

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLT TABAKALI KUM ZEMİNLERİN TEKRARLI
YÜKLER ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Hüseyin TUNÇOK**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

ARALIK 2005

**SİLT TABAKALI KUM ZEMİNLERİN TEKRARLI
YÜKLER ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Hüseyin TUNÇOK
(501031307)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Kasım 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Aralık 2005**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ayfer ERKEN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Hüseyin YILDIRIM (İ.T.Ü)
Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü)**

ARALIK 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tüm aşamalarının gerçekleşmesinde sabır ve ilgi ile benden yardımlarını esirgemeyen ve bana özgür bir çalışma ortamı sağlayan sevgili hocam Sayın Doç.Dr.Ayfer ERKEN'e, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında benden maddi manevi desteklerini esirgemeyen babam Süleyman Saip TUNÇOK ve ablam Av. Füsun TUNÇOK' a minnettarım.

Bu çalışmamı; 1993 yılında vefat eden kardeşim Erdem TUNÇOK ve 1997 yılında vefat eden annem Macide TUNÇOK'un aziz hatıralarına ithaf ediyorum.

Aralık, 2005

Hüseyin TUNÇOK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xx
1. GİRİŞ	1
2. KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ	3
2.1. Giriş	3
2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altında Dinamik Davranış Özellikleri	3
2.3 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri	6
2.3.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	8
2.3.2 Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	10
2.3.3 Siltli Kum Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	12
2.3.4 Siltli ve Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışlarına Etki Eden Faktörler	23
2.3.5 Siltli ve Siltli Kil Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	26
2.4 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi	34
2.5 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar	35
2.6 Dinamik Burulmalı Kesme ve Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinde Yapılan Çalışmaların Karşılaştırılması	39
2.7 Numune Hazırlama Yönteminin Dinamik Davranışa Etkisi	39
2.8 Zemin Yapısının Farklı Yükleme Koşullarında Konsolidasyon Değişimi	41
2.9 Sonuç	42
3.DENEY ALETİ, DENEY YÖNTEMİ, KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ	44
3.1.Giriş	44
3.2 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Sistemi	44
3.2.1 Üç Eksenli Yükleme Hücresi	45
3.2.2 Düşey Yük ve Burulma Momenti Yükleme Sistemi	48
3.2.3 Hava Su Kontrol Uygulama Birimi	48
3.2.4 Ölçüm ve Kayıt Sistemi	50
3.2.5 Numune Hazırlama Esnasında Kullanılan İç ve Dış Kalıplar	54

3.3 Numune Hazırlama Yöntemi ve Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	54
3.3.1 Numune Hazırlama Yöntemi	54
3.3.2 Deney Sisteminin Kalibrasyonu	66
3.3.3 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Endeks Özellikleri	67
3.4 Tabakalı Zeminde Oluşan Gerilme Ve Şekil Değiştirmenin Hesabı	71
3.5 Deney Kaydının Yorumlanması	74
3.6 Silt Tabakalarının Düzenlenmesi	75
3.7 Sonuç	76
4.DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	78
4.1. Giriş	78
4.1.1 Laboratuarda Hazırlanan Numunelerle Yapılan Dinamik Deneyler	78
4.2 Laboratuarda Hazırlanan Tabakalı Silt-Kum Zeminin Dinamik Davranışı	80
4.3 Tek Silt Tabakalı Kum Zeminin Dinamik Davranışı	80
4.4 İki Silt Tabakalı Kum Zeminin Dinamik Davranışı	84
4.5 Üç Silt Tabakalı Kum Zeminin Dinamik Davranışı	86
4.6 Tabakasız (Kum) Zeminin Dinamik Davranışı	89
4.7 Aynı Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranında Silt Tabakalı ve Tabakasız Kum Zeminlerin Dinamik Davranışı	92
4.8 Silt Tabaka Sayısının Dinamik Davranış Üzerindeki Etkisi	97
4.9 Silt Tabakalı Numunelerin Deney Sonrası Su Muhtevalarının Likit Limit Değerleriyle Karşılaştırılması	100
4.10 Silt Tabakası Kalınlığının Dinamik Davranış Üzerindeki Etkisi	101
4.11 Sonuç	108
5.SONUÇLAR VEÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	116
EKLER	120
ÖZGEÇMİŞ	155

KISALTMALAR

DKGO	:Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı
İDO	:İnce Dane Oranı
BSBO	:Boşluk Suyu Basıncı Oranı
B (%)	:Doygunluk
TS	:Tabaka Sayısı
DN	: Deney No

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1.	Burulmalı Kesme Deneylerinde İzotropik Gerilme Durumunda Çevre Basıncı ve Düşey Dengeleme Basınç Değişim Oranları... 65
Tablo 3.2.	Deneylerde Kullanılan Örselenmiş Numunenin Endeks Deney Sonuçları..... 67
Tablo 3.3a.	Deneyde kullanılan plastisite indisi % 18 olan silt numuneye ait elek analizi sonuçları..... 68
Tablo 3.3b.	Deneyde kullanılan plastisite indisi % 18 olan numuneye ait hidrometre analizi sonuçları..... 69
Tablo 3.4	Deneyde kullanılan kum numuneye ait elek analizi sonuçları.... 70
Tablo 3.5	Kum numunenin fiziksel özellikleri..... 70
Tablo 3.6	Deney kaydının ilk hali..... 75
Tablo 4.1.	Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi..... 98
Tablo 4.2.	Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı, Silt Tabaka Sayısı ve Kalınlığı, Boşluk Suyu Basıncı ve Deformasyon Anındaki Çevrim Sayısı Değerleri. (B: Doygunluk)..... 100
Tablo 4.3.	Deney sonrası numunelerden elde edilen su muhtevaları ve likit limit değerlerinin karşılaştırılması..... 101
Tablo 4.4.	Aynı gerilme oranında tabaka sayısı ve kalınlığı boşluk suyu basıncı oranı değişimi ve göçme anındaki çevrim sayısı..... 101
EKLER	
Tablo A.1	Genel Tablo

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, Yasuda ve Yokota, 1981).....	13
Şekil 2.2 : Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang,1990)	14
Şekil 2.3 : Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	14
Şekil 2.4 : Plastisite indisi % 4 olan iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	15
Şekil 2.5 : Düşük plastisiteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi	17
Şekil 2.6 : Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987).....	18
Şekil 2.7 : İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992).....	18
Şekil 2.8 : Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi ($F=$ Silt yüzdesi) (Troncoso, 1990).....	19
Şekil 2.9 : Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1984).....	19
Şekil 2.10a : Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995).....	20
Şekil 2.10b : Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995).....	21
Şekil 2.10c : Temiz kumda boşluk suyu basıncı gelişimi.(Erten ve Maher, 1995).....	21
Şekil 2.10d : Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Erten ve Maher, 1995).....	22
Şekil 2.11 : Örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinin dinamik davranış farklılığı (Puri, 1984).....	27

Şekil 2.12	:Plastisite indisinin 10 ve 30 çevrimde % 5 genlikli deformasyonun oluşması için gerilme oranıyla değişimi (Puri, 1984).....	28
Şekil 2.13	:Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışlarının plastisite indisine etkisi (Puri, 1984).....	28
Şekil 2.14	:Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984).....	29
Şekil 2.15	: Siltli ve kumlu zeminlerde dinamik mukavemetin plastisite indisıyla değişimi (El Hosri, 1984).....	29
Şekil 2.16	: Örselenmemiş numunelerde ve laboratuarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988).....	30
Şekil 2.17	: Tekrarlı şekil değiştirme genliği- çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	31
Şekil 2.18	: Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi .(Wagg, 1990).....	31
Şekil 2.19	: Tekrarlı şekil değiştirme genliği –çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	32
Şekil 2.20	: Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu 1992).....	32
Şekil 2.21	: Düşük plastisiteli siltlerde % 5 çift genlikli deformasyon durumuna plastisitenin etkisi (Sandoval ve Prakash, 1992).....	33
Şekil 2.22	: Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Sandoval, 1989).....	33
Şekil 2.23	: % 5 çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi ($\gamma_k = 16.0 \text{ kN/m}^3$) (Sandoval, 1989).....	34
Şekil 2.24	: Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin temiz kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992).....	37
Şekil 2.25	: Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin ince daneli kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992).....	37
Şekil 2.26	: İnce dane yüzdesinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992).....	38
Şekil 2.27	: Plaslisile indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992).....	39
Şekil 2.28	: Islak sıkıştırmayla hazırlanan Toyoura kumu numunelerinin dinamik mukavemetleri (Tatsuoka ve diğ. 1984).....	40
Şekil 3.1	: Üç eksenli deney sisteminin genel görünümü.....	45
Şekil 3.2	: Hücre alt tablasına bağlı vanaların gösterimi.....	46
Şekil 3.3	: Hücre üst başlığı.....	47

Şekil 3.4	: Düşey yük sistemi ve burulma momentinin genel görünümü.....	48
Şekil 3.5	: Hava su kontrol ünitesi.....	49
Şekil 3.6	: Veri edinim ünitesi.....	50
Şekil 3.7	: Deney sistemi genel görünümü.....	51
Şekil 3.8	: Deney numunesine ait düşey kesitin görünümü.....	52
Şekil 3.9	: Numune hazırlama aşamasında kullanılan iç kalıplar.....	55
Şekil 3.10	: Numune hazırlama aşamasında kullanılan alt ve üst başlıklar....	56
Şekil 3.11	: Numune hazırlama aşamasında kullanılan dış kalıplar.....	57
Şekil 3.12	: Membran ve iç kalıpların son hali.....	59
Şekil 3.13	: Kuru yağmurlama öncesi membran, iç ve dış kalıplar.....	60
Şekil 3.14	: Tabakalı numunenin son hali.....	61
Şekil 3.15	: Üç eksenli tripodun numunenin üst başlığına takılması durumu.	62
Şekil 3.16	: Dijital ölçüm panosu.....	66
Şekil 3.17	: Plastisite kartı (Likit limit-Plastisite indisi).....	68
Şekil 3.18	: Silt numuneye ait dane dağılımı eğrisi.....	69
Şekil 3.19	: Kum numuneye ait dane dağılımı eğrisi.....	70
Şekil 3.20	: Burulmalı kesme deney aletine ait tipik deney sonuçları.....	77
Şekil 4.1	: Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı=6 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,05 kN/m ³).....	80
Şekil 4.2	: Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı (N) ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı= 6 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,05 kN/m ³).....	81
Şekil 4.3	: Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,06 kN/m ³).....	82
Şekil 4.4	: Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı=12cm, I_p = % 18, γ_{kc} =16,05kN/m ³).....	83
Şekil 4.5	: Laboratuarda hazırlanan iki silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam Silt Tabakası Kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,07 kN/m ³).....	85
Şekil 4.6	: Laboratuarda hazırlanan iki silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,07 kN/m ³).....	85

Şekil 4.7	: Laboratuarda hazırlanan üç silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,10 kN/m ³)......	87
Şekil 4.8	: Laboratuarda hazırlanan üç silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,10 kN/m ³)......	88
Şekil 4.9	: Laboratuarda hazırlanan tabakasız zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,02 kN/m ³)......	89
Şekil 4.10	: Laboratuarda hazırlanan tabakasız zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,03 kN/m ³)......	91
Şekil 4.11	: Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi....	92
Şekil 4.12	: Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	93
Şekil 4.13	: Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi.....	94
Şekil 4.14	: Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	95
Şekil 4.15	: Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi....	96
Şekil 4.16	: Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi.....	97
Şekil 4.17a	: Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Tek silt tabakalı (6cm ve 12 cm) ve iki silt tabakalı kum zemin).....	98
Şekil 4.17b	: Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Üç Silt Tabakalı ve Tabakasız (Kum Zemin)).....	99
Şekil 4.18	: Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi (I_p = % 18; iki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 3 ve 6 cm), üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 2 ve 4 cm).).....	102
Şekil 4.19	: Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi (I_p = % 18; tabaksız (kum zemin) (0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 ve 12cm).....	103
Şekil 4.20	: Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi (I_p = % 18; tabaksız (kum zemin) (0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 ve 12cm).....	104

Şekil 4.21	: Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabaksız (kum zemin) (0 cm), iki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).....	104
Şekil 4.22	: Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; tabaksız (kum zemin) (0 cm), iki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).....	105
Şekil 4.23	: Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabaksız (kum zemin) (0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı sırasıyla 6 ve 12 cm). İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).	106
Şekil 4.24	: Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabaksız (kum zemin) (0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı sırasıyla 6 ve 12 cm). İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).	106
Şekil 4.25	: Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabaksız (kum zemin) (0 cm), İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).....	107
Şekil 4.26	: Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; tabaksız (kum zemin) (0 cm), İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).....	108
Şekil A.1	: Burulmalı kesme deney aletinde numune düşey kesiti ve ölçüm saatleri.....	121
Şekil A.2	: Burulmalı kesme deney aletinde numunenin yerleştirildiği hücre ve yükleme düzenek.....	122
Şekil B.1	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:13 Silt tabakası kalınlığı 6cm).....	123
Şekil B.2	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı 6cm, D.K.G.O=0,20).....	124
Şekil B.3	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:14 Silt tabakası kalınlığı 6cm).....	125
Şekil B.4	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı 6cm D.K.G.O=0,30).....	126
Şekil B.5	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:11 Silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	127
Şekil B.6	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oarnı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,20).....	128

Şekil B.7	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:12 Silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	129
Şekil B.8	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,30).....	130
Şekil C.1	: Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:3 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	131
Şekil C.2	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,15).....	132
Şekil C.3	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:5 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	133
Şekil C.4	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,25).....	134
Şekil C.5	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:6 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	135
Şekil C.6	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,30).....	136
Şekil C.7	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:9 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	137
Şekil C.8	: İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,35).....	138
Şekil D.1	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:4 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	139
Şekil D.2	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,15).....	140
Şekil D.3	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:7 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	141
Şekil D.4	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,25).....	142
Şekil D.5	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:10 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	143
Şekil D.6	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,30).....	144

Şekil D.7	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:8 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm).....	145
Şekil D.8	: Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,35).....	146
Şekil E.1	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:15)..	147
Şekil E.2	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (D.K.G.O= 0,20).....	148
Şekil E.3	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:16)..	149
Şekil E.4	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (D.K.G.O= 0,25).....	150
Şekil E.5	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:17)..	151
Şekil E.6	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (D.K.G.O= 0,30).....	152
Şekil E.7	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:18)..	153
Şekil E.8	: Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (D.K.G.O= 0,35).....	154

SEMBOL LİSTESİ

τ_d, τ_{cyc}	:Dinamik kayma gerilmesi
σ_d	:Dinamik düşey gerilme
σ_c, σ_v'	:Etketif çevre gerilmesi
σ_p'	:Ön konsolidasyon basıncı
σ_{z0}	:Ortalama kayma gerilmesi
σ_r	: Radyal gerilme
σ_z	: Üniorm düşey eksenel gerilme
σ_θ	: Çevre gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
$\Delta\sigma_r$	: Radyal gerilme artımı
$\Delta\sigma_z$	:Üniorm düşey eksenel gerilme artımı
$\Delta\sigma_\theta$	:Çevre gerilmesi artımı
F_z	:Düşey eksenel kuvvet
T	Burulma momenti
P_i	: İç hücre basıncı
P_0	: Dış hücre basıncı
ΔH	:Düşey eksenel yer değıştirme
$\Delta\theta$	:Burulma açısı
ΔV_i	:İç hücre hacim değışimi
ΔV_s	:Numune hacim değışimi
B	:Skempton doygunluk parametresi
γ_{z0}	:Ortalama birim kayma deformasyonu
ϵ_{z0}	:Kayma şekil değıştirme artımı
ϵ	:Hacimsel deformasyon
ϵ_z	:Eksenel şekil değıştirme artımı
ϵ_θ	:Çevresel şekil değıştirme artımı
ϵ_r	:Radyal şekil değıştirme artımı
A_s	:Numune kesit alanı
z	:Numune üst yüzeyinden olan düşey mesafe
u	:Boşluk suyu basıncı bileşeni
H_i	:Numune başlangıç yüksekliğı
H_s	:Numune deney sonu yüksekliğı
r_i	:Numune başlangıç iç yarıçapı
r_d	Numune başlangıç dış yarıçapı
V	:Başlangıç hacmi
N	:Çevrim sayısı
ΔU	:Boşluk suyu basıncı artımı
K_c	:Yatay toprak basıncı katsayısı
AKO	:Aşırı konsolidasyon oranı
W_n	:Doğal su muhtevası

w	:Doygun durumda su muhtevası
W_L	:Likit limit
W_P	:Plastik limit
I_p, PI	:Plastisite indisi
FC	:İnce dane miktarı
e_{max}	:En büyük boşluk oranı
e_{min}	:En küçük boşluk oranı
e₀	:Başlangıç boşluk oranı
γ_n	:Doğal birim hacim ağırlık
γ_k	:Konsolidasyon öncesi başlangıç kuru birim hacim ağırlık
γ_{kc}	:Konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlık
γ_s	:Dane birim hacim ağırlığı
γ'	:Efektif birim hacim ağırlığı
ML	:Düşük plastisiteli killi silt zemin
CL	:Düşük plastisiteli siltli kil zemin
SC	:Killi kum zemin
NP	:Plastik olmayan zemin

SİLT TABAKALI KUM ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARI

ÖZET

Son yıllarda yaşanan 1995, Kobe ve 1999, Kocaeli gibi büyük depremlerde siltli kum veya kumlu silt zeminlerde meydana gelen sıvılaşma olayları tekrarlı yüklerin zeminlerde oluşturduğu dinamik etkinin önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Ülkemizde son yıllarda yaşanan en büyük depremlerden biri olan 1999, Kocaeli depreminin zeminde neden olduğu taşıma gücü kayıpları ve sıvılaşma nedeniyle, yapılarda önemli hasarlar meydana gelmiş, can ve mal kayıpları olmuştur. Bu sebeple deprem bölgesinde bulunan yapıların temel altı zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının incelenmesi gerekir. Özellikle zemin tabakalarının deprem yükleri etkisi altındaki dinamik davranış özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu yüzden zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özelliklerinin farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi gerekmektedir.

Dinamik burulmalı kesme deney aletinde, plastisite indisi % 18 olan silt numuneleri ve kum numuneleri kullanılarak silt tabakalı ve tabakasız (sadece kum) zeminlerle artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik deneyler yapılmıştır. Deneylerde konsolidasyon basıncı izotropik olarak 100 kPa uygulanmıştır. Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından 0.10 Hz frekansında sinüzoidal burulma dinamik yükleme ile numuneler kesilmiştir. Numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncı oranı değişimi deney boyunca kaydedilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik deneyler, JICA projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilen içi boş silindirik burulmalı kesme deney aletiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi, düşey eksenel F_z , burulma momenti T , iç hücre basıncı P_i , ve dış hücre basıncı P_0 ve dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilmesinin yanı sıra; düşey eksenel yer değiştirme ΔH , burulma açısı $\Delta\theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_i ve numune hacim değişimi ΔV_s ' nin belirlenmesine olanak tanır. Burulma momenti istenilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda uygulanır. Düşey yük ve ters basınç ise hem dışarıdan elle hem de otomatik olarak kontrol edilebilmektedir.

Dinamik burulmalı kesme deney aletinde iç yarıçapı 3.00 cm dış yarıçapı 5.00 cm ve yüksekliği yaklaşık 20.00 cm boyutlarında hazırlanmış silt tabakalı kum zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Numune içeriden ve dışarıdan boyutlarına uygun 0.3 mm kalınlığında lastik membranlarla çevrilmektedir. Laboratuvar ortamında hazırlanan deneyler; kuru yağmurlama yöntemiyle tabakalı olarak hazırlanmaktadır. Bu çalışmada silt ve kum numunelerin kalıba yerleştirilmesi sırasında tabakaların kuru birim hacim ağırlıklarının aynı olmasına dikkat edilmiştir. Numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının aynı olması için özel olarak polistren malzemeden yapılan içi boş silindirik kalıp üzerine yapıştırılan ölçekli kağıt

yardımla, hazırlanan her tabakanın kuru birim hacim ağırlığının sabit bir değerde kalması sağlanmıştır

Bu deneysel çalışmada muayene çukurlarından alınan örselenmiş numunelerle hazırlanan laboratuvar numuneleri üzerinde; göçme seviyesi olarak belirlenen $\gamma = \pm \% 2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesine kadar 0.1 Hz frekansta ve 100 kPa konsolidasyon basıncı altında tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Bu deneylerde İstanbul Kemerburgaz çöp depolama tesislerinde arazide açılan muayene çukurlarından alınan ve laboratuvarında endeks özellikleri belirlenmiş silt numuneler kullanılmıştır.

Tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan silt-kum zeminlerle artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları uygulanarak değişik tiplerde deney setleri oluşturulmuştur. Hazırlanan bu deney setlerinden elde edilen sonuçlar hesaplanmış, boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ve birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi incelenerek, bu sonuçlarla ilgili yorumlar yapılmıştır. Ayrıca silt tabaka sayısı ve kalınlığının dinamik davranış üzerinde ne tür bir etki oluşturabileceği hakkında da yorumlar yapılmıştır

Tek tabaka halinde hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığı 6 cm ve 12 cm olacak şekilde hazırlanarak en kalın tabaka ve en ince tabaka üzerinde oluşacak dinamik burulmanın tabaka kalınlığından ne kadar etkileneceği incelenmiştir. Bu tabakalar arasına kum tabakaları yerleştirilerek, kum tabakalardan alt ve üst başlığa yakın olan tabakaların boyları sabit alınmak suretiyle alt ve üst drenaj yolunun sabit kalması sağlanmıştır. Kum numunenin tabaka kalınlıkları hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığına ve toplam numune yüksekliği olan 20 cm değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır.

İki tabaka halinde hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığı 12 cm alınmış ve her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olacak biçimde hazırlanmış, alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numune ve toplam numune yüksekliği (20 cm) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır.

Üç tabaka halinde hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığı 12 cm alınmış ve her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olacak şekilde hazırlanmış yine alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numunenin ve toplam numune yüksekliği (20 cm.) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır.

Son olarak tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan zemin numunesi artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına tabi tutularak, elde edilen sonuçlar silt tabakalı zemin numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Plastisite indisinin % 18 olduğu laboratuvar ortamında hazırlanan silt numunelerle silt tabakası kalınlığı 6 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olacak biçimde iki farklı deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde gerilme oranı arttıkça aynı göçme seviyesine ulaşmak için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir. Silt tabakası kalınlığı 6 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları neticesinde numunenin boşluk suyu basıncı oranında da artışlar gözlenmiştir

Laboratuvar ortamında $I_p = \% 18$ olan silt numunelerle yapılan, silt tabakası kalınlığı 12 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olan iki farklı deney yapılmıştır.

6 ve 12 cm olarak hazırlanan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde silt tabakası kalınlığındaki artışa, dolayısıyla kum numune yüksekliğindeki azalmaya bağlı olarak

aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında silt tabakası kalınlığındaki artış numunenin daha erken çevrim sayısında göçmesine neden olmaktadır. Aynı şekilde silt tabakası ve kalınlığındaki artışa bağlı olarak numune aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında boşluk suyu basıncı oranı değeri de artış göstermiştir.

İki silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 52 - \% 53$ arasında değişen silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olarak seçilmiştir. Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,15, 0,25, 0,30 ve 0,35 olacak şekilde 4 farklı deney yapılmış, artan tekrarlı kayma gerilmesi oranının numunenin boşluk suyu basıncı oranı ve birim kayma deformasyonunda ne tür bir etki edebileceği araştırılmaya çalışılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış numunenin aynı göçme seviyesine ulaşmaya kadar daha erken çevrim sayısında deformasyona maruz kaldığını göstermektedir. Aynı şekilde tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncında da artış gözlenmiştir.

Üç silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 51 - \% 53$ aralığında değişen silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olarak seçilmiş ve toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır. Sonuçta üç silt tabakalı silt-kum zeminlerle yapılan deneylerde tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış numunenin aynı göçme seviyesine ulaşmaya kadar daha erken çevrim sayısında deformasyona maruz kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncında da artış gözlenmiştir.

İki silt tabakalı ve üç silt tabakalı olarak hazırlanan numunelerde artan silt tabakası sayısının, artan kayma gerilmesi oranlarına bağlı olarak üç silt tabakalı silt-kum zeminin, iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni; artan silt tabaka sayısına bağlı olarak kum-silt ve silt-kum geçiş noktalarındaki zayıf bölgelerin numunenin artan kayma gerilmesi oranlarından daha çabuk etkilenmesi ve numuneyi daha erken çevrim sayısında sıvılaşmaya ve deformasyona maruz bırakmasıdır.

Tabakasız olarak hazırlanan, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 51 - \% 53$ arasında değişen kum numuneye her deneyde tekrarlı kayma gerilmesi oranı artacak şekilde sırasıyla 0,20, 0,25, 0,30 ve 0,35 olacak kayma gerilmesi uygulanmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numune istenilen doyumluk düzeyine ulaşmadan kesme işlemine başlanmıştır. Bu nedenle tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan silt-kum zemin numunesi, tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan numuneden daha geç çevrim sayısında deformasyona uğramıştır. Oysaki laboratuvar koşullarında hazırlanan bu deneyde doyumluk sağlandıktan sonra kesme işlemine başlansaydı; tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 den 0,25 değerine çıkartıldığında tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken elde edilen çevrim sayısından daha erken çevrim sayısında göçme deformasyonu gözlenmiş olacaktır.

Aynı durum tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 ve 0,35 olan deneylerde de gözlenmiştir. Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyde doyumluk sağlanmadan kesme işlemine başlanmıştır. Bu durum numunenin tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken deformasyonun meydana gelmesi için gereken çevrim sayısından daha erken çevrim sayısında deformasyonuna izin vermemiştir. Buna karşın bu deney doyumluk sağlandıktan sonra kesme işlemine başlansaydı; tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyde göçme seviyesi değeri olarak belirlenen $\gamma =$

$\pm$ % 2,5 birim kayma deformasyonu değerine daha erken çevrim sayısında ulaşılacaktır.

Ayrıca bu çalışmada, yapılan deneylerde silt tabakası sayısının dinamik davranış üzerinde etkisi araştırılmış ve artan silt tabaka sayına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki artış neticesinde numunenin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında ne tür bir dinamik davranış göstereceği araştırılmıştır. Silt tabakası sayısındaki artışa ve buna bağlı olarak her bir kum tabakasının kalınlığındaki azalma neticesinde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları dikkate alındığında genel olarak silt tabaka sayısındaki artış neticesinde silt-kum zemin daha erken çevrim sayılarında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte iki ve ç silt tabakalı silt kum zeminde; ç silt tabakalı silt-kum zemin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında şekil değiştirmelere maruz kaldığı gözlenmiştir.

Son olarak deney sonrası; silt numuneye ait deney sonu su muhtevaları ve likit limit değerleri karşılaştırılmak suretiyle numunenin doyurulması ve konsolidasyon esnasında numunenin kazandığı ve kaybettiği su miktarıyla ilgili olarak yorumlar yapılmış ve bu yorumlar tablo halinde verilmiştir.

DYNAMIC BEHAVIORS OF SANDS INCLUDING SILT LAYERS UNDER CYCLIC LOADS

SUMMARY

Recently, the earthquakes occurred in Kobe Japan in 1995 and Kocaeli in 1999 induced a range of liquefaction behavior in silty sand or sandy silt soils. This event emphasized the importance of dynamic effects of cyclic loading on soil behavior. 1999 Kocaeli earthquake that happened in Turkey caused to bearing capacity loss and liquefaction. Due to the soil dynamic problems there had been occurred so many structural damages and lots of casualties. Due to the structural damages in earthquake regions, it is necessary to investigate the behavior of soils lying under structures under earthquake loads.

In this respect, the stress-strain-pore pressure relationships and cyclic shear strength properties of soil stratum should be determined by conducting dynamic laboratory tests under distinct consolidation and stress conditions.

In this study, the stress-strain-pore pressure relationships and cyclic shear strength properties of soil stratum should be determined by conducting dynamic laboratory tests under distinct consolidation and stress conditions.

All these tests have been performed with the dynamic torsional shear testing apparatus brought to I.T.U Soil Mechanics Laboratory by the JICA project. The testing system enables the measure and the automatic record of vertical axial load F_z , torque load T , inner and outer confining pressures P_i and P_o as well as the vertical axial strain ΔH , angular displacement $\Delta \theta$, change in volume of inner cell ΔV_i , and the soil specimen ΔV_s . The torque load can be applied in one direction or cyclically under desired speed and value. Also the vertical load and the back pressure can be controlled automatically or manually. By using this testing apparatus, the stress-strain properties and the shear strength properties of soil can be determined with the application of the load under different isotropic torsional stress condition with a frequency range of 0,01-10,00 Hz.

In tests, hollow cylinder soil specimens were used. The inner radius of the air pluviated specimens is 3,0 cm, outer radius of them is 5,0 cm and the height of the specimen is $H=20$ cm. The rubber membranes that cover the inner and outer part of the soil specimens have a thickness of 0,3 mm. A certain amount of time was passed by to saturate this specimen by applying water diffusion from the bottom part through the whole specimen. And after that a certain value of back pressure was applied to the specimens. After the saturation process, inner and outer confining pressures increased up to desired effective consolidation pressure simultaneously. The consolidation pressure is 100 kPa in all tests. At the end of consolidation, cyclic shear stress were applied to the specimens up to failure limit in dynamic tests and the

change in the excess pore water pressure and the residual shear strains were observed during the test.

The thickness of soil stratum in one silt stratum sandy soil specimen is 6 cm and 12 cm respectively. The effect of dynamic behavior from the different silt-stratum thicknesses was investigated. Between these silt stratum, sand stratum were placed to bottom and top of whole specimen to ensure the bottom and top drainage ways constant during water diffusion. The thicknesses of sand stratum were adjusted with respect to the height of silt stratum and the total specimen height of 20 cm.

The thickness of silt stratum in two silt stratum sandy soil specimen is 12 cm and the thickness of each silt stratum is 4cm. Also the thicknesses of sand stratum in this experiment set were adjusted with respect to the height of silt stratum and the total specimen height of 20 cm.

In three-silt stratum sandy soil specimens, the total silt stratum is 12 cm and the thickness of each silt stratum is 4 cm. Also the thicknesses of sand stratum in this experiment were adjusted with respect to the height of silt stratum and the total specimen height of 20 cm.

The last test series include pure sand specimens prepared by dry pluviation. Cyclic shear loads within a wide range were applied to these sand specimens. The results taken from the experiments were compared to sandy soils having silt-stratum.

Silt with a plasticity index of 18 % were used to prepare silt stratum soil specimens. In sandy soil specimens having one silt layer the values of cyclic shear loading applied on soil specimens were $\tau/\sigma = 0,20$ and $\tau/\sigma = 0,30$ respectively. In experiments it is observed that when cyclic shear loading value increases, soil collapse at small number of cyclic. According to this, the pore water pressure increased in sandy soil specimen having one silt stratum with a thickness of 6 cm is larger under $\tau/\sigma = 0,30$ cyclic shear stress ratio

Sand specimens including silt layer with a thickness of 12 cm were loaded under $\tau/\sigma = 0,20$ and $\tau/\sigma = 0,30$ respectively. As a result the similar trend in pore pressure and cyclic shear strain is observed in one-silt stratum sandy soil specimen both with 6 cm and 12 cm of silt stratum thickness. As the cyclic loads increase pore pressure and cyclic shear strain increase. In addition the increase in the thickness of silt stratum causes an increase in pore pressure and shear strain under the same cyclic load.

The dry unit weight and the relative density of soil specimens having two silt layers each one is 6 cm high are 16 kN/m^3 and $D_r = 51 - 53 \%$ respectively,. The values of cyclic shear loading applied on soil specimens were 0,15, 0,25, 0,30 and 0,35 respectively. The effects of increase in cyclic shear loading on specimen's pore water pressure ratio and its stress strain deformations were investigated. It is observed that increase in the value of cyclic shear loading showed us that to reach deformation level, low cyclic numbers were needed. In addition to this, as a result of increase in the value of cyclic shear loading, pore water pressure ratio of soil specimen increased too.

When two silt-stratum sandy soil specimens and three silt-stratum sandy soil specimens compared in each other, according to the increase in the number of silt stratum and the increases in cyclic shear loading values, three silt-stratum sandy soil specimen reached its deformation level in earlier cyclic numbers when compared to two silt-stratum sandy soil specimen. The reason is that, with respect to the increase in the number of silt stratum and the weak transition zones at silt-sand and sand-silt

points of these silt stratum were easily affected from the increase in the cyclic shear loading values. Also these weak transition zones in soil stratum enforce soil specimen to reach its deformation level and liquefaction stage in early cyclic numbers.

In pure sand soil specimens with a dry unit weight of 16 kN/m^3 and having a relative density between $D_r = 51\% - 53\%$, the values of cyclic shear loads applied on soil specimens were 0,20, 0,25, 0,30 and 0,35 respectively.

The B values of soil specimen loaded to a cyclic shear stress level of 0,25 is below to 0,95. The unsaturated sand behaves different than saturated one and cyclic shear strain level of 2.5% developed at higher numbers of cyclic. When the results obtained from specimens loaded to 0,25 and 0,20 cyclic shear stress level are compared, it is observed that saturated sands loaded to 0,20 collapsed at lower number of cycles due to the effect of saturation

The same situation is also valid for the soil specimens having with a cyclic shear loading values of 0,30 and 0,35 respectively. Because of the lack of saturation in the soil specimen having with a cyclic shear loading value of 0,35, the soil specimen reached its deformation level in late cyclic numbers when compared to soil specimen having with a cyclic shear loading value of 0,35. If the soil specimen having with a cyclic shear loading value of 0,35 saturated well enough before applying on cyclic shear load, this soil specimen had reached its deformation level in earlier cyclic numbers when compared to soil specimen having with a cyclic shear loading value of 0,30.

In this study, the effect of the number of silt stratum on dynamic behavior was examined and with respect to the shear strain and pore pressure. The effect of increase in transition zones between silt-sand and sand-silt points in soil stratum on dynamic behavior of soil specimen was also examined due to the increase in the value of cyclic shear loading.

As a result increase in the number of silt stratum in soil specimens, the soil specimen to reach its limit deformation level to collapse in earlier cyclic number. Liquefaction stage starts at small number of cycles due to the increase weak zones in sands.

After experiments, water contents of silt specimens in soil stratum and liquid limit value of silt specimen were compared in each other to make a comment on the saturation ratio of bottom and top parts of silt-stratum sandy soil specimens

In addition to this during the consolidation stage the water taken into soil specimen and the lost of water in soil specimen were investigated and related graphics and tables were drawn out.

1.GİRİŞ

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

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

Bu çalışmada; farklı endeks özelliklerine sahip tabakalı silt-kum zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışlarını ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda dinamik burulmalı kesme deney aleti ile laboratuvar ortamında hazırlanan tabakalı silt-kum zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın amacı; tabakalı zemin olarak hazırlanan plastisite indisi % 18 olan silt numune ve relatif sıkılıkları $D_r = \% 51 - \% 53$ arasında değişen silt ve kum numunelerle hazırlanan tabakalı silt-kum zeminlerin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının incelenmesidir. Bununla birlikte, artan tekrarlı gerilme oranlarında yapılan deneylerde tabaka kalınlığı ve tabaka sayısına bağlı olarak numunede meydana gelebilecek deformasyonun hangi çevrim sayısında oluşacağı ve tabaka sayısının ve kalınlığının numunenin dinamik davranışına ne tür bir etki edeceği incelenmeye çalışılmıştır.

Çevrim sayısı, birim kayma (%) ve boşluk suyu basıncı oranının tabaka kalınlığı ve tabaka sayısından nasıl etkileneceği üzerine de yorumlar yapılmıştır.

Bu kapsamda, ikinci bölümde literatürde araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalardan örnekler verilmiştir. Farklı koşullar altında silt ve kum numuneleri ile gerek dinamik üç eksenli gerekse burulmalı kesme deney aletinde yapılan dinamik deneylerin sonuçları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde; kullanılan burulmalı kesme deney aleti sistemi, numune hazırlama yöntemi ve deney sonuçlarından elde edilen veriler hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde, yapılan deneylerin sonuçları sunulmaktadır. Laboratuvar ortamında hazırlanan tabakalı silt-kum zeminlerin değişen tekrarlı kayma gerilme oranlarında dinamik davranış özellikleri incelenmiştir. Ayrıca tabaka sayıları dikkate alınarak; artan kayma gerilmesi oranlarında tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız (sadece kum) zemin numunelerinin birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir. Tabaka kalınlığı ve tabaka sayısının dinamik davranış üzerine ne tür bir etki yapabileceğine dair yorumlar yapılmıştır

Son olarak deney sonrası silt numunelerin ne kadar suya doymun oldukları hakkında bilgi edinmek için silt numunelerin su muhtevaları ölçülerek likit limit değeri ile karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar birleştirilerek, genel olarak yorumlanmıştır.

2. KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

2.1 Giriş

Bu bölümde konuyla bağlantılı olarak literatürde yer alan çalışmalar iki ayrı kısımda anlatılmaktadır. İlk kısımda zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemlerden ve son yıllarda yapılmış çalışmalardan bahsedilmektedir. Yapılan bu çalışmalar konularına göre ayrılıp, her bir konuda araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar, bu çalışmanın kapsamı içerisinde dikkate alınmaktadır.

2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Dinamik Davranış Özellikleri

Geçmişte dünyanın çeşitli bölgelerinde yaşanmış değişik büyüklüklerdeki depremler ve gelecekte yaşanma ihtimali olan bölgelerde yapılacak olan mühendislik yapılarında gerekli deprem büyüklüklerinin belirlenebilmesi için bu yerlerdeki temel altı zeminlerinin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özellikleri, farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılacak olan deneylerle belirlenebilmektedir. Tekrarlı yükler altındaki zeminlerin davranışı araştırılırken arazideki mevcut zemin koşullarının aynen laboratuarda modellenmesi gerekmiştir. Buna karşın, araziden alınan zemin numunelerinde gerek numune alımı gerekse numunelerin laboratuara gelişi sırasında, gerekse laboratuarda yapılacak deney için numune hazırlanması sırasında meydana gelen örselenme nedeniyle laboratuvar deney sonuçlarının tek başına yorumlanması beraberinde bir takım olumsuzluklar getirebilir. Meydana gelen bu olumsuzlukların en aza indirilmesi için arazide ve laboratuarda yapılan deneyler birlikte değerlendirilmelidir. (Ansal ve Erken, 1986). Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği kapsamında yapılan laboratuvar ve arazi deneylerinde genel olarak şu zemin özellikleri belirlenmeye çalışılır.

1. Gerilme- şekil değiştirme ilişkisi; dinamik kayma modülü (elastik kayma deformasyonlarında, G_0 , kayma modülü-birim kayma ilişkisi), elastisite modülü, sönüm oranı,
2. Dinamik kayma mukavemeti özellikleri; dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı,
3. Konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte hacimsel deformasyon değişiminin belirlenmesi;
4. Boşlu suyu basıncı gelişimi.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları açıklanırken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olarak iki gruba ayırabiliriz. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak sönüm oranı ve dinamik kayma modülünün birim şekil değiştirmeye bağlı olarak tanımlanması gerekir. Bu özelliklerin belirlenmesi esnasında laboratuarda zeminin elastik davranış gösterdiği 10^{-6} dan küçük deformasyon seviyelerinde deneyler yapılırken, arazide de zeminin doğal yapısı bozulmadan yerinde özelliklerinin belirlenmesine çalışılır. Mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi içinde göçme seviyesi olarak belirlenen birim kayma seviyesine ulaşmak için gerekli dinamik kayma gerilmesi oranının ve çevrim sayısının bilinmesi gereklidir.

Doğada bulunan zeminleri, yükleme altında davranış özelliklerinde meydana gelen farklılıklardan dolayı; ince daneli, kaba daneli ve kohezyonlu, kohezyonsuz zeminler olarak iki kısma ayırabiliriz. Doğal ortamda dairesel, anizotropik, heterojen ve elasto-plastik davranış özelliği gösteren zeminlerin bu iki grup içerisinde birbirinden çok farklı özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada tabakalı zeminlerin hazırlanmasında kullanılan siltli zeminler ise dane boyutu olarak ince dane sınıfına girmesine rağmen, yapısal olarak kohezyonsuz zeminlere benzemektedir. Bu bakımdan değişik gerilme şartlarında yapılacak dinamik deneylerle kumların siltlerin ve belli oranda silt içeren ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenmelidir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda kohezyonlu, ince daneli ve kohezyonsuz kaba daneli zeminlerin, tekrarlı yükler altında büyük deformasyonlara uğrayarak mukavemetlerinde önemli oranda kayba uğradığını göstermektedir. Bu mukavemet kayıpları sonucu oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle, zeminde kalıcı

deformasyonlar meydana gelmektedir. İçerisinde belli oranda kil olan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının artan deformasyonlarının yanında sınırlı kalması sonucu taşıma gücünde önemli miktarda azalma meydana geldiği görülürken, ince daneli kumlarda artan boşluk suyu basınçları efektif gerilmelerde önemli ölçüde azalmaya yol açmakta, zeminde kalıcı deformasyonlar oluşmasına sebep olmaktadır.

Deney sonuçlarına etkiyen parametrelerden aşağıda bahsedilmiştir.

Belirli miktarda plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlerde ise yumuşamaya bağlı taşıma gücü kaybına etkiyen en önemli parametreler.

1. Plastisite indisi
2. Çevre basıncı
3. Su muhtevası
4. Aşırı konsolidasyon oranı
5. Doygunluk derecesi
6. Yatay toprak basıncı katsayısı
7. Birim kayma genliği
8. Çevrim sayısı
9. Konsolidasyon basıncı

Kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmayı doğrudan etkileyen parametreler ise;

1. Boşluk oranı (relatif sıkılık)
2. Dane şekli
3. Dane boyutları ve dağılımı
4. Birim kayma genliği
5. Çevre basıncı
6. Çevrim sayısı
7. Orta asal gerilme
8. Yatay toprak basıncı katsayısı
9. Efektif konsolidasyon basıncı

İncelenen bu parametrelerin doğal zemine etkisi, yapılan deneysel araştırmalarla önceden belirlenmiştir. Bununla birlikte numune hazırlama yönteminin ve kullanılan deney sisteminin sınır koşulları ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bakımından sonuçları önemli oranda etkilediği belirlenmiştir.

2.3 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri

Zeminlerin dinamik davranış özellikleri ve inceleme yöntemleri yükleme ile birlikte zeminde oluşan şekil değiştirme miktarının mertebesiyle ilişkilidir. Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarına bağlı olarak düşük deformasyon seviyelerinde zeminlerin gerilme şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Buna karşın daha düşük deformasyonlarda yük altında zeminde oluşan mukavemet kayıpları plastik davranış özellikleri önem kazanmaktadır.

Kumlu ve siltli zeminlerin belirli gerilme koşulları altında şekil değiştirme seviyesinin artışıyla beraber çok farklı dinamik davranış özellikleri ortaya koyduğu bilinmektedir. Buna paralel olarak, kumların dinamik davranış özelliklerini tüm yönleriyle inceleyebilmek için, kumların tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanı sıra artan şekil değiştirme seviyesi ile beraber zeminin mukavemet özelliklerindeki değişiminde belirlenmesi gerekir.

Deprem gibi önemli tekrarlı yüklere maruz kalan zemin tabakaları geniş sınırlar içerisinde değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında kalırlar. Bunun sonucunda, zemin boşluklarındaki suyun yer değiştirebilmesi için yeterli süre olmadığından zemin tabakalarında boşluk suyu artması ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen bu gerilme durumunu ve davranış biçimini laboratuarda inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir. (Ansal ve Erken, 1985).

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

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

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

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

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

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

Yapılan deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerindeki davranış farklılıkları bu deneylerde kullanılan zeminlerin değişik relatif sıkılıklara sahip

olmalarından kaynaklanmaktadır. Benzer davranış özellikleri anizotropik gerilme koşullarında yapılan deneylerde gözlenmiştir. (Vaid ve Chern, 1985).

Birinci davranış türünde tekrarlı yüklemenin belirli safhalarında zeminde görülen büyük şekil değiştirmeler zemin direncinin kaybolmasıyla oluşan deformasyon yumuşaması sonucu meydana gelmektedir. Bu durumda zemin, yukarıda bahsedilen zemin davranışına benzer bir şekilde direncinin büyük bir kısmını kaybederek sabit bir gerilmeyle sürekli olarak şekil değiştirmeye devam eder. Bu davranış şekli yine sabit gerilme durumu olarak nitelendirilir ve bu hadiseye sıvılaşma adı verilir. (Ishihara ve Yasuda, 1975).

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

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

2.3.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

Farklı türde zeminlerin farklı yükleme koşulları altında değişik davranış özellikleri ortaya koyduğu bilinmektedir. Bu davranışları etkileyen sadece zemin türü ve yükleme koşulları olmayıp aynı zamanda daha birçok faktörden de söz edilebilir. Fakat belirli koşullar altında belirli türdeki zeminlerin ortaya koydukları davranış özellikleri ilginç sonuçlar doğurmaktadır.

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

Hem laboratuarda hem de arazide yürütölen deneysel çalışmalar ışığında sıvılaşma olayının aydınlatılması amacıyla birçok inceleme ve araştırılma yapılmıştır. Sıvılaşma olayının gelişimi ve mekanizmasının aydınlatılması ilk olarak Seed ve Lee (1996) tarafından üç eksenli dinamik deney aletinde yürütölen deneylerle ortaya konulmuştur. Yürütölen deneysel çalışmalarda belirli bir çevre basıncında konsolide edilmiş suya doymun gevşek temiz kum numuneleri üniform bir tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Laboratuar ortamında yapılan çeşitli dinamik deney aletleri ile sürdürölen çalışmalarda sıvılaşmaya karşı en hassas zemin türünün suya soymun gevşek ince kum zeminlerin olduğu görölmüştür. Peacock ve Seed (1968), Ladd (1974) ve Seed (1979)’in laboratuarda sonradan oluşturulmuş kum zeminler üzerinde yürüttükleri dinamik deneyde zeminde sahip olduğu rölatif sıkılığın, başlangıçtaki konsolidasyon basıncının, uygulanan tekrarlı gerilmenin ve bu gerilmenin uygulama tekrar sayısının kumların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kum zeminlerde ortaya çıkan sıvılaşma ve deformasyon yumuşaması olaylarının belirlenmesi konusunda birçok deneysel ve teorik araştırmalar yürütölmüştür. (Drnevich, 1972; Ishihara ve Li, 1972; Castro, 1975; Castro ve Poulos, 1977, Nemat-Nasser ve Takahashi, 1984).

Özellikle dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney aletleri kullanılarak kumlu zeminlerin gerilme-şekil değıştirme ve mukavemet özelliklerinin saptanması ve bu özelliklere etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. (Alarkon-Guzman ve diğ., 1988; Dehghani ve diğ., 1999; Hyodo ve diğ., 1998; Yoshimine ve Ishihara, 1988).

Bu alışmalar doğrultusunda kumların sıvılaşmaya ulaşması için gereken koşullar üzerinde tartışmalar sürmüştür. Uygulanan tekrarlı gerilmeyle beraber suya doğgun kumlarda ilave boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde evre basıncına yaklaşması sonucunda zeminde oluşan birim şekil değiştirmelerin belirli bir değere ulaşması zeminin sıvılaştığı yargısına ulaşmaktadır. Sıvılaşmaya neden olan bu birim şekil değiştirme değeri yukarıda bahsedilen çalışmalar doğrultusunda laboratuvar dinamik deney aletleri için çift yönlü % 10 olarak düşünülmüştür. Çift yönlü % 10 birim şekil değiştirme değerine ulaşmak için zemine belirli genlikteki sabit gerilme değerinin yine belirli bir sayıda uygulanması gerekmektedir. Doğal olarak üniform gerilme genliğinin büyüklüğü sıvılaşmaya ulaşmak için uygulanması gereken çevrim sayısını etkilemektedir.

Depremlere ait kayıtların değerlendirilmesi doğrultusunda bir depremi temsil edebilen tekrarlı yükleme sayısının 10 ile 20 arasında olabileceği yargısına varılmıştır. Sonuç olarak kum zeminlerde sıvılaşmaya sebep olan gerilme genliğinin bu zeminde 20 çevrimde çift yönlü % 10 birim şekil değiştirme oluşturulan genlik olarak tanımlayabilmek mümkün olmaktadır.

Bu alışma kapsamında kumlarda sıvılaşmaya sebep olan gerek zemin özellikleri gerekse deney koşullarında yapılan değişikliklerin kum zeminin dinamik özelliklerine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Deneylerde laboratuvar koşullarında sonradan oluşturulan kum numuneler kullanılmıştır. Numune hazırlama yöntemleri olarak kuru yağmurlama yöntemleri kullanılmıştır. Suya doğgun kum numuneler üzerinde drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneyler farklı rölatif sıklık, evre basıncı ve gerilme genlikleri kullanılarak yürütölmüştür. Deneylerin tamamında dinamik gerilme uygulama frekansı 0,1 Hz. olarak seçilmiştir.

2.3.2 Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükle Altındaki Davranışı

Sıvılaşma suya doğgun bir kum birikintisini oluşturun daneler arasındaki temasın kaybolması ve su içerisinde asılı konuma geçmesi durumu olarak da ifade edilebilir. Bu bakımdan, evre basıncı etkisi altındaki daneciklerin birbirleri arasındaki sürtünme ile oluşabilecek deformasyonlara karşı koymaları nedeniyle, zemin türü sıvılaşmaya karşı hassasiyette en önemli faktörlerden birisidir. Eğer zemin ince daneli ve ince dane içeriğine sahipse ince daneler arasındaki kohezyon ve adezyon

oluşumu danelerin birbirlerinden ayrılmasına sebep olacaktır.Bu nedenle, ince dane varlığının kumların sıvılaşma direncine arttırıcı yönde etki etmesi beklenebilir.

