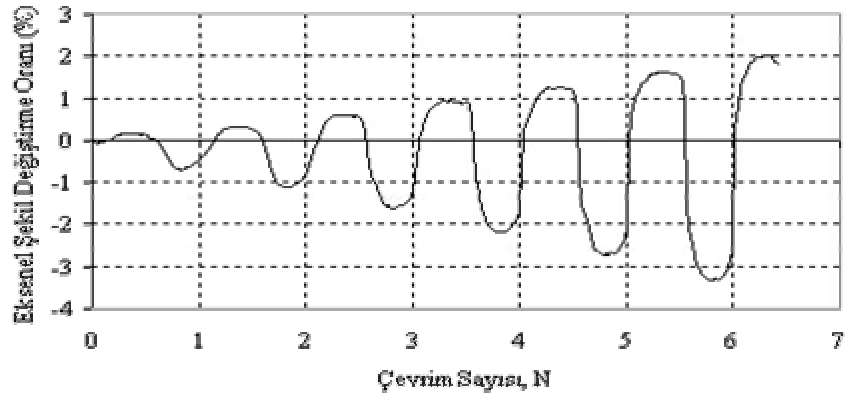
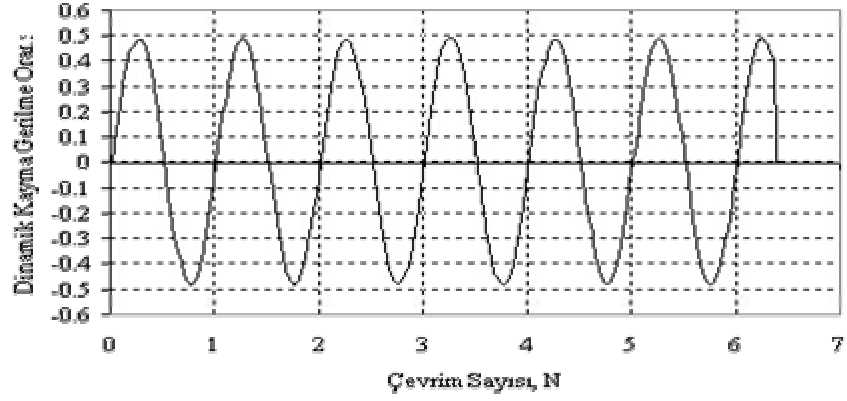
Sekil A-6 (9) numaralı dinamik üç eksenli deneyinin grafikleri

Deney No	10	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.991
Tarih	01.10.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.583
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	52
R(cm)Baslangıç	4.98	δ_s (gr/cm3)	1.56
H(cm) Baslangıç	10.1	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



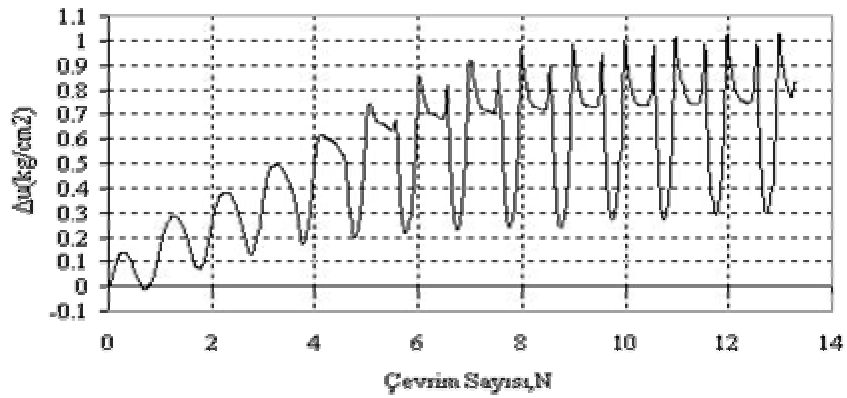
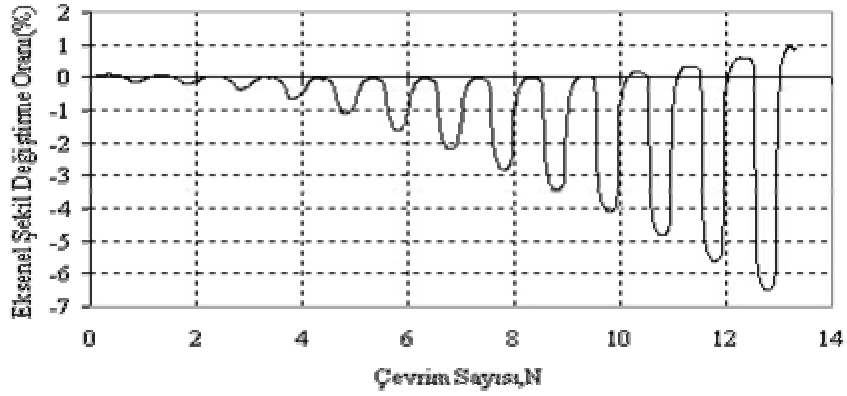
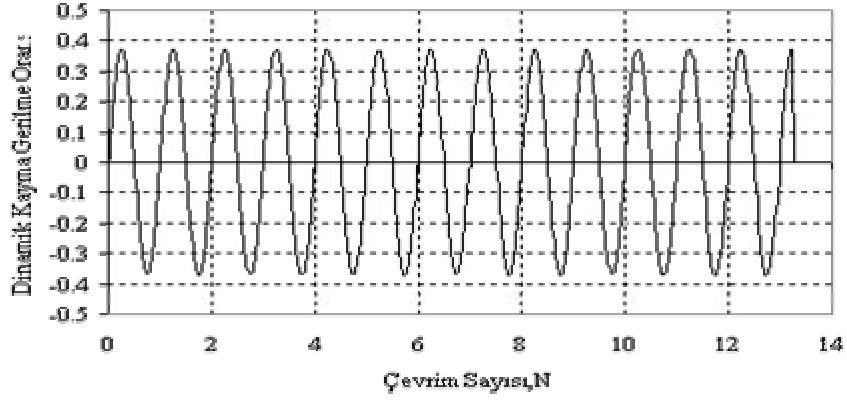
Şekil A-7 (10) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	11	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.991
Tarih	04.10.2005	Kons.Son.A(cm ²)	19.633
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	50
R(cm)Baslangıç	5	δ_s (gr/cm ³)	1.56
H(cm) Baslangıç	10	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



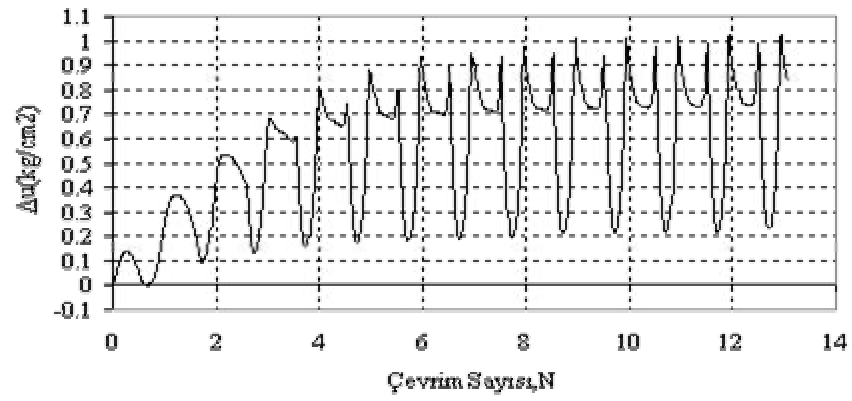
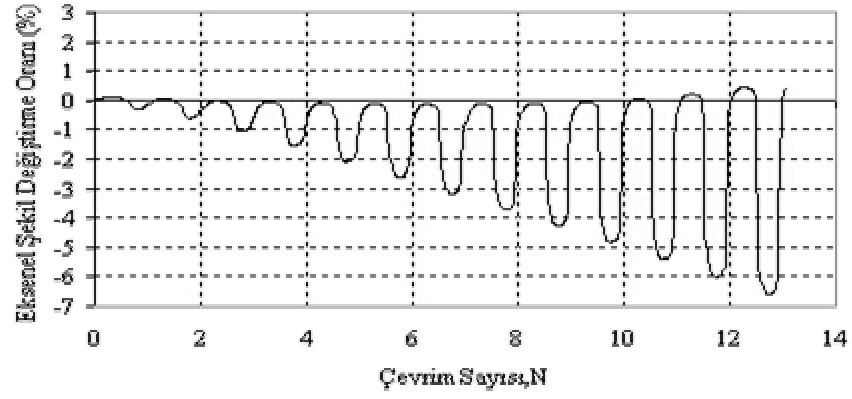
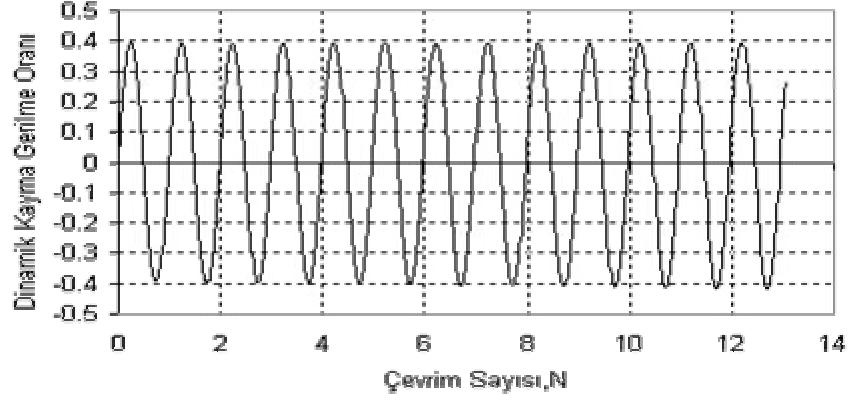
Sekil A-8 (11) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	12	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.986
Tarih	05.12.2004	Kons.Son.A(cm2)	19.652
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	50
R(cm) Baslangıç	5	δ_s (gr/cm3)	1.55
H(cm) Baslangıç	10	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



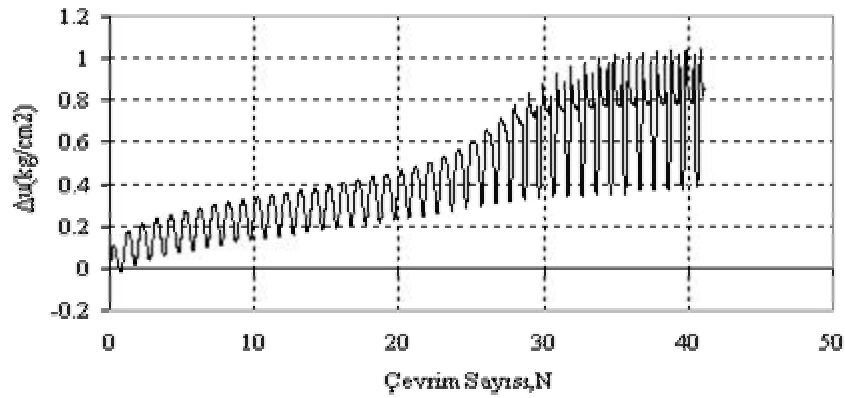
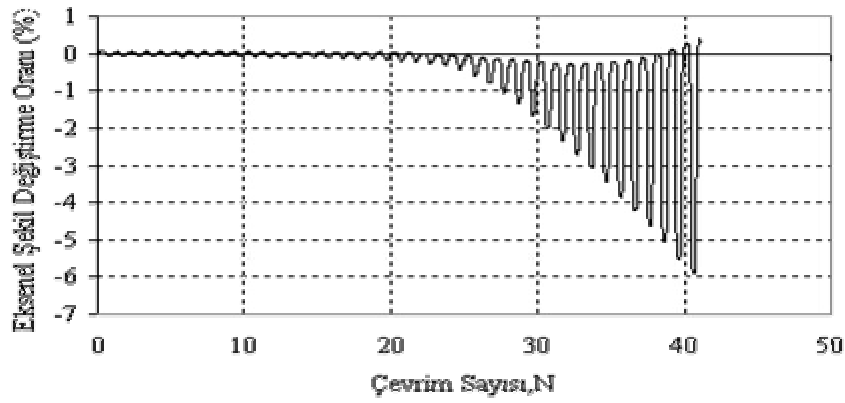
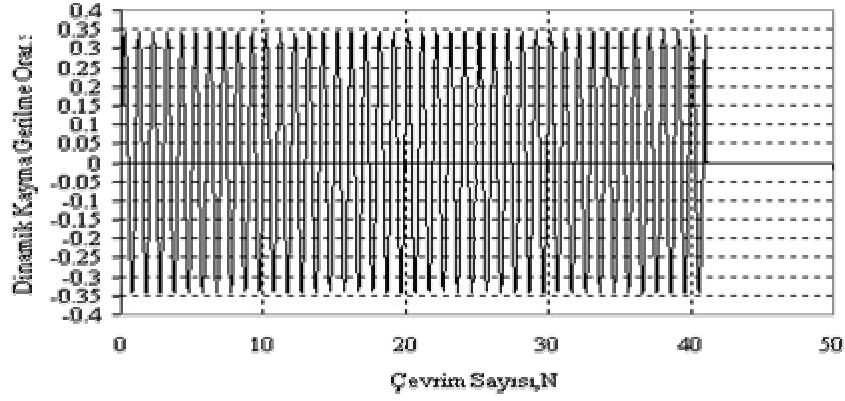
Sekil A-9 (12) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	14	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.995
Tarih	10.10.2004	Kons.Son.A(cm2)	19.660
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	49
R(cm)Baslangiç	4.99	δ_s (gr/cm3)	1.55
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



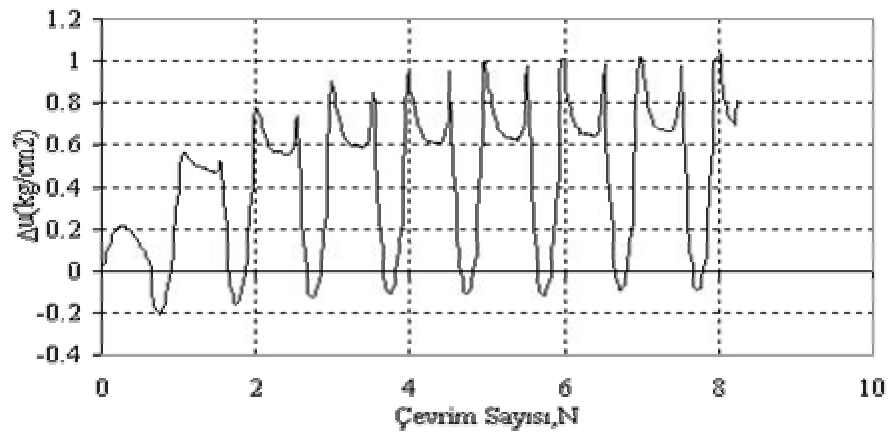
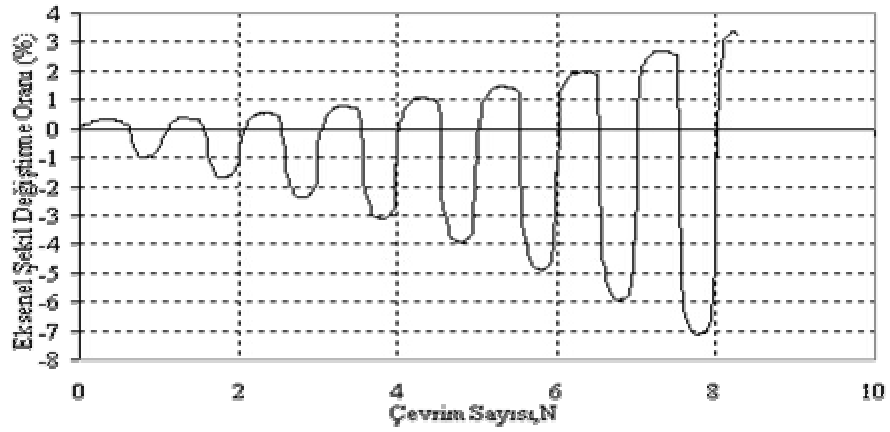
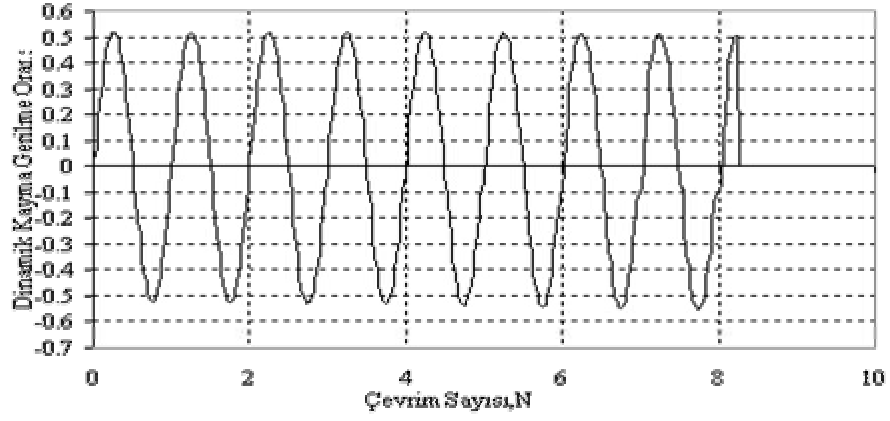
Sekil A-10 (14) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	16	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.991
Tarih	12.10.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.694
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	48
R(cm) Baslangiç	4.99	δ_s (gr/cm3)	1.55
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



