

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖRSELENMEMİŞ ZEMİNLERİN DEPREM SONRASI MUKAVEMETLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ahmet ŞENER

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mekaniği&Geoteknik Müh.

Danışman : Prof. Dr. Ayfer ERKEN

EYLÜL 2009

ÖNSÖZ

Bu çalışmada çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana kendisiyle çalışma olanağını tanıyan; sevgili hocam Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Yardımlarını esirgemeyen Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

EYLÜL 2009

Ahmet ŞENER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
1.GİRİŞ	2
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	2
2. ELE ALINAN KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ	4
2.1 Giriş.....	4
2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Dinamik Davranış Özellikleri	4
2.2.1 Silt, Siltli Kil ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları.....	6
2.2.2 Diğer Zemin Türlerinin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	15
2.2.2.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı	16
2.2.2.2 Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı.....	18
2.2.2.3 Siltli Kum Zeminlerin ve Silt Tabakalı Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	19
2.3 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri.....	35
2.4 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar	38
2.5 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi	40
2.6 Numune Hazırlama Yönteminin ve Ekipmanın Dinamik Davranışa Etkisi	41
2.7 Zemin Yapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Koşullarında Değişimi .	43
2.8 Sonuç.....	44
3. DENEY YÖNTEMİ VE KULLANILAN MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ.....	46
3.1 Giriş.....	46
3.2 Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi.....	46
3.3 Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre	47
3.4 Elektriksel Ölçüm Birimi	49
3.5 Deney Sisteminin Kalibrasyonu.....	51
3.6 Deneylerin Değerlendirilmesi	53
3.7 Sonuç.....	57
4. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	58
4.1 Giriş.....	58
4.2 Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Aletinde Numunelerin Dinamik Davranışı.....	58
5. SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	70
EKLER.....	78
EK A. YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ	78

KISALTMALAR

DKGO	: Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı
DKÜE	: Deformasyon Kontrollü Üç Eksenli
DKKK	: Deformasyon Kontrollü Kesme Kutusu
GKDD	: Gerilme Kontrollü Düzlem Deformasyon
DKDD	: Deformasyon Kontrollü Düzlem Deformasyon
ÜEB	: Üç Eksenli Basınç
GÜEB	: Gerçek Üç Eksenli Basınç
SB	: Serbest Basınç
İDO	: İnce Dane Oranı
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1 : Deney Sonuçlarına Etkiyen Parametreler	5
Çizelge 4.1 : Konsolidasyonlu Deney Datalarının Toplu Gösterimi (UU).....	53
Çizelge 4.2 : Konsolidasyonlu Deney Datalarının Toplu Gösterimi (CU).....	54

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Laboratuarda hazırlanan silt numunelerin dinamik davranışlarının plastisite indisine etkisi (Puri, 1984).....	6
Şekil 2.2 : Laboratuarda hazırlanan silt numunelerin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984).....	6
Şekil 2.3 : Siltli ve kumlu zeminlerde dinamik mukavemetin plastisite indisıyla değişimi (El Hosri, 1984).....	7
Şekil 2.4 : Örselenmemiş numunelerde ve laboratuarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988)	7
Şekil 2.5 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği- çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	8
Şekil 2.6 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi .(Wagg, 1990).....	9
Şekil 2.7 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği –çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	9
Şekil 2.8 : Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu 1992).....	10
Şekil 2.9 : Tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi değişimi.....	12
Şekil 2.10 : Yapay karışımlar için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)- Plastisite İndisi grafiği.....	13
Şekil 2.11 : Doğal zeminler için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)- Plastisite İndisi grafiği.....	13
Şekil 2.12 : İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, Yasuda ve Yokota, 1981).....	18
Şekil 2.13 : Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	19
Şekil 2.14 : Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	20
Şekil 2.15 : Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	20
Şekil 2.16 : Düşük plastisteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981).....	22
Şekil 2.17 : Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987).....	23
Şekil 2.18 : İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992).....	24
Şekil 2.19 : Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (F= Silt yüzdesi) (Troncoso, 1990).....	24

Şekil 2.20 :	Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1984).....	25
Şekil 2.21 :	Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995).....	26
Şekil 2.22 :	TAE-18 sondajındaki zemin kesiti ve kayma dalgası hızı (Erken, 2004).....	28
Şekil 2.23 :	Düzeltilmiş SPT darbe sayısı-Dinamik kayma gerilmesi ilişkisi ile güvenlik faktörünün derinlikle değişimi	29
Şekil 2.24 :	Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Tek, İki, Üç Silt Tabakalı ve Tabakasız (Kum Zemin)) (Tunçok, 2005).....	30
Şekil 3.1 :	Dinamik üç eksenli basınç deney sistemi.....	44
Şekil 3.2 :	Dinamik üç eksenli deney sisteminin yandan ve önden görünüşü (Özay,2002).....	45
Şekil 3.3 :	Dinamik yükleme ölçüm ve kayıt birimleri.....	47
Şekil 3.4 :	Ölçüm sistemi dijital panosu.....	48
Şekil 3.5 :	S4 12.00-12.50 m. dinamik deneyinde dinamik gerilme oranı, deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi.....	51
Şekil 3.6 :	S4 12.00-12.50 m. dinamik deneyinde Dinamik gerilmenin eksenel birim deformasyonla olan değişimi.....	52
Şekil 3.7 :	S15 4.50-5.00 m dinamik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ile ilişkisi.....	53
Şekil 3.8 :	S15 4.50-5.00 m dinamik deneyinde Dinamik gerilmenin eksenel birim deformasyonla olan değişimi.....	54
Şekil 4.1 :	Numunelerin plastisite kartı üzerinde gösterimi.....	57
Şekil 4.2 :	S9 15.00-15.50 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	58
Şekil 4.3 :	S9 15.00-15.50 m dinamik sonrası statik deneyde deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi	59
Şekil 4.4 :	S9 15.00-15.50 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla olan ilişkisi.....	59
Şekil 4.5 :	Numunelerin Statik ve Dinamik ardı Statik deney sonucu eksenel dayanımları.....	63
Şekil 4.6 :	Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (UU Deneyler).....	63
Şekil 4.7 :	Dinamik Sonrası Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (UU Deneyler	64
Şekil 4.8 :	Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (CU Deneyler).....	64

Şekil 4.9 :	Dinamik Sonrası Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (CU Deneyler).....	65
Şekil A.1 :	S2 3.00-3.50 statik deneyde Deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla ilişkisi.....	65
Şekil A.2 :	S2 3.00-3.50 dinamik deneyde Deviatör gerilme, boşluk suyu basıncının birim deformasyonun çevrim sayısı ile ilişkisi.....	66
Şekil A.3 :	S2 3.00-3.50 dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla ilişkisi.....	67
Şekil A.4 :	S4 12.00-12.50 m. statik deneyde Deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla ilişkisi.....	68
Şekil A.5 :	S4 12.00-12.50 m. dinamik deneyde Deviatör gerilme, boşluk suyu basıncının birim deformasyonun çevrim sayısı ile ilişkisi	69
Şekil A.6 :	S4 12.00-12.50 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla ilişkisi.....	70
Şekil A.7 :	S6 6.00-6.50 m. Statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla olan değişimi.....	71
Şekil A.8 :	S6 6.00-6.50 m. Dinamik deneyin deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi.....	72
Şekil A.9 :	S6 6.00-6.50 m. Dinamik sonrası statik deneyin deviatör gerilme boşluk suyu basıncının birim deformasyonla olan değişimi.....	73
Şekil A.10 :	S7 3.00-3.50 m. Statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla olan ilişkisi.....	74
Şekil A.11 :	S7 3.00-3.50 dinamik deneyde dinamik gerilme oranı eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	75
Şekil A.12 :	S7 3.00-3.50 m. dinamik sonrası statik deneyde boşluk suyu basıncı ve deviatör gerilmenin eksenel birim deformasyon ile ilişkisi.....	76
Şekil A.13 :	S9 15.00-15.50 m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ilişkisi.....	77
Şekil A.14 :	S9 15.00-15.50 m. dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	78
Şekil A.15 :	S9 15.00-15.50 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ilişkisi.....	79
Şekil A.16 :	S11 12.00-12.50m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi.....	80
Şekil A.17 :	S11 12.00-12.50 m. dinamik deneyde dinamik gerilme oranı eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	81
Şekil A.18 :	S11 12.00-12.50 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi.....	82

Şekil A.19 :	S13 4.50-5.00 m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi.....	83
Şekil A.20 :	S13 4.50-5.00 m. dinamik deneyde dinamik gerilme oranı eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	84
Şekil A.21 :	S13 4.50-5.00 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi.....	85
Şekil A.22 :	S13 10.50-11.00 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi.....	86
Şekil A.23 :	S13 10.50-11.00 m. dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	87
Şekil A.24 :	S13 10.50-11.00 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	88
Şekil A.25 :	S13 18.00-18.50 m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	89
Şekil A.26 :	S13 18.00-18.50 m. dinamik deneyde dinamik gerilme oranı eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	90
Şekil A.27 :	S13 18.00-18.50 m dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ilişkisi.....	91
Şekil A.28 :	S15 4.50-5.00 m. dinamik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyon ile ilişkisi.....	92
Şekil A.29 :	S15 4.50-5.00 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyon ile ilişkisi.....	93
Şekil A.30 :	S16 12.50-14.00 m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyon ile ilişkisi.....	94
Şekil A.31 :	S16 13.50-14.00 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	95
Şekil A.32 :	S16 13.50-14.00 m. dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyon ile ilişkisi.....	96

SEMBOL LİSTESİ

τ_d, τ_{cyc}	: Dinamik kayma gerilmesi
σ_d	: Dinamik düşey gerilme
σ_c, σ_v'	: Efektif çevre gerilmesi
σ_p'	: Ön konsolidasyon basıncı
σ_{z0}	: Ortalama kayma gerilmesi
σ_r	: Radyal gerilme
σ_z	: Üniform düşey eksenel gerilme
σ_0	: Çevre gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
$\Delta\sigma_r$	: Radyal gerilme artımı
$\Delta\sigma_z$	: Üniform düşey eksenel gerilme artımı
$\Delta\sigma_0$	: Çevre gerilmesi artımı
F_z	: Düşey eksenel kuvvet
T	: Burulma momenti
P_i	: İç hücre basıncı
P_0	: Dış hücre basıncı
ΔH	: Düşey eksenel yer değiştirme
$\Delta\theta$	: Burulma açısı
ΔV_i	: İç hücre hacim değişimi
ΔV_s	: Numune hacim değişimi
B	: Skempton doygunluk parametresi
γ_{z0}	: Ortalama birim kayma deformasyonu
ϵ_{z0}	: Kayma şekil değiştirme artımı
ϵ	: Hacimsel deformasyon
ϵ_z	: Eksenel şekil değiştirme artımı
ϵ_0	: Çevresel şekil değiştirme artımı
ϵ_r	: Radyal şekil değiştirme artımı
A_s	: Numune kesit alanı
Z	: Numune üst yüzeyinden olan düşey mesafe
u	: Boşluk suyu basıncı bileşeni
H_i	: Numune başlangıç yüksekliği

H_s	: Numune deney sonu yüksekliği
r_i	: Numune başlangıç iç yarıçapı
r_d	: Numune başlangıç dış yarıçapı
V	: Başlangıç hacmi
N	: Çevrim sayısı
ΔU	: Boşluk suyu basıncı artımı
K_c	: Yatay toprak basıncı katsayısı
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
W_n	: Doğal su muhtevası
w	: Doygun durumda su muhtevası
W_L	: Likit limit
W_P	: Plastik limit
I_p, PI	: Plastisite indisi
FC	: İnce dane miktarı
e_{max}	: En büyük boşluk oranı
e_{min}	: En küçük boşluk oranı
e₀	: Başlangıç boşluk oranı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ_k	: Konsolidasyon öncesi başlangıç kuru birim hacim ağırlık
γ_{kc}	: Konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlık
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ'	: Efektif birim hacim ağırlığı
ML	: Düşük plastisiteli killi silt zemin
CL	: Düşük plastisiteli siltli kil zemin
SC	: Killi kum zemin
NP	: Plastik olmayan zemin

ZEMİNLERİN DEPREM SONRASI MUKAVEMETLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Ülkemizin büyük bir bölümünün deprem kuşağı içinde olması ve 1999 yılında yaşanan depremler, zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğini önem kazanan bilim dalları haline getirmiştir. Sanayi bölgelerinde yer alan endüstri yapılarına gelecek deprem yüklerinin hesaplanması ve bu yapıların temel sistemlerinin zeminle olan etkileşimi, zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesini gerekli kılar

Zemin mekaniği ve geoteknik deprem mühendisliğinin temel amacı, zeminlerin tekrarlı yükler altında uğrayacakları deformasyonları belirlemek ve yapılacak farklı mühendislik yapıları için zeminden kaynaklanan dinamik etkinin derecesini saptamaktır.

Kocaeli- Sakarya bölgesi 17 Ağustos 1999'da büyüklüğü $M_w=7.4$ olan bir depremle ağır yapısal hasara ve büyük can kaybına uğramıştır. Adapazarı, Gölcük kıyıları ve Sapanca'da meydana gelen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları sonucu binalarda dönme, ötelenme, oturma, taşıyıcı sistemde kalıcı hasarlar oluşmuştur. Bu depremler sırasında düşük plastisiteli siltler ile kumlu zeminler yaygın olarak sıvılaşmış ve killer ise taşıma gücü kaybına uğramıştır.

Bu çalışma çerçevesinde Adapazarı zeminlerinin deprem yükleri altında nasıl bir davranış sergilediği incelenmiştir. Dinamik ve Dinamik sonrası statik deneylerle taşıma gücü kaybı belirlenmeye çalışılmıştır.

Deneyler dinamik üç eksenli deney sistemleri ile yapılmıştır. Buradan çıkan sonuçlarla mukavemet kayıpları hakkında bilgi elde edilmiştir.

STRENGTH OF SOILS AFTER EARTHQUAKE SHOCK

SUMMARY

Being Turkey located along earthquake zone and earthquakes which was experienced in 1999 give rise to soil dynamics and geotechnical earthquake engineering as important sciences. Calculation of the earthquake loads to industrial buildings located in industrial areas and relationship between bearing systems of buildings and soils requires behaviours of soils under dynamic effects to be determined.

Main purpose of soil dynamics and geotechnical earthquake engineering is to determine deformations of soils which occur under dynamic cyclic loads and the degree of dynamic affects caused by soil for other engineering building types.

Kocaeli-Sakarya region confronted with heavy structural damage and several casualties by an earthquake whose magnitude is $M_w=7.4$ on 17th of August in 1999. Liquefaction and loss of bearing capacity drove , permanent damage on structural system of buildings in Adapazarı, Sapanca and in shores of Gölcük. During those earthquakes low plasticity silts and sandy soils liquefied and clays and plastic silts lost their bearing capacity.

The behaviour of undisturbed Adapazarı soils have been investigated under earthquake loads. The Bearing Capacity loss is investigated through dynamic and static tests.

Experiments conducted with Dynamic Triaxial Compression apparatus.

1.GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Son yıllarda yaşanan depremler, zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğini önem kazanan bilim dalları haline getirmiştir. Sanayi bölgelerinde yer alan endüstri yapılarına gelecek deprem yüklerinin hesaplanması ve bu yapıların temel sistemlerinin zeminle olan etkileşimi, zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesini gerekli kılar.

Depremler sırasında düşük plastisiteli siltler ile kumlu zeminler yaygın olarak sıvılaşmış ve killeri ise taşıma gücü kaybına uğramıştır. 1999 yılında Adapazarı çevresindeki siltli kil ve killi zeminler deprem yükleri altında taşıma gücü kaybına yol açıp çok sayıda can ve mal kaybı oluşmasına yol açmıştır.

Bu çalışmada, örselenmemiş Adapazarı zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışlarını ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir

Yapılan çalışmanın amacı, örselenmemiş Adapazarı zeminlerinin farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının incelenmesidir.

Bu kapsamda, literatür bölümde araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalardan örnekler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan zemin numunelerinin özellikleri gösterilmiştir Dinamik Üç Eksenli Basınç deney sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, yapılan deneylerin sonuçları ve bu sonuçların değerlendirilmesi sunulmaktadır.

Son bölümde ise deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar birleştirilerek, genel bir sonuç ortaya çıkarılmış. Bu alanda yapılan çalışmalar hakkında öneriler getirilmiştir.

2. ELE ALINAN KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

2.1 Giriş

Literatür bölümünde çalışma konusuyla ilgili geçmiş çalışmalardan ve çalışmalardan çıkan sonuçlardan bahsedilecektir. Çalışmaya ışık tutması amacıyla öncelikle taşıma gücü kayıpları hakkındaki literatürden ve zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemlerden ve son yıllarda yapılmış çalışmalardan bahsedilecektir. Bu çalışmada düşük plastisiteli killerde taşıma gücü kayıpları inceleneceği için literatür kısmında siltli kil ve killerin tekrarlı yükler altındaki davranışına daha geniş yer ayrılacaktır. Bu bölümde çalışma konusu dışında kalan diğer zemin türleriyle ilgili çalışmalara da göz atılacaktır. Buna müteakip bölümlerde siltli killi ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan çalışmalar temel başlıkları altında geçmiş çalışmalar genel mantık bir çerçevesinde sıralanıp literatür kapsamı içersinde ele alınacaktır.

2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Dinamik Davranış Özellikleri

Deprem faktörü günümüzde mühendislik yapılarında dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir. Bu yüzden yapıdaki deprem büyüklüklerini belirlemek için önce temel altı zeminlerinin dinamik davranış özelliklerini belirlenmesi gerekir. Zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özelliklerini belirlemenin en pratik yolu deneylerdir. Deneyler farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılarak bir zemin tabakasında oldukça fazla envanter elde edilebilir. Bu deneyler ancak mevcut zemin koşullarının birebir olarak laboratuarda modellenmesi ile doğru sonuçlar vermektedir. Pratikte böyle bir şeyin çok zor olduğu bilinir, çünkü numunenin sahadan alımı, laboratuvar ortamına getirilmesi ve deney numunesinin hazırlanması sırasında bir takım örselenmeler oluşması doğaldır. Bu yüzden deney sonuçlarının tek başına yorumlanması beraberinde bir takım olumsuzluklar getirebilir. Meydana gelen bu olumsuzlukların en aza indirilmesi için arazide ve laboratuarda yapılan deneyler birlikte değerlendirilmelidir. (Ansal ve Erken, 1986).

Yapılan bu deneylerde belirlenmeye çalışan zemin özelliklerini gruplara ayırabiliriz.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi; dinamik kayma modülü (elastik kayma deformasyonlarında, G_0 , kayma modülü-birim kayma ilişkisi), elastisite modülü, sönüm oranı hesaplanması bunlardan ilkidir. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak sönüm oranı ve dinamik kayma modülünün birim şekil değiştirmeye bağlı olarak tanımlanması gerekir. Bu özelliklerin belirlenmesi esnasında laboratuarda zeminin elastik davranış gösterdiği 10^{-6} dan küçük deformasyon seviyelerinde deneyler yapılırken, arazide de zeminin doğal yapısı bozulmadan yerinde özelliklerinin belirlenmesine çalışılır.

İkinci olarak Dinamik kayma mukavemeti özellikleri; dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı hesaplanabilir. Mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi içinde göçme seviyesi olarak belirlenen birim kayma seviyesine ulaşmak için gerekli dinamik kayma gerilmesi oranının ve çevrim sayısının bilinmesi gereklidir.

Konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte hacimsel deformasyon değişiminin belirlenmesi ve boşluk suyu basıncı gelişimi de deneylerden edinebileceğimiz zemin özellikleridir.

Tekrarlı yüklemelerde altında zeminleri davranışlarında görülen kesin bir ayrıma göre iki gruba ayırabiliriz; İnce daneli, kohezyonlu ve kaba daneli, kohezyonsuz zeminler. Bu bakımdan değişik gerilme şartlarında yapılacak dinamik deneylerle kumların siltlerin ve belli oranda silt içeren ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenmelidir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda kohezyonlu, ince daneli ve kohezyonsuz kaba daneli zeminlerin, tekrarlı yükler altında büyük deformasyonlara uğrayarak mukavemetlerinde önemli oranda kayba uğradığını göstermektedir. Meydana gelen bu mukavemet kayıpları sonucu oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle, zeminde kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. İçerisinde belli oranda kil olan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının artan deformasyonlarının yanında sınırlı kalması sonucu taşıma gücünde önemli miktarda azalma meydana geldiği görülürken, kumlu zeminlerin de drenaj imkânı bulamaması ve artan boşluk suyu basınçları altında zeminin direncini kaybederek sıvı gibi davrandığı görülür. 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.(Elibol, 2005)

Deney sonuçlarına etkiyen parametreleri başlıca iki gruba ayırırsak.(Çizelge 2.1)

Çizelge 2.1 : Deney sonuçlarına etkiyen parametreler

Kohezyonlu zeminlerde yumuşamaya bağlı taşıma gücü kaybına etkiyen parametreler.	Kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmayı doğrudan etkileyen parametreler
Plastisite indisi	Boşluk oranı (rölatif sıkılık)
Doygunluk derecesi	Dane şekli
Su muhtevası	Dane boyutları ve dağılımı
Aşırı konsolidasyon oranı	Orta asal gerilme
Çevre basıncı	Çevre basıncı
Çevrim sayısı	Çevrim sayısı
Birim kayma genliği	Birim kayma genliği
Yatay toprak basıncı katsayısı	Yatay toprak basıncı katsayısı
Konsolidasyon basıncı	Efektif konsolidasyon basıncı

Bu parametreler dışında numune hazırlama yönteminin ve deney sisteminin, sınır koşulları ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bakımından sonuçlara etkisi gözlemlenmiştir.

2.2.1 Silt, Siltli Kıl ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

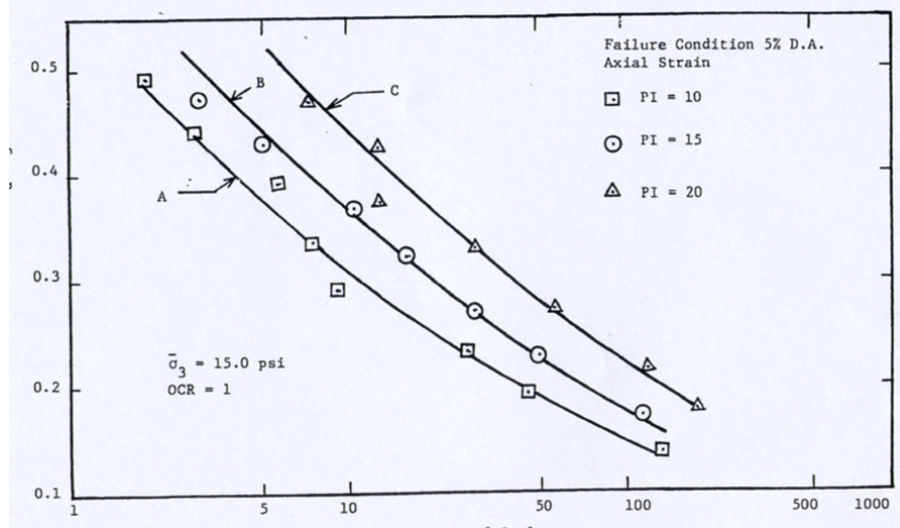
Silt zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışı bazı araştırmalarda belli miktarda silt içeren kumlarınkinden farklı elde edilirken, bazı çalışmalarda da benzer özellikler göstermiştir. Silt zeminler temiz kumlar gibi sıvılaşabilirler ancak bu sıvılaşma davranışı kumlarınkinden farklı olarak belirli miktar sıkışma ve drenajlı durumda artık boşluk suyu basıncı sönmelenmesi nedeniyle konsolidasyonu da beraberinde getirmektedir. Siltlerde tekrarlı yüklemeler altında oluşan boşluk suyu basıncı

artışları davranışa etkiyen; kil ve/veya kum miktarı, ince danelerin plastisitesi, boşluk oranı ve efektif konsolidasyon basıncı gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Bu da zeminin dinamik kayma mukavemetini etkilemektedir.

Plastik olmayan siltlerde ve içerisinde belli miktarda plastik silt olan kohezyonsuz zeminlerde yapılan çalışmalarda, bu tür zeminlerin tekrarlı yüklemeler sonucu hızla artan boşluk suyu basınçları nedeniyle sıvılaştığı ve efektif gerilmelerin sıfıra düştüğü belirlenmiştir. (Seed, 1976, Sandoval, 1989). İnce daneli zeminlerde yapılan çalışmalarda, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Buna göre her ikisi de arttığında dinamik mukavemette artış meydana gelmektedir.

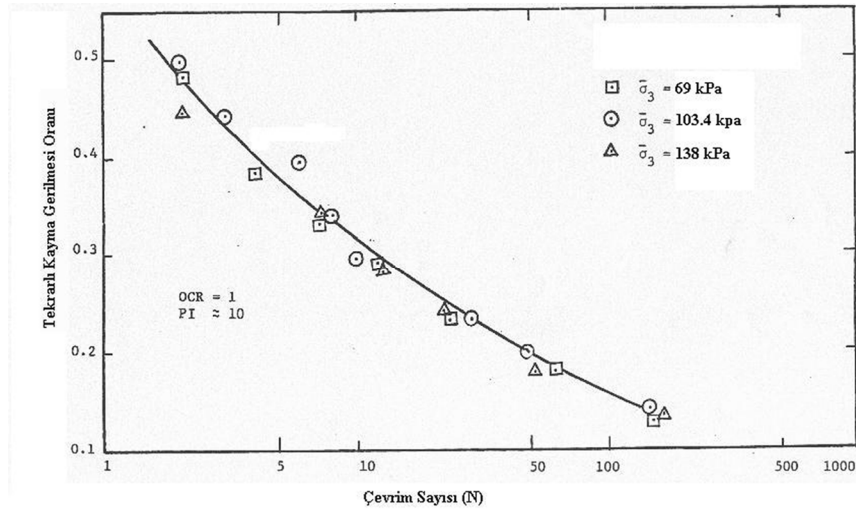
Puri (1984), yaptığı çalışmada plastisitenin etkisini belirlemek üzere göçme kriterini, % 5 çift genlikli deformasyon seviyesi olarak alıp, Şekil 2.1 de görülen dinamik mukavemet eğrileri ile ifade etmiştir. Buna göre, laboratuarda hazırlanan silt numunelerde % 10-20 aralığında plastisite indisi arttıkça zeminin dinamik mukavemeti de artmaktadır.

Yine Puri (1984) tarafından laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları görülmektedir(Şekil 2.2).Çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonu seviyesi zeminde göçme kriteri olarak alınmıştır. Plastisite indisi % 10 olan siltli numunelerde farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde numunelerde 0.1-0.5 arasında değişen oranlarda tekrarlı gerilme uygulanmış ve sonuçlarda fazla bir farklılık görülmemiştir.



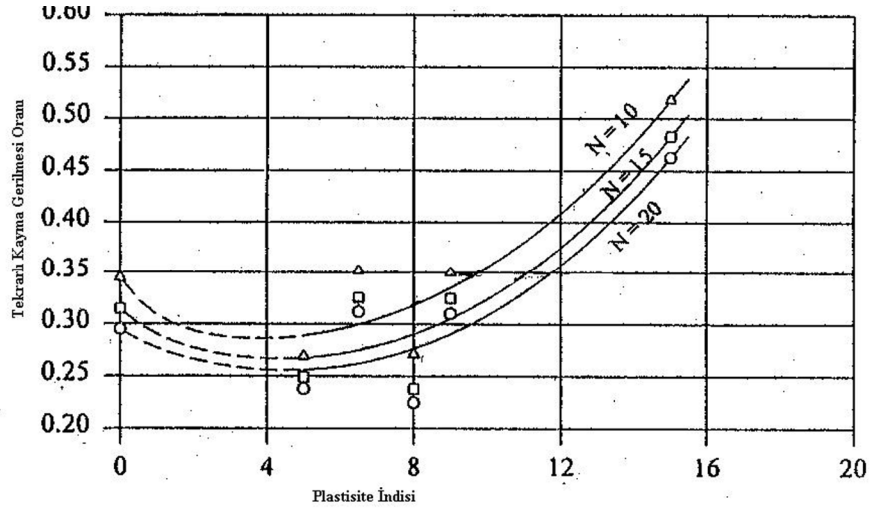
Çevrim Sayısı

Şekil 2.1 : Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışlarının plastisite indisine etkisi (Puri, 1984)



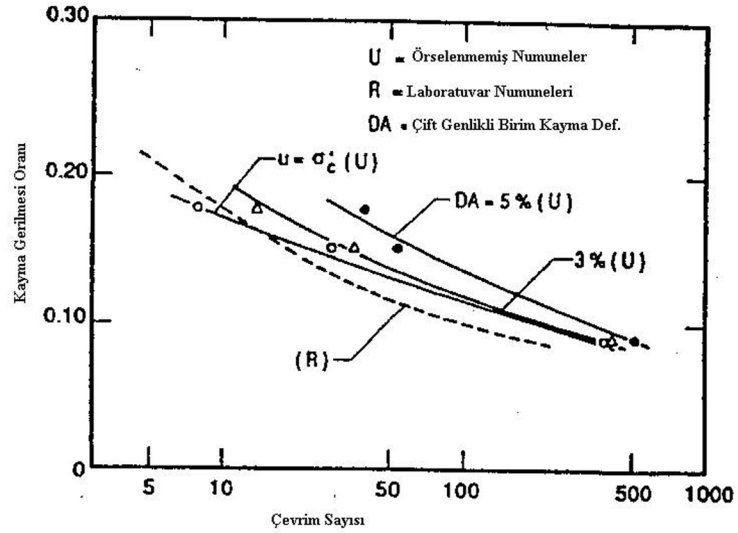
Şekil 2.2 : Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984)

El Hosri (1984), sadece plastisite etkisini araştırmak amacıyla boşluk oranına göre normalize edilen gerilme oranı ile plastisite indisi ilişkisi çizilmiş, % 5 plastisiteye kadar gerilme oranında azalma görülürken, sonraki değerlerde plastisite indisi ile gerilme oranı artmaktadır. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 : Siltli ve kumlu zeminlerde dinamik mukavemetin plastisite indisiyle değişimi (El Hosri, 1984)

Zhu ve Law (1988) ise örselenmemiş ve laboratuarda hazırlanan plastik olmayan siltli numunelerde yaptıkları deneylerde sabit boşluk oranında siltlerin dinamik mukavemetlerinin kumlarınkine benzediğini kaydetmişlerdir. Ayrıca, örselenmemiş numunelerde artık boşluk suyu basıncının efektif konsolidasyon basıncının % 80'i olduğu anda kayma deformasyonlarının hızla arttığını, laboratuvar numunelerinde ise bu seviyenin % 85'e karşılık geldiğini söylemişlerdir. (Şekil 2.4)

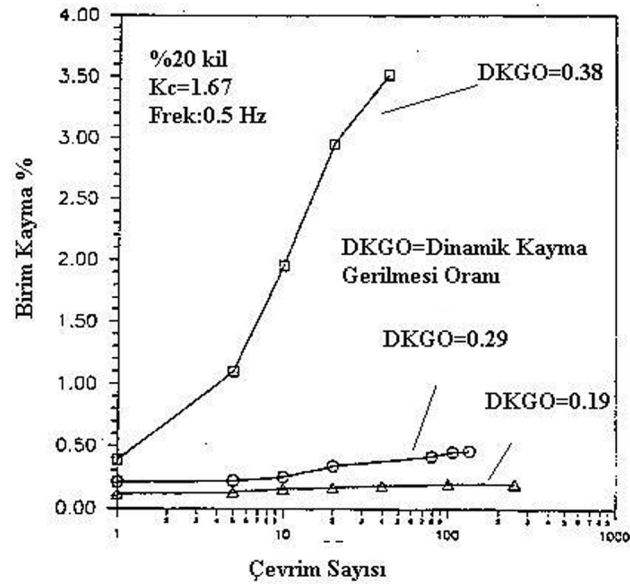


Şekil 2.4 : Örselenmemiş numunelerde ve laboratuarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988)

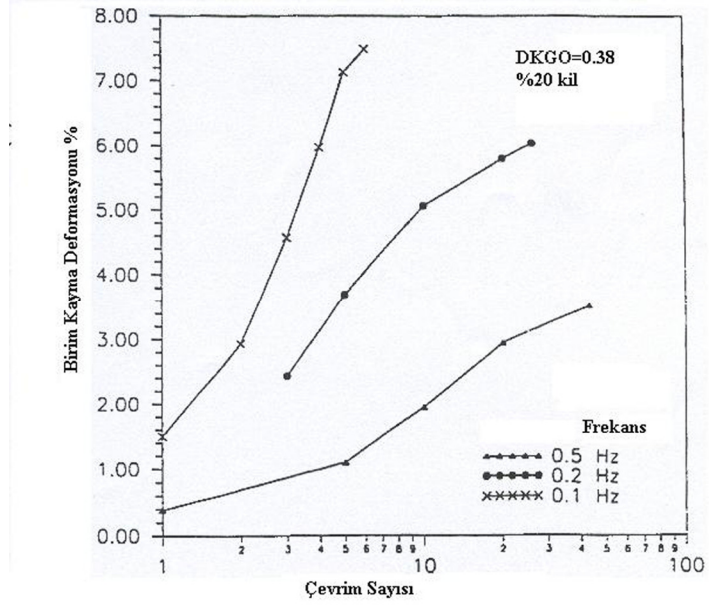
Konrad ve Wagg (1991) anizotropik olarak konsolide edilen killi siltler üzerinde yaptıkları drenajsız dinamik deneylerde, saf siltten % 40 kil içeren killi-silt karışımlarına kadar olan zeminlerde deformasyon seviyesinin üniform olmayan boşluk suyu basıncı dağılımında etkili olduğunu belirtmiştir.

Kil miktarı % 20 olan silt-kil karışımına ait birim kaymanın çevrim sayısı ile değişimini gösteren eğriler Şekil 2.5, 2.6, 2.7 'dedir. Şekil 2.5 ve 2.7 de farklı tekrarlı gerilme genliklerinde, aynı yükleme frekansında yapılan dinamik deneylerde birim kaymanın çevrim sayısı ile olan değişimi gösterilirken,

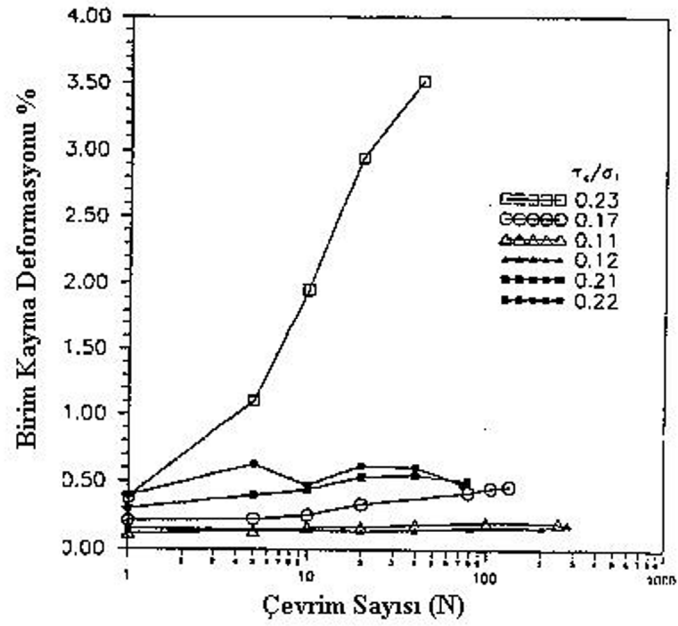
Şekil 2.6 'da birim kayma oluşumuna yükleme frekansının etkisi gösterilmiştir. Buna göre frekans attıkça aynı çevrim sayısında numunede oluşan birim kaymalar azalmaktadır. Dolayısıyla tekrarlı yüklemenin frekansı, ince daneli zeminde dinamik mukavemeti arttırmaktadır.



Şekil 2.5 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği- çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

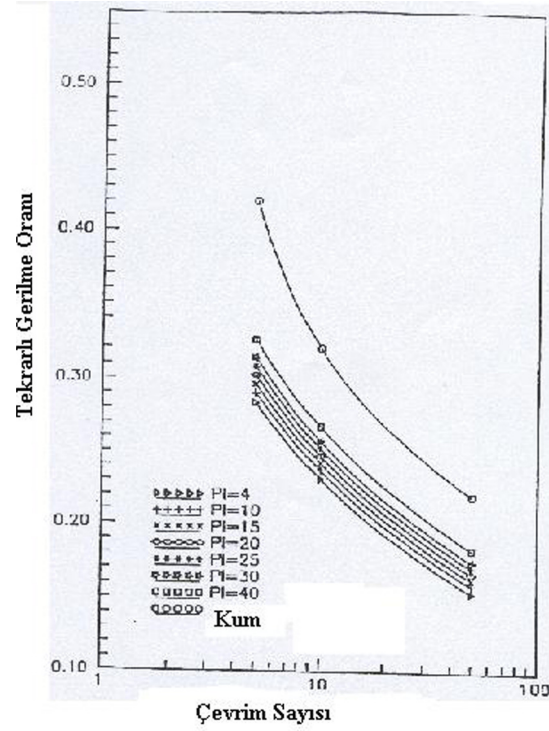


Şekil 2.6 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi .(Wagg, 1990)



Şekil 2.7 : Tekrarlı şekil değiştirme genliği –çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

Liu (1992) regresyon analiziyle elde ettiği dinamik mukavemet eğrilerinde, 10 çevrimde plastisite indisinin ince daneli, kohezyonlu zeminlerde dinamik mukavemet üzerindeki etkisini araştırmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu 1992)

Sandoval (1989), Prakash ve Sandoval (1992), siltlerin sıvılaşma potansiyeline plastisite indisinin etkisini araştırmıştır. Düşük plastisiteli siltte ($I_p = \% 1.7-3.4$), $\% 5-10$ oranında kaolin kili ekleyerek hazırladıkları numuneleri, boşluk suyu basıncı efektif çevre basıncına eşit olana kadar veya $\% 5-10-20$ birim kayma genliklerine ulaşılana kadar tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Sonuçlardan, düşük plastisitelere, plastisite indisi arttıkça siltlerin dinamik mukavemeti azalmaktadır.

Benzer şekilde, siltli zeminde kil yüzdesi arttıkça, göçmenin oluşması için aynı çevrim sayısında aksel deformasyon miktarı artmakta buna karşın dinamik gerilme oranı azalmaktadır. .