Kum içerisinde bulunan silt ve kil zeminlerin kumun dinamik davranışını etkilediği 1960'lı yıllardan beri bilinmektedir. İnce dane içeriğinin ve palstisitenin kumluların sıvılaşmaya karşı direncini ne şekilde etkilediği konusunda tam bir fikir birliği sağlanmış değildir.Yapılan bazı çalışmalarda (Finn ve diğ., 1994; Ishihara ve diğ., 1978; Okusa ve diğ., 1980; Dobry ve diğ., 1985; Garga ve Mckay, 1984) silt içeriğindeki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı sonucuna varılırken, diğer bazı çalışmalarda (Shen ve diğ., 1977; Ishihara ve diğ., 1980; Tronsco ve Verdugo, 1985; Erken ve Ansal, 1994; Vaid 1994; Yasuda ve diğ., 1994) silt içeriği oranındaki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Sıvılaşmaya yönelik bu etki incelenirken elbette ince danenin kendi mühendislik özelliklerinin bu zıtlıklara sebep olabileceği düşünülmelidir. İnce malzemenin sahip olduğu plastisite, adezyon ve kohezyon değerleri bazen bu malzemeleri sıvılaşmaya karşı kumlardan daha dirençsiz bir hale getirmektedir. Bu yüzden siltlerin veya siltli kumların dinamik özellikleri incelenirken ince danelerin kendi fiziksel ve endeks özelliklerinin öne çıkabileceğinin dikkate alınması gerekmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda yaygın olan düşünce; plastik olmayan silt içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı (Erken ve Ansal, 1994), plastik silt içeriğindeki artışın ise kumların sıvılaşma direncini arttırdığı şeklindedir. (Ishihara, 1996). Yapılan bazı çalışmalarda da silt içerisindeki belirli oranların sıvılaşmaya karşı kritik değerler ifade ettiği belirlenmiştir. (Koester, 1994).

Temiz kumlarda olduğu gibi siltli numunelerde kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Suyu doyurulan siltli numunelerle hazırlanan tabakalı zeminler üzerinde yapılan deneylerle silt içeriğindeki değişikliklerinin ve izotropik konsolidasyon koşullarının siltli zeminlerin dinamik davranış özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deneyler yine kum numunelerde olduğu gibi 0.1 Hz frekansındaki üniform tekrarlı sinüzoidal gerilmeler altında ve belirli bir rölatif sıkılık değerinde hazırlanan numuneler üzerinde yürütülmüştür. Böylelikle tabakalı zeminler hazırlanırken numune hazırlama yöntemlerindeki benzerlik dolayısıyla siltli

numunelerin dinamik özellikleri aynı relatif sıklığa sahip temiz kumların dinamik özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

2.3.3 Siltli Kum Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

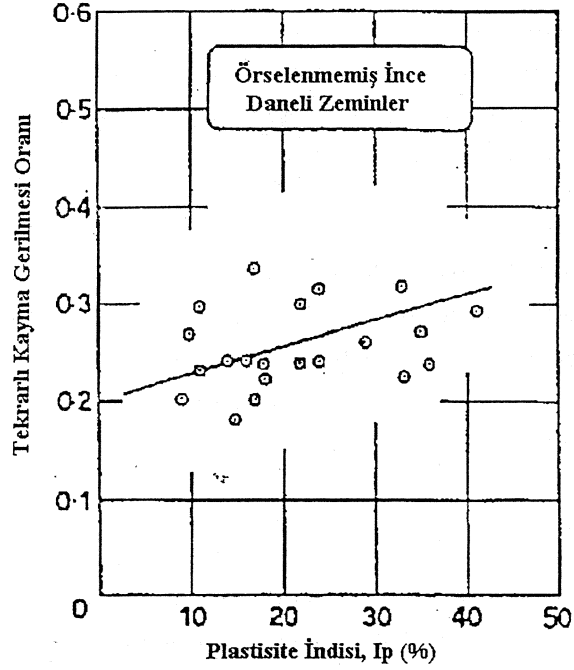
Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği konuları kapsamında yapılan çalışmalarda, genellikle temiz, gevşek ve suya doymuş kumların tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı üzerinde durulmuş, artan boşluk suyu basınçları sonucu kumlu zeminde meydana gelen efektif gerilme azalması ve dolayısıyla artan birim kaymalarla birlikte oluşan mukavemet kayıpları, bu çalışmaların ana temasını oluşturmuştur. Bunun yanında, son yıllarda içerisinde belli miktarda ince dane olan kumlu zeminlerle, plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları da, büyük depremlerde gözlenen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları nedeniyle önem kazanmaktadır.

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

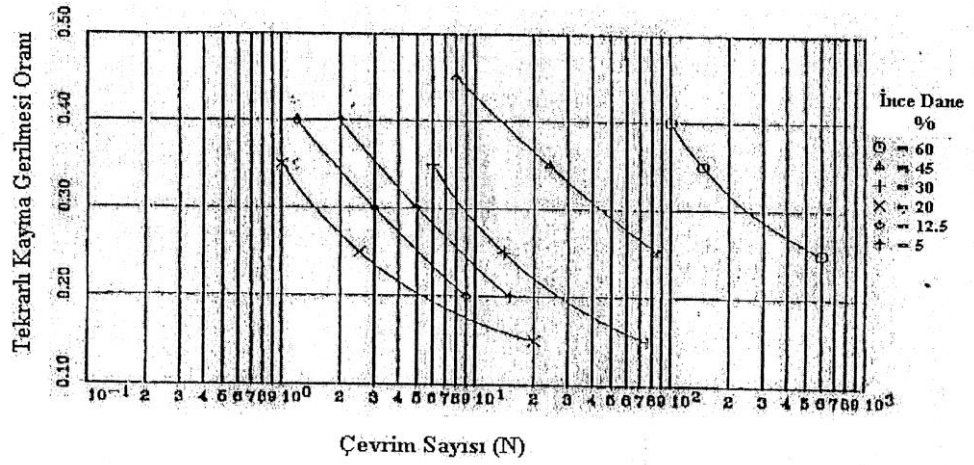
Ishihara ve diğ. (1978) tarafından yapılan dinamik deneylerde, kum zeminin sıvılaşmasına ince dane miktarının etkisi belirlenmiştir. İnce dane miktarı arttıkça, kumlu zeminin dinamik mukavemeti de gevşek durumda belli bir seviyeye kadar artmaktadır. Buna karşın, sıkı olduğu durumda artış daha da fazla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

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

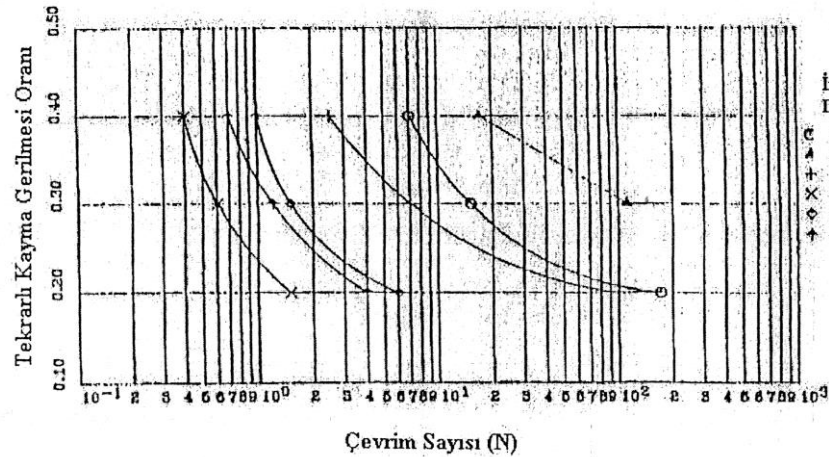
belirlenmiştir. Bununla beraber, ortalama olarak % 30 ince dane içeren kum zeminde ise, plastisitenin dinamik mukavemete etkisi araştırılmıştır. Lineer dağılıma ait $I_p/35$ oranının % 30 dan fazla ince dane içeren zeminlerde ise sabit olduğu ileri sürülmüştür (Ishihara ve diğ., 1981). Bununla birlikte plastisite indisi arttıkça aynı çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine erişmek için gerekli tekrarlı gerilme oranı artmaktadır (Şekil 2.1).



Plastisite indisi % 4 olan numunelerdeki silt miktarının dinamik mukavemete etkisi görülmektedir (Şekil 2.3). En büyük mukavemet içerisinde hiç silt bulunmayan temiz kumda oluşurken silt yüzdesi % 20 olana kadar mukavemet ince dane miktarıyla azalmaktadır. Temiz ve iyi derecelenmiş kumda yapılan deneylerde ise plastisite indisinden bağımsız olarak % 5 ince dane eklendiği takdirde dinamik mukavemetin arttığı görülmektedir (Şekil 2.4). Buna ek olarak, iyi derecelendirilmiş kumlar, diğer kum numunelere göre ince dane miktarından daha az oranda etkilenmektedir. Bütün kum numunelerde en düşük mukavemet ince dane yüzdesi % 4 olan kumda görülürken, temiz ve iyi derecelenmiş kumlarda % 2 ince dane oranı, genel olarak sıvılaşma dayanımını attırmaktadır.

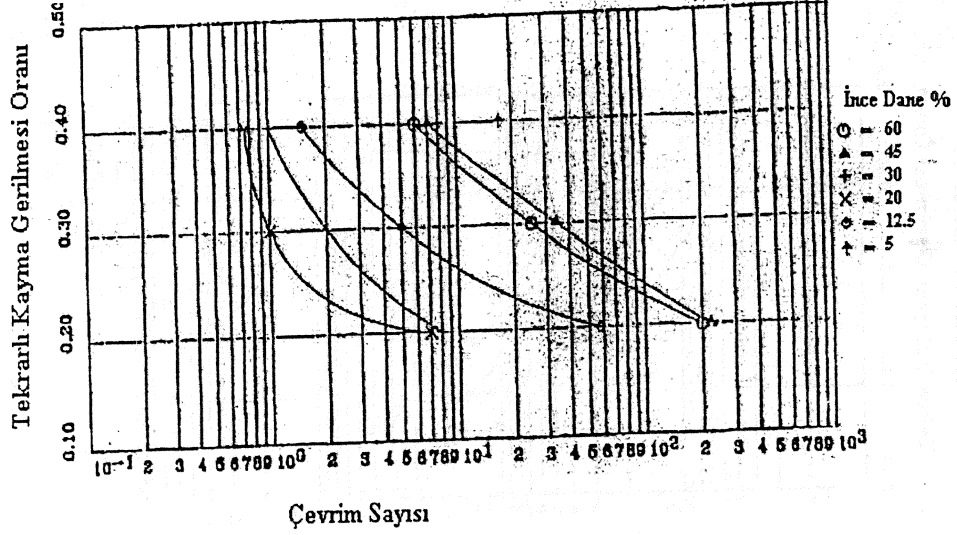


Şekil 2.2 Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).



Şekil 2.3 Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Koester ve Tsuchida, (1988), ince daneli kum zeminler üzerindeki çalışmalarında, ince dane oranının sıvılaşma eğilimi olan kumlu zeminleri, olmayanlardan ayırmada yeterli bir parametre olmadığını söylemişlerdir.



Şekil 2.4 Plastisite indisi % 4 olan iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

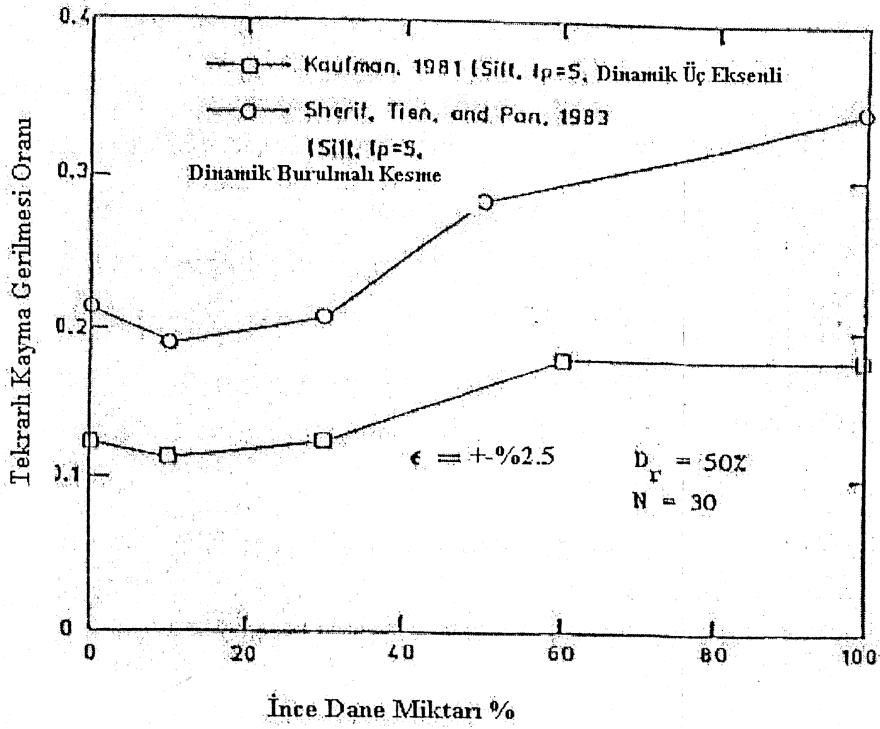
Koester (1992) kum zeminlere değişik oranlarda düşük plastisiteli silt ve plastik kil katarak, sıvılaşma dayanımını, yaptığı dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleriyle belirlemişlerdir. Deney sonuçlarında belirli bir boşluk oranına sahip kum zeminde % 20 oranla ilave edilen düşük plastisiteli ince dane miktarına kadar sıvılaşma dayanımı artmaktadır. Temiz kumda ise dinamik burulmalı kesme mukavemeti diğer ince daneli kumlara göre daha büyüktür. Bununla birlikte laboratuarda Casagrande aletiyle yaptığı likit limit deneylerini, koni penetrasyon aleti ile yaptığı deney sonuçlarıyla karşılaştırdıktan sonra, bulgularını arazideki sıvılaşma ve yumuşama potansiyeli yüksek olan ve önemli taşıma gücü kayıplarının gözlemlendiği bölgelerdeki endeks deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Casagrande aletinde yaptığı likit limit deney sonuçlarının koni penetrasyonla bulduğu değerlere göre % 4 daha düşük su muhtevasında olduğu belirlemiştir.

Buradan kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yükler altında dinamik mukavemet kayıplarının belirlenmesinde bu farkın dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Koester (1992), dinamik üç eksenli deney aletinde ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırladığı farklı türdeki numuneleri izotropik olarak konsolide ettikten sonra yaptığı deneylerle ince dane türü ve oranının kum-silt-kil karışım zeminlerinin dinamik mukavemeti üzerine olan etkisi araştırmıştır (Şekil 2.7). Dinamik burulmalı kesme deney aletinde ise dört tür numune kullanarak izotropik ve anizotropik koşullarda dinamik deneyler yapmıştır. Kullandığı numuneler; temiz ince kum; plastisite indisi $PI = \% 10$ olan $\% 20$ ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 25$ olan $\% 20$ ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 15$ olan $\% 45$ ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum numuneleridir. Bununla birlikte bu iki tür deney sisteminin sonuçları arasında ilişki olduğunu belirtmiş, bu durumun zemin dane dağılımına, tekrarlı yüklemenin genlik ve frekansına ve numune hazırlama yöntemine bağlı olduğunu belirtmiştir. Deney sonuçlarından, $\% 20$ 'den fazla ince dane içeren kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımının, temiz ince kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımına kıyasla daha az efektif çevre basıncına bağlı olduğu görülmüştür.

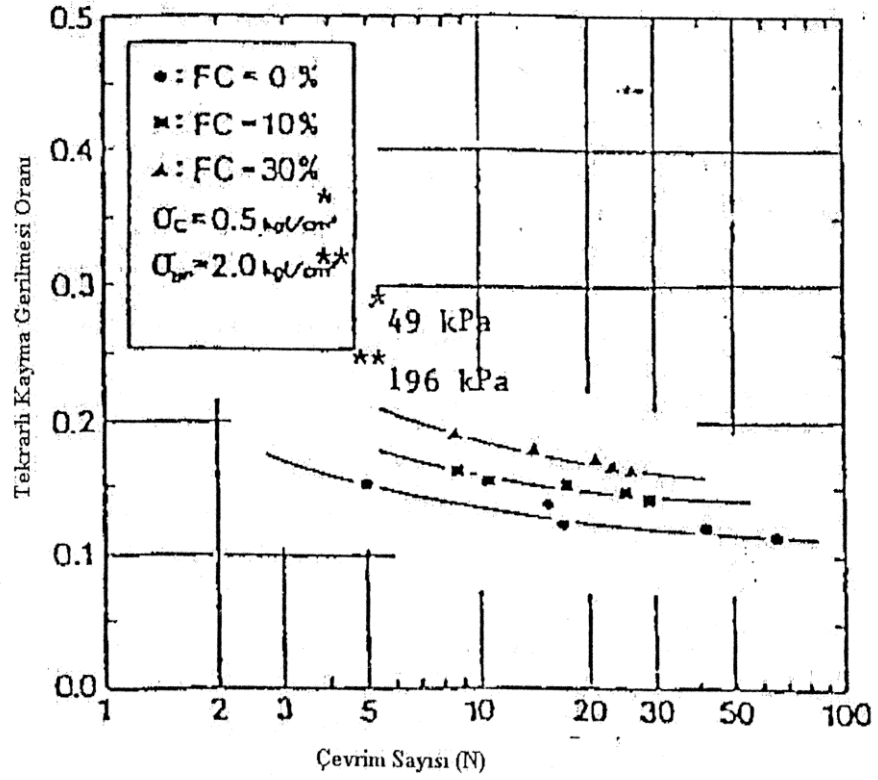
Kaufman (1981) ve Sherif ve diğ. (1983), benzer dane dağılımı eğrilerine ve endeks özelliklerine sahip farklı plastisitedeki silt miktarının kum-silt karışımının dinamik mukavemetini belirlemek üzere dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme dene aletiyle $\% 5$ çift genlikli deformasyon seviyesine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



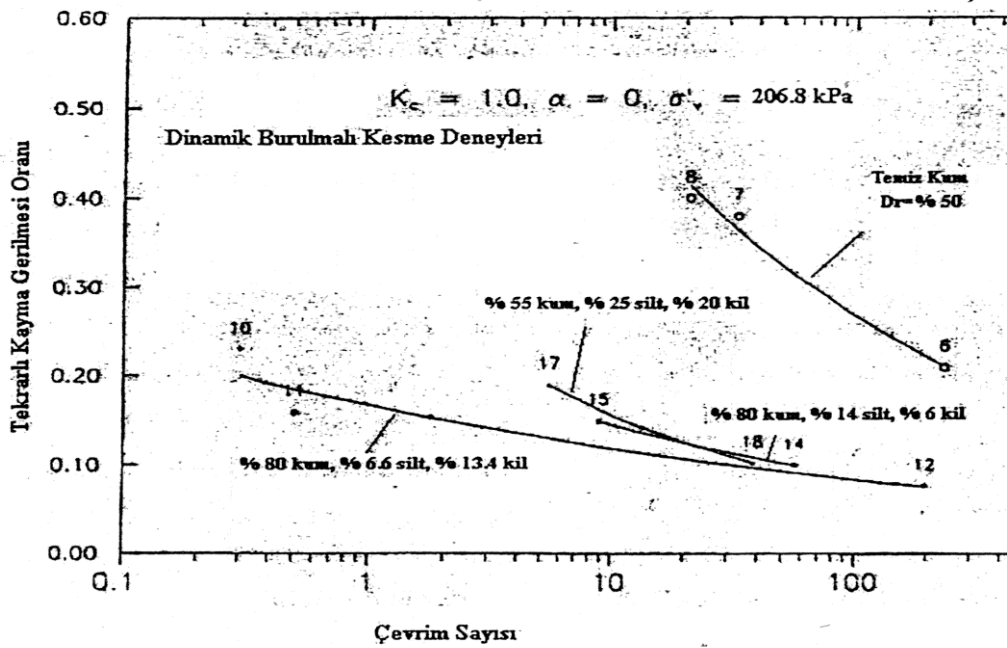
Şekil 2.5 Düşük plastisteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981 ve Sherif ve diğ. 1983)

Ayrıca kumlar üzerinde dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptığı sıvılaşma deneylerinin, ince dane türü ve miktardan direkt olarak etkilendiğini belirlemiştir. Belirli bir düzeye kadar eklenen ince dane miktarının sıvılaşma dayanımını arttırmadığını; ancak bu sınır değerini üzerine çıktığında, plastisite indisinden bağımsız olarak, sıvılaşma dayanımının, ince dane yüzdesiyle arttığını belirtmiştir. Troncoso (1990), 0.85 sabit boşluk oranında, % 0-30 arasında değişen oranlarda silt içeren kumların dinamik mukavemetini araştırmıştır. Artan silt miktarıyla, değişen dinamik mukavemetler Şekil 2.8 de gösterilmiştir. Aynı boşluk oranında silt yüzdesi % 30'a kadar arttıkça, kum zeminin mukavemeti azalmaktadır. Troncoso (1990), sabit boşluk oranında gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği sonuçların diğer yapılan araştırmalardan farklı olduğunu öne sürmüştür.

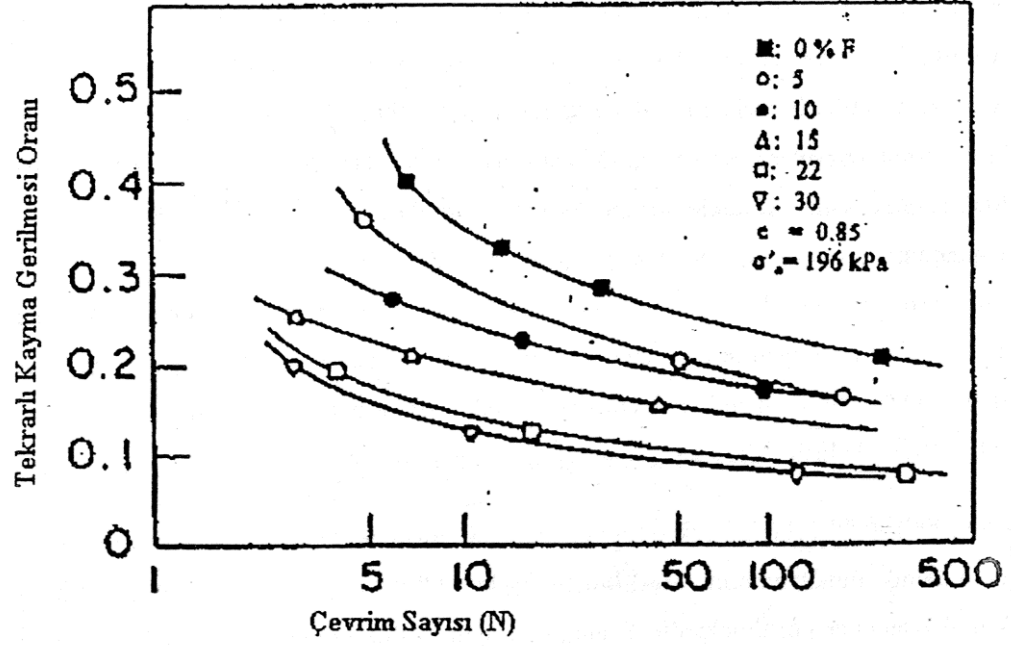
Erken ve Ansal, (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde yapılan deneylerde ise plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşma dayanımının da arttığı görülmüştür (Şekil 2.9).



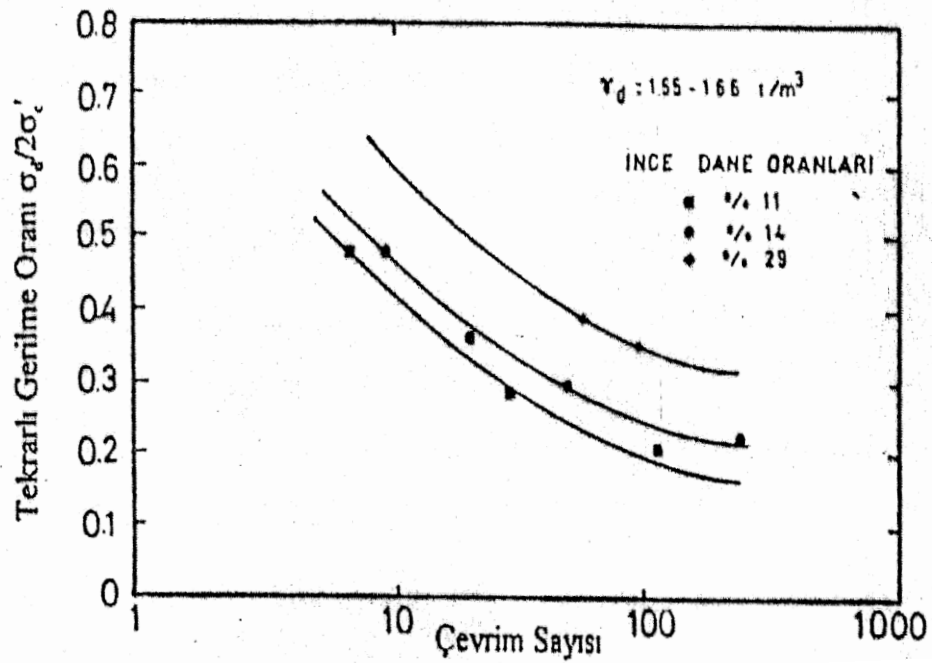
Şekil 2.6 Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987)



Şekil 2.7 İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992)

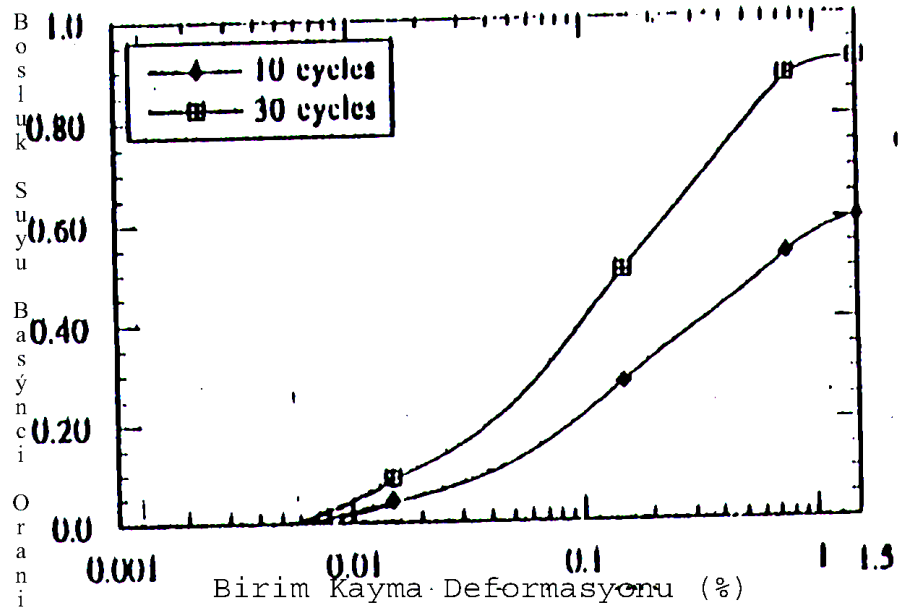


Şekil 2.8 Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (F= Silt yüzdesi)
(Troncoso, 1990)

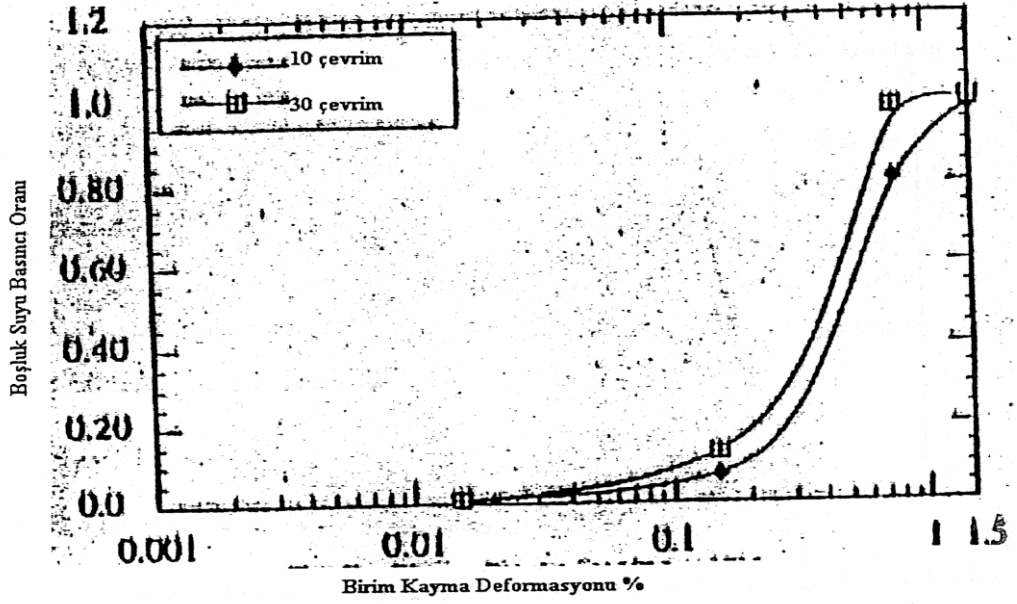


Şekil 2.9 Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1984)

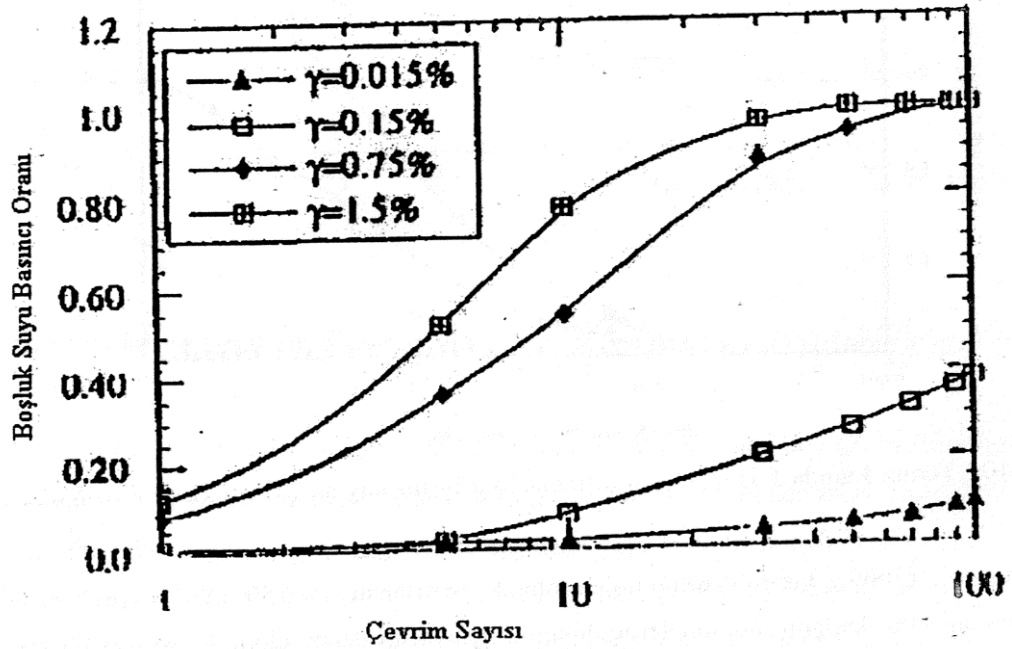
Erten ve Mahler, (1995) ise kumlarda boşluk suyu basıncı oluşumuna ince dane miktarının etkisini incelemek amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Silt miktarı, plastisite ve boşluk oranı, deney sonuçlarına etkileyen en önemli parametreler olarak belirlemiştir. Elde edilen sonuçlardan, silt miktarının ve plastisitesinin, boşluk suyu basıncı oluşumunda % 10^{-2} birim kayma deformasyonundan küçük değerlerde etkinin olmadığı, siltli kumlarda ise akma deformasyonu eşik değerinin temiz kumlardakiyle aynı olduğu görülmüştür. (Şekil 2.10a, 2.10b). Şekil 2.10c, 2.10d de boşluk suyu basıncının artan birim kayma değerlerinde değişimi görülmektedir. Buna göre, % 0.015 ve % 0.15 birim kayma seviyesine kadar yapılan deneylerden elde edilen boşluk suyu basınçları saf kumlarla % 10 plastik olmayan silt içeren kumlarda yaklaşık aynı seviyelerdeyken, % 0.75 ve % 1.5 birim kayma seviyesinde boşluk suyu basınçları temiz kumlarda daha düşük değerlerde kalmaktadır Erten ve Maher tarafından yapılan diğer çalışmalarda ise, % 60 silt miktarına kadar eklenen plastik olmayan siltin, kum numunedeki boşluk suyu basıncı oluşumuna bir etkisi olmadığı, % 60'ın üzerindeki silt miktarıyla boşluk suyu basıncının düştüğü belirlenmiştir.



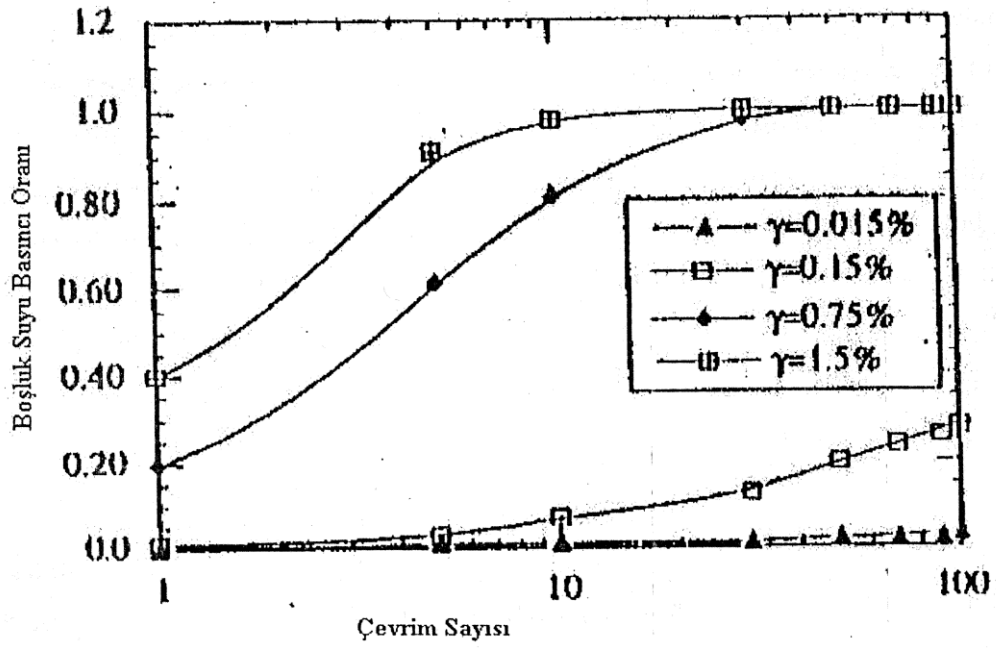
Şekil 2.10a Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995)



Şekil 2.10b Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995)



Şekil 2.10c Temiz kumda boşluk suyu basıncı gelişimi (Erten ve Maher, 1995)



Şekil 2.10d Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi
(Erten ve Maher, 1995)

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

Polito ve Martin (2001) ise kumların sıvılaşma dayanımına plastik olmayan ince danelerin etkisini araştırmışlardır. Plastik olmayan siltlerde aynı zeminde bulunan kumların dinamik davranışına hangi zeminin daha etkin olduğunu belirlemek için, kum zemin iskeletinin sahip olduğu boşlukların hangi oranda siltle dolu olduğunu bilmek gerektiğini söylemişlerdir.

Araştırmalardan, kum zeminin yapısını örselemeden daneler arası boşlukların alabileceği en büyük silt miktarına sınır değer silt yüzdesi adı verilmiştir ve yaklaşık olarak % 25-45 arasında bulunduğunu gözlemiştir. Eğer kum zeminin boşlularının bir kısmı siltle doluysa, zeminin dinamik davranışına kum zeminin sahip olduğu relatif sıkılık etkili olmaktadır. İskeletin boşluk oranı azaldıkça mukavemet artmaktadır. Bu karışım zeminin içeriği silt miktarı sınır değerin üzerindeyse, bu durumda davranışa silt etkili olurken, tüm zeminin rölatif sıkılığı dinamik mukavemete etkilemektedir. Buna karşın rölatif sıkılık, bir önceki duruma göre daha az oranda mukavemeti değiştirmektedir (Polito ve Martin, 2001).

2.3.4 Siltli ve Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışlarına Etki Eden Faktörler

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

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

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

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

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

Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını statik yükleme durumunda olduğu gibi belirleyen en temel etkenlerden birisi zeminin sıklık oranıdır. Genel olarak kohezyonsuz zeminlerin yapısal davranışlarının relatif sıklığa bağlı olarak açıklamak alışlagelmiş bir uygulamadır. Kum zeminin başlangıçta sahip

olduğu boşluk oranı tekrarlı yükler altında zeminde oluşacak mukavemet kaybının süreci ve şeklini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir.. Burada rölatif sıklığın kum zeminlerden sıvılaşabilirlikleri üzerinde etkisini görebilmek mümkündür. Buna göre de rölatif sıklığın azalması ile kum zeminin sıvılaşmaya ulaşmasının daha az bir çevrim sayısı ile ulaşılabileceğidir.

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

Aynı deney yöntemi kullanılarak izotropik koşullarda farklı çevre gerilmelerinde konsolide edilmiş kum numuneleri belirli bir genlikteki üniform burulmalı tekrarlı gerilmeler uygulanarak sıvılaşması için gereken çevrim sayıları belirlenmiştir. Yine izotropik koşullarda fakat artan gerilme genlikleri uygulanarak yürütülen deneylerde de farklı çevre basınçlarının sıvılaşma özelliğine etkisi incelenmiştir. Bu deneylerde artan gerilme genliklerinin artım oranları yaklaşık olarak eşit tutulmuştur. Bu tip gerilme koşullarında çevre gerilmesinin sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ilişkinin de yükleme deneylerinden elde edilen ilişkiye benzerlik gösterdiği düşünülmektedir.

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

Silt içeriğinin kumların dinamik davranışına etkisi üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalarda net bir sonuca ulaşılamamıştır. Ancak yürütülen deneysel çalışmalardaki genel görüş, plastik olmayan ince malzeme içeriğinin kumların

sıvılaşma direncini azalttığı, plastik ince malzemelerin ise tam tersine kumların sıvılaşma direncini arttırdığı yönündedir. Fakat silt ve kumların fiziksel ve endeks özellikleri ile mineralojik kökenlerindeki farklılıklar bu etkinin yönünü ve büyüklüğünü etkilemektedir.

2.3.5 Siltli ve Siltli Kil Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

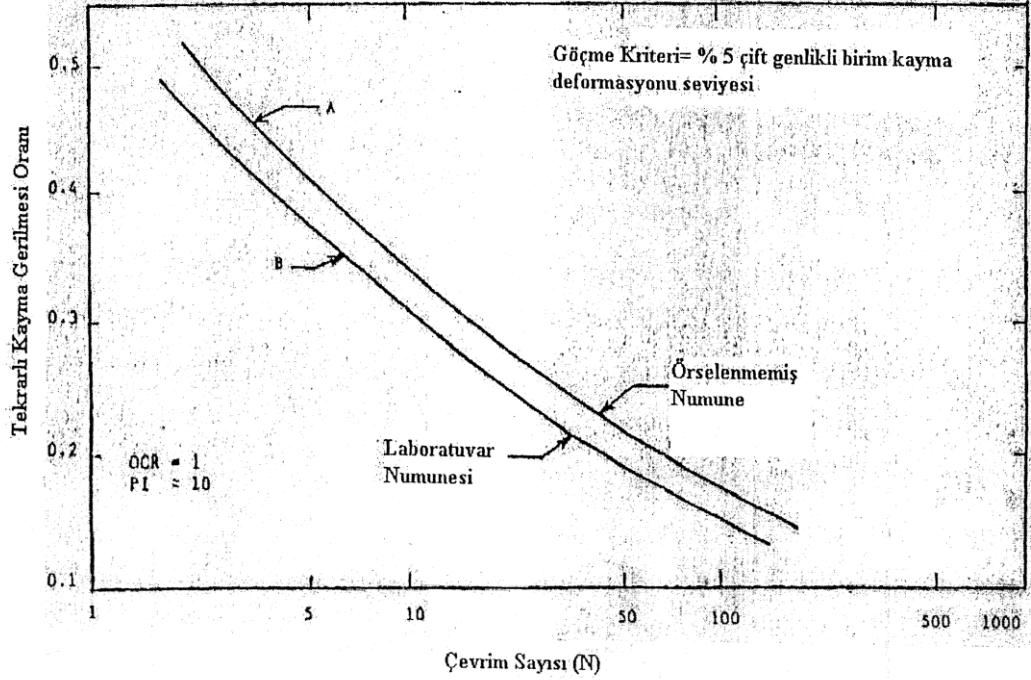
Silt zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışı bazı araştırmalarda belli miktarda silt içeren kumlarınkinden farklı elde edilirken, bazı çalışmalarda da benzer özellikler göstermiştir. Silt zeminler temiz kumlar gibi sıvılaşabilirler ancak bu sıvılaşma davranışı kumlarınkinden farklı olarak belirli miktar sıkışma ve drenajlı durumda artık boşluk suyu basıncı sönmelenmesi nedeniyle konsolidasyonu da beraberinde getirmektedir. Siltlerde tekrarlı yüklemeler altında oluşan boşluk suyu basıncı artışları davranışa etkiyen; kil ve/veya kum miktarı, ince danelerin plastisitesi, boşluk oranı ve efektif konsolidasyon basıncı gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Bu da zeminin dinamik kayma mukavemetini etkilemektedir.

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

Puri (1984), yaptığı çalışmada plastisitenin etkisini belirlemek üzere göçme kriterini, % 5 çift genlikli deformasyon seviyesi olarak alıp, Şekil 2.11 de görülen dinamik mukavemet eğrileri ile ifade etmiştir.

Şekil 2.12 de ise plastisite indisinin laboratuarda hazırlanan normal konsolide silt numunelerin dinamik mukavemetine etkisi görülmektedir. Aynı çevrim sayısında plastisite indisiyle birlikte gerilme oranı artarken çevrim sayısı ile birlikte aynı plastisitedeki numunelerin gerilme oranının azaldığı görülmektedir.

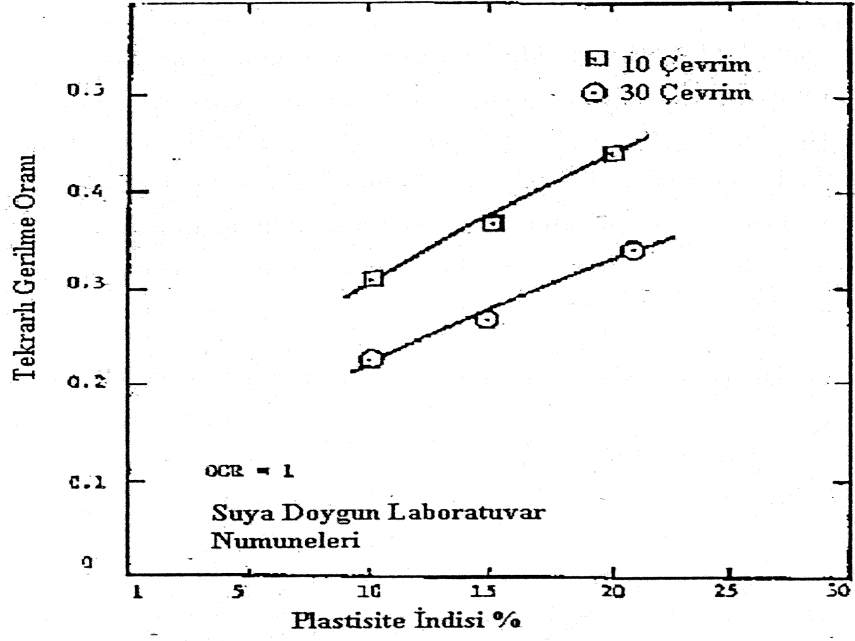
Laboratuarda hazırlanan silt numunelerde % 10-20 aralığında plastisite indisi arttıkça zeminin dinamik mukavemeti de artmaktadır.



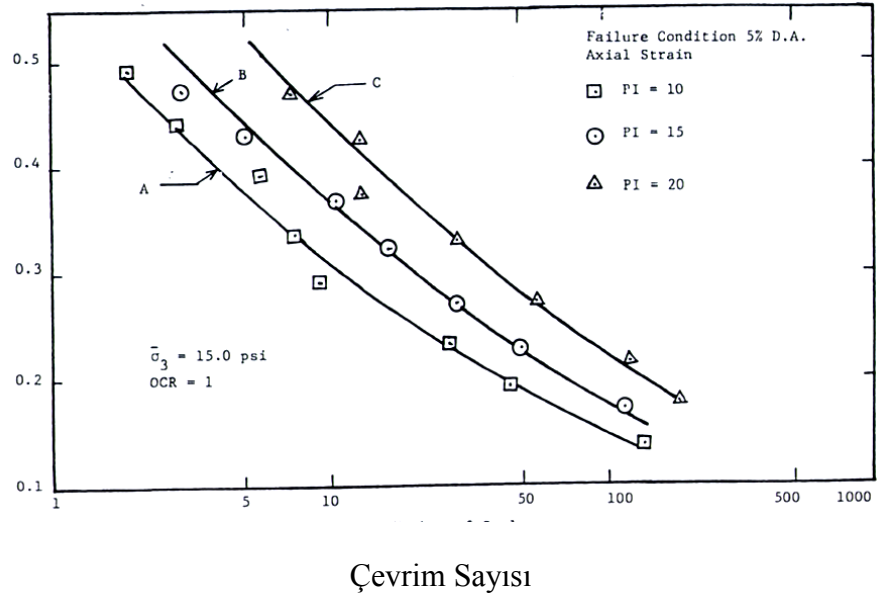
Şekil 2.11 Örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinin dinamik davranış farklılığı (Puri, 1984).

Puri (1984), yaptığı çalışmalarda plastisite etkisini belirlemek üzere göçme kriterini, % 5 çift genlikli deformasyon seviyesi olarak alıp Şekil 2.13 de görülen dinamik mukavemet eğrileri ile ifade etmiştir.

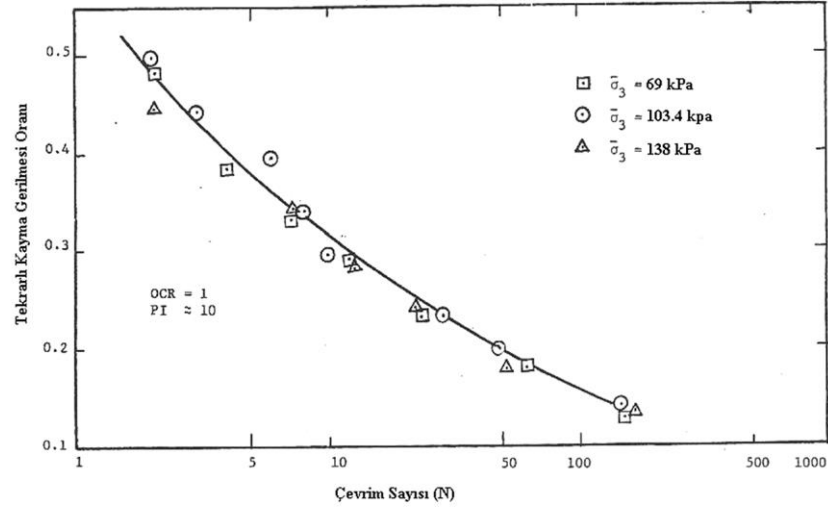
Plastisite indisi % 10 olan siltli numunelerde farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde numunelerde 0.1-0.5 arasında değişen oranlarda tekrarlı gerilme uygulanmış ve sonuçlarda fazla bir farklılık görülmemiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.12 Plastisite indisinin 10 ve 30 çevrimde % 5 genlikli deformasyonun oluşması için gerilme oranıyla değişimi (Puri, 1984)

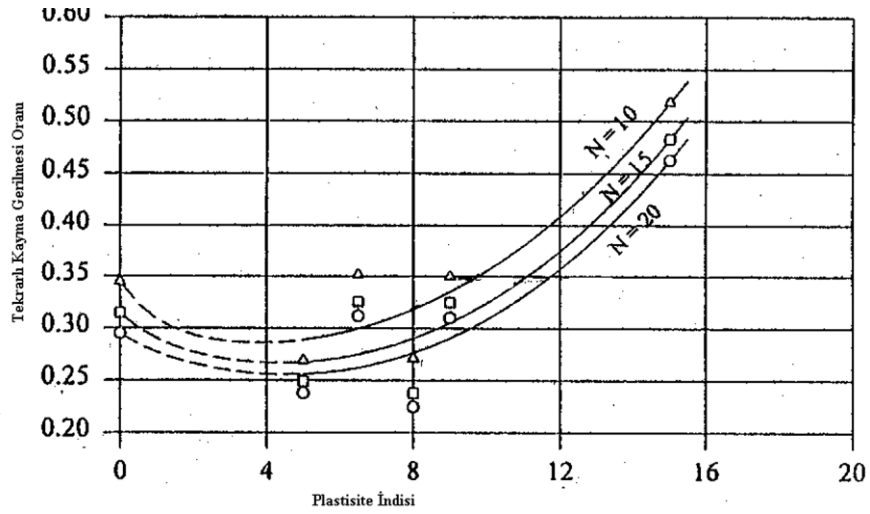


Şekil 2.13 Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışlarının plastisite indisine etkisi (Puri, 1984)



Şekil 2.14 Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984)

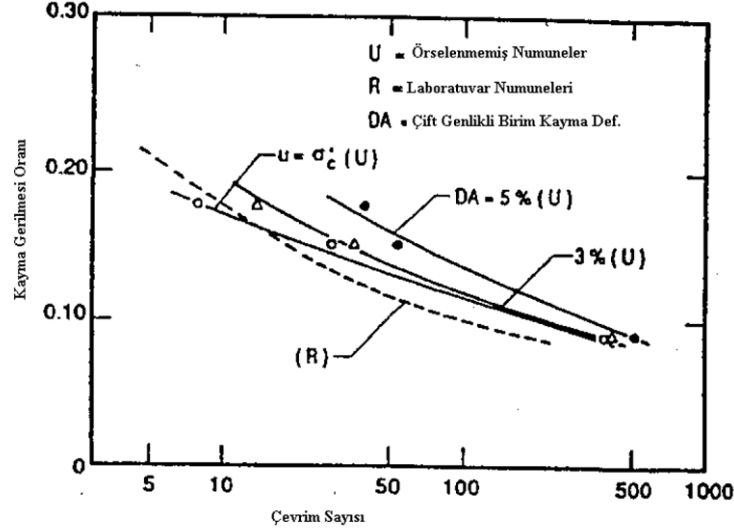
El Hosri (1984), sadece plastisite etkisini araştırmak amacıyla boşluk oranına göre normalize edilen gerilme oranı ile plastisite indisi ilişkisi çizilmiş, % 5 plastisiteye kadar gerilme oranında azalma görülürken, sonraki değerlerde plastisite indisi ile gerilme oranı artmaktadır. (Şekil 2.15)



Şekil 2.15 Siltli ve kumlu zeminlerde dinamik mukavemetin plastisite indisiyle değişimi (El Hosri, 1984)

Zhu ve Law (1988) ise örselenmemiş ve laboratuarda hazırlanan plastik olmayan siltli numunelerde yaptıkları deneylerde sabit boşluk oranında siltlerin dinamik mukavemetlerinin kumlarınkine benzediğini kaydetmişlerdir.