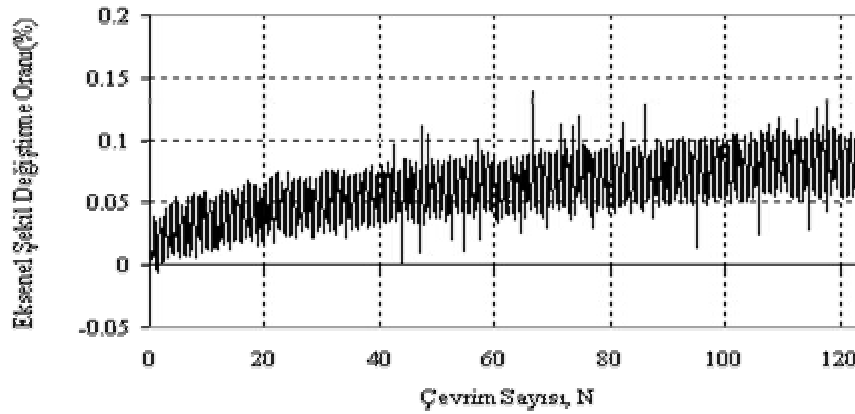
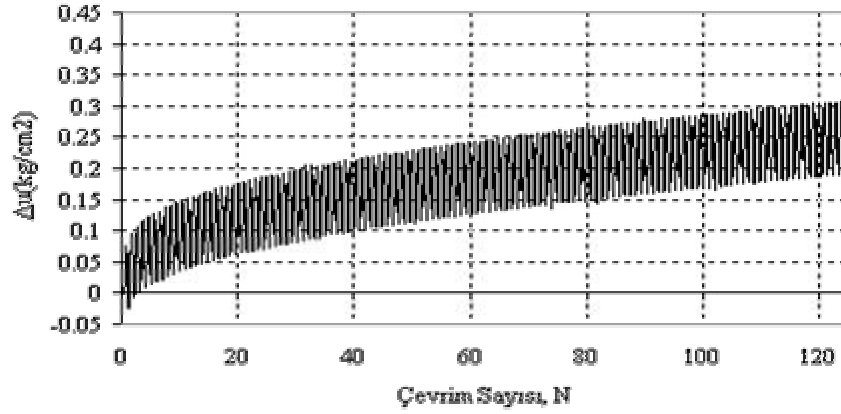
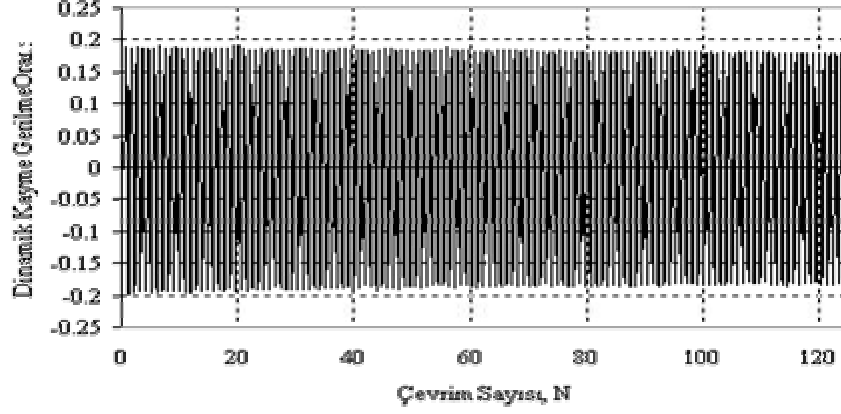
Sekil A-11 (16) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	27	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.912
Tarih	25.01.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.860
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	48
R(cm)Baslangiç	5	δ_c (gr/cm3)	1.55
H(cm) Baslangiç	10.05	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



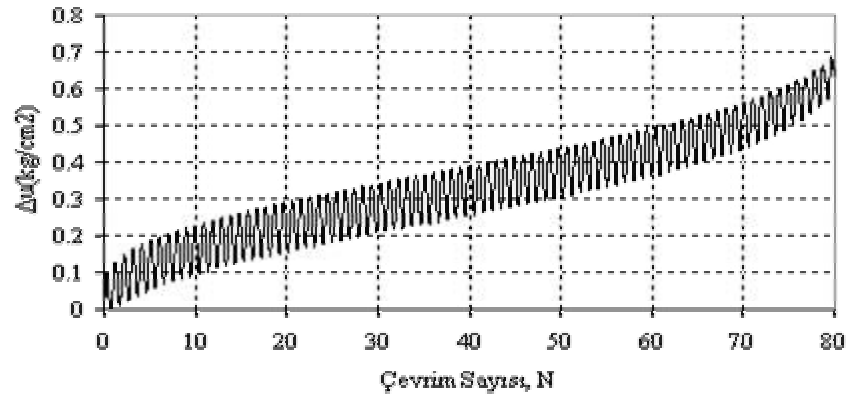
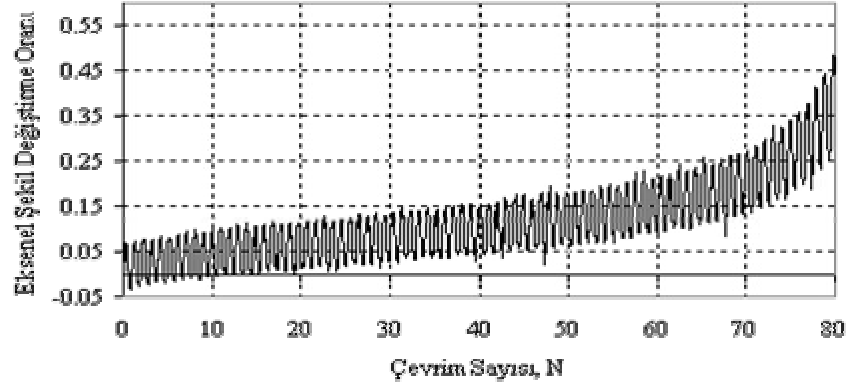
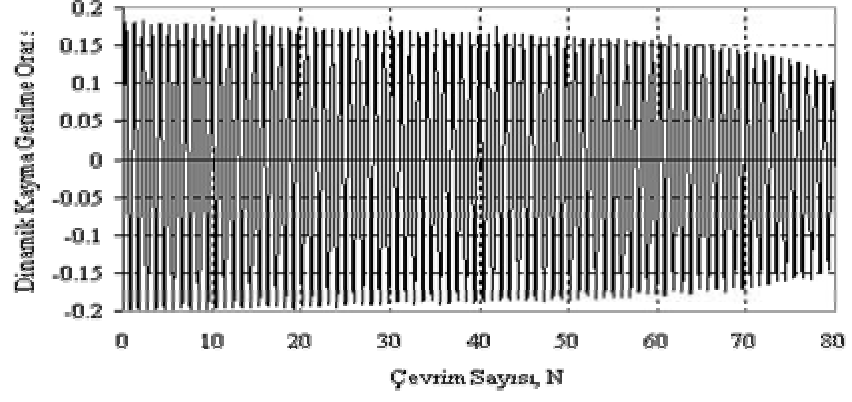
Sekil A-12 (27) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	2	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.992
Tarih	02.07.2005	Kons.Son.A(cm ²)	19.589
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	52
R(cm)Başlangıç	4.99	δ_s (gr/cm ³)	1.56
H(cm) Başlangıç	9.95	Sr(%)	99.5
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.53



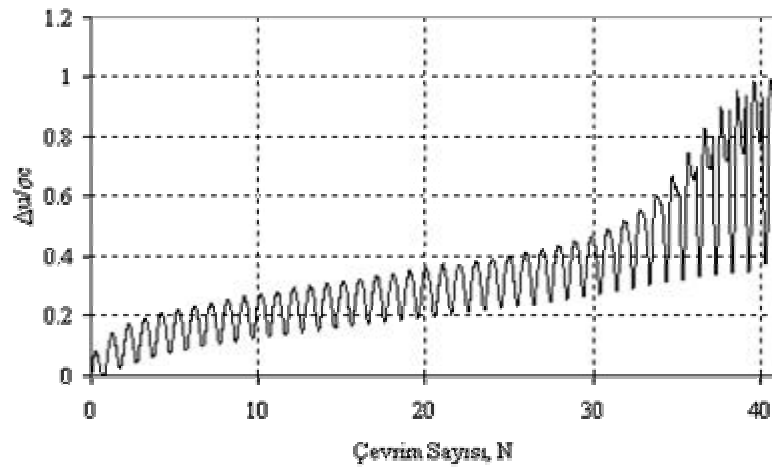
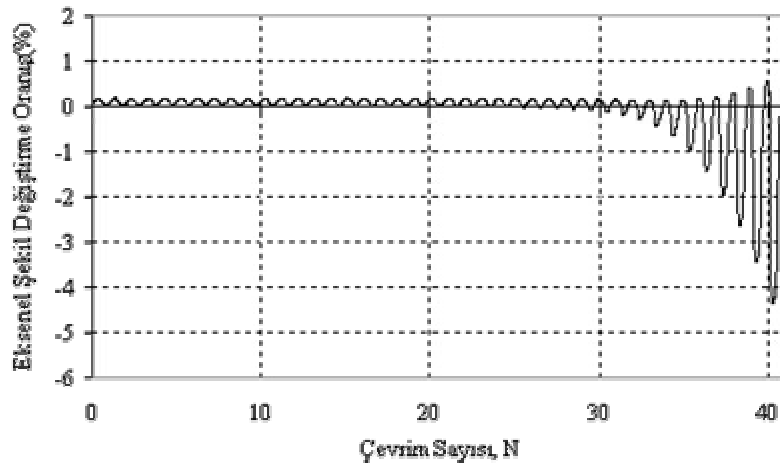
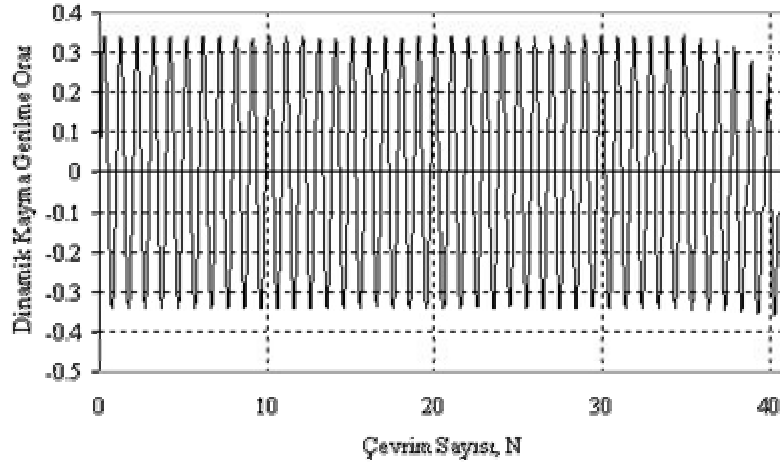
Sekil A-13 (2) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	3	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.98
Tarih	22.07.2004	Kons.Son.A(cm ²)	19.585
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	52
R(cm)Baslangiç	5	δ_s (gr/cm ³)	1.56
H(cm) Baslangiç	9.95	Sr(%)	99.9
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.88



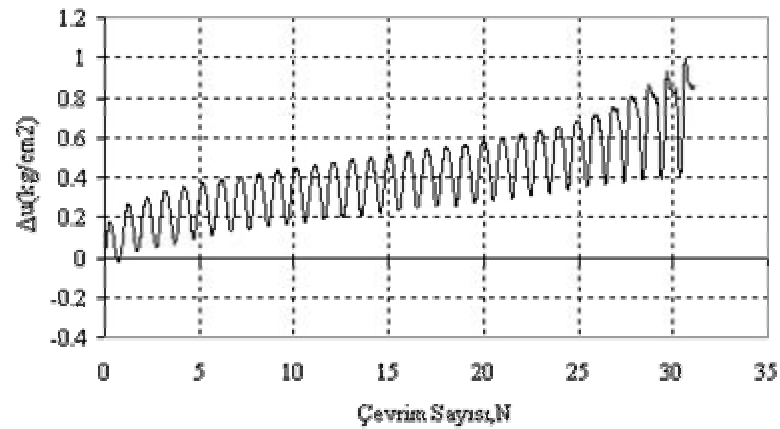
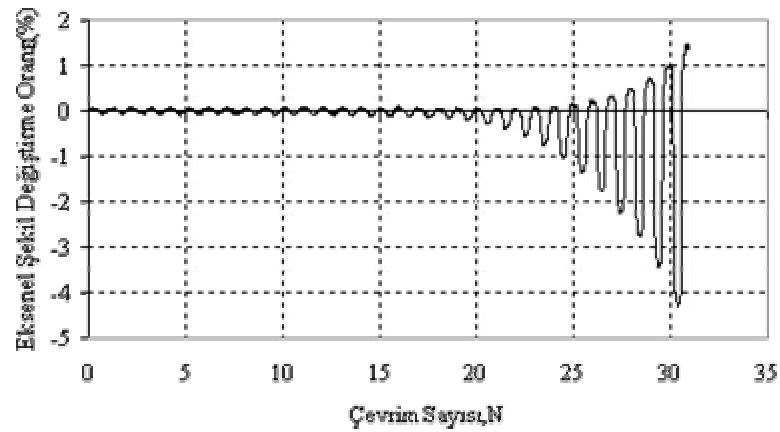
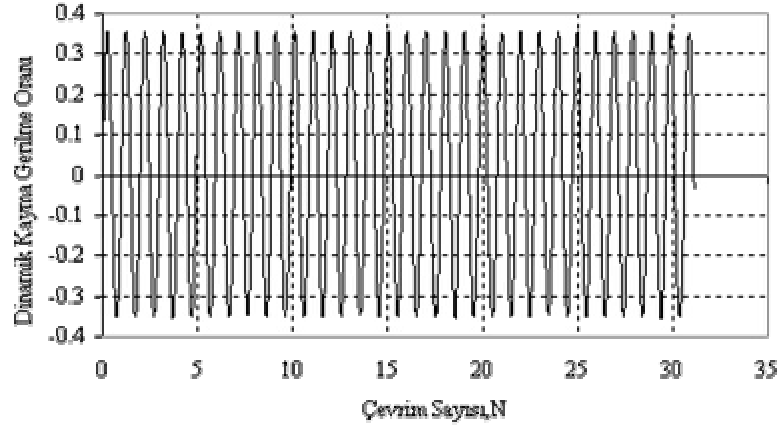
Şekil A-14 (3) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	53	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.922
Tarih	15.03.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.841
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	48
R(cm)	5	δ_k (gr/cm3)	1.55
H(cm)	10	Sr(%)	99.3
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.36