Das ve diğ. (1999) tarafından yapılan dinamik üç eksenli deneylerde $\% 9-14$ plastisite indisi değerlerine sahip killi silt numunelerde sıvılaşma meydana gelmiş, $\% 15$ ve üzeri plastisiteye sahip numunelerde ise boşluk suyu basıncı artışları sınırlı kalarak dinamik mukavemetteki azalma, yumuşama ile kendini göstermiştir.

Prakash ve Guo (1999) ise silt ve kil karışımlarının tekrarlı yükler altındaki davranışlarını belirlemişlerdir. Plastik olmayan siltlerde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı oluşumunun kumlardakine benzediğini söylemişlerdir. Ancak düşük miktarda da olsa yüksek plastisiteli kil eklendiğinde zeminde oluşan kohezyon etkisiyle sıvılaşma dayanımı artmaktadır.

Yoda ve diğ. (2001) tarımsal alanda plastisite indisi % 6 olan kil numuneleri için yapılan tekrarlı burulmalı kesme yüklemesi sonucunda, burulma kesme gerilmesinin ilk çevrimde ondan sonra gelecek değerlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çevrim sayısı arttıkça önce genliği azalır ve sonra sabit kalır.

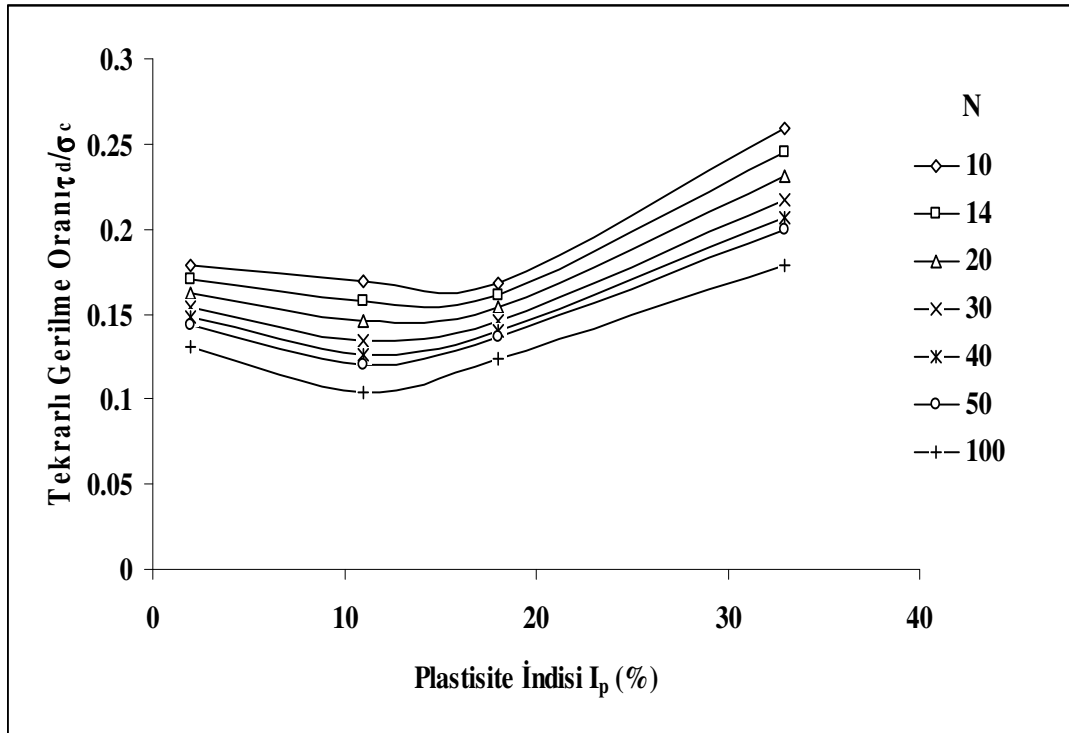
Pekcan (2001), İzmit Depremi sonrası Adapazarı'ndan aldığı siltli kil ve killi siltli zemin numunelerine dinamik yükleri deprem sırasında Adapazarı'nda meydana gelen yüklere benzer şekilde (Tekrarlı Gerilme Oranı 0.3 ile 0.55 arası) seçerek ve 1 Hz. Frekans ile uygulamıştır. Dinamik üç eksenli deney aletiyle yapılan deneyler sonucu ortaya çıkan en önemli sonuç; bazı silt ve kil karışımlarının tekrarlı yükler altında % 100 boşluk suyu basıncı oluşması veya % 5 iki eksenel deformasyon kriterlerine göre sıvılaşabildiklerini göstermiş olmasıdır. Ayrıca siltli killer ve killi siltlerde boşluk suyu basıncı oluşumu kumlarda ve plastik olmayan siltlerdeki göre daha yavaş olduğunu ve kil, silt karışımlarının dinamik dayanımları boşluk oranındaki azalma ve plastisite değerindeki artışla beraber artmakta olduğunu söylemiştir.

Thevanayagam ve Martin (2002), arazi incelemeleri ve deney sonuçlarından, siltli zeminlerin hacimsel sıkışma potansiyeli ve sıvılaşma sonrası sıkışma özelliklerinin dane temas noktalarındaki gerilmelere ve rölatif sıkılığa bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Erken ve Özay (2003) killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesine oranına etkisini inceledikleri çalışmada örselenmemiş normal konsolide killi zemin numuneleri üzerinde üç eksenli dinamik deneyleri 0.50 Hz frekansında yapmışlardır. Deney sonuçlarından plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Dinamik kayma gerilmesi oranı $\sigma_d/2\sigma_c$ çevrim sayısı N , ilişkileri üzerinde birim boy değişimi seviyesi $\varepsilon_{da}=\%5$ değeri için plastisite arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı artmaktadır. Ayrıca $\sigma_d/2\sigma_c$ üzerinde kıvamın da önemli etkisi olmaktadır. Aynı çevrim sayısı dikkate alındığında yumuşak kıvamlı numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranı düşük olmaktadır.

Ülker (2004) Adapazarı'ndan getirilen siltli ve killi zeminler üzerinde deneylerini yapmıştır. Bu deneylerden hayli geniş bir yelpazede sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin deney sonuçları plastisitenin siltlerin dinamik mukavemetine etkisini ortaya koymaktadır. İzotropik olarak 100 kPa basınçta konsolide edilen üç farklı plastisiteye sahip siltli numunelere diğer tüm deneylerde olduğu gibi 0.1 Hz

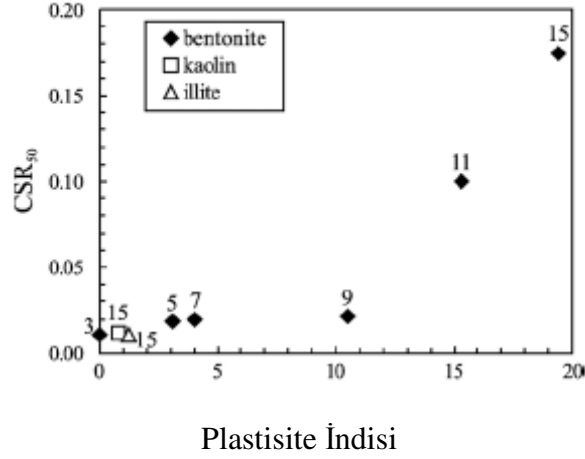
frekansında farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri uygulanmıştır. Sonuçlara göre plastisite arttıkça dinamik mukavemet artmaktadır. Ancak bu artış bu çalışmada yaklaşık % 10 plastisite indisi değerinden sonra gerçekleşmiştir. Plastisite indisi % 2 olan siltli numunenin dinamik mukavemeti, % 11 plastisiteli siltli numuneden az bir miktarla da olsa daha fazlayken, % 18 plastisiteli siltli kil zemine yakın elde edilmiştir. Bu durumun, kum miktarı da yüksek olan düşük plastisiteli silt zeminin daneler arası sürtünme mukavemetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca daha yüksek plastisiteli siltlere göre konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı da fazladır. Bununla birlikte siltlerde plastisite indisi % 11'e kadar arttıkça zeminin dinamik mukavemeti azalırken, bu değerden sonra plastisite arttıkça aynı çevrim sayısında numunenin göçmeye ulaşması için daha büyük gerilme seviyeleri gerekmektedir.(Şekil2.9)(Ülker,2004)



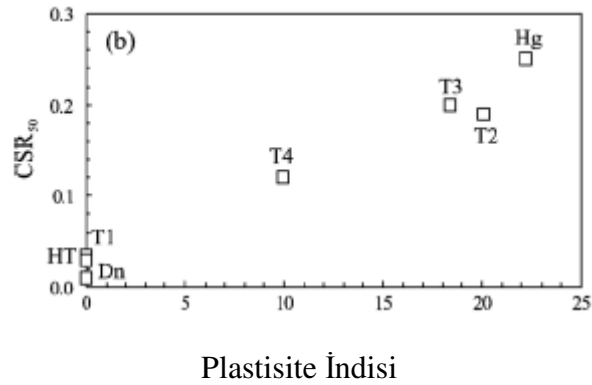
Şekil 2.9 : Tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi değişimi ($\gamma_{z0}=\pm\% 2.5$, $\gamma_{kc}=12.9-14.3 \text{ kN/m}^3$)

Sokolov, Osipov, Sassa ve Gratchev (2006) killi zeminlerin sıvılaşmasıyla ilgili çalışmalarında, killerin sıvılaşmasının killerin içeriğiyle ve minerolojisiyle alakalı olabileceği sonucunu çıkarmışlardır. Çalışmaya göre plastisite indisi ve kayma gerilmesi oranı arasındaki ilişki yapay karışımlar (Şekil 2.10) ve doğal zeminler

(Şekil 2.11) için çok benzerdir bu da plastisite indisinin killerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede bir kriter olabileceğini gösterir.



Şekil 2.10 : Yapay karışımlar için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)-Plastisite İndisi grafiği



Şekil 2.11 : Doğal zeminler için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)-Plastisite İndisi grafiği

2.2.2 Diğer Zemin Türlerinin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

Çalışma kapsamı dışında olduğu için kumlu, kumlu siltli ve siltli zemin türlerinin tekrarlı yükler altında davranışlarını zemin türlerine göre yapılan deneyleri ve alınan sonuçları bu konu başlığı altına kısaca incelenmiştir. Tekrarlı yükler altında farklı türde zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda yükleme koşullarına bağlı olarak da zeminlerde farklı davranış özellikleri gözlemlendiği bilinmektedir. Davranış özelliklerini etkileyen faktörlerin sadece zemin türü ve yükleme koşulları olduğunu

söylemek yanlış bir tespit olur. Tekrarlı yükler altında yapılan deneylerde zaman içinde çok farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Buna karşın alınacak sonuçları etkilemede yükleme koşulları ve zemin türünün ne kadar önemli olduğu yapılan çalışmalarda ortaya çıkan ilginç sonuçlarla görülmektedir. Bugüne kadar yapılan deneylerde farklı indeks özellikleri içeren zeminlerle, iki zemin türünün karışımı ve tabakalı zeminlerle ilgili yapılan çalışmalara rastlıyoruz. Bu bölümde çeşitli zemin türlerinin tekrarlı yükler altında davranışlarını zemin türlerine göre yapılan deneyleri ve alınan sonuçları irdeleyeceğiz.

2.2.2.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı

Kum zeminlerde, suya doymuş zeminlerin tekrarlı yükler altındaki danelerel özellikleri, sahip oldukları boşluk oranı, başlangıç konsolidasyon şartları ve uygulanan gerilmenin genlik değerinin yeterli koşulları sağlaması halinde belirli bir çevrim sayısı sonunda büyük şekil değiştirmeler meydana getirdiği bilinmektedir. Bu mukavemet kaybının başlıca nedeninin zemin içerisindeki boşluk suyu basıncının drenajsız koşullarda uygulanan tekrarlı kayma gerilmelerine bağlı olarak hızlı bir şekilde artması ve buna bağlı olarak ortalama efektif gerilme değerinin sıfıra yaklaşmasının olduğudur. Genel olarak suya doymuş, üniform, gevşek, ince kum veya siltli kum zeminlerde görülebilen bu olaya ve ortaya çıkan sonuçlarına göre genel olarak “sıvılaşma” adı verilir. Bu nedenler sıvılaşma üzerinde yapılan çoğu çalışmalar kumlu zeminler üzerinde yapılmıştır.

Hem laboratuarda hem de arazide yürütülen deneysel çalışmalar ışığında sıvılaşma olayının aydınlatılması amacıyla birçok inceleme ve araştırılma yapılmıştır. Sıvılaşma olayının gelişimi ve mekanizmasının aydınlatılması ilk olarak Seed ve Lee (1996) tarafından üç eksenli dinamik deney aletinde yürütülen deneylerle ortaya konulmuştur. Yürütülen deneysel çalışmalarda belirli bir çevre basıncında konsolide edilmiş suya doymuş gevşek temiz kum numuneleri üniform bir tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan çeşitli dinamik deney aletleri ile sürdürülen çalışmalarda sıvılaşmaya karşı en hassas zemin türünün suya doygun gevşek ince kum zeminlerin olduğu görülmüştür. Peacock ve Seed (1968), Ladd (1974) ve Seed (1979)’in laboratuarda sonradan oluşturulmuş kum zeminler üzerinde yürüttükleri dinamik deneyde zeminde sahip olduğu rölatif sıkılığın, başlangıçtaki

konsolidasyon basıncının, uygulanan tekrarlı gerilmenin ve bu gerilmenin uygulama tekrar sayısının kumların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Suya doygun kum zeminlerin tekrarlı yükler altında ve büyük deformasyon seviyelerinde ortaya koydukları dayanım özellikleri ve bunların yükleme sayısına bağlı olarak değişimi, sıvılaşma, çevrimsel oynaklık ve diğer benzeri olayların meydana gelmesinde belirleyici olmaktadır. Yeterli koşullar oluşturulduğunda tekrarlı yükler altındaki kumlar, içerisindeki boşluk suyu basıncının artmasıyla beraber mukavemetini kaybederken, değişik faktörlere bağlı olarak farklı davranış türeri ortaya koyabilmektedir. Özellikle yükleme sayısının miktarı, çevre basıncının değeri zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı ve anizotropik koşullar bu davranış türlerinin oluşmasında etken faktör olmaktadır. Buna göre çevre gerilmesindeki ve boşluk oranındaki farklılıkların kum zeminlerin dinamik özelliklerini ortaya koyan kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde değişiklikler oluşturduğu belirlenmiştir. Bu etken faktörlerin kum zeminlerin dinamik dayanımları üzerinde oldukça belirleyici etkileri olduğu tespit edilmiştir. Bu etkilerin belirlenmesi, zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyellerinin saptanmasında önemli olmaktadır. (Altun,2004)

Farklı bir çalışmada ise sıvılaşma özelliklerinde aşırı derecede küçük efektif gerilmeler altındaki kesme dayanımına ve gerilme seviyesine bağlı olarak değişimler görüldüğü (Koseki, Yoshida, Sao , 2005) tespit edilmiştir.

Kum zeminlerde ortaya çıkan sıvılaşma ve deformasyon yumuşaması olaylarının belirlenmesi konusunda birçok deneysel ve teorik araştırmalar yürütülmüştür. (Drnevich, 1972; Ishihara ve Li, 1972; Castro, 1975; Castro ve Poulos, 1977, Nemat-Nasser ve Takahashi, 1984)

Özellikle dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney aletleri kullanılarak kumlu zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin saptanması ve bu özelliklere etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir.(Bei-Lin Chu, 2006; Koseki, Yoshida, Sao , 2005 ; Tunçkok , 2005 ; Ansal – Altun , 2003 ; Dehghani ve diğ. , 1999; Hyodo ve diğ. , 1998; Lanzo vd., 1997; Lo Presti vd., 1993, 1997 ; Linvd., 1996; Vucetic, 1994; Tatsuoka vd., 1991; Alarkon-Guzman ve diğ. , 1988; Yoshimine ve Ishihara, 1988).

Bu alışmalar doğrultusunda kumların sıvılaşmaya ulaşması için gereken koşullar üzerinde tartışmalar sürmüştür. Uygulanan tekrarlı gerilmeyle beraber suya doygun kumlarda ilave boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde evre basıncına yaklaşması sonucunda zeminde oluşan birim şekil değiştirmelerin belirli bir değere ulaşması zeminin sıvılaştığı yargısına ulaşmaktadır.

2.2.2.2 Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı

Siltli zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışında en dikkat çekici şey farklı endeks özelliklerine sahipken sıvılaşma bakımından tamamen farklı sonuçlar çıkarmasıdır. Kum içerisinde bulunan silt ve kil zeminlerin kumun dinamik davranışını etkilediği 1960'lı yıllardan beri bilinmektedir. Fakat siltlerin ve killerin içeriğinin ve plastisitenin kumların sıvılaşmaya karşı direncini ne şekilde etkilediği konusunda tam bir fikir birliği sağlanmış değildir.

Yapılan bazı çalışmalarda (Finn ve diğ., 1994; Ishihara ve diğ., 1978; Okusa ve diğ., 1980; Dobry ve diğ., 1985; Garga ve McKay, 1984) silt içeriğindeki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı sonucuna varılırken, diğer bazı çalışmalarda (Shen ve diğ., 1977; Ishihara ve diğ., 1980; Tronsco ve Verdugo, 1985; Erken ve Ansal, 1994; Vaid 1994; Yasuda ve diğ., 1994) silt içeriği oranındaki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Sıvılaşmaya yönelik bu etki incelenirken elbette ince danenin kendi mühendislik özelliklerinin bu zıtlıklara sebep olabileceği dşünlmelidir. İnce malzemenin sahip olduğu plastisite, adhezyon ve kohezyon değerleri bazen bu malzemeleri sıvılaşmaya karşı kumlardan daha dirençsiz bir hale getirmektedir. Bu yüzden siltlerin veya siltli kumların dinamik özellikleri incelenirken ince danelerin kendi fiziksel ve endeks özelliklerinin ne çıkabileceğinin dikkate alınması gerekmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda yaygın olan düşünce; plastik olmayan silt içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı (Erken ve Ansal, 1994), rneğin plastik olmayan siltler üzerine yapılan başka bir çalışmada plastik olmayan siltlerin dinamik davranışının kumlara çok benzediği, kumların ve siltlerin arasındaki boşluk suyu basıncı karakterlerinin çok yakın olmasından dolayı çok önemli bir benzerlik olduğu ve bu benzerliğin gevşek kum ve gevşek siltlerin sıvılaşma potansiyelinin çok benzer olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.(Hussein ,1995), plastik silt içeriğindeki artışın ise kumların sıvılaşma direncini arttırdığı şeklindeyir. (Ishihara, 1996). Yapılan bazı çalışmalarda

da silt içerisindeki belirli oranların sıvılaşmaya karşı kritik değerler ifade ettiği belirlenmiştir. (Koester, 1994).Örneğin silt içerisindeki kil oranının etkilere farklı yönden incelenmiştir.(Andrews, 1997)

2.2.2.3 Siltli Kum Zeminlerin ve Silt Tabakalı Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

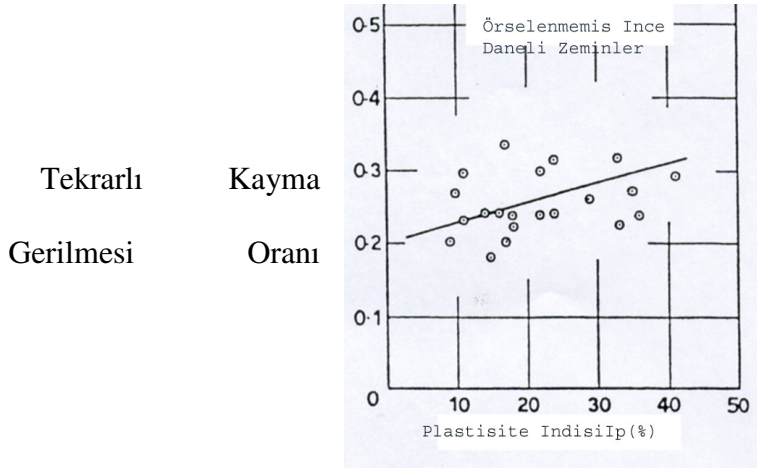
Bir önceki konu başlığı altında bahsedildiği üzere kumlu zemin içindeki belirli miktardaki ince daneli zeminlerin sıvılaşma bakımından etkisi özellikle son yıllarda iyice araştırılmaya başlanmıştır. İçerisinde belli miktarda ince dane olan kumlu zeminlerle, plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları da, büyük depremlerde gözlenen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları nedeniyle önem kazanmaktadır.

Siltli kum zeminlerin sıvılaşması günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir; Ishihara, (1978), Ishihara ve diğ. (1980), Ishihara ve diğ., (1981), Kaufman, (1981), Sherifd, Tien ve Pan, (1983), Troncoso ve Verdugo (1985), Kondoh, Sasaki ve Matsumoto, (1987), Koester ve Tauchida, (1988), Chang (1988, 1990), Troncoso, (1990), Koester, (1992), Erken ve Ansal, (1994), Erten ve Maher, (1995), Yamamuro ve Lade (1997b, 1998), Lade ve Yamamuro (1997), Amini ve Qi, (2000), Salgado, Bandini ve Karim, (2000), Yasamuro ve Covert, (2001).

Ishihara ve diğ. (1978) tarafından yapılan dinamik deneylerde, kum zeminin sıvılaşmasına ince dane miktarının etkisi belirlenmiştir. İnce dane miktarı arttıkça, kumlu zeminin dinamik mukavemeti de gevşek durumda belli bir seviyeye kadar artmaktadır. Buna karşın, sıkı olduğu durumda artış daha da fazla olmaktadır. Buradan ince danelerde bulunan kohezyon mukavemetinin, tekrarlı yükleme sırasında danelerin birbirinden ayrılmasını zorlaştırdığı, dolayısıyla da boşluk suyu basıncı artışlarının azalttığı ve geciktirdiği bu sebeple de sıvılaşma dayanımının arttığı sonucuna varılabilmektedir.

Ishihara ve diğ. (1980), tarafından kum zeminde yapılan çalışmada, belli bir yüzdeye kadar ince dane oranı arttıkça, sıvılaşma dayanımının da arttığı sonucuna varılmaktadır. Bunun yanında, plastik olmayan siltlerin % 15-20 arası plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlere göre çok daha düşük dinamik mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber, ortalama olarak % 30 ince dane içeren kum zeminde

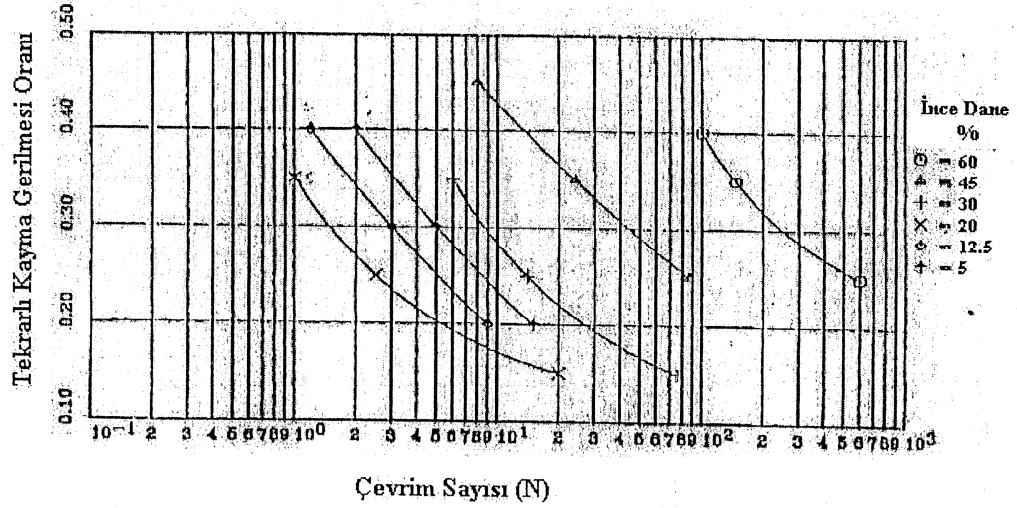
ise, plastisitenin dinamik mukavemete etkisi araştırılmıştır. Lineer dağılıma ait $I_p/35$ oranının % 30 dan fazla ince dane içeren zeminlerde ise sabit olduğu ileri sürülmüştür (Ishihara ve diğ., 1981). Bununla birlikte plastisite indisi arttıkça aynı çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine erişmek için gerekli tekrarlı gerilme oranı artmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.12 : İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, Yasuda ve Yokota, 1981)

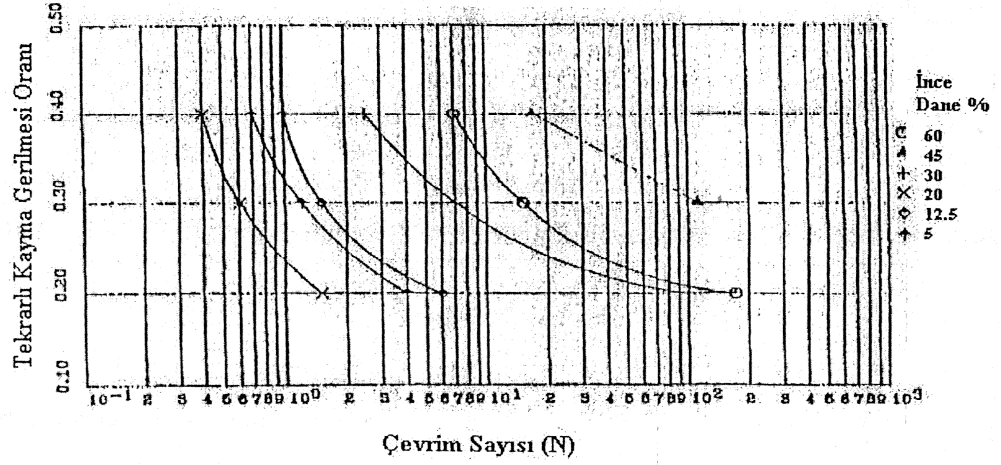
Chang (1988), Kaufman (1981), kumlarda % 10-60 arası arasında değişen oranlarda silt miktarı arttıkça, sıvılaşma potansiyelinin de arttığını söylemişlerdir. Chang, (1990), ise silt-kum karışımlarında yaptığı dinamik deneylerde, silt yüzdesinin dinamik mukavemet üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtirken, % 20 ‘ye kadar silt eklenen kumlu numunelerde mukavemetin silt miktarıyla azaldığını ancak bu durumda da ince danelerin boşluk suyu basıncı oluşumunu geciktirerek sıvılaşma dayanımını belli ölçüde arttırdığını söylemiştir. Bununla birlikte, suya doymun, temiz, orta sıkı ve iyi derecelenmiş üç farklı kum numunesinde yaptığı deneylerde ince dane oranı ve plastisite indisinin dinamik mukavemete etkisini araştırmıştır (Şekil 2.13, 2.14, 2.15). Plastisite indisi % 4 olan numunelerdeki silt miktarının dinamik mukavemete etkisi görülmektedir. En büyük mukavemet içerisinde hiç silt bulunmayan temiz kumda oluşurken silt yüzdesi % 20 olana kadar mukavemet ince dane miktarıyla azalmaktadır. Temiz ve iyi derecelenmiş kumda yapılan deneylerde ise plastisite indisinden bağımsız olarak % 5 ince dane eklendiği takdirde dinamik mukavemetin arttığı görülmektedir. Buna ek olarak, iyi derecelendirilmiş kumlar,

diğer kum numunelere göre ince dane miktarından daha az oranda etkilenmektedir. Bütün kum numunelerde en düşük mukavemet ince dane yüzdesi % 4 olan kumda görülürken, temiz ve iyi derecelenmiş kumlarda % 2 ince dane oranı, genel olarak sıvılaşma dayanımını attırmaktadır.



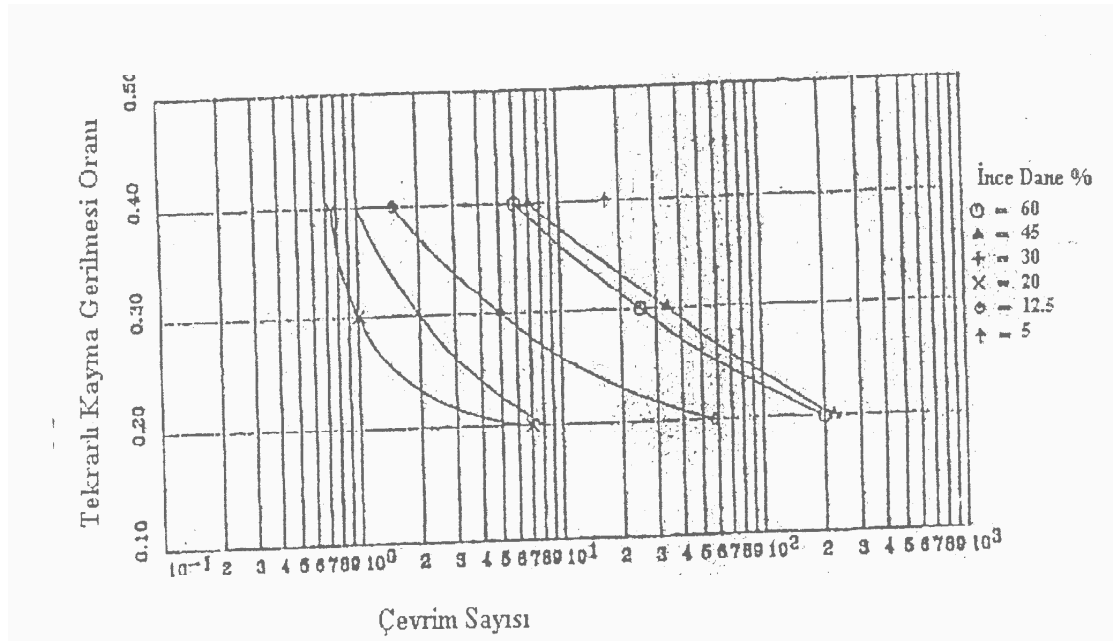
Şekil 2.13 : Plastikite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Kaufman (1981) ve Sherif ve diğ. (1983), benzer granulometri eğrilerine ve endeks özelliklerine sahip farklı plastisitedeki silt miktarının kum-silt karışımının dinamik mukavemetini belirlemek üzere dinamik 3 eksenli ve dinamik burulmalı kesme dene aletiyle % 5 çift genlikli deformasyon seviyesine kadar deneyler yapmışlardır. Şekil 2.5' den de görüleceği gibi ince dane yüzdesi arttıkça kumlu zeminlerde dinamik mukavemet artmaktadır. Saf silt içeren numunelerde dinamik mukavemet, % 30 veya daha az ince dane içeren numunelere göre dinamik üç eksenli deneylerde % 45 (Kaufman, 1981), Sherif ve diğ. (1983) tarafından yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerinde ise yaklaşık olarak % 65 daha fazla mukavemet elde edilmiştir.



Şekil 2.14 : Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Koester ve Tsuchida, (1988), A.B.D., Çin ve Japonya'dan elde ettikleri ince daneli kum zeminler üzerindeki çalışmalarında, ince dane oranının sıvılaşma eğilimi olan kumlu zeminleri, olmayanlardan ayırmada yeterli bir parametre olmadığını söylemişlerdir.



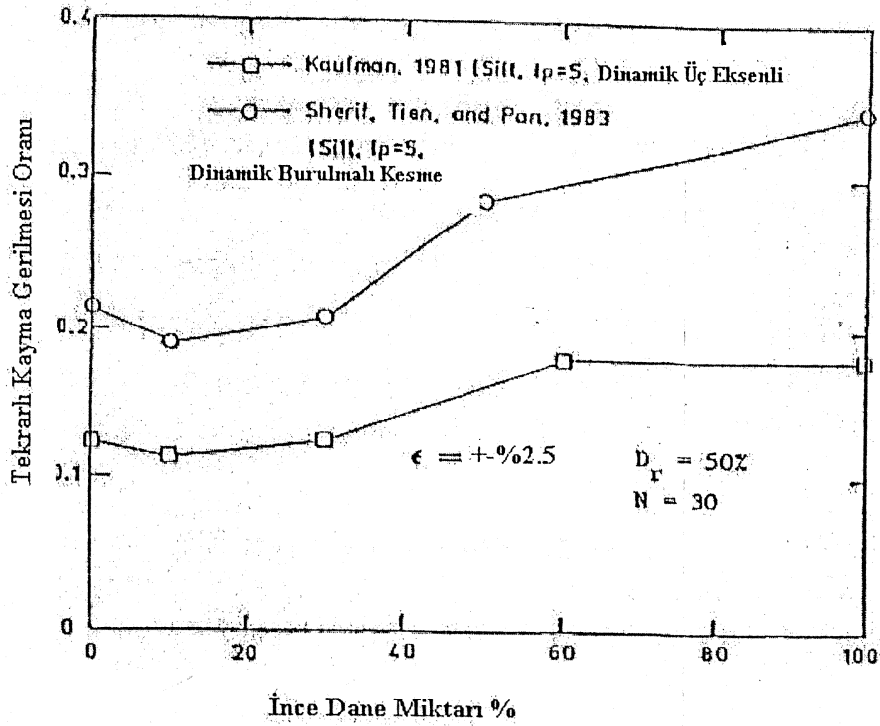
Şekil 2.15 : Plastisite indisi % 4 olan iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Koester (1992) kum zeminlere değişik oranlarda düşük plastisiteli silt ve plastik kil katarak, sıvılaşma dayanımını, yaptığı dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı

kesme deneyleriyle belirlemişlerdir. Deney sonuçlarında belirli bir boşluk oranına sahip kum zeminde % 20 oranla ilave edilen düşük plastisiteli ince dane miktarına kadar sıvılaşma dayanımı artmaktadır (Şekil 2.21). Temiz kumda ise dinamik burulmalı kesme mukavemeti diğer ince daneli kumlara göre daha büyüktür. Bununla birlikte laboratuarda Casagrande aletiyle yaptığı likit limit deneylerini, koni penetrasyon aleti ile yaptığı deney sonuçlarıyla karşılaştırdıktan sonra, bulgularını arazideki sıvılaşma ve yumuşama potansiyeli yüksek olan ve önemli taşıma gücü kayıplarının gözlemlendiği bölgelerdeki endeks deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Casagrande aletinde yaptığı likit limit deney sonuçlarının koni penetrasyonla bulduğu değerlere göre % 4 daha düşük su muhtevasında olduğu belirlemiştir. Buradan kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yükler altında dinamik mukavemet kayıplarının belirlenmesinde bu farkın dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Koester (1992), dinamik üç eksenli deney aletinde ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırladığı farklı türdeki numuneleri izotropik olarak konsolide ettikten sonra yaptığı deneylerle ince dane türü ve oranının kum-silt-kil karışım zeminlerinin dinamik mukavemeti üzerine olan etkisi araştırmıştır. Dinamik burulmalı kesme deney aletinde ise dört tür numune kullanarak izotropik ve anizotropik koşullarda dinamik deneyler yapmıştır. Kullandığı numuneler; temiz ince kum; plastisite indisi $PI = \% 10$ olan % 20 ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 25$ olan % 20 ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 15$ olan % 45 ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum numuneleridir. Bununla birlikte bu iki tür deney sisteminin sonuçları arasında ilişki olduğunu belirtmiş, bu durumun zemin granulometrisine, tekrarlı yüklemenin genlik ve frekansına ve numune hazırlama yöntemine bağlı olduğunu belirtmiştir. Deney sonuçlarından, % 20 'den fazla ince dane içeren kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımının, temiz ince kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımına kıyasla daha az efektif çevre basıncına bağlı olduğu görülmüştür.

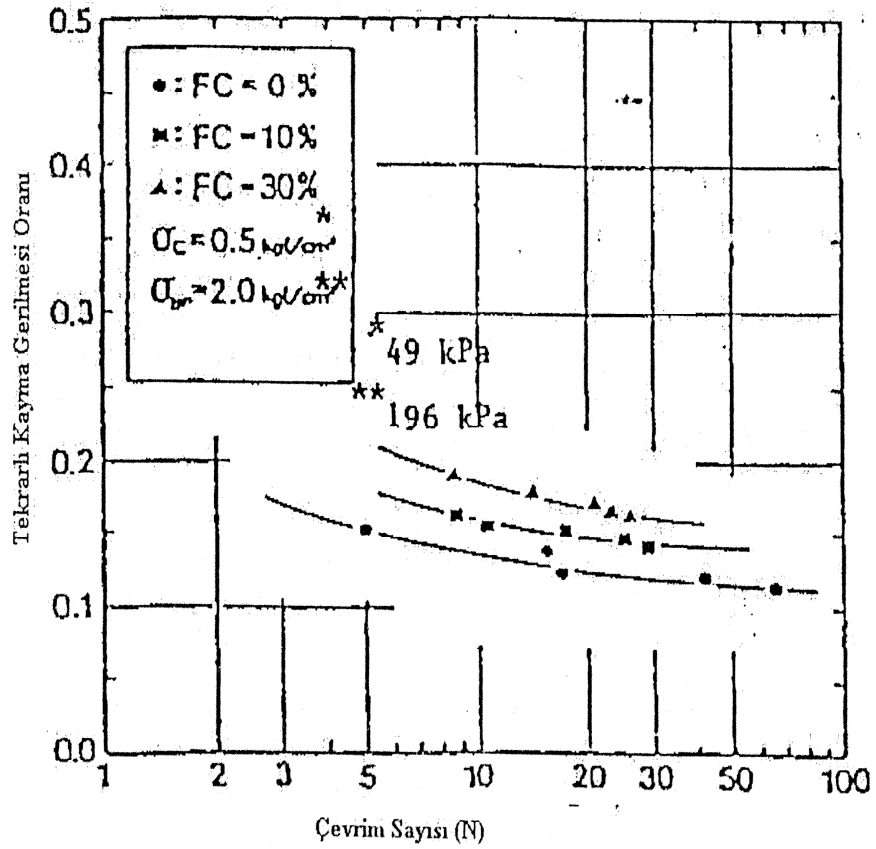


Şekil 2.16 : Düşük plastisteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981 ve Sherif ve diğ. 1983)

Ayrıca kumlar üzerinde yaptığı gerek dinamik üç eksenli gerekse dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptığı sıvılaşma deneylerinin, ince dane türü ve miktardan direkt olarak etkilendiğini ve belirli bir düzeye kadar eklenen ince dane miktarının sıvılaşma dayanımını arttırmadığını; ancak bu sınır değerini üzerine çıktığında, plastisite indisinden bağımsız olarak, sıvılaşma dayanımının, ince dane yüzdesiyle arttığını belirtmiştir. Troncoso (1990), 0.85 sabit boşluk oranında, % 0-30 arasında değişen oranlarda silt içeren kumların dinamik mukavemetini araştırmıştır. Artan silt miktarıyla, değişen dinamik mukavemetler Şekil 2.23 de gösterilmiştir. Aynı boşluk oranında silt yüzdesi % 30'a kadar arttıkça, kum zeminin mukavemeti azalmaktadır. Troncoso (1990), sabit boşluk oranında gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği sonuçların diğer yapılan araştırmalardan farklı olduğunu öne sürmüştür.

