

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNCE DANELİ ZEMİNLERDE KİL ORANININ
SIVILAŞMAYA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Nazile URAL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ

Mart 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNSÖZ

**İNCE DANELİ ZEMİNLERDE KİL ORANININ
SIVILAŞMAYA ETKİSİ**

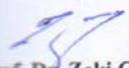
DOKTORA TEZİ

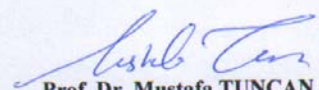
İnş. Yük. Müh. Nazile URAL

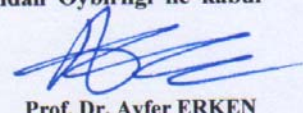
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ


Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

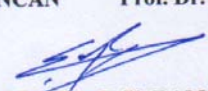
Bu tez 26 / 03 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Mustafa TUNCAN
Üye


Prof. Dr. Ayfer ERKEN
Üye


Prof. Dr. Hasan ARMAN
Üye


Yrd.Doç.Dr. Şefik RAMAZANOĞLU
Üye

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, Adapazarı için önemli bir problem olan zemin sıvılaşma davranışı incelenmiştir. Böylelikle zemin davranışlarının önceden belirlenerek, inşa edilecek yapıların deprem sırasında oluşacak sıvılaşma olayından en az derecede etkilenmesi sağlanmaktadır. İnce daneli zeminlerin sıvılaşma yeteneğini tayin etmede kullanılan ve Çin Kriteri olarak bilinen özelliklerin Adapazarı siltlerinin sıvılaşma yeteneğini tam olarak yansıtamadığı kuşkusu ile laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyleri yapılmış ve sıvılaşma belirtisi gösteren ve göstermeyen numunelerin ayırımı yapılmıştır.

Tüm çalışmalarım süresince kendisinden her türlü desteği gördüğüm danışman hocam Prof. Dr. Zeki Gündüz'e ve hocam Prof. Dr. Akın Önalp'a teşekkür ederim. Ayrıca tüm doktora süresi boyunca desteğini benden esirgemeyen, geceleri ve hafta sonları benimle deney yapmaya gelen eşim Faruk Ural'a ve eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen annem Fatma Saka ve babam Ramazan Saka ile tüm kardeşlerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
FOTOĞRAF LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Tezin Kapsamı.....	2
BÖLÜM 2.	
ZEMİNİN DİNAMİK/SİSMİK DAVRANIŞI.....	4
2.1. Sıvılaşmanın Tanımı.....	7
2.2. Kumlarda ve Siltlerde Sıvılaşma.....	8
2.2.1. Kumlarda sıvılaşma.....	9
2.2.2. Siltlerde sıvılaşma.....	18
2.3. Sıvılaşmanın Deformasyon Seviyesine Göre Tanımı.....	32
2.4. Siltte Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler.....	34
2.4.1. Dane boyutu.....	35
2.4.2. Boşluk oranı.....	35
2.4.3. Yeraltı su seviyesi ve drenaj durumu.....	36
2.4.4. Deprem büyüklüğü ve süresi.....	36

2.4.5. Gerilme tarihçesi.....	37
2.4.6. Aşırı konsolidasyon oranının etkisi.....	38
2.4.7. Plastisite indisi.....	39
2.4.8. Zemin yapısı.....	41
2.4.9. Yaşlanmanın etkisi.....	42
2.4.10. Başlangıç çevre basıncı.....	43
2.4.11. Membran etkisi.....	44
2.4.12. Numune Boyutu.....	44
2.4.13. Yükleme şeklinin ve frekansının etkisi.....	45

BÖLÜM 3.

KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ	48
3.1. Monterey No.0 Kumunun Özellikleri.....	48
3.2. Siltlerin Oluşumu ve Özellikleri.....	48
3.3. Siltle İlgili Çalışmalar.....	49
3.4. Adapazarı' nın Coğrafyası ve Jeomorfolojisi.....	49
3.5. Adapazarı Zeminlerinin Mineralojik Özellikleri	50
3.6. Fiziksel Deneyler.....	51
3.6.1. Dane çapı dağılımı.....	51
3.6.2. Dane özgül ağırlığı.....	51
3.6.3. Kıvam limitleri.....	53

BÖLÜM 4.

DENEY NUMUNESİNİN HAZIRLANMASI	57
4.1. Numune Hazırlama Teknikleri.....	57
4.1.2. Kuru yağmurlama.....	57
4.1.2. Islak tokmaktama.....	58
4.1.3. Suda çöktürme yöntemi.....	59
4.1.4. Bulamaç çökeli yöntemi.....	59
4.1.5. Brandon (1991) (Slurry in batch consolidometer)	61
4.2. Farklı Numune Hazırlama Yöntemlerinin Karşılaştırması.....	61
4.3. Adapazarı Siltinin Deneye Hazırlanması.....	70

BÖLÜM 5.

DENEY SİSTEMİ VE DENEY YÖNTEMİ.....	72
5.1. Dinamik Üç Eksenli DeneY Sistemi ile Arazi Uyumu.....	72
5.2. Dinamik Üç Eksenli DeneY Sisteminin Mekanığı.....	73
5.3. Dinamik Üç Eksenli DeneY Sisteminin Ekipmanları.....	76
5.3.1. Yükleme çerçevesi.....	78
5.3.2. Üç eksenli hücre.....	78
5.3.3. DeneY denetleme ve veri toplama sistemi.....	78
5.4. DeneY Yöntemi.....	79
5.4.1. Doyurma aşaması.....	79
5.4.2. Konsolidasyon aşaması.....	80
5.4.3. Dinamik yükleme aşaması.....	80
5.5. Dinamik Üç Eksenli DeneYde Hesaplamalar.....	81
5.6. Dinamik Üç Eksenli DeneY Sisteminin Kalibrasyonu.....	82

BÖLÜM 6.

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ.....	83
6.1. Dinamik Gerilme Oranı ve Çevrim Sayısı Arasındaki İlişki.....	88
6.2. Dinamik Gerilme Oranı, İnce Dane Oranı, Kil İçeriğı ve Plastisitenin Sıvılaşmaya Etkisi.....	91
6.2.1. Dinamik gerilme oranının sıvılaşmaya etkisi.....	91
6.2.2. İnce dane oranının sıvılaşmaya etkisi.....	95
6.2.3. Kil içeriğinin sıvılaşmaya etkisi.....	96
6.2.4. Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi.....	98
6.3. Sıvılaşabilirliğın üç değışkenli olarak tanımlanması.....	100
6.4. Deneysel Sonuçların Sıvılaşma Kriterleri ile Karşılaştırma.....	105

BÖLÜM 7.

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	114
KAYNAKLAR.....	119
EKLER.....	132
ÖZGEÇMİŞ.....	180

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a_{max}	Deprem tarafından zemin yüzeyinde oluşturulan en büyük yatay ivme
A_c	Konsolidasyon sonrası numune kesit alanı
C	Kil yüzdesi
CTX	Dinamik üç eksenli deneyi
DGO	Dinamik gerilme oranı
D_{10}	Efektif çap
D_{50}	Ortalama dane boyu
D_r	Sıklık derecesi
DSS	Dinamik basit kesme deneyi
ϵ_c	Sıkışmada eksenel birim deformasyon
ϵ_e	Çekmede eksenel birim deformasyon
ϵ_{da}	Çift yönlü eksenel birim deformasyon, (%)
e_{max}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
e	Boşluk oranı
FCL	Limit ince içeriği
FCth	Eşik İnce içeriği
g	Yerçekimi ivmesi
H_c	Konsolidasyon aşaması sonrası numune yüksekliği
I_L	Sıvılık indisi
I_p	Plastisite indisi
k	Geçirimsizlik katsayısı
K_o	Sükunette toprak basıncı katsayısı
N_c	Sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı
n	Kum etki faktörü
τ_{max}	Maksimum kayma gerilmesi
τ_{ort}	Ortalama kayma gerilmesi
P_c	Dinamik yük
r_d	Gerilme azaltma faktörü
r_u	Boşluk suyu basıncı oranı
ρ	Zeminin birim hacim ağırlığı
SPT	Standart penetrasyon deneyi
SPTN	Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı
S_r	Doğunluk derecesi
σ_a	Basma ve çekmede uygulanan gerilmenin ortalaması
σ_v	Toplam düşey gerilme
σ_d	Deviatör gerilme
σ_v'	Efektif düşey gerilme

σ'_{3c}	İzotrop konsolidasyon (hücre) basıncı
u_w	Boşluk suyu basıncı
V_s	Kayma dalgası hızı
w_n	Su muhtevası
w_L	Likit limit
w_P	Plastik limit

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Doygun kumda dane diziliminin dinamik yüklemekten etkilenmesi (PHRI, 1997).....	8
Şekil 2.2.	Doygun kumda sıvılaşma olayının gösterimi (Castro ve Poulos, 1977).....	12
Şekil 2.3.	İzotrop konsolidasyonlu üç eksenli deneyde akma sıvılaşması (Kramer ve Elgamal, 2001)	16
Şekil 2.4.	Çin Kriteri' ne esas olan zemin verileri (Wang, 1979)	19
Şekil 2.5.	Düşük plastisiteli siltin sıvılaşması için gerekli DGO- N ilişkisi (Sandoval, 1989; Prakash ve Sandoval, 1992)	23
Şekil 2.6.	Dinamik üç eksenli deney sonuçları (Koester, 1992)	23
Şekil 2.7.	Kil yüzdesi ile dinamik gerilme oranı arasında bağıntı (Liang ve diğ., 2000)	27
Şekil 2.8.	Sıvılaşabilir kumlarda dane dağılımı (Tsuchida, 1970)	35
Şekil 2.9.	Kumun sıvılaşmasında sismik geçmişin etkisi (Seed, Mori ve Chan, 1977)	38
Şekil 2.10.	Aşırı konsolidasyon oranı' nın çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişkiye etkisi (Sancio, 2003)	39
Şekil 2.11.	Plastisite indisinin %5 çift yönlü eksenel deformasyon etkisi (Puri, 1984)	40
Şekil 2.12.	$IP \leq 12$ ve $12 < IP < 20$ olan zeminlerin %3 eksenel birim deformasyonda plastisite indisinin etkisi (Sancio, 2003)	40
Şekil 2.13.	Farklı sıkıştırma yöntemlerinin çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişki(1)yüksek frekansta titreşimli ıslak (2)ıslak tokmaklama(3)ıslak şişleme(4)düşük frekansta titreşimli-kuru (5)yüksek frekansta titreşimli kuru (6)suda yağmurlama (7)havada yağmurlama (8)kuru şişleme (Mulilis ve diğ., 1977)....	41

Şekil 2.14.	El Cobre kumunun farklı yaşlar için dinamik üç eksenli deneydeki direnci (Troncoso, Ishihara ve Verdugo, 1988)	43
Şekil 2.15.	50 mm ve 100 mm çaplarındaki silindir numunelerin dinamik üç eksenli deneydeki boşluk suyu basıncı gelişimi.....	45
Şekil 2.16.	Sıvılaşma direncinde dalga şeklinin etkisi (Silver, 1977)	46
Şekil 2.17.	Farklı deviatör gerilme değerlerinde %3 eksenel birim deformasyon için gerekli çevrim sayısı (Sancio, 2003)	47
Şekil 2.18.	Adapazarı siltinde farklı frekanslarda %5 çift yönlü eksenel deformasyona ulaşılması için gerekli çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı (DGO) ilişkisi.....	47
Şekil 3.1.	Adapazarı fluviyal kilinin bileşimi (Bray, 2005)	52
Şekil 3.2.	Adapazarı fluviyal kilinin SEM fotoğrafı (Bray, 2005)	52
Şekil 3.3.	Deney programında kullanılan zeminlerin dane dağılım eğrileri.....	53
Şekil 3.4.	Deneylerde kullanılan karışımların TS1500 plastisite kartındaki yeri.....	54
Şekil 3.5.	Deneylerde kullanılan karışımların TS1500 plastisite kartındaki yeri.....	54
Şekil 3.6.	Deneylerde kullanılan karışımların TS1500 plastisite kartındaki yeri (Likit limit deneylerinde 200 nolu elek altından geçen zemin kullanılmıştır).....	56
Şekil 4.1.	Farklı yöntemlerle hazırlanan numunelerin basit kesme deneyi sonuçları.....	64
Şekil 4.2.	Islak tokmaklama (üniform) ve ıslak yağmurlama (tabakalı) zemin hazırlama yöntemleri arasındaki fark (Amini ve Sama, 1999).....	65
Şekil 4.3.	Üniform ve tabakalı hazırlanmış siltli kumların sıvılaşma davranışı (Amini ve Qi, 2000).....	66
Şekil 4.4.	Örselenmemiş (test 1), ıslak tokmaklama (test 6), bulamaç çamuru (test 8) numunelerinin gerilme-deformasyon karşılaştırması (Hoeg ve diğ., 2000)	66
Şekil 4.5.	Islak tokmaklama yöntemiyle $D_r=30\%$ olan Yatesville kumunun dinamik direnci (Polito ve Martin, 2001)	67

Şekil 4.6.	Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan Yatesville kumunun dinamik direnci (Polito ve Martin, 2001)	67
Şekil 4.7.	Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan Yatesville kumunda plastisite indisinin dinamik dirence etkisi (Sunitsakul, 2004)	68
Şekil 4.8.	Üniform ve tabakalı hazırlanmış numunelerde sıvılaştırmanın olduğu çevrim sayısındaki gerilme oranlarının karşılaştırması (Amini ve Chakravarty, 2004).....	69
Şekil 5.1.	(a) Depremde zeminde oluşan kayma gerilmesi (b) laboratuvarda uygulanan eşdeğer kayma gerilmesi.....	73
Şekil 5.2.	Depremde zemin elemanının aldığı çevrimsel kayma gerilmesi (Das, 1983)	74
Şekil 5.3.	Belirli düzlemde etkiyen çevrimsel kayma gerilmesinin üç eksenli deneyde benzeştirilmesi (Das, 1983)	75
Şekil 5.4.	Gevşek kumda drenajsız dinamik üç eksenli deneyinde gerilme koşulları (Das, 1983)	76
Şekil 5.5.	Dinamik üç eksenli deney sisteminin ekipmanları.....	77
Şekil 5.6.	Monterey kumunda dinamik gerilme oranı ile çevrim sayılarının karşılaştırılması.....	82
Şekil 6.1.	DGO=0.20 olan %54 ince %4 kil içerikli zeminin dinamik deney sonuçları	86
Şekil 6.2.	DGO=0.20 olan %75 ince %15 kil içerikli zeminin dinamik deney sonuçları.....	87
Şekil 6.3.	Sekiz farklı kil içerikli karışımlarda, \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısı - DGO bağıntısı.....	88
Şekil 6.4.	Sekiz farklı kil içerikli karışımlarda, \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısı – kil yüzdesi bağıntısı.....	89
Şekil 6.5.	Adapazarı siltinde D_{30} değerinin sıvılaştırmaya etkisi.....	91
Şekil 6.6.	%54 ince ve %4 kil zeminlerin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi.....	92

Şekil 6.7.	%78 ince ve %18 kil zeminlerin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi.....	93
Şekil 6.8.	Farklı zeminlerin DGO=0.20 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi.....	97
Şekil 6.9.	Farklı zeminlerin DGO=0.25 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi.....	99
Şekil 6.10.	Farklı zeminlerin DGO=0.20 değerinde boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi.....	101
Şekil 6.11.	(a) İnce içeriği, DGO ve çevrim sayısı arasındaki ilişki, (b)İnce içeriği ve DGO arasındaki ilişki.....	102
Şekil 6.12.	(a) Kil içeriği, DGO ve çevrim sayısı arasındaki ilişki, (b) Kil içeriği ve DGO arasındaki ilişki.....	103
Şekil 6.13.	(a)Kil içeriği, ince içeriği ve çevrim sayısı arasındaki ilişki, (b)Kil içeriği ve ince içeriği arasındaki ilişki.....	104
Şekil 6.14.	(a) Bu çalışmada kullanılan karışımların Çin Kriteri üzerinde gösterilmesi, w_L -%0.005 mm, (b) Bu çalışmada kullanılan karışımların Çin Kriteri üzerinde gösterilmesi, w_L - w_n	106
Şekil 6.15.	(a) Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Çin Kriteri ile karşılaştırılması: w_L -%0.005 mm, (b) Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Çin Kriteri ile karşılaştırılması: w_L - w_n	107
Şekil 6.16.	Bu çalışmada kullanılan karışımların Andrews ve Martin (2000) kriteri üzerinde gösterilmesi, w_L -%0.002 mm.....	108
Şekil 6.17.	Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Andrews ve Martin (2000) kriteri ile karşılaştırılması, w_L -%0.002 mm.....	108
Şekil 6.18.	Bu çalışmada kullanılan karışımların Bray ve Sancio (2006) kriteri üzerinde gösterilmesi, $I_p - w_n/w_L$	109
Şekil 6.19.	Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Bray ve Sancio (2006) kriteri ile karşılaştırılması, $I_p - w_n/w_L$	109
Şekil 6.20.	Bu çalışmada kullanılan karışımların Adapazarı Kriteri üzerinde gösterilmesi, I_L - w_L	110
Şekil 6.21.	Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Adapazarı Kriteri ile karşılaştırılması, I_L - w_L	111

Şekil 6.22. Bu çalışmada kullanılan karışımların Adapazarı Kriteri üzerinde gösterilmesi, nx(kil/silt)-D ₅₀	112
Şekil 6.23. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Adapazarı Kriteri ile karşılaştırılması, nx(kil/silt)-D ₅₀	112

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Monterey No.0 kumunun özellikleri.....	48
Tablo 3.2.	Kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri.....	51
Tablo 3.3.	Kullanılan zeminlerin 200 nolu elekten geçtikten sonraki kıvam limitleri.....	55
Tablo 4.1.	Numune hazırlama yönteminin kumların dinamik direncine etkisi (Ladd, 1977).....	62
Tablo 5.2.	Monterey kumunda dinamik üç eksenli kesme deneyi sonuçları.....	82
Tablo 6.1.	Dinamik üç eksenli deneyi yapılan numunelerin özellikleri.....	84
Tablo 6.2.	Zemin numunelerinin farklı DGO değerlerindeki dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	85

FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

- Foto 2.1. Siltte yanal yayılma (Sapanca / Sakarya); (a) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Sapanca oteli (Ansal ve diğ.,1999), (b) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Sapanca oteli (Ansal ve Tönük, 2006)..... 5
- Foto 2.2. 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı' nda siltte sıvılaşma belirtileri (a)Yapı altındaki zeminin yüzeye çıkışı, (b)Boş arazide zeminin yüzeye çıkışı..... 6
- Foto 2.3. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı' nda farklı oturma..... 7
- Foto 4.1. Konsolidasyon hücresinin yükleme sırasında görünümü..... 71

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Silt, Kil yüzdesi, Dinamik üç eksenli deney sistemi, Çin Kriteri, Adapazarı Kriteri

Sakarya Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı'nda 1998'den bu yana yapılmakta olan araştırmalarda ince daneli zeminlerin sıvılaşma yeteneğini tayin etmede kullanılan ve Çin Kriteri olarak bilinen özelliklerin Adapazarı siltlerinde durumu tam olarak yansıttığından kuşkuya düşülmüştür. Bu uyumsuzlukların temelinde siltin içerdiği kil yüzdesinin etkisinin önemli olacağı düşünülmüştür. Gerçek durumun anlaşılabilmesi için farklı kil yüzdesine sahip zemin numuneleri üzerinde laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarından elde edilen kayıtlar karşılaştırılarak zemin numunelerinin boşluk suyu basıncı oranı ve eksenel deformasyon ilişkisi incelenmiştir. Buna ilave olarak arazi gözlemlerine dayalı sıvılaşma kriterleri ile bu çalışmada yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Adapazarı kalınlığı oldukça fazla olan genç silt çok derin ve genç silt ve siltli kum çökeller üzerine kurulu olması nedeniyle dünyada az rastlanır zemin özellikleri göstermektedir. Özellikle Adapazarı kentinin birçok yerinde siltli kumlar ve killer arasında bulunan düşük plastisiteli ve plastik olmayan (NP) siltlerin yer aldığı, yapılmış çok sayıda sondajda görülmüştür. Bu siltlerin (ML) sıvılaşma yeteneğinin saptanmasında fiziksel özelliklerin ölçümü, arazi deneyleri yanında, belirsizliğin olduğu zeminlerde dinamik laboratuvar deneylerinin yapılması kesin yargıya varılabilmesi için gerekli görülmüştür. Bu doğrultuda laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyleri yapılmış ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Zemin içinde sıvılaşmanın değişen kil yüzdeleriyle yakından ilişkili olduğu ve artan kil yüzdesi ile sıvılaşma direncinin arttığı gözlenmiştir.

THE EFFECT OF CLAY CONTENT ON THE LIQUEFACTION OF THE FINE GRAINED SOILS

SUMMARY

Keywords: Adapazari, Liquefaction, Silt, Clay content, Cyclic triaxial test, Chinese Criteria, Adapazari Criteria

This thesis has been prepared in partial fulfilment for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Civil Engineering of the Graduate School of Sakarya University.

Adapazari city soils have been studied at Sakarya University since 1998. The city is founded on alluvium with an estimated thickness of 1000 meters deposited by the River Sakarya. Adapazari experienced most of ground failure problems such as liquefaction, strength decay, bearing capacity failure during the 1999 Kocaeli-Adapazari earthquake. Investigations following the earthquake in Adapazari have indicated that the dense sands mainly forming the ancient riverbeds traversing the city have rarely liquefied, whereas nonplastic silts exhibited liquefaction potential. Evaluating the liquefaction susceptibility of fine grained soils have generally been done using the so called Chinese Criteria. It was however seen that those criteria do not fully reflect the response of Adapazari soils. It is thought that this disagreement is due to clay percentage in the ML silts. A laboratory investigation was accordingly undertaken using the cyclic triaxial test.

It was thus concluded that clay content may be a decisive factor in judging the liquefaction potential of fine grained soils. It was observed that the increase clay percentage increased the liquefaction resistance of soils.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması geoteknik deprem mühendisliğinin önemli konularından biridir. Depremlerde tekrarlı kayma gerilmeleri alan zeminler bazı koşullar gerçekleştiğinde işlevlerini yitirirler. İşlev kayıpları çevrimsel hareketlenme, sıvılaşma, taşıma gücünü yitirme, aşırı toplam ve farklı oturmalar ve yanal yayılma (akma) biçiminde belirmektedir. Bu olaylar için “zemin yenilmesi” terimini kullanmak bu tezin amaçları açısından yeğlenecektir. Yatay arazinin sıvılaşması, değinilen olaylar içinde en sık gözlemlenen ve ilgi çekenidir.

Teorik olarak her tür zemin sıvılaşabilir. 1999 depreminde Adapazarı’ nda kumlar ve siltlerin sıvılaşması yanında, yağlı killer üzerinde oturan bir binanın depremden 24 saat sonra aşırı oturma gösterdiği öne sürülmüştür. Tüm bu nedenlerle, zeminlerin depremden davranışlarının tam anlaşılmanın bir konu olduğu görüşü yadsınamaz.

1.1. Tezin Amacı

1960’ lı yıllarda sıvılaşmanın sadece su altındaki kohezyonsuz kumlarda oluştuğu düşünülüyordu. 1970’ lerde ise meydana gelen depremlerde bu tür dengesizliğin ince daneli zeminlerde de belirebildiği gözlemlenmiştir. Depremler sırasında sıvılaşmanın ince daneli zeminlerde de gözlemlenmesini izleyerek Puri (1984), Sandoval (1989), Koester (1992), Andrews (1997), Polito ve Martin (2001), Sancio (2003), Bray ve Sancio (2006), Boulanger ve Idriss (2004, 2006) ve Hyde (2006) bu konuda araştırmalar yapmışlardır.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremini izleyerek Adapazarı doğal bir laboratuvar durumuna gelmiş, oluşan zemin yenilmeleri birçok araştırmacıyı bu bölgeye çekmiştir. Adapazarı’ nda meydana gelen zemin yenilmesi olaylarında kumlar yanında siltlerin de yer alması çalışmaları bu tür zeminlere de yöneltmiştir.

Sıvılaşma problemlerini çözmeye ince danelerin etkisini ele alan çalışmaların önemli bir bölümü sıvılaşan kumların ince dane içerikleri üzerine odaklanmıştır. Ancak, literatür incelemelerinden dinamik yükleme etkisindeki kumun davranışını ince danelerin ne denli etkilediğinin dahi açıklığa kavuşmadığı görülmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda kumda silt içeriğinin artmasıyla sıvılaşma direncinin artacağı, kayma direncinin azalacağı veya silt oranı bir limit değere ulaşıncaya kadar sıvılaşma direncinin azalacağı, bundan sonra direncin artacağı yolunda sonuçlara ulaşılmıştır. Buna ek olarak, siltli kumun sıvılaşma direncinin, silt içeriğinden boşluk oranına kadar birçok faktör tarafından etkilendiği gösterilmiştir.

Adapazarı örneğinde kentin birçok yerinde siltli kumlar ve killer arasında bulunan düşük plastisiteli ve plastik olmayan (NP) siltlerin yer aldığı, yapılmış çok sayıda sondajda görülmüştür. Bu siltlerin (ML) sıvılaşma yeteneğinin saptanmasında fiziksel özelliklerin ölçümü, ayrıca arazi deneyleri yanında mekanik ve dinamik laboratuvar deneylerinin yapılması kesin yargıya varılabilmesi için gerekli koşul olmuştur.

1.2. Tezin Kapsamı

Adapazarı zeminleri, kentin çok derin akarsu/göl çökelleri üzerine kurulu olması bakımından dünyada az rastlanır özellikler göstermektedir. 1999’ dan bu yana yapılmakta olan araştırmalarda bu çökellerin ince daneli olanlarının da sıvılaşma olayından etkilendiği belirlenmiş ve bu konuda deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu tezde, ince daneli zeminlerin sıvılaşma yeteneğini tayin etmede kullanılan sıvılaşma kriterlerinin Adapazarı siltlerinde durumu tam olarak yansıtamamasından dolayı geliştirilmiş “Adapazarı Kriteri” nin gerçekçiliğini denetlemek üzere laboratuvar deneylerine başvurulmuştur. Değişik kil yüzdelerinde hazırlanmış silt numuneleri üzerinde yapılmış dinamik üç eksenli deneylerin sonuçları ile bu deneylerde sıvılaşan-sıvılaşmayan silt ayırımının yapılması öngörülmüştür. Deney programına başlamadan, kum ve siltlerin sıvılaşması ile ilgili önceki çalışmaların gözden geçirilmesinin önem taşıdığı gerekçesi ile geniş bir kaynakça oluşturulmuş ve hedefler belirlenmiştir.

Adapazarı kenti ve çevresinin jeomorfolojisi, siltlerin davranışına ışık tutabilecek bilgiler sağlamıştır. Bu çalışmaları izleyerek değişen kil yüzdeleri içeren siltlerin gösterdiği özelliklerin dinamik üç eksenli deneyde ölçümü ile sivilaşma tanısında “belirsiz bölge” olarak bilinen belirsizliklerin giderilmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİNİN DİNAMİK/SİSMİK DAVRANIŞI

Zeminin dinamik/sismik koşullar altındaki davranışını anlamada en kolay yol zemin yenilmelerinin tanımlanmasıdır. Zemin yenilmesi; batık veya doygun zeminin deprem sırası ve hemen sonrasında çevrimsel hareketlilik kazanması, sıvılaşması, temel altında taşıma gücünü yitirmesi, eğimli arazide akması, uzun süren deprem sırasında tekrarlı yükleme sonucu aşırı sıkışmalar göstermesi olaylarını kapsar. Bu olayları birbirinden ayırmak da her zaman kolay olmamaktadır.

İnce daneli zeminlerde, tekrarlı kayma gerilmelerinden dolayı görülen işlev kayıpları, killi zeminlerde taşıma gücünü yitirme, aşırı ve farklı oturmalar olarak, siltlerde ise sıvılaşma ve yanal yayılma (akma) olarak kendini göstermektedir. Siltlerde ve kumlarda görülen yanal yayılma, Foto 2.1.' de görüldüğü gibi çok az eğimli ve çoğun bir su kütesine komşu olan düzlüklerde gelişmektedir. Foto 2.2.' de ise 1999 depremi sonrasında Adapazarı kent merkezinde sıvılaşma sonucu zeminin sıvı gibi davranıp yüzeye çıkışı görülmektedir.

Killerde, çevrimsel hareketlilik sonucu beliren aşırı toplam/farklı oturmalar depremden hemen sonra görüleceği gibi (Foto 2.3.) zemin profilinin özelliğine bağlı olarak depremden uzun bir süre sonra da belirebilmektedir (Kramer, 1996).



(a)



(b)

Foto 2.1. Siltte yanal yayılma (Sapanca / Sakarya); (a) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Sapanca oteli (Ansal ve diğ.,1999), (b) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Sapanca oteli (Ansal ve Tönük, 2006)



(a)



(b)

Foto 2.2. 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı' nda siltte sıvılaşma belirtileri; (a) Yapı altındaki zeminin yüzeye çıkışı, (b) Boş arazide zeminin yüzeye çıkışı (http://www.jsce-int.org/disaster_report/kocaeli_e.htm)



Foto 2.3. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı' nda farklı oturma

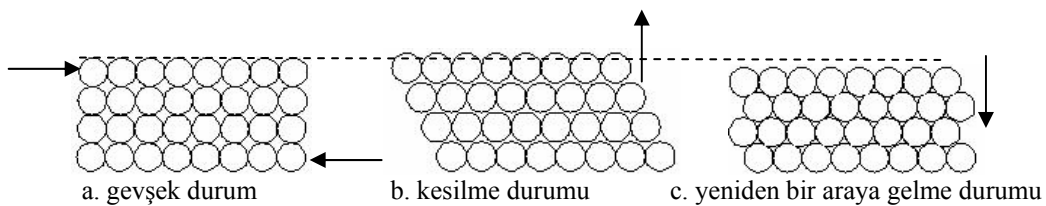
2.1. Sıvılaşmanın Tanımı

Latince “liquefacere” dan türetilmiş yumuşamak, erimek veya zayıflamak anlamına gelen sıvılaşma, kumlarda ani sismik yükleme sırasında oluşan direnç kaybı olarak tariflenen genel bir terimdir. Sözlük olayı akıcı olma durumu, sıvı davranış sergilemek veya sıvı olma, sıvı veya erimiş olma, durumu olarak tanımlanmaktadır (Polito, 1999; The English-Language Institute of America, 1971).

Sıvılaşma sözcüğü, genellikle suya doymun gevşek kumlu zeminlerde dinamik etki ile efektif gerilmelerin sıfıra düşmesi şeklinde algılanır. Bu tanıma göre, bir aşamada zeminin kayma direnci kaybolmakta ve sıvı gibi davranmaya başlamaktadır. Zemin tabakalarına deprem veya bir başka sismik kuvvet geldiğinde kum daneleri arasındaki denge bozulmakta ve ince daneler su ile birlikte yukarıya hareket ederek zemin yüzeyine çıkmaktadır. Bu tür bir etki geldiğinde doymun ve gevşek zemin daneleri daha sıkı duruma geçme eğilimine girerler. Drenajsız koşulda gerçekleşecek bu hacimsel azalmaya daneler arasındaki su engel olmaya çalışmakta, ancak suyun sıkışabilirliği düşük olduğundan boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Boşluk suyu basıncının artmasıyla daneler birbirinden ayrılma eğilimine girmekte, daneler su içinde askıda kaldığından ortam sıvı gibi davranmaya başlamaktadır. Sıvılaşma

özellikle kum ve siltli, jeolojik olarak genç gevşek çökellerin bulunduğu ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde kum fıçırması, kum krateri/volkanı şeklinde yüzeyde gözlemlenebilmektedir.

Depremden dolayı, danelerin oluşan kayma gerilmesini almadan önceki, kayma gerilmesini aldığı durumda ve kayma gerilmesini aldıktan sonraki dizilimi Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Şekil 2.1 (a)' da gevşek kumun depremden önceki dane dizilimi görülmektedir. Şekil 2.1 (b)' de depremden kaynaklanan kesme gerilmesi etkisi ile daneler arası temasın kaybolduğu görülmektedir. Bu evreye kadar danelerin birbirine dokunması ile aktarılmakta olan gerilmeler şimdi su tarafından karşılanma durumunda olacaktır. Sıvılaşıma olarak nitelendirilen bu aşamada kayma direnci sıfır olan su, sistemdeki gerilmeleri karşılayamadığından ortamın birim hacim ağırlığının doygun zemininkine eşit bir sıvıya dönüşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 2.1.c' de görüldüğü gibi, dinamik/sismik yüklemenin durmasından sonra denge yeniden sağlansa da yüzeyde önemli oturmalar belirecektir. Bu boy değiştirmenin süreçte dışarıya kaçan suyun hacmine eşdeğer olduğu söylenebilir. Sıvılaşıma nicel olarak da boşluk suyu basıncının başlangıç efektif gerilmesini aşması biçiminde tanımlanabilir. Bu süreçte kesme aşamasından önce etkiyen gerilme, boşluk suyu tarafından karşılanırsa tüm dokunma noktaları kaybolarak, $u_w = \sigma'$ koşulu sağlanır ve boşluk suyu basıncı oranı $u/\sigma' = 1.0$ olur (PHRI, 1997).



Şekil 2.1. Doygun kumda dane diziliminin dinamik yüklemekten etkilenmesi (PHRI, 1997)

2.2. Kumlarda ve Siltlerde Sıvılaşıma

Depremde kumların sıvılaşması tarih boyunca kaydedilmiş ancak 1960' lara kadar bilimsel olarak ele alınmamıştır. Aynı şekilde, geçmişte yapılmış birçok yayında

sıvılaştırmanın dolaylı tanımları yapılmış ancak bu tanımlara sıvılaştırma denilmemiştir. İlk olarak, Hazen 1920' li yıllarda California' da Calavera Barajının gövdesinde bulunan doygun kumda deprem sırasında yenilmelerin oluştuğunu bildirerek bunu "sıvılaştırma" kelimesini kullanarak tanımlamıştır (Wang, 1972). Yine aynı yıllarda 1920' de Çin' in Kansu bölgesinde üçyüz binin üzerinde insanın l6s akması altında kaldığı rapor edilmiştir (Wang, 1972). Sıvılaştırmadan kaynaklanan önemli temel hasarlarının ise 1959 Meksika (Marshall, 1961) ve 1964 Japonya Niigata (Seed ve Idriss, 1967) depremlerinde görüldüğü rapor edilmiştir. Sıvılaştırma yenilmesi depremlerin yanında diğer sebepler nedeniyle de görülmektedir. Patlatmayla ilgili titreşimlerin Rusya' da Swir III barajında yenilmeye sebebiyet verdiği kayıtlara geçmiştir (Wang, 1972).

2.2.1. Kumlarda sıvılaştırma

1964 Japonya Niigata ve Alaska depremlerinde kumlarda görülen sıvılaştırmayla birlikte bu konuyla ilgili çalışmalar başlamıştır. 1960' lı yılların başlarında H. B. Seed, sıvılaştırma davranışını gözlemlemek için deneyler yapmıştır. Daha sonra K.I. Lee, sıvılaştırma çalışmalarında ilk olarak dinamik üç eksenli deneyi kullanmıştır. Lee ve diğerleri (1967) dinamik üç eksenli deney sonuçlarından olayın bugün için de gerçekçi olan sonuçlarını özetleyen şu bulguları vermişlerdir; 1. Tekrarlı yük uygulamaları suya doygun kumlarda geniş bir birim hacim ağırlık aralığında kısmi veya tam sıvılaştırma oluşturur. 2. Çevrimsel gerilmenin veya birim deformasyonun düzeyi arttıkça yenilme veya sıvılaştırma için gerekli çevrim sayısı azalır. 3. Kumun altında bulunduğu çevre basıncı ne denli düşükse sıvılaştırma için gerekli çevrim sayısı onunla orantılı biçimde azalır. 4. Değişmez genlikte çevrimsel gerilme alan gevşek kumlarda sıvılaştırmanın hemen ardından büyük şekil değiştirmeler belirir. 5. Sıkı kumlar, bir efektif çevre gerilmesinde deformasyona karşı direnç gösterirken, deformasyon genliğinin belirli aralıklarında kısmi sıvılaştırmaya ulaşabilir. Bu durum aynı büyüklükte olmasa da başka birim deformasyonlarda da belirebilir. Böylece, bu tür ortamda kısmi sıvılaştırma her zaman yenilme aşamasına taşınamayabilir. Bu nedenle kısmi sıvılaştırma ve yenilme tarifinin açık biçimde yapılması kaçınılmaz bir zorunluluktur. 6. Başlangıçta gerilme altında olmayan kum elemanının yenilme veya

sıvılaşması için gerekli çevrim sayısı, gerilme altında olanlara oranla çok düşüktür (Seed ve Lee, 1966).

Seed ve Idriss (1967), Lee ve Seed (1967) laboratuvarında temiz kum numuneleri üzerinde tekrarlı yükler altında yapılan drenajsız deneylerde sıklılığa bağlı olarak iki tür davranış gözlemiştir. Gevşek kumlarda tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı ani artış göstererek efektif gerilmeye eşit olmuş, zemin sıvılaşığı için büyük şekil değiştirme göstererek kayma mukavemetini kaybetmiştir. Suyu doygun sıkı kumlarda ise yükleme çevriminin bir aşamasında boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye eşit değere ulaşmasına karşın zeminin genişlemeye çalışması ile boşluk suyu basıncı azalarak numune tekrarlı yüke karşı bir dayanım kazanmakta ve bu olaya da “ön sıvılaşma” denilmektedir.

Seed ve Lee (1966) sıvılaşma, başlangıç sıvılaşması, sınırlı deformasyon sıvılaşması, çevrimsel hareketlilik veya çevrimsel sıvılaşma terimlerinin tanımını yapmıştır. Sıvılaşmayı, bir zeminin sabit düşük bir kalıntı direnç durumunda deformasyon alması halinde ortamda aşırı boşluk suyu basıncı oluşması, bundan dolayı efektif çevre basıncının düşmesi olarak tanımlamışlardır. Bu tip sıvılaşma statik ya da dinamik yüklemeyle oluşabilmektedir. Araştırmacılar, başlangıç sıvılaşmasını, dinamik yükleme sırasında boşluk suyu basıncının uygulanan çevre basıncına eşit olması durumu olarak tanımlamışlardır. Sınırlı deformasyon sıvılaşması, çevrimsel hareketlilik veya çevrimsel sıvılaşma ise dinamik yüklemenin uygulanmasıyla oluşan başlangıç sıvılaşmasının ardından beliren sınırlı deformasyonların gelişmesidir. Sınırlı deformasyonun nedeni olarak da, deformasyona direnmek için zeminde hala direncin mevcut olması ya da zeminin genişmesi nedeniyle boşluk suyu basıncının düşmesi ve uygulanan yükleme altında zeminin direnç kazanması gösterilmektedir.

Castro (1975) çalışmasında kumlarda dinamik üç eksenli deney sonuçları ile arazide ölçülen standart penetrasyon direncini (SPT) karşılaştırmıştır. Laboratuvarında yapılan deney sonuçlarından iki temel olay ayırtlanmıştır. Birincisi, önceden tanımlanan gevşek kumlardaki klasik sıvılaşma, ikincisi ise dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyleri sırasında oluşan çevrimsel hareketlilik'tir. Bu araştırmacı sıvılaşmanın sadece gevşek kumlarda kritik boşluk oranından daha büyük boşluk

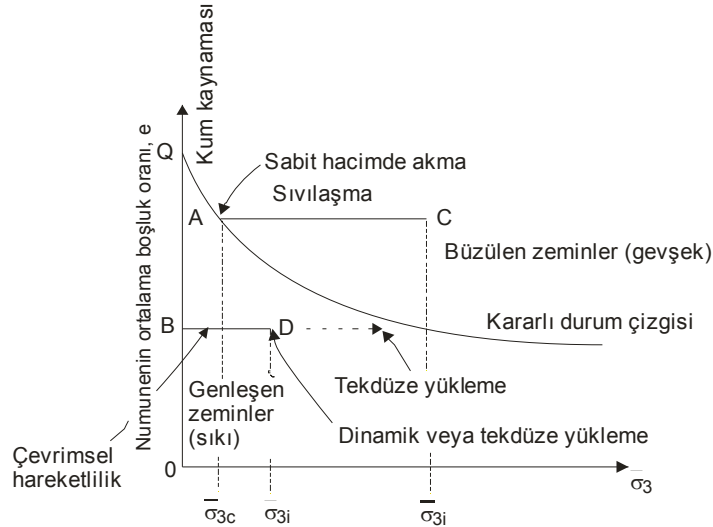
oranlarında, çevrimsel hareketliliğin ise doğal boşluk oranının kritik boşluk oranı değerinin altında olan zeminlerde oluşabileceğini öne sürmüştür. Sıvılaşmada, dinamik yükleme sırasında, hacim azalması nedeniyle gevşek kumlarda boşluk suyu basıncının aniden arttığını ve boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi sıfıra düşürdüğünü söylemiştir. Çevrimsel hareketlilikte ise dinamik yükleme altındaki sıkı kumlarda kesme sırasında zeminin genişleme eğilimi olduğunu ve bu genişleme eğilimi yüzünden boşluk suyu basıncının düştüğünü, şekil değiştirmenin bu nedenle sınırlı olduğunu öne sürmüştür.

Castro ve Poulos (1977) sıvılaşma ile çevrimsel hareketlilik arasındaki farkı anlatmak için Şekil 2.2.' i vermiştir. Kritik boşluk oranı sabit (kararlı: steady state) durum çizgisi ile çizilmiştir. Zeminin boşluk oranı kararlı durum çizgisinin sağında ve üstünde ise hacimsel azalma (daralma) oluştuğunu, dolayısıyla sıvılaşmanın belirdiğini söylemişlerdir. C noktasında olduğu gibi tekdüze (monoton) ya da dinamik yükleme durumunda pozitif boşluk suyu basıncı oluşmakta ve A noktasına doğru hareket edilmektedir. A noktası akma sıvılaşmasının başladığı yerdir.

Öte yandan, zeminin boşluk oranı kararlı durum çizgisinin altında ise, genişleme oluşmaktadır. Şekil 2.2.' de görüldüğü gibi D noktası, kararlı durum çizgisinin altında iken drenajsız dinamik yükleme sırasında B noktasına doğru ilerleyecektir. Dinamik yükleme sırasında deformasyonlar gelişecek ve numune yumuşayacaktır. Deformasyonların yeterince büyüdüğü bu duruma çevrimsel hareketlilik denilmektedir. Q noktası ise kum kaynaması durumunu göstermektedir. Bu durum, kumun direncinin kalmadığı ve hacimsel değişimin oluşmadığı evreyi göstermektedir.

Taheri (1980) sıvılaşma olasılığının hesaplanması ile ilgili olarak gevşek Ottawa kumu kullanarak, yaptığı dinamik üç eksenli deneylerinde birçok parametrenin zeminin sıvılaşmasını kontrol ettiğini gözlemlemiştir. Bunlar zeminin boşluk oranı, uygulanan hücre basıncı, dinamik yük ve çevrim sayısı olarak sıralanmıştır. Numunelerin yüksek boşluk oranında kolay sıvılaştığını, düşük hücre basıncında ise kolay sıvılaşma ihtimali olduğunu, deviatör gerilme büyüklüğünün sıvılaşma için gerekli çevrim sayısını azalttığını söylemiştir. Ladd (1977), Kramer ve Seed (1988)

dinamik üç eksenli deney sonuçlarının, relatif sıkılık, numune üniformluğu, numunenin örselenme derecesi, numunenin aldığı gerilme ve numunenin iç yapısından etkilendiğini gözlemlemiştirlerdir.



Şekil 2.2. Doymun kumda sıvılaşma olayının gösterimi (Castro ve Poulos, 1977)

Koester (1992) sıvılaşma sürecini “..gevşek iri daneli zeminler tekrarlı yükleme altında daha sıkı bir dizilime geçme eğilimine girerler. Ortam doymun ise etkiyen dış gerilmeler bir süre için drenaj koşullarına bağlı olarak zemin iskeletinden boşluk suyuna aktarılır. Yükselmiş boşluk suyu basıncı efektif gerilmeyi düşürdüğünden etkimekte olan gerilmeler büyük şekil değiştirmeler oluşturur” biçiminde açıklamaktadır. Ayrıca araştırmacı, arazi verilerinden depremlerde sıvılaşmanın genellikle, flüviyal-aluviyal birikintilerde, rüzgarla taşınan kum ve siltlerde, sahil kumlarında, şevlerde ve sıkıştırılmamış hidrolik dolgularda gözlemlediğini söylemiştir.

Diğer taraftan Singh (1994) plastik siltlerde önemli boşluk suyu basıncı artışlarından önce çevrimsel hareketliliğin geliştiğini, plastik olmayan siltlerde ise temiz kumdaki gibi fazla boşluk suyu basıncı oluştuktan sonra çevrimsel hareketliliğin geliştiğini öne sürmüştür. Kil içermeyen deney numunelerinde boşluk suyu basıncının oluşmasından sonra çevrimsel hareketliliğin olduğu gözlemlenirken, kil yüzdesi

%10-%16 olan plastik davranış gösteren numunelerde boşluk suyu basıncı oranı %100 değerine ulaşmadan çevrimsel hareketliliğin belirdiği bildirilmiştir.

Pradhan ve diğerleri (1995), üç farklı tipte kum numuneleri (Toyoura, Sengenyama ve Narita) üzerinde drenajsız dinamik üç eksenli deneyler yapmış ve ince içeriğinin sıvılaşma üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan deney sonuçlarından, ince içeriğinin %15' e kadar sıvılaşma potansiyeli üzerinde önemli bir değişim göstermediğini, sıklığın bozulmasıyla oluşan akma deformasyonunun boşluk suyu basıncının yüksek olduğu değerlerde görüldüğünü, sıvılaşma süresince kumdaki ince yüzdesinin akma deformasyonuna direnç gösterdiğini ve ince içeriği fazla olan kumlarda sıvılaşma ile yitirilmiş rijitliğin daha hızlı olarak geri kazanıldığını bildirmişlerdir.

Hussein (1995), sıkı kumlarda kesme sırasında genleşme eğiliminin yani hacim artışının boşluk suyu basıncının azalmasına neden olduğunu ve dolayısıyla efektif gerilmenin arttığını göstermiştir. Sıvılaşma ve çevrimsel hareketliliğin tanımını Castro (1975) ve Castro ve Poulos (1977)' a benzer şekilde vermiştir. Çalışmasında, plastik olmayan siltlerin dinamik davranışının kumlara benzediği, plastik siltlerin ise davranış bakımından çeşitlilik gösterdiği sonucuna varmıştır.

Robertson ve Wride (1998) sıvılaşma terimlerini akma sıvılaşması ve çevrimsel yumuşama olarak ikiye ayırmıştır. Çevrimsel yumuşamayı ise kendi içinde çevrimsel sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik olarak ayırmıştır. Akma sıvılaşmasını, drenajsız yükleme durumunda deformasyon yumuşaması olarak vermiştir. Bu olayı tekdüze ve dinamik yüklemenin tetikleyebileceğini söylemiştir. Çevrimsel yumuşama, deformasyon yumuşaması ve deformasyon pekleşmesi (genleşme) olarak verilmiştir. Çevrimsel sıvılaşmanın drenajsız dinamik yükleme ile efektif gerilmenin sıfıra ulaşması veya kayma gerilmesinin ters yöne dönmesi durumunda geliştiğini belirtirken, diğer yandan çevrimsel hareketliliği drenajsız dinamik yükleme ile kayma gerilmesinin daima sıfırdan büyük veya kayma gerilmesinin geri dönmemesi olarak vermiştir.

Ishihara (1996) sıvılaşma tanımını kohezyonsuz zeminlerde yapmıştır. Gevşek kumlarda oluşan başlangıç sıvılaşması büyük deformasyonların olduğu yumuşama durumunda boşluk suyu basıncı oranı ru' nun %100 değerine ulaşması sırasında direncin tamamen kaybolması durumu olarak tanımlanmıştır. Orta sıkı ve sıkı kumların yumuşaması durumunda görülen sınırlı sıvılaşma, çevrimsel yumuşama veya çevrimsel hareketlilik olayının ayırımını ise $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesinin eşlik ettiği, boşluk suyu basıncı oranının %100 değerine ulaştığı ancak büyük deformasyonların oluşmadığı ve direncin tamamının kaybolmadığı durum olarak yapmıştır. Siltli kumlar veya kumlu siltlerde plastik incelerin sıvılaşmaya etkisi olduğunu söylemiştir. Plastisite göstermeyen siltli zeminlerin temiz kumlar gibi kolaylıkla sıvılaşabildiklerini, kohezyonlu incelerin de siltli zeminlerin dinamik direncini arttırdığını teyid etmiştir. Killi zeminler doygun olsalar dahi bunların dinamik yükleme sırasında dirençlerini yitirmeyebileceklerini, tersine dinamik yükleme altında drenajsız dirençlerinin statik koşullardaki dirençten daha yüksek olabileceğini, dinamik yükleme altında killi zeminlerin davranışının da çevrim sayısı ile deformasyon arasındaki ilişkiden tanımlanabileceğini öne sürmüştür.

Kramer (1996), sıvılaşma olayını basitçe akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik olarak ikiye ayırmıştır. Akma sıvılaşmasını, zemin kütlesinin statik dengesi için gerekli kayma gerilmesinin zeminin sıvılaşmış haldeki kayma dayanımından büyük olduğu; çevrimsel hareketliliği ise statik kayma gerilmesinin, sıvılaşmış zeminin kayma dayanımından küçük kaldığı durumlar olarak tanımlamıştır. Akma sıvılaşmasının oluşmasında statik kayma gerilmelerinin rol oynadığını, çevrimsel hareketlilikte hem dinamik hem de statik kayma gerilmelerinin rol oynadığını öne sürmüştür.

Andrews (1997), plastik siltlerdeki boşluk suyu rejiminin ve çevrimsel hareketliliğin plastik olmayan (NP) siltlerden farklı olduğunu belirtmiştir. Plastik siltlerde çevrimsel hareketliliğin önemli boşluk suyu basıncı artışından önce geliştiğini, oysa NP siltlerde çevrimsel hareketliliğin temiz kumdaki gibi fazla boşluk suyu basıncı oluştuktan sonra belirildiğini ifade etmiştir. Plastik olmayan siltli zeminlerde boşluk suyu basıncı oranının %100' e ulaşması durumuna sıvılaşma derken, plastik siltte gözlenen sıvılaşmayı klasik anlamda sıvılaşmanın olmadığı, daha ziyade %100

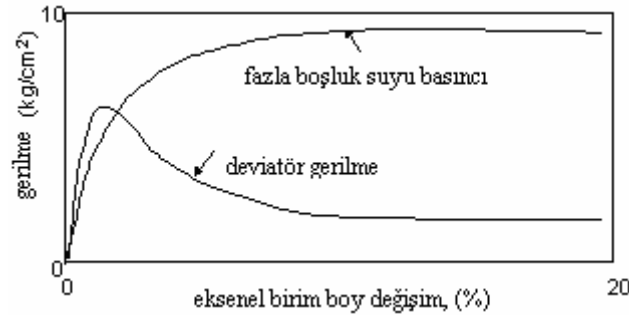
boşluk suyu basıncı oranının oluşmaması durumu için çevrimsel hareketlilik olarak tanımlamıştır. Çevrimsel hareketlilik gri bir alandır. Bu olay, plastisite gösteren profillerde klasik anlamda sıvılaşma oluşmamasına karşın deprem sırasında önemli deformasyon gösteren zeminlerde gelişebilmektedir.

Polito (1999) laboratuvar deneylerinde en genel tanım olan, numunedeki boşluk suyu basıncının öncelikle başlangıçtaki efektif gerilmeye eşit olması hali için sıvılaşma terimini kullanmıştır. Akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketliliği ise Castro (1975)'deki gibi açıklamıştır.

Perlea (2000), zeminin sıvılaşmasını daneler arasındaki temasın kaybolmasıyla danelerin su içinde askıda kalma durumu olarak tanımlamıştır. Bu yüzden sıvılaşma hassaslığının, kohezyonsuz ve düşük plastisiteli zeminlerin bir özelliği olduğunu öne sürmüştür.

Kramer ve Elgamal (2001), zemin sıvılaşmasının karmaşık bir olay olduğunu ve birçok araştırmacının sıvılaşmayı farklı açılardan değerlendirdiğini belirtmiştir. Son yıllarda sıvılaşmayla ilgili terimlerin uyuşmazlıkları yüzünden Kramer ve Elgamal (2001) yayınlarında sıvılaşmayla ilgili terminolojiyi yeniden tanımlamışlardır. Onlara göre; a) Akma sıvılaşması, statik dengeyi sağlamak için gerekli gerilmenin zeminin kalıntı direncinden yüksek olduğu durumdur. Akma sıvılaşması bu nedenle sadece düşük kalıntı dirence sahip gevşek zeminlerde oluşabilir. Bu tür sıvılaşma çok büyük deformasyonlar oluşturabilir (örneğin, akma heyelanları). Ancak, bu deformasyonların statik kayma gerilmelerince oluşturulduğunu unutmamak gerekmektedir. Akma sıvılaşması doğa ve laboratuvarında statik ve dinamik yüklemeyle oluşabilir. Laboratuvarında akma sıvılaşması deneylerini gerilme kontrollü yükleme ile yapmak uygun olur. Şekil 2.3.'de gerilme kontrollü tekdüze yüklemeli bir deney sonucu verilmiştir. Burada, artan deviatör gerilmeyle boşluk suyu basıncının arttığı görülmektedir. Deformasyon seviyesinin küçük olduğu durumda deviatör gerilme doruk noktasına ulaşmıştır ve bu noktada boşluk suyu basıncı oranı hala $r_u = 0.5$ düzeyindedir. Deviatör gerilme doruk noktasına ulaştıktan sonra deformasyon oranı ve boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Böylece, akma sıvılaşmasının deviatör gerilmenin doruk noktasına ulaştığı noktada başladığı

söylenmektedir. Zemin iskeletinin yapısı, mevcut direncin kalıntı dirence eşit olmasına kadar bozulmaktadır. Deviator gerilmenin kalıntı dirençten daha büyük olması durumunda numune statik dengede kalamayabilir ve sıvılaşma gelişir.



Şekil 2.3. İzotrop konsolidasyonlu üç eksenli deneyde akma sıvılaşması (Kramer ve Elgamal, 2001)

b) Çevrimsel hareketlilik ise statik kayma gerilmesinin kalıntı dirençten küçük olduğu durumda görülebilmektedir. Dinamik kayma gerilmesi uygulandığında ortamda aşırı boşluk suyu basıncı gelişmektedir. Bu olay doğada sıkça yanal yayılma biçiminde gözlemlenebilir. Yanal yayılma süreci deprem sırasında kalıcı deformasyonların yığışimli birikmesi ile gerçekleşmektedir. Bu deformasyon değerleri gevşek zeminler yanında, sıkı zeminlerde de azımsanmayacak değerlere ulaşabilir.

Jefferies ve Been (2006) kumlarda sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik terimlerinin tanımlarını vermişler ve statik ve çevrimsel sıvılaşmanın bir bakıma aynı olay olduğunu öne sürmüşlerdir. Plastik birim kayma şekil değiştirmelerinin (γ) birikmesi sırasında oluşan fazla boşluk suyu basınçları sönmelenemediğinden plastik birim hacim değişimlerinin hızla büyüdüğünü, bunun etkisi ile efektif gerilmeler azaldığından zeminin rijitlik ve direncinin aynı oranda düştüğünü ifade etmişlerdir. Statik ve çevrimsel etkilerden doğan sıvılaşmada farkın plastik birim hacim değişimlerinin ortaya çıkış biçiminden kaynaklandığını söylemişlerdir. Statik sıvılaşma olayında gerekli koşullardan biri gerilme-birim deformasyon-kabarma sürecinde beliren plastik hacimsel birim deformasyonun (ϵ_v), uygulanmakta olan gerilmeye direnme sırasında zemin iskeletinin pekleşmesi (work hardening) için

yapılan iş' ten daha büyük olmasıdır. Kritik durumdan daha gevşek her zeminde statik deformasyon gelişebilir.

Dinamik yüklemelerle sıvılaşma gelişmesi durumunu ise gerilme değişimleriyle sıkılaştıran zeminde plastik hacimsel birim deformasyonlar görülmesi, bunun da zemin danelerinin birbirine daha yakın konuma geçmek istemesi olarak açıklamışlardır. Bu tür sıvılaşmanın sıkı kumlar, hatta aşırı konsolide killerde de görülebileceğini ilave etmişlerdir. Statik ve çevrimsel sıvılaşma arasındaki farkı, sıkı zeminde çevrimsel sıvılaşmadan doğan birim deformasyonların sınırlı (kısıtlı) olmasına bağlamaktadırlar. Süreç başlar başlamaz sıkı zeminde kayma gerilmesi uygulamasından doğan genişlemeye bağlı kabarma sahneye çıkar ve sıkılaştırma eğiliminden kaynaklanan fazla boşluk suyu basıncını karşılamaya çalışır. Böylece çevrimsel sıvılaşma sıkı zeminlerde zeminin yumuşaması biçiminde belirirken gevşek zeminlerde açık bir gevrek göçme görülür.

Bu yazarlara göre sıvılaşmanın anlaşılmasında iki belirsiz konu bulunmaktadır. Birincisi, sıvılaşmanın görüldüğü depremlerde çalışmaların mekanik açıdan çok jeolojik bakış açısından yapılmış olmasıdır. Bu gruptaki araştırmacılar böylece eski deprem kayıtlarına odaklanarak zeminin mekaniğinden çok sınıflandırılmasına eğilmişler, kimileri de olayın mekaniğini tümüyle yok saymışlardır. Gösterilen ikinci neden, titreşimler sırasında beliren genişlemenin (dilation) ihmal edilmesidir. Bunun sonucunda sıvılaşmanın sadece efektif gerilmenin sıfıra düştüğü bir olay olarak algılandığı, gerçekte sıkı numunede bu durumun sadece geçici kısa bir dönemde gerçekleştiği öne sürülmektedir. Böylece, bunun olmadığı durumlarda beliren ve aşırı deformasyonların oluşmadığı yumuşamanın çevrimsel hareketlilik olarak tanımlandığı tezi getirilmektedir. Onlara göre ise, statik sıvılaşmada en gevşek zeminler en yüksek fazla boşluk suyu basınçları gösterecek ve drenajla birlikte zemin direnci yükselecektir. Çevrimsel hareketlilikte, maksimum fazla boşluk suyu basıncı gelişmesinin sınırının en gevşek durumda olmasından ziyade en yüksek gerilme bölgesinde oluşacağını, sönmümlenme sırasında fazla boşluk suyu göçünün dirençte veya rijitlikte azalmaya sebep olabileceğini, bunun da gecikmeli yenilmeye sebep olacağını öne sürmüşlerdir.

2.2.2. Siltlerde sıvılaşma

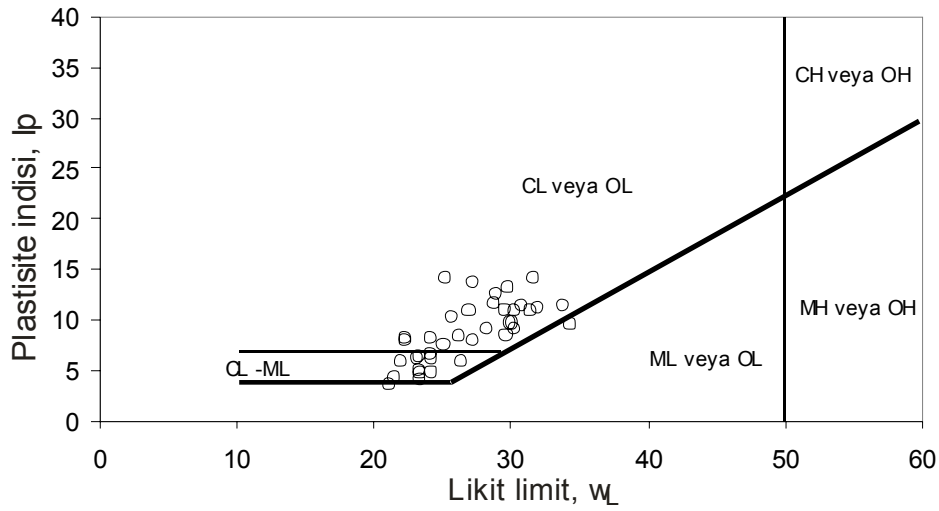
1964 yılında Niigata depremiyle kumların sıvılaşması nasıl gündeme geldiyse 1975 Haicheng ile 1976 Tangshan depremleriyle de siltlerin sıvılaşması araştırmaya başlanılmıştır. 1987 Chibaken-Tohooki ve 1989 Loma Prieta depremlerinde de sıvılaşmadan dolayı görülen kum kaynamalarının büyük oranda silt içerdiği, 1995 Hyogoken-Nanbu depreminde siltlerin sıvılaştığı görülmüştür. Silt birikintileri çoğu depremde hassas yumuşak zemin alanlarını oluşturduğundan bu alanlarda, önceki depremler sırasında zemin deformasyonu ve yenilmesi, yapılarda hasarın oluşması gibi olaylar gözlemlenmiştir. Ancak siltli zeminlerin sıvılaşma yeteneği ile ilgili belirsizlik günümüzde tam olarak çözüme kavuşmamıştır.

Wang (1979), 1975 Haicheng ve 1976 Tangshan depremleri sonrasında yaptığı çalışmalardan sıvılaşan silt ortamları için dane dağılımı, plastik ve likit limit-su muhtevası bağıntılarını geliştirmiştir. Bu sonuçlara göre günümüzde Çin Kriteri olarak anılan yaklaşımla, ince daneli bir zeminin sıvılaşması için aşağıdaki kriterlerin gerçekleşmesi gerektiğini belirtmiştir.

1. Kil yüzdesi $< \%15$
2. $w_L < \%35$
3. $w_n \geq 0.9 w_L$

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, Kil yüzdesi: $5\mu\text{m}$ ' den ince dane yüzdesini göstermektedir.

Öte yandan, veriler incelendiğinde değinilen ince daneli zeminlerin neredeyse tümünün CL simgesi taşıdığı dikkat çekmektedir (Şekil 2.4.). Bu çalışmada, likit ve plastik limitlerin düşen koni yöntemi ile ölçüldüğü unutulmamalıdır.



Şekil 2.4. Çin Kriteri' ne esas olan zemin verileri (Wang, 1979)

Wang (1981) devam eden depremlerin gözlenmesi sonucu Çin kriterini yenileyerek sınıflama kriterini aşağıdaki gibi vermiştir.

1. $w_L > 0.75$,
2. $w_n \geq 0.9 w_L$,
3. $SPT N \leq 4$,
4. $q_u < 50kPa$
5. $S_t > 4$

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, SPT (N): standart penetrasyon direnci, S_t : hassaslık' tır.

Chang ve diğ. (1982), kumda dinamik üç eksenli deneylerinde, silt içeriği %20' ye ulaşınca kadar sınıflama direncinin azaldığını, %20' den sonra ise sınıflama direncinin arttığını gözlemlemiştir.

Seed (1983), laboratuvar ve arazi çalışmalarına dayalı olarak "kohezyonlu" zeminlerin büyük çoğunluğunun depremde sınıflaşmayacağını belirtmiştir. Seed ve

Idriss (1982) tarafından verilen ve daha sonradan Youd ve Gilstrap (1999) tarafından geliştirilen aşağıdaki kriter, sıvılaşmanın teşhisinde kullanılmıştır.

1. Kil yüzdesi \leq %15
2. $w_L < \%35$
3. $w_n > 0.9 w_L$

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, Kil yüzdesi: 2 μm ' dan küçük yüzde olarak tanımlanmıştır.

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) 10 depremde Japonya' da 70, Japonya dışından 20 sıvılaşma vakası belgelemişlerdir. %20 kil içeriğinin sıvılaşmaya duyarlılığı engellediği ancak, burada kil dane boyutunun 0.005 mm' den daha küçük olarak tanımlandığı belirtilmiştir.