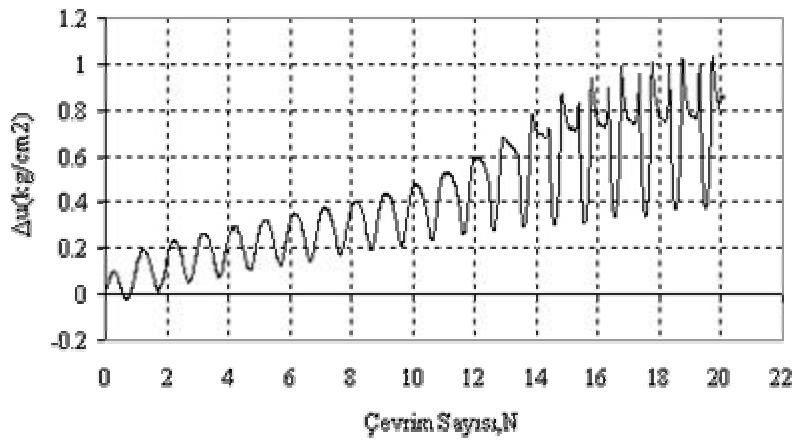
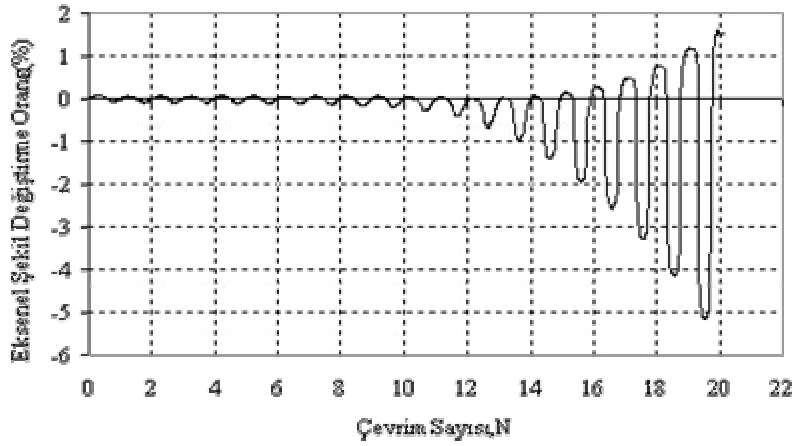
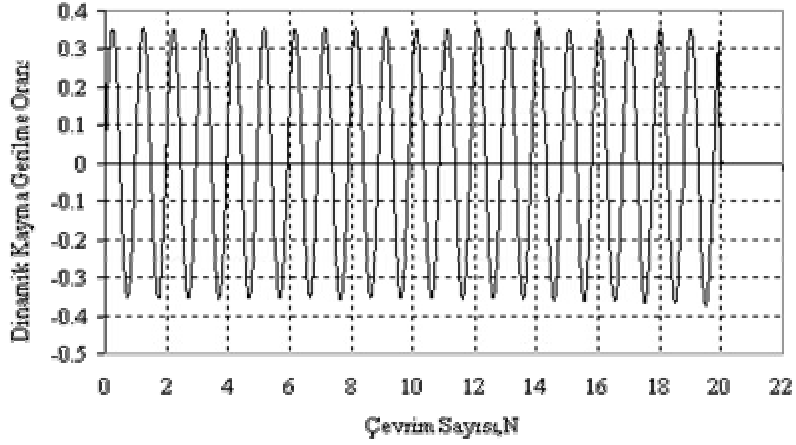
Sekil A-15 (53) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	90	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.965
Tarih	20.06.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.674
M(gr)	305.12	Kons.Sonrasi Dr(%)	51
R(cm)	5	δ_s (gr/cm3)	1.56
H(cm)	10	Sr(%)	99.7
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.70



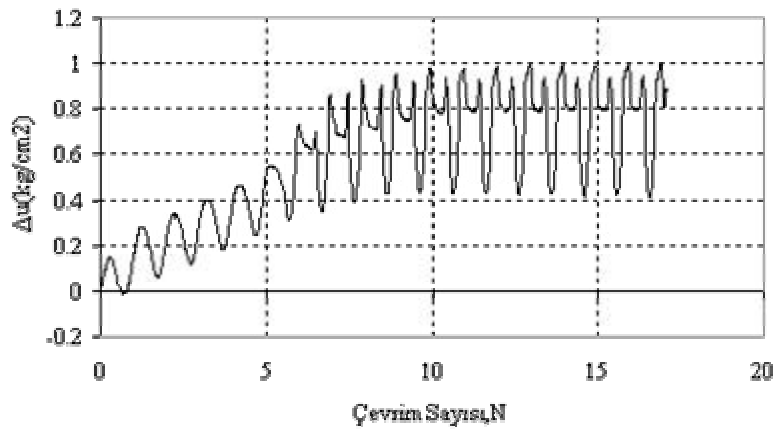
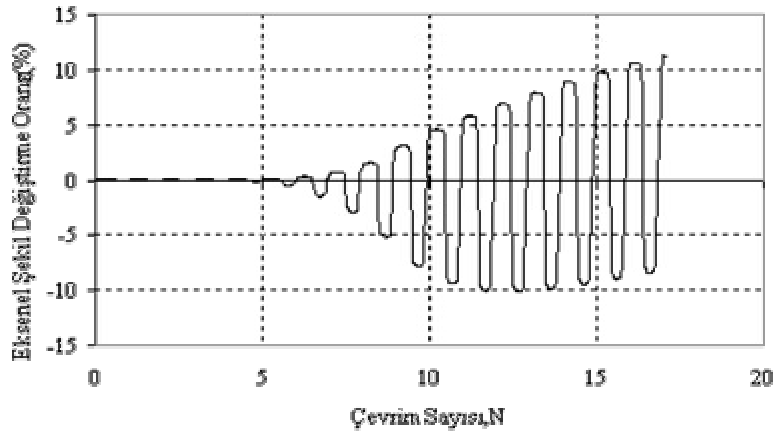
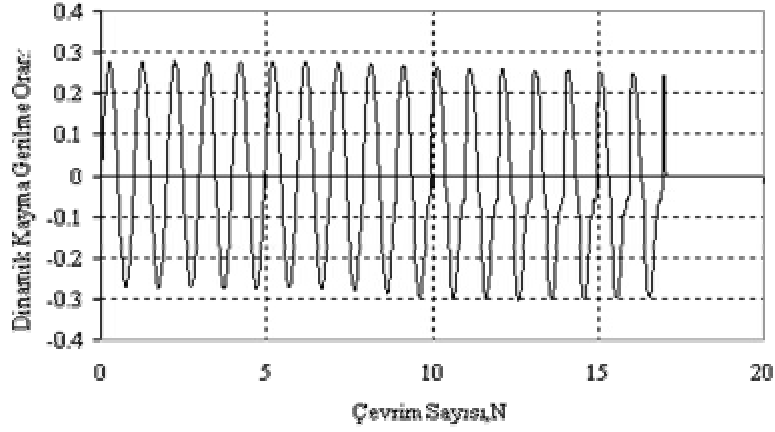
Sekil A-16 (90)numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	91	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.969
Tarih	21.06.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.586
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	53
R(cm)	5	δ_r (gr/cm3)	1.56
H(cm)	10	Sr(%)	99.8
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.75



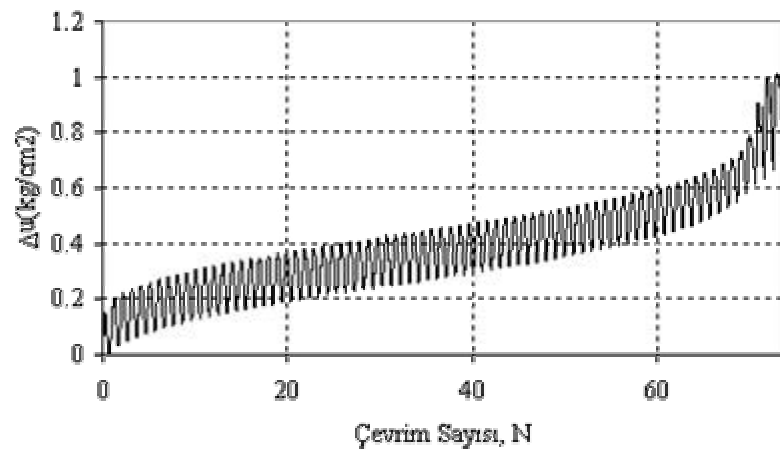
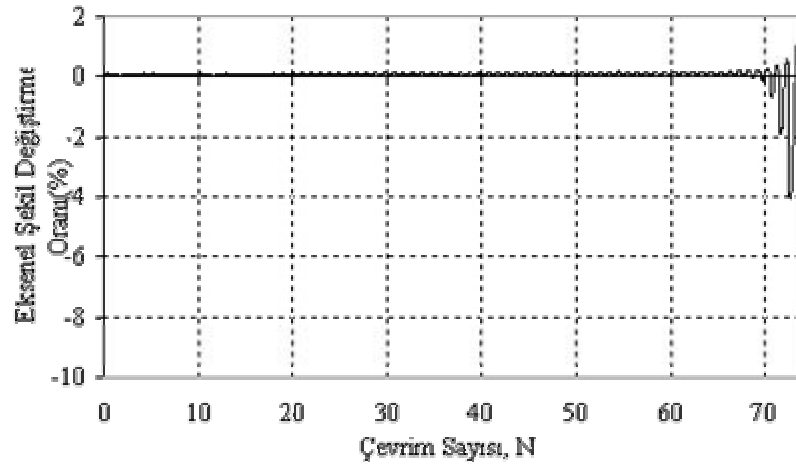
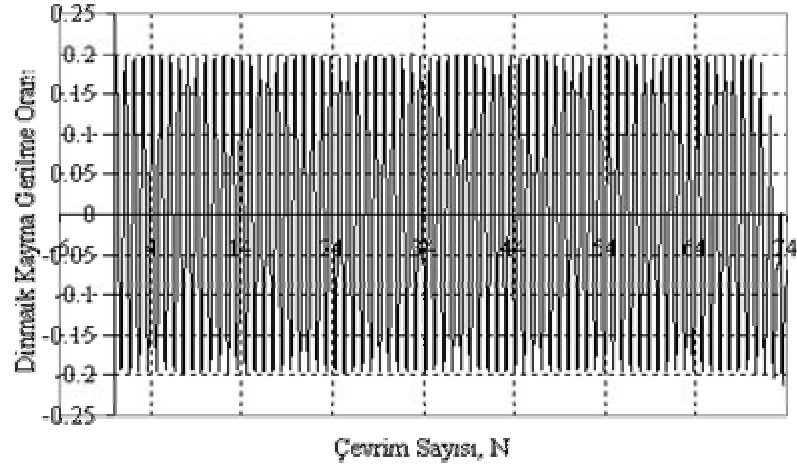
Sekil A-17 (91) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	92	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.961
Tarih	21.06.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.652
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	32
R(cm)	5	δ_r (gr/cm3)	1.51
H(cm)	10	Sr(%)	100
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



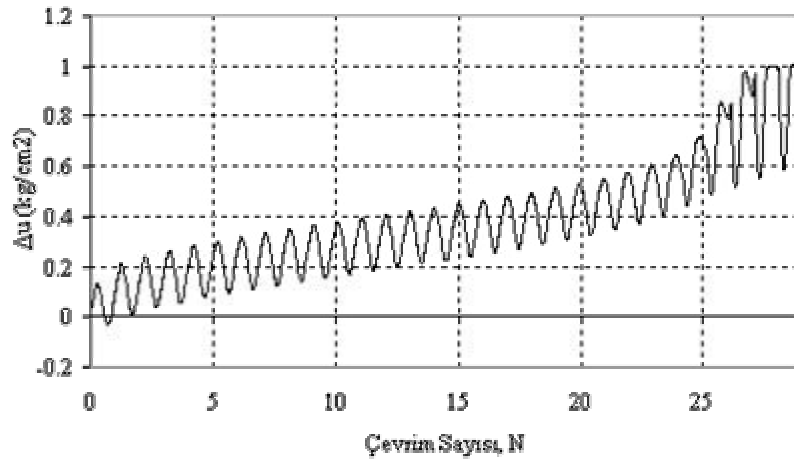
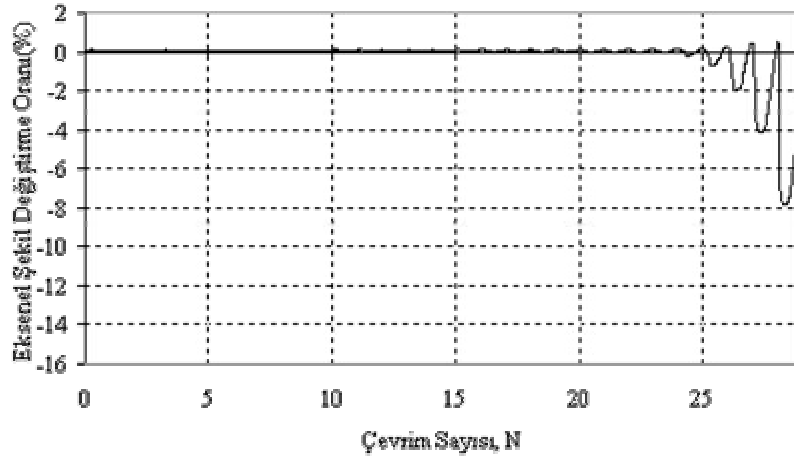
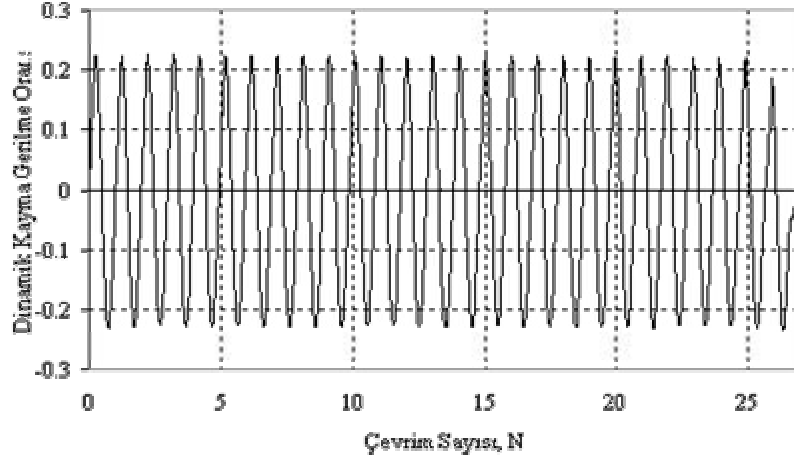
Sekil A-18 (92) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	69	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.917
Tarih	09.04.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.718
M(gr)	295.96	Kons.Sonrasi Dr(%)	32
R(cm)	5	δ_k	1.51
H(cm)	10	Sr(%)	85
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



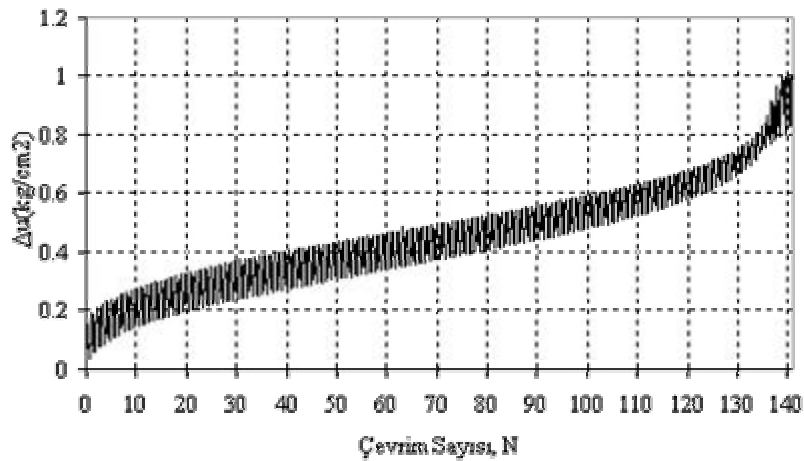
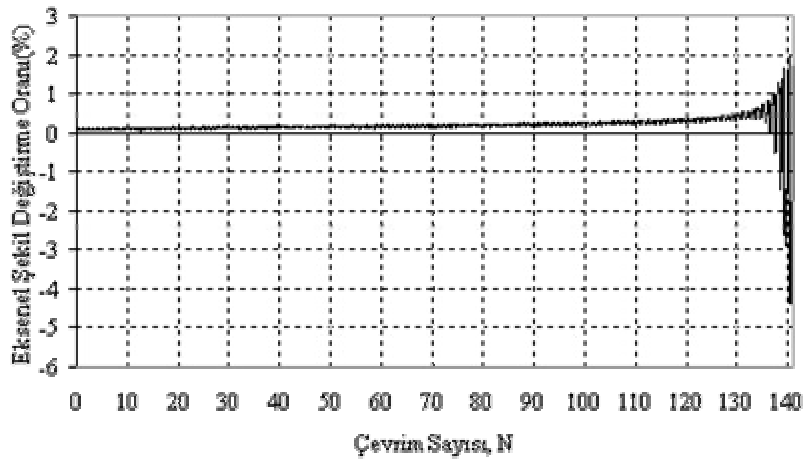
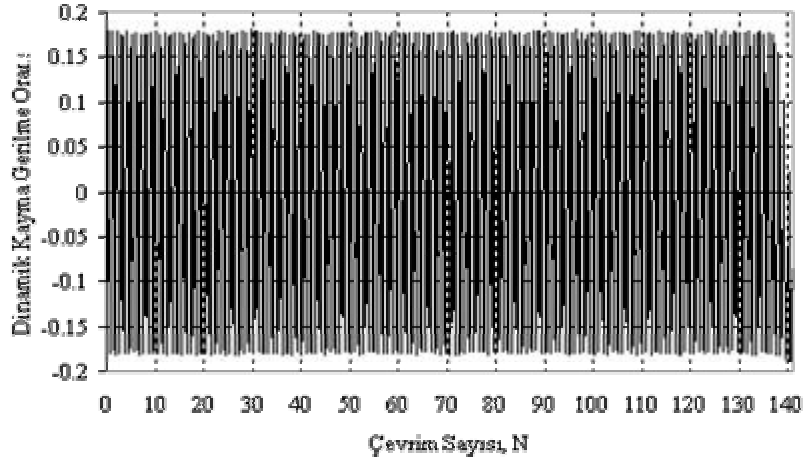
Sekil A-19 (69) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	70	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.917
Tarih	11.04.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.695
M(gr)	295.96	Kons.Sonrasi Dr(%)	33
R(cm)	5.04	δ_k (gr/cm3)	1.52
H(cm)	10	Sr(%)	87
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