Ayrıca, örselenmemiş numunelerde artık boşluk suyu basıncının efektif konsolidasyon basıncının % 80'i olduğu anda kayma deformasyonlarının hızla arttığını, laboratuvar numunelerinde ise bu seviyenin % 85'e karşılık geldiğini söylemişlerdir. (Şekil 2.16)

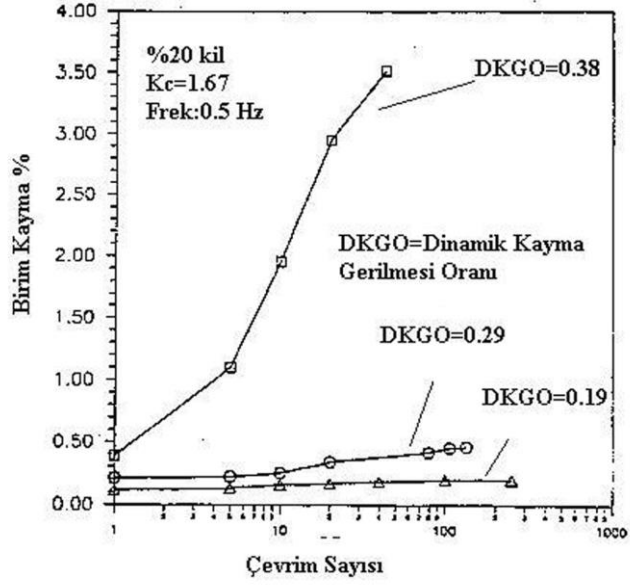


Şekil 2.16 Örselenmemiş numunelerde ve laboratuvar numunelerinde sıvılaştırma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988)

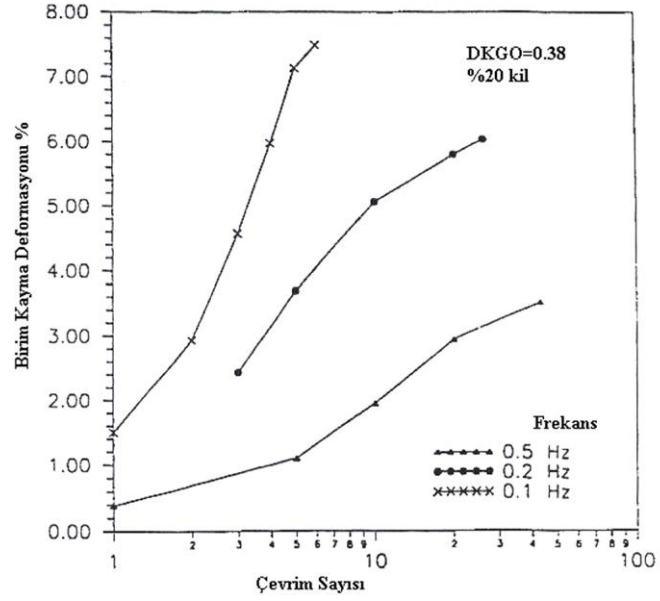
Konrad ve Wagg (1991) anizotropik olarak konsolide edilen killi siltler üzerinde yaptıkları drenajsız dinamik deneylerde, saf siltten % 40 kil içeren killi-silt karışımlarına kadar olan zeminlerde deformasyon seviyesinin üniform olmayan boşluk suyu basıncı dağılımında etkili olduğunu belirtmiştir.

Kil miktarı % 20 olan silt-kil karışımına ait birim kaymanın çevrim sayısı ile değişimini gösteren eğriler Şekil 2.17, 2.18, 2.19 'dedir. Şekil 2.17 ve 2.19 de farklı tekrarlı gerilme genliklerinde, aynı yükleme frekansında yapılan dinamik deneylerde birim kaymanın çevrim sayısı ile olan değişimi gösterilirken,

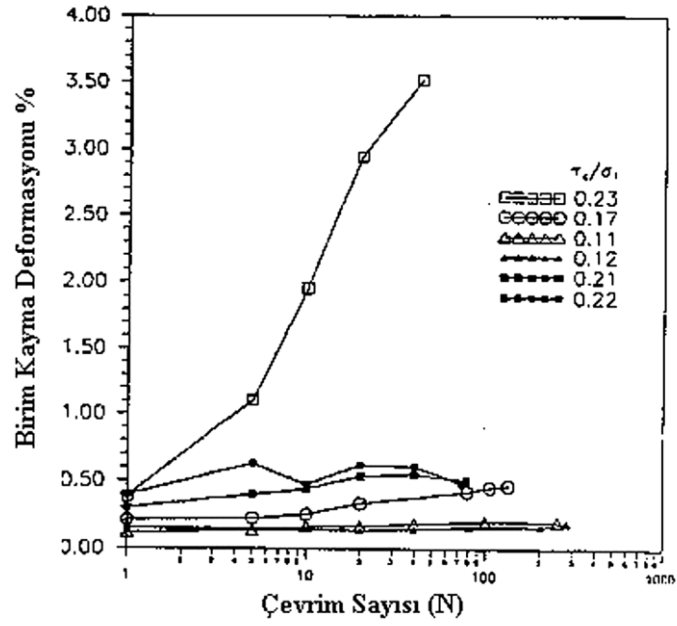
Şekil 2.18 'de birim kayma oluşumuna yükleme frekansının etkisi gösterilmiştir. Buna göre frekans attıkça aynı çevrim sayısında numunede oluşan birim kaymalar azalmaktadır. Dolayısıyla tekrarlı yüklemenin frekansı, ince daneli zeminde dinamik mukavemeti arttırmaktadır.



Şekil 2.17 Tekrarlı şekil değiştirme genliği- çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

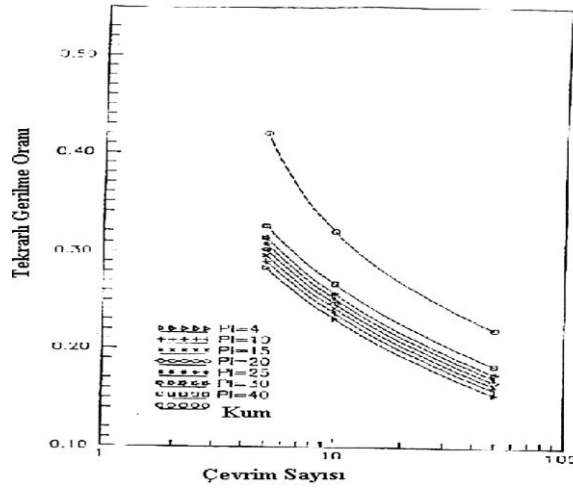


Şekil 2.18 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi .(Wagg, 1990)



Şekil 2.19 Tekrarlı şekil değiştirme genliği –çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

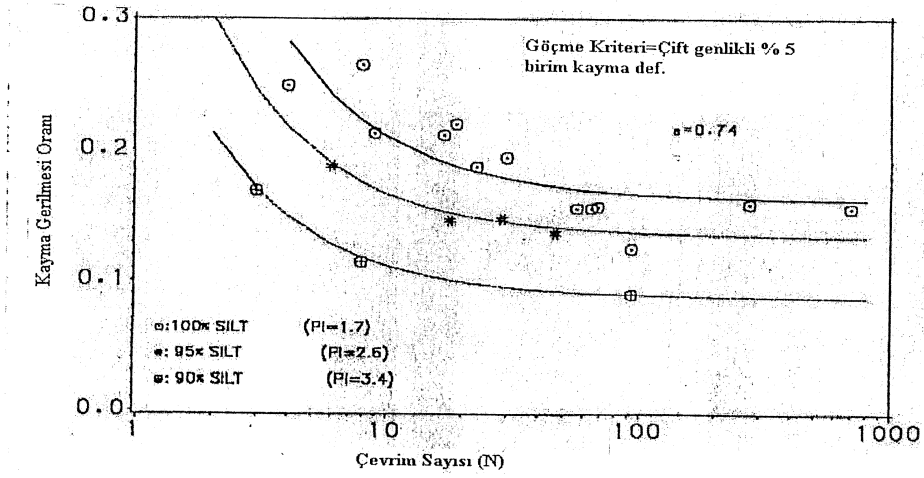
Liu (1992) regresyon analiziyle elde ettiği dinamik mukavemet eğrilerinde, 10 çevrimde plastisite indisinin ince daneli, kohezyonlu zeminlerde dinamik mukavemet üzerindeki etkisini araştırmıştır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu 1992)

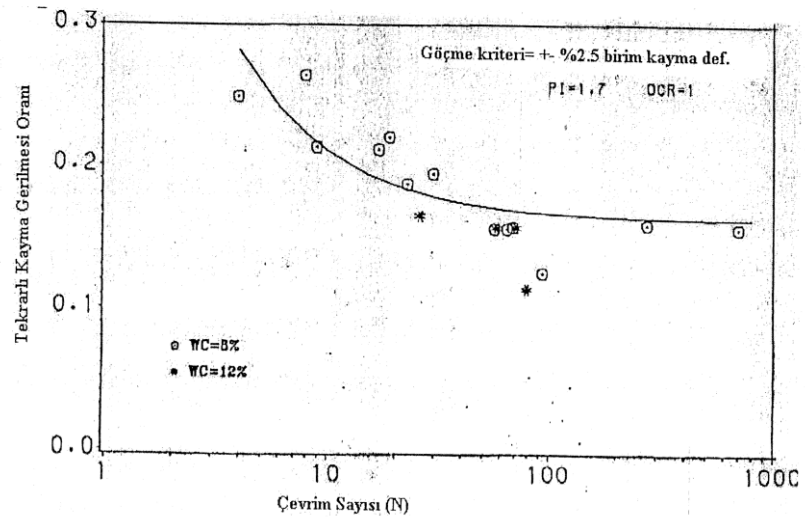
Sandoval (1989), Prakash ve Sandoval (1992), siltlerin sıvılaşma potansiyeline plastisite indisinin etkisini araştırmıştır. Düşük plastisiteli siltte ($I_p = \% 1.7-3.4$), % 5-10 oranında kaolin kili ekleyerek hazırladıkları numuneleri, boşluk suyu basıncı efektif çevre basıncına eşit olana kadar veya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

Sonuçlardan, düşük plastisitelerde, plastisite indisi arttıkça siltlerin dinamik mukavemeti azalmaktadır. (Şekil 2.21)

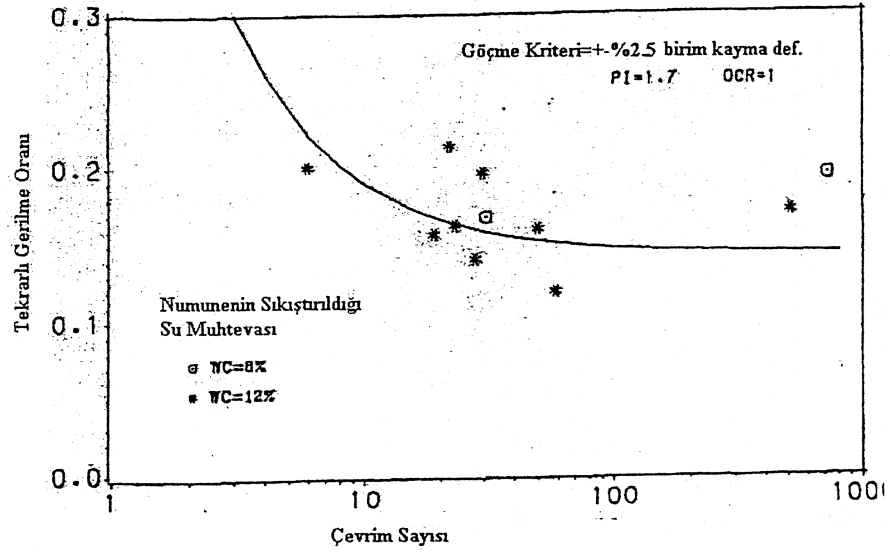


Şekil 2.21 Düşük plastisiteli siltlerde % 5 çift genlikli deformasyon durumuna plastisitenin etkisi (Sandoval ve Prakash, 1992)

Benzer şekilde, siltli zeminde kil yüzdesi arttıkça, göçmenin oluşması için aynı çevrim sayısında aksel deformasyon miktarı artmakta buna karşın dinamik gerilme oranı azalmaktadır. Şekil 2.22 ve Şekil 2.33 de % 8 ve % 12 su muhtevasında laboratuvar da sıkıştırılarak hazırlanan aynı efektif çevre basıncında farklı birim hacim ağırlıktaki düşük plastisiteli silte ait mukavemet eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.22 Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Sandoval, 1989)



Şekil 2.23 % 5 çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi ($\gamma_k = 16.0 \text{ kN/m}^3$) (Sandoval, 1989)

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

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

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

2.4. Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi

Yapılan çalışmalarda, deney sistemine de bağlı olarak sinüzoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapez yükleme şekilleri kullanılmıştır. Dikdörtgen yükleme biçiminin kullanılması durumunda en büyük gerilme değerinin numune üzerinde diğer yükleme şekillerine göre daha uzun süre etkimesinden dolayı daha büyük şekil değiştirmeler

ve dolayısıyla daha büyük artık boşluk suyu basınçları elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının temel amacı doğadaki durumu modellemek olduğu için, deneylerde kullanılan yükleme biçimi, deprem yüklemesine eşit bir etki yaratacak tipte olmalıdır. Literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan sinüzoidal yükleme şekli, gerçekte deprem tarafından zemin tabakalarına uygulanan yükleme şekli değildir. Ancak deney sonuçları her iki tür yükleme arasında fazla bir fark olmadığını göstermektedir. Bu farkın az olması laboratuvarda yüklemenin eşdeğer tekrarlı gerilme genliği şeklinde olmasındandır. Böylece çift yönlü yüklemeyle birlikte uygulanan tekrarlı gerilme genliğinin hem çekme hem de basınç bölgesinde kalması sağlanmaktadır. Sonuç olarak şekil değiştirmeler daha büyük olmakta; daha küçük mukavemet değerleri elde edilmektedir.

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

2.5. Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar

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

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

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

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

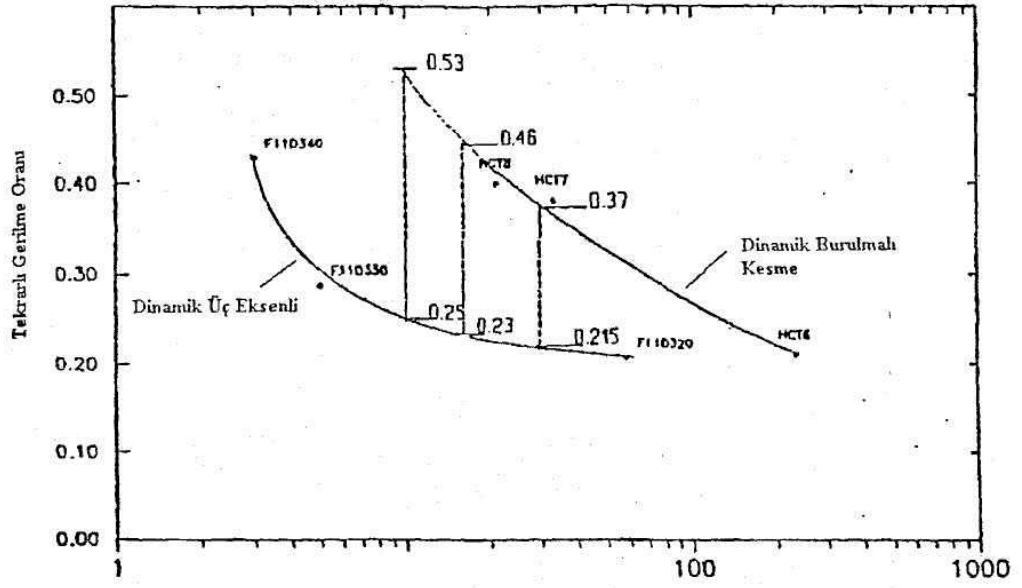
Yoshimine ve diğ. (1999), İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında yapmış oldukları burulmalı kesme deneylerinde drenajsız düzlem deformasyon durumunda kayma mukavemetini ve drenajsız kayma mukavemetini karşılaştırmışlardır.

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

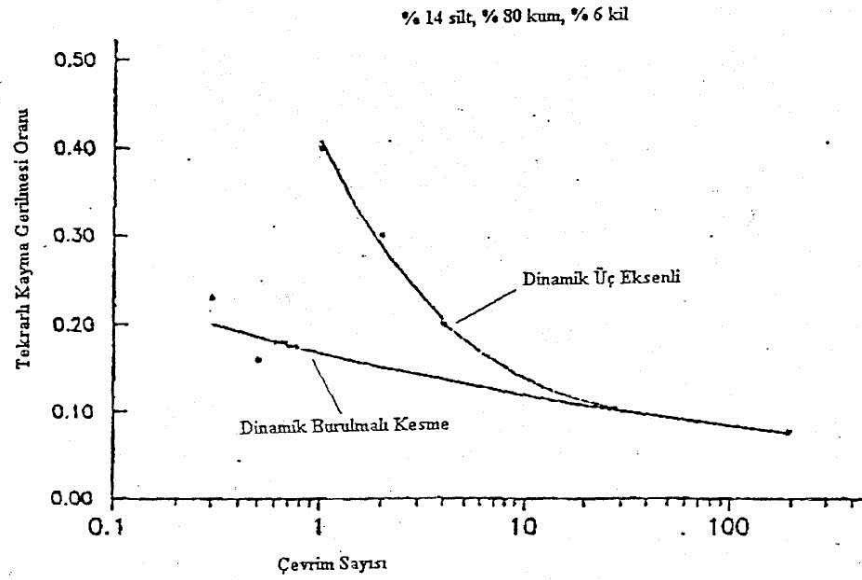
2.6 Dinamik Burulmalı Kesme ve Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinde Yapılan Çalışmaların Karşılaştırılması

Koester (1992), ince daneli kumlarda ve kohezyonlu zeminler üzerinde dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleri ile sıvılaşma davranışları incelenmiştir. Sonuçları boşluk suyu basıncı oluşumu ve farklı gerilme ve konsolidasyon şartları altında elde ettiği dinamik mukavemet açısından karşılaştırmıştır.

Koester (1992)'in dinamik üç eksenli deney aleti ile temiz kumlarda yaptığı deneylerden elde ettiği dinamik mukavemetler, burulmalı kesme deney aletinden elde ettiği mukavemetlerden daha düşüktür. İçerisinde % 14 silt ve % 6 kil bulunan kumlar kullanarak yaptığı dinamik üç eksenli deneylerden elde ettiği dinamik mukavemetler ise daha büyüktür (Şekil 2.24 ve Şekil 2.25).

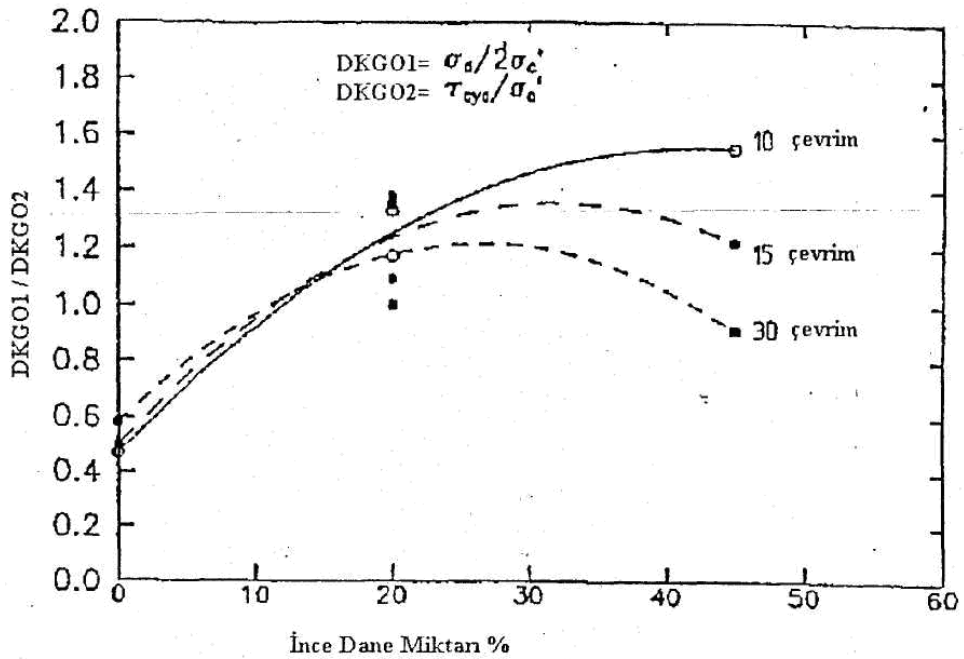


Şekil 2.24 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin temiz kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)

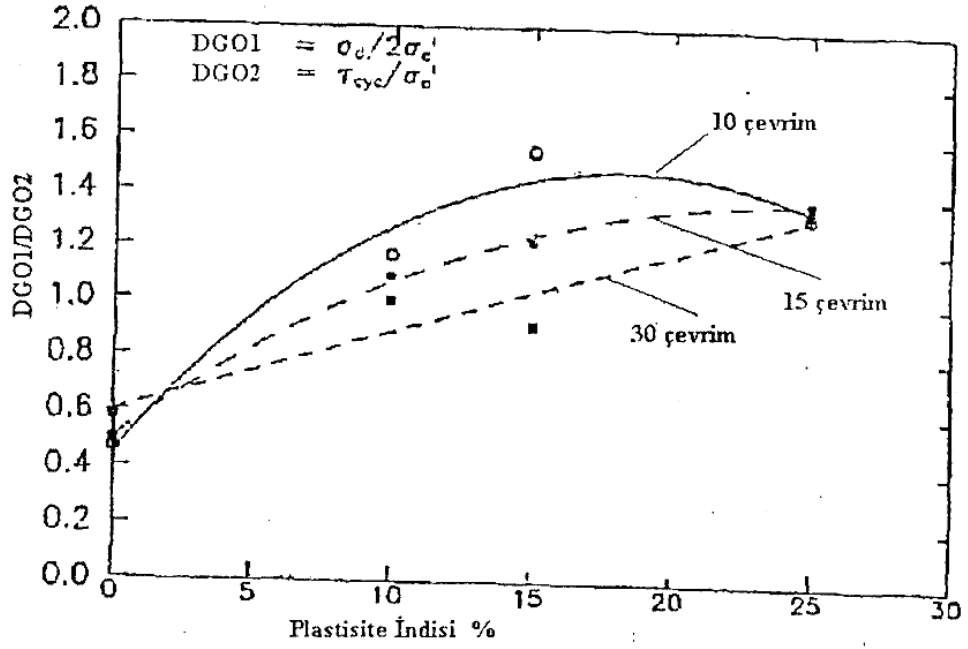


Şekil 2.25 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin ince daneli kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)

Koester (1992), yaptığı bir başka çalışmada ise ince dane oranı ve plastisite indisinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlerdeki farklılığa etkisini araştırmıştır. Bunun için 10, 15 ve 30 yükleme çevriminde farklı gerilme oranlarında deneyler yaparak Şekil 2.26 ve Şekil 2.27 deki eğrileri elde etmiştir. Buna göre dinamik üç eksenli mukavemet, ince danelerin plastisite indisi % 8 den az olduğu durumda, dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen mukavemetin yanında daha düşük kalmaktadır. Plastisite indisi % 8 den yüksek olduğu durumda dinamik üç eksenli deneyden elde edilen dinamik mukavemet daha büyüktür. 15 çevrimden elde edilen eğrilerin ise, ortalama olarak davranış göstermiştir.



Şekil 2.26 İnce dane yüzdesinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992)



Şekil 2.27 Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992)

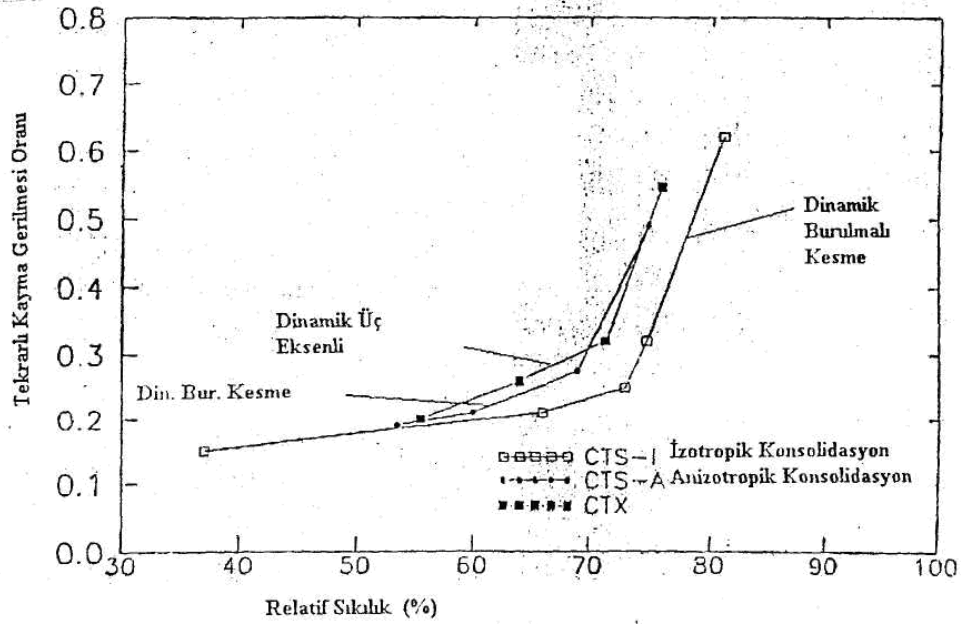
2.7 Numune Hazırlama Yönteminin Dinamik Davranışa Etkisi

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

Tatsuoka ve diğ. (1984), numune hazırlama yönteminin dinamik burulmalı kesme deney sonuçlarına etkisini araştırmışlardır. Bunun için ince dane içermeyen Toyoura kumu ile % 2.4 ince dane içeren Sengenyama kumu kullanmışlardır. Buna karşın en büyük ve en küçük boşluk oranının belirlenmesinde kullanılan yöntem ile dinamik deneylerde kullanılan numune hazırlama yöntemi farklı olduğundan, rölatif sıklığın kumlarda dinamik mukavemete olan etkisini tek başına yeterli bir parametre olarak almanın yanlış olacağını belirtmişlerdir. Dinamik deney sonuçları, numune hazırlama yöntemine doğrudan bağlıdır. Tatsuoka ve diğ. (1984), ıslak sıkıştırma, kuru yağmurlama, ıslak vibrasyon ve vibrasyonla suda yağmurlama yöntemleri kullanarak dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları deneylerde, 20 çevrim sayısında % 10

birim kayma elde etmek için gerekli gerilme oranı ıslak sıkıştırma yönteminde elde edilmiştir. Bu sonuç, Mulilis ve diğ. (1975), tarafından bulunan sonuçla uyushmaktadır. Bunun yanında ıslak sıkıştırma yöntemi ile elde edilen mukavemetlerle, ıslak vibrasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerle yapılan dinamik burulmalı kesme aletinden elde edilen mukavemetler (20 çevrimde % 15 birim kaymaya ulaşmak için gerekli gerilme oranı), daha büyüktür

% 60 ile % 80 relatif sıklıkta Toyoura kumundan hazırlanan numunelerde yapılan dinamik üç eksenli ve burulmalı kesme deney sonuçları görölmektedir (Şekil 2.28).Dinamik burulmalı kesme deneyleri izotropik ve anizotropik konsolidasyon altında yapılmış, ve relatif sıklık arttıkça numunede % 15 birim kayma deformasyonu oluşması için gerekli gerilme oranı, dinamik üç eksenli deneylerinkinden daha düşüktür.



Şekil 2.28 Islak sıkıştırma ile hazırlanan Toyoura kumu numunelerinin dinamik mukavemetleri (Tatsuoka ve diğ. 1984)

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

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

2.8 Zemin Yapısının Farklı Yükleme Koşullarında Konsolidasyon Değişimi

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

Farklı efektif gerilmelerde konsolide edilen ince daneli zeminlerde yapı değişimleri meydana gelmektedir. İzotropik konsolidasyon öncesindeki mevcut zemin yapısı, konsolidasyon sonrasındakine göre oldukça farklı olmaktadır. Laboratuarda çeşitli yöntemlerle hazırlanan numunelerin oluşturduğu yapı, konsolidasyon öncesi daha gevşek ve belli ölçüde anizotropikken, konsolidasyonla birlikte azalan poroziteye de bağlı olarak yönlenmiş ve izotrop bir yapı oluşturabilmektedir.

Youd (1977), tekrarlı yüklemenin granüler zeminler üzerindeki etkisine değirmiştir. Buna göre kumlarda yüklemeye birlikte dilatans nedeniyle oluşan hacimsel deformasyona bağlı olarak yeniden bir yerleşim olmaktadır. Bu yeni dane düzeni ise

boşluklu yapıyı etkilemektedir. Düşük deformasyon seviyelerinde kum daneleri arasında oluşan küçük çaplı boşluklar, deformasyonlar arttıkça yükleme döngüsüyle birlikte azalmaktadır. Buda tekrarlı yüklenen kum zeminlerin mikro mekanizmasına etki etmektedir.

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

Wagg, (1990), farklı numune hazırlama teknikleri kullanarak yaptığı dinamik deneylerde numune yapısını, epoksi ile doyurduktan sonra hazırladığı ince kesitlerle incelenmiştir. Üç orthogonal düzlemde dane temas noktalarında oryantasyonları ölçülmüştür. Buna göre kuru yağmurlama yönteminde düşey temas noktaları daha fazla olan numunenin mukavemeti diğerlerine göre daha fazladır. Buna göre ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerin dinamik mukavemeti diğer yöntemlerle hazırlanan numunelere göre daha fazladır.

2.9 Sonuç

Bu bölümde literatürdeki mevcut çalışmalardan bahsedilmiştir. Yapılan bu çalışmalar iki kısımda toplanmıştır. Bunlar; zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuarda yapılan deneysel araştırmalarla, doğal zeminlerin yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan teorik modellemelerden kısaca bahsedilmiştir.

İlk bölümde araştırmacıların laboratuvar ortamında yaptıkları deneysel çalışmalarla, kumlu, siltli kumların, kumlu siltlerin ve siltli killerin dinamik davranışları belirlenmiştir. Bununla birlikte deney sisteminin, yükleme koşullarının ve numune hazırlama yönteminin zeminlerin dinamik davranışına etkisi de araştırılan diğer konulardandır.

İkinci bölümde ise doğal zeminlerin çeşitli konsolidasyon ve yükleme koşulları altında yapılarında meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar anlatılmaktadır.

Son olarak zeminlerin konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte yapılarında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda bahsedilmiştir.

3. DENEY ALETİ, DENEY YÖNTEMİ VE KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

3.1 Giriş

Bu bölümde deney aleti ve numune hazırlama yöntemiyle deneylerde kullanılan örselenmiş numunelerin özellikleri ve bu numunelerde oluşan gerilme-şekil değiştirme yöntemleriyle ilgili hesap yöntemleri açıklanmaktadır.

3.2 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Sistemi

Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik deneyler, JICA projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilen içi boş silindirik burulmalı kesme deney aletiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi, düşey eksenel F_z , burulma momenti T , iç hücre basıncı P_i , ve dış hücre basıncı P_0 ve dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilmesinin yanı sıra; düşey eksenel yer değiştirme ΔH , burulma açısı $\Delta \theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_i ve numune hacim değişimi ΔV_s ' nin belirlenmesine olanak tanır. Burulma momenti istenilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda uygulanır. Düşey yük ve ters basınç ise hem dışarıdan elle hem de otomatik olarak kontrol edilebilmektedir.

Bu deney aleti ile içi boş, silindirik numuneye drenajsız koşullar altında, izotropik üç eksenli gerilme koşullarında, 0.01-10.00 Hz yükleme frekansı aralığında yük uygulanarak, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ile kayma mukavemeti özellikleri belirlenebilmektedir.

Şekil 3.7 de dinamik burulmalı kesme deney aletinin genel görünüşü görülmektedir. Şekil 3.8 de ise içi boş silindirik deney numunesine ait düşey kesit görülmektedir.

İstanbul Teknik Üniversitesi zemin dinamiği laboratuvarına, ortak yürütülen bir proje kapsamında Japonya Uluslararası İşbirliği Kuruluşu (JICA) tarafından getirilmiş olan DTC-421 modelidir.

Sistem esas olarak;

- i) Üç eksenli yükleme hücresi
- ii) Düşey Yük ve Burulma momenti yükleme sistemi
- iii) Hava-su kontrol uygulama birimi
- iv) Ölçüm ve kayıt sistemi

bölümlerinden oluşmaktadır.

3.2.1 Üç Eksenli Yükleme Hücresi

Dinamik burulmalı kesme deney aletinde üç eksenli yükleme hücresi sabit bir platform üzerindedir (Şekil 3.1). Bu platform üzerinde deney numunesinin kurulması aşamasında numunenin hazırlandığı alt başlık platform üzerindedir. Bu sistem hava sürükleyici bir sistemle ilişkilendirilerek sistemin rahat hareket etmesini sağlar.



Şekil 3.1 Üç eksenli deney sisteminin genel görünümü

Üç eksenli sistemde numuneye su ve ters basınç verilmesini sağlayan ve bunları kontrol eden kanallar mevcuttur. Bununla birlikte hava su kontrol ünitesi ile de ilişkilendirilen bu kanallar aracılığıyla numunede meydana gelecek basınç değişimlerini ölçmek üzere bu kanalları izleyen bağlantı noktalarında ölçüm cihazları yerleştirilmiştir.

Alt piston başlığı poroz taşının yerleştirildiği yuva, içinden geçen kanaldan oluşmakta ve alt tabladan ayrılabilir. Numune poroz taş üzerine yerleştirildiğinde bu kanaldan su girişi ve çıkışı tabla kenarına monte edilmiş vanalar yardımıyla sağlanır (Şekil 3.2).

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



Şekil 3.2 Hücre alt tablasına bağlı vanaların gösterimi

Üç eksenli deney sisteminde platform üzerinde sabit olan alt tablaya numune yerleştirilip üst piston monte edilerek sistemin düşey yönde yük alması sağlanmaktadır. Üst piston bölümünde düşey deformasyonun ölçümüne olanak sağlayan hassas algılayıcılar bulunmaktadır. Algılayıcılardaki veri üst başlıkta bulunan kanallardan geçen kablolar aracılığı ile veri edinim düzeneğine ulaşır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Hücre üst başlığı

3.2.2 Düşey Yük ve Burulma Momenti Yükleme Sistemi

Burulmalı kesme deney aletinde incelenen diğer bir bölümde numuneye statik yükleme esnasında verilen düşey yük ve dinamik burulma yükünün aktarıldığı düzenektir (Şekil 3.4). Bu sistemde, verilen düşey yük, hava-su kontrol ünitesinden gelen iki kanal sayesinde sağlanmaktadır. Bu kanallardan ilki düşey dengeleme basıncını ayarlayan kanaldır. Diğer kanal ise sisteme çevre basıncı verilmesi esnasında çevre basıncıyla orantılı olarak arttırılan düşey yükün sisteme verilmesini sağlayan kanaldır. Burulma momentinin sisteme aktaran ünite ise veri edinim ünitesiyle ilişkilendirilmiştir. Numuneye uygulanacak burulma momenti yükü veri edinim ünitesi aracılığıyla kontrol edilir.

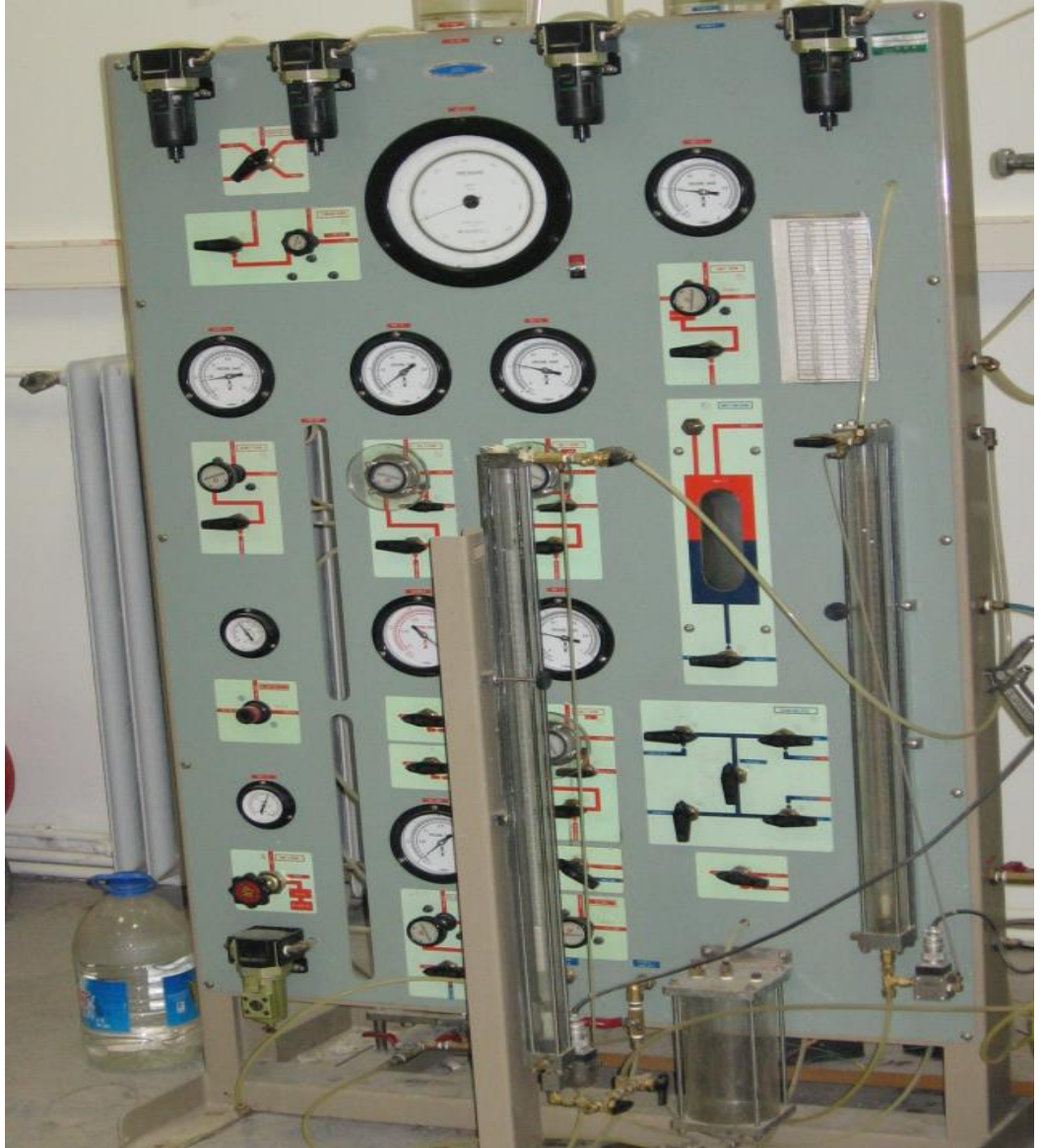


Şekil 3.4 Düşey yük sistemi ve burulma momentinin genel görünümü

3.2.3 Hava-Su Kontrol Uygulama Birimi

Sisteme uygulanan basınçlar kompresörden gelen basınçlı havanın düzenlenmesiyle elde edilir. Kompresörden gelen basınç G regülatöründe düzenlenmekte, değeri alete zarar vermeyecek kullanılabilecek maksimum değere indirgenerek sisteme borular aracılığıyla girişi sağlanır. Bu basınç deney sisteminin panosu içindeki regülatörler yardımıyla deney sırasında uygulanacak basınçlar ayarlanmak suretiyle çevre basıncı, düşey basınç, ters basınç ve dinamik yük uygulanır (Şekil 3.5).

Çevre basıncının uygulanması kompresörden gelen basınçlı havanın G regülatöründen geçtikten sonra sırasıyla sisteme girişi, ikinci regülatöre gelişi, burada istenen düzeye basıncın indirgenmesi ve ardında da hücre alt başlığındaki kanallardan girmesi ile tamamlanır. Kompresörden gelen basınçlı havanın diğer bir kullanım amacı da numuneye ters basınç uygulamasıdır. Burada da sistemden gelen basınçlı hava panodaki regülatörde düzenlendikten sonra önce 100 ml kapasiteli büret içindeki suya, su ile beraber hücre alt tablasındaki kanallara, oradan da numune altından iki kanalla ve üstten de bir kanalla giriş yapar.



Şekil 3.5 Hava-Su kontrol ünitesi

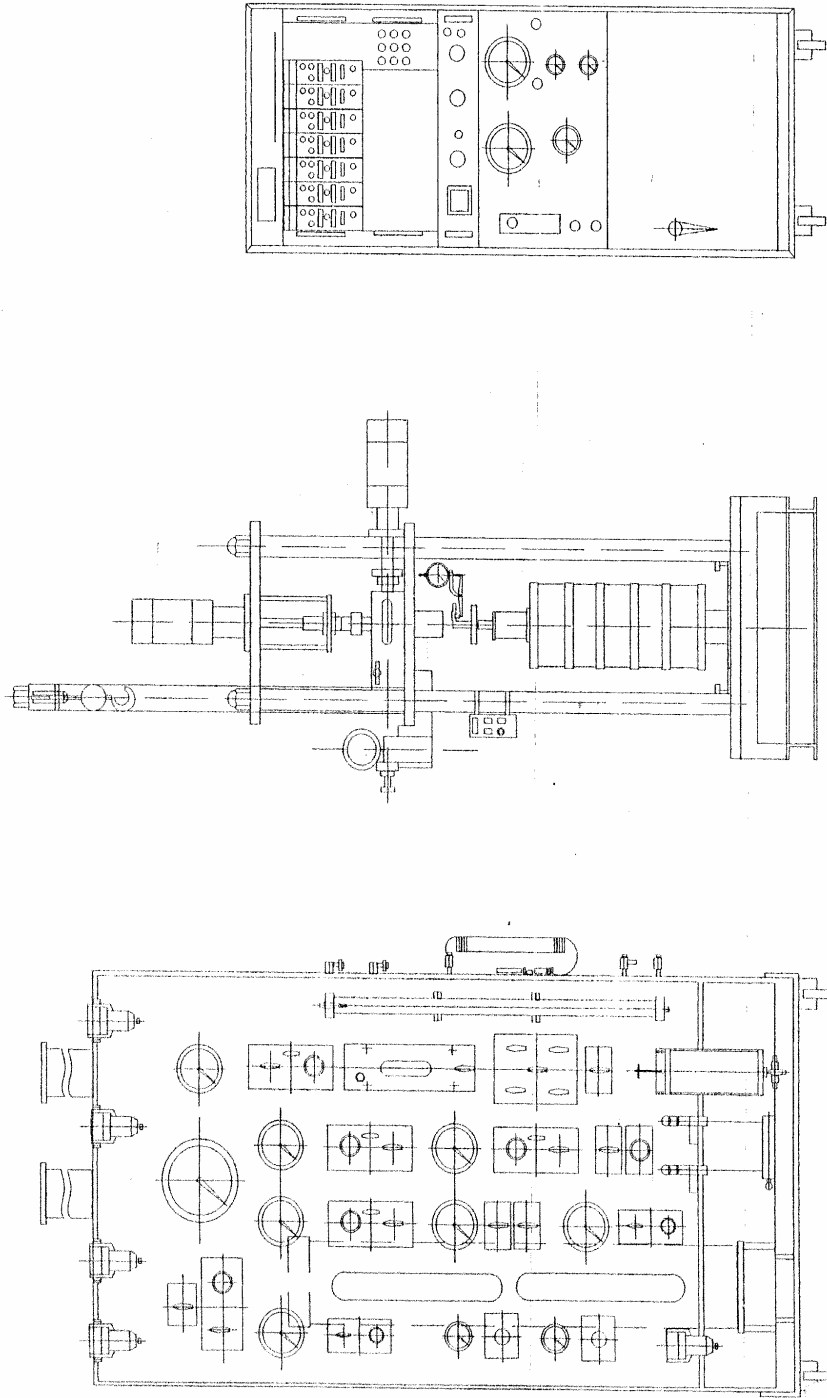
3.2.4 Ölçüm ve Kayıt Sistemi

Ölçüm sistemi olarak Seiken firması tarafından üretilmiş olan dijital voltmetreli, ayarlı deformasyon amplifikatörüdür (Şekil 3.6). Sistem giriş olarak aldığı sinyali büyütme ve çıkışı volt olarak vermektedir. Sistemin giriş olarak aldığı veri deformasyon ya da başka bir fiziksel özellikteki değişimin sistemde voltaj değişimine sebep olmasıdır.

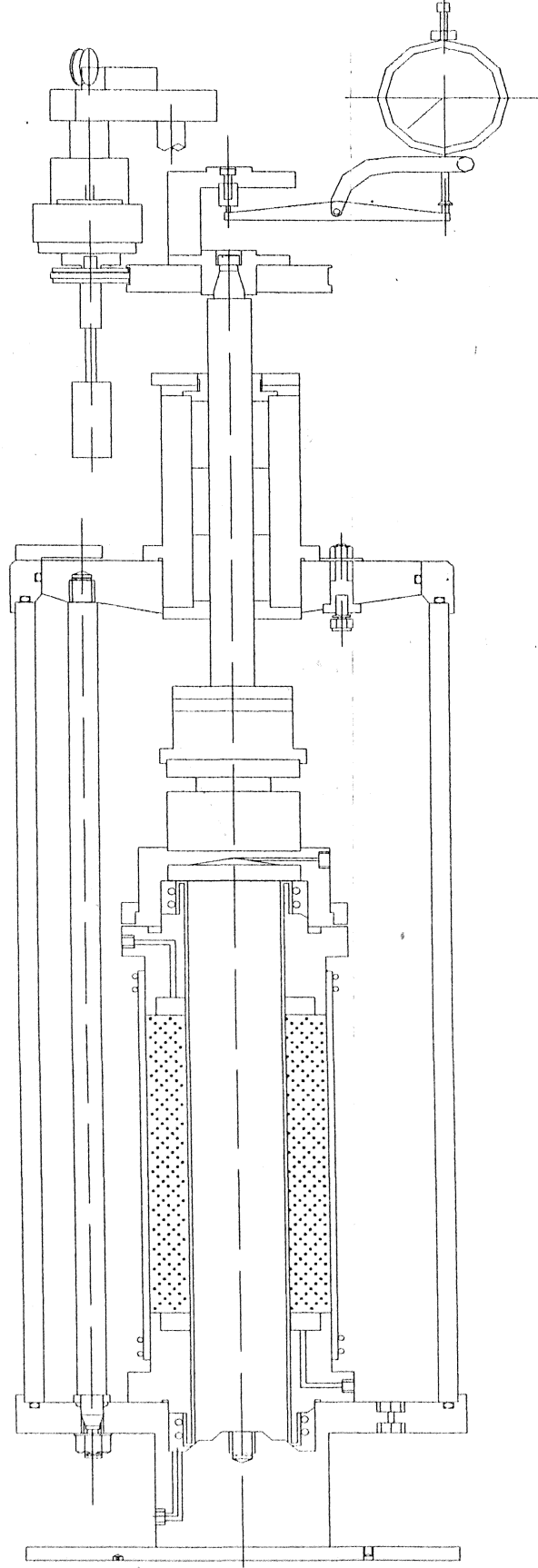
Temel olarak ölçüm sistemi deneyler sırasında numunelerde meydana gelen deformasyonların, oluşan basınçların ve kuvvetlerin ölçülmesidir. Kayıt sistemi de bu verilerin sonradan değerlendirilmeye alınması için fiziksel verilerin sayısal değerler olarak saklanmasından ibarettir. Kayıt sistemi de temel olarak ölçüm sisteminden alınan verilerin bir program aracılığı ile sayısal değere çevrilmesinden ibarettir. Deney düzeneği ölçüm panosundan çıkan veriler bilgisayara giriş yapar ve burada Labtec adlı program aracılığı volt değerleri sayısal olarak metin formatında kayıt edilir.



