



EGE ÜNİVERSİTESİ

DOKTORA TEZİ

SİLT İÇERİĞİNİN KUMLARIN DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Eyyüb KARAKAN

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selim ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 624.01.00
Sunuş Tarihi : 06.02.2015

Bornova-İZMİR
2015

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLT İÇERİĞİNİN KUMLARIN DİNAMİK ZEMİN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Eyyüb KARAKAN

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selim ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 624.01.00

Sunuş Tarihi : 06.02.2015

Bornova-İZMİR

2015

Eyyüb KARAKAN tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Silt İçeriğinin Kumların Dinamik Zemin Özelliklerine Etkisinin Tekrarlı Yükleme Deneyleri İle Araştırılması” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 09.02.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Doç. Dr. Selim Altun	
Raportör Üye	: Yrd. Doç. Dr. Devrim Erdoğan	
Üye	: Prof. Dr. Arif Ş. Kayalar	
Üye	: Doç. Dr. Alper Sezer	
Üye	: Doç. Dr. Volkan Okur	

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Silt İçeriğinin Kumların Dinamik Zemin Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

06 / 02 / 2015

.....

Eyyüb KARAKAN

ÖZET**SİLT İÇERİĞİNİN KUMLARIN DİNAMİK ZEMİN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

KARAKAN, Eyyüb

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selim ALTUN

Şubat 2015, 200 sayfa

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranış özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda, zeminin cinsi ve fiziksel özelliklerinin yanında yükleme koşullarının da önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Siltli kumların tekrarlı yükler altında, diğer zemin türlerinden farklı olarak ince dane etkisiyle farklı bir davranış özelliği gösterdiği bilinmektedir. Depremler sırasında ani yüklemeden dolayı siltli kumlar içerisindeki suyun dışarı çıkamaması, siltli kumların mukavemet özelliklerinin oldukça etkilemektedir. Bu amaçla suya doymuş siltli kumların tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışını belirlemek amacıyla, laboratuvar koşullarında konsolidasyonlu drenajsız dinamik deneyler yapmak uygun olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında suya doymuş nonplastik siltli kumlar ve düşük plastisiteli siltli kumlar ile drenajsız şartlarda, belirli gerilme koşullarında ve tekrarlı yükler altındaki dinamik davranış özellikleri, dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak araştırılmıştır. Bu deney sisteminde, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri oldukça farklı koşullar altında (Tekrarlı gerilme genliği oranı, izotropik konsolidasyon, gerilme genliği, frekans v.b) belirlenebilmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda, plastik olmayan siltli kumlar ve düşük plastisiteli siltli kumlar, farklı silt içeriğinde yapay örneklerin hazırlanmasında kullanılmış, ve belirli yükleme koşullarında deneylere tabi tutulmuştur.

Anahtar sözcükler: Siltli kum, tekrarlı üç eksenli deneyler, sıvılaşma.

ABSTRACT**THE EFFECT OF SILT CONTENT ON DYNAMIC PROPERTIES
OF SANDS**

KARAKAN, Eyyüb

Ph.D. in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selim ALTUN

February 2015, 200 pages

Theoretical and experimental studies concerning the behavior of soils under dynamic effects revealed that, soil type and physical properties have a remarkable effect, along with the loading conditions. Unlike other soil types, under cyclic loading, silty sands show a different behavior with fines effects. Due to low drainage conditions during rapid earthquake loading, the strength behavior of silty sands is severely affected. For this purpose, in order to investigate the dynamic behavior of saturated silty sands under cyclic loading, it is generally preferred to conduct consolidated undrained cyclic tests under laboratory conditions.

In this scope of this study, the dynamic behavior of saturated non-plastic silty sands and low plasticity silty sands were investigated by conducting cyclic triaxial tests under undrained conditions, certain stress conditions and cyclic loading. The experimental setup enables to determine the stress-strain and strength properties under substantially different conditions (CSR, isotropic consolidation, strain amplitude, frequency etc.). The studies carried out for this purpose includes experiments carried out on reconstituted specimens on non-plastic silty sands and silty sands of low plasticity, under certain loading conditions.

Keywords: Silty sand, cyclic triaxial compression test, liquefaction.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam boyunca desteği, ilgisi ve sabrı ile benden yardımlarını esirgemeyen, her zaman yol gösteren ve moral veren, kıymetli zamanını ayıran, her yönü ile kendisini örnek aldığım çok kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Selim ALTUN'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim.

Yine doktora tez çalışmam süresince değerli ilgilerini benden esirgemeyen ve her zaman moral aşılayan değerli hocalarım Prof. Dr. Arif Ş. KAYALAR'a, Doç. Dr. Alper SEZER'e ve Doç. Dr. Volkan OKUR'a; değerli zamanını, ilgisini ve bilgisini hiçbir zaman eksik etmeyen, değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Devrim ERDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bütün bu zorlukları aşarken hep yanımda olan, bana destek ve güç veren, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili anneme ve sevgili babama, en büyük moral kaynağım ve destekçilerim sevgili kardeşlerime, daima moral veren çalışma arkadaşlarıma, en derin ve en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Eyyüb KARAKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ.....	xxxi
SİMGELER DİZİNİ	xxxiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Gerekçesi	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2.ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞ ÖZELLİKLERİ.....	6
2.1 Suya Doygun Zeminlerin Dinamik Davranış Özellikleri	8
2.1.1 Zeminlerin Gerilme Şekil Değiştirme Özellikleri	43
2.1.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altında Özellikleri	46
3.DENEY ALETİ, KULLANILAN MALZEME VE DENEY YÖNTEMİ	48
3.1 Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinin Temel İlkeleri	48
3.2 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	51

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3 Deney Aleti	53
3.4 Deney Yönteminin Esasları	60
3.4.1 Numune Hazırlama	60
3.4.2 Deney Yöntemi	63
3.4.3 Deney Parametrelerinin Hesabı	65
4. DENEY PROGRAMI, KONSOLİDASYON VE TEKRARLI YÜKLEME KOŞULLARI	68
4.1 Deney Programı	68
4.2 Konsolidasyon ve Yükleme Koşulları	74
5.ZEMİNLERİN DRENAJSIZ KOŞULLARDAKİ GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖZELLİKLERİ.....	75
5.1 Siltli Kumlarda Kayma Modülü ve Sönüm Oranı	77
5.1.1 Siltli Kumlarda Dinamik Kayma Modülünün Belirlenmesi	83
5.1.2 Şekil Değiştirmeye Bağlı Kayma Modülü ve Sönüm Oranı.....	85
5.2 Siltli Kumlarda Gerilme Şekil Değiştirme Özelliklerini Etkileyen Faktörler	86
5.2.1 Çevre Basıncının Etkisi.....	86
5.2.2 Çevrim Sayısının Etkisi	91
5.2.3 Rölatif Sıkılığın Etkisi	93

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2.4 Silt İçeriğinin Etkisi.....	95
5.2.5 Boşluk Suyu Basıncı Oluşumu	97
5.3 Elastik ve Plastik Eşik Değerleri	98
5.4 Toplam ve Kalıcı Şekil Değiştirmelerin Gelişimi	101
6. SİLTİLİ KUM ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ	105
6.1 Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altında Mukavemet Özellikleri	105
6.2 Plastik Olmayan Siltli Kumlar ve Düşük Plastisiteli Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altında Mukavemet Özelliklerine Etki Eden Faktörler.....	123
6.2.1 Çevrim Sayısının Etkisi	124
6.2.2 Rölatif Sıklığın Etkisi	126
6.2.3 Çevre Basıncının Etkisi	128
6.2.4 Silt İçeriğinin Etkisi.....	134
6.3 Plastik Olmayan Siltli Kumlar ve Düşük Plastisiteli Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altında Mukavemet Kaybının Gerilme İzleri İle Açıklanması	140
6.4 İlave Boşluk Suyu Basıncının Gelişimi.....	142
6.4.1 Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısı ile Değişimi	142
6.4.2 Boşluk Suyu Basıncı Modelleri ve Karşılaştırma.....	159

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.5 Boşluk Oranına Bağlı Sıvılaşma Analizi	166
7. SİTLİ KUM ZEMİNLERİN SIVILAŞMA SONRASI OTURMA DAVRANIŞLARI.....	173
7.1 Tokimatsu ve Seed Yöntemi	173
7.2 Ishihara ve Yoshimine Yöntemi	174
7.3 Drenajsız Tekrarlı Yükleme İzleyen Rekonsolidasyon Süresince Hacim Değişimi	175
7.4 Siltli Kumlar için Maksimum Genlikteki Kayma Deformasyonu ve Güvenlik Sayısı Arasındaki İlişki	179
7.5 Siltli Kumlar için Güvenlik Sayısı ile Hacimsel Deformasyon Arasındaki İlişki	181
8. SONUÇLAR	185
KAYNAKLAR DİZİNİ	189
ÖZGEÇMİŞ	200

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İnce dane miktarı %30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki.....	10
2.2 $PI=4$ orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi	11
2.3 $PI=4$ temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi.....	11
2.4 $PI=4$ iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi	12
2.5 Düşük plastisiteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi	13
2.6 Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi	14
2.7 İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları	15
2.8 Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi	17
2.9 Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi	18
2.10a Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi	18
2.10b Plastik olmayan siltte boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi ..	19
2.10c Temiz kumda boşluk suyu basıncı gelişimi	20
2.10d Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı değişimi..	20
2.11 Örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinin dinamik davranış farklılığı	22

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.12 Plastisite indisinin 10 ve 30 çevrimde % 5 çift genlikli deformasyonun oluşması için gerekli gerilme oranıyla değişimi	23
2.13 Ön sıvılaşma durumu için gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi	24
2.14 Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına plastisite indisinin etkisi	25
2.15 Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi	26
2.16 Dinamik mukavemetin plastisite indisiyle değişimi	27
2.17 Örselenmemiş numunelerde ve laboratuvarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık	28
2.18 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi	29
2.19 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi	29
2.20 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi	30
2.21 Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi ...	31
2.22 Düşük plastisiteli siltlerde % 5 çift genlikli deformasyon durumuna plastisitenin etkisi	32
2.23 Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi	32
2.24 % 5 çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.25 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin temiz kumlar için karşılaştırması	35
2.26 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin ince daneli kumlar için karşılaştırması	35
2.27 İnce dane yüzdesinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi	36
2.28 Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi	37
2.29 Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi	38
2.30 Frekansın dirence etkisi	38
2.31 Farklı frekans değerlerinde % 3 eksenel uzama deformasyonundaki çevrim sayısı	39
2.32 Farklı frekans değerlerinde dinamik yükleme boşluk suyu basıncı ilişkisi	40
2.33 Farklı frekans değerleri ile değişen deviatör gerilme ve çevrim sayısı ..	41
2.34 Non plastik siltli kumların sıvılaşma dayanımına etkisi	42
2.35 Non plastik siltli kumların sıvılaşma dayanımına kritik ince dane oranı etkisi	42
2.36 Histeritik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	44
2.37 Düşük kayma birim deformasyonuna karşılık, boşluk oranı değerleri. ..	46

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Zeminde sismik gerilme durumu	49
3.2 Tekrarlı üç eksenli deneyde gerilme durumu	49
3.3 Tekrarlı üç eksenli deneyde mohr gerilme daireleri	49
3.4 Tekrarlı üç eksenli deneyde uygulanan gerilme durumu	51
3.5 Deneyde kullanılan zeminlerden plastik olmayan siltli kum karışımlarının dane boyu dağılım eğrileri	53
3.6 Deneyde kullanılan zeminlerden düşük plastisiteli siltli kum karışımlarının dane boyu dağılım eğrileri	53
3.7 Deney aletini oluşturan ünitelerin detaylı gösterimi	54
3.8 Hücre içine yerleştirilmiş silindir numune	56
3.9 Kullanılan deney sistemi	57
3.10 Deney sisteminde kullanılan membran ve mold	57
3.11 Deney sisteminde kullanılan membran ve mold yerleşimi	59
3.12 Malzeme yerleştirme	59
3.13 Örneğin içinden CO ₂ geçirilmesi	62
3.14 Örneğin içinden su geçirilmesi	63
5.1a Artan gerilme genlikleri durumunda boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ile değişimini gösteren tipik deney kayıtları	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1b Artan gerilme genlikleri durumunda deviatör gerilme-çevrim sayısı ile değişimini gösteren tipik deney kayıtları	79
5.1c Artan gerilme genlikleri durumunda eksenel deformasyon değerlerinin çevrim sayısı ile değişimini gösteren tipik deney kayıtları	79
5.2a Artan gerilme genliklerinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini gösteren küçük eksenel birim deformasyon değerleri için deney kayıtları	80
5.2b Artan gerilme genliklerinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini gösteren büyük eksenel birim deformasyon değerleri için deney kayıtları	80
5.3 Siltli kum zemine ait dinamik kayma modülünün birim şekil değiştirme genliğine bağlı değişimi	81
5.4 Siltli kum zemine ait sönüm oranı değerlerinin birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak değişimi	82
5.5 Farklı çevre gerilmeleri altında oluşan siltli kumlar için beşinci çevrimde oluşan dinamik kayma modülü azalım eğrileri	87
5.6 Farklı çevre gerilmeleri altında oluşan siltli kumlar için onuncu çevrimde oluşan dinamik kayma modülü azalım eğrileri	87
5.7 Farklı çevre gerilmelerinde elde edilen beşinci çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri	88
5.8 Farklı çevre gerilmelerinde elde edilen onuncu çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri	89
5.9 Kayma modülü oranı için farklı çevre gerilmelerinde elde edilen beşinci çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri	89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.10 Kayma modülü oranı için farklı çevre gerilmelerinde elde edilen onuncu çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri	90
5.11 Çevre basıncı başlangıç kayma modülü ilişkisi	91
5.12 Artan çevrim sayısının kayma modülüne etkisi	92
5.13 Artan çevrim sayısının sönüm oranına etkisi	93
5.14 Farklı rölatif sıkılık değerleri için elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri	94
5.15 Farklı boşluk oranları için elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri	94
5.16 Farklı silt içeriği için 5. çevrimde elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri	95
5.17 Farklı silt içeriği için 10. çevrimde elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri	96
5.18 Farklı silt içeriği için 5. çevrimde elde edilen sönüm oranı azalım eğrileri	96
5.19 Farklı silt içeriği için 10. çevrimde elde edilen sönüm oranı azalım eğrileri	97
5.20 Farklı rölatif sıkılıklarda 11.çevrimde elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum eğrileri	98
5.21 Aynı rölatif sıkılıkta ($D_r=0.25$), farklı silt içerikleri için 11.çevrimde elde edilen çift genlikteki eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı eğrileri	98

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.22a Elastik ve plastik eşiklerin kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrilerinde gösterimi	99
5.22b Elastik ve plastik eşiklerin kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrilerinde gösterimi	100
5.23 Tipik gerilme şekil değiştirme histerisis ilmiği	102
5.24 Üniform tekrarlı yükler altında oluşan kalıcı ve toplam şekil değiştirmelerin değişimi	102
5.25 Artan genlikli tekrarlı yükler altında oluşan kalıcı ve toplam şekil değiştirmelerin değişimi	104
6.1a Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin düşey yük ve çevrim sayısı	108
6.1b Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı ve çevrim sayısı	109
6.1c Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin eksenel şekil değiştirme ve çevrim sayısı	109
6.1d Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı	110
6.1e Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin p' ve u ile çevrim sayısı	110
6.2a Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin gerilme izi	111
6.2b Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin deviatör gerilme ve eksenel şekil değiştirmeye bağlı değişimi	111

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.3a Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranının eksenel şekil değiştirmeye bağlı değişimi	112
6.3b Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin çevrim sayısını eksenel şekil değiştirmeye bağlı değişimi	112
6.4a Plastik olmayan siltli kum zeminin düşey yük çevrim sayısı	115
6.4b Plastik olmayan siltli kum zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı çevrim sayısı	115
6.4c Plastik olmayan siltli kum zeminin eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı	116
6.5a Plastik olmayan siltli kum zeminin boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı	116
6.5b Plastik olmayan siltli kum zeminin boşluk suyu basıncı oranı eksenel şekil değiştirme	117
6.5c Plastik olmayan siltli kum zeminin çevrim sayısı eksenel şekil değiştirme	117
6.5d Plastik olmayan siltli kum zeminin p' ve u ile çevrim sayısı	118
6.6a Plastik olmayan siltli kum zeminin gerilme izi	118
6.6b Plastik olmayan siltli kum zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı eksenel şekil değiştirme	119
6.7a Düşük plastisiteli silt zeminin düşey yük çevrim sayısı	119

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7b Düşük plastisiteli silt zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı çevrim sayısı	120
6.7c Düşük plastisiteli silt zeminin eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı	120
6.8a Düşük plastisiteli silt zeminin çevrim sayısı eksenel şekil değiştirme	121
6.8b Düşük plastisiteli silt zeminin p' ve u ile çevrim sayısı	121
6.9a Düşük plastisiteli silt zeminin gerilme izi davranışı	122
6.9b Düşük plastisiteli silt zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı eksenel şekil değiştirme grafiği	122
6.10a Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi	125
6.10b Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi	125
6.11 Farklı tekrarlı gerilme genliğine maruz plastik olmayan siltli kumların sıvılaşmaya neden olan rölatif sıkılık değerlerindeki değişim	127
6.12 Farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip plastik olmayan siltli kumların sıvılaşmaya neden olan CSR değerlerindeki değişim	128
6.13a İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden tekrarlı deviatör gerilme oranı çevrim sayısı	129
6.13b İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı	130

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

6.13c İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı 130

6.13d İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden p' ve u çevrim sayısı 131

6.13e İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden çevrim sayısı normalize edilmiş boşluk suyu basıncı 131

6.14 Farklı çevre gerilmelerinde izotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin çevre basıncı etkisi 132

6.15a İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerden deviatör gerilme çevrim sayısı .133

6.15b İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerden boşluk suyu basıncı çevrim sayısı ilişkisi 133

6.15c İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerden eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı ilişkisi 134

6.16. Farklı silt içeriğine sahip ve izotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %25 rölatif sıkılıkta sıvılaşma çevrim sayıları.....136

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.17. Farklı silt içeriğine sahip ve izotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %50 rölatif sıkılıkta sıvılaşma çevrim sayıları.....	136
6.18 Farklı silt içeriğine sahip ve izotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip plastik olmayan siltli kum zeminlerin sıvılaşma çevrim sayıları	137
6.19 İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %25 rölatif sıkılıktaki 20. çevrime karşılık gelen silt içeriği değişimi.....	139
6.20 İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %50 rölatif sıkılıktaki 20. çevrime karşılık gelen silt içeriği değişimi.....	139
6.21 İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip plastik olmayan siltli kum zeminlerin 20. çevrime karşılık gelen silt içeriği değişimi	140
6.22.a Boşluk suyu basıncı oluşum modelleri Seed et al., (1975)	143
6.22.b Boşluk suyu basıncı oluşum modelleri Dobry et al., (1982)	143
6.23 Boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmenin çevrim sayısı ile değişimi (Sitharam 2004)	145
6.24 Çift genlikteki eksenel şekil değiştirme ile çevrim sayısı değişimi (Sitharam, 2004)	146
6.25 Boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmenin $D_r=60$ ve $CSR=0.082$ için çevrim sayısı ile değişimi (Sitharam 2004)	147

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.26 Çift genlikteki eksenel deformasyon ile çevrim sayısı değişimi (Sitharam 2004)	148
6.27 Boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmenin $D_r = 69.7$ ve $CSR = 0.14$ için 10 çevrimde bir değişimi (Sitharam 2004)	149
6.28 Boşluk suyu basıncı ile CSR ilişkisi (Sitharam 2004).....	150
6.29 Boşluk suyu basıncı oranı ile D_r ilişkisi (Sitharam 2004).....	151
6.30 Tekrarlı gerilme genliği oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki (Sitharam 2004)	151
6.31 $FC = 0$ ve 10 için aşırı boşluk suyu basıncı grafiği elde edilmesi (Sitharam 2004)	152
6.32 $FC = 30, 42$ ve 50 için aşırı boşluk suyu basıncı grafiği elde edilmesi (Sitharam 2004)	152
6.33 Boşluk suyu basıncı oranı - Çevrim sayısı oranı grafiği elde etme	154
6.34 $FC = 0$, $D_r = 25$ ve $\sigma'_0 = 100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği	155
6.35 $FC = 20$, $D_r = 25$ ve $\sigma'_0 = 100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı - Çevrim sayısı oranı grafiği	156
6.36 $FC = 40$, $D_r = 25$ ve $\sigma'_0 = 100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı - Çevrim sayısı oranı grafiği	156
6.37 $FC = 60$, $D_r = 25$ ve $\sigma'_0 = 100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı - Çevrim sayısı oranı grafiği	157

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.38 $FC=80$, $Dr=25$ ve $\sigma'_0=100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği	157
6.39 $FC=100$, $Dr=25$ ve $\sigma'_0=100$ kPa için Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Çevrim Sayısı oranı grafiği.....	158
6.40 $FC=0-100$, $Dr=25$ ve $\sigma'_0=100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği	158
6.41 $FC=0-100$, $Dr=25$ ve $\sigma'_0=100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği karşılaştırması	159
6.42 α katsayısının değişimi Seed et. al (1975)	161
6.43 α katsayısının değişimi Booker et. al (1976)	162
6.44 α_1 , α_2 , α_3 , α_4 katsayısının değişimi Polito et. al., (2008)	164
6.45. Mikroyapısal ve kaba ve ince daneler arası matris elde etme, Thevanayagam (2000)	168
6.46. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının ince dane oranı ile değişiminin gösterilmesi.....	171
6.47. Kaba ve ince daneler arası boşluk oranlarının CSR ile değişimi.....	171
6.48. Kaba ve ince daneler arası boşluk oranlarının CSR ile değişimi.....	172
7.1 Doygun kumlarda tekrarlı gerilme oranı ile SPT direnci ile hacimsel birim deformasyon hesaplanması (Tokimatsu and Seed, 1987).....	174
7.2 Sıvılaşma sonrası hacimsel değişim ile güvenlik sayısı ilişkisi (Ishihara and Yoshimine 1992)	175

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.3 Dr=%25 için hacimsel deformasyon maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi	177
7.4 Dr=%50 için hacimsel deformasyon maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi	177
7.5 Dr=%25 için güvenlik sayısı maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi elde etme.....	180
7.6 Dr=%50 için güvenlik sayısı maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi elde etme.....	180
7.7 Dr=%25 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi.....	182
7.8 Dr=%50 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi.....	183
7.9 FC=%0 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi.....	183
7.10 FC=%100 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi.....	184

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Torbalı kumu-plastik olmayan silt karışımı fiziksel özellikleri.....	52
3.2 Bayraklı Kum-Silt Karışımı Fiziksel Özellikleri.....	26
4.1 Torbalı kumu-plastik olmayan silt karışımı ile tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri.....	70
4.2 Torbalı kumu-plastik olmayan silt karışımı ile tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikler.....	71
4.3 Torbalı kumu-plastik olmayan silt karışımı ile artan genlikli tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri.....	71
4.4 İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum ile tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri	73
4.5 İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum ile artan genlikli tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri	74
5.1 Deformasyon özellikleri için zemin davranışı.....	77
5.2 Bazı zeminler için regresyon analizi değerleri	84
6.1 Gerilme tabanlı boşluk suyu basıncı modelleri karşılaştırılması.....	165
6.2 Kaba- İnce daneler arası boşluk oranına göre yapılan deney sonuçları.....	172
7.1 Deneylerden elde edilen sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme ve güvenlik sayısı değerleri	176
7.2 $D_r=25$ için hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları.....	178

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
7.3 $D_r=50$ için hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları.....	179
7.4 $D_r=50$ için güvenlik sayısı ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları.....	181

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
CSR	Tekrarlı Kayma gerilmesi oranı
$(\varepsilon_a)_{SA}$	Eksenel şekil değiştirme
σ_0'	Efektif çevre gerilmesi
e	boşluk oranı
D_r	Rölatif sıkılık
N	Çevrim sayısı
f	Frekans
w_L	Likit limit
w_P	Plastik limit
I_p	Plastisite indisi
G	Dinamik kayma modülü
H	Sönüm oranı
C_u	Üniformluk katsayısı
C_c	Derecelenme katsayısı
e_g	Kaba daneler arası boşluk oranı
e_f	İnce daneler arası boşluk oranı

1.GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Gerekçesi

1906 San Francisco depremi ile zemin dinamiği, geoteknik mühendisliğinin kapsamı arasına girmiş ve sıvılaşma olarak bilinen zemin problemi literatürdeki yerini almıştır. Daha sonra meydana gelen 1964 Niigata ve Alaska depremleri ve 1971 yılında San Fernando depremlerinde de görülen zemin sıvılaşması, deprem sarsıntıları veya diğer tekrarlı ve yüksek frekanslı yükleme koşulları altında suya doymun kumlu ve siltli zeminlerdeki boşluk suyu basıncının artarak, zeminin çevre basıncına eşitlenmesi ve bunun sonucu zeminin mukavemet ve rijitliğinin azaldığı bir olay olarak tarif edilmiştir.

Sıvılaşma, geoteknik mühendisliğinde en önemli ve oluşum mekanizması olarak açıklanması en karmaşık problemlerden birisidir. Niigata (1964), Alaska (1964), Loma Prieta (1989), Hyogoken-Manbu (1995) gibi geçmişte meydana gelen depremler ve yakın bir zamanda meydana gelen 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sıvılaşmanın zararlı etkilerini ortaya koymuştur. Bu depremler sonucunda oluşan sıvılaşma olayı neticesinde binalarda taşıma gücü kaybından dolayı oluşan temel göçmeleri, kalıcı yanal yer hareketleri ve gömülü yapıların zemin yüzeyine çıkması görülmüştür. Depremler sırasında oluşan sıvılaşmanın meydana getirdiği hasarlar inşaat mühendislerinin bu konuya odaklanmalarına neden olmuştur. Zemin daneleri arasındaki boşluklarda yer alan ve zemin daneleri üzerinde bir gerilme oluşturan su basıncı, boşluk suyu basıncı olarak bilinmekte ve efektif gerilmeleri etkilemektedir. Deprem esnasında suya doymun zemin elemanı o kadar hızlı bir şekilde yüklenir ki, boşluklarda yer alan su drene olamayacağından ve boşluk suyu basıncında büyük miktarlarda artışlar görülür. Boşluk suyu basıncında oluşan bu artış, efektif gerilmeleri ve dolayısı ile zeminin mukavemetini azaltır. Zeminin mukavemetinde meydana gelen bu azalma zemin kütlesinde büyük oturmaların oluşmasına sebep olur.

Sıvılaşma, bir zemin tabakasının mukavemetini kaybetmesi ve aşırı boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi ile meydana gelir. Bu durum yapılarda farklı oturmalara, otoyollarda ve demiryollarında büyük hasarlara neden olmaktadır. Sıvılaşmanın meydana geldiğini gösteren en belirgin işaret San Francisco 1906, Alaska ve Niigata 1964, Loma Prieta 1989, ve Adapazarı 1999 depremlerinde de ortaya çıkan zemin yüzeyinde oluşan kum konileridir. Ortaya çıkan bu kum konileri, depremin oluşturduğu sarsıntılar nedeni ile zemin içerisinde meydana

gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının yukarı yönlü hareketi ile sönümlenmesi esnasında kum danelerini de birlikte taşıması sırasında oluşmaktadır.

İnce daneli zeminlerin dinamik yükler altında davranış özelliklerinin nasıl değiştiği hala incelenmektedir. Özellikle nonplastik siltli kumlar ile düşük plastisiteli siltli kum içeriğinin zeminlerin dinamik davranışlarını ne yönde etkilediği günümüzdeki pek çok araştırmada konu edilmiştir. Bu nedenle, laboratuvarında gerçekleştirilen dinamik üç eksenli ve burulmalı, dinamik basit kesme, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri gibi deneysel çalışmalar yanında, arazide zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deney sistemleri geliştirilmiştir. Ayrıca, dinamik zemin davranışının anlaşılması üzerinde yapılan analitik çalışmalar oldukça büyük önem kazanmıştır. Böylece, zeminlerin elastik, elasto-plastik ve plastik davranış özellikleri bu şekilde daha kolay elde edilebilmektedir.

Nonplastik siltli kumlar ile düşük plastisiteli siltli kumların sıvılaşma olayı ve etkilerinin anlaşılması için yapılan çalışmaların çelişkili olması ve gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlaması amacıyla, laboratuvarında yapılacak yeni model deneylere ve gözlenen davranışları açıklayacak matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, bir başka ifadeyle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve dayanım özellikleri altında iki grupta değerlendirilebilir. Gerilme – şekil değiştirme özellikleri, genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ve bu değerlerin birim şekil değiştirmeye bağlı değişiminin belirlenmesi ile belirlenmektedir. Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür deney sistemlerinden faydalanılır. Zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hem deneysel çalışmalardan hem de teorik model benzeşimlerinden yararlanılır. Zeminlerin gerilme – şekil değiştirme özelliklerinin tayin edilmesinde, model çalışmasının seçiminde ve yapılan deneylerin analizinde olası şekil değiştirme seviyesi belirleyici rolü oynamaktadır. Zira farklı şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin gerilme – şekil değiştirme davranışları oldukça değişik özellikler arz etmektedir.

Zeminlerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelenirken özellikle kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı zemin ortamlarında, simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan zeminlerin davranışları, genellikle kayma modülü ve sönüm oranı özellikleri ile belirlenir. Bu tür zemin durumlarında kayma modülü ve sönüm oranı faktörlerinin kullanıldığı doğrusal analizler, zeminde oluşacak şekil değiştirmeler ile daha uyumlu olmaktadır. Hardin and Drenevich (1972a) tarafından yapılan çalışmada kum zeminlerde kayma modülüne etki eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu; buna karşın sönüm oranının ise tane boyutu, doygunluk derecesi, boşluk oranı, içsel sürtünme açısı, yanal toprak basıncı katsayısı ve çevrim sayısı değerlerinden az miktarda etkilenmekle beraber daha çok zeminin maruz kaldığı şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmektedir.

Zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini laboratuvar koşullarında araştırmak için geliştirilen deney sistemlerinden birisi de dinamik üç eksenli basınç deney sistemidir. Bu deney sistemi ile örselenememiş veya yeniden oluşturulmuş zemin numuneleri üzerinde statik ve dinamik yüklemeli deneyler yapılabilmektedir. Çalışmada deneylerde dinamik üç eksenli deney sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında iki farklı zemin türü kullanılmıştır. Bunlardan ilki İzmir-Bayraklı bölgesinden elde edilen düşük plastisiteli siltli kum, diğeri ise Torbalı kumu ile nonplastik özelliğe sahip silttir. Bu iki malzeme değişik oranlarda silt eklenerek (ince dane oranı (İ.D.O) % 0, %20, %40, %60, %80, %100) karışımlar elde edilmiştir.

Bu çalışmanın birinci amacı, kullanılan siltli kumların çok aşamalı, artan tekrarlı yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerindeki değişimin belirlenmesi ve değerlendirilmesidir. Dinamik üç eksenli deney aleti ile gerilme kontrollü olarak yapılan deneysel çalışmalarla tekrarlı yükler altındaki suya doymuş siltli kumların izotropik ve drenajsız şartlarda dinamik zemin özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar geçmişte benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci amacı ise farklı silt içeriğine sahip zeminlerin benzer deney koşullarındaki dinamik mukavemet özelliklerinin araştırılmasıdır. Bu amaçla sonradan hazırlanmış değişik silt içeriğine sahip (ince dane oranı (İ.D.O) % 0, %20, %40, %60, %80, %100) siltli kumların tekrarlı yükler altındaki mukavemet özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Numune hazırlama ve deney koşullarının benzerliğine rağmen bu zemin gruplarının dayanım özellikleri birbirleri ile

karşılaştırılmıştır. Bu malzemeler için üniform yüklemelerle gerçekleştirilen deneyler ile değişik koşullar altında dinamik mukavemet özellikleri saptanmaya çalışılmıştır. Nonplastik silt içeriğindeki farklılıkların bu özellikleri nasıl etkilediği farklı deney koşulları altında tespit edilmiştir. Numune hazırlama yöntemlerindeki benzerlik dolayısı ile silt içeriğindeki artışların zeminin dinamik davranış özelliklerini nasıl değiştirdiği incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür araştırmasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde yapılan deneysel çalışmaların değerlendirilmesi ve yorumlanmasında temel teşkil edecek, deneylerde kullanılan dinamik üç eksenli deney sistemi temel ilkeleri, gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin elde edilişi ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Yine bu bölümde deneyde kullanılan malzemelerin ve dinamik üç eksenli deney aletinin genel özellikleri verilmiştir. Ayrıca numune hazırlama metodu ve deneylerde kullanılan yöntemin esasları bütün detayları ile birlikte ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde deneysel çalışmaların genel özellikleri ile beraber hangi yükleme ve konsolidasyon koşulları altında yürütüldüğü ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Yine yapılan deneylerin hangi deney programı çerçevesinde gerçekleştirildiği de bu bölümde verilmiştir.

Beşinci bölümde siltli kumların tekrarlı yükler altında gerilme-şekil değiştirme davranış özelliklerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyler ele alınarak değişik silt içeriğine sahip zemin ve deney parametrelerinin bu dinamik zemin özelliklerini ne şekilde etkilediği incelenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafikler halinde verilmiştir.

Altıncı bölümde değişik fiziksel özelliklere sahip siltli kumların sıvılaşma ve mukavemet özelliklerini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve parametrik değişimler şekiller ve tablolar halinde verilmiştir.

Yedinci bölümde siltli kumların sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki arasındaki bağıntı incelenmiştir. İki farklı rölatif sıkılık ve yedi farklı silt içeriği için regrasyon analizleri ile aradaki ilişki gösterilmiştir.

Sekizinci ve son bölümde yürütülen deneylerden ve yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve yapılan çalışma değerlendirilerek bazı önerilerde bulunulmuştur.

2. ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞ ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı 1960'lı yıllardır, son yıllarda 1995 Kobe ve 1999 Kocaeli depremleri ile zeminlerde görülen sıvılaşma olayları ve taşıma gücü kayıpları, zeminin dinamik davranışının önceden bilinmesinin gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur. Özellikle kısa mesafelerde büyük farklılık gösteren zeminlerin dinamik davranışının önceden bilinmesinin ne kadar önemli olduğunu ülkemizde deprem sonrası hasarlarla ve can kayıplarıyla bize açıkça göstermiştir. Ülke topraklarımızın büyük bir kısmı ve nüfusun %98'inin deprem riski taşıyan bölgelerde yaşaması, geoteknik deprem mühendisliğinin önemini gözler önüne sermektedir. Buna bağlı olarak, yaşadığımız depremlerle ülkemizin geoteknik deprem mühendisliğinin bir laboratuvarı olduğunu kabul etmek gerekmektedir. Deprem nedeniyle zeminlerde görülen davranışlar, zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak farklı boşluk suyu basıncı ve farklı eksenel deformasyon değerleri vermektedir. Bu nedenle suya doymuş kum ve siltlerde görülen zemin problemlerinin araştırılmasında dinamik deneylerin önemi artmıştır. Depremler sırasında suya doymuş kumlar ve düşük plastisiteli siltler sıvılaşırken, yumuşak plastik siltler ve killi taşıma gücü kaybına uğramaktadır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde, Adapazarı'nda çok sayıda yapısal hasarlar ve buna bağlı olarak can kayıpları görülmüştür. Yapısal hasarlarda, yapıların malzeme kalitelerinin yanında zeminin dinamik yükler altındaki davranışının da etkili olduğu görülmüştür.

Zeminlerin arazi ve laboratuvar çalışmalarında dinamik parametreleri arasında gerilme-şekil değiştirme ve birim deformasyona bağlı olarak belirlenen kayma mukavemeti, dinamik kayma modülü ve elastisite modülü değerleri, poisson oranı ve sönüm oranı değerleri ile sıvılaşma parametreleri olan tekrarlı deviatör gerilme oranı (CSR) ile boşluk suyu basıncı değerleri sayılabilir. Zeminlerin dinamik yükler altında davranışını etkileyen parametreler ise; eksenel şekil değiştirme $(\varepsilon_a)_{SA}$, efektif çevre gerilmesi (σ_0') , boşluk oranı (e) , rölatif sıkılık (D_r) , çevrim sayısı (N) , frekans (f) , dane çapı, dane çapı dağılımı, ince dane oranı, likit limit (w_L) , plastik limit (w_p) , plastisite indisidir (I_p) .

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, bir başka ifadeyle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme – şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri diye iki gruba ayrılmaktadır. Gerilme – şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin ve bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması anlaşılmaktadır.

Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılmaktadır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür deney sistemlerinden faydalanılmaktadır. Zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hem deneysel çalışmalardan hem de teorik model benzeşimlerinden yararlanılmaktadır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin tayin edilmesinde, model çalışmasının seçiminde ve yapılan deneylerin analizinde olası şekil değiştirme seviyesi en belirleyici rolü oynamaktadır. Çünkü farklı şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları oldukça değişik özellikler arz etmektedir.