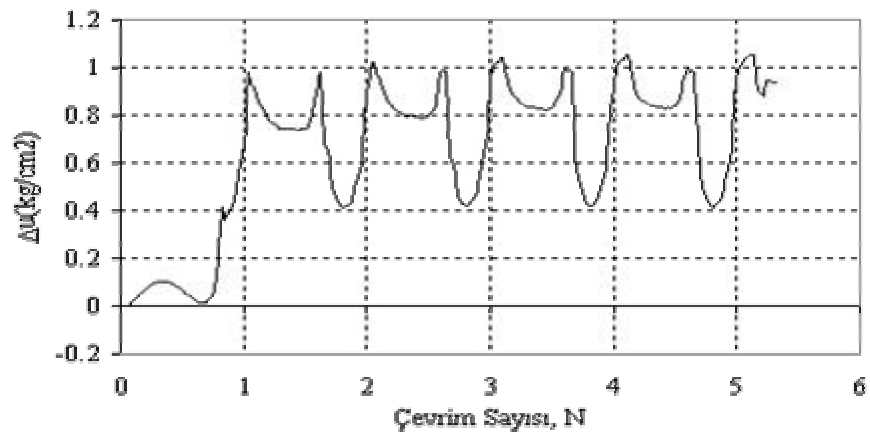
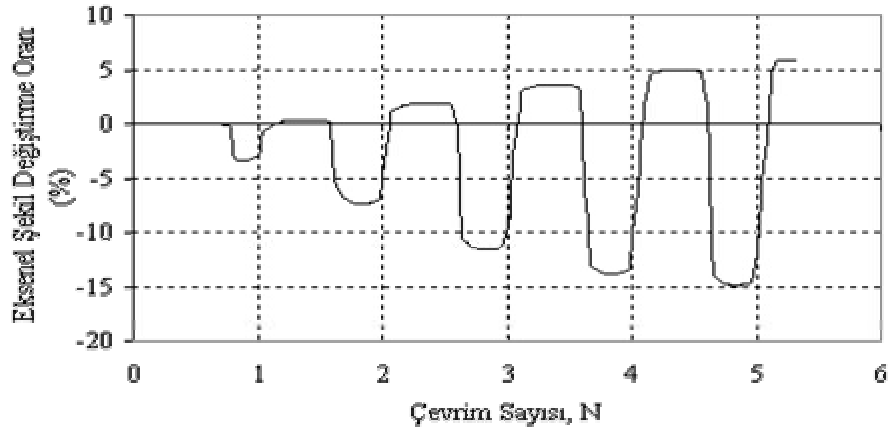
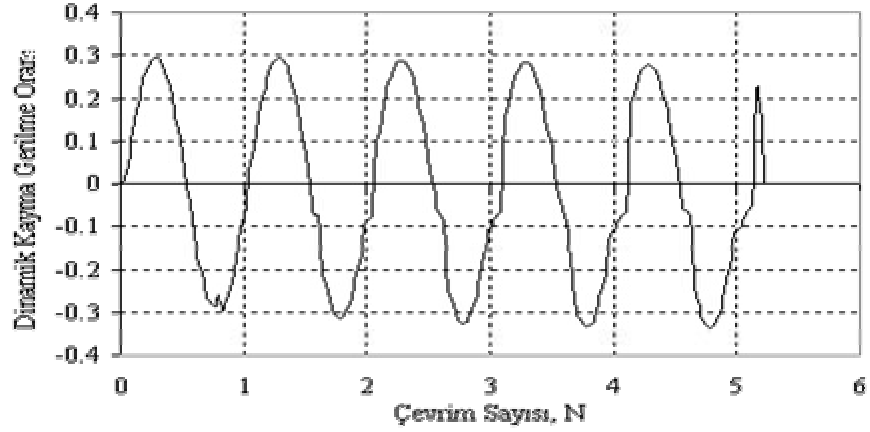
Sekil A-20 (70) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	73	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.922
Tarih	20.04.2005	Konsolidas.Son.A(cm2)	19.710
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	32
R(cm)	5	δ_s (gr/cm3)	1.51
H(cm)	10	Sr(%)	81
σ_c (kg/cm ²)	1	B	1.00



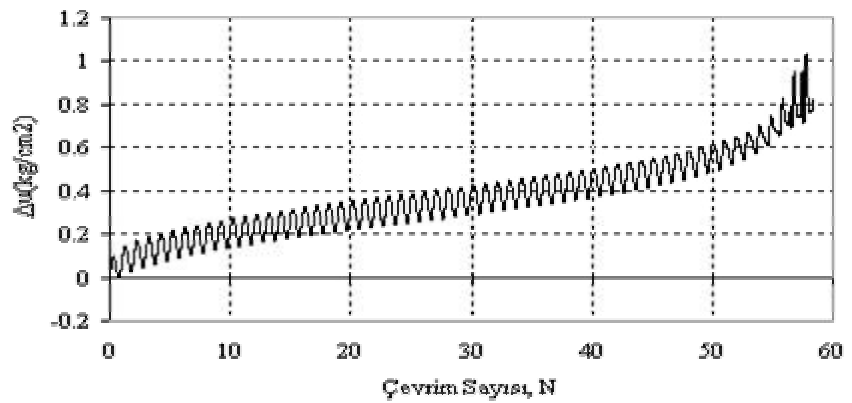
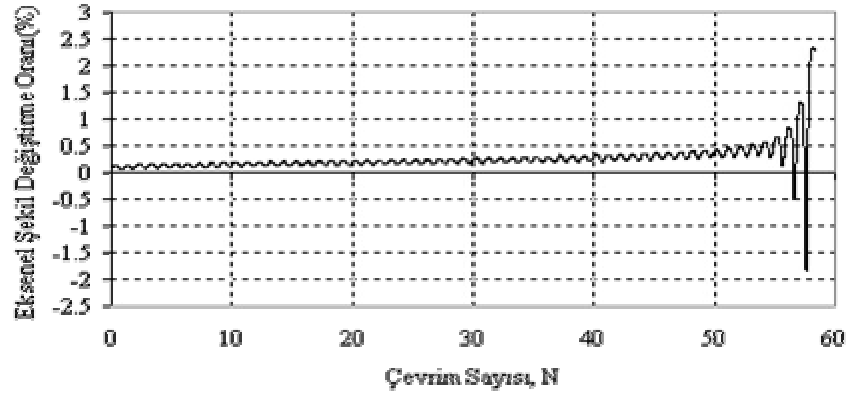
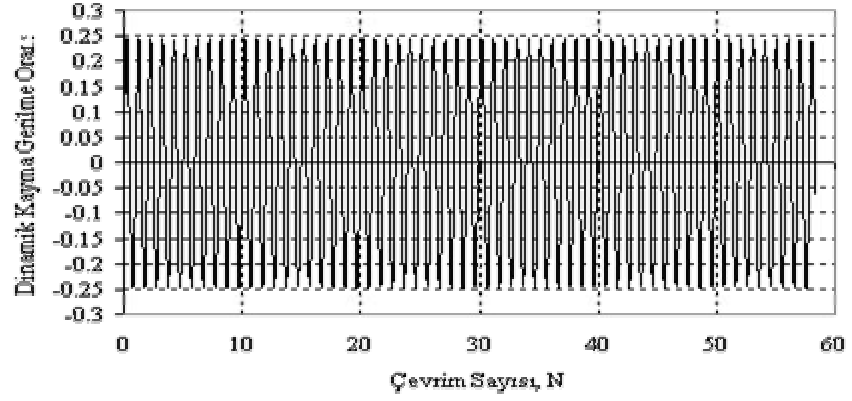
Sekil A-21 (73) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	25	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.936
Tarih	27.10.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.672
M(gr)	295.93	Kons.Sonrasi Dr(%)	33
R(cm)Baslangiç	4.99	δ_k (gr/cm3)	1.51
H(cm) Baslangiç	9.95	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.50



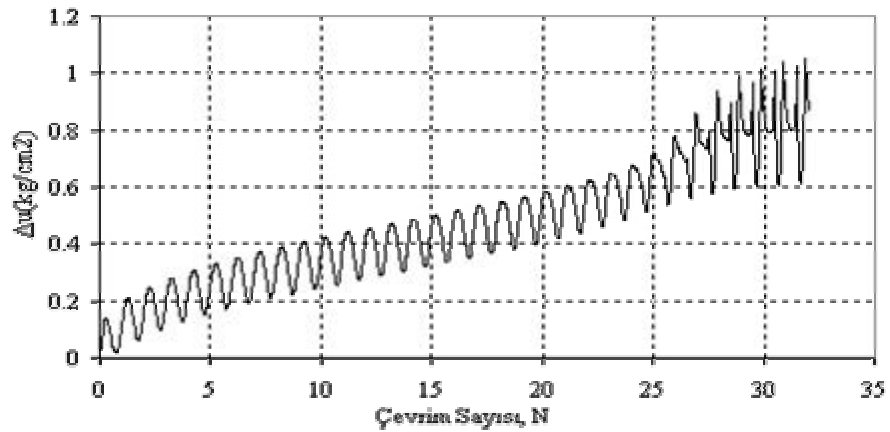
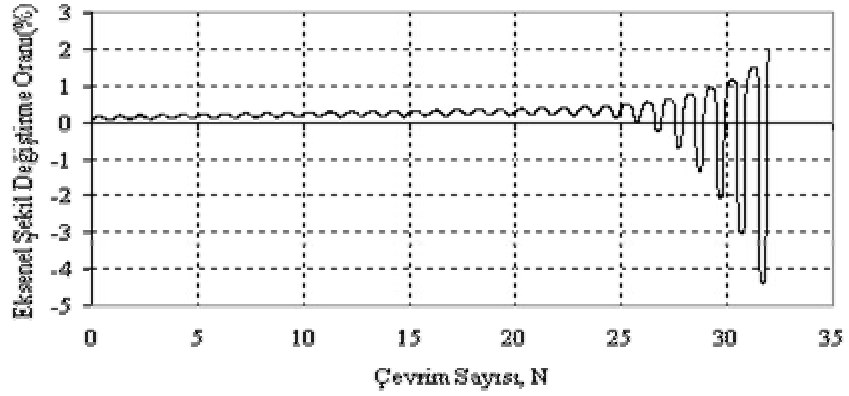
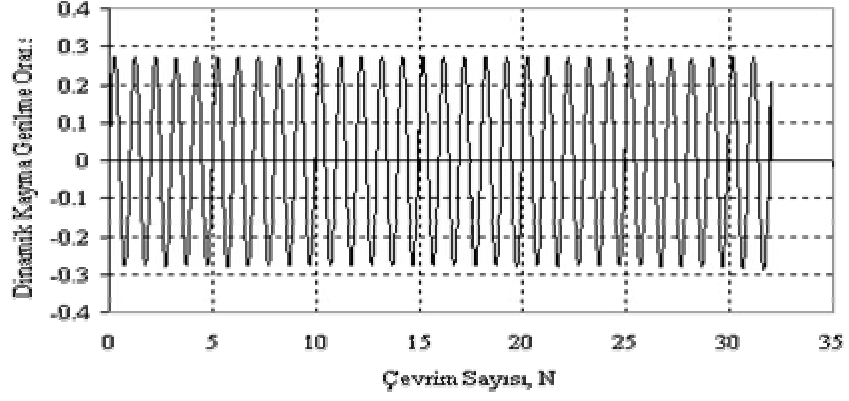
Sekil A-22 (25) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	29	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.956
Tarih	28.01.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.652
M(gr)	295.93	Kons.Sonrasi Dr(%)	32
R(cm)Baslangiç	5	δ_k (gr/cm3)	1.51
H(cm) Baslangiç	9.97	Sr(%)	81
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.50



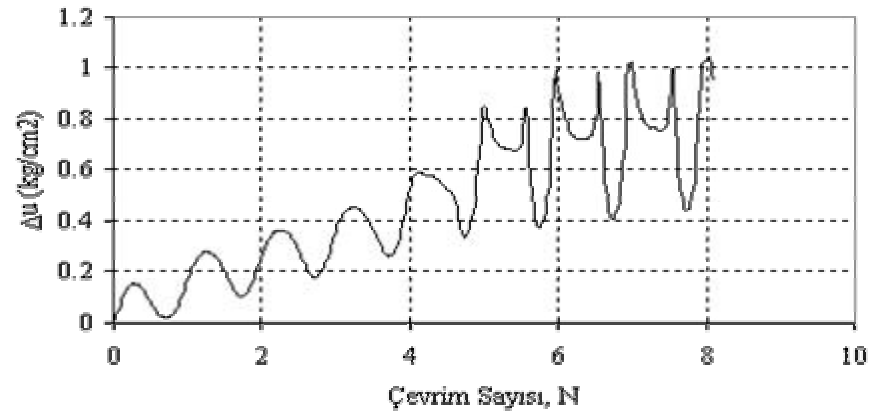
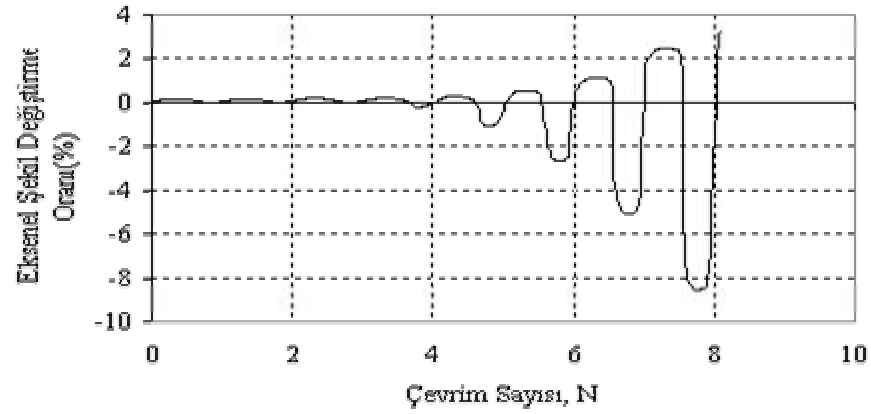
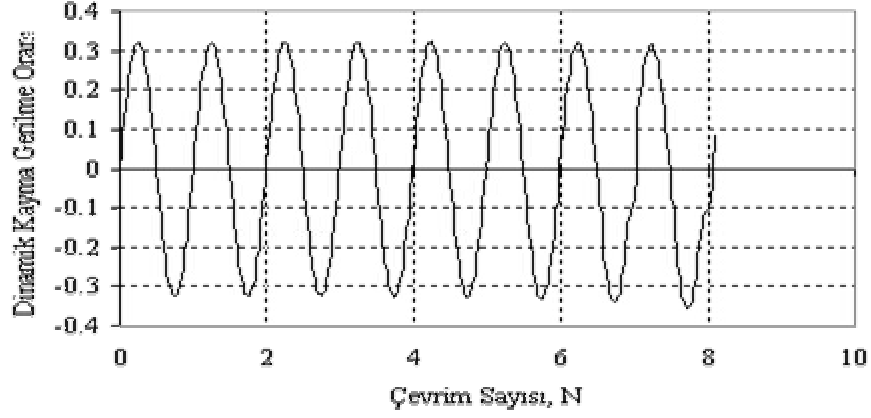
Sekil A-23 (29) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	30	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.982
Tarih	01.02.2005	Kons.Son.A(cm ²)	19.701
M(gr)	295.96	Kons.Sonrasi Dr(%)	29
R(cm)Baslangiç	5	δ_s (gr/cm ³)	1.50
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	81
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.50