Şekil 3.6 Veri Edinim Ünitesi



Şekil 3.7 Deney sistemi genel görünümü



Şekil 3.8 Deney numunesine ait düşey kesitin görünümü

Numunenin içinde bulunduğu üç eksenli deney hücresinin yapıldığı madde akriliktir. Numunenin etrafını saran ve damıtık suya 1 Mpa ‘ a kadar varan basınçlar uygulanmasına olanak tanır. Hücre alt ve üst düzlemlerine lastik conta ve vidalarla sıkıca sabitlenerek hava ve su sızıntısı engellenir.

Numuneye düşey eksenel yük en fazla 200 kg, burulma momenti de en fazla 200 kg-cm olacak şekilde iki ayrı yükleme pistonu aracılığıyla uygulanır. Bu yüklemeler altında zemin numunesinde oluşan gerilmeler ise bir yük hücresi yardımıyla belirlenir. Burulma momenti, numuneye yatay piston aracılığıyla bir doğrultuda statik veya iki doğrultuda tersinir sinüzoidal şekilde, dinamik olarak iletilir.

Numunenin dış yüzeyine uygulanacak basınç (p_0), hücreye verilen hava basıncının, dış kısma doldurulan damıtık su ile homojen bir şekilde numuneye aktarılması ile gerçekleştirilir. İç silindirik kısımda oluşturulmak istenen gerilme (p_i) ise suyla dolu olan iç kısma bağlı bir büret aracılığıyla elde edilir. Bu büretten iç hücre hacim değişimi (ΔV_i) ve bûretin altına yerleştirilen bir basınçölçerle de iç hücre basıncı (P_i) ölçülebilmektedir.

Numuneye alt kısmından iki, üst kısmından bir olmak üzere üç drenaj hattı bağlanmıştır. Alt başlığa bağlı olan iki hat, özellikle kum numunelerde uygulanan CO₂ geçişinde, tüm numunelerde doygunluğun sağlanmasında uygulanan su geçişinde ve numuneye ters basıncın uygulanmasında kullanılır.

Konsolidasyon ve yükleme sırasında numunede meydana gelen hacim değişimi (ΔV_s) ise drenaj hatlarının bağlı olduğu 100 ml’ lik diğerk bir bûretle ölçülebilmektedir. Alt başlığa bağlı drenaj hatlarından birinin üzerine yerleştirilen basınçölçerle de boşluk suyu basıncı (u), deney sırasında her aşamada ölçülebilmektedir. Üst başlığa bağlı olan hat ise, su geçirme ve konsolidasyon sırasında drenaj hattı olarak kullanılmaktadır. Deney süresince, düşey yük ve burulma momenti numuneye aynı anda iletildiği için meydana gelen sürtünme etkisini en aza indirmek için hava taşıyıcı sistemler kullanılmıştır. Düşey ve açısalyer değıştirmeler, hücre dışına yerleştirilen ölçüm saatleri aracılığıyla ölçülür. Bu saatlerin hassasiyeti % 0,02 mertebesindedir. Dinamik yüklemeler istenen deney şartlarına göre gerilme-deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Ayrıca kontrol panelindeki düzenekler yardımıyla, numuneye uygulanacak dinamik yükün dalga özellikleri ve frekansı ayarlanabilmektedir.

3.2.5 Numune Hazırlama Esnasında Kullanılan İç ve Dış Kalıplar

Bu esas ünitelerin yanında farklı tür ve boyutta numune hazırlanmasında kullanılan yardımcı aletler bulunmaktadır. Bunlar alt ve üst başlıklardır. Hazırlanacak numunelerin özelliğine göre iki farklı tip başlık kullanılabilir. Numuneler örselenmiş olarak hazırlanacaksa dış çapı 10.00 cm, iç çapı 6.00 cm olan başlıklar, numuneler örselenmemiş ise dış çapı 7.00 cm iç çapı 3.00 cm olan başlıklar kullanılır. Başlıkların içerisinde, yaklaşık 1.00 cm kalınlığında poroz taşlar bulunmaktadır (Şekil 3.10).

Bu taşların üzerinde ise 6 adet 0.50 mm kalınlığında metal bıçaklar ara mesafeleri aynı olacak şekilde düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.9). Bu bıçaklar numune kesilinceye kadar, numune üst yüzeyi ile başlık arasındaki kaymayı önleyerek, burulma momentinin numuneye aktarılmasını sağlarlar. Poroz taşlara; konsolidasyon sırasında drenaj yolunu belirlemek ve drenajın hem alt hem de üst başlıklara doğru olmasını sağlamak amacıyla kullanılırlar. Ayrıca burulma momentinin numuneye daha etkin bir şekilde iletilmesi için pürüzlü olarak yapılmışlardır.

Deneyde kullanılan diğer yardımcı araç ise; numunenin hazırlanması sırasında numune iç ve dış kısım yan yüzeylerinin düzgün bir yapıya sahip olmasını sağlamak amacıyla kullanılan iç ve dış kalıplardır (Şekil 3.11).

Bu kalıplarla sabitlenmiş iç ve dış lastik membranların arasında oluşan boş bölmeye doldurulan kum ve silt numunelerinin, numune hazırlama işlemi bitinceye kadar düzgünlüğün sağlanması için dış kalıba yaklaşık 20 kPa civarında vakum uygulanmaktadır.

3.3 Numune Hazırlama Yöntemi ve Numunelerin Özellikleri

3.3.1 Numune Hazırlama Yöntemi

Deneylerde laboratuarda hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Zemin numuneleri örselenmiş olarak araziden alındıktan sonra laboratuarda dane dağılımı belirlenmiş ve en büyük dane çapının No:40 eleğin altında kaldığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan zemin numuneleri plastisite indisi % 18 olan silt ve kum numunelerdir.

Dinamik burulmalı kesme deney aletinde iç yarıçapı 3.00 cm dış yarıçapı 5.00 cm ve yüksekliği yaklaşık 20.00 cm boyutlarında hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Numune içeriden ve dışarıdan boyutlarına uygun 0.3 mm kalınlığında lastik membranlarla çevrilmektedir. Membranların üst ve alt kısımları geçirimsizlik için lastik conta ve bantlarla sıkıca sarılmaktadır.



Şekil 3.9 Numune hazırlama aşamasında kullanılan iç kalıplar



Şekil 3.10 Numune hazırlama aşamasında kullanılan alt ve üst başlıklar

Laboratuar ortamında hazırlanan numuneler, kuru yağmurlama yöntemiyle tabakalı olarak hazırlanmaktadır.

Bu yöntemde iç ve dış membranlarla çevrili 20 kPa basıncında vakum uygulanarak tutulan kalıpların arasına kum ve silt numune çapı belirli ince bir borudan, numune yüksekliği referans alınarak tabakalı olarak kalıba yerleştirilmektedir.

Bu çalışmada doldurma işlemi sırasıyla tek, iki, üç silt tabakası ve tabakasız (sadece kum) halinde ve tabakaların kuru birim hacim ağırlıklarının aynı olmasına dikkat edilerek gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının aynı olabilmesi için özel olarak polistren malzemeden yapılan içi boş silindirik kalıp üzerine yapıştırılan ölçekli kağıt sayesinde hazırlanan her tabakanın sabit bir değerde kalması sağlanmıştır.

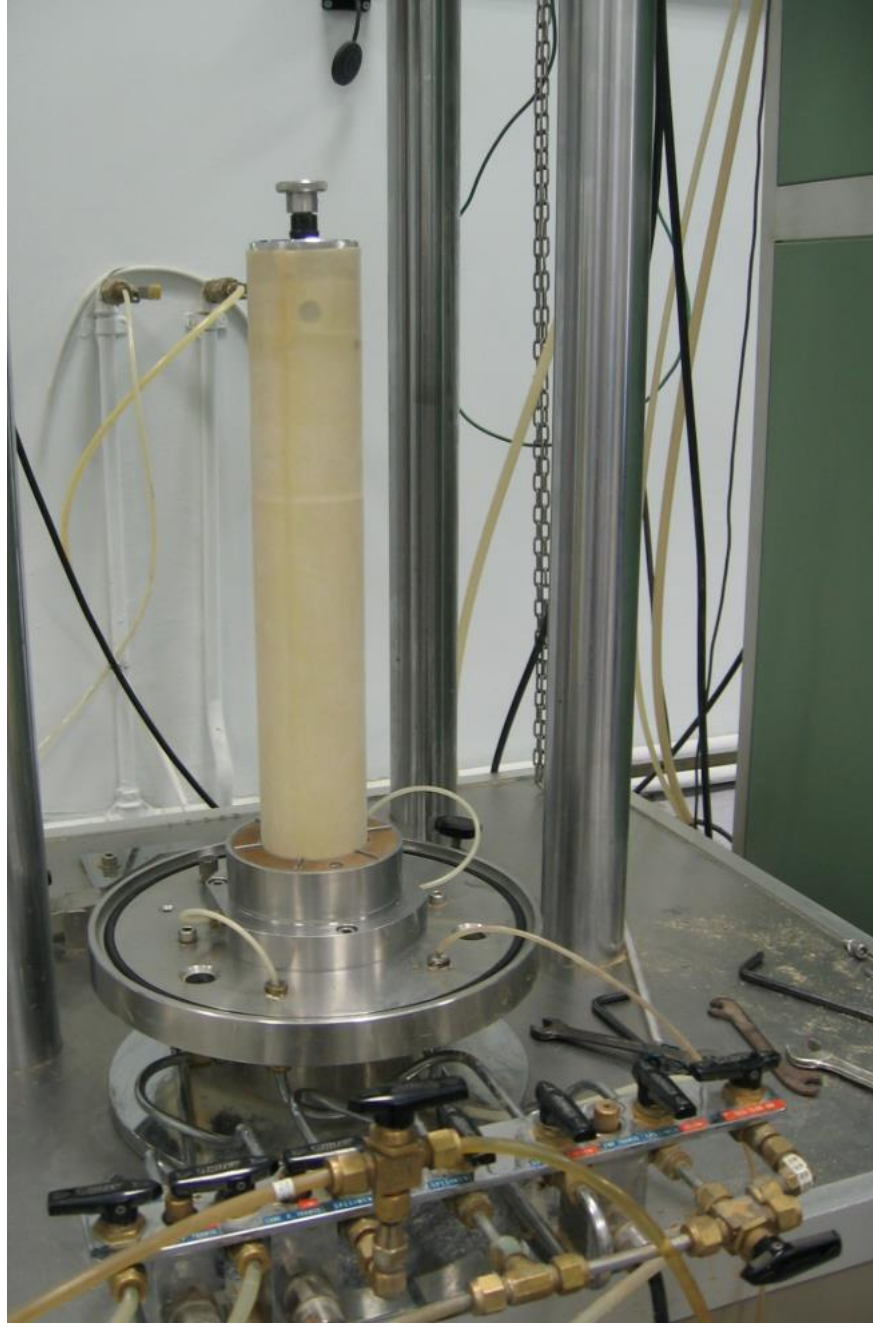


Şekil 3.11 Numune hazırlama aşamasında kullanılan dış kalıplar

Laboratuvar ortamına numune hazırlama sırasında farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Bu yöntemler; kuru yağmurlama, kuru depolama, ıslak sıkıştırma, suda çökeltme, şişleme, düşük frekanslı titreşim ve vibrasyonlu titreşimdir. Bu yöntemlerin seçiminde, numunenin tür ve özellikleri, deney aletinin sınır koşulları ve deneyin yapılış amacı önemlidir. Bu çalışmada kuru yağmurlama yöntemi kullanılmış, numunelerin yerleşim sıklıkları, dış kalıba karşılıklı dört yönden eşit şiddet ve sayıda vuruş yapılarak oluşturulan düşük frekanslı titreşim ile sağlanabilir (Şekil 3.11).

Uygulanan numune hazırlama yöntemi, Japonya Geoteknik Enstitüsü (JGS) tarafından yayınlanan standartlara (JGS 0543 2000) uygun olarak yürütülmüştür. Deney sırasında izlenen yol maddeler halinde aşağıda anlatılmıştır.

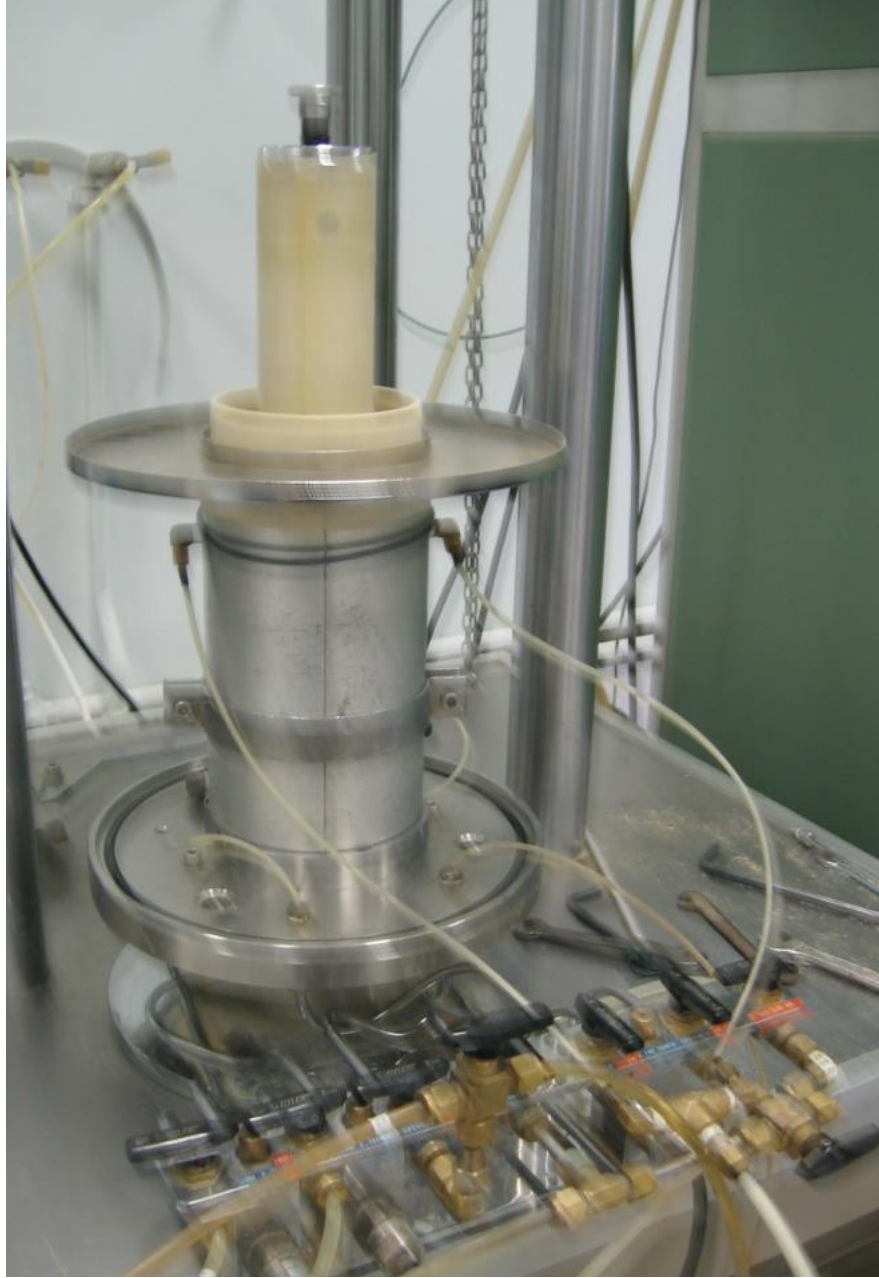
1. Numune hazırlama işlemine başlamadan önce hava-su kontrol ünitesini arkasında bulunan su tankına gerekli miktarda su alınır. Aynı şekilde, hazırlanan numunenin içinden su geçirme işleminin yapılabilmesi için hava-su kontrol ünitesinin üzerinde bulunan havası alınmış su tankına da gerekli miktarda su alımı yapılır. Su alma işlemi ilgili vanaların vakum konumuna getirilmesi suretiyle, daha önceden damıtılmış olan suyun hava su kontrol ünitesine alınması işlemi tamamlanmış olur.
2. Alt başlığa iç membran, uygun çaptaki lastik contalar yardımıyla takılır. Alt başlık uygun vidalar yardımıyla hava sürükleyici sisteme monte edilir. Hava sürükleyici sistemde bulunan alt drenaj boruları alt başlığa takılır ve anahtarla sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. İç membrana dört parçadan oluşan iç kalıplar yerleştirilir ve silindirik metal çubukla sisteme sabitlenir. Numunelerin tabakalı olarak hazırlanması durumu göz önünde bulundurularak, en alt ve en üst tabakada yer alan numunenin kum olması sağlanmıştır. Dış membran, uygun çaptaki lastik contalarla alt başlığa takılır ve dış kalıplar uygun vida ile kenetlenmek suretiyle dış membranın etrafına yerleştirilir. Dış kalıplar iki farklı metal vidayla sıkıştırılan kelepçeyle birbirine bağlanır. Kelepçe, anahtarla iyice sıkıştırıldıktan sonra dış membran üst tarafından dış kalıba bağlanır. Daha sonra vakum girişinin olduğu anahtarlı boruya harici vakum borusu takılmak suretiyle dış membrana 20 kPa basınçta vakum uygulanır. Vakumun dış kalıplara uygulanmasında temel etken numune hazırlama sırasında membranların deforme olmasını engellemek ve numunenin üniform bir şekilde hazırlanmasını sağlamaktır.



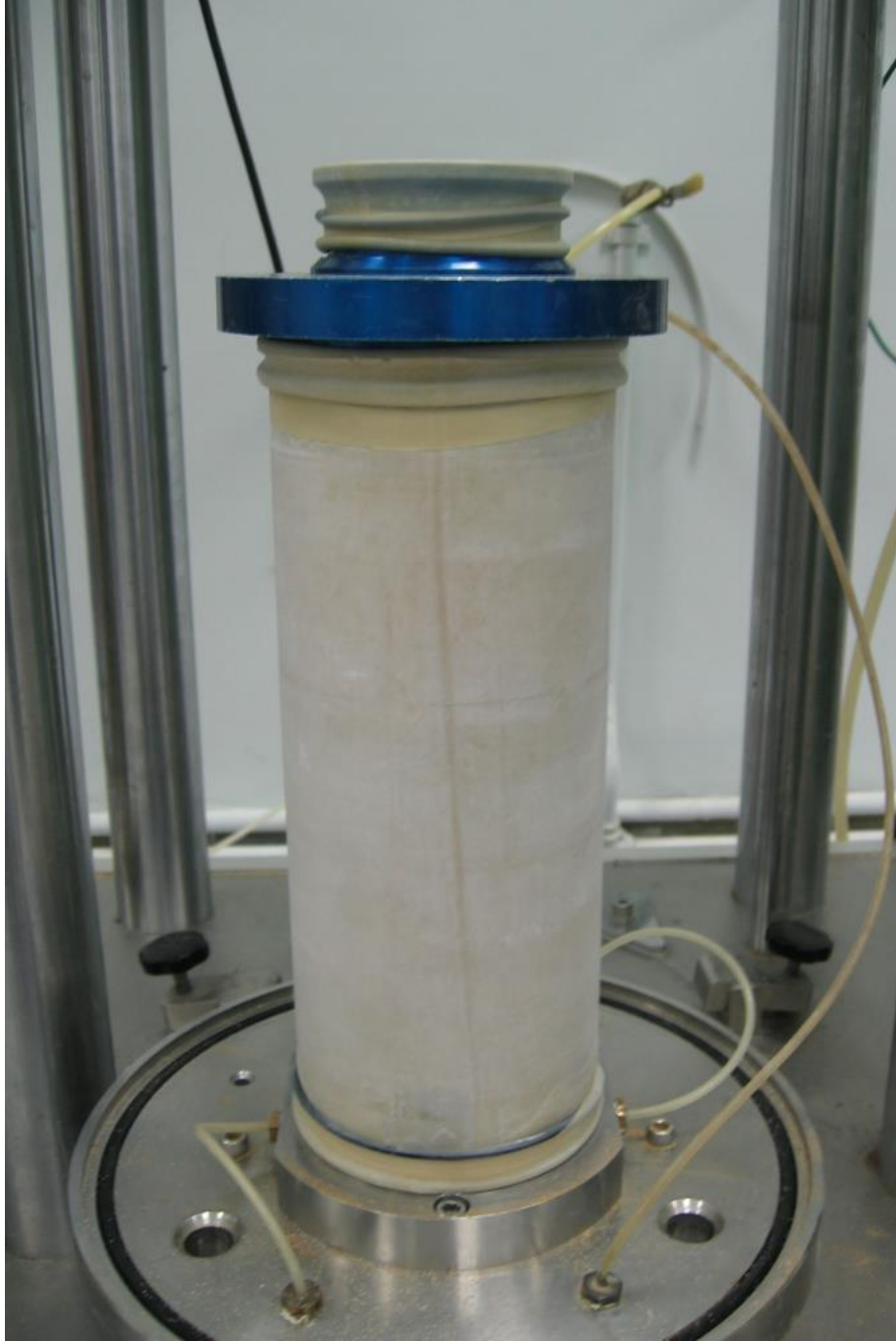
Şekil 3.12 Membran ve iç kalıpların son hali.

3. Oluşturulan içi boş silindirik numuneye önceden kurutulmuş olan kum ve silt numuneler tabakalar halinde daha önceden belirlenmiş kuru birim hacim ağırlık değeri sabit kalmak suretiyle belirli bir yükseklikten ve çapı sabit ince bir borudan dökülerek doldurulur. Homojen bir dağılımın sağlanması amacıyla doldurma işlemi hem saat yönünde hem de saatin tersi yönünde yapılır. Kum ve silt numunelerde ağırlık kaybının oluşmaması için dış kalıba

silindirik metal tabak yerleştirilir. Numune hazırlama işlemi bu çalışmada tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız(sadece kum) olarak yapılmış ve her tabakanın kuru birim hacim ağırlığı önceden belirtilen değerde sabit tutulmuştur. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra numune üst yüzeyi pürüzsüz yatay bir metal veya benzeri cisimle düzeltilir. Numune hazırlama yönteminde en üst tabakanın kum olması sağlanır. Üst başlık, bıçakları numuneye girecek şekilde dikkatli bir şekilde yerleştirilerek üst drenaj borusu üst başlığa takılır.



Şekil 3.13 Kuru yağmurlama öncesi membran, iç ve dış kalıplar



Şekil 3.14 Tabakalı numunenin son hali

4. Hava su kontrol ünitesinde bulunan vakum borusuna takılı olan harici vakum borusu, alt drenaj hattına monte edilen ve numunenin dik durmasını sağlayacak vakum borusu ile yer değiştirilir. Yer değiştirme işlemi yapılmadan önce numunenin alt kısmına vakum girişini sağlayacak olan vanaların açık olduğu gözden geçirilir. Daha sonra dış kalıplara verilen 20 kPa değerindeki basınç dikkatli bir şekilde harici vakum borusunun çıkartılarak, yerine diğer vakum borusunun takılması suretiyle hazırlanan

tabakalı numuneye verilir. Harici tripodun takılması işleminden hemen önce hava sürükleyici sistemde bulunan geçirimsizliği sağlayan siyah halkanın altı iyice temizlenerek herhangi bir numune tozu kalmamasına dikkat edilmelidir. Aksi halde hücreye su alımı sırasında üç eksenli hücreden su sızıntısı olabilir.



Şekil 3.15 Üç eksenli tripodun numunenin üst başlığına takılması durumu

5. Dış kalıpların çıkartılması işleminden sonra numune boyu ve dış çapı yükseklik boyunca 3 farklı yerden ölçülür ve kaydedilir. Harici tripot dikkatli bir şekilde hava sürükleyici sisteme tripodun ayaklarının deliklere tam oturması sağlanacak biçimde ve drenaj borularının hasar görmesini

engelleyecek biçimde yerleştirilir. Harici tripotta bulunan düşey yükleme başlığı üst başlıktaki vida yerlerine gelecek şekilde numunede ekstra burulma momenti ve ilave düşey yük oluşturmayacak şekilde vidayla sıkıştırılır. Yerleştirilen tripodun üç ayağı hava sürükleyici sisteme pul ve vidalarla sabitlenir.

6. Sistemi tamamlayan üç eksenli akrilik hücre yerine dikkatli bir şekilde yerleştirilmek suretiyle üst başlık kalın vidalarla akrilik hücreye monte edilir. Hava sürükleyici sistem düşey yük ve burulma momentinin uygulanacağı üniteye düzgün bir şekilde yerleştirilerek hava sürükleyici sistemin alt kısmı tablaya metal vidalarla sıkıştırılır.
7. Düşey ve açısal deformasyon ölçüm saatleri yerlerine yerleştirilir ve yükleme şaftına tam olarak degecek şekilde sıfırlanır. Elektrikli amplifikatördeki 7 kanal sırasıyla sıfırlanır. Kalibrasyon sırasında okunan volt değerleri istenen katsayıyla çarpılmak suretiyle ayarlanır. Bu çalışmada katsayılar 5.00 volt değerinde sabitlenmiştir.
8. Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, düşey basınç bir miktar artırılarak düşey yük yükleme barı, yükleme başlığına yaklaştırılır ve değdiği noktadan vidalarla sabitlenir. Bu işlem sırasında da numuneye ilave düşey yük ve burulma momenti uygulanmamasına dikkat edilir. Düşey yük sıfırlanmak suretiyle numunenin iç ve dış kısmına su alma işlemi yapılır. Numunenin dış kısmına alınacak su, hava-su kontrol ünitesinde yer alan üç eksenli basınç ayarlama vanasında basıncın yaklaşık 30 kPa değerine getirilmesi ile yapılır. Numunenin iç kısmına alınan su ise bütretlerin bulunduğu yerdeki vananın açılması suretiyle sağlanır.
9. Numunenin dış kısmına ve iç kısmına su alma işlemi kalibrasyon işlemi yapılmış olan veri edinim ünitesinden de takip edilebilir. Numunenin iç kısmına su alma işleminin tamamlandığı üst başlıkta bulunan vanaya takılan borudan su çıkışının görölmesi ile anlaşılırken, numunenin dış kısmına su alma işlemi su seviyesinin üst başlığa kadar gelmesiyle sona erdirilir.
10. Numunenin iç ve dış kısmına su alma işlemi tamamlandıktan sonra, düşey yük sıfırlanır. Üst başlıkta bulunan üç eksenli hücreye verilecek dış basıncı sağlayan boru dikkatli bir şekilde takılır. Bu aşamadan sonra numunenin iç ve

dış kısmına verilecek olan çevre basıncı basıncın 20 kPa değerine getirilmesine kadar hava su kontrol ünitesinde bulunan iç ve dış çevre basınçlarının ayarlanmış olduğu vanalar kullanılarak yapılır. Numunenin iç ve dış kısmına 20 kPa değerindeki çevre basıncı verilirken, ortamda bulunan 20 kPa değerindeki vakum kademeli olarak iç ve dış çevre basınçlarıyla bağlantılı olarak sıfırlanır. Sıfırlama işlemi dikkatli bir biçimde yapılmalı numunede hasar olmamasına dikkat edilmelidir. Daha sonra numuneye CO₂ geçişi için gerekli bağlantılar yapılmak suretiyle numunenin içerisindeki hava boşluklarının yerini CO₂ (karbondioksit)'in alması sağlanır. Böylelikle numunenin su ile doyurulması esnasında hava boşluklarının yerini alan karbondioksit gazı içinde su çözünerek tabakalı numunenin doygunluğu artırılır. Vakumun sıfırlamasından sonra alt drenaj borusuna takılı olan vakum borusu çıkartılarak numuneye su alma işleminin gerçekleşmesini sağlayacak drenaj borusu takılır.

11. Basınçların ayarlandığı panel vasıtasıyla ilgili vanalar birbiriyle ilişkilendirilir ve numuneye kendi hidrolik yüküyle alt başlıktan geçecek şekilde damıtık su geçişi sağlanır. Numunenin içinden su geçişinin olup olmadığı dışarıdan çıplak gözle ve tanktaki su seviyesindeki azalmayla kontrol edilir. Su geçirme işlemi numune doygunluğunun sağlanması içindir ve üst başlıktan su çıkana ve numune, yüksekliği boyunca tamamen ıslanana kadar devam edilir. Bu süre hava boşluklarının konumu numunenin geçirimsizliğine göre 1 saatten 3 güne kadar değişebilmektedir. Bu işlemle numunenin tüm hava boşluklarının suyla dolmasına çalışılır.
12. Su geçirme işlemin ardından numuneye ilgili vanalar birbiriyle ilişkilendirilmek suretiyle kademeli olarak 200 kPa değerine kadar numuneye ters basınç uygulanır. Ters basıncın 200 kPa değerine ulaştırılmasıyla birlikte iç ve dış çevre basınçları da otomatik olarak 220 kPa değerine gelir. Bununla birlikte numune türüne göre değişebilen değerlerde ters basınç uygulanabilir. Deney süresince sistem basınçları sabit tutulmaya çalışılmıştır.
13. Doygunluk kontrolü içinse; drenaj vanaları kapatılarak ters basınç değeri 50 kPa artırılmak suretiyle iç ve dış basınçların 270 kPa değerine getirilmesi sağlanır. Elektronik göstergeden boşluk suyu basıncı değerindeki artış miktarı

gözlenir Skempton B ($\Delta U/\Delta \sigma$) parametresi olarak adlandırılan artış miktarlarının 0.96 ve üzeri olduğu anda doygunluğun sağlandığı gözlenebilir.

14. Doygunluğun sağlanması işleminden sonra izotropik veya anizotropik olarak uygulanan konsolidasyon aşamasına geçilir. İzotropik konsolidasyon için iç ve dış basınçların istenen efektif konsolidasyon basıncı değerine (100 kPa) getirilmesine çalışılır. Uygulanan efektif düşey gerilme seviyesine bağlı olarak düşey yükünde aynı seviyede artması için Tablo 3.1’de belirtilen oranlara dikkat edilir. Anizotropik konsolidasyon içinse düşey yük ve çevre basınçları istenen anizotropik ve efektif gerilme değeri dikkate alınarak artırılır. Bu çalışmada tüm deneyler izotropik koşullar altında yapılmıştır.
15. Konsolidasyon işlemi hacim değişiminin ölçüldüğü büretlerden ve düşey deformasyon saatlerinden takip edilerek istenen bir süre boyunca devam ettirilir. Bu süre çoğunlukla 1 gün olarak uygulanmıştır.

Tablo 3.1 Burulmalı Kesme Deneylerinde İzotropik Gerilme Durumunda Çevre Basıncı ve Düşey Dengeleme Basıncı Değişim Oranları

Çevre Basıncı (kPa)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Düşey Dengeleme Basıncı (kPa)	1.15	2.3	3.45	4.6	5.75	6.9	8.05	9.2	10.35	11.5

Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından numunelerin dinamik deneylere farklı gerilme oranlarında burulma momenti uygulanmıştır. Bunun için veri edinim ünitesindeki amplifikatörün ve 7 ayrı kanalın bulunduğu panelden dinamik yük vanası açılır ve göstergeler kontrol edilir. Daha sonra istenen frekans ve gerilme genliği seçilir.

Dinamik burulma momentinin uygulanacağı yatay yük hücresi düşey yük hücresine yaklaştırılır ve yuvarlak vidayla bağlanır. Kişisel bilgisayarda gerekli komutlar girildikten sonra “Labtec” programı çalıştırılır ve deneye başlanır. Deney serilerinden ileride ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

3.3.2 Deney Sisteminin Kalibrasyonu

Deneysel çalışmalar yapıldığında ölçülen verilerin doğruluk derecesinin belirlenmesi için sistemlerin düzgün çalışmasının yanında alınan verilerin kontrol edilerek çalışmalarda kullanılması, çalışmanın sağlıklı şekilde yürümesi ve geçerlilik kazanması için gerekli bir işlemdir. Bu kontroller çeşitli veri alma tekniklerinin birbiri ile karşılaştırılmasıyla ve ölçüm cihazlarının çeşitli yollardan kontrolü ile sağlanabilir.

Dinamik üç eksenli deney aletinde kalibrasyonlar dijital panodaki deformasyon verilerinin karşılaştırılması ve panodaki değerlerin kontrolleri ile sağlanmaktadır. Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri Şekil 3.16 da görülmektedir.



Şekil 3.16 Dijital ölçüm panosu

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

voltmetredeki “0.00” okuması sağlanır ve CALL. ON düğmesine basılır GAIN kontrol düğmesi kullanılarak dijital voltmetre değeri “5.00” değerine ayarlanır. Ölçüm değişim anahtarı olan ZERO-C-BAL anahtarı ZERO pozisyonundayken köprü denge direnci ZERO CONTROLLER ayarı kullanılarak voltmetre göstergesi “0.00” değerine getirilir. ZERO-C-BAL anahtarı C-BAL pozisyonundayken sabit tutulur ve voltmetre göstergesi C-BAL kontrolü kullanılarak “0.00” değerine ayarlanmalıdır. Sistemde ZERO-C-BAL anahtarı her iki durumda da “0.00” değerini gösterene kadar yukarıda anlatılan adımlar tekrar edilmelidir.

Dijital değerlerin kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçüm panosundaki dijital deformasyon okumalarının kalibrasyonu sistemin üzerine yerleştirilen mekanik deformasyon saatlerinden aynı anda alınan okumaların arasındaki bağıntının belirlenmesiyle yapılmaktadır.

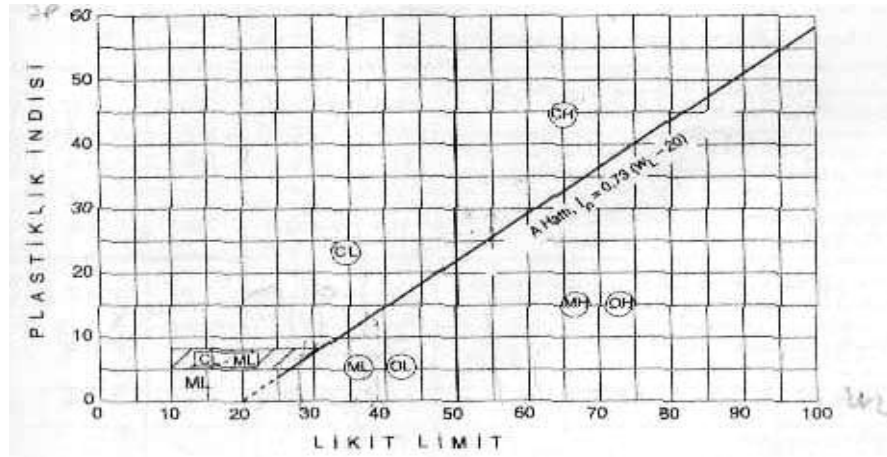
Mekanik saat okumaları sık okuma aralıkları belirlenir ve bu deformasyon miktarlarında düşey deformasyon ve açısal deformasyon okumaları dijital sayaçlardan kayıt edilir

3.3.3 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Endeks Özellikleri

Bu çalışmada laboratuvar ortamında hazırlanan örselenmiş zemin numuneleriyle tabakalı deneyler yapılmıştır. Örselenmiş numuneler İstanbul’ un Kemerburgaz ilçesinde bulunan çöp depolama tesislerine yakın bir yerde bulunan arazide açılan 3.0-5.0 m derinlikte açılan muayene kuyularından alınmıştır. Kemerburgaz ilçesinden getirilen numunelere ait elek analizi ve hidrometre analizi sonuçları tablo ve grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Deneylerde Kullanılan Örselenmiş Numunenin Endeks Deney Sonuçları

Grup	Kuyu No	Wn (%)	WL (%)	Wp(%)	Ip (%)	İnce Dane (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	wn (Kn/m3)	wk (Kn/m3)	ws (Kn/m3)
ML	1	14	47	29	18	74	26	70	4	21,1	16	27,4



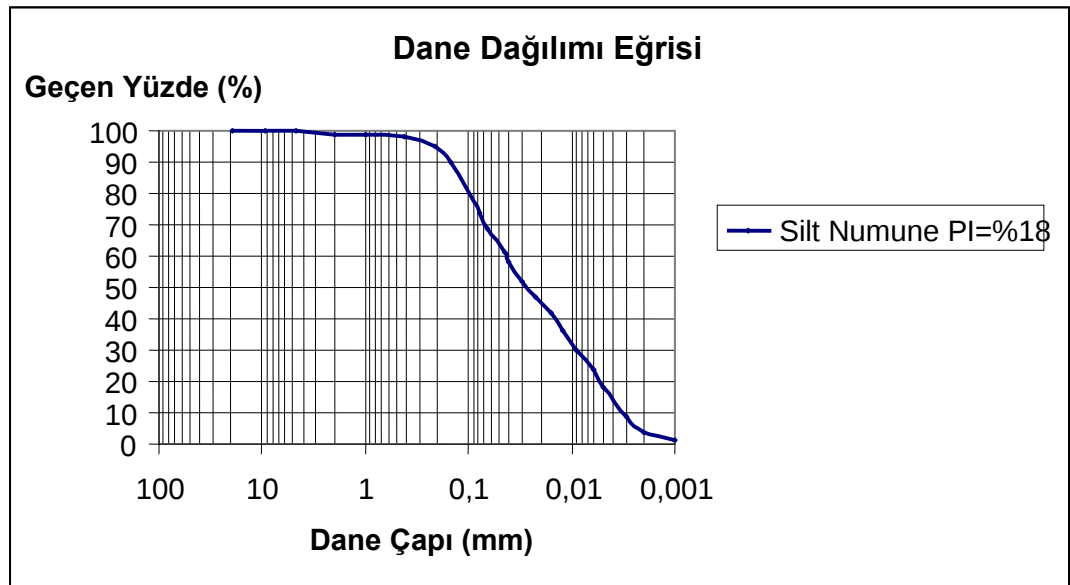
Şekil 3.17 Plastisite kartı (Likit limit-Plastisite indisi)

Tablo 3.3.a Deneyde kullanılan plastisite indisi % 18 olan silt numuneye ait elek analizi sonuçları:

ELEK ANALİZİ	ML				
Kuru Numune (gr):	640,2				
Yıkama sonrası (gr):	171				
İnce Dane Ağ. (%):	469,2				
İnde Dane Oranı (%):	74				
	Elek No	Elek Çapı	Elek Üstü	Geçen	Geçen
	-	(mm)	(gr)	(gr)	(%)
	3/4"	19,500	0	640,2	100
	3/8"	9,530	0	640,2	100
	4#	4,760	0	640,2	100
	10#	2,000	0,2	640	99
	18#	1,000	0,3	639,7	99
	40#	0,420	2	637,7	99
	70#	0,210	14,2	623,5	97
	100#	0,149	23,6	599,9	94
	200#	0,075	129	470,2	74

Tablo 3.3.b Deneyde kullanılan plastisite indisi % 18 olan numuneye ait hidrometre analizi sonuçları

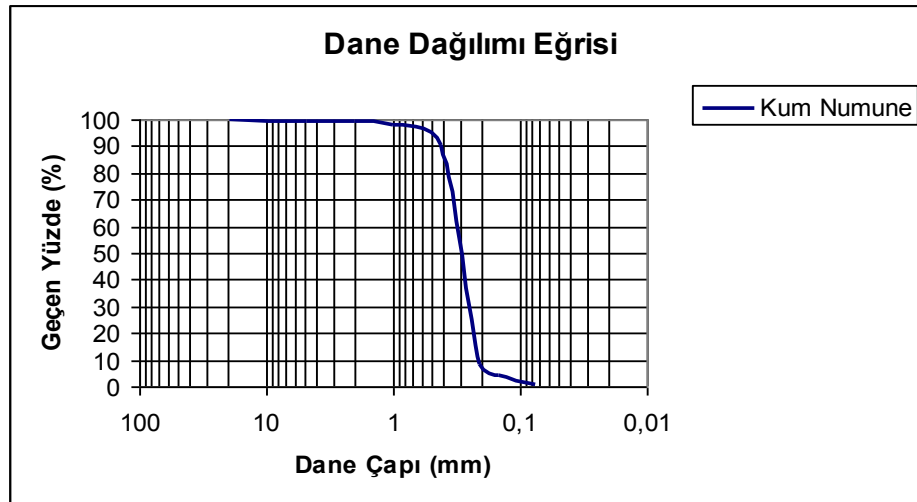
HİDROMETRE		ML				
			200# altı (%)	74		
				2,5		
t					D	Ana N.
(dak)	Rh1	Rh	Rh'	He	(mm)	(%)
0,25	48,50	49,50	47,00	8,26	0,077	70
0,5	42,50	43,50	41,00	9,23	0,058	61
1	40,50	41,50	39,00	9,56	0,041	58
2	36,50	37,50	35,00	10,21	0,030	52
4	33,00	34,00	31,50	10,78	0,022	47
8	30,00	31,00	28,50	11,26	0,016	42
15	25,50	26,50	24,00	11,99	0,012	36
30	21,50	22,50	20,00	12,64	0,009	30
60	17,50	18,50	16,00	13,29	0,006	24
120	13,50	14,50	12,00	13,94	0,005	18
240	7,50	8,50	6,00	14,92	0,003	9
480	4,50	5,50	3,00	15,41	0,002	4
1440	2,50	3,50	1,00	15,73	0,001	1



Şekil 3.18 Silt numuneye ait dane dağılımı eğrisi

Tablo 3.4 Deneyde kullanılan kum numuneye ait elek analizi sonuçları

ELEK ANALİZİ		KUM			
Kuru Numune (gr):	700				
Yıkama sonrası (gr):	692,7				
	Elek No	Elek Çapı	Elek Üstü	Geçen	Geçen
	-	(mm)	(gr)	(gr)	(%)
	3/4"	19,500	0	692,7	100
	3/8"	9,530	7,3	692,7	99
	4#	4,760	14,7	678	97
	10#	2,000	14,9	663,1	99
	18#	1,000	15,8	647,3	99
	40#	0,420	100,7	546,6	99
	70#	0,210	496,1	50,5	7
	100#	0,149	22,2	28,3	4
	200#	0,075	29	7,3	1



Şekil 3.19 Kum numuneye ait dane dağılımı eğrisi

Tablo 3.5 Kum numunenin fiziksel özellikleri

G_s	C_U	C_C	D_{50}	γ_{mak}	γ_{min}	$e_{maksimum}$	$e_{minimum}$
2.64	1.63	0.94	0.27	1.66	1.43	0.85	0.55

3.4 Tabakalı Zeminde Oluşan Gerilme ve Şekil Değiştirmenin Hesabı

Burulmalı kesme deney aletinde kullanılan numunelerde, deney sisteminin ve içi boş, silindirik numune özelliğinden dolayı uygulanan yüklemeler altında tabakalı zeminde oluşan toplam ve efektif gerilmeler belli kabuller altında hesaplanmaktadır. Bunun için öncelikle, tüm numuneyi tam bir dairesel silindir ve deformasyona uğrayan tek bir eleman olarak düşünülmesi gerekir. Bununla birlikte gerilme ve şekil değiştirmeler farklı yükleme koşulları altında numune yüksekliği boyunca değişebileceğinden ortalama olarak hesaplanması gerekir.

Polar koordinatlarla hesaplanan σ_r , σ_θ , σ_z ve $\sigma_{z\theta}$ 'nın belirlenmesi için yapılması gerekli kabuller şu şekilde sıralanabilir:

1. Düşey eksenel gerilme σ_z üniform
2. Çevre gerilmesi σ_θ ve radyal gerilme σ_r , lineer elastik,
3. Ortalama kayma gerilmesi $\sigma_{z\theta}$ ise elastik ve ideal plastik bir dağılım gösterir.

Ortalama düşey eksenel gerilme,

$$\sigma_z = \frac{P}{A_s} + z\gamma' + \Delta\sigma_z \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanır. P, numuneye gelen toplam eksenel yüke, A_s , numunenin ortalama kesit alanına, z numunenin üst yüzeyinden itibaren yüksekliği boyunca olan düşey mesafeye, γ' , numunenin efektif birim hacim ağırlığına, $\Delta\sigma_z$ ise membran düzeltme gerilmesine karşılık gelmektedir. Bu çalışmada membran penetrasyon etkisi göz ardı edilmiştir.

Düşey eksenel yükün belirlenmesinde kullanılan yük hücresi, üç eksenli hücre içerisinde olduğu için, hesaplamada yükleme şaftının alanı dikkate alınmaz. Ortalama efektif radyal ve çevre gerilmeleri ise sırasıyla;

$$\sigma_r = \frac{p_0 r_0 + p_i r_i}{r_0 + r_i} + \Delta\sigma_r \quad (3.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_0 r_0 - p_i r_i}{r_0 - r_i} + \Delta\sigma_\theta \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanır. Bu bağıntılar Hight ve diğ., (1983) tarafından üretilmiştir. $\Delta\sigma_r$ ve $\Delta\sigma_\theta$ elastik ince kabuklar teorisine dayanan membran düzeltme gerilmeleridir. Lineer elastik ve ideal plastik dağılıma uyan ve numune yüksekliği boyunca sabit olduğu kabul edilen ortalama kayma gerilmesi;

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_0^2 + r_i^2)} \right\} + \Delta\sigma_{z\theta} \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanır. Yukarıdaki ifadelerde r_i ve r_0 numunenin son iç ve dış yarıçaplarının T ise burulma momentini göstermektedir. (3.5) bağıntısındaki ilk kısım ideal plastik dağılımı, ikinci kısım ise lineer elastik ve izotropik bir malzemeyi temsil etmektedir. Küçük kayma gerilmesi ve deformasyon seviyelerinde lineer elastik dağılım en kabul edilebilir. Sonucu verdiğinden ifadenin ilk kısımda kullanılması uygun olmaktadır. Bunun yanında göçme seviyesi civarında ideal plastik dağılım söz konusu olduğundan, ifadenin ikinci kısmının kullanılması uygun hale gelmektedir.

Ortalama şekil değiştirme bileşenleri, numunenin deney başındaki düzgün silindirik yapısının korunduğu kabulüyle, düşey eksenel yer değiştirme, ΔH , numunenin açısal sapması $\Delta\theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_s ’ den hesaplanan iç ve dış yarıçap değişimleri Δr_0 , Δr_i ve numunenin ilk yarıçapları r_0 ve r_i cinsinden hesaplanır. Ortalama şekil değiştirmeler aşağıdaki kabullere uygun biçimde hesaplanmaktadır.

1. ΔH üniform eksenel yer değiştirmediir.
2. Numunenin yüksekliği boyunca lineer olarak değişen radyal yer değiştirme, u_r
3. $\Delta\theta$, üniform açısal sapmaya karşılık gelir.

Bu kabuller altında ortalama şekil değiştirme bileşenleri; eksenel şekil değiştirme, ε_z , radyal şekil değiştirme artımı ε_r , çevresel şekil değiştirme artımı, ε_θ ve kayma şekil değiştirme artımı, $\varepsilon_{z\theta}$ sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\varepsilon_z = -\Delta H/H_0 \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\left[\frac{r_0}{r_i} \int_{r_i}^{r_0} \frac{\partial U_r}{\partial r} r dr \right]}{\left[\frac{r_0}{r_i} \int_{r_i}^{r_0} r dr \right]} = -\frac{\Delta r_0 - \Delta r_i}{r_0 - r_i} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\left[\frac{r_0}{r_i} \int_{r_i}^{r_0} \frac{U_r}{r} r dr \right]}{\left[\frac{r_0}{r_i} \int_{r_i}^{r_0} r dr \right]} = -\frac{\Delta r_0 + \Delta r_i}{r_0 + r_i} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{z\theta} = \frac{1}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} \int_{r_i}^{r_0} \int_0^{2\pi} \varepsilon_{z\theta}(r) r dr \quad (3.7a)$$

$$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\Delta\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3h(r_0^2 - r_i^2)} \quad (3.7b)$$

Buradan (3.7b) ifadesi kullanılarak ortalama birim kayma şekil değıştirme artımı, $\gamma_{z\theta}$,

$$\gamma_{z\theta} = 2\varepsilon_{z\theta} = \frac{2\Delta\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3h(r_0^2 - r_i^2)} \quad (3.8)$$

Sonuç olarak burulmalı kesme deneyleri boyunca içi boş silindirik numunede oluşan dokuz bileşen belirlenebilmektedir. Bunlardan dört tanesi gerilme bileşeni, dört tanesi şekil değıştirme ve sonuncusu da boşluk suyu basıncı, u dur.

3.5 Deney Kaydının Yorumlanması

Deney verileri bilgisayara metin dosyası olarak kayıt edilmektedirler. Metin dosyası Microsoft Office Excel programı yardımıyla açılır ve sonuç olarak veriler Tablo 3.6 da olduğu gibi görüntülenir. Tabloda “CH0” olarak adlandırılan veriler uygulanan kuvvetin voltaj olarak karşılıklarıdır. Voltaj değęerleri bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi belli katsayılarla çarpılarak “kg” birimine çevrilir. “CH1” verileri ise oluşan düşey şekil değıştirmeleri 10^{-3} mertebesinde büyük değęerdeki ölçümleri almak için kullanılır ve voltaj cinsinden kayıt eder. Bu değęerlerde yapılan kalibrasyonlar sonucunda oluşan katsayıyla çarpılarak “mm” cinsine çevrilir. Kalibrasyon işlemi sistemde kalibrasyon için kullanılan sert plastik malzemeden imal edilmiş olan silindirin yüklenmesi sırasında alınan mekanik saatle elektronik verinin karşılaştırılması ve aralarındaki bağıntının bulunmasıyla yapılmaktadır.

Aynı işlem “CH4” kanalından alınan verilerin kalibrasyon katsayılarının belirlenmesinde de kullanılmaktadır. “CH4” kanalıda bilindiğı gibi düşey deformasyonların 10^{-3} - 10^{-5} mertebelerini okumak için kullanılmaktadır.