Depremlerde, zemin davranışlarına bağlı olarak, görülen hasarlara karşı önlem alınabilmesi için dinamik zemin özelliklerinin önceden ölçülmesi çok önemlidir. Çok değişik arazi ve laboratuvar yöntemleri olup bunların her birinin değişik problemler açısından farklı üstünlükleri ve sınırlamaları vardır. Dinamik üç eksenli deney çalışmaları Seed and Lee (1966) tarafından yapılmıştır. Deney 1992'de ASTM standardı olarak kabul edilmiştir (D5311-92). Dinamik burulmalı kesme deneyi çalışmaları İshihara and Li (1972)'de burulmalı bir üç eksenli deney aleti geliştirmesiyle başlamıştır.

Zeminleri, genel olarak iri daneli (kum ve çakıl) ile ince daneli (silt ve kil) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. İnce daneli zeminleri kendi arasında, nonplastik siltler, düşük ve yüksek plastisiteli siltler ve killer şeklinde alt gruplara ayrılabilir. Geçmiş çalışmalar bu zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışları ayrı ayrı değerlendirilip incelenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında suya doymun iyi derecelenmiş kumlar ile değişik oranlarda nonplastik siltler karıştırılarak elde edilen karışımlar ile İzmir - Bayraklı bölgesinden elde edilen düşük plastisiteli siltli kum karışımlarının, drenajsız şartlarda ve tekrarlı yükler altındaki dinamik davranış özellikleri dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır.

Bu bölümde yapılan çalışmanın anlaşılabilmesi amacıyla, yapılan deneysel çalışmaların hedefi doğrultusunda zeminlerin dinamik yükler altında davranış özellikleri farklı boyutları ile incelenmiştir. Ayrıca siltli kumlar ile geçmişte yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu inceleme kapsamında zeminlerin dinamik özelliklerine temel teşkil eden kavramlar verilmiştir.

2.1 Suya Doygun Zeminlerin Dinamik Davranış Özellikleri

Deprem sırasında, meydana gelen drenajsız kayma gerilmeleri, zeminin kayma deformasyonlarına maruz kalmasına ve buna bağlı boşluk suyu basıncı artışına sebep olmaktadır. Artan boşluk suyu basıncı, zemin efektif gerilmesine bağlı zemin rijitliğini düşürmekte ve böylece daha yüksek kayma deformasyonu ve boşluk suyu basınçları üretilmektedir. En son durumda, boşluk suyu basıncı toplam gerilmeye ulaşarak, zemin sıvılaşmasının tetiklenmesine sebep olmaktadır. Bu mekanizma doygun kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için de geçerli olmasına rağmen geçmişte birçok araştırmacı çoğunlukla suya doygun kumlu zeminlerin dinamik davranışlarına odaklanmışlardır (Erken et al., 1994; Erten et al., 1995; Verdugo et al., 1996; Yoshimi et al., 1989; Yoshimine et al., 1998; Yoshimine et al., 1999; Altun S., 2002). Oysa suya doygun ince daneli zeminleri, yani silt ve kil karışımlarını tekrarlı yükler altında dayanıklı olarak kabul etmişlerdir. Ancak 1964 Alaska (Boulanger et al., 2004), 1985 Mexico City (Seed et al., 1987), 1989 Loma Prieta (Boulanger et al., 1998), 1994 Northridge (Holzer et al., 1999), 1999 Adapazarı (Bray et al., 2001) ve 1999 Chi-Chi (Chu et al., 2004) depremlerinde ince daneli zeminlerin de tekrarlı yükler altında önemli şekilde dayanımını kaybettiği açıkça görülmüştür.

Ansal ve Tuncan (1987) normal konsolide killerde oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi sonucu oluşan sıkışmaların belirlenmesi için dinamik basit kesme sistemini kullanmışlardır. Erken vd. (1994) suya doygun, ince dane içeren kumlu zeminlerin dinamik yükler altındaki davranış biçimlerini dinamik basit kesme deneylerinin sonuçlarıyla incelemişlerdir. Özay vd. (1998) zemin yapısının dinamik mukavemet üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla kum numuneler ile plastik ince dane içeren kumlu zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Şener vd. (2007) zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı davranışlarını dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyi ile incelemişlerdir. Altun ve Ansal (2004), kum zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyan özellikler ve bunları etkileyen faktörleri burulmalı kesme deney aletiyle incelemiştir.

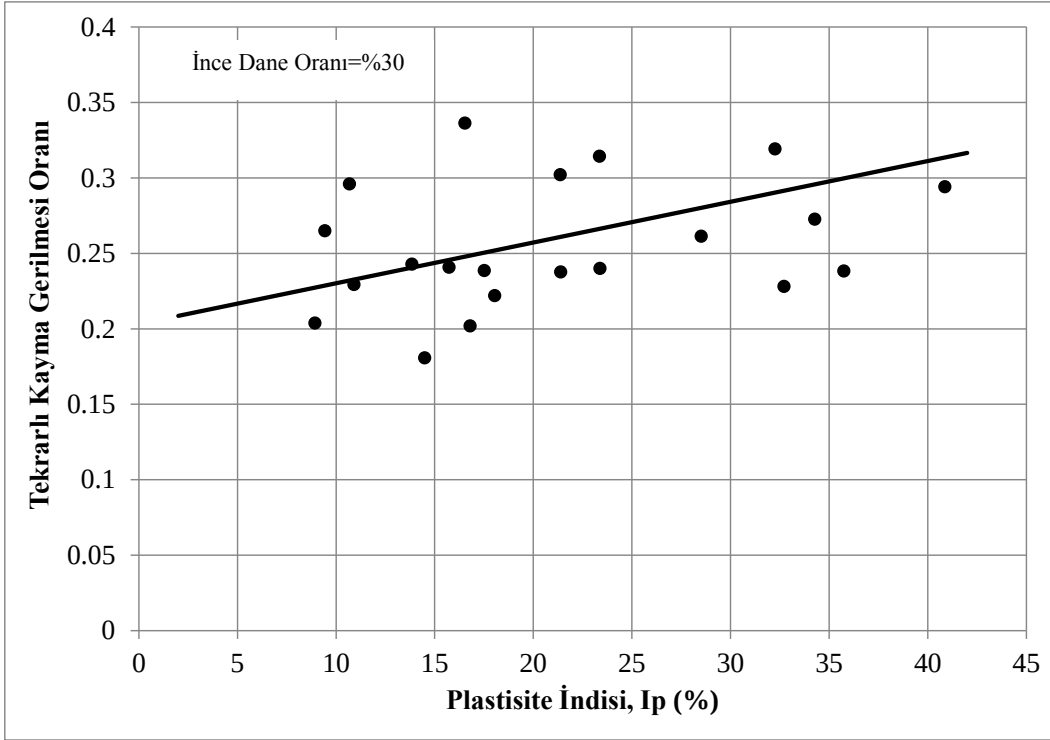
Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği konuları kapsamında yapılan çalışmalar, suya doygun düşük plastisiteli siltli kumların tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı üzerinde durmuş, artan boşluk suyu basınçları sonucu düşük plastisiteli siltli kum zeminde meydana gelen efektif gerilme azalımı 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 dşşk plastisiteli siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları da, büyük depremlerde gözlenen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları nedeniyle önem kazanmıştır.

Siltli kum zeminlerin sıvılaşması günümüze kadar pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir; Ishihara et al., (1978), Ishihara et al., (1980), Ishihara et al., (1981), Kaufman, (1981), Sherif et al., (1983), Troncoso and Verdugo (1985), Kondoh et al., (1987), Koester and Tsuchida, (1988), Chang, (1988, 1990), Troncoso, (1990), Koester, (1992), Erken ve Ansal, (1994), Erten ve Maher, (1995), Yamamuro and Lade (1997b, 1998), Lade and Yamamuro (1997), Amini and Qi, (2000), Salgado, et al., (2000), Yamamuro and Covert, (2001), Polito and Martin, (2001).

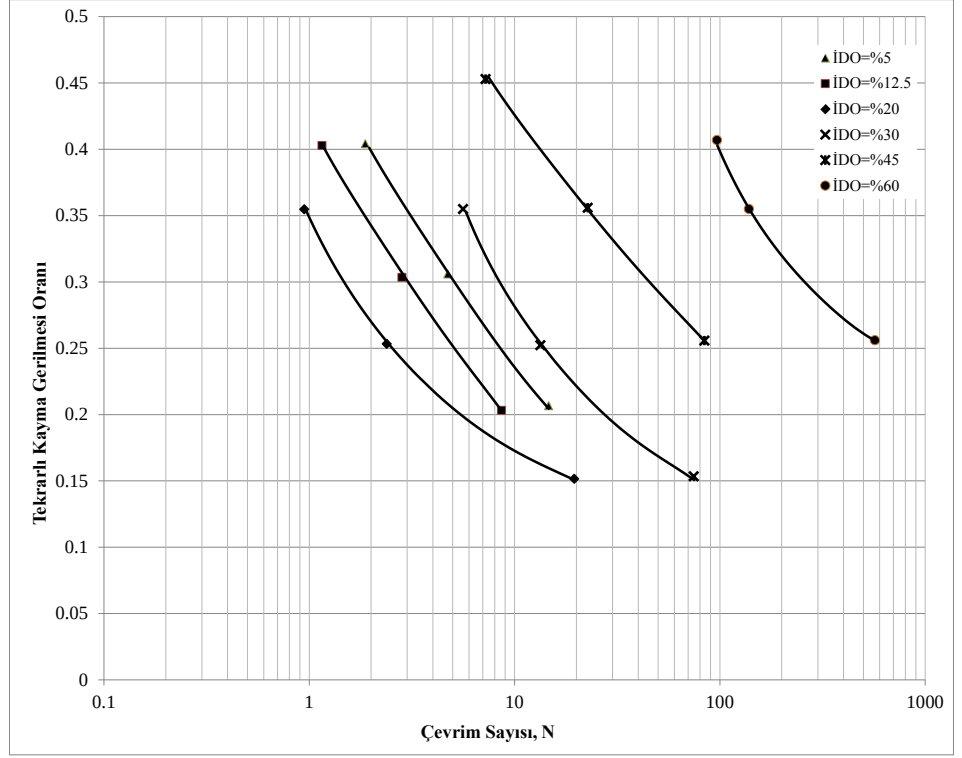
Ishihara et al., (1978), tarafından laboratuvar dinamik deneyleriyle yapılan araştırmada, kum zeminin sıvılaşmasına ince dane miktarının etkisi belirlenmiştir. İnce dane miktarı arttıkça, kumlu zeminin dinamik mukavemeti de gevşek durumda belli bir seviyeye kadar artmaktadır. Ancak sıkı olduğu durumda, bu artış daha fazla olmaktadır. Buradan ince danelerde bulunan kohezyon mukavemetinin, tekrarlı yükleme sırasında danelerin birbirinden ayrılmasını zorlaştırdığı, dolayısıyla boşluk suyu basıncı artışlarını azalttığı ve geciktirdiği, böylelikle de sıvılaşma dayanımını artırdığı sonucuna varılabilir.

Ishihara et al., (1980), tarafından kum zeminde yapılan çalışmada, belli bir yüzdeye kadar ince dane oranı arttıkça, sıvılaşma dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında, plastik olmayan siltlerin, % 15-20 arası plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlere göre çok daha dşşk dinamik mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ortalama olarak % 30 ince dane içeren kum zeminde ise, plastisitenin dinamik mukavemete olan etkisi araştırılmış, lineer dağılıma ait plastisite oranının % 30'dan fazla ince dane içeren zeminlerde sabit olduğu ileri sürülmüştür, (Ishihara et al., 1981). Bununla birlikte plastisite indisi arttıkça, aynı çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine erişmek için gerekli tekrarlı deviatör gerilme oranı artmaktadır (şekil 2.1).

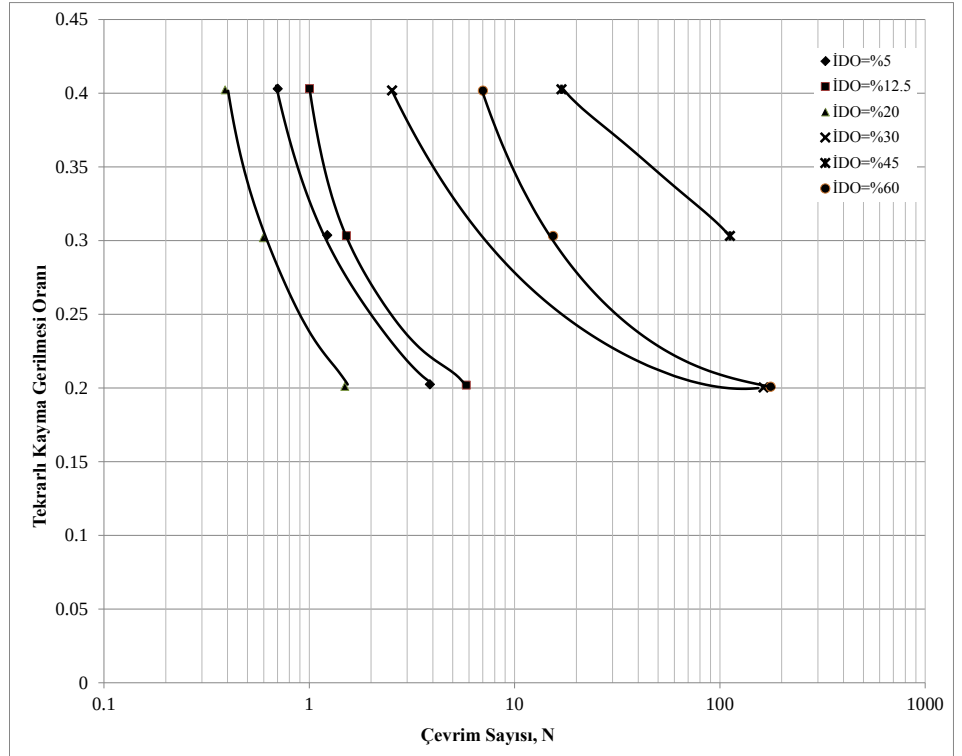


Şekil 2.1. İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara et al., 1981)

Chang (1988), ve Kaufmann (1981), kumlarda % 10-60 arasında değişen oranlarda silt miktarı arttıkça, sıvılaşma potansiyelinin de arttığını göstermişlerdir. Chang, (1990), ise silt-kum karışımlarında yaptığı dinamik deneylerde, silt yüzdesinin dinamik mukavemet üzerinde önemli olduğunu belirtirken, % 20'ye kadar silt eklenen kumlu numunelerde mukavemetin silt miktarıyla azaldığını ancak bu yüzdeden sonra ince danelerin boşluk suyu basıncı oluşumunu geciktirerek sıvılaşma dayanımını belli ölçüde artırdığını bulmuştur. Ayrıca, suya doygun, temiz, orta sıkı ve iyi derecelenmiş üç farklı kum numunesinde yaptığı deneylerde ince dane oranı ve plastisite indisinin dinamik mukavemete etkisini araştırmıştır (Şekil 2.2, 2.3, 2.4). Plastisite indisi % 4 olan numunelerdeki silt miktarının dinamik mukavemete olan etkisi görülmektedir. En büyük mukavemet, içerisinde hiç silt bulunmayan temiz kumda oluşurken silt yüzdesi % 20 olana kadar mukavemet ince dane miktarıyla azalmaktadır. Temiz ve iyi derecelenmiş kumda yapılan deneylerde ise plastisite indisinden bağımsız olarak % 5 ince dane eklendiği takdirde dinamik mukavemetin arttığı görülmektedir. Ayrıca iyi derecelenmiş kumlar, diğer kum numuneler göre ince dane miktarından daha az oranda etkilenmektedir. Tüm kum numunelerinde en düşük mukavemet ince dane yüzdesi % 4 olan kumda görülürken, temiz ve iyi derecelenmiş kumlarda % 2 ince dane oranı, genel olarak sıvılaşma dayanımını artırmaktadır.



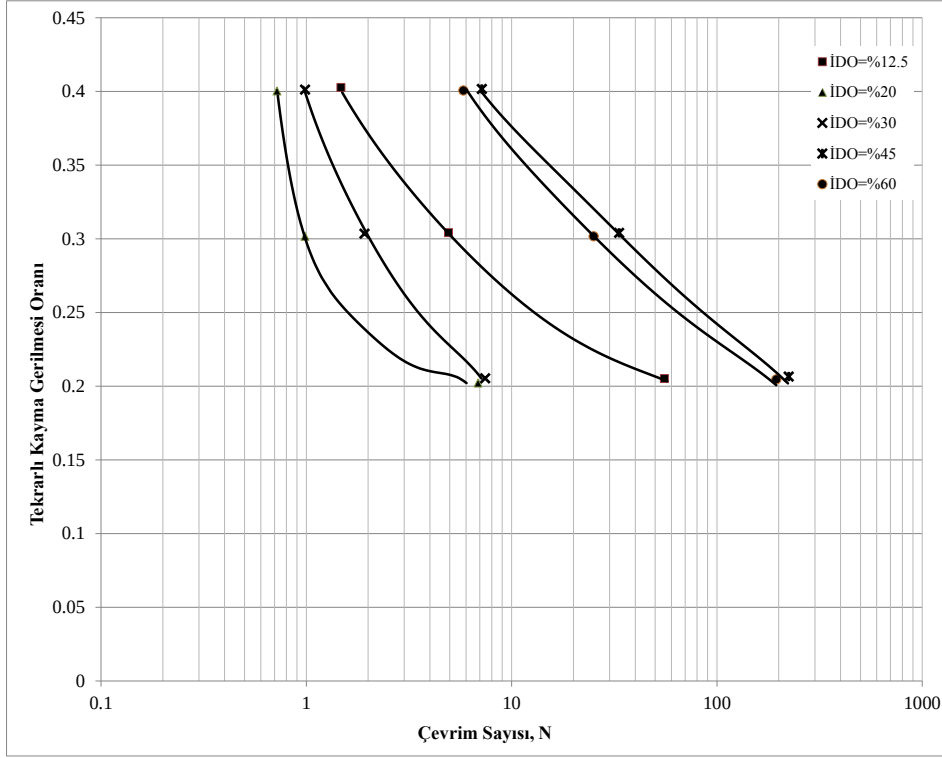
Şekil 2.2 PI= % 4 orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)



Şekil 2.3 PI= % 4 temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Kaufman (1981) ve Sherif et al., (1983), benzer granülometri eğrilerine ve endeks özelliklerine sahip farklı plastisitedeki silt miktarının, kum-silt karışımının

dinamik mukavemetini belirlemek üzere dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney aletleriyle % 5 çift genlikli deformasyon seviyesine kadar deneyler yapmışlardır. Şekil 2.5’den de görüleceği gibi ince dane yüzdesi arttıkça kumlu zeminde dinamik mukavemet artmaktadır.



Şekil 2.4 PI= % 4 iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

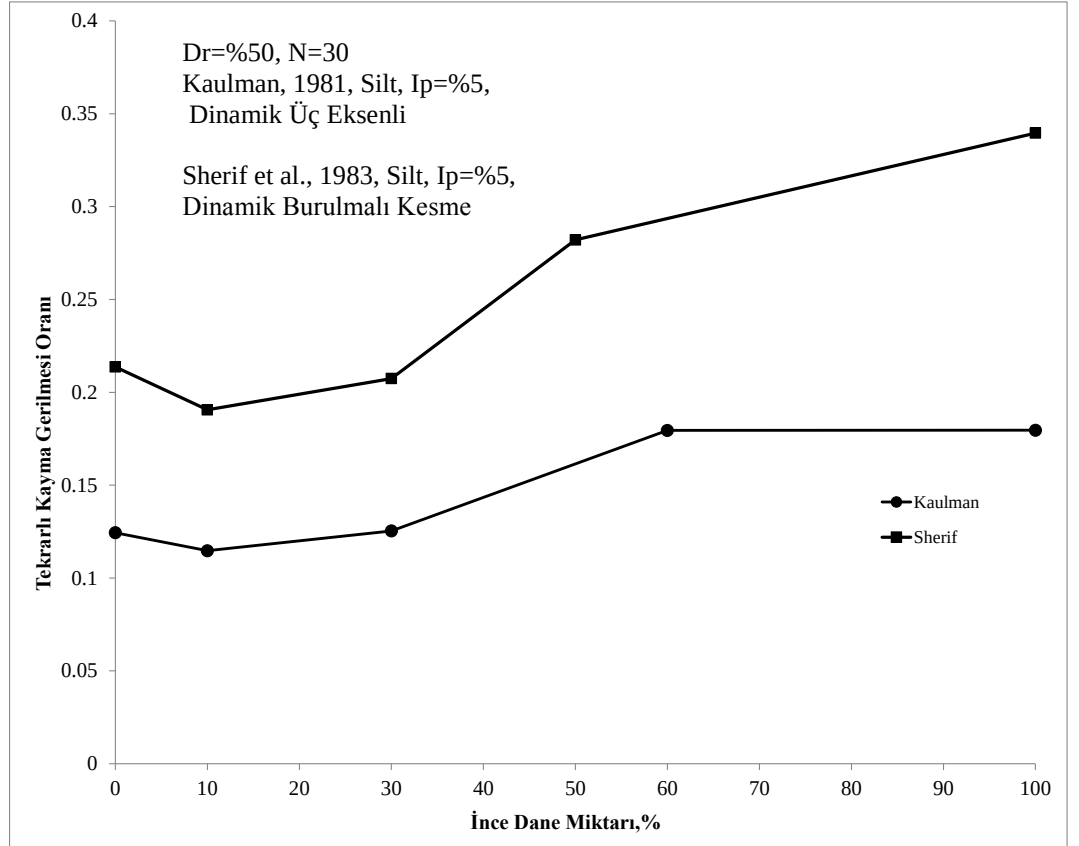
Kaufman, (1981) ve Sherif et al., (1983) tarafından yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerinde saf silt içeren numunelerde dinamik mukavemet, yaklaşık olarak % 65 daha fazla mukavemet elde edilmiştir.

Troncoso and Verdugo (1985) tarafından dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan deneylerde ise, plastik olmayan ince dane oranı arttıkça dinamik mukavemetin azaldığı belirlenmiştir.

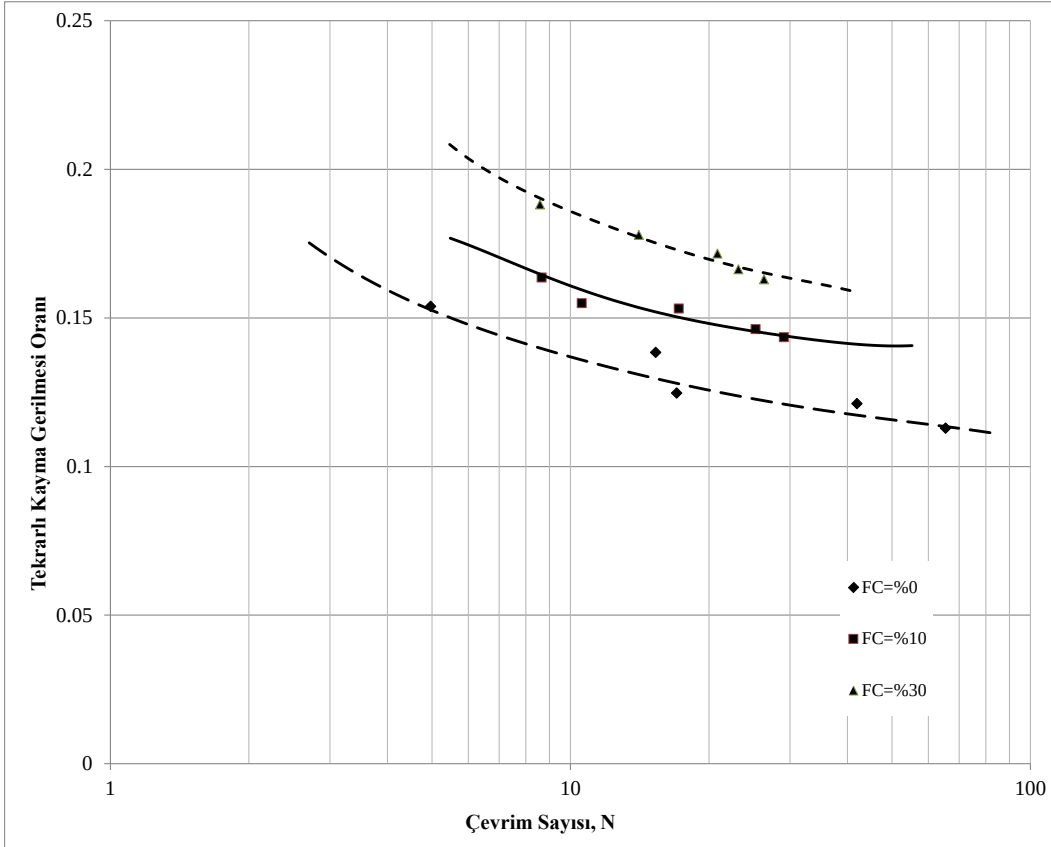
Kondoh et al., (1987), kumlarda sıvılaşma dayanımına etkiyen faktörlerden ince dane oranını, Sengenyama Kumuna kaolin kili ekleyerek araştırmışlardır. Ağırlıkça % 0 - 30 oranında eklenen ince danelerle hazırlanan numuneler üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Buna göre çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine ulaşmak için aynı tekrar sayısında, % 30 ince dane içeren

kum zemindeki gerilme oranının, % 10 ince dane miktarı olan kumla, temiz kumdan daha büyük olduğunu bulmuştur (Şekil 2.6).

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

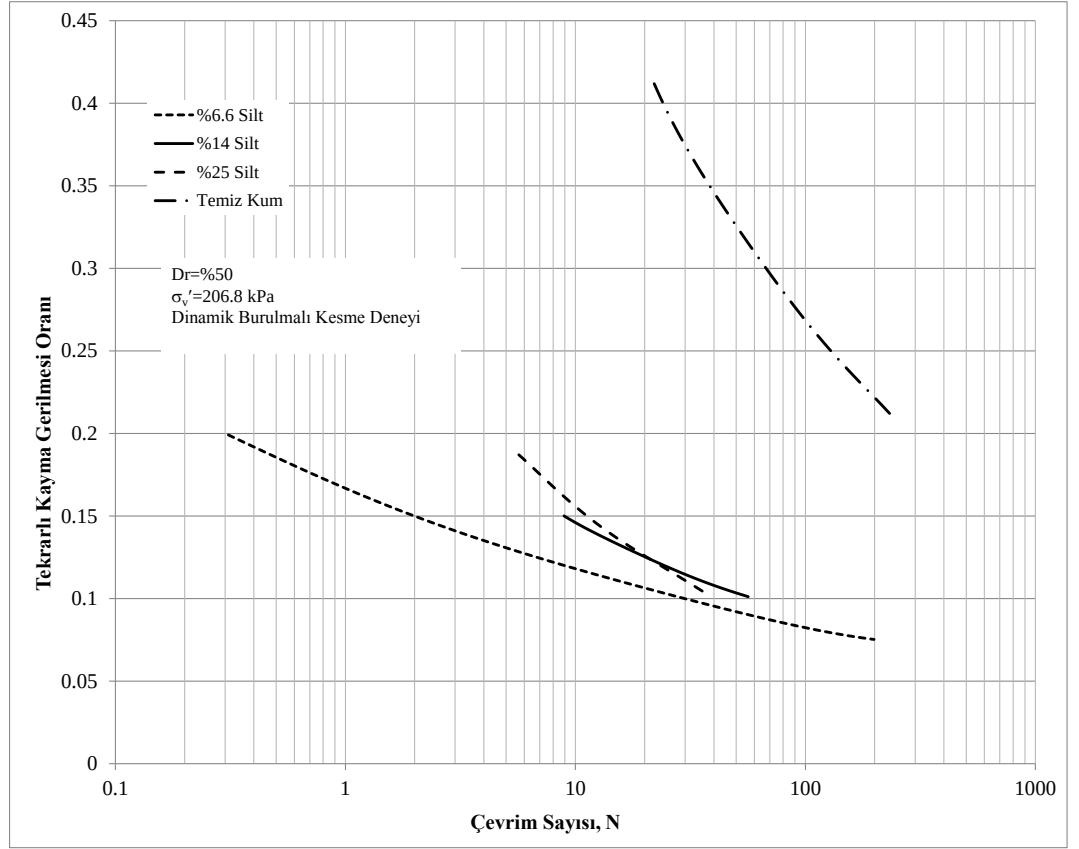


Şekil 2.5 Düşük plastisiteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981 ve Sherif et al., 1983)



Şekil 2.6 Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh et al., 1987)

Koester (1992), kum zeminlere değişik oranlarda düşük plastisiteli silt ve plastik kil katarak, sıvılaşma dayanımını, yaptığı dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleriyle belirlemiştir. Yapılan laboratuvar deney sonuçları, belirli bir boşluk oranına sahip kum zeminde, % 20 oranla ilave edilen düşük plastisiteli ince dane miktarına kadar sıvılaşma dayanımı azalmakta, bu sınırdan sonra ise ince dane yüzdesi artışı ile, sıvılaşma dayanımı artmaktadır (Şekil 2.7). Temiz kumda ise dinamik burulmalı kesme mukavemeti diğer ince daneli kumlara göre daha büyüktür. Laboratuvar da 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 korele etmiştir. Casagrande aletinde yaptığı likit limit deney sonuçlarının koni penetrasyonla bulduğu değerlere göre % 4 daha düşük su muhtevasında olduğunu belirlemiştir. Buradan kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yükler altında dinamik mukavemet kayıplarının belirlenmesinde bu farkın dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. İnce danelerin Casagrande yöntemiyle % 31'in üzerinde likit limite sahip kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin bulunduğunu söylemenin aşırı güvenli tarafta kalacağını belirtmiştir.



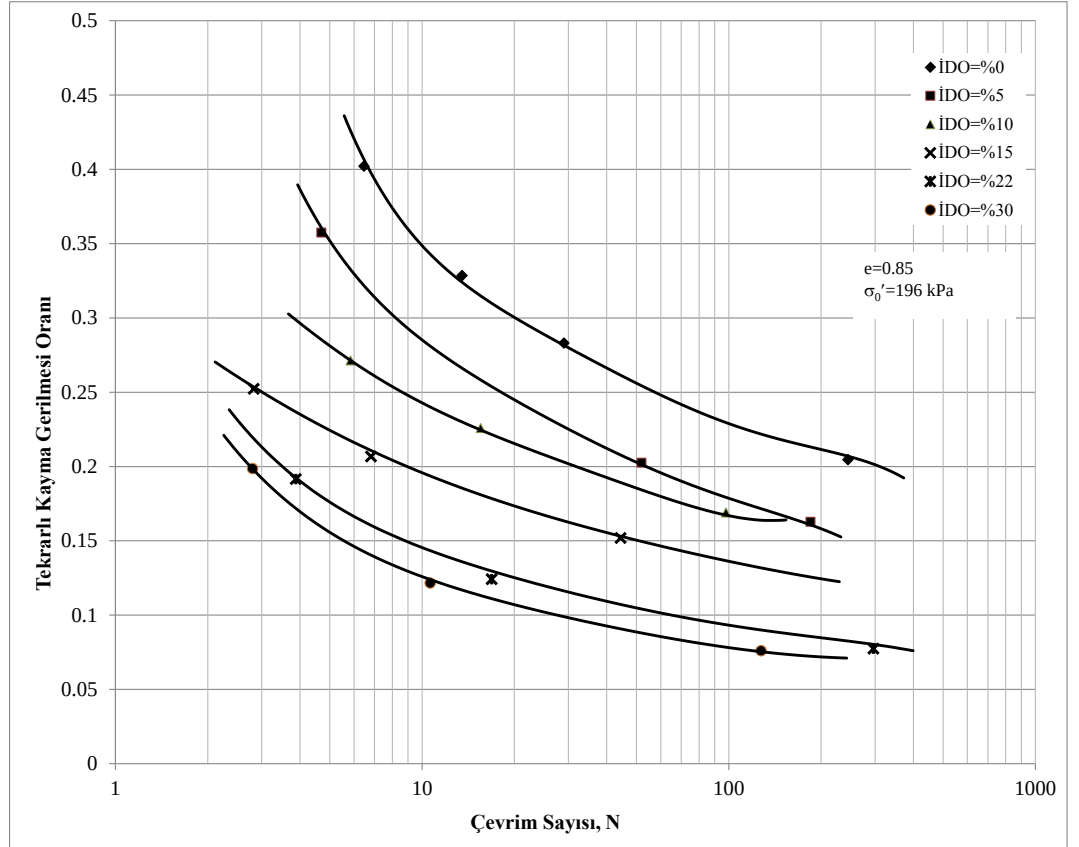
Şekil 2.7 İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992)

Koester (1992), dinamik üç eksenli deney aletinde ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırladığı 129 farklı türdeki numuneleri izotropik olarak konsolide ettikten sonra yaptığı yaklaşık 500 deney ile ince dane türü ve oranının kum-silt-kil karışım zeminlerinin dinamik mukavemeti üzerine olan etkisini araştırmıştır. Dinamik burulmalı kesme deney aletinde ise dört tür numune kullanarak izotropik ve anizotropik koşullarda dinamik deneyler yapmıştır. Kullandığı numuneler; temiz ince kum; plastisite indisi $PI = 10$ olan, % 20 ince dane eklenerek hazırlanan temiz ince kum; plastisite indisi $PI = 25$ olan, % 20 ince dane eklenerek hazırlanan temiz ince kum; plastisite indisi % 15 olan, % 45 ince dane eklenerek hazırlanan temiz ince kum numuneleridir. Bununla birlikte bu iki tür deney sisteminin sonuçları arasında ilişki bulunduğunu söylemiş, bu ilişkinin, zeminin granülometrisine, 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. Bununla birlikte, kumlar üzerinde yaptığı gerek dinamik üç eksenli, gerekse dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptığı sıvılaşma deneylerinin, ince dane

türü ve miktarından doğrudan etkilendiğini ve belirli bir yüzdeye kadar eklenen ince dane miktarının sıvılaşma dayanımını fazla artırmadığını, ancak bu sınır değerin üzerine çıkıldığında, plastisite indisinden bağımsız olarak, sıvılaşma dayanımının, ince dane yüzdesiyle arttığını belirtmiştir.

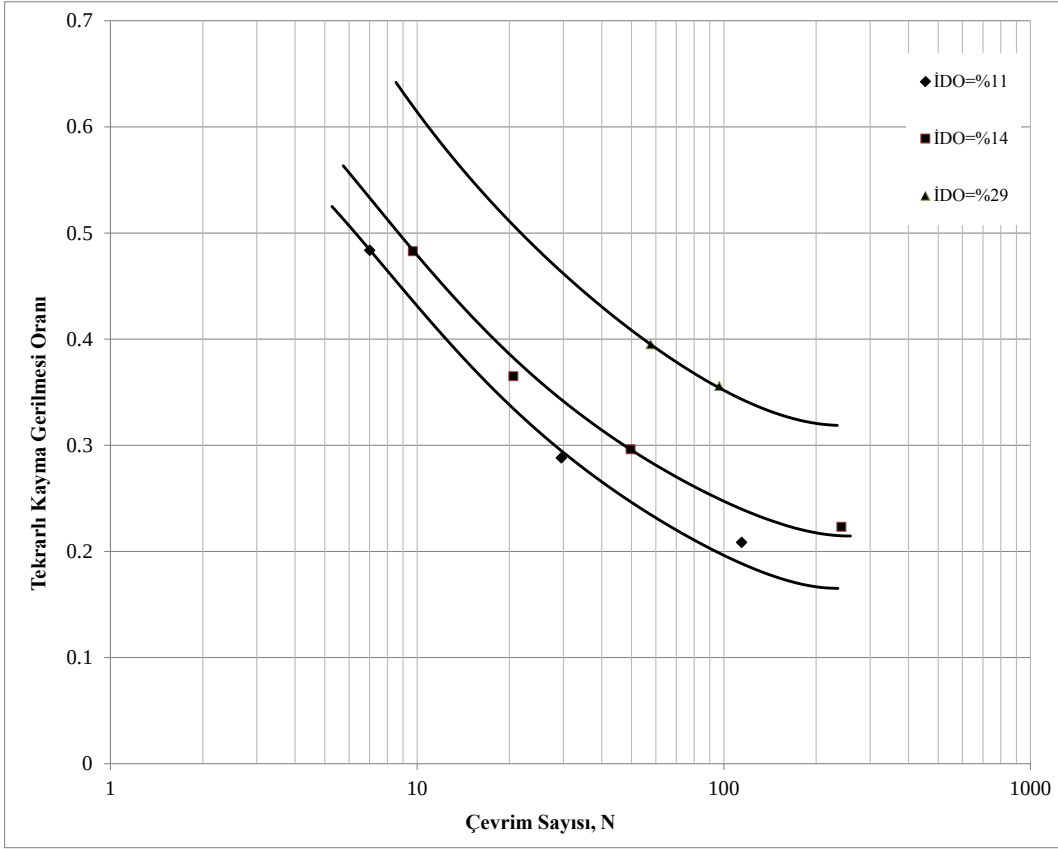
Troncoso (1990), 0.85 sabit boşluk oranında, % 0 - 30 arasında değişen oranlarda silt içeren kumların dinamik mukavemetini araştırmıştır. Şekil 2.8’de artan silt miktarıyla, değişen dinamik mukavemetler görülmektedir. Buna göre, aynı boşluk oranında silt yüzdesi % 30’a kadar artırıldıkça, kum zeminin mukavemeti azalmaktadır. Troncoso (1990), sabit boşluk oranında gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği bu sonuçların, diğer araştırmacıların sonuçlarından farklı olduğunu öne sürmüştür.