Puri (1984), doğal ve yeniden hazırlanmış lőslerin sıvılaşma direncini ve deformasyonlarını incelemek için örselenmemiş ve laboratuvarında ıslak tokmaklamayla hazırlanan numuneler üzerinde deneyler yapmıştır. Deneyler boşluk suyu basıncı hücre basıncına eşit oluncaya veya istenen çift yönlü eksenel deformasyon belirene kadar devam ettirilmiştir. Sonuçlar, lőslerin dinamik gerilme altında davranışının temiz kumdan farkının, boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyonun aniden artmaması, ve boşluk suyu basıncının efektif hücre basıncına eşit olmasından önce ($r_u = \%100$) çift yönlü eksenel deformasyon değerinin yenilme kriterini aşması olduğunu göstermiştir. Ayrıca plastisite indisi I_p 10 ila 20 arasında arttıkça dinamik direncin arttığı, I_p değerinin 15 ve üstü olması halinde boşluk suyu basıncının 200 çevrimde dahi efektif gerilmeye eşit olmadığı, ancak %5 ve %10 çift yönlü eksenel deformasyona ulaşıldığı, temiz kumda $u_w = \sigma_3$ durumu yaklaşık 10. çevrimde belirirken siltlerde daha fazla çevrim gerektiği, temiz kumda $u_w = \sigma_3$ ve %5 çift yönlü eksenel deformasyona aynı çevrim sayısında erişildiği, siltlerde ise %5 çift yönlü eksenel deformasyona ulaşılması için gerekli çevrim sayısının daha fazla olması gerektiği gözlemlenmiştir. Ayrıca aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla zeminin dinamik direncinin arttığı söylenmiştir.

Seed ve diğ. (1985), Seed ve Idriss (1971)' de yapılmış 'ince içeriğinin artmasıyla sıvılaşma direncinin artacağına göze alınması gerektiği' önerisine ilave olarak DGO ile normalleştirilmiş SPT değerleri arasındaki bağıntıyı gösteren eğride %5, %15 ve %35 ince yüzdeleri için değişiklik yapmışlardır. Daha fazla ince içerikli zeminin sıvılaşması için DGO değerinin de daha fazla olması gerektiği bu eğrilerle gösterilmiştir.

Zhu ve Law (1988), örselenmemiş NP silt numuneleri ve laboratuvarında hazırlanmış numunelerde dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Bu iki grup numunenin sıvılaşma dirençleri karşılaştırıldığında laboratuvarında hazırlanan numunelerde örselenmeden dolayı direnç kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Dinamik deney sırasında boşluk suyu basıncı oranının laboratuvarında hazırlanan numunelerde %80' e, örselenmemiş numunelerde ise %85' e ulaştığında aşırı deformasyonların belirdiğini belirtmişlerdir.

Singh (1988), siltli zeminlerde dinamik üç eksenli deneyde oluşan fazla boşluk suyu basıncı ve gelişen deformasyonları ele almıştır. Deneylerde gevşek siltlerde oluşan fazla boşluk suyu basıncı oranının %100' e ulaştığı ve büyük deformasyonlar olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde yüksek boşluk suyu basıncı kaydedilmeden önce kabul edilemez büyüklükte deformasyonların olduğu, kimilerinde ise boşluk suyu basıncı oranının hiçbir zaman %100 değerine ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Araştırmacı dinamik üç eksenli deneyde boşluk suyu basıncının numunenin tabanında ölçülmesini önermiştir.

Kuerbis (1989) flüviyal çökel ve hidrolik dolguda ince dane oranı ve dane boyutu dağılımının sıvılaşmaya etkisini monotonik/dinamik yükler altında araştırmıştır. Yapılan deneylerde numuneler bulamaç hazırlama yöntemiyle hazırlanarak kullanılmıştır. Dinamik üç eksenli deneyde dinamik direnç silt oranı %21' e yükselene kadar azalmıştır. Sıvılaşma yenilmesi %100 boşluk suyu basıncının olduğu veya %2.5 tek yönlü genliğin olduğu 20. çevrimde gösterilmektedir.

Düşük plastisiteli lös ve siltlerde sıvılaşma olasılığının araştırıldığı çalışmada Sandoval (1989), laboratuvarında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan numuneler

üzerinde sıvılaşma potansiyelini belirlemek için dinamik üç eksenli deneyi yapmıştır. Düşük plastisiteli siltlerde plastisite indisi arttıkça sıvılaşmaya karşı direnç azalmaktadır. Bu tür siltlerde boşluk suyu basıncının hücre basıncına eşit oluncaya kadar aşamalı arttığını ve ön sıvılaşmanın 27. çevrimde gerçekleştiği, kumda ise ilk dört çevrimde boşluk suyu basıncının aniden arttığı ve ön sıvılaşmanın 33. çevrimde oluştuğu belirtilmiştir. İnce üniform kum ve düşük plastisiteli siltin ön sıvılaşmasının %5 ve %10 çift yönlü aksenal deformasyonun aksenal deformasyondan önce belirlediği, düşük plastisiteli siltin yenilmesi için gerekli çevrim sayısının da ince kumunkinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

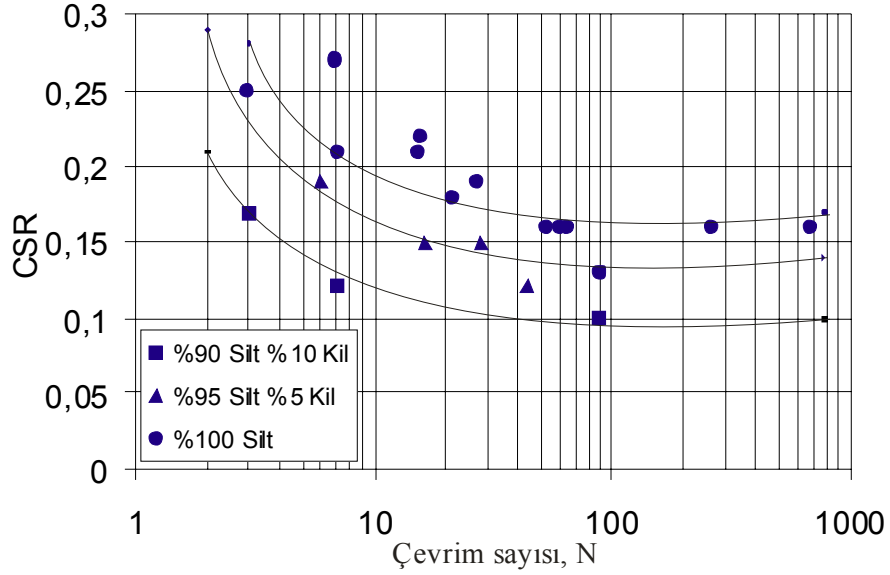
Sandoval (1989) ve Prakash ve Sandoval (1992)' in siltlerde yaptıkları dinamik üç eksenli deneylerinin sonucu Şekil 2.5.' de verilmiştir. Buradan, kil yüzdesi ve plastisite indisinin artışı ile sıvılaşma için gerekli çevrim sayısının azaldığı görülmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak, düşük plastisite aralığında, plastisitenin artması ile dinamik gerilme oranının azalacağı öne sürülmektedir.

Cao ve Law (1991) kumun sıvılaşma direnci ile plastik olmayan silt numunelerinin sıvılaşma direncini karşılaştırmak amacıyla sabit boşluk oranında ıslak tokmaktama yöntemiyle numuneler hazırlamıştır. Hazırlanan siltli zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarından, silt içeriği %60' a ulaşana kadar sıvılaşma direncinin azaldığını, %60 geçildikten sonra sıvılaşma direncinin arttığını gözlemlenmişlerdir.

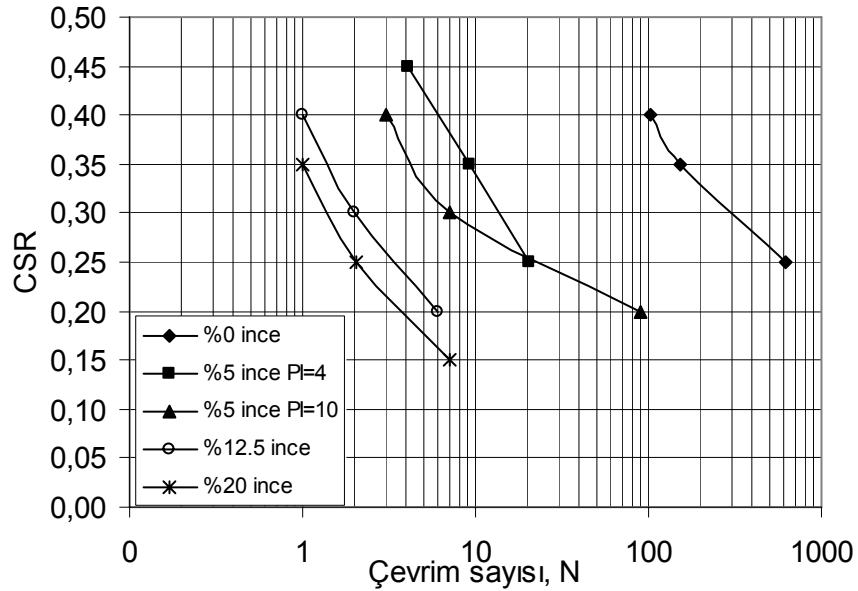
Law ve Ling (1992) farklı silt içeriklerinde ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırladıkları 0.64 ve 0.78 boşluk oranındaki numunelerde dinamik üç eksenli deneyleri yapmışlardır. Silt içeriği %30' a ulaşınca kadar sıvılaşma direncinin azaldığı, %30 silt yüzdesi aşıldığında sıvılaşma direncinin arttığı belirtilmiştir.

Koester (1992) 129 farklı ince kum numunesini ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlayarak yaklaşık 500 dinamik üç eksenli deneyi yapmıştır. Yapılan deney sonuçlarından, ince içeriğinin titreşim sırasında boşluk suyu basıncının gelişmesine izin vermediğini, dolayısıyla ince oranının deney sonuçlarını doğrudan etkilediğini

gözlemlemiştir. Ayrıca ince içeriğinin %20' ye kadar artmasıyla düşük plastisiteli siltlerin dinamik direncinde azalma olduğunu göstermiştir (Şekil 2.6.).



Şekil 2.5. Düşük plastisiteli siltin sıvılaşması için gerekli DGO- N ilişkisi (Sandoval, 1989; Prakash ve Sandoval, 1992)



Şekil 2.6. Dinamik üç eksenli deney sonuçları (Koester, 1992)

Prakash (1992), düşük plastisiteli siltli zeminlerin olası sıvılaşmasında plastisite indisinin etkisini incelemiştir. Plastisite indisi değişikliği düşük plastisiteli silte %5-%10 kaolin karıştırılmasıyla sağlanmıştır. Doymun silt numunelerinde dinamik yüklemeye boşluk suyu basıncı efektif çevre basıncına eşit oluncaya, ya da %5, %10 veya %20 deformasyon oluşana kadar devam edilmiştir. Plastisite arttıkça sıvılaşma direncinin azaldığı görülmüştür. Bu çalışma sonunda, doymun düşük plastisiteli silt numunelerinin dinamik yüklenmesi sonucunda boşluk suyu basıncının efektif konsolidasyon basıncına eşit olduğu ve sonuçta başlangıç sıvılaşma durumunun gözlemlendiği, silt numunelerde %5 çift yönlü aksel deformasyon için gerekli çevrim sayısı ile başlangıç sıvılaşması için gerekli çevrim sayısının aynı olduğu, kil yüzdesinin artmasıyla yenilme durumu için gerekli DGO değerinin azaldığı, kil yüzdesi %10' dan fazla olduğunda DGO değerinin daha da azaldığı ve kil oranı arttıkça düşük plastisiteli siltin aksel deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir. %5 kil içerikli numunede, %5 çift yönlü aksel deformasyondan sonra ancak %10 çift yönlü aksel deformasyondan önce başlangıç sıvılaşması durumu gözlenmiş, %10 kil için ise, başlangıç sıvılaşması durumu %10 çift yönlü aksel deformasyondan sonra ve %20 çift yönlü aksel deformasyondan önce tesbit edilmiştir.

Erken ve diğerleri (1995) 1992 Erzincan depreminde kumlu siltli zemin tabakalarının sıvılaşması sonucu zemin yüzeyinde kum konilerinin ve oturmalarının olduğunu gözlemlenmişlerdir. Kuzey Anadolu Fay hattının birbirine yaklaşık 2 km mesafede olan iki parçası arasında yer alan sıvılaşma bölgesinin dışında ise zemin koşulları büyük farklılık göstermektedir. Basit kesme deneyinde plastisite arttıkça dinamik mukavemetin arttığını, aynı plastisitede olan organik zeminlerin ise bitki lifleri nedeniyle daha fazla mukavemete sahip olduklarını gözlemlenmişlerdir. İnce içeren NP kumların dinamik mukavemetinin plastik olmayan siltlerden daha yüksek, plastik siltlerden ise daha düşük olduğunu gözlemlenmişlerdir. Ayrıca, siltlerde plastisite ve bağıl sıklık arttıkça dinamik mukavemetin arttığını tesbit etmişlerdir.

Puri ve diğerleri (1996) düşük plastisiteli siltli zeminlerin sıvılaşma hassaslığını hesaplamak için deneysel araştırmalar yapmışlardır. Bu maksatla örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanmış numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deney yapılmıştır.

Kullanılan düşük plastisiteli silt numunelerinde boşluk suyu basıncı efektif gerilmeye eşit olmadığı halde büyük aksel deformasyonlar gözlemlenmiştir.

Andrews (1997), kumun içine ilave edilen plastik olmayan siltin artışıyla sıvılaşma direncinin azaldığını, silt ilavesinin limit değerleri geçince sıvılaşma direncinde artış olduğunu, siltte ve kum/silt karışımında sıvılaşma direncinin kil yüzdesinin %10 olduğu durumda %10 ve %20 kildekine göre daha az olduğu ve aşılın limit değerden sonra sıvılaşma direncinde azalma olduğu, plastik siltlerde önemli boşluk suyu basıncı kaydedilmeden önce çevrimsel hareketliliğin geliştiği, plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının temiz kumlarınkine aynı olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki kriter önerilmiştir (kil boyutu < 0.002 mm);

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. $w_L < 35$, Kil yüzdesi < %10 | sıvılaşmaya hassas |
| 2. $w_L < 35$, Kil yüzdesi > %10 | sıvılaşmaya hassas |
| 3. $w_L > 35$, Kil yüzdesi < %10 | laboratuvar çalışması gerekli |
| 4. $w_L > 35$, Kil yüzdesi = %10 - %15 | laboratuvar çalışması gerekli |
| 5. $w_L > 35$, Kil yüzdesi > %15 | sıvılaşmaya hassas değil |

İri kum ve çakıl içerikli siltleri ayırmak için yukarıdaki kriterler $D_{20} < 0.4$ mm karışımlara kısıtlanmıştır. Böylece, doğal kil içeriği olan veya olmayan (<0.002 mm) ve D_{20} boyutu 0.4 mm' den küçük olan siltli zeminler için sıvılaşma kriteri aşağıdaki biçime dönüşmüştür;

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. $w_L < 32$ | sıvılaşmaya hassas |
| 2. $w_L > 32$ ve Kil yüzdesi < %15 | laboratuvar çalışması gerektirir |
| 3. $w_L > 32$ ve Kil yüzdesi > %15 | sıvılaşmaya hassas değil |

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, Kil yüzdesi: 2 μm ' den geçen danelerin yüzdesi olarak verilmiştir.

Das ve diğerleri (1999), siltli zeminlerin sıvılaşma davranışını belirlemek için örselenmemiş ve hazırlanmış numuneler kullanarak dinamik üç eksenli deneyler

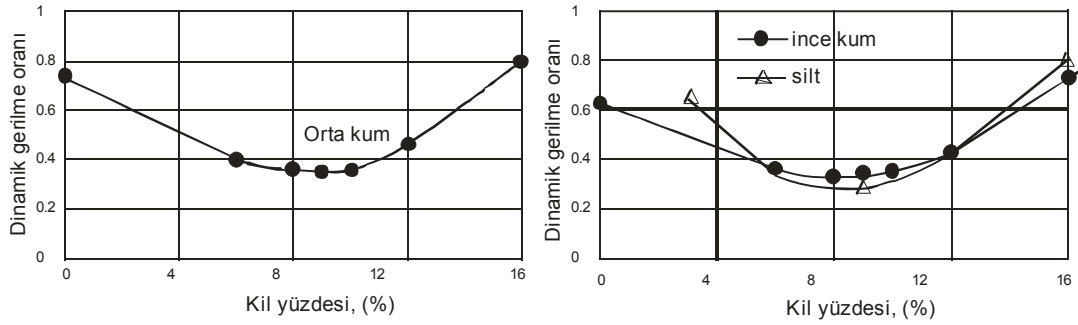
yapmışlardır. Deney sonuçlarından düşük plastisiteli zeminlerin başlangıç çevre basıncının kaybolması durumu olarak tanımlanan sıvılaşmanın görülmemesine rağmen, yenilme büyük aksenal deformasyonlar ile tanımlanmıştır. %5 ve %10 doruk aksenal deformasyonla boşluk suyu basıncının başlangıç çevre basıncına eşit olmasından önce belirlediği, %20 doruk aksenal deformasyonun olduğu yenilmenin ise boşluk suyu basıncının başlangıç çevre basıncına eşit olmasından sonra olduğu gözlemlenmiştir. Siltlerin dinamik direncinin aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla yükseldiği, bu nedenle siltlerin sıvılaşmasında gerilme geçmişinin etkisinin çok önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Polito (1999) kumun dinamik yüklemde davranışında plastik olmayan incelerin etkisini araştırmak için ıslak tokmaktama yöntemiyle çeşitli kil oranlarında numune hazırlayarak dinamik üç eksenli deneyler yapmıştır. DGO' ye karşı sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı (N)' nin çizilebilmesi için en az 3 değişik DGO düzeyinde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde sabit boşluk oranında dinamik direncin önce azaldığı, sonra silt içeriğinin belirli bir değerine çıktığında arttığı, kil yüzdesinin artmasıyla dinamik direncin bu yüzde belirli bir değere yükselene kadar azaldığı gözlemlenmiştir.

Perlea ve diğerleri (1999), deprem sırasında çoğu killi zeminlerin sıvılaşmaya hassas olmamasına karşın, Çin Kriteri ile karşılaştırma yaparak önemli direnç kaybı için hassaslığı belirlemişlerdir. Bu çalışma sonunda önemli deformasyonların görülmesine karşın başlangıç sıvılaşmasının kohezyonlu zeminlerde nadiren görüldüğü, ince içeriğinin artmasıyla sıvılaşmaya karşı olan direncin arttığı, siltli kil veya killi siltlerde incelerin plastikliğin sıvılaşmayı etkilediği, sıvılaşma direncinin en düşük olduğu zemin numunelerinin I_p değerinin 4 ila 5 arasında değiştiği ve sıvılaşmanın görülmediği zemin numunelerinde $I_p > 14$ olduğu öne sürülmüştür.

Niu (2000), farklı kil içeriğine sahip siltlerin sıvılaşma özelliğini araştırmışlardır. Dinamik üç eksenli deneyi sonuçlarından, %9 kil içeriğinin siltin karakterinin değiştiği limit olduğu, kil yüzdesi ile DGO grafiğinin parabol şeklini alarak %9 kil içeriğinde kesme gerilmesinin en düşük değeri aldığı, kil içeriği artınca dinamik kesme direncinin de yükseldiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, Liang ve diğerleri

(2000) deney sonuçlarından kum ve siltlerin sıvılaşma özelliklerini belirlemişlerdir. Siltin sıvılaşma özelliğini etkileyen ana faktörün kil içeriği olduğunu ve kritik kil içeriğinin Şekil 2.7.' dan anlaşılacağı gibi %9 olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 2.7. Kil yüzdesi ile dinamik gerilme oranı arasında bağıntı (Liang ve diğ., 2000)

Andrews ve Martin (2000), sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerin ayırımını yapabilmek için Wang' ın veritabanını kullanarak geliştirdikleri "Modifiye Çin Kriteriteri" nde sıvılaşma hassaslığının kil yüzdesi (<0.002mm) ve w_L gibi iki parametre değeri ile belirlenebileceğini söylemişlerdir.

- | | |
|---|--|
| 1. $w_L < 32$, Kil yüzdesi < %10 | Sıvılaşmaya hassas |
| 2. $w_L < 32$, Kil yüzdesi \geq %10 | Ek çalışma gerekiyor (NPdaneler) |
| 3. $w_L \geq 32$, Kil yüzdesi < %10 | Ek çalışma gerekiyor (NPdaneler) |
| 4. $w_L \geq 32$, Kil yüzdesi \geq %10 | Sıvılaşmaya hassas değil, olarak vermişlerdir. |

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, %Kil yüzdesi: 2 μ m' den geçen yüzde olarak verilmiştir.

Atukorala ve diğerleri (2000), çalışmalarında yedi farklı yerden alınan zeminlerde dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyleri yaparak siltli ve kumlu zeminlerin dinamik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Siltli zeminlerin dinamik davranışının kumlu zeminlerinkinden farklı olduğu ve siltli zeminlerde boşluk suyu basıncı ve deformasyonun çevrim sayısı ile aşamalı olarak arttığı, kumlarda ise bu artışın aniden gerçekleştiği bildirilmiştir.

Hoeg ve diğerleri (2000), aynı boşluk oranı ve çevre basıncında, silt ve siltli kumların örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanmış numuneleriyle drenajsız gerilme-deformasyon-direnç davranışlarının farklılıklarını belirlemek üzere deneyler yapmışlardır. Örselenmemiş numunelerde genleşme (dilation) ve yumuşama görülürken, aynı boşluk oranında laboratuvarında hazırlanan numunelerin birkaçında hacim azalması (contractive) ve gevrek (brittle) davranış görülmüştür. Çalışmada hidrolik dolgu olarak kullanılan siltli kumun yanında, flüviyal silt birikintilerinden ıslak tokmaklama yöntemiyle numune hazırlanmıştır. Ayrıca, karşılaştırma yapabilmek için diğer numune hazırlama yöntemleri olan bulamaç ve suda yağmurlama yöntemiyle de numune hazırlanmıştır. Tüm siltli numuneler %73 gibi yüksek D_r ' de hazırlanmasına karşın düşük direnç ve gevrek davranış sergilerken, D_r ' si %66 olan örselenmemiş numunelerin genleştiği gözlemlenmiştir.

Thevanayagam (2000), farklı oranlarda NP incelerin kuma ilave edilmesiyle değişen dinamik davranışları incelemiştir. Drenajsız gerilme-birim boy değişim davranışı, kayma direnci ve göçme potansiyeli iri daneler arası ve ince daneler arası sürtünme tanımlarıyla sunulmuştur. İnce içeriği eşik (FCth) ve limit ince içeriği olarak (FCl) olarak ayrılmıştır. Sonuç olarak, siltli kum ve kumlu siltlerden gelen bulgular, daneler arası veya sadece inceler arası boşluk oranlarının tek başlarına zeminin davranışının göstergesi olamayacağını göstermiştir.

Polito ve Martin (2001), laboratuvarında kumların sıvılaşma hassaslığında plastik olmayan siltlerin etkisini gözlemlemek için, 16 kum ve silt içerikli karışım kullanarak 300 dolayında dinamik üç eksenli deney yapmıştır. Deney sonuçlarından şu görüşler oluşmuştur; 1. Kum ve plastik olmayan siltlerden oluşan numunelerde iki farklı ve belirgin davranış biçimi belirlemiştir. Bunlardan hangisinin baskın olduğu; kum iskeletinin içerdiği boşlukları dolduran siltin kumun sürekli iskeletinin yapısını bozarak davranışını değiştirmesine bağlıdır. Kumun boşluklarında olabilecek en büyük silt oranı "limit silt içeriği" olarak adlandırılmakta ve %25-45 arasında değişmektedir. 2. Silt içeriği limit değerinin altında ise kum matrisi içindeki silt varsayımı yapılabilir. Böyle bir durumda zeminin çevrimsel yükleme direnci kumun bağıl birim hacim ağırlığı D_r ile yönetilir. D_r , söz konusu silt ve kumun karışımının maksimum ve minimum indis boşluk oranlarından hesaplanır. D_r arttıkça zeminin

çevrimsel gerilme direnci de yükselir. 3. Silt içeriği limit değerden yüksekse numunenin yapısı silt matrisi içinde asılı ve birbirine tam değmeyen kum danelerinden oluşacaktır. Direnci yine bağıl birim hacim ağırlığa bağlı olmakla birlikte, artış; limitin altında silt içeriğindeki numunelere oranla daha yavaştır.

Önalp ve Arel (2002), yapılan laboratuvar deneyleri ve arazi gözlem ve deneyleri sonucunda “Adapazarı Kriteri” ni önermişlerdir. Bu kriterde sıvılaştırılabilir siltlerin sınıfının ML olduğu ve aşağıdaki koşulların sağlanması gerektiği öne sürülmüştür.

1. $I_L \geq 1$,
2. $w_L \leq 30$
3. Kil yüzdesi $\leq \%15$

Burada, I_L : sıvılık indisi, w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, Kil yüzdesi: $2 \mu\text{m}$ ' den geçen yüzde olarak verilmiştir.

Sancio ve diğerleri (2002), Adapazarı' nda 1999 depreminde zemin yenilmelerinin gözlenmesi ile Çin Kriteri karşılaştırmasını yapmışlar, sıvılaştırılan zeminlerde Çin Kriteri' nde öngörülen kil içeriği koşulunun sağlanmadığını belirtmişlerdir. Buna neden olarak kil boyutundaki danelerin yüzdesinin değil bunların mineralojik özelliklerinin etkin olması gösterilmiştir. Kil boyutundaki danelerin önemli bölümünün kuvars ve feldispat olması nedeniyle kil içeriğinin kriterde yer almasının güvenilir sonuçlar getireceğini öne sürmüşlerdir. Öte yandan, kil içeriği yüksek olan zemin profillerinde sıvılaştırmanın görülmediği de rapor edilmiştir.

Kaya ve diğerleri (2002), 1999 depreminden sonra Adapazarı' ndan örselenmemiş numuneleri kullanarak doygun, silt, kil ve siltli kum numuneler üzerinde drenajsız dinamik deneyler yapmışlardır. Artan çevrim sayısı ile şekil değiştirme ve boşluk suyu basınçlarının arttığı, plastisitenin artmasıyla mukavemetin de arttığı gözlemlenmiştir.

Önalp ve diğerleri (2002), Adapazarı' nda yaygın olarak bulunan NP siltlerin sıvılaştırma yeteneği konusunda edinilen bilgileri özetlemişlerdir. Yapılan SPT ve CPT

deneylemlerinin sonuçları kullanılarak Çin kriteri ve CPT zemin tipi davranış katsayısı I_c değerlendirilip çalışma sonucunda siltler için Adapazarı kriterini,

1. $I_L \geq 1$
2. $w_L \leq 30$
3. Kil yüzdesi $\leq \%15$
4. $1.7 < I_c < 2.6$, olarak yenilemişlerdir.

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, Kil yüzdesi: $2 \mu m$ ' den geçen yüzde, I_c : zemin tipi davranış indisi olarak verilmiştir.

Soong ve diğerleri (2004) %65 ve %95 arasında silt içeren zemin numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Yapılan dinamik basit kesme deneylerinde (DSS) dinamik yenilmeyi %10 çift yönlü deformasyon genliğinde tanımlamışlardır. Ancak, sıvılaşmanın yalnızca NP siltlerde oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Bray ve diğerleri (2004) Adapazarı'nda 1999'da gözlenen sıvılaşmanın Çin kriterine uymadığını yinelemişlerdir. Sıvılaşmayı kil miktarından ziyade kil minerallerinin etkilediğini, bu nedenle bir zeminin plastisite indisinin sıvılaşmayı daha belirleyici bir gösterge olduğunu söylemişlerdir. Böylece siltli zeminlerin sıvılaşma hassaslığı aşağıdaki gibi verilmiştir:

1. $I_p \leq 12$ ve $w_n \geq 0.80 w_L$ sıvılaşmaya hassas,
2. $12 < I_p < 20$ ve $w_n \geq 0.80 w_L$ sıvılaşmaya dirençli, çevrimsel hareketliliğe hassas
3. $I_p > 20$ ve $w_n < 0.80 w_L$ sıvılaşma hassaslığının olmadığı, söylemişlerdir.

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği olarak verilmiştir.

Sunitsakul (2004), siltli zeminlerde fazla boşluk suyu basıncının oluşmasını ve büyük deformasyonların gelişmesini araştırmıştır. Daha önceki depremlerde sıvılaşan veya zemin yenilmesi görülen yerlerden elde edilen verileri incelemiş ve son yıllardaki çoğu araştırmanın aksine kumu çok olan zeminlerin sıvılaşma hassasiyetinde silt

içeriğinin etkisini vurgulamıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarından, kumlu zeminlerin aksine siltli zeminlerin davranışının yükleme frekansı ve büyüklüğünden etkilendiği belirlenmiştir. Aşırı konsolide ve plastikliği fazla olan siltler deformasyon ve boşluk suyu basıncının gelişmesine daha dirençlidir. Laboratuvarında hazırlanan numuneler için, dinamik direncin plastisite indisi I_p den küçük olan siltli zeminlerde artmadığı, ancak örselenmemiş numunelerde dinamik direncin I_p ' nin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir.

Önalp ve diğerleri (2006) sıvılaşmayı belirlemede siltlerin içerisindeki kil oranının yanında sıvılık indisi ve likit limitin de göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Çalışma sonunda, Y.A.S.S. altındaki silt ortamlarında ve $M_w > 7$ koşulunda sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için aşağıdaki kriterin sağlanması gerektiğini söylemişlerdir.

1. $I_L \geq 0.9$
2. $w_L \leq 33$
3. Kil yüzdesi $\leq \%10$
4. $D_{50} > 0.02$ mm

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği, Kil yüzdesi: 2μ ' den geçen yüzde, D_{50} : ortalama dane boyutu olarak verilmiştir. D_{50} yeni bir değişken olarak getirilmiştir.

Bray ve Sancio (2006) ince daneli zeminlerin sıvılaşma hassaslığını I_p ve w_n/w_L ile yargılamışlardır. 1994 Northridge, 1999 Kocaeli ve 1999 Chi Chi depremlerinde ince daneli zeminlerdeki sıvılaşma olaylarının Çin Kriteri ile uyummadığını yinelemişlerdir. Bu nedenle zeminlerin kil yüzdesinden ziyade I_p değerinin sıvılaşma hassaslığını belirlemede daha iyi bir gösterge olacağını belirtmişlerdir. Dinamik üç eksenli deneyinde efektif konsolidasyon basıncı düşük olan deney sonuçlarına göre sıvılaşma kriterini, aşağıdaki şekilde vermişlerdir:

1. $I_p \leq 12$ ve $w_n \geq 0.85 w_L$ sıvılaşma hassaslığının olduğu,
2. $12 < I_p < 18$ ve $w_n \geq 0.80 w_L$ sıvılaşmaya kısmen hassas olduğu

3. $I_p > 18$ ve $w_n < 0.80 w_L$ sivilaşma hassaslığının olmadığı, ifade edilmiştir.

Burada w_L : likit limit, w_n : doğal su içeriği olarak verilmiştir.

Sanin ve Wijewickreme (2006) Fraser Nehri deltası siltinin dinamik kayma direncini sabit hacimli dinamik basit kesme deneyiyle (DSS) incelemiştir. Kullanılan numuneler 305 m kalınlığındaki Holosen yaşlı düşük plastisiteli siltten alınmıştır. Numuneler başlangıç konsolidasyon gerilmesinde veya ön konsolidasyon gerilmesinin üstünde konsolide edildiklerinde, dinamik yükleme sırasında çevrimsel hareketlilik tipi deformasyonlar görülmüştür. Dinamik kayma direnci aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla artmaktadır. Numunelerin, dinamik yükleme sonrasında, oluşan fazla boşluk suyu basıncı oranı ($r_u > 80\%$) sonucu önemli hacimsel deformasyonlar (%2.5–%5) görülmüştür.

Brandon ve diğerleri (2006), siltlerin statik koşullarda drenajsız kesme direncinin nasıl göz önüne alınması gerektiği ile ilgili pratik bilgi vermişlerdir. Bu amaçla siltlerin drenajsız kayma direncinin belirlenmesi sırasında değişen boşluk suyu basıncı ile ilgili olarak Skempton A parametresini yenilme kriteri olarak belirlemişlerdir.

Boulanger ve Idriss (2007) ince daneli zeminlerin sivilaşma hassaslığının belirlenmesinde kullanılan Çin Kriteri ile tanımlamanın, zeminlerin mekanik davranışından ziyade arazi gözlemleriyle yapılmasından dolayı eksik bir kriter olduğunu öne sürmüşlerdir. Silt ve kil arasındaki sivilaşma ve çevrimsel hareketliliği ayırtlamak için silt zeminleri kendi içinde kumsu ($I_p < 7$ olan zeminler) ve kilsu ($I_p \geq 7$ olan zeminler) olarak ifade etmişlerdir. Kumsu zeminlerde sivilaşma, kilsu zeminlerde ise çevrimsel hareketliliğin belirlediğini söylemişlerdir. Kil yüzdesinin sivilaşmada kriter olarak kullanılmamasını önermişlerdir.

2.3. Sivilaşmanın Deformasyon Seviyesine Göre Tanımı

Chang ve diğerleri (1982), düşük plastisiteli siltli zeminler üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu araştırmacılar kil içerikli numunelerin sivilaşma yenilme limitini

%10 çift yönlü eksenel deformasyon olarak tanımlamışlardır. Temiz kumlarda gelişen boşluk suyu basıncı artışı plastik özellikli numunelerle karşılaştırıldığında temiz kumlarda ilk çevrimsel hareketlilik olmaksızın %100 boşluk suyu basıncının geliştiği, plastik siltlerde ise %100 boşluk suyu basıncı kaydedilmeden önce çevrimsel hareketliliğin geliştiği gözlenmiştir.

Law ve Ling (1992), plastik killi kumlarda deneyler yapmışlar ve sıvılaşma yenilmesini az miktarda kil içeren numunelerin %100 boşluk suyu basıncının oluşması aşamasında tanımlamışlardır. Ancak, önemli kil içeriği olan numunelerde sıvılaşma yenilmesi %5 çift yönlü eksenel deformasyonda tanımlanmıştır.

Stewart ve Hussein (1993), NP siltin sıvılaşma eğilimini kil oranının artışına bağlı olarak incelemiştir. %0 ve %10 kil içerikli siltte fazla boşluk suyu basıncının gelişiminin aynı, %20 kil içerikli siltte ise farklı olduğu gözlemlenmiştir. Plastik siltlerde çevrimsel hareketlilik önemli boşluk suyu basıncı gelişimi kaydedilmeden önce gözlemlenirken, plastik olmayan siltlerin boşluk suyu basıncı gelişimi temiz kumda olduğu gibi önce $r_u = \%100$ değerine ulaşılması, bunu izleyerek önemli birim boy değiştirmelerin belirmesi biçiminde ortaya çıkmıştır.

Koester (1994) farklı plastisitede siltlerde deney yapmıştır. Sıvılaşma yenilmesini boşluk suyu basıncı oranının %100' e yükselmesi veya %2.5 çift yönlü eksenel deformasyon olarak tanımlamıştır. %100 boşluk suyu basıncı oranının öncelikle düşük plastisiteli siltlerde belirdiği ve %2.5 çift yönlü eksenel deformasyonun plastikliği yüksek siltlerde oluştuğu öne sürülmüştür.

Singh (1994), Prakash ve Puri (1982) gibi siltli zeminlerin sıvılaşması üzerinde çalışmıştır. Bu gurubun görüşüne göre de plastik olmayan (NP) siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artması ve çevrimsel hareketliliğin oluşması genellikle temiz kumlarınkiyle aynıdır. Boşluk suyu basıncının artması ve çevrimsel hareketlilik özellikleri plastik silt ve plastik kumlarda benzerdir. Bu çalışmalarda örselenmemiş lölserde kil içeriğinin boşluk suyu basıncı artışını geciktirdiği belirlenmiştir.

Prakash ve Sandoval (2003), siltler ve kil-silt karışımlarının sıvılaşma hassaslığını dinamik üç eksenli deneylerde incelemişlerdir. Yapılan dinamik üç eksenli deneyde sonuçlarından sıvılaşmayı boşluk suyu basıncı oranının %100 olması veya dinamik deformasyonun %20 çift yönlü eksenel deformasyonda tanımlamışlardır.

Bu bilgiler siltlerde yenilmelerin %2.5 - %20 çift yönlü eksenel deformasyon gibi çok geniş bir aralıkta oluştuğunu belirtmektedir. Bu geniş aralığın çevrimsel hareketlenme ve sıvılaşma ayırımının kesin olarak yapılamamasından kaynaklandığı açıktır.

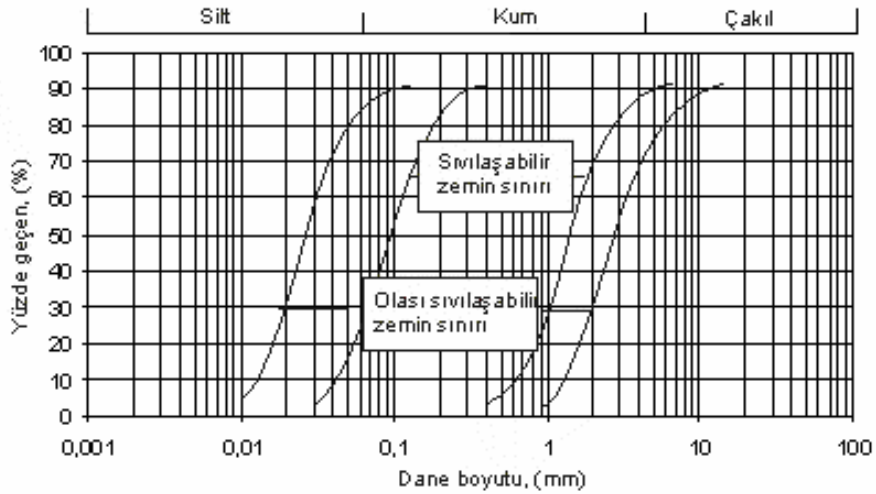
2.4. Siltte Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler

Siltli zeminlerde sıvılaşmayı etkileyen birçok faktör vardır. Laboratuvar deney sonuçlarına ve arazi gözlem ve deneylerine dayalı olarak, sıvılaşmayı etkileyen en önemli faktörler aşağıda verilmiştir.

1. Dane boyutu ve dağılımı
2. Boşluk oranı
3. Su seviyesi ve drenaj durumu
4. Deprem şiddeti ve süresi
5. Geçmişte aldığı gerilmeler
6. Aşırı konsolidasyon oranı
7. Plastisite indisi
8. Zemin iskeletinin yapısı
9. Yaşlanma
10. Başlangıç çevre basıncı
11. Deneyde membran etkisi
12. Numunenin boyutu
13. Yükleme şekli ve frekansı

2.4.1. Dane boyutu

Zeminin türü, sıvılaşma olasılığında önemli bir faktördür. İlk olarak kumlarda sıvılaşma incelemelerinde dane boyutunun etkisine bakacak olursak, Tsuchida (1970) geçmiş depremlerde sıvılaşan veya sıvılaşmayan kumlu zeminlerin dane boyutu dağılımını inceleyerek Şekil 2.8.'deki sıvılaşma sınır eğrilerini vermiştir. Üniform, plastik olmayan zeminlerin sıvılaşma hassaslığı düzgün dane dağılımlı zeminlere göre fazladır. İyi derecelenmiş zeminlerde (W), büyük daneler arasındaki boşlukları küçük daneler doldurmakta bu da deprem sırasında boşluk suyu basıncının artışı azaltırken, zeminin hacim azalmasında da düşüş olmasına sebep olmaktadır. Koester (1992), silt ve kil danelerinin şekil ve dokusu gözönüne alındığında kıvam etkisine rağmen bunların zeminin davranışındaki etkisinin ayırt edilemeyeceğini söylemiştir.



Şekil 2.8. Sıvılaşabilir kumlarda dane dağılımı (Tsuchida, 1970)

2.4.2. Boşluk oranı

Önalp (2007), çakıl içeriği %8' den, silt ve kil içeriği %12' den az olan kumlu zeminlerin sınıflandırılmasında relatif sıkılık kavramı kullanılmasında yarar olduğunu söylemiştir. Kumların gerilme – deformasyon davranışı relative yoğunluğa

ne kadar bağlıysa ince daneli zeminlerin de gerilme – deformasyon davranışı boşluk oranı veya yoğunluktan o kadar etkilenmektedir (Boulangier ve Idriss, 2004). Bu çalışmada kullanılan karışımların ince içeriği %50' den fazla olduğu için boşluk oranı kavramı kullanılmıştır. El Hosri ve diğerleri (1984), Kuerbis ve diğerleri (1988) boşluk oranının azalması ile siltli killerin dinamik direncinin arttığını söylerken Vaid (1994), sabit silt içeriğinde boşluk oranının azalmasının sıvılaşma direncini arttırdığını söylemiştir. Bu çalışmada, karışımların boşluk oranı 0.75 ile 0.80 arasında tutularak boşluk oranından dolayı sıvılaşma direncinde görülecek farklılığın ortadan kaldırılması sağlanmıştır.

2.4.3. Yer altı su seviyesi ve drenaj durumu

Sıvılaşmanın meydana gelmesi için yeraltı su seviyesi' nin yüzeye yakın olması ön koşuldur. Deprem sırasında, zemin hareketinin süresi kısa olduğundan oluşan drenaj ihmal edilebilir. Umehara ve diğerleri (1985), çevrimsel kesme gerilmeleri alan zeminde artan boşluk suyu basıncının zemin hareketi sırasında bir miktar sönmülenebileceğini belirtmişlerdir. Bu durum zemin kitlesinin sıvılaşma potansiyelini önemli derecede etkilemektedir. Örneğin, derin zemin tabakalarında oluşan boşluk suyu basıncının sönmülmesi yukarıya yönelen sızıntıya yol açabilir. Bu da yüzeydeki tabakaların sıvılaşmasına sebep olabilmektedir. Diğer yandan, dinamik yükleme etkisiyle zemin kitlesinde oluşan boşluk suyu basıncı sönmülense, sıvılaşma tehlikesi ortadan kalkar. Arazide yükleme sırasında boşluk suyunun dağılması veya sönmülmesi, boşluk suyunun hidrolik eğimi, ortamın geçirimsizliği, sıkışabilirliği ve yükleme frekansına bağlıdır. Depremler sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı hızlı bir şekilde sönmülense zemin sıvılaşmaya karşı hassas olmayabilir (Sandoval, 1989).

2.4.4. Deprem büyüklüğü ve süresi

Deprem sırasında, zeminin hacimsel azalma göstermesine, aşırı boşluk suyu basıncının gelişmesine yol açan kayma deformasyonları yer hareketinin ivmesi ve sarsıntı süresi gibi özelliklerden etkilenir. Deprem şiddeti ve süresinin artması

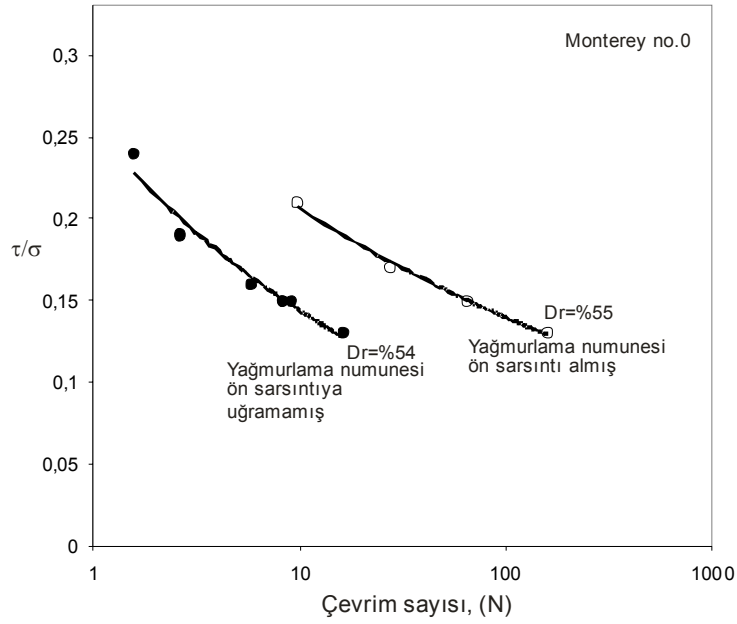
sıvılaşma olasılığını arttırır. Büyüklüğü fazla olan depremlerin ivme değeri büyük, deprem süresi uzun olmaktadır.

Dinamik gerilme seviyesi, zeminin sıvılaşma potansiyelini tayinde önemli bir etkendir. Deprem sırasında, dinamik gerilme seviyesi zemin kütlesinin davranışını etkilemektedir. Dinamik gerilme ne kadar büyükse boşluk suyu basıncı artışı da o kadar fazla olur. Boşluk suyu basıncındaki bu artış efektif gerilmeyi azaltır. Seed ve Idriss (1971), Niigata depremlerinin kayıtlarını inceleyerek 370 yıl içinde maksimum ivme değerinde yaklaşık 25 deprem olduğunu ve bu depremlerin değeri $0.13g'$ yi aştığında sıvılaşma gözlemlendiğini rapor etmişlerdir.

Seed ve Idriss (1971) yaptıkları bütün laboratuvar çalışmalarında sıvılaşmanın çevrim sayısına bağlı olduğunu söylemişlerdir. Ishihara (1985) sıvılaşmanın meydana gelmesi için eşik bir değer olduğunu ve bu eşik değer için doruk yer ivmesini $a_{max}=0.10g$ ve $M_w=5$ olarak vermiştir.

2.4.5. Gerilme tarihçesi

Daha önceki yıllarda deprem etkisine maruz kalmış zeminler, sıvılaşmaya karşı yeni oluşmuş zeminlerin sıvılaşma direncinden daha fazla bir direnç gösterirler. Finn ve diğerleri (1970) sıvılaşmada geçmişteki gerilmelerin etkisini vurgulamış, küçük dinamik kayma deformasyonu uygulandığında sıvılaşma direncinde artış olduğunu göstermişlerdir. Seed ve diğ.'nin (1977) sarsma tablasından elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.9.'da özetlenmiştir. Görüldüğü gibi dinamik direnç oranında %100'e varan artışlar söz konusudur.

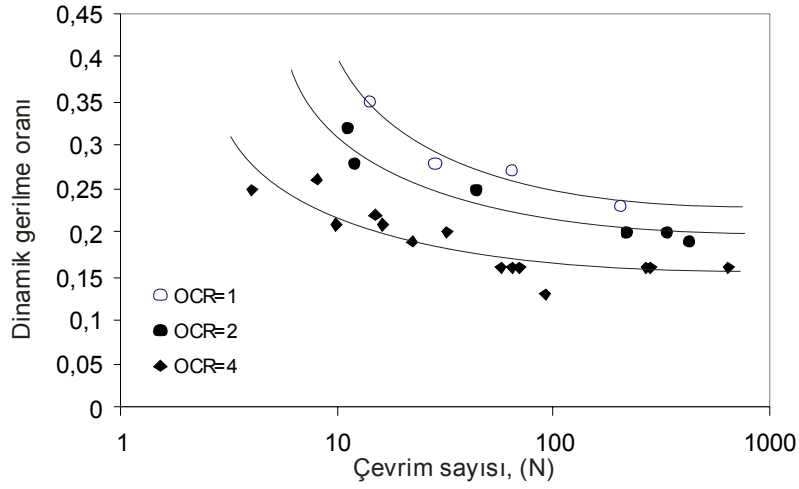


Şekil 2.9. Kumun sıvılaşmasında sismik geçmişin etkisi (Seed, Mori ve Chan, 1977)

2.4.6. Aşırı konsolidasyon oranının etkisi

Aşırı konsolidasyon oranının kumlardaki etkisi Seed ve Peacock (1971), Lee ve Focht (1976), Ishihara ve diğerleri (1978), Ishihara ve Takatsu (1979), Campanella ve Lim (1981), Stamatopoulos ve diğerleri (1995) ve Nagase ve diğerleri (1996) gibi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve aşırı konsolidasyon oranı arttıkça direncin (CRR) arttığı gözlemlenmiştir.

Ishihara ve diğerleri (1978) aşırı konsolidasyon oranının etkisini alüvyal siltli kum ve kumlu siltlerde incelemiştir ve kumdaki ince içeriğinin artmasıyla bu etkinin belirginleştiğini söylemişlerdir. Finn (1981) ve Puri (1984)' de aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla kayma direncinin arttığını belirtmişlerdir. Ishihara (1977) aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığını belirtmiştir. Sancio (2003), siltte aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla dinamik direncin arttığını Şekil 2.10.' de göstermiştir.

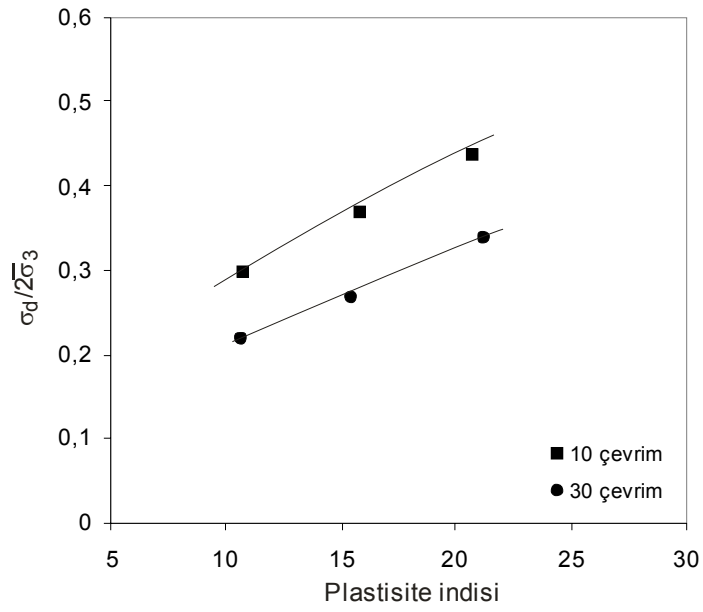


Şekil 2.10. Aşırı konsolidasyon oranı'nın çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişkiye etkisi (Sancio, 2003)

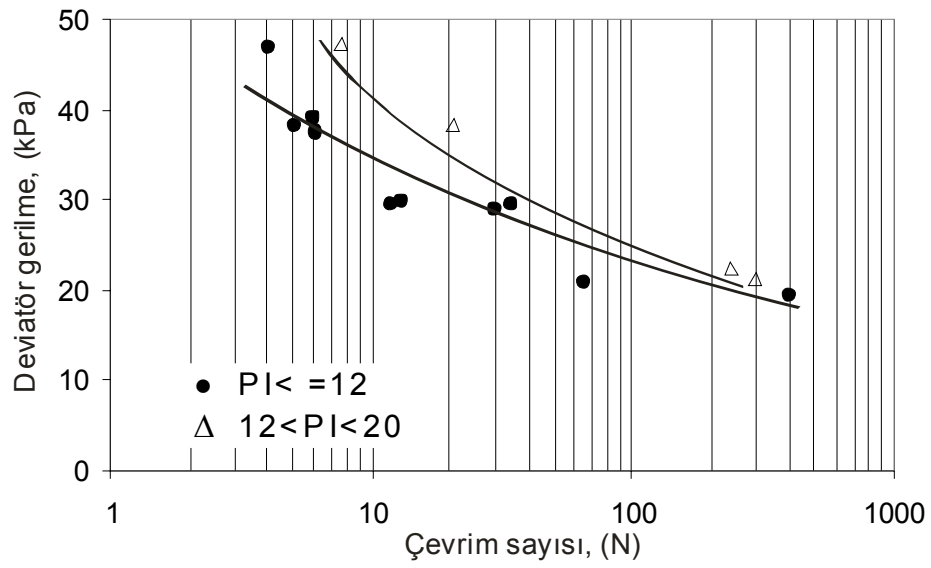
2.4.7. Plastisite indisi

Ishihara (1985) “depremler sırasında başlangıç sıvılaşmasının görüldüğü zeminleri, ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince daneler içeren kum çökelleri” olarak tanımlamıştır. Bir başka deyişle, plastik olmayan zeminlerin sıvılaşmaya karşı hassas olduğunu söylemiştir.

Puri (1984), plastisite indisinin artmasıyla yenilme için gerekli kesme gerilmesinin de arttığını dinamik üç eksenli deneylerle göstermiştir. Şekil 2.11.' de plastisite indisinin artmasıyla dinamik gerilme oranının arttığı görülmektedir. Sancio (2003), $I_p \leq 12$ ve $12 < I_p < 20$ olan Adapazarı zemin numuneleri üzerinde uyguladığı dinamik üç eksenli deney sonuçlarını Şekil 2.12.' de vermiştir. Çalışma sonunda I_p arttıkça %3 tek yönlü aksenal deformasyona ulaşmak için gerekli çevrim sayısının arttığı gözlemlenmiştir.



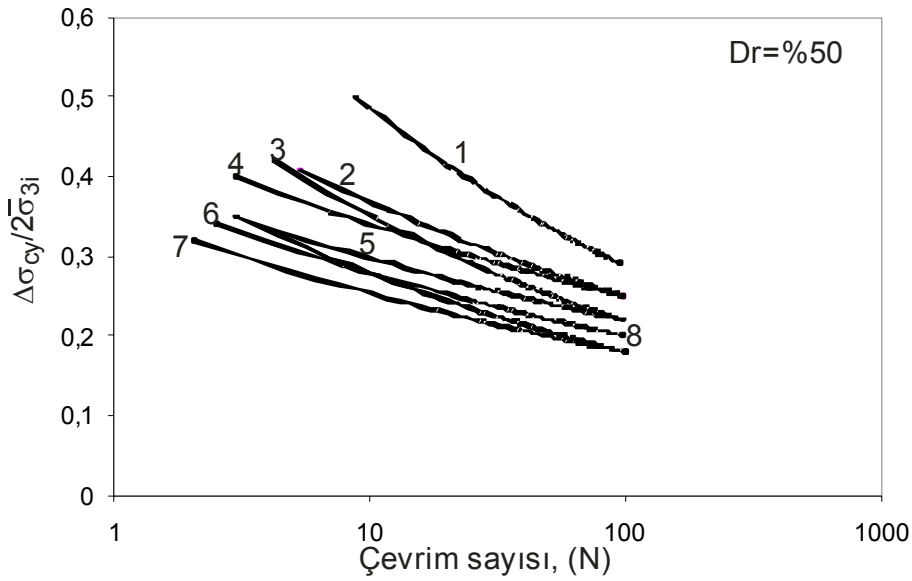
Şekil 2.11. Plastisite indisi ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişki (Puri, 1984)



Şekil 2.12. $I_p \leq 12$ ve $12 < I_p < 20$ olan zeminlerin %3 aksenal birim deformasyonda plastisite indisinin sıvılaşmaya etkisi (Sancio, 2003)

2.4.8. Zemin yapısı

Seed ve diğ. (1977) ve Ladd (1977) numune hazırlama yöntemi ve zemin yapısının dinamik yükleme altındaki doymun kumun sıvılaşmasını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Numune hazırlama yönteminin dinamik dirençte büyük etkisi olabilmektedir. Farklı numune hazırlama yöntemleriyle hazırlanmış kum numunelerin dinamik dirençleri %200'e varan farklar göstermektedir. Mulilis ve diğerleri (1977) havada yağmurlama, suda yağmurlama, yüksek ve düşük frekansda vibrasyon, ıslak tokmaktama, kuru ve ıslak şişleme olmak üzere 11 farklı numune hazırlama yöntemini değerlendirmiştir. Islak numuneler yüksek frekansda en yüksek direnci verirken, kuru numuneler aynı frekansta en düşük değeri vermiştir. Islak numuneli yöntemler kuru yöntemlere göre %20 daha fazla dinamik gerilme artışı vermektedir. Şekil 2.13.' de Mulilis ve diğerlerinin (1977) numune hazırlama yöntemlerinin etkisini temsil ettikleri eğriler verilmiştir.



Şekil 2.13. Farklı sıkıştırma yöntemlerinin çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişki (1)yüksek frekansta titreşimli ıslak (2)ıslak tokmaktama (3)ıslak şişleme (4)düşük frekansta titreşimli-ıslak (5)yüksek frekansta titreşimli kuru (6) suda yağmurlama (7)havada yağmurlama (8)kuru şişleme (Mulilis ve diğ., 1977)

Yamamuro ve Wood (2004), çamurdan hazırlama, suda çöktürme, havada yağmurlama, kuru dökme (mixed dry deposition) ve huniden kuru dökme olmak üzere farklı numune hazırlama yöntemleri kullanarak %20 silt içerikli Nevada kumu üzerinde drenajsız üç eksenli deneyi yapmıştır. Her bir numune hazırlama yöntemiyle aynı boşluk oranında hazırlanarak yapılan drenajsız üç eksenli deneylerin sonuçlarından, numune hazırlama yöntemlerinin farklılığının numunelerin iç yapısını değiştirdiği gözlemlenmiştir.

2.4.9. Yaşlanmanın etkisi

Youd ve Hoose (1977) ve Youd ve Perkins (1978) de jeolojik yaşın sıvılaşma direncinde artışa sebep olduğunu belirtmiştir. Son birkaç bin yılda oluşan çökellerin Holosen sedimentlere göre daha hassas olduğu, Pleyistosen sedimentlerinin daha çok dirençli olduğu ve Pleyistosen öncesi birikimlerin ise sıvılaşmadığı bilinmektedir. Zaman içerisinde sıvılaşma direncindeki artış, danelerin daha iyi sıkışmasından olabilmektedir. Daneler arasındaki bu sıkışma sırasında gerçekleşen temasın da çimentolaşma veya yapışmayla sonuçlanması olasıdır.

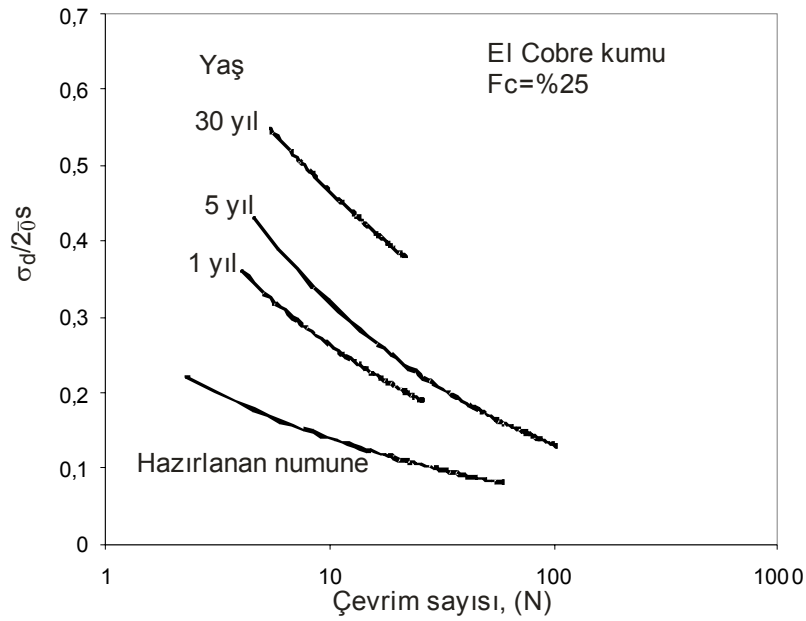
Finn (1981), jeolojik yaşın sıvılaşma direncinde %75 kadar artış getirdiğini gözlemlemiştir. Campanella ve Lim (1981), shelby tüpüyle alınmış killi siltli yaşlı ve yaşlı olmayan numunelerde dinamik üç eksenli deneyi yaparak, yaşlı numunelerin sadece 19 gün daha yaşlıyken, bunların genç numunelerden %25 daha dirençli olduğunu gözlemlemiştir. Zeminin dinamik davranışında katman yaşının etkisi üzerindeki çalışmalardan, bekleme süresinin uzamasıyla boşluk suyu basıncı oranının %100 olması için gerekli gerilmenin arttığı gözlemlenmiştir. Troncoso ve diğerleri (1988) %25 silt içerikli kum birikintisinde yaşın etkisini incelemiştir. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarından birikme süresinin uzamasının dinamik direnci arttırdığı görülmektedir (Şekil 2.14.). Sandoval (1989), arazideki zeminin sıvılaşma özelliğinin birikintinin yaşından etkilendiğini, ayrıca çevre basıncının yüksekliği oranında sıvılaşma direncinin de o denli arttığını göstermiştir.

Zeminlerin çökme ortamı, zemin yapısının oluşmasında etkilidir. Göllerde, nehirlerde ve denizlerde oluşan doğal çökeller gevşek ve dağınık (disperse) zemin

yapısı oluşmasından dolayı sıvılaşmaya karşı daha hassas ortamlar oluşturmaktadır. Hidrolik dolgular da su içine düşen zemin danelerinin gevşek ve dağınık zemin yapısı oluşturmasından dolayı sıvılaşmaya karşı oldukça hassastır.

2.4.10. Başlangıç çevre basıncı

Dinamik yükler altında yapılan deneylerde uygulanan efektif çevre basıncının büyüklüğü zeminin sıvılaşma hassaslığını etkilemektedir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli efektif çevre basıncındaki artışla azalmaktadır. Bu etki 1964 Niigata depremi sırasında, 2.7 m altındaki zemin sıvılaşmazken çevresindeki aynı zeminin sıvılaşması şeklinde görülmüştür (Tezcan ve Özdemir, 2004). Bu tez çalışmasında, efektif konsolidasyon basıncının deneyler üzerindeki etkisini kaldırabilmek için bütün deneylerde efektif konsolidasyon basıncı 100 kPa olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.14. El Cobre kumunun farklı yaşlar için dinamik üç eksenli deneydeki direnci (Troncoso, Ishihara ve Verdugo, 1988)

2.4.11. Membran etkisi

Nicholson (1993), $D_{20}=0.2$ mm olan tipik temiz bir kumda membran penetrasyonunun ihmal edilebileceğini söylemiştir. Siltli numunelerde D_{20} değeri daha da küçük olduğundan membran penetrasyonu etkisi kumlardan daha da küçük olacağından bu çalışma kapsamında siltin membran penetrasyonundan etkilenmeyeceği belirlenmiştir.

2.4.12. Numune boyutu

Lee ve Fitton (1969), dinamik deneylerde kullanmak üzere 1.4 ve 2.8 inch çapında ince ve iri kumlardan oluşturulan numuneleri sabit D_r ve sabit çevre basıncında denemiştir. Sonuçlar iki numune çapı arasındaki sıvılaşma direnci farkının %5' den küçük olduğunu göstermiştir. Çapı büyük olan numunenin daha düşük dirençte olduğu gözlemlenmiştir. Fakat verilerdeki dağınıklıktan dolayı kumlarda numune çapı farklılığının sonuçlarda etkisinin ne boyutta olduğu kesin olarak bulunamamıştır.