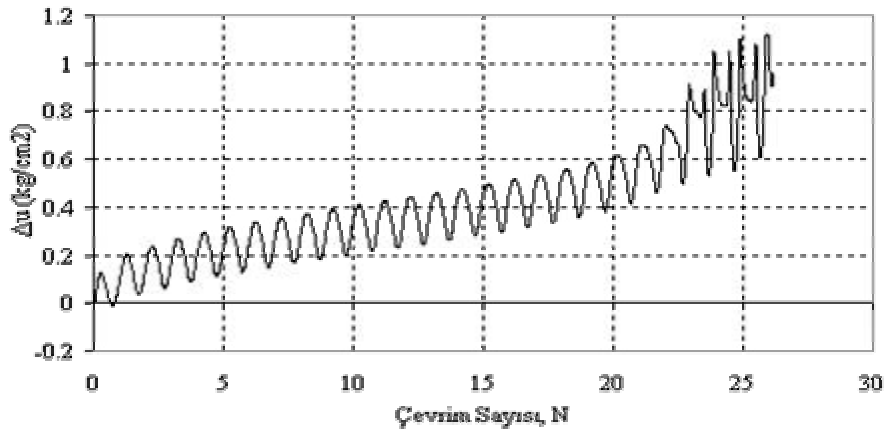
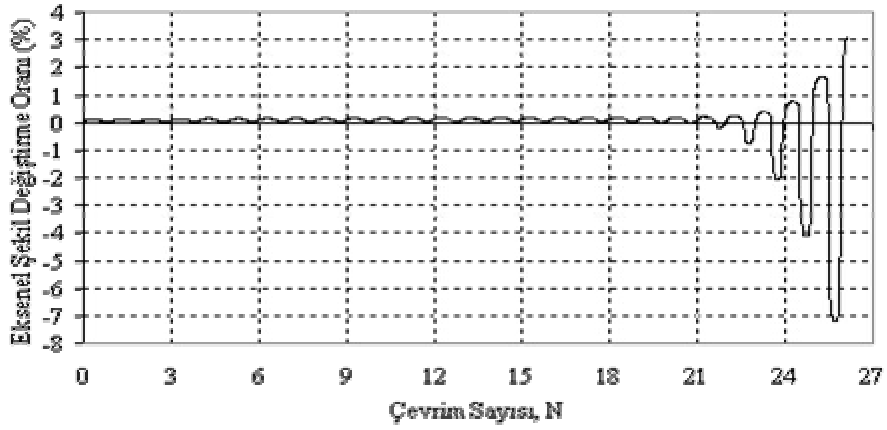
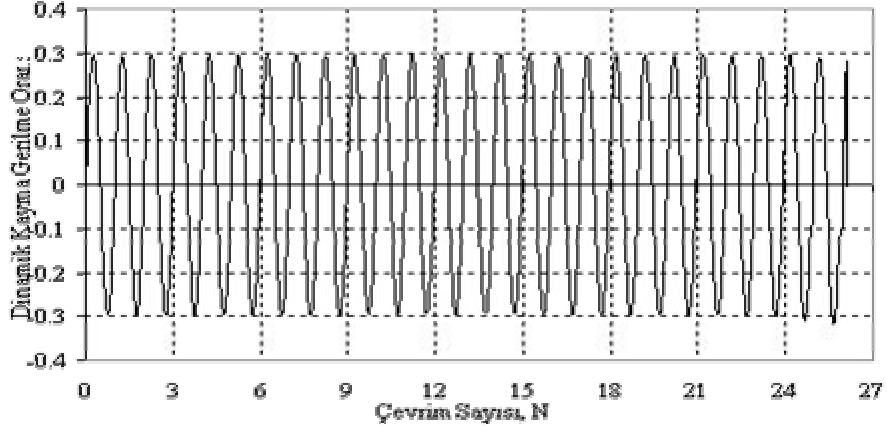
Sekil A-24 (30) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	31	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.986
Tarih	01.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.702
M(gr)	295.96	Kons.Sonrasi Dr(%)	28
R(cm)Baslangiç	4.99	δ_k (gr/cm3)	1.50
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	84
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.50



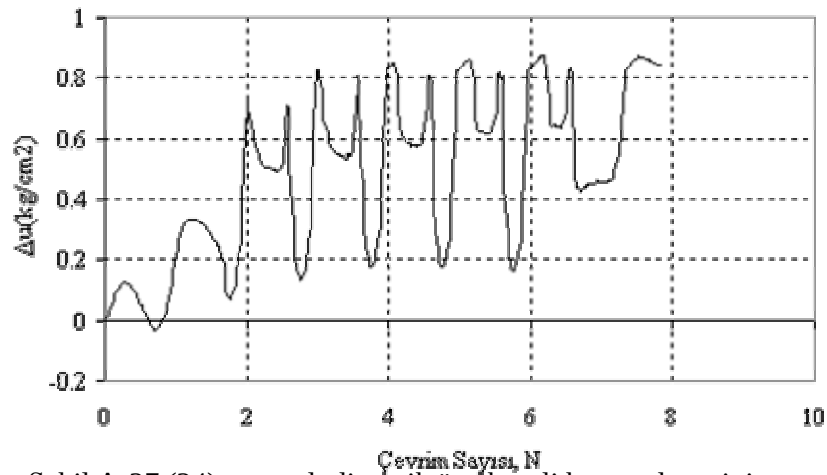
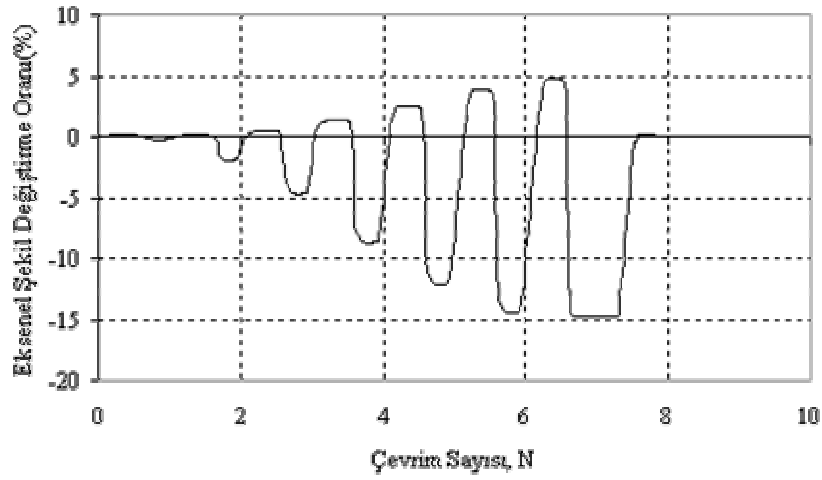
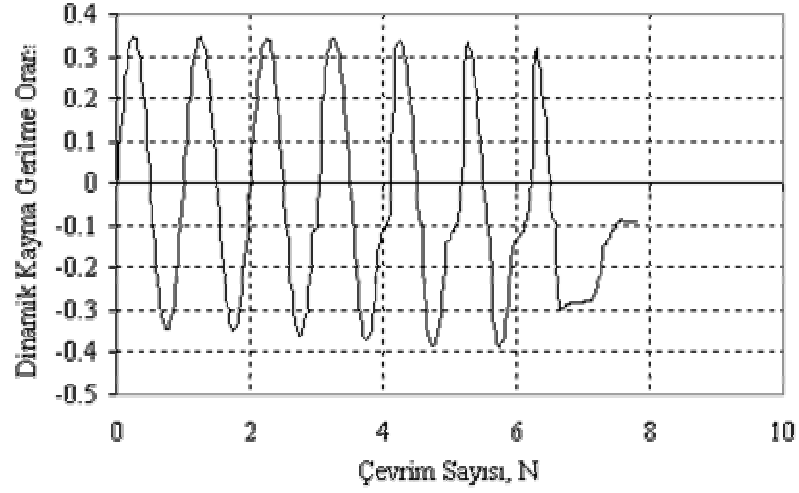
Sekil A-25 (31) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	32	Konsolidasyon sonrasi H(cm)	9.986
Tarih	03.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	19.682
M(gr)	295.96	Kons.Sonrasi Dr(%)	30
R(cm)Baslangiç	5	δ_s (gr/cm3)	1.51
H(cm) Baslangiç	10	Sr(%)	81
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.50



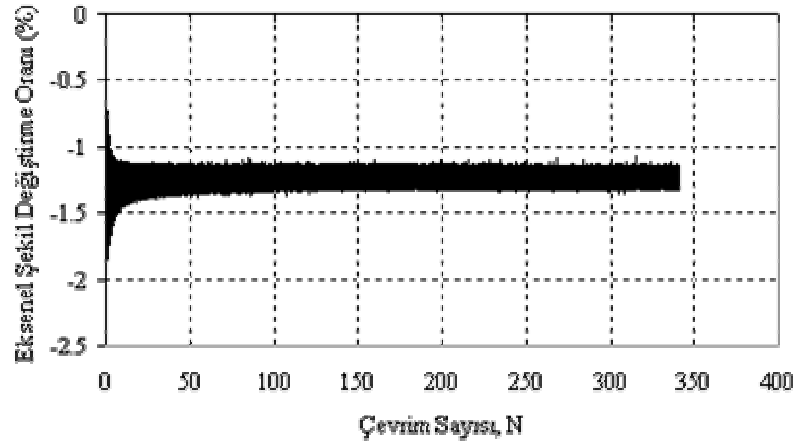
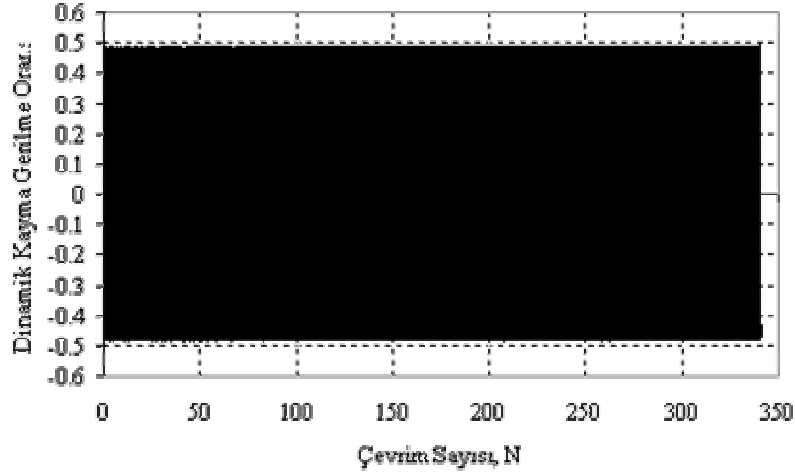
Sekil A-26 (32)numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	24	Konsolidasyon sonrası H(cm)	9.986
Tarih	25.10.2004	Kons.Son.A(cm2)	19.622
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	31
R(cm) Başlangıç	5.01	δ_k (gr/cm3)	1.51
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	99.7
σ_c (kg/cm ²)	1	B	0.63



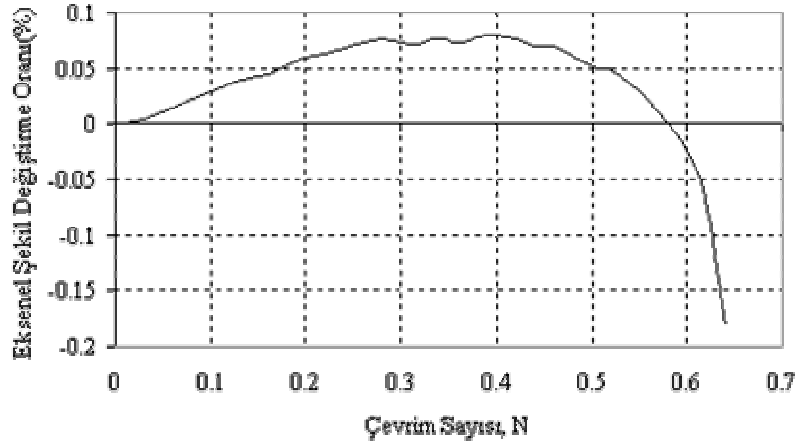
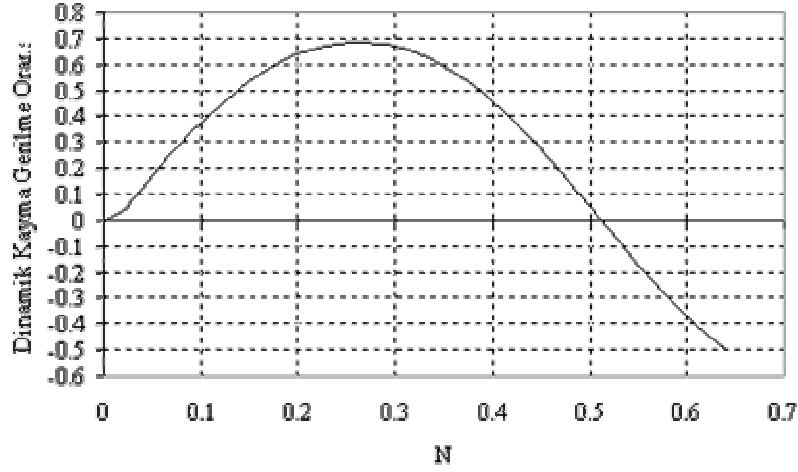
Şekil A-27 (24) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	17	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	12.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	56
R(cm) Başlangıç	4.98	δ_k (gr/cm ³)	1.57
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



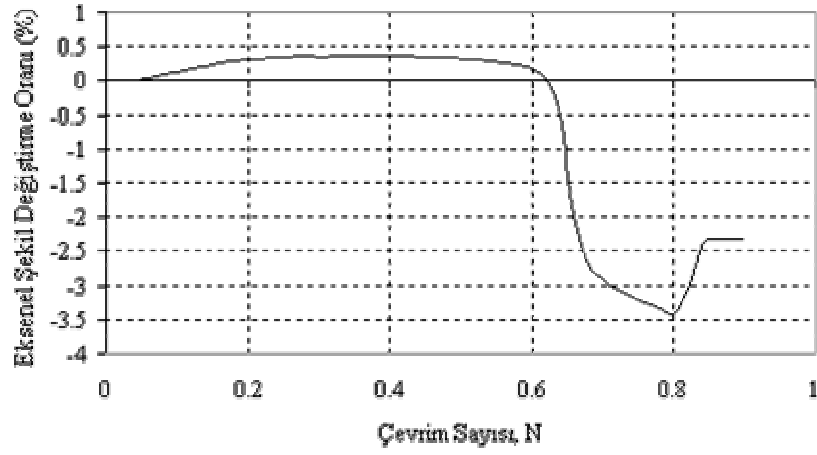
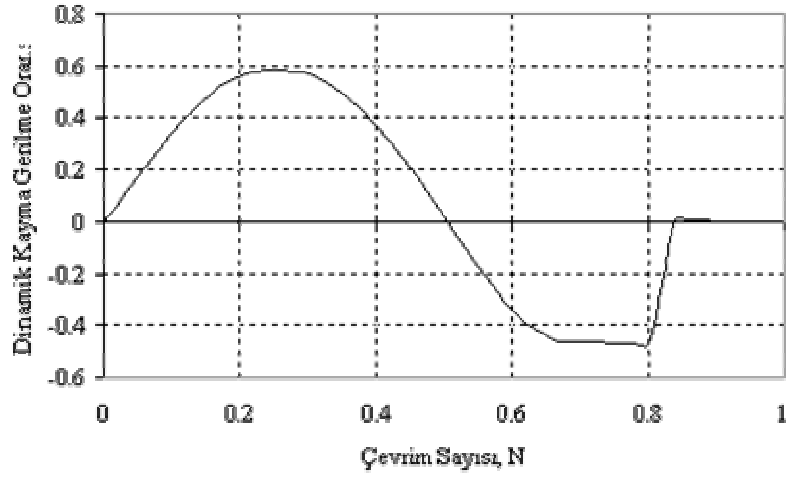
Şekil A-28 (17) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	18	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	12.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	56
R(cm) Başlangıç	4.98	δ_k (gr/cm ³)	1.57
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



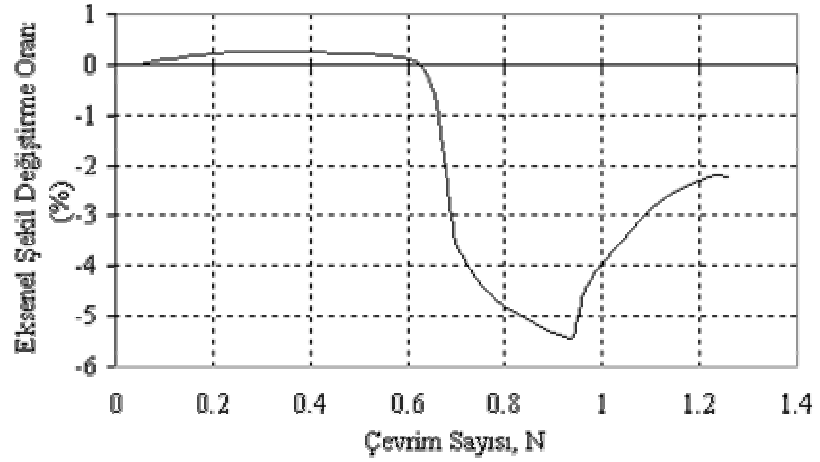
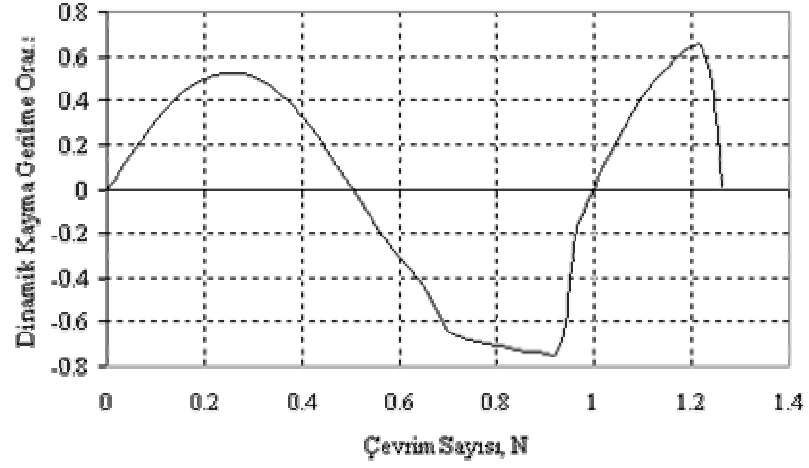
Şekil A-29 (18) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	19	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	13.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	46
R(cm) Başlangıç	5.02	δ_k (gr/cm ³)	1.54
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