Tablo 3.6 Deney kaydının ilk hali

LABTECH NOTEBOOK			
Data file			
Time is 16:23:23.43.			
Date is 05-16-2005.			
Torque	pore pre	Angular	Vertical
Volt	volt	Volt	Volt
2,056	5,215	0,205	0,293
1,333	3,755	0,396	0,054
0,942	2,729	0,474	0,059
0,63	1,997	0,474	0,059
0,469	1,499	0,444	0,059
0,356	1,133	0,4	0,049
0,273	0,869	0,347	0,044
0,22	0,688	0,298	0,039
0,181	0,557	0,259	0,034

Tabloda da görüldüğü üzere bilgisayara bağlı veri edinim kanallarından 4 tanesi açık tutularak kayıt alınmıştır. Bu kanallardan ilki numunede oluşacak burulma momentini ölçen “Torque Load” adı verilen CH1 kanalıdır. İkinci Kanal ise numunede oluşacak boşluk suyu basıncı değişimini gösteren “Pore Pressure” adı verilen CH2 kanalıdır. Üçüncü kanal olan CH3 kanalı ise numunede meydana gelecek açısız deformasyonları ölçmeye yarar ve “Angular Displacement” olarak adlandırılır. Son kanal ise numunede oluşan düşey yükü ölçmeye yarayan “Vertical Load” olarak adlandırılan CH4 kanalıdır.

3.6 Silt Tabakalarının Düzenlenmesi

Tek silt tabakası halinde, plastisite indisi % 18 olan silt numuneyle hazırlanan silt kum zeminde silt tabakası kalınlığı 6cm ve 12 cm olacak şekilde en kalın tabaka ve en ince tabaka üzerinde oluşacak dinamik burulmanın tabaka kalınlığından ne kadar etkileneceği analiz edilmiştir. Bu tabakalar arasına kum tabakaları yerleştirilmiştir. Kum tabakalardan alt ve üst başlığa yakın olan tabakaların boyları sabit alınmak suretiyle alt ve üst drenaj yolunun sabit kalması sağlanmıştır.

Kum numunenin tabaka kalınlıkları hazırlanan plastisite indisi % 18 olan silt numunenin tabaka kalınlığına ve toplam numune yüksekliği olan 20 cm değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır.

İki silt tabakası halinde plastisite indisi % 18 olan silt numuneyle hazırlanan silt-kum zeminde toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm; her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm ve 12 cm olacak şekilde hazırlanmıştır. Yine alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numunenin ve toplam numune yüksekliği olan (20 cm.) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır.

Son olarak; üç silt tabakası halinde hazırlanan silt kum zeminde toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm, her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olacak şekilde hazırlanmıştır. Alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numunenin ve toplam numune yüksekliği olan (20 cm.) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır.

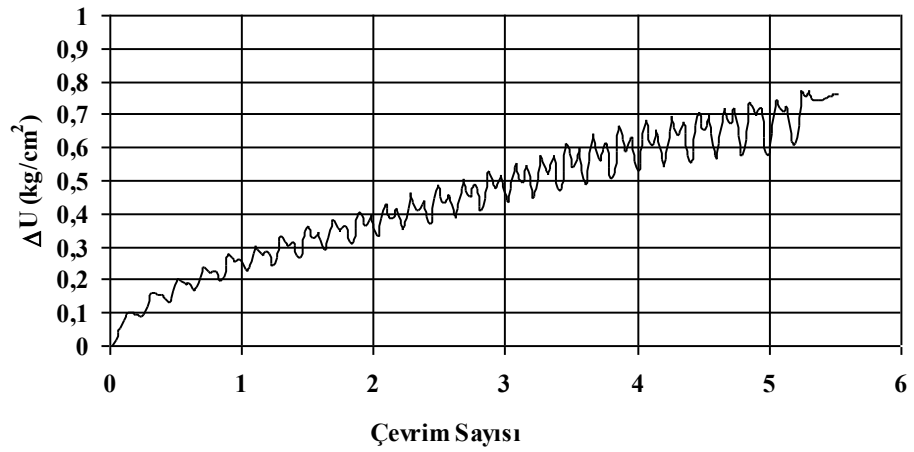
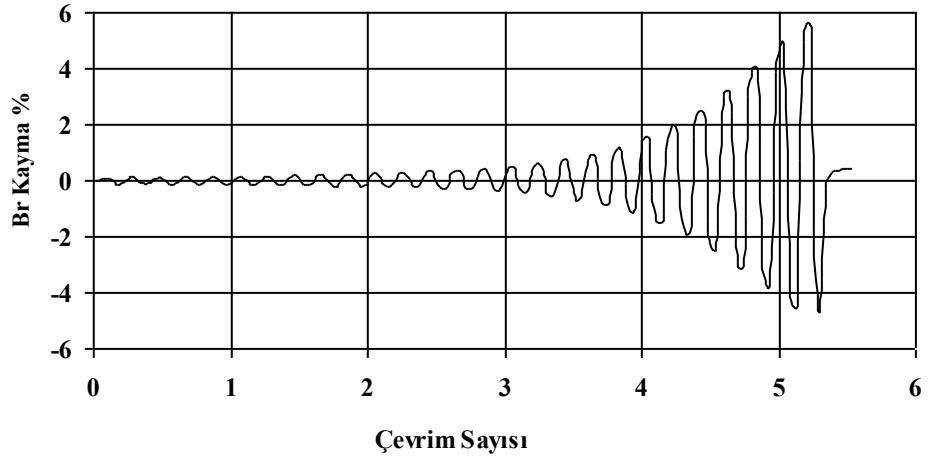
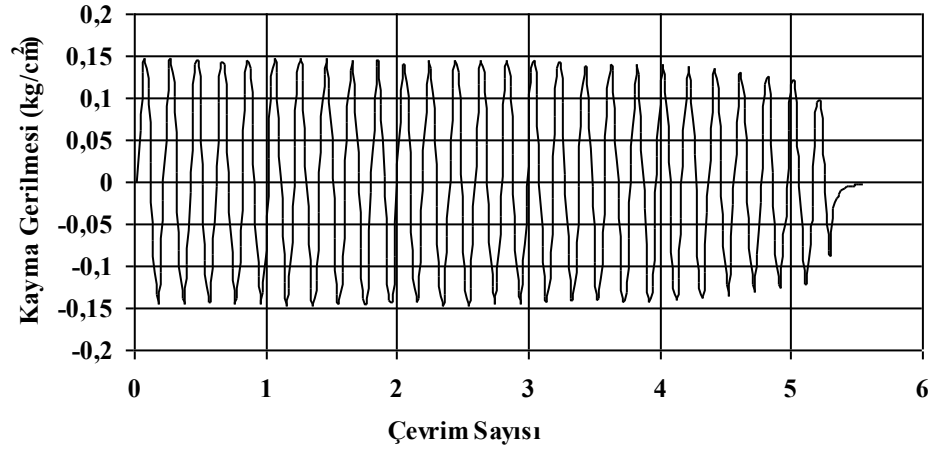
Hazırlanan iki silt tabakalı ve üç silt tabakalı silt-kum zeminler sırasıyla 0,15, 0,20, 0,25 0,30 ve 0,35 tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında burulmalı gerilmeye tabi tutulmak suretiyle tabakalarda meydana gelen deformasyon incelenmiştir. Birim kayma-çevrim sayısı, boşluk suyu basıncı- çevrim sayısı ve dinamik kayma gerilmesi oranının çevrim sayısı ile değişimi incelenmiştir.

Son olarak laboratuvar ortamında 16 kNm^3 kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanan kum numunelerden tabaksız (sadece kum) zemin olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu kum numunelere sırasıyla; 0,20, 0,25, 0,30 ve 0,35 dinamik kayma gerilmesi oranları uygulanmıştır. Bütün deneyler 100 kPa efektif konsolidasyon basıncı altında ve 0.1 Hz frekansta yapılmıştır.

3.7 Sonuç

Bu bölümde çalışmada kullanılan dinamik burulmalı kesme deney aleti, numune hazırlama yöntemi, silt tabakaların düzenlenmesi ve numune özellikleri ile ilgili olarak bilgi verilmiştir. Burulmalı kesme deney aletinde laboratuvarda hazırlanan ve örselenmiş içi boş ve tabakalı olarak yapılan silindirik numunelerde istenilen genlik ve hızda, dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir.

Bu çalışmada laboratuvarda hazırlanan silt tabakalı silt-kum zemin numuneleri kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Tabakalı olarak hazırlanan silt numuneler sırasıyla tek, iki ve üç tabakalı olarak hazırlanmıştır. Deneyler tek tip zemin numunesi kullanılarak yapılmış, deneylere ait tipik sonuçları ise grafik halinde aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.20 Burulmalı kesme deney aletine ait tipik deney sonuçları

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Bu çalışmada; dinamik burulmalı kesme deney aletinde, plastisite indisi % 18 olan silt numuneleri ve kum numuneleri kullanılarak, hazırlanan tabakalı ve tabakasız (sadece kum) zeminlerle artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik deneyler yapılmıştır. Dinamik deneyler 0.1 Hz. frekansta gerçekleştirilmiştir

Deneylerde konsolidasyon basıncı izotropik olarak 100 kPa uygulanmıştır. Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından 0.1 Hz frekansında sinüzoidal burulma dinamik yükleme ile numuneler kesilmiştir. Numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncı değişimi deney boyunca kaydedilmiştir.

Tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan silt-kum zeminlerle artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları uygulamak suretiyle değişik tiplerde deney setleri oluşturulmuştur. Hazırlanan bu deney setlerinden elde edilen sonuçlar hesaplanmış, boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ve birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi incelenerek, bu sonuçlarla ilgili yorumlar yapılmıştır. Ayrıca tabaka sayısı ve tabaka kalınlığının dinamik davranış üzerinde ne tür bir etki oluşturabileceği hakkında da yorumlar yapılmıştır.

4.1.1 Laboratuarda Hazırlanan Numunelerle Yapılan Dinamik Deneyler

Muayene çukurlarından alınan örselenmiş numunelerle hazırlanan laboratuvar numuneleri üzerinde; göçme seviyesi olarak belirlenen $\gamma = \pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar 0.1 Hz frekansta ve 100 kPa konsolidasyon basıncı altında tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Bu deneylerde İstanbul Kemerburgaz çöp depolama tesislerinde arazide açılan muayene çukurlarından alınan ve laboratuarda endeks özellikleri belirlenmiş silt numunelerle deneyler yapılmıştır.

Plastisite indisi % 18 olan silt numuneleri, No 200 elekte ıslak olarak elendikten sonra No 200 eleğin altında kalan kısım bir kapta toplanmak suretiyle +95° C deki

etüvde 1 gün bekletildikten sonra aşırı bir deformasyona uğratılmadan öğütülerek No. 40 elekten geçmesi sağlanmıştır. No.40 elekten geçen malzeme deney numunesi olarak kullanılmıştır.

Kum numuneler ise No 200 elekten ıslak analiz yapılmak suretiyle kumun yıkanması sağlanmış, daha sonra No 200 eleğin üstünde kalan kısım etüvde 1 gün bekletildikten sonra, No. 40 elekten elenmek suretiyle silt numunesiyle aynı üniformlukta zemin numunesi elde edilmiş ve deney numunesi olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada; laboratuarda hazırlanan zemin numuneleri kuru yağmurlama yöntemiyle tabakalı olarak hazırlanmıştır. Numuneler sırasıyla tek, iki ve üç silt tabakalı olarak hazırlanmıştır. Tek tabaka halinde hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığı 6 cm ve 12 cm olacak şekilde hazırlanarak en kalın tabaka ve en ince tabaka üzerinde oluşacak dinamik burulmanın tabaka kalınlığından ne kadar etkileneceği incelenmiştir (Ek.B). Bu tabakalar arasına kum tabakaları yerleştirilerek, kum tabakalardan alt ve üst başlığa yakın olan tabakaların boyları sabit alınmak suretiyle alt ve üst drenaj yolunun sabit kalması sağlanmıştır. Kum numunenin tabaka kalınlıkları hazırlanan silt numunede silt tabaka kalınlığına ve toplam numune yüksekliği olan 20 cm değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır. İki tabaka halinde hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığı 12 cm alınmış ve her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olacak biçimde hazırlanmış, alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numune ve toplam numune yüksekliği olan (20 cm) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır (Ek. C).

Üç tabaka halinde hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığı 12 cm alınmış ve her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olacak şekilde hazırlanmış yine alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numunenin ve toplam numune yüksekliği olan (20 cm.) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır (Ek. D).

Son olarak tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan zemin numuneleri artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına tabi tutularak, elde edilen sonuçlar silt tabakalı zemin numuneleri ile karşılaştırılmıştır (Ek E).

Tüm deneyler kuru yağmurlama yöntemiyle drenajlı koşullarda 0.1 Hz frekansta ve 100 kPa konsolidasyon basıncı altında sinüzoidal tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır.

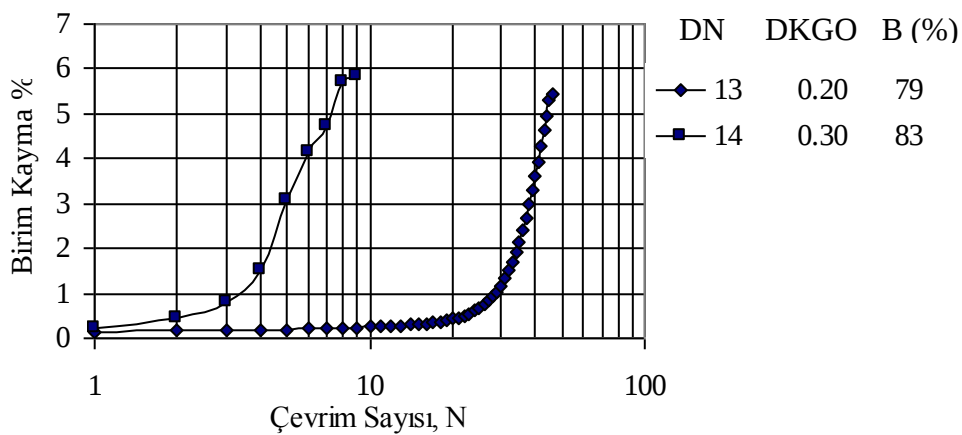
4.2 Laboratuarda Hazırlanan Tabakalı Silt Kum Zeminin Dinamik Davranışı

Bu çalışma sabit tekrarlı kayma gerilmesi oranında göçmeye ulaşınca kadar yapılan dinamik deneyleri kapsamaktadır. Buna göre silt numuneler tek, iki ve üç tabaka halinde farklı tabaka kalınlıkları sağlanmak suretiyle hazırlanmıştır.

4.3 Tek Silt Tabakalı Kum Zeminin Dinamik Davranışı

Tek silt tabakalı silt-kum zeminde (Ek. B) yapılan dinamik deneyde silt tabakası kalınlığı 6 cm alınmış ve tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olan iki deney yapılmıştır. Her iki deneyde de konsolidasyon süresi 1 gün olarak alınmıştır. Tüm deneyler sonucunda elde edilen veriler “Labtec” programında kayıt edilerek her bir deneye ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ve birim kayma-çevrim sayısı sonuçları elde edilerek bu sonuçlar grafik haline getirilmiştir. (DN=Deney No, B= Doygunluk, B.S.B.O= Boşluk Suyu Basıncı Oranı, DKGO= Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı)

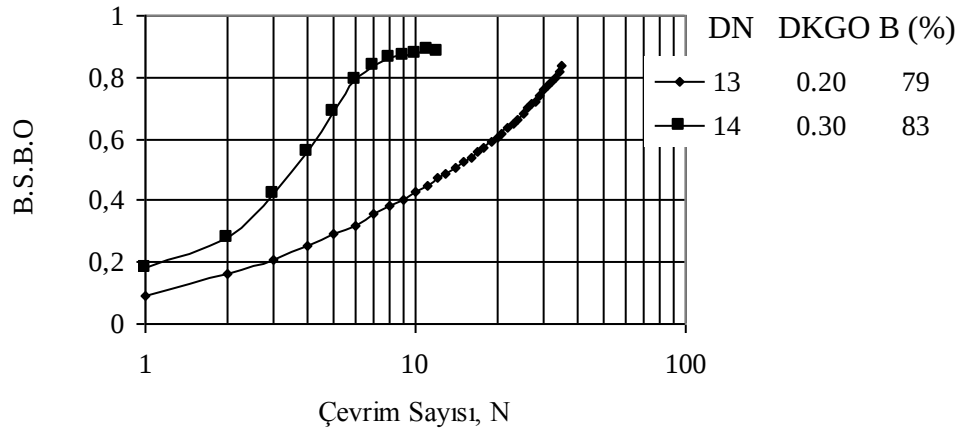
Plastisite indisinin % 18 olduğu laboratuvar ortamında hazırlanan silt numunelerle yapılan, silt tabakası kalınlığı 6 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olacak biçimde iki farklı deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde gerilme oranı arttıkça aynı göçme seviyesine ulaşmak için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı=6 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,05 kN/m³)

Göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine tekrarlı gerilme oranı 0,20 iken 37 çevrimde ulaşılmıştır. Buna karşın tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30'a çıkartıldığında göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ değerine 5 çevrimde ulaşılmıştır.

Genel olarak siltli zeminlerde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basınçları belirli bir gerilme seviyesinden sonra artmaktadır. Şekil 4.2 de görülen $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle tek tabakalı olarak hazırlanan silt-kum zeminde aynı çevrim sayısında tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde boşluk suyu basıncı oranı değeri de artmaktadır. Buna göre çevrim sayısı değeri 10 olarak alındığında bu değerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,42 ölçülmüştür. Buna karşın tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri 0,30' a çıkartıldığında boşluk suyu basıncı oranı daha hızlı artarak 0,87 değerine ulaşmıştır.



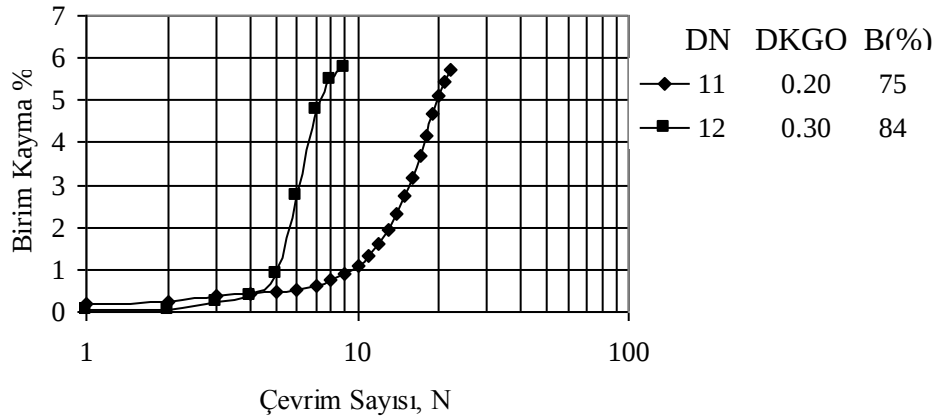
Şekil 4.2 Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı (N) ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı= 6 cm, $I_p = \% 18$, $\gamma_{kc} = 16,05 \text{ kN/m}^3$)

Tek silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlıkları 16 kN/m^3 ve relatif sıkılıkları $D_r \% 51$ - $\% 53$ olan silt-kum zeminde silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmış, tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olan iki deney yapılmıştır (Ek B). Bu deneyler 0,1 Hz frekansta ve 100 kPa efektif konsolidasyon basıncı altında gerçekleştirilmiştir.

Konsolidasyon süresi her iki deney için 1 gün olarak alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda birim kayma -çevrim sayısı ilişkisi ve boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisini gösteren şekiller çizilmiştir.

Laboratuvar ortamında $I_p = \% 18$ olan silt numunelerle yapılan, tabaka kalınlığı 12 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olan iki farklı deney yapılmıştır (Ek B).Yapılan deneylerde gerilme oranı arttıkça aynı göçme seviyesine ulaşmak için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir (Şekil 4.3).

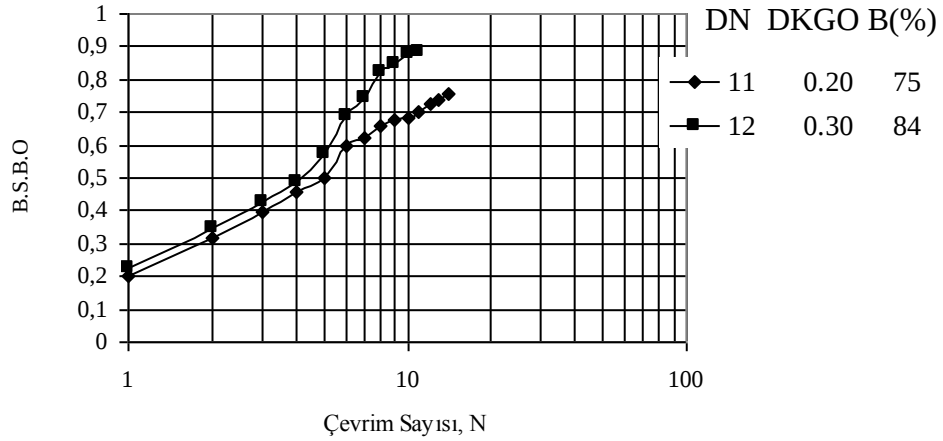
Buna göre, göçme seviyesi olarak belirlenen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonuna ulaşmak için tekrarlı gerilme oranı 0,20 olan deneyde çevrim sayısı 14 iken, tekrarlı gerilme oranı değeri 0,30'a çıkartıldığında numune göçme seviyesi olarak belirtilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 4 çevrim sayısında ulaşmıştır.



Şekil 4.3 Laboratuvar ortamında hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı=12 cm, $I_p = \% 18$, $\gamma_{kc} = 16,06 \text{ kN/m}^3$)

$I_p = \% 18$ olan silt numuneyle silt tabakası kalınlığı 12 cm olan olarak hazırlanan silt-kum zeminde aynı çevrim sayısında tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde boşluk suyu basıncı oranı değeri de artmaktadır. Buna göre çevrim sayısı

değeri 10 olarak alındığında bu değerle tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,68 ölçülmüştür. Buna karşın tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri 0,30' a çıkartıldığında aynı çevrim sayısında boşluk suyu basıncı oranı daha hızlı artarak 0,89 değerine ulaşmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Laboratuarda hazırlanan tek silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı=12cm, I_p = % 18, γ_{kc} =16,05kN/m³)

Sonuç olarak silt tabakası kalınlığındaki artış; birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi göz önüne alındığında Şekil 4.1 de 6 cm silt tabakalı silt-kum zeminde, tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm$ % 2,5 birim kayma deformasyonu değerine 37 çevrimde ulaşılırken 12 cm silt kalınlığına sahip tabakalı silt-kum zeminde aynı tekrarlı gerilme oranında $\gamma = \pm$ % 2,5 birim kayma deformasyonu değerine 14 çevrimde ulaşılmıştır (Şekil 4.3).

Şekil 4.1 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30' a çıkartıldığında 6 cm silt tabakalı kum zeminde göçme seviyesine 5. çevrimde ulaşılırken silt tabakası kalınlığı 12 cm olan silt-kum zeminde aynı göçme seviyesi değerine 4. çevrimde ulaşılmıştır. Sonuç olarak silt tabakası kalınlığındaki artışa, dolayısıyla kum tabakası yüksekliğindeki azalmaya bağlı olarak aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında silt tabakası kalınlığındaki artış numunenin daha erken çevrim sayısında deformasyonuna neden olmaktadır.

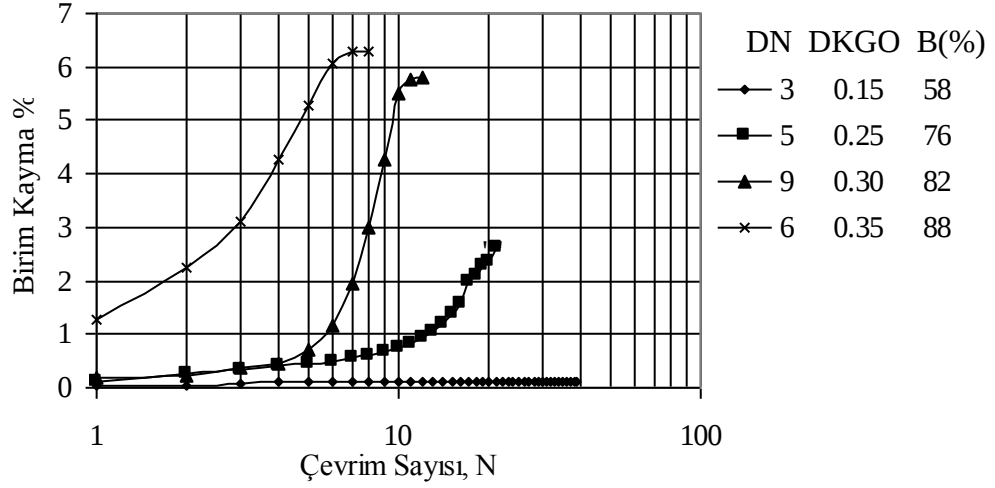
Tabaka kalınlığındaki artışın boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisine etkisi incelenmiştir. Buna göre; Şekil 4.2 de çevrim sayısı değeri 10 iken tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan 6 cm silt tabakası kalınlığına sahip numunede boşluk suyu basıncı değeri 0,42 dir. Silt tabakası kalınlığı 12 cm değerinde iken aynı tekrarlı gerilme oranı değerinde boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,68 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.4). Tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri 0,30 iken 6 cm silt tabaka kalınlığına sahip zeminde çevrim sayısı 10 olarak alındığında boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,87 olarak kayıt edilmiştir (Şekil 4.2). Silt tabakası kalınlığı 12 cm iken boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,89 olmuştur (Şekil 4.4). Genel olarak silt tabakası kalınlığındaki artışa bağlı olarak numune aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında boşluk suyu basıncı oranı değeri de artış göstermiştir.

4.4 İki Silt Tabakalı Kum Zeminin Dinamik Davranışı

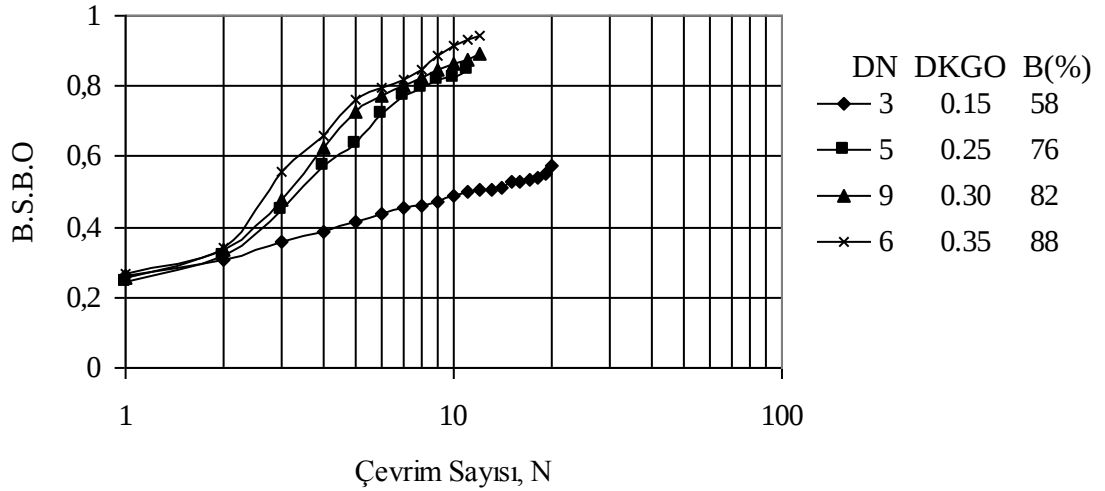
İki silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 51 - \% 53$ arasında değişen silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olarak seçilmiştir (Ek. C). Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,15, 0,25, 0,30 ve 0,35 olacak şekilde 4 farklı deney yapılmış, artan tekrarlı kayma gerilmesi oranının numunenin boşluk suyu basıncı oranı ve birim kayma deformasyonunda ne tür bir etki edeceği araştırılmıştır. Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde artırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır (Şekil 4.5).

Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış numunenin aynı göçme seviyesine ulaşmaya kadar daha erken çevrim sayısında deformasyona maruz kaldığını göstermektedir Buna göre; tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,15 olarak seçildiğinde numunede doygunluk ($B = \% 58$) sağlanamadığı için deformasyon olayı gözlemlenmemiştir. Buna karşılık tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 değerine çıkartıldığında göçme seviyesi olarak belirlenen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine 21.çevrimde başlamıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30'a çıkartıldığında göçme seviyesi değerine 8 çevrimde ulaşılmıştır. Son olarak tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 değerine getirildiğine göçme seviyesi olarak alınan $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 3 çevrimde ulaşılmıştır

Sonuç olarak gerilme seviyesi attıkça daha düşük çevrimlerde sıvılaşma meydana gelmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Laboratuarda hazırlanan iki silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam Silt Tabakası Kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,07 kN/m³)



Şekil 4.6 Laboratuarda hazırlanan iki silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,07 kN/m³)

Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde artırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncındaki değişim incelenmiştir (Şekil 4.6).

Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,15 olarak seçildiğinde çevrim sayısı 10 olarak alındığında boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,48 değerinde kalmıştır.

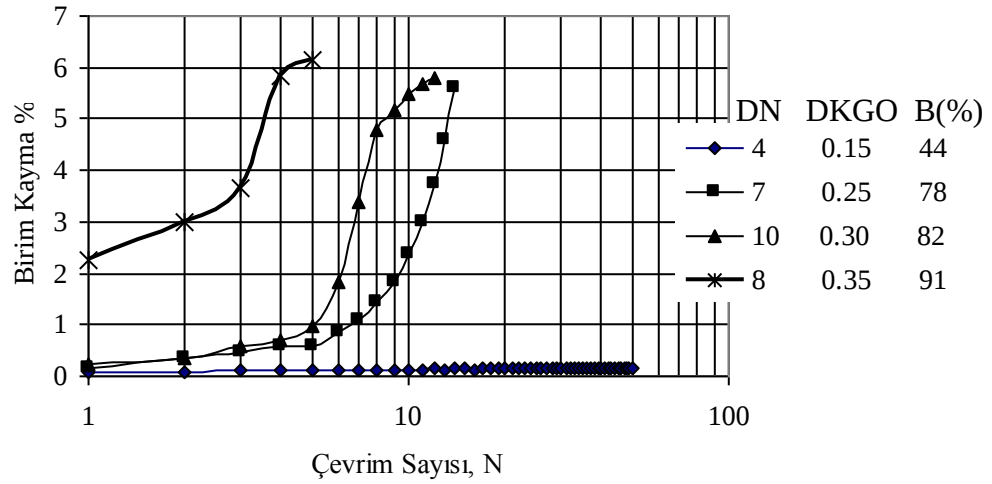
Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 değerine çıkartıldığında çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,82'dir. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken çevrim sayısı yine 10 olarak alındığında boşluk suyu basıncı oranı 0,84 olarak kaydedilmiştir. Son olarak çevrim sayısı değeri 0,35'e çıkartıldığında boşluk suyu basıncı oranı değeri 10.çevrimde 0,92 değerini almıştır.

Bu sonuçlar ışığında silt tabakası sayısındaki artışa bağlı olarak kum-silt ve silt-kum tabakaları arasındaki geçiş noktalarındaki zayıf bölgeler, numunenin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında erken çevrim sayılarında daha hızlı sıvılaşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

4.5 Üç Silt Tabakalı Kum Zeminin Dinamik Davranışı

Üç silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 51 - \% 53$ aralığında değişen silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olarak seçilmiş ve toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır (Ek D). 12 cm silt tabakası kalınlığında hazırlanan silt-kum zemin her deney sırasıyla 0,15, 0,25, 0,30 ve 0,35 değerlerinde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranına tabi tutulmuş ve numunede meydana gelebilecek birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi incelenmiştir.

Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde artırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış numunenin aynı göçme seviyesine ulaşınca kadar daha erken çevrim sayısında deformasyona maruz kaldığını göstermektedir (Şekil 4.7).

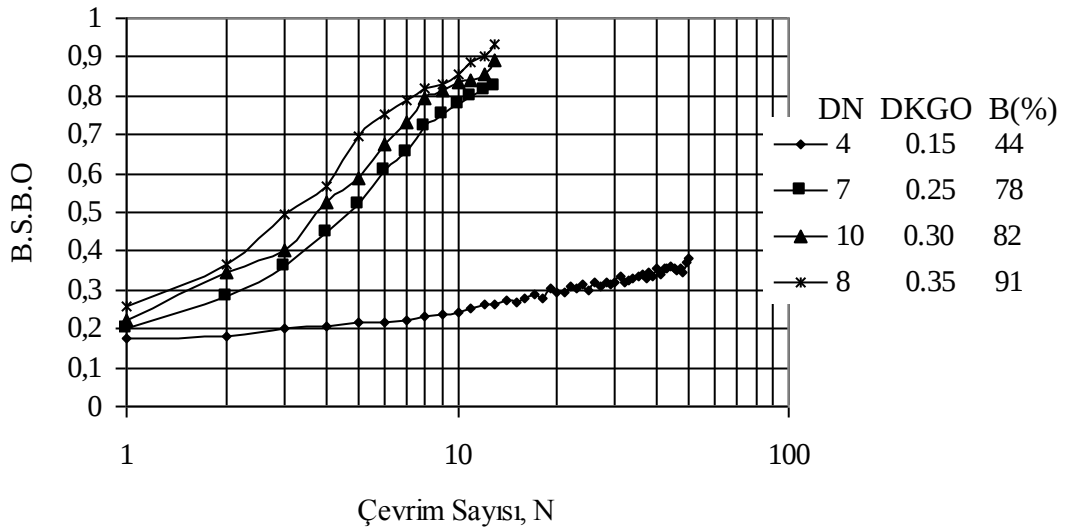


Şekil 4.7 Laboratuarda hazırlanan üç silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,10 kN/m³)

Buna göre; tekrarlı gerilme oranı 0,15 olarak seçildiğinde numune (B=% 44) istenilen doygunluk düzeyine ulaşmadığı için deney boyunca deformasyon olayı gözlemlenmemiştir. Buna karşılık tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 değerine çıkartıldığında göçme seviyesi olarak belirlenen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 11. çevrimde ulaşılmıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30'a çıkartıldığında göçme seviyesi değerine 6. çevrimde ulaşılmıştır. Son olarak tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 değerine getirildiğinde göçme seviyesi olan $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 2. çevrimde ulaşılmıştır.

Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde artırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncındaki değişim incelenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Laboratuarda hazırlanan üç silt tabakalı zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,10 kN/m³)

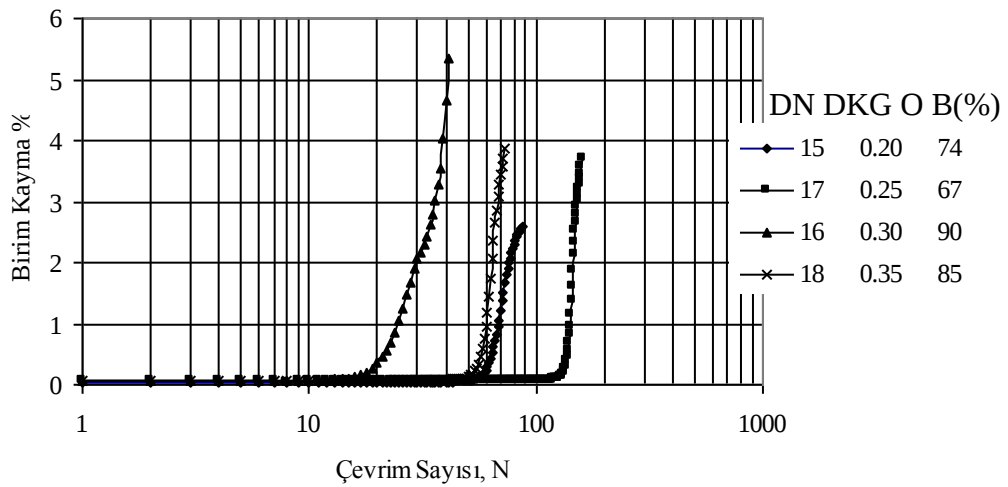
Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,15 olarak seçildiğinde çevrim sayısı 10 olarak alındığında boşluk suyu basıncı oranı değeri yaklaşık 0,37 değerinde kalmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 değerine çıkartıldığında çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,79'dur.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken çevrim sayısı yine 10 olarak alındığında boşluk suyu basıncı oranı 0,81 olarak kaydedilmiştir. Son olarak çevrim sayısı değeri 0,35'e çıkartıldığında boşluk suyu basıncı oranı değeri 10. çevrimde 0,87 değerini almıştır.

Sonuç olarak, silt tabakası sayısındaki artışa bağlı olarak kum-silt ve silt kum tabakaları arasındaki geçiş noktalarındaki zayıf bölgeler numunenin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında erken çevrim sayılarında daha hızlı sıvılaşmasına neden olduğunu göstermiştir

4.6 Tabakasız (Kum) Zeminlerin Dinamik Davranışı

Tabakasız olarak hazırlanan, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \%51 - \%53$ arasında değişen kum numuneye her deneyde tekrarlı kayma gerilmesi oranı artacak şekilde sırasıyla 0,20, 0,25, 0,30 ve 0,35 olan yüklemeler uygulanmıştır (Ek. E). Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artışın tabakasız olarak hazırlanan kum numune üzerinde boşluk suyu basıncı oranı ve birim kayma deformasyonu değerlerine ne tür bir etki yapacağı araştırılmıştır.



Şekil 4.9 Laboratuarda hazırlanan tabakasız zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, $I_p = \% 18$, $\gamma_{kc} = 16,02 \text{ kN/m}^3$)

Şekil 4.9'daki birim kayma-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde artırılmak suretiyle 0,20 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Kum numunelerle yapılan deneylerde birim kayma deformasyonu-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafik tabakalı olarak hazırlanan silt-kum zeminlere ait deney sonuçlarından elde edilen grafiklerle farklılıklar göstermektedir. Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine ulaşmak için gereken çevrim sayısı 85 dir. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 değerine çıkartıldığında çevrim sayısı artmakta ve göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 150 çevrimde ulaşılmaktadır.

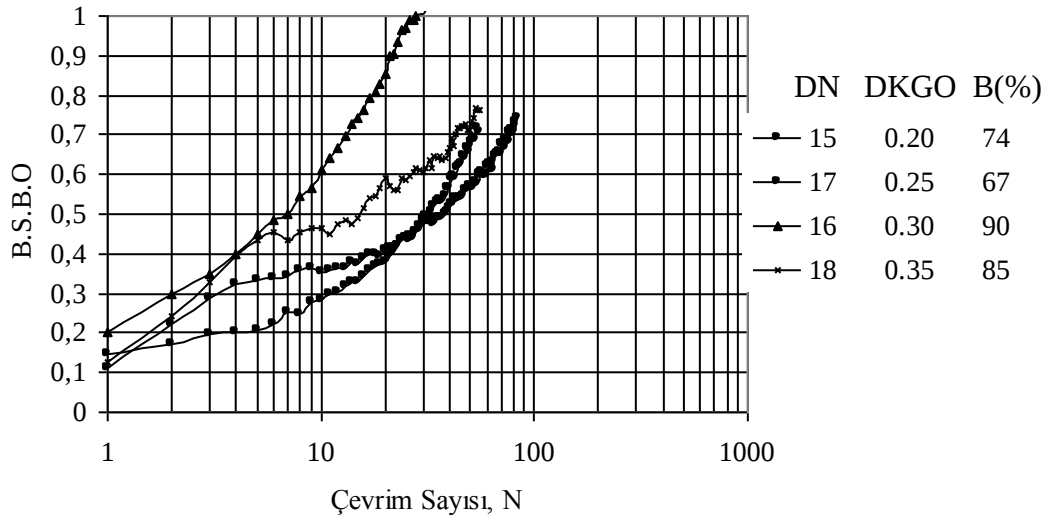
Bu durumun nedeni; tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numunenin doygunluk ($B=37\%$) sağlanmadan kesme işlemine başlanmasıdır. Oysaki aynı laboratuvar koşullarında hazırlanan bu deney, doygunluk sağlandıktan sonra kesme işlemine başlansaydı durum farklı olacaktır. Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri 0,20 den 0,25 değerine çıkartıldığında tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken deformasyonun gerçekleşmesi için gereken çevrim sayısı tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken deformasyonun gerçekleşmesi için gereken çevrim sayısından daha az olacaktır.

Aynı durum tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 ve 0,35 olan deneylerde de gözlenmiştir. Göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 olan deneyde 34 çevrimde ulaşılırken, tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 değerine çıkartıldığında göçme seviyesi değeri olarak belirlenen $\gamma = \pm 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 66 çevrimde ulaşılmıştır.

Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyde doygunluk ($B=51\%$) sağlanmadan kesme işlemine başlanmıştır. Bu durum numunenin tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken deformasyonun meydana gelmesi için gereken çevrim sayısından daha erken çevrim sayısında deformasyonuna izin vermemiştir.

Buna karşın bu deney doygunluk sağlandıktan sonra kesme işlemine başlansaydı; tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyde göçme seviyesi değeri olarak belirlenen $\gamma = \pm 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine daha erken çevrim sayısında ulaşılacaktır.

Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde artırılmak suretiyle 0,20 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncındaki değişimi incelenmiştir (Şekil 4.10).



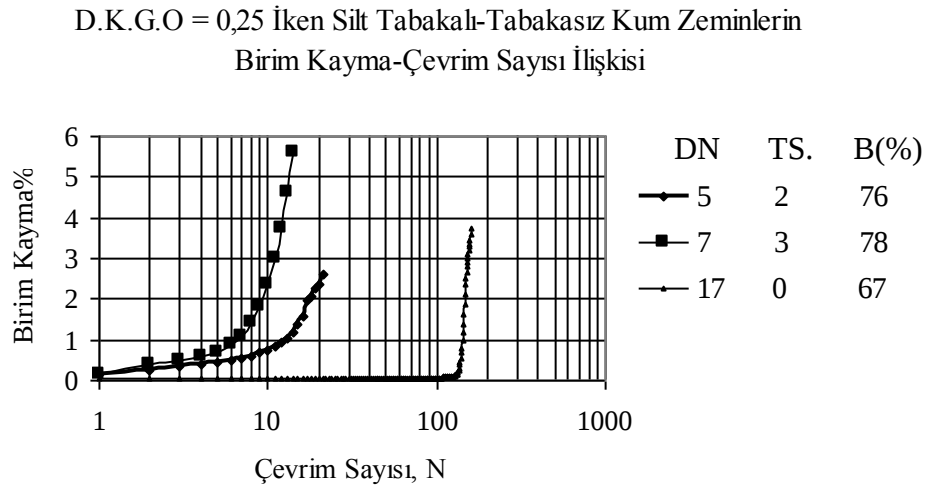
Şekil 4.10 Laboratuarda hazırlanan tabakasız zemine ait artan kayma gerilmesi oranlarındaki boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı (N) ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı=12 cm, I_p =% 18, γ_{kc} =16,03 kN/m³)

Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olarak seçildiğinde çevrim sayısı 10 olarak alındığında boşluk suyu basıncı oranı değeri yaklaşık 0,30 değerinde kalmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 değerine çıkartıldığında çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,38'dir. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken çevrim sayısı yine sabit değer olarak 10 alındığında boşluk suyu basıncı oranı 0,63 olarak kaydedilmiştir. Son olarak çevrim sayısı değeri 0,35'e çıkartıldığında boşluk suyu basıncı oranı değeri 10.çevrimde 0,48 değerini almıştır. Buna göre; deney sonunda elde edilen grafikte (Şekil 4.10) tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan numunedeki boşluk suyu basıncı oranındaki artışın tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numuneye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numunenin doygunluk (B =% 67) sağlanmadan kesme işlemine başlanmasıdır. Oysaki tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numunede doygunluk sağlandıktan sonra kesme işlemi başlatılsaydı, deney sonunda tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numunenin boşluk suyu basıncı oranı değeri artan tekrarlı kayma gerilmesi oranı neticesinde tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan numuneden daha fazla olacaktır.

4.7 Aynı Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranında Silt Tabakalı ve Tabakasız Kum Zeminlerin Dinamik Davranışı

Aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlerin dinamik davranışı incelenmiş ve birim kayma çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı grafikleri çizilmiştir. (TS= Tabaka Sayısı)

Şekil 4.11 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki silt tabakalı, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlerin birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir.



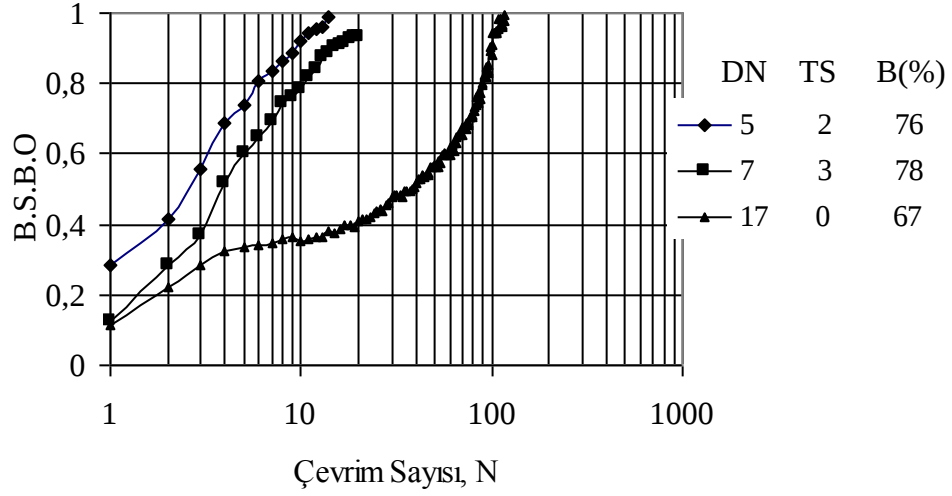
Şekil 4.11 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi

Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki silt tabakalı kum zemin göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine 21 çevrimde ulaşmıştır. Üç silt tabakalı kum zeminde göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine ise 8 çevrimde ulaşmıştır. Tabakasız (sadece kum) zeminde ise göçme seviyesi değeri olan, $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine 150 çevrimde ulaşmıştır.

Sonuç olarak silt tabaka sayısındaki artış ve numunenin doygunluk değeri numunenin daha erken çevrim sayısında sıvılaşmasına neden olmaktadır. Tabakasız zeminde ise numunede doygunluk sağlanamadığı için aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri olan 0,25 de iki ve üç silt tabakalı kum zemine göre çok daha geç çevrim sayısında sıvılaşmaya başlamıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zemine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir (Şekil 4.12).

D.K.G.O =0,25 İken Silt Tabakalı-Tabakasız Kum Zeminlerin
Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Çevrim Sayısı İlişkisi



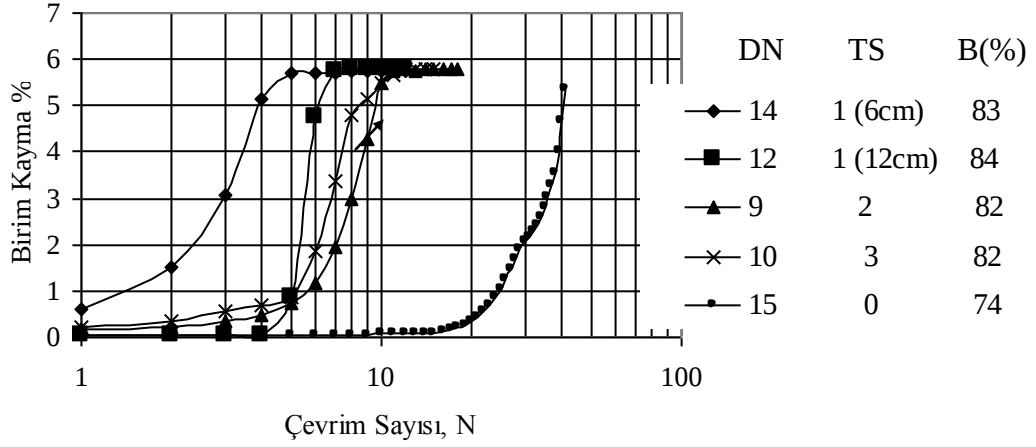
Şekil 4.12 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken çevrim sayısı değeri 10 olarak alındığında iki silt tabakalı kum zeminde boşluk suyu basıncı oranı 0,85 okunmuştur. Üç silt tabakalı kum zeminde ise boşluk suyu basıncı oranı 0,79 olarak okunmuştur. Tabakasız olarak hazırlanan kum zeminde ise çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,38 de kalmıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek silt tabakalı (6cm ve 12 cm), iki silt tabakalı, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlerin birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek, iki ve üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma –çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir (Şekil 4.13).