Erken ve Ansal, (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde yapılan deneylerde ise plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşma dayanımının da arttığı görülmüştür (Şekil 2.9). Erten ve Mahler, (1995) ise kumlarda boşluk suyu basıncı

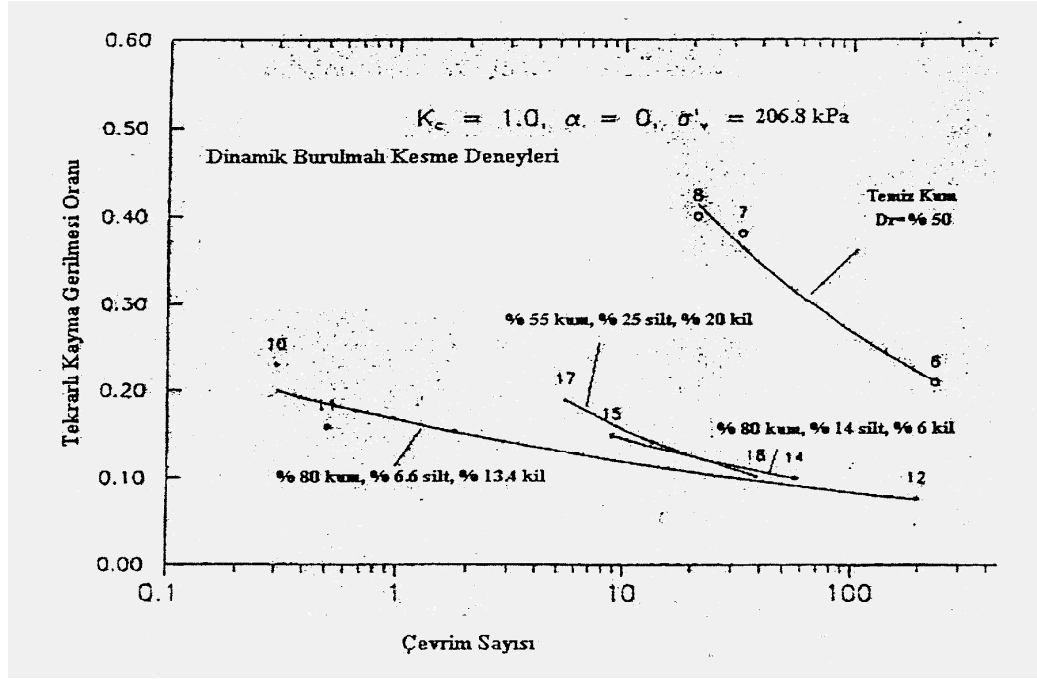
oluşumuna ince dane miktarının etkisini incelemek amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır.



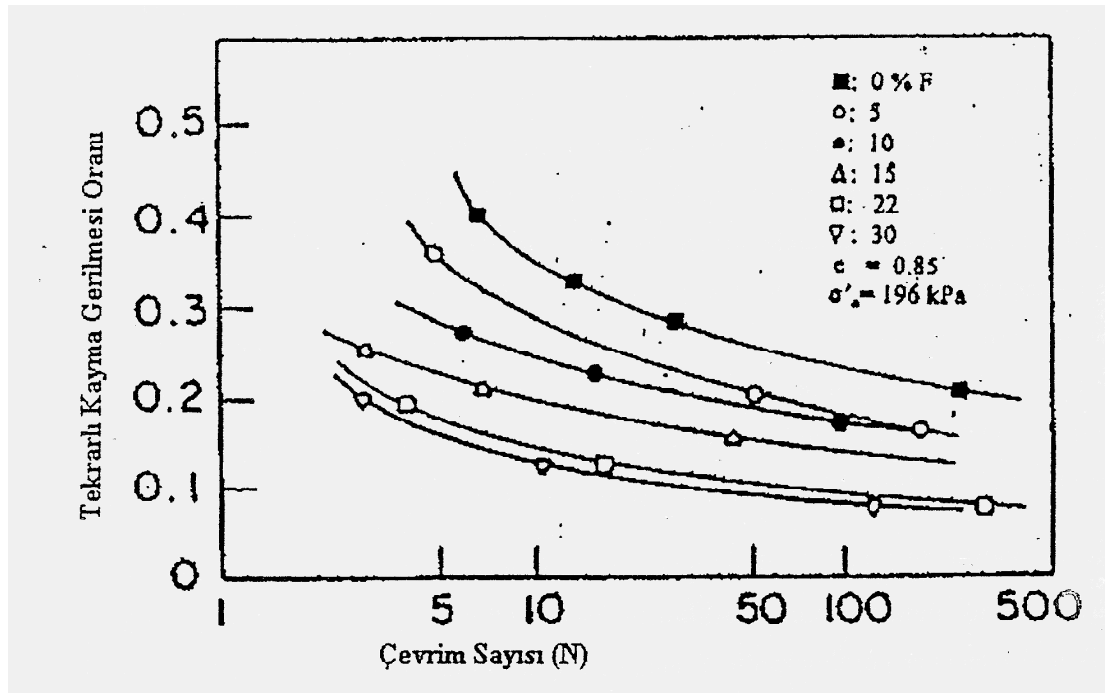
Şekil 2.17 : Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987)

Silt miktarı, plastisite ve boşluk oranı, deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler olarak belirlemiştir.

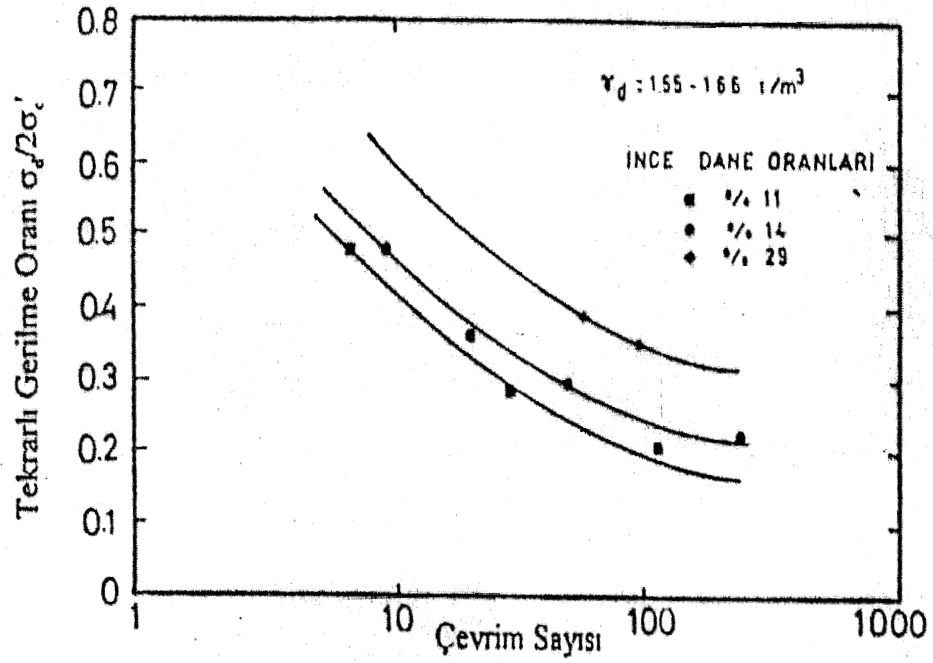
Elde edilen sonuçlardan, silt miktarının ve plastisitesinin, boşluk suyu basıncı oluşumunda $\% 10^{-2}$ birim kayma deformasyonundan küçük değerlerde etkinin olmadığı, siltli kumlarda ise akma deformasyonu eşik değerinin temiz kumlardakiyle aynı olduğu görülmüştür. (Şekil 2.25)



Şekil 2.18 : İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992)



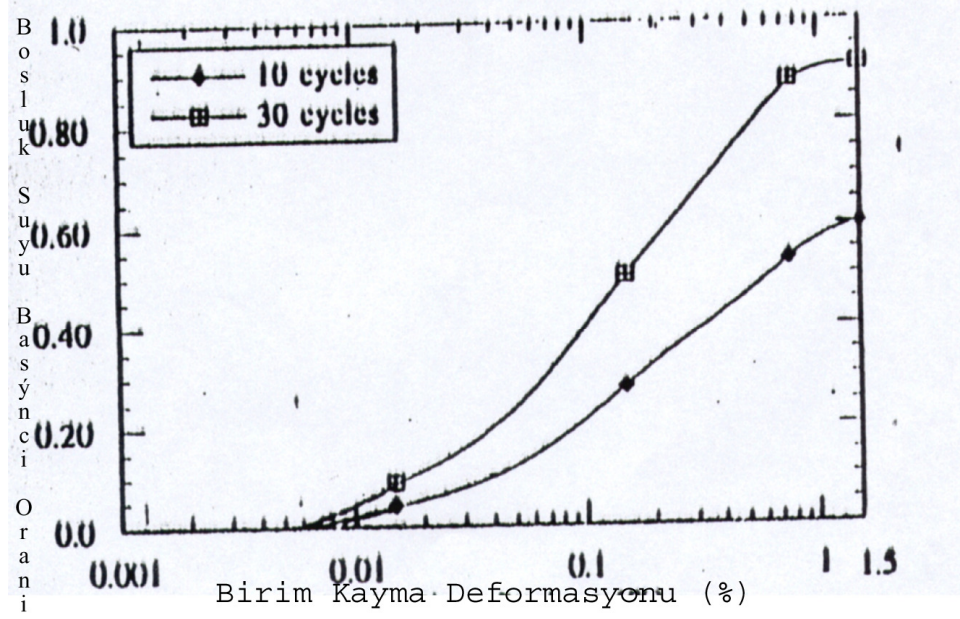
Şekil 2.19 : Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (F= Silt yüzdesi) (Troncoso, 1990)



Şekil 2.20 : Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1984)

Buna göre, % 0.015 ve % 0.15 birim kayma seviyesine kadar yapılan deneylerden elde edilen boşluk suyu basınçları saf kumlarla % 10 plastik olmayan silt içeren kumlarda yaklaşık aynı seviyelerdeyken, % 0.75 ve % 1.5 birim kayma seviyesinde boşluk suyu basınçları temiz kumlarda daha düşük değerlerde kalmaktadır.

Erten ve Maher tarafından yapılan diğer çalışmalarda ise, % 60 silt miktarına kadar eklenen plastik olmayan siltin, kum numunedeki boşluk suyu basıncı oluşumuna bir etkisi olmadığı, % 60'ın üzerindeki silt miktarıyla boşluk suyu basıncının düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 2.21 : Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995)

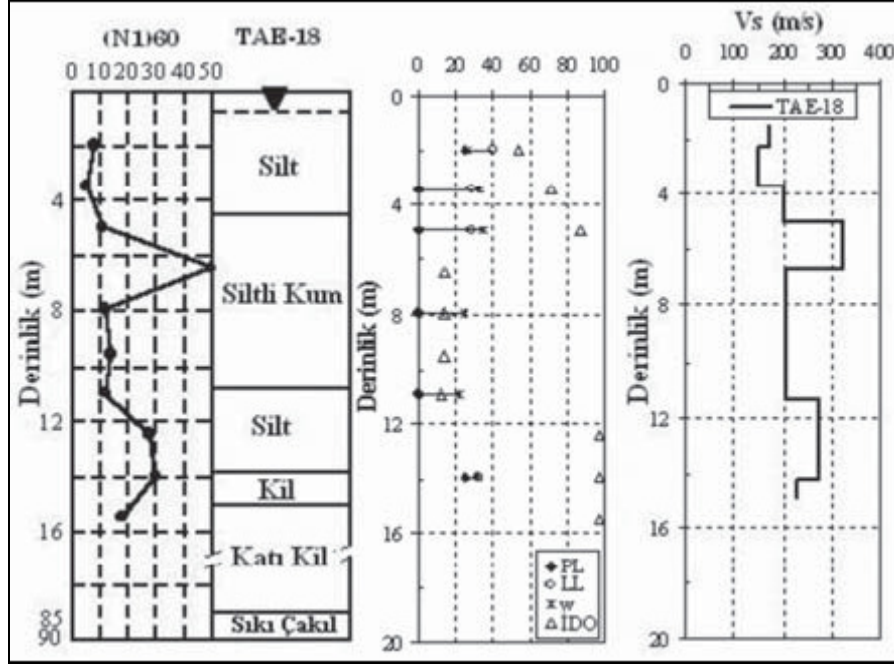
Amini ve Qi, (2000), tarafından homojen olarak hazırlanan ve 250 kPa çevre basıncı uygulanan silt-kum karışımı numunelerde dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan bir seri deneyde % 10'dan % 50'ye kadar artan silt miktarının, N=10 çevrim sayısına karşılık gelen dinamik gerilme oranında % 60'a kadar bir artışla sebep olduğu görülmüştür. Çevre basıncının 50, 100, 250 kPa değerlerinde ve sabit boşluk oranında yapılan deneylerde, üniform ve tabakalı zeminlerin davranışları birbirine yakın elde edilmiştir. Buna göre çevre basıncı arttıkça, sıvılaşma dayanımı azalmaktadır. Homojen olarak hazırlanan ve % 30 silt içeren numunelerde çevre basıncının 50 kPa'dan 250 kPa ' a kadar artmasıyla, N= 10 çevrime karşı gelen dinamik gerilme oranında % 38 bir azalma meydana gelmektedir. Tabakalı olarak hazırlanan numunelerde ise bu azalma % 20 seviyesindedir (Amini ve Qi, 2000).

Polito ve Martin (2001) ise kumların sıvılaşma dayanımına plastik olmayan ince danelerin etkisini araştırmışlardır. Plastik olmayan siltlerde aynı zeminde bulunan kumların dinamik davranışına hangi zeminin daha etkin olduğunu belirlemek için, kum zemin iskeletinin sahip olduğu boşlukların hangi oranda siltle dolu olduğunu bilmek gerektiğini söylemişlerdir. Araştırmalardan, kum zeminin yapısını örselemeden daneler arası boşlukların alabileceği en büyük silt miktarına sınır değer silt yüzdesi adı verilmiştir ve yaklaşık olarak % 25-45 arasında bulunduğunu

gözlemiştir. Eğer kum zeminin boşlularının bir kısmı siltle doluyorsa, zeminin dinamik davranışına kum zeminin sahip olduğu rölatif sıkılık etkili olmaktadır. İskeletin boşluk oranı azaldıkça mukavemet artmaktadır. Bu karışım zeminin içeriği silt miltarı sınır değerini üzerindeyse, bu durumda davranışa silt etkili olurken, tüm zeminin rölatif sıkılığı dinamik mukavemete etkilemektedir. Buna karşın rölatif sıkılık, bir önceki duruma göre daha az oranda mukavemeti değiştirmektedir. (Polito ve Martin, 2001).

Depremler sırasında zemin sıvılaşması ile ilgili başka bir çalışmada (Erken, 2004) ise suya doymuş kumlu, düşük plastisiteli ve plastik olmayan siltli zeminlerde deprem yükleri altında boşluk suyu basınçlarının artması ile efektif basınçlar azalarak tamamen sıfır veya sıfıra yakın değerlere düşerler. Efektif gerilmenin sıfıra yakın değere düşmesi sonucu zeminin taşıma gücü tamamen ortadan kalkar. Sıvılaşan zeminde drenaj koşulları ve zeminin geçirgenliğine bağlı olarak su kumlu zemini kısa sürede terk ederken düşük plastisiteli siltte zamana bağlı olarak terk edecektir. Hem kumlu hem de düşük plastisiteli siltlerde sıvılaşma sonucu zemin yüzeyinde farklı oturmalar oluşmaktadır. Bu nedenle de eğer yapının temel sistemi yeterli güvenlikle inşa edilmedi ise zemindeki düzensiz oturmalar önce temel sistemini ve daha sonra üst yapıyı etkilemeye başlar. Bu nedenle zeminlerin sıvılaşabilirliğinin yapı tasarım aşamasında bilinmesi ve ona göre gereken önlemlerin alınması gerekir.(Erken, 2004), (Şekil 2.22)

Yine aynı çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşabilirliği üzerine bir araştırma yapılmıştır. Genel olarak gevşek yerleşimli olan kum tabakasının altında katı silt ve killeri bulunan sondaj mahallinde kayma dalgası hızları şekilde görüldüğü gibi zemin tabakalarının Ohta ve Goto (1978) tarafından verilen formülle ($V_s=85.3*N^{0.348}$) hesaplanmıştır. Burada N, düzeltilmemiş standart penetrasyon sayısıdır.

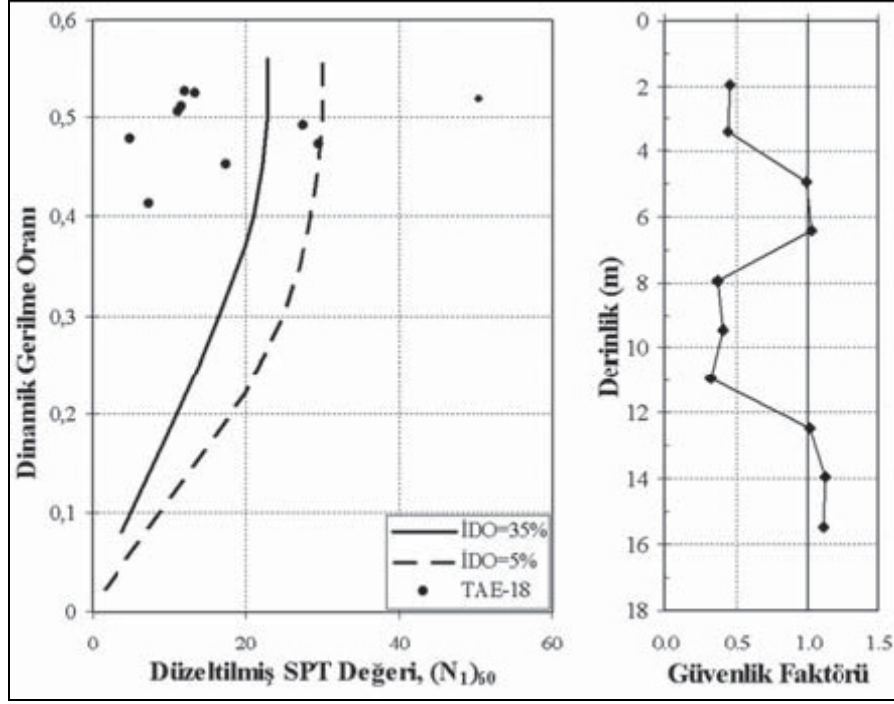


Şekil 2.22 : TAE-18 sondajındaki zemin kesiti ve kayma dalgası hızı

Sıvılaşma direncini değerlendirmek için Seed ve diğ. (1985) tarafından verilen grafik kullanılarak zeminlerin içerdiği ince dane oranı ve (N1)60 değerlerine göre dinamik kayma direnç oranı (DKDO) elde edilir. Bu değer ile depremde oluşan dinamik kayma gerilme oranı (DKGO) karşılaştırılması ile sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü (GF) elde edilir.

$$GF = DKD \setminus DKGO \quad (2.1)$$

Güvenlik faktörünün $GF \leq 1$ olması durumunda silt ve kum tabakaları için sıvılaşmadan söz edilebilir. Bu sondaj loglarına ait düzeltilmiş SPT-(N1)60 ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişki ve güvenlik faktörünün derinlikle değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi depremde oluşmuş dinamik kayma gerilmesi oranı 0.41-0.53 arasında değişmekte olup ince dane oranı %5 eğrisinin solunda sıvılaşma aralığı içerisinde yer almaktadır. Güvenlik faktörünün derinlikle değişimine bakıldığında yaklaşık 13.0 m derinliğe kadar devam eden silt ve kum tabakalarda $GF \leq 1$ olması nedeni ile büyüklüğü 7.5 olan bir depremde sıvılaşma riskinin bulunduğu görülmektedir. Bu yöntemle göre 13.0 m derinliğin altında kalan zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı dirençleri yüksektir (Erken, 2004), (Şekil 2.24)

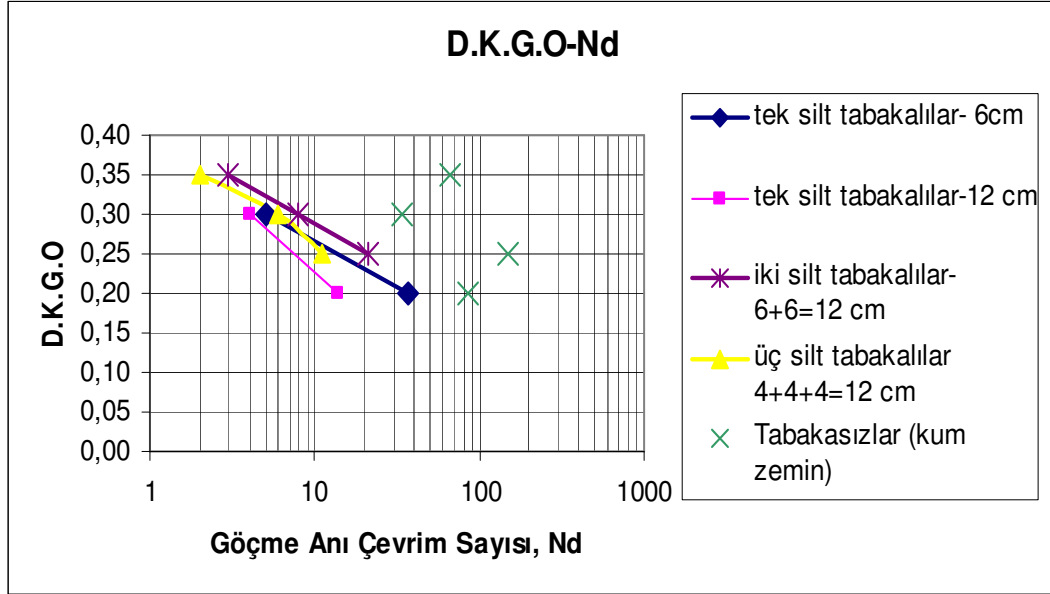


Şekil 2.23 : Düzeltilmiş SPT darbe sayısı-Dinamik kayma gerilmesi ilişkisi ile güvenlik faktörünün derinlikle değişimi

Tunçok (2005) çalışmasında ise farklı endeks özelliklerine sahip tabakalı silt-kum zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışlarını ve mukavemet özellikleri belirlenmesi için dinamik burulmalı kesme deney aleti ile laboratuvar ortamında hazırlanan tabakalı silt-kum zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Çalışmanın amacı tabakalı zemin olarak hazırlanan plastisite indisi % 18 olan silt numune ve rölatif sıkılıkları $Dr = \% 51-53$ arasında değişen silt ve kum numunelerle hazırlanan tabakalı silt-kum zeminlerin farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının incelenmesidir. Bununla birlikte, farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan deneylerde tabaka kalınlığı ve tabaka sayısına bağlı olarak numunede meydana gelebilecek deformasyonun hangi çevrim sayısında oluşacağı ve tabaka sayısının ve kalınlığının numunenin dinamik davranışına ne tür bir etki edeceği incelenmeye çalışılmıştır.

Tabaka kalınlığı ve sayısının göçme anındaki çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi incelenmiştir. Silt tabaka sayısındaki artışa ve buna bağlı olarak her bir tabaka kalınlığındaki azalma neticesinde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları dikkate alındığında genel olarak silt tabaka sayısındaki artış neticesinde silt-kum zemin daha erken çevrim sayılarında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir.

Bununla birlikte iki ve üç silt tabakalı silt kum zeminde; üç silt tabakalı silt-kum zemin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında şekil değiştirmelere maruz kaldığı gözlenmiştir. Bu durum nedeni; artan tabaka sayısına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki zayıf bölgelerin numunenin artan kayma gerilmesi oranlarından daha çabuk etkilenmesine neden olmuş buda numuneyi daha erken çevrim sayısında sıvılaşmaya ve deformasyona maruz bırakmıştır (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 : Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Tek, İki, Üç Silt Tabakalı ve Tabakasız (Kum Zemin))

Smith (2006), sitli kum ve killi kum zeminlerin rijitlik ve dinamik davranışlarını incelemiştir.

Siltli ve kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarına etki eden faktörlerin de incelenmesi gerekir. Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranış özelliklerinin incelenmesinde hem arazi deneyleri, hem laboratuvar deneyleri, hem de teorik modellerden faydalanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilen laboratuvar deney aletlerinde geliştirilen daha gerçekçi modeller sayesinde, hazırlanan numuneler mümkün olduğunca doğadaki koşullara uygun gerilmelere maruz bırakılarak, mümkün olduğunca doğadaki koşullara uygun gerilmelerinde olabildiğince yine doğada gerçekleşen gerilmeleri temsil edebilme olanağına yaklaşılmıştır. Zeminin çok fazlı karmaşık yapısı nedeniyle zeminlerin gerilmeler altındaki dayanım ve deformasyon özellikleri konusundaki araştırmalar yapılan tüm bu gelişmelere rağmen halen en doğruya daha yakın olmaktan öteye gidememektedir.

Laboratuvar deneylerinin yürütülmesinde sonuca etkiyen birçok faktörden bahsedilebilir. Kullanılan deney aletinin sınır koşulları, seçilen numune hazırlama yöntemi, uygulanan yüklemenin türü ve numunede oluşturduğu gerilme koşulları, ölçüleme ve veri edinim sistemlerindeki farklılıklar yürütülen deneylerden elde edilecek sonuçlar üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Örneğin aynı zemin özellikleri ve deney koşullarında üç eksenli deney aleti ve burulmalı kesme deney aletinde yürütüldüğü belirlenen deney sonuçları birbirlerinden oldukça farklıdır. (Tatsuoka ve diğ., 1986b). Bu farklılığın deney aletlerinin sınır koşulları ve numunede yaratılan gerilme koşullarındaki değişikliklerden kaynaklandığını söylenebilir. Numune hazırlama yöntemlerindeki farklılıklar da deney sonuçlarını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bu nedenle yapılacak çalışmanın amacı doğrultusunda sonuçlar etkileyecek bu faktörlerin iyi bilinmesi gerekir.

Bu faktörlerin etkisi incelenirken sonucu etkileyebilecek diğer faktörlerin sabit kalmasına dikkat edilmelidir. Örneğin kumlu ve siltli numunelerin dinamik özellikleri karşılaştırılırken aynı numune hazırlama yöntemi ile benzer rölatif sıklıktaki numuneler elde edilebilecek şekilde deney hazırlanmalıdır.

Çevrim Sayısının Etkisi: Zeminlerin etkisi altına bulundukları yüklere göre ortaya koydukları davranışlar birbirinden farklı olmaktadır. Dinamik yükleri statik yüklerden ayıran en temel özellik dinamik yüklemenin çevrimsel olarak uygulanmasıdır. Bu nedenle de tekrarlı yüklemelerde en önemli parametrelerden biri uygulanan yükün çevrim sayısıdır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerindeki değişikliklere neden olan tekrarlı yüklerin genlik değeri ve zeminin fiziksel özellikleri kadar yükün uygulanma süresinin ve çevrim sayısının da önem taşıdığı bilinmektedir. Özellikle suya doymuş gevşek kumlarda tekrarlı yükler dolayısıyla ortaya çıkan mukavemet kaybı ve sıvılaşma olayı uygulanan gerilmenin çevrim sayısı miktarı ile çok yakından ilgilidir. Zeminler üzerinde dinamik etkiler oluşturan doğa olaylarından depremlerin de belirli etkisi olduğu düşünülürse özellikle depremlerin sebep olduğu mukavemet kaybı incelenirken uygulanan yükün çevrim sayısının etkisinin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Deprem sırasında ana şokun 10-20 arasında çevrim sayısında değişik genlikli ve nispeten yüksek frekanslı tekrarlı yüklemeleri oluşturduğu bilinmektedir. Buna karşın deniz dalgaları etkisi altındaki zeminler çok daha büyük çevrim sayılarında ve daha düşük frekanslı tekrarlı yüklemeler etkisi altındadır. Dolayısıyla zeminlerin dinamik özellikleri

araştırılırken yapılacak olan çalışmalar incelenen problemin amacı doğrultusunda yapılmalıdır.

Rölatif Sıklığın Etkisi: Tekrarlı yükler altında suya doymun kum zeminlerde oluşan birim şekil değıştirme genliklerindeki artan bir değışim göstermektedir. Belirli bir genlikteki üniform kayma gerilmelerine maruz bir zemin içerisinde artan boşluk suyu basınçları ile birlikte efektif gerilme değeriinde meydana gelen azalmaların zeminin mukavemet özelliklerindeki etkisi birim şekil değıştirmelerin ani bir şekilde artışı ile kendisini göstermektedir.

Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını statik yükleme durumunda olduğu gibi belirleyen en temel etkenlerden birisi zeminin sıklık oranıdır. Genel olarak kohezyonsuz zeminlerin yapısal davranışlarının rölatif sıklığa bağılı olarak açıklamak alışlagelmiş bir uygulamadır. Kum zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı tekrarlı yükler altında zeminde oluşacak mukavemet kaybının süreci ve şeklini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Farklı rölatif sıklık değerlerine sahip ve izotropik koşullarda konsolide edilmiş suya doymun kumların drenajsız koşullarda belirli bir üniform burulmalı gerilme değeriinde kesilmeye çalışıldığında sıvılaşmaya ulaşması için gereken çevrim sayıları Şekil..de gösterilmiştir. Burada rölatif sıklığın kum zeminlerden sıvılaşabilirlikleri üzerinde etkisini görebilmek mümkündür. Buna göre de rölatif sıklığın azalması ile kum zeminin sıvılaşmaya ulaşmasının daha az bir çevrim sayısı ile ulaşılabilceğidir.

Çevre Basıncının Etkisi: Zeminlerin sıvılaşma davranışlarına etki eden deneysel parametrelerden birisinin de farklı çevre basıncı değeriinde olduğu düşünölmektedir. Zeminlerin doğada aynı çevre gerilmesi altında olmadığı farz edilirse bu farklılığın tekrarlı yükler altındaki mukavemet kaybı olayını ne şekilde etkilediğinin incelenmesi gerektiği açıktır. Yine bununla ilgili geçmişte değışik zemin türlerinde farklı deney aletleri kullanılarak laboratuvar koşullarında bir çok deneysel çalışma yürütölmüştür (Yoshimi ve diğ., 1984; Tatsuoka ve diğ., 1981; Vaid ve Chen, 1985; Bhatia ve diğ., 1985; Hyodo ve diğ., 1988).

Aynı deney yöntemi kullanılarak izotropik koşullarda farklı çevre gerilmelerinde konsolide edilmiş kum numuneleri belirli bir genlikteki üniform burulmalı tekrarlı gerilmeler uygulanarak sıvılaşması için gereken çevrim sayıları belirlenmiştir. Yine izotropik koşullarda fakat artan gerilme genlikleri uygulanarak yürütölen deneylerde de farklı çevre basınçlarının sıvılaşma özelliğine etkisi incelenmiştir. Bu deneylerde

artan gerilme genliklerinin artım oranları yaklaşık olarak eşit tutulmuştur. Bu tip gerilme koşullarında çevre gerilmesinin sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ilişkinin de yükleme deneylerinden elde edilen ilişkiye benzerlik gösterdiği düşünülmektedir.

Silt İçeriğinin Etkisi: İnce dane veya başka deyişle kohezyonlu zeminlerin varlığının granüler zeminlerin gerek statik ve gerekse dinamik özelliklerinin etkilediği bilinmektedir. Bu etkinin büyüklüğü ince malzemenin kendi özelliklerine de (plastisite, kohezyon ve adezyon kuvvet katsayısı vb.) oldukça bağlıdır. Dolayısıyla bu etki araştırılırken öncelikle ince daneli zeminlerin kendine ait fiziksel ve endeks özelliklerinin ortaya konması gerekmektedir.

Silt içeriğinin kumların dinamik davranışına etkisi üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalarda net bir sonuca ulaşılamamıştır. Ancak yürütülen deneysel çalışmalardaki genel görüş, plastik olmayan ince malzeme içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı, plastik ince malzemelerin ise tam tersine kumların sıvılaşma direncini arttırdığı yönündedir. Fakat silt ve kumların fiziksel ve endeks özellikleri ile mineralojik kökenlerindeki farklılıklar bu etkinin yönünü ve büyüklüğünü etkilemektedir.

2.3 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri

Tekrarlı yüklemelerin neden olduğu şekil değiştirme miktarı zeminlerin dinamik davranış özelliklerine direkt olarak etki eden önemli bir etmendir. Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarına bağlı olarak düşük deformasyon seviyelerinde zeminlerin gerilme şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Daha düşük deformasyonlarda ise yük altında zeminde oluşan mukavemet kayıplarında plastik davranış özellikleri önem kazanmaktadır.

Zeminlerin belirli gerilme koşulları altında şekil değiştirme seviyesinin artışıyla beraber çok farklı dinamik davranış özellikleri ortaya koyduğu bilinmektedir. Tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanı sıra artan şekil değiştirme seviyesi ile beraber zeminin mukavemet özelliklerindeki değişiminde belirlenmesi gerekir.

Deprem gibi önemli tekrar yüklere maruz kalan zemin tabakaları geniş sınırlar içerisinde değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında

kalırlar. Bunun sonucunda, zemin boşluklarındaki suyun yer değştirebilmesi için yeterli süre olmadığından zemin tabakalarında boşluk suyu artması ve şekil değıştirmeler meydana gelir. Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen bu gerilme durumunu ve davranış biçimini laboratuarda inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir (Ansal ve Erken, 1985).

Suya doygun kumlu ve siltli zeminler ani yüklemeler altında içerisindeki suyu dışarı atamadıkları için drenajsız koşullarda kayma gerilmelerine maruz kalırlar. Bunun sonucunda böyle bir yükleme ile kum zeminde büyük şekil değıştirmeler oluşmakta ve hatta sürtünme kuvvetleri yenilerek zemin sıvı davranış özellikleri gösterebilmektedir.

Bununla birlikte farklı tekrarlı gerilme oranında yapılan dinamik deneylerden sonra statik gerilme-şekil değıştirme ilişkileri arasında çevrim sayısına bağı olan bir davranış da söz konusudur. Numunelerde göçme seviyesine ulaşıldığından sonuçlar arasında pek bir farklılık olmasa da, tekrarlı gerilme oranı arttıkça, dinamik deney sonrası statik mukavemetler de az bir miktarla da olsa yüksek çıkmaktadır (Ülker, 2004).

Deprem gibi tekrarlı yüklemeler veya hızlı statik yüklemeler altında kum içerisindeki suyun pratik olarak dışarı çıkması mümkün olmayacağından, zeminde drenajsız kayma mukavemetleri gözlenebilir.

Tekrarlı gerilmeler etkisinde kalmış zeminlerin gerilme-şekil değıştirme ve mukavemet özelliklerinin incelenmesine 1960'lı yıllarda başlanmış ve günümüze kadar pek çok araştırma yapılmıştır. Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zemin davranışı ile ilgili ilk çalışmalar Seed ve Chan (1966) Thiers ve Seed (1969) tarafından yapılmıştır. Daha sonra Andersen ve diğ. (1980), Ansal (1981), Ansal ve Erken (1982, 1986, 1989), Ansal ve Yıldırım (1985) tekrarlı yükler altında davranışı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Matsui ve Bahr (1992), Özay Erken (2002), Özay (2002) örselenmemiş killi zeminler üzerinde üç eksenli dinamik deney aletinde önce tekrarlı yük uygulayıp daha sonra statik deformasyon kontrollu deneyler yapmışlardır

Tekrarlı yüklemeler altında suya doygun kumların dinamik davranış özellikleri ile ilgili çalışmalar Seed ve Lee (1996) tarafından dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile kumlu zeminlerde gerçekleşen sıvılaşma olayı incelenmeye çalışılmıştır.

Aradan geçen süre içerisinde bu konu ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır.(Lee ve Seed, 1967a,1967b; Dehghami ve diğ. 1999, Hyodo ve diğ., 1994; Castro ve Christian, 1976; Hanzawa, 1980; Seed ve Idriss, 1971; Nemat-Nasser ve Takahashi, 1984; Peacock ve Seed, 1968; Poulos ve diğ, 1985; Pradhan ve diğ. 1988a, Seed; 1979; Talaganov, 1996).

Araştırmacıların birçoğu tekrarlı yükler altında kumlarda meydana gelen bu büyük şekil değiştirmelerin sebebini dinamik yüklemenin belli koşul ve aşamalarında zemindeki efektif gerilmenin geçici olarak sıfıra düşmesine bağlayarak bu olayı sıvılaşma olarak tanımlamışlardır. Bununla birlikte zeminlerin dinamik davranış özelliklerini tam olarak kavrayabilmek için statik yükler altındaki davranışları ile beraber ele almak ve incelemek doğru bir yaklaşım olmaktadır. Bu amaçla suya doymuş kum zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışlarının kumun fiziksel özelliklerine ve yüklemenin türüne göre farklılık gösterdiği, bir çok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. (Bouckovalas ve Hoeg, 1987; Castro ve Poulos, 1977; Frost ve Drnevich, 1994; Ishihara ve Okada, 1978; Ishihara ve Takatsu, 1979; Lade ve Duncan, 1976; Lam ve Tatsuoka, 1988; Miura ve Toki, 1982; Pradhan ve Tatsuoka, 1979; Tatsuoka ve diğ.; 1983; Wong ve Artur, 1986; Yamashita ve Toki, 1993). Laboratuvar koşullarında sonradan oluşturulan zeminler üzerinde yapılan deneylerde numune hazırlama yöntemlerindeki farklılıklarının dinamik davranış üzerindeki etkileri Ladd (1974) ve Mulilis ve diğ. (1974) tarafından yürütülen çalışmalarla incelenmeye çalışılmıştır.

Buna ek olarak geçmiş yıllarda meydana gelen sıvılaşma olayının teorik olarak modellenmesi çalışmaları da Bolton ve Wilson (1989), Ishihara ve Kabilamany (1990), Jouanna ve Mokhtar (2000), Li ve Ming (2000), Nishi ve Kantani (1990) ve Ramsamooj ve Alwash (1990) tarafından yürütülmüştür.