Erken ve Ansal, (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde yapılan deneylerde ise plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşma dayanımının da arttığı görülmüştür (Şekil 2.9). Erten ve Maher, (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 belirlenmiştir. Sonuçlardan, silt miktarının ve plastisitesinin, boşluk suyu basıncı oluşumunda % 10^{-2} birim kayma deformasyonundan küçük değerlerde pek etkisinin olmadığı, siltli kumlarda ise akma deformasyonu eşik değerinin, temiz kumlardakiyle yaklaşık 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 (1995), 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.

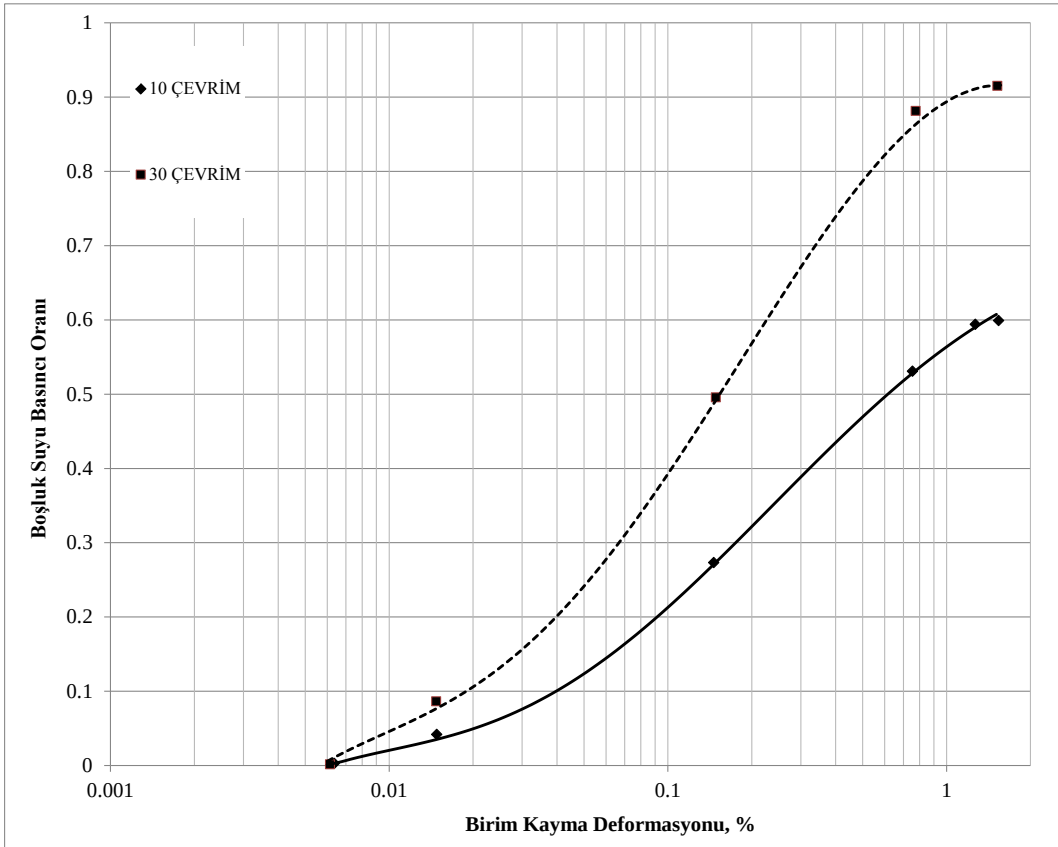


Şekil 2.8 Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (F=Silt Yüzdesi) (Troncoso, 1990)

Bir diğer çalışmada, plastik olmayan silt miktarı arttıkça, kumlu zeminde drenajlı ve drenajsız durumda hacimsel sıkışma potansiyelinin arttığı ve böylece mukavemetin azalarak sıvılaşmanın olduğu görülmüş, zeminde akma meydana geldiği belirtilmiştir (Yamamuro and Lade 1997b, 1998; Lade and Yamamuro 1997). Ayrıca Ishihara (1993) ve Verdugo and Ishihara (1996), plastik olmayan silt yüzdesi arttıkça zeminin daha kolay sıvılaştığını göstermişlerdir.

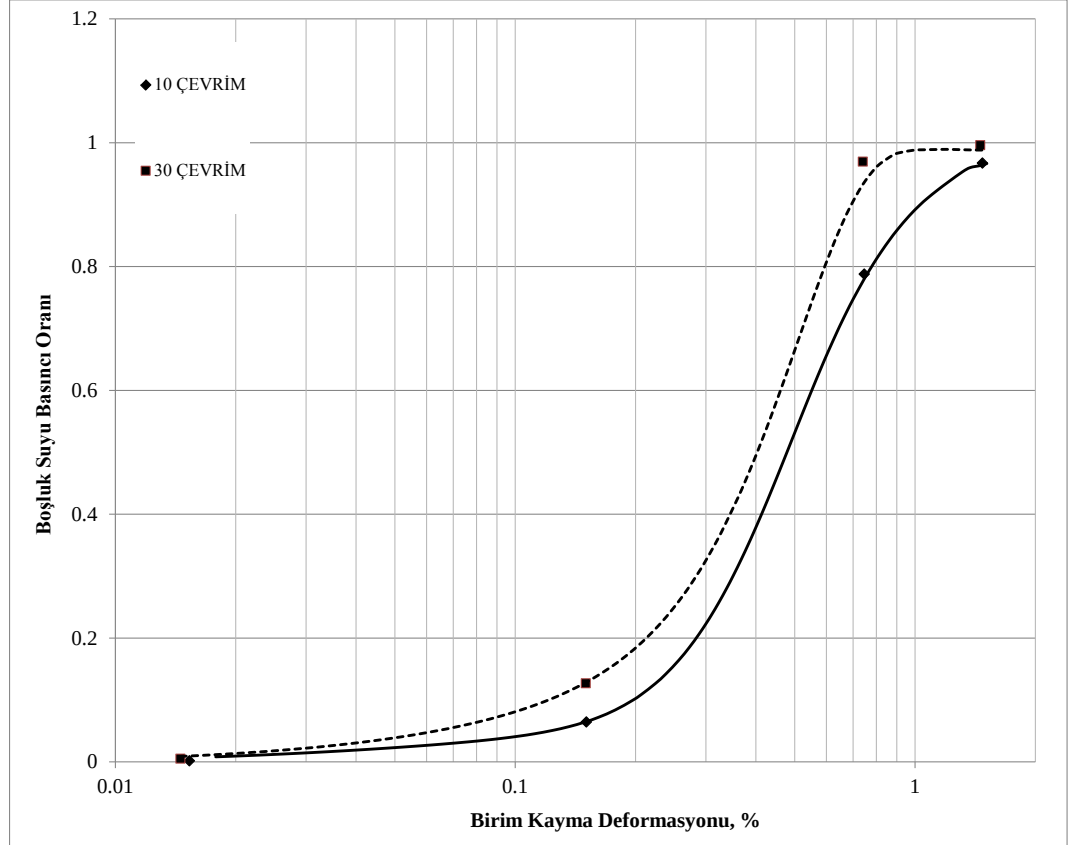


Şekil 2.9 Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1994)

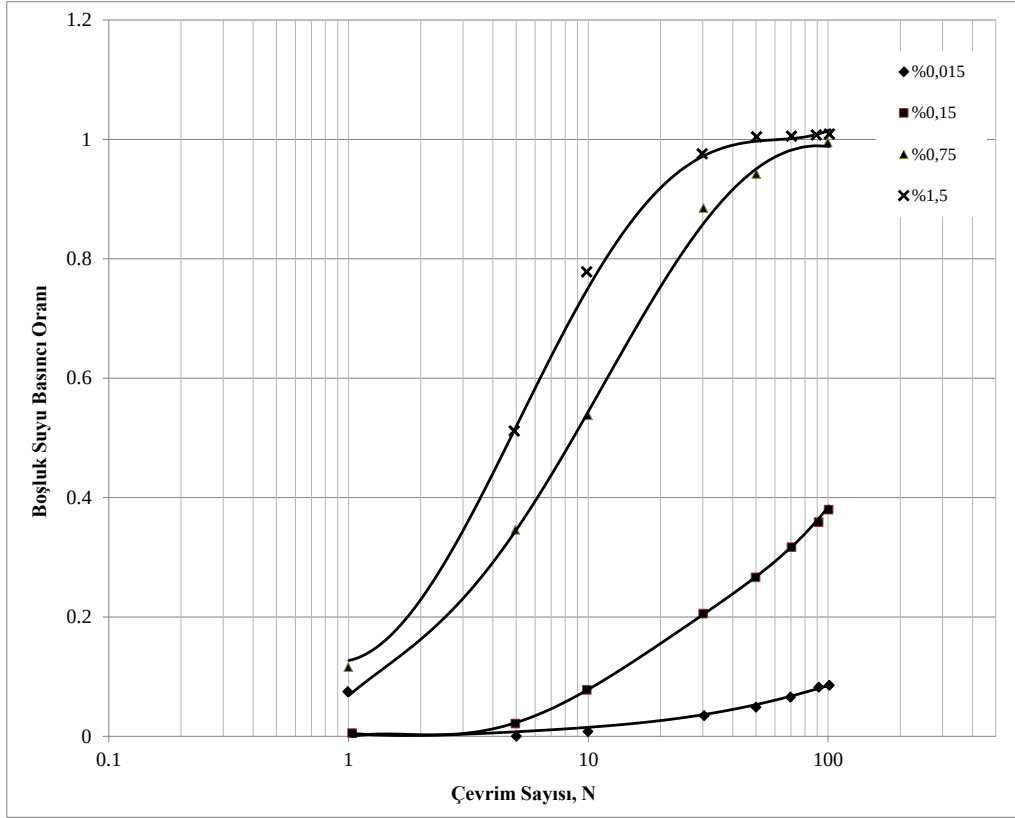


Şekil 2.10a Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten and Maher, 1995)

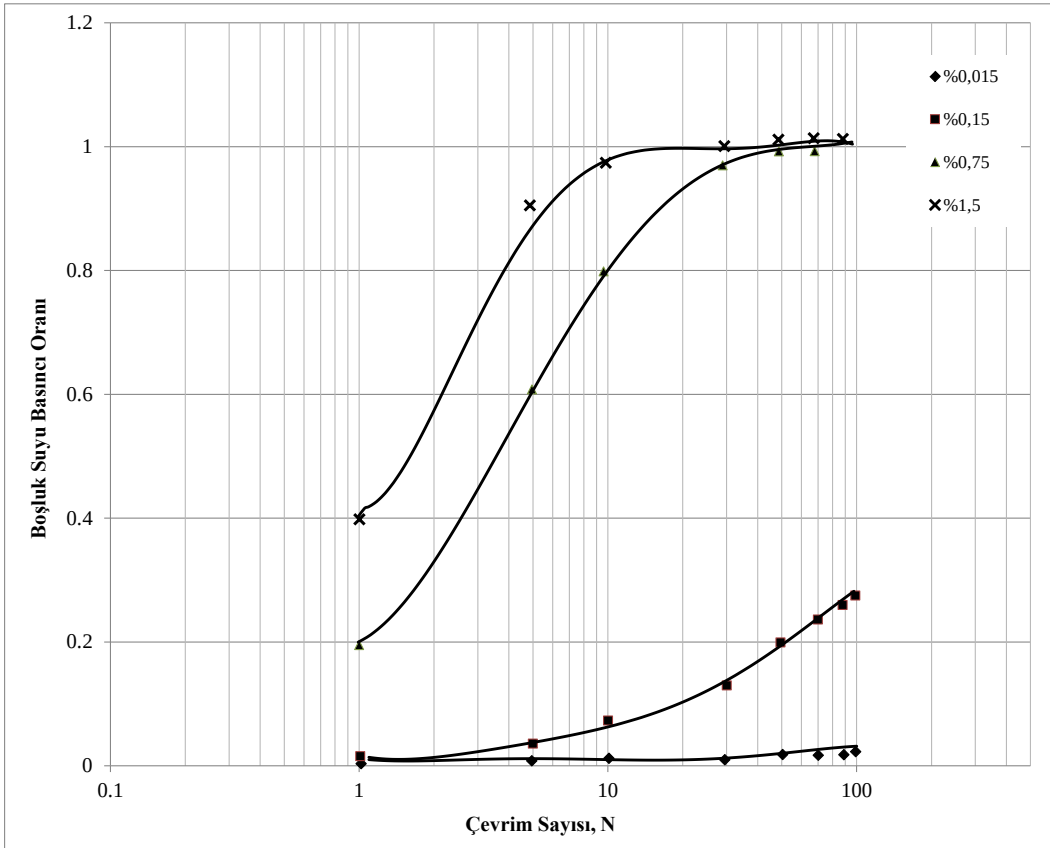
Amini and Qi, (2000), tarafından homojen olarak hazırlanan ve 250 kPa çevre basıncı uygulanan silt-kum karışımı numunelerde dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan bir seri deneyde % 10'dan % 50'ye kadar artan silt miktarının, $N=10$ çevrim sayısına karşılık gelen dinamik gerilme oranında % 60'a kadar bir artışa sebep olduğu görülmüştür.



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



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



Şekil 2.10d Plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı değişimi (Erten and Maher, 1995)

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 düşüş meydana gelmektedir. Tabakalı olarak hazırlanan numunelerde ise bu azalma % 20 seviyesindedir (Amini and Qi, 2000).

Salgado et al., (2000), dinamik mukavemetin yanında, kumlarda düşük deformasyon seviyelerindeki elastik davranışın ve kayma mukavemetinin de, ince dane miktarıyla arttığını belirtmişlerdir.

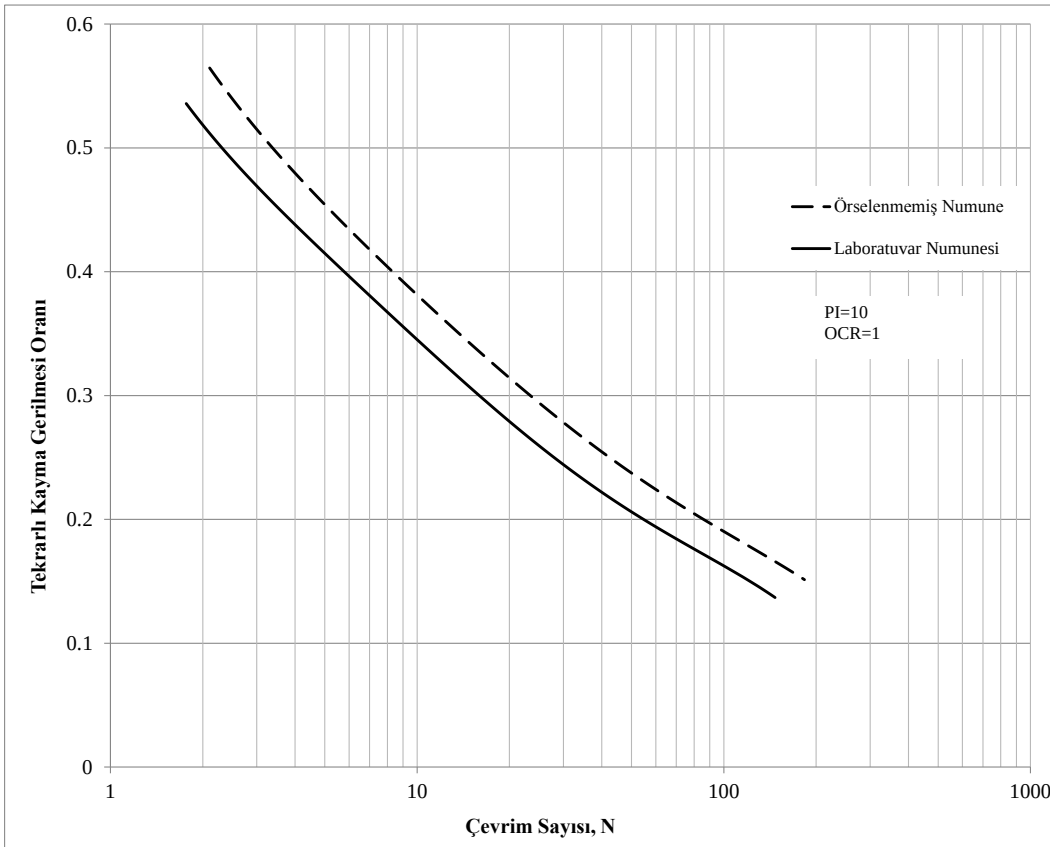
Yamamuro and Covert (2001), % 40 silt içerikli gevşek kum zeminlerde drenajsız statik ve dinamik üç eksenli deneyler yapmışlar, statik üç eksenli deneylerden elde ettikleri kırılma zarfının dinamik deneylerde sıvılaşmanın oluşması için gerekli gerilme seviyesine yakın olduğunu belirlemişlerdir.

Polito and Martin (2001), ise kumların sıvılaşma dayanımına plastik olmayan ince danelerin etkisini araştırmıştır. Plastik olmayan siltlerle 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 danelerarası boşlukların alabileceği en büyük silt miktarına sınır değer silt yüzdesi adı verilmiştir ve yaklaşık olarak % 25-45 arasında olduğu bulunmuştur. Eğer, kum zeminin boşluklarının bir kısmı siltle doluyorsa, zeminin dinamik davranışına kum zeminin sahip olduğu relatif sıkılık etkili olmaktadır. İskeletin boşluk oranı azaldıkça mukavemet artmaktadır. Bu karışım zeminin içerdiği silt miktarı sınır değer üzerindeyse, bu durumda davranışa silt etkili olurken, tüm zeminin relatif sıkılığı dinamik mukavemete etkimektedir. Ancak relatif sıkılık, bir önceki duruma göre daha az oranda mukavemeti değiştirmektedir (Polito and Martin, 2001).

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 et al., 1976, Sandoval, 1989). İnce daneli zeminlerde yapılan çalışmalarda, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon

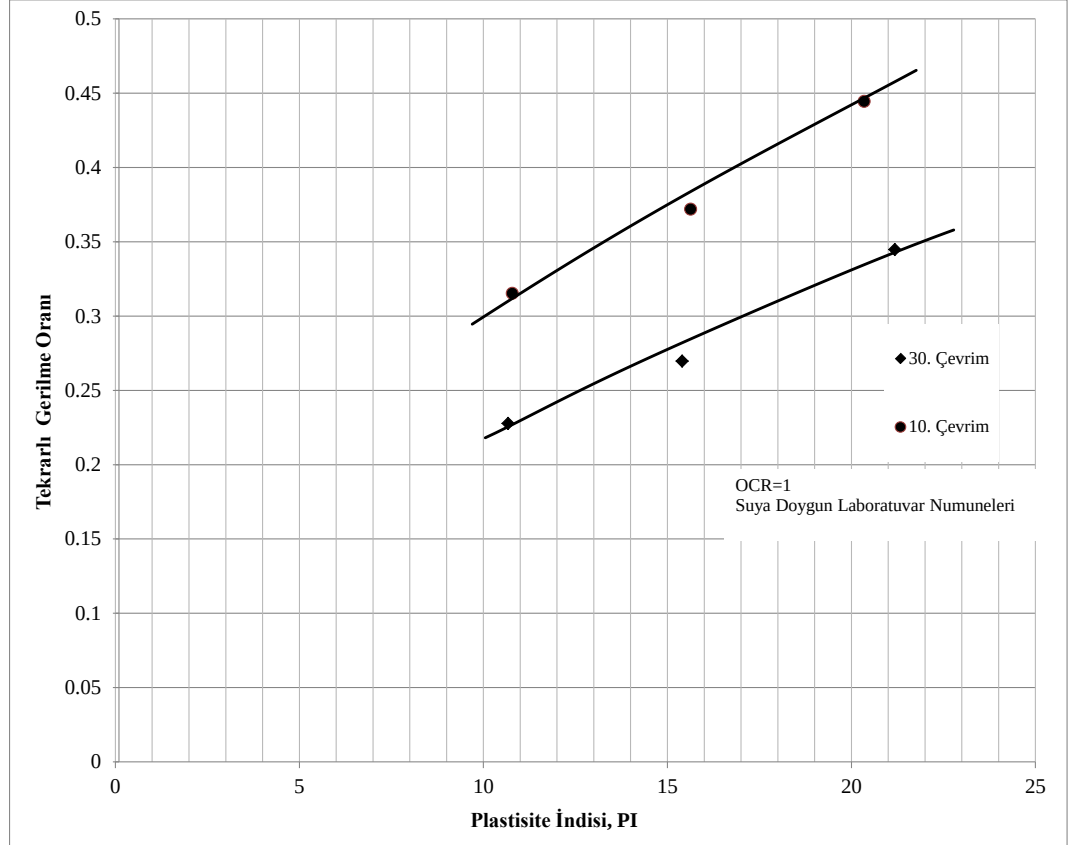
oranının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Buna göre her ikisi de arttığında dinamik mukavemette artış meydana gelmektedir.

Puri (1984), doğal su muhtevasında deneye tabi tutulmuş örselenmemiş numunelerin yanında, ters basınç altında doyurulduktan sonra önceden seçilmiş efektif konsolidasyon basıncında konsolide edilen laboratuvar numunelerinde de deneyler yapmıştır. Şekil 2.11’de, bu iki tür numunenin % 5 çift genlikli deformasyon seviyesine kadar yüklendikleri duruma ait mukavemet eğrileri görülmektedir. Buna göre, örselenmemiş plastik olmayan siltli numunelerin dinamik mukavemetleri laboratuvarda hazırlananlara göre daha yüksektir. Şekil 2.12’de ise plastisite indisinin laboratuvarda hazırlanan normal konsolide silt numunelerinin dinamik mukavemetine olan etkisi görülmektedir. Aynı çevrim sayısında plastisite indisıyla birlikte gerilme oranı artarken, çevrim sayısı ile birlikte aynı plastisitedeki numunelerde gerilme oranının azaldığı bulunmuştur.

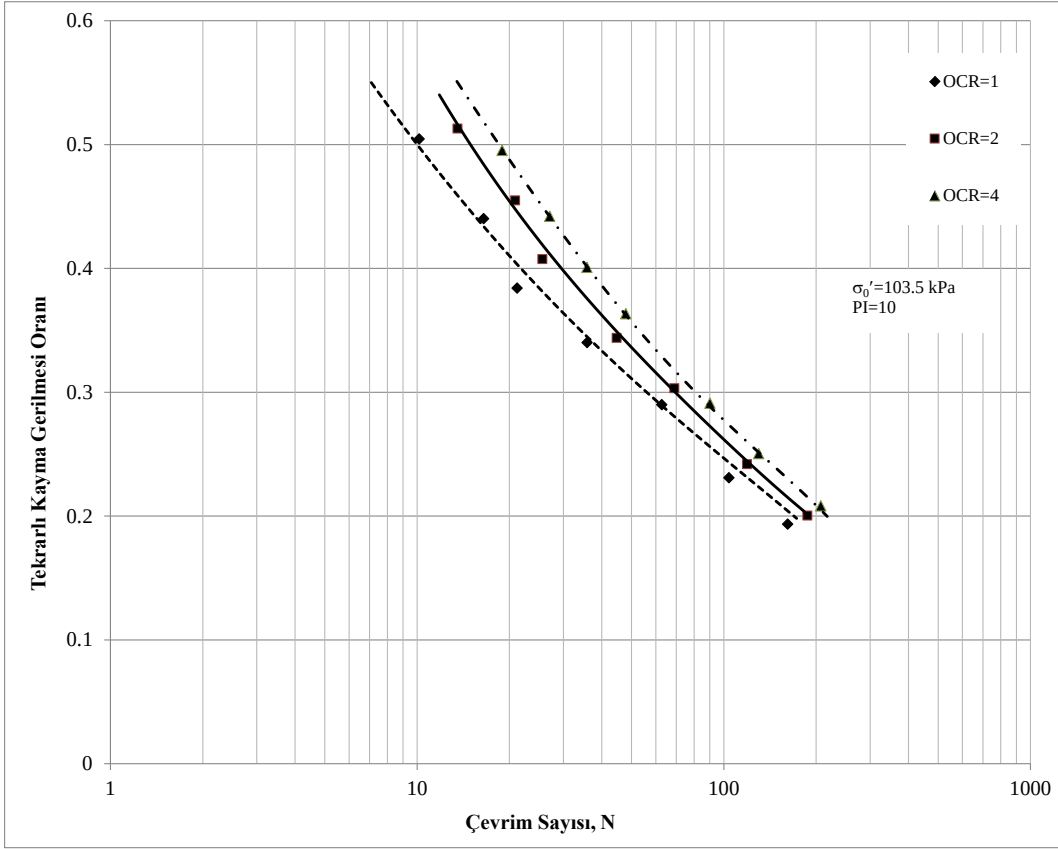


Şekil 2.11 Örselenmemiş ve laboratuvar numunelerinin dinamik davranış farklılığı (Puri, 1984)

Şekil 2.13'te ise aşırı konsolidasyon oranıyla örselenmemiş siltli numunelerin dinamik davranışı arasındaki ilişki verilmiştir (Puri, 1984). Buna göre aşırı konsolidasyon oranı arttıkça aynı çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine ulaşmak için gerekli gerilme oranı ve dolayısıyla dinamik mukavemet artmaktadır.

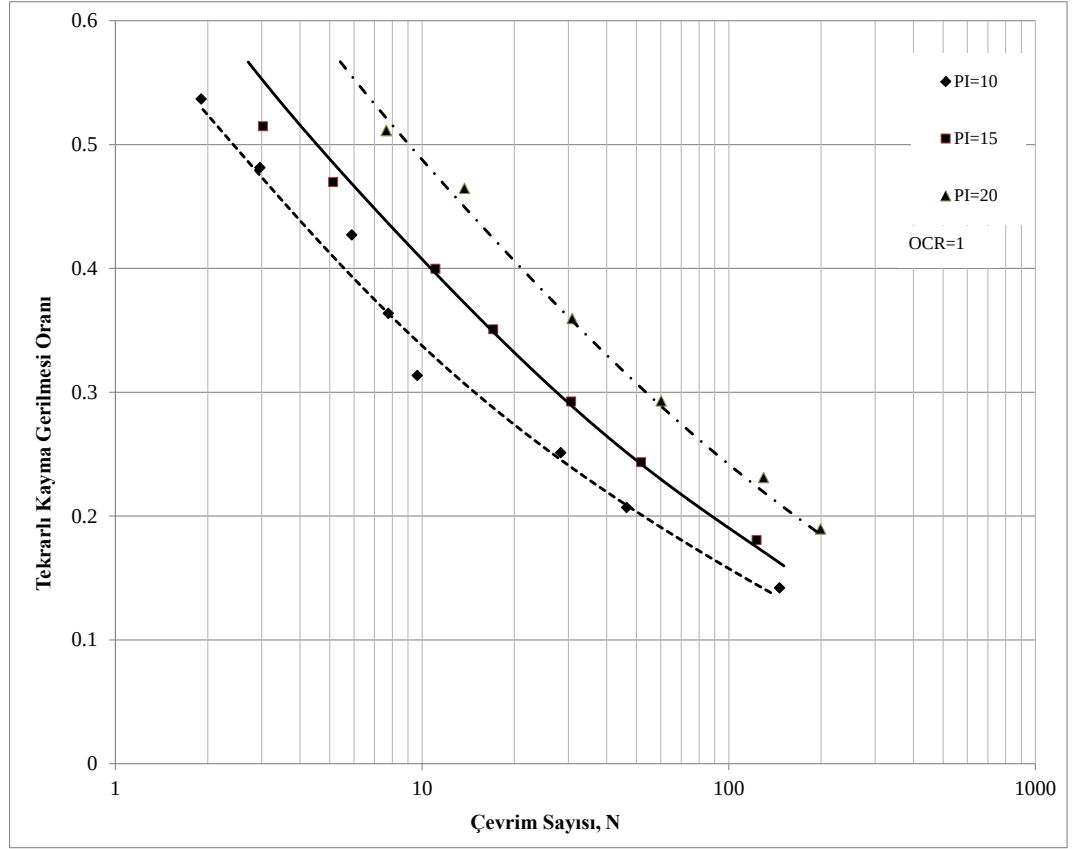


Şekil 2.12 Plastisite indisinin 10 ve 30 çevrimde % 5 çift genlikli deformasyonun oluşması için gerekli gerilme oranıyla değişimi (Puri, 1984)



Şekil 2.13 Ön sıvılaşma durumu için gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisi (Puri, 1984)

Puri (1984), yaptığı çalışmada plastisitenin etkisini belirlemek üzere göçme kriterini, % 5 çift genlikli deformasyon seviyesi olarak alıp, Şekil 2.14'te görülen dinamik mukavemet eğrileri ile ifade etmiştir. Buna göre, laboratuvarında hazırlanan silt numunelerinde % 10-20 aralığında plastisite indisi arttıkça, zeminin dinamik mukavemeti de artmaktadır.



Şekil 2.14 Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına plastisite indisinin etkisi (Puri, 1984)

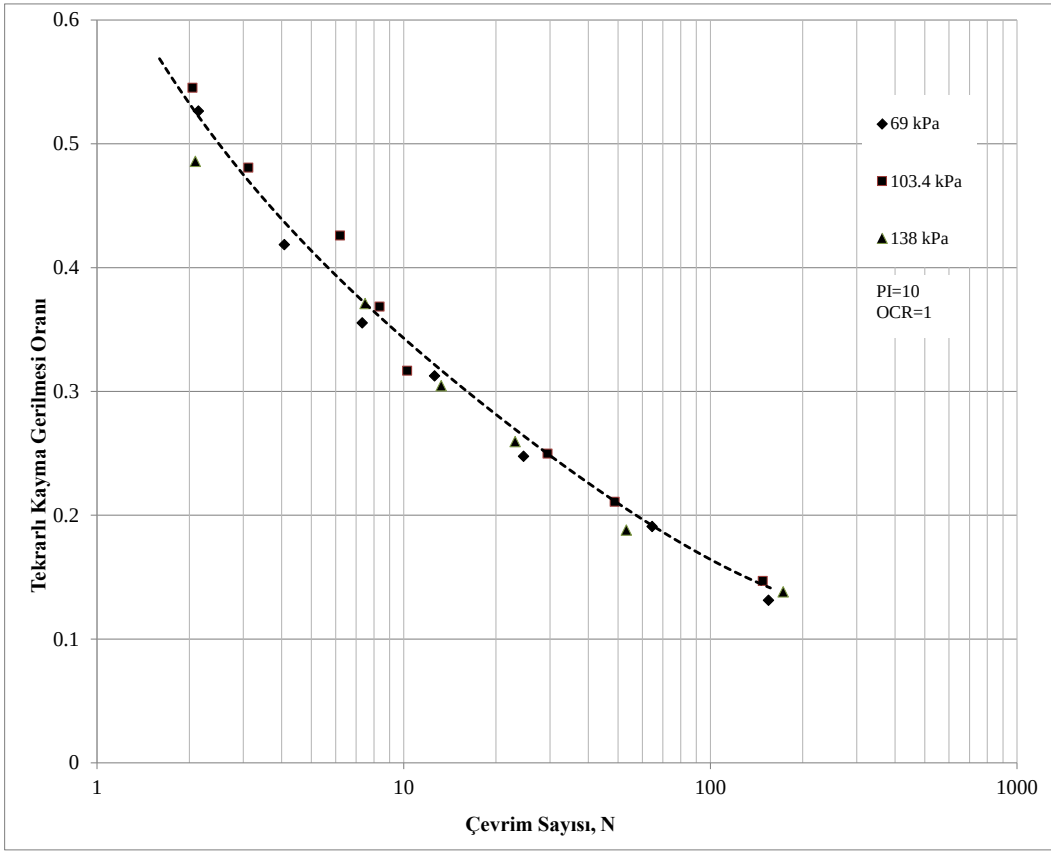
Şekil 2.15'te Puri (1984) tarafından laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları görülmektedir. Çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonu seviyesi zeminde göçme kriteri olarak alınmıştır. Plastisite indisi % 10 olan siltli numunelerde farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde numunelere 0.1-0.5 arasında değişen oranlarda tekrarlı gerilme uygulanmış ve sonuçlarda fazla bir farklılık görülmemiştir.

El Hosri et al., (1984), iki farklı bölgeden 20-40 m'den aldığı örselenmemiş silt numunelerinde çeşitli dinamik deneyler yapmıştır. Siltli kum numunesi dışında diğer numuneler, % 5-15 arası plastisiteye sahip (ML-CL veya ML-MH) siltli kil ve killi silt özelliktedir. Elde ettiği sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1) Boşluk oranı 0.478, plastisite indisi % 5 olan numune, $CSR=0.32$ dinamik gerilme oranında göçmeye uğramıştır. Boşluk oranı 0.644 olan plastik olmayan siltli numune ise $CSR=0.295$ gerilme oranında göçmeye ulaşmıştır. İlk numune ikincisine oranla daha sıkı olmasına rağmen, göçmenin oluşması için gerekli

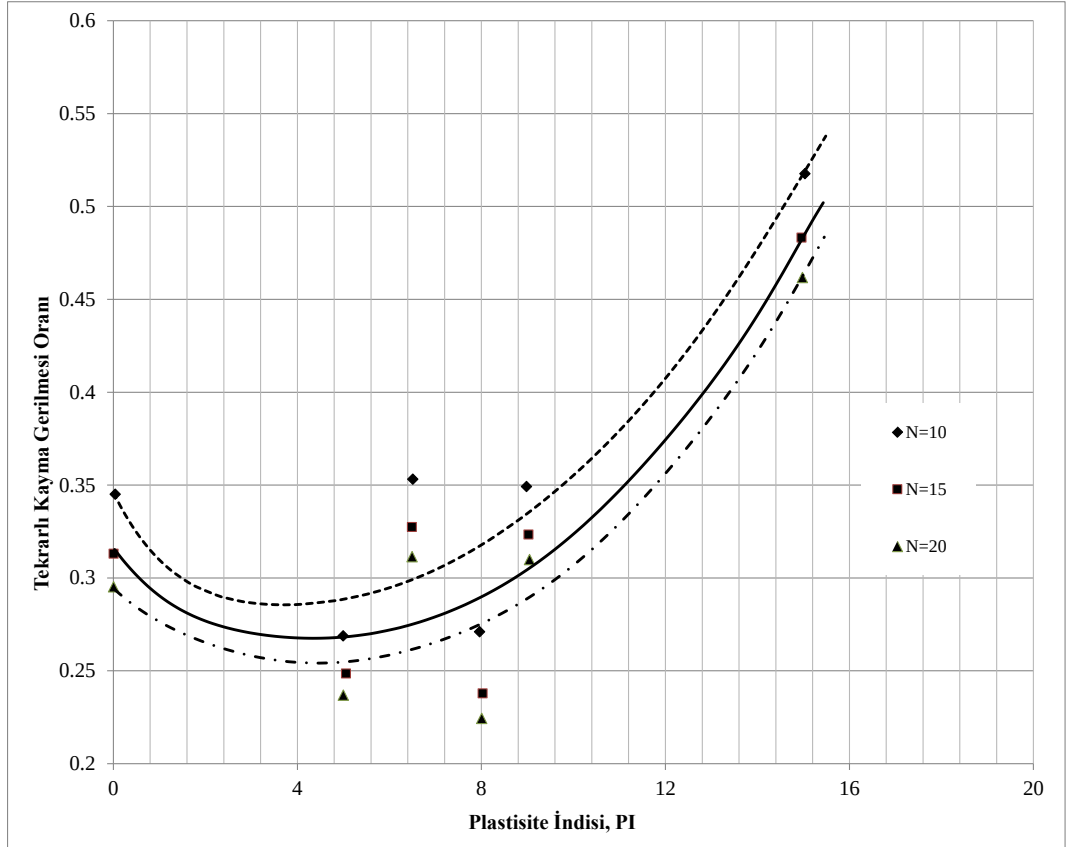
gerilme oranı yalnızca az bir miktar daha fazladır. Buradan boşluk oranının yanında plastisitenin de dinamik mukavemette etkili olduğu sonucuna varılmaktadır.

2) Üçüncü bir numunede boşluk oranı 0.548, plastisite indisi ise % 8 olup, göçmeye $CSR=0.265$ gerilme oranında ulaşılmıştır. Yine bu numune de ikinci numuneden daha sıkı olmasına karşın sıvılaşmaya karşı dayanımı daha düşüktür. Aynı şekilde bu numunede de plastisite indisi, ilk numuneye göre daha fazladır, ancak gerilme oranı daha düşüktür. Bununla birlikte bu son kıyas tartışmaya açıktır çünkü bu son numunedeki boşluk oranı ilk numunedekinden daha büyüktür.



Şekil 2.15 Laboratuvarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984)

3) Sadece plastisitenin etkisini araştırmak amacıyla, boşluk oranına göre normalize edilen gerilme oranı ile plastisite indisi ilişkisi çizilmiştir, % 5 plastisiteye kadar gerilme oranında azalma görülürken, sonraki değerlerde plastisite indisi ile gerilme oranı da artmaktadır (Şekil 2.16). Artan çevrim sayılarında ise bu artış daha düşük gerilme oranlarında meydana gelmektedir.