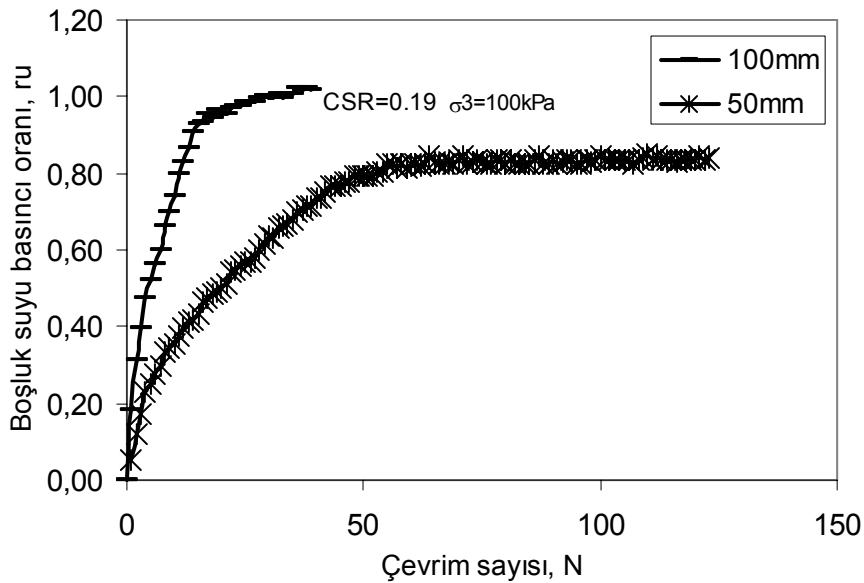
Polito (1999), 1.4 ve 2.8 inch çapındaki numunelerin deney sonucunda sıvılaşma direncinin büyük çaplıda %5 daha düşük değerde olduğunu gözlemlemiştir ancak, Lee ve Fitton (1969) gibi numune çapında farklılığın önemli etkisinin olmadığını belirtmiştir. Abdulla ve Kioussis (1997) çalışmalarında, çimentolanmış kumun modellenmesini üç eksenli deney ile yaparak numune boyutunun olası etkisini incelemiştir. 5 ve 10 cm çaplı numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarından küçük numunelerin büyük numunelere göre daha güçlü davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, öncelikli olarak numune boyutu etkisine bakılmıştır. 5 cm ve 10 cm' lik deney numuneleriyle yapılan deney sonuçlarından küçük çaplı deney numunelerinin sıvılaşma direncinin büyük çaplı deney numunelerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 2.15.' de büyük ve küçük çaplı numunelerin boşluk suyu basıncı gelişimi verilmiştir. 10 cm çaplı numunenin boşluk suyu basıncı oranı %100 değerine 20 çevrim sonunda ulaşırken, 5 cm çaplı numunenin boşluk suyu basıncı

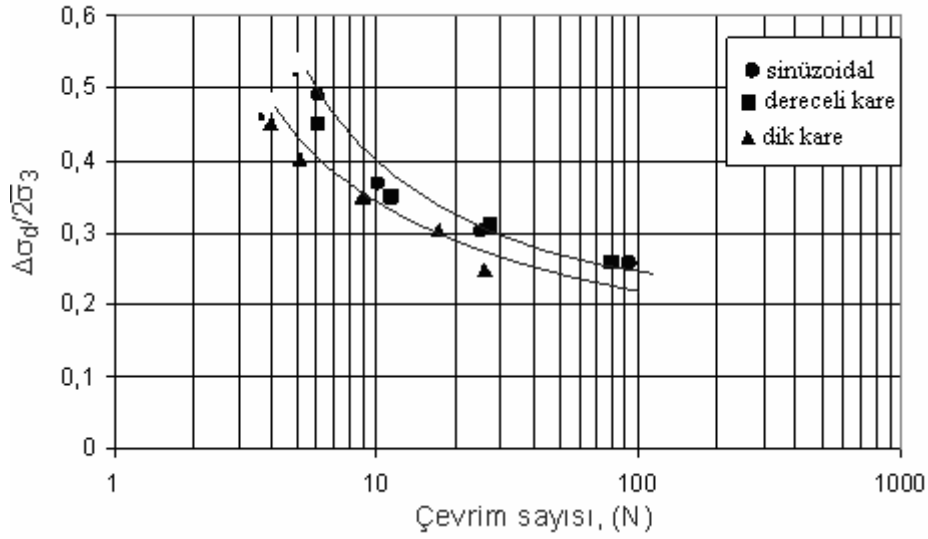
oranının %100 değerine hiç ulaşamadığı, bunun yanında boşluk suyu basıncı oranının %80 değerine 50 çevrim sonunda ulaştığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak büyük çaplı numunenin sıvılaşma direnci küçük çaplı numunenin sıvılaşma direncinden daha düşüktür.

2.4.13. Yükleme şeklinin ve frekansının etkisi

Silver (1977) ve Mulilis ve diğerleri (1978) bir zeminin dinamik direncinin yükleme şekli tarafından önemli ölçüde etkilendiğini söylemişlerdir. Dinamik üç eksenli deney sisteminde, dikdörtgen, üçgen, sinüzoidal dalga formları kullanılmaktadır. Sinüzoidal dalgaların kullanıldığı deneylerde numunelerin dinamik direnci, dikdörtgen dalga tipinin kullanıldığı deneylerin dinamik direncinden %15 hatta %30' dan daha fazla çıkmaktadır. Silver (1977) dalga formunun değişimiyle dinamik dirençte doğan farkı Şekil 2.16.' da vermiş, sinüzoidal dalga formunun kullanılmasını önermiştir.



Şekil 2.15. 50 mm ve 100 mm çaplarındaki silindirik numunelerin dinamik üç eksenli deneyde boşluk suyu basıncı oranının gelişimi

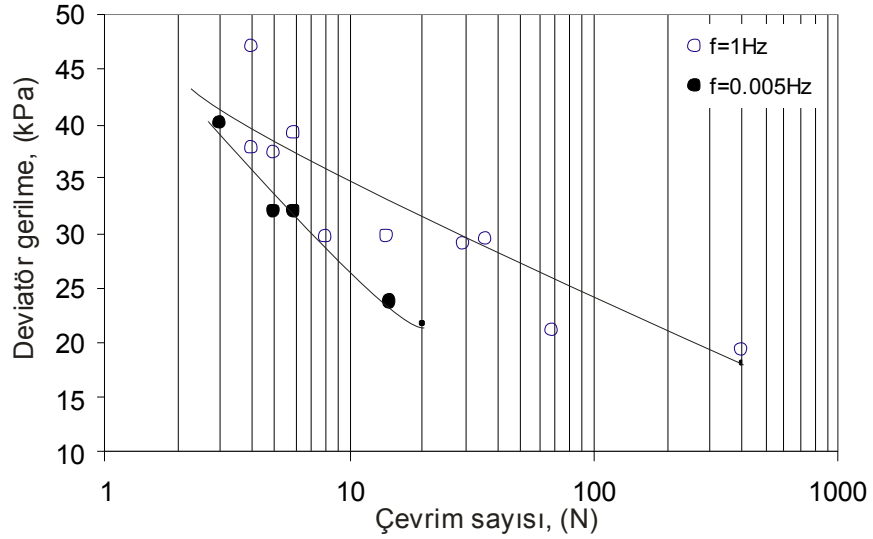


Şekil 2.16. Sıvılaştırma direncinde dalga şeklinin etkisi (Silver, 1977)

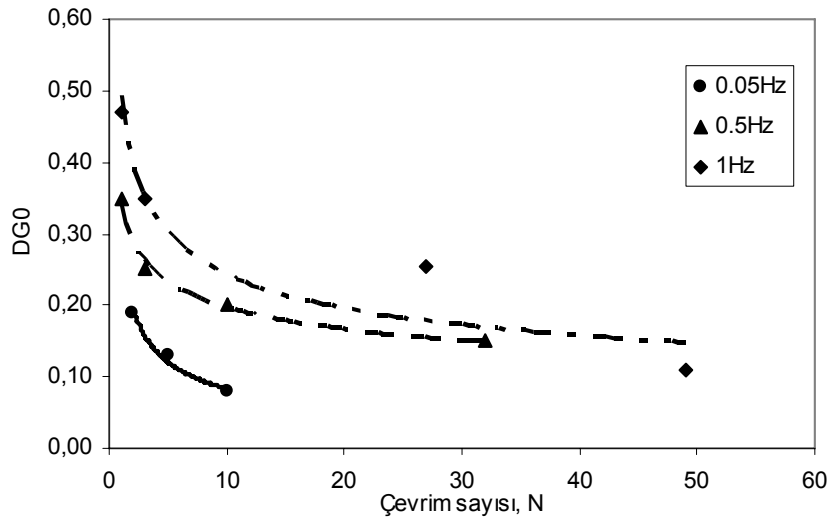
Lee ve Fitton (1969) ve Mulilis ve diğerleri (1975) dinamik dirençte yükleme frekansının etkisini çalışmıştır. Lee ve Fitton (1969) düşük frekansta dinamik gerilmenin daha düşük olduğunu Mulilis ve diğerleri (1975) ise tam tersinin doğru olduğunu savunmuştur. Ancak, Monterey No. 0/30 kumu kullanılarak yapılan deney sonuçları arasındaki farkın az olmasından dolayı ½ ve 1Hz arasındaki yükleme frekansının dinamik direnci etkilemeyeceğini söylemiştir. Sancio (2003), Adapazarı'nın siltli zeminlerinde 1 Hz ve 0.005 Hz değerlerini kullanarak yükleme frekansının etkisini incelemiş ve deney sonuçlarını Şekil 2.17.' de olduğu gibi vermiştir. Grafikten, frekans değerinin düşmesiyle aksel deformasyona ulaşmak için gerekli çevrim sayısının belirgin biçimde azaldığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan Adapazarı siltinde, 1 Hz, 0.5 Hz ve 0.05 Hz frekanslarında dinamik üç eksenli deneyi yapılmış ve beliren farklılıklar değerlendirilmiştir. Şekil 2.18' de görüldüğü gibi $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşılması için gerekli çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı (DGO) karşılaştırılmıştır. Dinamik üç eksenli deney eğrilerinden 0.05 Hz ile yapılan deneyin istenen aksel deformasyona ulaşılması için gerekli çevrim sayısının en düşük değerde olduğu, frekansın sırasıyla 0.5 Hz ve 1 Hz olarak artmasıyla istenen aksel deformasyona ulaşılması için gerekli çevrim sayısının arttığı görülmüştür. 0.5 Hz

frekansında yapılan deneylerin boşluk suyu basınçlarının daha iyi incelenebildiği gözlenmiştir. Bu çalışma sonunda Adapazarı zeminleri gibi genç akarsu/göl ortamlarında oluşmuş yumuşak ince daneli zeminler (ML, MI, CL) için dinamik üç eksenli deneylerde frekansın 0.5 Hz olarak kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 2.17. Farklı deviyör gerilme değerlerinde %3 eksenel birim deformasyon için gerekli çevrim sayısı (Sancio, 2003)



Şekil 2.18. Adapazarı siltinde farklı frekanslarda %5 çift yönlü eksenel deformasyona ulaşılması için gerekli çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı (DGO) ilişkisi

BÖLÜM 3. KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

3.1. Monterey No.0 Kumunun Özellikleri

Bu çalışmada deneylerin yürütüldüğü dinamik üç eksenli deney cihazının kalibrasyonu için de Monterey No.0 standart kumu kullanılmıştır (Gallagher, 2000; Horita, 1985; Silver, 1977). Kalibrasyon için kullanılan Monterey No.0 kumu ABD Kaliforniya' dan temin edilmiştir. Gereç; üniform, açık kahve renginde ince kum olup TS 1900-1/2006 ve TS1500/2000 uyarınca yapılan sınıflandırma deneylerinden hesaplanan D_{50} değeri ile maksimum ve minimum boşluk oranı Tablo 3.1.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Monterey No.0 kumunun özellikleri

	Bu çalışma	Polito No.0/30	Gallagher No.0/30	Horita No.0/30	William No.0	Silver No.0	Mulilis No.0	Chan No.0
Simge	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
D_{50}	0.38	0.43	0.44	0.45	0.36	0.36	0.40	0.36
G_s	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
e_{max}	0.82	0.82	0.821	0.80	0.88	0.85	0.851	0.86
e_{min}	0.56	0.63	0.464	0.56	0.67	0.56	0.573	0.57

3.2. Siltlerin Oluşumu ve Özellikleri

Silt kelimesi sözlükte, akarsuyla gelen ince zemin veya çamur birikintisi, ince toprak sedimenti olarak tanımlanmaktadır. Bir başka sözlükte, su vasıtasıyla sık sık taşınan çok ince daneli zeminler ve sediment olarak adlandırılan birikintiler olarak tanımlanırken bir diğer sözlükte, genellikle suda süspansiyon halinde taşınan, kaya veya zeminden ayrılan ince malzemeden oluşan gevşek sediment olarak tanımlanmıştır.

Siltin dane boyutu 2 mikron ile 74 mikron arasındadır. Silt malzemesi nehirlerde, deltalarda veya denizlerde sıkça belirir. Silt ayrıca kayaların aşınması, buzulların öğütmesi, havayla aşınma ve nehir kenarlarında görülen erozyonla farklı şekilde oluşabilir. Silt daneleri yeterince küçük olduklarından çok uzaklara, su veya rüzgar yoluyla çok kolay taşınabilirler. Rüzgarla taşınmış kalın silt malzemelerinin birikimleri daha çok lös olarak adlandırılır.

Anakayanın yıpranması/ayrışması sonucu oluşan malzemelerin büyük çoğunluğu su, rüzgar, yerçekimi ve buzullar tarafından taşınarak farklı uzaklıklarda birikirler. Bu çalışmada kullanılan malzeme Adapazarı kent merkezinde Serdivan Mahallesi'nden temin edilmiştir ve bir akarsu çökeli olduğu düşünülmektedir.

3.3. Siltle İlgili Çalışmalar

Özellikle düşük plastisiteli siltlerin ve plastik olmayan (NP) siltlerin mühendislik davranışları kil veya kumların davranışından farklıdır. Plastik olmayan siltler kolayca örselenmekte, bu nedenle laboratuvarında yapılacak deneyler için örselenmemiş numune temini mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada, amaca en uygun hazırlama yönteminin seçilmesiyle laboratuvarında oluşturulan numuneler kullanılmıştır.

3.4. Adapazarı'nın Coğrafyası ve Jeomorfolojisi

Adapazarı, Sakarya ilinin merkez ilçesi olup kendi adı ile anılan ovanın güneybatı kenarında kurulmuş bir şehirdir. Adapazarı Ovası, doğuya doğru Hendek Ovası, güneydoğuya doğru Akyazı Ovası, kuzeybatıya doğru da Gökçeören Ovası vasıtasıyla körfez biçiminde sokularak, bu kesimlerdeki plato ve tepeler arasına girer. Batıya doğru Sapanca Gölünü içine alan ve İzmit Körfezi doğusundaki ovaya bitişen oluk şekilli çukurda uzanır. Doğuda Gümüşova eşiği ile sınırlanırken güneyde Samanlı Dağlarının doğuya doğru devamı olan Karadağ-Keremali Dağları ile sınırlanır. Batıda Kocaeli Platosunun doğu kenarına dayanırken, kuzeydoğu'da Çandağı'nın etekleri bu kesimdeki sınırı oluşturur. Bu sınırlar içerisinde kalan Adapazarı ovası 600 km²'lik alanıyla Marmara Bölgesinin en büyük alüviyal ovasıdır.

Bol (2003), taşkın ovası çökellerinin (eski nehir yatakları, ark bataklıklar, yarık yayılması çkelleri, ...vs) geçmişteki dağılımlarını ve derinliklerini bularak elde ettiği zemin haritalarını yorumlamış ve kent merkezindeki alüvyonun dağılımını vermiştir. Yapılan sondajların üst seviyelerindeki kil, kum, çakıllı kumlar ovanın en son dolma safhasına ait depolarıdır. Dolguların farklı yerlerde farklı karakter göstermesi Sakarya Nehrinin sık sık yatak değiştirmesiyle açıklanabilir. Ovanın bazı kesimlerinde belirlenen eski mecra izleri ve hilal biçimli kopuk menderesler başta Sakarya olmak üzere ovadaki akarsuların çok sık yatak değiştirdiğinin bir kanıtıdır. Sakarya nehir kanalının değişken konumu sonucu oluşan fasiyeslerde 4 metreden alınan bir numune üzerinde yapılan karbon yaş testi sonuçları 960 ± 40 yıl olarak bulunmuştur. 4 metre kalınlığa sahip bir alüvyon tabakası için gerekli olan çökeltme zamanını yaklaşık olarak 1000 yıl olarak tahmin edilmiştir.

Bilgin (1984), Sakarya Nehrinin Geyve Boğazı'ndan ani olarak çıkışından sonra düz olan Adapazarı Ovasına ulaşarak hızını kaybettiğini ve bu esnada çakıl, kum, silt ve kil malzemeleri ovaya bıraktığını, daha sonra yatağın gittikçe dolması sonucu azalan akım hızının ise kil ve silt istiflerinin birikmesine yol açtığını belirtmiştir. Bol (2003) Adapazarı siltinin, Sakarya Nehrinin yaklaşık son 1000 yıldan bu yana yarık yayılmasını (crevasse splay) takiben taşkın ovasına doğru yapmış olduğu sellenmeler ile çökeldiğini söylemiştir. Bu çalışmada kullanılacak zemin karışımları da bu süreçler gözönüne alınarak hazırlanmıştır.

3.5. Adapazarı Zeminlerinin Mineralojik Özellikleri

Deneylerde kullanılan zemin karışımlarının kil içeriğinin tanınması için suda çöktürülen numune üzerinde TÜBİTAK-MAM' da X-ışını kırınım analizi yaptırılmış ve bulunan mineraller kuvars, kalsit, feldispat, montmorillonit, illit ve kaolinit olarak verilmiştir.

Bray (2005) ise ABD Willamette Geological Service laboratuvarında yapılan analizde Adapazarı zeminlerinin kil içeriğinin Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi smektit veya rastgele tabakalı illit/smektit, klorit, illit ve kaolinit olarak belirlendiğini bildirmiştir. Montmorillonitin kaynağı olan smektit ince kilin eğemen minerali olup,

illit daha büyük kil boyutlarında boldur. $<0.2 \mu\text{m}$ boyutların tüm durumlarda %85 smektit, %10 illit ve %5 klorit ve kaolinit içerdiği söylenebilmektedir. Şekil 3.2.' de Adapazarı siltinin tarama elektron mikroskobu fotoğrafları verilmiştir.

3.6. Fiziksel Deneyler

Zeminin öncelikle dane çapı dağılımı, dane özgül ağırlığı ve kıvam limitleri TS1900/2006 uyarınca ölçülmüş ve bu özellikler Tablo 3.2.' de gösterilmiştir.

3.6.1. Dane çapı dağılımı

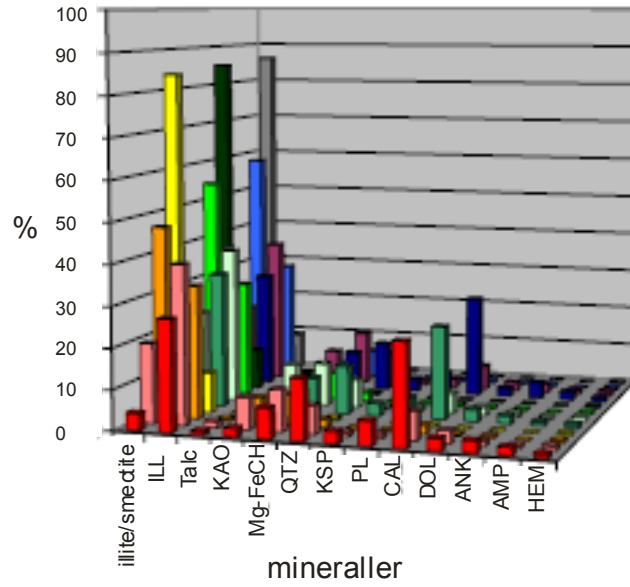
Dane çapı dağılımı her tür zeminin sınıflaşmasında etkin bir faktördür. Bu çalışmada dane dağılımı ölçümleri TS 1900-1/2006' ya göre yapılmıştır. Deneylerde kullanılan farklı kil içerikli 8 numunenin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.3.' de verilmiştir.

3.6.2. Dane özgül ağırlığı

Deneylerde kullanılan numunelerin dane özgül ağırlığı TS 1900-1/2006' ya göre ölçülmüş olup sonuçlar Tablo 3.2.' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri

karışım	w_L	w_p	I_p	GS	%KİL	%SİLT	%KUM
1	27	0	0	2,73	4	50	46
2	28	0	0	2,72	6	45	49
3	31	0	0	2,69	9	62	29
4	30	0	0	2,70	10	57	33
5	32	0	0	2,69	12	61	27
6	29	0	0	2,70	13	50	37
7	29	19	9	2,71	15	60	25
8	30	21	10	2,69	18	60	22

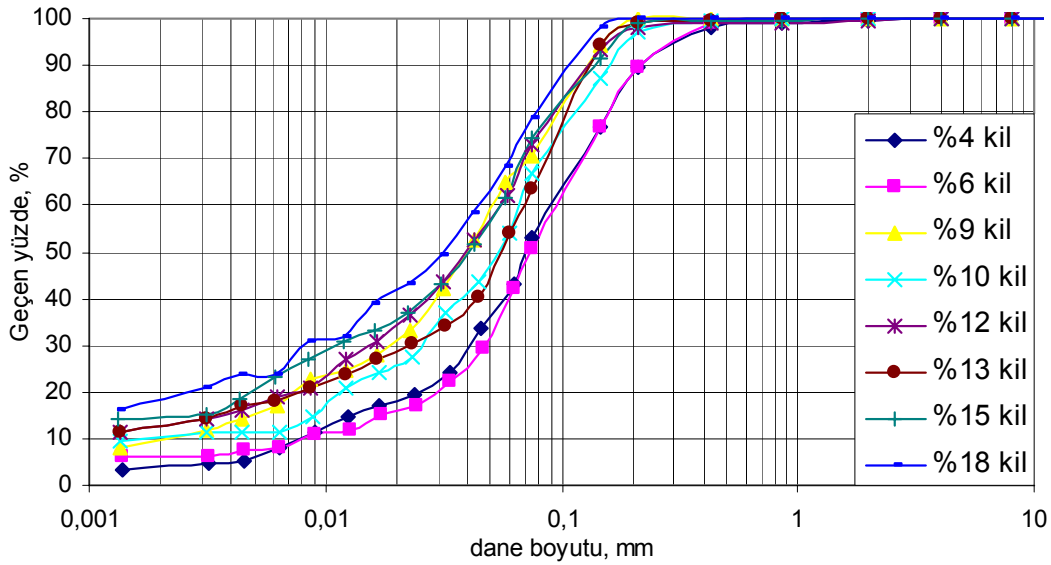


QTZ: kuvars, ILL:illit, KAO: kaolinit, Mg-FeCH: Mg zengini klorit, KSP: K-feldispat,CAL:kalsit
DOL: dolomit,PL:plajiyoklaz, AMP:Amfibol ANK:Ankerit,HEM:hematit

Şekil 3.1. Adapazarı fluviyal kilinin bileşimi (Bray, 2005)



Şekil 3.2. Adapazarı fluviyal kilinin tarama elektron mikroskobu fotoğrafı (Bray, 2005)

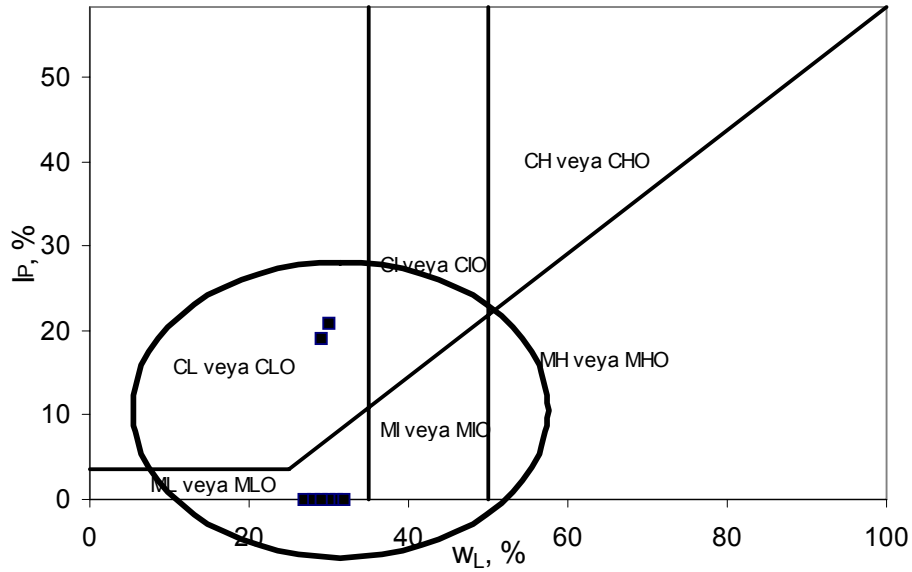


Şekil 3.3. Deney programında kullanılan zeminlerin dane dağılım eğrileri

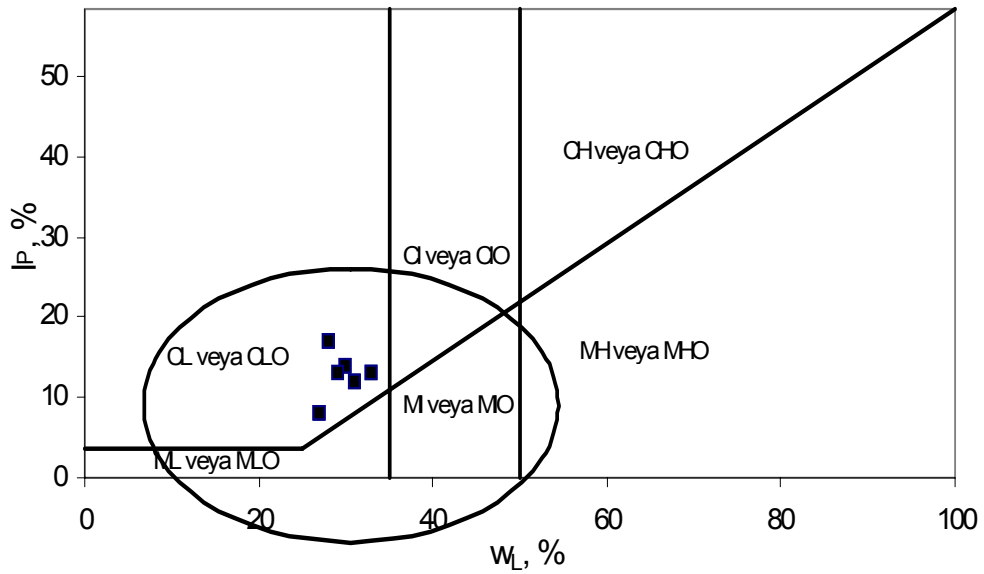
3.6.3. Kıvam limitleri

Bu çalışmada kıvam limitleri TS 1900-1/2006' ya göre ölçülmüştür. Ancak, kil yüzdesi %13' den küçük olan zeminlerin likit limit değerleri Casagrande cihazı ile belirlenemediğinden tüm numunelerin likit limit ölçümü düşen koni yöntemi ile yapılmıştır. Bu deney programında kullanılan zemin numunelerinin kıvam limitleri Tablo 3.2.' de verilmiştir. Şekil 3.4.' de ise kullanılan zeminlerin TS1500/2000 plastisite kartındaki yerleri gösterilmektedir.

Şekil 3.5.' de görüldüğü gibi kil içeriği %4-13 arası olan karışımlar plastik özellik göstermemekte, bundan yüksek olan yüzdelerde ise sınıflama ML' den CL' ye dönüşmektedir. Kıvam limitleri Casagrande cihazı ile değil de Çin' de yapıldığı gibi düşen koni yöntemiyle ölçülürse bu çalışmada kullanılan zemin karışımlarının sınıfı ML iken CL sınıfına girmektedir. Bundan dolayı, düşük plastisiteli siltlerde plastik limitin klasik yöntemle ölçümünün tartışmalı olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan numunelerin TS1500 plastisite kartındaki yeri



Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan karışımların TS1500 plastisite kartındaki yeri (plastik limit düşen koni ile yapılmıştır)

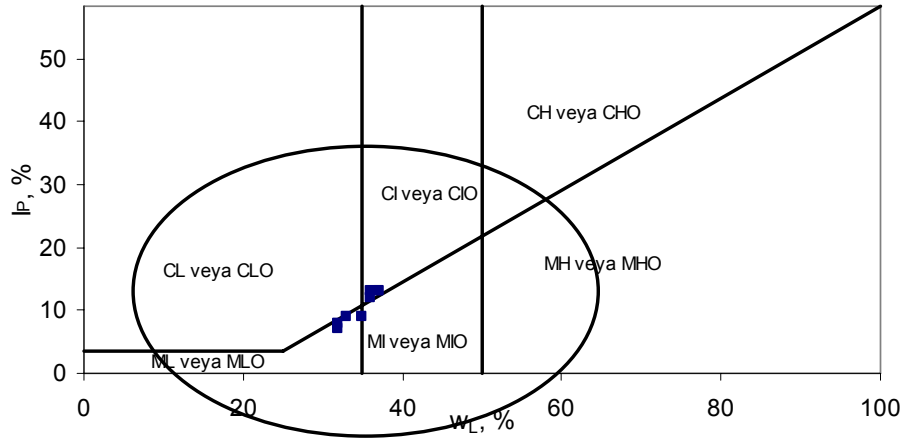
Gündüz (2000), çalışmasında kıvam limitlerinin ince daneli zemin grubunda yer alan kil ve siltlere ait bir özellik olduğunu ancak kıvam limitlerinin ölçümünde 40 nolu elek altı zeminin kullanılarak zemin içindeki kumun kıvam limitleri değerlerini

etkilediğini söylemiştir. Buna bağlı olarak Serdivan orijinli yüksek plastisiteli kil zemine ince kum ilave edilerek kıvam limitlerindeki değişiklikleri gözlemiştir. İnce kum ilavesi sonucu, yüksek plastisiteli kil zeminin düşük plastisiteli zemin sınıfına girdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın devamında Soysal (2003), yüksek plastisiteli zemine ince kum ilave etmesiyle yüksek plastisiteli zeminin orta veya düşük plastisiteli kil, orta plastisiteli kilin düşük plastisiteli kil sınıfına girdiğini söylemiştir.

Bu çalışmada, kullanılan 8 farklı zeminin kıvam limitlerinin 200 nolu elek altında yapılması sonucunda, düşük plastisiteli siltin %4 ve %10 kil yüzdesine sahip zemin numunelerinde yine düşük plastisiteli silt, %6, %9 ve %12 kil yüzdesine sahip zemin numunelerinde orta plastisiteli silt ve %13 kil yüzdesine sahip zemin numunelerinde düşük plastisiteli kil olduğunu, %15 ve %18 kil yüzdesine sahip düşük plastisiteli kil numunelerin ise orta plastisiteli kil zemin olduğu gözlemlenmiştir. 200 nolu elek altındaki yapılan likit limit ve plastik limit deney sonuçları Tablo 3.3’de verilmiştir. Şekil 3.6.’ da 200 nolu elek altı zemin numunelerinin plastisite kartındaki yerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.3 Kullanılan zeminlerin 200 nolu elekten geçtikten sonraki kıvam limitleri

karişım	w _L	w _p	I _p	GS	TS 1500/2000
1	32	25	7	2,73	ML
2	32	24	8	2,72	ML
3	35	26	9	2,69	MI
4	33	24	9	2,70	ML
5	36	24	12	2,69	CI
6	36	23	13	2,70	CI
7	37	24	13	2,71	CI
8	37	24	13	2,69	CI



Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan zeminlerin TS1500 plastisite kartındaki yeri (Likit limit deneylerinde 200 nolu elek altından geçen zemin kullanılmıştır)

BÖLÜM 4. DENEY NUMUNESİNİN HAZIRLANMASI

4.1. Numune Hazırlama Teknikleri

Doğadaki zemin yapısını en iyi temsil eden numune hazırlama yönteminin belirlenmesi, yapılacak deneylerin güvenilirliği açısından önemlidir. Kohezyonsuz numunelerin, araziden laboratuvara özellikleri değişmeden taşınması zor ve pahalı olduğundan, bunların laboratuvarında üretimi genellikle tercih edilir. Hazırlanan bu tür numunelerde, arazide ölçülen doğal birim hacim ağırlık ve bağıl birim hacim ağırlık (rölatif sıklık) D_r esas alınmaktadır. Ancak Ladd (1977), Mullilis ve diğ. (1977), Tatsuoka ve diğerleri (1984) ve Ishihara (1993) yaptıkları çalışmalarda, laboratuvarında hazırlanan kum numunelerinin hazırlanma yöntemlerine göre, aynı rölatif sıklığa ve de birim hacim ağırlığına sahip olmalarına karşın, arazide yüzde yüzü geçen bir farkla değişik sıvılaşma potansiyeline sahip olduklarını belirlemişlerdir. Farklı sıvılaşma potansiyelinin danelerin diziliminden kaynaklanan anizotropiden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Araştırmacıların farklı zemin türlerini incelemeleri nedeniyle laboratuvarında farklı numune hazırlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar;

1. Kuru yağmurlama,
2. Islak tokmaktama,
3. Suda çöktürme,
4. Bulamaç çökeli ile hazırlama,
5. Brandon (1991) (Slurry in batch consolidometer), olarak özetlenebilir.

4.1.1. Kuru yağmurlama

Kuru yağmurlama, kumların doğal oluşum sürecine benzerlik göstermesinden dolayı çokça kullanılan bir yöntemdir. Kuru numune, farklı çaplarda olabilen bir huni

vasıtasıyla kalıbın içine yağmurlama şeklinde dökülür. Numunenin birim hacim ağırlığının ayarlanması için zeminin düşü yüksekliği kontrol edilmelidir. Kuru yağmurlamada, danelerin ayrılması (particle segregation) sorunu ortaya çıkmaktadır. İnce içeriği çok olan numunelerde hacimsel şişme görülmekte, dolayısıyla hazırlanan numune gerçek çökelmeyi yansıtamamaktadır. Kuerbis ve Vaid (1988), çalışmalarında dane ayrımının genellikle düzgün dane dağılımlı örneklerde dane diziliminden kaynaklandığını söylemektedirler. Bu olay özellikle ince içeriği yüksek olan numunelerde belirlemektedir. %20' den fazla silt içerikli zeminler ise genişlemeye karşı hassas olabilmektedir. Bu numune hazırlama yöntemi siltli kumlarda sık kullanılmaktadır.

4.1.2. Islak tokmaktama

Islak tokmaktama ile kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılması yaygın olarak kullanılan bir numune hazırlama yöntemidir. Bu yöntemde üniform bir yapı sağlamak için ıslak numune, tabakalar halinde kalıba dökülüp her bir tabakanın sıkıştırılmasıyla hazırlanır. Bu yöntemin dezavantajı, numune boyunca birim hacim ağırlıkta üniformluk sağlanamamasıdır. Kuerbis ve Vaid (1988), ince içerikli kumlu zeminlerdeki genişlemenin, doyum aşamasında büyük deformasyonlara yol açtığını bildirmiştir. Ladd (1978), bu tür zeminlerde tokmaktamanın eşit değil, aşağıdan yukarıya artan kalınlıkta tabakalar halinde yapılmasını önermiş, bu yöntem olumlu sonuçlar vermiştir. Koester (1992), Singh (1994) ve Yamamuro ve Covert (2001) siltli zeminlerde gerçekleştirdikleri çalışmalarında genellikle ıslak tokmaktama yöntemi kullanmışlar ancak bu yöntem kullanıldığında ince içeriğinin artmasıyla büyük hacimsel değişimlerin belirmesini yöntemin olumsuz yanı olarak göstermişlerdir.

Chang ve diğ. (1982), Cao ve Law (1991), Law ve Ling (1992) ve Hussein (1995), siltli zeminlerde yaptıkları deneylerde ıslak tokmaktama yöntemini kullanarak numuneleri hazırlamışlardır.

Sandoval (1989), lölşlerde sıvılaşımanın olması ve yapılarda zararlarına yönelik çalışma yapmıştır. Çalışmada siltli zeminlerin sıvılaşıma ve oturması ile ilgili

deneysel yapılmıştır. Deneysel kullanılmak üzere hazırlanan numuneler, ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmıştır. Silt numunesinin içine %8 ve %10 su koyularak karıştırılıp 24 saat bekletilip daha sonra tabakalar halinde ıslak tokmaktama yapılmıştır.

Koester (1992), su muhtevası %5 ve %7.5 olmak üzere 5 tabaka halinde ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırladığı numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deneysel yaparak sıvılaşımda ince dane etkisini araştırmıştır.

Thevanayagam ve diğeri (2002) ve Vaid ve diğeri (1999) ıslak tokmaktama yöntemiyle gevşek ve doymuş hazırlanan ince içerikli kum numunesinin büzülebildiğini belirtmişlerdir.

4.1.3. Suda çöktürme yöntemi

Doğada zemin çökmesi sürecini benzeştiren bir yöntemdir. Agregalı kumu numunelerini suda çöktürme yöntemi Rathje (2005) tarafından önerilmiştir. 101.6 mm çaplı telle donatılmış kılıfın çevresine bir kalıp yerleştirilmekte ve yarıya kadar damıtık suyla doldurulmaktadır. Kuru numune yağmurlama ile istenilen yüksekliğe kadar suya dökülüp daha sonra numune hücreye alınmaktadır.

4.1.4. Bulamaç çökeli yöntemi

Wang (1972), bulamaç çökeli 100 kPa' a konsolide ederek numune hazırlamıştır. Emery (1973), numunelerdeki boşluk suyunu düşük viskoziteli jelatin çözeltisiyle yer değiştirerek deneysel yapmıştır. Bu işlem kumlu numunelerin vakum olmaksızın elle kaldırılabilmesini sağlamıştır. Bu yöntem günümüzdeki çalışmalarda killi kumların homojen olarak hazırlanmasında kullanılmaktadır.

Nacci ve D'andrea (1976), gevşek tabakalı silt numunelerinin özelliklerinin incelenmesinde numuneyi 0.1N NaCl çözeltisiyle hazırlayarak 50 kPa ile konsolide etmiştir. Konsolidasyon aşaması tamamlanıp bulamaç 24 saat derin dondurucuda tutulduktan sonra hücreye yerleştirilmekte, hücre basıncı uygulanmakta ve numune

oda sıcaklığında erimeye bırakılmaktadır. Siltin yok denecek kadar az olması durumunda, donma ve çözünmenin numune dokusunda önemli değişiklik oluşturmayacağı görülmüştür. Bu uygulamada numune eridikten sonra doyunluk korunduğundan geri basınç uygulamasının gerekmediği söylenmektedir.

Kuerbis ve Vaid (1988), iyi derecelenmiş kum ve siltli kumların hazırlanması için bulamaç çamuru olarak isimlendirdikleri yeni bir yöntem tanımlamışlardır. Bulamaç çökeli yöntemi, ince içeriği %20' den fazla olan zemin numuneleri için kullanılır. Bu yöntemde zemin numunesi ve damıtık su belirli oranlarda karıştırılarak plexiglas kalıp içine dökülür. Kalıbın altına ve üstüne poroz taşı koyulması ve üstteki poroz taşın üstüne metal başlık koyularak karışımın bekletilmesiyle devam edilir. Daha sonra, metal başlık kalıbın üstünden alınmakta ve kalıbın içindeki numune deney cihazının hücreesine yerleştirilmektedir. Bulamaç çökeliyle hazırlama yönteminin avantajı, doyunluğun sağlanması, kısa sürede hazırlanması, su miktarına göre dane ayırımının kontrol edilebilmesi, gevşek numuneler hazırlanabilmesi, ince içeriğine ve derecelenmeye bakılmaksızın homojen boşluk oranı sağlanabilmesidir. Bu yöntem flüviyal sistemleri ve hidrolik dolguları modellemede kullanılır. Numunenin öngörölmüş birim hacim ağırlığı tekrarlanabilmektedir.

Wagg (1990), kil-silt karışımının dinamik yükleme sırasındaki davranışını belirlemek için deneylerde kullandığı numuneleri bulamaç çamuru hazırlayarak yapmıştır. Yeteri kadar kil-silt alınıp homojen şekilde karıştırılmıştır. w_L ' in 1.5 katı su koyularak çamur oluşturulmakta ve bir gece bekletilmektedir. Sonra kalıba alınan bulamaç, tekrar karıştırılıp, elle sallanıp havası alınmaktadır. Numune kalıba kaşıkla 3 tabaka halinde koyulup, yüzeyden su çıkana kadar spatülle düzlenlenmekte, hava girişini önlemek için numune ve tepesindeki gözenekli taş 5 mm su altında tutulmaktadır.

Carraro (2004), plastik ve plastik olmayan inceleri farklı yüzdelerde kuma ilave edilerek laboratuvarında statik ve dinamik davranışları incelemiştir. Numuneler ince içerikli kumun homojen bir numune olması için bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin homojen olması, başlangıç doyunluk derecesinin yüksek olması, doğal zeminlere benzerlik nedeniyle tercih edilmiştir.

Ishihara' nın konsolidasyon çamuru (Ishihara' s consolidation of slurry), Ishihara ve diğ. (1980)' de maden atık malzemelerinin dinamik direncinin hesaplaması için geliştirdiği bir yöntemdir. Orta sıklıkta bir numune için $D_r = \%60-70$ olacak şekilde kuru yağmurlama ve daha sıkı bir numune için çamur konsolidasyonu kullanılmıştır. Numune, likit limite yakın bir su muhtevasında su ile karıştırılır. Altına ve üstüne poroz taş koyularak, çamur karışımı kaşık yardımıyla kalıba koyulur. Karışım 5 dk vibratörle titretilir ve 50 veya 100 kPa eşdeğer yük koyularak yaklaşık 2-3 gün konsolide edilir. Konsolidasyon aşamasından sonra numune kalıpla birlikte dondurulur. Daha sonra donan numune çıkarılır ve hücreye koyulur. Eriyen numuneye 20 kPa vakum uygulanarak, CO₂ geçirilir, ardından damıtık su geçirilip deneye başlanır.

4.1.5. Brandon (1991) (Slurry in batch consolidometer)

Brandon (1991) (Slurry in batch consolidometer), laboratuvarında üniform siltli kumun hazırlanması için farklı bir prosedür geliştirmiştir. Siltli kum çamuru kuru numuneyle suyun karıştırılmasıyla hazırlanır. Çamur K_0 şartlarında konsolide edilir. Daha sonra numune üç eksenli numunesi olacak şekilde traşlanır. Bu metod yoğun bir yapı oluşturduğundan gevşek zeminler için uygun değildir.

Romero (1998), silt numunelerinin hazırlanması için benzer bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem Brandon' unki benzemekle birlikte numune 3 parçalı kalıpta konsolide edildiğinden traşlama gerekmemektedir.

4.2. Farklı Numune Hazırlama Yöntemlerinin Karşılaştırması

Ladd (1977) çalışmasında, kumların dinamik stabilitesini araştırmak için. kuru titreştirme, ıslak titreştirme, kuru tokmaktama ve ıslak tokmaktama olmak üzere dört farklı yöntemle numune hazırlamıştır. Hazırlanan numunelerde dinamik üç eksenli deney yapılmıştır. Deney sonuçlarından kullanılan numune hazırlama yönteminin kumların dinamik kayma direncini Tablo 4.1.' de görüldüğü gibi çok etkilediği görülmektedir.

Tablo 4.1. Numune hazırlama yönteminin kumların dinamik direncine etkisi (Ladd, 1977)

Numune hazırlama yöntemi	Dinamik gerilme oranı (DGO)	Yenilme kriterine ulaşılan çevrim sayısı, N				
		Başlangıç sınılaşması	Doruktan doruğa birim deformasyon			
			2.5	5	10	20
kuru vibratör	0.12	53	54	57	58	61
kuru vibratör	0.15	14	15	16	17	24
Islak vibratör	0.21	61	56	59	61	64
Islak vibratör	0.26	13	9	11	12	15
Kuru tokmaktama	0.14	21	18	21	30	-
Kuru tokmaktama	0.21	6	4-1/2	5-1/2	7-1/2	39
Islak tokmaktama	0.21	42	41	42	43	46
Islak tokmaktama	0.26	11	9-1/2	12	13	17

Mulilis ve diğerleri (1977), 11 farklı yöntemle hazırlanmış Monterey kumu numuneleri üzerinde yaptıkları deneylerde, kuru yağmurlama, suda yağmurlama, yüksek frekanslı titreştirme, düşük frekanslı titreştirme, ıslak tokmaktama, kuru ve ıslak şişleme yöntemlerini kullanmıştır. Deney sonuçlarından, aynı yoğunlukta numuneler hazırlanmasına rağmen kum numunelerinin sınılaşma potansiyeli bakımından büyük farklılıklar gösterdiği bulunmuştur.

Kuerbis ve Vaid (1988), kumlarda ve siltli kumlarda iyi derecelenmiş homojen numunelerin hazırlanabildiği bulamaç çamuru yöntemini geliştirmiştir. Bu tekniğin bir sunumunu da Salgado 2000' de, %20 plastik olmayan siltin kuma karıştırılmış halinde vermiştir. Lade ve Yamamuro (1997), Yamamuro ve Covert (2001), Zlatovic ve Ishihara (1997) siltli kumların, havada yağmurlama ile elde edilen gevşek numune yapısının yüksek hacimsel azalma gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Luh (1980) kil numuneleri, Krizek ve diğerleri (1975)' de tanımladığı gibi farklı konsolidasyon basınçlarında kaolin kilinden oluşturulan kil bulamaçlarını konsolide ederek hazırlamıştır. Sonuçlar, dane dizilimini etkileyen, su rejimi, boşluk oranı, gerilme geçmişi, gerilme izi gibi etkilerin dinamik özellikleri etkilediğini göstermiştir.

Üniform kumun homejen numunesi hava veya suda yağmurlamayla hazırlanabilir. Vaid ve Negusse (1988), çalışmasında suda yağmurlama yöntemiyle doymun numunelerin kolaylıkla hazırlandığını göstermişlerdir. Oda (1978) çalışmasında suda yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin yapı ve davranışının doğal alüviyal zeminlere benzediğini söylemiştir.

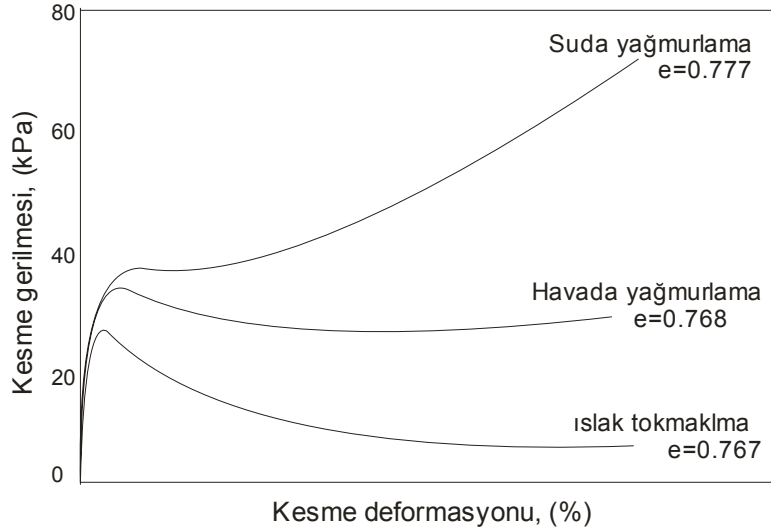
Vaid (1994), plastik olmayan silt oranının artmasıyla kumun sıvılaşma hassasiyetinin değişimini gözlemlemiştir. Çalışmasında ıslak tokmaktama tekniğinin alüviyal zeminlerin yapısını ve uniformluğunu sağlamadığını iddia etmektedir. Islak tokmaktama ile hazırlanan numunenin homejenliği açıkça görülememekte ama varsayım dayalı sınır şartları sağlanmaktadır (Castro, 1969; Vaid ve diğerleri, 1999). Çalışmada ıslak tokmaktama yönteminin yüksek boşluk oranında numune sağladığı gözlemlenmiştir. Siltler için arazideki durumuna benzediğine inanıldığından, daha homojen ve boşluk oranı gerçek değerinde numuneler bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlanmıştır.

Gookin (1998), çalışmasında kullanılan numuneler, çamur halinde kalıba koyulmakta ve 22 psi' lik hava basıncı verilerek numunenin konsolide olması sağlanmaktadır. Konsolide olan çamurdan, arazide Shelby tüpüne numune alır gibi tüpe numune alınmaktadır.

Polito (1999), silt ve kilin kumun dinamik yük altındaki davranışını etkilediğini düşündüğünden, kumlu zeminlerin sıvılaşma direncinde ince oranının ve plastikliğin etkisini incelemiştir. Çeşitli kil oranlarında, ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Islak tokmaktama doğal birikme koşulunu sağlamazken, yağmurlama veya titreştirme yöntemleri numune yoğunluğunun kontrol edilebilmesini sağladığından dolayı seçilmiştir.

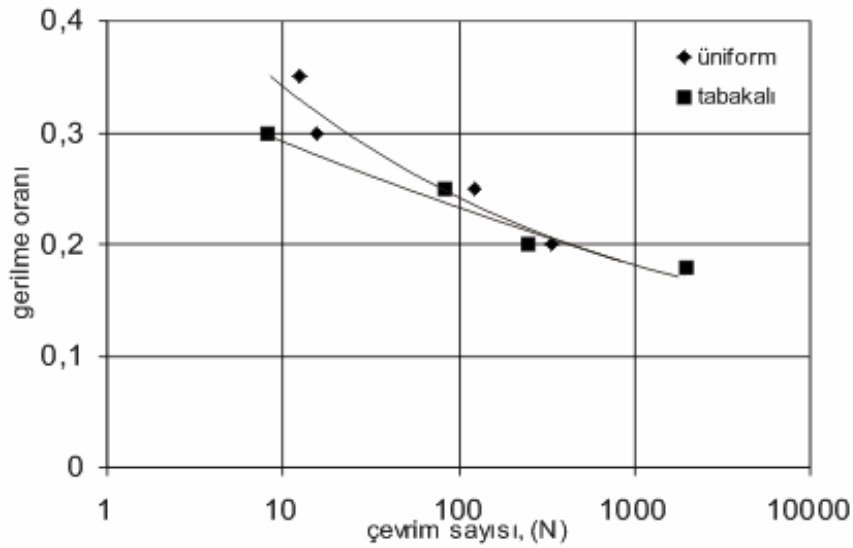
Vaid ve diğerleri (1999), farklı numune hazırlama yöntemlerini kullanarak kumların drenajsız davranışını incelemiştir. Deneylerin sonucunda aynı boşluk oranında ve aynı çevre basıncında, ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan kum sıvılaşabilirken suda biriktirme yöntemiyle hazırlanan kum genişleyebilmektedir. Aynı zamanda, suda biriktirme yöntemiyle hazırlanan numuneler, ıslak numunedeki üniformluğun

aksine üniform olmayan şekilde birikmektedirler. Farklı yöntemlerle hazırlanan numuneler üzerinde yapılan basit kesme deney (DSS) sonuçları Şekil 4.1.' de gösterildiği gibi farklıdır.



Şekil 4.1. Farklı yöntemlerle hazırlanan numunelerin basit kesme deneyi sonuçları

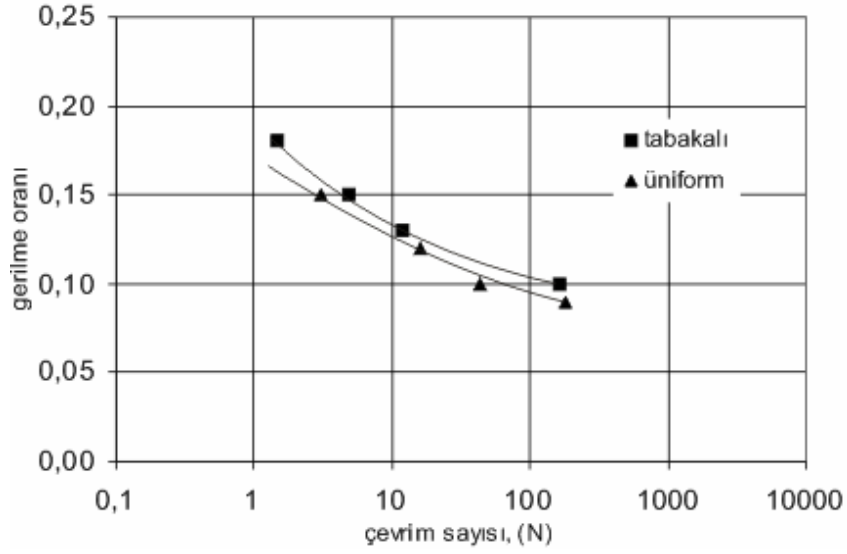
Amini ve Sama (1999), homojen ve tabakalı kum-silt-çakıl karışımının sıvılaşma sırasındaki davranışını karşılaştırmak amacıyla gerilme kontrollü drenajsız dinamik üç eksenli deneyleri yapmışlardır. Homojen bir zemin numunesi elde etmek için ıslak tokmaktama yöntemleri kullanılmış ve numune 7 tabaka halinde tokmaktalanmıştır. Tabakalı zemin numunesini elde etmek için ise ıslak yağmurlama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, kılıfın gerdirilmiş olduğu kalıba damıtık suyun koyulmasıyla başlanır. Daha sonra zemin yağmurlama şeklinde yapılandırılır ve çökmesi için 1 saat beklenir. İri ve ince daneler farklı zamanda çökelediğinden, iri daneler daha çok dipte toplanırken ince zemin üstte birikir. Bu da farklı boşluk oranları oluşturur. Çalışma sonunda, Şekil 4.2.' de görüldüğü gibi iki yöntemle hazırlanan numunelerin yapılarının tamamen farklı olması nedeniyle sıvılaşma dirençleri arasında önemli fark görülmüştür.



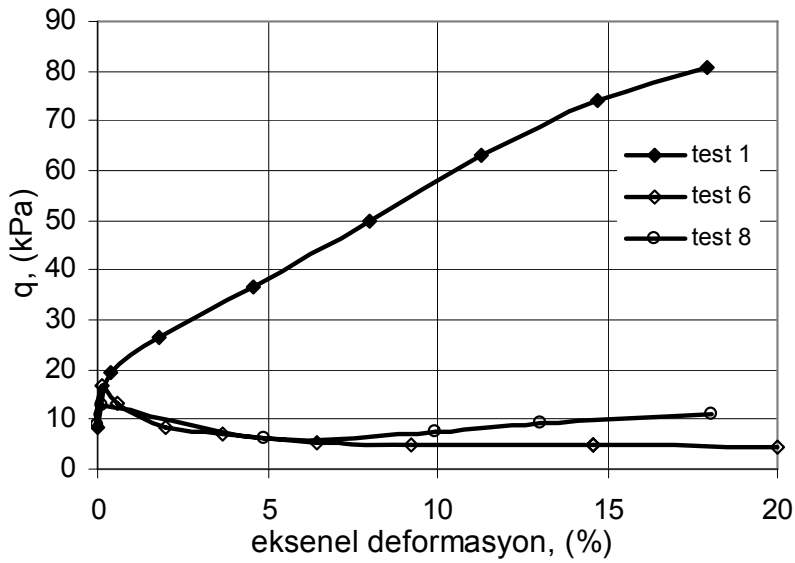
Şekil 4.2. İslak tokmaktama (üniform) ve ıslak yağmurlama (tabakalı) yöntemleri arasındaki farkın dinamik gerilme oranı ile ilişkisi (Amini ve Sama, 1999)

Önceki çalışmalarda numuneler ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırlanırken son yıllarda ıslak tokmaktama ile hazırlanan numunelerin sıvılaşmaya daha hassas olmasından dolayı tercih edilmediği görülmektedir. Oysa Amini ve Qi (2000), tabakalı siltli kumlarda sıvılaşma yeteneğinde, yağmurlama yöntemi ve ıslak tokmaktama arasında fark olmadığını göstermiştir. Bu çalışmada, homojen ve tabakalı siltli kum zeminin sıvılaşma sırasındaki davranışını karşılaştırmak amacıyla farklı silt oranlarında ve çevre basıncında dinamik üç eksenli deneyi yapmışlardır. Şekil 4.3.' de görüldüğü gibi üniform ve tabakalı hazırlanan numunelerin deney sonuçları karşılaştırıldığında önemli fark olmadığı görülmektedir.

Hoeg ve diğerleri (2000), silt ve siltli kumun örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanmış numuneleri arasındaki drenajsız gerilme-deformasyon-direnç davranış farklılıkları incelemiştir. Bütün örselenmemiş numunelerde yumuşama (ductile) ve genişleme (dilative) görülürken, bu davranışlar hazırlanan numunelerin sadece birkaç tanesinde görülmüştür. Laboratuvarında numuneler ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmıştır. Şekil 4.4.' de görüldüğü gibi örselenmemiş numunelerde genişleme görülürken, hazırlanmış numunelerde büzülme ve gevrek davranış belirmiştir.

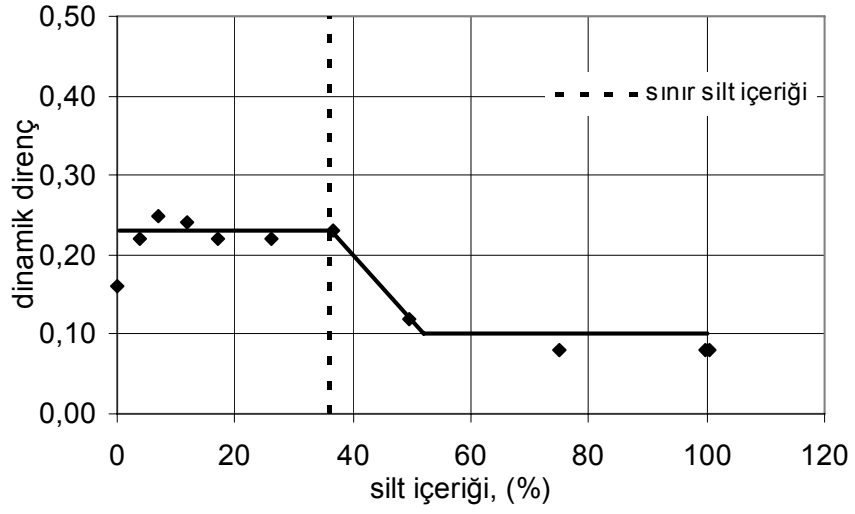


Şekil 4.3. Üniform ve tabakalı hazırlanmış siltli kumların sıvılaşma davranışı (Amini ve Qi, 2000)

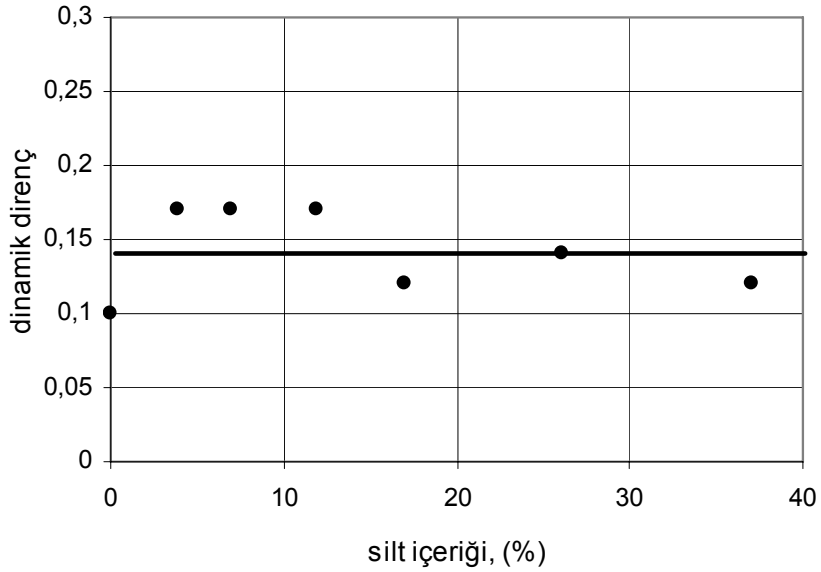


Şekil 4.4. Örselenmemiş (test 1), ıslak tokmaklama (test 6), bulamaç çamuru (test 8) numunelerinin gerilme-deformasyon karşılaştırması (Hoeg ve diğ., 2000)

Polito ve Martin (2001), sıvılaşma direncinde plastik olmayan incelerin etkisini incelerken ıslak tokmaklama yöntemini kullanmıştır. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'nın karşılaştırılması yapıldığında, D_r ' si daha yüksek olan bulamaç çökeli numunesinin daha düşük dinamik direnç verdiği görülmektedir.



Şekil 4.5. Islak tokmaklama yöntemiyle $D_f=30$ olan Yatesville kumunun dinamik direnci (Polito ve Martin, 2001)

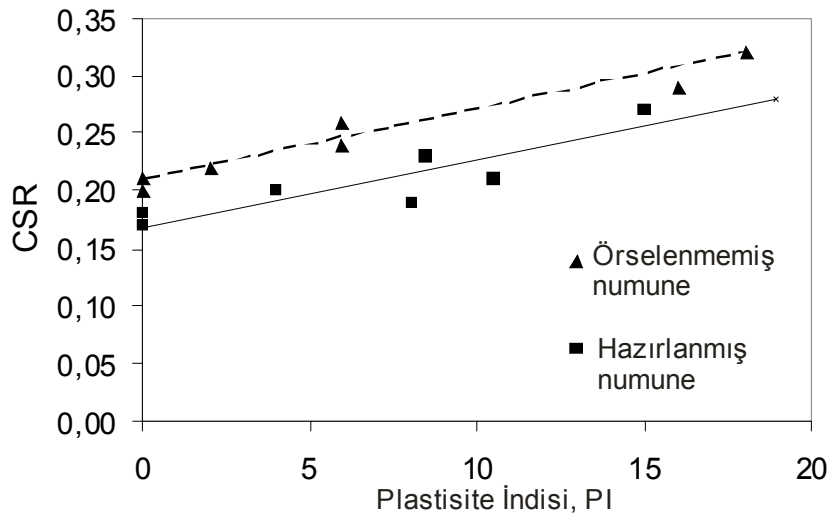


Şekil 4.6. Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan Yatesville kumunun dinamik direnci (Polito ve Martin, 2001)

Sunitsakul (2004), özellikle siltli zeminlerde dinamik yükleme sırasında oluşan fazla boşluk suyu basıncı gelişmesini, olası büyük deformasyonları ve kumlu zeminlerin sıvılaşma hassasiyetinde silt içeriğinin etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, hem UD tüpüyle elde edilen örselenmemiş numuneler hem de aynı numunelerin laboratuvarında

bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Şekil 4.7.' de bu örselenmemiş ve hazırlanmış numunelerle yapılmış deneylerin I_p ile dinamik dirençleri arasındaki ilişki verilmiştir. Örselenmemiş numunelerin hazırlanmış numunelerden daha fazla direnç gösterdiği görülmektedir.

Huang ve diğerleri (2004), Batı Taiwan siltli kumunda sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. Bu amaçla, laboratuvarında hazırlanan numuneler üzerinde izotrop konsolidasyonlu, drenajsız monotonik ve dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Numuneler ıslak tokmaktama ve kuru yağmurlama yöntemleriyle hazırlanmıştır. İnce yüzdesi ve su muhtevalarının dağılımından numune hazırlama yönteminin sonuçları etkilemediği görüşü belirmiştir.

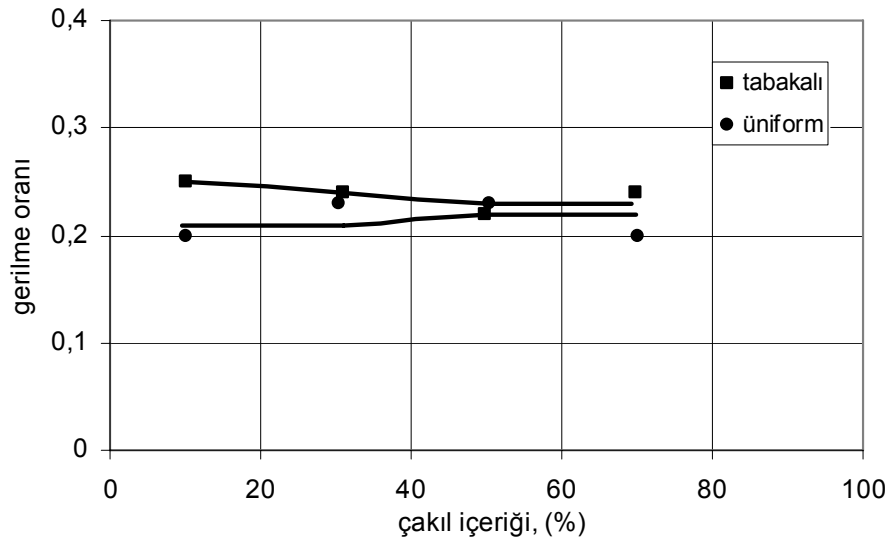


Şekil 4.7. Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan Yatesville kumunda plastisite indisinin dinamik dirence etkisi (Sunitsakul, 2004)

Yamamuro ve Wood (2004) kum ve siltlerin drenajsız davranışında ve mikro yapısında biriktirme yöntemlerinin etkisini incelemişler, bu amaçla huniden kuru yağmurlama, suda biriktirme, bulamaç çamuru, kuru karışımı biriktirme (mixed dry deposition) ve havada yağmurlama yöntemlerini kullanmışlardır. Yapılan drenajsız üç eksenli deney sonuçlarından, hazırlama yöntemlerinin deney sonuçlarını çok etkilediği görülmüştür. Islak biriktirme yöntemleri daha çok hacimsel genleşme veya

dengeli davranış gösterirken, kuru yöntemler daha çok büzülme/daralma veya dengesiz davranış sergilemişlerdir.

Amini ve Chakravarty (2004), daha çok alüvyon ve hidrolik dolgularda karşılaşılan kum-çakıl tabakalarının sıvılaşmaya etkisini incelemiştir. Homojen zemin durumunu temsil etmek için havada yağmurlama yöntemi, tabakalı zemin durumunu temsil etmek için de ıslak yağmurlama yöntemi kullanılmıştır. Yapılan drenajsız dinamik üç eksenli deneyleri sonucunda numune hazırlama yönteminin ve zemin yapısının farklılığının kum-çakıl karışımlarda sıvılaşma direncini Şekil 4.8.' de görüldüğü gibi fazla etkilemediği görülmektedir.