Buna göre Verdugo ve Ishihara (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmada drenajsız koşullarda üç eksenli deney sistemiyle belli bir çevre gerilmesi altında izotropik olarak konsolide edilmiş, suya doymuş kumlarda gerçekleştirilen statik yüklemeli deneylerden saptanan zeminin davranış özellikleri gerilme izleri ile beraber Şekil 2.2 de gösterilmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerindeki davranış farklılıkları bu deneylerde kullanılan zeminlerin değişik relatif sıkılıklara sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Benzer davranış

özellikleri anizotropik gerilme koşullarında yapılan deneylerde gözlenmiştir. (Vaid ve Chern, 1985).

Birinci davranış türünde tekrarlı yüklemenin belli safhalarında zeminde görülen büyük şekil değiştirmeler zemin direncinin kaybolmasıyla oluşan deformasyon yumuşaması sonucu meydana gelmektedir. Bu durumda zemin, yukarıda bahsedilen statik durumdaki 1 ve 2. No'lu eğrilerle temsil edilen zemin davranışına benzer bir şekilde direncinin büyük bir kısmını kaybederek sabit bir gerilmeyle sürekli olarak şekil değiştirmeye devam eder. Bu davranış şekli yine sabit gerilme durumu olarak nitelendirilir ve bu hadiseye sıvılaşma adı verilir. (Ishihara ve Yasuda, 1975).

İkinci davranış türünde ise kumda meydana gelen şekil değiştirmelerin tekrarlı yüklemeler nedeniyle artan boşluk suyu basıncından dolayı efektif gerilmenin sıfıra yaklaşmasıyla beraber kumun rijitliğinin gittikçe azalması sonucunda gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu gerilme-şekil değiştirme davranış durumunun hiçbir safhasında deformasyon yumuşaması türü davranış görülmez. Zeminde oluşan belirgin şekil değiştirmeler sadece yükleme-boşaltma döngülerinde görülür.

Sıvılaşma, sınırlı sıvılaşma ve çevrimsel oynaklık olayları tekrarlı yükler altında özellikle suya doygun kum zeminlerde görülebilen en tipik deformasyon davranışlarıdır. Bu davranış türlerini ve özelliklerini belirlemek için laboratuarda gerçekleştirilen dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme vb. deneyleriyle farklı zemin özellikleri değişik yükleme koşullarında incelenir. Örneğin çevre gerilmesi, boşluk oranı gibi değişkenlerin zeminin dinamik davranışı üzerindeki etkisi birçok deneysel çalışmanın konusu olmuştur (Vaid ve Chern, 1985; Verdugo ve Ishihara, 1996). Yinede drenajsız koşullarda uygulanan tekrarlı yüklemeler altında meydana gelen şekil değiştirmelerin mekanizması tam olarak kesinlik kazanmamıştır.

2.4 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar

Tatsuoka ve diğ. (1982), dinamik burulmalı kesme deney aletinde Toyoura ve Sengenyama kumu kullanarak sıvılaşma deneyleri yapmışlardır. Rölatif sıklığın sıvılaşma dayanımını arttırdığını belirten araştırmacılar, sıkı kumlarda sınırlı ön sıvılaşma ve çevrimsel oynaklık davranışını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte ince dane içermeyen Toyoura kumunun dinamik mukavemetinin, % 1.6 ince dane içeren Sengenyama kumuna göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir.

Tatsuoka ve diğ. (1982) sıkı kumların drenajsız tekrarlı yükler altında yapılan burulmalı kesme deneyleriyle, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini araştırmışlardır. Sonuçlardan, rölatif sıkılığın belli bir değerinden sonra, % 7.5 ve % 15 birim kayma elde etmek için gerekli gerilme seviyesinin statik deneylerden elde edilen gerilme değerine yakın olduğu bulunmuştur.

Sayao ve Vaid (1991), gerilme anizotropisini ve asal eksenlerin döngüsünü araştırmışlardır.

Tatsuoka ve diğ. (1996), kumlarda mukavemet ve deformasyon özelliklerini yaptıkları burulmalı kesme deneyleriyle araştırmışlardır. Sonuçların doğruluğu açısından düşey eksenel yük ve burulma momentinin doğrulukla ölçülmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak numunede oluşan gerilmelerin membran penetrasyonu açısından düzeltilmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Yoshimine ve diğ. (1999), İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında yapmış oldukları burulmalı kesme deneylerinde drenajsız düzlem deformasyon durumunda kayma mukavemetini ve drenajsız kayma mukavemetini karşılaştırmışlardır.

Yoda ve diğ. (2001), değişik bir çalışmaya imza atarak tarım arazisindeki araçların hareketlerinin yükleme karakteristiklerini tekrarlı burulmalı kesme gerilmesi ile modelleyerek Bangkok'taki tarım arazisindeki killi silt zemin numunesinin dinamic davranışını öğrenmeye çalışmışlardır. Tarım arazi zeminleri genelde doymuş olmaması bu deney tipinin seçilmesi için en önemli etken olarak gösterilmiştir.

Shahnazari ve Towhata (2002), kumlarda gerilme-hacim değişimi ilişkisini araştırmak amacıyla dinamik burulmalı kesme deneyleri yapmışlardır. Araştırmalarında Toyoura kumu kullanarak, drenajlı deneyler altında başlangıç anizotropik gerilme durumu ile efektif çevre gerilmesinin ve birim hacim ağırlığının deney sonuçlarına ve gerilme-hacim değiştirme ilişkisine etkisini araştırmışlardır.

Ülker (2004), çalışmasının amacı olarak farklı endeks özelliklerine sahip yumuşak ve suya doymuş kumlu ve killi siltlerin ve siltli killerin tekrarlı yükler altındaki dinamik mukavemet özelliklerini belirlemeyi göstermiştir. Daha da detaylı olarak söylemek gerekirse yumuşak siltli kil zeminin dinamik mukavemetinin belirlenmesi ve tekrarlı yükleme sonrası önceden belirlenen statik mukavemetinde meydana gelen azalmanın derecesini saptanması, farklı plastisite indislerindeki silt zeminlerin dinamik

mukavemetlerinin belirlenmesi, farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarında zemin dane yapısında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan bu çalışmanın amaçları olarak sıralanabilirler.

Koseki ve diğ. (2005), dinamik burulmalı kesme deney aletini kullanarak düşük gerilmeler altında Toyoura kumunun sıvılaşma özelliklerini incelemişlerdir ve sıvılaşma özelliklerinde aşırı derecede küçük efektif gerilmeler altındaki kesme dayanımına ve gerilme seviyesine bağlı olarak değişimler görmüşlerdir.

Koseki ve HongNam (2005), dinamik üç eksenli deney aleti ve dinamik burulmalı kesme aletiyle Toyoura kumunun Quasi-Elastic deformasyon özelliklerini incelemişlerdir.

Tunçok (2005), çalışmasında dinamik burulmalı kesme deney aleti yardımıyla tabakalı zemin olarak hazırlanan plastisite indisi % 18 olan silt numune ve rölatif sıkılıkları $D_r = \% 51-53$ arasında değişen silt ve kum numunelerle hazırlanan tabakalı silt-kum zeminlerin farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının belirlemiş, farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan deneylerde tabaka kalınlığı ve tabaka sayısına bağlı olarak numunede meydana gelebilecek deformasyonun hangi çevrim sayısında oluşacağı ve tabaka sayısının ve kalınlığının numunenin dinamik davranışına ne tür bir etki edeceği incelemiştir.

2.5 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi

Yapılan çalışmalarda, deney sistemine de bağlı olarak sinüzoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapez yükleme şekilleri kullanılmıştır. Dikdörtgen yükleme biçiminin kullanılması durumunda en büyük gerilme değerinin numune üzerinde diğer yükleme şekillerine göre daha uzun süre etkimesinden dolayı daha büyük şekil değiştirmeler ve dolayısıyla daha büyük artık boşluk suyu basınçları elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının temel amacı doğadaki durumu modellemek olduğu için, deneylerde kullanılan yükleme biçimi, deprem yüklemesine eşit bir etki yaratacak tipte olmalıdır. Literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan sinüzoidal yükleme şekli, gerçekte deprem tarafından zemin tabakalarına uygulanan yükleme şekli değildir. Ancak deney sonuçları her iki tür yükleme arasında fazla bir fark olmadığını göstermektedir. Bu farkın az olması laboratuvarda yüklemenin eşdeğer tekrarlı gerilme genliği şeklinde olmasındandır. Böylece çift yönlü yüklemeyle birlikte uygulanan tekrarlı gerilme genliğinin hem çekme hem de basınç bölgesinde kalması

sağlanmaktadır. Sonuç olarak şekil değiştirmeler daha büyük olmakta; daha küçük mukavemet değerleri elde edilmektedir.

Yapılan çalışma kapsamında kullanılan dinamik burulmalı kesme deney sisteminin diğer dinamik deney aletlerine göre bazı avantajları vardır. Deneylerde kullanılan içi boş silindirik numuneler, numune yüksekliği boyunca üniform gerilme dağılımının oluşması, düşey eksenel kuvvet, burulma momenti ve iç ve dış hücre basınçlarının bağımsız bir şekilde uygulanabilmesi orta asal gerilme etkisinin incelenebilmesi, asal eksen yönlerinin istenilen koşullara göre döngüsünün sağlanması, bu avantajlardan en önemlileridir. Ayrıca anizotropik konsolidasyonun sağlanabilmesi, zeminin arazide maruz kaldığı gerilme koşullarını laboratuarda aynen modelleme açısından yarar sağlar.

2.6 Numune Hazırlama Yönteminin ve Ekipmanın Dinamik Davranışa Etkisi

Deney sonuçlarına etkileyen bir diğer parametre ise numune hazırlama yöntemidir. Laboratuvar çalışmalarında yapılan dinamik deneylerde farklı yöntemler kullanılarak farklı sıklıkta örselenmiş numuneler oluşturulabilmektedir. Bunlar arasında, ıslak sıkıştırma, suda çökeltme, kuru yağmurlama, şişleme, düşük frekanslı titreşim, vibrasyonlu yüksek frekanslı titreşim genelde kullanılan yöntemlerdir.

Tatsuoka ve diğ. (1984), numune hazırlama yönteminin dinamik burulmalı kesme deney sonuçlarına etkisini araştırmışlardır. Bunun için ince dane içermeyen Toyoura kumu ile % 2.4 ince dane içeren Sengenyama kumu kullanmışlardır. Buna karşın en büyük ve en küçük boşluk oranının belirlenmesinde kullanılan yöntem ile dinamik deneylerde kullanılan numune hazırlama yöntemi farklı olduğundan, rölatif sıklığın kumlarda dinamik mukavemete olan etkisini tek başına yeterli bir parametre olarak almanın yanlış olacağını belirtmişlerdir. Dinamik deney sonuçları, numune hazırlama yöntemine doğrudan bağlıdır. Tatsuoka ve diğ. (1984), ıslak sıkıştırma, kuru yağmurlama, ıslak vibrasyon ve vibrasyonla suda yağmurlama yöntemleri kullanarak dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları deneylerde, 20 çevrim sayısında % 10 birim kayma elde etmek için gerekli gerilme oranı ıslak sıkıştırma yönteminde elde edilmiştir. Bu sonuç, Mulilis ve diğ. (1975), tarafından bulunan sonuçla uyushmaktadır. Bunun yanında ıslak sıkıştırma yöntemi ile elde edilen mukavemetlerle, ıslak vibrasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerle yapılan dinamik

burulmalı kesme aletinden elde edilen mukavemetler (20 çevrimde % 15 birim kaymaya ulaşmak için gerekli gerilme oranı), daha büyüktür.

Vaid ve diğ. (1999), kumların drenajsız mukavemetlerine laboratuarda yeniden hazırlama yöntemlerinin etkisini araştırmışlar, kuru yağmurlama, ıslak sıkıştırma ve suda depolama yöntemleriyle elde edilen numunelerin dinamik ve statik davranışlarını incelemişlerdir. Sabit boşluk oranında ve aynı çevre gerilmesi altında, ıslak sıkıştırmayla hazırlanan numunelerin sıvılaşma potansiyeli olduğu ve hacim azalması gösterdikleri belirlenirken, suda yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin hacim artışı gösterdikleri bulunmuştur. Buna ek olarak ıslak sıkıştırmayla hazırlanan numunelerin suda çökelmeyle elde edilen numunelere göre daha üniform olmayan bir davranış gösterdikleri belirlenmiştir.

Suya doymuş kumlar dikkate alındığında, numune hazırlama yönteminin, kumun sıvılaşma davranışı üzerinde etkili olduğu görülür. Bunun nedeni ise, laboratuarda farklı numune hazırlama yöntemleriyle, farklı dane yapısı ve yerleştirme sahip farklı sıklıktaki kumların oluşturulmasındandır.

Mulilis ve diğ. (1975), farklı numune hazırlama yöntemleriyle, aynı çevre basıncı altında aynı rölatif sıklıkta sarsma tablası deneyleri yapmışlardır. Şekil 2.30'dan da görüleceği gibi, belirli bir tekrar sayısı da ön sıvılaşma meydana getirecek tekrarlı gerilme oranları arasında % 200'e çıkan farklar olmaktadır. Bu farklılığın ayrıca kumun cinsinin rölatif sıklığına ve efektif çevre gerilmesine bağlı olduğu da belirtilmiştir.

Deney sisteminin ve hazırlama yönteminin dinamik davranışa etkisi gibi deney sırasında kullanılacak ekipmanlarında alınan sonuçlara direk olarak etkisi vardır.

Örneğin Koseki, Yoshida ve Sato (2005) düşük gerilmeler altında yapılan drenajsız dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptıkları deneyler sonucu kesme gerilmesi hesaplarındaki düzeltmelerde membranın etkisinin hesaba katılmasının bir zorunluluk olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca sıvılaşma direncinin gerilme azaldıkça arttığı sonucu yanında membran penetrasyon düzeltmesinin bu eğilime önemli bir etki yapamayacağı sonucunda ulaşmışlardır.

2.7 Zemin Yapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Koşullarında Değişimi

Zemin Mekanikği'nde deneysel çalışmalar sırasında kullanılan ince daneli, kohezyonlu ve kaba daneli kohezyonsuz zeminlerin sahip oldukları yapı, üç fazlı ve daneleşel malzeme olan zeminlerin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışına doğrudan etkimektedir. Bu açıdan günümüzde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerine yapılarının etkisini belirlemek üzere çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

Youd (1977), tekrarlı yüklemenin granüler zeminler üzerindeki etkisine değışmiştir. Buna göre kumlarda yüklemeyle birlikte dilatans nedeniyle oluşan hacimsel deformasyona bağılı olarak yeniden bir yerleşim olmaktadır. Bu yeni dane düzeni ise boşluklu yapıyı etkilemektedir. Düşük deformasyon seviyelerinde kum daneleri arasında oluşan küçük çaplı boşluklar, deformasyonlar arttıkça yükleme döngüsüyle birlikte azalmaktadır. Buda tekrarlı yüklenen kum zeminlerin mikromekanizmasına etki etmektedir.

Cotecchia ve Chandler (1997), doğal kil zeminin statik kayma gerilmeleri altındaki göçme öncesindeki davranışına numune yapısının etkisini araştırmıştır. Araziden örselenmemiş olarak doğal kil zemin ile laboratuvarıda ödometre deney aletinde konsolide edildikten sonra yoğrularak üç eksenli deneyde kullanılan kil numuneleri arasında yapısal farklılık olduğunu belirten araştırmacılar elektron mikroskobu görüntüleriyle örselenmemiş numunelerin oluşumları sırasında paralel tabletler halinde sıralandıklarını söylemişlerdir.

Ülker (2004), ise çalışmaları sonucunda izotropik konsolidasyonla birlikte hem laboratuvarıda hazırlanan örselenmiş ince kumlu ve killi silt numunelerde, hem de örselenmemiş killi silt numunelerde, kaba daneler arası büyük ve ince daneler arası küçük boşluklarda belirgin bir azalma söz konusu olduğunu ve bu azalmanın, örselenmemiş zeminde daha fazla olduğunu saptamıştır ve diğeri bir saptamaya göre laboratuvarıda hazırlanan örselenmiş siltli numunede ise konsolidasyon öncesi porozite örselenmemiş numuneye göre daha büyüktür. Bir başka sonuç ise tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli zeminden elde edilmiştir. Buna göre yükleme öncesinde her üç doğrultudan alınan görüntülerin analizinden, büyük çaptaki boşlukların heterojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Tekrarlı yükleme de yeniden bir dane dağılımı ve yapısına sahip olan numunede, boşluk

aplarının da yeni yerleşime bağlı olarak değiştii ve her üç düzlemde yapılan ölçümlerde bu çap değerlerinin birbirine yaklaştığı belirlenmiştir.

Yıldırım ve Erşan (2006), tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonunu araştırdıkları çalışmada tekrarlı yükler altında zeminde meydana gelen oturmalar, zeminin daha sonra maruz kalacağı yüklere karşı konsolidasyon davranışını değiştirmekte, sıkışma indisi tekrarlı gerilme genliğine bağlı olarak azalmakta olduğunu belirlemişlerdir.

2.8 Sonuç

Literatür bölümünde çalışma konusuyla ilgili geçmiş çalışmalardan ve çalışmalardan çıkan sonuçlardan bahsedilmiştir.

Birinci bölümde öncelikle taşıma gücü kayıpları hakkındaki literatürden ve zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemlerden ve son yıllarda yapılmış çalışmalara değinilmiştir.

İkinci bölümde çalışma konusu dışında kalan diğer zemin türleriyle ilgili çalışmalara da göz atılmıştır

Son bölümlerde siltli killi ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları ve geçmiş çalışmalar genel mantık bir çerçevesinde sıralanıp literatür kapsamı içersinde ele alınmıştır.

3. DENEY YÖNTEMİ VE KULLANILAN MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ

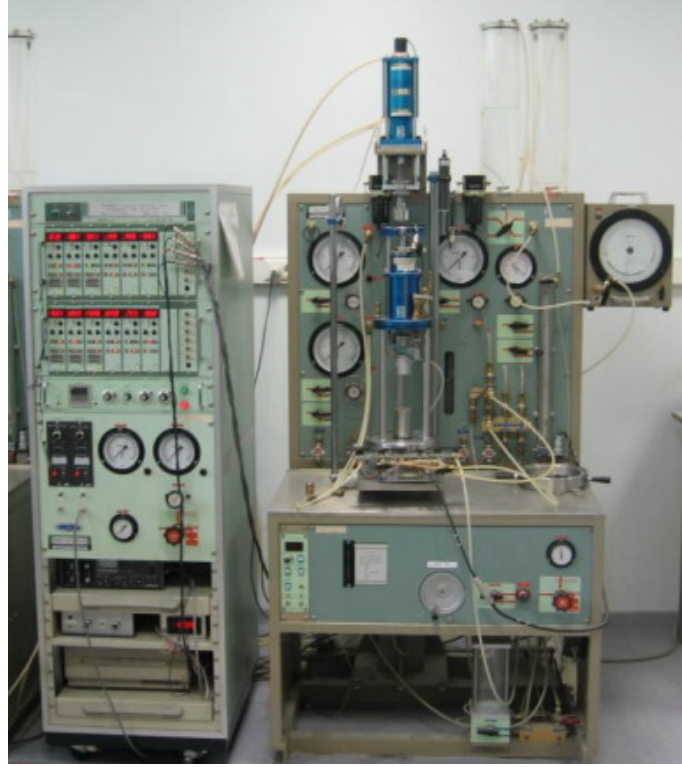
3.1 Giriş

Laboratuar çalışmalarının temel amacı doğadaki durumu modellemek olduğu için, deneyde kullanılacak numune doğal ortamındaki şartlar altında olmalı ve deneylerde kullanılan yükleme biçimi, deprem yüklemesine eşit bir etki yaratacak tipte olmalıdır. Bu yüzden deney aleti, deney yöntemi ve kullanılacak malzemenin hazırlanması çok önem taşımaktadır. Üçüncü bölümde deney aleti hakkında bilgiler ve numune hazırlama yöntemiyle deneylerde kullanılan örselenmemiş numunelerin özellikleri ve bu numunelerde oluşan gerilme-şekil değiştirme yöntemleriyle ilgili hesap yöntemleri açıklanmaktadır.

3.2 Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

Bu araştırmada dinamik deneylerin yapıldığı deney sistemi klasik üç eksenli dinamik basınç deney sisteminin Japon “Seiken Inc” şirketi tarafından geliştirilmiş bir modeli olup İ.T.Ü-JICA projesi (Japonya Uluslararası İşbirliği Kuruluşu) kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği laboratuvarına getirilmiştir.

Şekil 3.1’ ea görüldüğü gibi deney sistemi iki ana üniteden oluşmaktadır. Bunlar ünite A ölçüm ve ünite B yükleme birimi olarak isimlendirilmiştir.

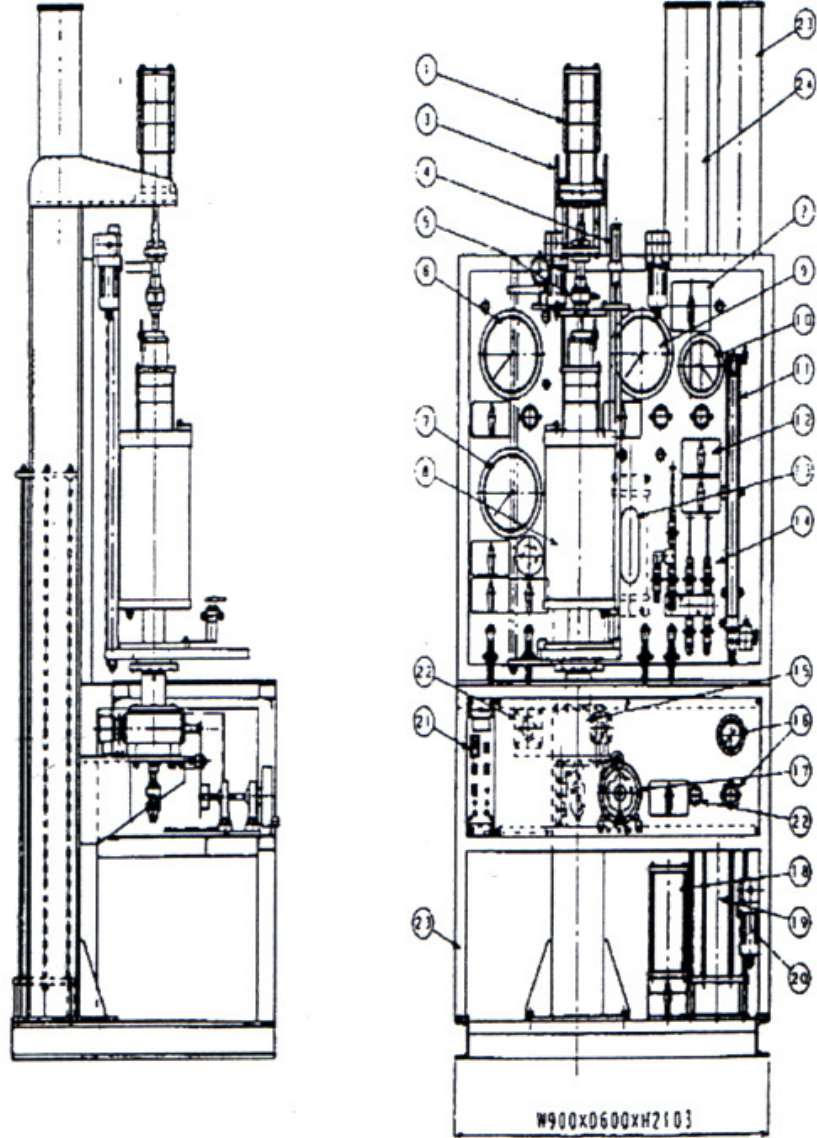


Şekil 3.1 : Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

3.3 Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre

Şekil 3.2’ de dinamik üç eksenli deney sisteminin yandan ve önden görünüşü ile üniteleri görülmektedir. Numunenin yerleştirildiği üç eksenli hücrenin 500 kgf düşey yük kapasitesi, 10 kg/cm² lik yatay yük kapasitesi veya hücre basıncı kapasitesi mevcuttur. Üst ve alt başlık parçaları değiştirilerek $\phi = 50, 60, 75$ mm çaplarında ve 100, 120, 150 mm yüksekliğinde numuneler ile deney yapılması mümkün olmaktadır. Düşey yük yükleme aletinin 200 kgf dinamik yük kapasitesi mevcuttur.

1 Pnömatik yükleme	13 Üst ters basınç tankı: 1.5 Litre
2 Ana vana valfi	14 Numuneye su giriş sistemi
3 Yükleme çerçevesi	15 Mekanik kol: Kapasite:500 kgf
4 Düşey deplasman ölçer : ± 20 mm	16 Ana basınç saati ve basınç regülatörü
5 Yük hücresi alt kısmı	17 Manüel kol
6 Düşey basınç saati: maks: 10 kgf/cm^2	18 Alt ters basınç tankı: 1.5 Litre
7 Çevre basıncı saati: maks: 10 kgf/cm^2	19 Su tankı: 10 Litre
8 Hücre	20 Hava fitresi
9 Ters basınç saati: maks: 10 kgf/cm^2	21 Hız kontrol ünitesi
10 Vakum saati: maks:-1 kgf/cm^2	22 Hava kaydırma regülatörü
11 Çift tüplü büret: 25 ml	23 Vakum tankı: 5 Litre
12 Açma kapama vanası	24 Havası alınmış su tankı: 5 Litre



Şekil 3.2 : Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Yandan ve Önden Görünüşü
(Özay, 2002)

Yükleme çerçevesinin içerisinde düşey yönde hareket eden piston vasıtası ile düşey dinamik yük üst başlığa aktarılmaktadır. Statik üç eksenli basınç deneyinin

uygulamasında ise yükleme kapasitesi 500 kgf ve yükleme hızı 0.002 -2 mm/dak' dır. Bu sistemin güç kaynağı 100 V' tur. Hava-Su ölçüm sistemi 0 ile 10 kg/cm² basınç ayarlanmasına uygundur. Çevre basıncı ile ters basıncın 0–10 kg/cm² değerleri arasında verilmesi regülatör yardımı ile düzenlenmektedir. Ayrıca bias vana yardımı ile düşey basınç, ters basınç ve çevre basıncı aynı anda arttırılabilmektedir. Alt ve üst başlıktan gelen drenaj kanallarına bağlı 25 ml' lik buretten hacim değişimi ölçülmekte ve ters basınç uygulanmaktadır. Sistemde 5 litrelik su tankı ve 5 litrelik damıtık vakum tankı mevcuttur. Basınç ayarlamaları SI ve metrik sisteme göre yapılabilmektedir.

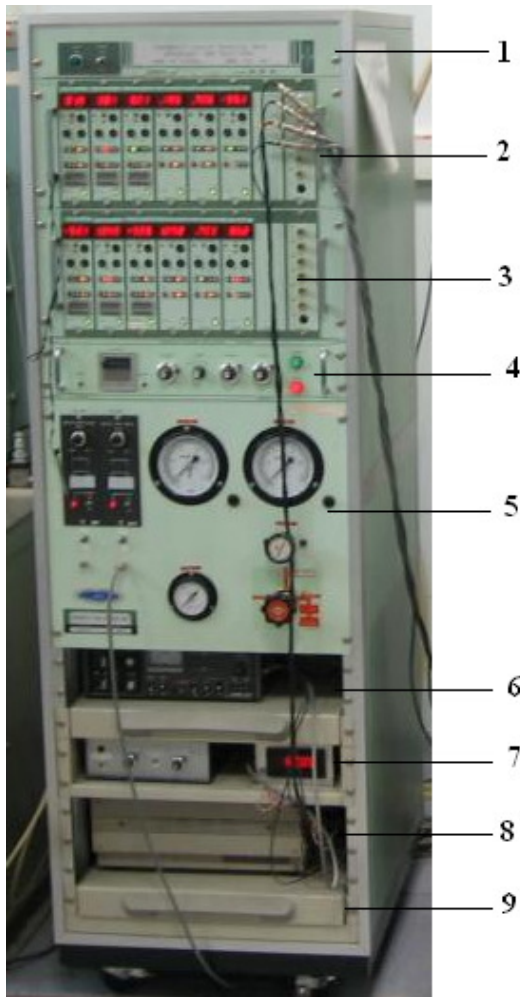
3.4 Elektriksel Ölçüm Birimi

Şekil 3.3' de dinamik yükleme ölçüm ve kayıt ünitesi görülmektedir. Elektriksel ölçüm ve kayıt birimi hem yüklemeyi kontrol etmekte hem de verilerin toplanıp aktarılmasında kullanılmaktadır. Pnömatik sinüzoidal yükleme birimi hem bir deprem kaydını yüklemeye hem de değişik frekanslarda sinüzoidal yük yüklemeye göre tasarlanmıştır. Sinüzoidal yüklerin frekansları 0.001 ile 2 Hz arasında değişebilecek şekilde ayarlanabilir. Elektriksel ölçüm ünitesi düşey yükleme transdüseri, düşey yer değiştirme transdüseri, boşluk suyu basıncı transdüseri, küçük yer değiştirme transdüseri, hacim değiştirme transdüserleri olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır.

Elektriksel voltaj değişimine göre çalışan bu ünitelerde yük uygulandığı zaman sistemde voltlar değişir. Yük kaldırıldığı zaman sistem otomatik olarak ilk denge durumuna getirilir.

Düşey dinamik yük üç değişik maksimum değerde uygulanmaktadır. Bu değerler 200 kgf, 100 kgf ve 40 kgf' ten ibarettir. Kullanılan zemin özelliğine göre uygulanacak düşey yük aralığı belirlenir. Düşey yer değişiminin ölçümü için de 20 mm, 10 mm ve 4 mm' olmak üzere üç seçenek bulunmaktadır. Boşluk suyu basıncı transdüserinden de üç değişik aralıkta ölçüm yapma imkanı vardır. Bu aralıklar 10 kgf/cm², 5 kgf/cm² ve 2 kgf/cm² dir. Küçük deplasmanlar ise hücre içerisinde üst başlığın bağlı olduğu düşey mile monte edilen biri sağda biri solda olmak üzere iki adet ACE-55 PAN model Gap-Sensor vasıtası ile algılanmaktadır. Üst başlığın çok küçük düşey yer değiştirme yapması buradaki algılayıcıları etkilemekte ve bunun sonucunda Gap-Sensorun çıkış voltajında bir değişiklik meydana gelmektedir. Bu sistemin klasik üç

eksenli sistemlerden farkı budur. Maksimum çıkış voltajı 0.5 olan bu transdüserler de 1 mm, 0.5 mm ve 0.2 mm aralıklarında küçük deformasyon ölçümü yapmaya olanak sağlamaktadır. Üst başlığın iki yanında bulunan dairesel metal parçaları çok küçük yer değiştirme olması halinde bile sinyal almakta ve alınan sinyaller çıkış voltajını değiştirmektedir. Oluşan voltaj değişimi bir yer değiştirme sonucu olduğundan sistemin de yer değiştirmeden önceki denge durumu bilindiğinden ne kadar yer değiştirme olduğu iki pozisyon farkından hesaplanabilir. Ayrıca 25 mm' lik burete bağlı bir transdüser ile hacim değişimleri de elektriksel olarak ölçülmektedir. Deney sisteminde üst başlığa bağlı deformasyon mikrometresinden düşey yer değişimleri ve bürette oluşan su seviyesi değişiminden de hacimsel değişimler elde edilmektedir. Ölçülen bu değerler kişisel bilgisayara Virtuel Bench Logger programı aracılığı ile aktarılıp kaydedilmektedir. Aynı zamanda sisteme bağlı grafik çizici yardımı ile değerler grafik olarak kaydedilebilmektedir.



1	Ana elektrik kaynağı
2	Amplifikatörler CH1: Düşey yük, 200 kgf CH2: Düşey deplasman, ± 20 mm CH3: Boşluk suyu basıncı ölçer, 10 kgf/cm ²
3	Amplifikatörler CH1: Düşey yük, 200 kgf CH2: Düşey deplasman, ± 20 mm CH3: Boşluk suyu basıncı ölçer, 10 kgf/cm ²
4	Dinamik yükleme kontrol birimi
5	Dinamik yükleme basınç birimi
6	Veri kayıt birimi
7	Direkt akım amplifikatör
8	Kayıt cihazı (8 kanal)
9	Elektrik ölçüm birimleri

Şekil 3.3 : Dinamik Yükleme Ölçüm ve Kayıt Birimleri

3.5 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 3.4’ de görülmektedir.



Şekil 3.4 : Ölçüm Sistemi Dijital Panosu

Panonun kalibrasyonu başlangıç olarak sistem çalıştırıldığında kazanç düğmesi, ATT5 düğmesi ve CAL.µε düğmelerinin ışıklarının yandığının kontrolü ile başlar. ATT düğmesi ölçümlerin hassaslığını 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 voltmetredeki “0.00” okuması sağlanır ve CALL. ON düğmesine basılır GAIN kontrol düğmesi kullanılarak dijital voltmetre değeri “5.00” değerine ayarlanır. GAIN düğmesi amplifikatörün hassaslığını 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

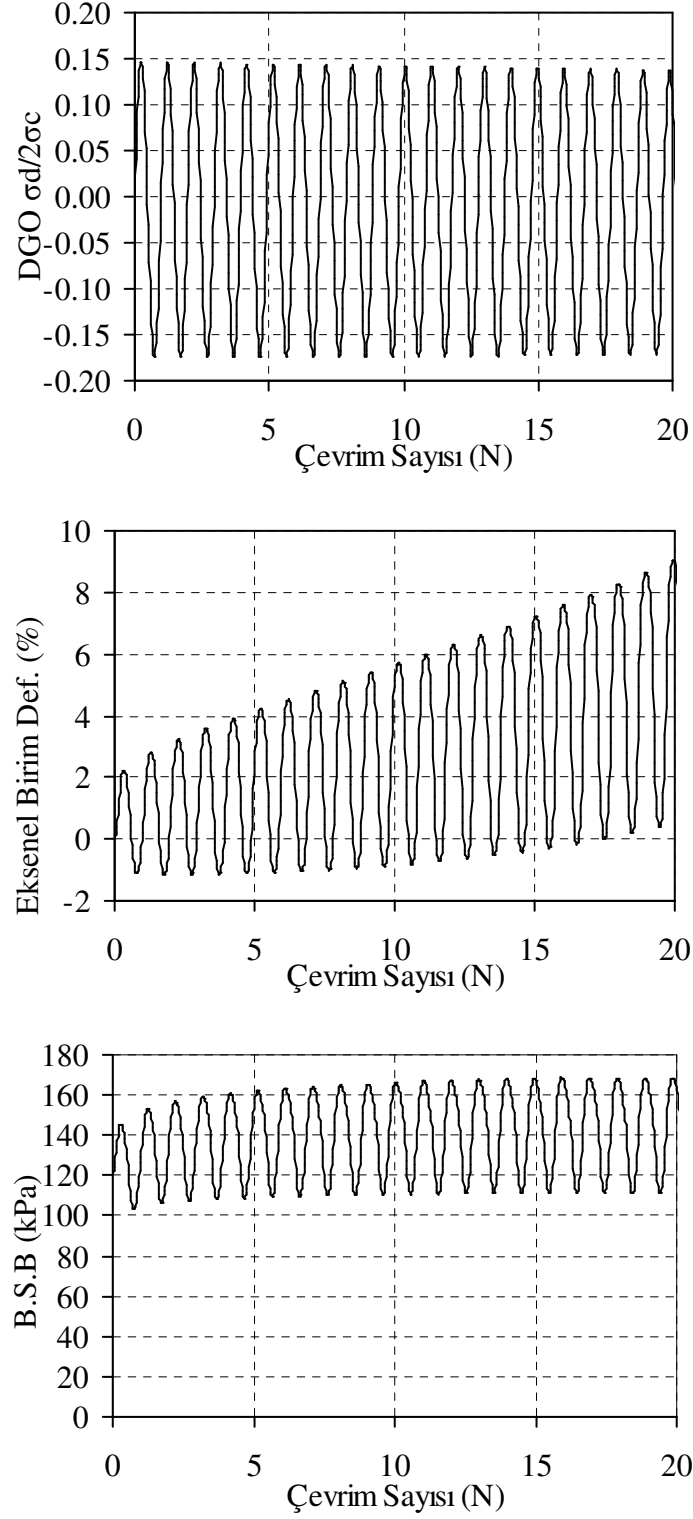
voltmetre göstergesi “0.00”değerine getirilir. ZERO-C-BAL anahtarı C-BAL pozisyonundayken sabit tutulur ve voltmetre göstergesi C-BAL kontrolü kullanılarak “0.00” değerine ayarlanmalıdır. Sistemde ZERO-C-BAL anahtarı her iki durumda da “0.00” değerini gösterene kadar yukarıda anlatılan adımlar tekrar edilmelidir. Bu arada ölçümün hassalığının ayarlanması için ATT 1,2 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.

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.

3.6 Deneylerin Değerlendirilmesi

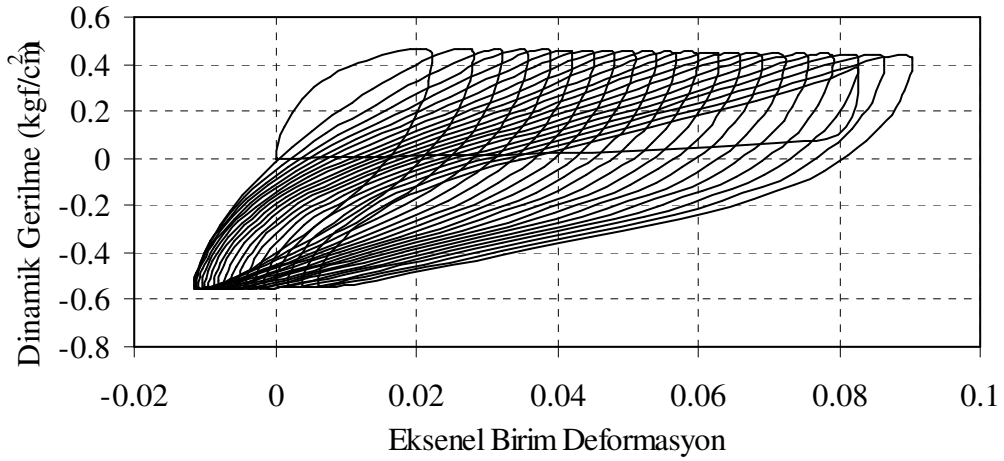
Bu çalışmada kullanılan dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde konsolidasyonlu ve konsolidasyonsuz drenajsız şartlarda değişik yükleme koşullarında gerilme ve deformasyon kontrollü deneyler yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan numune türü örselenmemiş numunedir ve yapılan dinamik deneyler gerilme kontrollü, statik deneyler ise deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada numunelerin sadece eksenel statik dayanımının, eksenel dinamik yükleme ardındanki eksenel statik dayanımına oranı araştırılmıştır. Deneyler aynı shelby tüpünden çıkan iki numune üzerinde uygulanmıştır. Yapılan deneylerde arazideki efektif konsolidasyon basıncı izotropik olarak numuneye uygulanmıştır. Deney şartlarının sağlanmasının ardından numune 0.2 mm/dk eksenel deformasyon hızında kesilmiştir. Numunenin statik dayanımı %10 deformasyon seviyesi olarak alınmıştır. Numunelere uygulanan dinamik yükleme çevrim sayısı deprem şiddeti 7.5 e denk gelen 20 çevrim sayısı olarak belirlenip numuneler ardından eksenel statik yüklemeye başlanmıştır.