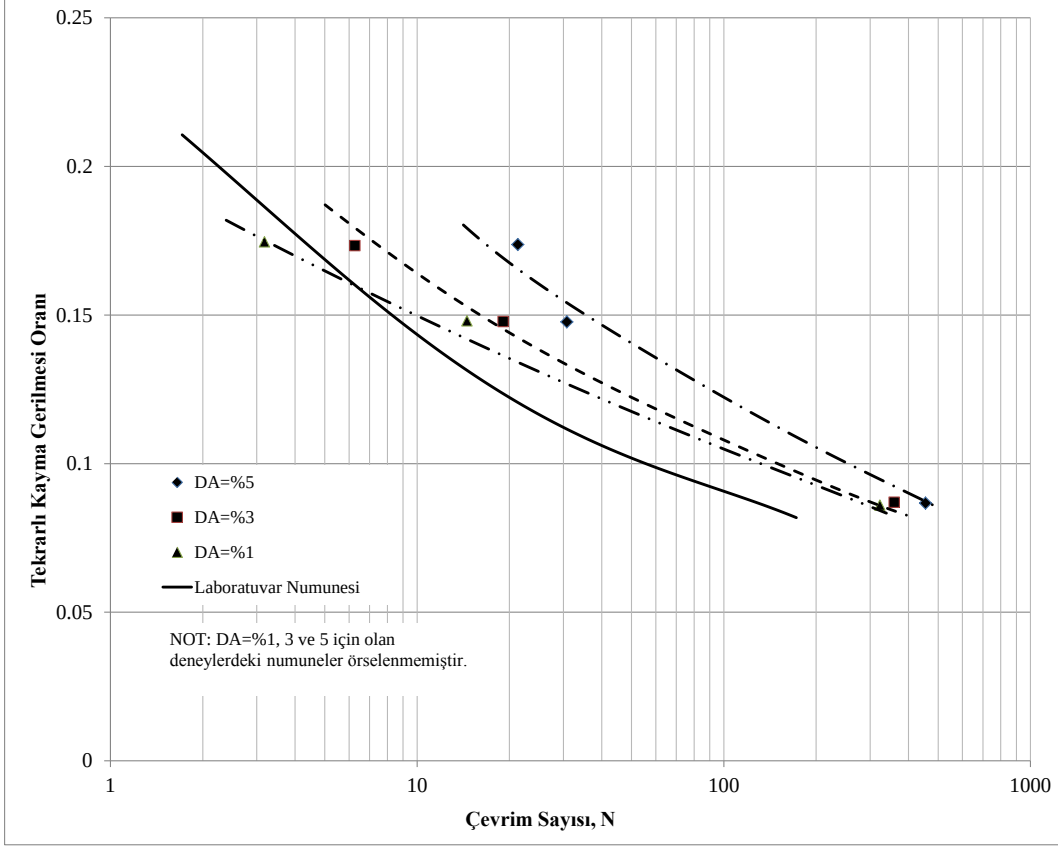


Şekil 2.16 Dinamik mukavemetin plastisite indisiyle değişimi (El Hosri et al., 1984)

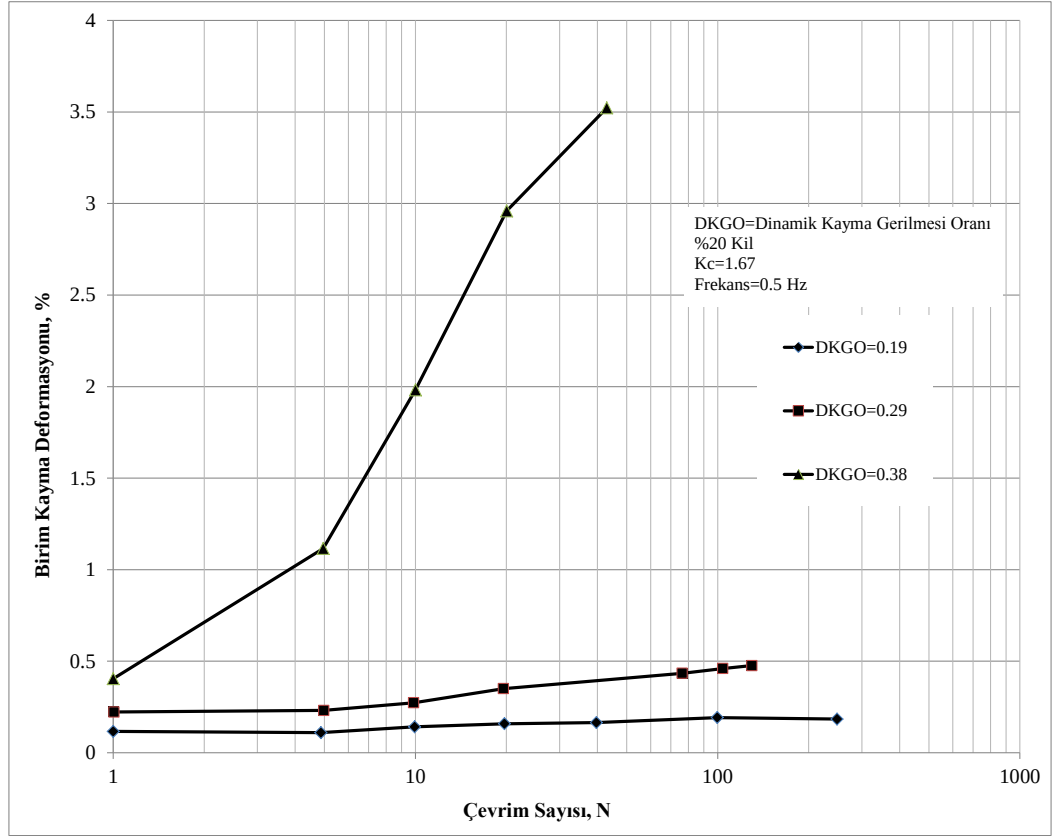
Zhu and Law (1988), ise örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanan plastik olmayan siltli numunelerde yaptıkları deneylerde sabit boşluk oranında siltlerin dinamik mukavemetlerinin kumlarınkine benzediğini kaydetmişlerdir. Ayrıca, örselenmemiş numunelerde artık boşluk suyu basıncının efektif konsolidasyon basıncının % 80'i olduğu anda kayma deformasyonlarının hızla arttığını, laboratuvar numunelerinde ise bu seviyenin % 85'e karşılık geldiğini söylemişlerdir (Şekil 2.17).

Konrad and 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 2.18, 2.19, 2.20'de dir. Şekil 2.18 ve 2.20'de farklı tekrarlı gerilme genliklerinde, aynı yükleme frekansında yapılan dinamik deneylerde birim kaymanın çevrim sayısı ile olan değişimi görülürken, Şekil 2.19'da birim kayma oluşumuna yükleme frekansının etkisi gösterilmiştir. Buna göre frekans arttıkça aynı çevrim sayısında numunede oluşan birim kaymalar azalmaktadır. Dolayısıyla

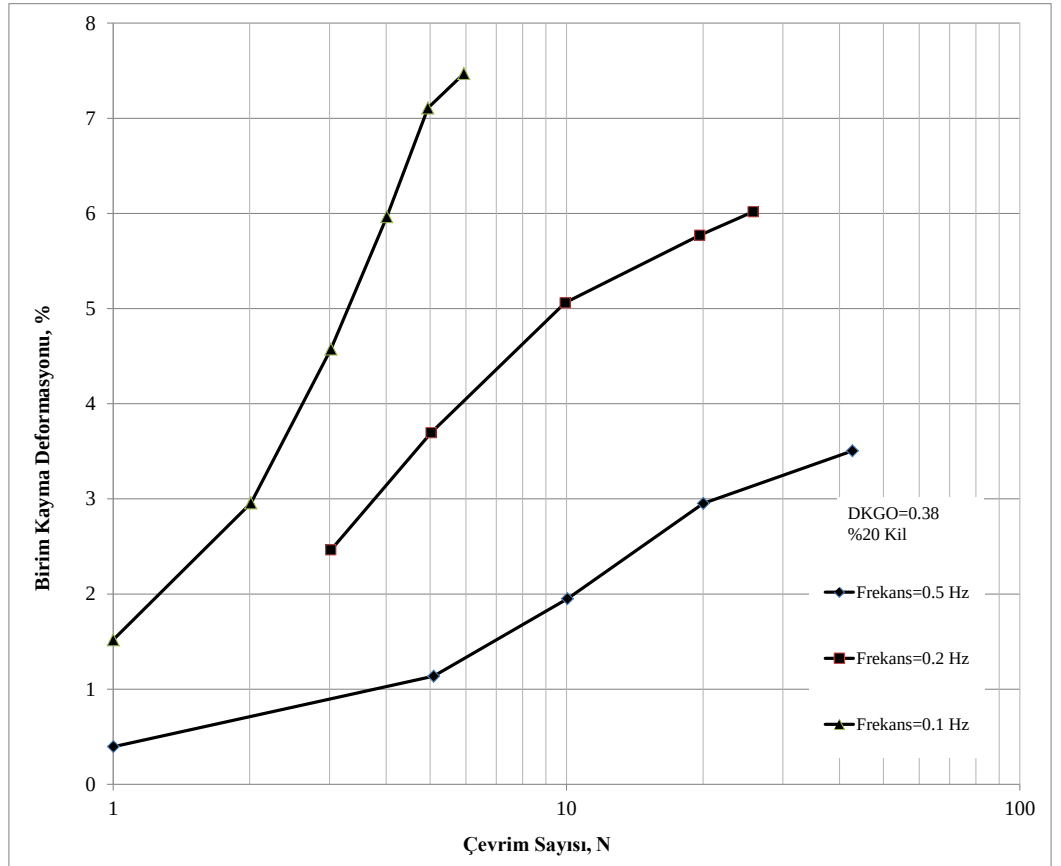
tekrarlı yüklemenin frekansı, ince daneli zeminde dinamik mukavemeti artırmaktadır.



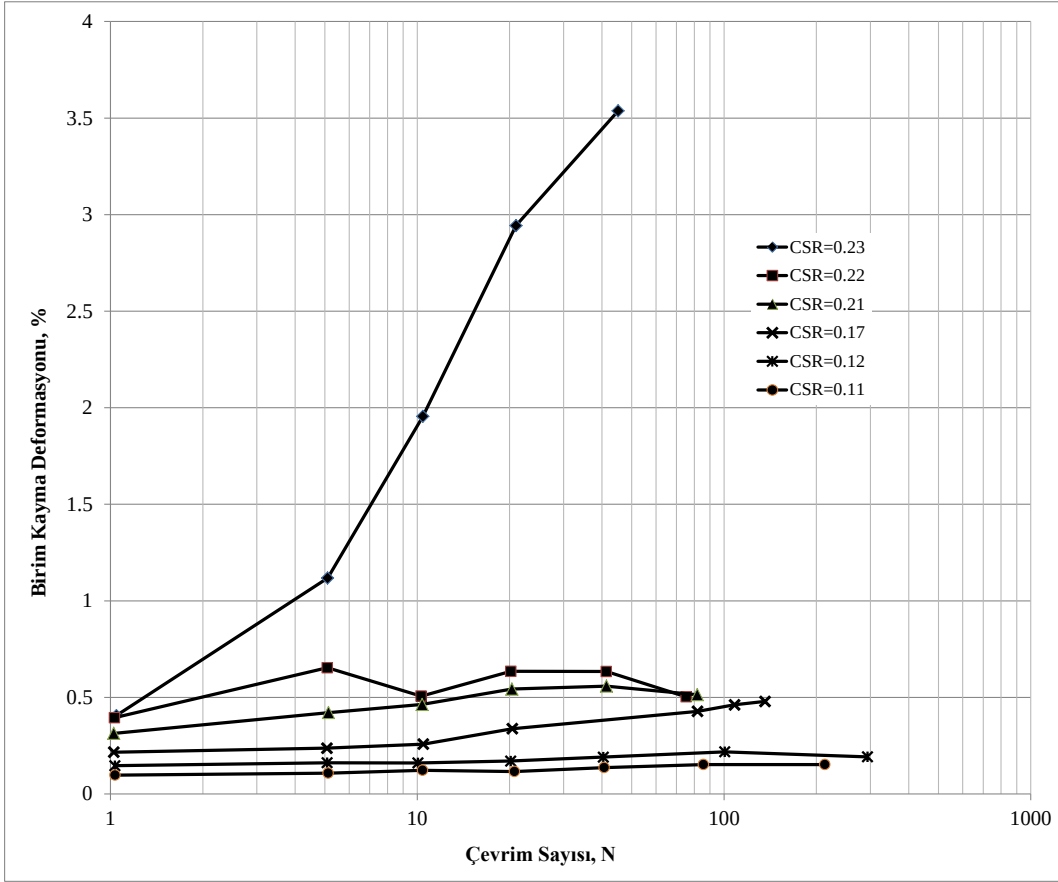
Şekil 2.17 Örselenmemiş numunelerde ve laboratuvarında hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu and Law, 1988)



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



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

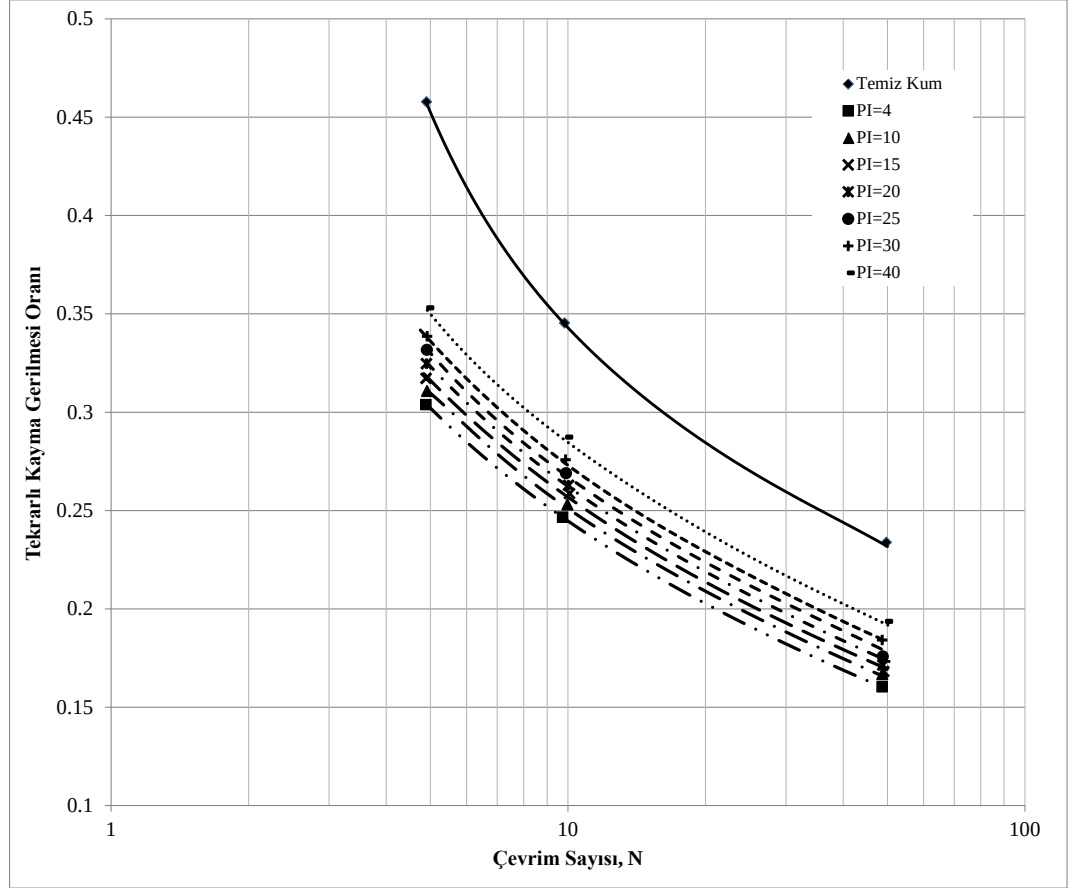


Şekil 2.20 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

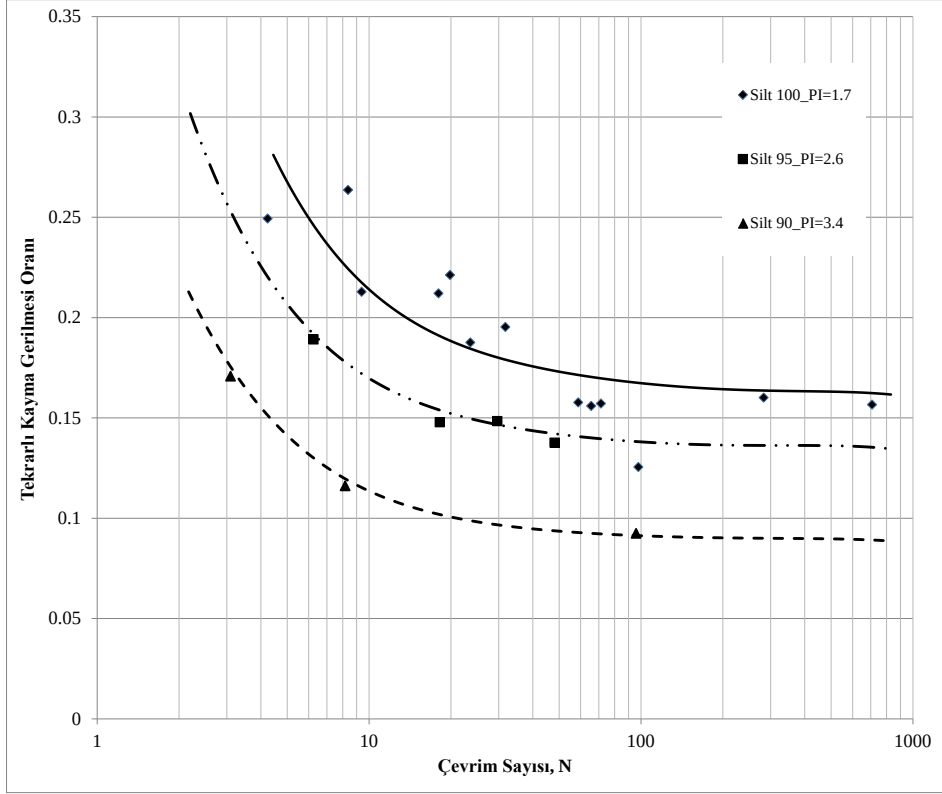
Liu (1992), regresyon analiziyle elde ettiği dinamik mukavemet eğrilerinde, 10 çevrimde plastisite indisinin ince daneli, kohezyonlu zeminde dinamik mukavemet üzerindeki etkisini araştırmıştır (Şekil 2.21). Plastisite indisinin % 4-40 arası değerlerinde artan plastisite ile dinamik mukavemet artarken, en yüksek mukavemet temiz kumda elde edilmiştir.

Sandoval (1989), ve Prakash and Sandoval (1992), siltlerin sıvılaşma potansiyeline plastisite indisinin etkisini araştırmıştır. Düşük plastisiteli silte ($I_p = \% 1.7 - 3.4$), % 5-10 oranında kaolin kili ekleyerek hazırladıkları numuneleri, boşluk suyu basıncı efektif çevre basıncına eşit olana kadar veya % 5-10-20 birim kayma genliklerine ulaşılan kadar tekrarlı yüklemeye maruz bırakmışlardır. Sonuçlardan, düşük plastisitelere, plastisite indisi arttıkça siltlerin dinamik mukavemeti azalmaktadır (Şekil 2.22). Benzer şekilde, siltli zeminde kil yüzdesi arttıkça, göçmenin oluşması için aynı çevrim sayısında eksenel deformasyon miktarı artmakta buna karşın dinamik gerilme oranı azalmaktadır. Şekil 2.23 ve

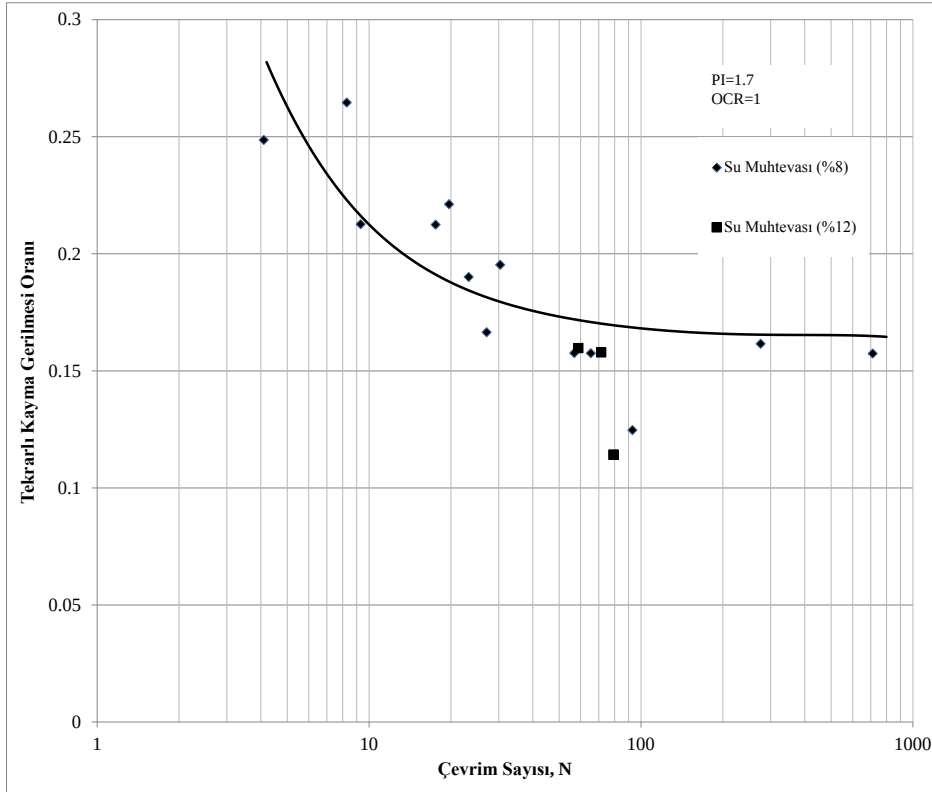
2.24'te % 8 ve % 12 su muhtevasında laboratuvarında sıkıştırılarak hazırlanan, aynı efektif çevre basıncında farklı birim hacim ağırlıktaki düşük plastisiteli silte ait mukavemet eğrileri görülmektedir. Zeminlerin birim hacim ağırlıklarının artması ile beraber aynı çevrim sayısına karşılık gelen tekrarlı kayma gerilmesi genliği oranları artmıştır.



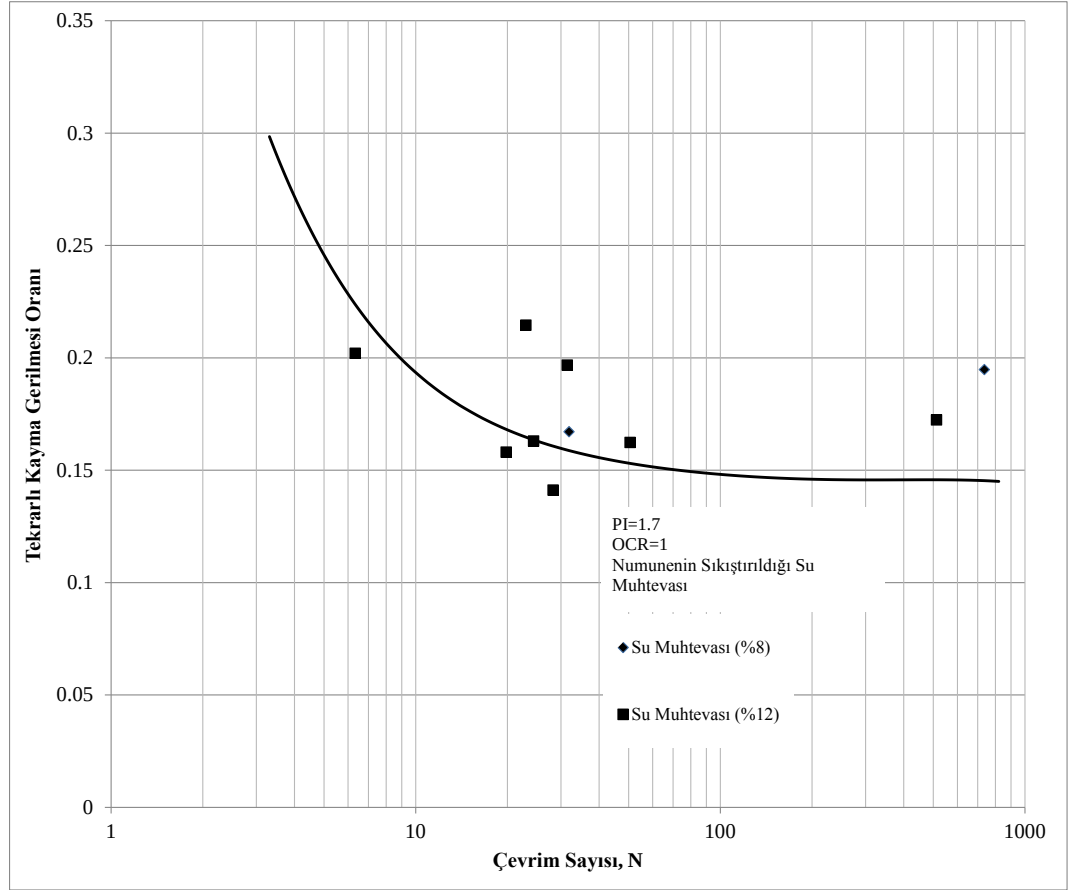
Şekil 2.21 Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu, 1992)



Şekil 2.22 Düşük plastisiteli siltlerde % 5 çift genlikli deformasyon durumuna plastisitenin etkisi (Sandoval and Prakash, 1992)



Şekil 2.23 Çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi ($\gamma=15.3$ kN/m³) (Sandoval, 1989)



Şekil 2.24 % 5 çift genlikli deformasyon seviyesinde gerilme oranıyla çevrim sayısı ilişkisi ($\gamma_k=16.0$ kN/m³) (Sandoval, 1989)

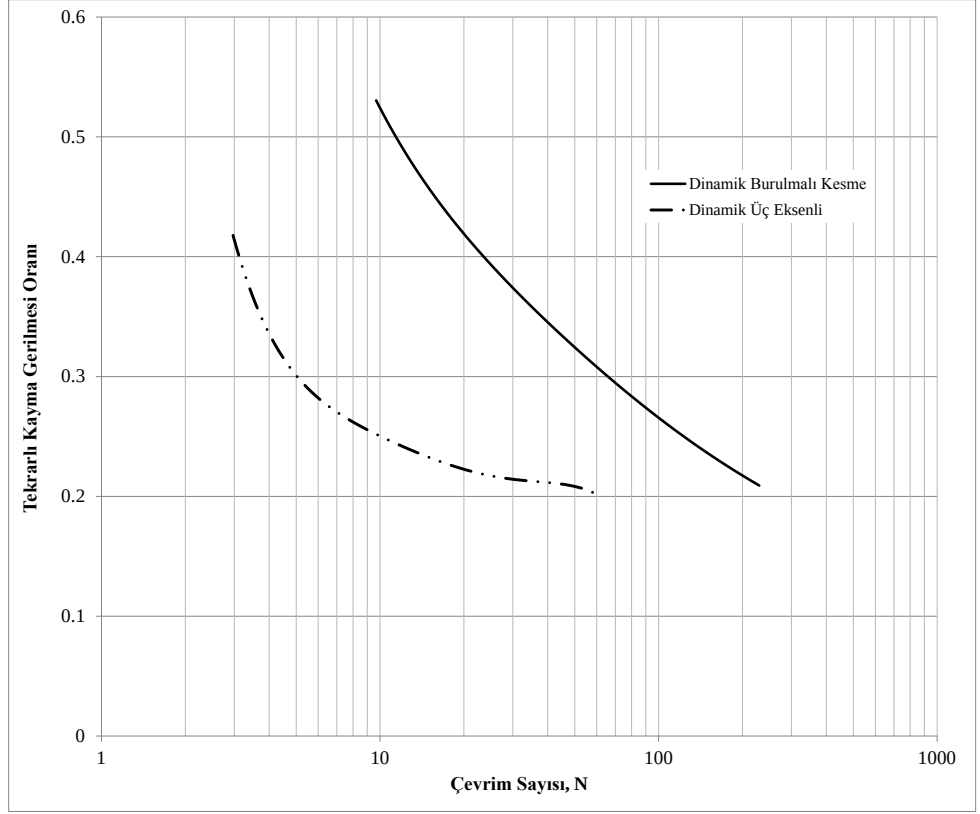
Das et al., (1999) tarafından yapılan dinamik üç eksenli deneylerde % 9 - 14 plastisite indisi değerlerine sahip killi silt numunelerde sıvılaşma meydana gelmiş, % 15 ve üzeri plastisiteye sahip numunelerde ise boşluk suyu basıncı artışları sınırlı kalarak dinamik mukavemetteki azalma, yumuşama ile kendini göstermiştir. Bununla beraber, plastisite indisinin % 4 - 5 değerlerinde en düşük dinamik mukavemetin olduğu görülmüştür. Zeminin plastisitesi, kaolin kili eklenerek bir miktar artırılmış ve aynı çevrim sayısında zemin numunesinde göçmenin olabilmesi için gerekli dinamik gerilme oranının, plastisite indisiyle beraber artış gösterdiği belirlenmiştir.

Prakash and 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 bir miktarda da olsa yüksek plastisiteli kil eklendiğinde zeminde oluşan kohezyon mukavemeti etkisiyle sıvılaşma dayanımı artmaktadır. Saf siltlerle kıyaslandığında, kil-silt karışımlarında sıvılaşmanın veya yumuşamanın oluşumu genel olarak plastisiteye bağlıdır.

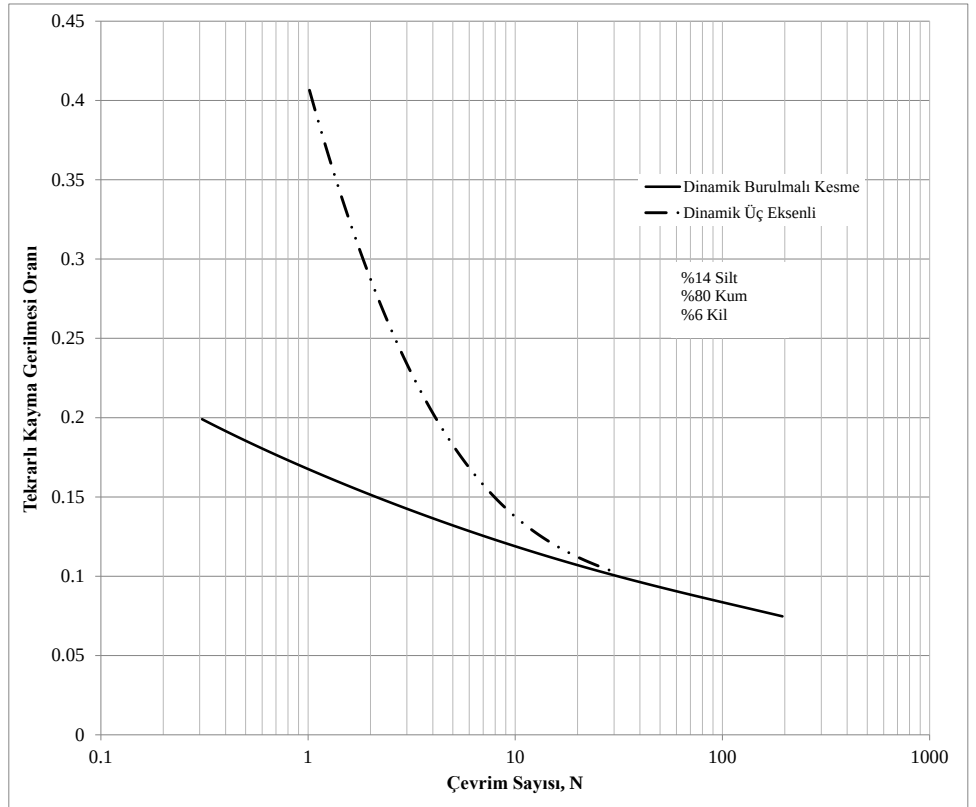
Thevanayagam and Martin (2002), arazi incelemeleri ve deney sonuçlarından, siltli zeminlerin hacimsel sıkışma potansiyeli ve sıvılaşma sonrası sıkışma özelliklerinin dane temas noktalarındaki gerilmelere ve relatif sıkılığa bağlı olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca ince danelerin türü ve plastisitesi de sıvılaşma sonrası hacim değişimi üzerinde etkili olmaktadır.

Tatsuoka et al., (1982), dinamik burulmalı kesme deney aletinde Toyura ve Sengenyama kumu kullanarak sıvılaşma deneyleri yapmışlardır. Relatif sıkılığın sıvılaşma dayanımını artırdığını belirten araştırmacılar, sıkı kumlarda sınırlı ön sıvılaşma ve çevrimsel oynaklık davranışını gözlemişlerdir. Ayrıca ince dane içermeyen Toyura kumunun dinamik mukavemetinin, % 1.6 ince dane içeren Sengenyama kumuna göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir. İnce dane oranı az olmasına rağmen davranışlar arasında böyle bir farklılığın oluşması numunelerdeki dane yapısının üzerinde durulmasına sebep olmuştur.

Koester (1992), ince daneli kumlarda ve kohezyonlu zeminler üzerinde dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleri ile sıvılaşma davranışını araştırmıştır. Sonuçları boşluk suyu basıncı oluşumu ve farklı gerilme ve konsolidasyon şartları altında elde ettiği dinamik kayma mukavemeti açısından karşılaştırmıştır. Buna göre, dinamik üç eksenli deney aleti ile temiz kumlarda yaptığı deneylerden elde ettiği dinamik mukavemetler, burulmalı kesme deney aletinden elde ettiği mukavemetlerden daha düşük olmasına karşın içerisinde % 14 silt ve % 6 kil bulunan kumlar kullanarak yaptığı dinamik üç eksenli deneylerden elde ettiği dinamik mukavemetler ise daha büyüktür (Şekil 2.25, 2.26).

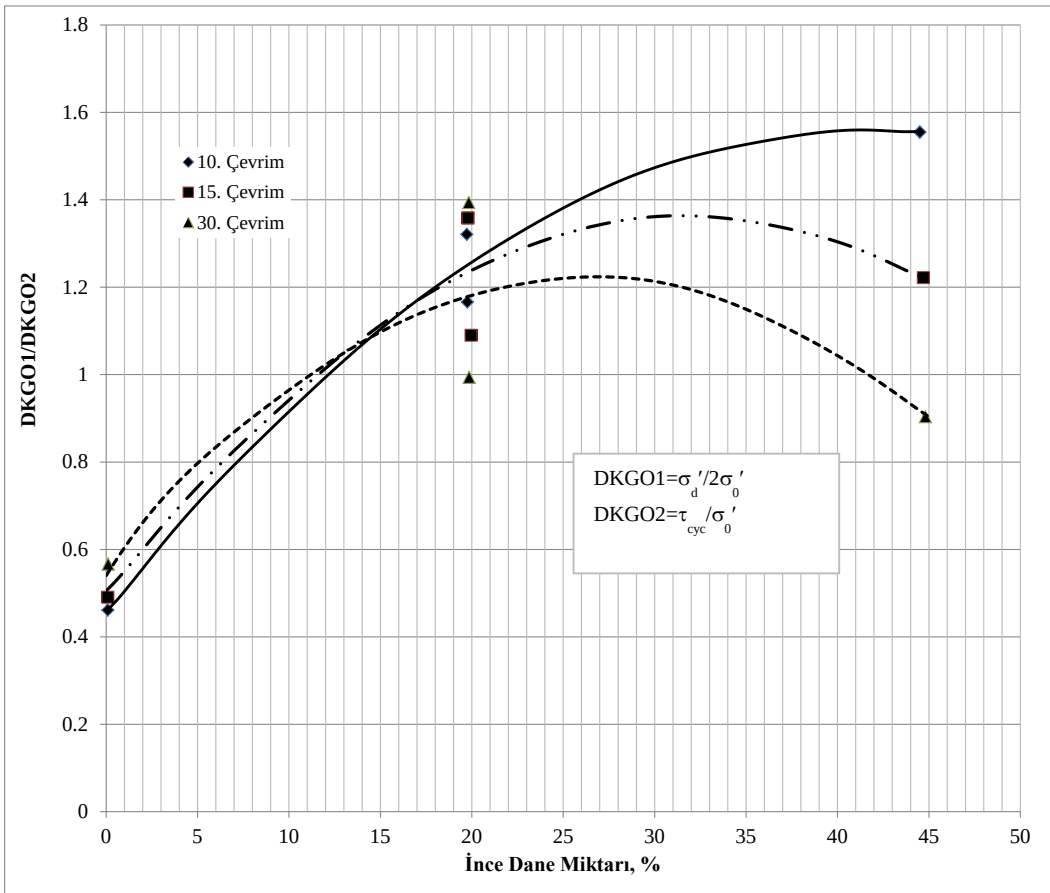


Şekil 2.25 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin temiz kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)

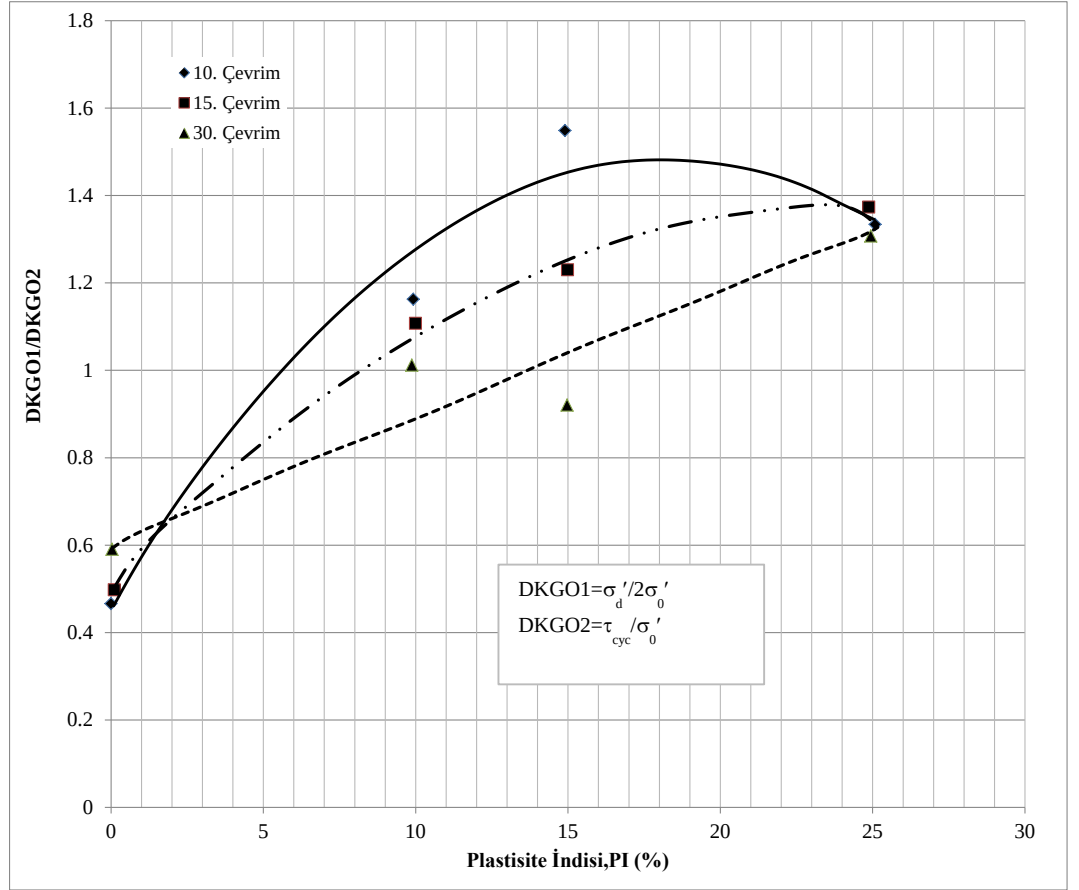


Şekil 2.26 Dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerinin ince daneli kumlar için karşılaştırması (Koester, 1992)

Koester (1992), yaptığı çalışmada ayrıca 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 2.27 ve 2.28'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 olmaktadır. Plastisite indisi % 8'den yüksek olduğu durumda üç eksenli deneyden elde edilen dinamik mukavemet daha büyüktür. 15 çevrimden elde edilen eğrilerin ise, ortalama olarak davranışı gösterdiği belirtilmiştir.