Şekil 4.8. Ünlform ve tabakalı hazırlanmış numunelerde sıvılaşmanın oluştuğu çevrim sayısındaki gerilme oranlarının karşılaştırması (Amini ve Chakravarty, 2004)

Hazırba (2005), sıvılaşma olayında boşluk suyu basıncının gelişmesinde ince içeriği etkisini Monterey #0/30 temiz kum numunesini ve siltli kum numunesini ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlayarak incelemiştir. Islak tokmaktama, kuru yağmurlama ve suda çöktürmede beliren dane ayrışmasını ortadan kaldırmaktadır. Çalışma sonucu, ıslak tokmaktama yönteminin %20 ince içerikli numunelerin hazırlanmasında iyi sonuç verdiği görülürken, %20' den daha fazla ince içeriği olan

zeminlerde doymur ve konsolidasyon sırasında hacim değişiminin çok etkili olduğu göze çarpmaktadır.

4.3. Adapazarı Siltinin Deneye Hazırlanması

Literatür araştırması suda yağmurlama ve bulamaç çökeli yöntemlerinin siltli kum, alüvyon, hidrolik dolgu, maden atığı gibi numunelerin sıvılaşıma incelemesi için sıklıkla kullanılan yöntemler olduğunu göstermiştir. Tüm sonuç ve etkenler değerlendirildiğinde bu araştırmada da bulamaç çökeli yöntemi tercih edilmiştir.

Zemin numunesi Adapazarı kenti Serdivan bölgesinde 3-4 m derinlikten alınmış %10 kil içerikli silttir. Araziden yeterli hacimde kazılarak alınan zemin laboratuvarında havada kurutularak depolanmıştır. Deney yapılacağı zaman ağırlığının 10 katı kadar suyla karıştırılarak sıvı haline getirilmiştir. Farklı kil içerikli zemin numunelerini elde etmek için süspansiyonun ince bölümü farklı zamanlarla vakumlanarak alınmıştır. Böylelikle aynı zeminin %4, 6 ve 9 kil içeriğine sahip zemin numuneleri elde edilmiştir. Buradan elde edilen kil %10 kil yüzdesine sahip zemin numunesine ilave edilerek %12, %13, %15 ve %18 kil yüzdelerinde numuneler elde edilmiştir. Böylelikle zeminin mineralojik yapısı değişmeden farklı silt ve kil yüzdelerine sahip 8 farklı zemin numunesi hazırlanmıştır.

Günümüzde bulamaç çökeli yöntemi ile numune hazırlama için bir standart yoktur. Bu çalışmada uygulanan bulamaç çamuru hazırlama yöntemi önceden belirlenen boşluk oranına göre düzenlenmiştir. Buna göre, kuru numuneye su muhtevasını likit limitinin 1.5 katına çıkartacak kadar damıtık su eklenip karıştırılır. Numune, suyu tamamen alıp dengeye gelmesi için en az 24 saat bekletilmektedir.

Karışım saydam plastikten yapılmış 10 cm iç çaplı, 22 cm yükseklikte bir hücreye yerleştirilir. Bu aşamada çok yumuşak olduğundan yükleme yapılmadan kendi ağırlığı altında 24 saat bekletilir. Ertesi günden başlayarak öngörülen konsolidasyon basıncına en az 10 adımda erişmek üzere kademeli yükleme başlatılır (Foto 4.1.). Çift yönlü ve radyal drenajlı konsolidasyon işlemi yaklaşık bir hafta içinde tamamlandıktan sonra numune dondurucuya konur. 24 saat dondurucuda bekleyen

numune hücreden çıkartılarak deney hücresine yerleştirilir. Dondurma işlemi hızlı yapıldığından siltli numunede buz mercikleri oluşmamaktadır. Bu çalışmada, numunelerin boşluk oranı 0.75 ile 0.80 arasında tutularak boşluk oranından dolayı sıvılaşma direncinde görülen farklılığın ortadan kaldırılması gözletilmiştir.



Foto 4.1. Konsolidasyon hücresinin yükleme sırasında görüntümü

BÖLÜM 5. DENEY SİSTEMİ VE DENEY YÖNTEMİ

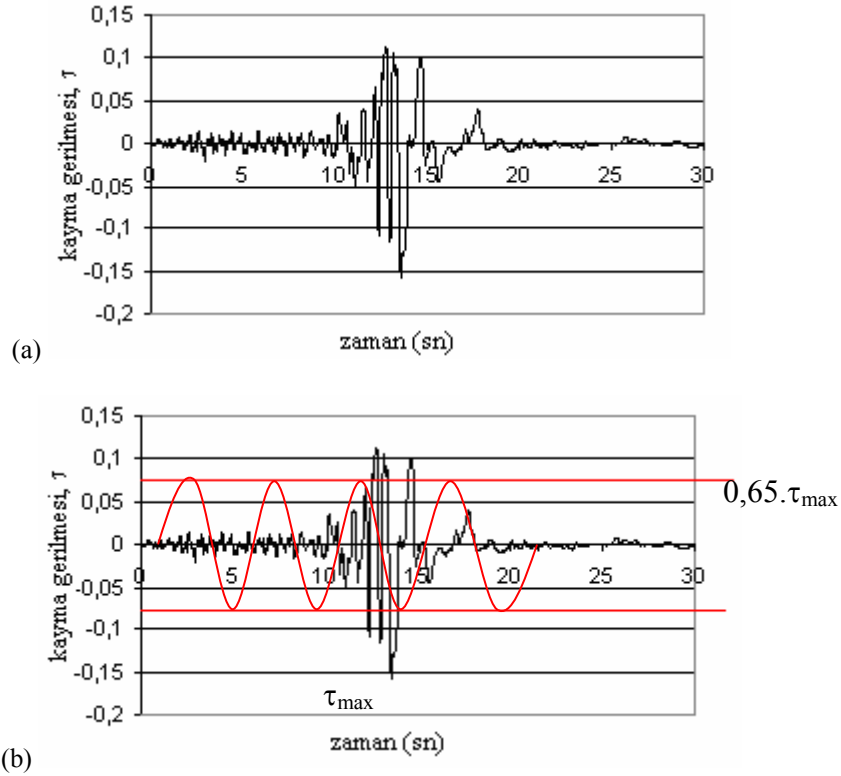
Dinamik üç eksenli deney sistemi, deprem etkisi ile zemine gelen yüklerin modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bölümde dinamik üç eksenli deneyi teorisi ve arazi uyumu ile ilgili bilgiler verilmektedir.

5.1. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi ile Arazi Uyumu

Zeminlerin dinamik davranışı arazi ve laboratuvarında incelenebilir. Laboratuvarında yapılacak deneyler için numunelerin arazi şartlarına benzer olarak hazırlanması, böylelikle elde edilen sonuçların gerçeğe yakın olması hedeflenir. Laboratuvar deneylerine başlamadan öncelikle incelemenin yapıldığı bölgenin seçilmiş bir deprem kaydından düzensiz kayma gerilmeleri Şekil 5.1(a)' da görüldüğü gibi elde edilmektedir. Düzensiz kayma gerilmeleri Şekil 5.1(b)' de olduğu gibi kayma gerilmesinin %65' i alınarak sabit genlikli üniform eşdeğer kayma gerilmesine dönüştürülerek zemin numunesine uygulanmaktadır.

Dinamik yükleme altında zemin tabakalarının davranışını incelemek için birçok deney sistemi geliştirilmiştir. Arazideki gerilme-deformasyon ilişkisini yaklaşık olarak modelleyen deney sistemleri; dinamik üç eksenli deneyi (CTX), dinamik basit kesme deneyi (DSS), dinamik burulmalı deney (TS), rezonant kolon deneyi (RC) ve sarsma tablası (ST) olarak özetlenebilir. Dinamik üç eksenli deneyin standardı ASTM 5311-92, DSS' nin standardı ASTM D6528-00, TS' nin standardı Türkiye' de genellikle JGS 0543-2000, RC deneyinin standardı ise ASTM D4015 olarak uygulanmaktadır. Sıvılaşma çalışmalarında genellikle dinamik üç eksenli deneyi ve dinamik basit kesme (DSS) deneyleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, dinamik yükleme altındaki zemin davranışının ölçümünde yaygın olarak kullanılan dinamik üç eksenli deney kullanılmıştır. Böylelikle, yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları önceki çalışmalarla karşılaştırılabilecektir. Dinamik üç eksenli deneyi

gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki şekilde uygulanır. Bu çalışmada gerilme kontrollü deney kullanılmıştır. Üç eksenli hücre kesme deneyi zeminin statik şartlar altındaki özelliklerini belirlemede ne denli yaygınsa dinamik üç eksenli deney de zeminin dinamik özelliklerini belirlemede o denli yaygın olarak kullanılmaktadır.



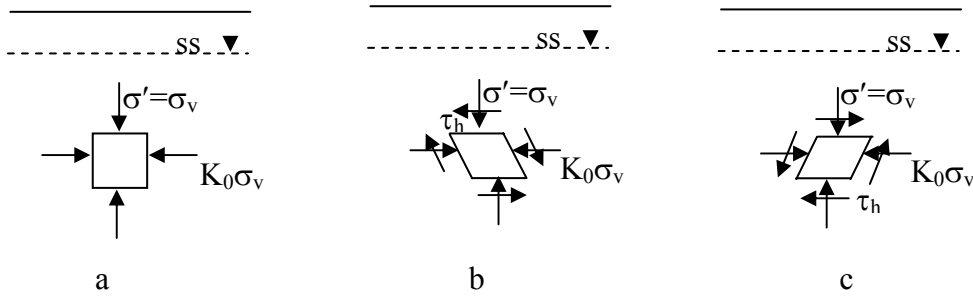
Şekil 5.1. (a) Depremde zeminde oluşan kayma gerilmesi (b) laboratuvarında uygulanan eşdeğer kayma gerilmesi

5.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Mekanîği

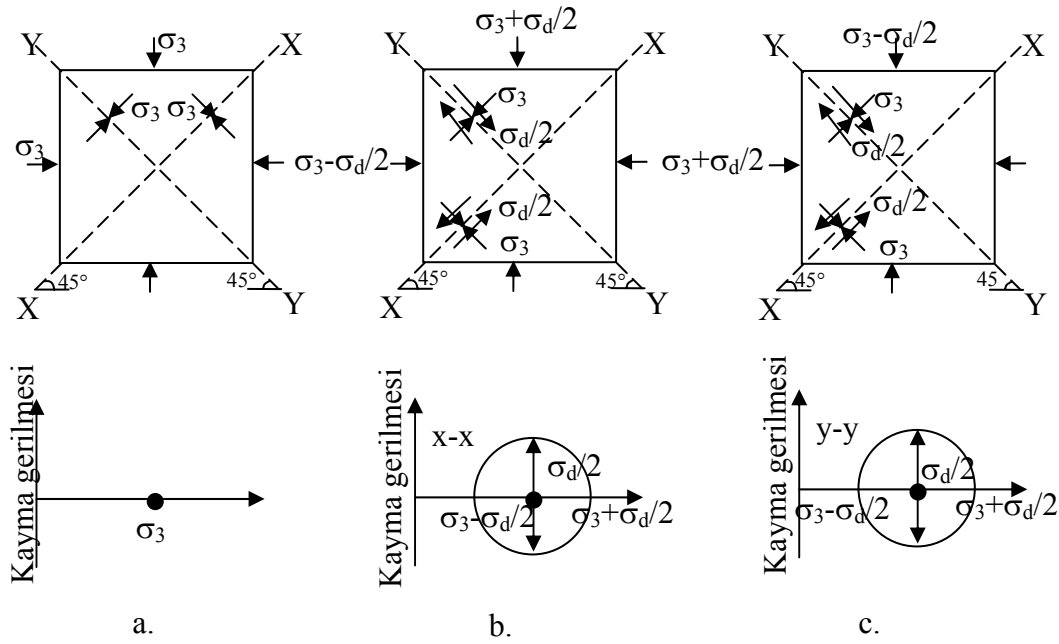
Dinamik üç eksenli deney, Bölüm 2.2.1' de bahsedildiği gibi zeminlerin dinamik özelliklerinin incelenmesinde 1960' lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Deneyin uygulanmasının basitliği yaygınlaşmasını sağlamıştır. Dinamik üç eksenli deneyi ile ilgili genel teorik bilgiyi Das (1983) vermiştir. İzotrop konsolide edilen numunelerde her yükleme çevriminde büyük asal gerilmenin yönü 90° değişmektedir. Numuneye uygulanan maksimum dinamik kayma gerilmesi, konsolidasyonun sonunda ve deney sırasında boşluk suyu basıncının gelişmesinde gerilme durumuyla kontrol

edilebilmektedir. İzotrop koşulda konsolide edilen numunede deney sırasında boşluk suyu basıncının artması efektif gerilmeyi düşürmektedir.

Şekil 5.2.a.' da görüldüğü zemin elemanının aldığı düşey efektif gerilme (σ_v) ve yatay efektif gerilme ($K_0\sigma_v$)' dir. Deprem sırasında Şekil 5.2.b. ve c.' de görüldüğü gibi zemin elemanına bir dinamik kayma gerilmesi (τ_h) etkimektedir. Şekil 5.3.' de dinamik kayma gerilmesinin etkilediği düzlem verilmiştir. Şekil 5.3.a.1.' den görüldüğü gibi, numune öncelikle σ_3 toplam normal gerilmeye yüklenmiştir. Bu durum Şekil 5.3.a.2.' de gerilme dairesi üzerinde gösterilmektedir. Numune üzerindeki aksenal gerilmeler eşit olarak $\sigma_3 + \frac{1}{2}\sigma_d$ ve radyal gerilmeler $\sigma_3 - \frac{1}{2}\sigma_d$ şeklinde değişir, numuneye su girişi ve çıkışı engellenirse gerilme dairesi Şekil 5.3.b.2.' de olduğu gibi çizilecektir. X-X düzleminde toplam gerilme σ_3 ve kesme gerilmesi $+\frac{1}{2}\sigma_d$ olur. Y-Y düzleminde ise toplam gerilme σ_3 ve kesme gerilmesi $-\frac{1}{2}\sigma_d$ olarak belirir. Benzer şekilde, numune Şekil 5.3.c.1.' deki gibi gerilmeye maruz kalırsa, gerilme dairesi Şekil 5.3.c.2.' deki gibi çizilecektir. X-X düzleminde toplam gerilme σ_3 ve kesme gerilmesi $-\frac{1}{2}\sigma_d$, Y-Y düzlemindeki toplam gerilme σ_3 , kesme gerilmesi ise $+\frac{1}{2}\sigma_d$ olacaktır.

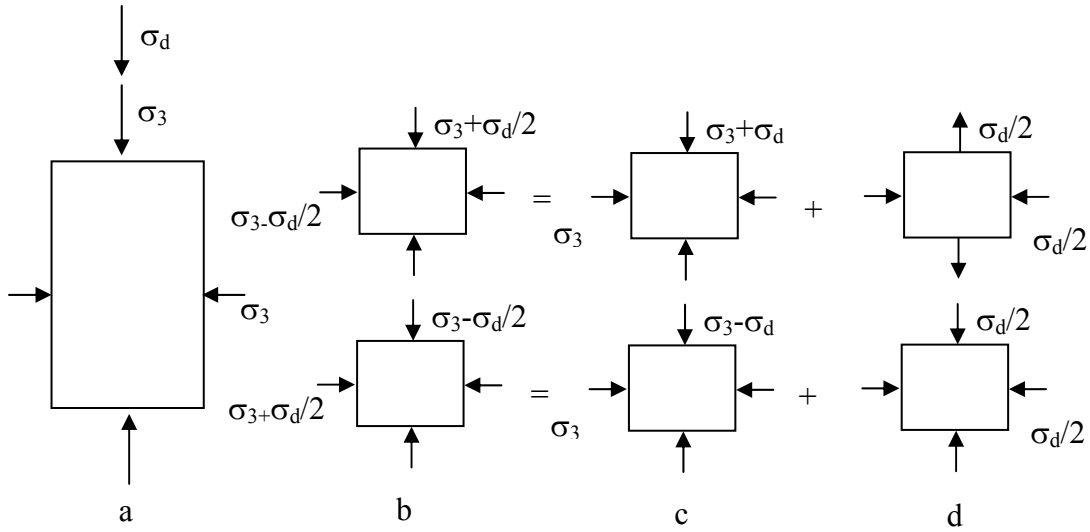


Şekil 5.2. Depremde zemin elemanının aldığı çevrimsel kayma gerilmesi (Das, 1983)



Şekil 5.3. Belirli düzlemde etkiyen çevrimsel kayma gerilmesinin üç eksenli deneyde benzeştirilmesi (Das, 1983)

Drenajsız deneyde normal gerilme σ_3 ve dinamik yüklemde deviyör gerilme σ_d olacak şekilde yapılır (Şekil 5.4.a.). Eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı dinamik yüklemde deviyör gerilme (σ_d) uygulanması süresince ölçülebilmektedir. Şekil 5.4.b.1.' de gösterilen durum Şekil 5.4.c.1. ve d.1.' de özetlenmiştir. Şekil 5.4.d.1.' de gösterilen gerilme durumunun etkisi, eksenel deformasyon değerinde herhangi bir değişiklik oluşturmaksızın boşluk suyu basıncını $\frac{1}{2}\sigma_d$ kadar düşürmektir. Bu yüzden, Şekil 5.4.b.1.' de gösterilen gerilme koşulunu sağlamak için (Şekil 5.4.d.1.' de olduğu gibi) bundan sadece $u_w = \frac{1}{2}\sigma_d$ değerinde boşluk suyu basıncının çıkartılması yeterli olacaktır. Şekil 5.4.b.2.' deki durumdaki gerilme etkisi ise $\frac{1}{2}\sigma_d$ ilavesi şeklinde olmaktadır.



Şekil 5.4. Gevşek kumda drenajsız dinamik üç eksenli deneyinde gerilme koşulları (Das, 1983)

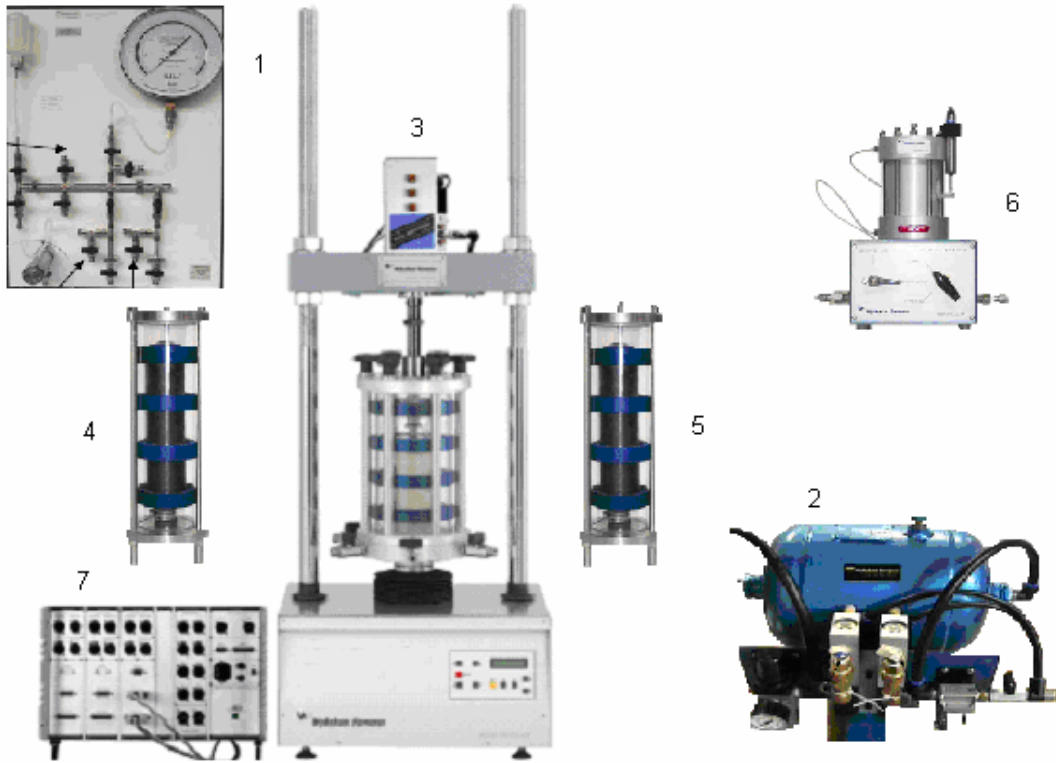
5.3. Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Ekipmanları

Bu tez çalışmasında kullanılan ve Sakarya Üniversitesi' ne ait olan dinamik üç eksenli deney sistemi 1997 Wykeham Farrance yapımıdır. Dinamik üç eksenli cihazı, Wykeham Farrance tarafından geliştirilen "The Universal Testing Machine" (UTM) yazılımı ile birlikte kullanılmaktadır. Bu program, düşük maliyetle bilgisayar kontrollü bir yüklemenin yapılabilmesi ve her bir bilginin veri toplayıcı sistemde (CDAS) toplanmasının sağlanması amacıyla hazırlanmıştır. Sistemde kuvvet, gerilme, deformasyon ve yükleme dalga tipleri kontrol edilebilmektedir. Dinamik üç eksenli deney sistemi ve cihazın parçaları Foto 5.1. ve Şekil 5.5.' de gösterilmektedir. Buradaki parçalar;

1. Su ve hava dolaşım sistemi,
2. Hava kurutucu,
3. Yükleme çerçevesi,
4. ve 5. Değişmez basınç sağlar hücreler,
6. Hacim değişimi ölçer,
7. Kontrol ve veri alıcı sistemden (CDAS), oluşmaktadır.



Foto 5.1. Dinamik üç eksenli deney sistemi ve cihazın parçaları



Şekil 5.5. Dinamik üç eksenli deney sisteminin ekipmanları

5.3.1. Yükleme çerçevesi

Yükleme çerçevesi düz bir taban plakasına ve dijital hız kontrollü sisteme sahiptir. Piston kirişi iki dişli çubukla desteklenmekte ve yükseklik ayarı yapılabilmektedir. Çerçeve sınırlı sapmanın olması ve tekrarlı yükleme sırasında ölçümlerin doğru yapılması için rijit yapılmıştır. Yükleme piston merkezinden hava basıncı yardımı ile uygulanmaktadır. Yükleme sırasında pistonla hücre arasında oluşacak sürtünmenin etkisi piston çevresinde bilyalı yatak kullanılması nedeniyle büyük ölçüde giderilmektedir. Deney başlarken numune ile piston arasındaki olası boşluktan doğabilecek şok, deney başlamadan uygulanan küçük bir oturtma yükü ile en aza indirilmektedir. Hava basınçlı (pnömatik) sistem düşey yük ve çevre basıncının bir düzenleyiciden geçen basınçla birlikte uygulanmasını sağlamaktadır.

5.3.2. Üç eksenli hücre

Dinamik üç eksenli hücresi aynı üç eksenli hücrede olduğu gibi silindirik şeklinde olup içine çapı en fazla 100 mm, yüksekliği ise 200 mm olan numunenin yerleştirilmesi uygun olmaktadır. Hücreye numune yerleştirilip, membran geçirildikten sonra contalar yerleştirilmektedir. Daha sonra suyla doldurulan hücre 2000 kPa basınca kadar dayanabilmektedir.

5.3.3. Deney denetleme ve veri toplama sistemi

Deneyle ilgili bütün değerler kontrol ve veri alıcı sistemin (CDAS) içinde düzenlenerek deneyde uygulanması sağlanır. Yükleme özellikleri, lineer aksenal boy değişim ölçer (LVDT), boşluk suyu basıncı transdüşeri, çevre basıncı transdüşeri, geri basınç transdüşeri ve hacim değişimi ölçer kanallarının girişi CDAS' a yapılmaktadır. CDAS hem numune hem de veri toplayıcı transdüşerlerin kontrolünü sağlayarak kolay veri elde etmeyi sağlar.

5.4. DeneY Yöntemi

Gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyde numune hücreye yerleştirildikten sonra, bilgisayara gerekli veriler (numune boyutu, dalga tipi, numuneye uygulanacak dinamik yükleme değeri, uygulanacak frekans değeri) girilerek sistem hazırlanır. Bu çalışmada dinamik yükleme, Silver (1977)' in önerdiği sinüzoidal dalga ve farklı dinamik gerilme oranlarının (DGO) kullanılmasıyla yapılmıştır. 2.4.13 alt bölümünde açıklandığı gibi Adapazarı zeminleri gibi genç akarsu/göl ortamlarında oluşmuş normal yüklenmiş, yumuşak ince daneli zeminler için (ML, MI, CL) dinamik üç eksenli deneylerde frekansın 0.5 Hz olarak kullanılması tercih edilmiştir.

Numune ortalama yüksekliğinin çapa oranı 2 veya 2.5 olmalıdır. Bu çalışmada alt bölüm 2.4.12' de açıklaması yapıldığı gibi numune çapı 100 mm olarak seçilmiştir. Boyutları belirlenen numune hücreye yerleştirilir. Numune hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra dinamik üç eksenli deney;

1. Doyurma aşaması,
2. Konsolidasyon aşaması,
3. Dinamik yükleme aşaması, olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir.

5.4.1. Doyurma aşaması

Doyurma işlemi, numunenin şişmesine müsaade edilmeden ve kayma gerilmelerine maruz bırakmadan tüm boşluklarının su ile doldurulmasıdır. Boşluklarda mevcut havanın suyun içinde eriyip ortadan kaldırılması için boşluk suyuna 500 kPa düzeyinde geri basınç uygulaması yapılır. Geri basıncın uygulanması, kademeli olarak hücre basıncı ve geri basıncın karşılıklı yükseltilmesiyle gerçekleştirilir. Her kademedeki basınç aralığı, o kademedeki istenen efektif konsolidasyon basıncına ve bir sonraki kademedeki numunenin ulaşması istenen doygunluk derecesine bağlı olarak 35 kPa ile 140 kPa arasındaki bir değerde seçilir. Geri basınç uygulaması sırasında hücre basıncı ile geri basınç arasındaki fark, 35 kPa' ı geçmemelidir. Geri basınç artış adımlarından sonra veya geri basıncın tümünün uygulanmasından sonra, denge durumu kontrol edilmelidir. Boşluk suyu basıncı parametresi B' nin değeri 0.95 veya

büyükse ve geri basınç artışına rağmen B değeri değişmiyorsa numune doymun duruma gelmiş kabul edilir.

5.4.2. Konsolidasyon aşaması

Konsolidasyon aşamasının amacı, numunenin kayma direnci ölçümü sırasında olması gereken efektif gerilme altında denge durumuna erişmesidir. Konsolidasyon en az bir logaritmik çevrim tamamlanana kadar veya birincil konsolidasyonun %100' e gelmesi beklenir. Bu süre zemin numunesinin dane dağılımına göre değişebilmektedir. İstenen dinamik yük yaklaşık olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_c = 2\sigma'_{3c} \times DGO \times A_c \quad (5.1)$$

Burada,

P_c = numuneye uygulanan tahmini dinamik yük

σ'_{3c} = konsolidasyon basıncı

DGO = hedeflenen dinamik gerilme oranı (%)

A_c = konsolidasyon aşamasından sonra numunenin kesit alanı

5.4.3. Dinamik yükleme aşaması

Konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra dinamik yüklemeye geçilir. Yükleme sırasında basınçlar, eksenel yük, eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı her çevrim için elektronik olarak kaydedilir. Yükleme basınç gerilmesi olarak yapılır. Deney %20 çift yönlü eksenel deformasyon ulaşılan kadar, 500 çevrim sayısında veya istenen herhangi bir çevrim sayısına kadar sürdürülebilir. Dinamik yükleme tamamlandıktan sonra gözenekli taştaki suyun emilmesini önlemek için numune hücreden çok kısa sürede çıkartılarak tartılır, başlangıçta olduğu gibi deney sonunda da su muhtevası ölçülür. Bu çalışmada 75kPa, 50kPa, 40kPa ve 30kPa yüklemeleri yapılmıştır.

5.5. Dinamik Üç Eksenli Deneyde Hesaplamalar

Dinamik üç eksenli deney verilerinden dinamik gerilme oranı (DGO), deformasyon ve boşluk suyu basıncı aşağıdaki formüllerden hesaplanır. Gerilmeler σ ile gösterilirken boy değişimler δ , birim boy değişimler ε , numune yüksekliği H ve boşluk suyu basıncı U ile gösterilmektedir. Uygulanan gerilmeler, birim boy değişimler ve boşluk suyu basınçları aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$DGO = \frac{\sigma_a}{2\sigma_{3c}} \quad (5.2)$$

$$\sigma_c = P_c / A_c \quad \sigma_e = P_e / A_c \quad \sigma_a = (\sigma_c + \sigma_e) / 2 \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_c = \delta_c / H_c \quad \varepsilon_e = \delta_e / H_c \quad \varepsilon_{da} = \varepsilon_c + \varepsilon_e \quad (5.4)$$

$$U = u_{\max} / \sigma_{3c} \quad (5.5)$$

Burada,

DGO = Dinamik gerilme oranı

σ_a = Basma ve çekmede uygulanan gerilmenin ortalaması

σ_c = ($\sigma_c = P_c / A_c$) = basmada doruk dinamik gerilme

σ_e = ($\sigma_e = P_e / A_c$) = çekmede doruk dinamik gerime

P_c = basmada uygulanan doruk yüklemenin değişimi

P_e = çekmede uygulanan doruk yüklemenin değişimi

A_c = ($A_c = V_c / H_c$) = konsolidasyon sonrası numune kesit alanı

ε_c = sıkısmada eksenel birim deformasyon

ε_e = çekmede eksenel birim deformasyon

δ_c = sıkısmada dinamik eksenel deformasyon

δ_e = çekmede dinamik eksenel deformasyon

H_c = konsolidasyon aşamasından sonraki numunenin yüksekliği

ε_{da} = çift yönlü eksenel birim deformasyon, (%)

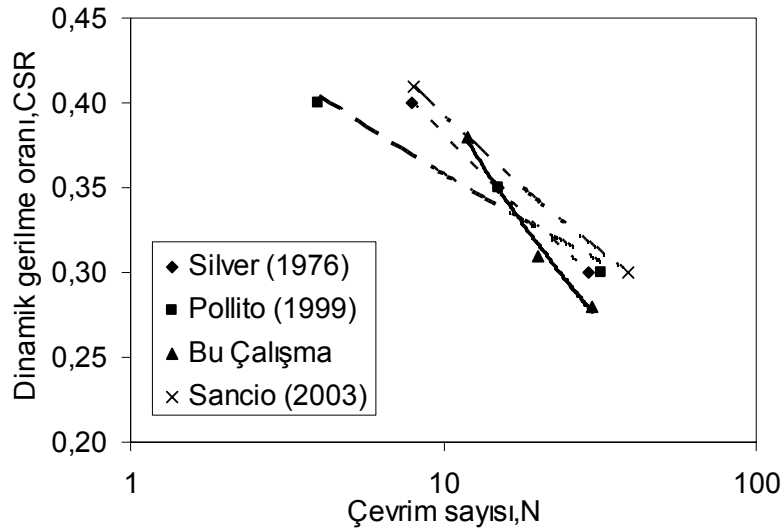
U = dinamik boşluk suyu basıncı

$u_{w\max}$ = çevrim sırasında maksimum fazla boşluk suyu basıncı

σ'_{3c} = izotrop konsolidasyon (hücre) basıncı

5.6. Dinamik Üç Eksenli Deney Sisteminin Kalibrasyonu

Araştırma programına başlamadan kullanılması öngörölmüş deney sisteminin diğeri araştırmacıların kullandığı sistemlerle uyumlu olduğunu kanıtlamak gerekmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, daha önce Monterey standart kumu üzerinde kalibrasyon işlemi yapmış araştırmacıların bulguları ile karşılaştırıldığında eğrilerin çakıştığı Şekil 5.6.' da görölmektedir (Polito, 1999; Sancio, 2003; Silver ve diğ., 1976). Bunun anlamı, kullanılmakta olan Wykeham Farrance dinamik üç eksenli deney aletinin araştırmalarda kullanılmış diğeri aletlerle aynı performansa sahip olduğudur. Ancak, bu sonuçlara varılana değin sistemde belirli ayarlamaların yapılması gerekmiştir. Bu nedenle, her yeni sistemin deneylere başlamadan kontrol edilmesi ve kalibrasyonun titizlikle gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. Kalibrasyon için yapılan deneylerin sonuçları Tablo 5.2.' de verilmiştir.



Şekil 5.6. Monterey kumunda dinamik gerilme oranı ile çevrim sayılarının karşılaştırılması

Tablo 5.2. Monterey kumunda dinamik üç eksenli kesme deneyi sonuçları

DGO	Silver			Polito			Sancio		Bu çalışma		
	0,30	0,35	0,40	0,30	0,35	0,40	0,30	0,41	0,28	0,31	0,38
$\sigma'=0$ için N	29	15	8	32	15	4	39	8	30	20	12

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ

Çalışmanın bu bölümünde, dinamik üç eksenli deneylerinin sonuçları verilmiştir. Kohezyonsuz numunelerin, araziden laboratuvara özellikleri değişmeden taşınması eldeki imkanlarla oldukça zor, gelişmiş yöntemlerle alınmasının da yüksek maliyeti nedeniyle deneylerde kullanılacak zemin numunelerinin laboratuvarında hazırlanılmasına karar verilmiştir. Literatür araştırması değerlendirildiğinde, bu araştırmada bulamaç çökeli yöntemi tercih edilmiştir. Zemin numunesi Adapazarı kenti Serdivan bölgesinde 3-4 m derinlikten alınmış %67 ince ve %10 kil içerikli siltli zemindir. Farklı kil içerikli zemin numunesi elde etmek için zeminin ağırlığının 10 katı kadar suyla karıştırılarak oluşturulan süspansiyonun ince bölümü farklı zamanlarla vakumlanarak alınmıştır. Böylelikle aynı zeminden %4, %6 ve %9 kil içeriğine sahip zemin numuneleri elde edilmiş ve buradan elde edilen kil, %10 kil yüzdesine sahip doğal zemin numunesine ilave edilerek %12, %13, %15 ve %18 kil oranı içeren zemin numuneleri elde edilmiştir (Tablo 6.1.).

Öncelikle elde edilen farklı kil yüzdelere sahip zemin karışımlarının Bölüm 3.6' da verildiği gibi kıvam limitleri, dane dağılımı ve dane özgül ağırlığı elde edilmiştir. Fiziksel özelliklerinin belirlenmesinden sonra dinamik üç eksenli deneyi için 10 cm çaplı silindirik numuneler hazırlanmıştır. Dinamik üç eksenli hücrelerine yerleştirilen silindir numuneler Bölüm 5.4' de verilen aşamalar takip edilerek deneylere tabi tutulmuştur.

Sekiz farklı kil içeriğinde zemin numunelerinin farklı DGO değerlerindeki deney sonuçları Tablo 6.2.' de özetlenmiştir. Bu çalışmada dinamik üç eksenli deneyi yapılan numunelerin yenilme kriteri olarak; Seed ve Idriss (1981)' de verdiği $M_w = 7\frac{1}{2}$ büyüklüğünde bir depremde 15. çevrimde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine ulaşması kabul edilmiştir. Bu kritere göre belirlenen %54 ince ve %4 kil, %51 ince ve %6 kil, %71 ince ve %9 kil, %67 ince ve %10 kil, %73 ince ve %12 kil,

%63 ince ve %13 kil, %75 ince ve %15 kil ve %78 ince ve %18 kil içeren numunelerin dinamik üç eksenli deney kayıtları DGO 0.35, 0.25, 0.20 ve 0.15 değerlerinde; DGO-Çevrim sayısı, Eksenel deformasyon- Çevrim sayısı, Boşluk suyu basıncı- Çevrim sayısı, Boşluk suyu basıncı-Eksenel deformasyon, Dinamik gerilme- Eksenel deformasyon ve p' - q' olmak üzere Ekler-I'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 6.1. Dinamik üç eksenli deneyi yapılan numunelerin özellikleri

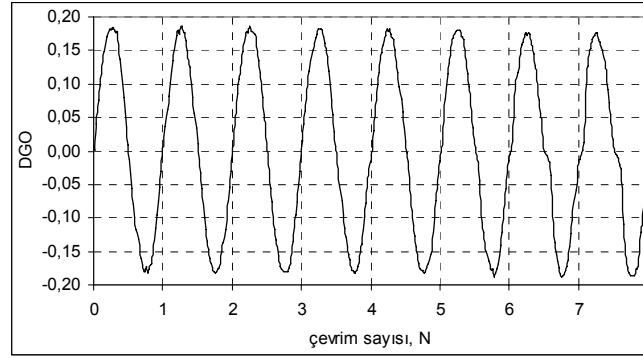
Numune	Kum içeriği, %	İnce içeriği, %	%Silt içeriği, %	Kil içeriği, %	w_L	w_P
A-1	46	54	50	4	27	-
A-2	46	54	50	4	27	-
A-3	46	54	50	4	27	-
A-4	46	54	50	4	27	-
B-1	49	51	45	6	28	-
B-2	49	51	45	6	28	-
B-3	49	51	45	6	28	-
B-4	49	51	45	6	28	-
C-1	29	71	62	9	31	-
C-2	29	71	62	9	31	-
C-3	29	71	62	9	31	-
C-4	29	71	62	9	31	-
D-1	33	67	57	10	30	-
D-2	33	67	57	10	30	-
D-3	33	67	57	10	30	-
D-4	33	67	57	10	30	-
E-1	27	73	61	12	32	-
E-2	27	73	61	12	32	-
E-3	27	73	61	12	32	-
E-4	27	73	61	12	32	-
F-1	37	63	50	13	29	-
F-2	37	63	50	13	29	-
G-1	25	75	60	15	29	19
G-2	25	75	60	15	29	19
H-1	22	78	60	18	30	21
H-2	22	78	60	18	30	21
H-3	22	78	60	18	30	21
H-4	22	78	60	18	30	21

Tablo 6.2. Zemin numunelerinin farklı DGO değerlerindeki dinamik üç eksenli deney sonuçları

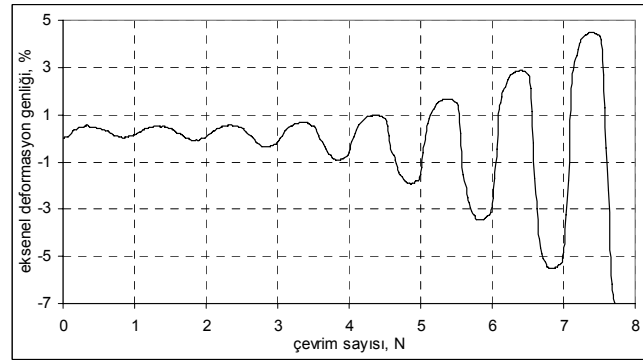
Numune	İnce içeriği, %	Kil içeriği, %	Su muhtevası, %	Birim hacim ağırlığı, kN/m ³	efektif konsolidasyon basıncı, kPa	B	σ_a , kPa	DGO	$\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısı	$\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesindeki boşluk suyu basıncı, kPa
A-1	54	4	28	19,08	99.634	0.96	74.242	0,3726	1	17.094
A-2	54	4	27	18.76	99.145	0.97	49.797	0,2511	3	91.331
A-3	54	4	27	19.16	100.122	0.96	39.988	0,1997	6	91.82
A-4	54	4	27	18.85	100.122	0.95	31.363	0,1566	30	96.215
B-1	51	6	27	19.26	101.099	0.98	73.718	0,3646	1	20.025
B-2	51	6	27	19.49	100.61	0.96	49.492	0,2460	2	79.609
B-3	51	6	27	19.93	100.122	0.96	39.59	0,1958	4	83.03
B-4	51	6	27	19.35	101.099	0.95	30.818	0,1524	13	88.89
C-1	71	9	28	18.92	100.61	1.00	72.872	0,3639	2	95.238
C-2	71	9	30	18.58	97.68	0.95	49.621	0,2540	3	87.91
C-3	71	9	28	18.61	100.123	0.99	40.231	0,1990	8	86.45
C-4	71	9	28	18.77	99.634	0.97	30.387	0,1525	30	98.168
D-1	67	10	28	17.68	99.634	0.96	73.557	0,3691	1	23.932
D-2	67	10	27	17.06	101.099	0.95	49.955	0,2471	3	62.027
D-3	67	10	27	19.08	99.634	0.96	40.004	0,2008	10	96.704
D-4	67	10	31	18.95	99.634	0.96	30.052	0,1508	32	92.308
E-1	73	12	28	18.49	99.145	0.95	73.743	0,3719	4	99.45
E-2	73	12	28	18.40	99.634	0.97	50.235	0,2521	7	92.80
E-3	73	12	29	19.08	100.122	0.97	40.495	0,2032	12	79.61
E-4	73	12	27	18.82	100.122	0.95	30.309	0,1514	302	87.424
F-1	63	13	28	18.60	99.634	0.96	50.51	0,2504	6	93.773
F-2	63	13	29	19.27	100.122	0.98	40.15	0,2015	24	100.122
G-1	75	15	29	18.84	99.146	0.98	50.369	0,2540	12	90.843
G-2	75	15	28	18.71	100.122	0.95	40.22	0,2009	30	88.401
H-1	78	18	28	18.99	100.61	0.95	74.204	0,3670	3	26.862
H-2	78	18	28	18.77	99.634	0.96	50.518	0,2523	9	49.817
H-3	78	18	28	19.05	101.099	0.96	40.633	0,2010	49	72.284
H-4	78	18	29	18.77	100.611	0.98	30.277	0,1505	337	86.447

Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarından aynı DGO değerinde farklı numunelerin farklı dinamik davranış sergilediği görülmüştür. $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon değerine ilk çevrimlerde ulaşan zeminlere örnek deney kaydı Şekil 6.1.'de verilirken, $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon değerine 15. çevrimden sonra ulaşan zemine ait kayıtlar Şekil 6.2.'de verilmiştir.

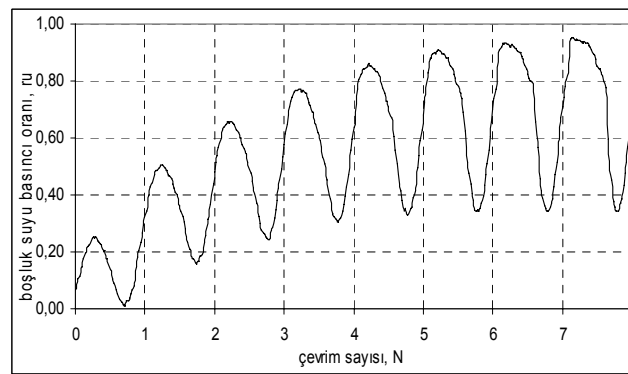
Bu çalışmada, zeminlerin dinamik davranışları üzerinde dinamik gerilme oranı, ince dane oranı, kil içeriği ve plastisite etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla aynı özelliklere sahip zeminlerin DGO-Çevrim sayısı, boşluk suyu basıncı - çevrim sayısı, eksenel deformasyon - çevrim sayısı grafikleri hazırlanmıştır (Ek-II, III, IV).



a.DGO ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

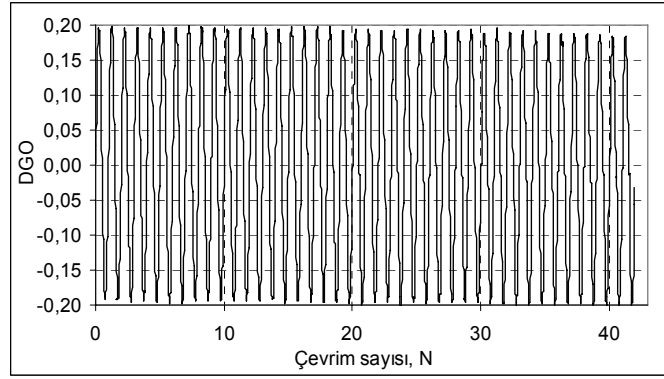


b. Eksenel deformasyon ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

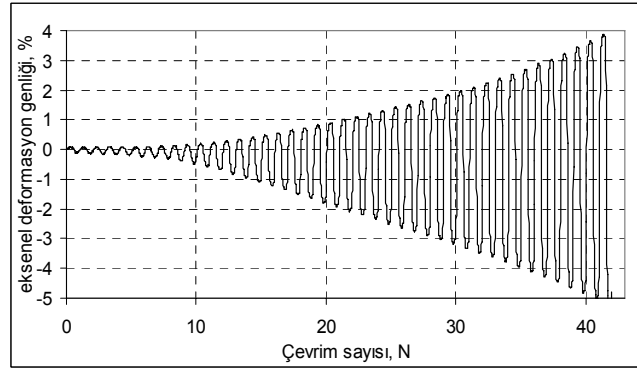


c. Boşluk suyu basıncı oranı ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

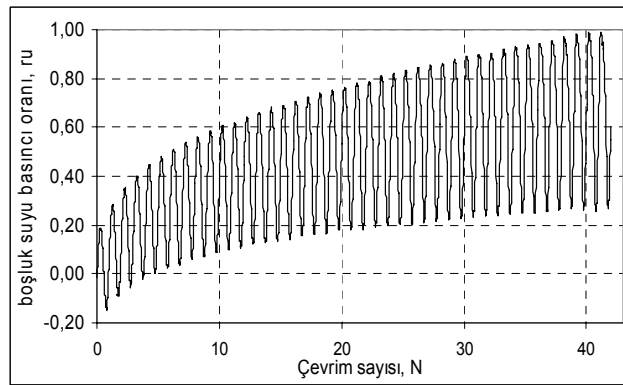
Şekil 6.1. DGO=0.20 olan %54 ince %4 kil içerikli numunelerin dinamik deney sonuçları



a. DGO ve çevrim sayısı arasındaki ilişki



b. Eksenel deformasyon ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

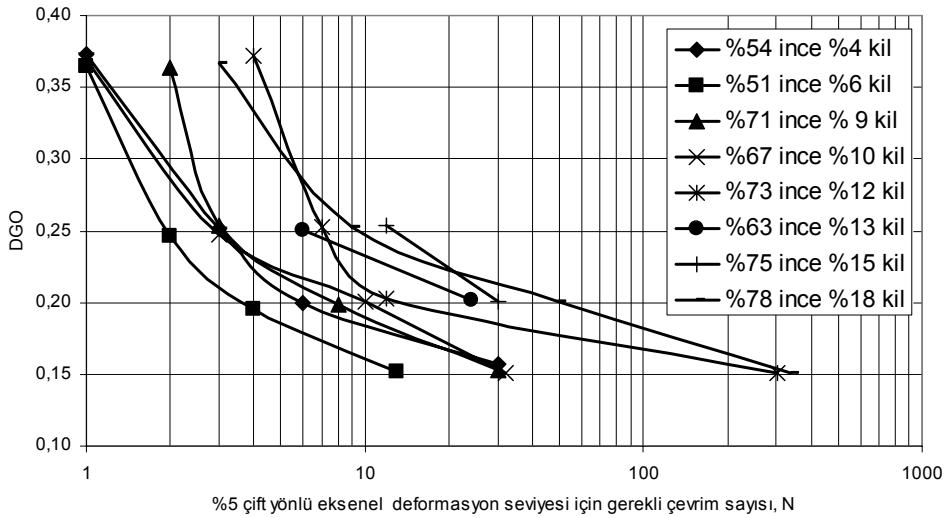


c. Boşluk suyu basıncı oranı ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

Şekil 6.2. DGO=0.20 olan %75 ince %15 kil içerikli numunelerin dinamik deney sonuçları

6.1. Dinamik Gerilme Oranı ve Çevrim Sayısı Arasındaki İlişki

Şekil 6.3.' de farklı kil içeriğindeki numunelerde $\pm\%2.5$ aksel deformasyon değeri için gerekli çevrim sayısı (N) ile numuneye uygulanan DGO değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3' den görüldüğü gibi ilk 15 çevrimde kil içeriğinin $\%12$ ve daha düşük olduğu numunelerde ve $DGO \geq 0.20$ değerlerinde, $\pm\%2.5$ aksel deformasyon değerine çok küçük çevrim sayılarında ulaştığı gözlemlenmiştir. Kil içeriği $\geq \%13$ numunelerde $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısı $DGO \geq 0.25$ değerinde olmaktadır. Örneğin, kil yüzdesi $\%18$ olan numunelerde $DGO \geq 0.25$ olduğunda $\pm\%2.5$ aksel deformasyon değeri için gerekli çevrim sayısı 10. çevrimden önce görülürken $DGO < 0.25$ değerinde $\pm\%2.5$ aksel deformasyon değeri için gerekli çevrim sayısı çok yüksek değerlerde gözlenmiştir.

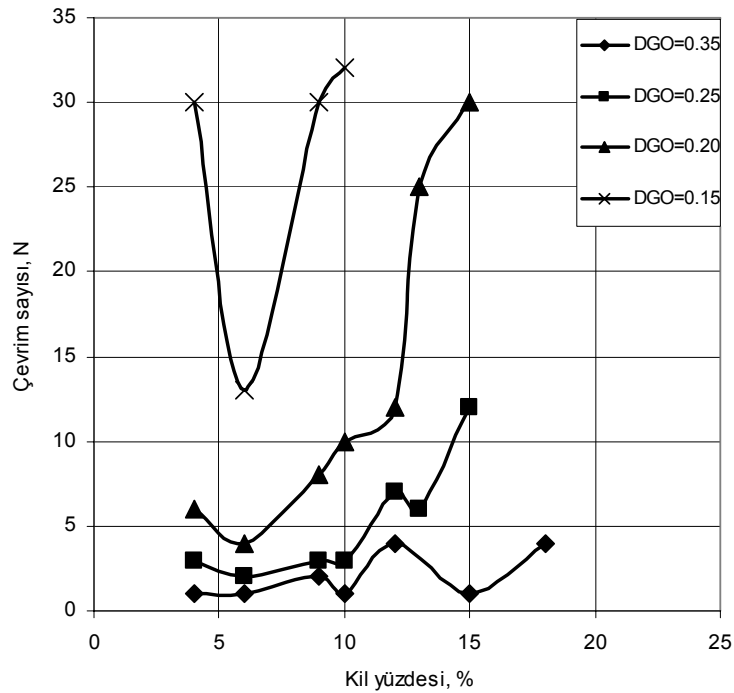


Şekil 6.3. Sekiz farklı kil içerikli numunelerde, $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısı - DGO bağıntısı

Genel olarak kil yüzdesi fazla olan zeminlerin dinamik mukavemeti yüksek olmaktadır. Kil yüzdesi $\leq \%10$ zeminlerde aynı dinamik gerilme oranında (DGO) $\pm\%2.5$ aksel deformasyon için gerekli çevrim sayısı birbirine oldukça yakın çıkmaktadır. Bu davranış, kil içeriğinin belirli bir oranın altında olması nedeniyle zeminin “kumsu” özellik gösterdiği ve başlangıç sıvılaşmasının kolayca sağlandığı biçiminde açıklanmıştır (Boulanger ve Idriss, 2006). Kil yüzdesi $\%13$ 'ün üstündeki

zeminlerde ise $\pm\%2.5$ aksel deformasyona $DGO \geq 0.25$ değerinde 15. çevrimden önce ulaşıldığı, DGO'nun bu değerlerin altında olması durumunda ise 15. çevrimden sonra $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşıldığı görüldüğü ve bu nedenle bu üçüncü gurubun “kils” örnekler olarak nitelendirilebileceği düşünülmüştür.

Farklı kil içeriklerinde hazırlanmış numunelerinin dinamik üç eksenli deneyde DGO'nun 0.35, 0.25, 0.20 ve 0.15 değerlerinde $\pm\%2.5$ aksel deformasyon değerine ulaşması için gerekli çevrim sayıları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.4.' de görüldüğü gibi kil yüzdesi-çevrim sayısı grafiğinde DGO 0.25 ve 0.35 değerlerinde farklı kil içeriklerindeki $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayılarının paralellik gösterdiği, DGO 0.20 ve 0.15 değerlerinde ise çevrim sayılarının çok farklı eğimlerde yükseldiği görülmüştür.



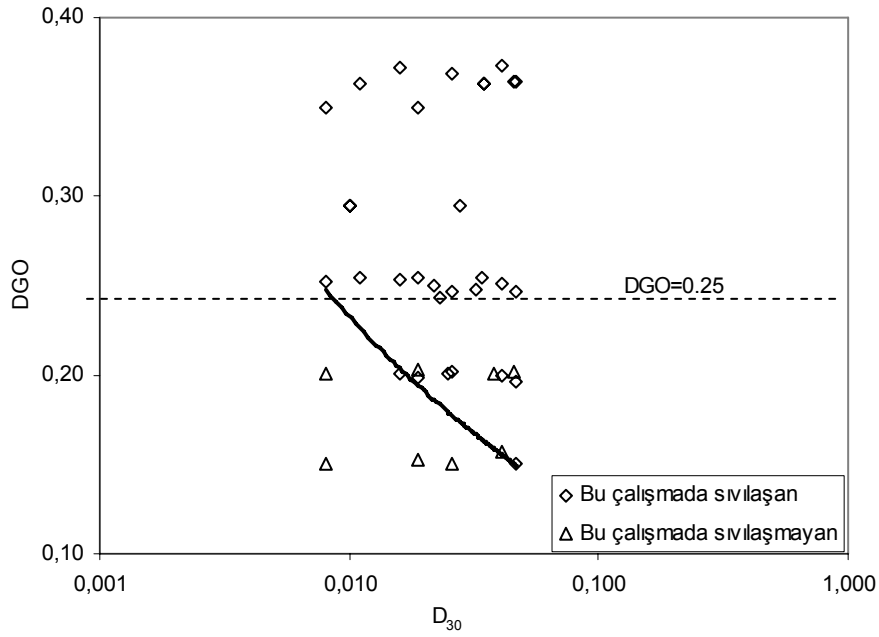
Şekil 6.4. Sekiz farklı kil içerikli numunelerde, $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısı – kil yüzdesi bağıntısı

Farklı kil içeriklerinde hazırlanmış zemin numunelerinin D_{50} , D_{60} ve D_{30} değerleriyle karşılaştırılması yapılmış ancak sadece D_{30} değerleri ile dinamik üç eksenli deneyde $DGO= 0.35, 0.25, 0.20$ ve 0.15 ile çizilen grafikte (Şekil 6.5) diğerlerine göre daha

anlamli sonuçlar çıkarılmıştır. Dinamik u eksenli deney sonuçlarından DGO değerinin 0.25 ve uzerinde olduğunda zemin numunelerinin sıvılaştığı, DGO değeri 0.25'in altında ise sıvılaşan ve sıvılaşan/sıvılaşmayan zemin numunelerin noktalanmasıyla Şekil 6.5'i 3 bölgede değerlendirebileceğimiz görülmüştür. DGO değerini yatayda sınır çizgisi olarak çizdiğimizde DGO 0.25'in altındaki bölgenin ise formül (6.1)' de görüldüğü gibi bir denklemlle ayrılabilceği görülmektedir. Formülle ayrılan sınır çizgisinin sağındaki bölgeye farklı DGO' da yapılan dinamik u eksenli deneylerinden sıvılaşan ve sıvılaşmayan deneylerin noktalandığı görülmektedir. Bundan dolayı bu bölge deney gerektiren bölge olarak isimlendirilmiştir. Sınır çizgisinin solundaki bölgeye ise farklı DGO' da yapılan dinamik u eksenli deneylerinden sıvılaşmayan deneylerin noktalandığı görülmektedir. Bundan dolayı bu bölge sıvılaşmanın olmadığı bölge olarak isimlendirilmiştir. Böylece mineralojisi değişken olmayan Adapazarı zemininde aşağıdaki bağıntının sıvılaşabilir-sıvılaşmaz ayırımını temsil ettiği sonucuna ulaşılmaktadır.

$$DGO = 0.0621(D_{30})^{-0.2871} \quad (6.1)$$

Deneylerden görüldüğü kadarı ile Adapazarı siltinde $DGO \leq 0.15$ koşullarında sıvılaşma oluşmamaktadır. 1957 ($M_w=7.0$; $t=31$ s) ve 1967 ($M_w=7.2$; $t=?$ s) depremlerinde siltlerde zemin yenilmesi olaylarının hiç rapor edilmemesinin bu koşulun gerçekleşmiş olma olasılığı ve deprem sürelerinin de çok daha kısalığı ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Oysa, $M_w=7.4$; ana kayada $t=48$ s iken ovada daha uzun sürdüğü tahmin edilen 1999 depreminde kentin yaklaşık yarısında çevrimsel hareketlenme ve sıvılaşma belirtileri gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5. Adapazarı siltinde D_{30} – DGO ilişkisi

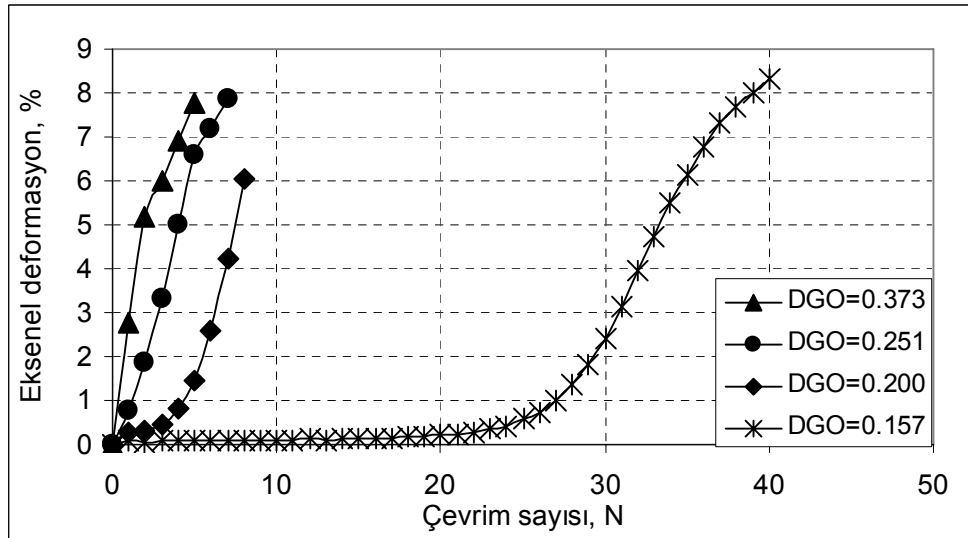
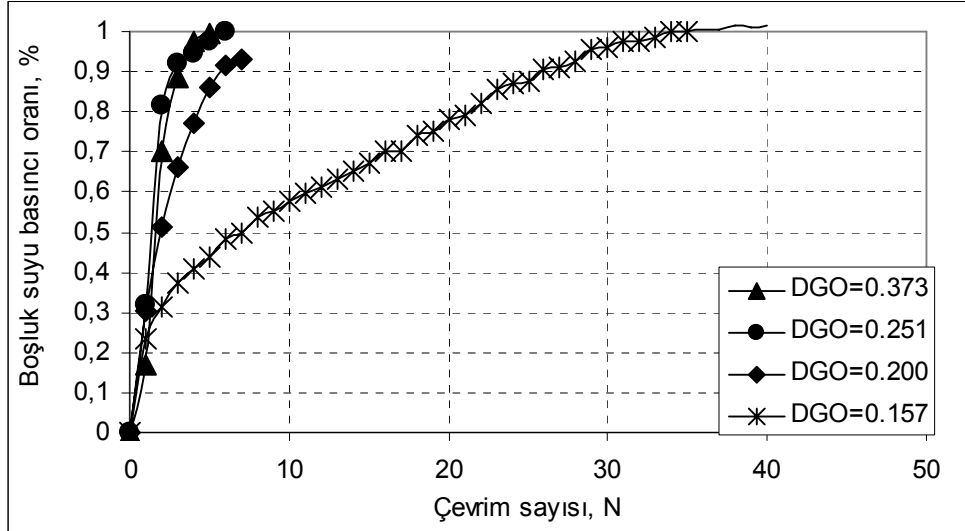
6.2. Dinamik Gerilme Oranının, İnce Dane Oranının, Kil İçeriğinin ve Plastisitenin Sıvılaşmaya Etkisi

6.2.1. Dinamik gerilme oranının sıvılaşmaya etkisi

Dinamik üç eksenli deneyi yapılan %54 ince ve %4 kil, %51 ince ve %6 kil, %71 ince ve %9 kil, %67 ince ve %10 kil, %73 ince ve %12 kil, %63 ince ve %13 kil, %75 ince ve %15 kil ve %78 ince ve %18 kil içeren numunelerin DGO etkisini incelemek için boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, eksenel deformasyon-çevrim sayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Ek-II).

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi %54 ince ve %4 kil içeren silt zeminde DGO' nın 0.373 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 1. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.17, DGO' nın 0.251 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 3. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.91, DGO' nın 0.200 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 6. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.92 ve DGO' nın 0.157 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon

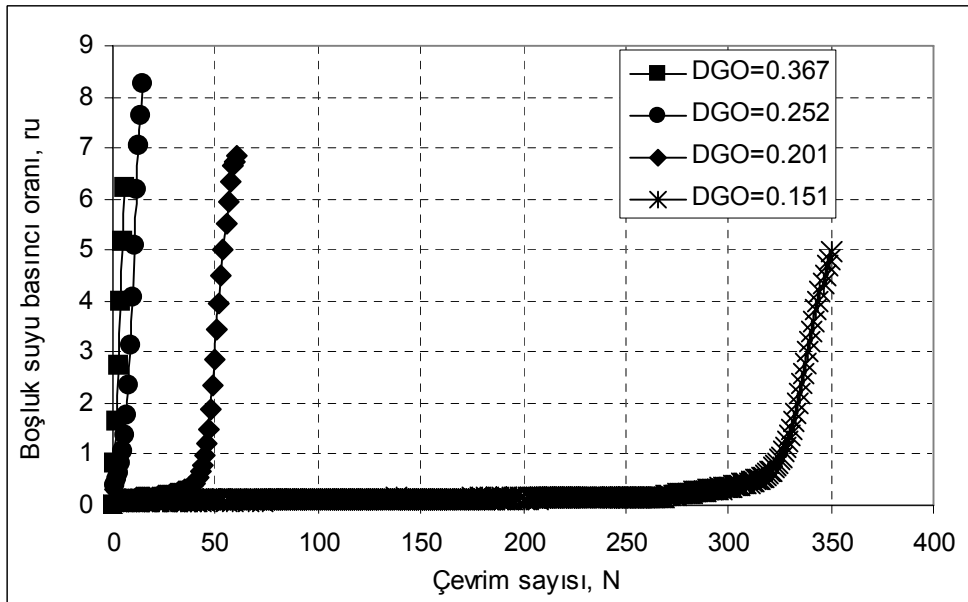
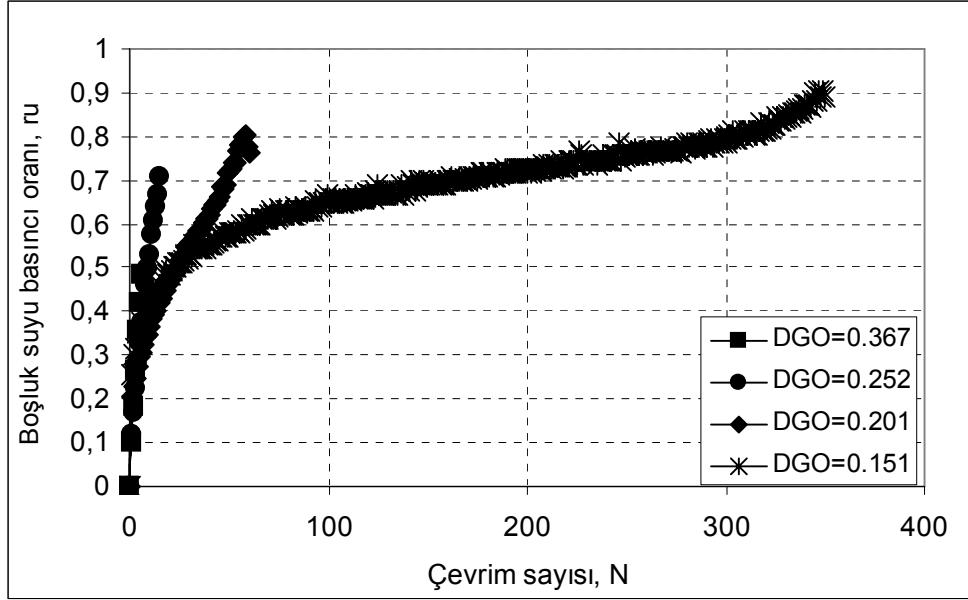
seviyesine 30. çevrimde ulaşılırken boşluk suyu basıncı oranı 0.96 olarak gözlenmiştir.