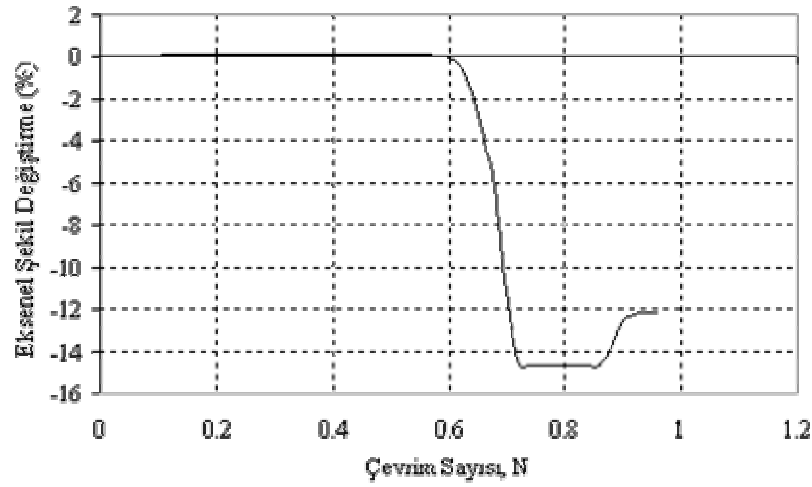
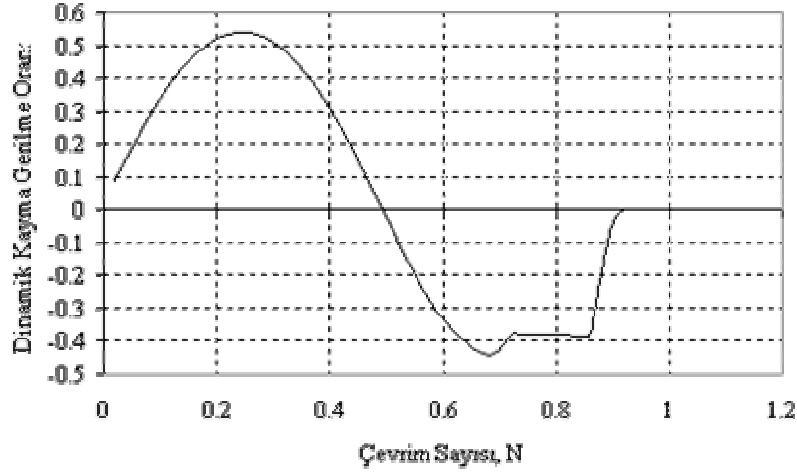
Şekil A-30 (19) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	20	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	13.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	46
R(cm) Başlangıç	5.02	δ_k (gr/cm ³)	1.54
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



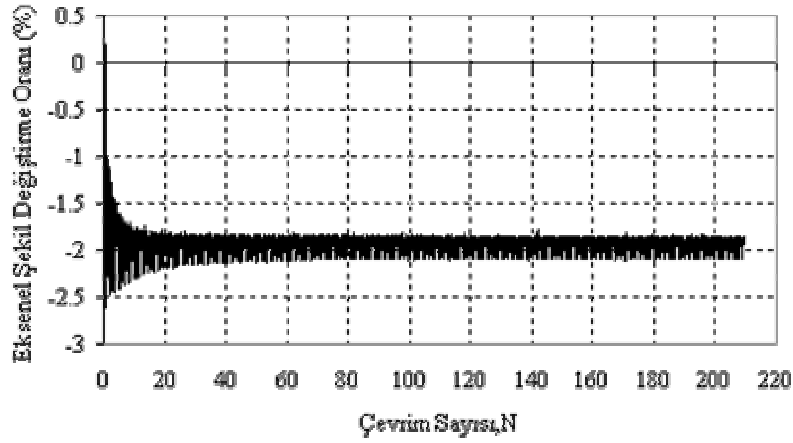
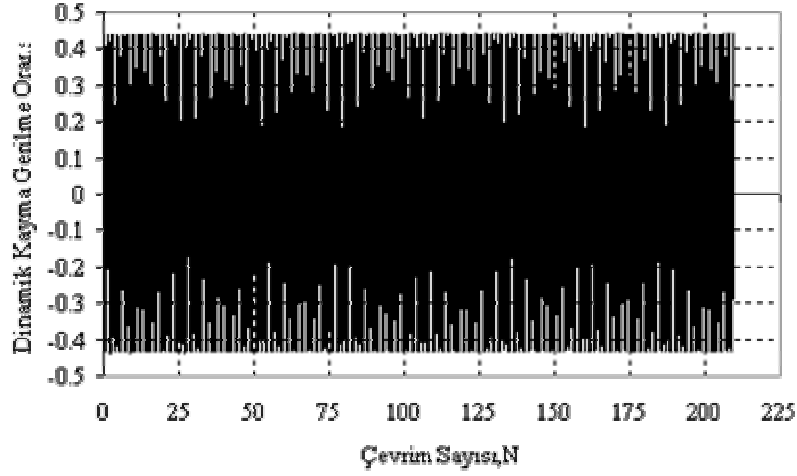
Şekil A-31 (20) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	21	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	14.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	51
R(cm) Başlangıç	5.01	δ_k (gr/cm ³)	1.56
H(cm) Başlangıç	9.95	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



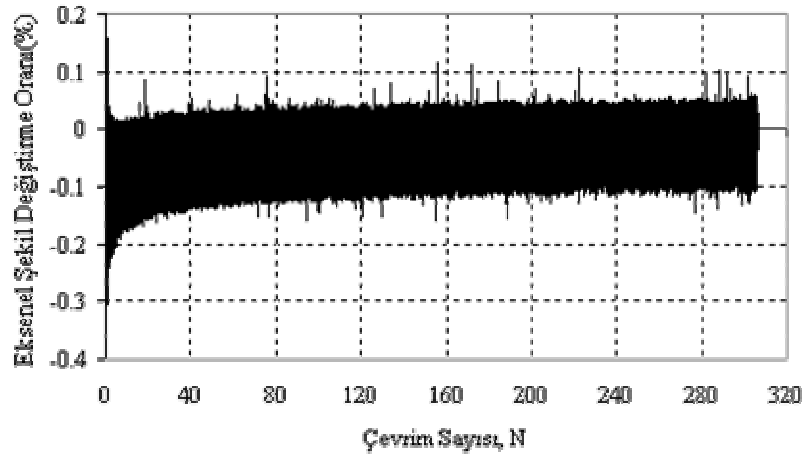
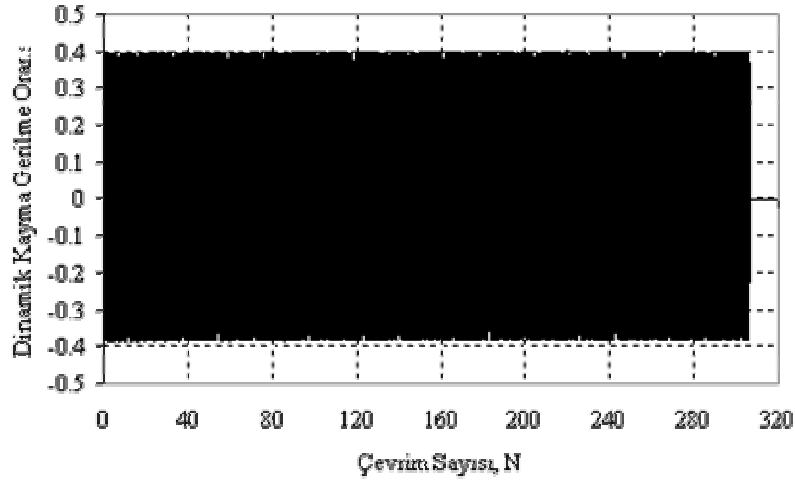
Şekil A-32 (21) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	22	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	14.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	53
R(cm) Başlangıç	5	δ_k (gr/cm ³)	1.56
H(cm) Başlangıç	9.95	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



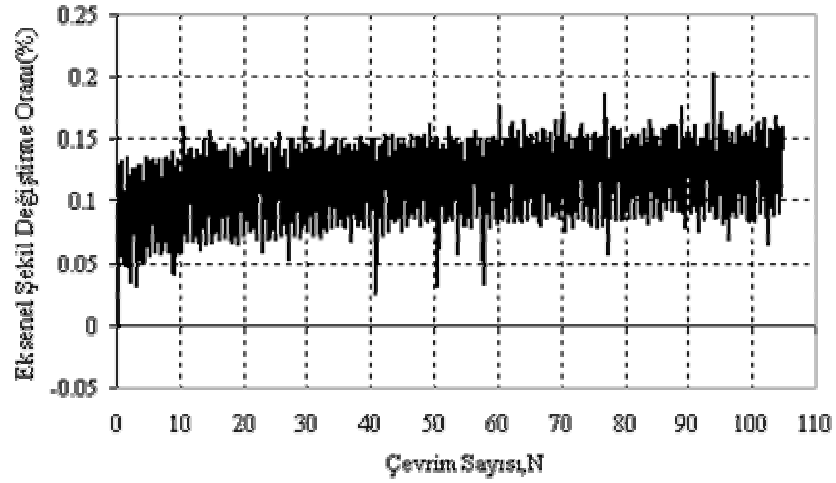
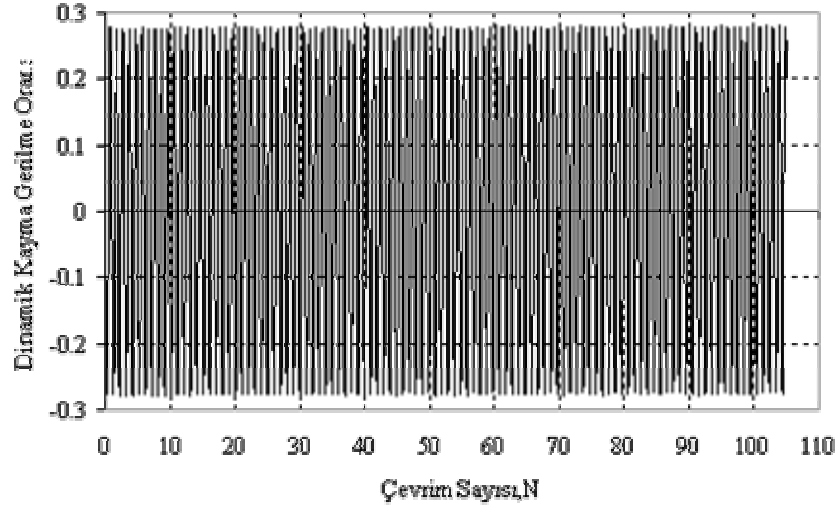
Şekil A-33 (22) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	23	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	15.10.2004	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	48
R(cm) Başlangıç	5.01	δ_k (gr/cm ³)	1.55
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



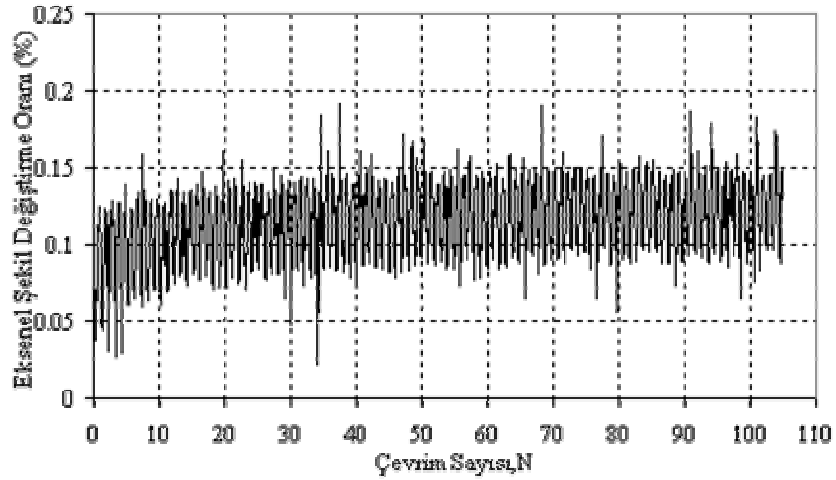
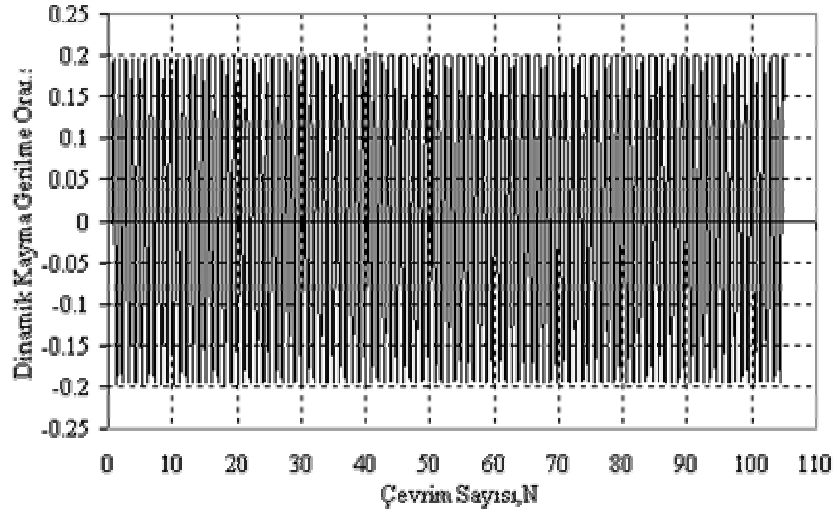
Şekil A-34 (23) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	40	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	17.02.2005	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	52
R(cm) Başlangıç	4.99	δ_k (gr/cm ³)	1.56
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



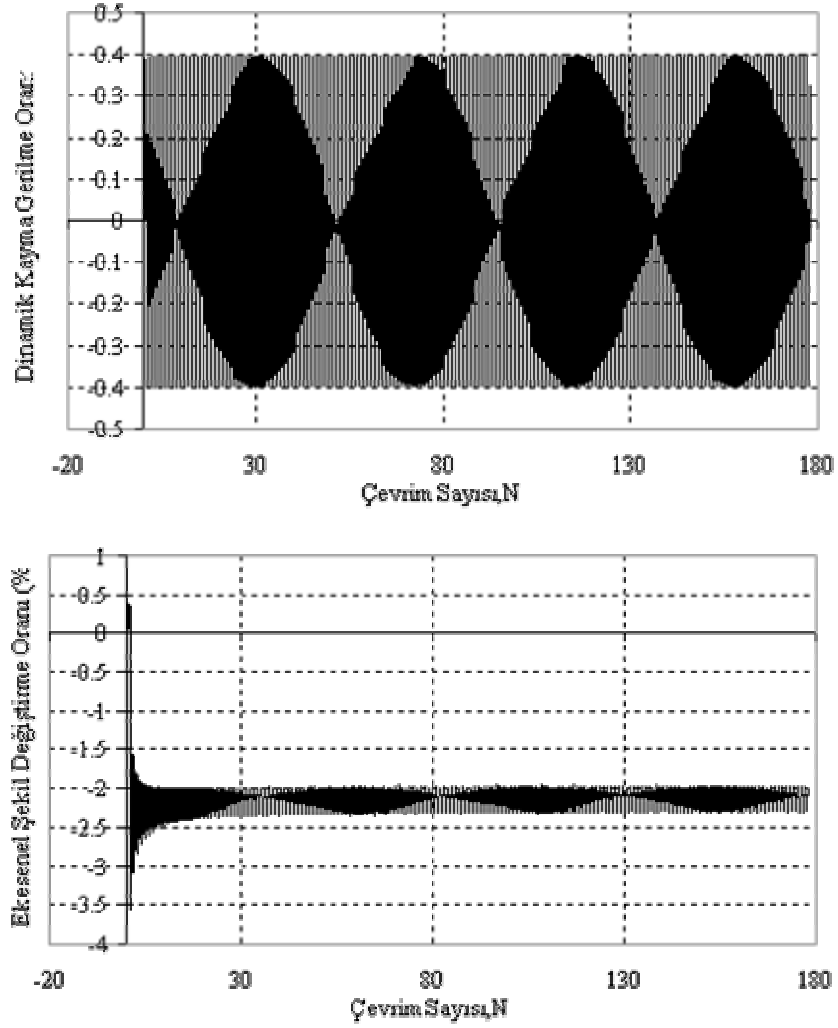
Şekil A-35 (40) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	41	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	18.02.2005	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	47
R(cm) Başlangıç	4.97	δ_k (gr/cm ³)	1.55
H(cm) Başlangıç	10.05	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	2	B	-