D.K.G.O =0,30 İken Silt Tabakalı-Tabakasız Kum Zeminlerin Birim Kayma-Çevrim Sayısı İlişkisi



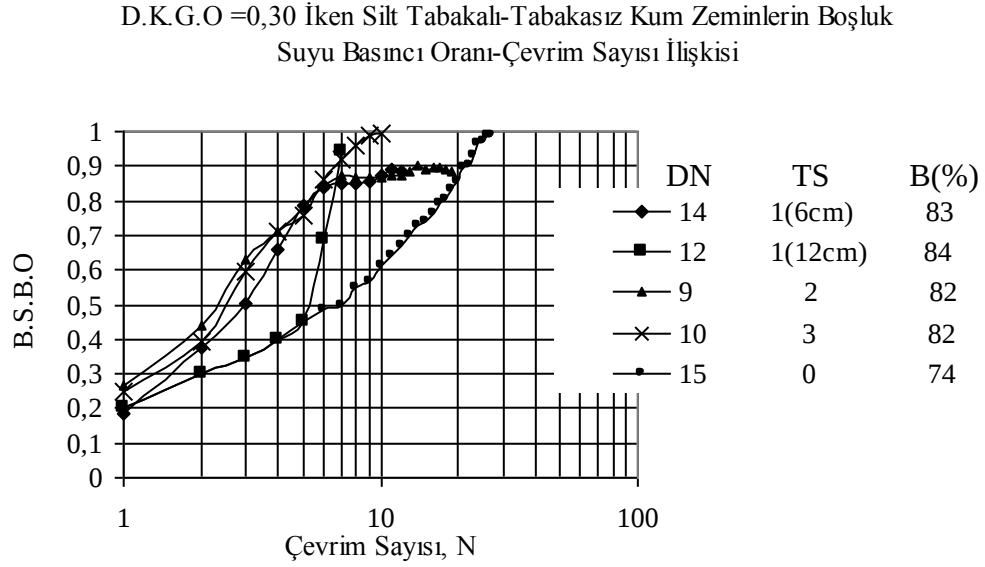
Şekil 4.13 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi

Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken tek silt tabakalı (silt tabakası kalınlığı 6 cm) kum zeminde göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine 5 çevrimde ulaşılmıştır. Tek silt tabakalı (silt tabakası kalınlığı 12 cm) kum zeminde göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine ise 4 çevrimde ulaşılmıştır. İki silt tabakalı kum zeminde göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine ise 8 çevrimde ulaşılmıştır.

Üç silt tabakalı kum zeminde göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine ise 6 çevrimde ulaşılmıştır. Tabakasız (sadece kum) zeminde ise göçme seviyesi değeri olan, $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu seviyesine 34 çevrimde ulaşılmıştır.

Sonuç olarak silt tabakası sayısındaki artış ve numunenin doygunluk değeri numunenin daha erken çevrim sayısında sıvılaşmasına neden olmaktadır. Tabakasız zeminde ise numunede doygunluk sağlanamadığı için aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri olan 0,30 da tek, iki ve üç silt tabakalı kum zemine göre çok daha geç çevrim sayısında sıvılaşmaya başlamıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zemine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir (Şekil 4.14).



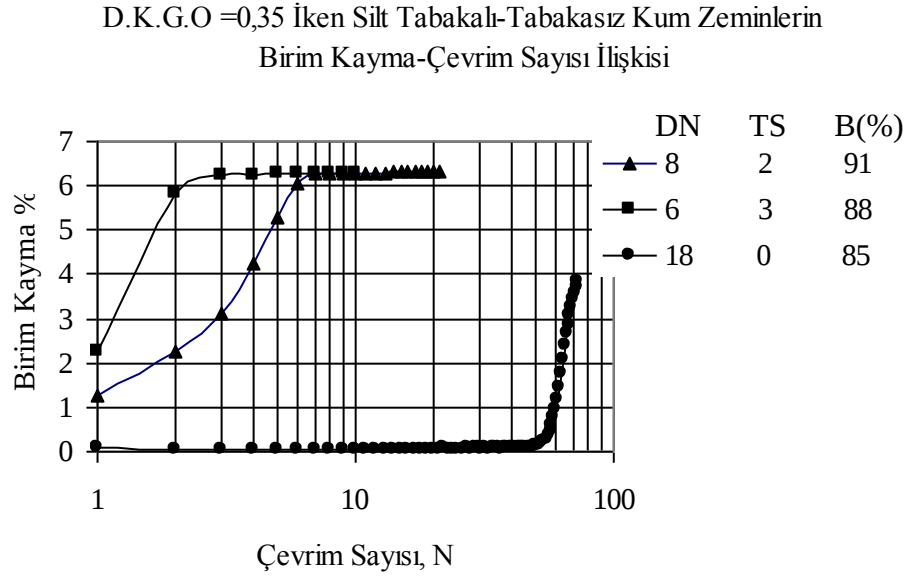
Şekil 4.14 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken çevrim sayısı değeri 10 olarak alındığında tek silt tabakalı (silt tabakası kalınlığı 6cm) kum zeminde boşluk suyu basıncı oranı 0,82 okunmuştur. Tek silt tabakalı (silt tabakası kalınlığı 12 cm) kum zeminde ise boşluk suyu basıncı oranı 0,92 olarak okunmuştur.

İki silt tabakalı kum zeminde çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,86 okunmuştur. Üç silt tabakalı kum zeminde ise çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı 0,98 olarak okunmuştur. Tabakasız olarak hazırlanan kum zeminde ise çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,61 de kalmıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zemine ait birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir.

Şekil 4.15 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki silt tabakalı, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlerin birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir.



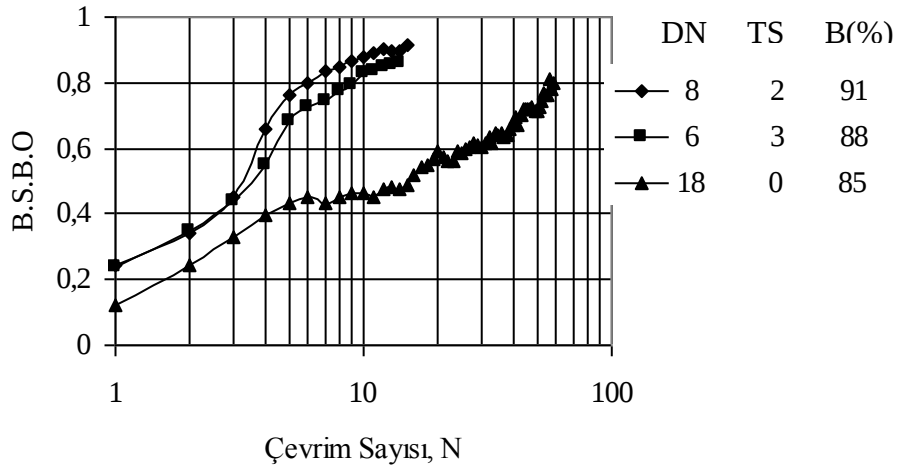
Şekil 4.15 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi

Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki silt tabakalı kum zemin göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 3 çevrimde ulaşmıştır. Üç silt tabakalı kum zeminde göçme seviyesi olarak kabul edilen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine ise 2 çevrimde ulaşılmıştır. Tabakasız (sadece kum) zeminde ise göçme seviyesi değeri olan, $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine 66 çevrimde ulaşılmıştır.

Sonuç olarak silt tabakası sayısındaki artış ve numunenin doygunluk değeri numunenin daha erken çevrim sayısında sıvılaşmasına neden olmaktadır. Tabakasız zeminde ise numunede doygunluk sağlanamadığı için aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranı değeri olan 0,35 de iki ve üç silt tabakalı kum zemine göre çok daha geç çevrim sayısında sıvılaşmaya başlamıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zemine ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir (Şekil 4.16).

D.K.G.O =0,35 İken Silt Tabakalı-Tabakasız Kum Zeminlerin
Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Çevrim Sayısı İlişkisi



Şekil 4.16 Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken iki, üç silt tabakalı ve tabakasız kum zeminlere ait boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken çevrim sayısı değeri 10 olarak alındığında iki silt tabakalı kum zeminde boşluk suyu basıncı oranı 0,86 okunmuştur.

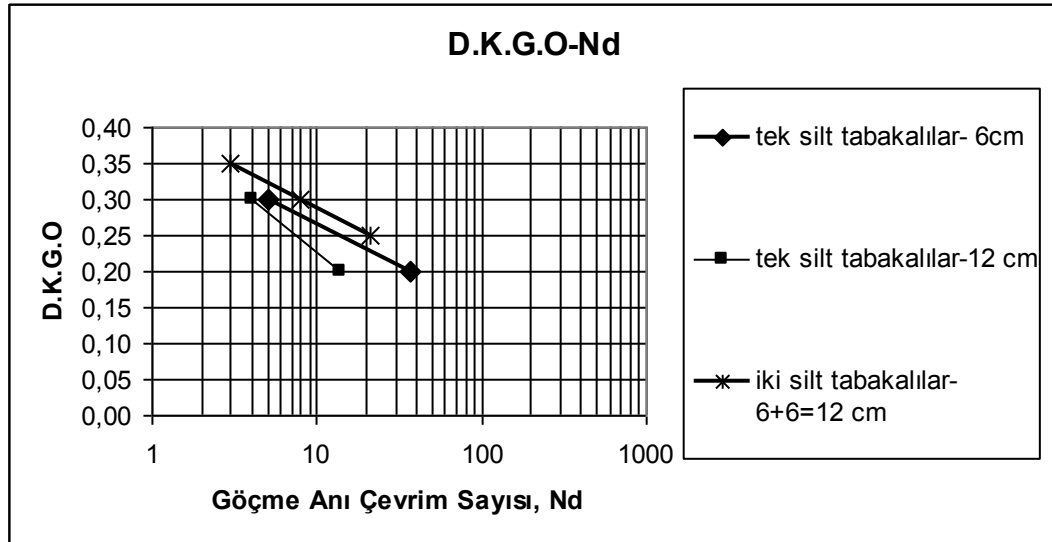
Üç silt tabakalı kum zeminde ise boşluk suyu basıncı oranı 0,81 olarak okunmuştur. Tabakasız olarak hazırlanan kum zeminde ise çevrim sayısı 10 iken boşluk suyu basıncı oranı değeri 0,42 de kalmıştır

4.8 Silt Tabaka Sayısının Dinamik Davranış Üzerindeki Etkisi

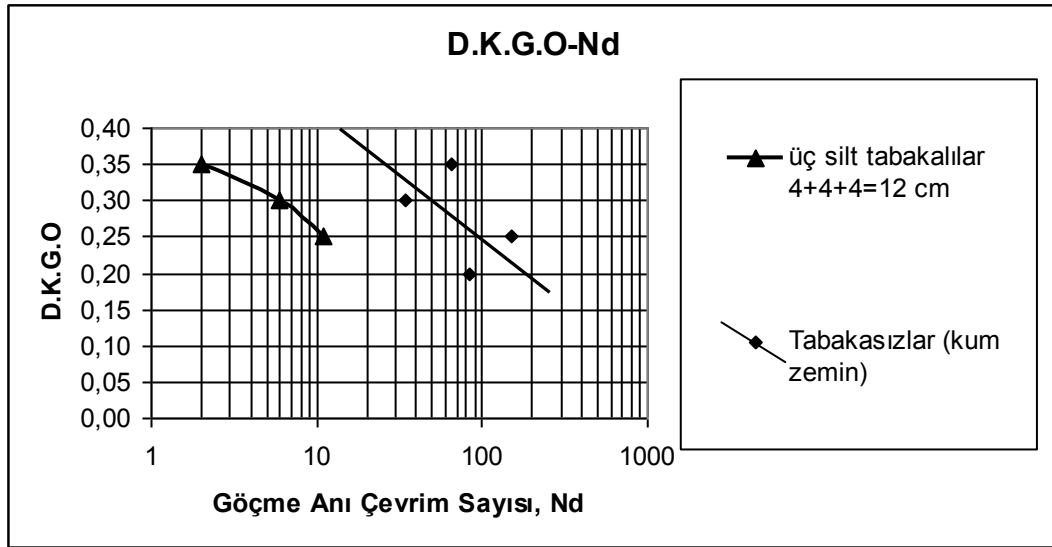
Yapılan deneyler sonucunda deneyleri tek silt tabakalı, iki silt tabakalı, üç silt tabakalı ve tabakasız olarak gruplandırmak suretiyle artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına bağlı olarak numunenin deformasyona başladığı çevrim sayıları grafik ve tablo haline getirilmek suretiyle tabaka sayısının dinamik davranış üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi

			γ_{kc} silt	γ_{kc} kum
Tabaka Sayısı ve Kalınlığı	D.K.G.O	Nd ($\pm\% 2,5$)	(kN/m ³)	(kN/m ³)
Tek Tabakalı 6 cm	0,2	37	16,06	15,9
	0,3	5	16,05	15,95
Tek Tabakalı 12 cm	0,2	14	16,06	15,95
	0,3	4	16,05	16
İki Tabakalı 6+6 = 12cm	0,15	0	16,06	16
	0,25	21	16,07	15,95
	0,3	8	16,07	15,9
	0,35	3	16,07	15,95
Üç Tabakalı 4+4+4=12 cm	0,15	0	16,11	16
	0,25	11	16,12	16,05
	0,3	6	16,11	16
	0,35	2	16,12	16
Tabakasızlar (Kum Zemin)	0,2	85	16,03	16
	0,25	150	16,02	15,95
	0,3	34	16,02	15,95
	0,35	66	16,03	16



Şekil 4.17a Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Tek silt tabakalı (6cm ve 12 cm) ve iki silt tabakalı kum zemin)



Şekil 4.17b Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Üç silt tabakalı kum zemin ve Tabakasız (Kum Zemin))

Dinamik kayma gerilmesi oranı-deformasyon anındaki çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte silt tabakası sayısındaki artışa bağlı olarak numunenin daha erken çevrim sayısında deformasyona ulaştığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.17a ve Şekil 4.17b). Daha öncede belirtildiği üzere silt tabakası sayısındaki artış ve buna bağlı olarak kum-silt ve silt kum arası geçiş noktalarındaki zayıf bölgelerin artışı numunenin artan kayma gerilmesi oranına bağlı olarak daha hızlı bir şekilde deformasyona ulaştığını göstermektedir. Bununla birlikte tabakasız zeminlerde artan kayma gerilmesi oranına bağlı olarak numunenin hızlı bir şekilde deformasyona uğramadığı gözlenmiştir. Bunun temel nedeni, artan kayma gerilmesi oranlarında hazırlanan numunelerden tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 ve 0,25 olan numunelerin yeterli doygunluğa ulaşmadan kesme işlemine başlanmasıdır.

Aynı şekilde tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 ve 0,35 olan numunelerde de yeterli doygunluğun sağlanmaması artan kayma gerilmesi oranına bağlı olarak numunenin daha erken çevrim sayılarında deformasyona maruz kalmasına engel olmuştur. Tablo 4.2 de dinamik kayma gerilmesi oranı, tabaka sayısı, tabaka kalınlığı, boşluk suyu basıncı ve deformasyon anındaki çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir.

Tablo 4.2 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı, Silt Tabaka Sayısı ve Kalınlığı, Boşluk Suyu Basıncı ve Deformasyon Anındaki Çevrim Sayısı Değerleri. (B: Doygunluk)

Deney No	Gerilme	Silt Tabaka		B(%)	Nd ($\pm 2,5$)
		Sayısı	Kalınlığı		
3	0,15	2	6+6=12	58	0
2	0,15	3	2+2+2=6	62	0
4	0,15	3	4+4+4=12	70	0
15	0,2	0	0	74	85
11	0,2	1	12	75	14
13	0,2	1	6	79	37
5	0,25	2	6+6=12	76	21
7	0,25	3	4+4+4=12	78	11
17	0,25	0	0	67	150
12	0,3	1	12	84	4
14	0,3	1	6	83	5
9	0,3	2	6+6=12	82	8
10	0,3	3	4+4+4=12	82	6
16	0,3	0	0	90	34
6	0,35	2	6+6=12	88	3
8	0,35	3	4+4+4=12	91	2
18	0,35	0	0	85	66

4.9 Silt Tabakalı Numunelerin Deney Sonrası Su Muhtevalarının Likit Limit Değerleriyle Karşılaştırılması

Yapılan deneyler sonucunda kum-silt zeminden alınan silt numuneye ait su muhtevaları değerleri silt numunenin likit limit değerleriyle karşılaştırılmak suretiyle numunenin likit limit değerine paralel olarak ne kadar suya doyduğu hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

Her deneye ait silt numunenin deney sonrası su muhtevaları ve likit limit değerleri Tablo 4.3 de verilmiştir.

Tablo 4.3 Deney sonrası numunelerden elde edilen su muhtevaları ve likit limit değerlerinin karşılaştırılması

Deney No:	D.K.G. O	Silt Tabaka Sayısı	Silt Tabaka Kalınlığı	w ₁	w ₂	w ₃	w _(ort)	Likit Limit
13	0,2	1	6 cm	0,33	0,32	0,33	0,33	0,47
14	0,3	1	6 cm	0,34	0,33	0,33	0,34	0,47
11	0,2	1	12 cm	0,34	0,33	0,34	0,34	0,47
12	0,3	1	12 cm	0,34	0,33	0,33	0,34	0,47
1	0,15	2	3 cm	0,42	0,43	0,41	0,42	0,47
3	0,15	2	6 cm	0,42	0,4	0,41	0,41	0,47
5	0,25	2	6 cm	0,36	0,35	0,37	0,36	0,47
9	0,3	2	6 cm	0,33	0,35	0,34	0,34	0,47
6	0,35	2	6 cm	0,27	0,28	0,27	0,28	0,47
2	0,15	3	2 cm	0,24	0,24	0,23	0,23	0,47
4	0,15	3	4 cm	0,41	0,42	0,41	0,42	0,47
7	0,25	3	4 cm	0,37	0,36	0,38	0,37	0,47
10	0,3	3	4 cm	0,36	0,35	0,35	0,36	0,47
8	0,35	3	4 cm	0,33	0,32	0,33	0,33	0,47

4.10 Silt Tabakası Kalınlığının Dinamik Davranış Üzerindeki Etkisi

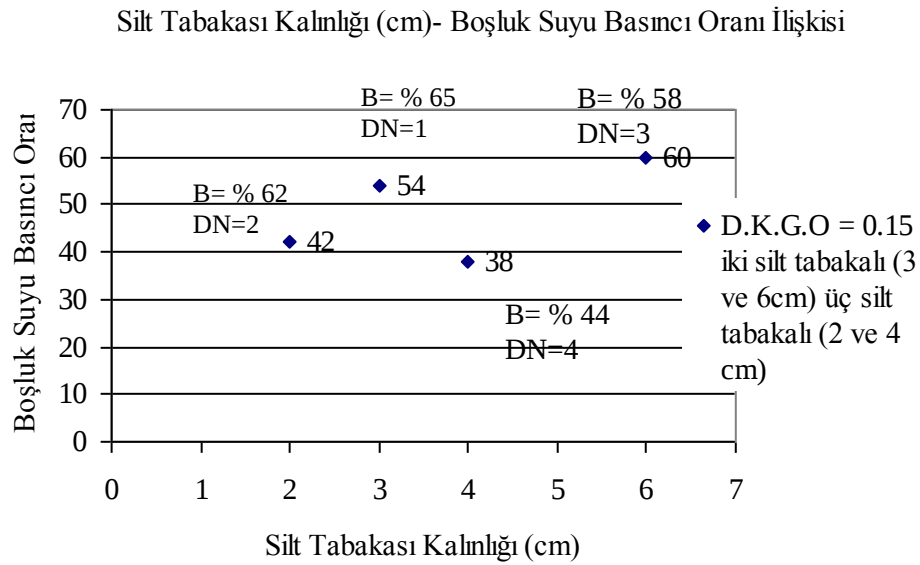
Tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız (kum) zeminlerin aynı tekrarlı gerilme oranında tabaka kalınlığı ve göçme anındaki çevrim sayısı ilişkisi ve tabaka kalınlığı boşluk suyu basıncı oranı değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4 Aynı gerilme oranında tabaka sayısı ve kalınlığı boşluk suyu basıncı oranı değişimi ve göçme anındaki çevrim sayısı

Deney No	Gerilme	Tabaka		Doygunluk	
		Sayısı	Kalınlığı	B %	N (±%2,5)
1	0,15	2	3	65	0
3	0,15	2	6	58	0
2	0,15	3	2	62	0
4	0,15	3	4	44	0
15	0,2	0	0	74	85
13	0,2	1	6	79	37
11	0,2	1	12	75	14
17	0,25	0	0	67	150
5	0,25	2	6	76	21
7	0,25	3	4	78	11
12	0,3	1	12	84	4
14	0,3	1	6	83	5

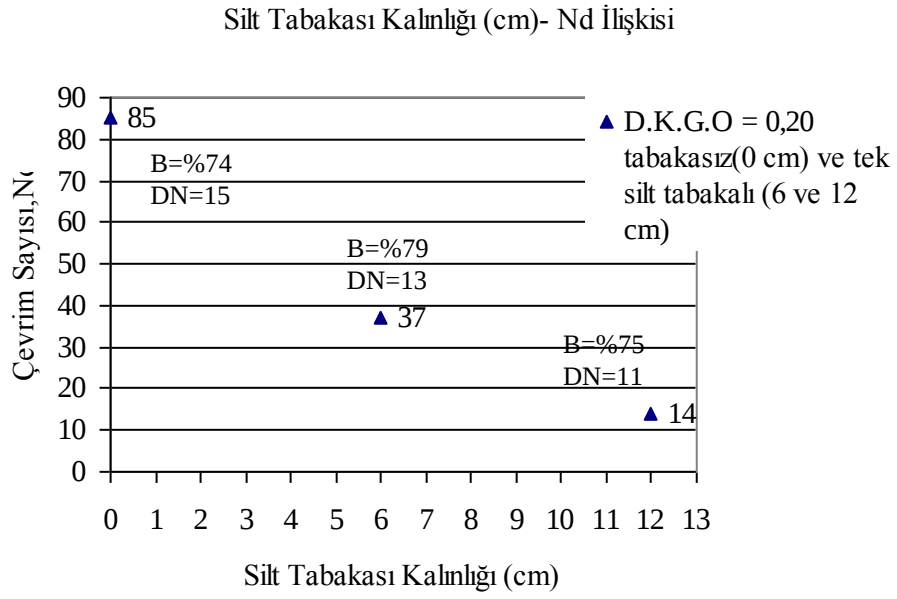
9	0,3	2	6	82	8
10	0,3	3	4	82	6
16	0,3	0	0	90	34
6	0,35	2	6	88	3
8	0,35	3	4	91	2
18	0,35	0	0	85	66

Şekil 4.18 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,15 iken iki silt tabakalı ve üç silt tabakalı silt kum zemine ait tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi görülmektedir. Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,15 iken iki silt tabakalı; her bir silt tabakası kalınlığı 3 ve 6 cm olan deneylerde boşluk suyu basıncı oranı sırasıyla 54 ve 60 olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte üç silt tabakalı; her bir silt tabakası kalınlığı 2 ve 4 cm olan deneylerde ise boşluk suyu basıncı oranı değişimi sırasıyla 42 ve 38 olarak ölçülmüştür.



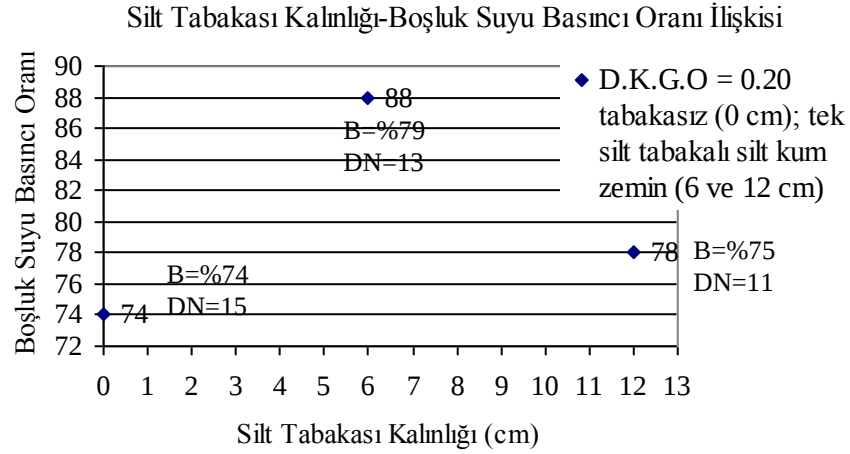
Şekil 4.18 Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; iki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 3 ve 6 cm), üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 2 ve 4 cm).)

Tekrarlı kayma gerilmesi 0,20 iken silt tabakası kalınlığının göçme anındaki çevrim sayısı ile değişimi görülmektedir. Buna göre tabakasız olarak hazırlanan ve sadece kum zeminden oluşan deneyde göçme anındaki çevrim sayısı 85 iken silt tabaka sayısı tek olan silt-kum zeminde silt tabakası kalınlığı sırasıyla 6 ve 12 cm iken göçme anındaki çevrim sayısı 37 ve 14 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.19).



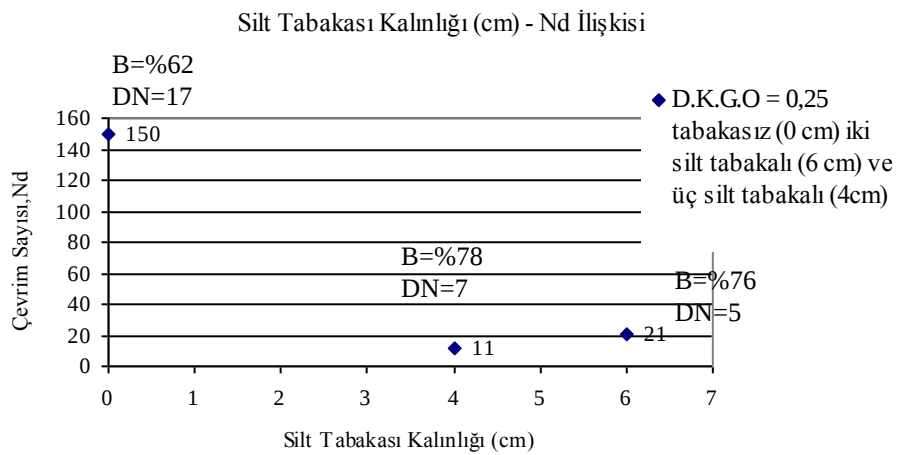
Şekil 4.19 Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) 0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 ve 12cm).

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken silt tabakası kalınlığının boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi görülmektedir. Tabakasız olarak hazırlanan kum zeminde boşluk suyu basıncı oranı değeri 74 olarak ölçülmüştür. Tek silt tabakalı olarak hazırlanan silt-kum zeminde silt tabakası kalınlıkları sırayla 6 ve 12 cm iken boşluk suyu basıncı oranındaki değişim 88 ve 78 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.20).



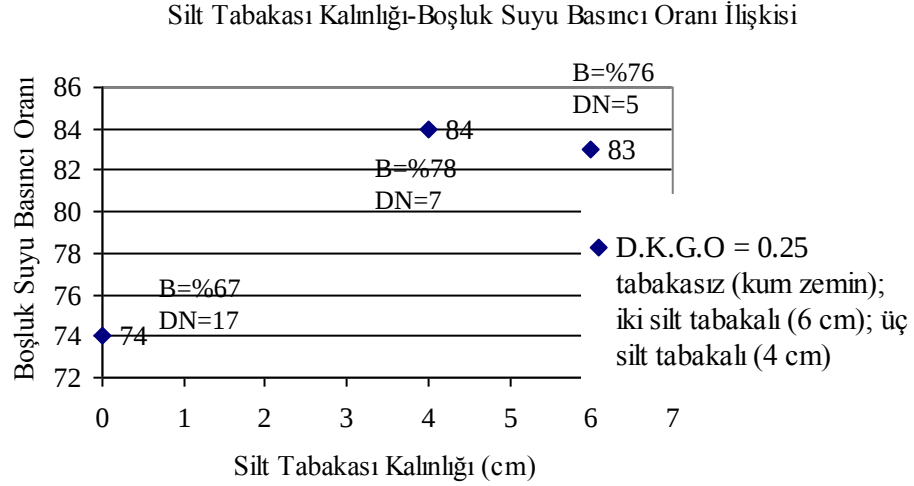
Şekil 4.20 Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) 0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 ve 12cm).

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken silt tabakası kalınlığının göçme anındaki çevrim sayısı ile değişimi görülmektedir (Şekil 4.21). Buna göre tabakasız olarak hazırlanan silt-kum zeminde göçme anındaki çevrim sayısı 150 olarak ölçülmüştür. Buna karşın tabaka sayısı artırılarak hazırlanan iki silt tabakalı ve her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olan silt-kum zeminde ölçülen çevrim sayısı değeri 21 dir. Üç silt tabakalı ve her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olan deneyde ölçülen çevrim sayısı değeri 11 dir.



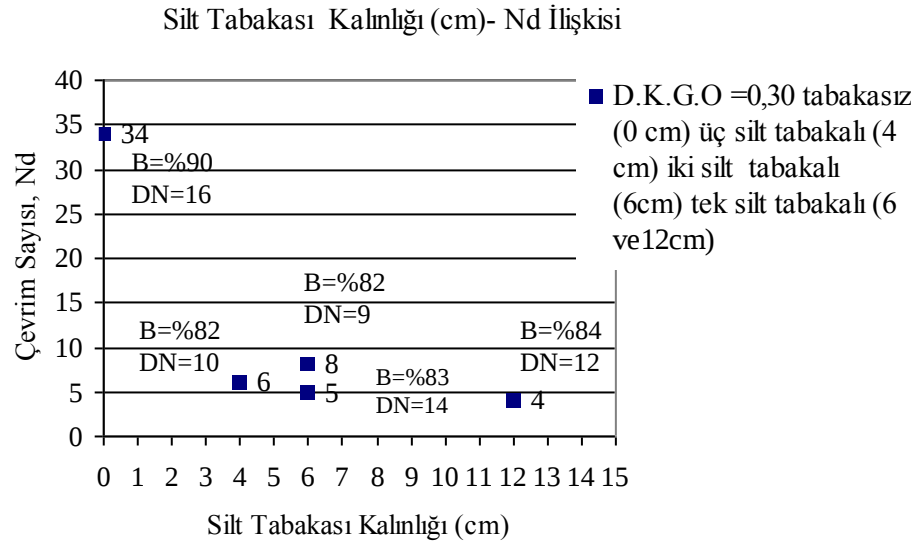
Şekil 4.21 Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) 0 cm), iki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm)).

Şekil 4.22 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 iken silt tabakası kalınlığının boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi görülmektedir. Buna göre tabakasız olarak hazırlanan kum zeminde boşluk suyu basıncı oranı değeri 74 olarak ölçülmüştür. İki silt tabakalı ve her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olan silt-kum zeminde boşluk suyu basıncı oranı değeri 83 tür. Üç silt tabakalı ve her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olan silt-kum zeminde ise boşluk suyu basıncı oranı değeri 84 olarak ölçülmüştür.

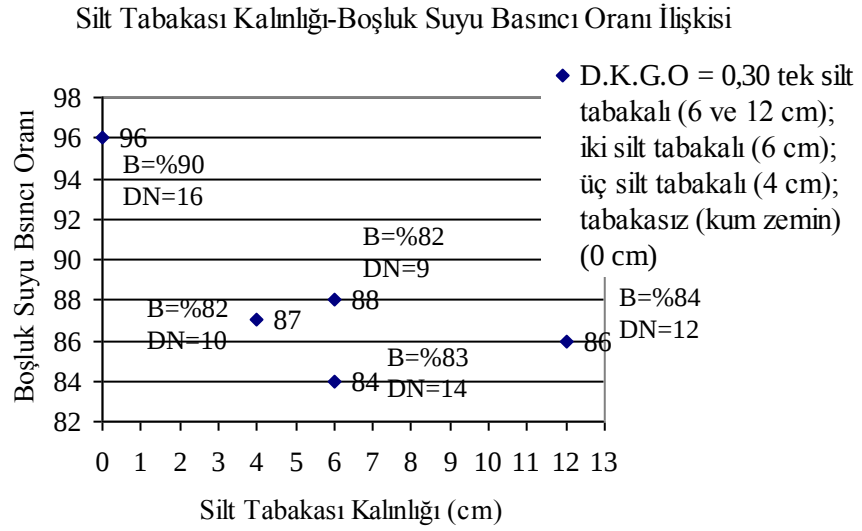


Şekil 4.22 Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) 0 cm), iki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm))

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken silt tabakası kalınlığının göçme anındaki çevrim sayısı ile değişimi görülmektedir (Şekil 4.23). Buna göre tabakasız olarak hazırlanan silt-kum zeminde göçme anındaki çevrim sayısı 34 olarak ölçülmüştür. Buna karşın tabaka sayısı artırılarak hazırlanan tek silt tabakalı ve silt tabakası kalınlığı sırasıyla 6 cm ve 12 cm olan silt-kum zeminde ölçülen çevrim sayısı değerleri 5 ve 4 dür. İki silt tabakalı ve her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olan deneyde ölçülen çevrim sayısı değeri 8 dir. Üç silt tabakalı ve her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olan silt-kum zeminde göçme anında ölçülen çevrim sayısı ise 4 olmuştur



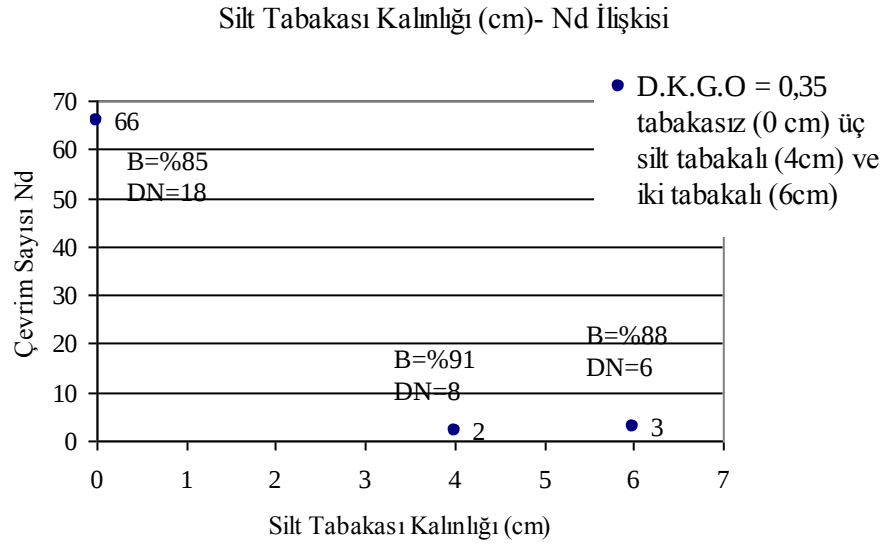
Şekil 4.23 Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) 0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı sırasıyla 6 ve 12 cm). İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm))



Şekil 4.24 Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) 0 cm), tek silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı sırasıyla 6 ve 12 cm). İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm))

Şekil 4.24 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken silt tabakası kalınlığının boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi görülmektedir. Buna göre tabakasız (sadece kum) zeminde boşluk suyu basıncı oranı değeri 96 olarak ölçülmüştür. Tek silt tabakalı zeminde silt tabaka kalınlıkları sırasıyla 6 ve 12 cm iken boşluk suyu basıncı oranı değerleri 86 ve 84 olarak ölçülmüştür. İki silt tabakalı silt-kum zeminde tabaka kalınlığı 6 cm iken ölçülen boşluk suyu basıncı değeri 88 dir. Üç silt tabakalı silt-kum zeminde tabaka kalınlığı 4 cm iken ölçülen boşluk suyu basıncı değeri ise 88 dir.

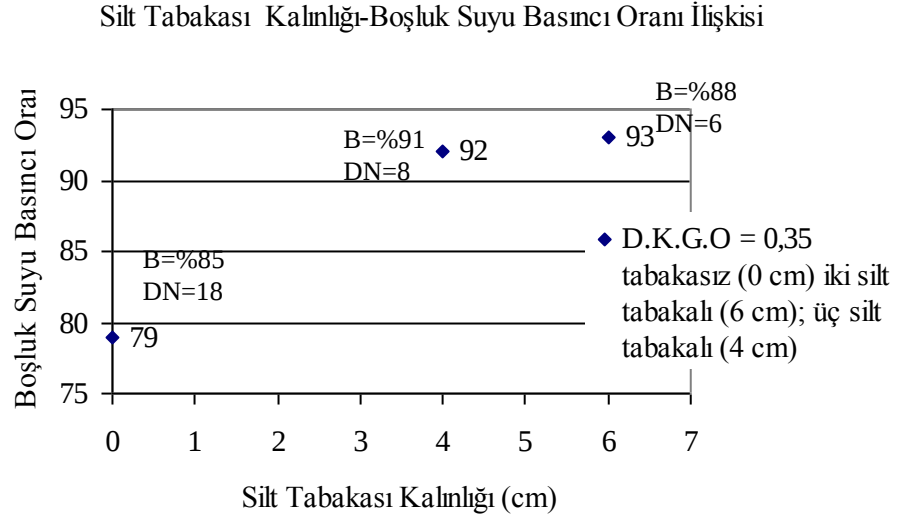
Şekil 4.25 de tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken silt tabakası kalınlığının göçme anındaki çevrim sayısı ile değişimi görülmektedir. Buna göre tabakasız (sadece kum) zeminde göçme anındaki çevrim sayısı 66 olarak ölçülmüştür. İki silt tabakalı zeminde tabaka kalınlığı 6 cm iken göçme anındaki çevrim sayısı 3 olarak ölçülmüştür. Üç silt tabakalı silt-kum zeminde tabaka kalınlığı 4 cm iken göçme anındaki çevrim sayısı değeri 2 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.25 Tabaka kalınlığı-göçme anı çevrim sayısı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) (0 cm), İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabaka kalınlığı 4 cm))

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 iken silt tabakası kalınlığının boşluk suyu basıncı ile değişimi görülmektedir. Buna göre tabakasız (sadece kum) zeminde boşluk suyu basıncı oranı 79 olarak ölçülmüştür.

İki silt tabakalı zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm iken boşluk suyu basıncı 93 olarak ölçülmüştür. Üç silt tabakalı silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm iken boşluk suyu basıncı değeri 92 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.26)



Şekil 4.26 Tabaka kalınlığı-boşluk suyu basıncı oranı değişimi ($I_p = \% 18$; tabakasız (kum zemin) (0 cm), İki silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm) üç silt tabakalı silt-kum zemin (her bir silt tabaka kalınlığı 4 cm))

4.11 Sonuç

Plastisite indisi % 18 olan silt numune ve kum numuneleriyle farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik deneyler yapılmıştır. Tek, iki, üç silt tabakalı ve tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan numunelerle değişik tiplerde deney setleri oluşturulmuştur. Hazırlanan bu deney setlerinden elde edilen sonuçlar hesaplanmış, boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ve birim kayma-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında silt tabakası kalınlığı ve sayısının göçme anındaki çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi araştırılmıştır.

Tek silt tabakalı (Ek.B) olarak hazırlanan silt-kum numunede artan kayma gerilmesi oranına bağlı olarak numune daha erken çevrim sayısında sıvılaşmaya deformasyon (şekil değiştirmelere) maruz kaldığı görülmüştür.

Yine iki silt tabakalı (Ek.C) olarak hazırlanan silt-kum numunede yapılan dinamik deneyler sonucunda her deneydeki tekrarlı kayma gerilmesi oranı artışı numuneyi daha hızlı bir biçimde sıvılaşmasına ve şekil değiştirmelere maruz bırakmıştır.

Üç silt tabakalı (Ek.D) olarak hazırlanan silt-kum numunede de her deneyde artırılan tekrarlı kayma gerilmesi oranı değerleri numunenin daha erken çevrim sayısında sıvılaşmasına ve şekil değiştirmesine neden olmuştur.

Buna paralel olarak iki silt tabakalı ve üç silt tabakalı olarak hazırlanan numunelerde artan silt tabakası sayısının, artan kayma gerilmesi oranlarına bağlı olarak üç silt tabakalı silt-kum zeminin, iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bu durum nedeni; artan silt tabakası sayısına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki zayıf bölgelerin numunenin artan kayma gerilmesi oranlarından daha çabuk etkilenmesine neden olmuş buda numuneyi daha erken çevrim sayısında sıvılaşmaya ve deformasyona maruz bırakmıştır.

Tabakasız (sadece kum) zeminlerde (Ek.E); artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları dikkate alındığında tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 ve 0,25 olan deneyler kendi arasında incelenmiştir. Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan silt-kum zemin gerekli doygunluk sağlanmadan kesme işlemine başlandığı için göçme anındaki çevrim sayısı değeri tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan silt-kum zemine göre daha yüksek bir değerdedir. Aynı durum tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 ve 0,35 olan silt-kum zeminlerde de gözlenmiştir. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyin yeterli doygunluk sağlanmadan kesme işlemine tabi tutulması neticesinde elde edilen göçme anındaki çevrim sayısının tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 olan deneyden daha fazla olmuştur.

Oysaki kesme işlemi öncesinde gerekli doygunluk sağlanmış olsaydı çevrim sayısı değerleri artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına bağlı olarak bir azalma gösterecektir.

Bununla birlikte deneylerde silt tabakası sayısının dinamik davranış üzerinde etkisi araştırılmış ve yukarıda bahsedilen artan silt tabakası sayına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki artış neticesinde numunenin artan dinamik kayma gerilmesi oranlarında daha hızlı sıvılaşma ve deformasyona uğradığı grafiksel olarak anlatılmış ve tablolaştırılmıştır.

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

Son olarak, deney sonrası silt numuneye ait deney sonu su muhtevaları ve likit limit değerleri karşılaştırılmak suretiyle numunenin doyurulması ve konsolidasyon esnasında numunenin kazandığı ve kaybettiği su miktarıyla ilgili olarak yorumlar yapılmış ve bu yorumlar tablo halinde verilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada plastisite indisi % 18 olan silt numuneler ve kum numuneler, laboratuvar ortamında relatif sıkılıkları $D_r = \% 51$ -%53 arasında olacak şekilde kuru yağmurlama yöntemiyle tabakalı olarak hazırlanmıştır. Tek, iki ve üç silt tabakalı ve tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan silt-kum zeminler farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik yüklemeye maruz bırakılarak dinamik davranışları incelenmiştir.

Tabakalı olarak hazırlanan silt-kum zemin numuneleri içi boş silindirik olarak hazırlanmıştır. Laboratuvar ortamında kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan zemin numunelerinin iç yarıçapı $r_i = 3,0$ cm, dış yarıçapı $r_d = 5,0$ cm ve yüksekliği $H = 20$ cm dir. Deneyler 0,1 Hz frekansta ve 100 kPa efektif konsolidasyon basıncı altında yapılmıştır. İzotropik konsolidasyonun tamamlanmasının ardından tabakalı silt-kum zemin numuneleri artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında göçme seviyesine ulaşmaya kadar yüklenmiş, numunelerde oluşan boşluk suyu basıncı ve kalıcı deformasyonlar incelenmiştir. Deney sonucunda birim kayma-çevrim sayısı, boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkileri incelenmiş ve grafik haline getirilmiştir. Ayrıca tabakalı silt-kum zeminlerinde silt tabakası sayısının ve kalınlığının göçme anındaki çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi incelemiştir. Deney sonrası silt numunelerinin suya doygunluğunu anlamak amacıyla deney sonrası silt numunelerin su muhtevaları silt numunenin likit limit değeriyle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bu çalışmada; tabakalı olarak hazırlanan numuneler sırasıyla tek, iki ve üç silt tabakalı olarak hazırlanmıştır. Tek tabaka halinde hazırlanan silt numunede, silt tabakası kalınlığı 6 cm ve 12 cm olacak şekilde hazırlanarak en kalın tabaka ve en ince tabaka üzerinde oluşacak dinamik burulmanın tabaka kalınlığından ne kadar etkileneceği incelenmiştir (Ek.B). Bu tabakalar arasına kum tabakaları yerleştirilerek, kum tabakalardan alt ve üst başlığa yakın olan tabakaların boyları sabit alınmak suretiyle alt ve üst drenaj yolunun sabit kalması sağlanmıştır. Kum numunenin

tabaka kalınlıkları hazırlanan silt numunede silt tabakası kalınlığına ve toplam numune yüksekliği olan 20 cm değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır. İki tabaka halinde hazırlanan toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olan numunede yine her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olacak biçimde hazırlanmış, alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numune ve toplam numune yüksekliği (20 cm) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır (Ek.C).

Üç tabaka halinde hazırlanan toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olan numunede, her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olacak şekilde hazırlanmış yine alt ve üst başlıkta yer alan kum tabakalarının yüksekliği silt numunenin ve toplam numune yüksekliği (20 cm.) değerine göre göreceli olarak ayarlanmıştır (Ek.D).

Son olarak tabakasız (sadece kum) olarak hazırlanan zemin numunesi farklı türde tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına tabi tutularak, elde edilen sonuçlar silt tabakalı zemin numuneleri ile karşılaştırılmıştır (Ek.E).

Tek silt tabakalı (Ek.B) olarak sırasıyla 6 cm ve 12 cm olarak hazırlanan zemin numuneleriyle her biri tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 ve 0,30 olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda birim kayma-çevrim sayısı, boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir.

Plastisite indisinin % 18 olan silt numunelerle hazırlanan tabaka kalınlığı 6 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olan iki deney yapılmıştır(Ek B.). Yapılan deneylerde gerilme oranı arttıkça aynı göçme seviyesine ulaşmak için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir. Tabaka kalınlığı 6 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları neticesinde numunenin boşluk suyu basıncı oranında artışlar gözlenmiştir. Laboratuvar ortamında $I_p =$ % 18 olan silt numunelerle yapılan, tabaka kalınlığı 12 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,20 ve 0,30 olan iki farklı deney yapılmıştır (Ek.B). Yapılan deneylerde gerilme oranı arttıkça aynı göçme seviyesine ulaşmak için daha düşük çevrim sayıları gerekmektedir (Şekil 4.3).

Tabaka kalınlığı 12 cm olan tek silt tabakalı silt-kum zeminlerde artan kayma gerilmesi oranları neticesinde boşluk suyu basıncı oranlarında artışlar gözlenmiştir.

6 cm ve 12 cm olarak hazırlanan tek silt tabakalı kum zeminlerde silt tabakası kalınlığındaki artışa, dolayısıyla kum numune yüksekliğindeki azalmaya bağlı olarak

aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında silt tabakası kalınlığındaki artış numunenin daha erken çevrim sayısında göçmesine neden olmaktadır. Aynı şekilde silt tabakası kalınlığındaki artışa bağlı olarak numunede aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranında boşluk suyu basıncı oranı değerinde de artış gözlenmiştir.

İki silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 52 - \% 53$ arasında değişen silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 6 cm olarak seçilmiştir (Ek.C). Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranı sırasıyla 0,15, 0,25, 0,30 ve 0,35 olacak şekilde 4 farklı deney yapılmış, artan tekrarlı kayma gerilmesi oranının numunenin boşluk suyu basıncı oranı ve birim kayma deformasyonundaki değişim araştırılmaya çalışılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış numunenin aynı göçme seviyesine ulaşmaya kadar daha erken çevrim sayısında deformasyona maruz kaldığını göstermektedir (Şekil 4.5). Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde arttırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncında artış gözlenmiştir (Şekil 4.6). Bu sonuçlar ışığında tabaka sayısındaki artışa bağlı olarak kum-silt ve silt-kum tabakaları arasındaki geçiş noktalarındaki zayıf bölgeler numunenin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında erken çevrim sayılarında daha hızlı sıvılaşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Üç silt tabakalı, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \% 51 - \% 53$ aralığında değişen silt-kum zeminde her bir silt tabakası kalınlığı 4 cm olarak seçilmiş ve toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır (Ek.D). Birim kayma-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde arttırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış numunenin aynı göçme seviyesine ulaşmaya kadar daha erken çevrim sayısında deformasyona maruz kaldığını göstermektedir (Şekil 4.7). Aynı şekilde boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisini gösteren grafikte tekrarlı kayma gerilmesi oranı her deneyde arttırılmak suretiyle 0,15 den 0,35 değerine çıkartılmıştır. Tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artış neticesinde numunenin boşluk suyu basıncında da artış gözlenmiştir (Şekil 4.8).

İki silt tabakalı ve üç silt tabakalı olarak hazırlanan numunelerde artan silt tabakası sayısının, artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarına bağlı olarak üç silt tabakalı silt-kum zeminin iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni; artan tabaka sayısına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki zayıf bölgelerin, numunenin artan kayma gerilmesi oranlarından daha çabuk etkilenmesine neden olmuş buda numuneyi daha erken çevrim sayısında sıvılaşmaya ve deformasyona maruz bırakmıştır.

Tabakasız olarak hazırlanan, kuru birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve relatif sıkılığı $D_r = \%51 - \%53$ arasında değişen kum numuneye her deneyde dinamik kayma gerilmesi oranı artacak şekilde sırasıyla 0,20, 0,25, 0,30 ve 0,35 olacak kayma gerilmesi uygulanmıştır (Ek.E). Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranındaki artışın tabakasız olarak hazırlanan kum numune üzerinde boşluk suyu basıncı oranı ve birim kayma deformasyonu değerlerinde ne tür bir değişim yapacağı araştırılmıştır.

Tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numunenin istenilen doygunluk düzeyine ulaşmadan kesme işlemine başlanmıştır. Bu nedenle tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan silt-kum zemin numunesi, tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan numuneden daha geç çevrim sayısında deformasyona uğramıştır. Oysaki laboratuvar koşullarında hazırlanan bu deneyde doygunluk sağlandıktan sonra kesme işlemine başlansaydı tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 den 0,25 değerine çıkartıldığında tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 iken elde edilen çevrim sayısından daha erken çevrim sayısında göçme deformasyonu gözlenmiş olacaktır. Bununla birlikte aynı çevrim sayısında tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,20 olan numunedeki boşluk suyu basıncı oranındaki artışın tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,25 olan numuneye göre daha fazla olmaktadır

Aynı durum tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 ve 0,35 olan deneylerde de gözlenmiştir. Buna göre tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyde doygunluk sağlanmadan kesme işlemine başlanmıştır. Bu durum numunenin tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,30 iken deformasyonun meydana gelmesi için gereken çevrim sayısından daha erken çevrim sayısında deformasyonuna izin vermemiştir.