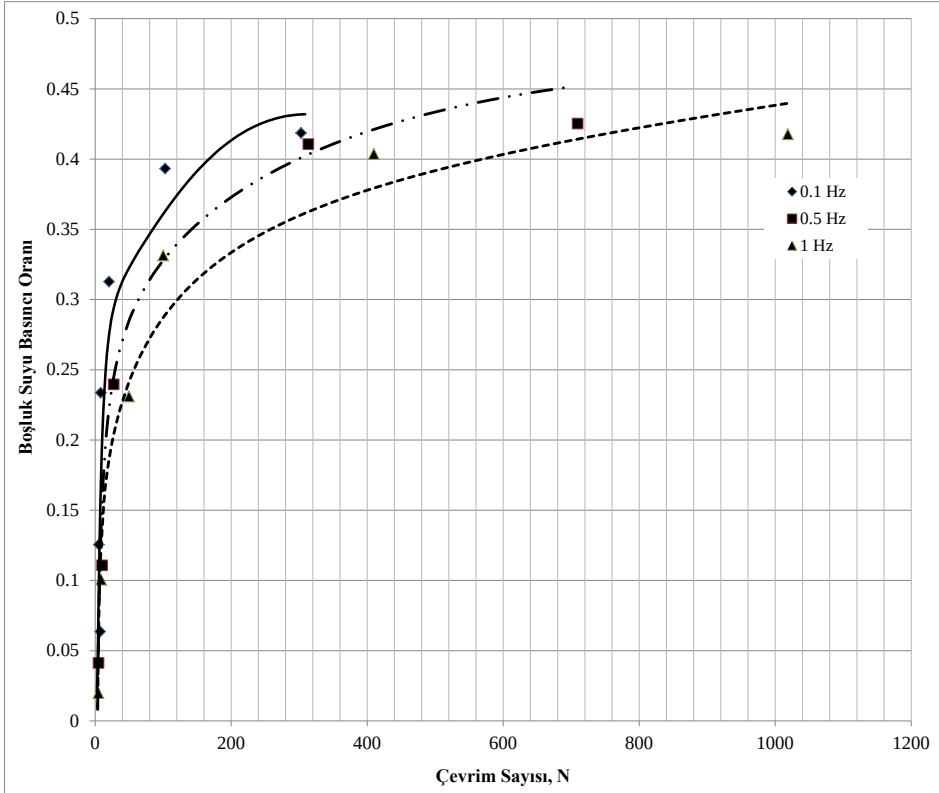
Şekil 2.27 İnce dane yüzdesinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992)



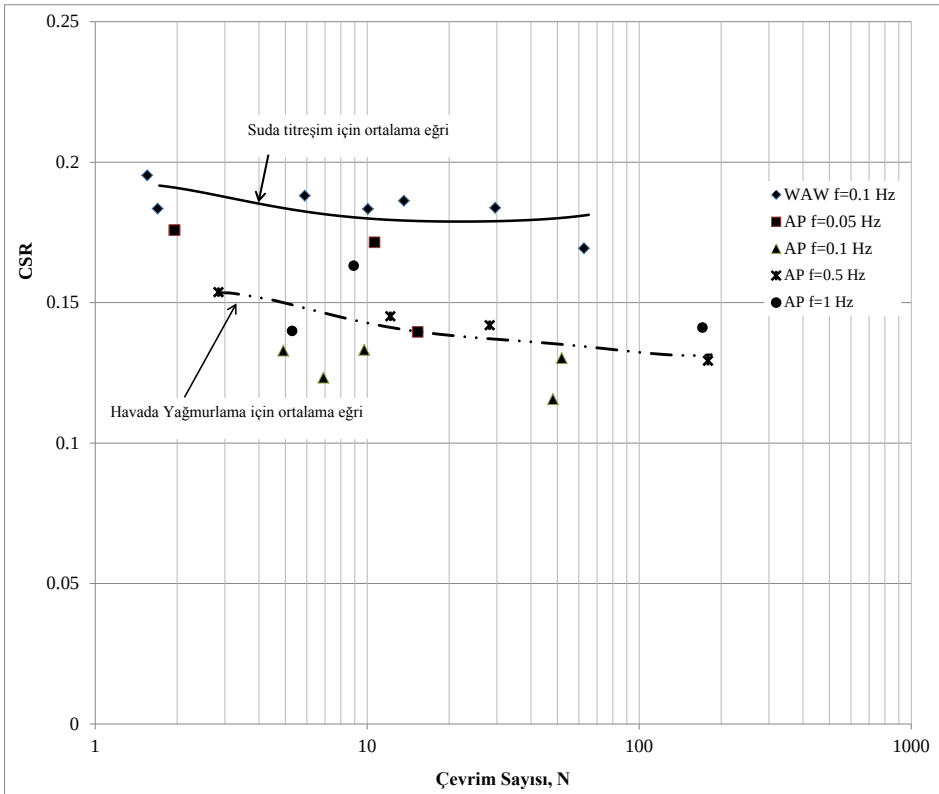
Şekil 2.28 Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Koester, 1992)

Ansal (1985), depremlerde zemin tabakalarında meydana gelen tekrarlı gerilmelerin, depremin ve zeminin özelliklerine göre değişik frekanslarda olduğunu bu nedenle kohezyonlu zeminlerde frekansının etkisinin göz önüne alınması gerektiğini söylemiştir. Şekil 2.29’da görüldüğü gibi uygulanan gerilme frekansının azaltılması boşluk suyu basıncı değerlerini artırmaktadır.

Mulilis et al., (1977) temiz kumlarda yükleme frekansının 0.1 Hz, 2 Hz veya 3 Hz olması halinde aradaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğunu söylemiştir. Daha sonra Sanjay (1991), zeminlerin dinamik kayma direnci özelliklerini belirlediği çalışmasında yükleme frekansının 0.05Hz ile 1.0Hz arasındaki alındığı durumlardaki sonuçları Şekil 2.30’da görüldüğü gibi vermiştir.

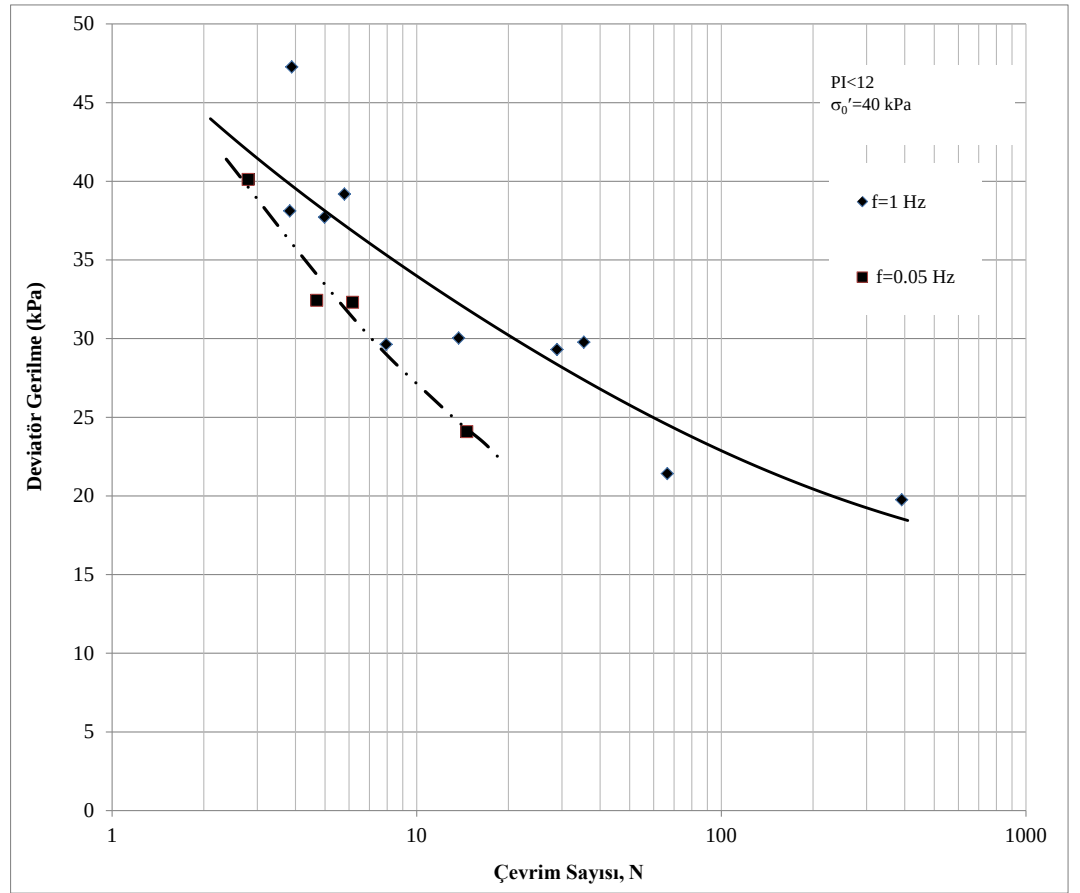


Şekil 2.29 Plastisite indisinin dinamik deney sistemlerinden elde edilen mukavemetlere etkisi (Ansal, 1985)



Şekil 2.30 Frekansın dirence etkisi (AP: Havada yağmurlama, WAW:Suda titreşim),(Sanjay, 1991)

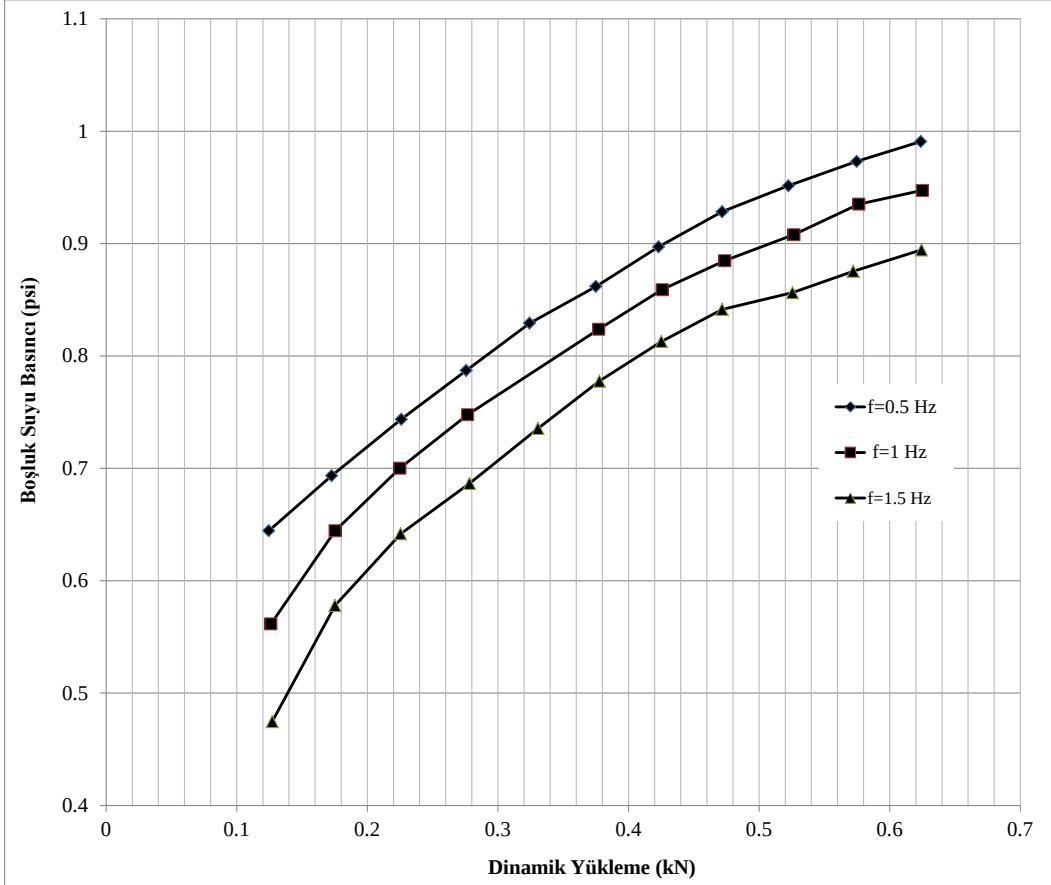
Sancio (2003), Adapazarı'nın siltli zeminlerinde, 1 Hz ve 0.005 Hz frekans değerleri kullanarak yükleme frekansının etkisini incelemiştir. Şekil 2.31'de frekansın deviator gerilme üzerindeki etkisi görülmektedir. Çalışmasında çoğu deneyi 1 Hz kullanarak yapmasına karşın bu frekansın numune boyunca oldukça eşit boşluk suyu basıncının oluşmasına imkan vermeyecek denli yüksek olmasından dolayı bir grup deneyde frekansı 0.005 Hz olarak kullanmıştır. Sonuç olarak, numune oldukça yavaş kesildiğinde numune merkezinde kesme aşamasının sonunda boşluk suyu basıncı arttığından, numune kenarından merkeze doğru su basıncı hareketi olduğunu; hızlı kesildiğinde ise hareketin olmayacağı ancak boşluk suyu basıncı ölçümünün numune boyunca temsil edilemeyeceğini öne sürmüştür.



Şekil 2.31 Farklı frekans değerlerinde % 3 eksenel uzama deformasyonundaki çevrim sayısı (Sancio, 2003)

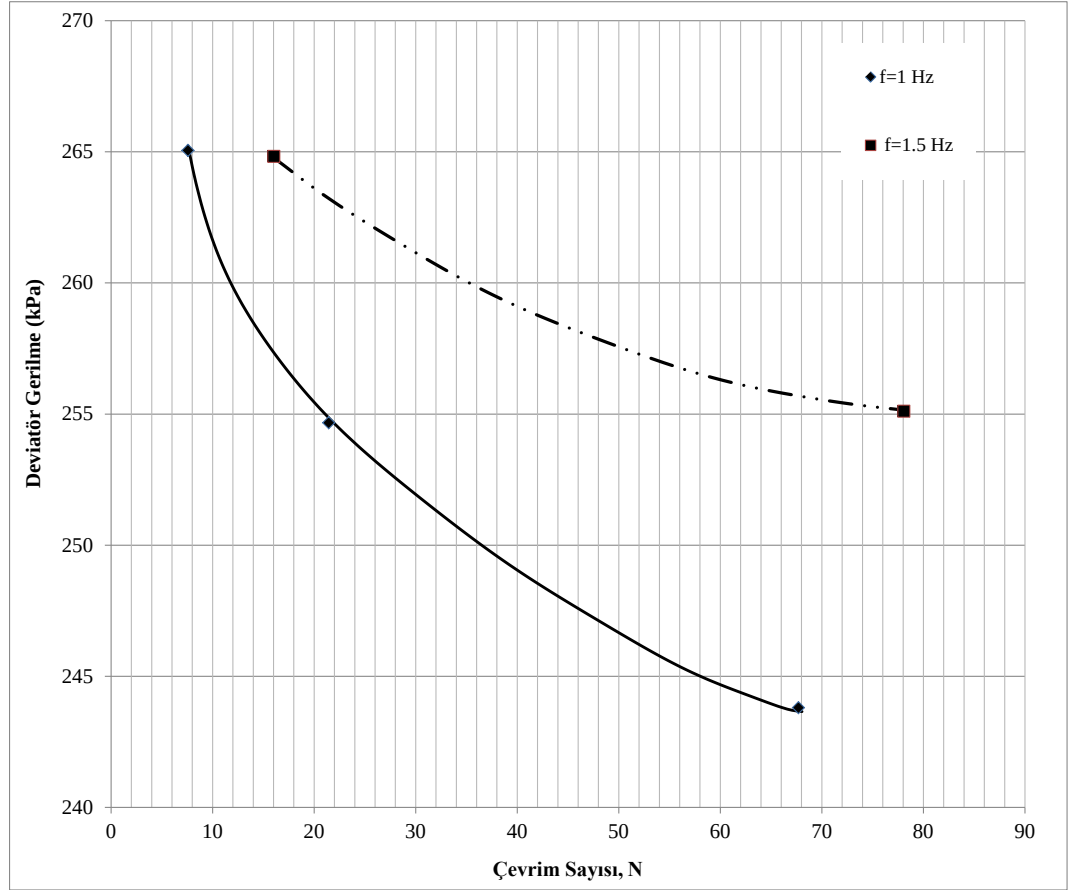
Christakos (2003), dinamik yük altındaki zemin davranışını ve zemin performansını etkileyen parametreleri incelemiştir. Çalışmada gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deney sistemiyle bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Zeminin dinamik davranışını etkileyen parametreler arasında olan yükleme frekansını, 0.5Hz ile 1.0Hz arasında kullanarak dalga formunun ve frekansın değişimiyle boşluk suyu basıncındaki değişim gözlemlenmiştir. Şekil 2.32'deki eğrilerden daha

düşük frekans değerlerinin kullanılması sonucu daha büyük boşluk suyu basıncı değerleri ve daha büyük eksenel birim boy değişim değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



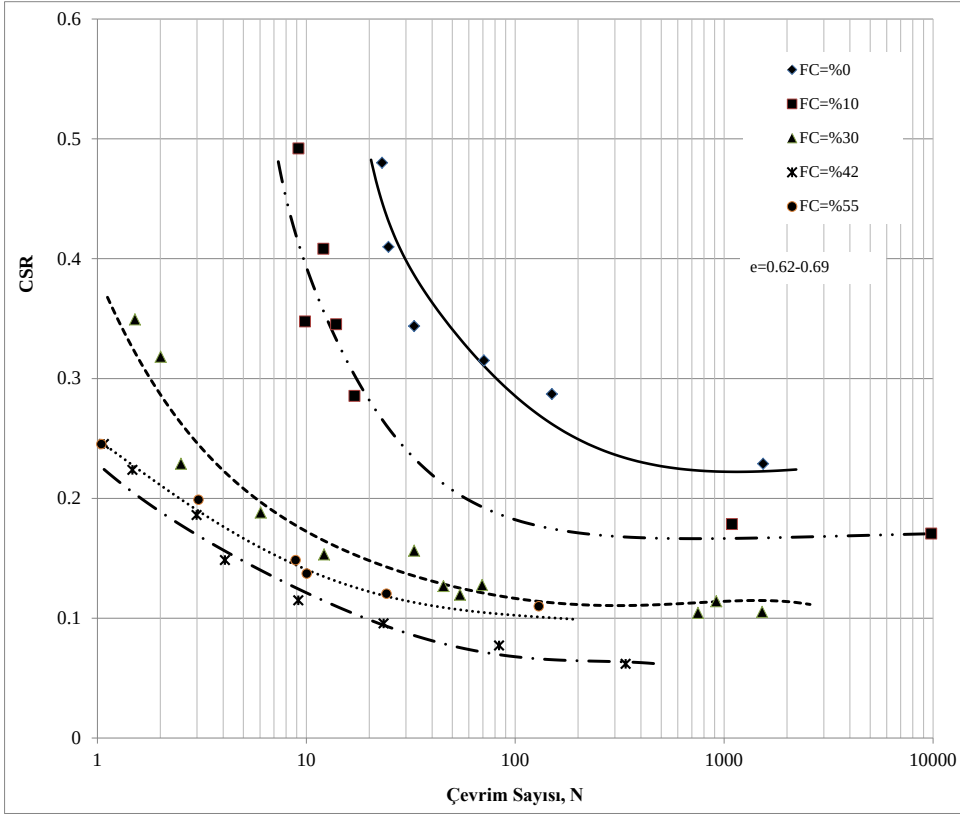
Şekil 2.32 Farklı frekans değerlerinde dinamik yükleme boşluk suyu basıncı ilişkisi (Christakos, 2003).

Sunitsakul (2004), çalışmasında ince daneli zemin içeren numunelerin dinamik deneylerdeki boşluk suyu basıncının değişimini etkileyen faktörler arasında dinamik yükleme hızının etkisi bulunduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, dinamik yükleme hızının önceki araştırmaların sonuçlarından yararlanılarak dikkatle seçilmesi gerektiğini ve yükleme frekans değerinin 0.1 Hz ve daha yüksek olarak alınması gerektiğini belirtmiştir. Çalışmasında siltlerde dinamik yükleme sırasında oldukça yavaş drenajsız deney yapılmasını ve boşluk suyu basıncının bu şekilde ölçülmesi gerektiğini Şekil 2.33'deki gibi ifade etmiştir.

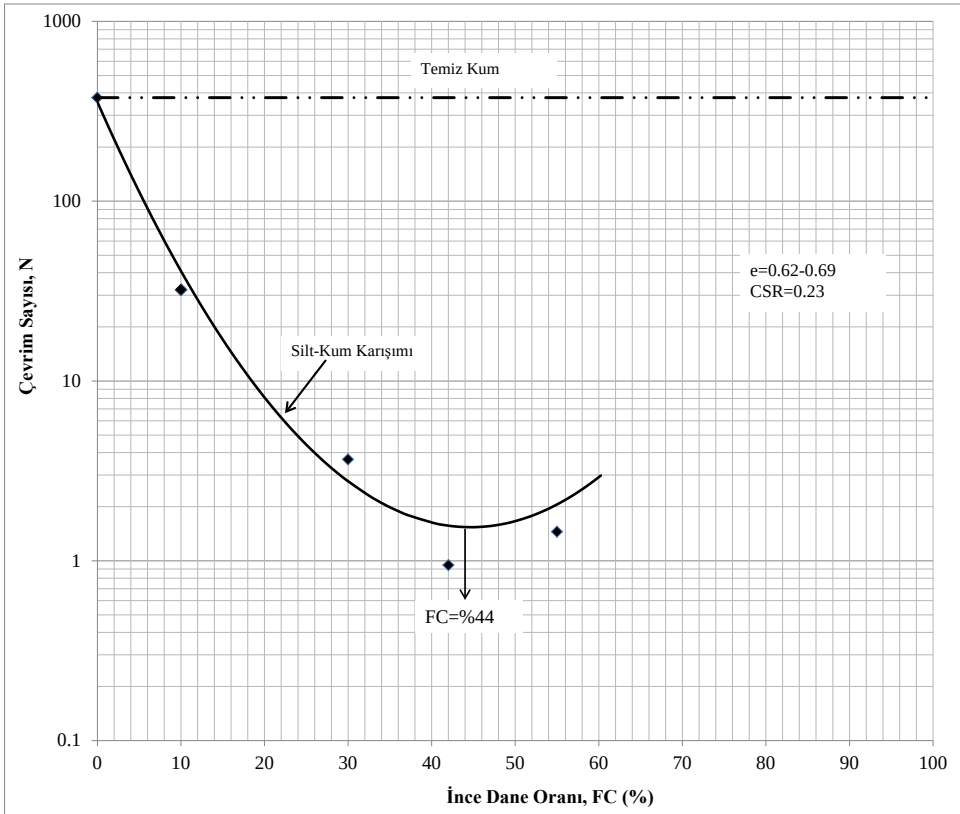


Şekil 2.33 Farklı frekans değerleri ile değişen deviator gerilme ve çevrim sayısı (Sunitsakul, 2004)

Xenaki and Athanasopoulos (2003)'un yürütülen çalışmalarında ince taneliden orta taneliye kadar farklı miktarlarda nonplastik doymun kum karışımlarının sıvılaşma dayanımları hesaplanmıştır. Şekil 2.34 ve 2.35'de % 0 -% 44'e kadar ince tane içeren karışımların, temiz kumlarla kıyaslandığında sıvılaşma dayanımlarının azaldığını, bu eğilimin % 44'den daha fazla ince tane içeriğinde tersine döndüğünü göstermiştir.



Şekil 2.34 Non plastik siltli kumların sıvılaşma dayanımına etkisi (Xenaki and Athanasopoulos (2003)).

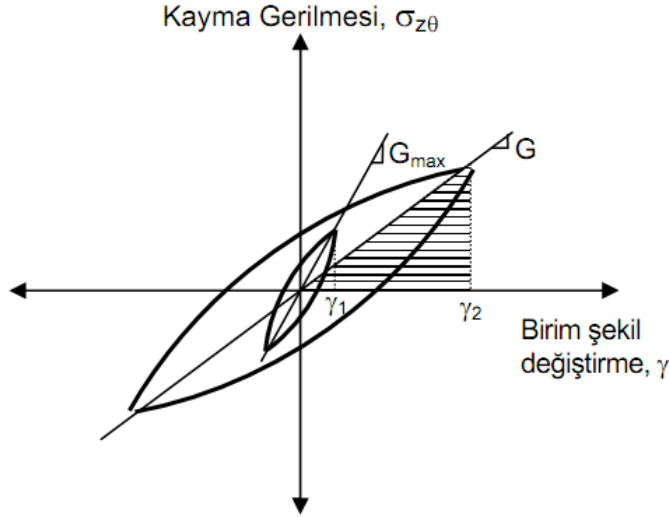


Şekil 2.35 Non plastik siltli kumların sıvılaşma dayanımına kritik ince dane oranı etkisi (Xenaki and Athanasopoulos (2003)).

2.1.1 Zeminlerin Gerilme - Şekil Değiştirme Özellikleri

Zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hem deneysel çalışmalardan hem de teorik modellerden yararlanılır. Zeminlerin gerilme–şekil değiştirme özelliklerinin tayin edilmesinde, model çalışmasının seçiminde ve yapılan deneylerin analizinde olası şekil değiştirme seviyesi en belirleyici rolü oynamaktadır. Çünkü farklı şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin gerilme–şekil değiştirme davranışları oldukça değişik özellikler arz etmektedir.

Zeminlerde gerilme–şekil değiştirme ilişkisi incelenirken özellikle kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı zemin ortamlarında simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan zeminlerin davranışları genellikle kayma modülü ve sönüm oranı özellikleri ile belirlenir. Bu tür zemin durumlarında kayma modülü ve sönüm oranı faktörlerinin kullanıldığı lineer analizler, zeminde oluşacak şekil değiştirmeler ile daha uyumlu olmaktadır. Hardin and Drenevich (1972) tarafından yapılan çalışmada kum zeminlerde kayma modülüne etki eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu; buna karşın sönüm oranının ise tane boyutu, doygunluk derecesi, boşluk oranı, içsel sürtünme açısı, yanal zemin basıncı katsayısı ve çevrim sayısı değerlerinden az miktarda etkilenmekle beraber daha çok zeminin maruz kaldığı şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmektedir. Şekil değiştirmelerin küçük seviyelerde kalması bekleniyorsa zeminlerin gerilme–şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesinde “lineer elastik teori”ye uygun modellerin kullanımı daha doğru olmaktadır. Bu şekil değiştirme seviyesinde zemin davranışının modellenmesinde “kayma modülü” en önemli parametre olmaktadır. Şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını ifade edebilmek için birim şekil değiştirmelerin teorik olarak yaklaşık 10^{-5} den küçük olması gerektiği ve zeminlerin bu seviyenin altında elastik davranış özellikleri gösterdiği kabul edilir. Yine bu şekil değiştirme seviyesinde maksimum kayma modülü (G_{maks}) olup elastik sınırlar içerisinde sabit değere sahiptir (Şekil 2.36).



Şekil 2. 36 Histeritik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak 10^{-3} den küçük olması durumunda zeminin davranış özellikleri “elasto-plastik teori”ye daha uygun olacaktır. Bu şekil değiştirme aralığına orta deformasyon seviyesi adı verilir. Artık bu deformasyon seviyesinden itibaren kayma modülü azalmaya, şekil değiştirmeler artmaya başlar. Yine bu seviyeden itibaren tekrarlı yüklemelerle beraber enerji kayıpları oluşur ve zeminin bu soğurma özelliğini temsil etmek için “sönüm oranı” ifadesi kullanılır. Bu deformasyon seviyesine kadar şekil değiştirmelerin halen yeterince küçük olduğu ve zemin özelliklerinde kalıcı değişikliklerin oluşmadığı kabul edilir. Kayma modülünün ve sönüm oranının da tekrarlı yüklemeler sonucu değişmediği bu sabit seviyeli zemin davranışı “azalmayan histerisis türü” olarak isimlendirilir. Bu tür zemin davranışlarını bünyesel olarak modelleyebilmek için en uygun seçim “lineer viskoelastik teori” (Kelvin, Maxwell vb.) olmaktadır. Lineer olmayan, çevrimden bağımsız model çalışmalarında ise yine enerji kayıplarıyla beraber lineer olmayan deformasyonların dikkate alınabildiği modellerle (Hyperbolic, Ramberg-Osgood, vb.) gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve dolayısıyla zeminin kayma modülü G ve sönüm oranı D elde edilebilmektedir. Orta deformasyon seviyesindeki zemin davranışını temsil eden en önemli parametreler kayma modülü ve sönüm oranıdır.

Birim kayma deformasyonunun 10^{-2} den büyük olması durumunda artık tekrarlı yüklemeler altındaki zeminde oluşan şekil değiştirmelerin kalıcı olduğu söylenebilmektedir. Bu seviyeden sonra kayma modülü ve sönüm oranı tekrarlı yüklemelerle beraber değişimlerini sürdürürler. Bu durumda zemin davranışı “azalan histerisis türü” olarak isimlendirilir. Bu deformasyon seviyesi için de şekil değiştirmelerin “plastik teori”ye uygun olduğu kabul edilerek model çalışmaları

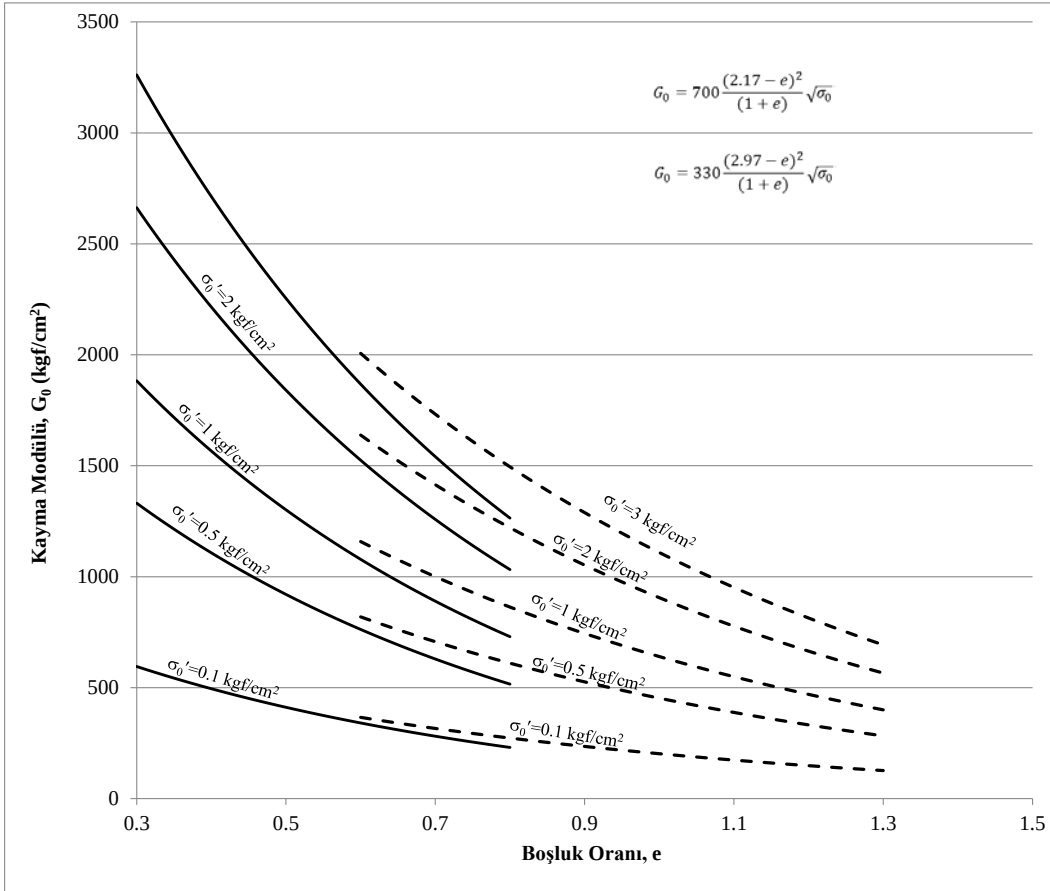
yapılabilmektedir. Yukarıda verilen model çalışmaları ile beraber zeminlerin küçük deformasyon seviyelerindeki gerilme–şekil değiştirme özellikleri örselenmemiş veya yeniden oluşturulmuş numunelerle yapılan deneysel çalışmalarla da elde edilmektedir. Yapılan dinamik deneylerin birçoğunda farklı zeminlerin çok küçük deformasyon seviyelerindeki ($<10^{-4}$) kayma modülleri saptanmaya çalışılmıştır. Bu seviyelerdeki dinamik kayma modülüne maksimum veya başlangıç kayma modülü G_{max} adı verilmektedir.

Gerilme veya deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde çevrim sayısındaki artışla beraber boşluk suyu basıncının artması numunede yumuşamayı arttırıcı yönde etki etmektedir. Böylece zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme–şekil değiştirme özelliklerini temsil eden en önemli parametreler olan dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ve bu değerlerin zamana (veya birim şekil değiştirmedeki artışa) bağlı olarak değişimi her çevrimde elde edilen histerisis ilmiklerinden yararlanılarak belirlenir.

Seed and Idriss, (1970); Hardin and Drenevich, (1972); Hardin and Drenevich, (1972b) tarafından kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerle yapılan laboratuvar deneylerinde kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi kayma deformasyonuna bağlı olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalarda kum zeminlerde kayma modülüne etki eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu; buna karşın sönüm oranının ise daha çok kum zeminin maruz kaldığı şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmektedir. Tekrarlı yükler altındaki kohezyonsuz zeminlerin kayma modülünün belirlenmesi ile ilgili ilk deneysel çalışmalardan birisi Hardin and Richart, (1963) tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada farklı çevre gerilmelerinde ve boşluk oranlarında yapılan deneylerle zeminin kayma modülünde meydana gelen değişim araştırılmıştır.

Daha sonraki yıllarda yine laboratuvar koşullarında dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme ve rezonant kolon deney aletleriyle kumların gerilme–şekil değiştirme özelliklerini belirlemek ve bu özellikleri etkileyen zemin ve yükleme koşullarını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen bazı deneysel çalışmalar (Seed, et al., 1986), (Alarkon-Guzman A., 1986), (Chen, 1988), (Ishibashi, et al., 1988) , (Tatsuoka, et al., 1991), (Ampadu and Tatsuoka, 1993), (Ishibashi, et al., 1993), (Lo Presti, et al., 1993), (Vucetic, 1994), (Lin, et al., 1996), (Rollins, et al., 1998), (Lanzo, et al., 1997),(Zavoral and Campanella 1994) (Altun ve Göktepe 2006) tarafından yürütülmüştür.