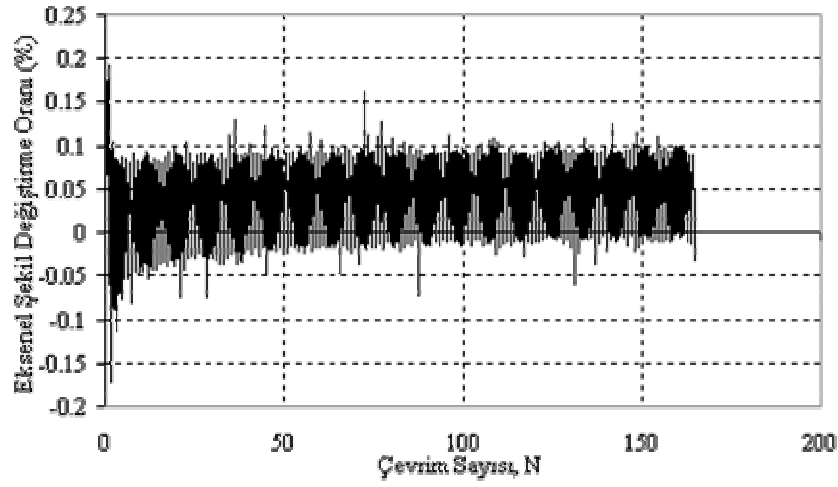
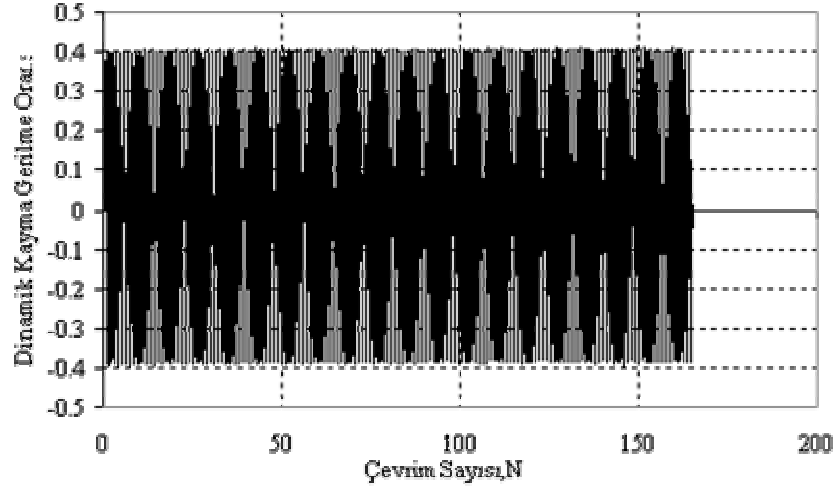
Şekil A-36 (41) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	42	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	22.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	58
R(cm) Başlangıç	4.97	δ_k (gr/cm3)	1.58
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	2	B	-



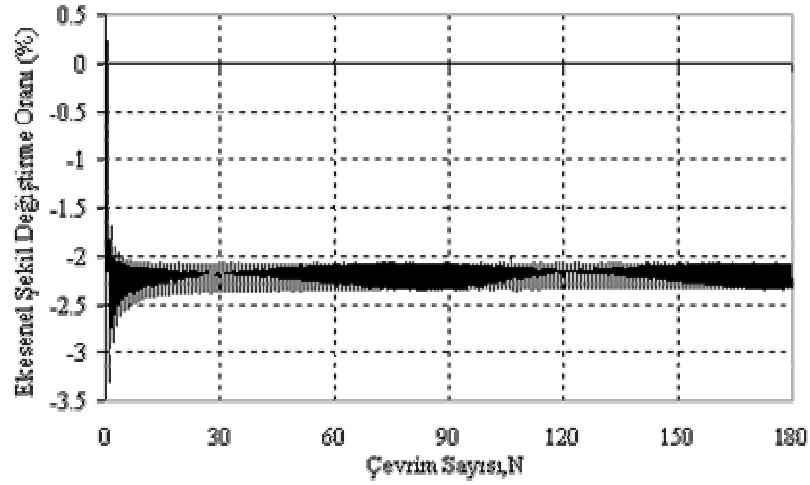
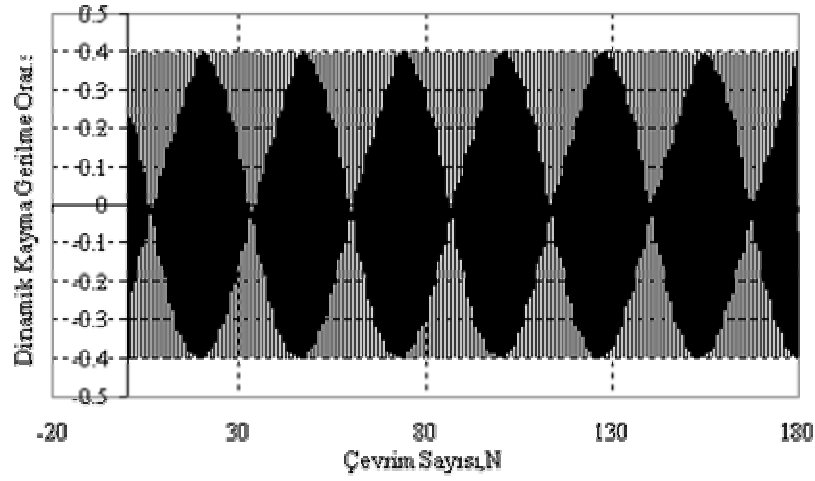
Şekil A-37 (42) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	44	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	24.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	48
R(cm) Başlangıç	5.01	δ_k (gr/cm3)	1.55
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	0.5	B	-



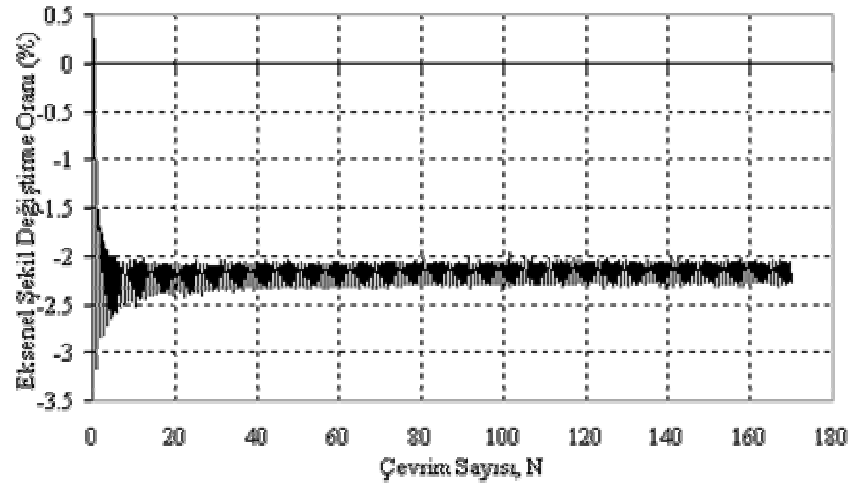
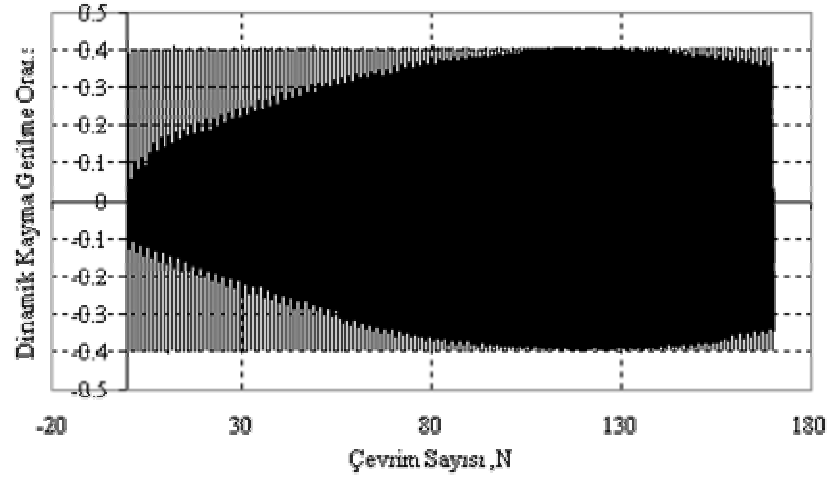
Şekil A-38 (44) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	48	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	04.03.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	48
R(cm) Başlangıç	5.01	δ_k (gr/cm3)	1.55
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1.5	B	-



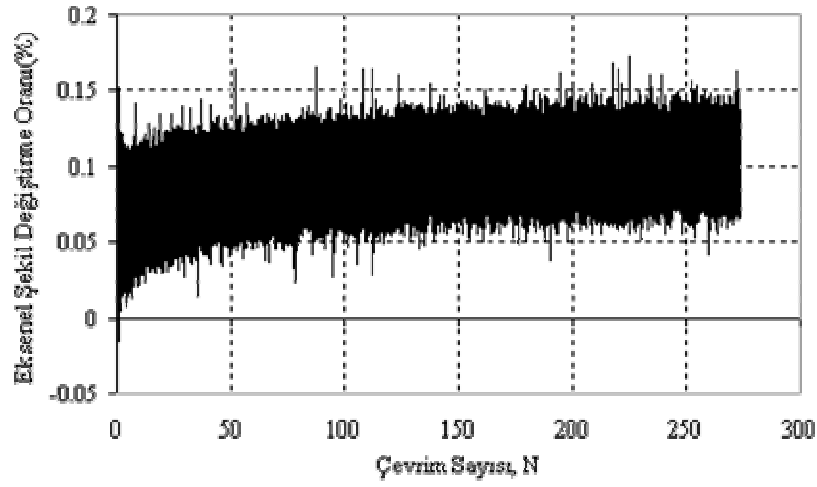
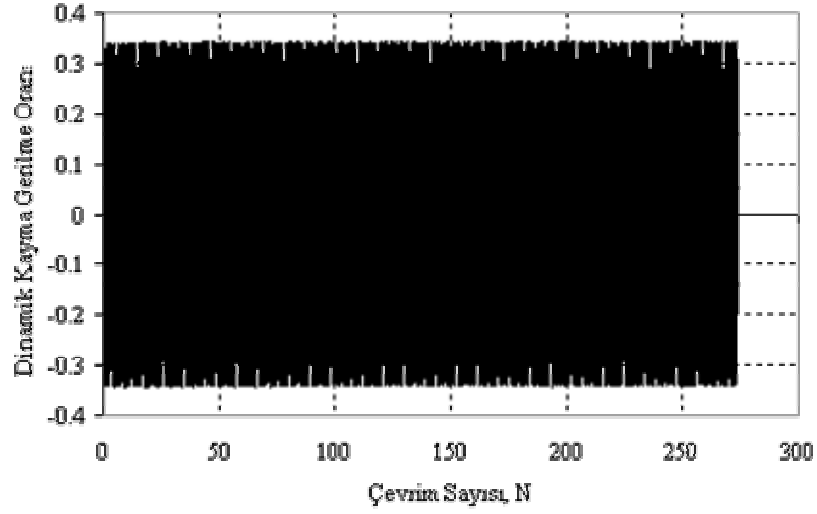
Şekil A-39 (48) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	51	Konsolidasyon sonrası H(cm)	DRENAJLI
Tarih	07.03.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	50
R(cm) Başlangıç	5	δ_k (gr/cm3)	1.55
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



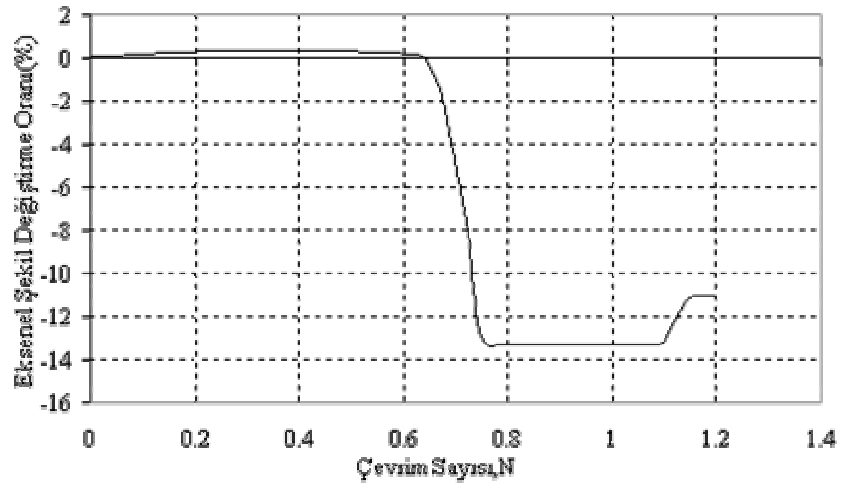
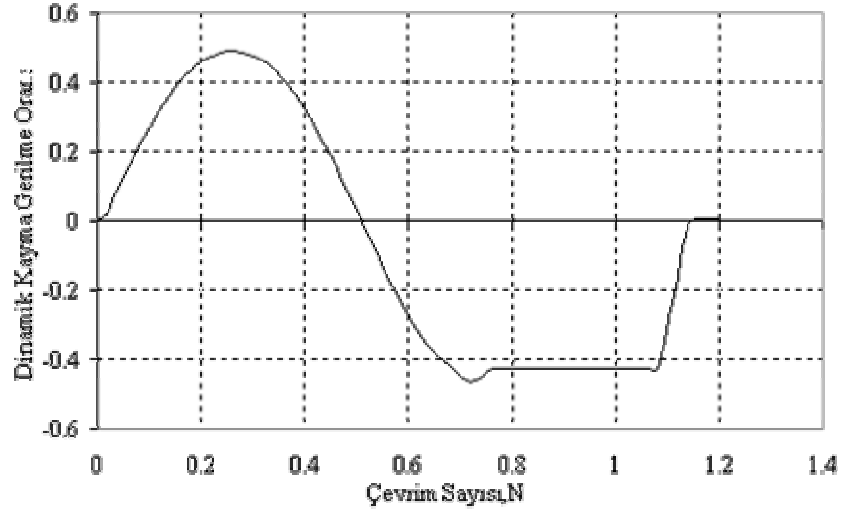
Şekil A-40 (51) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	52	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	15.03.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	305.12	Kons.Sonrası Dr(%)	50
R(cm) Başlangıç	5	δ_k (gr/cm3)	1.55
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



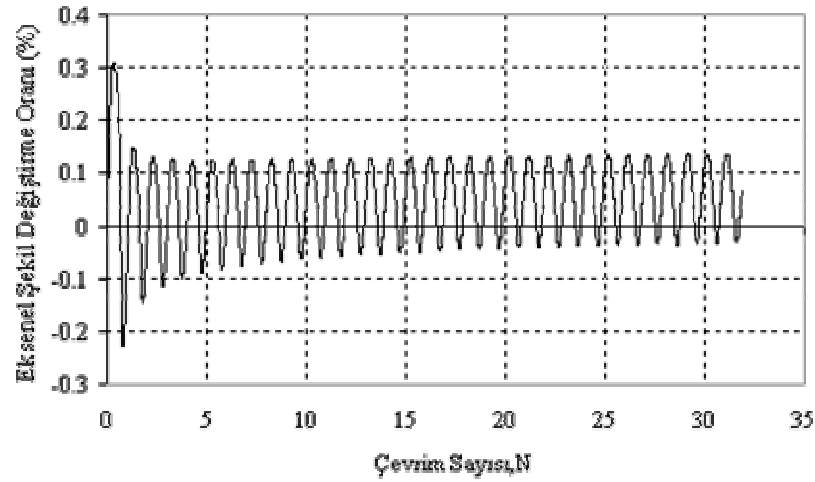
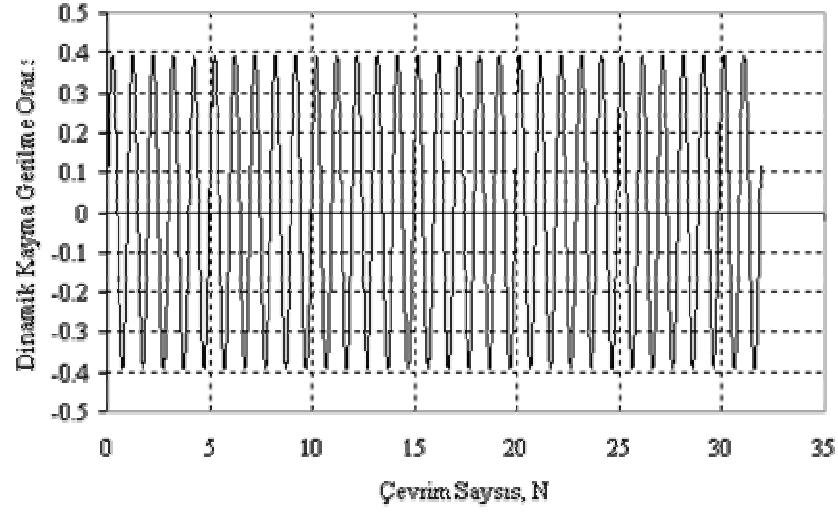
Şekil A-41 (52) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	33	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	04.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	30
R(cm) Başlangıç	5	δ_k (gr/cm3)	1.51
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