Şekil 3.5 : S4 12.00-12.50 m. dinamik deneyinde dinamik gerilme oranı, deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi

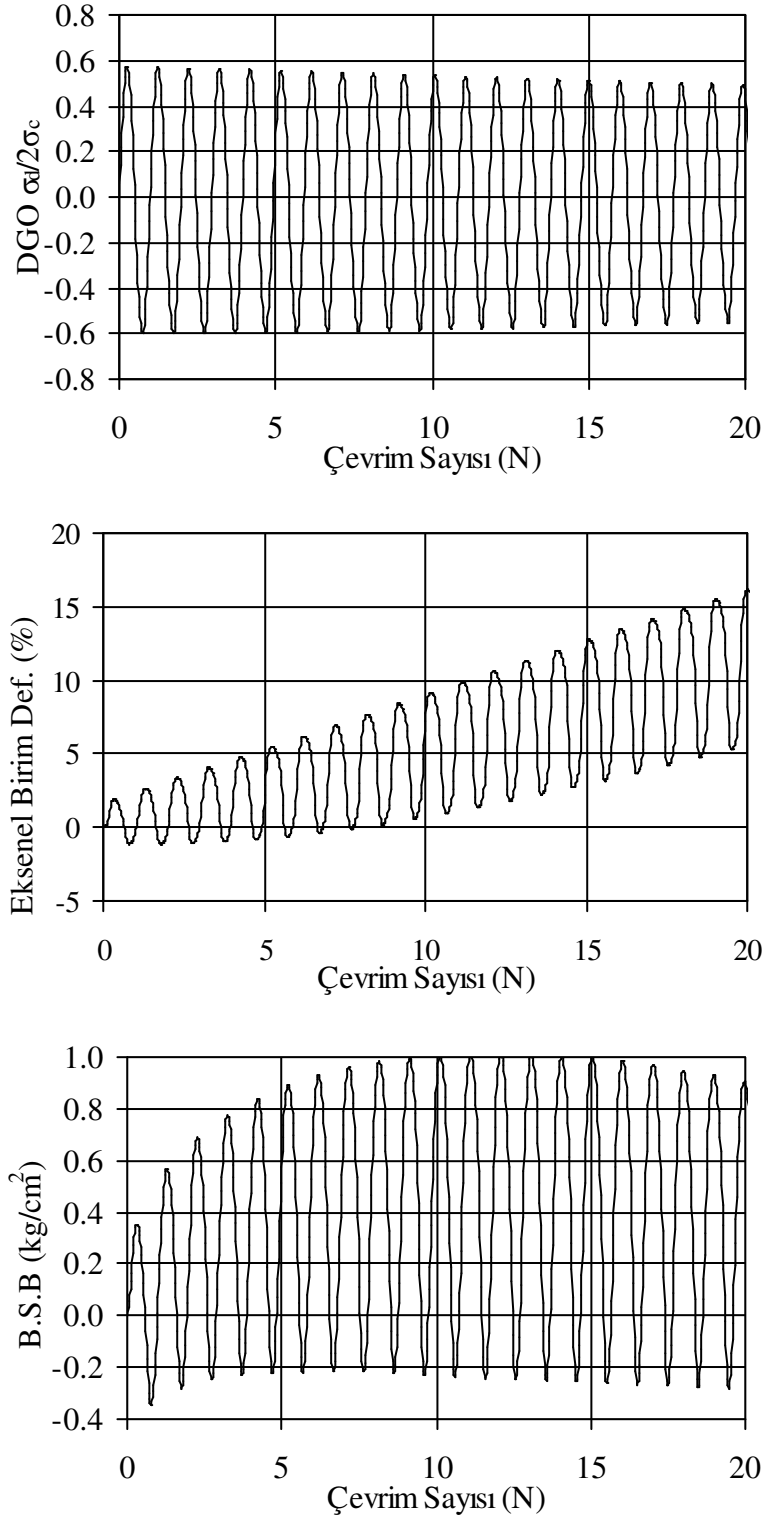
Şekil 3.5 de bir deneyde elde edilen değerler grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafikler sırayla dinamik gerilme oranı ve çevrim sayısı ilişkisi, eksenel birim deformasyon ve çevrim sayısı ilişkisi, boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı ilişkisidir.



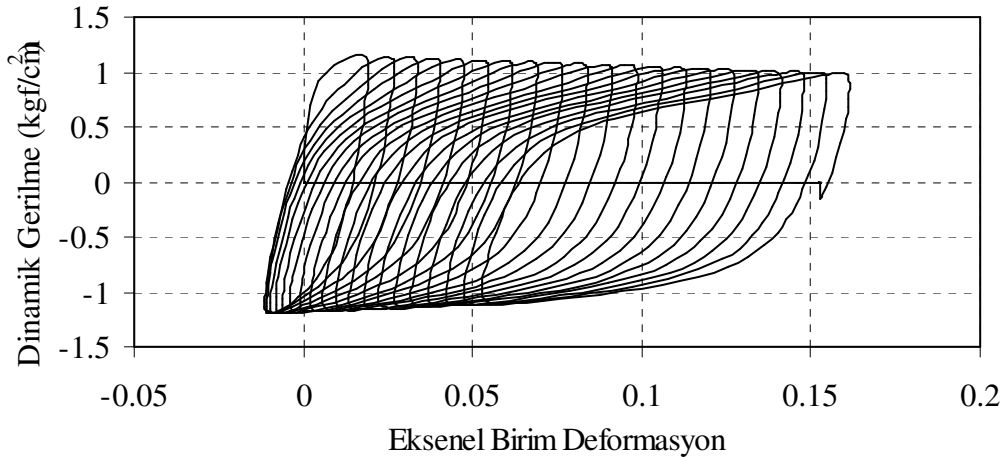
Şekil 3.6 : S4 12.00-12.50 m. dinamik deneyinde Dinamik gerilmenin eksenel birim deformasyonla olan değişimi

Numunelere yapılan yükleme ardından elde edilen UU şartlarında yapılan deney için tipik yükleme kaydı şekil 3.5 de görülmektedir. Buna göre dinamik gerilme oranı $\frac{\sigma_d}{2\sigma_c} = \pm 0.156$ uygulanan deneye ait dinamik gerilme oranı, eksenel birim

deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi görülmektedir. N=3 çevrimde eksenel birim deformasyon ± 2.5 % seviyesine ulaşan numunede aynı seviyeye karşılık gelen boşluk suyu basıncı 158 kPa dır. Numunede hızla artan eksenel birim deformasyonların yanında boşluk suyu basınçları sınırlı kalmıştır. N=20 çevrim sonunda numune şekil değiştirmesi ± 4.5 % dir. Deney başı boşluk suyu basıncı 120 kPa dır. Efektif konsolidasyon basıncı 160 kPa dır. Numunenin 20 çevrim sonunda ulaştığı boşluk suyu basıncı 168 kPa dır. Şekil 3.6 da bu deneye ait histerisis ilmikleri görülmektedir. Dinamik gerilme- eksenel birim deformasyon elde edilen ilmiklerde, çevrim sayılarıyla birlikte büyüme ve yatıklaşma meydana gelmektedir. Artan birim deformasyon genliğine bağlı olarak zeminde oluşan kalıcı deformasyonlar nedeniyle ince daneli zeminlerde yumuşama olmaktadır. Bundan dolayı zemin devam eden yükleme çevrimlerinde önemli mukavemet kayıplarına uğramaktadır.



Şekil 3.7 : S15 4.50-5.00 m dinamik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ile ilişkisi



Şekil 3.8 : S15 4.50-5.00 m dinamik deneyinde Dinamik gerilmenin eksenel birim deformasyonla olan değişimi

Numunelere yapılan yükleme ardından elde edilen CU şartlarında yapılan deney için tipik yükleme kaydı şekil 3.7 de görülmektedir. Buna göre dinamik gerilme oranı $\frac{\sigma_d}{2\sigma_c} = \pm 0.55$ uygulanan deneye ait dinamik gerilme oranı, eksenel birim

deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi görülmektedir. N=4 çevrimde eksenel birim deformasyon ± 2.5 % seviyesine ulaşan numunede aynı seviyeye karşılık gelen boşluk suyu basıncı 75 kPa dır. Numunede artan eksenel birim deformasyonların yanında boşluk suyu basınçları efektif konsolidasyon gerilmesi değeri olan $\sigma_c=100$ kPa değerine ulaşmıştır. N=20 çevrim sonunda numune şekil değiştirmesi ± 5 % dir. Efektif konsolidasyon basıncı 100 kPa dır. Numunenin 20 çevrim sonunda ulaştığı boşluk suyu basıncı 89 kPa dır. Şekil 3.8 de bu deney ait histerisis ilmikleri görülmektedir. Dinamik gerilme- eksenel birim deformasyon elde edilen ilmiklerde, çevrim sayılarıyla birlikte büyüme ve yatıklaşma meydana gelmektedir. Artan birim deformasyon genliğine bağlı olarak zeminde oluşan kalıcı deformasyonlar nedeniyle ince daneli zeminlerde yumuşama olmaktadır. Bundan dolayı zemin devam eden yükleme çevrimlerinde mukavemet kayıplarına uğramaktadır.

3.7 Sonuç

Üçüncü bölüm dâhilinde çalışmada kullanılan Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney aleti ile ilgili olarak bilgi verilmiştir. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney aletinde silindirik numunelerde istenilen genlik ve frekansa, dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak yapılabilir.

4. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Bu çalışmada kullanılan Dinamik Üç Eksenli Basınç sisteminde, drenajsız olmak üzere değişik yükleme koşullarında gerilme ve deformasyon kontrollü deneyler yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan numuneler örselenmemiş zemin numunesidir ve yapılan dinamik deneyler gerilme kontrollü, statik deneyler ise deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde konsolidasyon basıncı arazide numuneye etki eden düşey efektif gerilme hesaplanıp izotropik olarak uygulanmıştır. Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından 0.10 Hz frekansında sinüzoidal yüklemesiyle numunelere dinamik yük uygulanmıştır. Dinamik deney çevrim sayısı $M_w = 7.5$ şiddetindeki depremi temsil edecek 20 çevrim sayısı uygulanmıştır. Numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncının değişimi deney boyunca kaydedilmiştir. Statik deneyler ise 0.2 mm/dk deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir.

4.2 Dinamik Üç Eksenli Basınç Deney Aletinde Numunelerin Dinamik Davranışı

Çizelge 4.1 Konsolidasyonsuz Deney Datalarının Toplu Gösterimi (UU)

Konsolidasyonsuz Deneyler (UU)												
Sondaj no ve Derinlik (metre)	wn (%)	wl (%)	Ip (%)	wn/wl (%)	σ_c (kPa)	$\sigma_d/2\sigma_c$	ϵ_d	σ_s (kPa)	σ_{ds} (kPa)	Emaxd (MPa)	σ_{ds}/σ_s	Genlik
SK13 4.00-4.50	40	90	60	44	100	± 0.12	$\pm 0.8\%$	78	62	100	0.79	50
SK4 12.00-12.50	55	76	49	72	160	± 0.156	$\pm 4.5\%$	62	54	27	0.87	100
SK16 13.50-14.00	55	92	55	60	200	± 0.285	$\pm 13.75\%$	80	64	28	0.80	250
SK9 15.00-15.50	32	62	39	51	210	± 0.09	$\pm 0.25\%$	140	102	55	0.73	75
SK13 18.00-18.50	34	73	48	46	210	± 0.09	$\pm 0.14\%$	216	193	100	0.89	75
SK11 12.00-12.50	52	66	38	78	150	± 0.125	$\pm 0.75\%$	59	45	22	0.76	75
SK13 10.50-11.00	49	65	43	75	150	± 0.127	$\pm 0.75\%$	40	43	15	1.08	75

Çizelge 4.1 de araziden shelby tüpü ile örselenmeden alınmış zemin numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyonsuz drenajsız koşullar altında yapılan dinamik deney ve dinamik sonrası statik deneylere ait bilgiler verilmektedir. Ani yükleme durumunda deprem sonrası statik dirençteki azalma miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada plastisite indisi $PI=38-60$ arasında değişen zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 4.1). Likit limit ile doğal su muhtevası

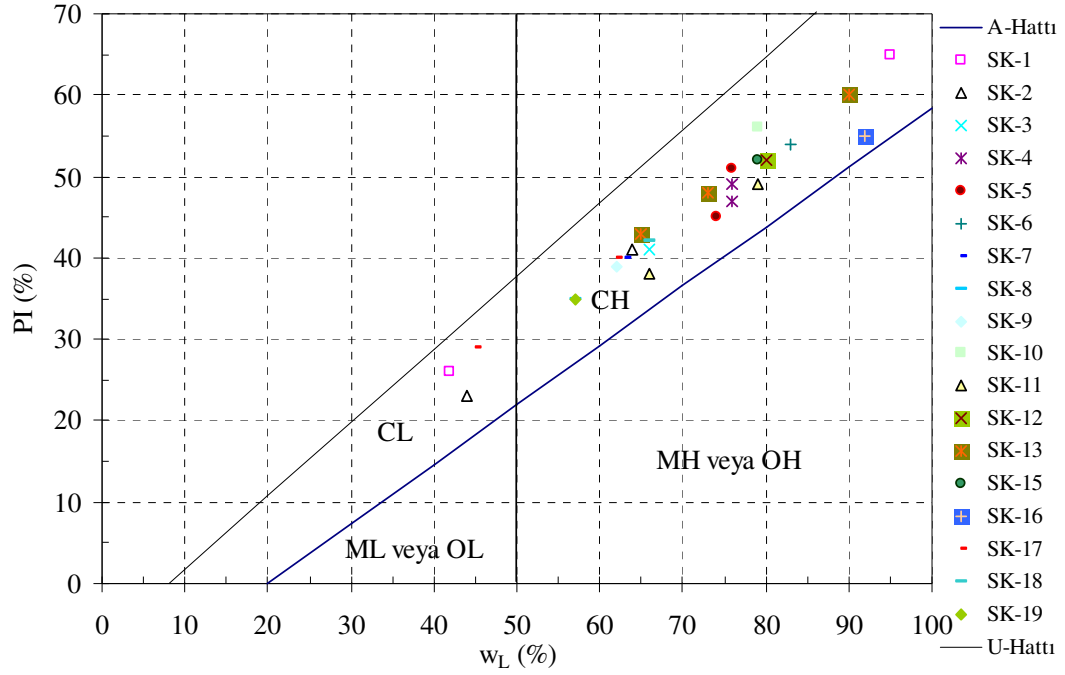
arasındaki oran 0.44 ile 0.78 arasında değişmektedir. Numuneler arazide etkisi altında oldukları efektif düşey basınca izotropik olarak konsolide edilmişlerdir. Konsolidasyon basıncı 100 kPa ile 210 kPa arasında değişmektedir. İlk aşamada zemin numunelerine küçük deformasyon seviyelerinde dinamik yük uygulanarak elastisite modülleri ölçülmüştür. İkinci aşamada zeminde büyük deformasyon seviyelerinin oluşmasına neden olacak dinamik yükler uygulanmıştır. Uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranı $\sigma_d/2\sigma_c = \pm 0.09 - \pm 0.285$ arasında değişmektedir. $N=20$ çevrim sonunda zeminlerde oluşan eksenel deformasyon $\epsilon_d = \pm 0.14 - \pm 13.75$ arasında değişim göstermiştir. Dinamik yükleme $N=20$ çevrimde durdurulup numuneye hemen statik yükleme uygulanmıştır.

Konsolidasyonlu Deneyler (CU)

Sondaj no ve Derinlik (metre)	w _n (%)	w _l (%)	I _p (%)	w _n /w _l (%)	σ_c (kPa)	$\sigma_d/2\sigma_c$	ϵ_d	σ_s (kPa)	σ_{ds} (kPa)	E _{maxd} (MPa)	σ_{ds}/σ_s	Genlik
SK6 6.00-6.50	46	83	54	55	100	± 0.75	$\pm 12\%$	110	65	90	0.59	300
SK15 4.50-5.00	34	76	50	44	100	± 0.55	$\pm 5\%$	130	100	90	0.77	225
SK15 4.50-5.00	34	76	50	44	100	± 0.38	$\pm 0.6\%$		130	200		150
SK7 3.00-3.50	42	77	49	54	65(122)	± 0.40	$\pm 0.35\%$	86	67	1000	0.77	100
SK2 3.00-3.50	36	81	54	44	62(141)	± 0.55	$\pm 0.08\%$	118	100	100	0.84	125
SK7 12.00-12.50	54	79	53	68	125			90				

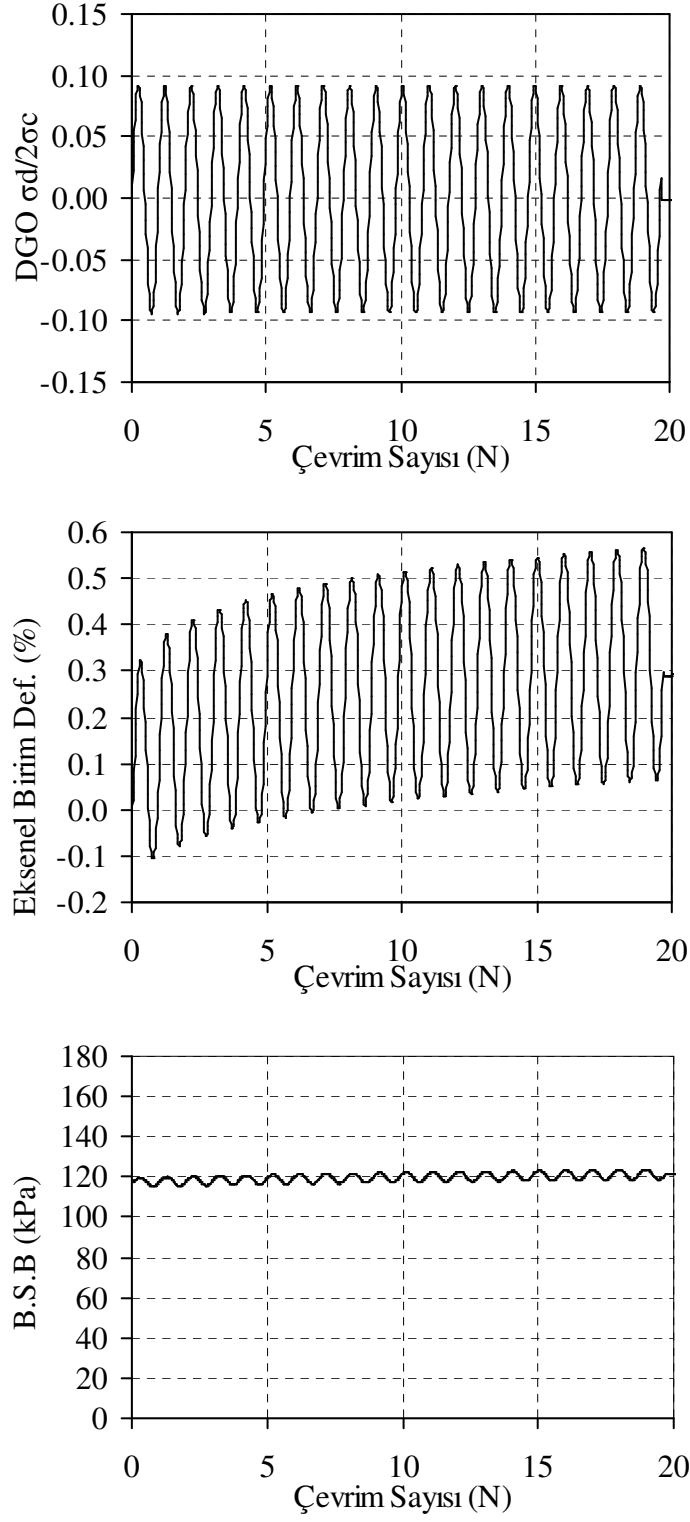
Çizelge 4.2 Konsolidasyonlu Deney Datalarının Toplu Gösterimi (CU)

Çizelge 4.2 de örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajsız koşullar altında yapılan dinamik deney ve dinamik sonrası statik deneylere ait bilgiler verilmektedir. Çalışmanın bu aşamasında plastisite indisi $PI=49-54$ arasında değişen zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 4.1). Likit limit ile doğal su muhtevası arasındaki oran 0.44 ile 0.55 arasında değişmektedir. Numuneler arazide etkisi altında oldukları efektif düşey basınca izotropik olarak konsolide edilmişlerdir. Konsolidasyon basıncı 100 kPa ile 125 kPa arasında değişmektedir. Uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranı $\sigma_d/2\sigma_c = \pm 0.38 - \pm 0.75$ arasında değişmektedir. $N=20$ çevrim sonunda zeminlerde oluşan eksenel deformasyon $\epsilon_d = \pm 0.08 - \pm 12$ arasında değişim göstermiştir. Dinamik yükleme $N=20$ çevrimde durdurulup numuneye hemen statik yükleme uygulanmıştır.

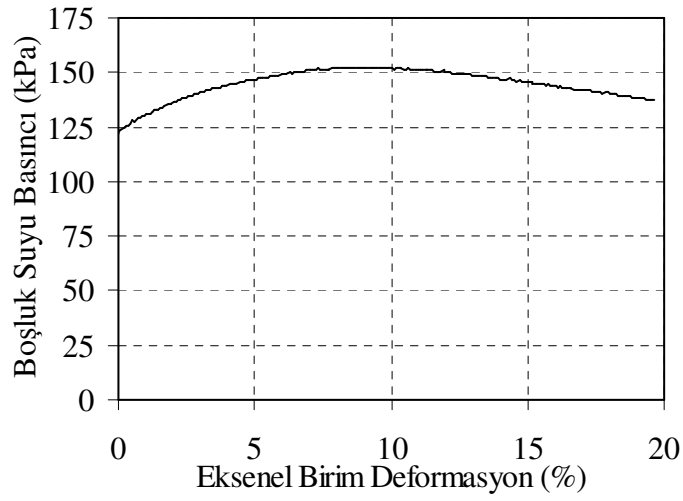
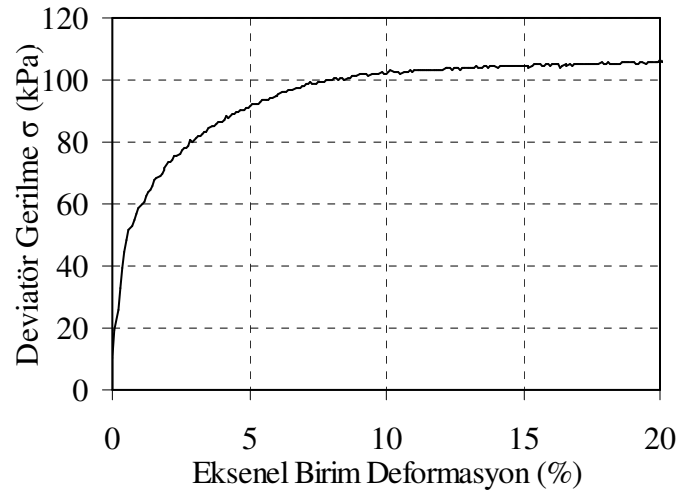


Şekil 4.1 Zemin Numunelerin Plastisite Kartında Gösterimi

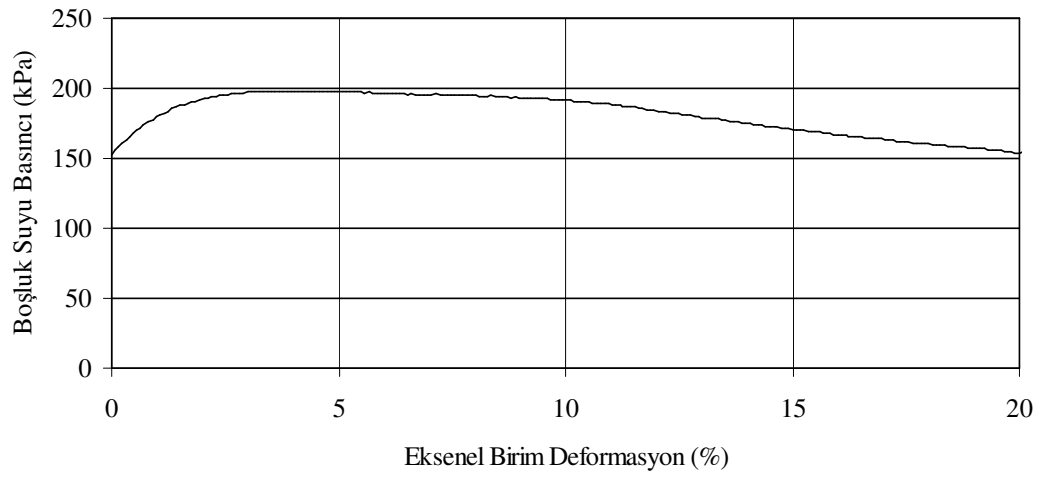
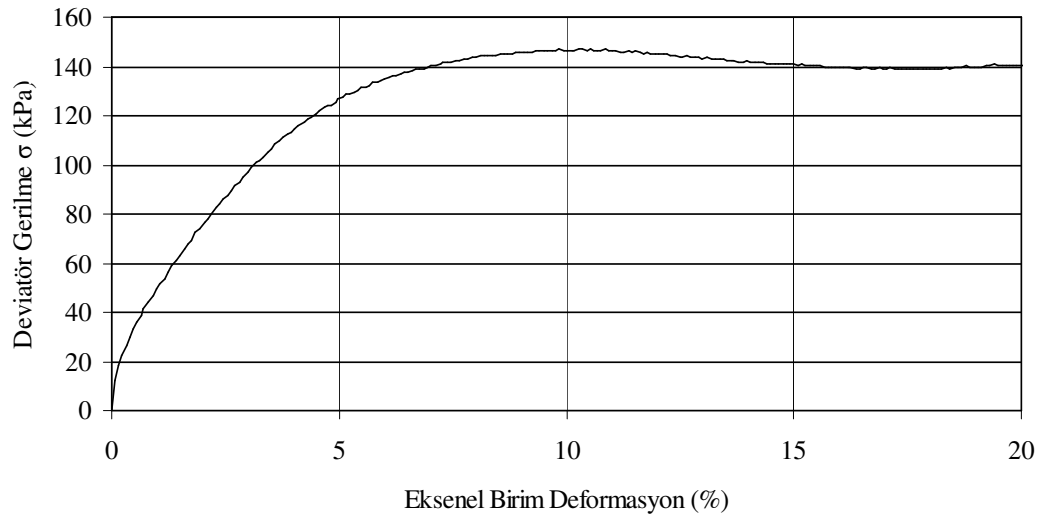
S9 sondajında 15.00-15.50 m arasında alınmış örselenmemiş zemin numunesi üzerinde yapılan dinamik deneye ait sonuçlar Şekil 4.2 de gösterilmiştir. 210 kPa basınca konsolide edilen zemin numunesine $\sigma_d/2\sigma_c=\pm\%0.09$ dinamik eksenel gerilme oranı uygulanmış ve zeminde oluşan eksenel deformasyonlar ile boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. N=20 çevrim sonunda zeminlerde oluşan eksenel deformasyon $\epsilon_d=\pm\%0.55$ olarak elde edilmiştir. Deney süresince oluşan boşluk suyu basıncı sabit olup $\Delta u=120$ kPa dir. N=20 çevrim sonunda dinamik deney durdurulmuş ve zemin numunesine statik yükleme uygulanmıştır. Aynı numunenin statik yüklemeye ait deney sonuçları Şekil 4.3 de verilmektedir. Eksenel deformasyonun artması ile deviatorik gerilme artmış ve $\epsilon_{ds}=\%20$ deformasyon seviyesinde 105 kPa olmuştur. Boşluk suyu basıncı artarak 150 kPa değerine çıkmış ve deformasyonun artması ile azalarak $\epsilon_{ds}=\%20$ deformasyon seviyesinde 140 kPa olmuştur. Bu derinlikten alınan zemin numunesi üzerinde yapılan statik deneyde zeminde ölçülen en büyük gerilme 145 kPa olmuştur (Şekil 4.4). Dinamik deney sonrası statik gerilmenin statik gerilmeye oranı 0.73 olarak elde edilmiştir. Mukavemette yaklaşık %30 kayıp oluşmuştur.



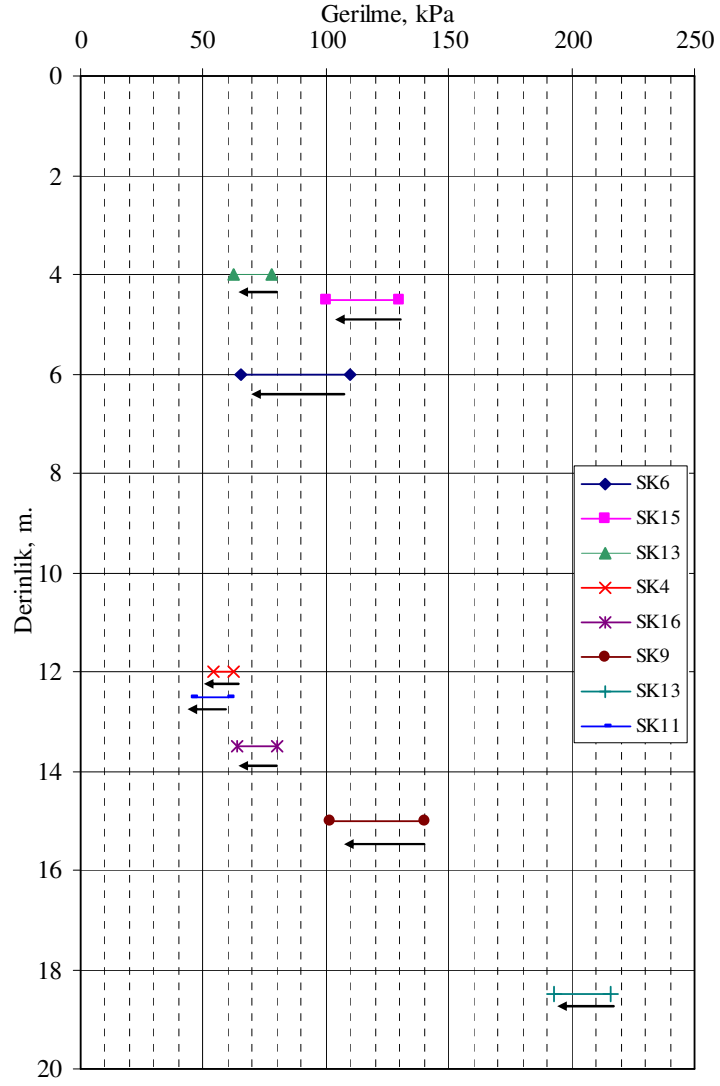
Şekil 4.2 S9 15.00-15.50 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.3 S9 15.00-15.50 m dinamik sonrası statik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla olan ilişkisi

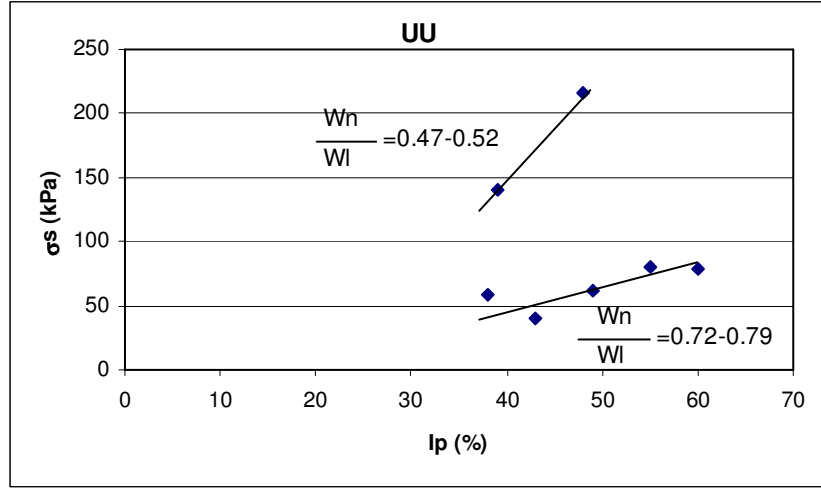


Şekil 4.4. S9 15.00-15.50 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla olan ilişkisi



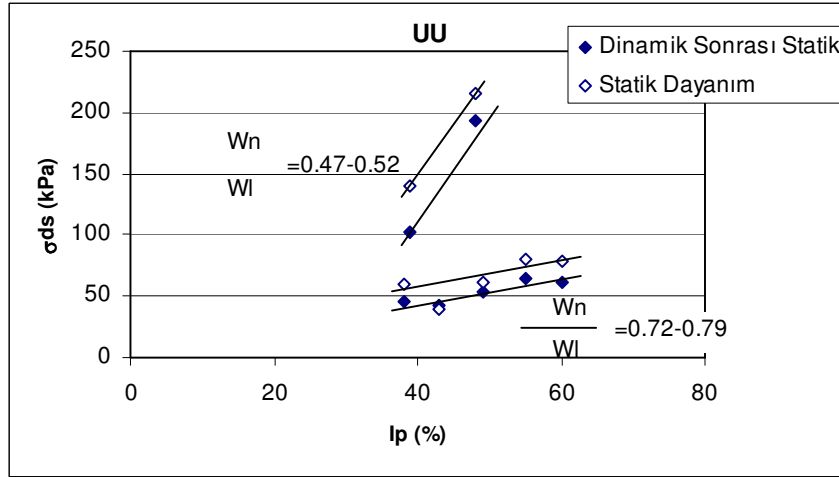
Şekil 4.5 Numunelerin Statik ve Dinamik ardı Statik deney sonucu eksenel dayanımları

Şekil 4.5 de numunelerin statik dayanımının ve dinamik deneyin ardından statik dayanımının azalımının derinlikle değişimi gösterilmiştir. Statik direnç dinamik yük sonrası %11 ile %40 arasında azalma göstermiştir.



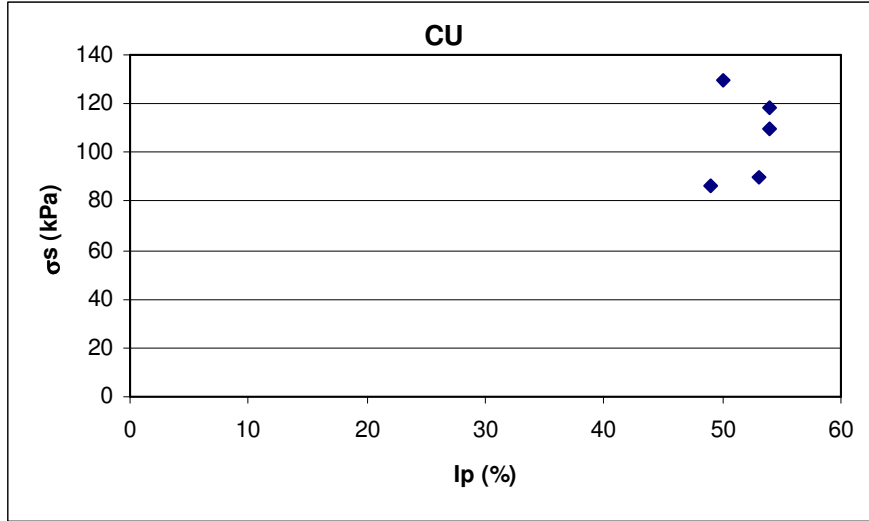
Şekil 4.6 Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (UU Deneyler)

UU deneylerin plastisitelerine göre statik dayanımları eşleştirildiğinde Şekil 4.6 deki gibi bir grafik oluşmaktadır. Noktalar $\frac{w_n}{w_l}$ değerlerine göre değerlendirildiğinde yumuşak ve orta sert olarak iki grup oluşmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi plastisite indisi arttıkça mukavemette artış olmaktadır. Bu artış w_n/w_l oranından etkilenmekte olup aynı plastisite indisinde olan zeminlerde zemin katılaştıkça mukavemet artmaktadır.



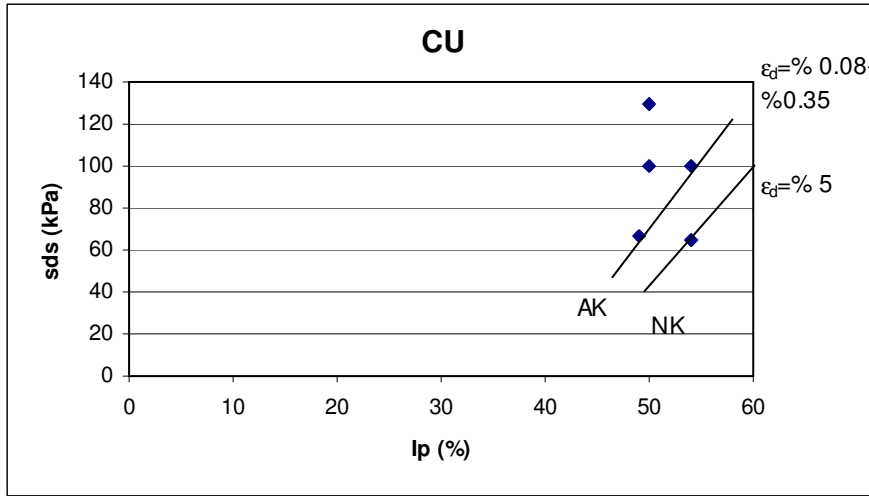
Şekil 4.7 Dinamik Sonrası Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (UU Deneyler)

Yine UU Deneyleri Şekil 4.7 de plastisitelerine göre dinamik deney sonrası statik dayanımları ile eşleştirildiğinde noktalar $\frac{w_n}{w_l}$ değerlerine göre değerlendirildiğinde yumuşak ve orta sert olarak iki grup oluşmaktadır. Hem katı killerde hem de yumuşak killerde her plastisite indisinde dinamik deney sonrası statik mukavemetler statik deneye göre azalım göstermektedir.