Buna karşın bu deney doygunluk sağlandıktan sonra kesme işlemine başlansaydı; tekrarlı kayma gerilmesi oranı 0,35 olan deneyde göçme seviyesi değeri olarak belirlenen $\gamma = \pm \% 2,5$ birim kayma deformasyonu değerine daha erken çevrim sayısında ulaşılacaktır

Bununla birlikte deneylerde silt tabakası sayısının dinamik davranış üzerindeki etkisi araştırılmış ve artan silt tabaka sayına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki artış neticesinde numunenin artan dinamik kayma gerilmesi oranlarında ne tür bir dinamik davranış göstereceği araştırılmıştır.

Aynı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında silt tabakası kalınlığı ve sayısının göçme anındaki çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi incelenmiştir. Silt tabaka sayısındaki artışa ve buna bağlı olarak her bir kum tabakası kalınlığındaki azalma neticesinde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları dikkate alındığında genel olarak silt tabaka sayısındaki artış neticesinde silt-kum zeminin daha erken çevrim sayılarında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte iki ve üç silt tabakalı silt kum zeminde; üç silt tabakalı silt-kum zemin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında şekil değiştirmelere maruz kaldığı gözlenmiştir.

Ayrıca deney sonrası silt numuneye ait deney sonu su muhtevaları ve likit limit değerleri karşılaştırılmak suretiyle numunenin doygunluğu ve konsolidasyon esnasında numunenin kazandığı ve kaybettiği su miktarıyla ilgili olarak yorumlar yapılmış ve bu yorumlar tablo halinde verilmiştir.

Siltli numunelerle hazırlanan tabakalı zeminler ileride yapılacak olan siltli-killi ve killi-kumlu tabakalı zeminlerin dinamik davranışları hakkında fikir verecektir. İleride yapılacak daha detaylı ve kapsamlı çalışmalar neticesinde deprem bölgesinde bulunan tabakalı siltli kum ve siltli kil zeminlerde dinamik yükler etkisi altında oluşacak deformasyonlar ve sıvılaşma hakkında daha pozitif yaklaşımlarda bulunulabilecektir.

KAYNAKLAR

- Alhas, E.**, 1994. Siltli ve killi kumlarda sıvılaşma, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul
- Altun, S.**, 2003. Burulmalı kesme deney aleti ile zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi, *Doktora tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Amini, F. and Qi, G.Z.**, 2000. Liquefaction testing of stratified silty sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **126**, 208-217
- Ansal, A.M.**, 1981. Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989 Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, Deprem Araştırma Bülteni, **50**, 10-53
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, Journal of The Geotechnical Engineering Division, **115**, 968-983
- Castro, G.**, 1969 Liquefaction of sands, *PhD Thesis*, Harvard University, Cambridge, Massachusettes.
- Castro, G., Keller, T.O. and Boynton, S.S**, 1989, Re-evaluation of the lower San Fernando Dam-Report 1: Contract Report GL-89-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S.
- Castro, G., Poulos, S.J. France J.W. and Enos, J.L.**, 1982, Liquefaction induced by cyclic loading, Report By Geotechnical Engineers Inc. To the National Science Foundation, Washington D.C.
- Chang, N.Y.**, 1990. Influence of fines content and plasticity on earthquake induced soil liquefaction, Misc. Paper, GL-87-24, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Wicksburg, MS.
- Chaundlary, S.K., Kuwano J. Hashimoto S., Hayano Y. And Nakamura, Y.**, 2002 Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand, Soils And Foundations, **42**, 147-157
- Chen, Y.C., Ishibashi, I. And Jenkins, J.T.**, 1988. Dynamic shear modulus and fabric: part 1, depositional and induced anisotropy, Geotechnique, **38**, 25-32.
- Das, M.B.**, 1993. Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company. Boston.

- Das, M.B., Puri, V.K. and Prakash, S.** 1999, Liquefaction of silty soils, Proceedings of Second Earthquake Geotechnical Eng. Int. Conf. Lisbon, Portugal, 619-623
- Dyvik, R.** 1981. Strain and pore pressure behavior of fine grained soils subjected to cyclic shear loading, *PhD Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, UMI, Ann Arbor.
- El Hosri, M.S, Biarez, and Hicher, P.Y.,** 1984, Liquefaction characteristics of silty clay, Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng., Prentice Hall, NJ, 277-284.
- Erken, A.,** 1982 Killerin dinamik özellikleri üzerine frekansın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Erken, A. and Ansal, A.M.,** 1994 Liquefaction characteristics of undisturbed sands, Performance of Ground And Soil Structures, Thirteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Foundation Engineering, 165-170.
- Erken, A.,** 2001. The role of geotechnical factors on observed damage in Adapazarı, Proceedings of Fifteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering Sat. Conf. On Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes, İstanbul, Turkey, 29-32.
- Erten, D. and Maher, M.H.,** 1995. Cyclic undrained behavior of silty sand, Soil Dynamics And Earthquake Engineering, **14**, 115-123.
- Guo, T. and Prakash, S.,** 1999. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, Journal of Geotechnical Engineering And Geoenvironmental Engineering, **125**, 706-710.
- Hoeg, K. Dyvik R. AND Sandbaekken, G.,** 2000. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens, Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, **126**, 606-617.
- Hong, W.P. and Lade, P.V.,** 1989 Strain increment and stress directions in torsion shear tests, Journal of The Geotechnical Engineering Division, **115**, 1388-1401.
- Hussein, A.K.,** 1985 Undrained cyclic behavior of nonplastic silt, PhD Thesis, Cornell University, UMI, Ann Arbor.
- Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Yamamoto, Y., and Teruhisa, F.,** 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, Soils And Foundations, **39**, 45-58.
- Ishihara, K and Yasuda, S.,** 1975. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, Soils And Foundations., **15**, 45-59.
- Ishihara, K, Sodekawa, M ve Tanaka, Y.,** 1978. Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing fines, Dynamic Geotechnical Testing, **654**, 246-264.
- Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y., and Takahashi, Y.,** 1980. Cyclic strength characteristics of tailings materials, Soils And Foundations, **20**, 127-142.
- Ishihara, K., Yauda, S., Yokota, K.,** 1981. Cyclic strength of undisturbed mine tailings, Proc. Int. Conf. On Recent Advances in Geotechnical

- Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, 53-58.
- Ishihara, K.**, 1995. Earthquake Geotechnical Engineering Proc. of IS-Tokyo' 95 The First Int. Conf. On Earth. Geo. Eng., Rotterdam Balkema.
- Ishihara, K.**, 1996. Soil Behavior of Earthquake Geotechnics. Claredon Press, Oxford.
- Kaufman, L.P.**, 1981. Percentage silt content in sands and its effects on liquefaction potential, M.S. Thesis, University of Colorado, Denver
- Koester, J.P. and Tsuchida, T.**, 1988. Earthquake induced liquefaction of fine grained soils: some considerations from Japanese research, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Koester, J.P.**, 1992 Cyclic strengenth and pore pressure generation characteristics of fine-grained soils, *PhD Thesis*, University of Colorado at Boulder, UMI, Ann Arbor.
- Konrad, J.M. and Wagg, B.T.**, 1993. Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts, Journal of The GeotechnicalEngineering Division, **119**, 929-947.
- Lee, K.L. and Focht, J.A.**, 1975 Strength of clay subjected to cyclic loading, Marine Geotechology, **1**, 165-185
- Lee, K and Dass, W.C.**, 1993. An experimental study of granular packing structure changes under load, Powders and Grains, **93**, 17-22.
- Matsui, T. Ohara, H. And Ito, T.**, 1980. Cyclic stress strain history and shear characteristics of clay, Journal of The Geotechnical Engineering Division, **106**, 1101-1120
- Özy, R. Ve Erken, A.**, 2002 Killerde dinamik yüklerin hacim değişimine etkisi. IX. Ulusal Zemin Mekanîği ve Temel Mühendisliği Kongresi, AÜ, Eskişehir, 21-22 Ekim, s. 342-348.
- Poulos, S.J., Castro, G. And France, J.W.**, 1985. Liquefaction evaluation procedure, Journal of te Geotechnical Engineering Division, ASCE, **111**, 772-792
- Polito, C.P. and Martin, J.R.**, 2001. Effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands, Journal of Geotechnical Engineering, **127**, 408-415
- Prakash, S. And Sandoval, J.AÇ**, 1992. Liquefaction of low of low plasticity silts. Soil Dynamics And Earthquake Engineering., **11**, 373-379
- Puri, V.K.**, 1984 Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla UNI, Ann Arbor.
- Sandoval, S.A.**, 1989 Liquefaction and settlement characteristics of silt soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer J.**, 1976. Pore water pressure changes during liquefaction, Journal of Soil Mechanics And Foundation Eng. Div., ASCE, **102**, 323-347

- Shahnazari, H. And Towhata, I.,** 2002. Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationships of sand, *Soils and Foundations*, **42**, 105-119
- Tatsuoka, F., Muramatsu M. And Sasaki T.,** 1982. Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, **22**, 55-70
- Tatsuoka, F., Ochi K. Fujii S., an Okamoto, M.,** 1986. Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, **26**, 23-41
- Tatsuoka, F., Sonoda S., ara, K., Fukushima, S.and Pradhan T.B.S.,** 1986. Failure and deformation of sand in torsional shear, *Soils and Foundations*, **26**, 79-97
- Terauchi, T., Altun, S., Erken, A. ve Yasuda, S.,** 1998. Burulmalı dinamik deney sistemiyle sıvılaşma deneyleri, VII. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, YTÜ, İstanbul, 22-23 Ekim, s. 584-590.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.,** 1948 *Soil Mechanics in Engineering practice*, John-Wiley and Sons.
- Usaborisut, P., Koike, M., Bahalayodhin, B., Niyamapa, T. and Yoda, A., 2001 Cyclic torsional shear loading test for an unsaturated hollowed specimen using Bangkok clayey soil, *Journal of Terramechanics*, **38**, 71-87
- Wagg, B.T.,** 1990. Undrained behavior of clay-silt mixtures during cyclic loading, *PhD Thesis*, University of Waterloo, UMI, Ann Arbor.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.,** 1998. Steady state concept and static liquefaction of silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **124**, 868-877
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.,** 1999. Experiments and modelling of silty sands susceptible to soil liquefaction, *Mech. Of Cohesive-Frictional Mat.*, **4**, 545-564
- Yamamuro, J.A. and Covert, K.M.,** 2001. Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **127**, 314-324
- Yoshimine, M., Özay R., Sezen A. and Ansal, A.M.,** 1999 Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus, *Soils and Foundations*, **39**, 131-136
- Zhu, R, and Law, K.T.,** 1988, Liquefaction potential of silt, *Proceedings of Ninth Int. Conf. On Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, pp.237-242

EKLER

EK A KULLANILAN DENEY ALETLERİNİN BÖLÜMLERİ

EK B TEK SİLT TABAKALI KUMLU ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ

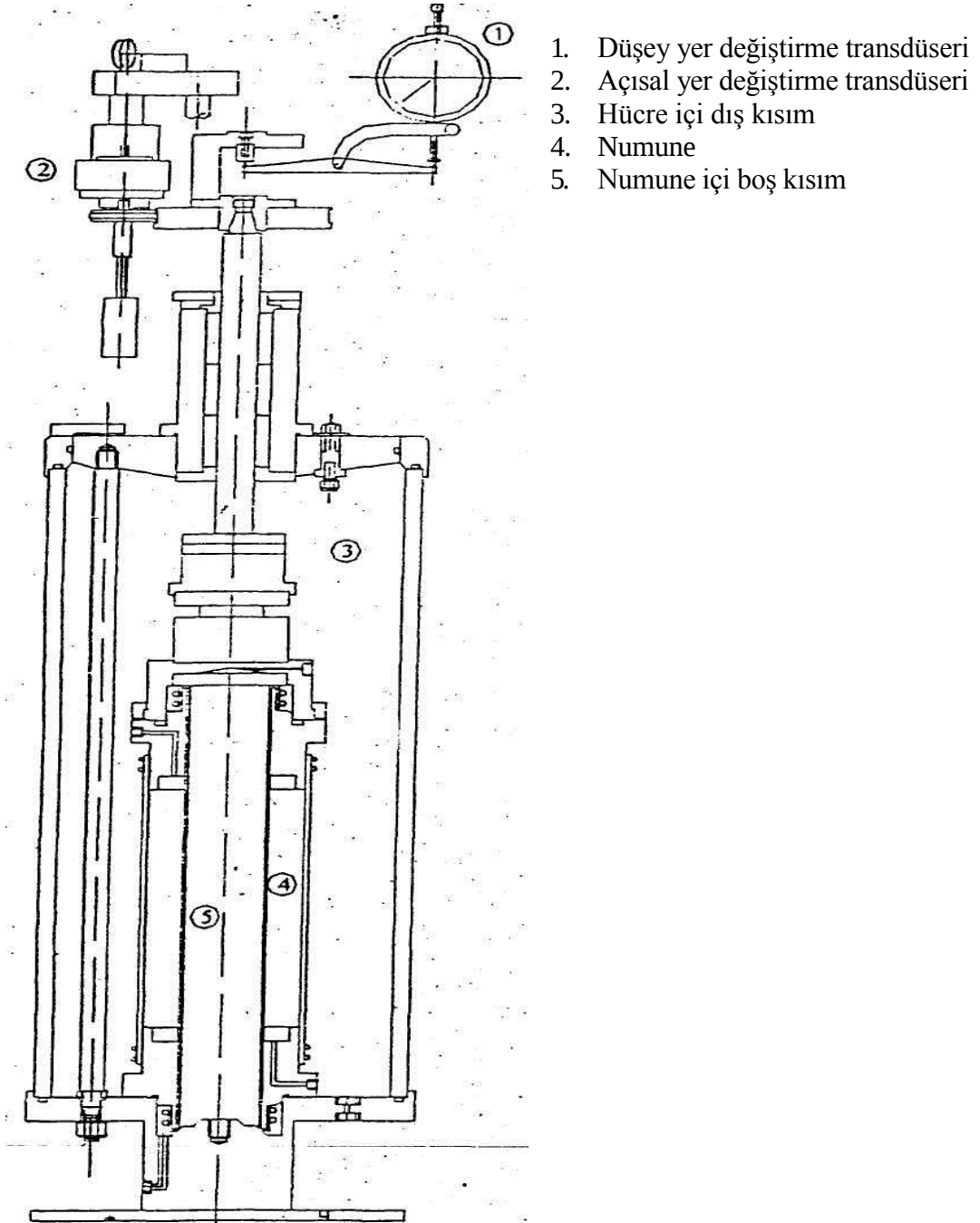
EK C İKİ SİLT TABAKALI KUMLU ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ

EK D ÜÇ SİLT TABAKALI KUMLU ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ

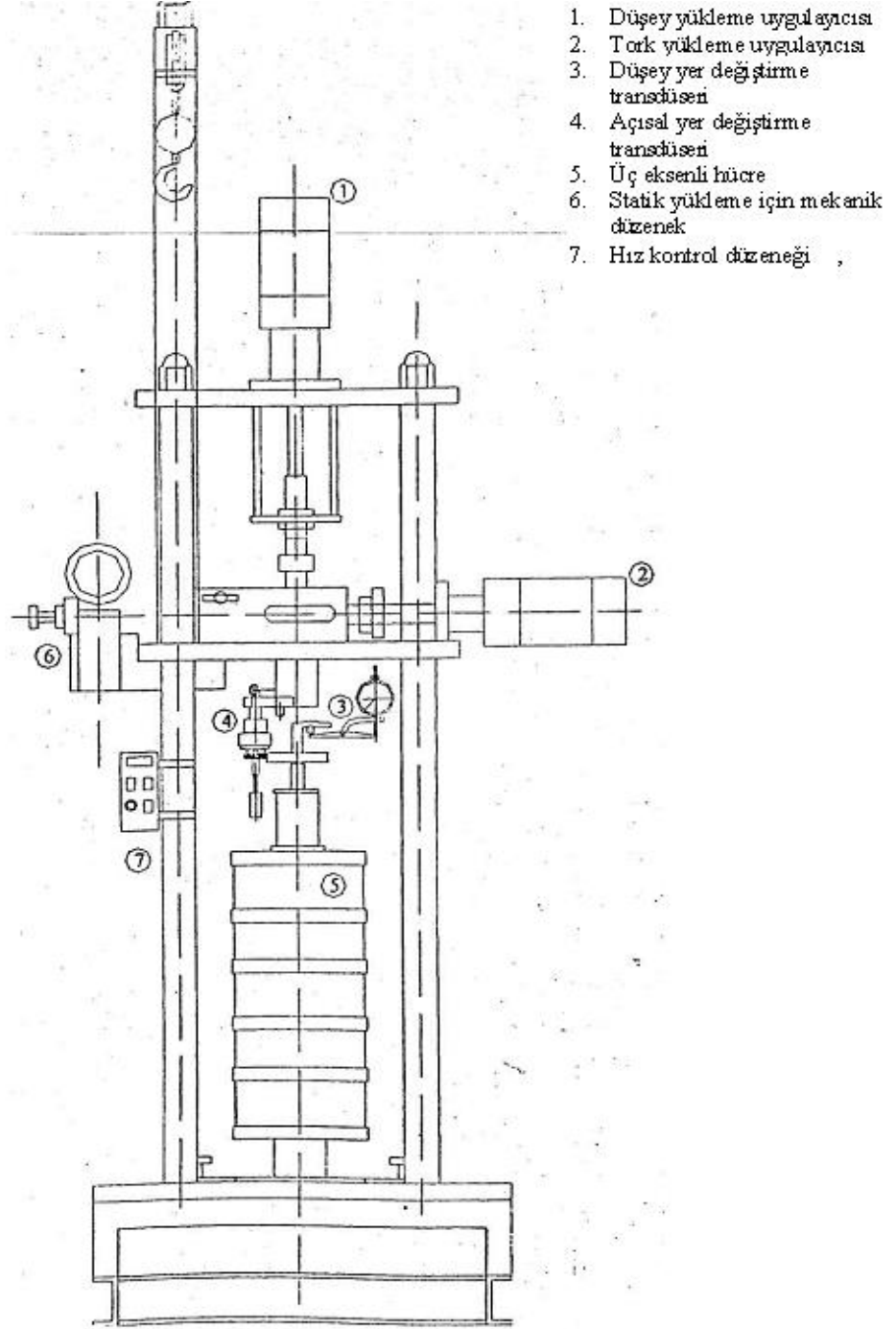
EK E TABAKASIZ (SADECE KUM) ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ

EK F GENEL TABLO

EK A KULLANILAN DENEY ALETLERİNİN BÖLÜMLERİ

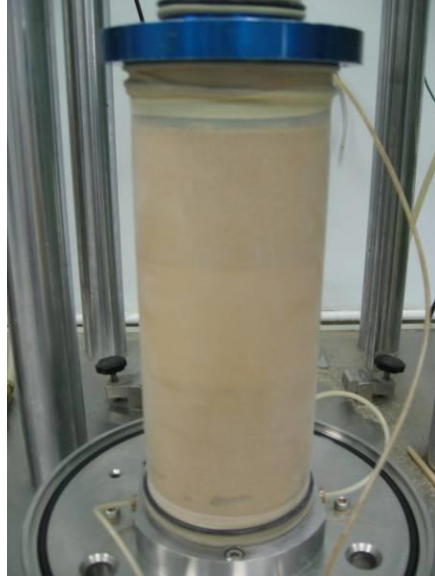


Şekil A1 Burulmalı kesme deney aletinde numune düşey kesiti ve ölçüm saatleri



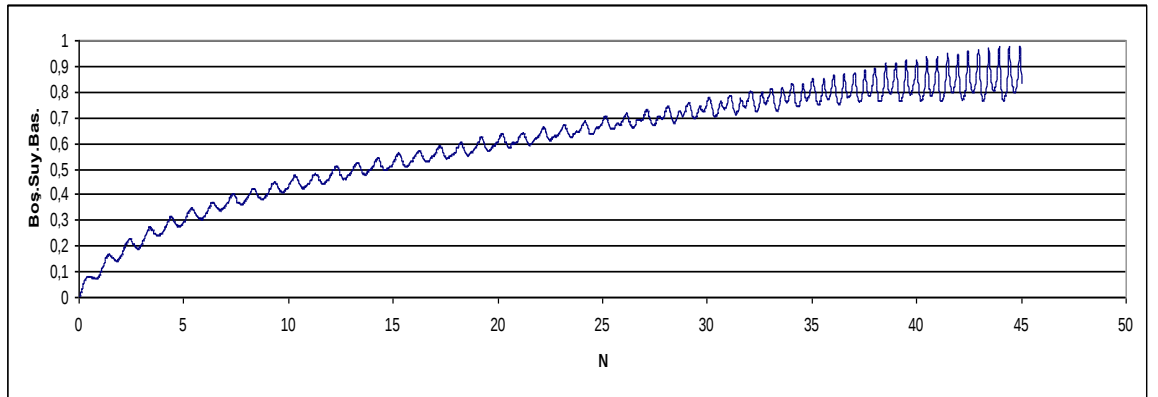
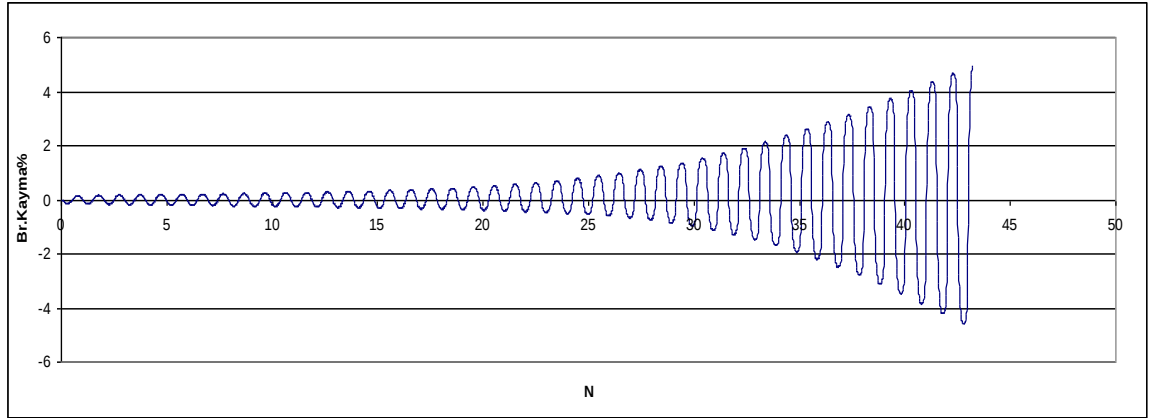
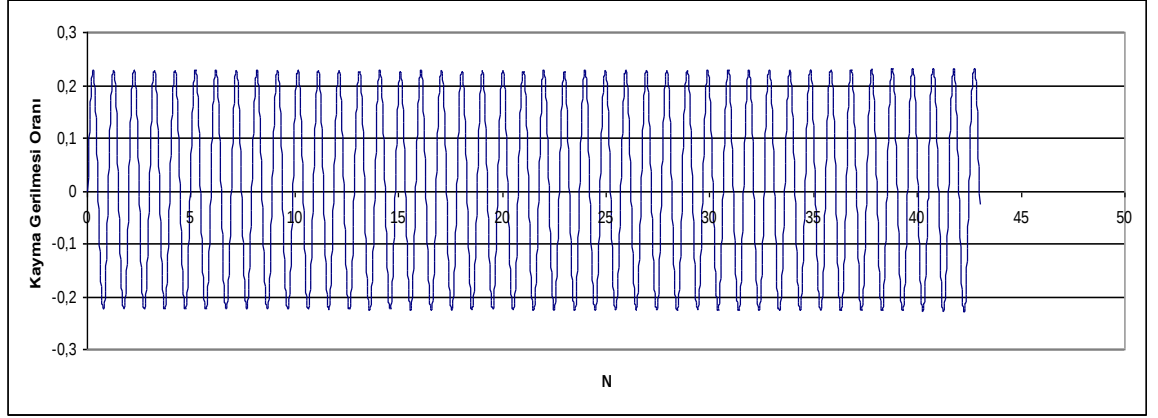
Şekil A2. Burulmalı kesme deney aletinde numunenin yerleştirildiği hücre ve yükleme düzenek

EK B TEK SİLT TABAKALI KUMLU ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ



Şekil B1 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:13 Silt tabakası kalınlığı 6cm)

26-06-2005 tarihinde 6 cm (1) silt tabakalı $I_p = 18\%$ olan silt numuneyle yapılan
dinamik deney $D.K.G.O = 0,22$ $\gamma_{kc} = 16,06 \text{ kN/m}^3$

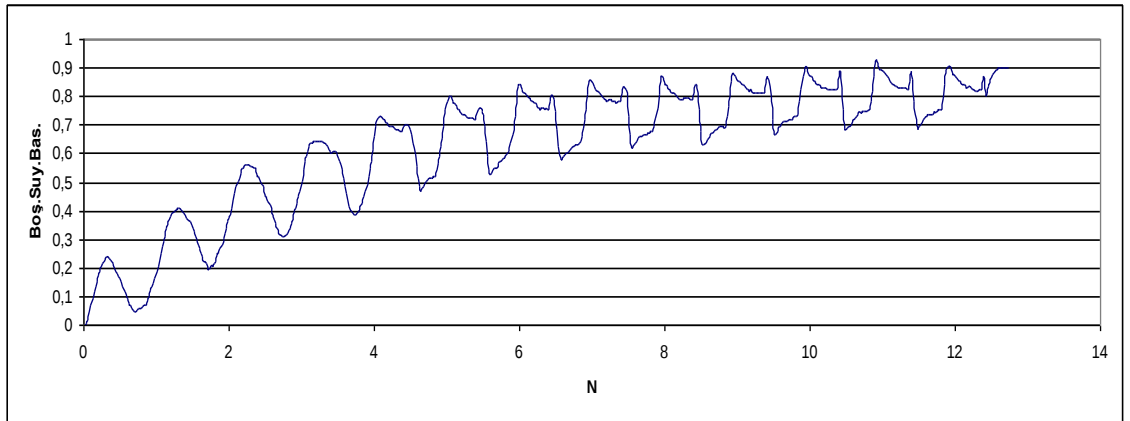
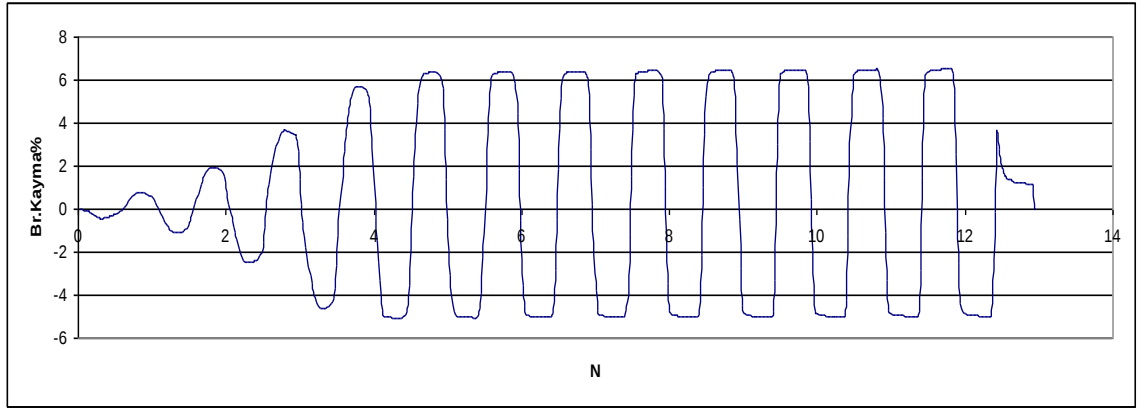
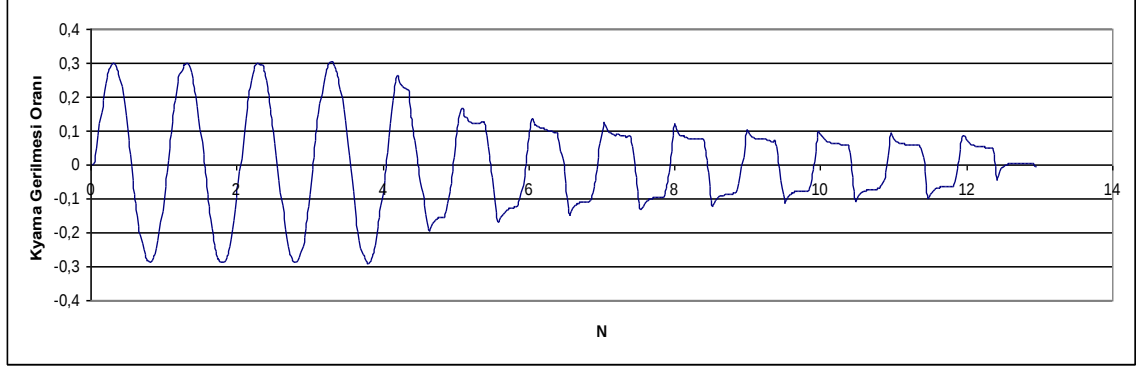


Şekil B2 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı,
birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt
tabakası kalınlığı 6cm, D.K.G.O=0,20)



Şekil B3 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:14 Silt tabakası kalınlığı 6cm)

29-06-2005 tarihinde 6 cm (1) silt tabakalı düşük $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,30 $\gamma_{kc}=16,05 \text{ kN/m}^3$

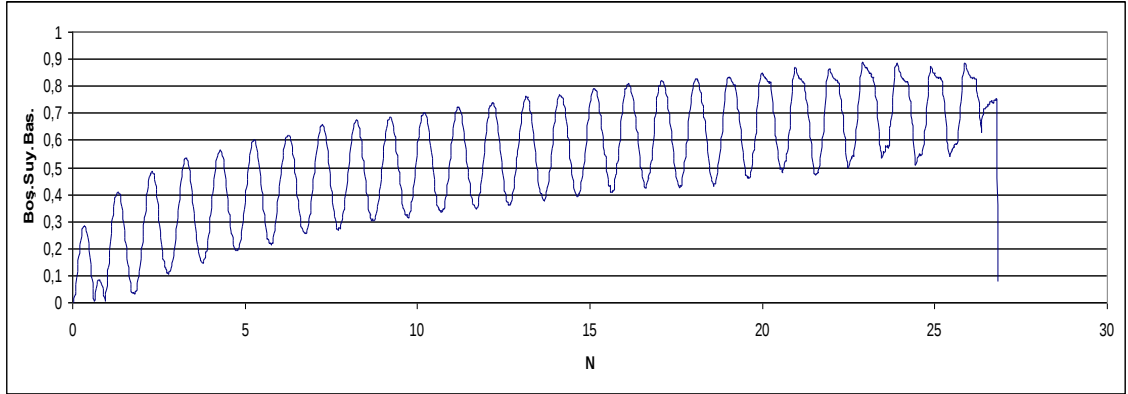
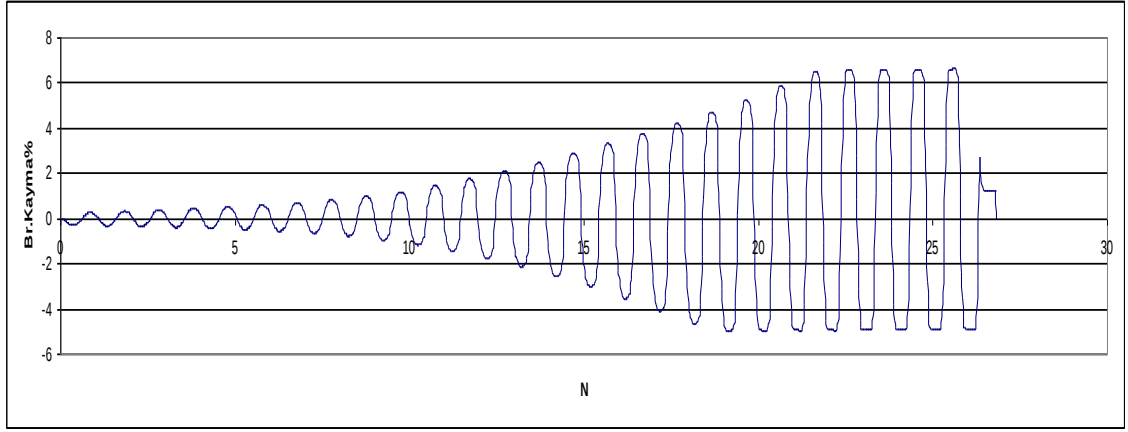
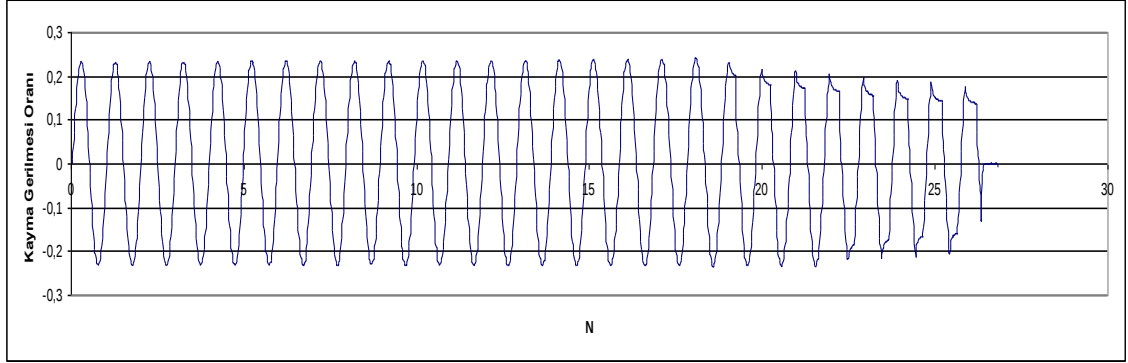


Şekil B4 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı 6cm D.K.G.O=0,30)



Şekil B5 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:11 Silt tabakası kalınlığı 12 cm)

21-06-2005 tarihinde 12 cm (1) silt tabakalı $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,22 $\gamma_{kc} = 16,06 \text{ kN/m}^3$

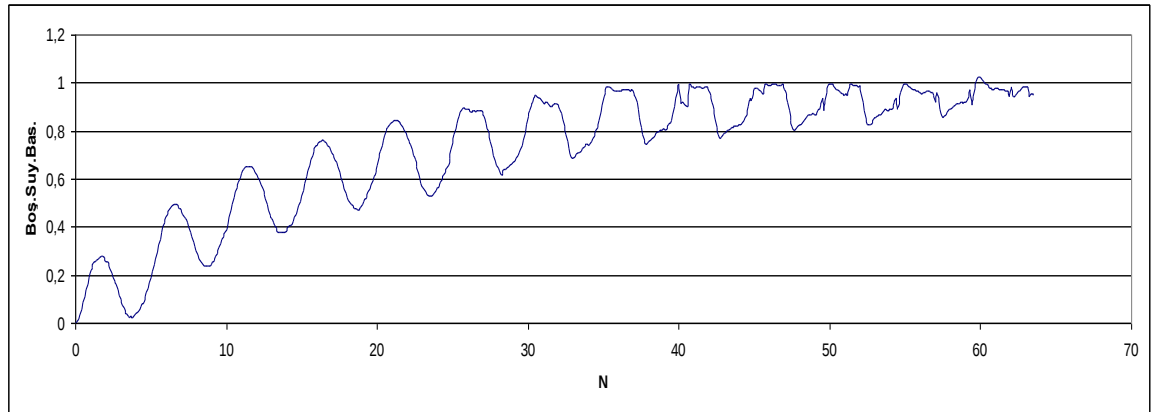
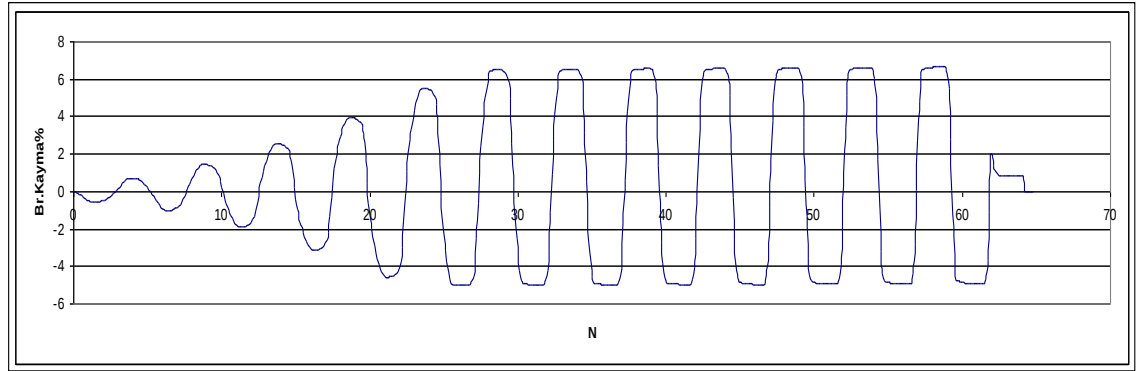
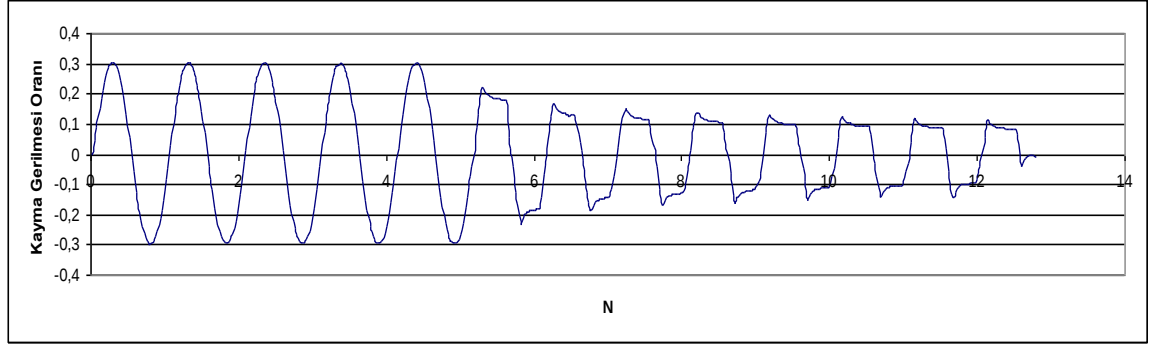


Şekil B6 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oarnı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,20)



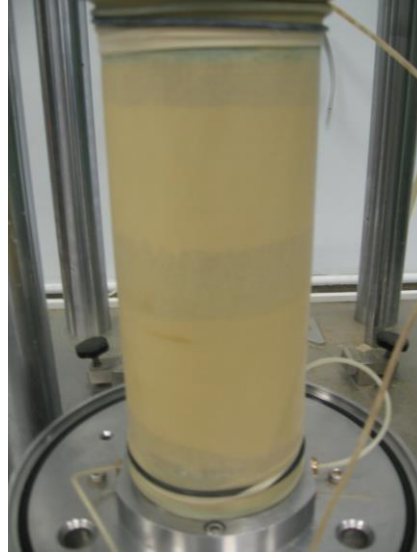
Şekil B7 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:12 Silt tabakası kalınlığı 12 cm)

23-06-2005 tarihinde 12 cm (1) silt tabakalı $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan
dinamik deney $D.K.G.O = 0,30$ $\gamma_{kc} = 16,05 \text{ kN/m}^3$



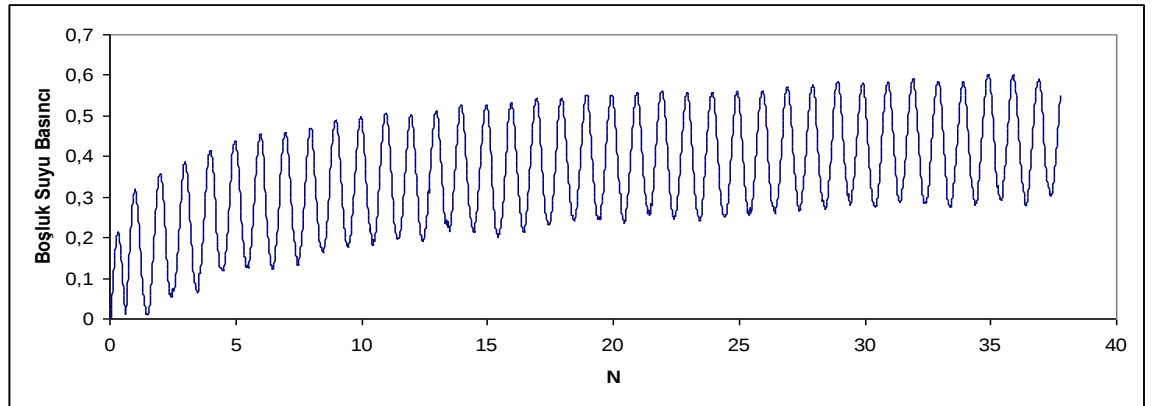
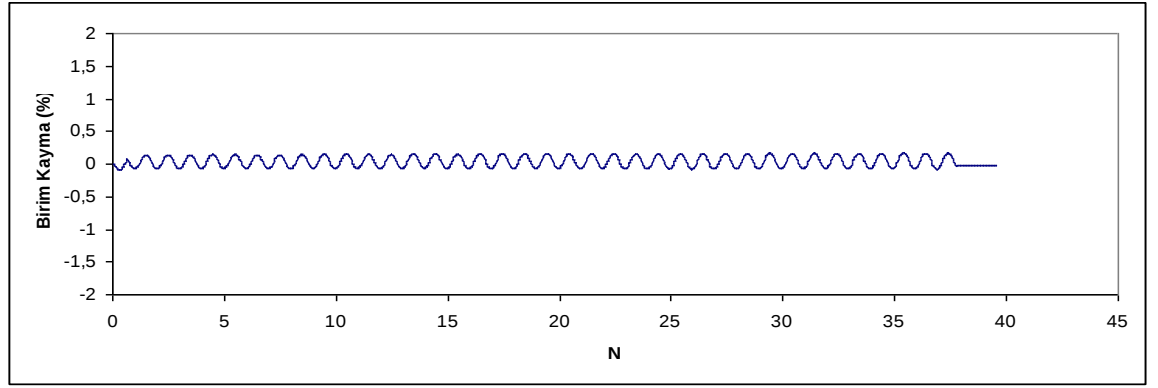
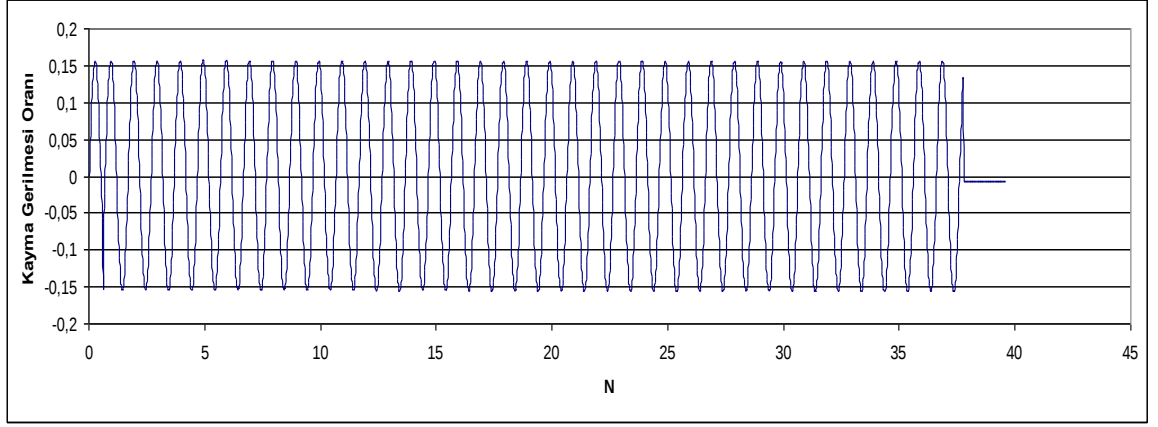
Şekil B8 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı,
birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Silt
tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,30)

EK C İKİ SİLT TABAKALI KUMLU ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ



Şekil C1 Tek silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:3 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

02-06-2005 tarihinde 6+6=12 cm (2) silt tabakalı $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney sonuçları $D.K.G.O = 0,15$ $\gamma_{kc}=16,06 \text{ kN/m}^3$

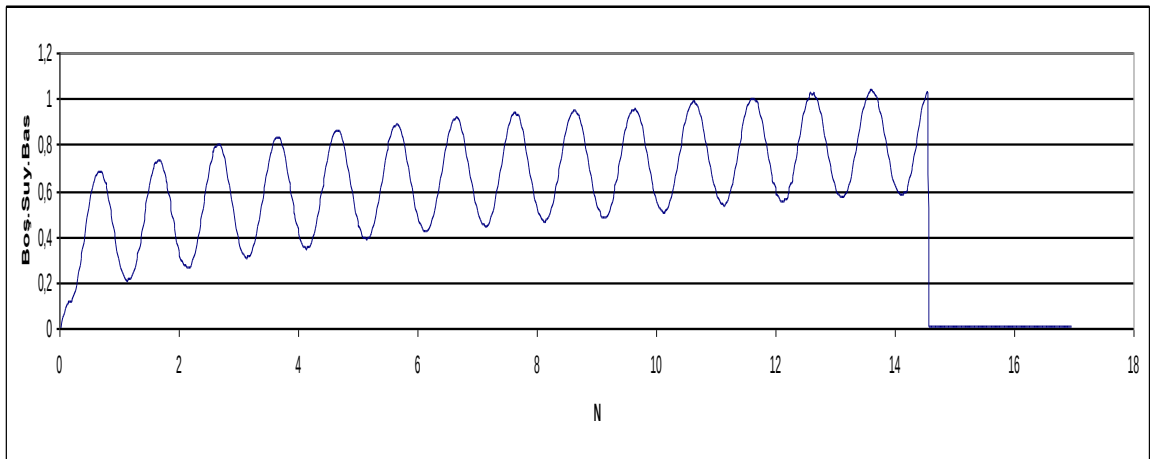
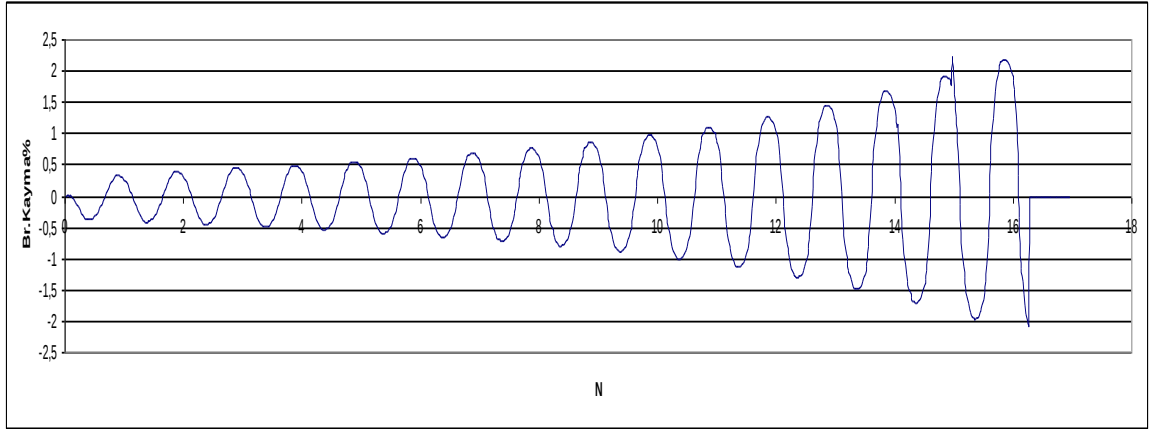
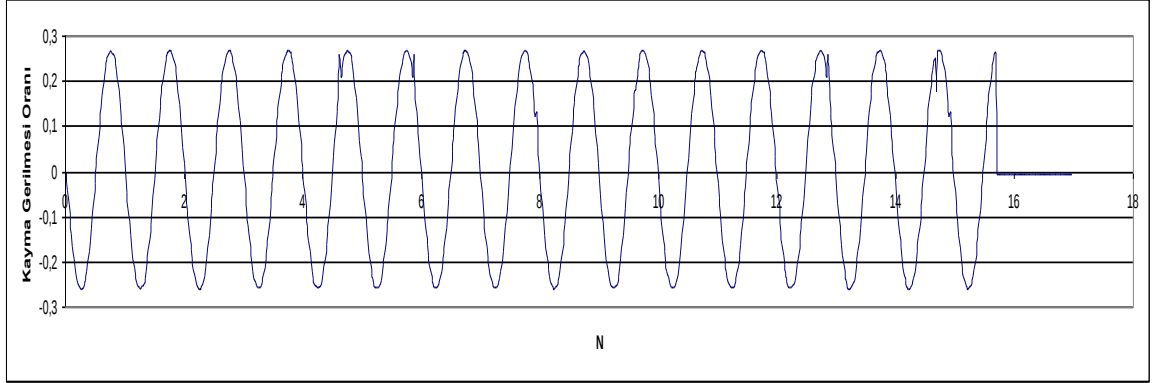


Şekil C2 İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,15)

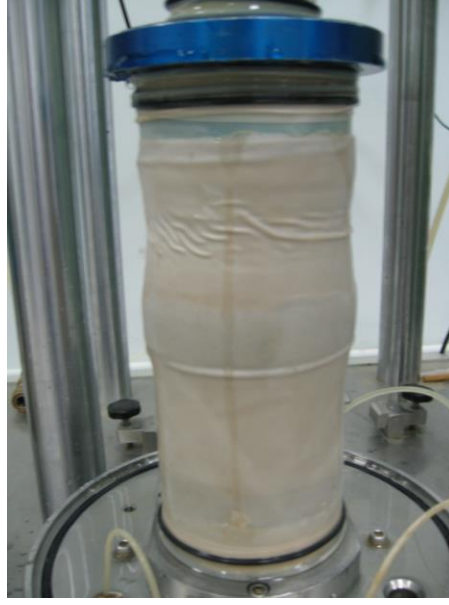


Şekil C3 İki silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:5 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

06-06-2005 tarihinde tabakalı (6+6=12cm) (2) $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney sonuçları $D.K.G.O=0,25$ $\gamma_{kc}=16,07 \text{ kN/m}^3$