Şekil 6.6. %54 ince ve %4 kil zeminlerin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 6.7'de ise %78 ince ve %18 kil içeren silt zeminlerde DGO' nın 0.367 değerinde \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine 3. çevrimde ulaşılırken boşluk suyu basıncı oranı 0.27, DGO' nın 0.252 değerinde \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine 9. çevrimde ulaşılırken boşluk suyu basıncı oranı 0.50, DGO' nın 0.201 değerinde \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine 49. çevrimde ulaşılırken boşluk

suyu basıncı oranı 0.72 ve DGO' nun 0.150 değerinde $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine 337. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.87 olarak gözlenmiştir.



Şekil 6.7. %78 ince ve %18 kil zeminlerin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve aksel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi

%51 ince ve %6 kil içeren silt zeminlerde DGO' nun 0.365 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 1. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı 0.20, DGO' nun 0.246 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 2. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı 0.80, DGO' nun 0.196 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 4. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.83 ve DGO' nun 0.152 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 13. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.89 olarak gözlenmiştir (Şekil Ek-2.2).

%71 ince ve %9 kil içeren silt zeminlerde DGO' nun 0.364 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 2. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.95, DGO 0.254 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 3. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.88, DGO' nun 0.199 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 8. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.87 ve DGO' nun 0.153 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 30. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.98 olarak gözlenmiştir (Şekil Ek-2.3).

%67 ince ve %10 kil içeren silt zeminlerde DGO' nun 0.369 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 1. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.24, DGO' nun 0.247 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 3. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.62, DGO' nun 0.201 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 10. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.97 ve DGO' nun 0.151 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 32. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.92 olarak gözlenmiştir (Şekil Ek-2.4).

%73 ince ve %12 kil içeren silt zeminlerde DGO' nun 0.372 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 4. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.92, DGO' nun 0.252 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 7. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.93, DGO' nun 0.203 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 12. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.80 ve DGO' nun 0.151 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 302. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.87 olarak gözlenmiştir (Şekil Ek-2.5).

%63 ince ve %13 kil içeren silt zeminlerde DGO' nun 0.250 değerinde \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesine 6. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.94 ve DGO' nun 0.202 değerinde \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesine 14. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.99 olarak gözlenmiştir (Şekil Ek-2.6).

%75 ince ve %15 kil içeren silt zeminlerde DGO' nun 0.2540 değerinde \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesine 12. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.91 ve DGO' nun 0.201 değerinde \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesine 30. çevrimde ulaşılrken boşluk suyu basıncı oranı 0.88 olarak gözlenmiştir (Şekil Ek-2.7).

Sonuç olarak dinamik gerilme seviyesinin artmasıyla boşluk suyu basınçlarının arttığı ve efektif gerilmeyi azalttığı gözlenmiştir. Deformasyonlarda ise dinamik gerilme seviyesinin artmasıyla \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının azaldığı gözlenmiştir.

6.2.2. İnce dane oranının sıvılaşmaya etkisi

Dinamik üç aksel deneyi yapılan %54 ince ve %4 kil, %51 ince ve %6 kil, %71 ince ve %9 kil, %67 ince ve %10 kil, %73 ince ve %12 kil, %63 ince ve %13 kil, %75 ince ve %15 kil ve %78 ince ve %18 kil içeren numunelerin ince dane oranının sıvılaşmaya etkisini incelemek için boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, aksel deformasyon-çevrim sayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Ek-III).

%75 ince dane yüzdesine kadar olan zeminlerin DGO' nun 0.35 iken 1. çevrimde \pm %2.5 aksel deformasyona ulaşılrken %75'in üzerindeki ince dane oranında 3. çevrimde \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesine ulaştığı gözlenmiştir (Şekil Ek-3.1).

%75 ince dane yüzdesine kadar olan zeminlerin DGO' nun 0.25 değerinde \pm %2.5 aksel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının daha büyük çevrim

sayılarında ulaştığı ve boşluk suyu basınçlarının 10. çevrimden önce pik değerleri gözlenmiştir. %75 ve üzeri ince dane yüzdelerinde ise DGO' nun 0.25 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 15. çevrimden önce ulaşıldığı gözlenmiştir (Şekil Ek-3.2).

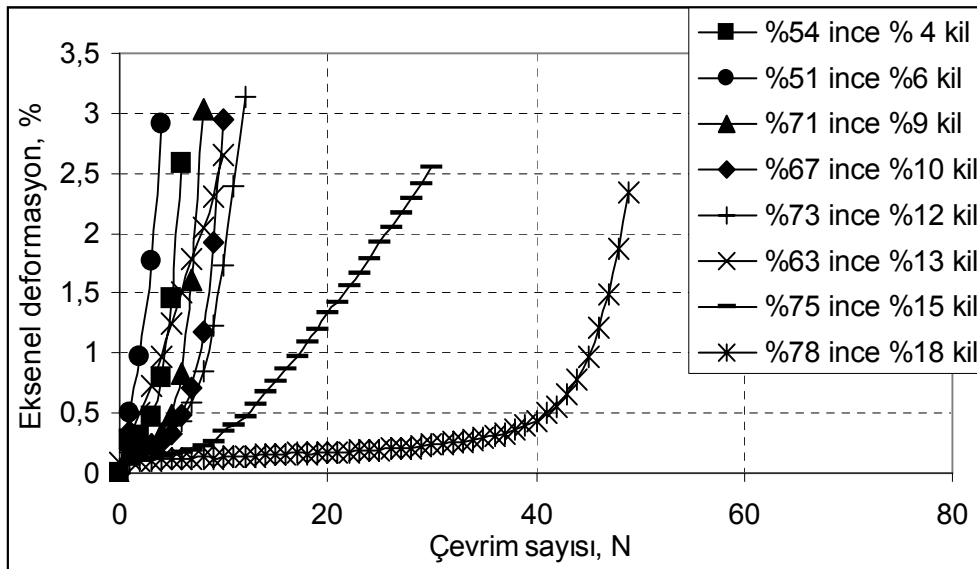
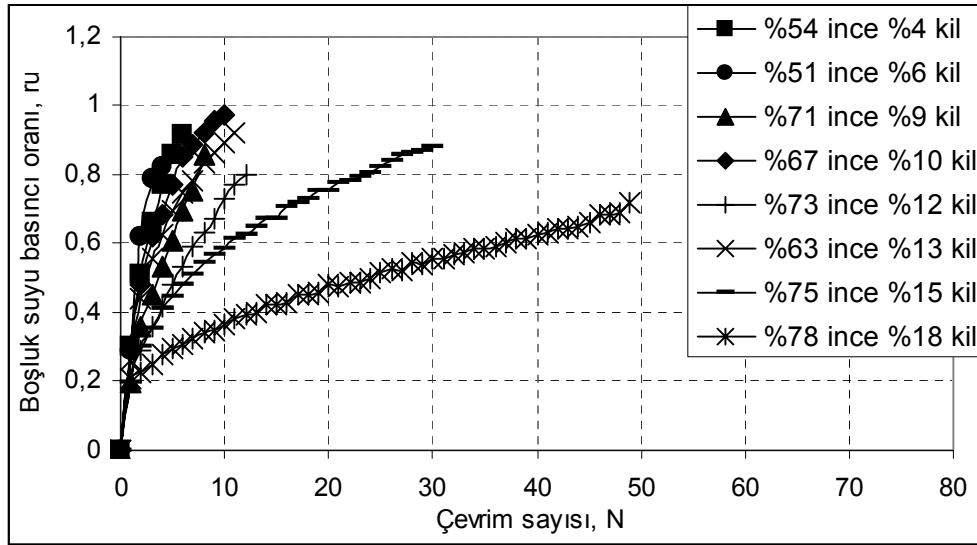
Şekil 6.8'de görüldüğü gibi %75 ince dane oranına kadar olan zeminlerin DGO' nun 0.20 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının 15. çevrimden önce ulaştığı ve boşluk suyu basınçlarının 10. çevrimden önce pik değerleri gözlenebilmiştir. %75 ve üzeri ince dane oranlarında ise DGO' nun 0.20 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 15. çevrimden sonra ulaşıldığı ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesinde boşluk suyu basıncı oranının 30. çevrimlere kadar izlenebildiği gözlenmiştir.

%75 ince dane yüzdesine kadar olan zeminlerin DGO' nun 0.15 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının 30. çevrimlerde ulaştığı %75 ve üzeri ince dane oranlarında ise DGO' nun 0.15 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 300. çevrimlerde ulaşıldığı gözlenmiştir (Şekil Ek-3.4).

Sonuç olarak, dinamik üç eksenli deneyi yapılan zemin numunelerinin ince dane yüzdesinin artmasıyla boşluk suyu basınçlarının $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesinde azaldığı, $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının ise ince dane içeriğinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir.

6.2.3. Kil içeriğinin sıvılaşmaya etkisi

Dinamik üç eksenli deneyi yapılan %54 ince ve %4 kil, %51 ince ve %6 kil, %71 ince ve %9 kil, %67 ince ve %10 kil, %73 ince ve %12 kil, %63 ince ve %13 kil, %75 ince ve %15 kil ve %78 ince ve %18 kil içeren zeminlerin kil içeriği etkisini incelemek için boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, eksenel deformasyon-çevrim sayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Ek-III).



Şekil 6.8. Farklı zeminlerin DGO=0.20 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi

Dinamik üç eksenli deneyleri yapılan numunelerin %10 kil yüzdesine kadar olan zeminlerin DGO' nun 0.35 ve 0.25 değerlerinde \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli çevrim sayısının birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmadaki tüm zeminlerin DGO' nun 0.35 ve 0.25 değerlerinde

boşluk suyu basıncı oranları istenen deformasyon değerlerinde birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu gözlenmiştir (Şekil Ek-3.1 ve Şekil Ek-3.2).

DGO' nun 0.20 ve 0.15 değerlerinde %13 ve altındaki kil yüzdelерinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli çevrim sayısındaki boşluk suyu basıncı oranlarının birbirine yakın olduğu, %13 kil yüzdesinin üzerindeki zeminlerde ise çok daha büyük çevrim sayılarında daha küçük boşluk suyu basıncı değerlerine ulaştığı gözlenmiştir (Şekil Ek-3.3 ve Şekil Ek-3.4).

Sonuç olarak, dinamik üç eksenli deneyi yapılan zemin numunelerinin ince dane yüzdesi %71-%78 arasında değişen, kil yüzdesi %9-%18 arası olan zemin numunelerinin gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu basınçları Şekil 6.9.' da karşılaştırılmıştır. Kil yüzdesi arttıkça boşluk suyu basıncı oranlarının ve deformasyon seviyelerinin azaldığı gözlenmiştir.

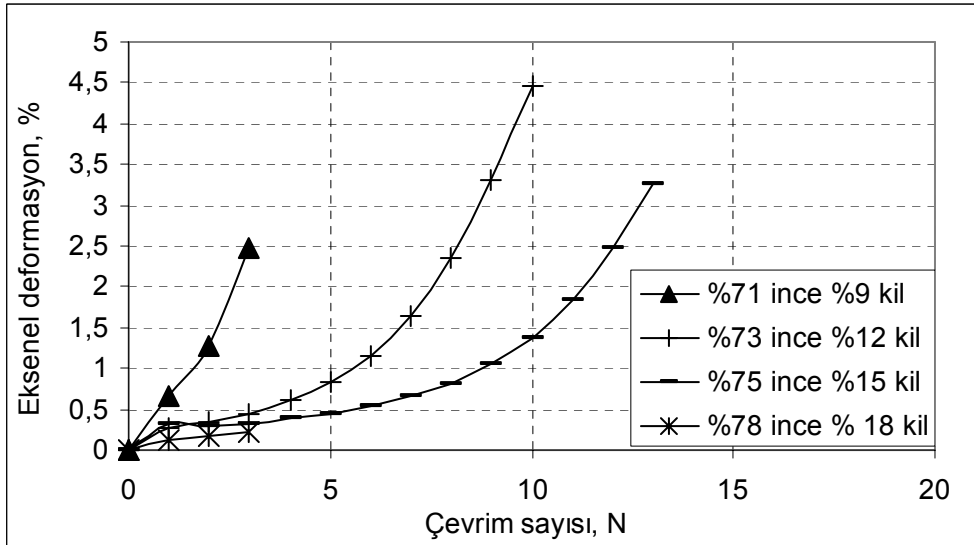
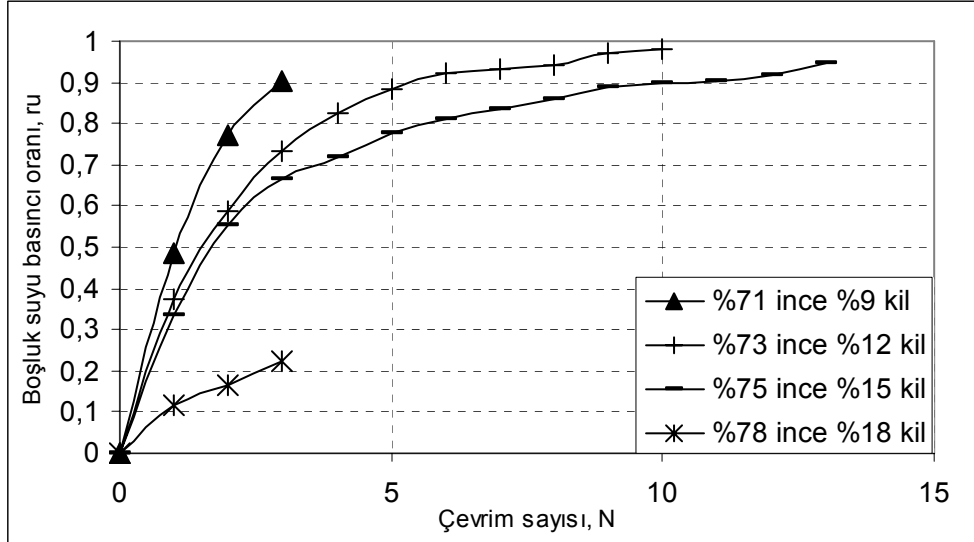
6.2.4. Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi

Dinamik üç eksenli deneyi yapılan %54 ince ve %4 kil, %51 ince ve %6 kil, %71 ince ve %9 kil, %67 ince ve %10 kil, %73 ince ve %12 kil, %63 ince ve %13 kil, %75 ince ve %15 kil ve %78 ince ve %18 kil içeren zeminlerde plastisitenin sıvılaşmaya etkisini incelemek için boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, eksenel deformasyon-çevrim sayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Ek-IV).

Dinamik üç eksenli deneyleri yapılan NP zeminlerin DGO' nun 0.35 iken 1. çevrimde istenen deformasyona ulaşırken plastisitesi belirlenebilen zeminlerin 3. çevrimde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine ulaşabildiği görülmüştür. Tüm zeminlerde DGO' nun 0.25 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 15. çevrimden önce ulaşıldığı gözlenmiştir (Şekil Ek-4.1 ve Şekil Ek-4.2).

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi NP zeminlerde DGO' nun 0.20 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının 15. çevrimden önce ulaştığı plastisitesi belirlenebilen zeminlerde DGO' nun 0.20 değerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine 15. çevrimden sonra ulaşıldığı ve $\pm\%2.5$ eksenel

deformasyon seviyesinde boşluk suyu basıncı oranının 40. çevrimlere kadar izlenebildiği gözlenmiştir.



Şekil 6.9. Farklı zeminlerin DGO=0.25 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi

NP zeminlerde DGO' nın 0.15 değerinde ± 2.5 eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının 30. çevrimlerde ulaştığı plastisitesi belirlenebilen zeminlerin ise DGO' nın 0.15 değerinde ± 2.5 eksenel deformasyon seviyesine 300. çevrimlerde ulaşıldığı gözlenmiştir(Şekil Ek-4.4).

Sonuç olarak, dinamik üç eksenli deneyinde plastik davranış göstermeyen zemin numunelerinin küçük çevrim sayılarında daha büyük boşluk suyu basıncı ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısının daha küçük değerlerde olduğu gözlenmiştir. Plastik davranış gösteren zemin numunelerinin 20. çevrimi referans aldığımızda daha küçük boşluk suyu basıncı oranında ve deformasyon seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Plastisite arttıkça boşluk suyu basıncı oranları ve deformasyon seviyelerinin azaldığı gözlenmiştir.

6.3. Sıvılaşılabirliğin üç değişkenli olarak tanımlanması

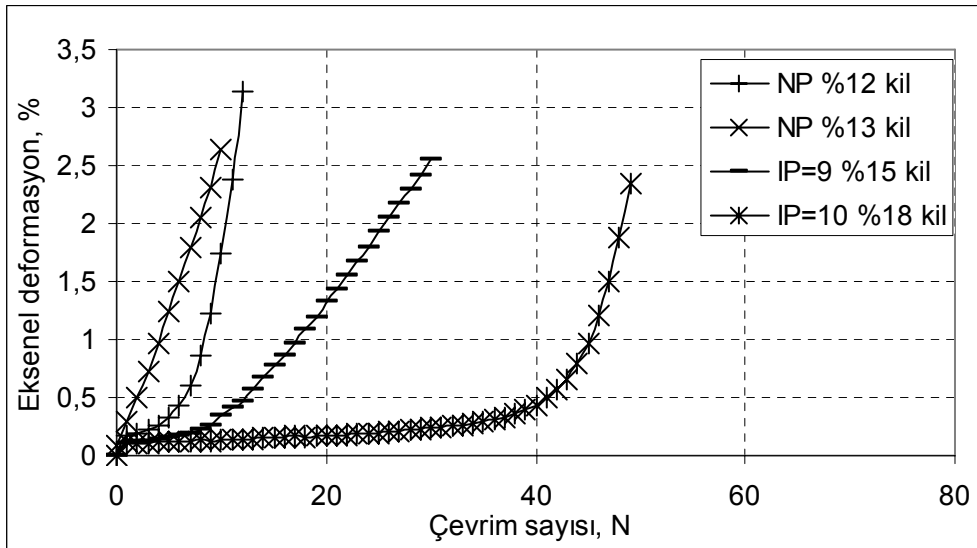
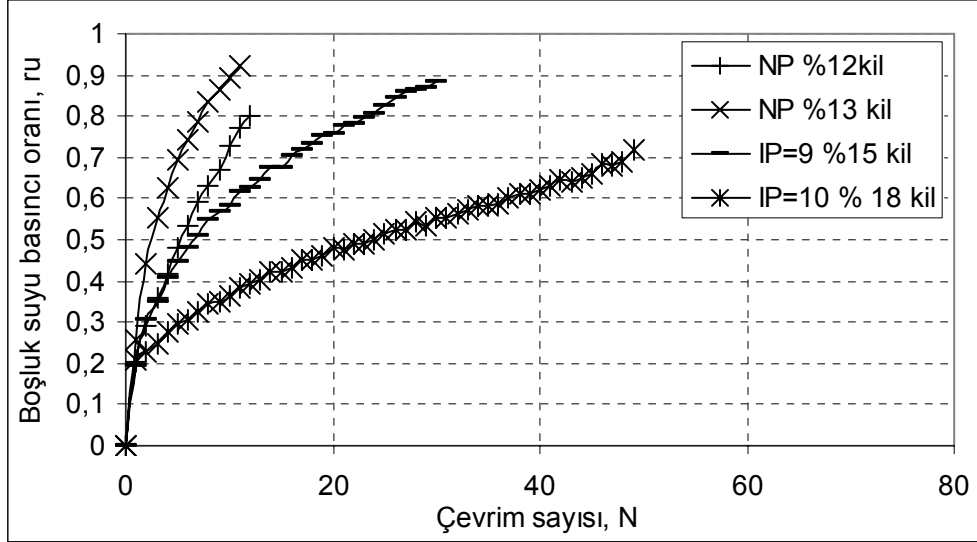
Numunelerde yenilmenin üç veya daha fazla değişkence kontrol edildiği bulgusu çizilen bağıntıların iki boyutlu yerine blok diyagramla temsil edilmesi fikrini doğurmuştur. Üç değişkenli grafiklerde, DGO değerlerinin daha iyi görünmesi için bunlar 100 ile çarpılmıştır. Grafikler sırasıyla;

Şekil 6.11.(a)'daki eksenler ince yüzdesi, dinamik gerilme oranı ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısını göstermektedir. Şekil 6.11.(b)'de ince dane yüzdesi ile dinamik gerilme oranı değerlerinin iki boyutlu verildiği grafik üzerinde 15. çevrimdeki $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi izlenebilmektedir. Grafik çiziminden DGO azalması ve ince içeriğinin artmasıyla $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon için gerekli çevrim sayısının arttığı görülmektedir.

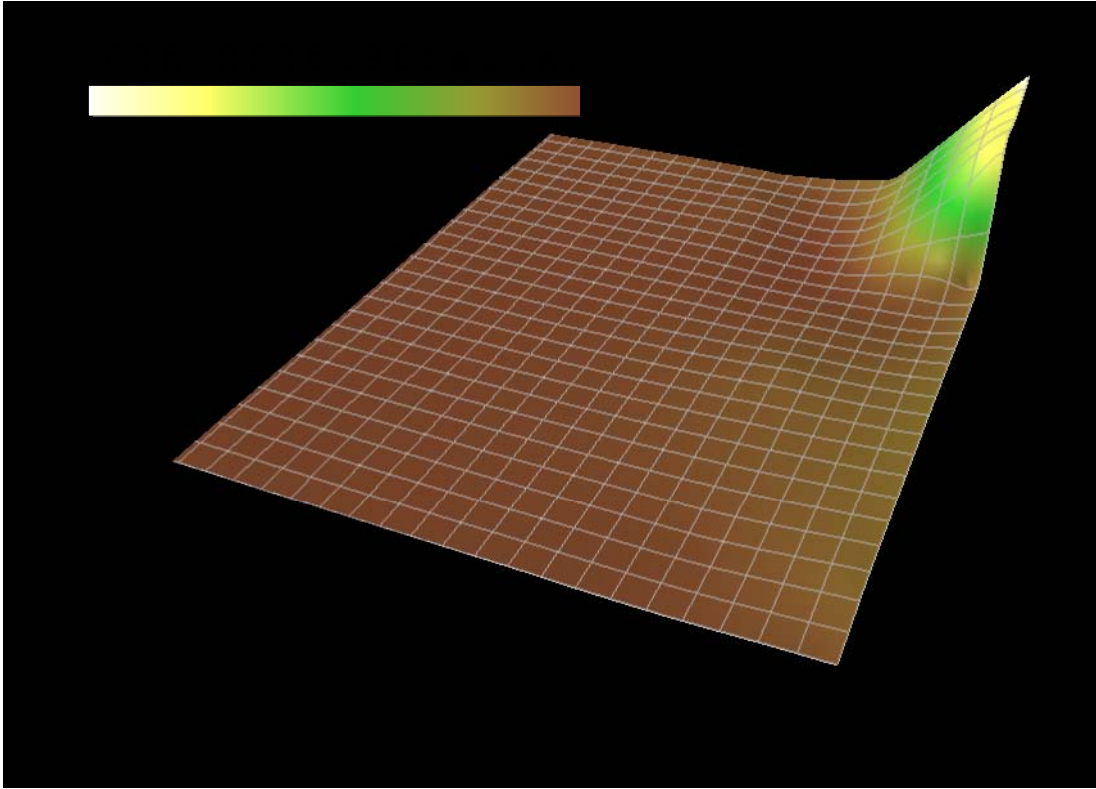
Şekil 6.12.(a)'da, kil yüzdesi, dinamik gerilme oranı ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısı N gösterilmektedir. Şekil 6.12.(b)'de kil yüzdesi ile dinamik gerilme oranı değerlerinin iki boyutlu verildiği, grafik üzerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısı N değeri izlenebilmektedir. Grafik çiziminden DGO azalması ve kil içeriğinin artmasıyla $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon için gerekli çevrim sayısının arttığı görülmektedir.

Şekil 6.13.(a)'da kil yüzdesi, ince yüzdesi ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon için gerekli çevrim sayısı N gösterilmektedir. Şekil 6.13.(b)'de kil yüzdesi ve ince yüzdesi değerlerinin iki boyutlu verildiği, grafik üzerinde $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon değişimi izlenebilmektedir. Grafik çiziminden ince içeriğinin artması

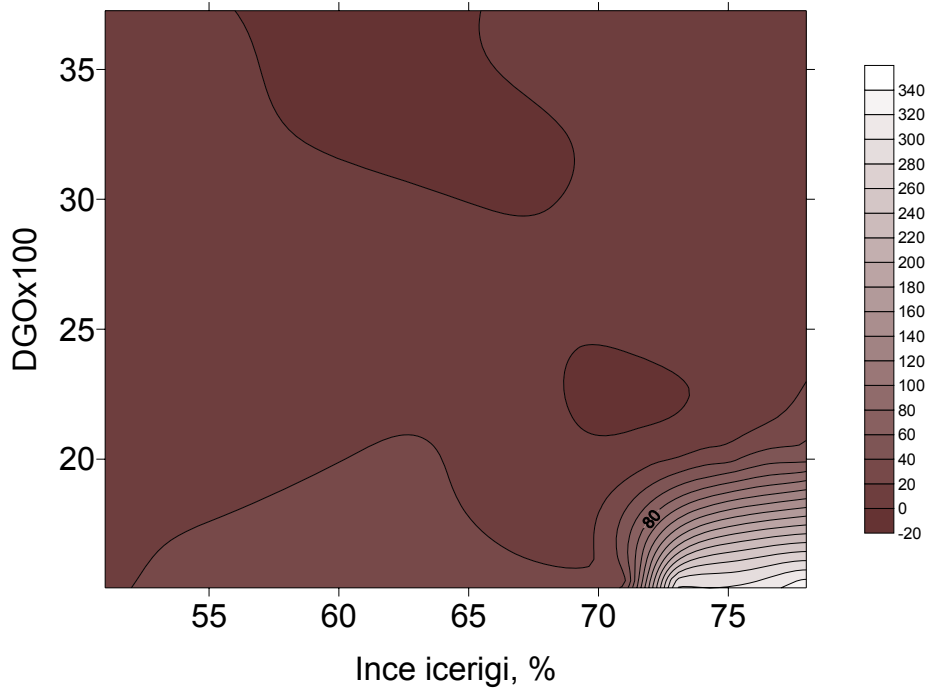
ve bu ince yüzdesindeki kil içeriğinin artması $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon için gerekli çevrim sayısının arttığı görülmektedir.



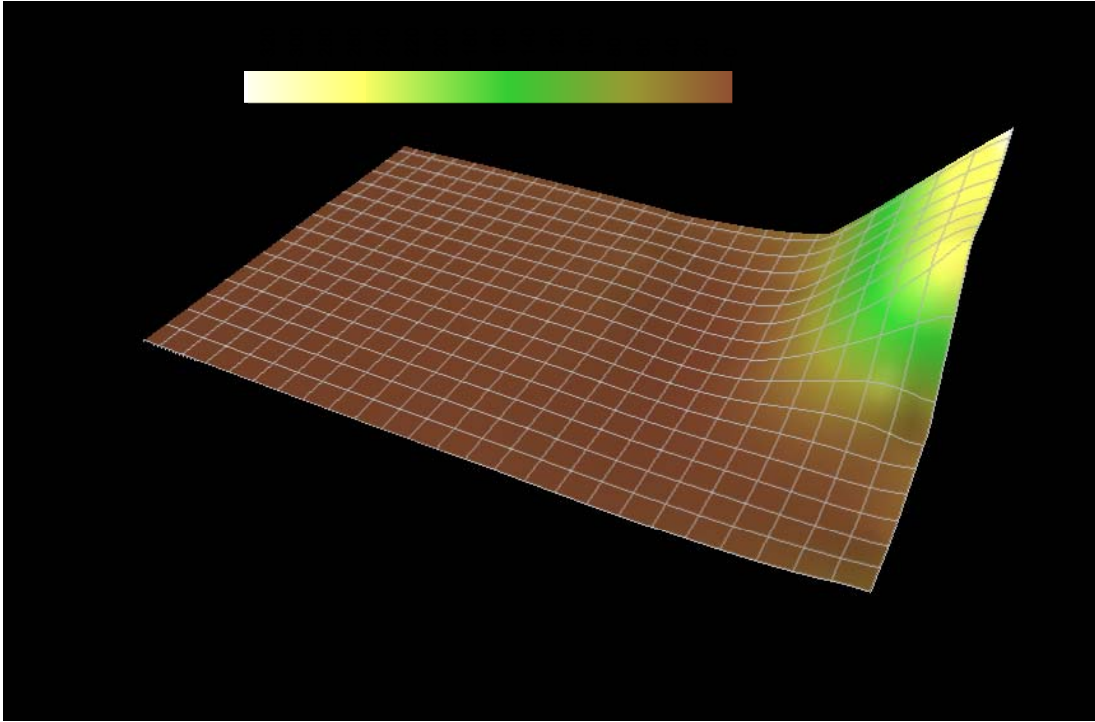
Şekil 6.10. Farklı zeminlerin DGO=0.20 değerinde boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



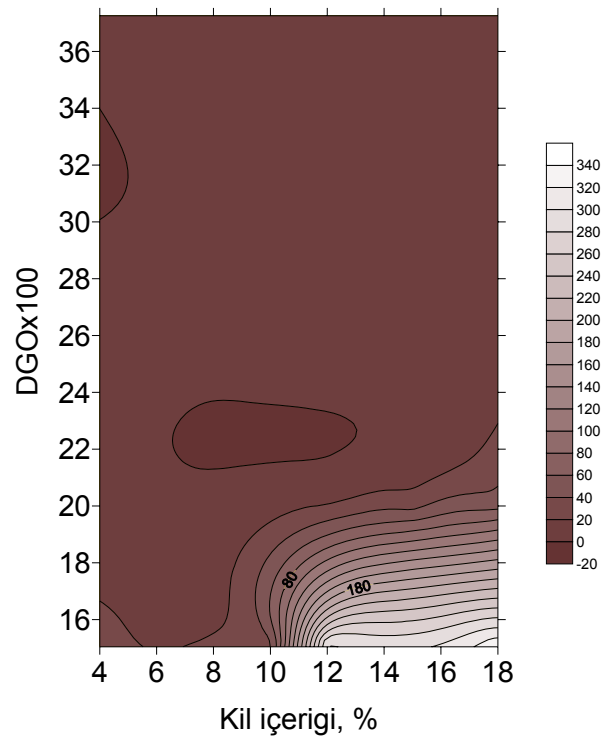
Şekil 6.11. (a) İnce içeriği, DGO ve çevrim sayısı arasındaki ilişki



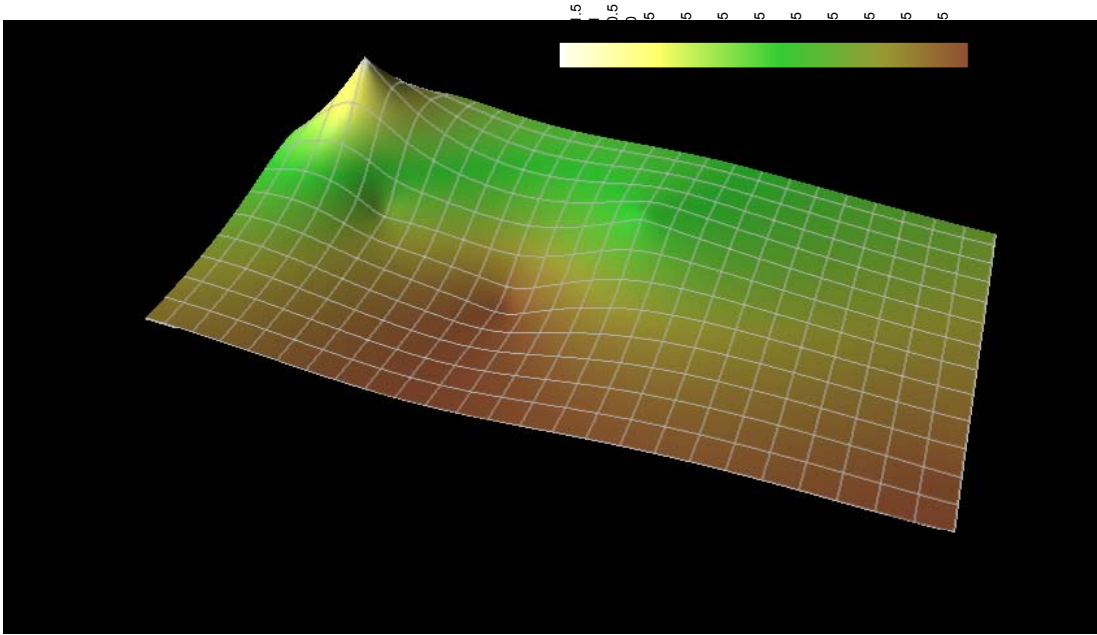
Şekil 6.11. (b) İnce içeriği ve DGO arasındaki ilişki



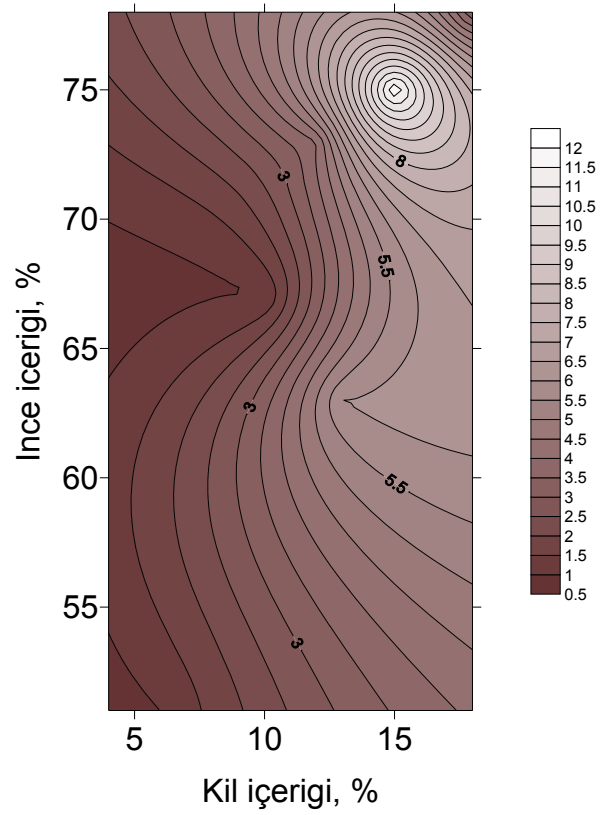
Şekil 6.12. (a) Kil içeriği, DGO ve çevrim sayısı arasındaki ilişki



Şekil 6.12. (b) Kil içeriği ve DGO arasındaki ilişki



Şekil 6.13. (a) Kil içeriği, ince içeriği ve çevrim sayısı arasındaki ilişki



Şekil 6.13. (b) Kil içeriği ve ince içeriği arasındaki ilişki

6.4. Deneysel Sonuçların Sıvılaşma Kriterleri ile Karşılaştırılması

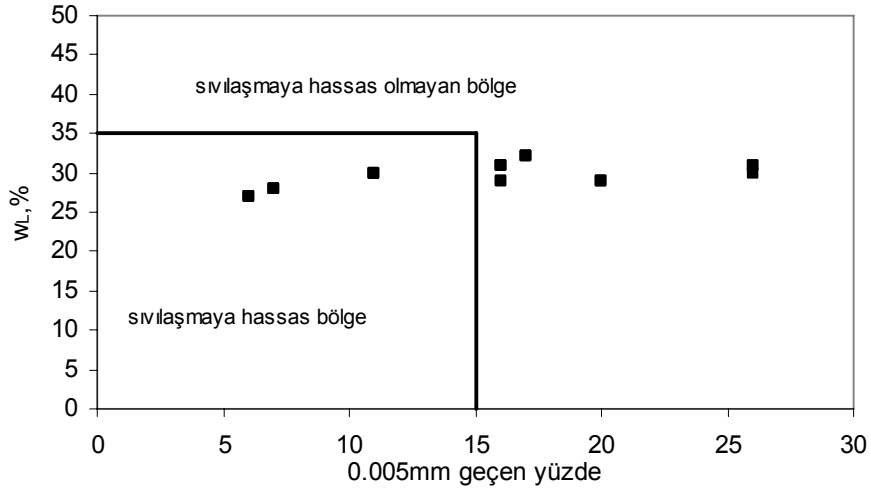
Bu tez kapsamında dinamik üç eksenli deneyleri %4, %6, %9, %10, %12, %13, %15, %18 kil yüzdeli silt zeminlerde DGO değerleri 0.35, 0.25, 0.20 ve 0.15 olacak şekilde yapılmıştır. Deney sonuçları Seed ve Idriss (1981) kriterine göre numunelerin \pm %2.5 eksenel deformasyon seviyesine ulaşabildiği noktalanmıştır. Bu çalışmadaki deney sonuçları, Çin Kriteri (Wang, 1979), Andrews ve Martin (2000), Bray ve Sancio (2006) ve Önalp ve diğerleri (2006) çalışmaları sonucu önerdikleri kriterlerle karşılaştırılmıştır.

Son yıllarda Çin Kriterinin gözlemsel verilerle karşılaştırılması araştırmacıların bu kritere ihtiyatla yaklaşması sonucunu getirmiştir. Şekil 6.14.(a)' da bu çalışmada kullanılan numunelerin sonuçları Çin Kriteri diyagramı üzerine noktalanmıştır. Buradan görüldüğü gibi, laboratuvarında yapılan ölçüm/gözlem sonuçları sıvılaşmaya hassas ve hassas olmayan bölgelere rastgele saçılmış bir görünüm vermiştir. Şekil 6.14.(b)' de ise numunelerin tümü sıvılaşmaya hassas bölgeye girerken, Çin Kriteri'nin yeterince duyarlı teşhis yapamadığı kuşkusunu uyanmaktadır.

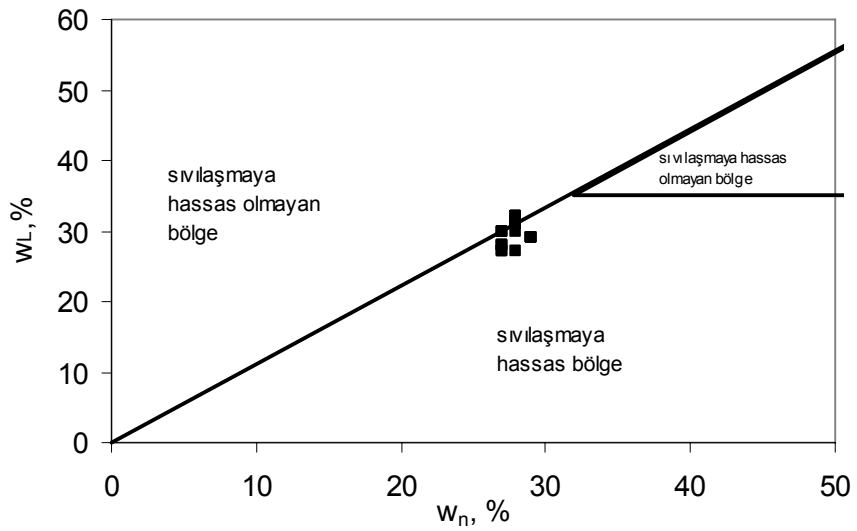
1999 Kocaeli depreminden sonra Adapazarı zeminlerinde yapılan deneyler ve gözlemlerde bu kriter ile deney sonuçlarının uyumlu olmadığı görülmüştür. Şekil 6.15.(a) ve Şekil 6.15.(b)' den görüldüğü gibi, Çin Kriterine göre sıvılaşmaya hassas olmayan bölgeye dinamik üç eksenli deneyin sonucu sıvılaştığı görülen zeminlerin noktalandığı, aynı şekilde sıvılaşmaya hassas bölgeye dinamik üç eksenli deneyi sonucu sıvılaşmayan zeminlerinin noktalandığı görülmektedir. Çin Kriterinin laboratuvarında dinamik deneyler yapılmaksızın fiziksel deneylere ve gözlemsel verilere dayanması sebebiyle bu uyumsuzluğun belirdiği düşünülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan zeminlerin sonuçları Şekil 6.16.' da görüldüğü gibi Andrews ve Martin (2000) grafiğinin üzerine noktalandığında, bunların sıvılaşmaya duyarlı ve deney gerektiren bölgelere yayıldığı görülmektedir. Şekil 6.17.' da görüldüğü gibi sıvılaşmaya hassas bölgeye, dinamik üç eksenli deneyde sıvılaşmayan zemin numunelerinin noktalandığı görülmüştür. Ek çalışma gerektiren bölgeye ise dinamik üç eksenli deneyde sıvılaşan ve sıvılaşmayan zemin numunelerinin noktalandığı

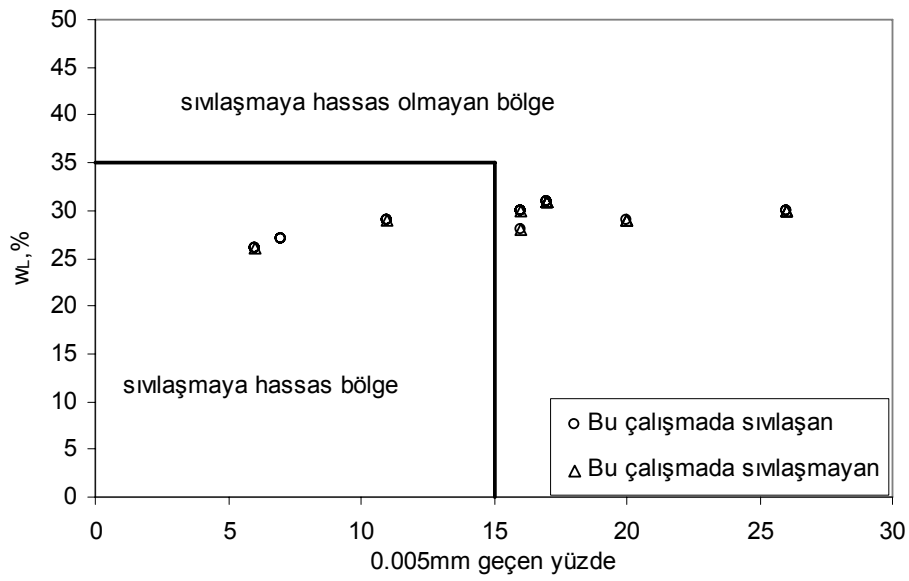
görülmüştür. Sonuç olarak, Andrews ve Martin (2000)' in önerdiği kriterin sıvılaşmayı yeterince teşhis yapamadığı kuşkusunu uyanmaktadır.



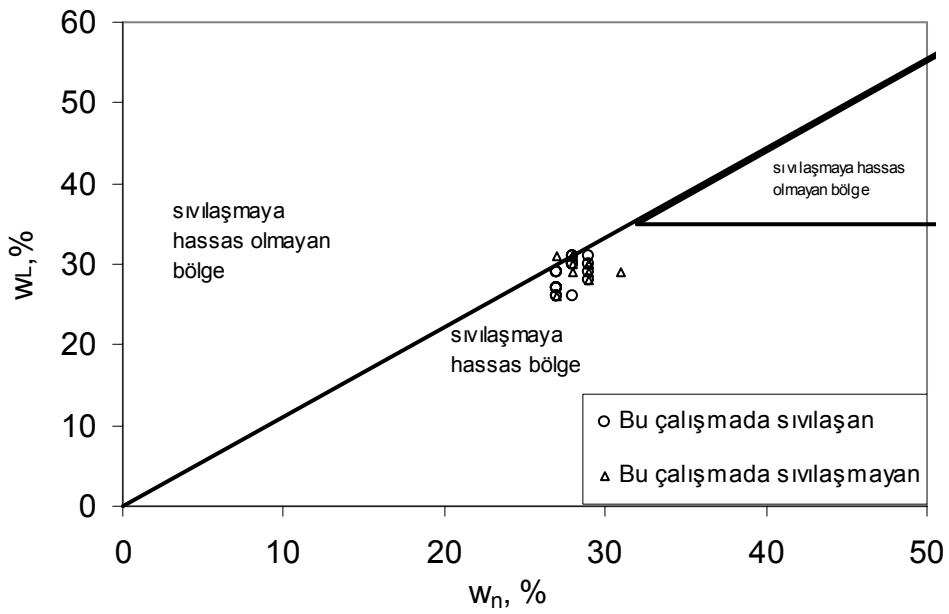
Şekil 6.14. (a) Bu çalışmada kullanılan zemin numunelerinin Çin Kriteri'nde bulunduğu bölgenin gösterilmesi, w_L -%0.005 mm



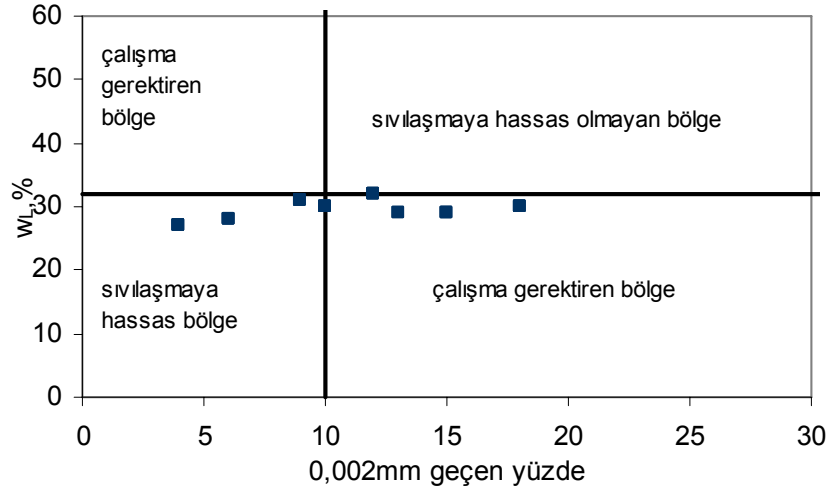
Şekil 6.14. (b) Bu çalışmada kullanılan zemin numunelerinin Çin Kriteri'nde bulunduğu bölgenin gösterilmesi, w_L - w_n .



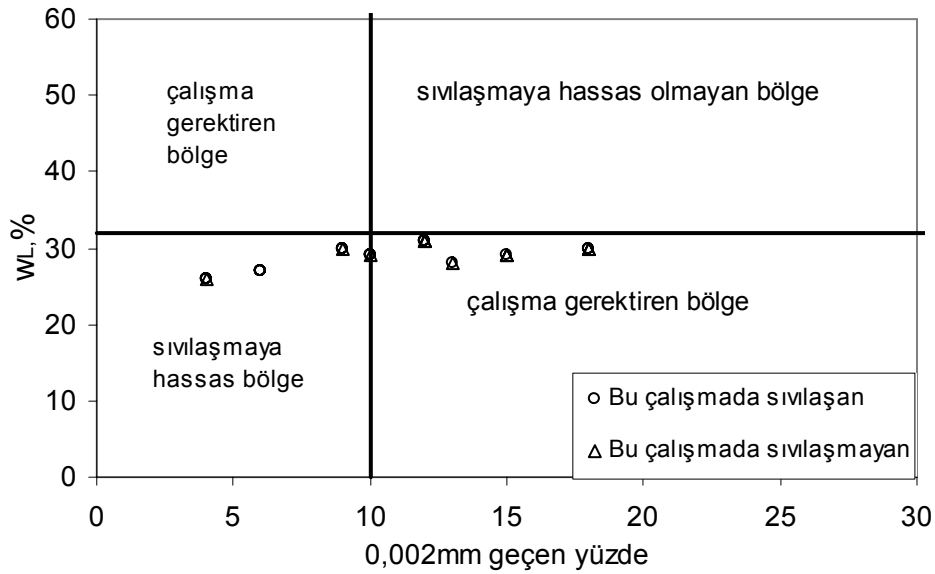
Şekil 6.15. (a) Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Çin Kriteri ile karşılaştırılması: w_L -%0.005 mm



Şekil 6.15. (b) Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Çin Kriteri ile karşılaştırılması: w_L - w_n



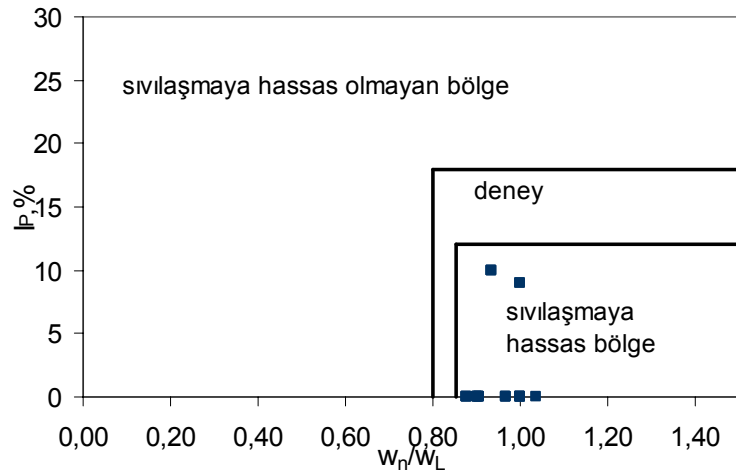
Şekil 6.16. Bu çalışmada kullanılan zeminlerin Andrews ve Martin (2000) kriteri üzerinde gösterilmesi, w_L -%0.002 mm



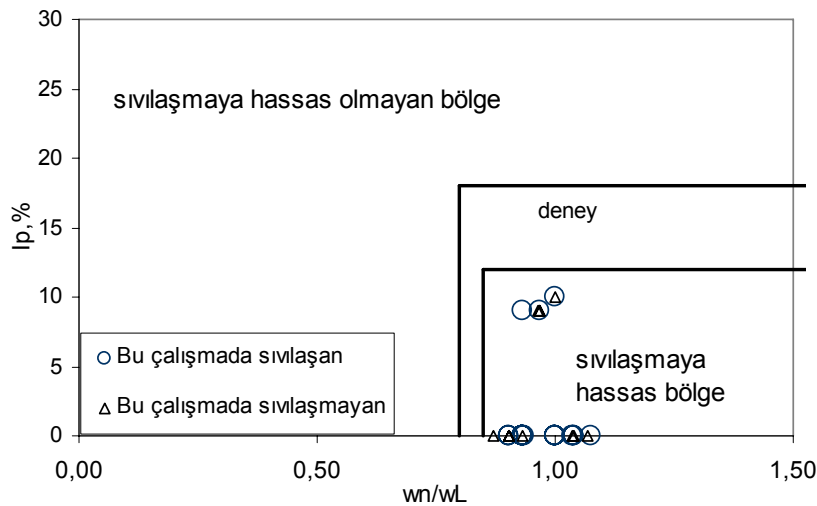
Şekil 6.17. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Andrews ve Martin (2000) kriteri ile karşılaştırılması, w_L -%0.002 mm

Bu çalışmada kullanılan zeminlerin sonuçları Şekil 6.18. ve Şekil 6.19.' de görüldüğü gibi Bray ve Sancio (2006)'nın önerdiği grafiğin üzerine noktalandığında,

zeminlerin tümünün sıvılaşmaya hassas bölgede yer aldığı görülmektedir. Öncelikle, bu araştırmacıların yapmış oldukları dinamik üç eksenli deneylerinin düşük hücre basınçlarıyla gerçekleştirildiğinin belirtilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Kaldı ki, bu öneriye göre bazı CH killer dahi sıvılaşabilir görünmektedir (Kun Li ve diğerleri, 2007). NP siltlerin ağırlıkta olduğu Adapazarı'nda $I_p=12$ koşulu da gerçekçi bir öneri gibi görünmemektedir. Bu nedenle, öneri tartışılabilir nitelik taşımaktadır.

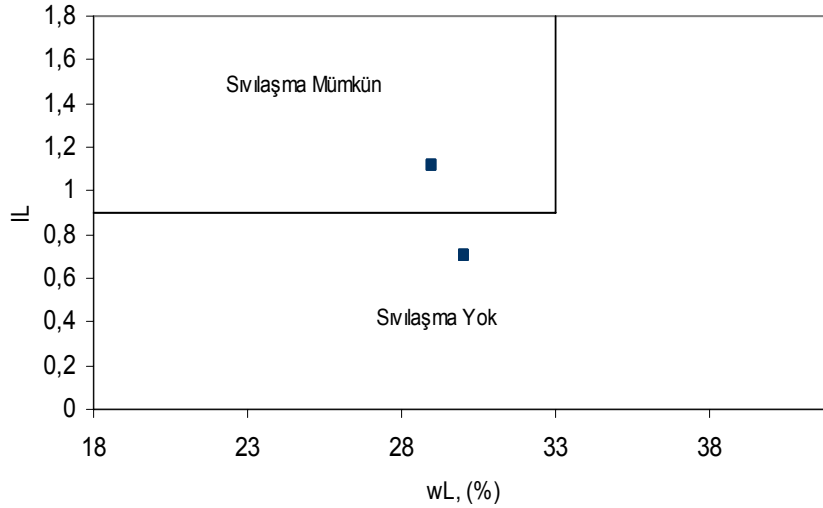


Şekil 6.18. Bu çalışmada kullanılan zeminlerin Bray ve Sancio (2006) kriteri üzerinde gösterilmesi, $I_p - w_n/w_L$



Şekil 6.19. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Bray ve Sancio (2006) kriteri ile karşılaştırılması, $I_p - w_n/w_L$

Önalp ve diğ. (2006), Y.A.S.S. altındaki silt ortamlarında ve $M_w > 7$ koşulunda sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli koşulları araştırmıştır. İncelenen zeminlerin tümünün $w_L < 33$ ' tür. Bu çalışmada kullanılan zeminlerin sonuçları Şekil 6.20.' de görüldüğü gibi Önalp ve diğ. (2006)' nın önerdiği grafiğin üzerine, 8 farklı zeminden sadece %15 ve %18 kil yüzdesindeki zemin numunelerinin noktalandığı görülmektedir. Diğer 6 numunenin plastik davranış göstermemesi sonucu sıvılık indisi hesaplanamamakta ve grafik üzerinde noktalanamamaktadır. Şekil 6.21' de bu çalışma kapsamında yapılan dinamik üç eksenli deneylerde sıvılaşmadığına karar verilen numunelerin Önalp ve diğ. (2006) kriterine göre dağılık şekilde yer aldığı görülmektedir.

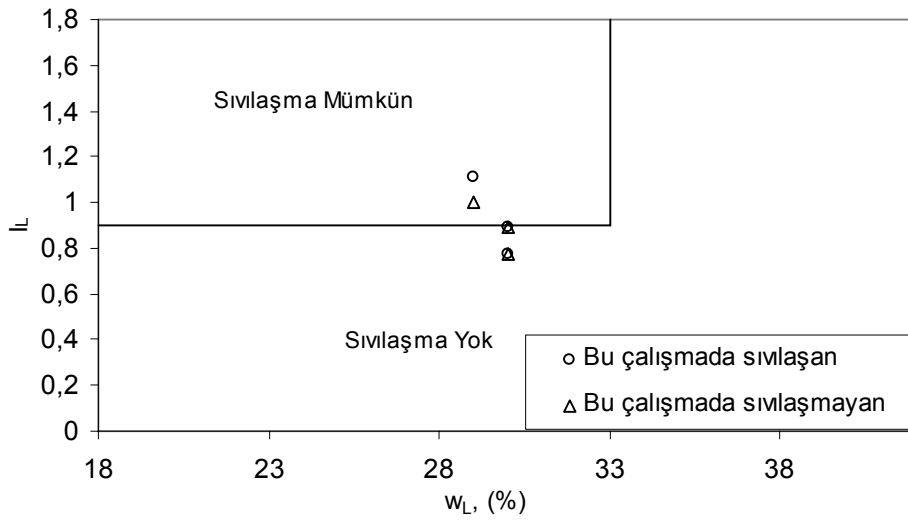


Şekil 6.20. Bu çalışmada kullanılan numunelerin Adapazarı Kriteri üzerinde gösterilmesi, I_L - w_L

ML sınıfında ve likit limiti ölçülebilse dahi plastik limiti belirlenemeyen zeminlerde Şekil 6.20. ve Şekil 6.21.' de yapılan karşılaştırmada sıvılaşmayı değerlendirirken eksik bir parametre olabileceği kuşkusunu getirmiştir. Önalp ve diğ. (2006)' da başlangıç sıvılaşmasının numunenin kum içeriğinin yüksek olmasına, bir başka deyişle zeminin kumsu karakterine bağlı olduğu görüşü getirilmiştir. Bu, ortalama dane boyutunun $D_{50} > 0.02$ mm olması ek koşul getirmişlerdir. Sıvılaşma tayininde sadece kilin etkisini incelemenin pek doğru olmayacağı görüşü ile aynı kil yüzdesine sahip silt numuneleri içerdikleri kum oranına bağlı olarak birbirinden farklılık gösterecek ve dolayısı ile ortalama dane boyutlarının farklı olacağını söylemişlerdir.

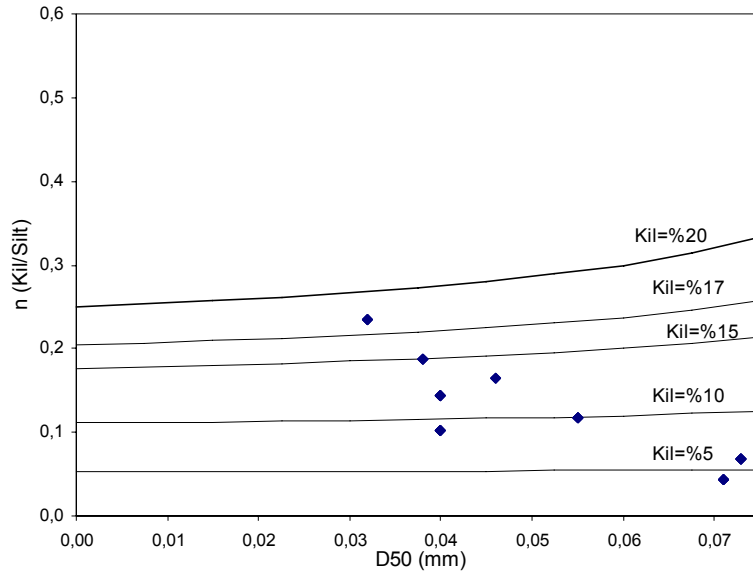
Bu sebeple (Kil/Silt) oranı kum içeriğine bağlı olarak değişen bir “n” katsayısı ile çarpılarak söz konusu oranda bir tür normleştirme yapmışlardır. Kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri Şekil 6.22’ de Önalp ve diğ. (2006) kriterine göre D_{50} ile $n_x(\text{Kil/Silt})$ eksenleri üzerinde gösterilmiştir.

$$n = 1 - \left[\frac{\%kum}{100} \right] \quad (6.2)$$

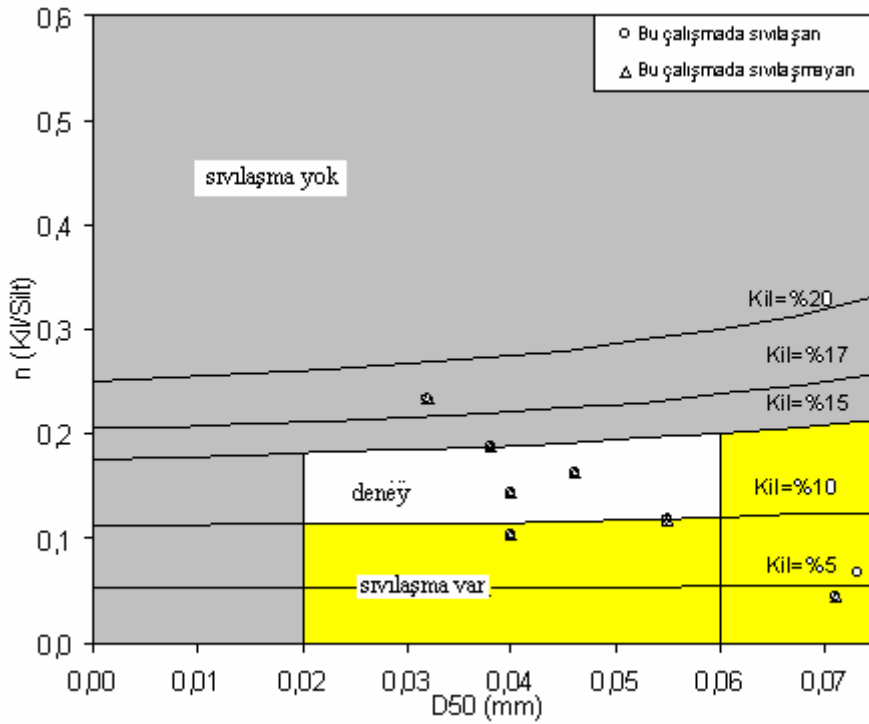


Şekil 6.21. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Adapazarı Kriteri ile karşılaştırılması, I_L - w_L

Dinamik üç eksenli deneyleri yapılan zemin numunelerinin bu kritere göre sıvılaşmış ve sıvılaşmamış Şekil 6.23.’ da karşılaştırılmıştır. Önalp ve diğ. (2006) çalışmasında verdikleri D_{50} ile $n_x(\text{Kil/Silt})$ grafiğinde sıvılaşma olan, sıvılaşma olmayan ve deney bölgesi üzerine dinamik üç eksenli deney sonuçlarının dağılık olarak noktalandığı görülmekte ve kriterin sıvılaşmayı yeterince teşhis yapamadığı kuşkusunu uyanmaktadır.



Şekil 6.22. Bu çalışmada kullanılan numunelerin Adapazarı Kriteri üzerinde gösterilmesi, $n_x(\text{kil/silt})-D_{50}$



Şekil 6.23. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarının Adapazarı Kriteri ile karşılaştırılması, $n_x(\text{kil/silt})-D_{50}$

Boulanger ve Idriss' in (2007) zeminleri 'kumsu' ($I_p < 7$) ve 'kilsli' ($I_p \geq 7$) olarak ayırmasına göre, bu çalışma kapsamında denenen numunelerin I_p değerlerine bakıldığında %4, %6, %9, %10, %12 ve %13 kil içerikli zeminlerde $I_p < 7$ olduğundan kumsu; kil içeriği %15 ve %18 olan zeminlerin $I_p > 7$ olduğundan kilsli oldukları sonucu çıkmaktadır. Bu da, en azından %15 ve %18' lik zeminlerin sıvılaşma yeteneğinin boşluk suyu basıncı oranının %100 değerine ulaşmasından ziyade ± 2.5 eksenel deformasyon seviyesine göre sıvılaşmanın olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında denenen zeminlerde plastik davranış göstermeyen zemin numunelerinin sıvılaşması için gerekli çevrim sayılarının çok düşük değerlerde olduğu gözlemlenirken plastisik davranış gösteren zemin numunelerinin sıvılaşması için gerekli çevrim sayılarının daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Adapazarı kalınlığı oldukça fazla olan genç silt çok derin ve genç silt ve siltli kum çökeller üzerine kurulu olması nedeniyle dünyada az rastlanır zemin özellikleri göstermektedir. 1998' den bu yana yapılmakta olan araştırmalarda ince daneli zeminlerin sıvılaşma olayında etkili rol oynadığı belirlenmiştir. Bu tezde, farklı ince ve kil yüzdesine sahip zeminlerin dinamik davranışları incelenmiş ve dinamik gerilme oranının, ince dane yüzdesinin, kil yüzdesinin ve plastisitenin sıvılaşmaya etkisi incelenmiştir. Ayrıca ince daneli zeminlerin sıvılaşma yeteneğini tayin etmede kullanılan arazi gözlemlerine dayalı sıvılaşma kriterlerinin, Adapazarı siltlerinin sıvılaşma yeteneğini tam olarak yansıtamadığı kuşkusu ile sıvılaşma kriterleri ile %4 ile %18 arasında kil yüzdesinde hazırlanmış silt numunelerinin dinamik üç eksenli deneyler sonuçları karşılaştırılmış ve aşağıda maddeler halinde elde edilen sonuçlar verilmiştir.

1. Adapazarı gibi akarsu/göl ortamlarında çökelmiş çok genç zeminlerin geoteknik özelliklerinin laboratuvarında belirlenmesinde numune hazırlama yönteminin seçiminin önemli olduğu düşünülmüştür. Bu çalışmada, laboratuvarında Adapazarı zeminlerinin doğadaki oluşumunu en iyi benzeştiren yöntem olarak bulamaç çökeli yöntemi seçilmiştir.

2. Siltli zeminlerin laboratuvarında dinamik üç eksenli deney uygulamalarında numunelerin yükleme frekansının önemi ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, yükleme frekansı için 1 Hz, 0.5 Hz ve 0.05 Hz değerleri kullanılarak dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. 0.5 Hz frekansında yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarından boşluk suyu basıncının daha iyi gözlemlendiği için Adapazarı zeminleri gibi genç akarsu ortamlarında oluşmuş yumuşak ince daneli zeminler için (ML, MI, CL) dinamik üç eksenli deneylerde frekansın 0.5 Hz olarak kullanılması uygun görülmüştür.