Şekil 4.8 Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (CU Deneyler)

CU deneylerin plastisitelerine göre statik dayanımları eşleştirildiğinde Şekil 4.8 deki gibi bir grafik oluşmaktadır. Plastisite indisi $PI = 49-54$ arasında değişmektedir. $W_n/W_l = 0.44-0.55$ arasında bulunmaktadır. Bu nedenle mukavemetleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.9 Dinamik Sonrası Statik Dayanımla Plastisite İndisi arasındaki ilişki (CU Deneyler)

CU deneylerin Şekil 4.9 da plastisitelerine göre dinamik yükleme sonrası statik dayanımları eşleştirildiğinde yukarıdaki gibi bir grafik oluşmaktadır. Dinamik deney sonunda zemin numunesinde oluşan deformasyon seviyesi dinamik sonu statik mukavemet üzerinde çok etkili olmaktadır. Dinamik sonu deformasyonlar arttıkça statik mukavemet azalmaktadır. Aşırı konsolide olması düşük birim deformasyonlara sebep oluiken, normal konsolidasyon durumu %5 deformasyona ulaşmasına sebep olmaktadır (Şekil 4.9).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi'nden getirilen örselenmiş siltli kil zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranışı, dinamik üç eksenli basınç deney aletinde yapılan dinamik ve statik deneylerle araştırılmıştır. Dinamik deneyler gerilme kontrollü 20 çevrim olacak şekilde, statik deneyler ise deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler numuneler konsolidasyonlu ve konsolidasyonsuz drenajsız koşullarda 0.1 Hz frekansta sinüzoidal tekrarlı yükleme altında kalmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar neticesinde dinamik kuvvet uygulanmasının ardından zeminlerdeki dinamik ardından hemen sonraki eksenel statik dayanımın azaldığıdır. Statik direnç deprem sonrası %11 ile %40 arasında azalma göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Alhas, E.**, 1994. Siltli ve killi kumlarda sıvılaşma, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul
- Altun, S.**, 2003. Burulmalı kesme deney aleti ile zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi, *Doktora tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Altun, S., Ansal, A.**, 2003, Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri, *İTÜ Dergisi*, Ağustos, Cilt:2, Sayı:4, 25-34
- Amini, F. and Qi, G.Z.**, 2000. Liquefaction testing of stratified silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**, 208-217
- Ansal, A.M.**, 1981. Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989 Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, *Deprem Araştırma Bülteni*, **50**, 10-53
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, 115, 968-983
- Castro, G.**, 1969 Liquefaction of sands, *PhD Thesis*, Harvard University, Cambridge, Massachusettes.
- Castro, G., Keller, T.O. and Boynton, S.S**, 1989, Re-evaluation of the lower San Fernando Dam-Report 1: Contract Report GL-89-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S.
- Castro, G., Poulos, S.J. France J.W. and Enos, J.L.**, 1982, Liquefaction induced by cyclic loading, Report By Geotechnical Engineers Inc. To the National Science Foundation, Washington D.C.

- Chang, N.Y.**, 1990. Influence of fines content and plasticity on earthquake induced soil liquefaction, Misc. Paper, GL-87-24, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Wicksburg, MS.
- Chaundlary, S.K., Kuwano J. Hashimoto S., Hayano Y. And Nakamura, Y.**, 2002 Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand, *Soils And Foundations*, **42**, 147-157
- Chen, Y.C., Ishibashi, I. And Jenkins, J.T.**, 1988. Dynamic shear modulus and fabric: part 1, depositional and induced anisotropy, *Geotechnique*, **38**, 25-32.
- Chu Lin, D.B.**, 2006, Case studies of soil liquefaction of sands and cyclic softening of clays induced by the 1999 Taiwan Chi-Chi Earthquake, *PhD Thesis*, University of California, California
- Cotecchia, F., and Chandler, R.J.**, 1997. The influence of structure on the pre-failure behavior of a natural clay, *Geotechnique*, **47**, 523-544
- Das, M.B.**, 1993. Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company. Boston.
- Das, M.B., Puri, V.K. and Prakash, S.** 1999, Liquefaction of silty soils, Proceedings of Second Earthquake Geotechnical Eng. Int. Conf. Lisbon, Portugal, 619-623
- Dyvik, R.**, 1981. Strain and pore pressure behavior of fine grained soils subjected to cyclic shear loading, *PhD Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, UMI, Ann Arbor.
- El Hosri, M.S, Biarez, and Hicher, P.Y.**, 1984, Liquefaction characteristics of silty clay, Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng., Prentice Hall, NJ, 277-284.
- Elilbol, B., Ülker, B.C., Kaya, Z., Özay, R. ve Erken,** 2004, Depremeler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve taşıma gücü kayıpları, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 431, 20-26.

- Erdem, A., Okan, R., Erken, A.,** 2003, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi’de Adapazarı’nda yeralan zeminlerin davranışı, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, AT-112
- Erken, A.,** 1982 Killerin dinamik özellikleri üzerine frekansın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Erken, A. and Ansal, A.M.,** 1994 Liquefaction characteristics of undisturbed sands, Performance of Ground And Soil Structures, Thirteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Foundation Engineering, 165-170.
- Erken, A.,** 2001. The role of geotechnical factors on observed damage in Adapazarı, Proceedings of Fifteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering Sat. Conf. On Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes, İstanbul, Turkey, 29-32.
- Erşan, H., Yıldırım, H.,** 2006. Tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonu, İTÜ Dergisi, Cilt:5 Sayı:3,2, 187-195
- Erten, D. and Maher, M.H.,** 1995. Cyclic undrained behavior of silty sand, Soil Dynamics And Earthquake Engineering, **14**, 115-123.
- Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I., Sokolov, V.N.,** 2004. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading, Engineering Geology, **86**, 70-84
- Guo, T. and Prakash, S.,** 1999. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, Journal of Geotechnical Engineering And Geoenvironmental Engineering, **125**, 706-710.
- Hoeg, K. Dyvik R. AND Sandbaekken, G.,** 2000. Strentgh of undisturbed versus reconstitued silt and silty sand specimens, Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, **126**, 606-617.
- Hong, W.P. and Lade, P.V.,** 1989 Strain increment and stress directions in torsion shear tests, Journal of The Geotechnical Engineering Division, **115**, 1388-1401.
- Hussein, A.K.,** 1995 Undrained cyclic behavior of nonplastic silt, PhD Thesis, Cornell University, UMI, Ann Arbor.

- Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Yamamoto, Y., and Teruhisa, F.,** 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils And Foundations*, **39**, 45-58.
- Ishihara, K and Yasuda, S.,** 1975. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, *Soils And Foundations.*, **15**, 45-59.
- Ishihara, K,** Sodekawa, M ve Tanaka, Y., 1978. Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing fines, *Dynamic Geotechnical Testing*, **654**, 246-264.
- Ishihara, K.,** Troncoso, J., Kawase, Y., and Takahashi, Y., 1980. Cyclic strength characteristics of tailings materials, *Soils And Founations*, **20**, 127-142.
- Ishihara, K.,** Yauda, S., Yokota, K., 1981. Cyclic strength of undisturbed mine tailings, *Proc. Int. Conf. On Recent Advances ibn Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, 53-58.
- Ishihara, K.,** 1995. *Earthquake Geotechnical Engineering Proc. of IS-Tokyo' 95 The First Int. Conf. On Earth. Geo. Eng.*, Rotterdam Balkema.
- Ishihara. K.,** 1996. *Soil Behavior of Earthquake Geotechnics*. Claredon Press, Oxford.
- Kaufman, L.P.,** 1981. Percentage silt content in sands and its effects on liquefaction potential, M.S. Thesis, University of Colorado, Denver
- Koester, J.P. and Tsuchida, T.,** 1988. Earthquake induced liquefaction of fine grained soils: some considerations from Japanese research, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Koester, J.P.,** 1992 Cyclic strengenth and pore pressure generation characteristics of fine-grained soils, *PhD Thesis*, University of Colorado at Boulder, UMI, Ann Arbor.
- Konrad, J.M. and Wagg, B.T.,** 1993. Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **119**, 929-947.

- Koseki, J., AnhDan, L.,** 2004, Effects of large number of cyclic loading on deformation characteristics of dense granular materials, June, **44.3**, 115-123
- Koseki, J., HongNam, N.,** 2005, Quasi-elastic deformation properties of Toyoura sand in cyclic triaxial and torsional loadings, Soils and Foundations, October, **45.5**, 19-38
- Lee, K.L. and Focht, J.A.,** 1975 Strength of clay subjected to cyclic loading, Marine Geotechnology, **1**, 165-185
- Lee, K and Dass, W.C.,** 1993. An experimental study of granular packing structure changes under load, Powders and Grains, **93**, 17-22.
- Liu, H.C.,** 1992. Liquefaction resistance of soils containing fines, *PhD Thesis*, University of Colorado.
- Matsui, T. Ohara, H. And Ito, T.,** 1980. Cyclic stress strain history and shear characteristics of clay, Journal of The Geotechnical Engineering Division, **106**, 1101-1120
- Moses, G.G., Rao, S.N., Rao, P.N.,** 2003, Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading, Ocean Engineering, **30**, 1765-1789.
- Özay, R. ve Erken, A.,** 2003 Killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi, İTÜ Dergisi, Şubat 2003, Cilt;2, Sayı:1, s. 55-63
- Özay, R. ve Erken, A.,** 2002 Killerde dinamik yüklerin hacim değişimine etkisi. IX. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, AÜ, Eskişehir, 21-22 Ekim, s. 342-348.
- Özay, R. ve Erken, A.,** 2003 Tekrarlı yük etkisinde kalmış düşük plastisiteli killi zeminlerin davranışı, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26 -30 Mayıs, AT-114
- Pekcan, O.,** 2001, Cyclic behaviour of Adapazarı clayey silts, Yüksek lisans tezi, ODTÜ, Ankara

- Poulos, S.J., Castro, G. And France, J.W.,** 1985. Liquefaction evaluation procedure, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, **111**, 772-792
- Polito, C.P. and Martin, J.R.,** 2001. Effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands, Journal of Geotechnical Engineering, **127**, 408-415
- Prakash, S. And Sandoval, J.AÇ,** 1992. Liquefaction of low of low plasticity silts. Soil Dynamics And Earthquake Engineering., **11**, 373-379
- Puri, V.K.,** 1984 Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla UNI, Ann Arbor.
- Sandoval, S.A.,** 1989 Liquefaction and settlement characteristics of silt soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Sato, T., Yoshida, T. and Koseki, J.,** 2005, Liquefaction properties of Toyoura sand in cyclic torsional shear tests under low confining stress, Soils and Foundations, October, **45.5**, 103-113
- Sayao, A. and Vaid, Y.P.,** 1991. A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens, *Soils And Foundations*, **31**, 60-72
- Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer J.,** 1976. Pore water pressure changes during liquefaction, Journal of Soil Mechanics And Foundation Eng. Div., ASCE, **102**, 323-347
- Shahnazari, H. And Towhata, I.,** 2002. Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationships of sand, Soils and Foundations, **42**, 105-119
- Sherif, M.A., Tien, Y.B. and Pan, Y.W.,** 1983. Liquefaction potential of silty sand, Soil Engineering Research Report No. 26, University of Washington College of Engineering, Seattle, Washington.
- Smith, N.,** 2006, Stiffness and cyclic response of clay fine sands, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, October, **159**, 251-268

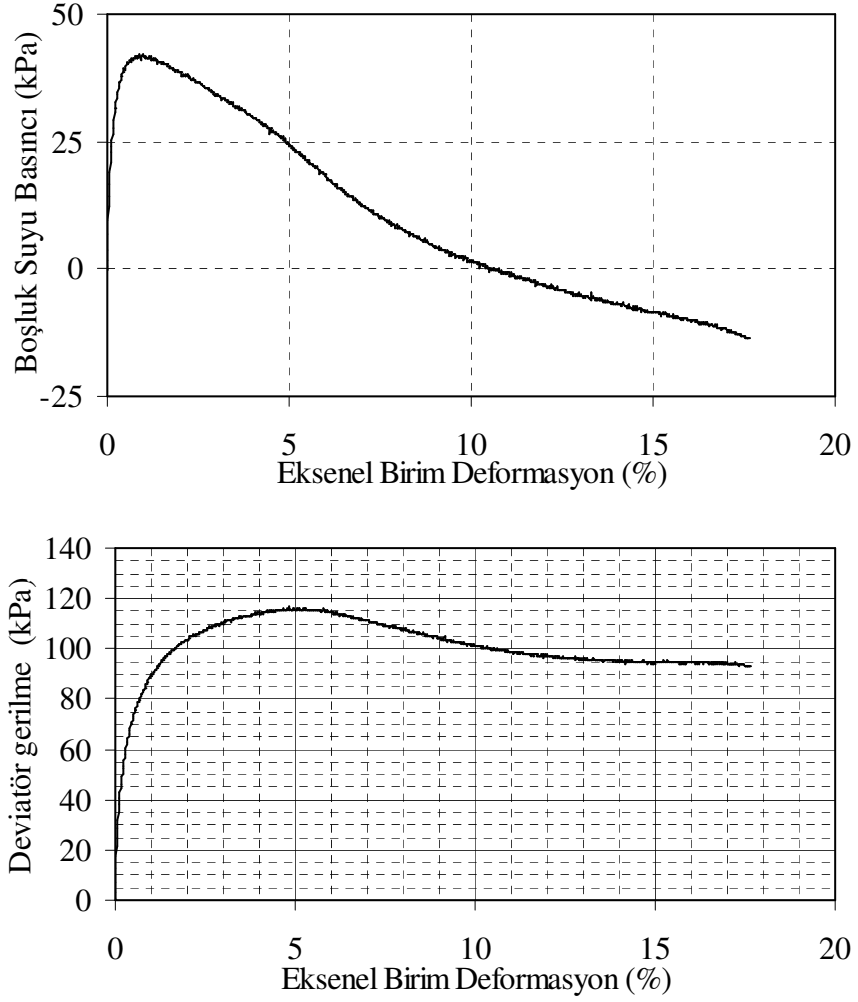
- Tatsuoka, F., Muramatsu M. And Sasaki T.,** 1982. Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, **22**, 55-70
- Tatsuoka, F., Ochi K. Fujii S., an Okamoto, M.,** 1986. Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, **26**, 23-41
- Tatsuoka, F., Sonoda S., ara, K., Fukushima, S.and Pradhan T.B.S.,** 1986. Failure and deformation of sand in torsional shear, *Soils and Foundations*, **26**, 79-97
- Terauchi, T., Altun, S., Erken, A. ve Yasuda, S.,** 1998. Burulmalı dinamik deney sistemiyle sıvılaşma deneyleri, VII. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, YTÜ, İstanbul, 22-23 Ekim, s. 584-590.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.,** 1948 *Soil Mechanics in Engineering practice*, John-Wiley and Sons.,
- Thevanayagam, S. and Martin, G.R.,** 2002. Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*, **22**, 1035-1042
- Tunçok, H.,** 2005, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul
- Usaborisut, P., Koike, M., Bahalayodhin, B., Niyamapa, T. and Yoda, A.,** 2001 Cyclic torsional shear loading test for an unsaturated hollowed specimen using Bangkok clayey soil, *Journal of Terramechanics*, **38**, 71-87
- Ülker, B.C.,** 2004, Siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul
- Wagg, B.T.,** 1990. Undrained behavior of clay-silt mixtures during cyclic loading, *PhD Thesis*, University of Waterloo, UMI, Ann Arbor.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.,** 1998. Steady state concept and static liquefaction of silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **124**, 868-877

- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.**, 1999. Experiments and modelling of silty sands susceptible to soil liquefaction, *Mech. Of Cohesive-Frictional Mat.*, **4**, 545-564
- Yamamuro, J.A. and Covert, K.M.**, 2001. Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **127**, 314-324
- Yılmaz, I., Üstünkaya, M.**, 2004 Uncosolidated clays from the inner shore of the Gemlik Gulf in the Marmara Sea (Bursa-Turkey), 12 Mart, *Bull Eng.Geol.Env.*, **63**, 133-139
- Yoshimine, M., Özay R., Sezen A. and Ansal, A.M.**, 1999 Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus, *Soils and Foundations*, **39**, 131-136
- Youd, T.L.**, 1977, Packing changes and liquefaction susceptibility, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **103**, 918-922
- Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K.**, 2007, Explanation of cyclic mobility of soils: aproach by stress-induced anisotrophy, *Japanese Geotechnical Society*, August, **47.4**, 635-647
- Zhu, R, and Law, K.T.**, 1988, Liquefaction potential of silt, *Proceedings of Ninth Int. Conf. On Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, pp.237-242

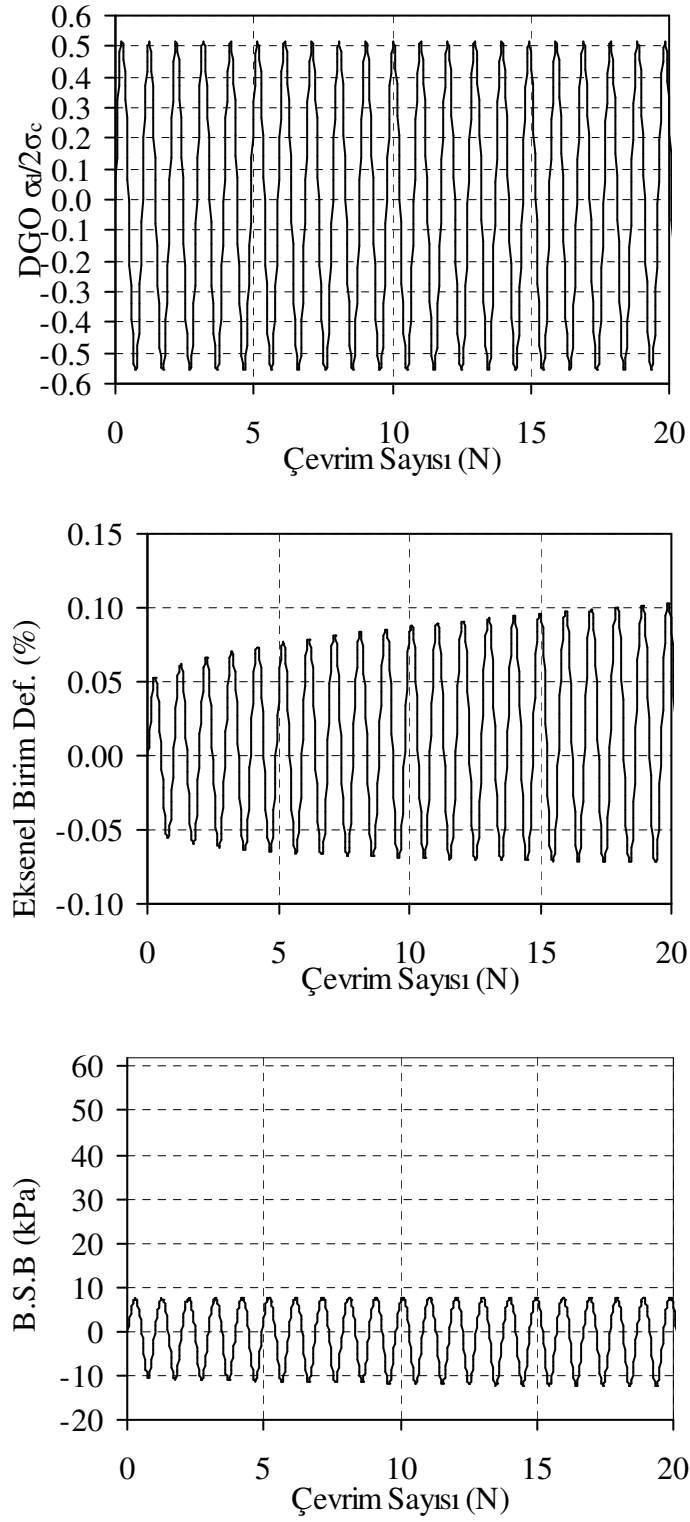
EKLER

EK A.1 YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ

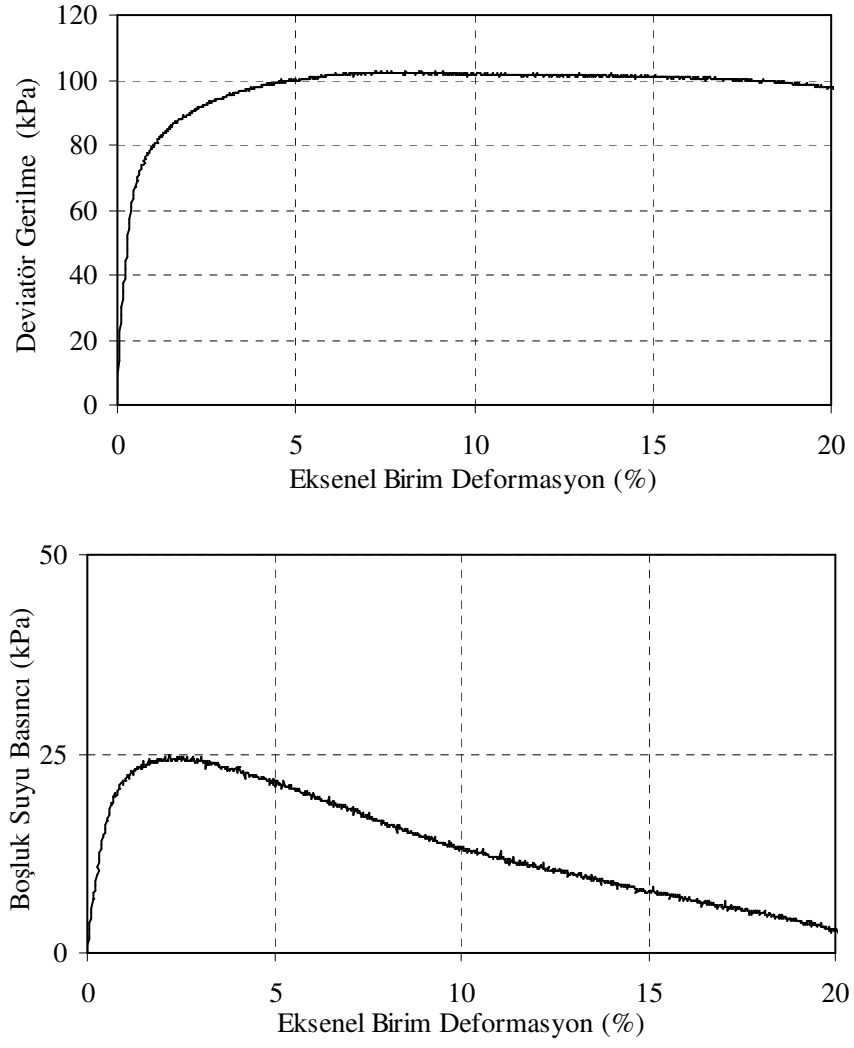
EK A.1 YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ



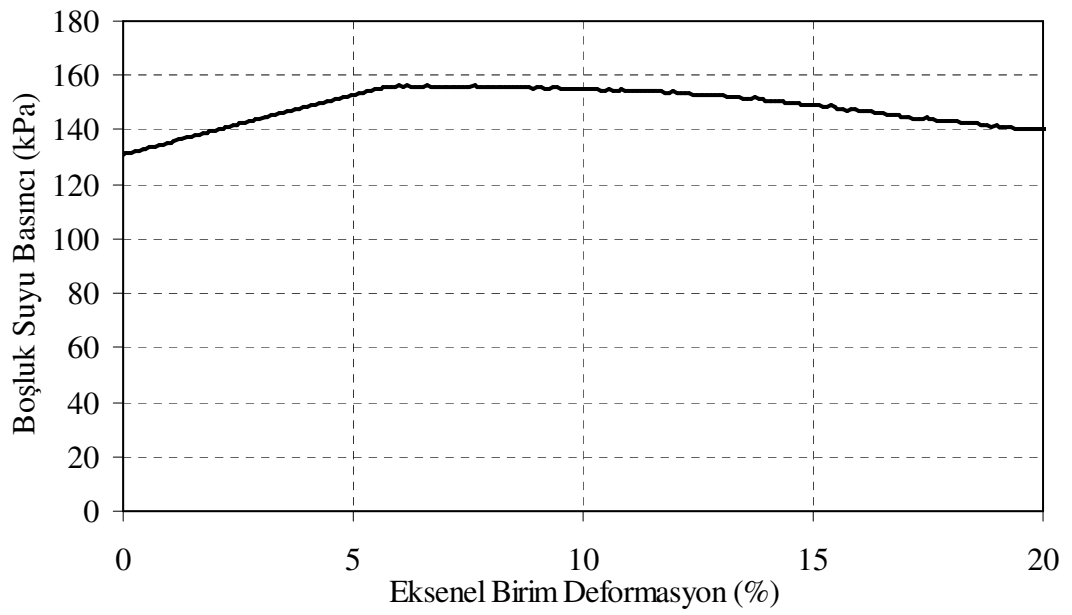
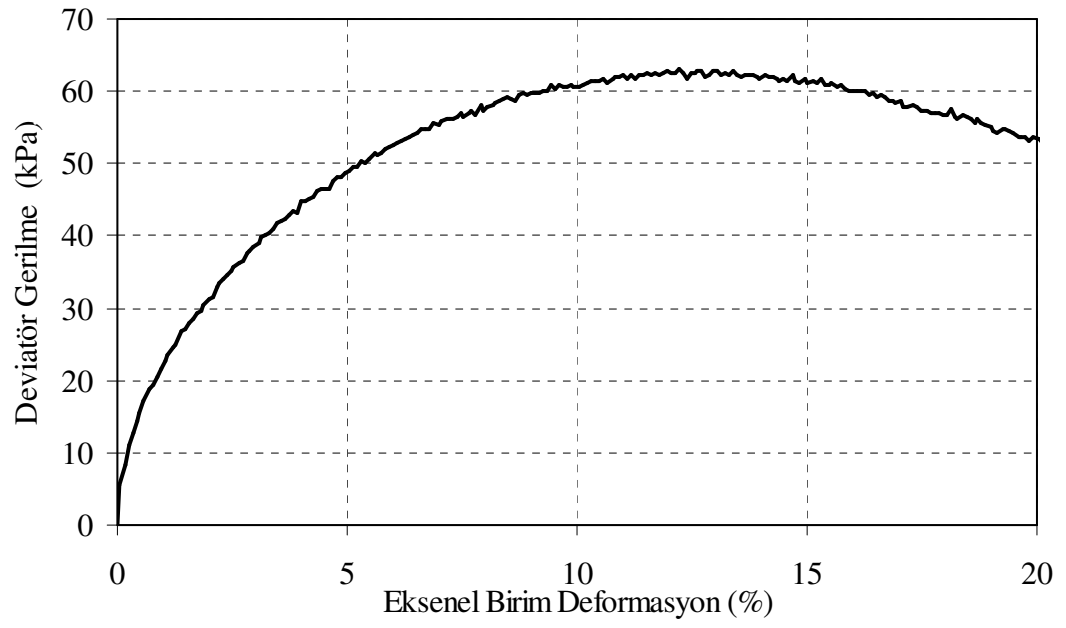
Şekil A.1 : S2 3.00-3.50 statik deneyde Deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla ilişkisi



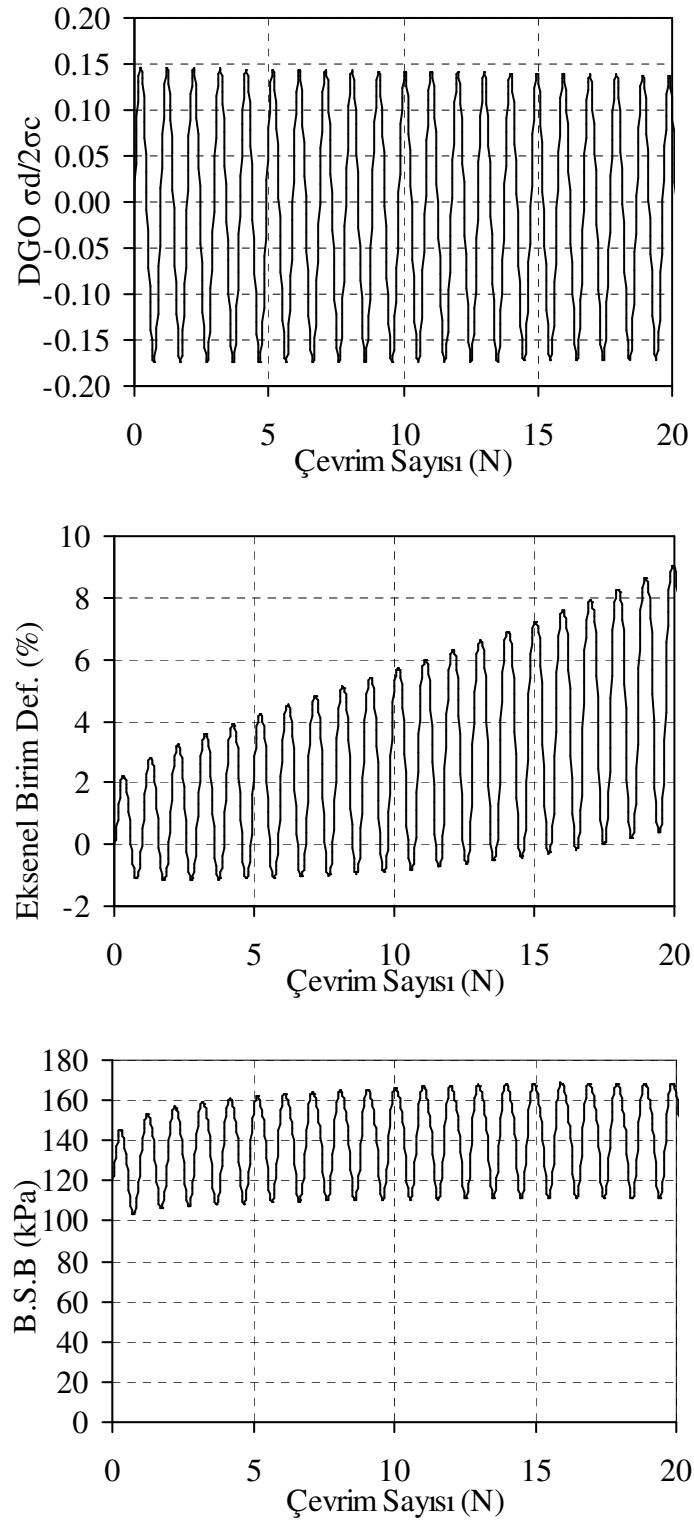
Şekil A.2 : S2 3.00-3.50 dinamik deneyde Deviatorör gerilme, boşluk suyu basıncının birim deformasyonun çevrim sayısı ile ilişkisi



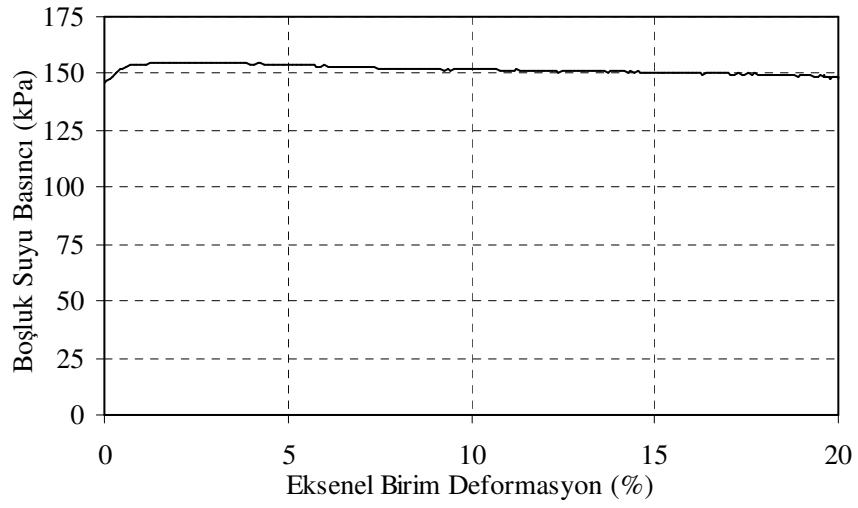
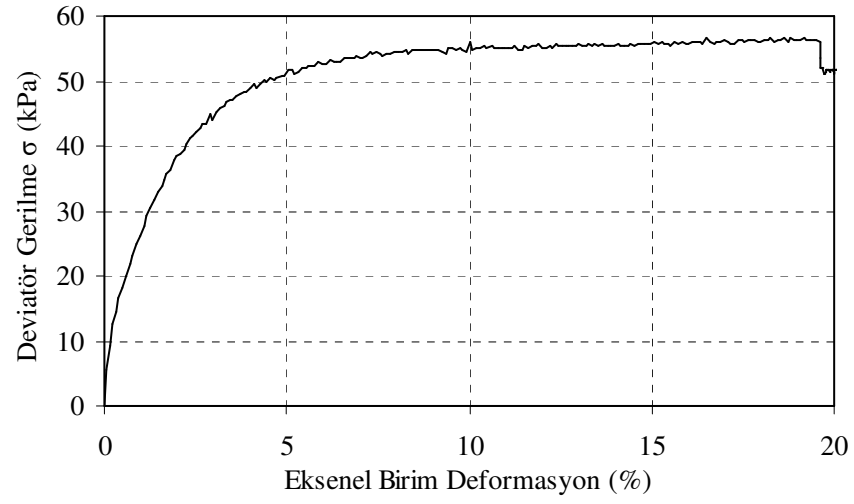
Şekil A.3 : S2 3.00-3.50 dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla ilişkisi



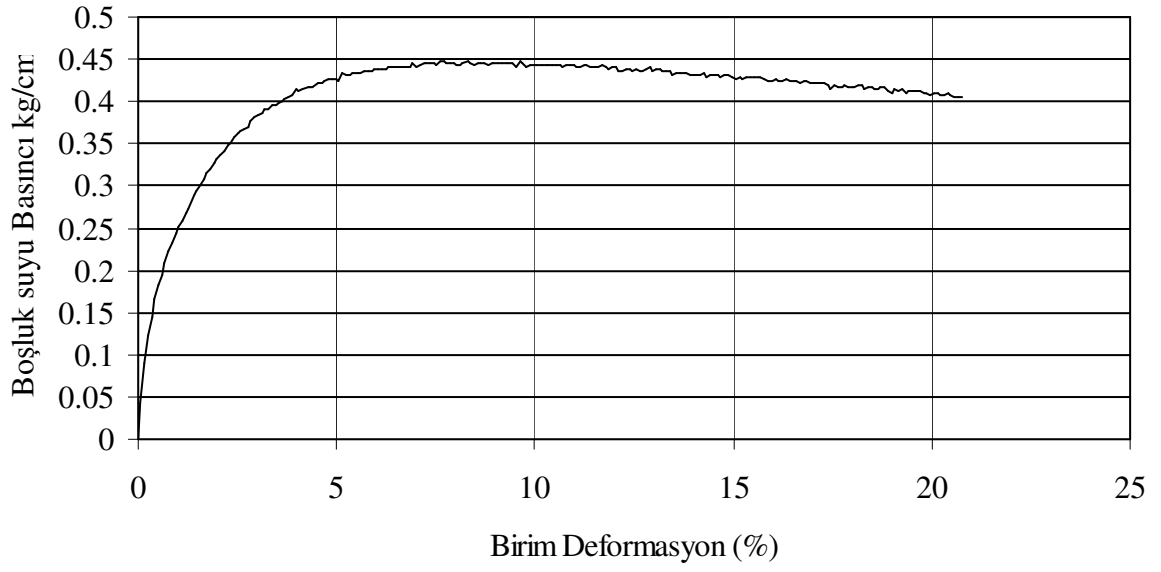
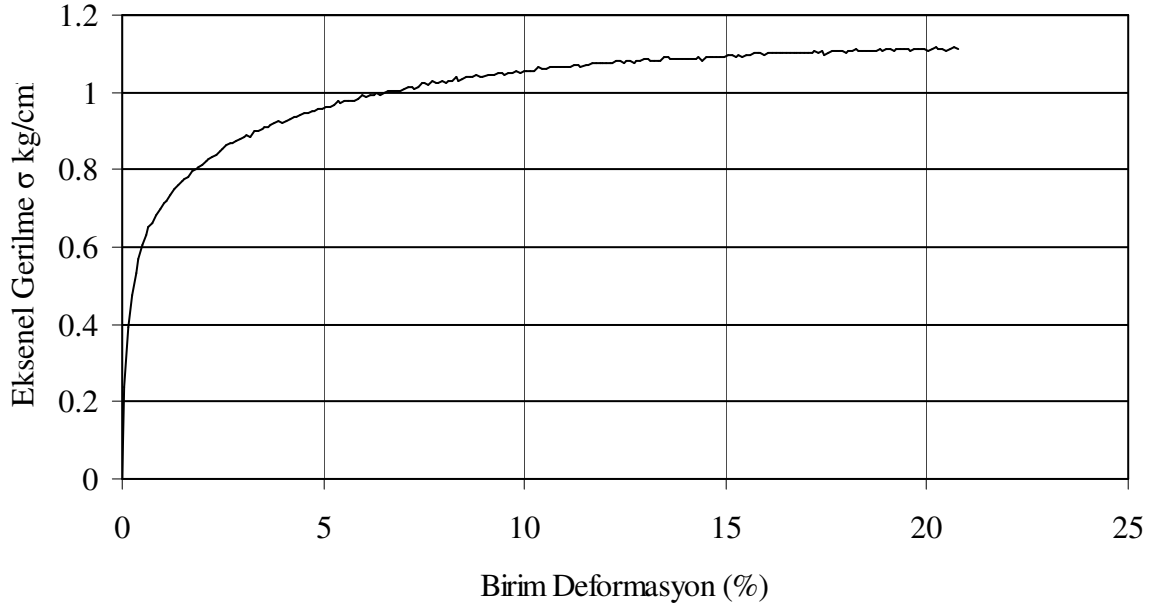
Şekil A.4 : S4 12.00-12.50 m. deneyinde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi