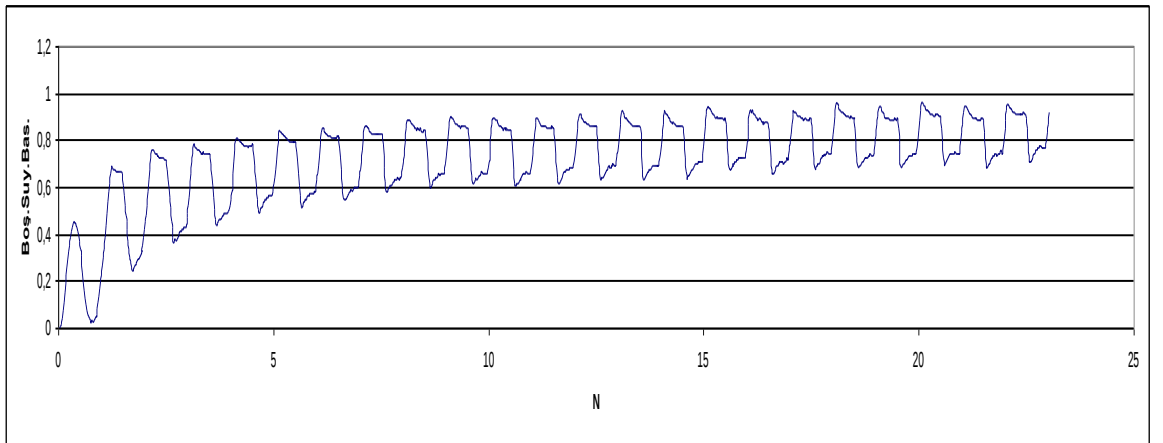
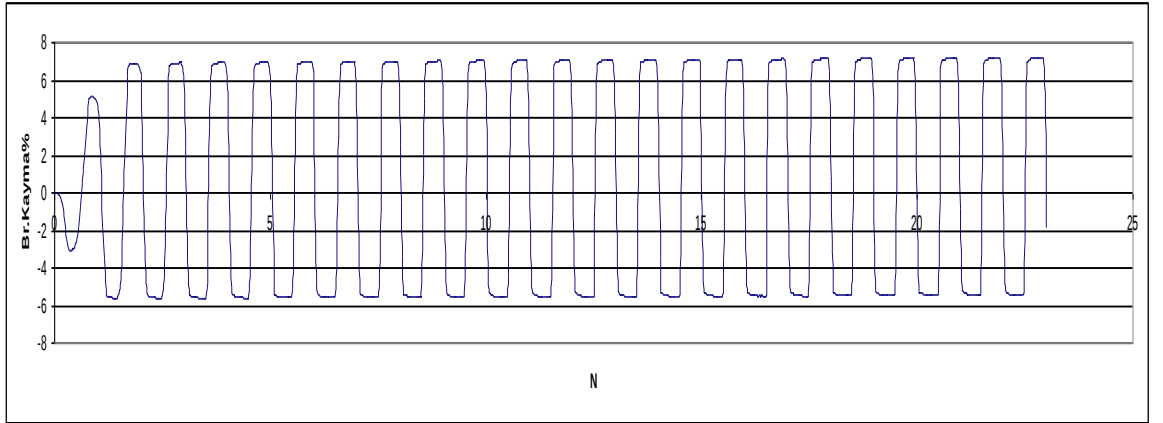
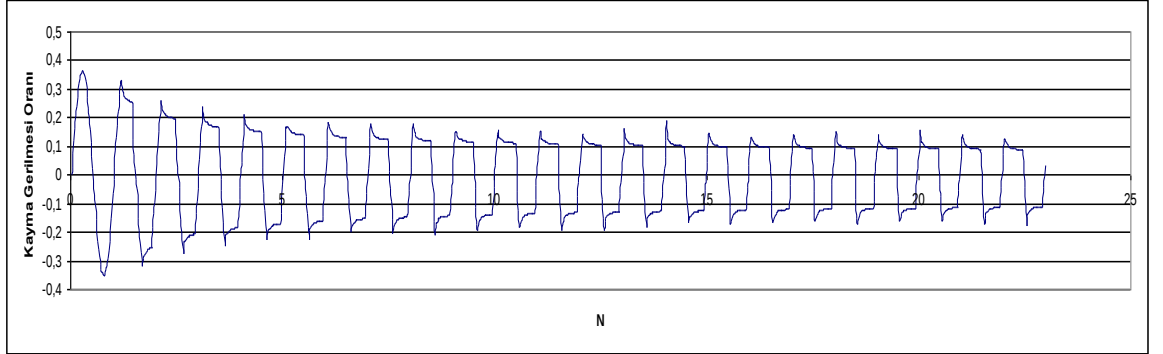


Şekil C4 İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,25)



Şekil C5 İki silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:6 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

09-06-2005 tarihinde 6+6=12 cm (2) silt tabakalı $I_p=\% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney $D.K.G.O=0,30$ $\gamma_{kc}=16,07 \text{ kN/m}^3$

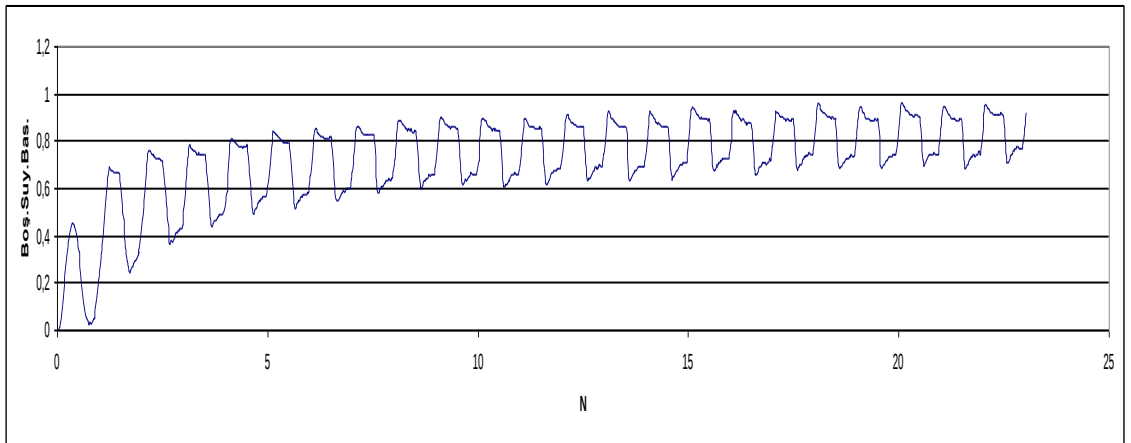
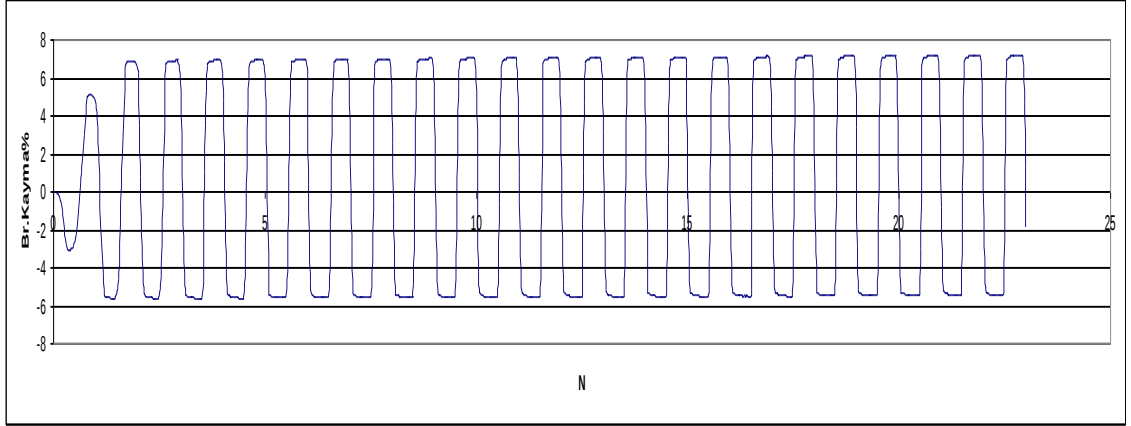
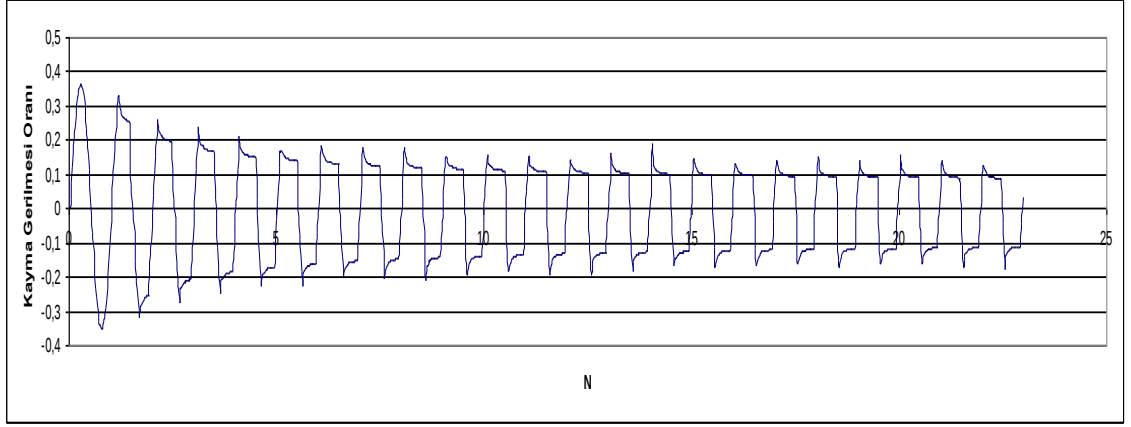


Şekil C6 İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı-birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,30)



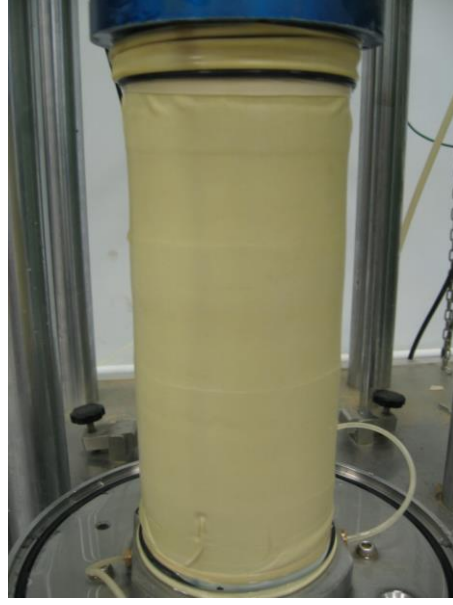
Şekil C7 İki silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:9 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

09-06-2005 tarihinde 6+6=12 cm (2) silt tabakalı $I_p=\% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney $D.K.G.O=0,35$ $\gamma_{kc}=16,07 \text{ kN/m}^3$



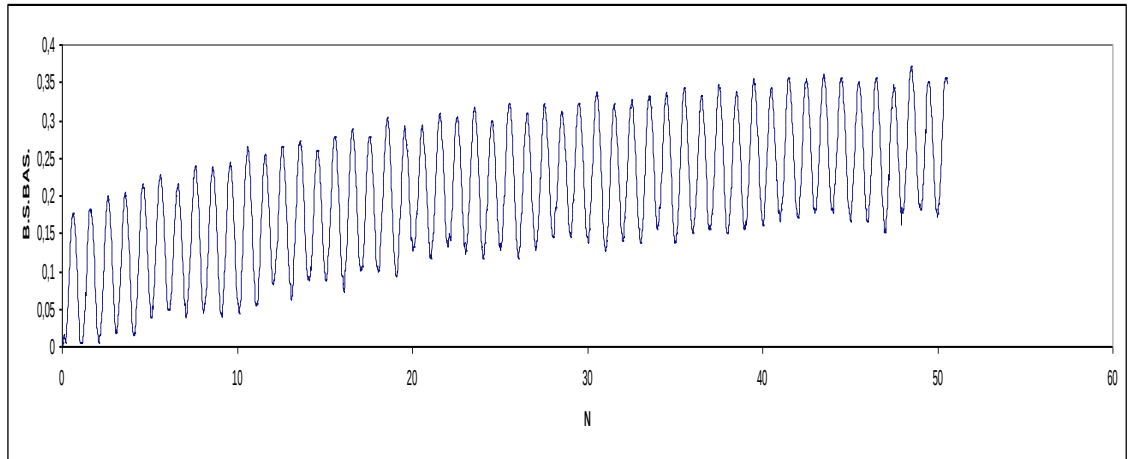
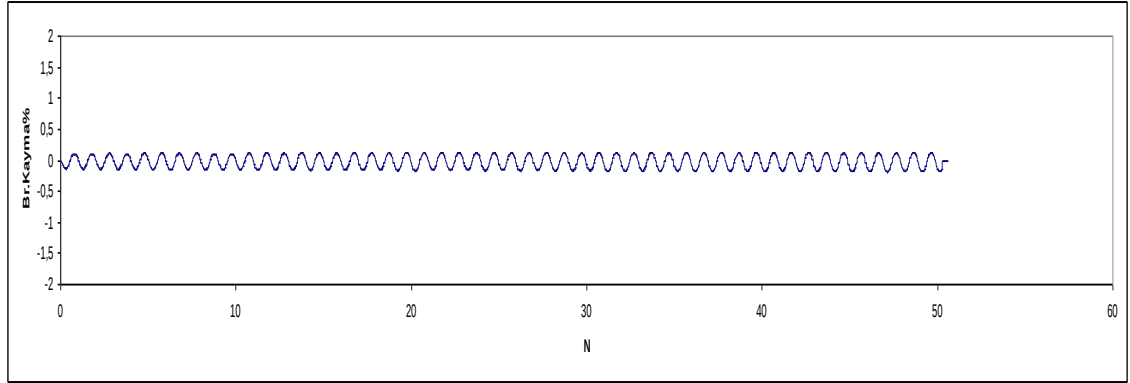
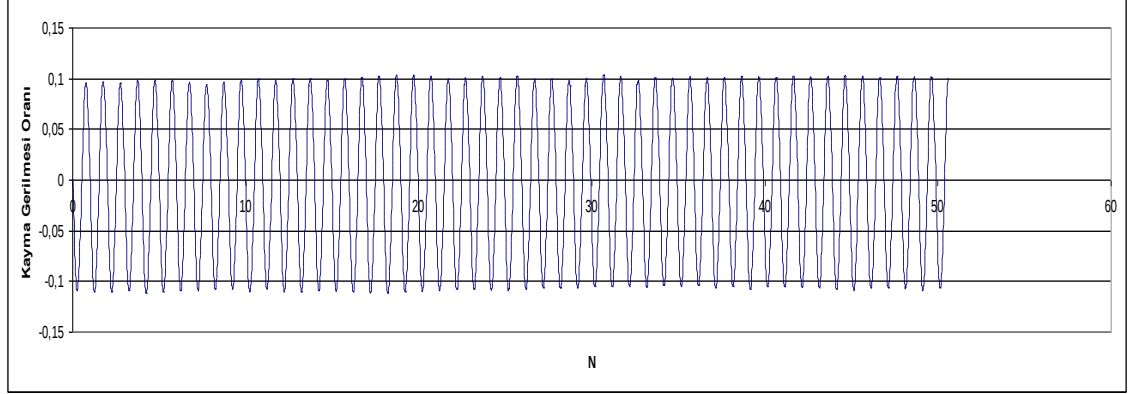
Şekil C8 İki silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,35)

EK D ÜÇ SİLT TABAKALI KUMLU ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ



Şekil D1 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:4 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

04-06-2005 Tarihinde 4+4+4=12 cm (3) silt tabakalı $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney: $D.K.G.O=0,11$ $\gamma_{kc}=16,11 \text{ kN/m}^3$

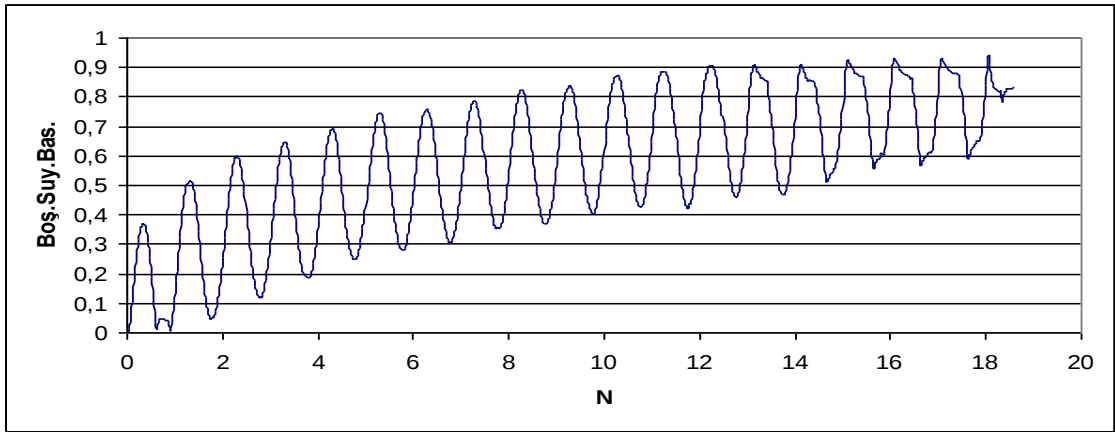
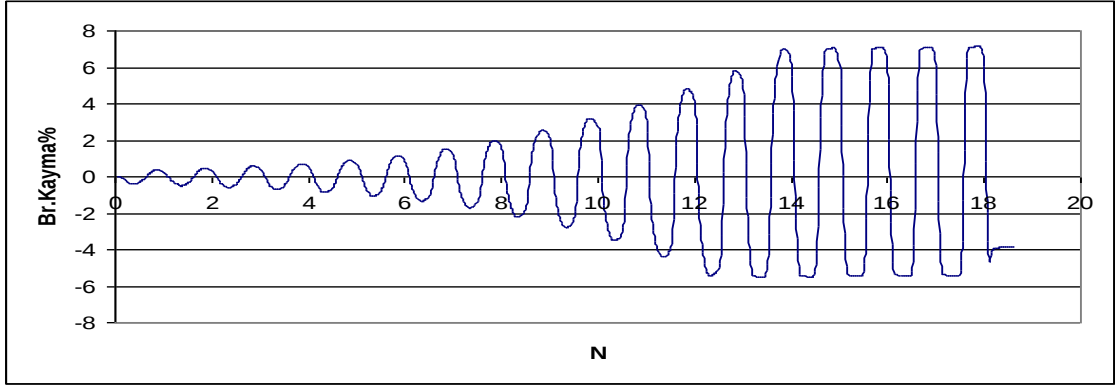
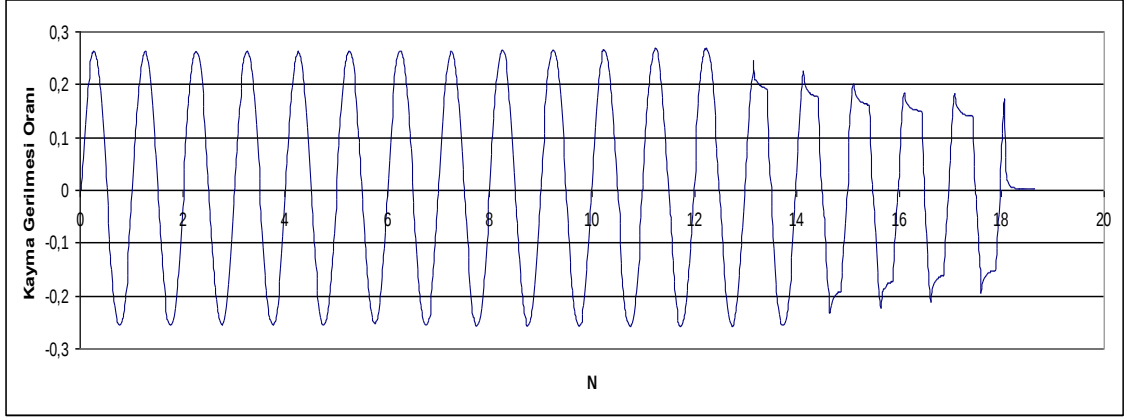


Şekil D2 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,15)



Şekil D3 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:7 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

11-06-2005 tarihinde 4+4+4=12 cm (3) silt tabakalı $I_p = \%18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,25 $\gamma_{kc}=16,12 \text{ kN/m}^3$

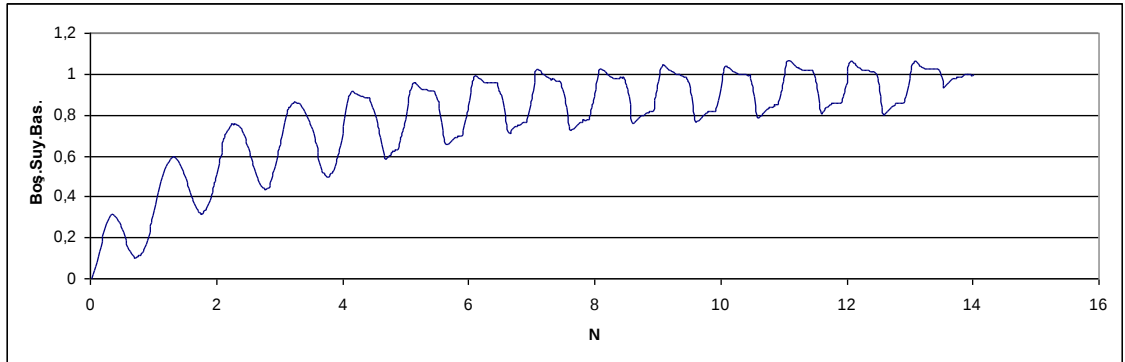
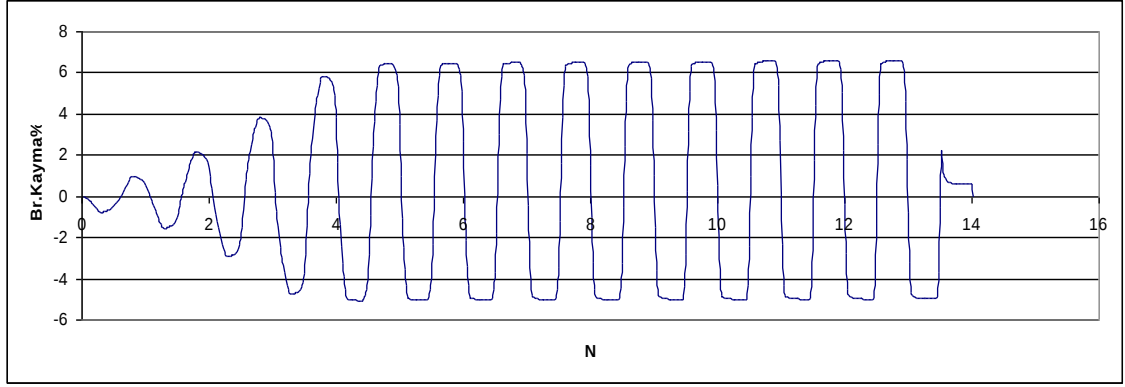
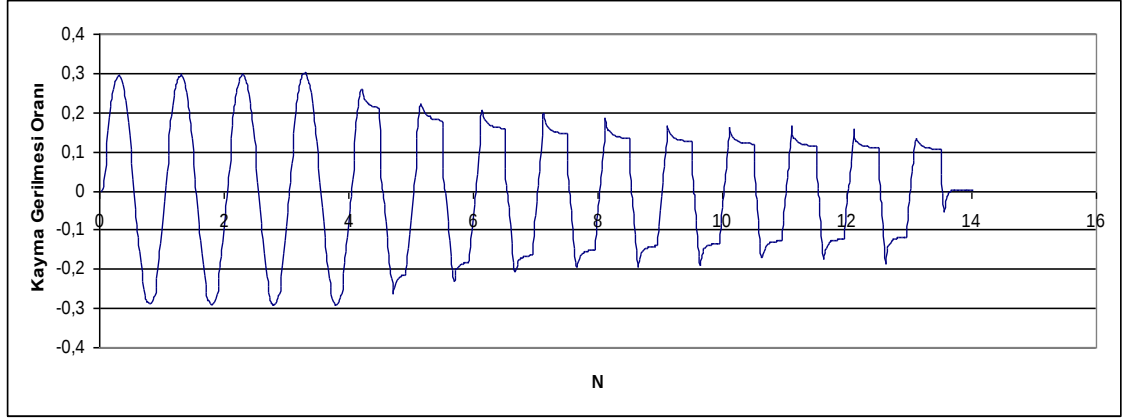


Şekil D4 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,25)



Şekil D5 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:10 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

19-06-2005 tarihinde yapılan 4+4+4=12 cm (3) silt tabakalı $I_p = \% 18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,30 $\gamma_{kc}=16,11 \text{ kN/m}^3$

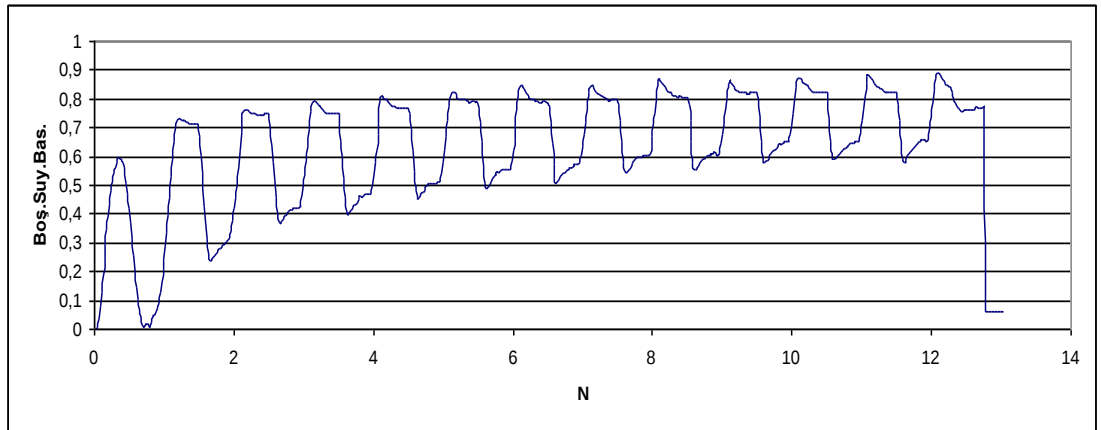
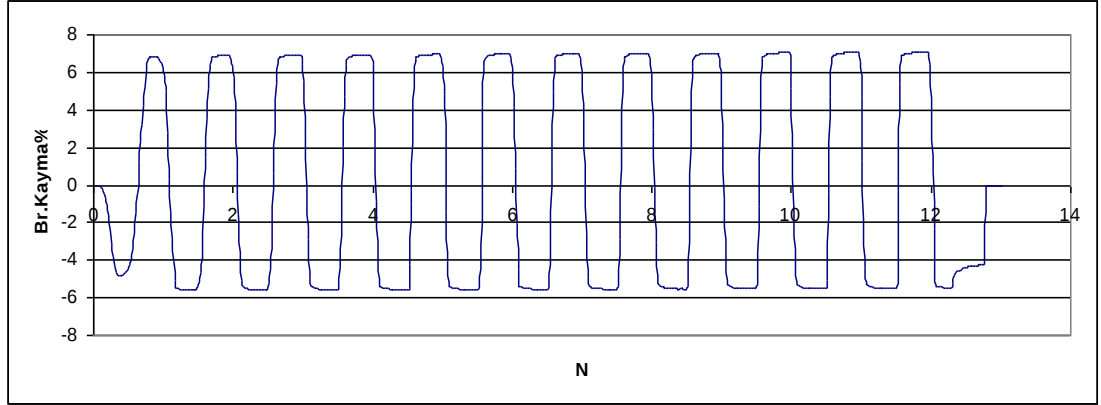
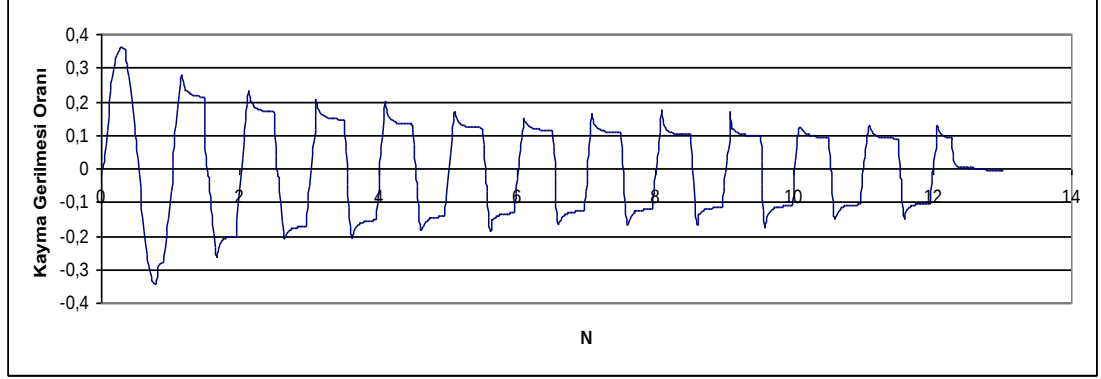


Şekil D6 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,30)



Şekil D7 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait fotoğraflar (Deney No:8 Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm)

13-06-2005 tarihinde 4+4+4= 12 cm (3) silt tabakalı $I_p = \%18$ olan silt numuneyle yapılan dinamik deney $D.K.G.O = 0,35$ $\gamma_{kc}=16,12 \text{ kN/m}^3$



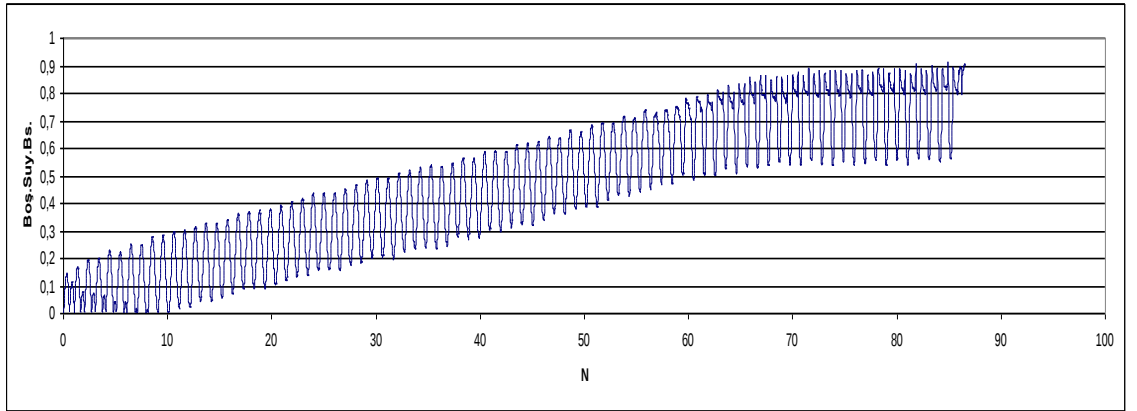
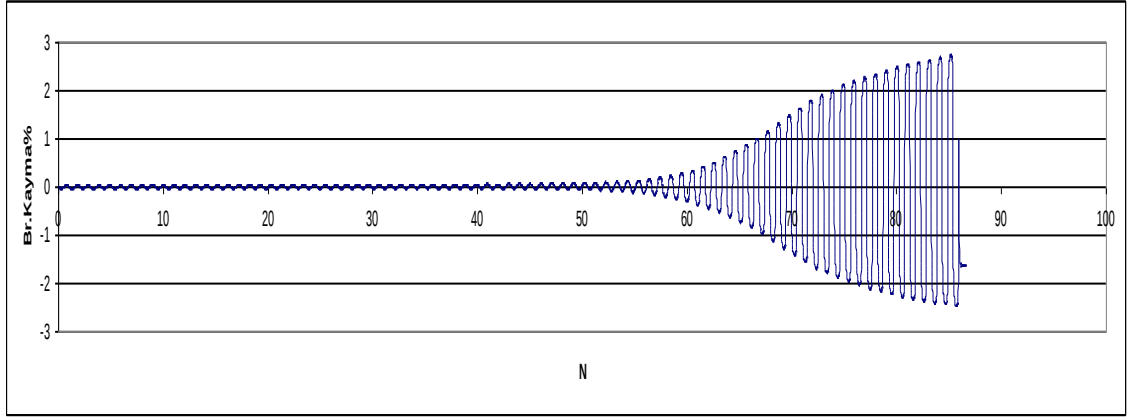
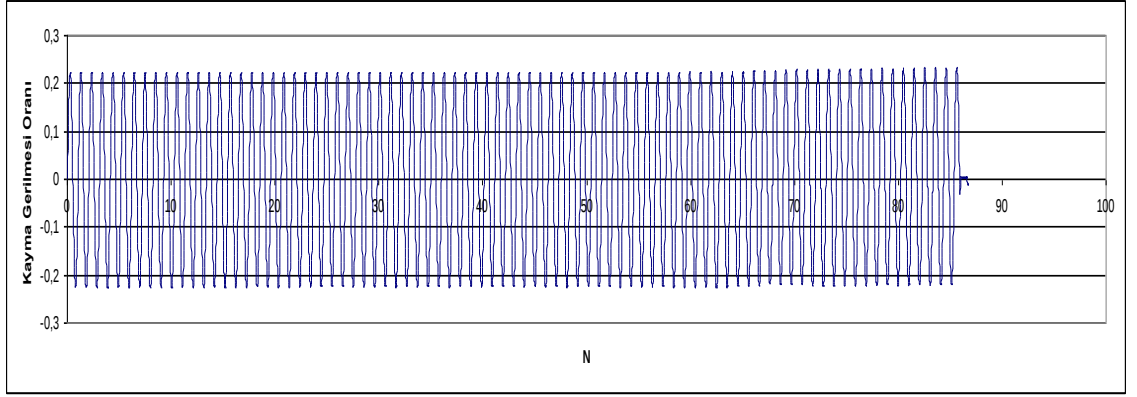
Şekil D8 Üç silt tabakalı kumlu zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (Toplam silt tabakası kalınlığı 12 cm D.K.G.O= 0,35)

EK E TABAKASIZ (SADECE KUM) ZEMİNLERİN GRAFİKLERİ



Şekil E1 Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:15)

30-06-2005 tarihinde kum zeminde yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,21 $\gamma_{kc}=$
16,03 kN/m³

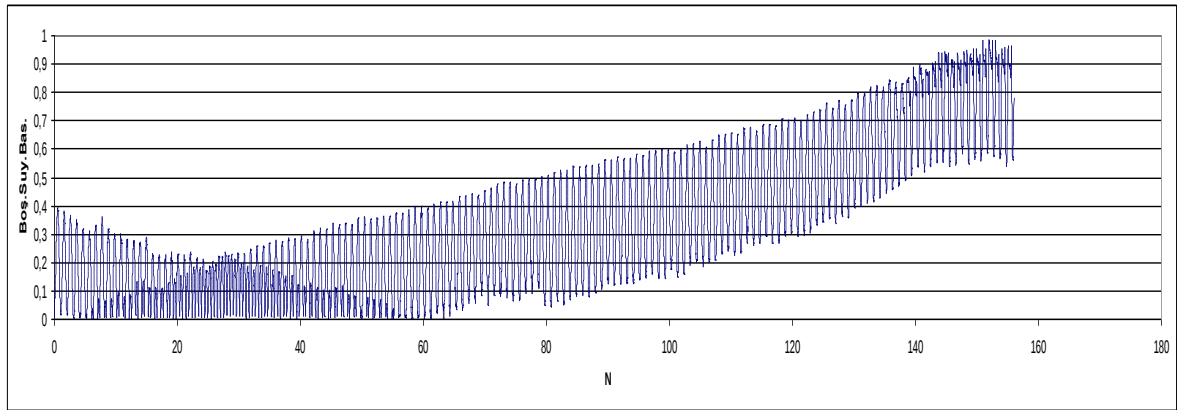
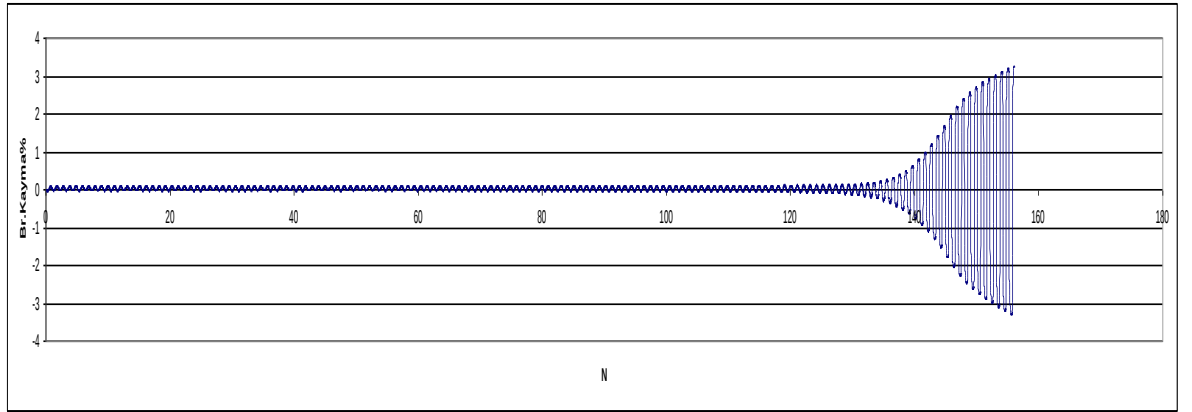
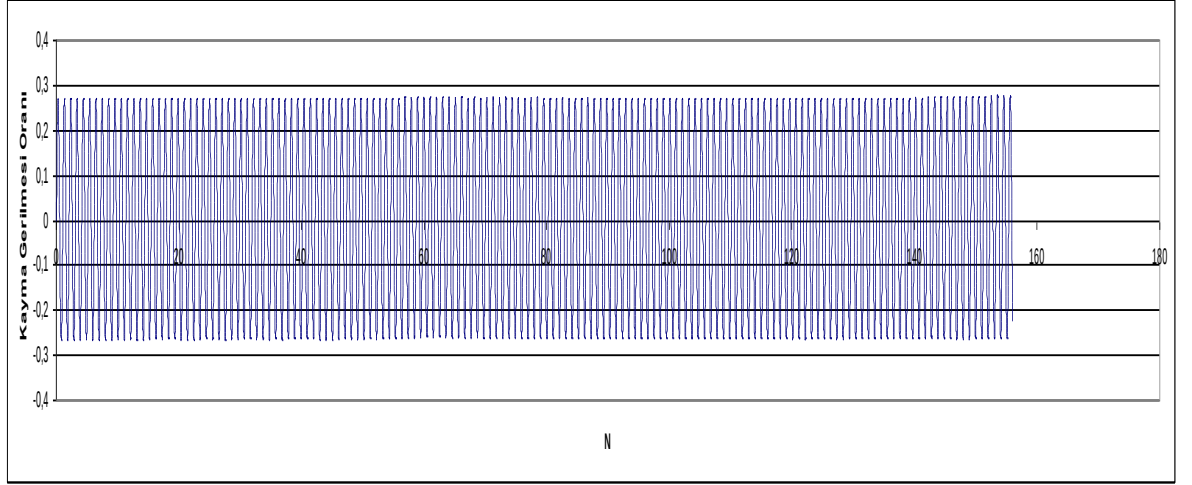


Şekil E2 Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı,
birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi
(D.K.G.O= 0,20)



Şekil E3 Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:16)

07-07-2005 tarihinde kum zemine yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,25 $\gamma_{kc}=16,02$
kN/m³



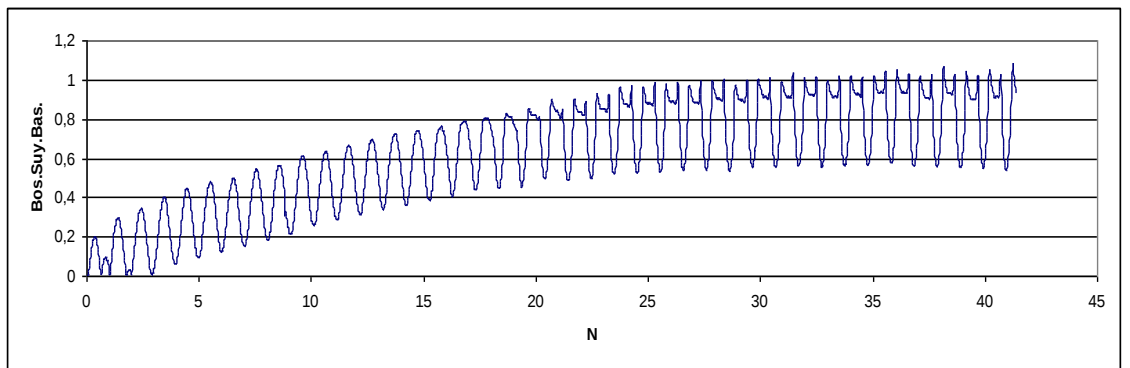
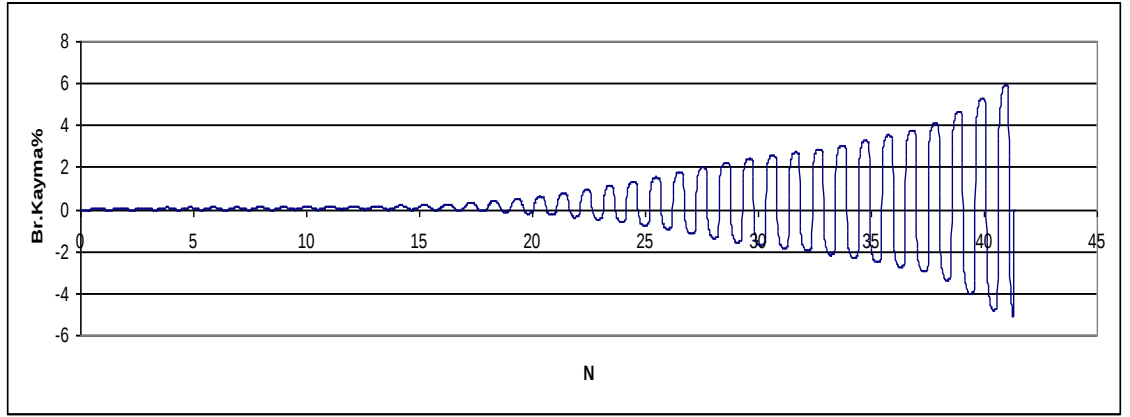
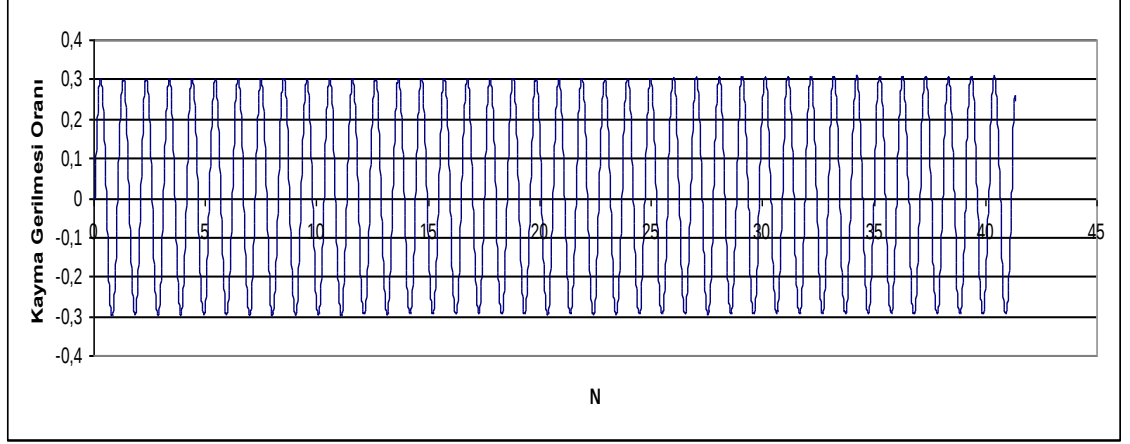
Şekil E4 Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı,
birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi
(D.K.G.O= 0,25)



Şekil E5 Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:17)

01-07-2005 tarihinde kum numune üzerinde yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,30

$$\gamma_{kc} = 16,02 \text{ kN/m}^3$$



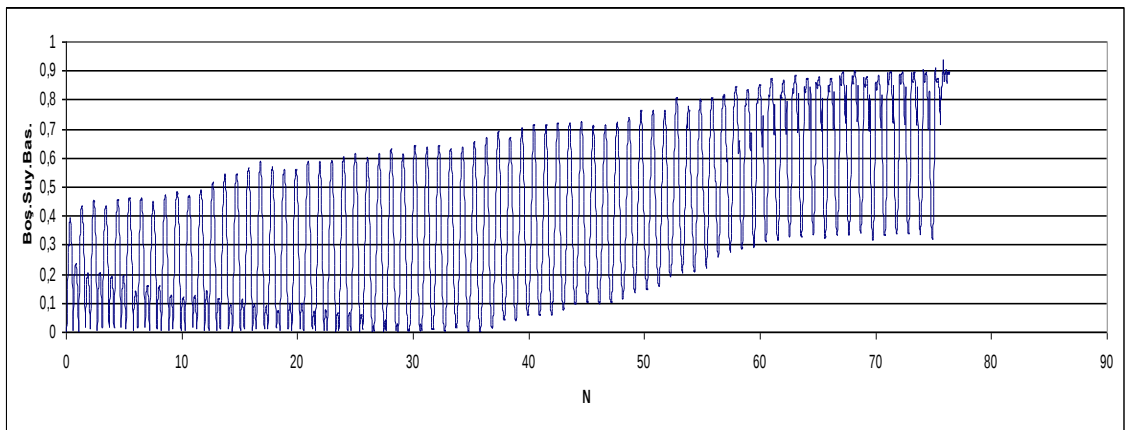
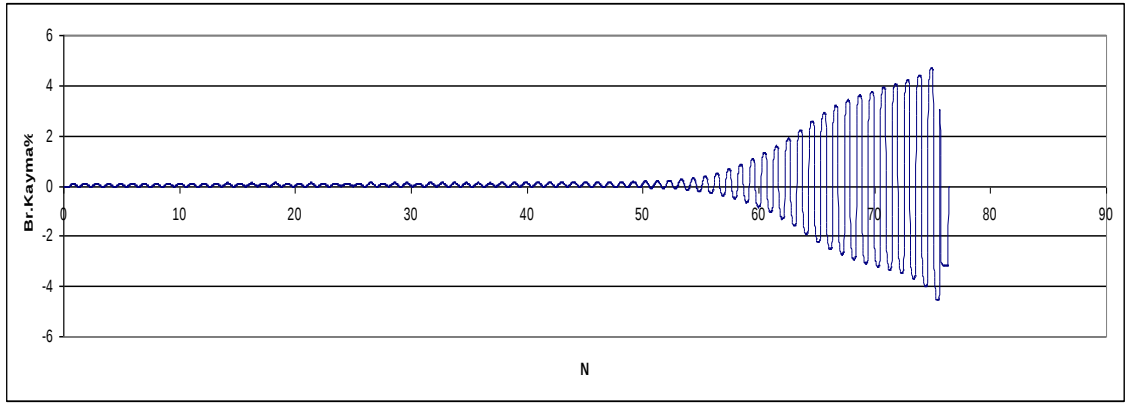
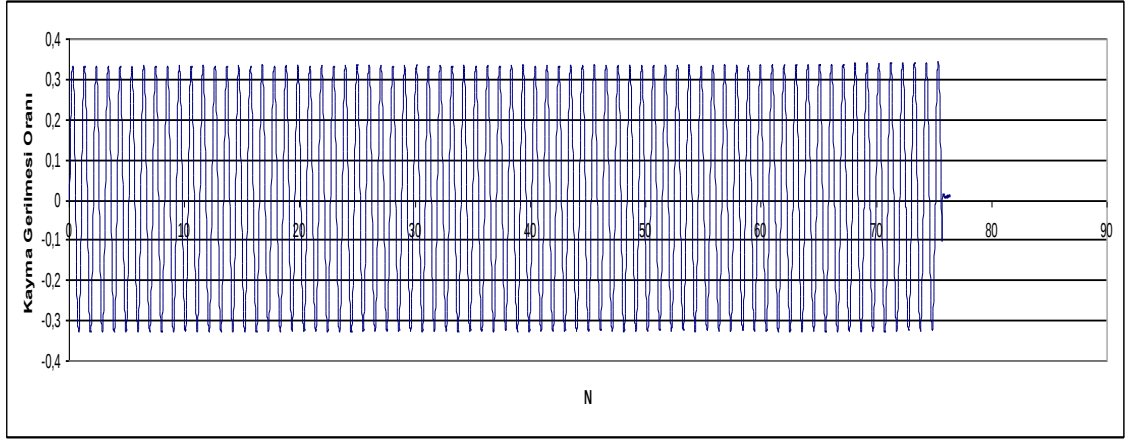
Şekil E6 Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (D.K.G.O= 0,30)



Şekil E7 Tabakasız (sadece kum) zemine ait fotoğraflar (Deney No:18)

08-07-2005 tarihinde kum zeminde yapılan dinamik deney D.K.G.O = 0,35

$$\gamma_{kc}=16,03 \text{ kN/m}^3$$



Şekil E8 Tabakasız (sadece kum) zemine ait kayma gerilmesi oranı-çevrim sayısı, birim kayma-çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkisi (D.K.G.O= 0,35)

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1981 yılında Afyonda doğdu. Orta öğrenimini 1996 yılında Afyon Kocatepe Anadolu Lisesinde, lise öğrenimini ise 1999 yılında Afyon S.Demirel Fen Lisesinde tamamladı. 1999 yılında kazandığı Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden üniversite öğreniminin 2.yılı sonunda 3,6 not ortalamasıyla İ.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümüne yatay geçiş yaptı. 2003 yılında mezun olduğu İ.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümünde aynı yıl Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.