3. Genel olarak kil yüzdesi fazla olan zeminlerin dinamik mukavemeti yüksek olmaktadır. Kil yüzdesi \leq %10 zeminlerde aynı dinamik gerilme oranında (DGO) \pm %2.5 aksenal deformasyon için gerekli çevrim sayıları birbirine oldukça yakın çıkmaktadır. Bu davranış, kil yüzdesinin belirli bir oranın altında olması nedeniyle zeminin “kumsu” özellik gösterdiği düşünülmektedir. Kil yüzdesi %13’ün üstündeki zeminlerde ise \pm %2.5 aksenal deformasyona DGO \geq 0.25 değerinde 15. çevrimden önce ulaşılmaktadır. Kil yüzdesi %13’ün üstündeki zeminlerde DGO $<$ 0.25 durumunda 15. çevrimden sonra \pm %2.5 aksenal deformasyon seviyesine ulaşıldığı görülmektedir. Bu davranışlar sebebi ile zeminlerin “kilsu” özellik gösterdiği düşünülmüştür

4. İki boyutlu olarak çizilen DGO-D₃₀ grafiğinden sıvılaştıran-sıvılaştırmayan bölgelerin ayrıldığı görülmektedir. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarından DGO’ nın değerinin 0.25 ve üzerinde olduğunda zemin numunelerinin sıvılaştığı, DGO’ nın değeri 0.25’in altında ise sıvılaştıran ve sıvılaştıran/sıvılaştırmayan zemin numunelerinin noktalmasıyla Şekil 6.5’i 3 bölgede değerlendirebileceğimiz görülmüştür. DGO değerini yatayda sınır çizgisi olarak çizdiğimizde DGO 0.25’in altındaki bölgenin ise

$$DGO = 0.0621(D_{30})^{-0.2871}$$

denklemlerle ayrılabilirliği görülmektedir. Formülle ayrılan sınır çizgisinin sağındaki bölgeye farklı DGO’ da yapılan dinamik üç eksenli deneylerinden sıvılaştıran ve sıvılaştırmayan deneylerin noktalandığı görülmektedir. Bundan dolayı bu bölge deney gerektiren bölge olarak isimlendirilmiştir. Sınır çizgisinin solundaki bölgeye ise farklı DGO’ da yapılan dinamik üç eksenli deneylerinden sıvılaştırmayan deneylerin noktalandığı görülmektedir. Bundan dolayı bu bölge sıvılaştırmayan bölge olarak isimlendirilmiştir.

5. Bu çalışmada yapılan dinamik üç eksenli deneylerindeki zemin numunelerinde dinamik gerilme seviyesinin artmasıyla boşluk suyu basınçlarının arttığı ve efektif gerilmeyi azalttığı gözlenmiştir. Deformasyonlarda ise dinamik gerilme seviyesinin artmasıyla \pm %2.5 aksenal deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının daha küçük değerlerde olduğu gözlenmiştir.

6. Dinamik üç eksenli deneyi yapılan zemin numunelerinin ince dane yüzdesinin(200 nolu elek altı) artmasıyla boşluk suyu basınçlarının $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesinde azaldığı gözlemlenmiştir. $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının ise ince dane içeriğinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir.

7. Dinamik üç eksenli deneyi yapılan zemin numunelerinin ince dane yüzdesi $\%71$ - $\%78$ arasında değişen, kil yüzdesi $\%9$ - $\%18$ arası olan zemin numunelerinin gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu basınçları karşılaştırılmış ve kil yüzdesi arttıkça boşluk suyu basıncı oranlarının ve deformasyon seviyelerinin azaldığı gözlenmiştir.

8. Dinamik üç eksenli deneyinde, plastik davranış göstermeyen zemin numunelerinin küçük çevrim sayılarında daha büyük boşluk suyu basıncı ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısının daha küçük değerlerde olduğu gözlenmiştir. Plastik davranış gösteren zemin numunelerinin 20. çevrimi referans aldığımızda daha küçük boşluk suyu basıncı oranında ve deformasyon seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Plastisite arttıkça boşluk suyu basıncı oranları ve deformasyon seviyelerinin azaldığı gözlenmiştir.

9. Üç boyutlu grafik sonuçlarından kil yüzdesi, dinamik gerilme oranı ve $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısını temsil eden grafik çiziminden DGO azalması ve ince içeriğinin, kil yüzdesinin artmasıyla $\pm\%2.5$ eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının arttığı görülmektedir.

10. Bu çalışmada yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları Çin Kriterine göre çizilen grafikler üzerine noktalandığında; dinamik üç eksenli deneyinin sonucu sıvılaştıran zeminlerin sıvılaşmaya hassas olmayan bölgeye de noktalandığı, aynı şekilde sıvılaşmaya hassas bölgeye dinamik üç eksenli deneyinin sonucu sıvılaşmayan zeminlerin noktalandığı görülmektedir.

11. Bu çalışmada kullanılmış zeminlerin sonuçları Andrews ve Martin (2000) grafiğinin üzerine noktalandığında, bunların sıvılaşmaya duyarlı ve deney gerektiren bölgelere yayıldığı görülmektedir. Sıvılaşmaya hassas bölgeye, dinamik üç eksenli deneyde sıvılaşmayan zemin numunelerinin noktalandığı görülmüştür. Ek çalışma

gerektiren bölgeye ise dinamik üç eksenli deneyde sıvılaştıran ve sıvılaştırmayan zemin numunelerinin noktalandığı görülmüş ve kriterin sıvılaştırmayı yeterince teşhis yapamadığı düşünülmektedir.

12. Bu çalışmada kullanılan zemin numuneleri Bray ve Sancio (2006) tarafından önerilen grafiğin üzerine noktalandığında, Dinamik üç eksenli deneyde sıvılaştırmayan zemin numunelerinin de sıvılaştırmaya hassas bölge içinde yer aldığı görülmüştür. Bu araştırmacıların yapmış oldukları dinamik üç eksenli deneylerinin düşük hücre basınçlarıyla gerçekleştirilmesi nedeniyle öneri tartışılabilir nitelik taşımaktadır.

13. Dinamik üç eksenli deneyleri yapılan zemin numunelerinin Önalp ve diğ. (2006) çalışmasında verdikleri D_{50} ile $n_x(\text{Kil/Silt})$ grafiğinde, sıvılaştıran, sıvılaştırmayan ve deney bölgeleri üzerine yayıldığı görülmekte ve bu kriterin de sıvılaştırmayı yeterince teşhis yapamadığını göstermektedir.

14. Bu tez çalışmasında incelenen zemin numunelerinde plastik davranış göstermeyen zemin numunelerinin sıvılaştırması için gerekli çevrim sayılarının çok düşük değerlerde olduğu gözlemlenirken plastik davranış gösteren zemin numunelerinin de sıvılaştırması için gerekli çevrim sayılarının daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

15. Bu çalışma sonunda, Adapazarı gibi alüviyal zeminlerde yapılan zemin etüd raporları sonucunda, kil yüzdesi %13' ün altında olan, likit limiti % 32'den küçük, plastik davranış göstermeyen (NP) zeminlerin sıvılaştırma hassaslığının olabileceği görülmüştür. Kil yüzdesi %13 üzerinde olan zemin numunelerinin sıvılaştırma hassaslığının değişen DGO ile değişebileceği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada; zeminlere dinamik deneylerin uygulanması sırasında, numune hazırlama yönteminin, numune boyutunun ve numuneye uygulanacak dinamik yükleme frekansının deney sonuçları üzerinde etkin olacağı görülmüştür. Bu nedenle, yapılan her çalışmada dinamik özelliği belirlenecek zemin/çalışma alanı için özel bir numune hazırlama yönteminin seçilmesi ve zeminin özelliğine göre uygun frekansın belirlenmesi gerekmektedir. Adapazarı zeminlerinde bu seçimin ne kadar önemli

olduğu bu çalışma sırasında gözlemlenmiştir. Bazı araştırcıların bulgularına aksine, gerekli dinamik gerilmenin uygun frekansta uygulanması durumunda zeminlerin sıvılaşabildiği grlmştir.

İncelenen numunelerde kil yüzdesi dışında tüm diğer değişkenler aynı düzeyde tutulmuştur. Bundan sonraki araştırmalarda yine farklı kil içeriklerinde deneyler yapılması dşnlmekle birlikte, siltin içerdiği kil mineralinin de değiştirilmesi ile konunun genişletilmesi planlanmaktadır.

Tablo 3.1. Monterey No.0 kumunun özellikleri.....	48
Tablo 3.2. Kullanılan zeminlerin fiziksel özellikleri	51
Tablo 3.3 Kullanılan zeminlerin 200 nolu elekten geçtikten sonraki kıvam limitleri	55
Tablo 4.1. Numune hazırlama yönteminin kumların dinamik direncine etkisi (Ladd, 1977)	62
Tablo 5.2. Monterey kumunda dinamik üç eksenli kesme deneyi sonuçları	82
Tablo 6.1. Dinamik üç eksenli deneyi yapılan numunelerin özellikleri	84
Tablo 6.2. Zemin numunelerinin farklı DGO değerlerindeki dinamik üç eksenli deney sonuçları.....	85

Foto 2.1. Siltte yanal yayılma (Sapanca / Sakarya); (a) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Sapanca oteli (Ansal ve diğ.,1999), (b) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Sapanca oteli (Ansal ve Tönük, 2006) 5

Foto 2.2. 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı' nda siltte sıvılaşma belirtileri; (a) Yapı altındaki zeminin yüzeye çıkışı, (b) Boş arazide zeminin yüzeye çıkışı (<http://www.jsce-int.org/Report/report/kocaeli>)6

Foto 2.3. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı' nda farklı oturma 7

Foto 4.1. Konsolidasyon hücresinin yükleme sırasında görünümü 7

KAYNAKLAR

- [1] ABDULLA, A.A., VE KIOUSIS, P.D, Behavior of cemented sands - I. Testing, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Volume 21, Issue 8, s. 533 – 547, 1997.
- [2] AMINI, F. ve SAMA, K.M., Behavior of Stratified Sand–Silt–Gravel Composites Under Seismic Liquefaction Conditions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, s. 445-455, Volume 18, Number 6, 1999.
- [3] AMINI, F. ve QI, G.Z., Liquefaction Testing of Stratified Silty Sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, s. 208-217, Volume 126, Issue 3, 2000.
- [4] AMINI, F. ve CHAKRAVRTY, A., Liquefaction Testing of Layered Sand-Gravel Composites, Geotechnical Testing Journal, s. 1-19, Vol. 27, No. 1, 2004.
- [5] ANDREWS, D.C.A., Liquefaction of Silty Soils: Susceptibility, Deformation, and Remediation, Doktora Tezi, Southern California Üniversitesi, Los Angeles, 1997
- [6] ANDREWS, D. C. A. ve MARTIN, G. R., Criteria for Liquefaction of Silty Soils, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand Paper 0312, 2000.
- [7] ANSAL, A., BARDET, JP., BRAY, J., CETIN, O., DURGUNOGLU, T., ERDIK, M., KAYA, A., URAL, D., YILMAZ, T., YOUND, L., Initial Geotechnical Observations of the August 17, 1999, Izmit Earthquake , A Report of the Turkey-US Geotechnical Reconnaissance Team, 1999.
- [8] ANSAL, A. VE TÖNÜK, G., Evaluation of Liquefaction Susceptibility for Microzonation and Urban Planning, Institute Geohazards-Technical, Economical and Social Risk Evaluation, Lillehammer, Norway 2006.
- [9] ASTM, Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil: D 5311-92, pp: 10, 2004.
- [10] ATUKORALA, U., WIJEWICKREME D. VE MCCAMMON, N., Some Observations Related to Liquefaction Susceptibility of Silty Soils, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand; Bildiri No. 1324: s. 1-8. 2000.

- [11] BILGIN, T., Adapazarı Ovası ve Sapanca Oluğunun Alüvyal Morfolojisi ve Kuvaternerdeki Jeomorfolojik Tekamülü, İst. Üniv. Edebiyat Fakültesi Yayınları, No: 2572, İstanbul, 1984.
- [12] BOL, E., Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı, 2003.
- [13] BOULANGER, R. W. ve IDRİSS, I. M., Evaluating the Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays, Department of Civil & Environmental Engineering College of Engineering University of California at Davis, 2004.
- [14] BOULANGER, R. W., ve IDRİSS, I. M., Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(11), 1413-1426, 2006.
- [15] BOULANGER, R. W., ve IDRİSS, I. M., Evaluation of cyclic softening in silts and clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6), 641-652, 2007.
- [16] BRANDON, T. L., CLOUGH, G. W., RAHARDJO, P. P., Fabrication of Silty Sand Specimens for Large and Small Scale Tests, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, s. 46-55, Vol. 14, No. 1, 1991.
- [17] BRANDON, T. L., ROSE, A. T. ve DUNCAN, J. M., Drained and Undrained Strength Interpretation for Low-Plasticity Silts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, s. 250-267, Volume 132, Issue 2, February 2006.
- [18] BRAY, J. D., SANCIO, R. B., RIEMER, M. F., ve DURGUNOGLU, T., Liquefaction susceptibility of fine-grained soils, 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, s. 655-662, 2004.
- [19] BRAY, J.D., The liquefaction susceptibility, resistance, and response of silty and clayey soils, U.S. Geological Survey, National Earthquake Hazards Reduction Program, 10/1/04-9/30/06, Award Number: 05HQGR0009, University of California, Berkeley, 2005.
- [20] BRAY, J.D. ve SANCIO, R.B., An Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 9, s. 1165-1177, September 2006.

- [21] CAMPANELLA, R.G. ve LIM, B.S., Liquefaction characteristics of undisturbed soils, Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.1, s.227-230, 1981.
- [22] CAO,Y.L. ve LAW,A.K., Energy Asyfroch for Liquefaction of Sandy and Clayey Silts. Proceeding:2. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, s. 491-497 11-15 Mart, St.Louis, Missouri, 1991.
- [23] CASTRO, G., Liquefaction of Sands, Doktora Tezi, Harvard Üniversitesi, Cambridge, 1969.
- [24] CASTRO, G., Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No. GT6, s. 551-569, 1975.
- [25] CASTRO,G., and Poulos, S.J., Factors affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT6), s. 501-506, 1977.
- [26] CARRARO, J.A.H., Mechanical Behavior of Silty and Clayey Sands, Doktora Tezi, Purdue Üniversitesi, 2004.
- [27] CHANG, N.Y., YEH,S.T. ve KAUFMAN, L.P., Liquefaction Potantial of Clean and Silty Sands, 3. International Earthquake Microzonation Conference Proceedings, Vol.2, Seattle, 1982.
- [28] DAS, B.M., Fundamentals of Soil Dynamics, Elver Science Publishers Co., s.356-357, 1983.
- [29] DAS, B.M., PURI, V.K. ve PRAKASH, S., Liquefaction of silty soils, Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, 1999.
- [30] EL HOSRI, M. S., BIAREZ, J., AND HICHER, P.Y., Liquefaction Characteristics Of Silty Clay, Proceedings. of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, s. 277-284, 1982.
- [31] EMERY, J.J., LIAM F. W.D. ve LEE, K.W., Uniformity of Saturation Sand Specimens, Evaluation of Relative Density and ITS Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, s.182-194, 1973.
- [32] ERKEN, A., ANSAL, A., YILDIRIM, H., ÜLKER, R., SANCAR, T. ve KILIÇ, C., Liquefaction of silt and sand layers in Erzincan-Ekşisu, First Int.Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Vol.1, s.13-18, 1995.

- [33] FINN, W.D.L, BRANSBY P.L. ve PICKERING D.J., Effect of strain history on liquefaction of sand, Soil mechanics and foundations division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 96, No. 6, s. 1917-1934, November/December 1970
- [34] FINN, W.D.L,. Liquefaction potential: developments since 1976, In Proceedings of the 1st International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Mo. Vol. 2. Edited by S. Prakash. University of Missouri-Rolla., May. s. 655–681, 1981
- [35] GALLAGHER, P. M., Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk,. Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Enstitüsü ve State Universitesi, Virginia, 2000.
- [36] GOOKIN, W.B., The Combined Effects of Loading Frequency and Other Parameters on Dynamic Properties of Reconstituted Cohesive Soils, Doktora Tezi, California Universitesi, Berkeley, 1998.
- [37] GÜNDÜZ, Z., Zeminlerin Kıvam Limitlerinin Belirlenmesi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4.Cilt, 2. Sayı s.25-27, 2000.
- [38] HAZEN, A., Hydraulic Fill Dams, ASCE Transactions, Vol.83, s.1713-1745, 1920.
- [39] HAZIRBABA, K., Pore Pressure Generation Characteristics of Sands and Silty Sands: A Strain Approach, Doktora Tezi, Univ. of Texas, Austin, 2005.
- [40] HOEG, K., DYVIK, R. ve SANDBAEKKEN, G., Strength of Undisturbed Versus Reconstituted Silt and Silty Sand Specimens, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(7), s. 606-617, 2000.
- [41] HORITA, M., Modelling of cyclic behavior of saturated Monterey No.0/30 Sand, Doktora Tezi, Colorado Üniversitesi, 1985.
- [42] HUANG, Y.T., HUANG, A.B., KUO, Y.C. VE TSAI, M.D., A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 s. 733–743, 2004.
- [43] HUSSEIN, A.K., Undrained Cyclic Behavior of Nonplastic Silt, Doktora Tezi, Cornell University, 1995.

- [44] HYDE, A. F. L., HIGUCHI, T. ve YASUHARA, K., Liquefaction, Cyclic Mobility, and Failure of Silt, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 6, s. 716-735, 2006.
- [45] ISHIIHARA, K., Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes, *Soils and Foundation*, 17(3), s.1-17, 1977.
- [46] ISHIIHARA, K., SODEKAWA, M. ve TANAKA, Y., Effects of Overconsolidation on Liquefaction Characteristics of Sands Containing Fines, *Dynamics Geotechnical Testing*, American Society for Testing and Materials STP 654, ASTM, s. 246-264, 1978.
- [47] ISHIIHARA, K. ve TAKATSU, H., Effects of Overconsolidation and K₀ Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sands, *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.19, No.4, s. 59-68, 1979.
- [48] ISHIIHARA, K., TRONCOSO, J., YASUHIRO, K., ve YOSHIKI, T., Cyclic Strength Characteristics of Tailing Materials, *Soils and Foundation*, Vol. 20, No. 4, s. 127-142, 1980.
- [49] ISHIIHARA, K., Stability of natural deposits during earthquakes, 11th Soil Mechanics and Foundation Conference, San Fransisco, Vol 1, 321-376, 1985.
- [50] ISHIIHARA, K., Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes, *Geotechnique*, Vol. 43 (3), s. 351-415, 1993.
- [51] ISHIIHARA, K., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, 1st Ed., Oxford, Clarendon Press, 350 s., 1996.
- [52] JEFFERIES, M. ve BEEN K., *Soil Liquefaction A Critical State Approach*, Taylor ve Francis Group, London and New York 2006.
- [53] KAYA, Z., IRISAWA, T. , ERKEN, A., Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Davranışı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002.
- [54] KOESTER, J. P., Cyclic Strength and Pore Pressure Generation Characteristics of Fine-Grained Soils, *Doktora Tezi*, Colorado Üniversitesi, 1992.
- [55] KOESTER, J.P., The Influence of fines type and content on cyclic strength, *Ground Failure under Seismic Conditions*, *Geotechnical Special Publication*(44), 17-33, 1994.
- [56] KRAMER, S.L. ve SEED, H.B., Initiation of soil liquefaction under static loading conditions, *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 114, no. 4, s. 412-430., 1988.

- [57] KRAMER, S.L., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey s.379-380, 1996.
- [58] KRAMER, S.L. ve ELGAMAL, A.W., Modeling Soil Liquefaction Hazards for Performance-Based Earthquake Engineering, PEER Report 2001, Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley, 2001.
- [59] KRIZEK, R. J., EDIL, T. B., ve OZAYDIN, K., Preparation and Identification of Clay Samples with Controlled Fabric, Engineering Geology, Vol. 9, s. 13-38, 1975.
- [60] KUERBIS, R. ve VAID, Y.P., Sand Sample Preparation- the Slurry Deposition Method, Soils and Foundations, 28(4), s.107-118, 1988.
- [61] KUERBIS, R., NEGUSSEY, D., ve VAID, V. P., Effect Of Gradation And Fines Content On The Undrained Response Of Sand, Proceedings. Hydraulic Fill Structures, Fort Collins, USA, s. 330-345, 1988.
- [62] KUERBIS, R., The Effect of Gradation and Fines Content on the Undrained Loading Response of Sand, Yüksek Lisans Tezi, British Columbia Üniversitesi, Vancouver, Kanada, 1989.
- [63] KUN LI, D., JUANG, C.H., ANDRUS, R.D., CAMP, W.M., Index Properties-Based Criteria for Liquefaction Susceptibility of Clayey Soils: A Critical Assessment, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 1, 110-115, 2007.
- [64] LADD, R.S., Specimen Preparation and Cyclic Stability of Sands, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 103(6), s. 535-547, 1977.
- [65] LADD, R.S., Preparing Test Specimens Using Undercompaction, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1(1), S. 16-23, mart 1978.
- [66] LADE, P.V. ve YAMAMURO, J.A., Effects of Nonplastic Fines on Static Liquefaction of Sands, Canadian Geotechnical Journal, 34(6), s. 918-928, 1997.
- [67] LAW, K.T. VE LING, Y.H., Liquefaction of Granular Soils with Non Cohesive and Cohesive Fines, Proc., 10th World Conf. on Earthquake Eng., s. 1491-1496, 1992.
- [68] LEE, K.L. ve SEED H.B., Dynamics Strength of Anisotropically Consolidated Sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 93, Sm 5, PT I, Bildiri 5451, s. 169-190, 1967.
- [69] LEE, K. L. ve SEED, H. B., Cyclic Stres Conditions Causing Liquefactions on Sand, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 93(1), s. 47-70, 1967.

- [70] LEE, K.L., ve FITTON, J.A., Factors Affecting The Cyclic Loading Strength Of Soil, *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations*, ASTM STP 450, American Society for Testing and Materials, s. 71-95, 1969.
- [71] LEE, K. L. ve FOCHT, J.A., Strength of clay subjected to cyclic loading, *Marine Geotechnology*, V.1, No.3, s. 165-185, 1976.
- [72] LIANG, R.W., BAI, X.H., ve WANG, J.C., Effect of Clay Particle Content on Liquefaction of Soil, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand; Bildiri No. 1560, 2000.
- [73] LUH, G.G. F., *An Experimental Study of the Dynamic Behavior of Soils*, Doktora Tezi, Wisconsin Üniversitesi, 1980.
- [74] MARSHAL, R.J., Behavior of sandy uniform soil during the Jaltipan Earthquake, Mexico, *Proceedings, 5th ICSMFE*, Vol.1, pp224-233, Paris,1961.
- [75] MULILIS, J. P., CHAN, C.K. ve SEED, B., The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stres Strain Behavior of Sands, *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. EERC 75-18, s. 1-138, 1975.
- [76] MULILIS, J.P., ARULANANDAN, K., MITCHELL, J.K., CHAN, C.K. ve SEED, H.B., Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(2), s. 91-108, 1977.
- [77] MULILIS, J. P., TOWNSEND, F. C., ve HORZ, R. C., *Triaxial Testing Techniques And Sand Liquefaction*, *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, s. 265-279, 1978.
- [78] Nacci, V. A. and D'Andrea, R. A., A Technique for the Preparation of Specimens of Loose Layered Silts, *Soil Specimen Preparation for Laboratory testing*, ASTM STP 599, s. 193-201, 1976.
- [79] NAGASE, H., YASUDA, S., TSUJINO, S.SHINJI, R. ve YANAGIHATA, T., Liquefaction Strength characteristics of overconsolidated sand samples, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Oxford, 1996.
- [80] NICHOLSON, P.G., ve KASHYAP, V., Fly ash stabilization of tropical Hawaiian soils, *Fly ash for soil improvement*, Geot. Sp. Publ. No. 36., ASCE. s. 15-29, 1993.

- [81] NIU, Q., Time Effect on Liquefaction Potential of Silt Containing Various Amounts of Clay Particles, 12. th. World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [82] ODA, M., KOISHIKAWA, I. ve HIGUCHI, T., Experimental Study of Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Test, Soils and Foundations, 18(1), 25-38, 1978.
- [83] ÖNALP, A. ve AREL, E., Siltlerin sıvılaşma yeteneği: Adapazarı Kriteri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002.
- [84] ÖNALP, A., BOL, E., URAL, N., Siltlerin Sıvılaşabilirliği: Adapazarı Kriterinin Geliştirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon 2006.
- [85] ÖNALP, A., Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği, Geoteknik Sözlüğü Glossary, Birsen Yayınevi, İstanbul 2007.
- [86] ÖZAYDIN, K., Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, No.1, İstanbul, 1982.
- [87] PERLEA, V.G., KOESTER, J.P. ve PRAKASH, S., How Liquefiable are Cohesive Soils?, Proc. Second Int Conf on Earthquake Geotechnical Engg., Vol. 2, s. 611-618, Lisbon, Portugal, 1999.
- [88] PERLEA, V.G., Liquefaction of Cohesive Soils, Geotechnical Special Publication, Soil Dynamics and Liquefaction, ASCE No.107, s. 58-76, 2000.
- [89] PHRI, Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A.A.Balkema, Rotterdam, 1997.
- [90] POLITO, C.P., The Effects Of Non-Plastic and Plastic Fines On The Liquefaction Of Sandy Soils, Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Enstitüsü, 1999.
- [91] POLITO, C.P. ve MARTIN, J.P., 2001, Effects of Nonplastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127 No. 5, s. 408-414, 2001.
- [92] PRADHAN, T.B.S, KIKU, P. ve SATO, K., Effect of fines content on behaviour of sand during the process to liquefaction, First Int.Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Vol.1, s. 823-828, 1995.
- [93] PRAKASH, S., Liquefaction of low plasticity silts, Soil Dynamics and Earthquake Engineering (11), s. 373-379, 1992.

- [94] PRAKASH, S. VE PURI, V.K., Liquefaction of Loessial Soils, Third, International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, June 28-July1, 1982.
- [95] PRAKASH, S., ve SANDOVAL, J.A., Liquefaction of Low plasticity Silts, *J. Soil Dyn, and Earthquake Engg.*, 71(7), s.373-397, 1992.
- [96] PRAKASH, S., ve SANDOVAL, J.A., Liquefaction of silts and silt-clay Mixtures, U.S.-Taiwan Workshop on Soil Liquefaction, Hsin-Chu, Taiwan on November 3 - 5, 2003.
- [97] PURI, V. K., Liquefaction Behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, Doktora Tezi, Missouri-Rolla Üniversitesi, 1984.
- [98] PURI, V.K. DAS, B.M., ve PRAKASH, S., Liquefaction of silty soils, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 6, No.4., (ISSN 1053-5381), The International Society of Offshore and Polar Engineers, 1996.
- [99] RATHJE, E. M., CHANG, W. J., ve STOKOE II, K. H., Development of an In Situ Dynamic Liquefaction Test, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 28, No. 1, s. 50-60, 2005.
- [100] ROBERTSON, P.K. ve WRIDE, C.E., Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test, *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (3), s. 442-459, 1998.
- [101] ROMERO, S. J., The Behavior of Silts as Clay Content is Increased, Yüksel Lisans Tezi, University of California, Davis, CA. 1998.
- [102] SALGADO, R., BANDINI, P. VE KARIM, A., Shear Strength and Stiffness of Silty Sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5),s.451-462, 2000.
- [103] SANCIO, R.B., BRAY, J.D., STEWART, J.P., YOUNG, T.L., DURGUNOĞLU, H.T., ÖNALP, A., SEED, R.B., CHRISTENSEN C., BATURAY, M.B. VE KARADAYILAR, T., Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazarı, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, s. 1093-1102, 2002.
- [104] SANCIO, B. R., Ground failure and building performance Adapazarı, Turkey, Doktora Tezi, California Üniversitesi, Berkeley, 2003.
- [105] SANDOVAL, S.J., Liquefaction and settlement characteristics of silts soils, Doktora Tezi, Missouri Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, 1989.
- [106] SANIN, M.V., Wijewickreme, D., Cyclic shear response of channel-fill Fraser River Delta silt, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, s. 854-869, 2006.

- [107] SEED, H.B. ve LEE, K.L., Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, *Journal of soil mechanics and foundations division, ASCE*, V.92, No.SM6, , s.105-134, Nov.1966.
- [108] SEED, H.B. ve IDRIS, I. M., Soil Liquefaction in the Niigata Earthquake, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.93, No.SM3, Proc. May, s.83-108, 1967.
- [109] SEED, H.B. ve PEACOCK W.H., Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.97, No.8, s.1099–1119, 1971.*
- [110] SEED, H. B. ve IDRIS, I. M., Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 97(9), s. 1249-1273, 1971.*
- [111] SEED, H.B., MORI, K. ve CHAN, C. K., Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 103(4), s. 257-270, 1977.*
- [112] SEED, H. B. ve IDRIS, I.M., Evaluation of Liquefaction Potential of Sand Deposits Based on Observations of Performance in Previous Earthquakes, Pre-print 81-544, Session on In-situ Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri, October 1981 .
- [113] SEED, H. B. ve IDRIS, I. M., On the importance of dissipation effects in evaluating pore pressure changes due to cyclic loading, *John Wiley and Sons, Ltd. , s. 53-59, 1982.*
- [114] SEED, H. B., Earthquake-resistant design of earth dams, Proc., Symp. Seismic Des. of Earth Dams and Caverns, ASCE, New York, s. 41–64, 1983.
- [115] SEED, H.B., TOKIMATSU, K., HARDER, L.F. ve CHUNG, R.M., Influence of SPT Procedures on Soil Liquefaction Resistance Evaluations, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering, Volume III, No. 12, s. 1425-1445, 1985.*
- [116] SILVER, M., CHAN, C., LADD, R., LEE, K., TIEDMANN, D., TOWNSEND, F., VALERA, J., WILSON, J., Cyclic Strength Of Standard Test Sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102(5), s. 511-523, 1976.*
- [116] SILVER, M. L., Laboratory Triaxial Testing Procedures To Determine The Cyclic Strength Of Soils, NUREG-0031, National Technical Information Service, Springfield, VA., 1977.

- [117] SINGH, S., Liquefaction Criteria for Silts, Proceedings Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, August, Vol. III, 231-236, 1988.
- [118] SINGH, S., Liquefaction Characteristics of Silts, Session on Ground Failures under Seismic Conditions, Proc., ASCE National Convention , Special Publication No. 44, s.105-116, 1994.
- [119] SOONG, B., YASUHARA, K., ve MURAKAMI, S., Cyclic and postcyclic strength and stiffness of silty soils with initial static shear stress in direct simple shear tests, Geotech. Test. J., 27-6, s. 607-613, 2004.
- [120] STAMATOPOULOS, C., STAMATOPOULOS, A. ve KOTZIAS, P., Effect of prestress on the liquefaction potential of silty sands, Soil Dynamics and Earthquake Engineering VIII, Computational Mechanics Publications, s. 181-188, 1995.
- [121] STEWART, H.E. VE HUSSEIN, A.K., Undrained Cyclic Behavior of Silt, US-Japan Workshop, Napa, CA, 7-9 June 1993.
- [122] SUNITSAKUL, J., Dynamics Behavior of Silty Soils, Doktora Tezi, Oregon State Üniversitesi, 2004.
- [123] TAHERI, S.D.M, Liquefaction of Soil, Yüksek Lisans Tezi, Texas Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Mayıs 1980.
- [124] TATSUOKA, F., OCHI, K., ve FUJI, S., Effect of Sample Preparation Method on Cyclic Undrained Strength of Sand in Triaxial and Torsional Shear Tests, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, University of Tokyo, No.17, s. 29-62, March 1984.
- [125] TEZCAN, S.S. ve ÖZDEMİR, Z., Liquefaction Risk Analyses and Mapping Techniques, İstanbul : Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, 2004.
- [126] THEVANAYAGAM, S., Liquefaction Potential and Undrained Fragility of Silty Soils, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Bildiri: 2383, 2000.
- [127] THEVANAYAGAM, S., SHENTHAN, T., MOHAN, S. ve LIANG, J., Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands and Sandy Silts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, Issue 10, s. 849-859, October 2002.
- [128] THE ENGLISH-LANGUAGE INSTITUTE OF AMERICA, INC., The New Grolier Webster International Dictionary of the English Language, 1971.

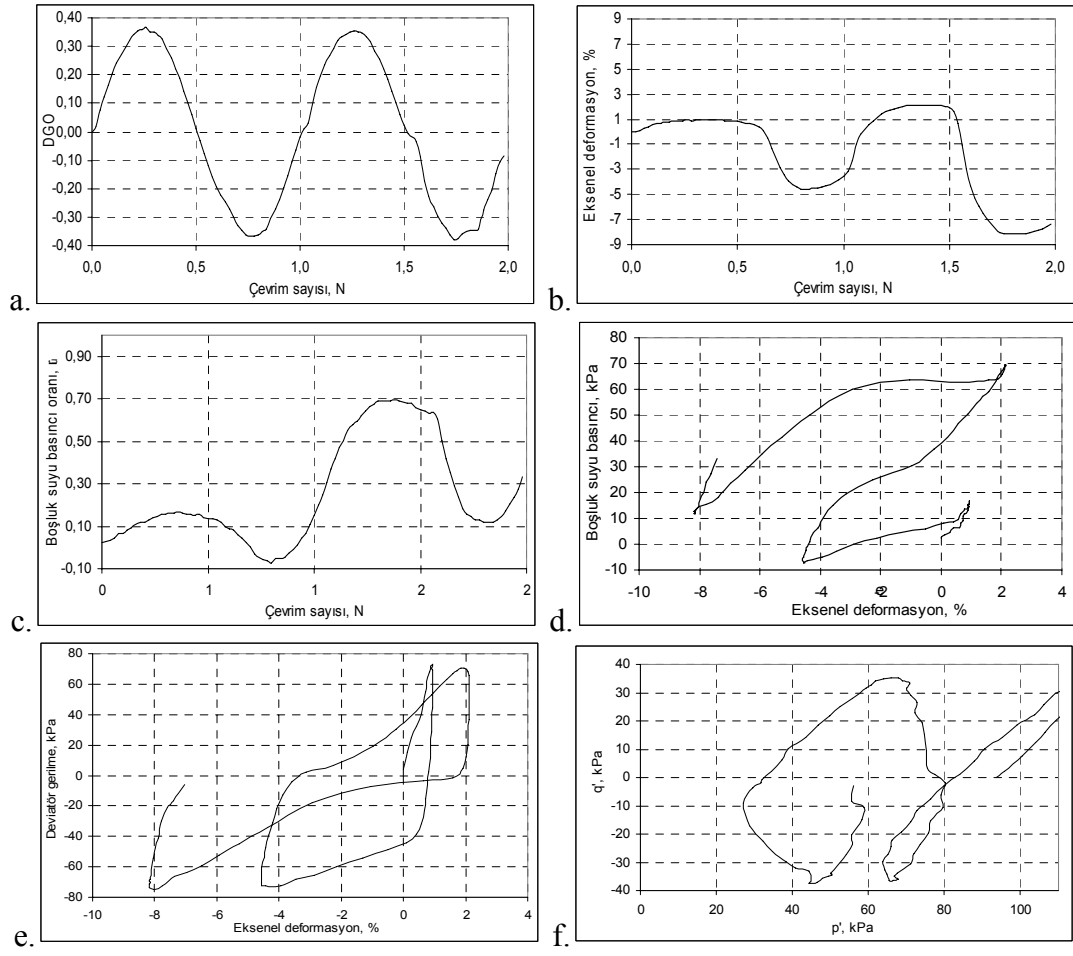
- [129] TOKIMATSU, K. ve YOSHIMI, Y., Empirical correlation of soil Liquefaction Based in SPT n-value and Fines Content, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 23(4), s. 56-74, 1983.
- [130] TRONCOSO, J., ISHIHARA, K. ve VERDUGO, R., Aging Effects on Cyclic Shear Strength of Tailings Materials, Proceedings Nith World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, August 2-9, Vol.III, s. 121-126, 1988.
- [131] TSE, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması: TSE1500, Ankara, , sf:11, 2000.
- [132] TSE, İnşaat Mühendisliği Zemin Laboratuvar Deneyleleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, TSE1900-1, Ankara, , sf:101, 2006.
- [133] TSUCHIDA, H., Prediction and countermeasure against liquefaction in sand deposits, Seminar of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Yokosuka, Japan, 3.1-3.33, 1970.
- [134] UMEHARA, Y., ZEN, K. VE HAMADA, K., Evaluation of Soil Liquefaction Potentials in Partially Drained Conditions, Soils and Foundations, Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering, 25(2), 57-72, 1985.
- [135] VAID, Y.P., Liquefaction of Silty Soils, Ground Failures Under Seismic Conditions, ASCE Geotechnical Special Publication 44, s. 1-16, 1994.
- [136] VAID, Y.P., ve NEGUSSEY, D., Preparation of Reconstituted sand Specimens, Advanced triaxial testing of soil and rock, s. 405-417, 1988.
- [137] VAID, Y.P., SIVATHAYALAN, S. ve STEDMAN, D., Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand, Geotechnical Testing Journal, 22(3), 187-196, 1999.
- [138] Wagg, B.T., Undrained Behaviour of Clay-Silt Mixtures During Cyclic Loading, Yüksek Lisans Tezi, Waterloo Üniversitesi, Yer Bilimleri, 1990.
- [139] WANG, S. M., Liquefaction of Triaxial Sand Damples Under Different Frequencies of Cyclic Loading, Yüksek Lisans Tezi, Western Ontario Üniversitesi, 1972.
- [140] WANG, W.S., Some Findings in Soil Liquefaction, Research İnstitute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Beijing, China, 1979.
- [141] WANG, W. S., Foundation Problems in Aseismic design of Hydraulic Structures, In Proceedings of the Joint US-PRC Microzonation Workshop, 11-16 September, Harbin, PRC, 1981.
- 142 www.jsce-int.org/disaster_report/kocaeli_e.htm, 16 Kasım 2007

- [143] YAMAMURO, J.A. ve COVERT, K.M., Monotonic and Cyclic Liquefaction of Very Loose Sands with High Silt Content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 4, s. 314-324, 2001.
- [144] YAMAMURO, J.A. ve WOOD, F.M., Effect of Depositional Method on the Undrained Behavior and Microstructure of Sand with Silt, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, Vol. 24, s. 751-760, 2004.
- [145] YOUNG, T. L., ve HOOSE, S. N., Liquefaction susceptibility and geologic setting, *Proc., 6th World Conf. on Earthquake Eng. Vol.3*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., s. 2189–2194, 1977.
- [146] YOUNG, T. L., ve PERKINS, D. M., Mapping of Liquefaction induced ground failure potential, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 104(4), s. 433–446, 1978.
- [147] YOUNG, T.L., ve GILSTRAP, S.G., Liquefaction and Deformation of Silty and Fine-Grained Soils, *Proceedings, 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, v. 3, s. 1013-1020, 1999.
- [148] YOUNG, T.L., IDRISSE, I.M., ANDRUS, R.D., ARANGO, I., CASTRO, G., CHRISTIAN, J.T., DOBRY, R., LIAM FINN, W.D.L., HARDER, L.F., JR., HYNES, M.E., ISHIIHARA, K., KOESTER, J.P., LIAO, S.S.C., MARCUSON, W.F., III, MARTIN, G.R., MITCHELL, J.K., MORIWAKI, Y., POWER, M.S., ROBERTSON, P.K., SEED, R.B., STOKOE, K.H., II, Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V. 127, No. 10, s. 817-833, 2001.
- [149] ZHU, R. ve LAW, K.T., Liquefaction Potential of Silt, *Proceedings Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, August, Vol.III, 237-242, 1988.
- [150] ZLATOVIC, S. ve ISHIIHARA, K., Normalized Behavior of Very Loose Non-Plastic Soils: Effects of Fabric, *Soils and Foundations*, 37(4), 47-56, 1997.

EKLER

EKLER-I

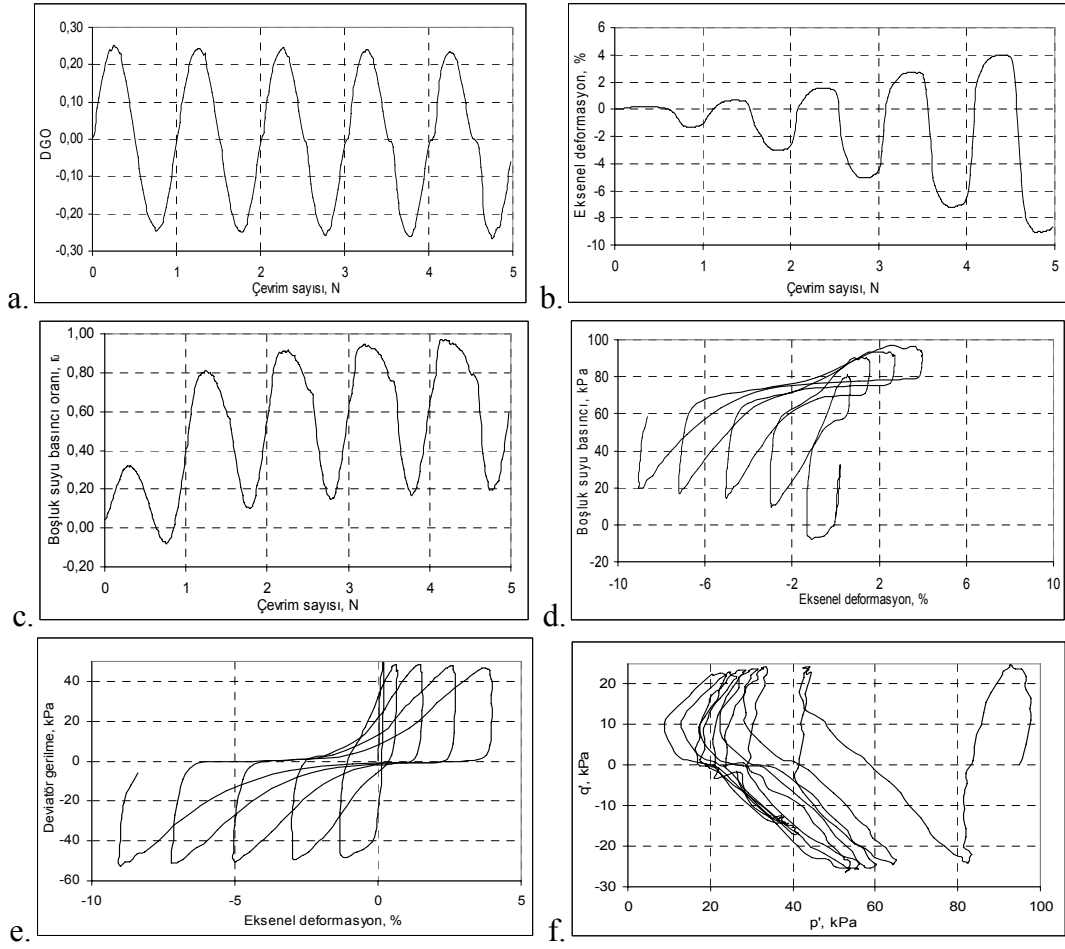
DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEY SONUÇLARI



Şekil Ek-1.1. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.35 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyator gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



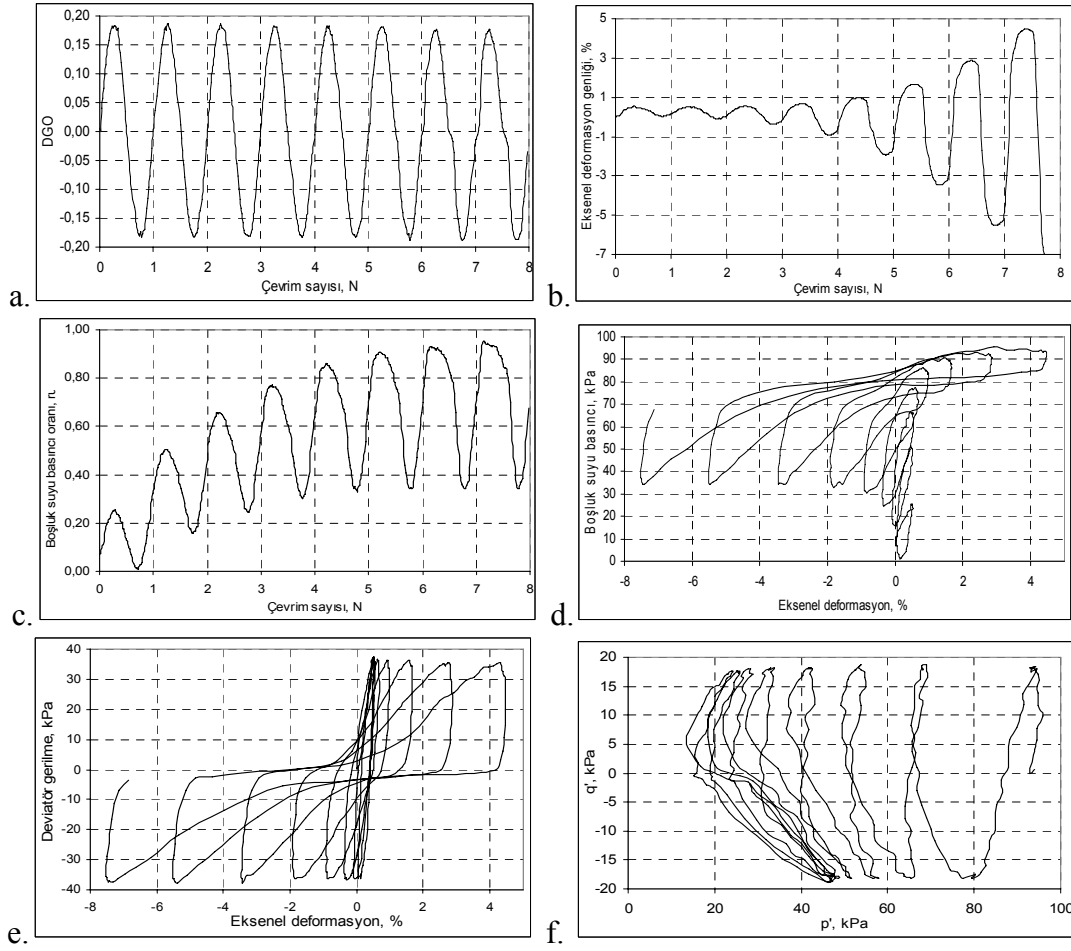
Foto Ek-1.1. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.35 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.2. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.25 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyonu, f. q' - p' arasındaki ilişki



Foto Ek-1.2. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.25 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.3. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyonu, f. q' - p' arasındaki ilişki

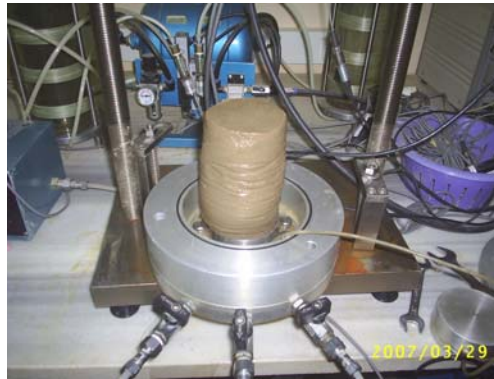
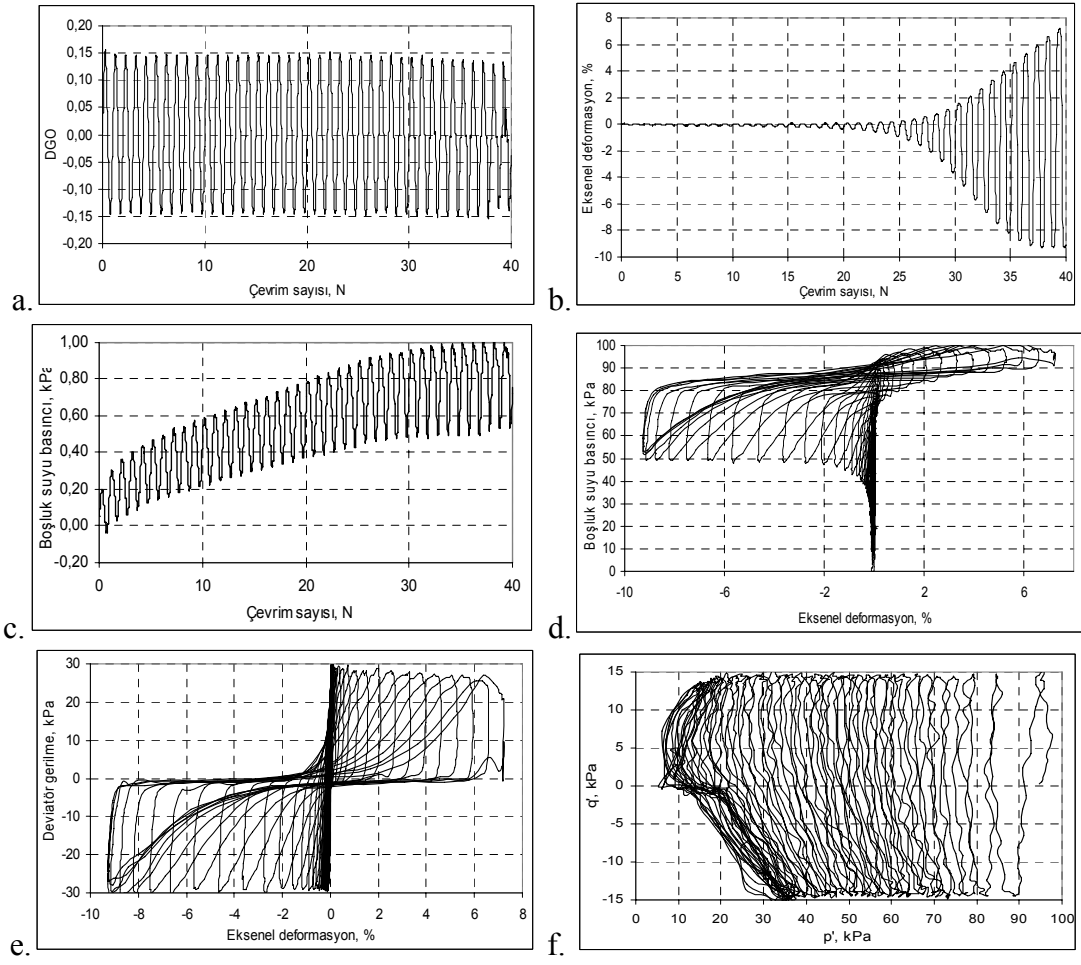


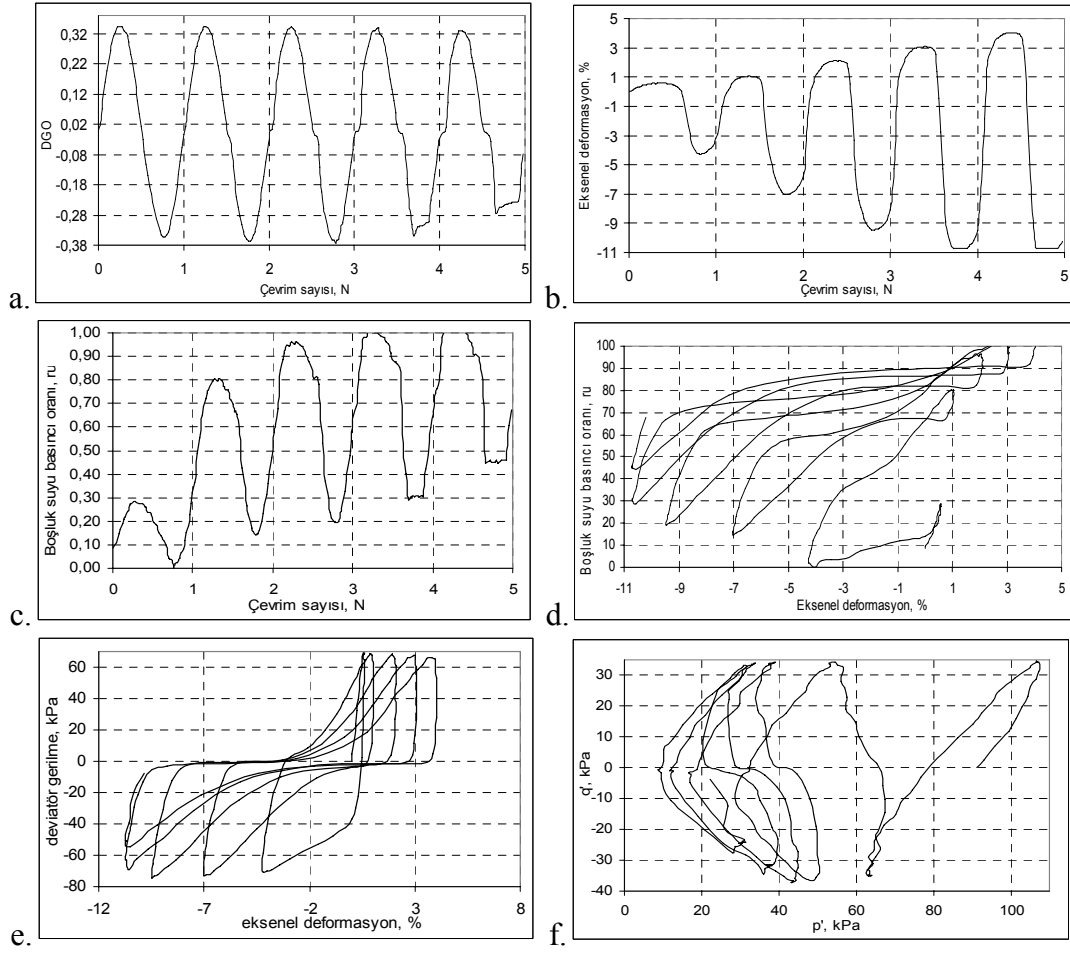
Foto Ek-1.3. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.4. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.15 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



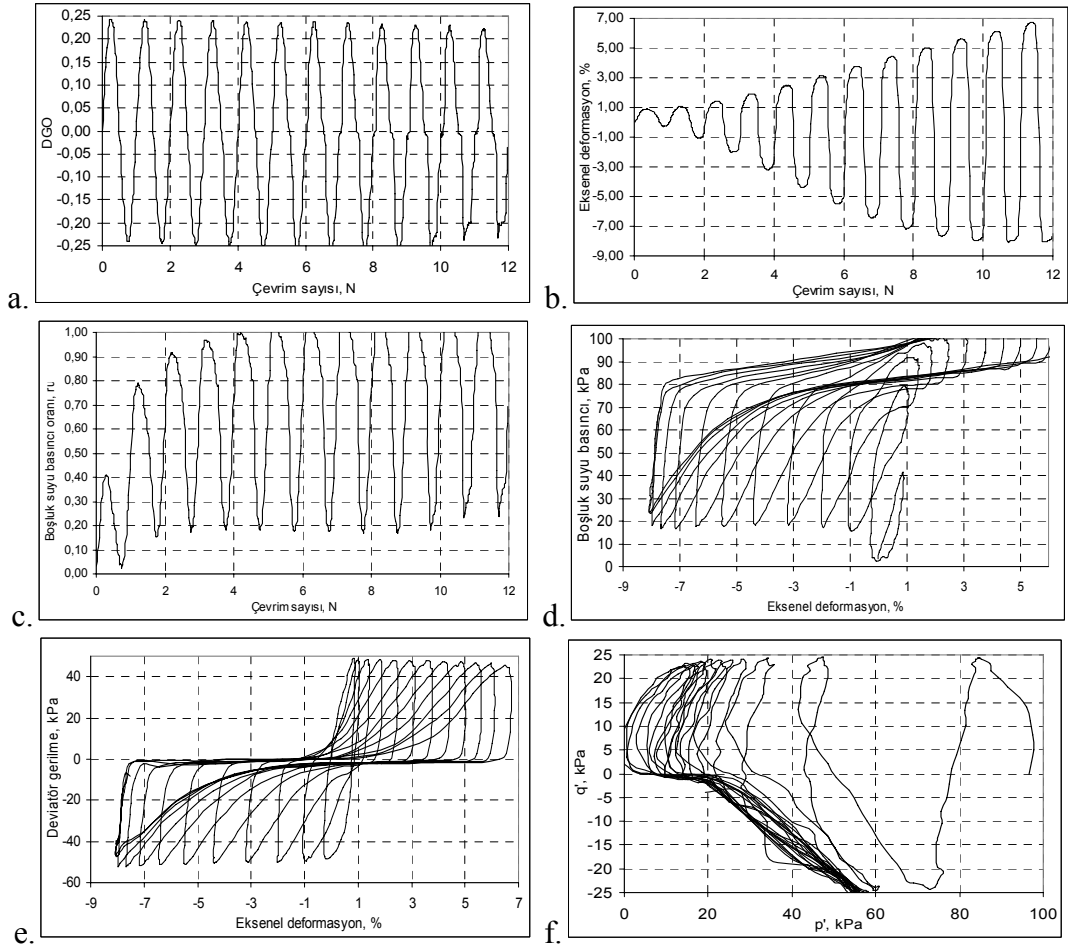
Foto Ek-1.4. %54 ince içeren ve %4 kil içeren zemin numunesi DGO=0.15 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.5 %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi DGO=0.35 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



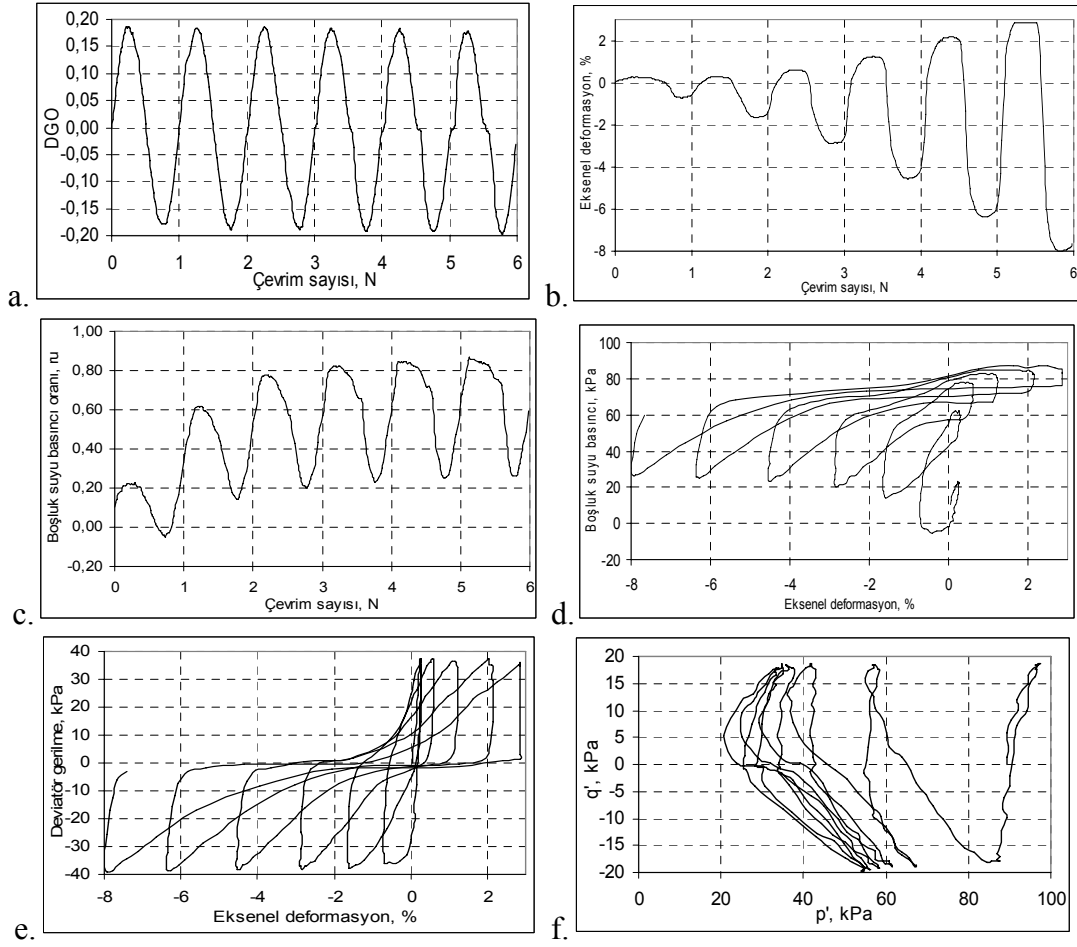
Foto Ek-1.5. %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi DGO=0.35 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.6. %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.25$ deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



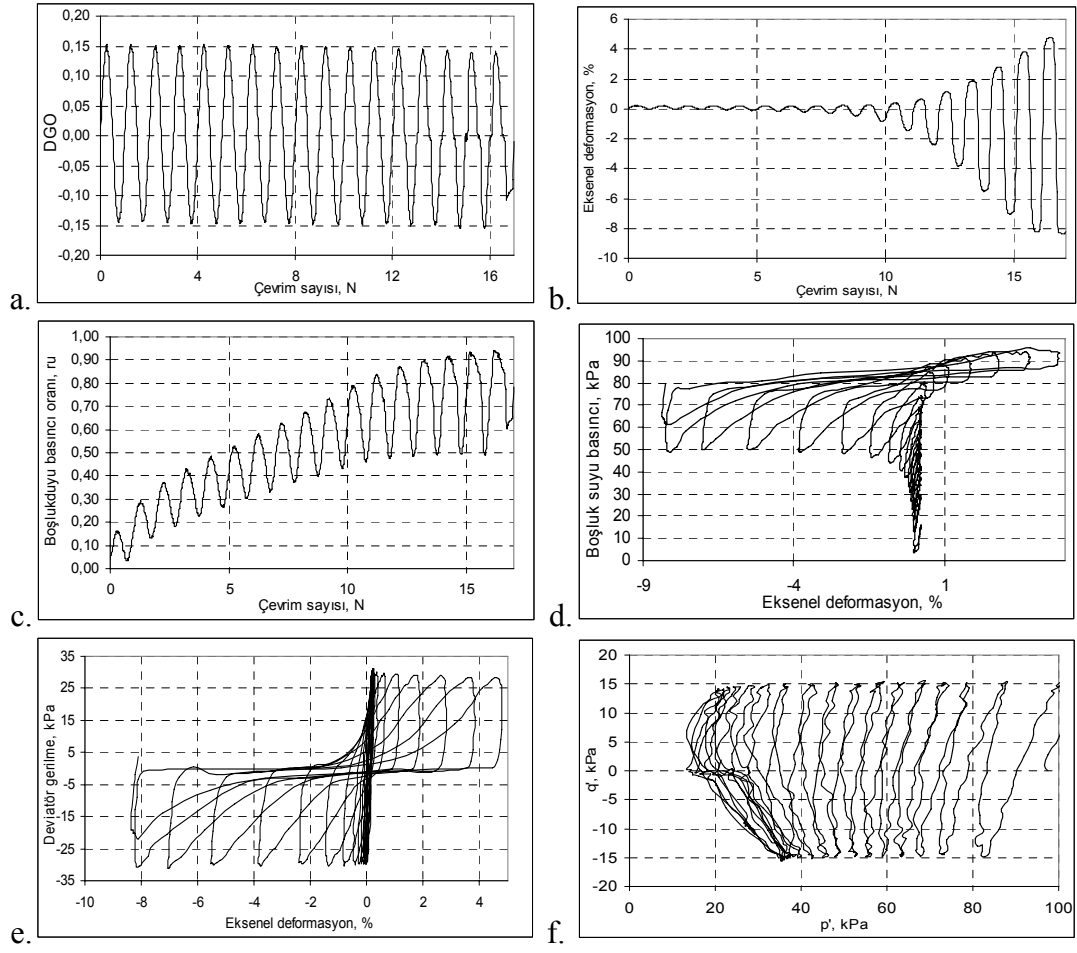
Foto Ek-1.6. %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.25$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.7. %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