Kayma birim deformasyonunun 10^{-4} 'den küçük değerleri için, Hardin and Richard (1963) ve Iwasaki and Tatsuoka (1977) kayma modülü G_0 değerlerinin tahmini için ampirik bağıntı önermişlerdir. Bu bağıntının grafik formu Şekil 2.37'de gösterilmiştir. Şekle göre boşluk oranı 0.6 ile 0.9 arası ve çevre basıncı 0.5 ile 1.0 kgf/cm² iken kayma modülü değerleri 500 ile 1200 kgf/cm² arasında değerler almıştır.



Şekil 2. 37 Düşük kayma birim deformasyonuna karşılık, boşluk oranı değerleri (Hardin and Richard (1963) ve Iwasaki and Tatsuoka (1977)).

2.1.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altında Özellikleri

Sıvılaşma granüler bir zeminin artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucu katı durumdan sıvı duruma dönüşmesi olarak tanımlanabilmektedir. Boşluk suyu basıncı artışı çevrimli kayma şekil değiştirmelerine maruz kalan granüler zeminin sıkışma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Yükleme çevrimlerinin hızlı olmasından dolayı boşluk suyu dışarı çıkamamakta ve sıkışmaya zorlanan suda basınç artışları meydana gelmektedir. Katı durumdan sıvı duruma dönüşüm

düşük geçirimli gevşek-orta sıkı yerleşimli siltli kumlar veya az geçirimli kaplama veya ara tabakalar ile boşluk suyunun drene olması engellenen kumlu çakıllı zeminlerde daha hızlı bir şekilde ortaya çıkmakta, sıvılaşma oluşunca zemin yumuşamakta ve büyük kayma şekil değiştirmeleri meydana gelmektedir. Gevşek malzemelerde yumuşama ile birlikte kayma mukavemeti kaybı ortaya çıkarken bunun sonucunda büyük kayma şekli değiştirmeleri hatta akma göçmesi ve akma sıvılaşması (flow liquefaction) meydana gelebilmektedir. Orta sıkı malzemelerde ise sıvılaşma geçici yumuşamaya ve artan çevrimli kayma şekil değiştirmelerine yol açmakla birlikte, genleşme eğilimi mukavemet kaybını ve büyük şekil değiştirmeler meydana gelmesini sınırlamaktadır. Bu tür zeminlerde çevrimsel oynaklık (cyclic mobility) veya çevrimsel sıvılaşma (cyclic liquefaction) durumu ortaya çıkabilmektedir (Kramer S.,1996; Ishihara K., 1996) .

Sıvılaşma oluşması durumunda temel altı zeminler ve şevlerde akma türü göçme meydana gelebilmekte, düz ve çok az eğimli arazilerde de yanal yayılma ve yer salınımı durumları ortaya çıkabilmektedir. Gevşek zeminlerde sıvılaşma sırasında aşırı boşluk suyu basınçları sönmölenirken kum kaynamaları ve sonrasında sıkışma (oturma) meydana gelebilmektedir. Akma sıvılaşması (flow liquefaction) sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetinin zemin kütesinin statik dengesi için gereken kayma direncinden daha az olması durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda statik kayma gerilmeleri altında zeminde büyük şekil değiştirmeler oluşmakta ve akma göçmesi meydana gelmektedir. Akma sıvılaşması çok hızlı olarak ortaya çıkmakta ve sıvılaşan zemin çok büyük yer değiştirmeler göstermektedir. Çevrimsel sıvılaşma (cyclic liquefaction) statik kayma gerilmeleri sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetini aşmadığı durumlarda ortaya çıkmakla birlikte, kabul edilebilir seviyelerin üzerinde kalıcı şekil değiştirmelere yol açabilmektedir. Çevrimsel sıvılaşmada deprem esnasında şekil değiştirmeler çevrimsel olarak artarak göçmelere yol açabilmektedir. Statik ve çevrimsel kayma gerilmelerinden kaynaklanan bu şekil değiştirmeler çok az eğimli arazilerde dahi yanal akma veya yayılmalara neden olabilmektedir. Düz sahalarda ise çevrimsel sıvılaşma yanal akmalara yol açmasa da deprem sırasında zemin salınımları olarak bilinen hareketlere yol açabilmektedir. Bir sahada oluşacak akma sıvılaşması veya çevrimsel sıvılaşma durumlarının ciddi problemlere ve üstyapıda hasara neden olabildiği bilinmektedir.

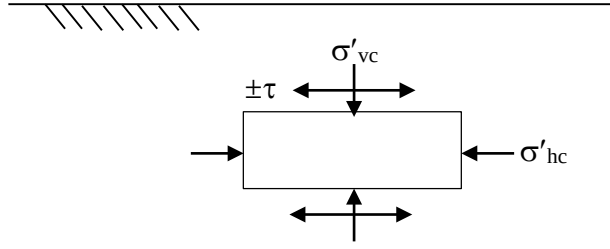
3.DENEY ALETİ, KULLANILAN MALZEME VE DENEY YÖNTEMİ

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneyler Ege Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dinamik üç eksenli deney cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi düşey yöndeki eksenel yer değiştirmeyi ölçmeye ve kaydetmeye imkan veren iki farklı deplasman ölçer, boşluk suyu basıncı ve çevre basıncını otomatik olarak ölçen ve kaydeden ölçüm sistemleri, dinamik yükleme boyunca verilen yükü ölçen düşey eksenel kuvvet ölçüm cihazı ve numunenin hacim değişiminin belirlenmesine olanak sağlayan sistem yer almaktadır. Bu hassas ölçümler numunenin gerilme ve şekil değiştirme büyüklüklerini tam olarak ortaya koymaktadır. Bu sayede gerilme izleri daha kesin bir şekilde elde edilebilmektedir.

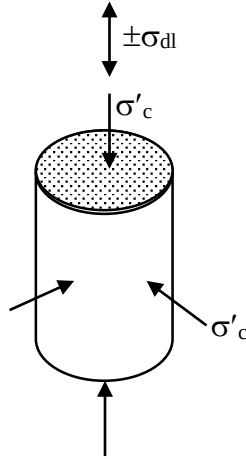
Bu bölümde, yapılan çalışma kapsamında kullanılan deney malzemesi, deney aleti ve yöntemi ortaya konmaktadır. Yapılan deney sonuçlarının yorumlanması ve deney analizlerinin yapılabilmesine temel teşkil eden dinamik üç eksenli deney aletinin temel özelliklerinin detaylı bir şekilde ortaya konması gerekmektedir. Ayrıca numune hazırlama ve deney yöntemiyle ilgili bilgiler bölüm içerisinde sunulmuştur.

3.1 Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinin Temel İlkeleri

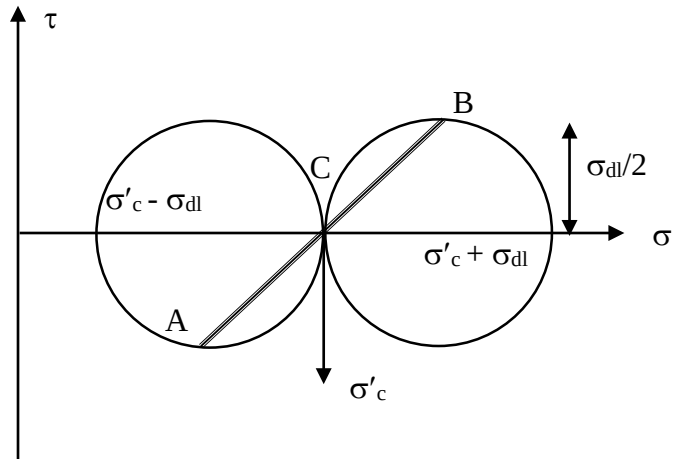
Şekil 3.1'de bir deprem sırasında zeminde idealize edilmiş gerilme durumu gösterilmiştir. Depremden önce, efektif gerilme K_0 durumundadır ve yatay düzlemde hiç kayma gerilmesi yoktur. Düşey yayılan S dalgaları yatay düzlemde tekrarlı kayma gerilmeleri üretirken, kumların yapısında sırasıyla negatif ve pozitif yönlerde genleşmeye neden olur ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşturur. Tekrarlı kayma gerilmesi genliği τ ile gösterilmiştir. Laboratuvarda bu gerilme durumunu yeniden oluşturmak için burulmalı kesme ve basit kesme deney aletleri uygun değildir. Sonuç olarak dinamik üç eksenli deney aleti örselenmemiş numuneler için daha yaygın kullanılmaktadır. İzotropik olarak konsolide edilmiş, efektif gerilme altındaki (σ'_c), zemin örneğinin alındığı düşey gerilmeye eşitlenerek Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Konsolidasyondan sonra tekrarlı eksenel gerilme, $\pm\sigma_{dl}$, drenajsız koşullarda büyük deformasyonlar oluşana kadar yüklenir. Arazideki tekrarlı kayma gerilmeleri, $\pm\tau$, laboratuvarda eksenel yönde tekrarlı eksenel gerilme, $\pm\sigma_{dl}$, şeklini alır (Towhata, 2008).



Şekil 3.1. Zeminde sismik gerilme durumu (Towhata, 2008)



Şekil 3.2 Tekrarlı üç eksenli deneyde gerilme durumu (Towhata, 2008)



Şekil 3.3 Tekrarlı üç eksenli deneyde mohr gerilme daireleri (Towhata, 2008)

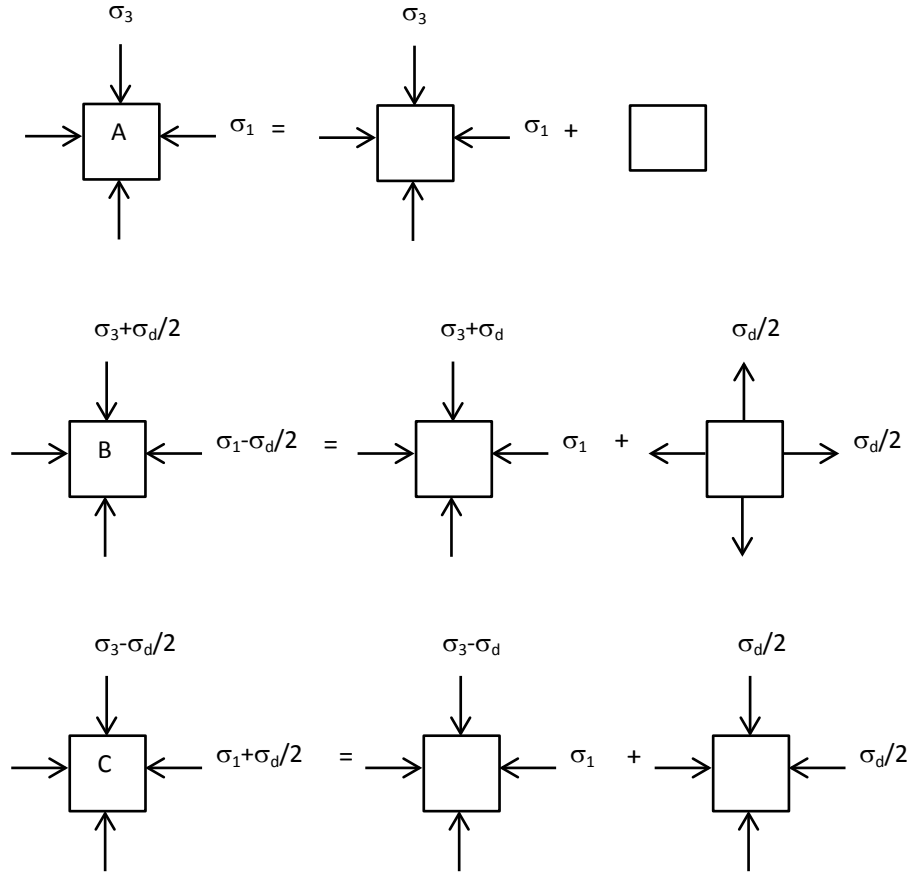
Gerilme durumu Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de düzlem şekil değiştirme ve eksenel simetri ile izotropik ve anizotropik konsolidasyon durumlarında farklıdır. Ancak Şekil 3.1 ile üç eksenli numunenin 45° düzlem olması durumunda, Şekil 3.3’de gerilme durumları arasında bazı benzerlikler vardır (Towhata, 2008).

Şekil 3.3’de tekrarlı üç eksenli deney ile yüklenmiş zemin örneğinin Mohr daireleri gösterilmiştir. Başlangıç kayma gerilmesi olmadan, 45° düzlem durumunda zemin konsolide edilmiştir (C noktası). Tekrarlı yükleme üzerine, normal ve kayma gerilmeleri ($\sigma'_c \pm \sigma_{dl}/2$) ile ($\pm \sigma_{dl}/2$) arasında değişir (A ve B noktaları). Numune tamamen su ile doyduktan sonra, normal gerilmenin değişimi % 100 boşluk suyu basıncına iletilir ve numune etkilenmez. Böylece normal gerilmenin değişimi ihmal edilir ve arazi ile laboratuvarı; $\sigma'_{vc} \leftrightarrow \sigma'_c$, $\pm \tau \leftrightarrow \pm \sigma_{dl}/2$ ilişkisi ile gerilme oranı $\tau/\sigma'_{vc} \leftrightarrow \sigma_{dl}/(2\sigma'_c)$ ilişkileri elde edilir (Towhata, 2008).

Eksenel gerilme $\sigma_{dl}/2$ ve yanal hücre basıncı $-\sigma'_{dl}/2$ arasında değişim gösterirken, normal gerilmenin 45° düzlem üzerinde sabit tutulduğu düşünülür. Bu pratikte zordur, çünkü hücre basıncı pnömatik sistem ile kontrol edildiğinden tepkisi yavaştır ve eksenel yükleme ile aynı fazda çalıştırılmaz (Towhata, 2008).

Zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla en sık kullanılan cihazlardan biri de dinamik üç eksenli test cihazıdır. Bu deneyin temel felsefesi, deviatör yükün tekrarlı bir şekilde uygulanmasıdır. Dinamik üç eksenli test cihazı ilk kez 1966’da (Seed et al., 1966) tarafından geliştirilmiştir. Dinamik üç eksenli test cihazının genel kuralları ve izlenecek yöntemleri belirleyen bir bildiri (Silver 1977) tarafından yayınlanmıştır. (Li et al., 1988) de otomatik bir dinamik üç eksenli test cihazı geliştirmiştir. Sonraki yıllarda, gelişmiş veri toplama ve servo sistemlerinin gelişmesiyle birlikte toplana veriler ve test koşulları üzerindeki kontrol güvenilirliği önemli ölçüde artmıştır.

Dinamik üç eksenli deneyde, önce çevre basıncı uygulanmakta ve daha sonra drenaja izin verilmeden eksenel yönde tekrarlı deviatör gerilme uygulanmaktadır. Bir numune üzerinde hareket eden gerilme koşulları kombinasyonları (Seed et al., 1966)’de sunulan şekliyle, Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Tekrarlı üç eksenli deneyde uygulanan gerilme durumu

Dinamik üç eksenli deney sisteminin bazı avantajları; i) Deneyde gerilme ve drenaj durumları kolaylıkla kontrol edilebilir, ii) Deney sonunda hacim değişimi kolaylıkla ölçülebilir, iii) Şekil değiştirmeler çok küçük değerlerden itibaren ölçülebilir. Ancak, dinamik üç eksenli deney sistemi ile i) K_0 durumunda yerinde deney yapılamaz, ii) Örneğin uçlarında gerilme konsantrasyonları oluşur, iii) Büyük asal gerilme iki yarım çevrimde 90° döner, iv) Arazide zeminler deprem gibi dinamik yükler altında çok yönlü salınımına maruz kalırken, dinamik üç eksenli deneyde tek yönlü olarak modellenirler.

3.2 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan ilki Torbalı Kumu ile nonplastik silt karışımıdır. Kullanılan diğer malzeme ise İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli

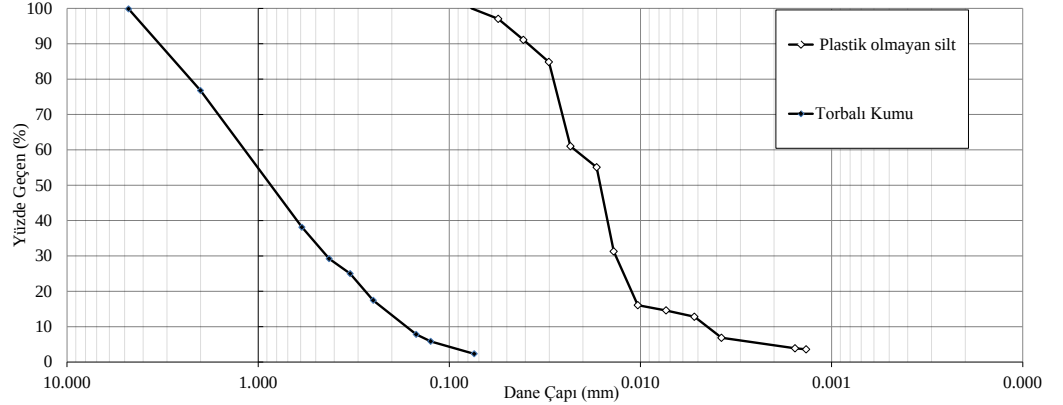
siltli kumdur. Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri ASTM standartlarına göre belirlenmiş olup Tablo 3.1’de Torbalı kumu ile nonplastik silt için ve Tablo 3.2’de İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum karışımının özellikleri verilmiştir. Birinci kısım deneyler için kullanılan malzemeye ait dane çapı dağılımı eğrisi Şekil 3.5’de ve ikinci kısım deneyler için elde edilen dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Torbalı kumu-nonplastik silt karışımı fiziksel özellikleri

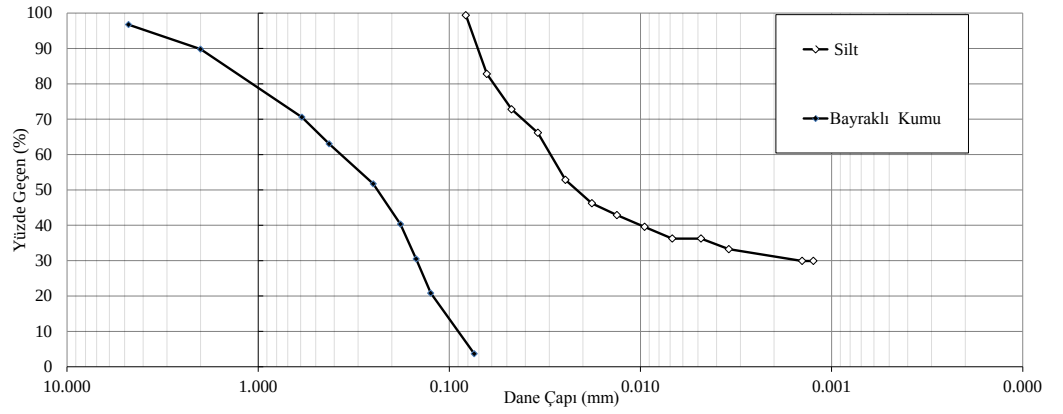
Zemin Parametresi/Tipi	Torbalı Kumu	Plastik olmayan silt
(D ₁₀) mm	0.17	0.0045
(D ₃₀) mm	0.48	0.0135
(D ₆₀) mm	1.30	0.022
Üniformluk Katsayısı, C _u	7.65	4.88
Derecelenme Katsayısı, C _c	1.05	1.84
Zemin Sınıfı	SW	ML
G _s	2.660	2.679
e _{min}	0.466	0.992
e _{maks}	0.755	1.186

Tablo 3.2 Bayraklı Kum-Silt Karışımı Fiziksel Özellikleri

Zemin Parametresi/Tipi	Bayraklı Kumu	Düşük plastisiteli silt
(D ₁₀) mm	0.09	---
(D ₃₀) mm	0.15	0.022
(D ₆₀) mm	0.38	0.03
Üniformluk Katsayısı, C _u	4.22	--
Derecelenme Katsayısı, C _c	0.657	---
Zemin Sınıfı	SP	ML
G _s	2.656	2.730
e _{min}	0.664	0.987
e _{maks}	0.941	1.511



Şekil 3.5 Deneyde kullanılan zeminlerden plastik olmayan siltli kum karışımlarının dane boyu dağılım eğrileri



Şekil 3.6 Deneyde kullanılan zeminlerden düşük plastisiteli siltli kum karışımlarının dane boyu dağılım eğrileri

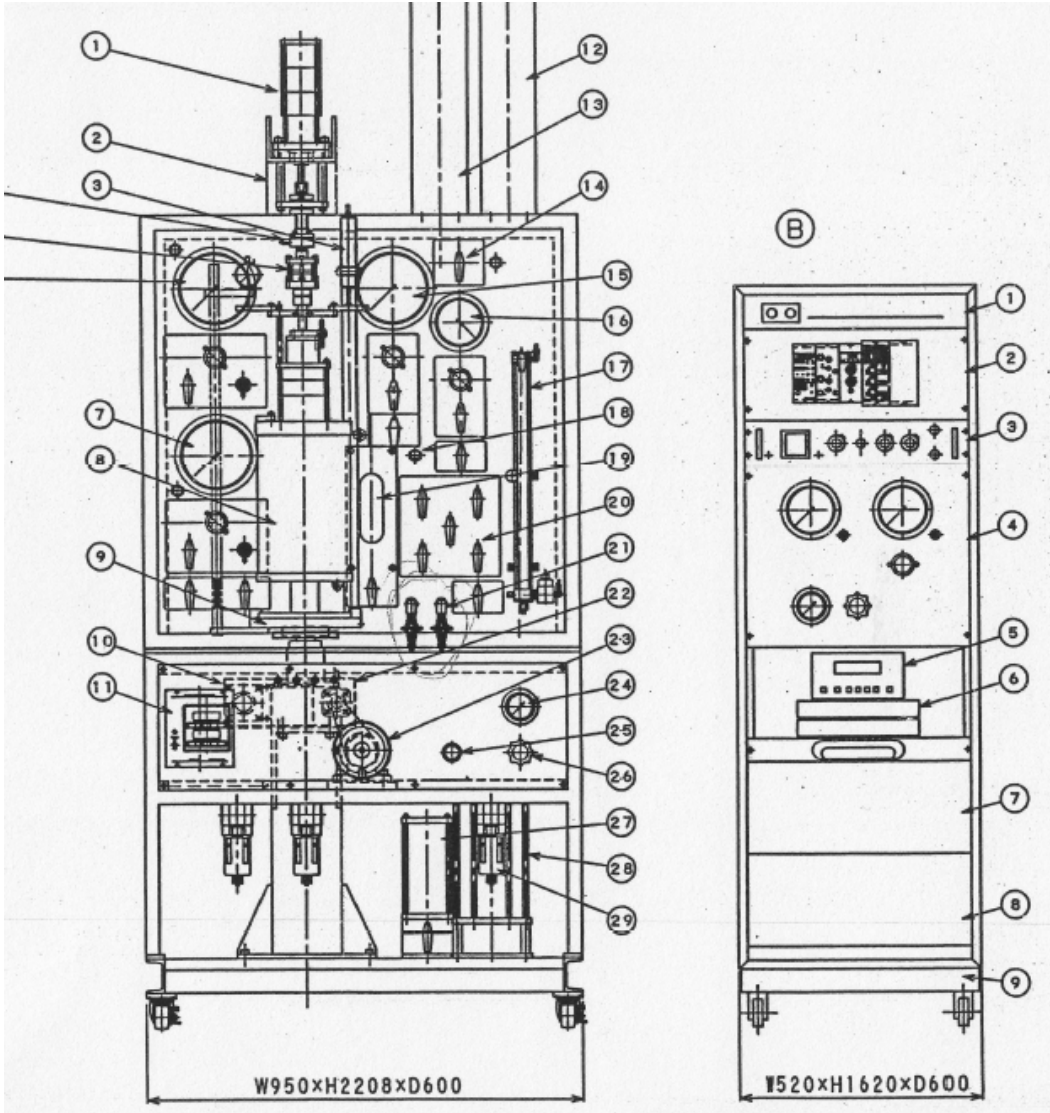
Deneyde kullanılan her iki tür malzeme için de kuru yağmurlama yöntemiyle $Dr \approx 30$ ve 50 rölatif sıkılık değerlerini elde edebilmek için belirli yükseklikten üç tabaka halinde dökülerek gevşek ve orta sıkılıkta örnekler oluşturulmuştur. Örnekler hazırlanırken homojenliğin sağlanmasına özen gösterilmiştir. Her iki grup deneylerde hazırlanan numuneden CO_2 geçirme tekniği kullanılmış ve 20 kN/m^2 değerinde geri basınç uygulayarak numunenin, *Skempton B* değeri 0.96 ve üstü olacak şekilde doygunlaşması sağlanmıştır.

3.3 Deney Aleti

Bu çalışmada kullanılan dinamik üç eksenli deney aletinin genel görünüşü Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görülmektedir. Bu deney aleti ile numuneye drenajlı ve

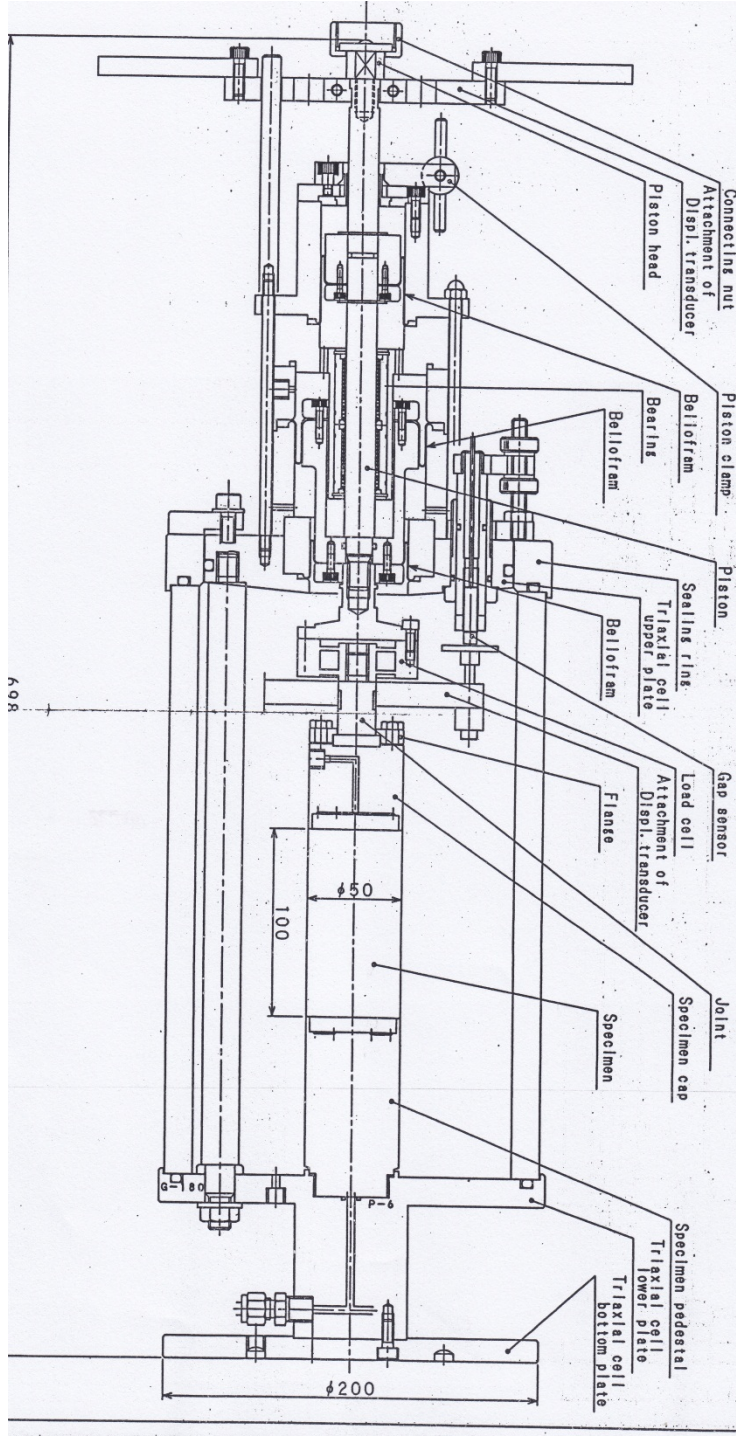
drenajsız şartlarda, izotropik veya anizotropik gerilme koşullarında statik veya değişik frekanslarda (0.1~9.9 Hz.) tekrarlı dinamik yükleme yapılarak zeminin dinamik gerilme ve şekil değiştirme özellikleri (kayma modülü, sönüm oranı, sıvılaşılabirliği vb.) laboratuvar koşullarında belirlenmeye çalışılır. Dinamik üç eksenli deneyler gerilme kontrollü olarak yapılmaktadır.

Çalışmada kullanılan dinamik üç eksenli deney sistemi pnömatik türde olup deney hücresi, basınç sistemi, dinamik yük düzeneği, ölçüm ve kayıt sistemi olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.9). Bu mekanik ve otomatik üniteler hava basınç-vakum sistemi, su basıncı ve elektrikle çalışan kontrol ve ölçümleme sistemlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.7 Deney aletini oluşturan ünitelerin detaylı gösterimi

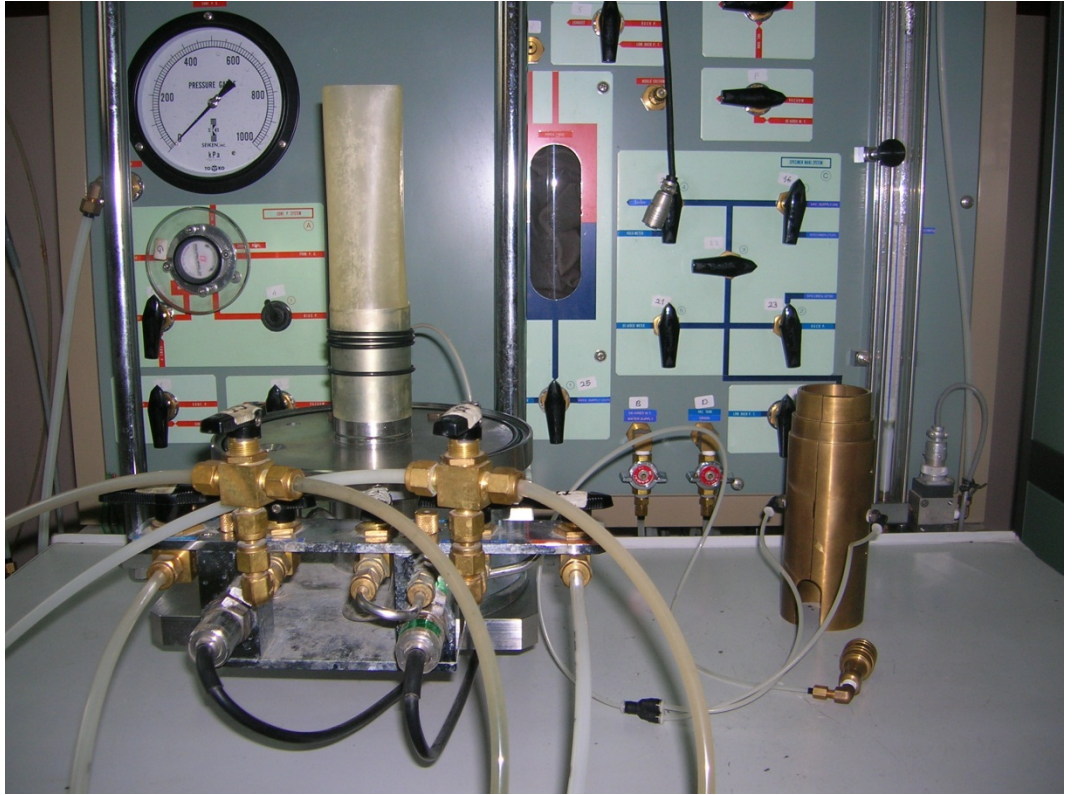
Deneyde kullanılan numunelerin çapı 5 cm. ve yüksekliği 10 cm. dir. Numune 210x50x0.25 mm boyutlarındaki membran ile çevrelenmektedir (Şekil 3.10). Membranın alt ve st kısımları geçirimsizlik için lastik contalar ve bantlarla sıkıca sarılmaktadır. Numunenin dış yüzeyine uygulanacak basınç hücreye verilen hava basıncının dış kısma doldurulan su aracılığıyla homojen bir şekilde numuneye aktarılması ile olur.



Şekil 3.8 Hücre içine yerleştirilmiş silindirik numune



Şekil 3.9 Kullanılan deney sistemi



Şekil 3.10 Deney sisteminde kullanılan membran ve mold

Numuneye alt kısımdan bir ve üst kısımdan da bir olmak üzere iki adet basınç ve drenaj hattı bağlanmıştır. Alt başlığa bağlı olan hat 25 ml. lik bir büret aracılığıyla doygunlaştırma sürecinde numuneden CO₂ ve su geçirilmesinde, ayrıca numuneye geri basınç uygulanmasında kullanılır (maksimum 1000 kPa).

Yine konsolidasyon ve deney süresince numunede meydana gelen hacim değişimleri aynı büret ile ölçülür. Bu hatlardan birisinin üzerinde bulunan transducer ile numunede oluşan boşluk suyu basıncı (u) ölçülmektedir. Üst başlığa bağlı olan hat ise doygunlaştırma, konsolidasyon ve deney süreçlerinde drenaj hattı olarak kullanılmaktadır.

Numune hazırlama sürecinde numune iç ve dış kısım yan yüzeylerinin düzgün bir yapıya sahip olmasını sağlamak için bazı kalıplar ve bağlayıcı gereçler kullanılmaktadır (Şekil 3.11). Özellikle kumlu zeminlerde bu yüzeysel düzgünlüğü ve stabiliteyi sağlamak için vakum işlemlerinden de yararlanılır.

Numunenin kesmeye maruz kaldığı üç eksenli silindirik deney hücresi akrilikten yapılmıştır. Hücre, alt ve üst düzlemlere lastik conta ve vidalarla sıkıca sabitlenerek hava ve su sızıntısı engellenir. Silindirik numunenin hücre içerisine yerleştirilmiş hali ve deney hücresiyle ilgili diğer ayrıntılar Şekil 3.9'da verilmiştir.

Deney sisteminin bir diğer ana ünitesi olan hava-su kontrol paneli numuneye uygulanacak yükleme ve doygunlaştırma işlemlerinin, hava ve su basınçları kullanılarak gerçekleştirilmesini sağlayan birimdir (Şekil 3.9). Panel üzerindeki basınç ve vakum ölçüm düzenekleri ve valfleri ile manuel ayarlamalar yapılarak, yükleme hücresi basınçları, geri basınç ve düşey eksenel basınç pnömatik olarak iletilmektedir. Bu birimde yer alan su ve vakum tankları ile numuneye su verilmekte ve vakum uygulanmaktadır. Bu üniteye ölçümlenen veya kontrol edilen basınç değerleri belirli bir hata yüzdesine sahip ve genellikle $\pm 0.1\%$ civarındadır.

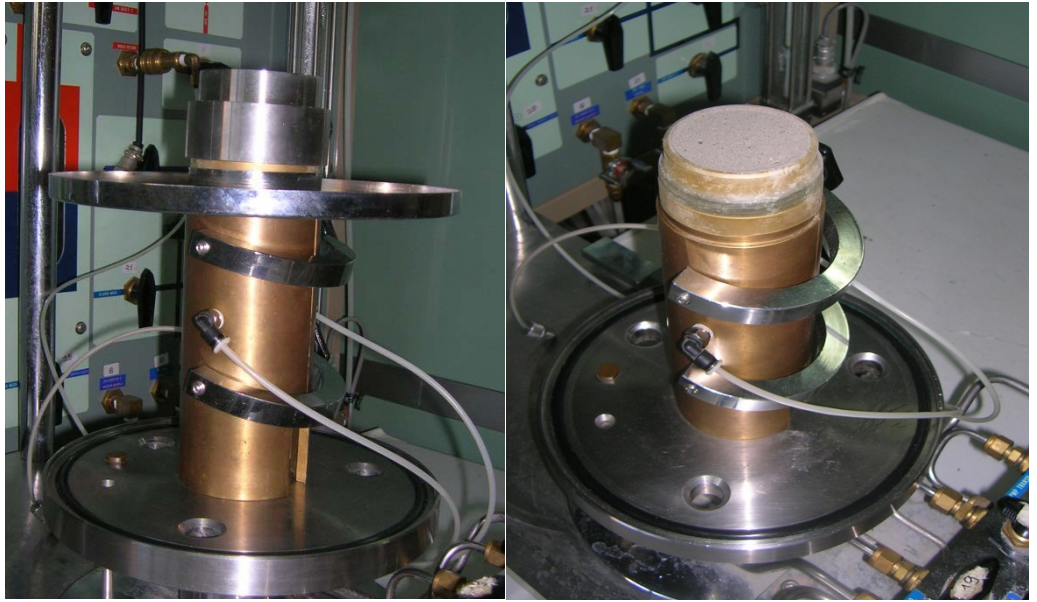
Pnömatik sinüzoidal yükleme veri edinim birimi ise numuneye uygulanacak statik veya dinamik yüklerin frekans ve genliklerinin kontrol edildiği ünite olup birçok gerilme ve şekil değiştirme verilerinin belirlendiği amplifikatörleri de içermektedir. Bu üniteden numuneye gerilme kontrollü olarak yükleme yapılır. Aparat üzerindeki kontrol panelinde bulunan düzenekler sayesinde numuneye uygulanacak dinamik yükün özellikleri ve frekansı ayarlanabilir. Bu birimden

yazılım ve donanım desteği sağlanmış kişisel bir bilgisayara bir “*data logger*” aracılığıyla veri aktarımı gerçekleştirilerek, deney süresince amplifikatörden ölçülen gerilme ve şekil değiştirme değerleri gözlemlenip kayıt edilebilmektedir.