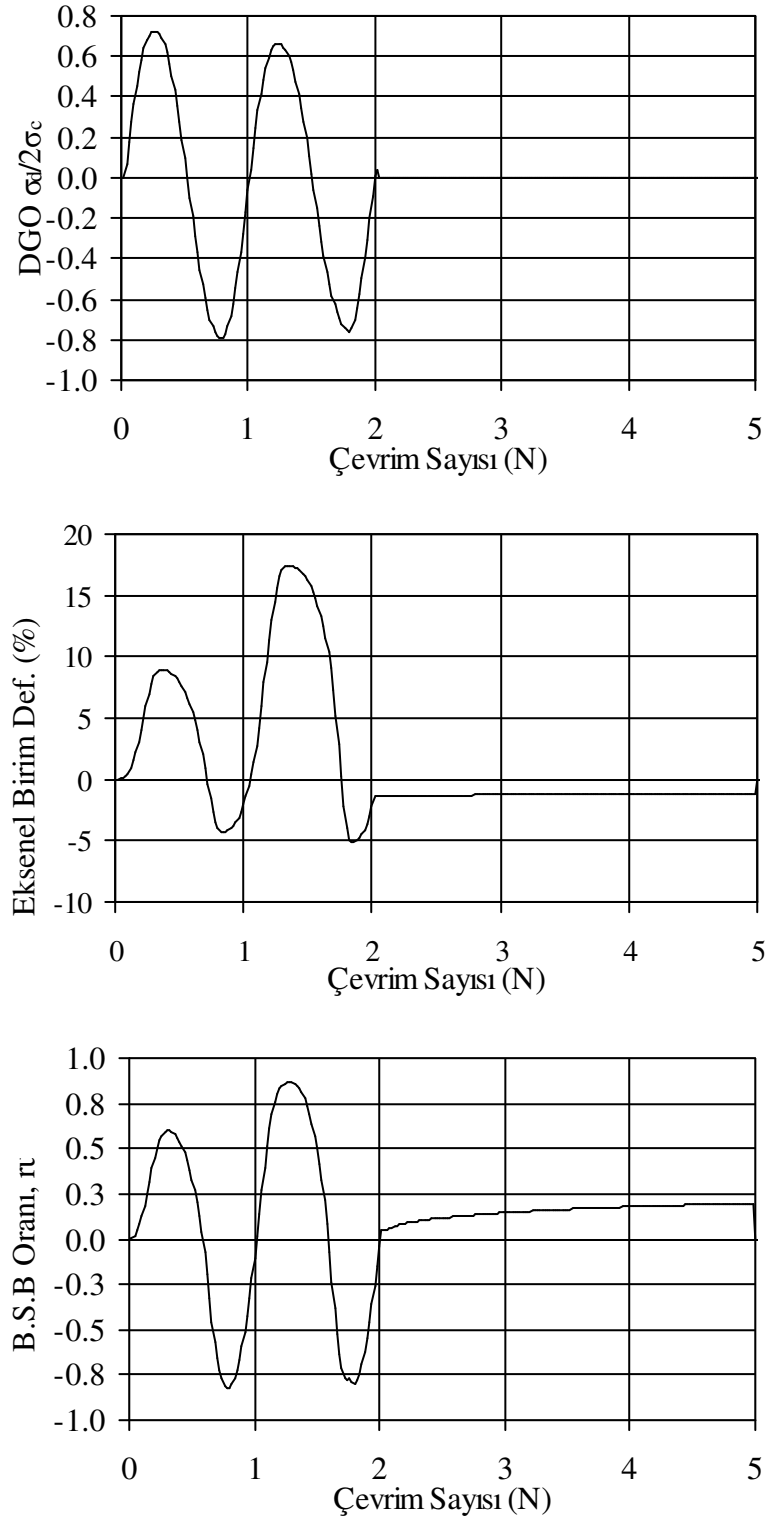
Şekil A.5 : S4 12.00-12.50 m. dinamik deneyinde dinamik gerilme oranı, deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi



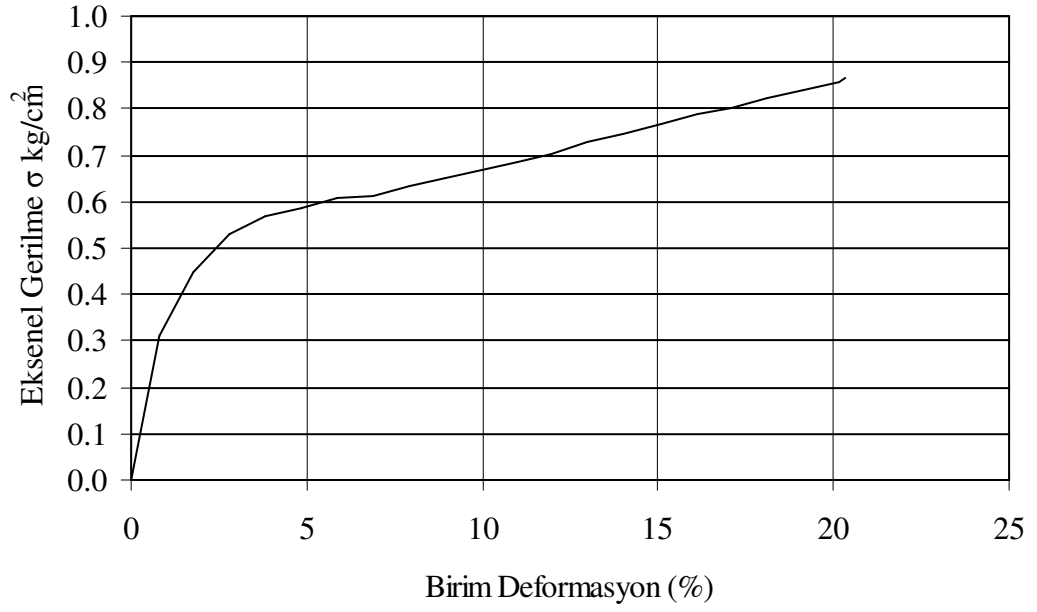
Şekil A.6 : S4 12.00-12.50 m. dinamik sonrası statik deneyinde, deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi



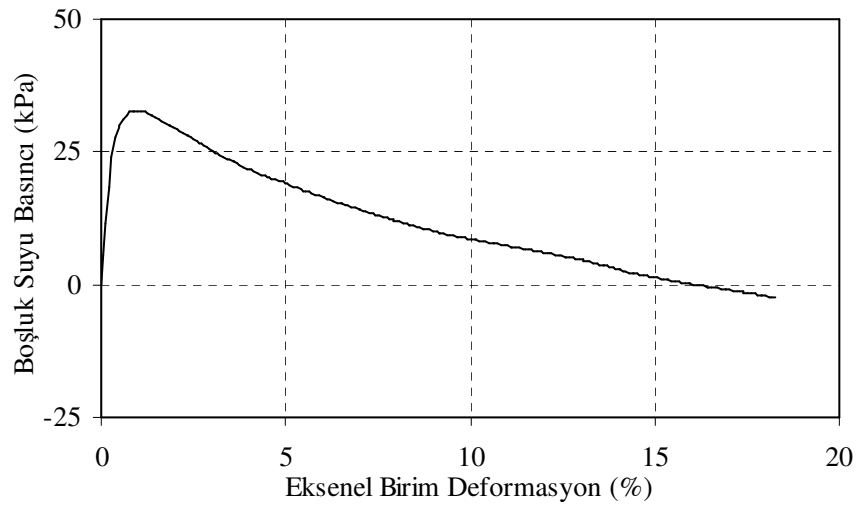
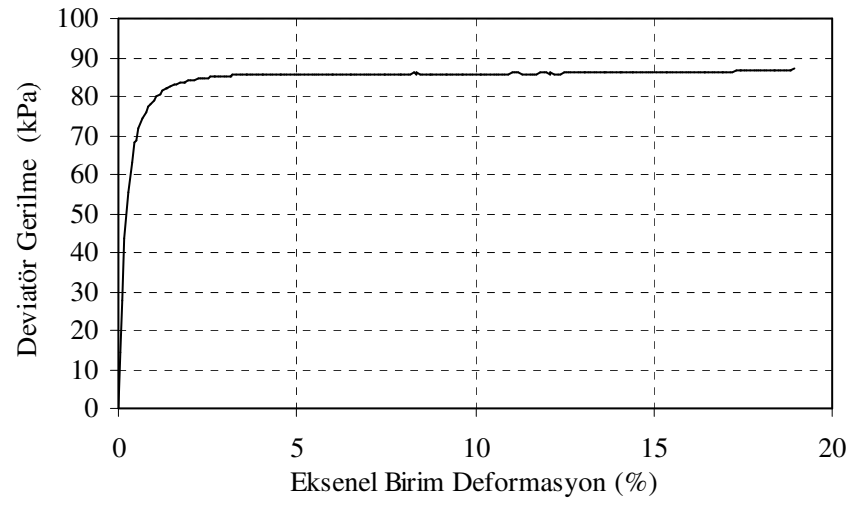
Şekil A.7 : S6 6.00-6.50 m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla olan değişimi



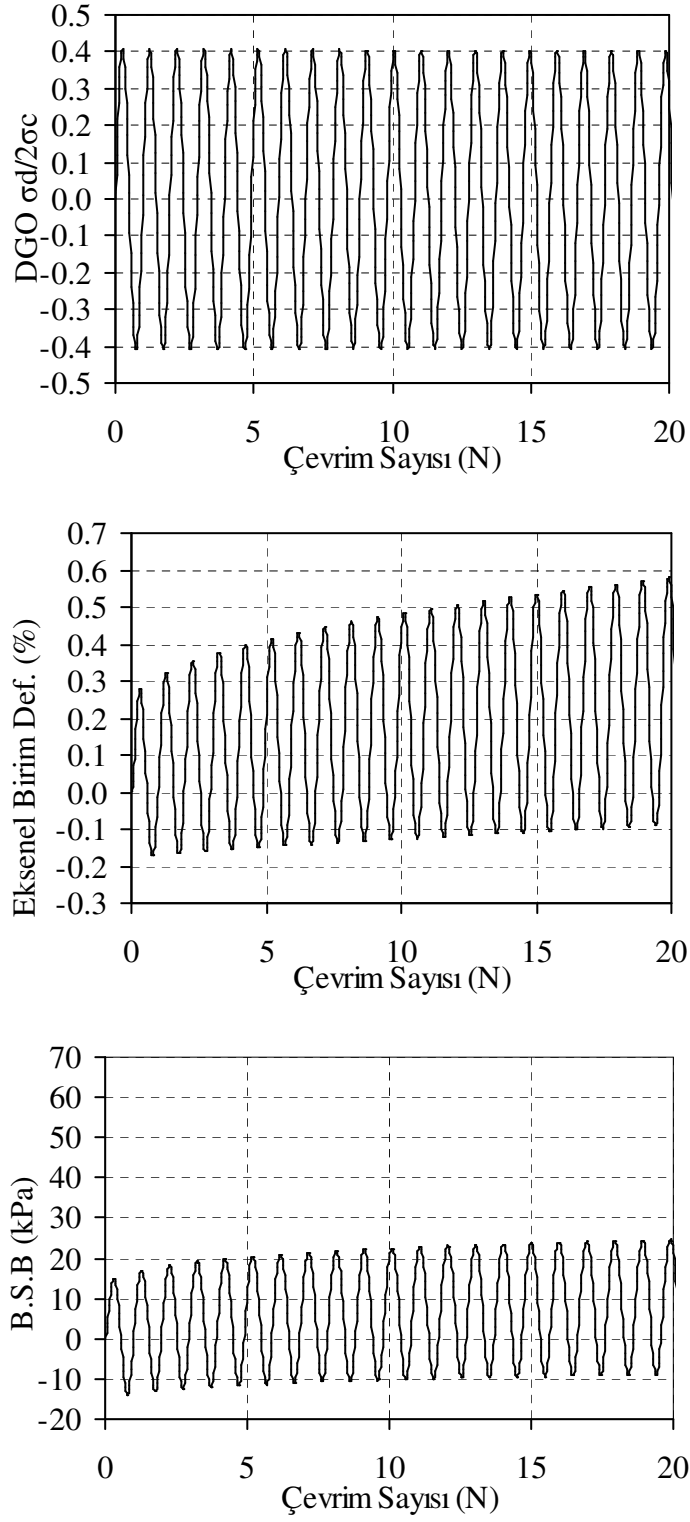
Şekil A.8 : S6 6.00-6.50 m. dinamik deneyin deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi



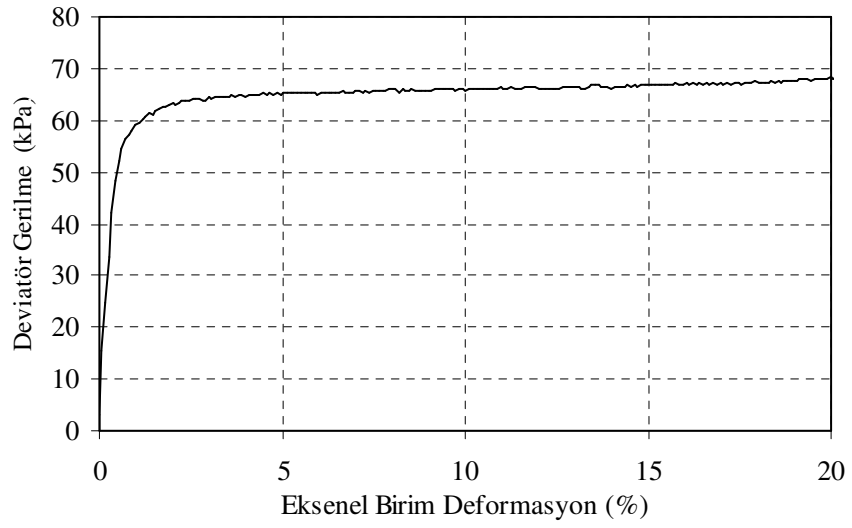
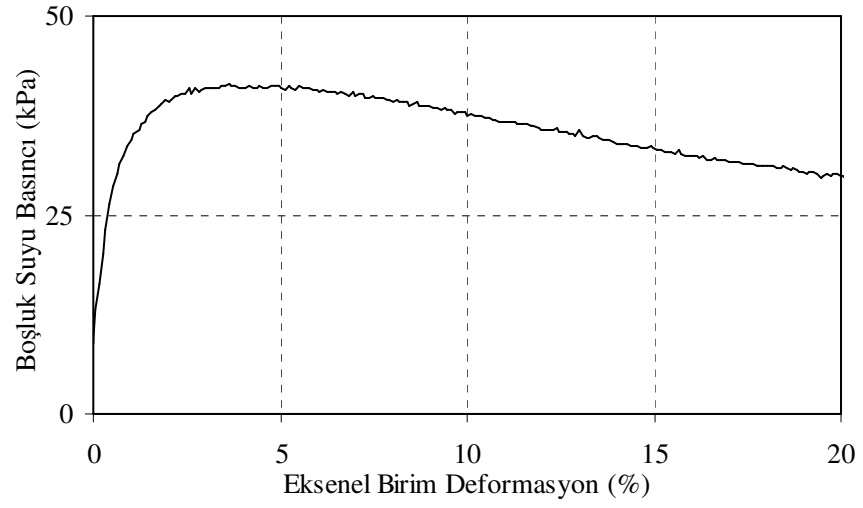
Şekil A.9 : S6 6.00-6.50 m. dinamik sonrası statik deneyin deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının birim deformasyonla olan değişimi



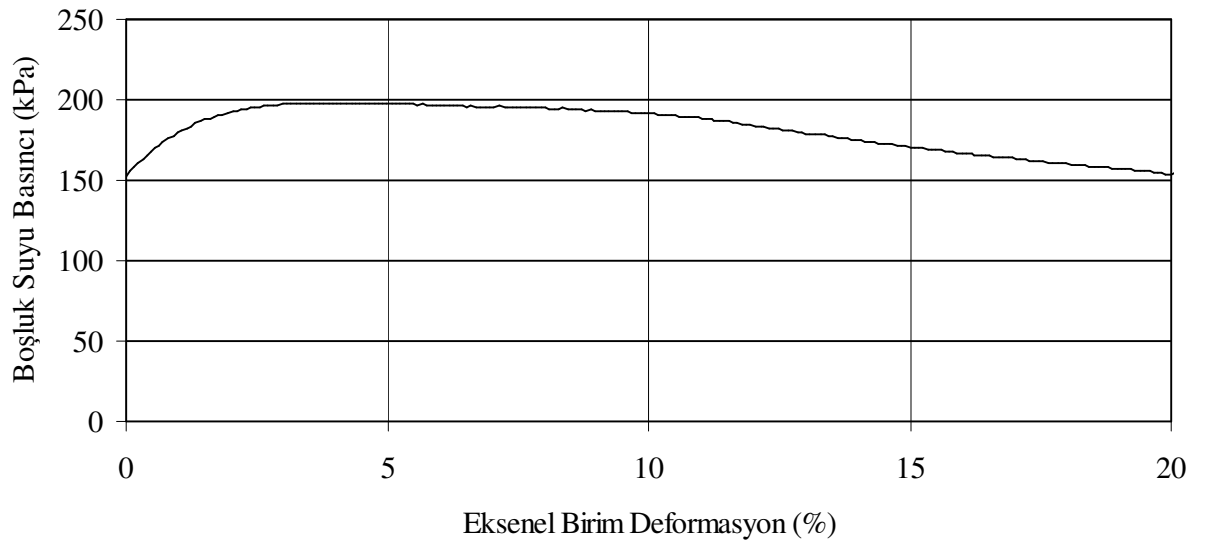
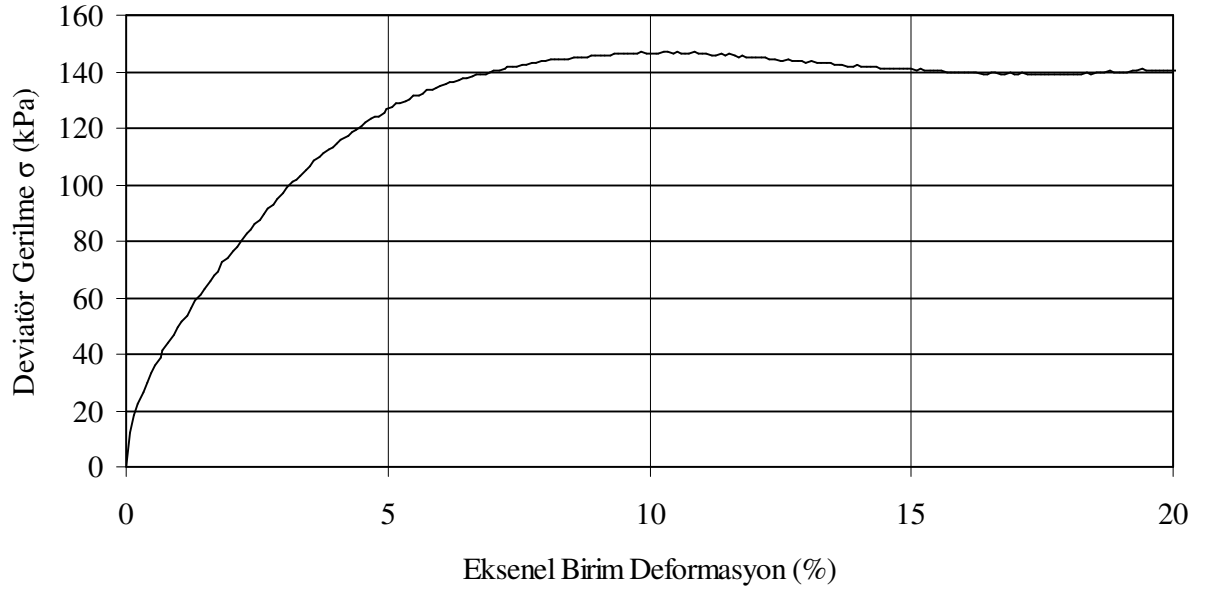
Şekil A.10 : S7 3.00-3.50 statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla olan ilişkisi



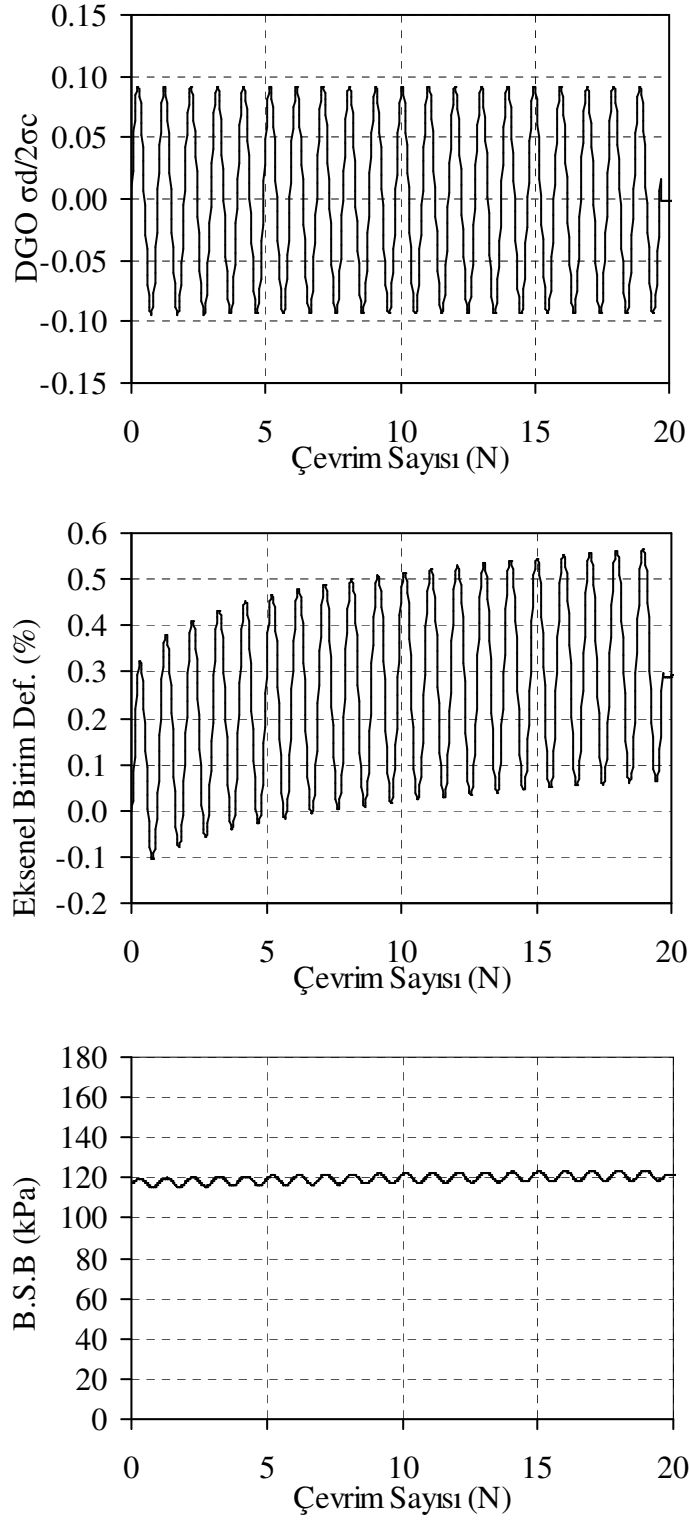
Şekil A.11 : S7 3.00-3.50 dinamik deneyde dinamik gerilme oranı eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



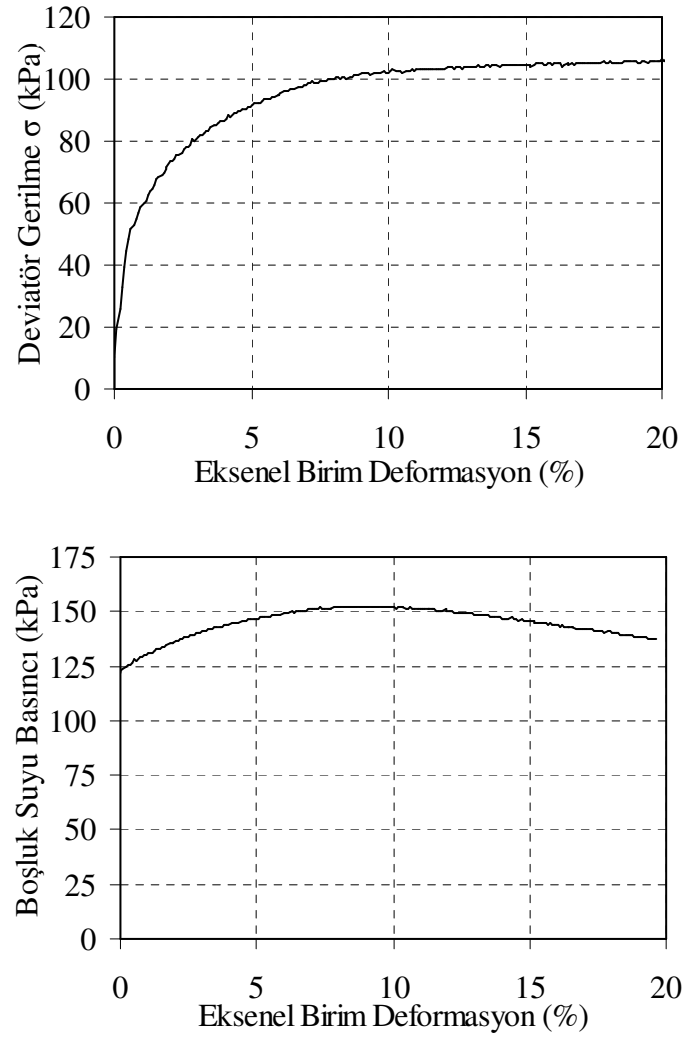
Şekil A.12 : S7 3.00-3.50 dinamik sonrası statik deneyde Boşluk suyu basıncı ve deviatör gerilmenin eksenel birim deformasyon ile ilişkisi



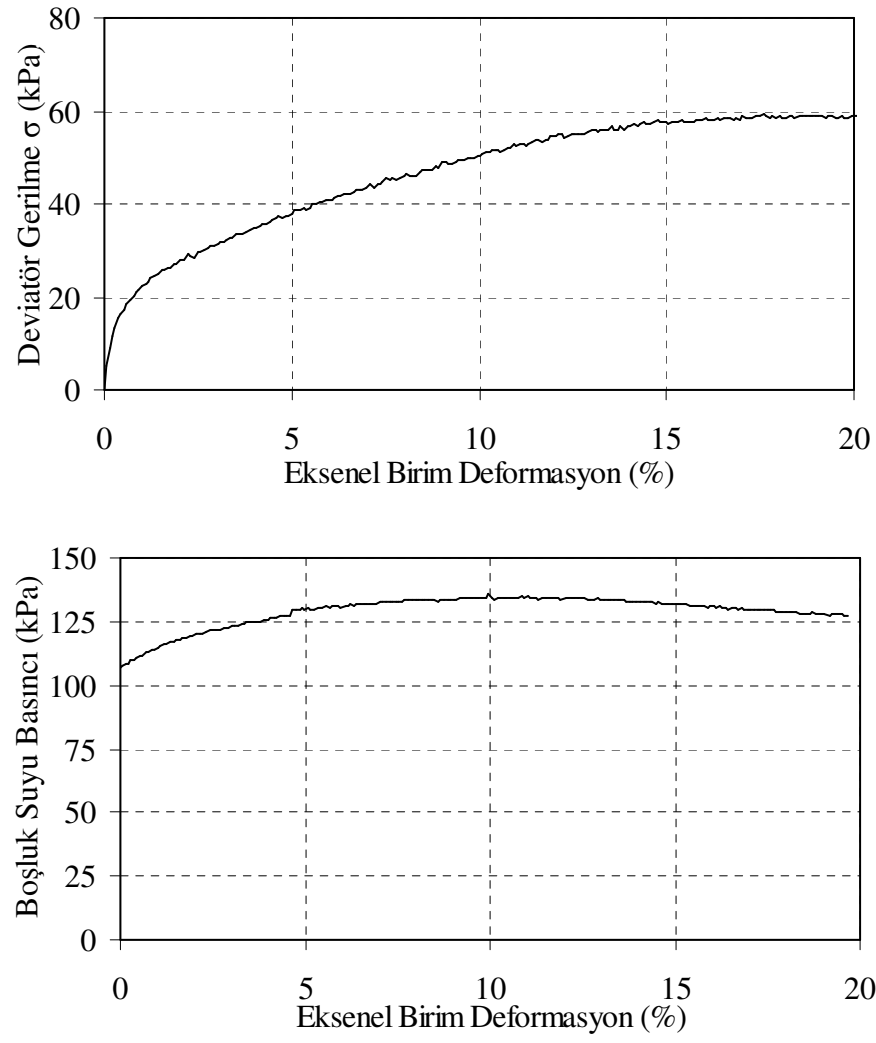
Şekil A.13 : S9 15.00-15.50 m. statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ilişkisi



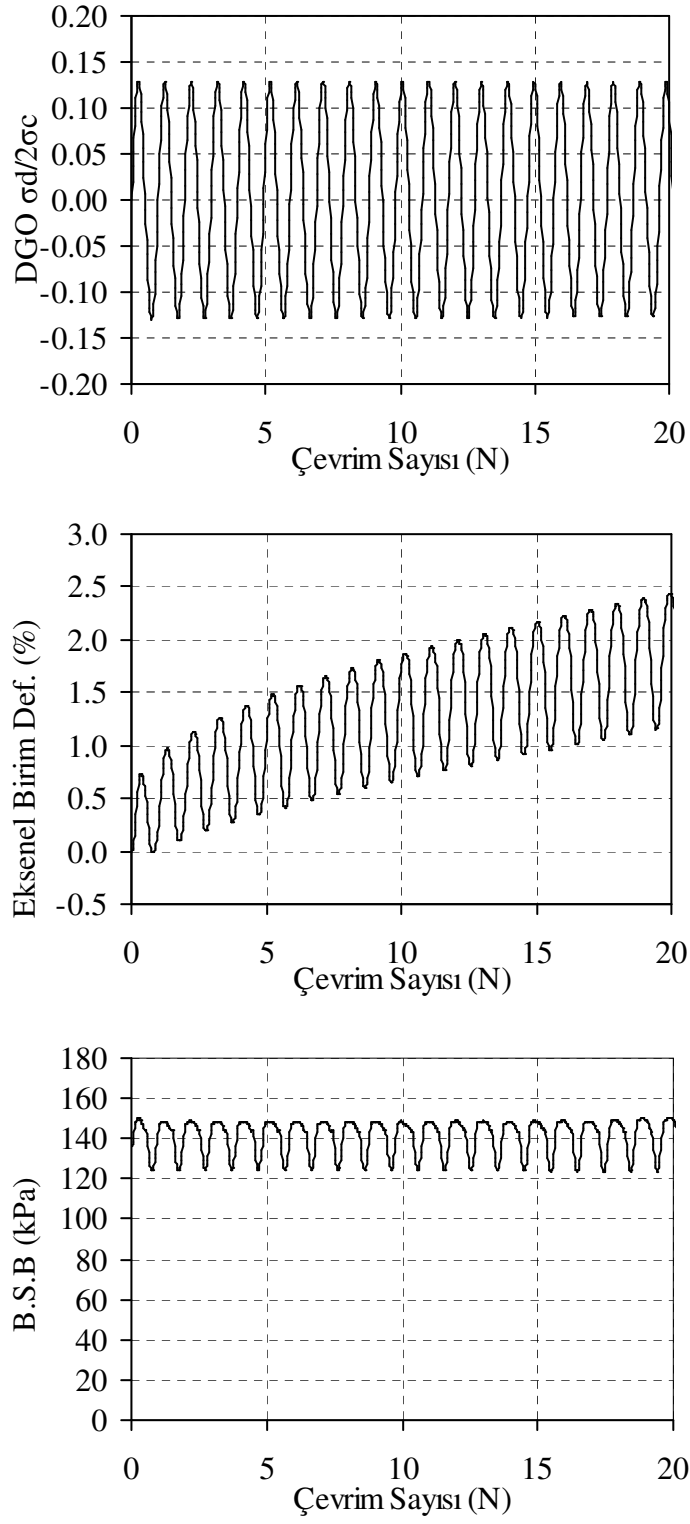
Şekil A.14 : S9 15.00-15.50 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



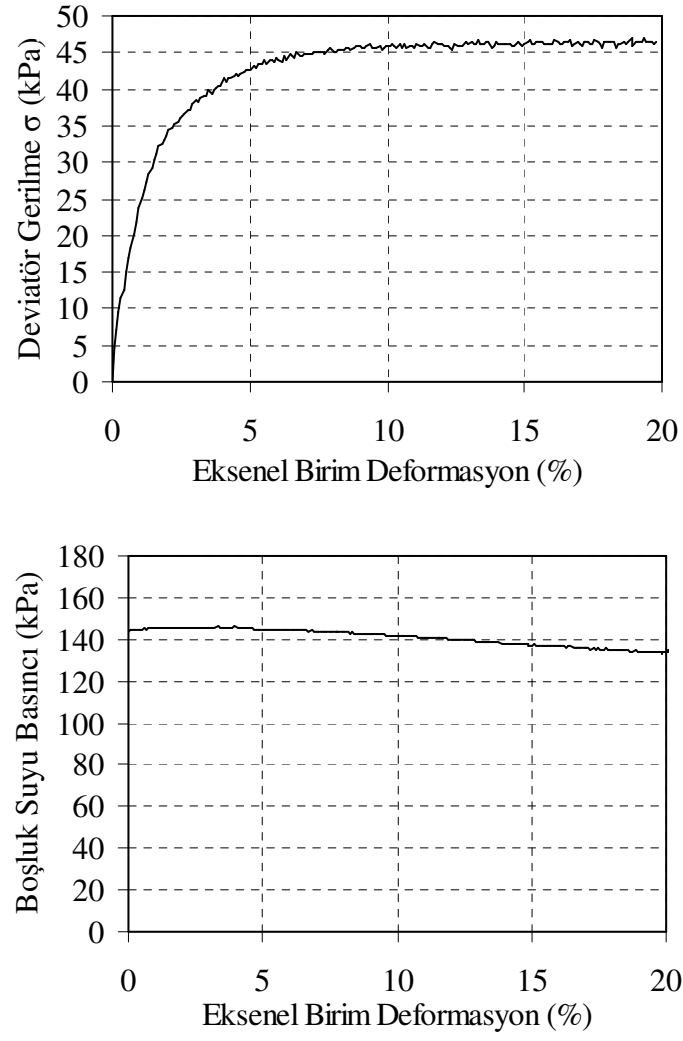
Şekil A.15 : S9 15.00-15.50 m dinamik sonrası statik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla olan ilişkisi



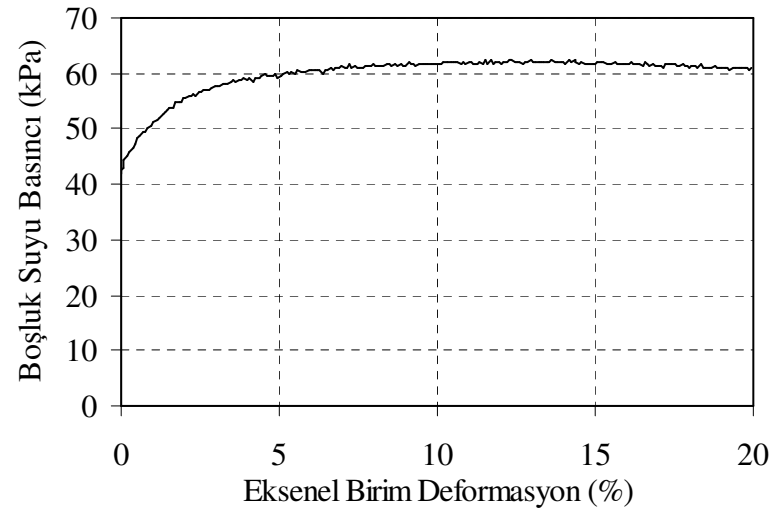
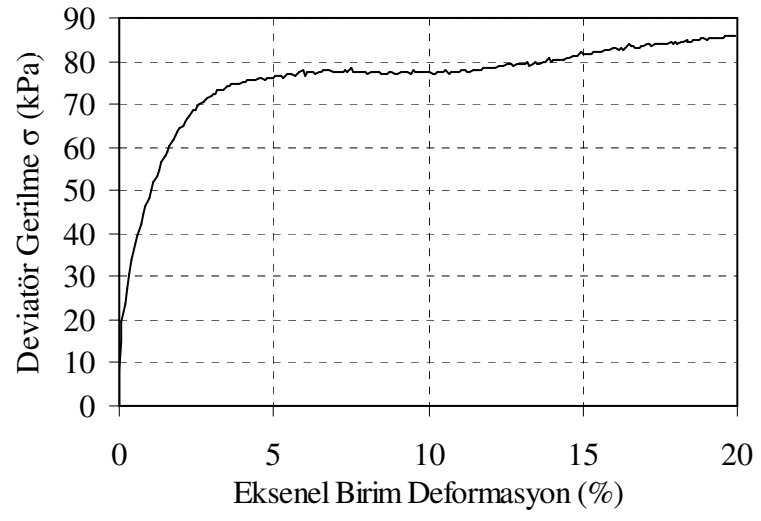
Şekil A.16 : S11 12.00-12.50 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi



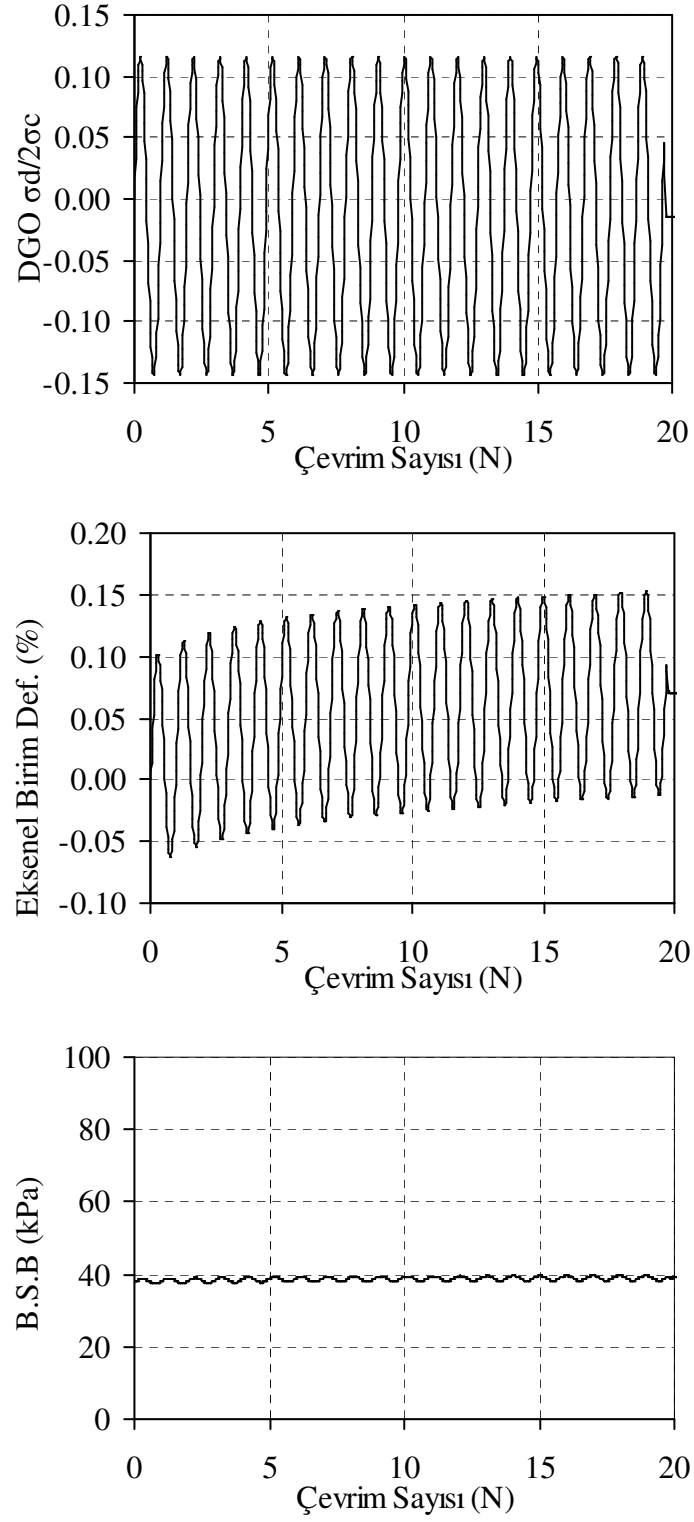
Şekil A.17 : S11 12.00-12.50 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