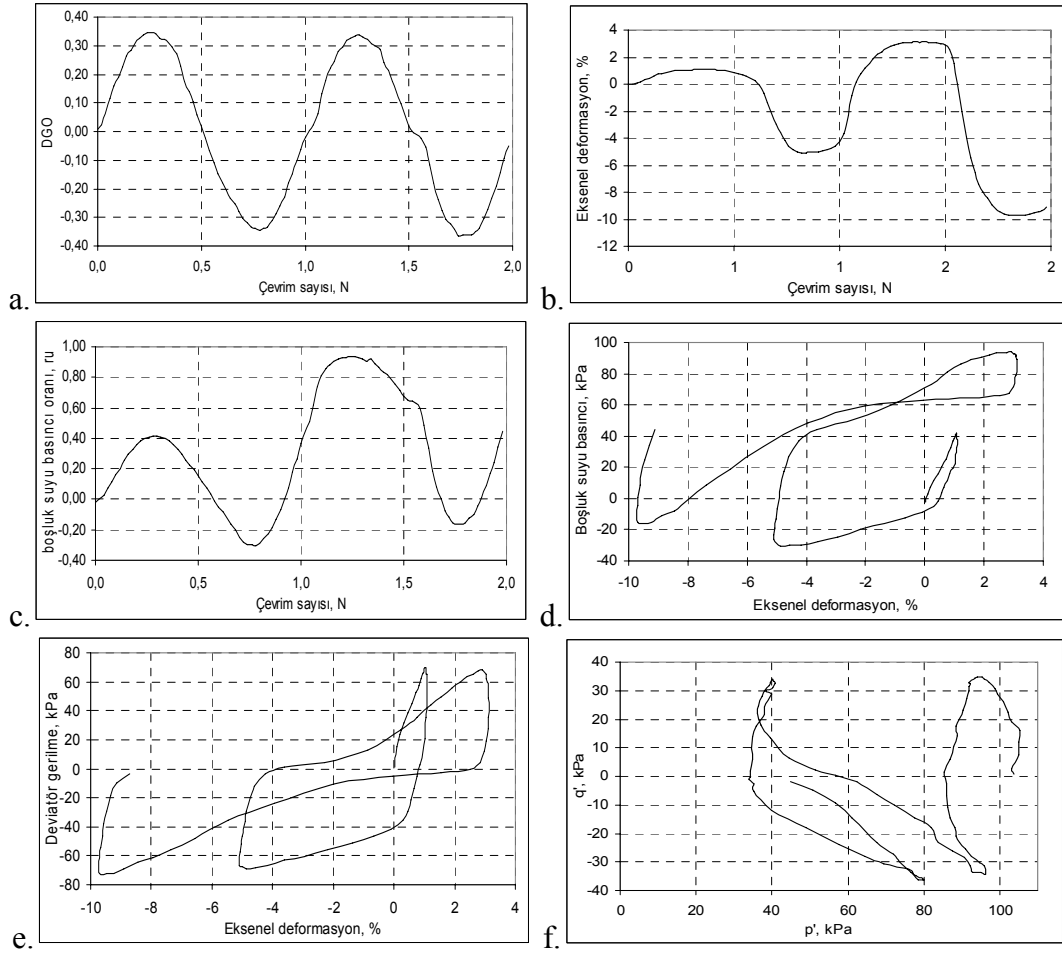
Foto Ek-1.7. %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.8. %51 ince içeren ve %6 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.15$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



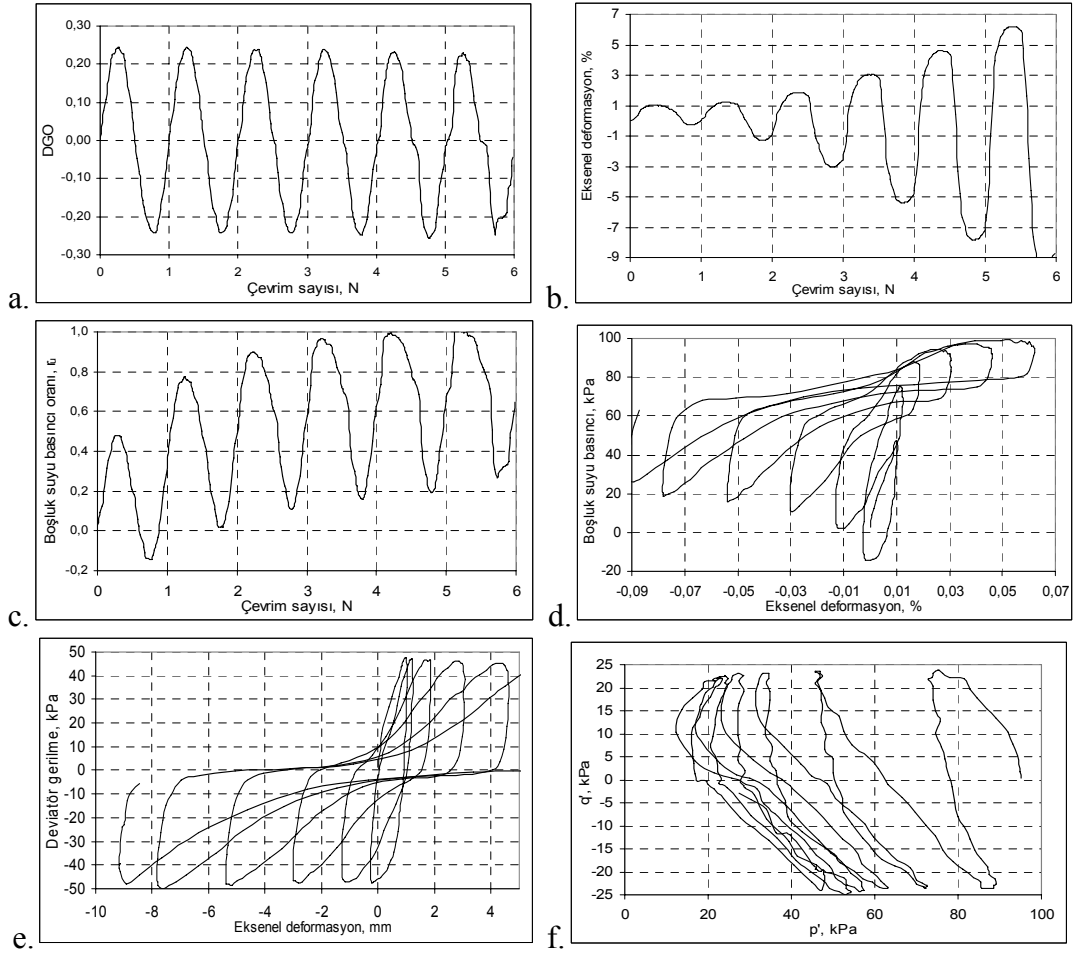
Foto Ek-1.8. %51 ince içeren ve %6 kil numunesinin $DGO=0.15$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.9. %71 ince içeren ve %9 kil içeren zemin numunesi DGO=0.35 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatr gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



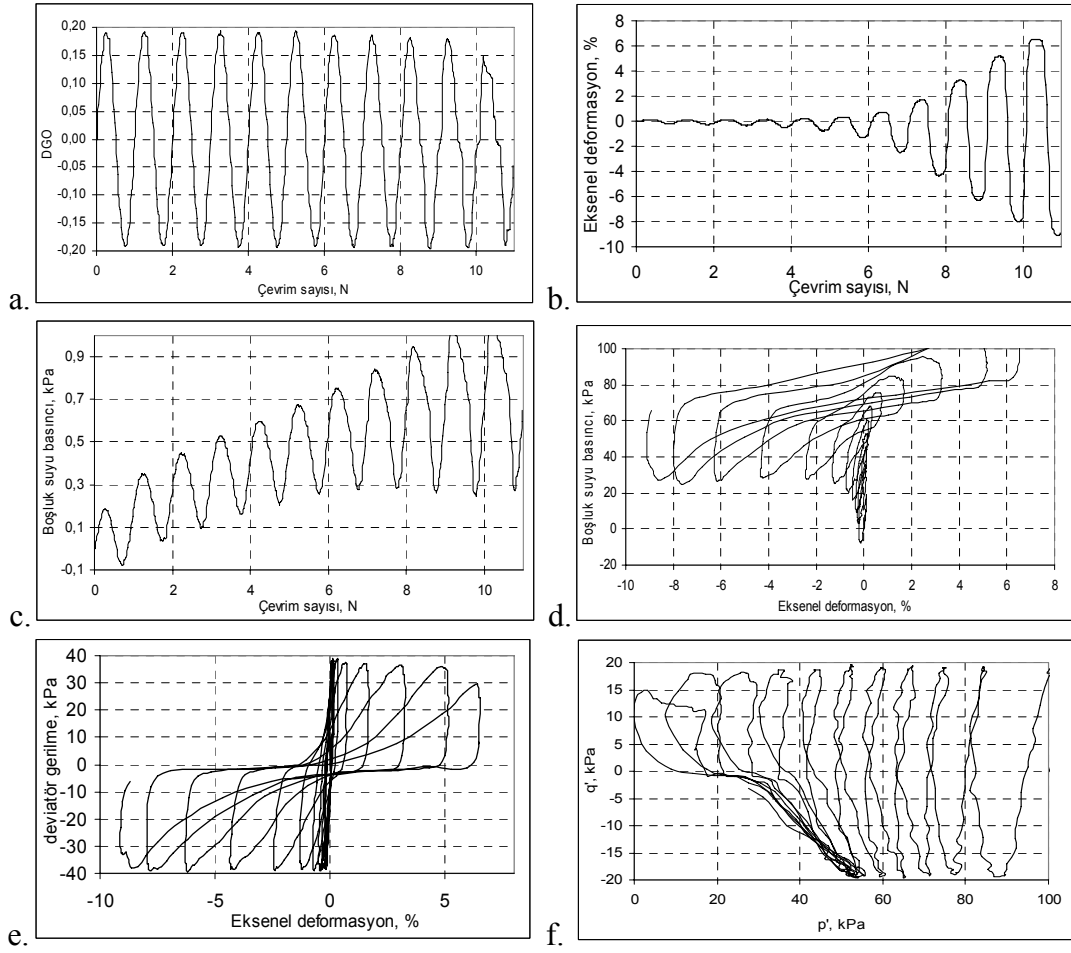
Foto Ek-1.9. %71 ince içeren ve %9 kil içeren numunenin DGO=0.35 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.10. %71 ince içeren ve %9 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.25$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



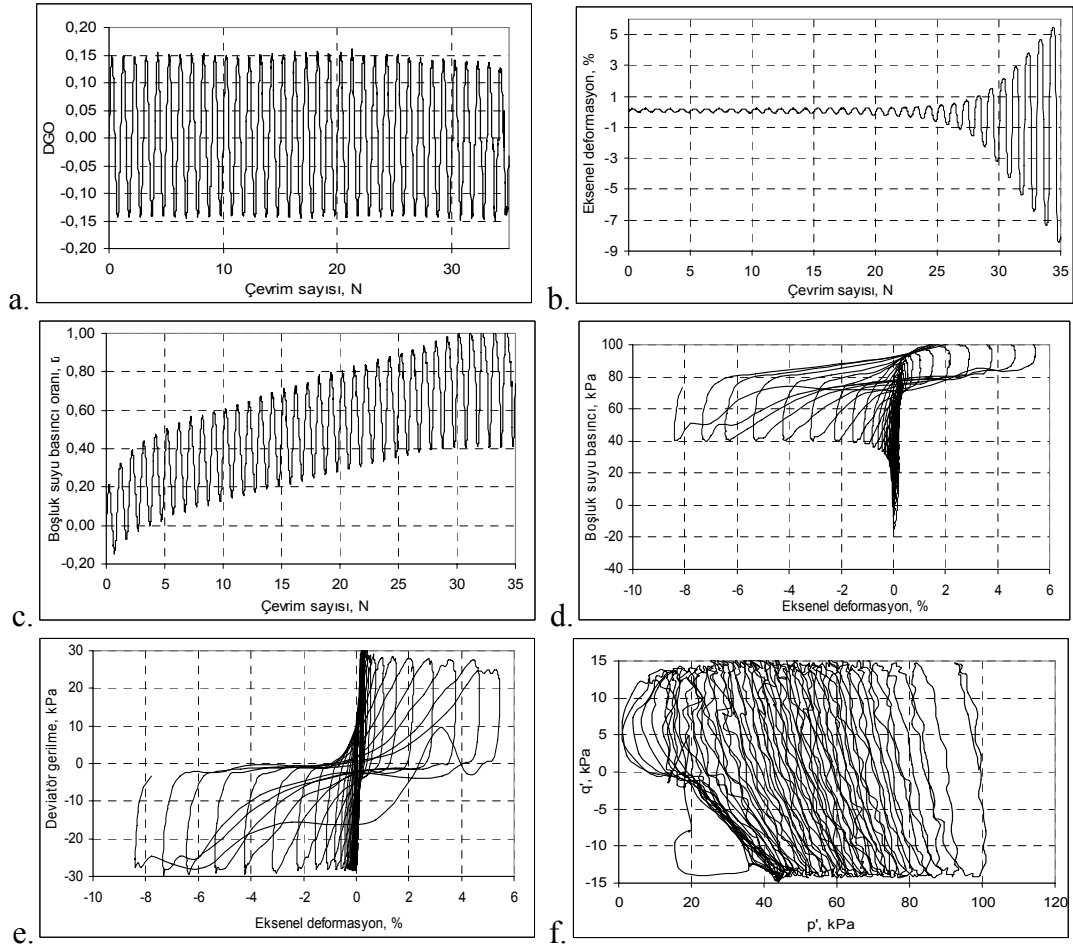
Foto Ek-1.10. %71 ince içeren ve %9 kil içeren numunenin $DGO=0.25$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.11. %71 ince içeren ve %9 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



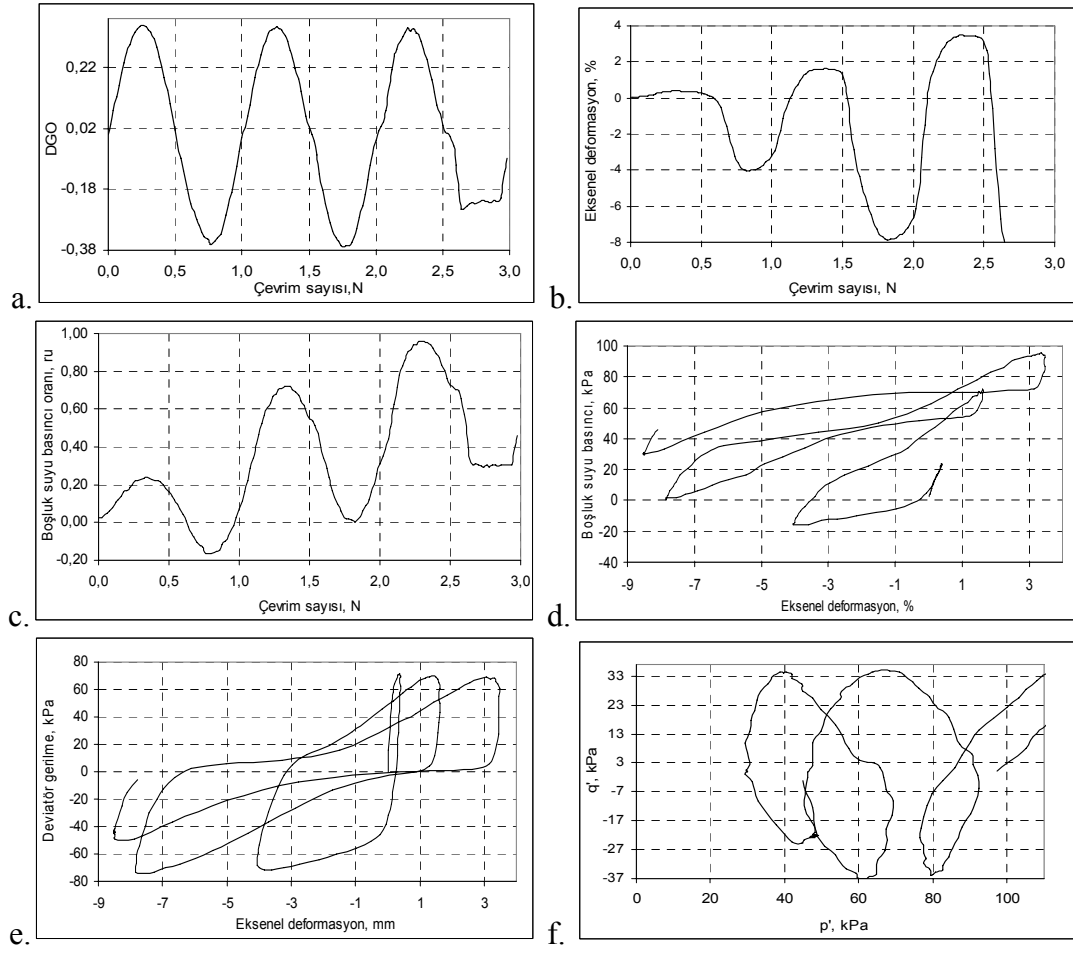
Foto Ek-1.11. %71 ince içeren ve %9 kil içeren numunenin DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.12. %71 ince içeren ve %9 kil içeren zemin numunesi DGO=0.15 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



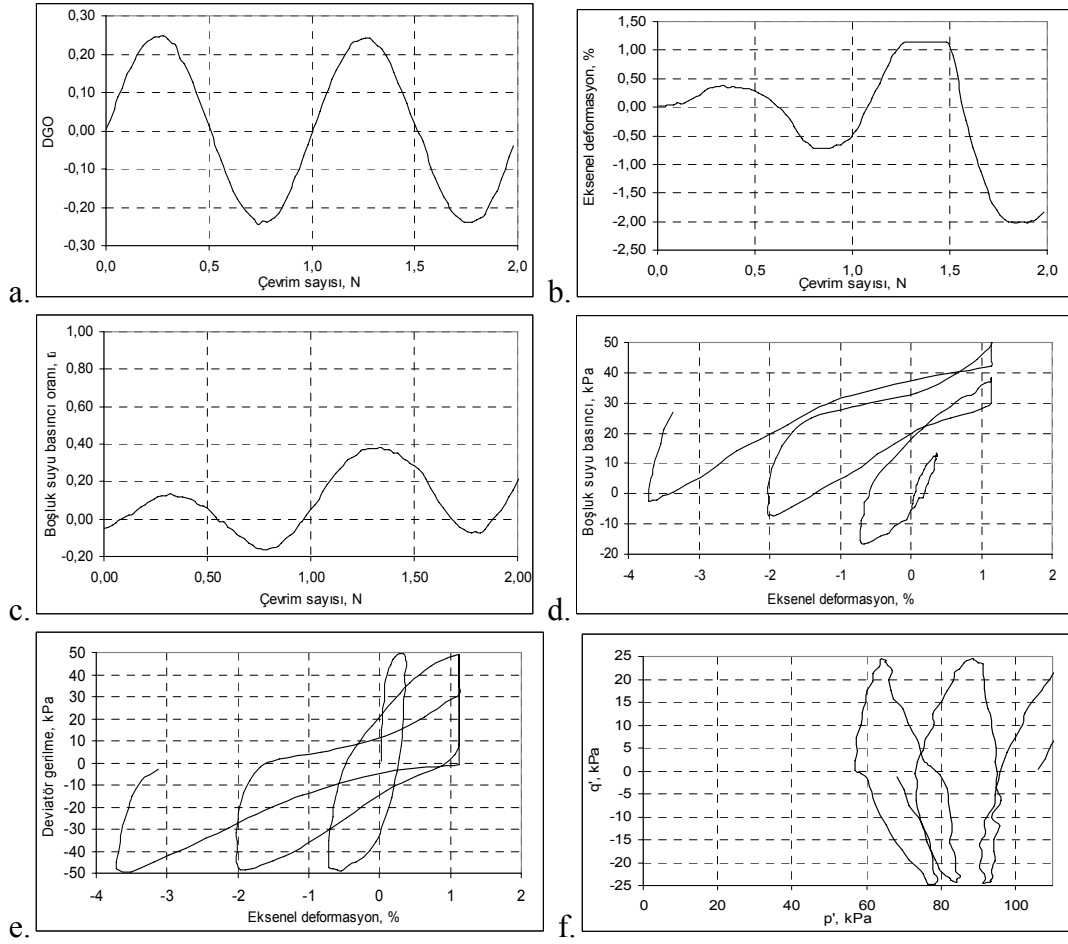
Foto Ek-1.12. %71 ince içeren ve %9 kil içeren numunenin DGO=0.15 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.13. %67 ince içeren ve %10 kil içeren zemin numunesi DGO=0.35 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



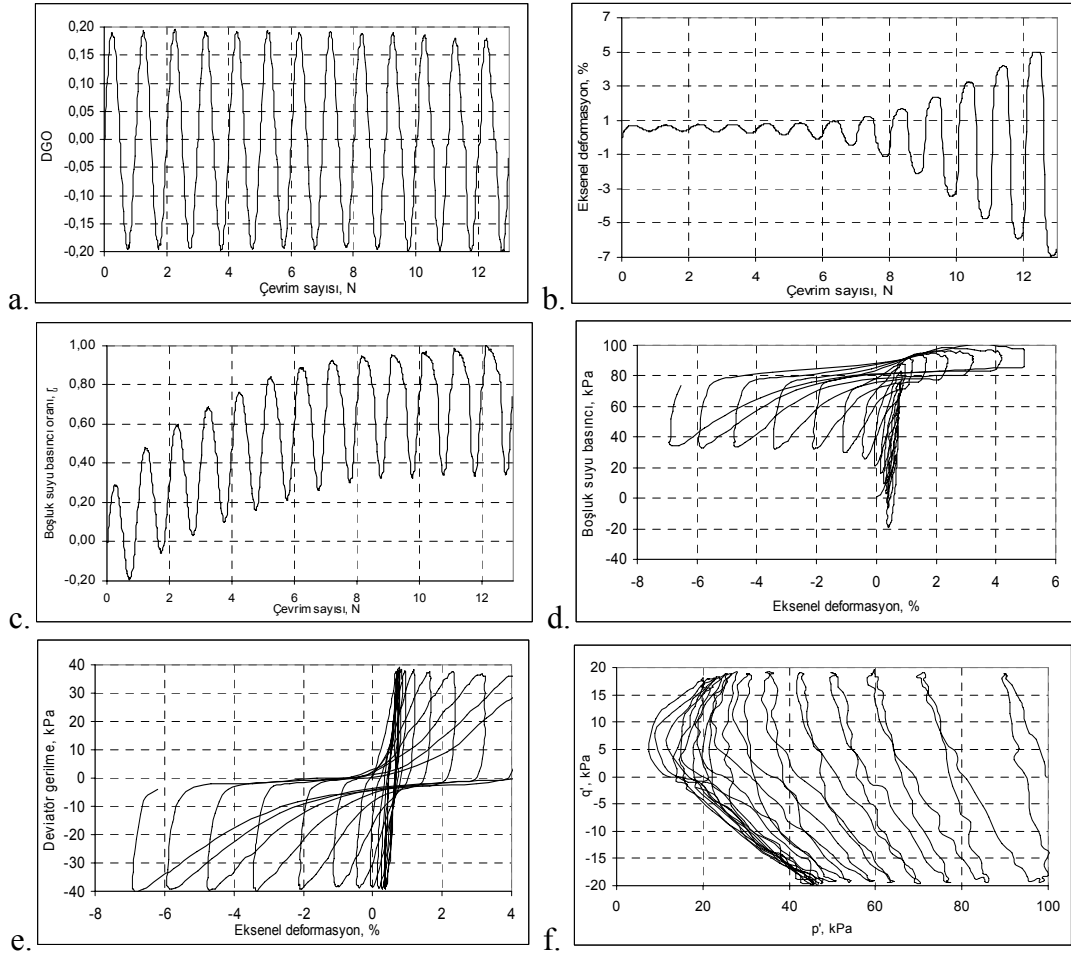
Foto Ek-1. 13. %67 ince içeren ve %10 kil içeren numunenin DGO=0.35 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.14. %67 ince içeren ve %10 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.25$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



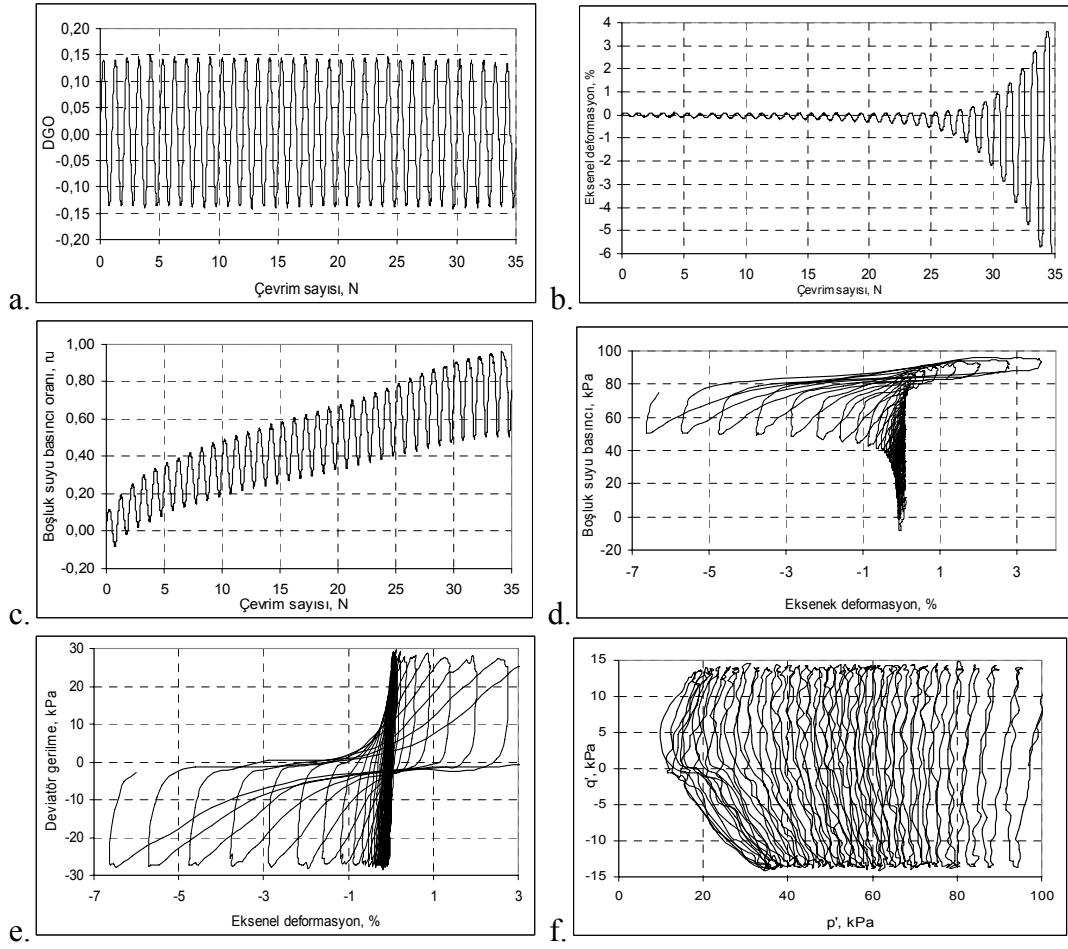
Foto Ek-1.14. %67 ince içeren ve %10 kil içeren numunenin $DGO=0.25$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.15. %67 ince içeren ve %10 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



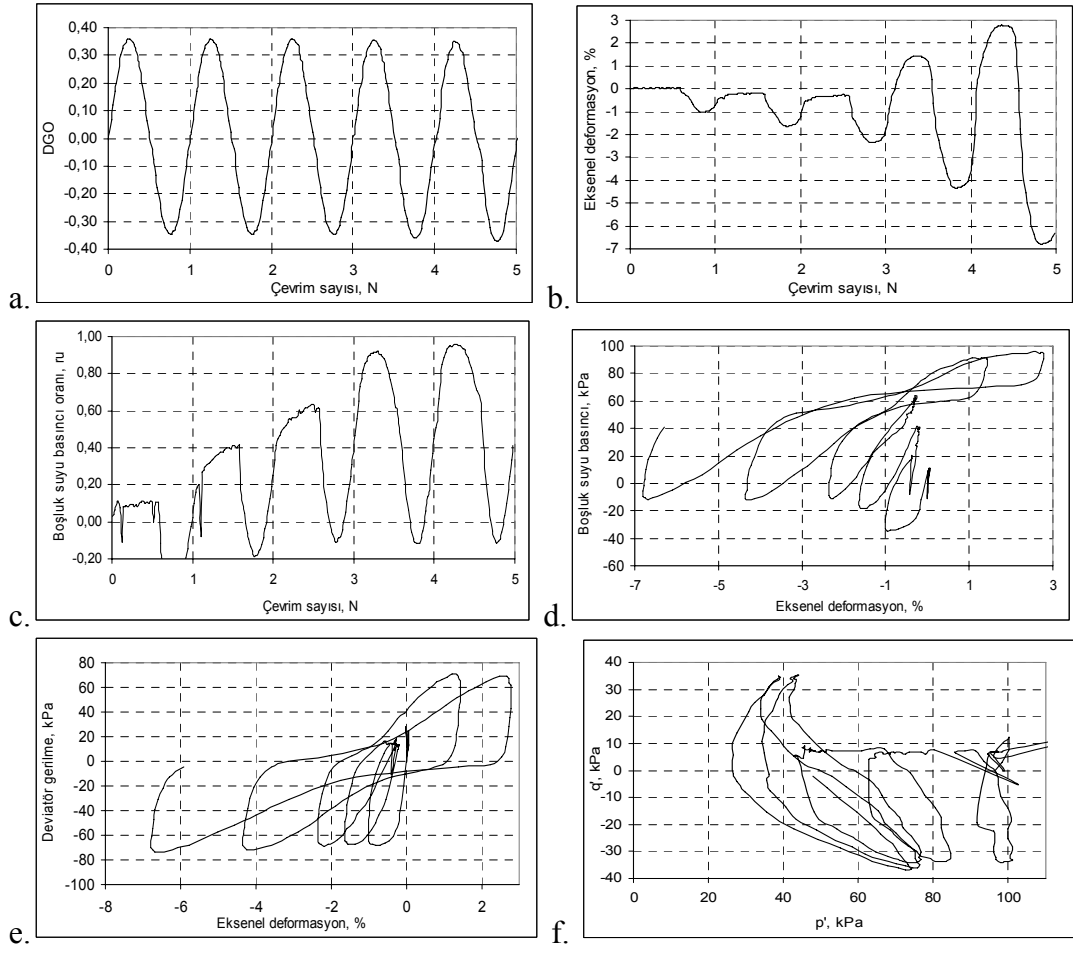
Foto Ek-1.15. %67 ince içeren ve %10 kil içeren numunenin DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.16. %67 ince içeren ve %10 kil içeren zemin numunesi DGO=0.15 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



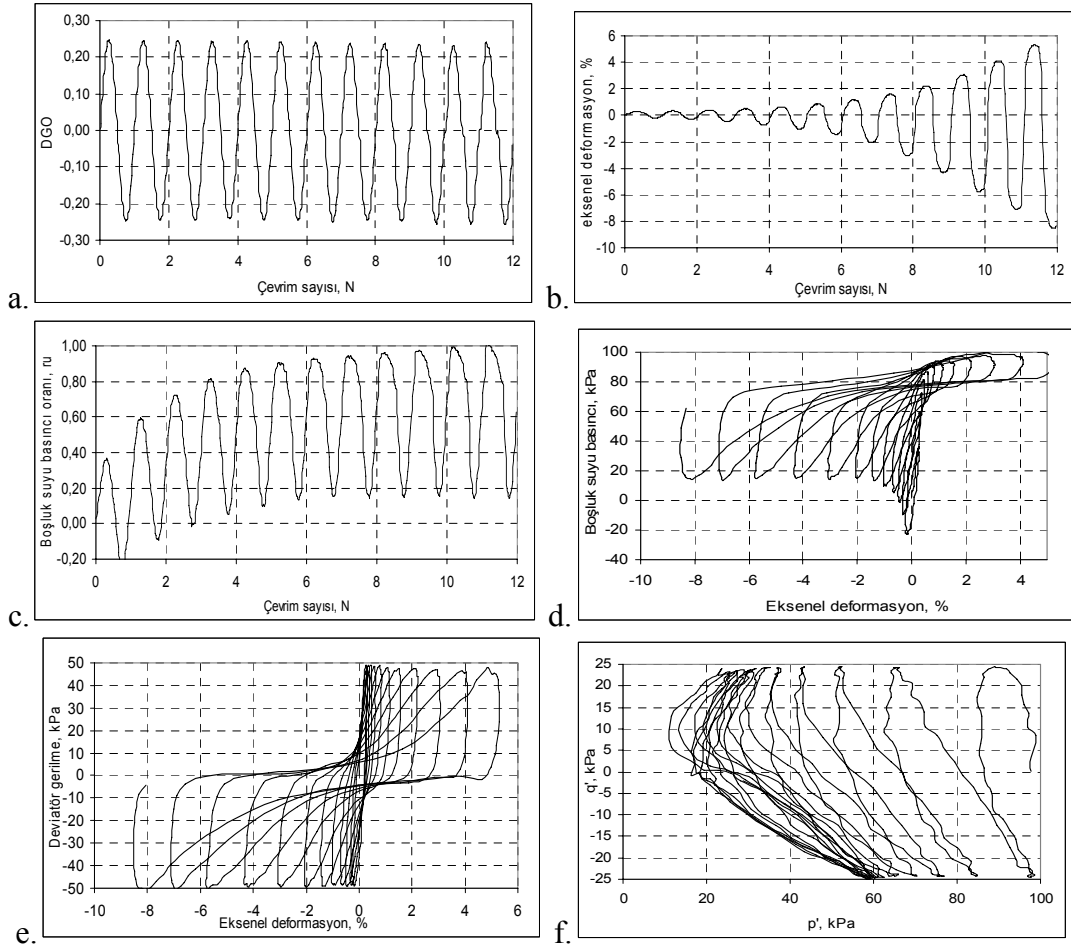
Foto Ek-1.16. %67 ince içeren ve %10 kil içeren numunenin DGO=0.15 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.17. %73 ince içeren ve %12 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.35$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



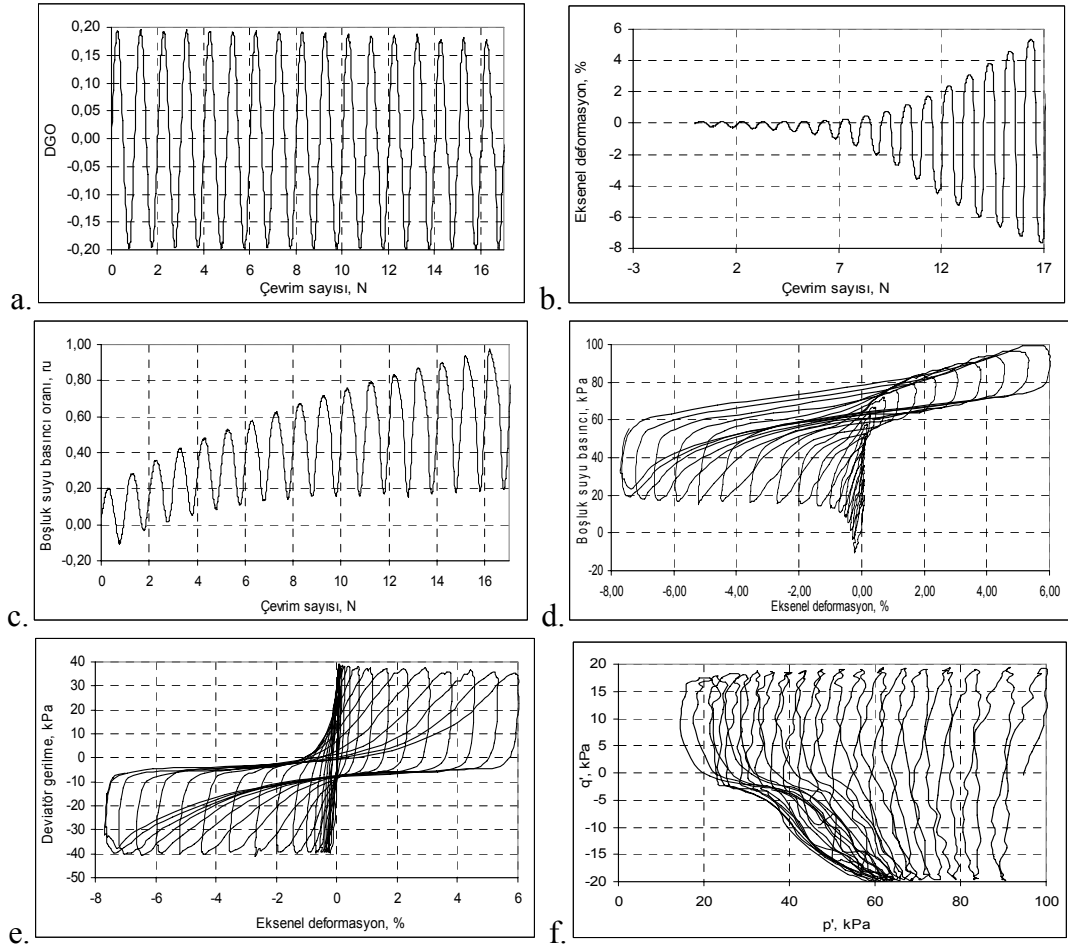
Foto Ek-1.17. %73 ince içeren ve %12 kil içeren numunenin $DGO=0.35$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.18. %73 ince içeren ve %12 kil içeren zemin numunesi DGO=0.25 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q'-p' arasındaki ilişki



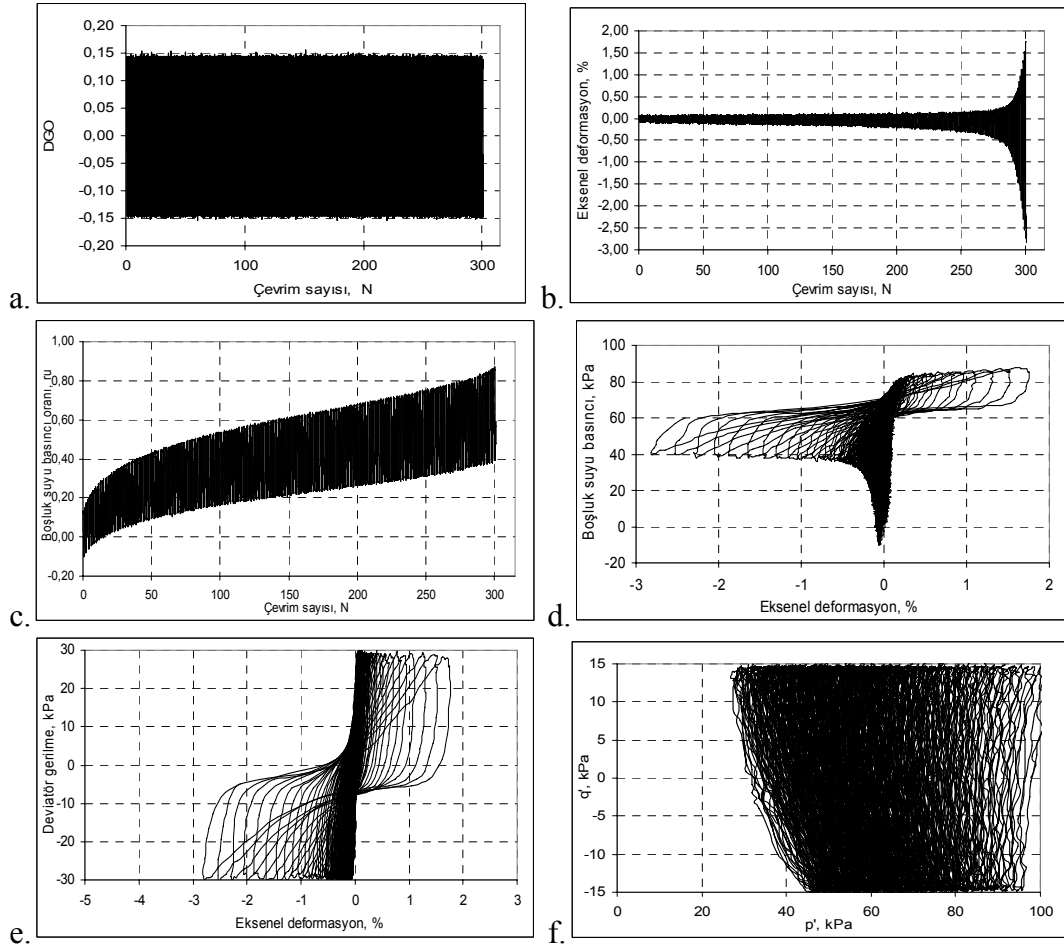
Foto Ek-1.18. %73 ince içeren ve %12 kil içeren numunenin DGO=0.25 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.19. %73 ince içeren ve %12 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



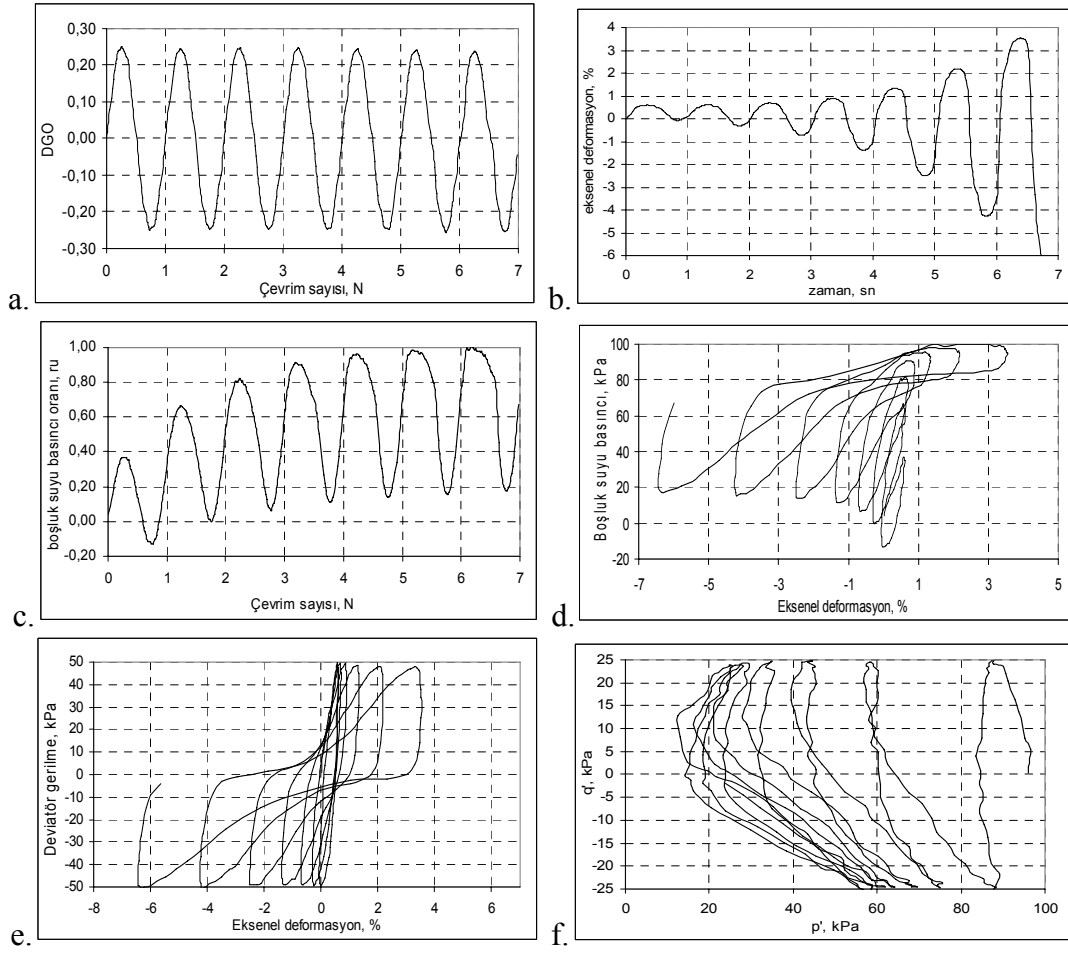
Foto Ek-1.19. %73 ince içeren ve %12 kil içeren numunenin DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.20. %73 ince içeren ve %12 kil içeren zemin numunesi DGO=0.15 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



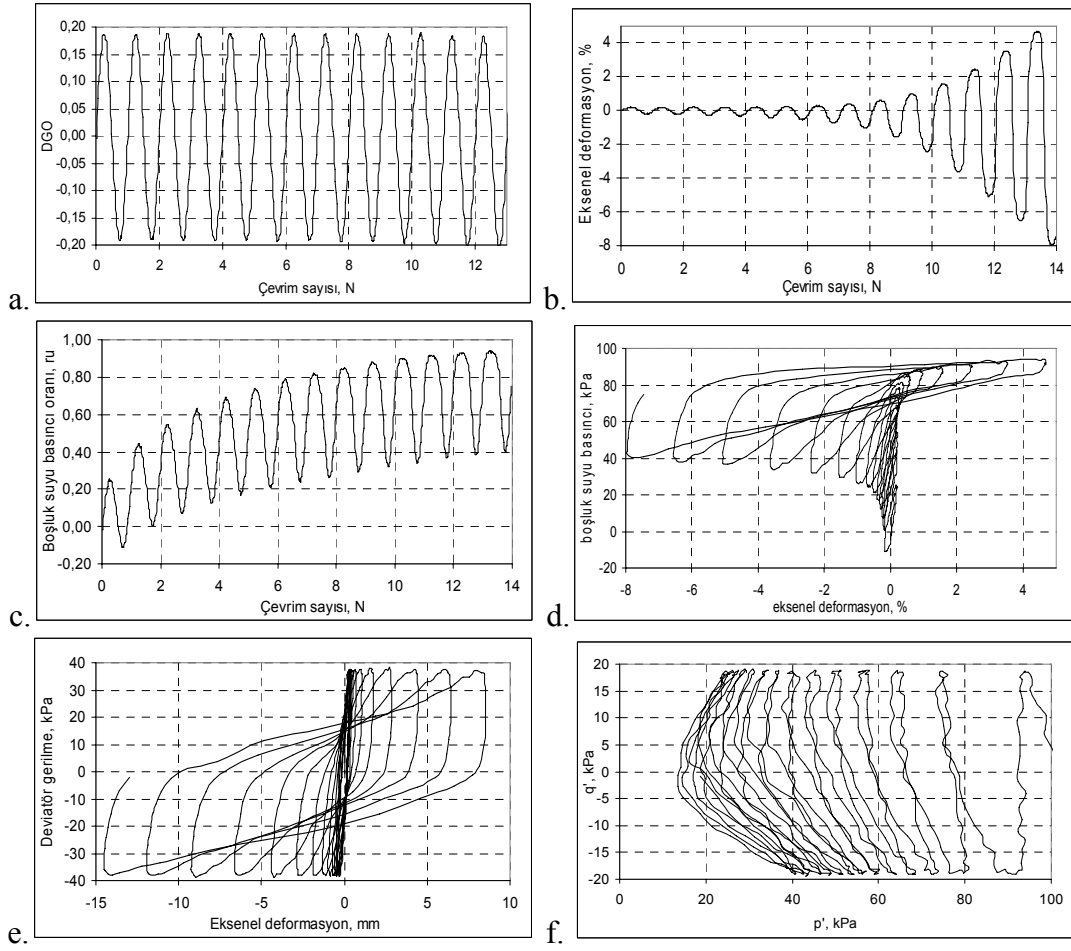
Foto Ek-1.20. %73 ince içeren ve %12 kil içeren numunenin DGO=0.15 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.21. %63 ince içeren ve %13 kil içeren zemin numunesi DGO=0.25 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



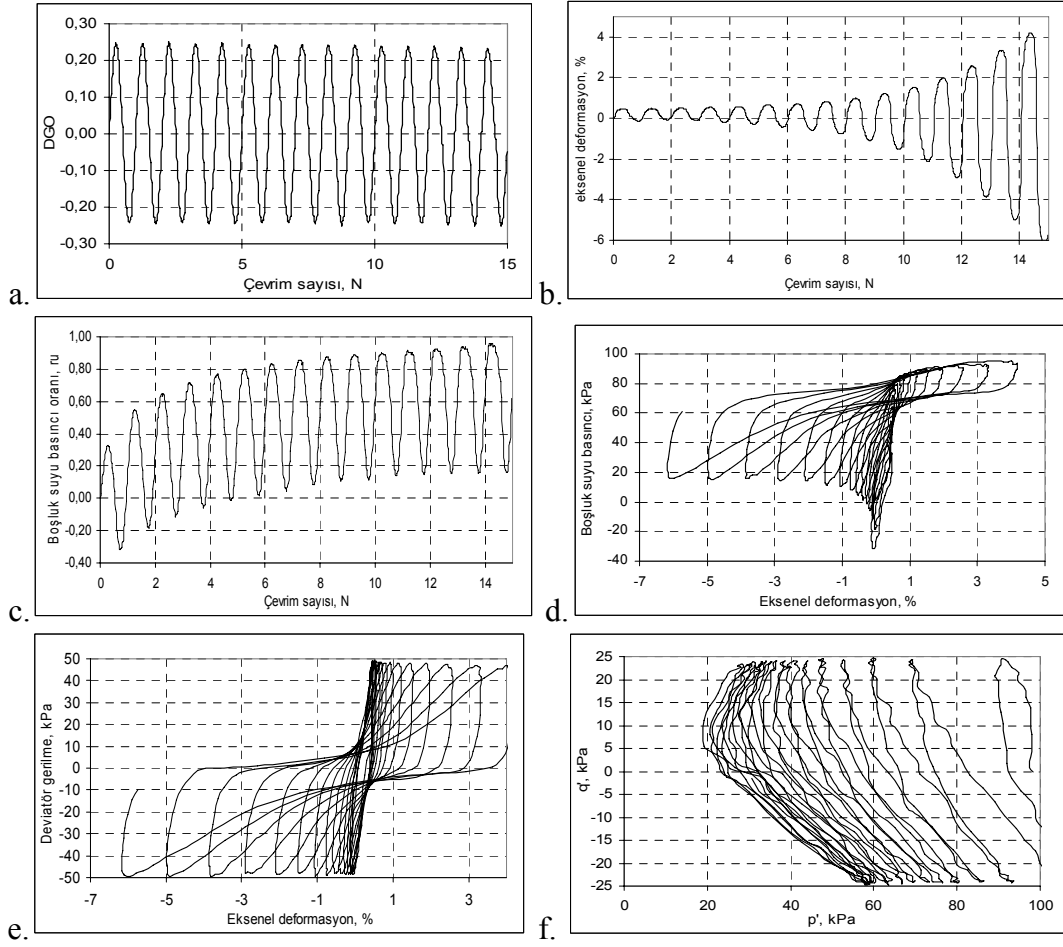
Foto Ek-1.21. %63 ince içeren ve %13 kil içeren numunenin DGO=0.25 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.22. %63 ince içeren ve %13 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



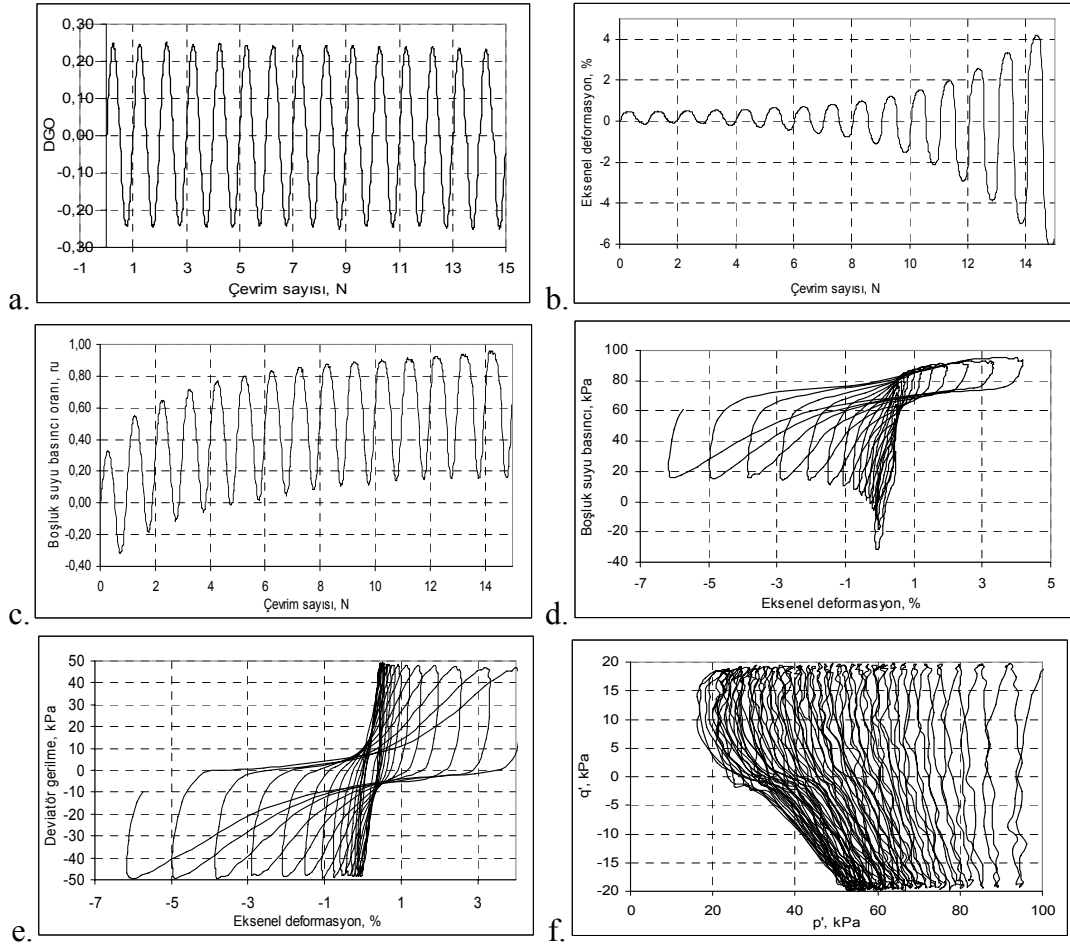
Foto Ek-1.22. %63 ince içeren ve %13 kil içeren numunenin DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.23. %75 ince içeren ve %15 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.25$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



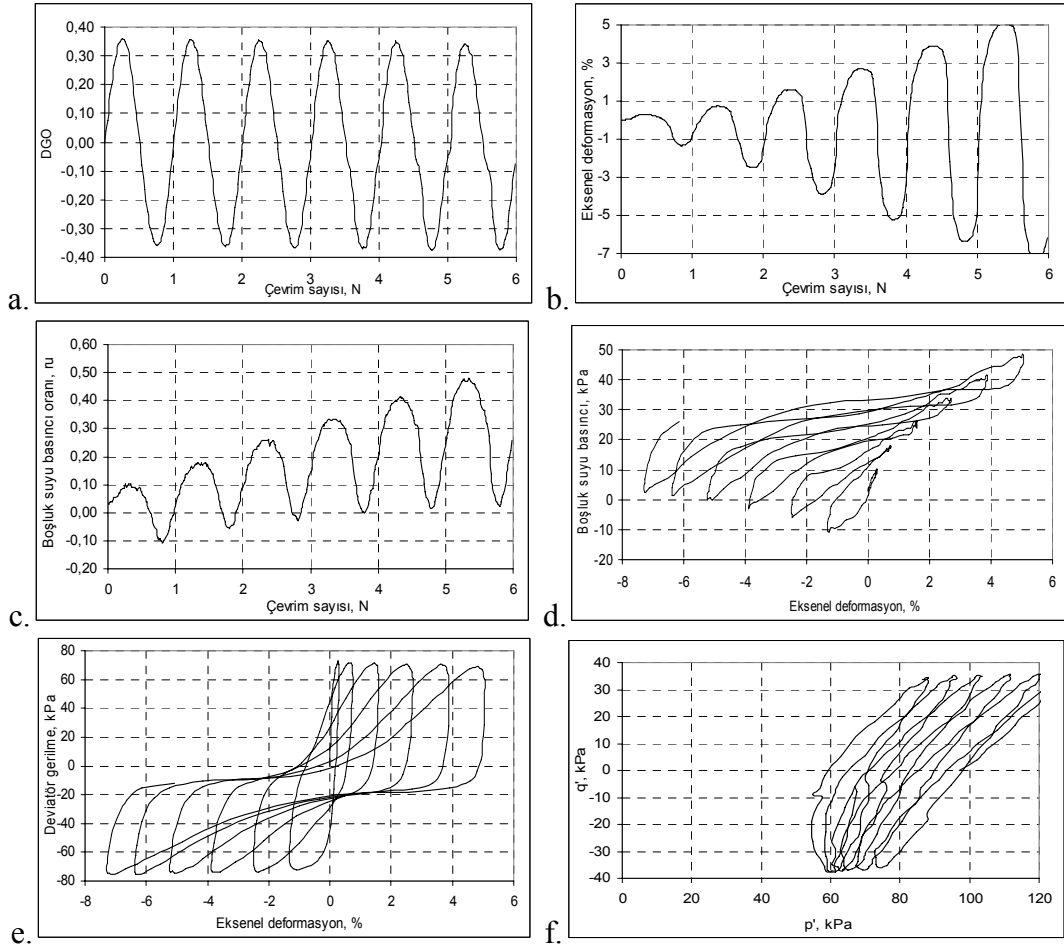
Foto Ek-1.23. %75 ince içeren ve %15 kil içeren numunenin $DGO=0.25$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.24. %75 ince içeren ve %15 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q'-p' arasındaki ilişki



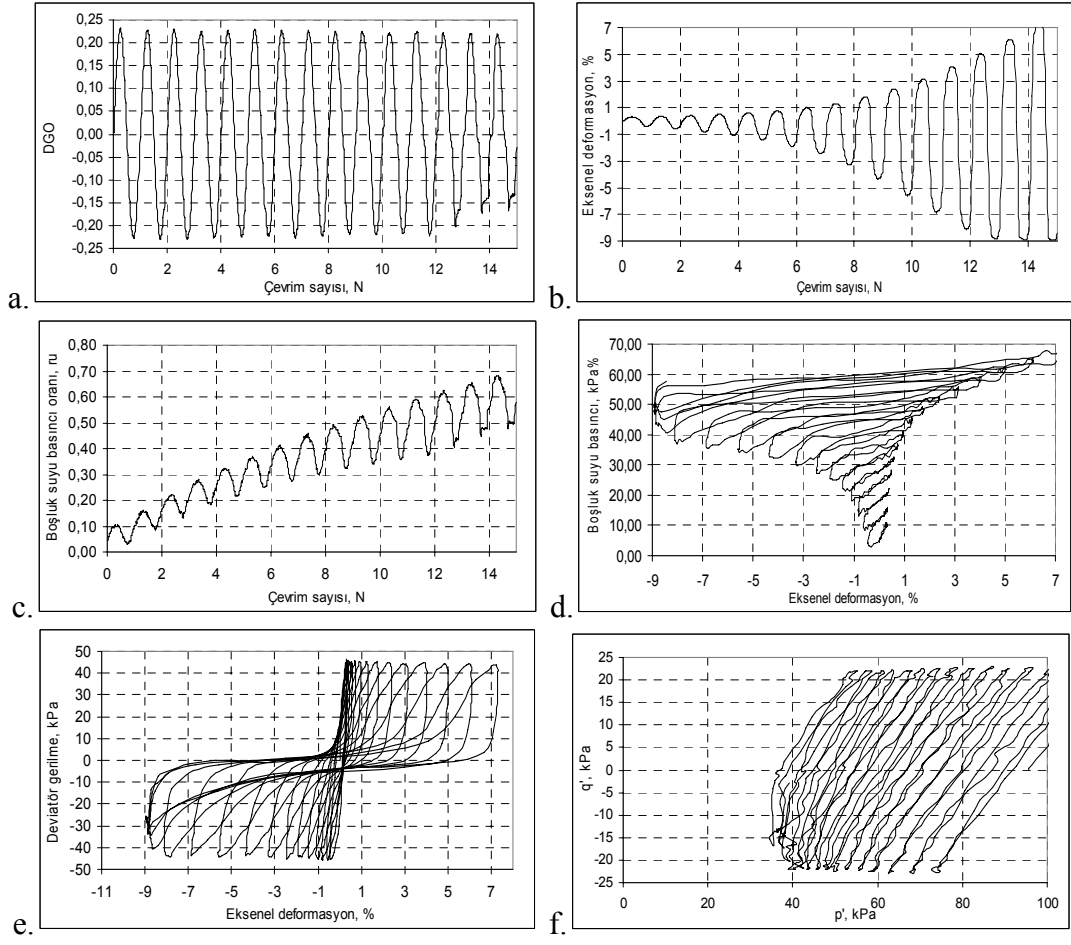
Foto Ek-1.24. %75 ince içeren ve %15 kil içeren numunenin DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.25. %78 ince içeren ve %18 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.35$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



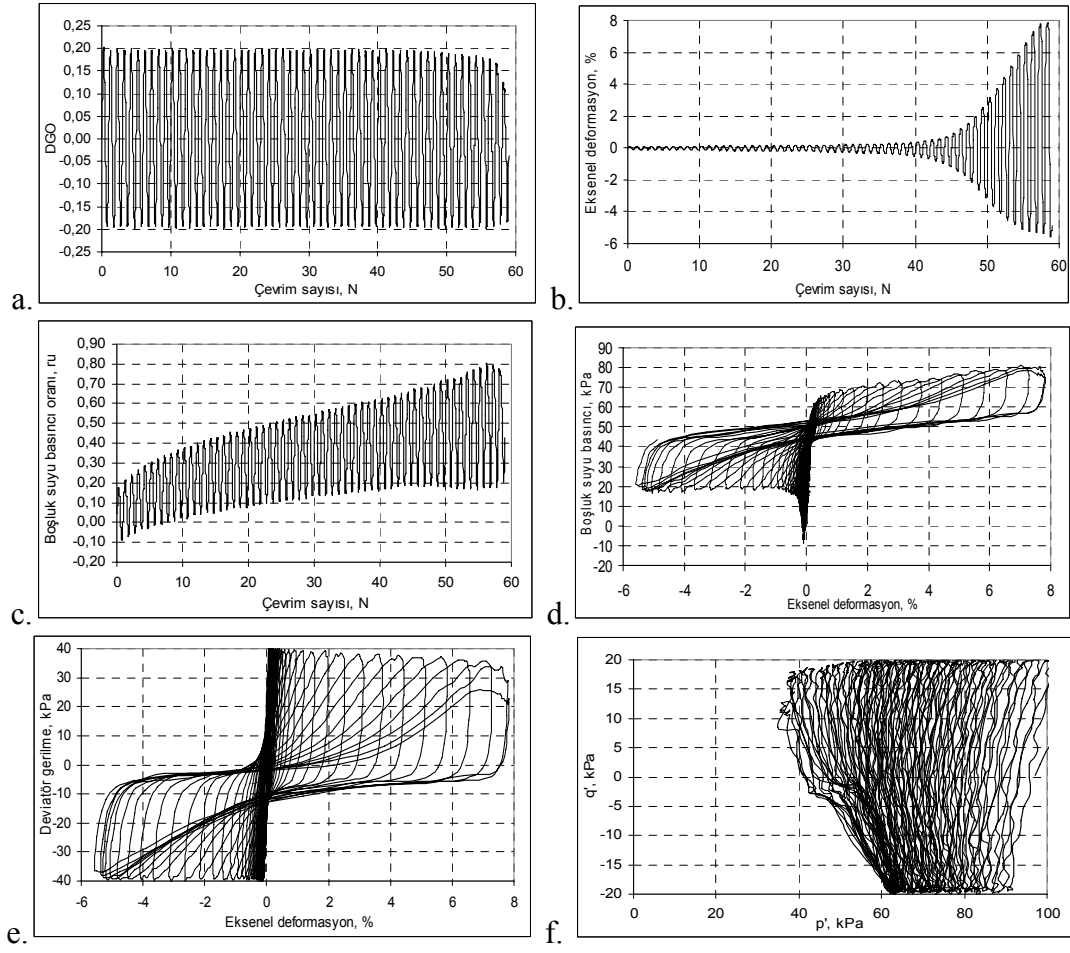
Foto Ek-1.25. %78 ince içeren ve %18 kil içeren numunenin $DGO=0.35$ deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.26. %78 ince içeren ve %18 kil içeren zemin numunesi DGO=0.25 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q'-p' arasındaki ilişki