Bu temel birimlerin yanı sıra gerek numune hazırlama sürecinde gerekse deney safhasında kullanılan bazı yardımcı alet ve aksesuarlar vardır. Özellikle farklı türde zeminlerle numune hazırlamak için bazı değişik yardımcı aletler kullanılmaktadır.



Şekil 3.11 Deney sisteminde kullanılan membran ve mold yerleşimi



Şekil 3.12 Malzeme yerleştirme

3.4 Deney Yönteminin Esasları

Dinamik üç eksenli deney aleti diğer dinamik deney aletlerine kıyasla daha kompleks bir yapıya sahiptir. Bu nedenle deney yöntemlerinde de bazı farklılıklar oluşmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi dinamik üç eksenli deney aleti ile değişik koşul ve gerilme durumlarında farklı amaçlara yönelik deneyler yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında silt kum karışımı numuneler üzerinde drenajsız koşullarda izotropik olarak konsolide edilmiş dinamik üç eksenli deneyler yapılarak zeminin gerilme ve şekil değiştirme özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

3.4.1 Numune Hazırlama

Laboratuvar ortamında yürütülen deneysel çalışmalarda numunelerin oluşturulması sırasında farklı numune hazırlama yöntemleri (kuru yağmurlama, kuru depolama, ıslak sıkıştırma vb.) kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerin seçiminde numunenin tür ve özellikleri, deney aletinin sınır koşulları ve deneyin yapılış amacı gibi etkenler rol oynamaktadır. Farklı yöntemlerle hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deneyler birbirinden oldukça farklı sonuçlar verebilmektedir (Tatsuoka, et al., 1986).

Çalışma kapsamında yürütülen bütün deneylerde Japonya Geoteknik Enstitüsü (JGS) tarafından yayınlanan standartlara uygun (JGS 0520-2000) uygun bir numune hazırlama metodu kullanılmıştır. Bu deney yönteminin aşamaları;

1. İlk olarak zemin numuneleri 0520-2000 standardına uygun olarak hazırlanır.
2. Dinamik üç eksenli deney aletinin hava ve su kontrol ünitesindeki gerekli basınç ayarlamaları yapılır. Su tanklarına vakum yardımıyla yeterince su alınarak (5 litre) su içerisinde hava çıkarılmaya çalışılır. Bu aşamada en az 3 saat vakum uygulanmalıdır.
3. 210x50x0.25 mm boyutlarındaki lastik membran alt kısma yerleştirilir. Su sızdırmazlığı için 2 adet lastik halka membranın alt kısmına sıkılır. Daha sonra iki parçadan oluşan kalıp takılır. Kalıplar kelepçeler yardımı ile sabitlenir. Üst başlığı membranın tutması için iki adet lastik halka takılır. Kalıp içerisinde düzgün bir yüzey oluşturması için kalıp ile membran arasına 20 kPa değerinde vakum uygulanır. Uygulanan vakum ile kalıp

içerisinde düzgün yüzey oluşturulmuş olur. Alt kısma 50 mm çapında bir adet filtre kağıdı yerleştirilir.

4. Önceden kurutulmuş ağırlığı belirlenmiş siltli kum numune kuru yağmurlama yöntemine göre istenilen rölatif sıklığı oluşturmak üzere belirli bir yükseklikten dökülür. Numunenin çevreye saçılmamasına özen gösterilir. Numunenin üst kısmı düzlenerek üst başlık numuneye dikkatli bir şekilde yerleştirilir ve üst drenaj borusu takılır.
5. Numunenin kalıplar çıkarıldıktan sonra düzgün bir şekilde kendini tutabilmesi için numuneye geri basınç hatları kullanılarak 20 kPa değerinde vakum uygulanır. Membranla çevrili kum numunesi artık kalıplar olmadan silindirik şeklini koruyabilmektedir. Kalıp çıkarıldıktan sonra numune üst başlıktan, orta kısımdan ve alt kısmında ölçülerek ortalama çapı ve yükseklikleri bulunur.
6. Düşey yükleme başlığı numune başlığına değinceye kadar indirilir ve bu iki başlık vidalarla birbirine sabitlenir. Bu işlem yapılırken numuneye herhangi bir ilave düşey kuvvet uygulamaktan kaçınılır. Daha sonra akrilik üç eksenli hücre yerine dikkatlice yerleştirilir ve üst tarafı sabitlenir. Düşey yer değiştirme transdüseri yerine takılarak pnömatik sinüzoidal yükleme aleti ile gerekli kablo bağlantıları yapılır ve alet çalıştırılır. Veri edinim birimlerinin kalibrasyonları yapılır.
7. Numunenin basınç dengesi korunarak hücre içerisinde orta seviyesine kadar su ile doldurulur. Su seviyesi ortada iken çevre basıncı sıfırlanır. Daha sonra hücrenin üst kısmına kadar su ile doldurulur. Numune çepeçevre su ile doldurulduktan sonra, bir taraftan numuneye halen uygulanmakta olan vakum kademeli olarak sıfırlanırken aynı anda çevre basıncı ilk değerine (20 kPa) kadar yine kademeli olarak arttırılır. Bu süreçte numune içerisine herhangi bir su sızıntısı olup olmadığı kontrol edilir.
8. Numunenin doymuşlaşmasını daha kolay gerçekleştirmesini sağlamak amacıyla numuneden belirli bir süre CO₂ geçirilir. CO₂ geçiş süresi numunedeki ince tane içeriğine göre değişir (Şekil 3.13). Bunun sebebi CO₂'nin su içerisindeki çözünürlüğünün havaya göre çok daha fazla olduğunun bilinmesidir. Daha sonra numuneden hidrostatik basınç şartlarında, havası alınmış su geçirilip doymuşlaştırma sürecine başlanır. Bu işlemle numunedeki bütün hava boşluklarının su ile doldurulmasına çalışılır. Bu süreçte suyun numune içerisinden geçişi ve drenaj hattından çıkışı kontrollü bir şekilde gözlenip belirli bir miktarda suyun geçişine izin verilerek işlem sonlandırılır (Şekil 3.14).

9. Su geçirilen numuneye izotropik gerilme koşullarında 25 kPa'lık artım aralıklarıyla belirli bir değere kadar geri basınç uygulanır. Bu aşamada çevre basıncı, geri basınç+20 kPa değerine ulaşır. Bu sırada düşey basınç değeri numunede ilave düşey gerilme oluşturmayacak şekilde ayarlanır. Uygulanan bu geri basınç işlemiyle numunenin doygunluk derecesinin yükseltilmesi sağlanır. Numunenin doygunlaşma kontrolü Skempton B değerinin belirlenmesiyle yapılır. Bunun için drenaj hatları kapatılarak çevre basıncı belirli bir değere kadar arttırılır. Tam doygunlaşma için belirli bir zaman sürecinde numunede oluşan boşluk suyu basıncı değeri dikkate alınarak hesaplanan B değerinin 0.96'dan büyük olma koşulu aranır. Doygunlaştırma işlemi öncesi ve sonrasında numunede oluşan boy ve hacim değişimleri transdüser ve büret yardımıyla belirlenir.
10. Doygun hale gelen zemin numunesi izotropik gerilme koşullarında belirli bir süre için konsolidasyona maruz bırakılır. Bunun için düşey eksenel ve çevre gerilmeleri numunede her yönde eşit gerilmeler oluşturacak şekilde istenilen efektif gerilme değeri kadar arttırılır. Konsolidasyon işlemi hacim değişimi sabitlenene kadar devam ettirilir. Konsolidasyon öncesinde ve bitiminde numunede meydana gelen hacim değişim miktarı büretten yapılan okuma ile tespit edilir. Konsolidasyon sürecinin bitimiyle beraber numune artık istenilen kesme deneyine hazır hale gelir.



Şekil 3.13 Örneğin içinden CO₂ geçirilmesi



Şekil 3.14 Örneğin içinden su geçirilmesi

3.4.2 Deney Yöntemi

Zeminlerin dinamik özelliklerinin incelenmesinde dinamik üç eksenli deney aleti ile amaca bağlı olarak değişik yükleme koşullarında deneyler yapılabilmektedir. Deney aleti, araştırmacının incelenen konunun hedefi doğrultusunda, konsolide edilen zemin numunesine istenilen tür ve koşullarda yükleme yapılabilmesine ve diğer birçok deneysel parametreyi değiştirebilmesine izin vermektedir. Yapılacak deneyin yöntemi ve yükleme özellikleri araştırma konusuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Çalışmada, belirlenen amaç doğrultusunda yürütülen deneyler, yine Japonya Geoteknik Enstitüsü (JGS) tarafından yayınlanan deney standartlarına ve yöntemlerine göre farklı dinamik zemin parametrelerini bulmak amacıyla, 2 farklı deney yöntemi kullanılmıştır. Bu deneysel yöntemlerden ilki dinamik drenajsız üç eksenli deneydir (JGS 0541-2000). Bir diğeri ise zeminlerin deformasyon özelliklerinin hesaplanması için tekrarlı üç eksenli deneydir (JGS 0542-2000).

Bu çalışma kapsamında yapılan bütün deneyler gerilme kontrollü olarak drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiştir. Yine deneylerin tamamı 0.1 Hz sabit frekansında sinüzoidal tekrarlı yükleme koşullarında yapılmıştır. Yapılan ilk kısım deneylerde dinamik kesme gerilmesi belirli bir değerde sabit tutularak (üniform yükleme) numuneler kesilmiştir (JGS 0541-2000). Bu şekilde en az dört

deney yapılmalıdır. Deney çevrim sayısı 200'den fazla olursa veya $\left(\frac{\Delta L}{H_c}\right) \times 100 > \%5$ ise deney sonlandırılır. Burada ΔL =çift genlikteki eksenel yer değiştirme (mm); H_c : konsolidasyon sonrası numune boyu (mm) dur.

İkinci kısım deneyler (JGS 0542-2000) ise ilk aşamada küçük gerilme değerlerinde on bir çevrimde bir yükleme yapılır. On bir çevrimden sonra alt ve üst başlık vanaları açılarak numunenin konsolide olması sağlanır. Böylece başlangıç şartlarına yeniden dönmüş olunur. Küçük gerilme değerlerinde dinamik yüklemeler yapılarak kayma deformasyonlarının elastik sınırlar içinde olduğu bölgede zeminin dinamik gerilme ve şekil değiştirme özellikleri araştırılır. Deneyin ikinci aşamasında numuneye kesilinceye kadar on bir çevrimde bir arttırılan daha büyük gerilme değerlerinde dinamik yüklemeler uygulanır ve plastik deformasyon koşullarında zeminin dinamik mukavemet özellikleri incelenir.

Konsolidasyon bitiminden hemen sonra drenaj vanaları kapatılır. Veri edinim amplifikatörlerinde gerekli kalibrasyonlar yapıp ilk aşamada zeminde istenen yükü oluşturmak için sinüzoidal yükleme ünitesinde gerekli ayarlamalar yapılır. Bu arada veri edinim ünitesinden elde edilen değerlerin gözlemlenip kaydedilebilmesi için üniteye bağlı olan kişisel bilgisayar ve yazılım programı deneye hazırlanır. Bu bilgisayar ve yazılım programı sayesinde deney süresince amplifikatörlerden gelen gerilme, şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı verileri ile zamana bağlı olarak değişimleri aynı anda izlenebilmekte ve kaydedilebilmektedir. Deney başlatıldıktan sonra transduserler, gerilme ölçerler ve yük hücreleriyle belirlenen gerilme ve şekil değiştirme değerleri veri edinim amplifikatörlerinde volt olarak ölçülür. Deney başladıktan sonra on bir çevrimde bir deney sonlandırılır ve drenaj vanaları açılarak numunenin konsolide olması sağlanır. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra her on bir çevrimde bir yük değeri arttırılır ve numune kesilinceye kadar bu işleme devam edilir. Numune kesildikten sonra deney sonlandırılır. Deneyler süresince geri basınç ve çevre gerilmesi sabit tutulur.

Deneyden sonra yükleme boşaltılır ve gerekli basınç ayarlamaları yapılarak deney hücresi sökülür. Kesmeye maruz kalan zemin numunesi dikkatli bir şekilde yerinden çıkarılarak etüvde kurutulmaya bırakılır. Ertesi gün numunenin kuru ağırlığı belirlenir.

3.4.3 Deney Parametrelerinin Hesabı

Konsolidasyon aşamasından önce numunede doygunlaşma kontrolü yapılırken kullanılan Skempton B değeri;

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (3.1)$$

Burada $\Delta \sigma$ izotropik gerilme artışını, Δu ise bu ilave gerilme artışının neden olduğu boşluk suyu basıncını göstermektedir.

Konsolidasyon sonrası hacim;

$$V_c = V_0 - \Delta V_c \quad (3.2)$$

Burada V_0 deney başlangıcındaki hacim (cm^3), ΔV_c konsolidasyon boyunca oluşan hacim değişimi (cm^3) dir. Konsolidasyon sonrası numune boyu;

$$H_c = H_0 - \Delta H_c \quad (3.3)$$

Burada H_0 deney başlangıcındaki numune boyu (cm), ΔH_c konsolidasyon boyunca oluşan boy değişimi (cm) dir. Konsolidasyon sonrası numune alanı;

$$A_c = V_c / H_c \quad (3.4)$$

Burada A_c konsolidasyon sonucu hesaplanan numune alanı (cm^2) dir.

Dinamik yükleme boyunca her on bir çevrimden sonra yükleme sonlandırılarak drenaj vanaları açılır ve zeminin konsolide olması sağlanır. Bu sebeple her bir yükleme boyunca numune hacmi;

$$V_n = V_c - \Delta V_n \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada ΔV_n her bir yükleme aşamasından sonra zeminin konsolide olduktan sonra ölçülen hacim değişimidir. Ayrıca her bir yükleme aşamasında numune boyu;

$$H_n = H_c - \Delta H_n \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada ΔH_n her bir yükleme aşamasından sonra zeminin konsolide olduktan sonra ölçülen boy değişimidir. Ayrıca her bir yükleme aşamasında numune alanı;

$$A_n = V_n / H_n \quad (3.7)$$

şeklinde hesaplanır. Burada A_n her bir yükleme aşamasından sonra zeminin konsolide olduktan sonra hesaplanan alan değeridir.

Japonya Geoteknik Enstitüsü (JGS 0542-200) standardına göre beşinci ve onuncu çevrimlerde;

Tek genlikteki tekrarlı deviatör gerilme, σ_d (kN/m²),

$$\sigma_d = \frac{P_c + P_E}{2A_n} \times 10 \quad (3.8)$$

Burada P_c ve P_E değerleri dinamik yükleme kademesindeki basınç ve çekme oluşturan eksenel yük (N) değerleridir. A_n ise yükleme öncesi numune alanıdır.

Tek genlikteki eksenel şekil değiştirme, $(\epsilon_a)_{sa}$ (%),

$$(\epsilon_a)_{sa} = \frac{\Delta L}{2H_n} \times 100 \quad (3.9)$$

Burada ΔL çift genlikteki eksenel yer değiştirme (cm), H_n her bir yükleme kademesindeki numune boyudur.

Eşdeğer young modülü E_{eq} (MN/m²)

$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{(\epsilon_a)_{sa}} \times \frac{1}{10} \quad (3.10)$$

Histeritik sönüm oranı(%);

$$h = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (3.11)$$

Burada ΔW tek bir çevrimdeki sönümlenen enerjidir. W ise tek bir çevrimdeki eşdeğer elastik giriş enerjisidir (Ncm).

$$W = \frac{(P_c + P_E)x\Delta L}{4} \quad (3.12)$$

değeri elde edilir.

4. DENEY PROGRAMI, KONSOLİDASYON VE TEKRARLI YÜKLEME KOŞULLARI

Laboratuvarda zeminlerin dinamik gerilme - şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin bulunması ve zeminlerin sıvılaşma olayının incelenmesi amacıyla geliştirilen dinamik deney aletlerinden birisi de dinamik üç eksenli deney aletidir. Bu çalışma kapsamında yürütülen deneyler Ege Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dinamik üç eksenli deney aleti ile gerçekleştirilmiştir. Deney aleti, deney yöntemi ve kullanılan zemin türü ve özellikleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler daha önceki bölümlerde verilmiştir.

Bu bölümde, değişik amaçlar doğrultusunda yapılan deney türleri, özellikleri ve elde edilen sonuçlar bakımından ayrıntılı bir şekilde irdelenmekte, değerlendirilmekte ve yorumlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle yapılan deneysel çalışmaların hangi koşullarda yürütüldüğü; yükleme ve diğer deney parametrelerinin değişimleri ortaya konmaktadır.

Belirli deney ve yükleme koşullarında zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin incelenmesi, dinamik kayma modülü ve sönüm oranındaki değişimin belirlenmesi, tekrarlı yüklemeler sonucu zeminde oluşan toplam ve kalıcı şekil değiştirmeler ile boşluk suyu basıncındaki değişimin araştırılması ve sıvılaşma olayına etkisi gerilme izlerinden yararlanılarak yürütülen deneysel çalışmalar ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca farklı rölatif sıkılık ve çevre basıncındaki değişimin zeminlerin dinamik davranışları üzerindeki etkisi de incelenen diğer konular olmuştur. Yukarıda söz edilen ve araştırılması hedeflenen bu konular için belirli bir deney programı kapsamında deneysel çalışmalar yürütülmüş ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar belirli bir amaç doğrultusunda değerlendirilmiştir. Sonuçlar geçmişte değişik araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

4.1 Deney Programı

Bu çalışma kapsamında yürütülen bütün deneyler gerilme kontrollü olarak drenajsız koşullarda ve 0.1 Hz sabit frekansındaki sinüzoidal dalga formunda uygulanan tekrarlı yükleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün deneyler laboratuvar koşullarında sonradan oluşturulan suya doymuş siltli kum ve kumlu silt numuneler üzerinde yürütülmüştür.

Deneyler yükleme türü olarak iki ana bölüm altında sınıflandırılabilir. Buna göre yapılan ilk kısım deneylerde dinamik gerilme belirli bir değerde sabit tutularak (üniform yükleme) numuneler kesilmiştir. İkinci kısım deneylerde ise numunelere küçük artırımlarla manuel bir şekilde dinamik yükleme yapılarak, artan gerilme koşullarında zeminlerin dinamik davranış özellikleri incelenmiştir. Yapılan ikinci kısım deneylerde ilk aşamada küçük gerilme değerlerinde on bir çevrimde bir arttırılan (multi stage) tekrarlı yüklemeler yaparak kayma deformasyonlarının elastik sınırlar içinde olduğu bölgede zeminin dinamik gerilme ve şekil değiştirme özellikleri araştırılmıştır. Yükleme artışlarına devam edilerek, numune kesilinceye kadar yine on bir çevrimde bir arttırılan daha büyük gerilme genliği değerlerinde dinamik yüklemeler uygulanmış ve plastik deformasyon koşullarında zeminin dinamik mukavemet özellikleri incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan birinci malzeme olarak Torbalı Kumu ile nonplastik silt karışımıdır. Bu karışımlar üzerinde sıvılaşma ve gerilme-şekil değiştirme deneyleri yapılmıştır. Kullanılan diğer malzeme ise İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum karışımıdır. Bu malzeme ile tekrarlı yükler altında ve değişik koşullarda yürütülen mukavemet deneyleri ile zemine ait dinamik özellikler belirlenmeye çalışılmıştır.

Deneylerde kullanılan bütün numuneler kuru yağmurlama yöntemiyle laboratuvar koşullarında hazırlanmıştır. Böylece malzemelerin davranış özelliklerinin birbirleri ile karşılaştırılırken hazırlanma yöntemlerinin aynı olması esasına göre hareket edebilme imkanı doğmuştur.

Torbalı Kumu ile plastik olmayan silt karışımları, üniform yükler altında gerçekleştirilen deneylerin genel olarak hangi koşullarda yürütüldüğü Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de gösterilmektedir. Tablolarda görüldüğü gibi yapılan deneyler değişik yükleme şartlarında farklı rölatif sıkılık, çevre basıncı ve başlangıç konsolidasyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Özellikle üniform yüklemelerin yapıldığı deneylerde değişik rölatif sıkılık, çevre basıncı değerlerinin yanı sıra farklı konsolidasyon basıncının zeminlerin dinamik davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tablo 4.3’de artan gerilme genlikleri altında Torbalı kumu ile gerçekleştirilen deneylerin genel özellikleri tablo halinde verilmiştir. Ayrıca artan gerilme genlikleri ile yapılan deneylerde de değişik rölatif sıkılık, çevre basıncı,

konsolidasyon basıncı ve silt içeriğinin zeminlerin dinamik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tablo 4.1 Torbalı Kumu-nonplastik silt karışımı ile tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri

Test No	Numune Boyutları		Silt İçeriği	Rölatif Sıkılık	Doygunluk	Hücre Basıncı	Geri Basınç	Konsolidasyon	Tekrarlı Gerilme	CSR	Çevrim Sayısı
	D	H									
	(mm)	(mm)	%	(Dr)		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)		
1	49.83	99.81	11	25	1.00	250.7	200.9	49.8	13.717	0.137721	7
2	49.74	99.79	11	25	0.986	210.2	160.8	49.4	26.125	0.264423	2
3	49.8	99.81	11	25	0.993	233.7	184	49.7	15.629	0.157233	63
4	49.82	99.8	11	25	0.972	230.4	181	49.4	11.445	0.11584	131
5	49.61	99.57	11	25	0.998	221.2	121.3	99.9	42.641	0.213418	5.5
6	49.65	99.55	11	25	0.984	415.4	316.9	98.5	27.573	0.139964	56
7	49.67	99.58	11	25	0.99	319.2	220.9	98.3	17.869	0.09089	184
8	49.48	99.66	11	25	0.974	274.1	175.1	99	24.024	0.121333	101
9	49.88	99.88	11	70	0.966	189.4	140.2	49.2	43.724	0.44435	3
10	49	99.87	11	70	0.975	249.4	199.8	49.6	32.112	0.32371	5.5
11	49.89	99.85	11	70	0.986	209.1	160	49.1	20.588	0.209654	18
12	49.97	99.82	11	70	0.92	249.3	200.2	49.1	16.829	0.171375	88
13	49.7	99.74	11	70	0.952	280.1	180.7	99.4	42.332	0.212938	28
14	50.39	99.7	11	70	0.996	449.5	350.1	99.4	55.068	0.277002	8.5
15	50.39	99.64	11	70	0.978	399.2	300.2	99	31.306	0.158111	79.5
16	49.88	99.69	11	70	0.986	298.8	200.4	98.4	24.341	0.123684	152
17	50.15	99.85	15	25	0.953	400	348	52	22.18	0.213269	11.5
18	50.09	99.76	15	25	0.989	349.8	300	49.8	16.493	0.165592	32
19	49.66	99.74	15	25	1.00	76.9	29.6	47.3	10.683	0.112928	200
20	50.19	99.62	15	25	1.00	300.6	199.6	101	19.239	0.095243	280
21	49.64	99.47	15	25	0.976	249.5	150.5	99	22.479	0.11353	79.5
22	49.64	99.59	15	25	0.984	200.3	100	100.3	26.938	0.134287	44.5
23	49.75	99.55	15	25	1.00	250.4	151	99.4	41.437	0.208436	4
24	49.87	99.9	15	70	0.986	264.6	214.2	50.4	25.694	0.254901	35
25	49.93	99.88	15	70	0.985	301.4	250.5	50.9	17.911	0.175943	210
26	49.91	99.89	15	70	0.989	250.2	200.6	49.6	36.357	0.366502	8
27	50.06	99.87	15	70	0.979	300.6	251	49.6	23.118	0.233044	2.5
28	50.49	99.77	15	70	0.952	400.8	300.2	100.6	55.006	0.27339	23
29	49.67	99.75	15	70	0.981	275.3	175.7	99.6	41.741	0.209543	53
30	50.01	99.79	15	70	0.994	200.4	101.3	99.1	31.114	0.156983	112
31	49.04	99.77	15	70	1.00	128	32	96	40.449	0.210672	17.5
32	49.74	99.89	15	70	0.974	200.3	100.1	100.2	39.629	0.19775	109
33	49.89	99.78	22	25	0.977	169.2	120.1	49.1	14.933	0.152067	4.5
34	50.67	99.71	22	25	0.982	200.3	151.2	49.1	10.413	0.106039	100
35	50.94	99.54	22	25	0.962	329.7	279.1	50.6	7.575	0.074852	700
36	49.78	99.49	22	25	1.00	300	200.6	99.4	54.435	0.273818	0.5
37	51.33	99.54	22	25	1.00	458.5	359.4	99.1	39.259	0.198078	4
38	49.42	99.5	22	25	1.00	161.5	62.8	98.7	33.879	0.171626	13.5
39	49.19	99.55	22	25	0.964	250.6	151	99.6	28.316	0.142149	21
40	49.8	99.49	22	25	1.00	199.6	99.8	99.8	21.081	0.105616	45.5
41	49.79	99.54	22	25	1.00	299.3	201.9	97.4	15.888	0.081561	430
42	49.75	99.5	22	25	1.00	349.3	250.2	99.1	48.815	0.246292	133
43	50.3	99.42	22	25	1.00	375.3	276.1	99.2	18.97	0.095615	156
44	50.35	99.57	22	70	1.00	451.4	351.2	100.2	29.632	0.147864	142
45	50.1	99.61	22	70	1.00	450.7	350.6	100.1	54.723	0.273342	6.5
46	50.77	99.62	22	70	0.9691	450.2	349.8	100.4	41.958	0.208954	31
47	50.25	99.7	22	70	0.9674	450.4	350.9	99.5	35.678	0.179286	350
48	49.79	100.13	22	70	1.00	400.1	349.8	50.3	22.022	0.218907	575
49	49.97	99.81	22	70	1.00	400.7	350.6	50.1	43.033	0.429471	16
50	49.97	99.85	22	70	1.00	400.5	350.4	50.1	33.033	0.329671	20
51	49.94	99.81	22	70	1.00	400.8	350.3	50.5	24.76	0.245149	31
52	49.94	99.79	22	70	1.00	400.3	349.8	50.5	18.63	0.184455	650
53	50.84	99.85	22	70	1.00	400	350	50	49.97	0.4997	14

Tablo 4.2 Torbalı Kumu-nonplastik silt karışımı ile tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri

Test No	Numune Boyutları		Silt içeriği (%)	Rölatif Sıkılık Dr (%)	Doygunluk Katsayısı, B	Hücre Basıncı (kPa)	Geri Basıncı (kPa)	Konsolidasyon Basıncı	Tekrarlı Gerilme (kPa)	CSR	Çevrim Sayısı N
	D(mm)	H(mm)									
1	49.83	99.81	0	25	1.00	180	80	100	23.747	0.119	208
2	49.74	99.79	0	25	0.986	425	325	100	26.59	0.133	50
3	49.8	99.81	0	25	0.993	422	322	100	36.44	0.182	29
4	49.82	99.8	0	25	0.972	424	324	100	32.4	0.162	109
5	49.61	99.57	0	25	0.998	400	300	100	26.3	0.132	390
6	49.65	99.55	0	25	0.984	180	80	100	45.39	0.227	11
7	49.67	99.58	0	25	0.990	352	252	100	49.226	0.246	10
8	49.48	99.66	20	25	0.974	300	200	100	31.975	0.160	14
9	49.88	99.88	20	25	0.966	350	250	100	26.95	0.135	30
10	49	99.87	20	25	0.975	200	100	100	22.22	0.111	72
11	49.89	99.85	20	25	0.986	375	275	100	16.83	0.084	210
12	49.97	99.82	40	25	1.00	450	350	100	31.716	0.159	13
13	49.7	99.74	40	25	0.978	200	100	100	27.889	0.139	17
14	50.39	99.7	40	25	0.996	476	376	100	20.713	0.104	63
15	50.39	99.64	40	25	0.978	400	300	100	16.296	0.081	212
16	49.88	99.69	60	25	0.986	575	475	100	29.996	0.150	10
17	50.15	99.85	60	25	0.953	550	450	100	25.161	0.126	34
18	50.09	99.76	60	25	0.989	400	300	100	20.881	0.104	39
19	49.66	99.74	60	25	1.00	275	175	100	21.984	0.110	67
20	50.19	99.62	60	25	1.00	375	275	100	16.537	0.083	230
21	49.64	99.47	80	25	0.976	250	150	100	33.756	0.169	3
22	49.64	99.59	80	25	0.984	275	175	100	27.948	0.140	11
23	49.75	99.55	80	25	1.00	250	150	100	20.8	0.104	49
24	49.75	99.43	80	25	1.00	300	200	100	12.83	0.064	40
25	49.69	99.51	80	25	1.00	225	125	100	25.819	0.129	12
26	49.56	99.41	100	25	1.00	240	140	100	33.949	0.170	5.5
27	49.44	99.39	100	25	1.00	280	180	100	28.65	0.143	23.5
28	49.72	99.26	100	25	1.00	260	160	100	22.5	0.113	25
29	49.63	99.33	100	25	1.00	180	80	100	15.445	0.077	136

Tablo 4.3 Torbalı Kumu-nonplastik silt karışımı ile artan genlikli tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri

Test No	Silt içeriği (%)	Rölatif Sıkılık Dr (%)	Konsolidasyon Basıncı (kPa)
1	0	25	100
2	0	30	100
3	0	40	100
4	0	70	100
5	0	70	100
6	20	25	100
7	20	40	100
8	20	50	100
9	20	70	100
10	60	25	100
11	80	25	100
12	100	25	100

Ayrıca İzmir - Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum karışımı ile üniform yükler altında gerçekleştirilen deneylerin genel olarak hangi koşullarda yürütüldüğü Tablo 4.4’de gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi yapılan deneyler değişik yükleme şartlarında farklı rölatif sıkılık, çevre basıncı ve başlangıç konsolidasyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Özellikle üniform yüklemelerin yapıldığı deneylerde değişik rölatif sıkılık, çevre basıncı değerlerinin yanı sıra farklı konsolidasyon basıncının zeminlerin dinamik davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tablo 4.5’de artan gerilme genlikleri altında Torbalı kumu ile gerçekleştirilen deneylerin genel özellikleri tablo halinde verilmiştir. Ayrıca artan gerilme genlikleri ile yapılan deneylerde de değişik rölatif sıkılık, çevre basıncı, konsolidasyon basıncı ve silt içeriğinin zeminlerin dinamik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tablo 4.4 İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum ile tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri

Test No	Numune Boyutları		Silt içeriği (%)	Rölatif Sıklık Dr (%)	Doygunluk Katsayısı, B	Hücre Basıncı (kPa)	Geri Basıncı (kPa)	Konsolidasyon Basıncı (kPa)	Tekrarlı Gerilme	CSR	Çevrim Sayısı N
1	50.00	99.00	0	30	0.997	275	175	100	31.123	0.156	30
2	48.52	99.76	0	30	1.000	180	80	100	44.35	0.222	2.5
3	49.18	99.11	0	30	1.000	200	100	100	37.414	0.187	10.5
4	49.59	99.00	0	30	0.970	270	170	100	26.669	0.133	103
5	49.32	99.18	0	30	1.000	280	180	100	21.073	0.105	29
6	49.70	99.09	5	30	1.000	225	125	100	45.111	0.226	5
7	50.00	98.89	5	30	0.960	360	260	100	49.243	0.246	2.5
8	49.96	98.98	5	30	0.987	250	150	100	25.445	0.127	76.5
9	49.92	99.00	5	30	0.982	250	150	100	34.481	0.172	15.5
10	49.44	99.10	5	30	1.000	175	75	100	20.351	0.102	425
11	50.00	98.88	10	30	0.965	300	200	100	51.543	0.258	1.5
12	49.84	98.88	10	30	0.977	225	125	100	41.802	0.209	3.5
13	49.56	98.98	10	30	0.983	175	75	100	37.000	0.185	10.5
14	49.67	98.97	10	30	0.984	200	100	100	28.292	0.141	53
15	49.88	99.01	20	30	0.993	275	175	100	28.016	0.140	38.5
16	50.00	99.00	20	30	0.997	300	200	100	22.276	0.111	199
17	49.7	98.91	20	30	1.000	275	175	100	33.409	0.167	15
18	49.48	98.96	20	30	1.000	175	75	100	39.434	0.197	6.5
19	49.57	98.8	40	30	1.000	250	150	100	25.943	0.130	38.5
20	49.52	98.78	40	30	1.000	250	150	100	21.516	0.108	241
21	49.52	98.78	40	30	1.000	275	175	100	32.553	0.163	14.5
22	49.57	98.77	40	30	1.000	250	150	100	37.378	0.187	4.5
23	49.54	98.71	60	30	1.000	225	125	100	28.337	0.142	28.5
24	49.53	98.65	60	30	1.000	225	125	100	22.707	0.114	95.5
25	49.39	98.41	60	30	1.000	200	100	100	34.258	0.171	7.5
26	49.75	98.56	60	30	1.000	275	175	100	39.357	0.197	3.5
27	49.52	98.14	80	30	1.000	250	150	100	26.161	0.131	17.5
28	49.35	98.23	80	30	1.000	175	75	100	22.349	0.112	163
29	49.33	98.45	80	30	1.000	175	75	100	39.336	0.197	2.5
30	49.78	98.22	80	30	1.000	225	125	100	24.948	0.125	73.5
31	49.63	98.26	100	30	1.000	225	125	100	31.112	0.156	13.5
32	49.5	98.45	100	30	1.000	175	75	100	20.976	0.105	163.5
33	49.47	98.94	100	30	0.985	375	275	100	26.556	0.133	35.5
34	49.42	98.47	100	30	1.000	200	100	100	39.525	0.198	4.5
35	49.92	99.44	0	50	0.981	225	125	100	41.544	0.208	19
36	50.00	99.34	0	50	0.973	400	300	100	50.941	0.255	6
37	49.71	99.42	0	50	0.978	200	100	100	32.497	0.162	151
38	49.64	99.38	0	50	0.995	200	100	100	65.376	0.327	2.5
39	50	99.12	20	50	0.978	275	175	100	54.675	0.273	2.7
40	49.52	99.21	20	50	1.000	175	75	100	41.738	0.209	7
41	49.53	99.2	20	50	1.000	175	75	100	32.605	0.163	32
42	49.6	99.22	20	50	1.000	200	100	100	27.174	0.136	126.5
43	49.7	99.12	40	50	0.992	225	125	100	54.732	0.274	1.5
44	49.52	99.08	40	50	0.995	175	75	100	44.136	0.221	5
45	49.92	98.97	40	50	1.000	250	150	100	32.541	0.163	35
46	49.55	99.15	40	50	1.000	175	75	100	27.491	0.137	95
47	49.6	98.78	60	50	1.000	175	75	100	55.888	0.279	0.5
48	49.58	99.07	60	50	1.000	180	80	100	44.968	0.225	3.5
49	49.55	99.02	60	50	0.995	175	75	100	32.84	0.164	29.5
50	49.51	99.02	60	50	0.992	175	75	100	24.709	0.124	423
51	49.95	98.77	80	50	0.987	250	150	100	52.969	0.265	0.5
52	49.72	98.79	80	50	0.995	250	150	100	41.981	0.210	4
53	49.69	98.85	80	50	0.992	225	125	100	32.779	0.164	26
54	49.54	98.86	80	50	1.000	200	100	100	27.947	0.140	61
55	49.4	98.79	100	50	1.000	175	75	100	27.656	0.138	132
56	49.41	98.81	100	50	1.000	175	75	100	42.043	0.210	5.5
57	49.48	98.99	100	50	1.000	175	75	100	33.712	0.169	30
58	49.82	989.71	100	50	0.992	250	150	100	53.068	0.265	0.5

Tablo 4.5 İzmir-Bayraklı bölgesinden alınan düşük plastisiteli siltli kum ile artan genlikli tekrarlı yükler altında yürütülen deneysel çalışmaların genel özellikleri

Test No	Silt içeriği (%)	Rölatif Sıkılık Dr (%)	Konsolidasyon Basıncı (kPa)
1	0	25	100
2	20	25	100
3	40	25	100
4	60	25	100
5	80	25	100
6	100	25	100
7	100	25	50
8	100	25	150

4.2 Konsolidasyon ve Yükleme Koşulları

Zeminlerin gerek statik gerekse dinamik yükler altındaki davranış özellikleri incelenirken daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için doğada etkisi altında bulunduğu yükleme koşullarının laboratuvar ortamında oluşturulabilmesi amacıyla geçmişten günümüze kadar birçok araştırma yapılmış, değişik özellikteki deney aletleri ve yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle zeminlerin dinamik gerilmelere maruz kalmadan önce konsolidasyon sürecine ait yükleme koşullarının gerçeğe uygun bir şekilde oluşturulması deneylerden elde edilecek sonuçlarında daha sağlıklı olmasını sağlar.