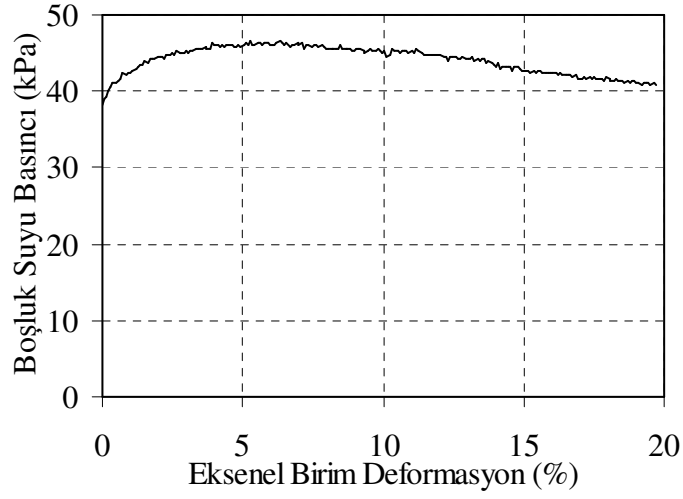
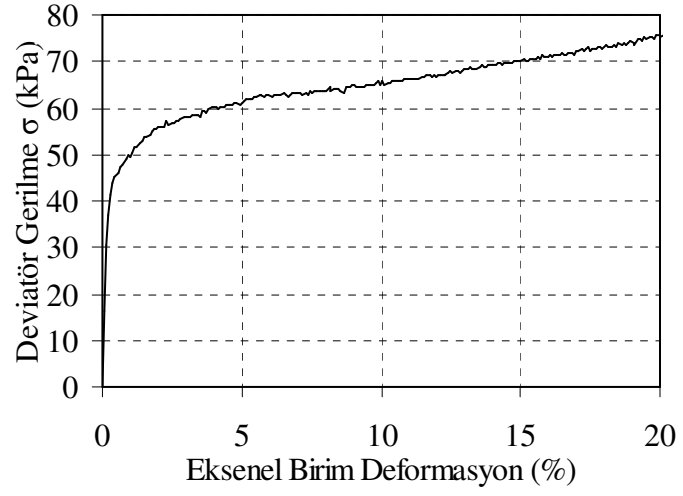
Şekil A.18 : S11 12.00-12.50 m dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi



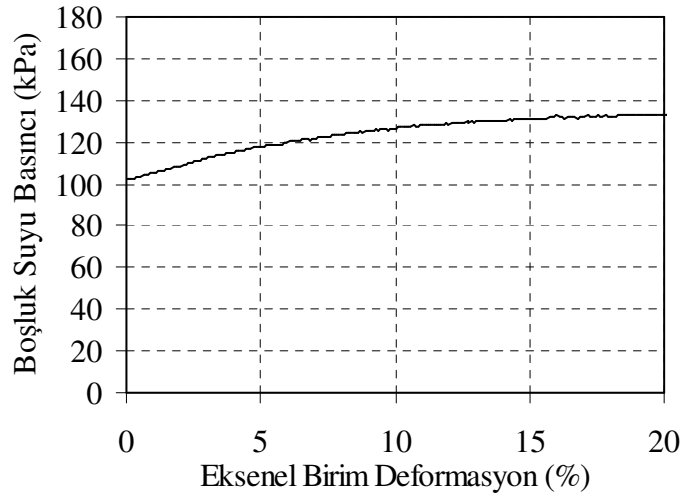
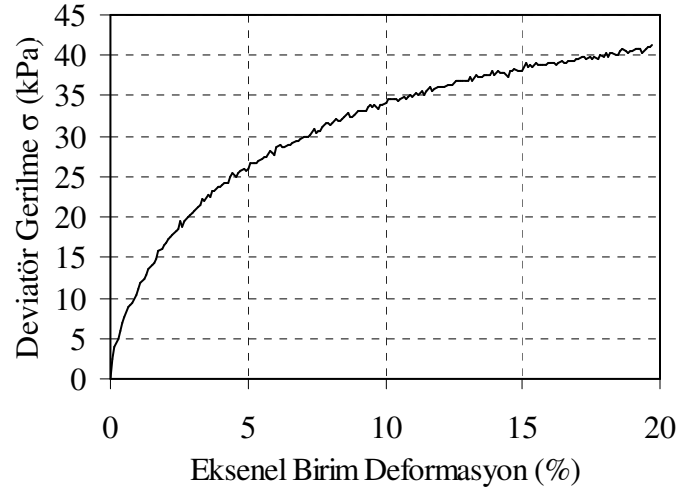
Şekil A.19 : S13 4.50-5.00 m statik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla değişimi



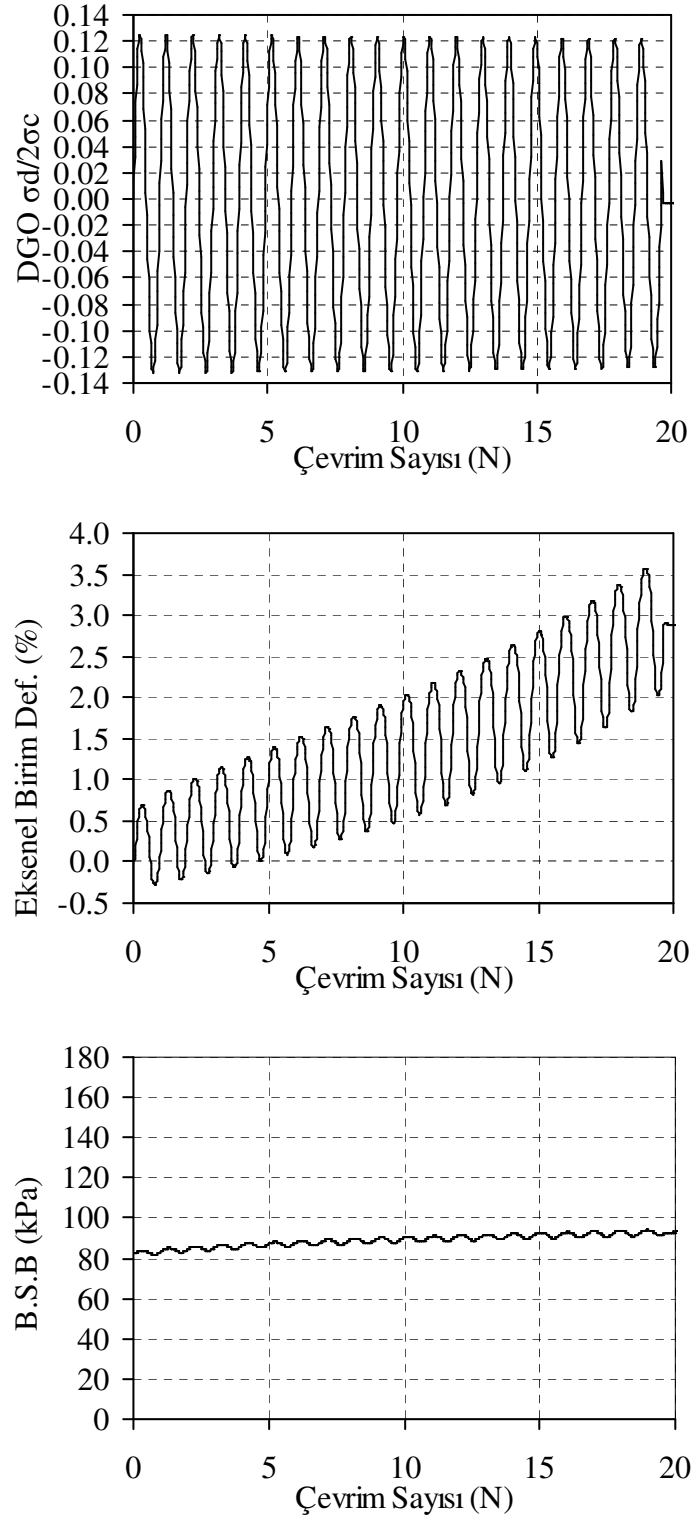
Şekil A.20 : S13 4.50-5.00 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



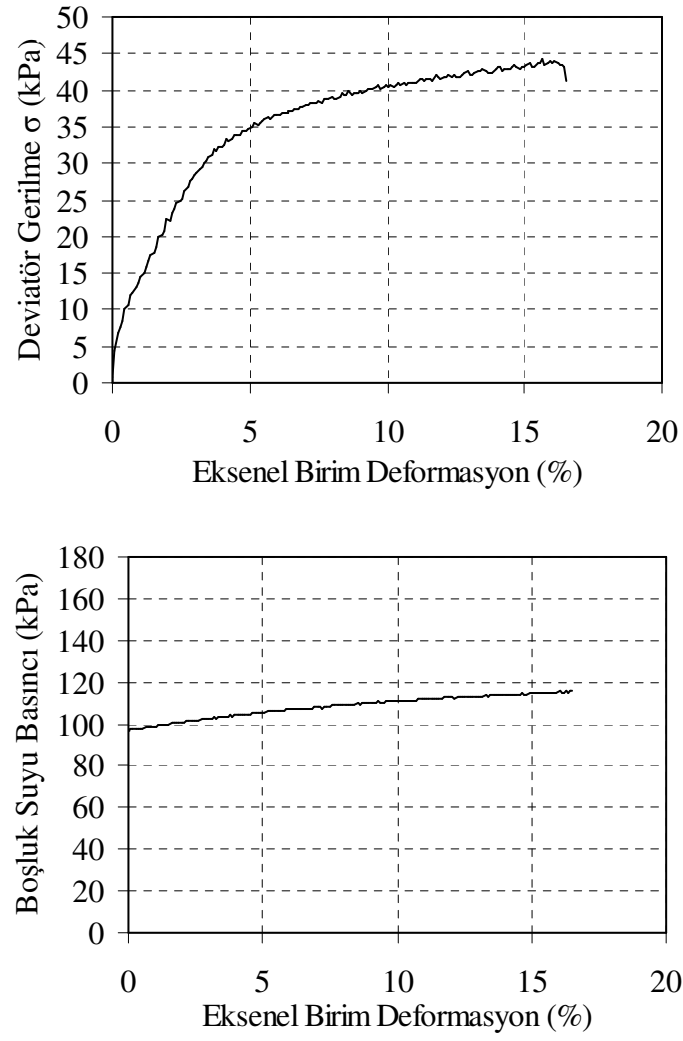
Şekil A.21 : S13 4.50-5.00 m dinamik sonrası statik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının aksel birim deformasyonla değişimi



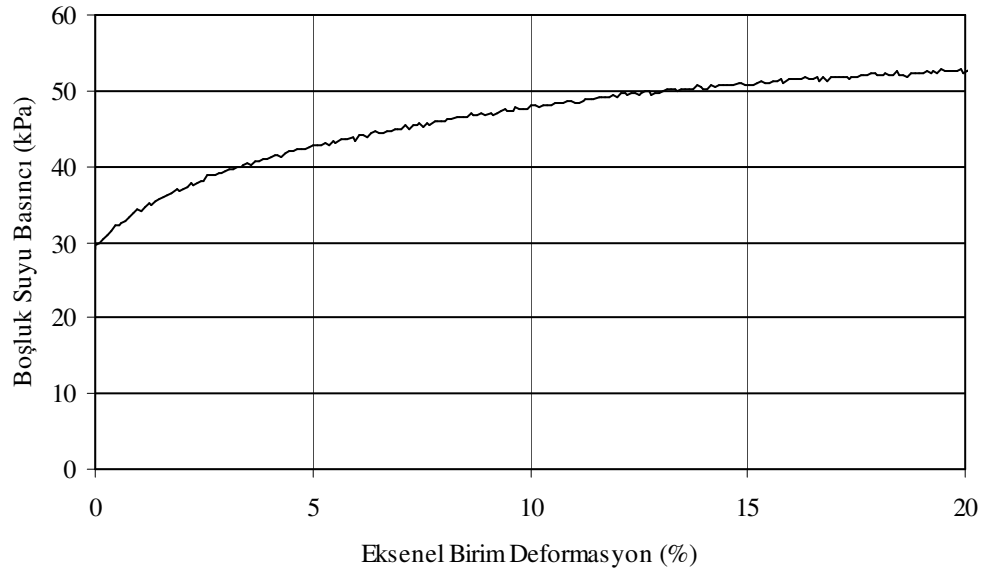
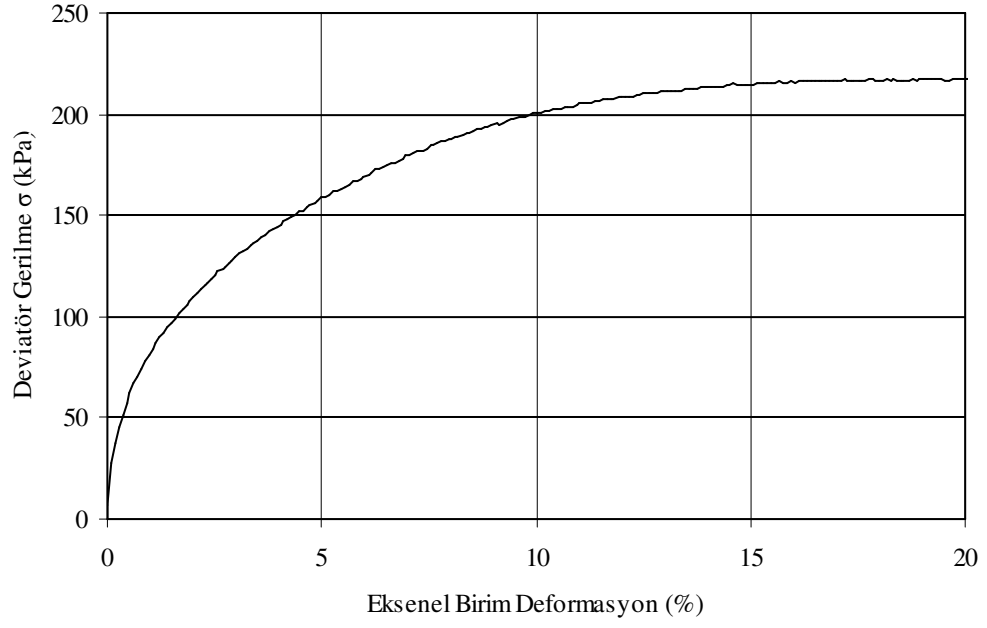
Şekil A.22 : S13 10.50-11.00 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının aksenal birim deformasyonla değişimi



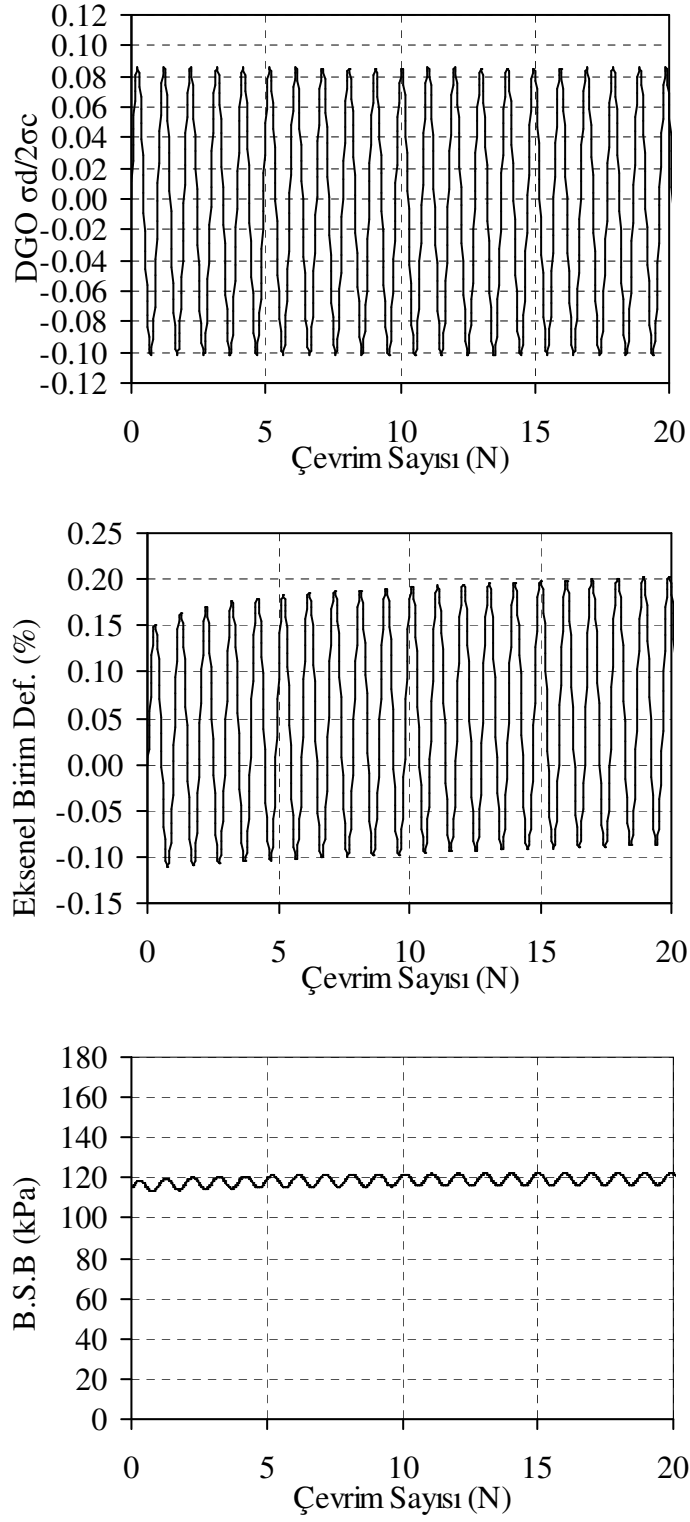
Şekil A.23 : S13 10.50-11.00 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



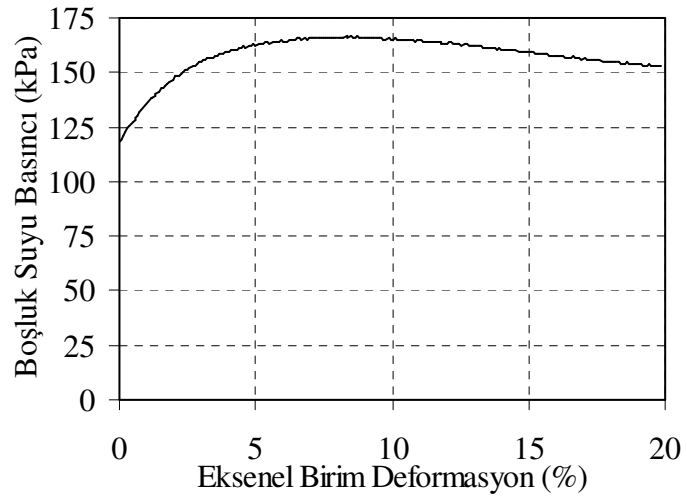
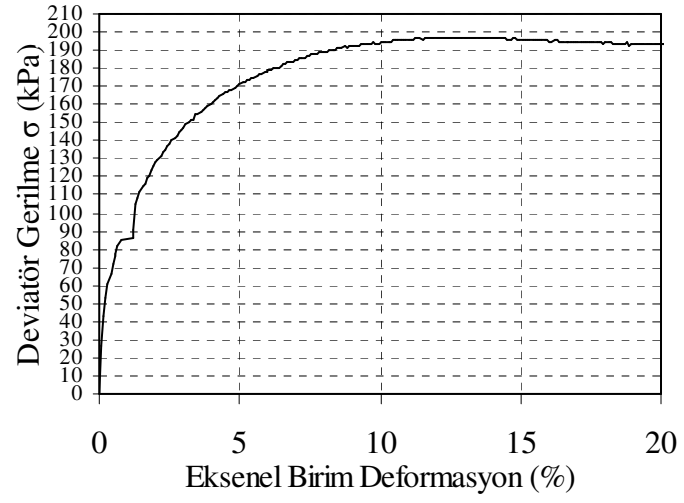
Şekil A.24 : S13 10.50-11.00 m dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



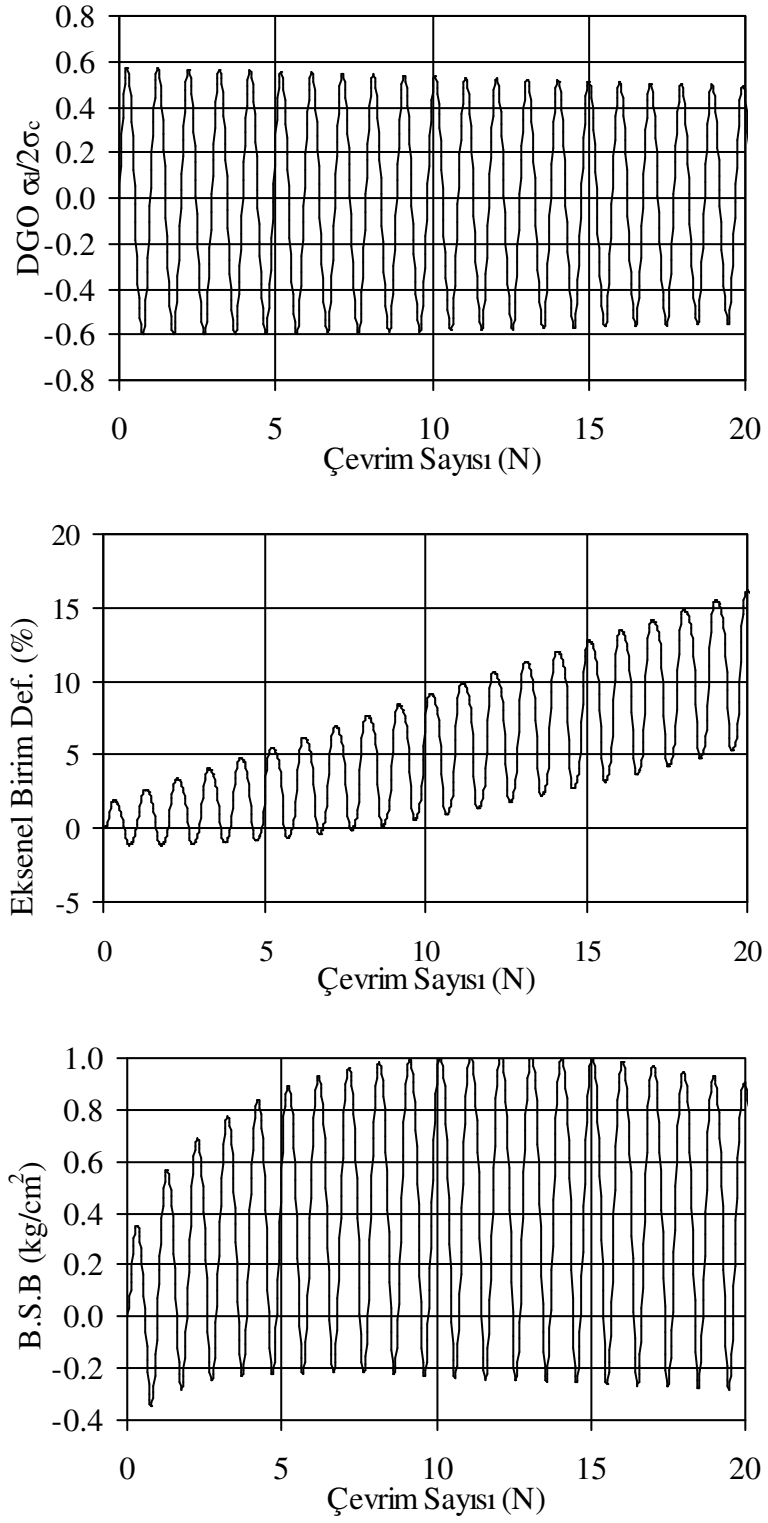
Şekil A.25 : S13 18.00-18.50 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



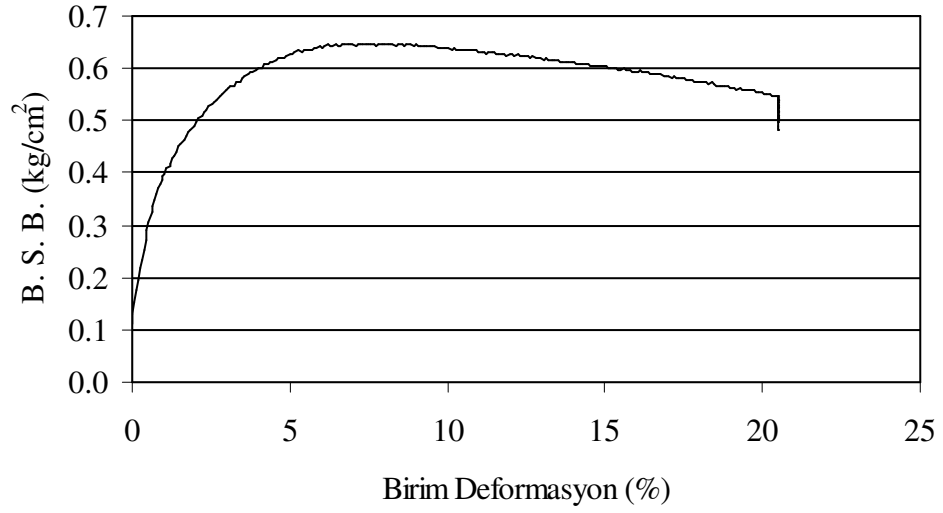
Şekil A.26 : S13 18.00-18.50 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



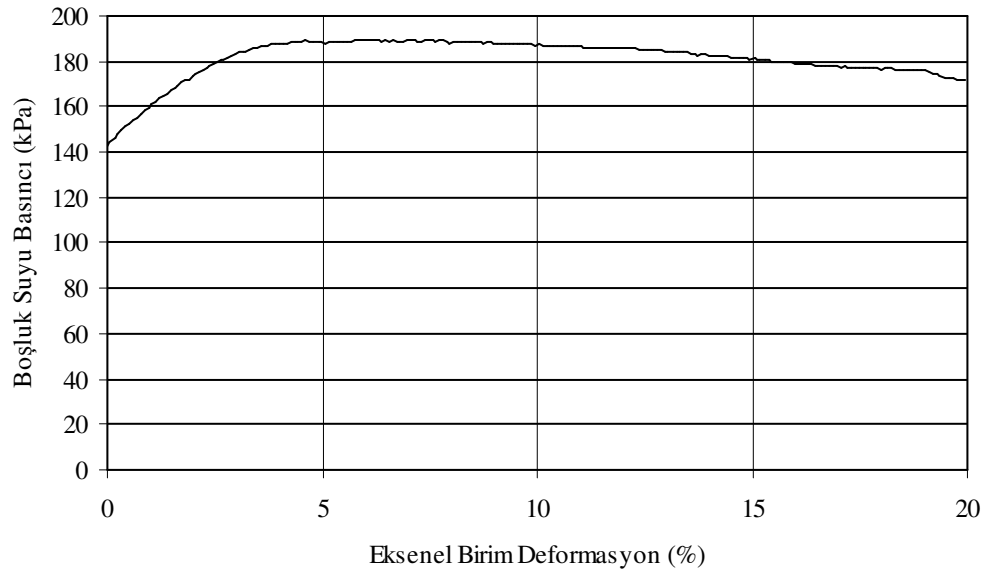
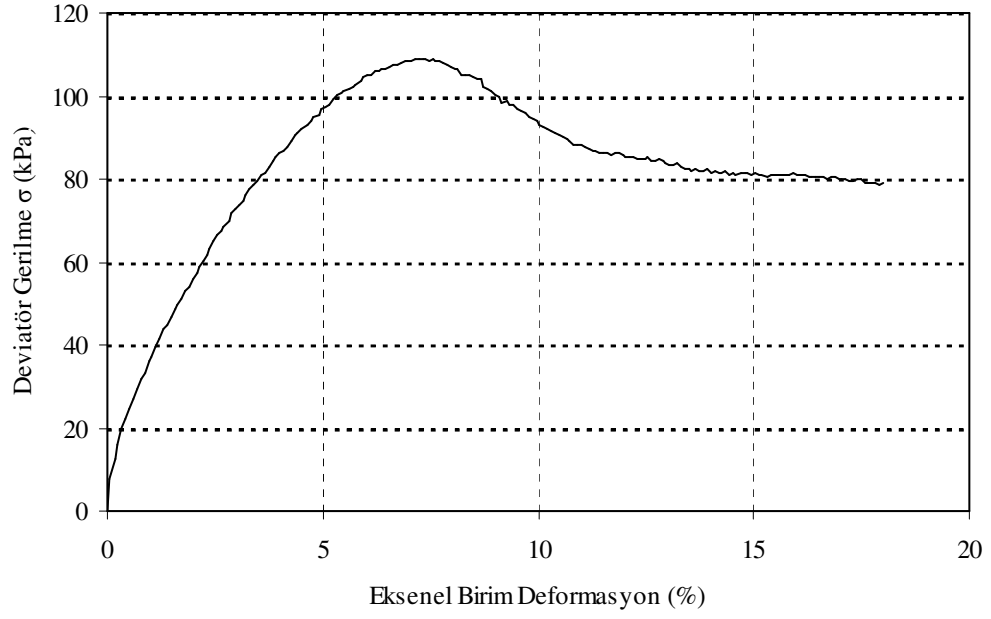
Şekil A.27 : S13 18.00-18.50 m dinamik sonrası statik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ile ilişkisi



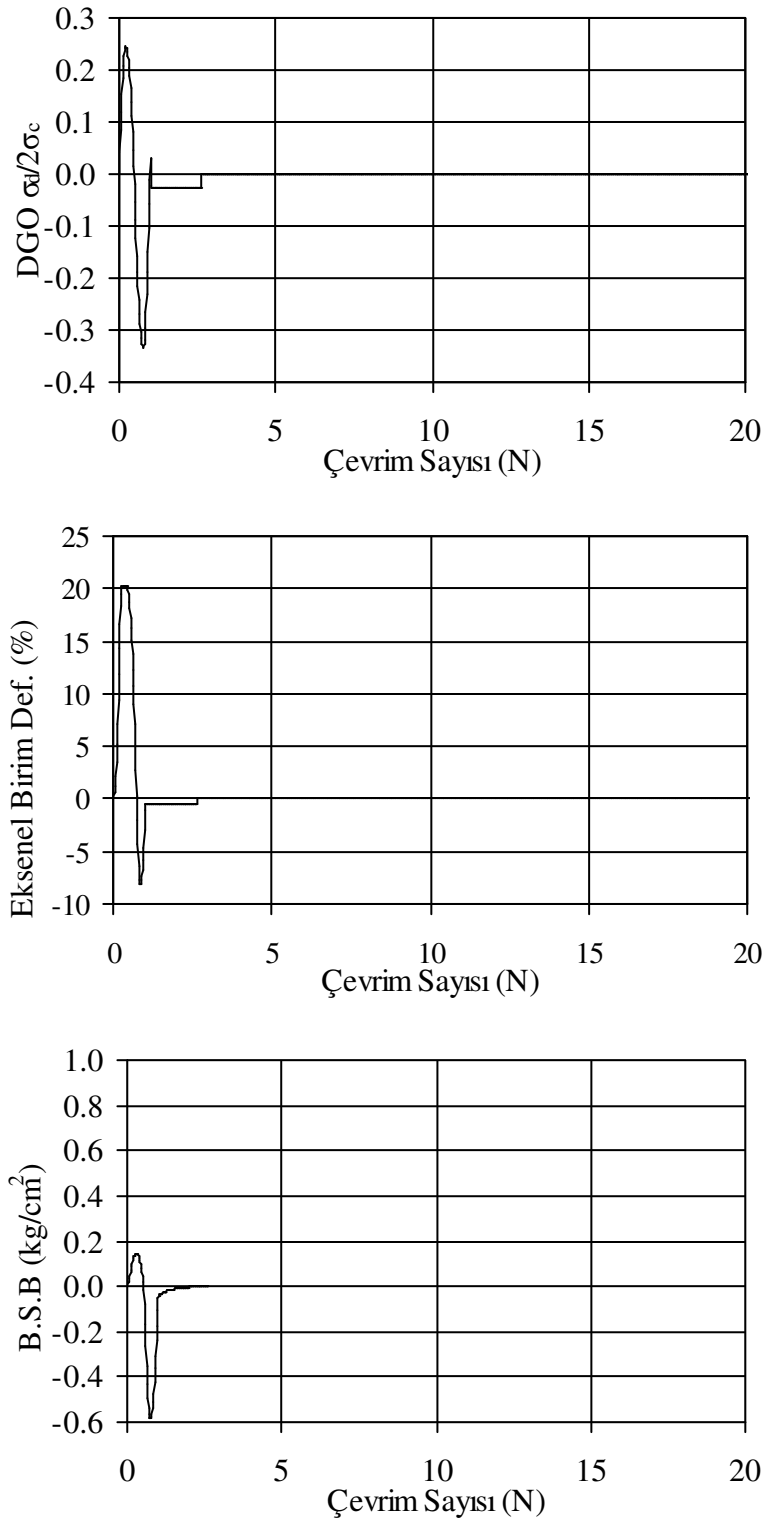
Şekil A.28 : S15 4.50-5.00 m dinamik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ilişkisi



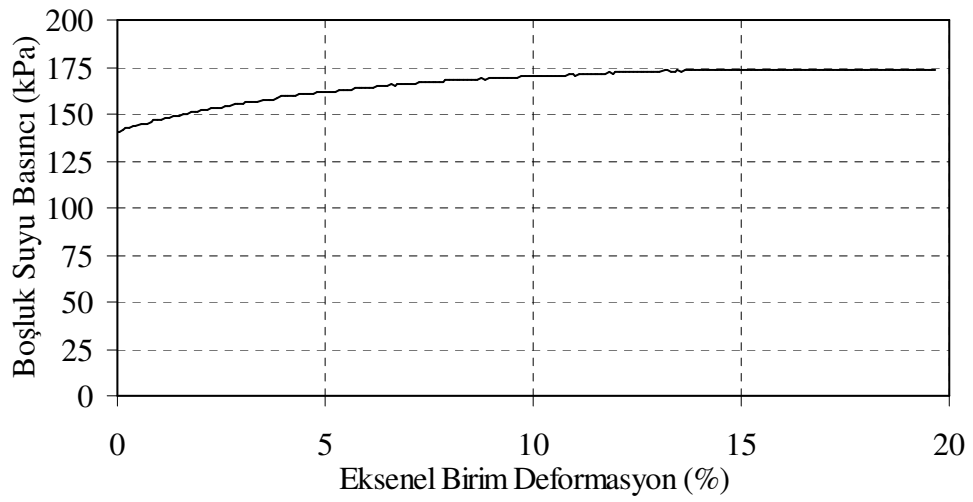
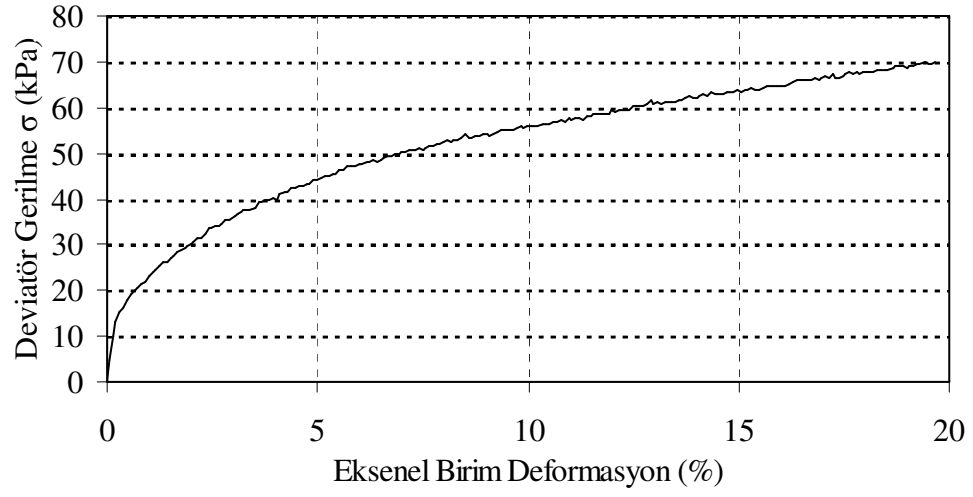
Şekil A.29 : S15 4.50-5.00 m dinamik sonrası statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ile ilişkisi



Şekil A.30 : S16 13.50-14.00 m statik deneyde deviatör gerilme ve boşluk suyu basıncının eksenel birim deformasyonla ile ilişkisi



Şekil A.31 : S16 13.50-14.00 m dinamik deneyde dinamik gerilme oranı, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile ilişkisi



Şekil A.32 : S16 13.50-14.00 m dinamik sonrası statik deneyde deviator gerilme ve boşluk suyu basıncının aksel birim deformasyonla ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet ŞENER

Doğum Yeri ve Tarihi: Kayseri 10.03.1983

Adres: Denizköşkler mah. Zafer cad. Misket Sokak.1/2 Avcılar, İstanbul

Lisans Üniversite: Erciyes Üniversitesi.