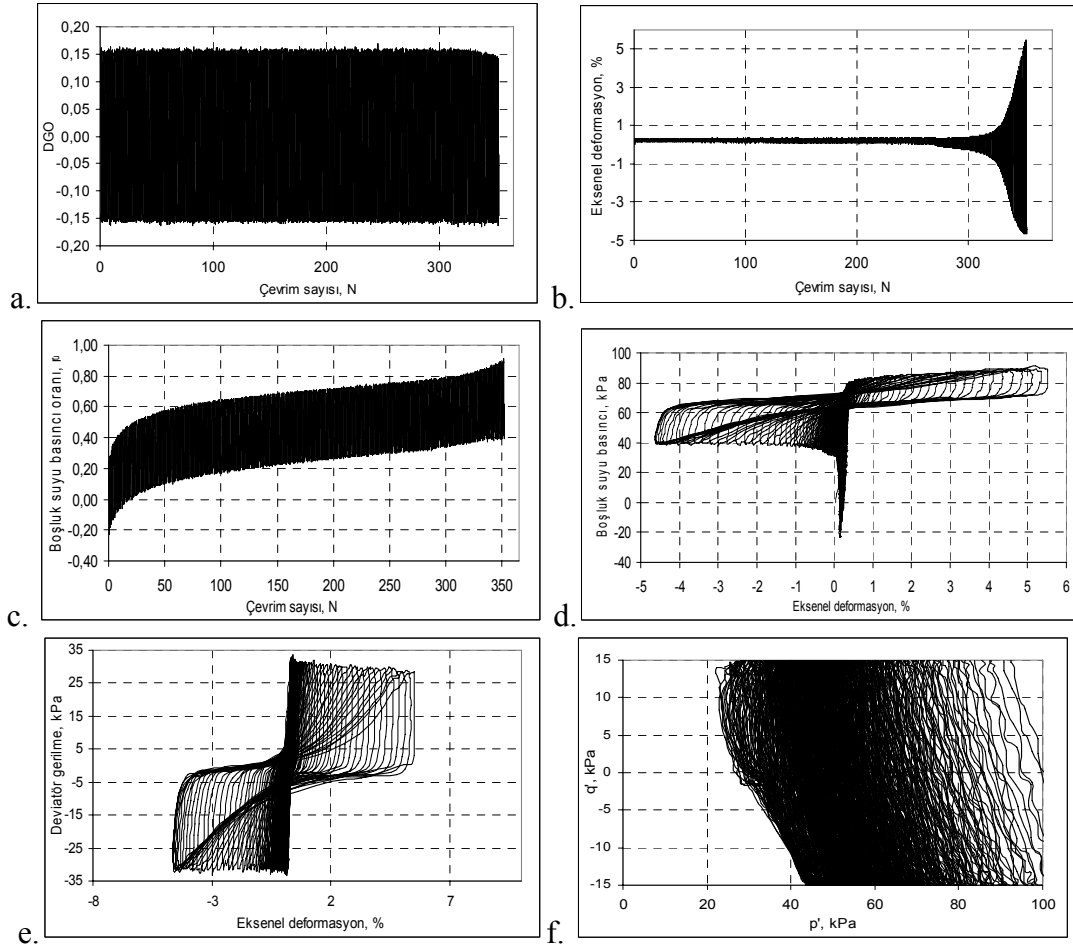
Foto Ek-1.26. %78 ince içeren ve %18 kil içeren numunenin DGO=0.25 deney sonu fotoğrafı



Şekil Ek-1.27. %78 ince içeren ve %18 kil içeren zemin numunesi DGO=0.20 deney sonuçları, a. DGO-çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



Foto Ek-1.27. %78 ince içeren ve %18 kil içeren numunenin DGO=0.20 deney sonu fotoğrafı



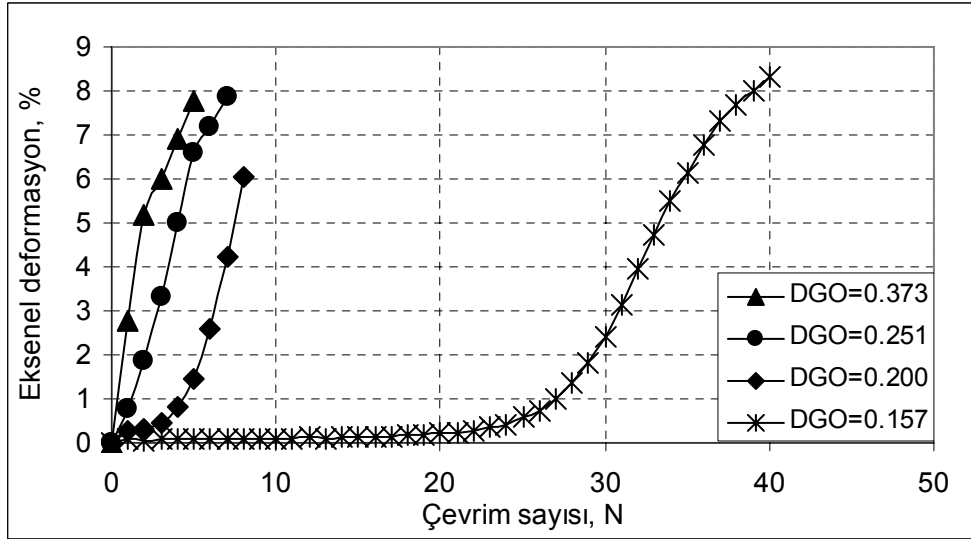
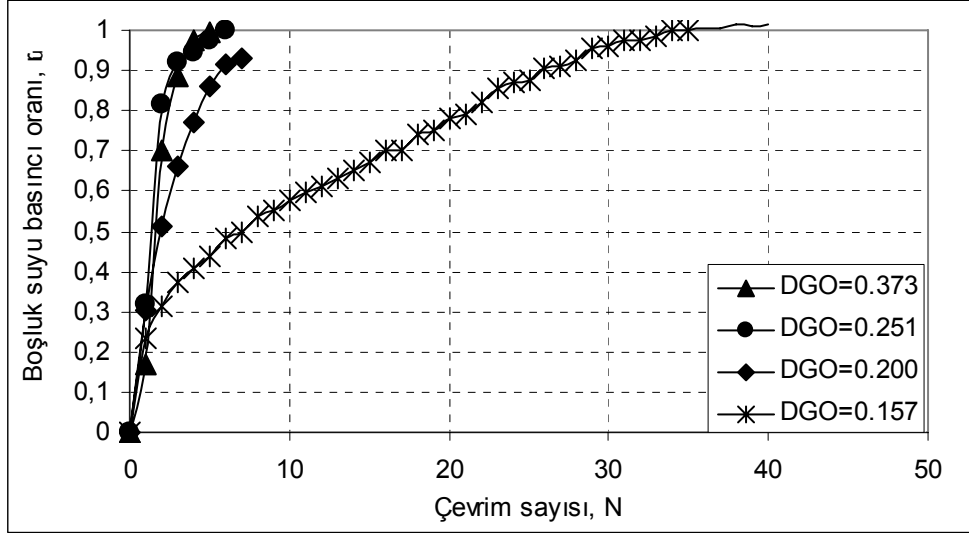
Şekil Ek-1.28. %78 ince içeren ve %18 kil içeren zemin numunesi $DGO=0.15$ deney sonuçları, a. DGO -çevrim sayısı, b. eksenel deformasyon-çevrim sayısı, c. boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı, d. boşluk suyu basıncı-eksenel deformasyon, e. deviyatör gerilme-eksenel deformasyon, f. q' - p' arasındaki ilişki



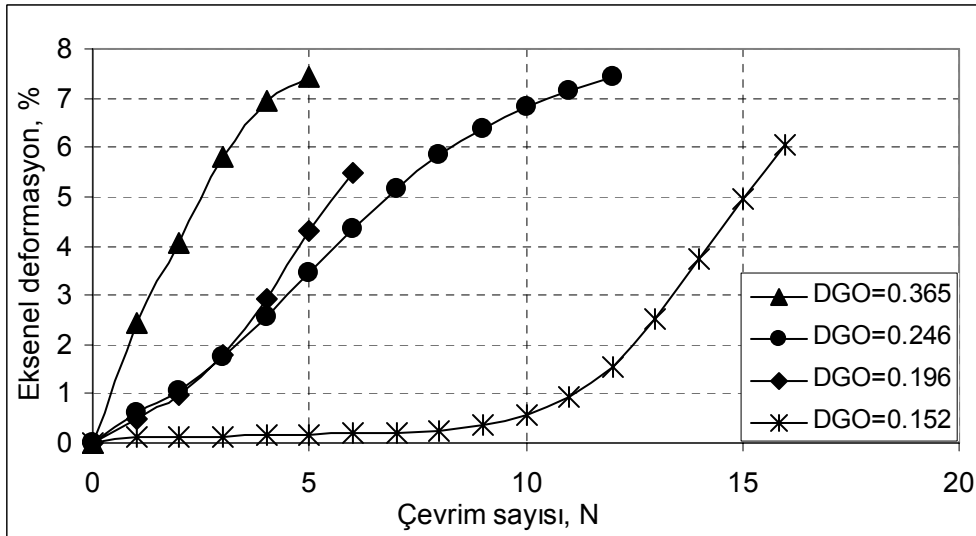
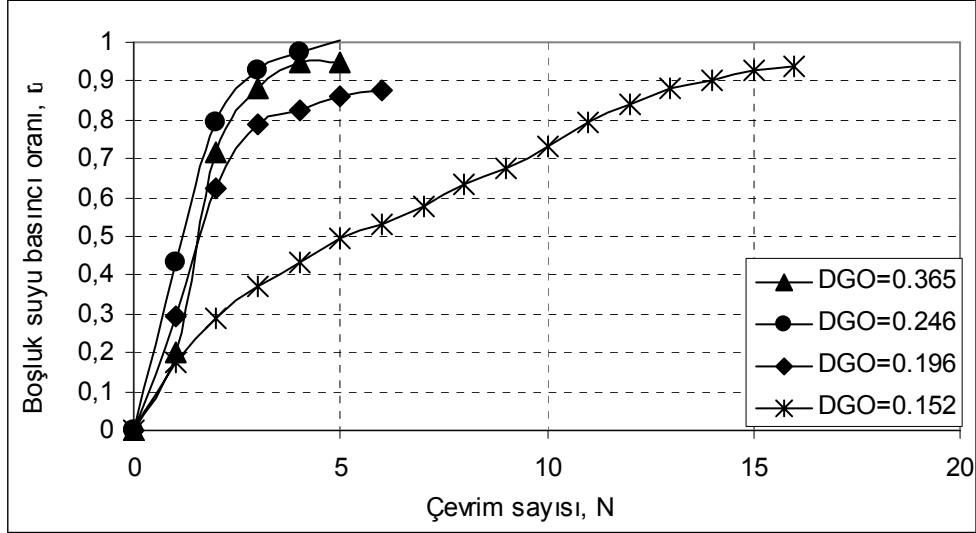
Foto Ek-1.28. %78 ince içeren ve %18 kil içeren numunenin $DGO=0.15$ deney sonu fotoğrafı

EKLER-II

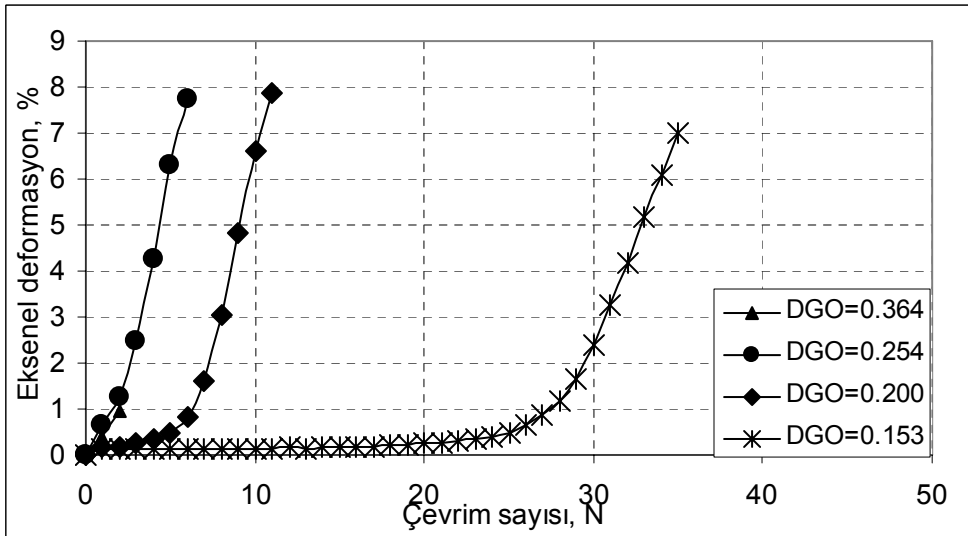
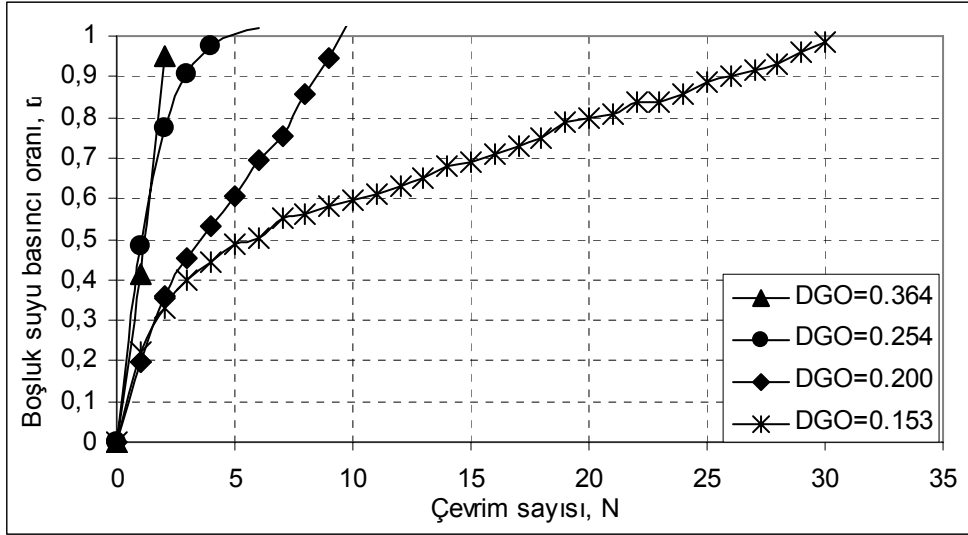
FARKLI DGO DEĞERLERİNDE BOŞLUK SUYU BASINCI ORANI-ÇEVİRİM SAYISI İLE EKSENEL DEFORMASYON-ÇEVİRİM SAYISI ARASINDAKİ İLİŞKİ



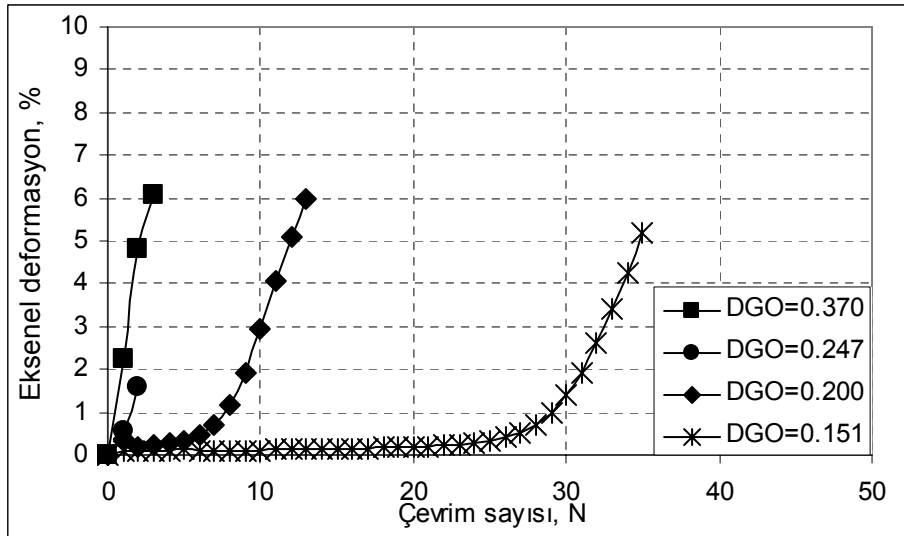
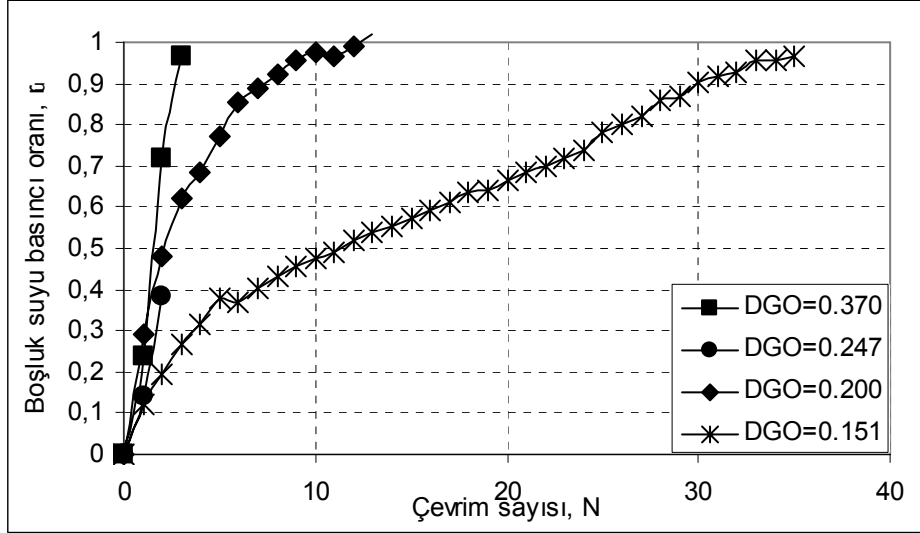
Şekil Ek-2.1. %54 ince ve %4 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



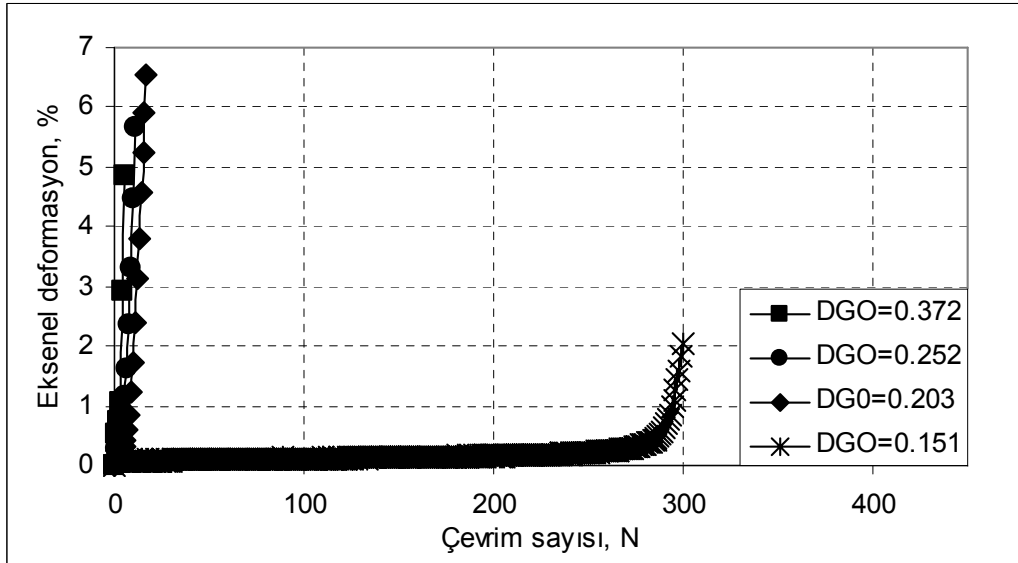
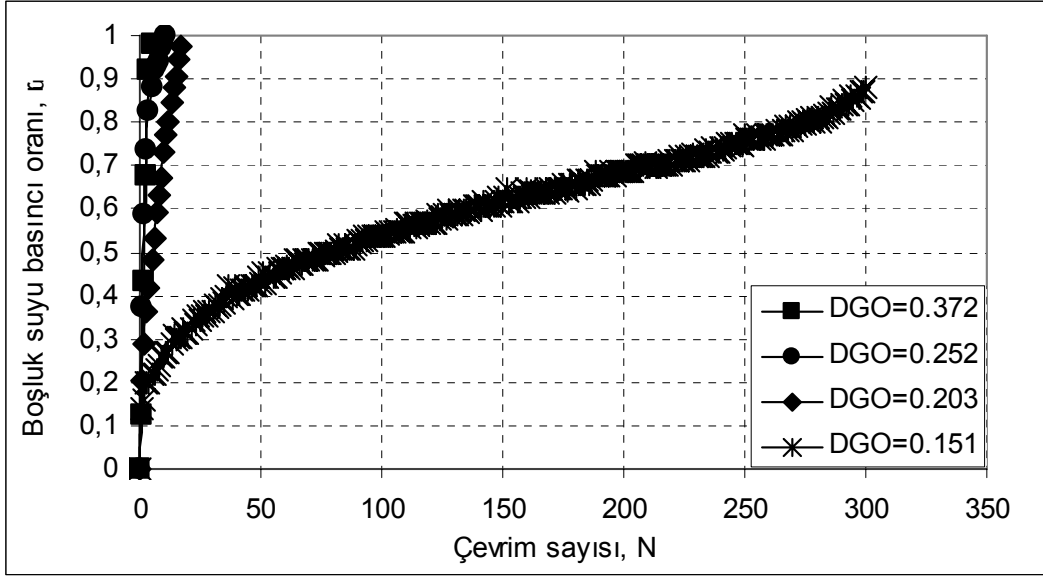
Şekil Ek-2.2. %51 ince ve %6 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



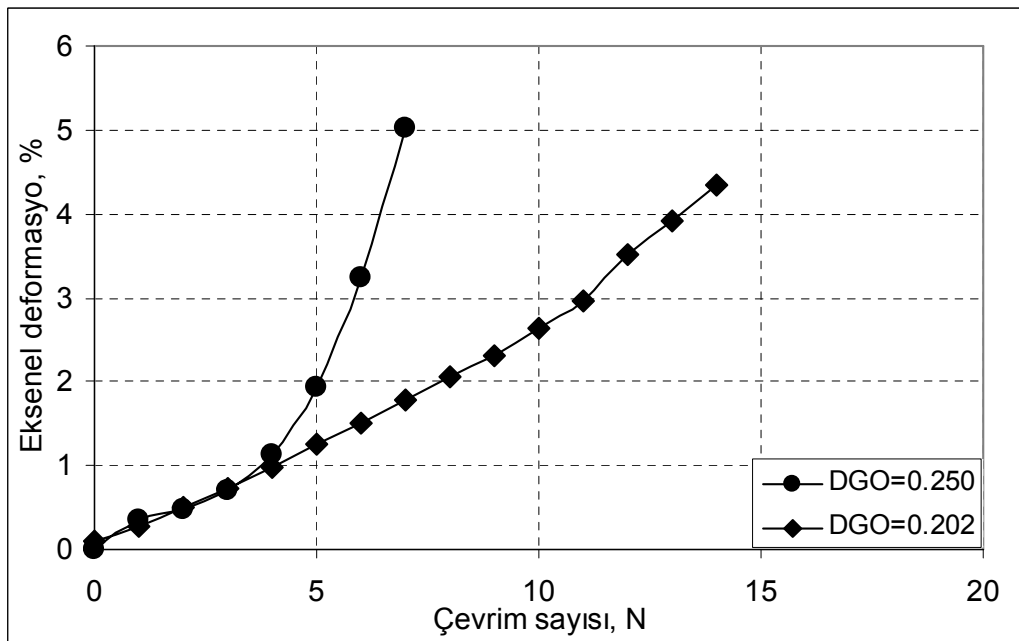
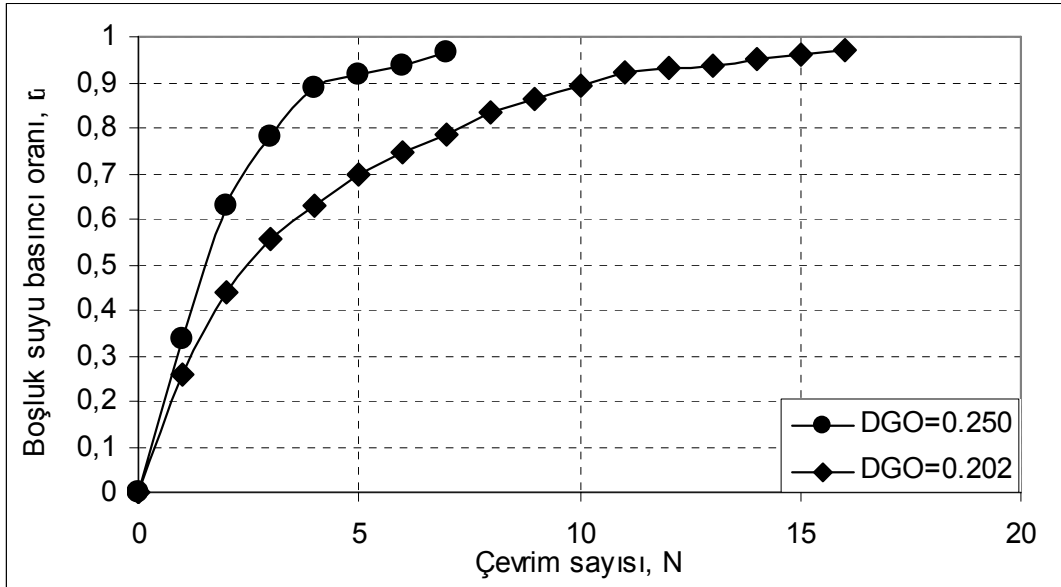
Şekil Ek-2.3. %71 ince ve %9 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



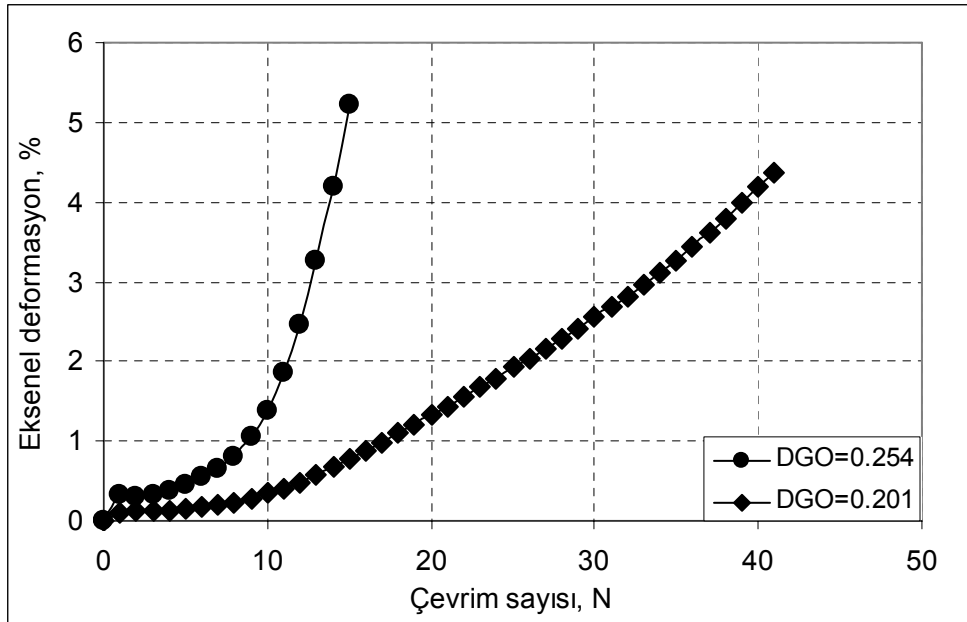
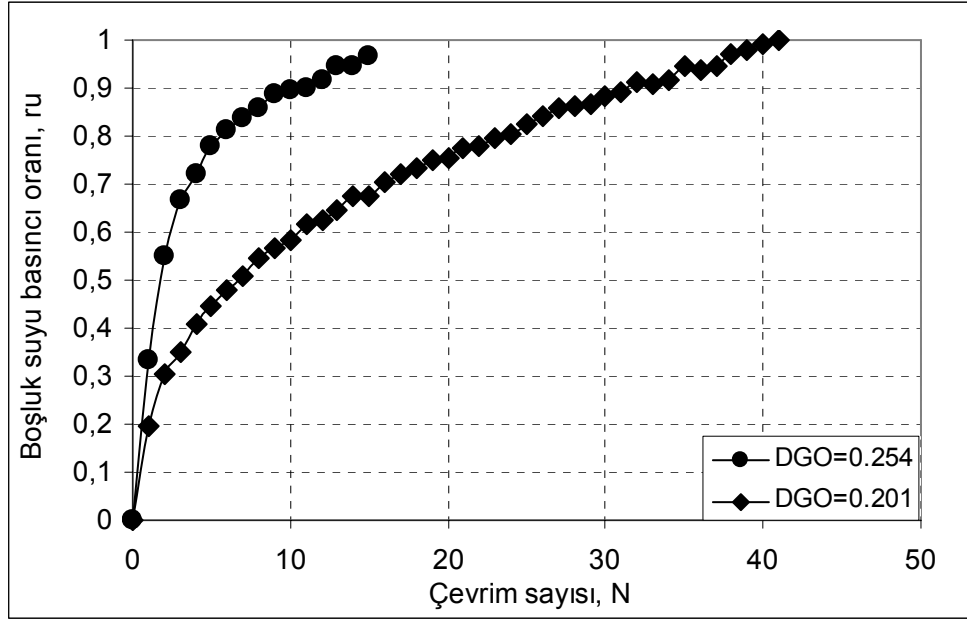
Şekil Ek-2.4. %67 ince ve %10 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



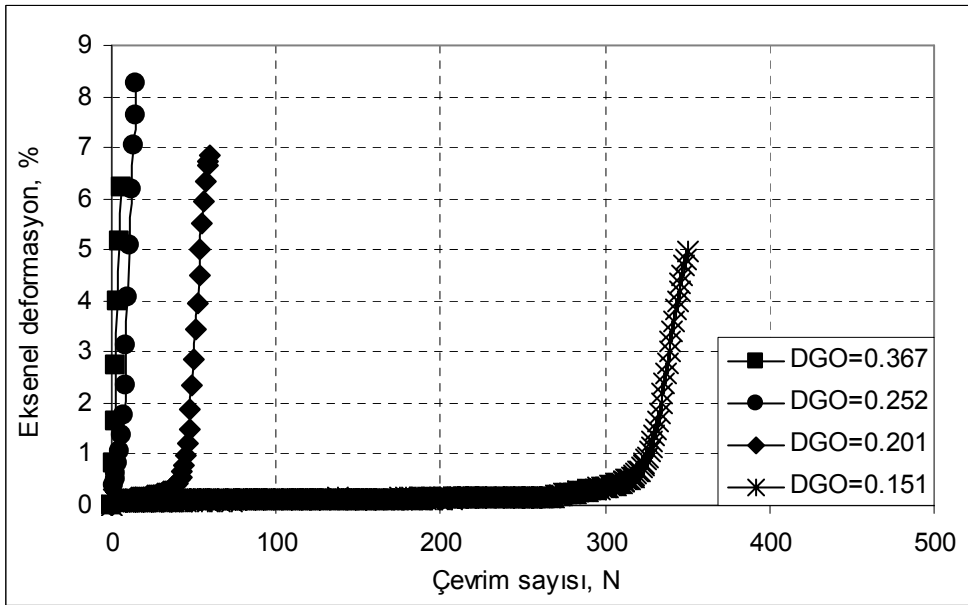
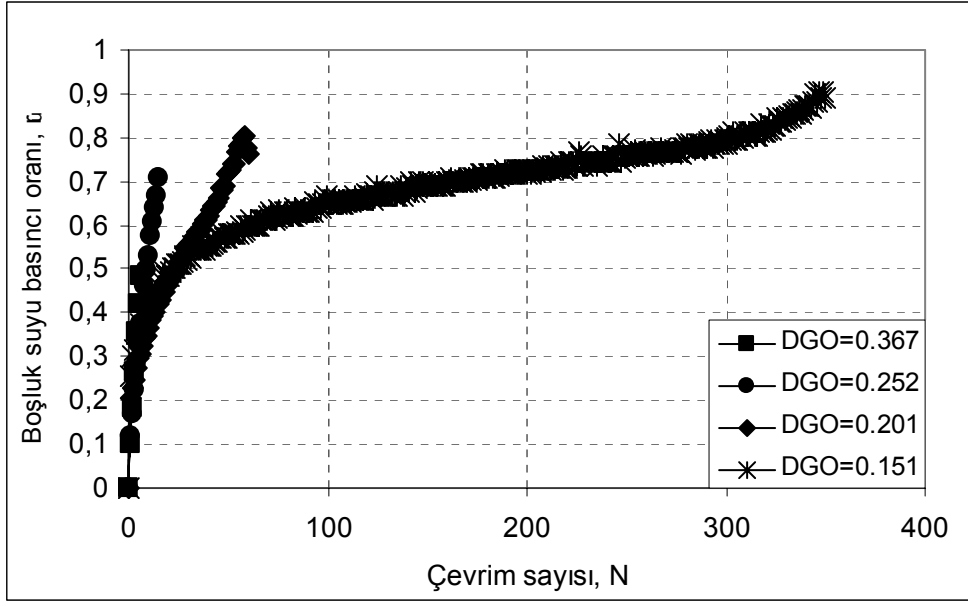
Şekil Ek-2.5. %73 ince ve %12 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



Şekil Ek-2.6. %63 ince ve %13 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



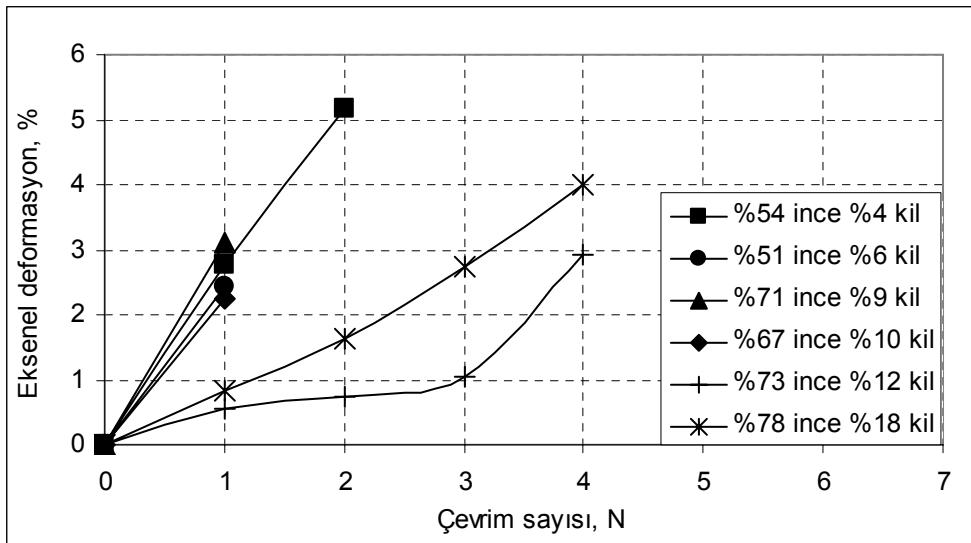
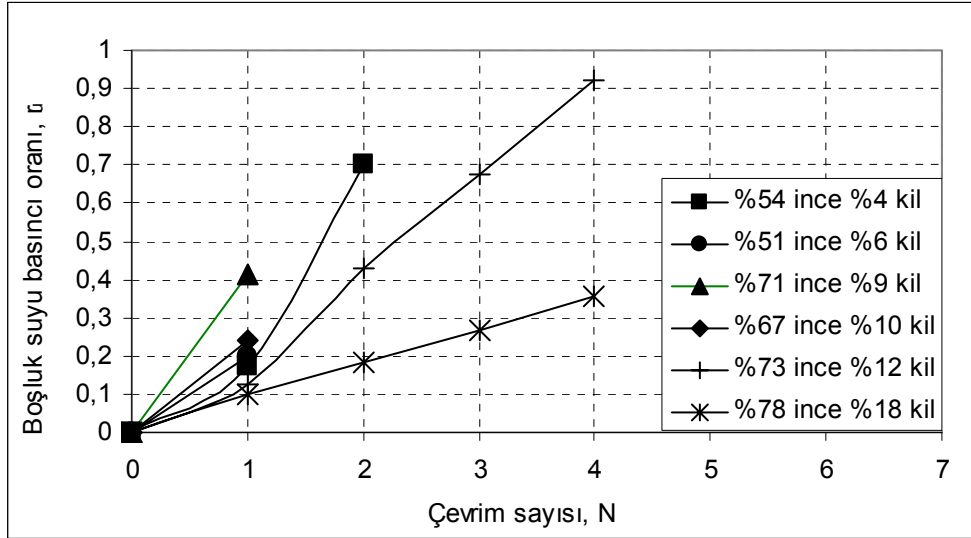
Şekil Ek-2.7. %75 ince ve %15 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi



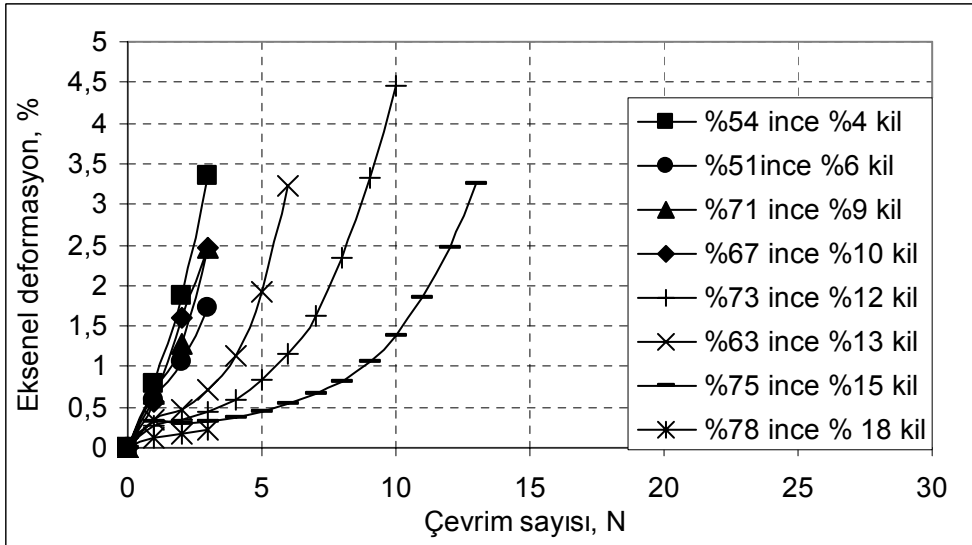
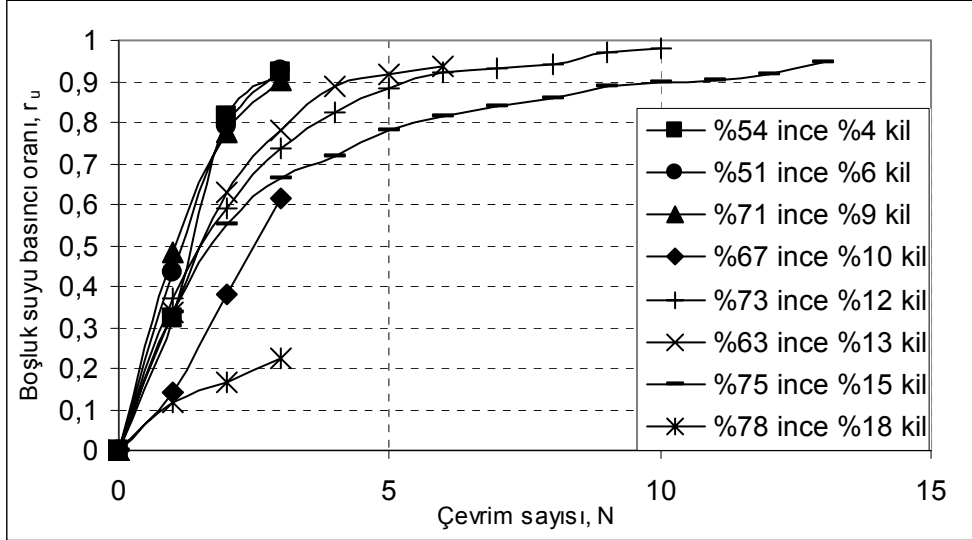
Şekil Ek-2.8. %78 ince ve %18 kil zeminin farklı DGO değerlerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel birim boy değişim genliği-çevrim sayısı ilişkisi

EKLER-III

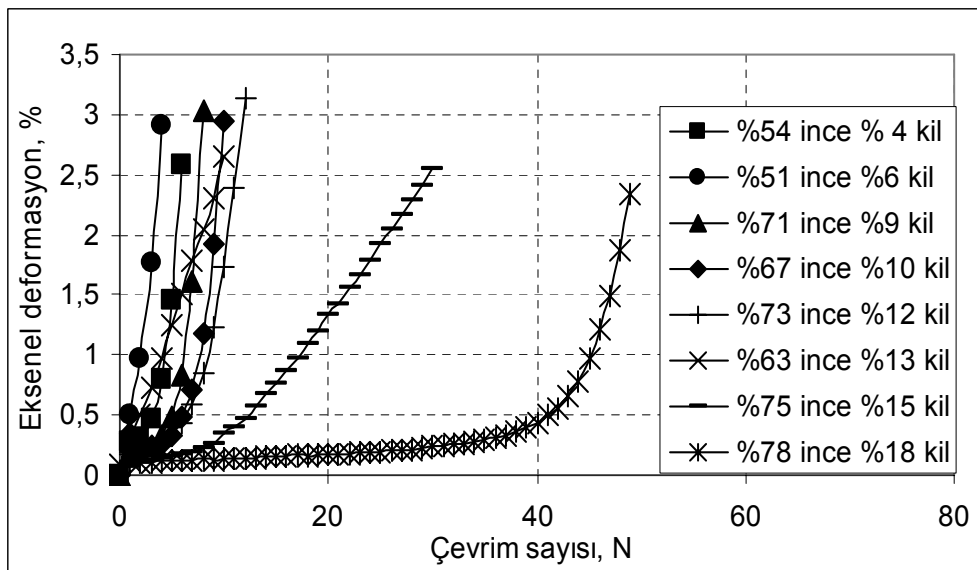
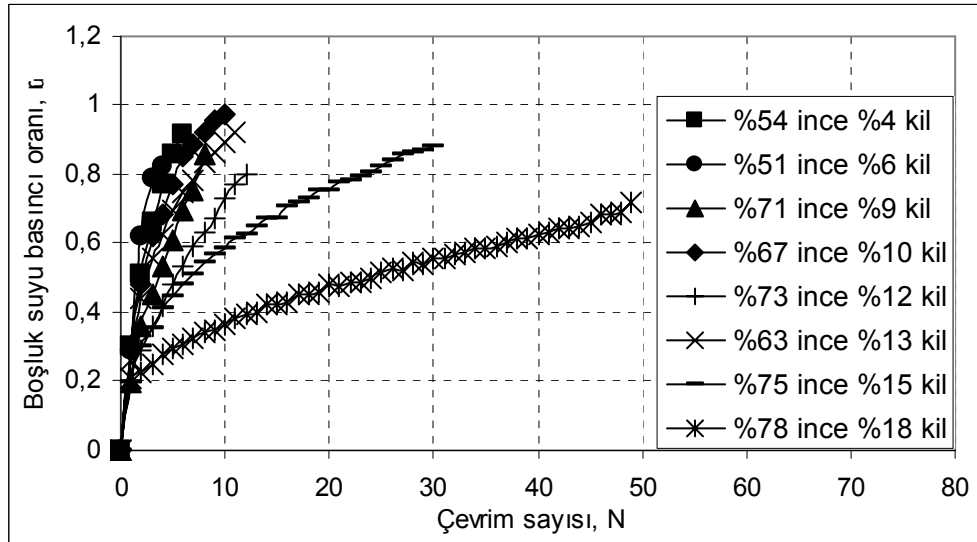
FARKLI İNCE VE KİL ORANLARINDAKİ ZEMİNLERİN DGO=0.35, 0.25, 0.20 VE 0.15 DEĞERLERİNDEKİ BOŞLUK SUYU BASINCI ORANI-ÇEVİRİM SAYISI İLE EKSENEL DEFORMASYON-ÇEVİRİM SAYISI ARASINDAKİ İLİŞKİ



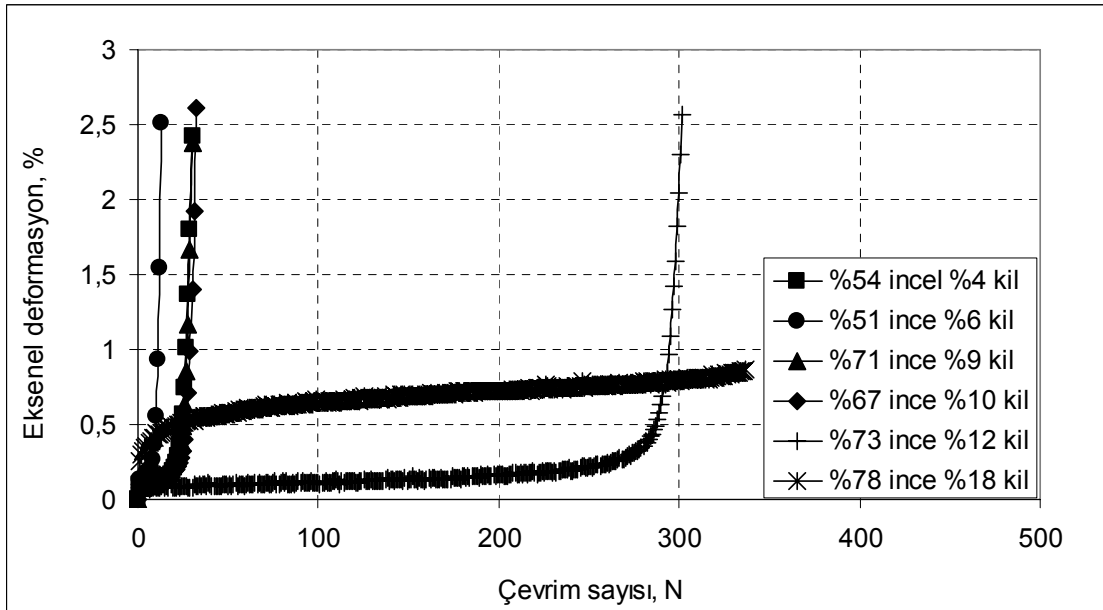
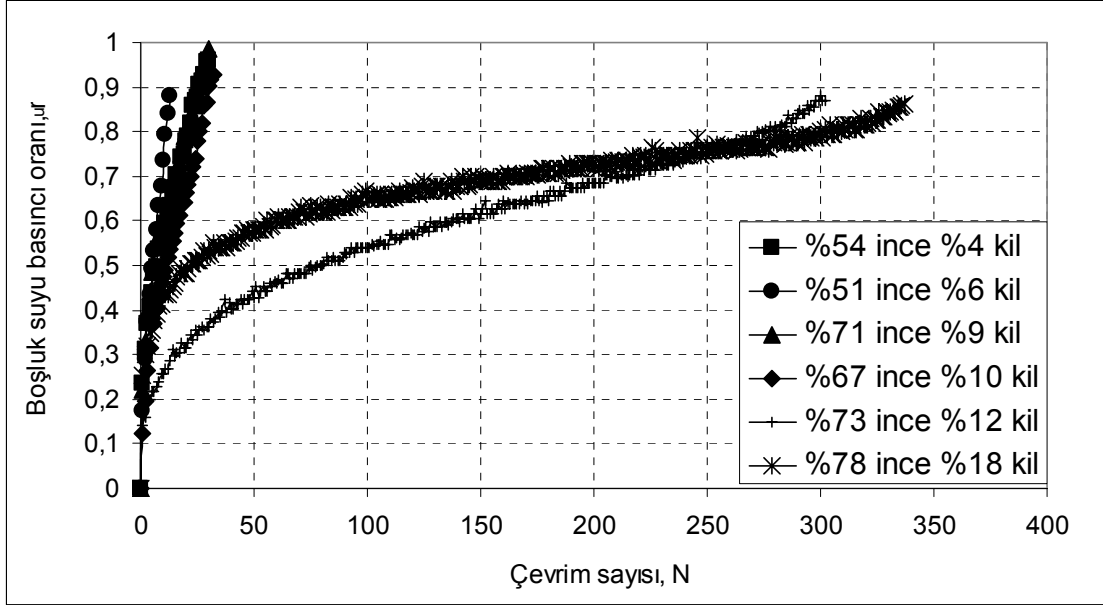
Şekil Ek-3.1. Farklı zeminlerin DGO=0.35 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



Şekil Ek-3.2. Farklı zeminlerin DGO=0.25 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



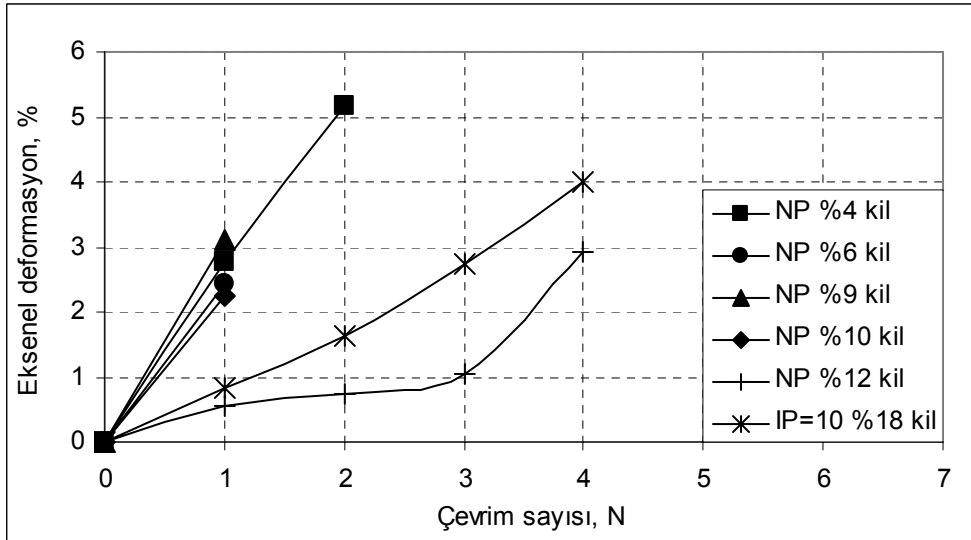
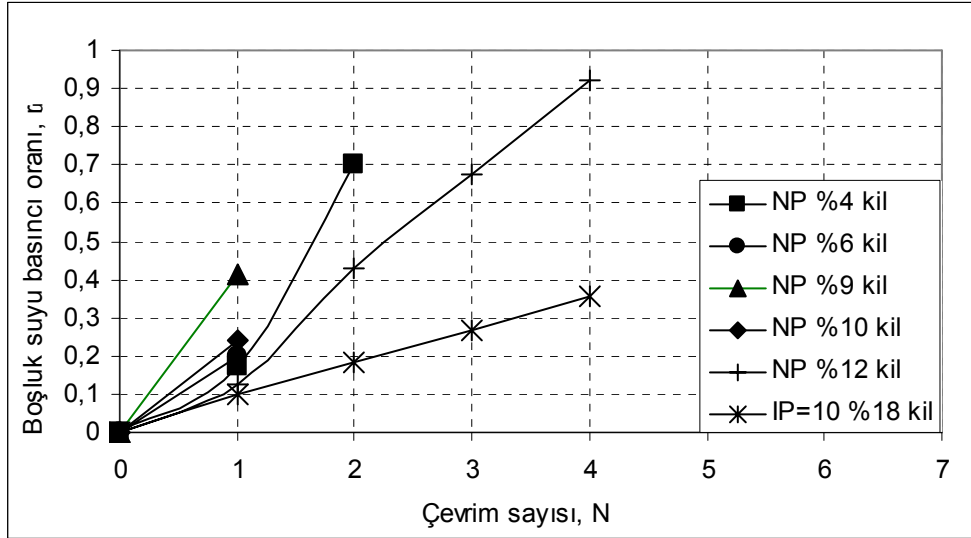
Şekil Ek-3.3. Farklı zeminlerin DGO=0.20 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



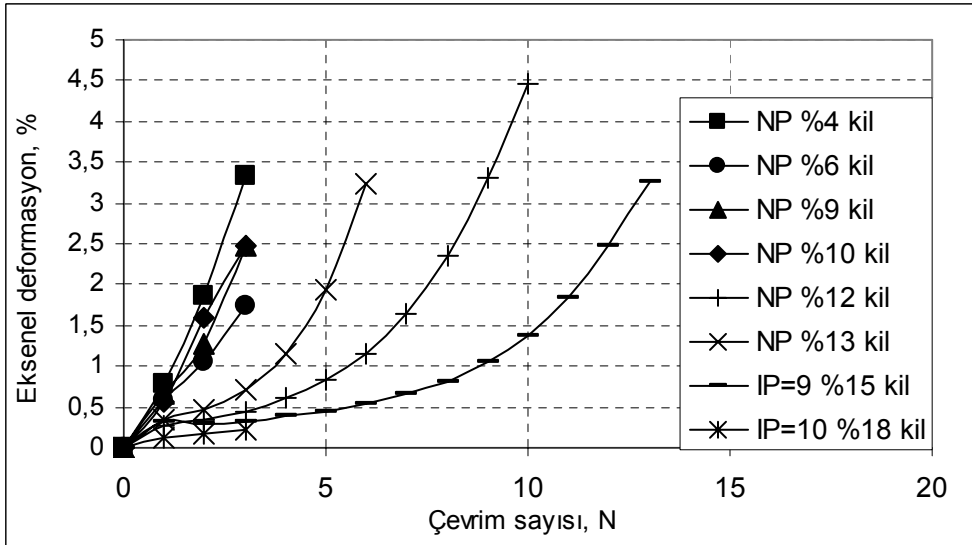
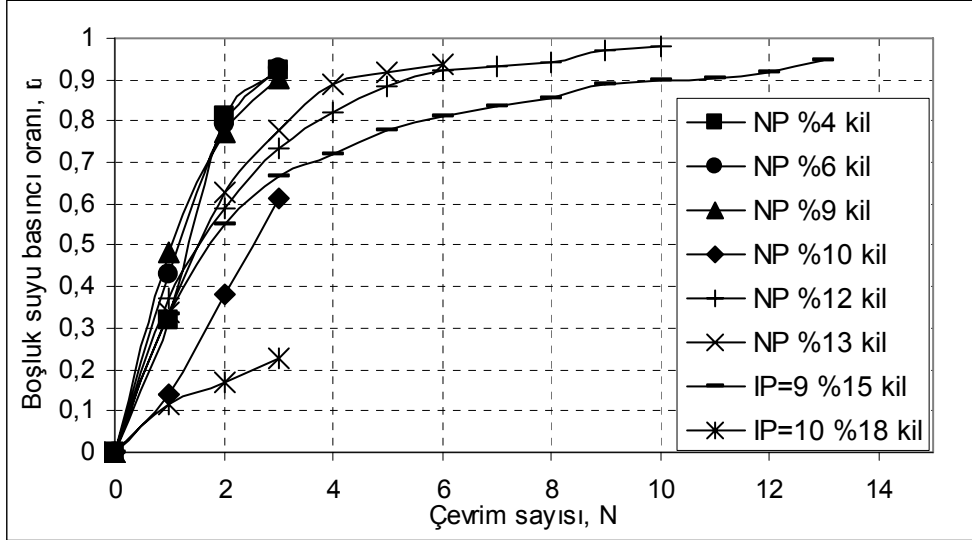
Şekil Ek-3.4. Farklı zeminlerin DGO=0.15 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi

EKLER-IV

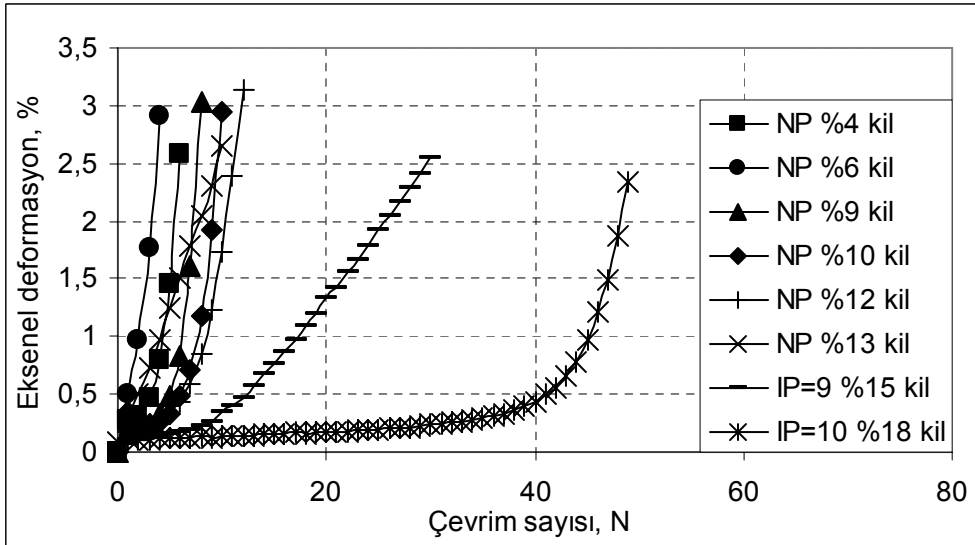
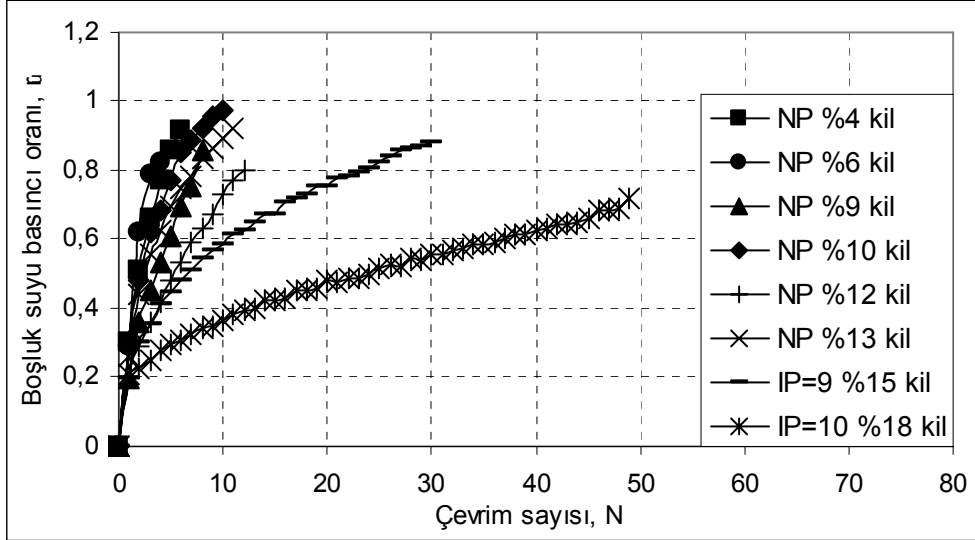
FARKLI PLASTİSİTE DEĞERLERİNDEKİ ZEMİNLERİN $DGO=0.35, 0.25, 0.20$ VE 0.15 DEĞERLERİNDEKİ BOŞLUK SUYU BASINCI ORANI-ÇEVİRİM SAYISI İLE EKSENEL DEFORMASYON-ÇEVİRİM SAYISI ARASINDAKİ İLİŞKİ



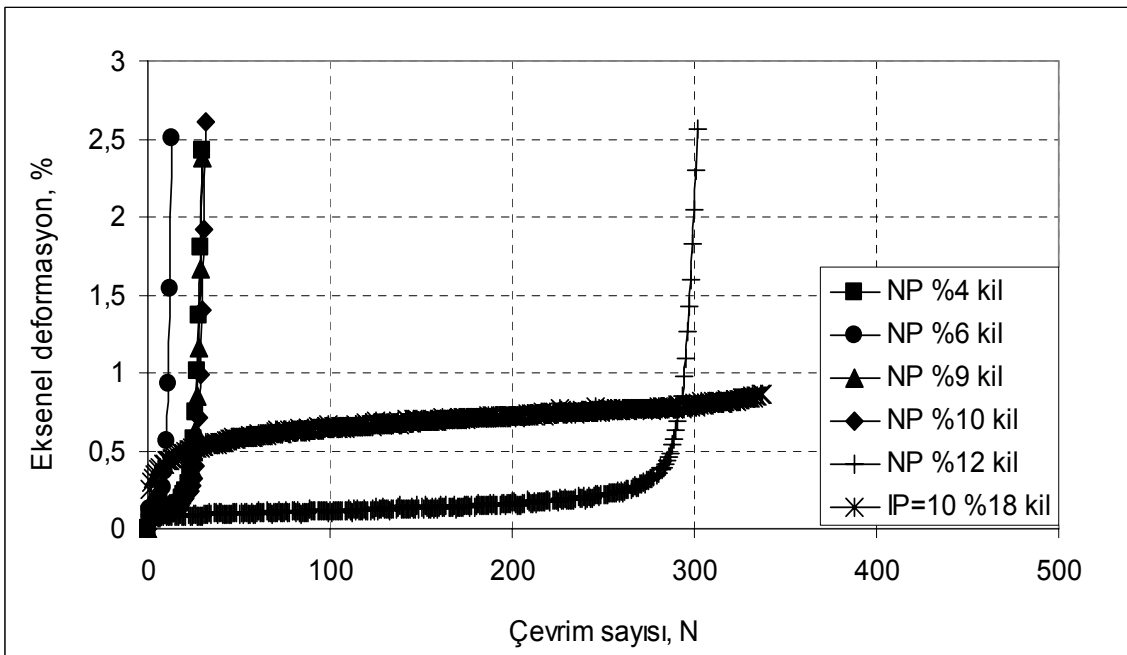
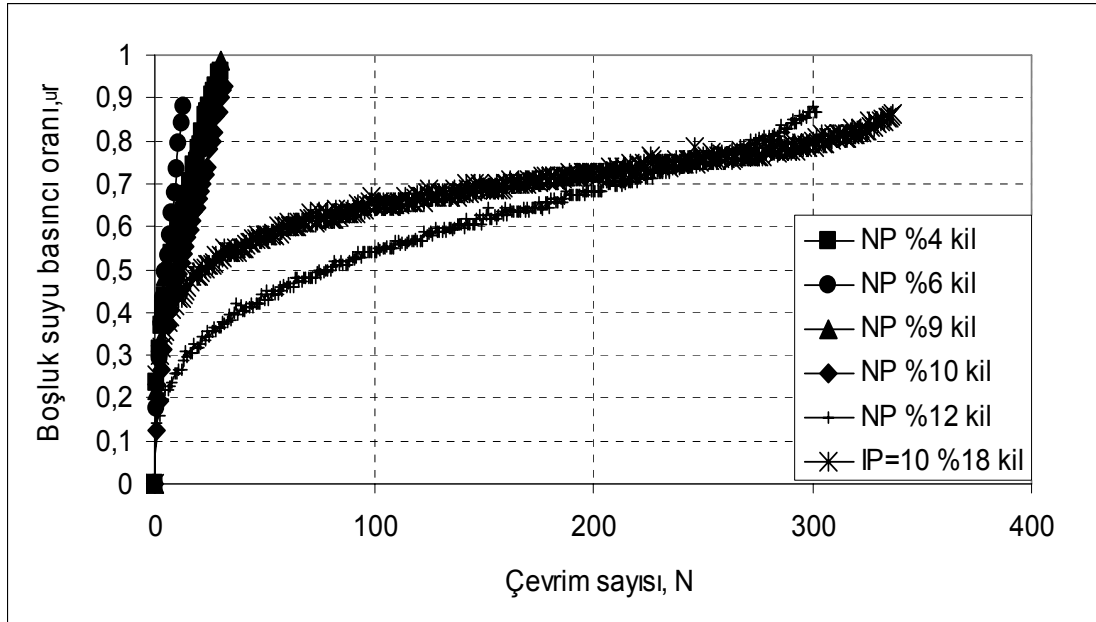
Şekil Ek-4.1. Farklı zeminlerin DGO=0.35 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



Şekil Ek-4.2. Farklı zeminlerin DGO=0.25 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



Şekil Ek-4.3. Farklı zeminlerin DGO=0.20 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi



Şekil Ek-4.4. Farklı zeminlerin DGO=0.15 değerinde boşluksuyu basıncı-çevrim sayısı ve eksenel deformasyon-çevrim sayısı ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Nazile URAL, 20.05.1977'de Duisburg/ Almanya' da doğdu. İlkokul birinci sınıfı Almanya'da okuduktan sonra ilkokulun tamamını, ortaokul ve lise eğitimini Bozüyük'te tamamladı. 1994 yılında Bozüyük Lisesi'nden mezun oldu. 1995 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 1999 yılında bitirdi. 2001 yılında Anadolu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim dalında yüksek lisans derecesini aldı. 1999-2001 yılları arasında Bozüyük Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğünde İnşaat Mühendisi olarak görev yaptı. 2001-2002 yılında Anadolu Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak görev yaptı. 2002 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümü Geoteknik programında doktora çalışmalarına başlamıştır. Evlidir.