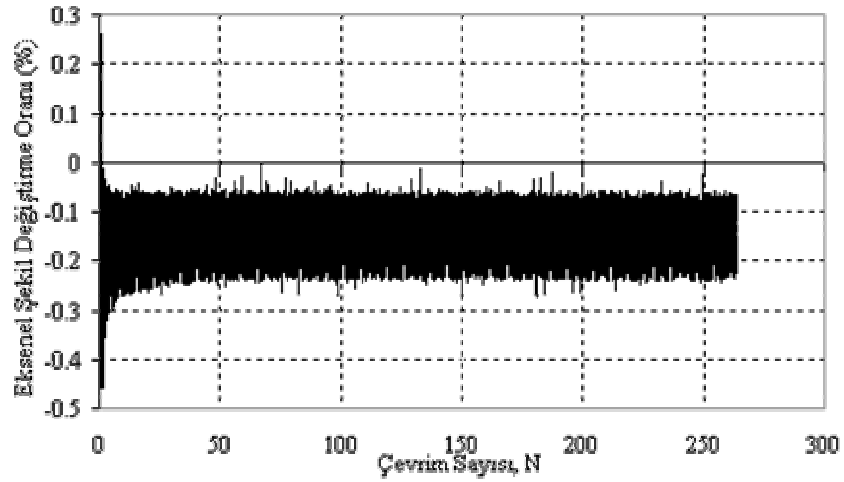
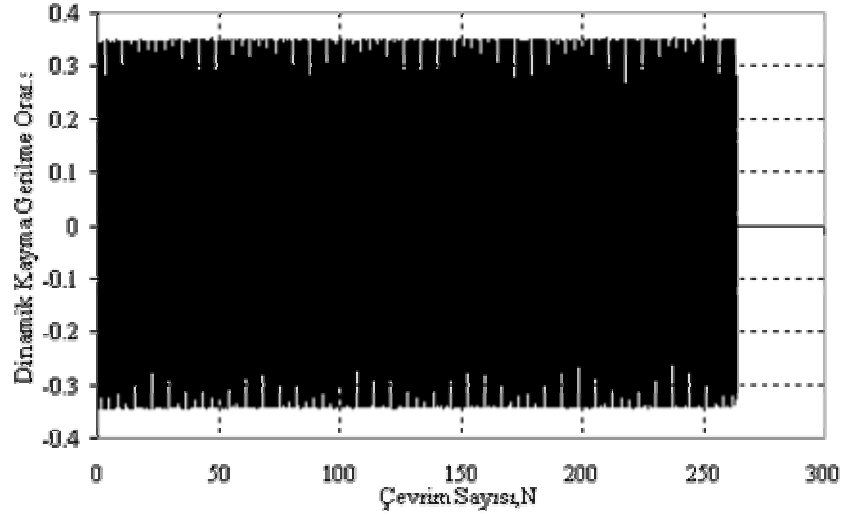
Şekil A-42 (33) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	34	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	09.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	39
R(cm) Başlangıç	4.97	δ_k (gr/cm3)	1.53
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



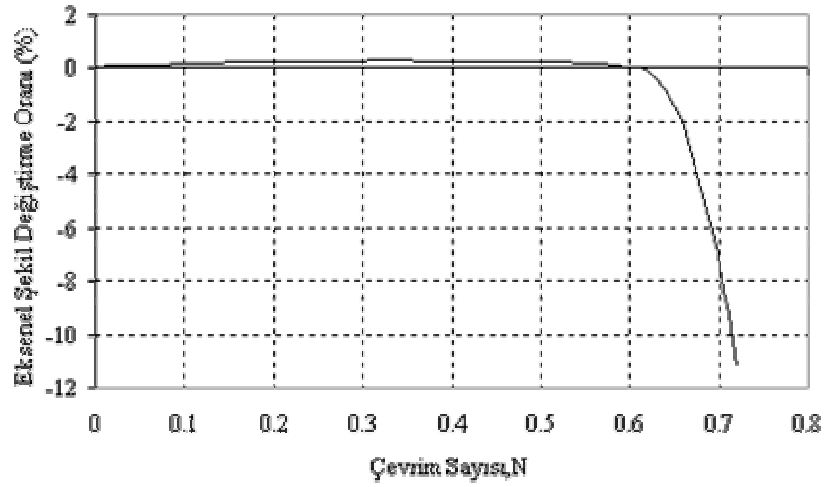
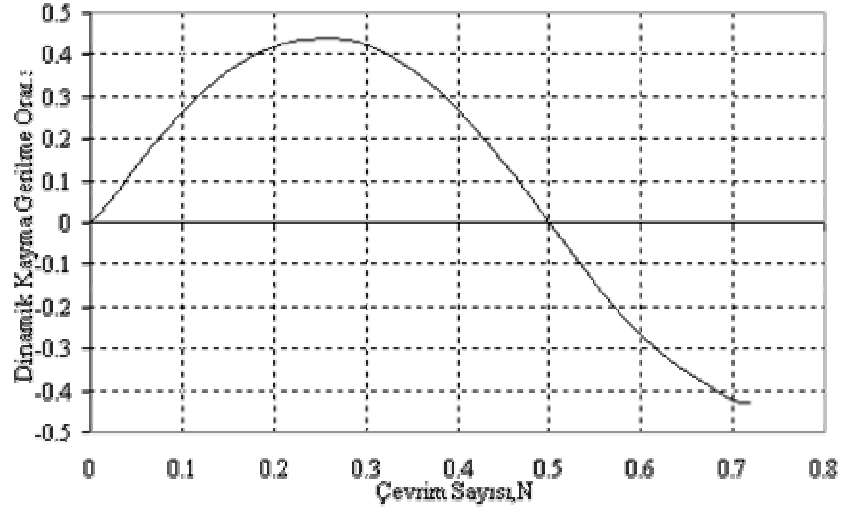
Şekil A-43 (34) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	35	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	09.02.2005	Kons.Son.A(cm ²)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	35
R(cm) Başlangıç	4.98	δ_k (gr/cm ³)	1.52
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



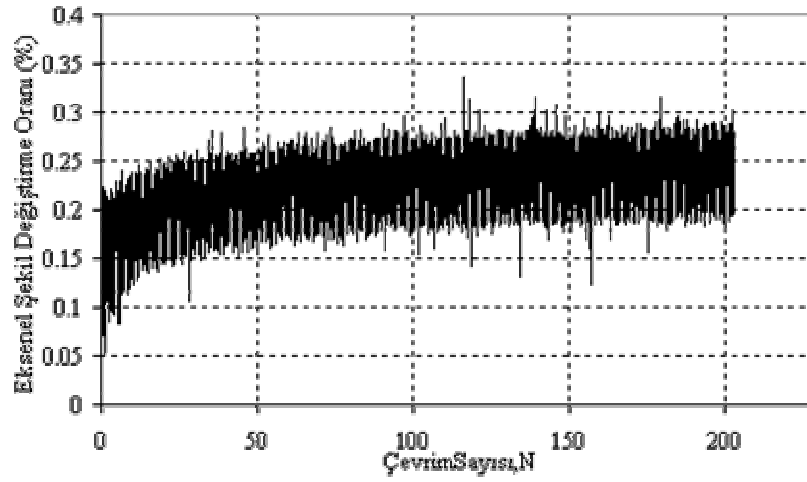
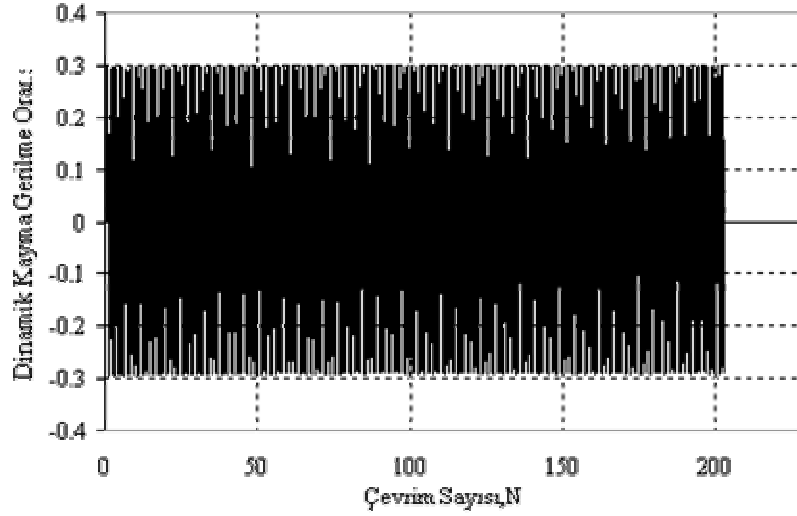
Şekil A-44 (35) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	36	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	10.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	30
R(cm) Başlangıç	5	δ_k (gr/cm3)	1.51
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



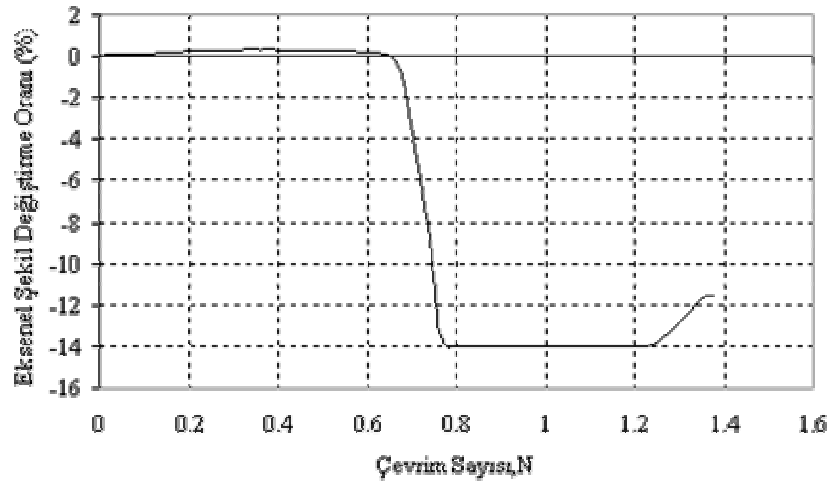
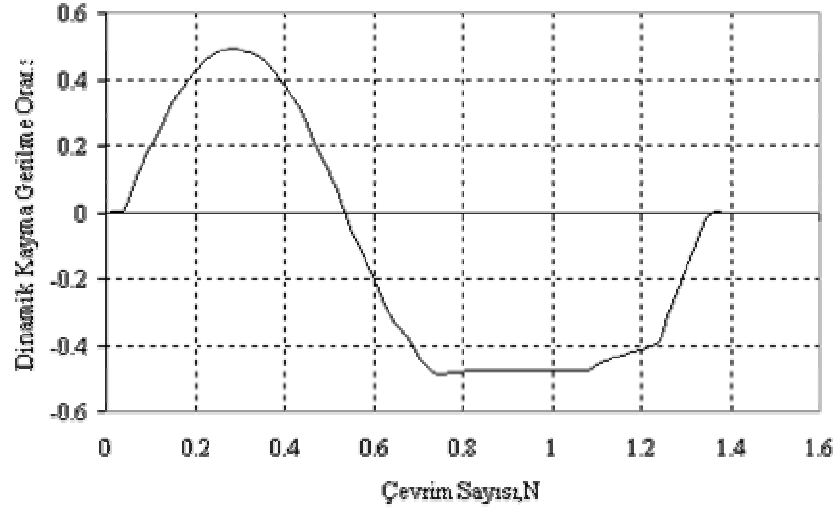
Şekil A-45 (36) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	37	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	11.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	35
R(cm) Başlangıç	4.98	δ_k (gr/cm3)	1.52
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



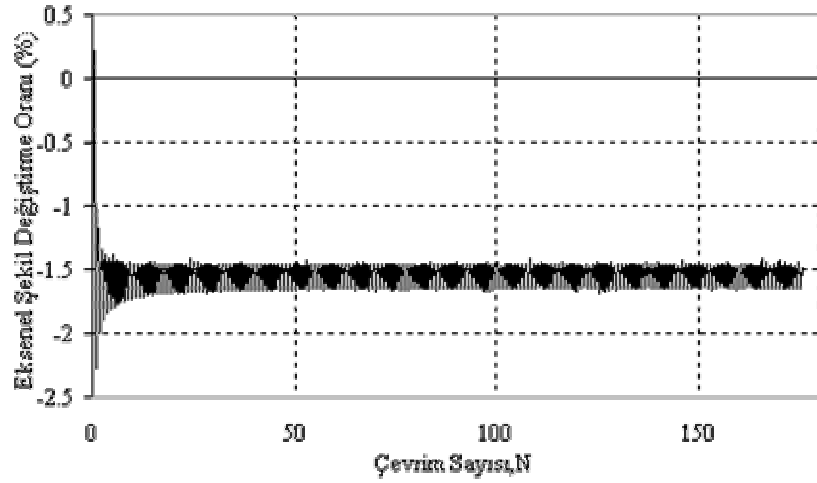
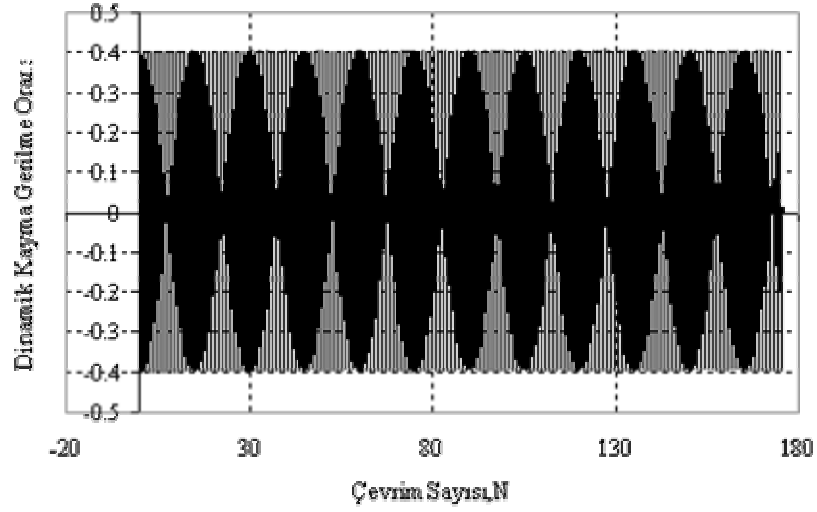
Şekil A-46 (37) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	38	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	16.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	35
R(cm) Başlangıç	4.98	δ_k (gr/cm3)	1.52
H(cm) Başlangıç	10	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



Şekil A-47 (38) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

Deney No	39	Konsolidasyon sonrası H(cm)	-
Tarih	17.02.2005	Kons.Son.A(cm2)	-
M(gr)	295.96	Kons.Sonrası Dr(%)	33
R(cm) Başlangıç	5	δ_k (gr/cm3)	1.52
H(cm) Başlangıç	9.95	Sr(%)	-
σ_c (kg/cm ²)	1	B	-



Şekil A-48 (39) numaralı dinamik üç eksenli basınç deneyinin sonuçları

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Ankara'nın Polatlı ilçesinde doğdu. Orta ve lise öğrenimini Polatlı Anadolu Lisinde tamamladıktan sonra 1997 yılında Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliğinde yükseköğrenimine başladı ve 2001 yılında iyi dereceyle mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans programına kayıt oldu. 2002 yılı sonuna kadar çeşitli şantiyelerde saha mühendisliği ve şantiye şefliği yaptıktan sonra Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2004 yılı sonunda geçici görevlendirmeye İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde göreve başladı ve halen bu görevi sürdürmektedir.