Bu çalışmada oluşturulan deneyler başlangıçta izotropik şartlarda konsolide edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon sürecinde bütün numuneler öncelikle istenilen gerilme değerinde izotropik koşullarda, düşey ve çevre gerilmeleri kademeli bir şekilde artırılarak konsolide edilmiştir. Çalışmada yürütülen bütün deneyler konsolidasyon aşamaları ve deney koşullarına bağlı olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- 1) İzotropik Dinamik Kesme: Bütün numuneler değişik çevre gerilmesi değerlerinde izotropik koşullarda konsolide edilmiştir. Konsolidasyon sonrasında numuneye üniform bir dinamik yükleme uygulanmıştır.
- 2) Artan Gerilmeli Dinamik Kesme: Bütün numuneler değişik çevre gerilmesi değerlerinde izotropik koşullarda konsolide edilmiştir. Konsolidasyon sonrasında zeminin gerilme şekil değiştirme özelliklerini belirlemek amacıyla artan gerilme genlikli dinamik yüklemeler uygulanmıştır.

5. ZEMİNLERİN DRENAJSIZ KOŞULLARDAKİ GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖZELLİKLERİ

Depremler sırasında yerel zemin koşullarının yer hareketleri üzerindeki etkisini daha ileri bir düzeyde inceleyebilmek için birçok laboratuvar deney aletleri geliştirilmiştir. Bu tür aletler ile analizlerde zeminlerin şekil değiştirme seviyesine bağımlı dinamik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Analizlerde kullanılan zemin kayma modülü ve sönüm oranının geniş bir şekil değiştirme aralığı içinde tanımlanması, ancak birçok laboratuvar deneyinin birlikte yapılması ile mümkün olmaktadır. Düşük şiddette titreşimler altında meydana gelen şekil değiştirme seviyelerinde, zeminin elastik davrandığı ve bu durumda kayma modülünün maksimum değerine, sönüm oranının ise minimum değerine sahip olduğu kabul edilmektedir.

Tekrarlı yükleme genliğine bağlı olarak, zemin davranışı da farklılıklar göstermektedir. Düşük genlikli titreşimlerin oluşturduğu dalga yayılımı problemlerinde elastik davranış gözlenirken, deprem ve patlamalar gibi büyük genlikli tekrarlı yüklemelerde, dane temas yüzeylerinde oluşan kaymalardan kaynaklanan plastik şekil değiştirmeler söz konusu olup, özellikle depremler sonrası oluşan yapısal hasarlar, zeminlerin tekrarlı yüklemeler karşısında gösterdikleri davranıştan büyük ölçüde etkilenmektedir.

Depremler sonucu meydana gelen yapısal hasarın bir kısmı bazı durumlarda ise tamamı, zemin tabakalarının tekrarlı yüklemeler altında gösterdikleri davranışa bağlıdır. Düşük genlikli titreşimlerin oluşturduğu, dalga yayılımı gibi yüklemelerde zemin tabakaları tamamen elastik bir davranış gösterirken, deprem ve patlamalar gibi büyük genlikli tekrarlı yükleme durumlarında, dane temas yüzeylerinde oluşan kaymalardan kaynaklanan elasto-plastik ve plastik şekil değiştirmeler söz konusudur.

Tekrarlı yükler altında kil zeminlerin davranışı karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Tekrarlı yük etkisi altında zemin taşıma kapasitesi ya da deformasyonların hesaplanmasına yönelik temel bir yöntem geliştirilebilmiş değildir. Bunun bir nedeni de, tekrarlı yük özellikleri, (yükleme frekansı ve süresi, yükleme yönü) zemin özellikleri (gerilme geçmişi, çevre basıncı, zemin yapısı v.b), yer altı suyu gibi birçok faktörün davranışa etki ediyor olmasıdır. Tekrarlı yükleme tipi deprem gibi yüksek genlik ve kısa süreli ya da dalga, trafik yükü ya da makine temel titreşimi gibi kısa genlik ve uzun süreli olabilir. Zemin davranışı

ve zemin-yapı etkileşimi analizlerinde adı geçen faktörlerin etkisi büyük önem taşımaktadır.

Zeminlerin, tekrarlı yükler altında gerilme-birim şekil değiştirme parametreleri maksimum kayma modülü G_{maks} , ($\gamma \leq \%5 \times 10^{-4}$), maksimum (başlangıç) kayma modülü, sekant modülü, G ve sönüm oranı, H değerleridir. G_{maks} değeri laboratuvar ve arazide elastik dalga yayılımıyla ilgili deneylerden hesaplanabilmektedir. Diğer modül değerleri, sekant kayma modülü ve sönümlenen enerji miktarını gösteren sönüm oranı tekrarlı yükleme sonucu elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinden hesaplanmaktadır.

Zeminlerde gerilme şekil değiştirme ilişkisi incelenirken özellikle kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı zemin ortamlarında simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan zeminlerin davranışları genellikle kayma modülü ve sönüm oranı özellikleri ile belirlenir. Bu tür zemin durumlarında kayma modülü ve sönüm oranı kullanıldığı lineer analizler zeminde oluşacak şekil değiştirmeler ile daha uyumlu olmaktadır.

Geçmişte yapılan çalışmalarda zeminlerde kayma modülüne ekti eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu buna karşın sönüm oranının ise dane boyutu, doygunluk derecesi, boşluk oranı, içsel sürtünme açısı ve çevrim sayısı değerlerinden daha az miktarda etkilendiği, daha çok zeminin maruz kaldığı şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmiştir. İnce daneli zeminler üzerinde yapılan gerilme ve deformasyon kontrollü deneylerde, geniş bir aralıktaki tekrarlı birim kayma genliklerinde ince daneli zeminlerin davranışı incelenmiştir (Andersen et al., 1980; Ansal and Erken, (1982,1989); Azzouz et al., 1989, Vucetic et al., 1998; Tan and Vucetic 1989). Bu çalışmalardan, ince daneli zeminlerde oluşan boşluk suyu basınçlarının, tekrarlı birim kayma gerilmesi τ_c , ya da tekrarlı birim kayma şekil değiştirme γ_a , çevrim sayısı N , gerilme geçmişi ve lineer olmayan elastik eşik değeri γ_e 'ye bağlı olduğu görülmektedir.

Yapılan bu çalışma kapsamında yürütülen deneyler ile siltli kum karışımlarının gerilme şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyan özellikler ve bunları etkileyen faktörler incelenmeye çalışılmıştır. Bu kısımda silt kum karışımlarında dinamik kayma modülü ve sönüm oranındaki değişim artan gerilme genliklerinde *JGS 0542-2000 (Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials)* standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Silt

kum karışımlarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranındaki değişimin silt içeriği, çevrim sayısı, çevre gerilmesi ve boşluk oranı gibi faktörlerden ne ölçüde etkilendiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca toplam ve kalıcı şekil değiştirmeler arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

5.1 Siltli Kumlarda Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Zeminlerin gerilme şekil değiştirme özelliklerinin laboratuvar koşullarında belirlenmesi amacıyla geliştirilen deney aletlerinin zeminlerin dinamik davranışını temsil eden birçok parametreyi tespit edebilmektedir. Dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme ve dinamik basit kesme aletleri ile 10^{-4} ~ 10^{-6} seviyelerinde birim kayma deformasyonları belirlenebilmektedir. Rezonant kolon deneyi ile daha küçük birim kayma deformasyonları elde edilebilmektedir. Son yıllarda hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde bu deney aletleri ile literatürde (Okur et al., 2007;2009),(Ansal et al., 2001), (Lo et al., 1997), (Lanzo et al., 1997) yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca Tablo 5.1’de zeminlerin deformasyon seviyeleri için gelişen zemin davranışları gösterilmiştir.

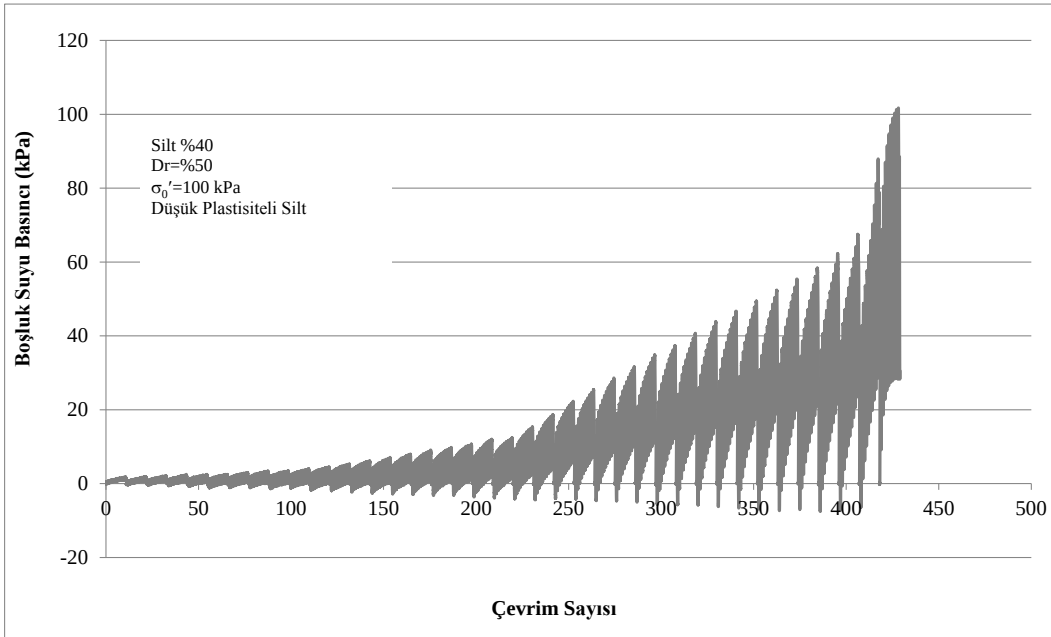
Tablo 5.1:Deformasyon özellikleri için Zemin Davranışı

Birim Şekil Değiştirme	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Küçük şekil değiştirme		Orta şekil değiştirme		Büyük şekil değiştirme	Göçme
Elastik						
Elasto plastik						
Göçme						

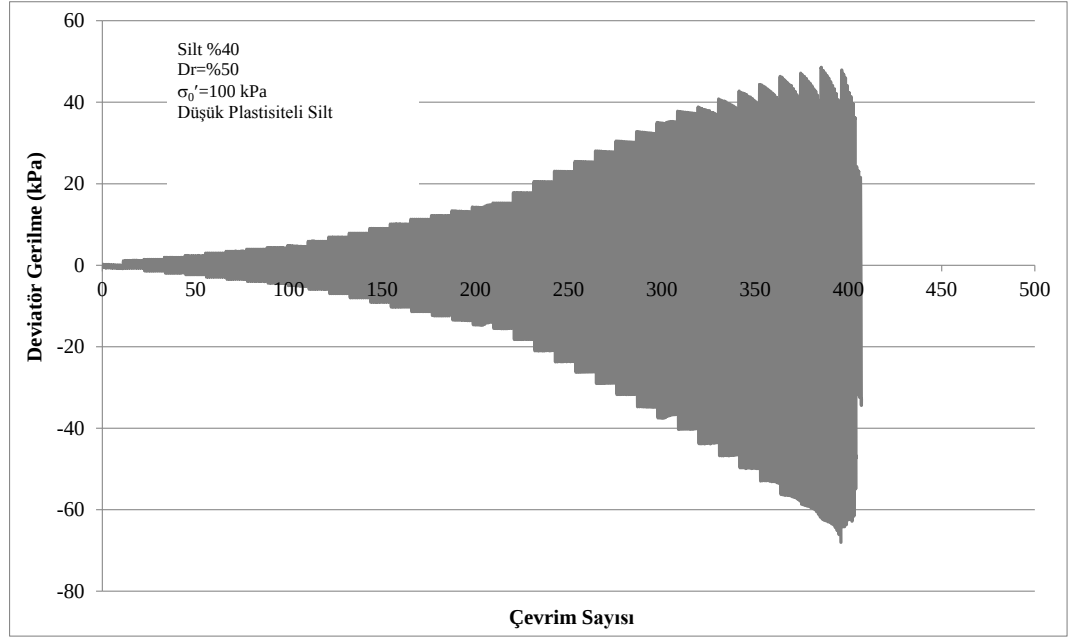
Siltli kum zeminlerde küçük deformasyon seviyelerindeki gerilme şekil değiştirme ilişkisini incelemek amacıyla *JGS 0542-2000 (Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials)* standardına uygun olarak her 11 çevrimde bir artan genliklerde deney durdurulmuştur. Daha sonra zemin alt ve üst başlık vanaları açılarak boşluk suyu basıncının sönümlenmesi sağlanmıştır. Bir sonraki yükleme kademesi için arttırılan genlikler ile numunelere tekrarlı yüklemeler uygulanarak dinamik zemin özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deneylerde gerilme genlikleri oldukça küçük değerlerden başlanarak her on bir çevrimde bir arttırılmış ve deformasyonların

elastik sınırlar içinde kalması gözetilerek belirli bir çevrim sayısına kadar deneyler sürdürülmüştür. Bu aşamada küçük deformasyon seviyelerindeki gerilme ve şekil değiştirme genliklerini hassas bir şekilde ölçüp kaydedebilmek için deney aletinde ve veri edinim ünitesinde gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Küçük şekil değiştirme için gereken deformasyon seviyesine ulaşıldıktan sonra daha büyük gerilme ve deformasyon seviyelerine uygun artan gerilmelerle kalıcı şekil değiştirmelerin olduğu deformasyon seviyelerindeki ikinci aşama deney kısmı yapılmıştır. Böylece iki aşamalı deney süreci tamamlanmış ve sonuçta bu iki aşama birleştirilerek kayma modülünün ve sönüm oranının birim şekil değiştirme genliğine bağlı olan değişim eğrileri elde edilmiştir.

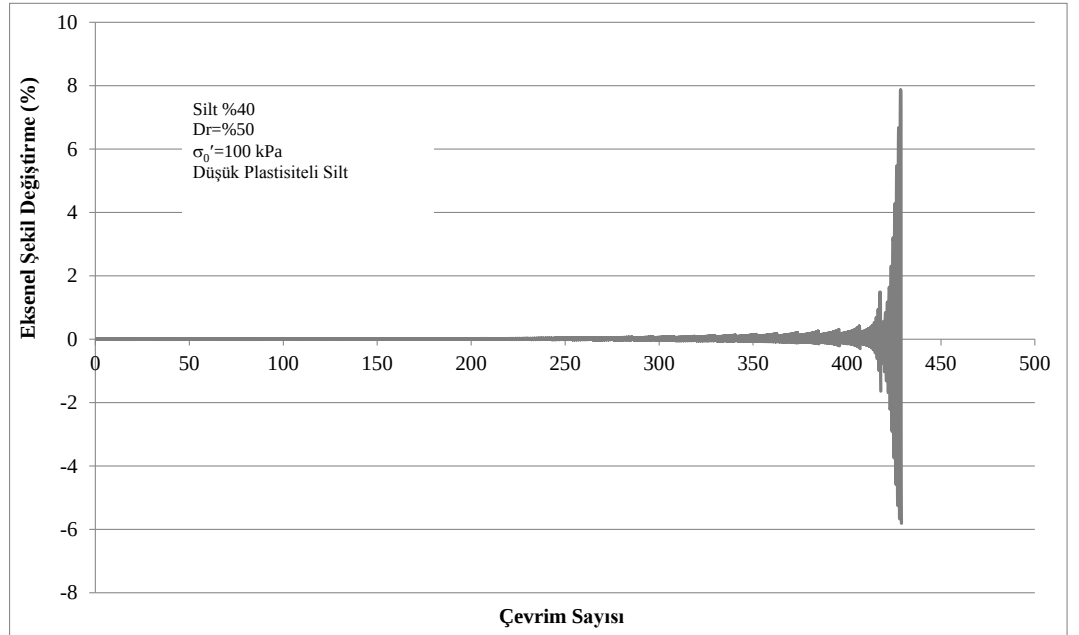
Siltli kum zeminlerde dinamik üç eksenli deney aleti ile yürütülen artan gerilme genlikli deneylere ait tipik kayıtlar Şekil 5.1’de görülmektedir. Bu şekilde ilave boşluk suyu basıncının, deviator gerilmenin ve eksenel deformasyon değerlerinin çevrim sayısına bağlı olarak değişimi verilebilmektedir.



Şekil 5.1.a Artan gerilme genlikleri durumunda boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı ile değişimini gösteren tipik deney kayıtları



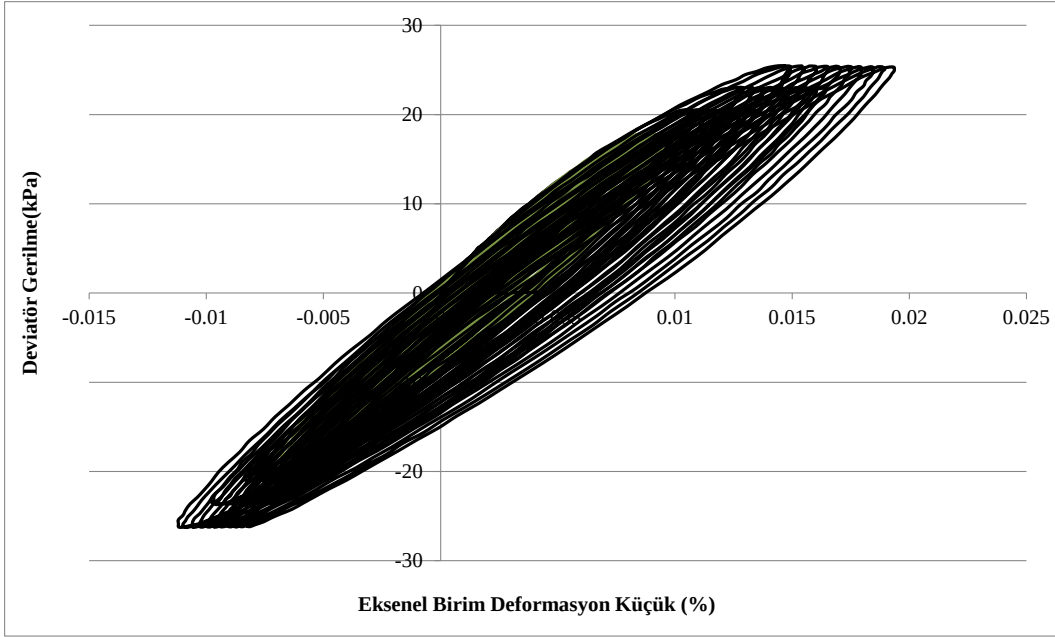
Şekil 5.1.b Artan gerilme genlikleri durumunda deviatör gerilme-çevrim sayısı ile değişimini gösteren tipik deney kayıtları



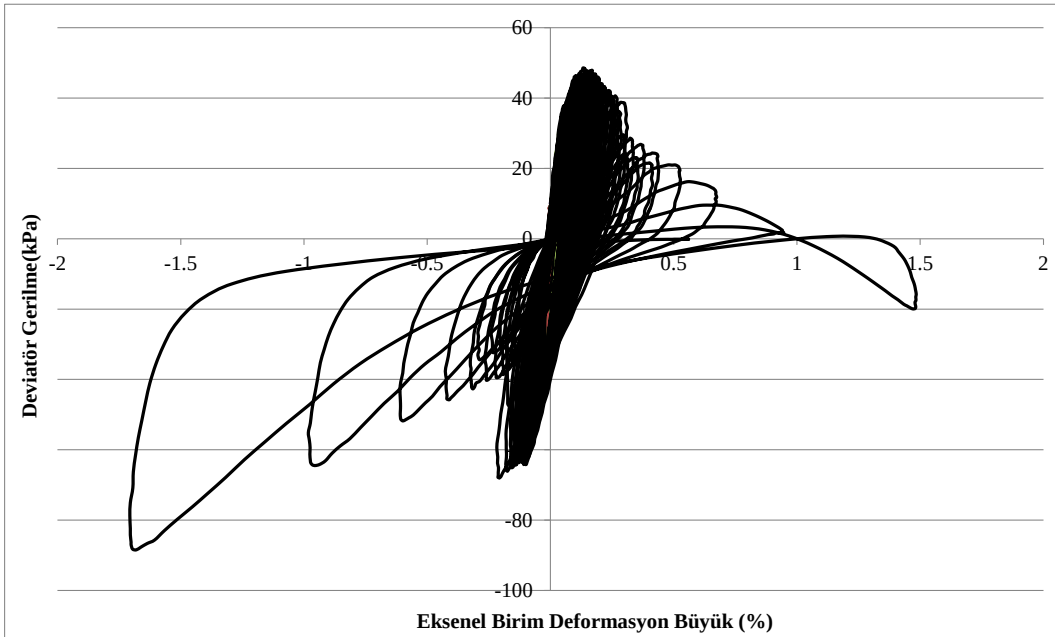
Şekil 5.1c Artan gerilme genlikleri durumunda eksenel deformasyon değerlerinin çevrim sayısı ile değişimini gösteren tipik deney kayıtları

Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan zeminlerde her on bir çevrimden sonra alt ve üst başlıkların drenaj vanaları açıldığı için boşluk suyu basıncı sönümlenmektedir. Bir sonraki yüklemde yeniden sıfır değerinden başlayarak artış göstermektedir. Başlangıçta elde edilen eksenel deformasyonların çok küçük seviyelerde olması zeminin elastik sınırlar

içerisinde kaldığını da göstermektedir. Belirli bir yükleme kademesinden sonra ise boşluk suyu basıncının ve uygulanan yükleme seviyesinin artması ile ilk olarak elasto plastik bölgeye daha sonra ise göçme bölgesine ulaşmasını sağlamaktadır. Böylece göçme bölgesinde çok büyük deformasyonlar elde edilmektedir.



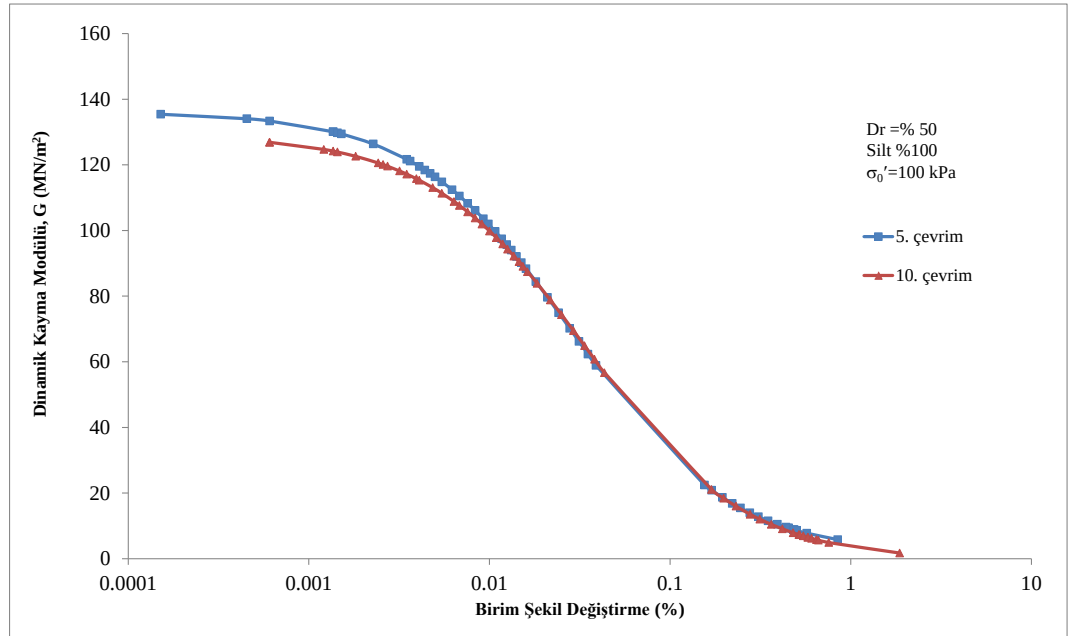
Şekil 5.2.a. Artan gerilme genliklerinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini gösteren küçük eksenel birim deformasyon değerleri için deney kayıtları



Şekil 5.2.b. Artan gerilme genliklerinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini gösteren büyük eksenel birim deformasyon değerleri için deney kayıtları

Şekil 5.2’de gerilme-şekil değiştirme ilişkisini niteleyen deviatör gerilme-eksenel birim deformasyon grafiklerinin, küçük ve büyük deformasyon değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.2 a’da eksenel birim deformasyon değerleri % 0.01’den küçük değerler için çizilmiştir. Burada uygulanan deviatör gerilme ± 40 kPa civarındadır. Bu durumda zemin elastik bölgede yer almaktadır. Artan yükleme kademeleri ile birlikte uygulanan deviatör gerilme değeri artmakta ve zeminde çok daha büyük (kalıcı) deformasyonlar meydana gelmektedir. Böylece zemin plastik bölgede yer almaktadır (Şekil 5.2.b).

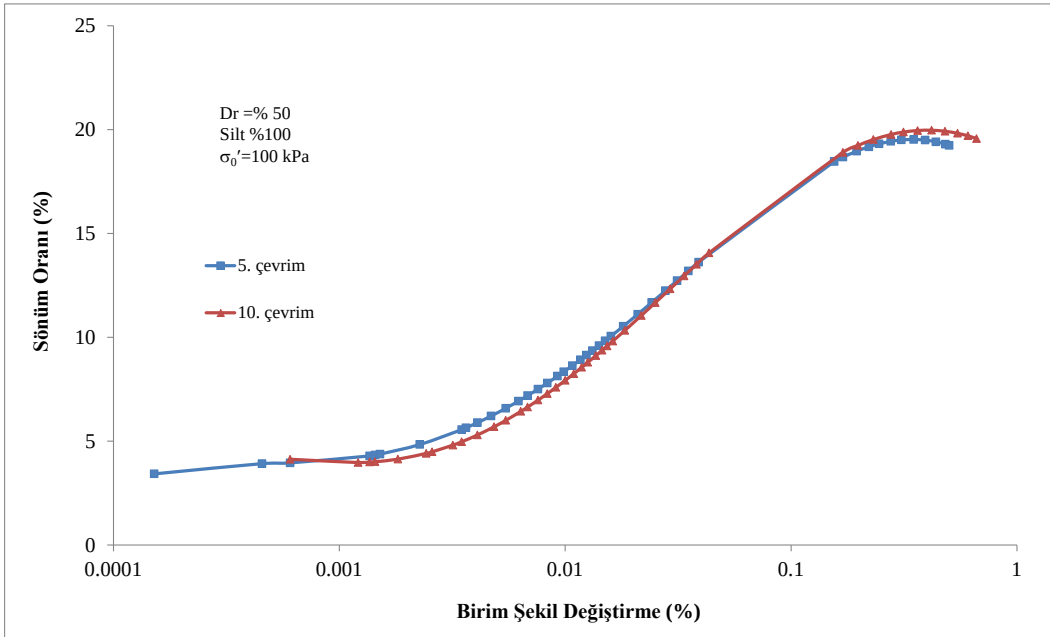
Bu deviatör gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisine bağlı olarak siltli kum zemine JGS0542-2000 standardında belirtildiği gibi beşinci ve onuncu çevrimlerdeki kayma modülü ve sönüm oranının değişimi sırası ile Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görülmektedir.



Şekil 5.3 Siltli kum zemine ait dinamik kayma modülünün birim şekil değiştirme genliğine bağlı değişimi

JGS0542-2000 standardında belirtilen dinamik kayma modülü ve birim şekil değiştirme grafiğinde saf silt kullanılarak yapılan % 50 rölatif sıkılık ve 100 kPa çevre basıncı altında elde edilen grafiğe göre beşinci çevrimde elde edilen başlangıç dinamik kayma modülü değerinin daha büyük olduğu ve buna karşı gelen birim şekil değiştirme değerinin çok daha küçük olduğu görülmektedir. Beşinci çevrimde elde edilen başlangıç dinamik kayma modülü değerinin yaklaşık

138 MPa olduğu buna karşı elde edilen birim şekil değiştirme genliğinin ise $1 \cdot 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Aynı deneyde ve aynı koşullarda onuncu çevrimde elde edilen başlangıç dinamik kayma modülünün 128 MPa olduğu ve bu değere karşılık elde edilen birim şekil değiştirmenin $2 \cdot 10^{-3}$ olduğu görülmektedir. Bu durumda Şekil 5.3’de açık bir şekilde görüldüğü gibi zeminlerde çevrim sayısının da dinamik kayma modülü- birim şekil değiştirmede önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır.



Şekil 5.4 Siltli kum zemine ait sönüm oranı değerlerinin birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak değişimi

Zeminlerin gerilme şekil değiştirme özellikleri incelenirken elde edilen ikinci parametre ise sönüm oranı olmaktadır. Şekil 5.4’de saf silt ile %50 rölatif sıkılık ve 100 kPa çevre basıncı altında yapılan deney için beşinci ve onuncu çevrimdeki sönüm oranı ile birim şekil değiştirme (%) ilişkisi gösterilmiştir. Her iki çevrim sayısı için de sönüm oranında yaklaşık %20 civarında olduğu ve bu durumda elde edilen birim şekil değiştirmenin ise %1 civarında olduğu saptanmıştır.

Burada kayma modülü G ,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5.1)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Bu ifadedeki E değeri (3.9) denkleminde elde edilen eşdeğer young modülü, ν ise poisson oranıdır. Bir başka deyişle Şekil 2.1’de görülen tek çevrimlik histerisis ilmiğinin iki ucunu birleştiren doğrunun eğimi dinamik kayma modülünü vermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta kayma modülünün ortalama kayma gerilmesi olmasıdır. Şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olmasından dolayı her bir yükleme çevrimi için hesaplanması gerekir.

Dinamik kayma modülünün en büyük değeri çok küçük birim şekil değiştirme genliklerinde gerçekleşir. Bu değere maksimum kayma modülü, G_{maks} denilmektedir. Bu değer genellikle 10^{-5} deformasyon seviyesinden daha küçük şekil değiştirme genliklerine karşı gelmektedir. Zeminlerde dinamik kayma modülü ile ilgili eğriler oluşturulurken genellikle elde edilen kayma modülü değerleri G_{maks} değeri ile normalize edilir. Bu sayede kayma modülü için elde edilen azalım eğrileri kimi zemin ve deney parametrelerinin etkilerinden kurtarır.

Sönüm oranını belirlemek için kullanılan ifade (%);

$$D = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (5.2)$$

Burada ΔW Şekil 2.1’de kapalı histerisis ilmiğinin alanı, W ise yine şekildeki taralı üçgenin alanıdır. Sönüm oranı da her bir çevrim için hesaplanması gereken bir dinamik zemin parametresidir.

Böylece her bir çevrimde bir hesaplanan bu değerlerin artan genlikli gerilme durumu için beşinci ve onuncu çevrime ait değerleri dikkate alınarak kayma modülünün ve sönüm oranının birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak değişim eğrileri çizilebilmektedir (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4).

5.1.1 Siltli Kumlarda Dinamik Kayma Modülünün Belirlenmesi

Dinamik gerilme şekil değiştirme özelliklerinin en önemlilerinden birisi hiç şüphesiz başlangıç dinamik kayma modülü, G_{maks} değeridir. Maksimum kayma modülü gerek deneysel yöntemlerle gerekse zeminlerde geliştirilen modellere uygun olarak ortaya konan ampirik formüllerle belirlenmeye çalışılır.

Dinamik kayma modülünün saptanması için biri (Hardin et al., 1963) ve bir diğeri (Hardin 1978) tarafından önerilen bağıntılar kullanılmaktadır. (Hardin et al., 1963b) köşeli ve dairesel Ottawa kumları ile küçük deformasyon seviyelerinde

kayma modülünü elde etmek için bir seri rezonant kolon deneyleri yapmıştır. Birim şekil değiştirmenin 10^{-4} ve daha küçük değerleri için

$$G_{maks} = C_g * P_a^{1-ng} * \frac{(e_g - e)^2}{(1+e)} * \sigma_m^{mg} \quad (5.3)$$

Bu ifade ile dinamik kayma modülünü C_g , e_g ve ng zemine bağlı regresyon sabitleri olarak bulmuştur. Burada e boşluk oranı, P_a atmosfer basıncını göstermektedir.

(Roesler 1979) kayma dalgası hızı ölçümleri ile korelasyonu geliştirmiştir.

$$G_{maks} = C * P_A^{(1-n-m)} * \sigma_a^n * \sigma_p^m \quad (5.4)$$

Burada σ_a dalga yayılımı yönünde etki eden efektif gerilme, σ_p dalga yayılımına dik yöndeki efektif gerilmedir. C , m ve n regresyon sabitleridir.

(Jamiołkowski et al., 1991)'de, (Hardin 1978) denkleminde farklı olarak maksimum kayma modülü için boşluk oranına bağlı farklı bir fonksiyon önermiştir. Burada ag regresyon sabitidir.

$$G_{maks} = C_g * P_a^{(1-ng)} * e^{ag} * \sigma_m^{mg} \quad (5.5)$$

(Hardin 1978) ve (Hardin et al., 1963) önerdiği denklemler kullanılarak birçok araştırmacı tarafından regresyon analizleri geliştirilmiştir (Iwasaki et al., 1977), (Yu 1984).

G_{maks} hesaplamak için gereken regresyon analizi değerleri farklı kum zeminler için Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Bazı zeminler için regresyon analizi değerleri

Zemin Türü	e_{min}	e_{maks}	ϕ	C_g	e_g	n_g	c_u
Monterey #0 kumu _{a,b}	0.57	0.89	37	326	2.97	0.50	1.6
Ticino kumu _{d,e}	0.57	0.93	34.8	647	2.27	0.43	1.50
Toyoura kumu _{d,e}	0.61	0.99	35.1	900	2.17	0.40	1.27
Ottawa kumu (yuvarlak) _c	0.48	0.78	29.0	612	2.17	0.44	1.48
Sacramento nehir kumu _a	0.61	1.03	33.3	NA	NA	NA	1.47
Hokksund kumu _{d,e}	0.55	0.87	36.0	942	1.96	0.46	1.91

(Iwasaki et al., 1977) kayma modülünün etkisini temiz kumlarda, ince dane içeren doğal kumlarda ve ince dane içeren yapay kumlarda incelemiştir. Kayma modülü,

$$G_{maks} = C(\gamma) * B * \frac{(2.17-e)^2}{1+e} P_A^{1-m(\gamma)} \sigma_m^{m(\gamma)} \quad (5.6)$$

Burada $C(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ şekil değiştirmeye bağlı regresyon analizi değerleridir. B ise birim şekil değiştirme (γ), boşluk oranı (e), ve çevre gerilmesinden bağımsız regresyon analizi ile elde edilen parametrelerdir. (Iwasaki et al., 1977)'de maksimum kayma modülünün ince dane içeriği arttıkça azaldığını göstermiştir. (Randolph et al., 1994) siltli kumlarda küçük deformasyon seviyelerinde önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Küçük deformasyon seviyelerinde siltli kumlarda % 5 - 10, % 10 - 15 ve % 15 - 20 silt içeriğinde temiz kumlara göre maksimum kayma modülünün sırasıyla % 50, % 25 ve % 19 azaldığını göstermiştir.

5.1.2 Şekil Değiştirmeye Bağlı Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Tekrarlı yüklemeler altında bulunan zeminlerde uygulanan kayma gerilmesi ve oluşan şekil değiştirmeler yeterince küçük ise zemin davranışı çevrim sayısının artışı ile birlikte değişmeyecek ve kayma modülü ve sönüm oranı değerleri tekrarlı gerilmelerin uygulanması süresince değişmeyecektir. Bununla birlikte şekil değiştirme miktarında oluşan belirgin artış zeminin gerilme şekil değiştirme ilişkisi içerisinde non lineer histerisis ilmiklerinin oluşmasına yol açacaktır. Esasen zeminlerin dinamik yüklemeler karşısında belirli deformasyon aralıklarında şekil değiştirme özellikleri non lineer olup bu durum özellikle “*Masing Kuralı*” olarak bilinen ve yükleme boşaltma bölümündeki histerisis ilmiğinin iskelet eğrisinin oluşumunu niteleyen analiz çerçevesinde kayma modülü ve sönüm oranlarının gerilme genliği ve çevrim sayılarına göre değişiminde açık bir şekilde görülebilmektedir.

Zeminlerin bilinen bu davranış özelliği kayma modülü ve sönüm oranının değişim eğrilerinin teorik olarak tahmininde de yol gösterici olmaktadır. Bu değişimlerin teorik olarak ortaya konulabilmesi için çeşitli modeller ve ampirik formüller geliştirilmiştir. İkinci bölümde de incelendiği gibi bu şekil değiştirme seviyesinde zeminlerde non lineer gerilme şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyan modellerden birisi “Hiperbolik model” dir. Zeminlerin gerilme şekil değiştirme

ilişkisini başlangıç kayma modülü ve bu seviyede oluşan şekil değiştirme seviyesi ile daha büyük şekil değiştirme seviyesi arasındaki ilişki ile tanımlayan model kayma modülünün ve sönüm oranının değişim eğrilerinin tahmininde kullanılabilmektedir.

Çalışma kapsamında artan gerilme genlikleri uygulanarak siltli kum zeminlerde gerçekleştirilen dinamik deneyler sonucunda dinamik kayma modülü değerleri ve azalım eğrileri farklı başlangıç ve zemin koşulları altında elde edilmiştir.

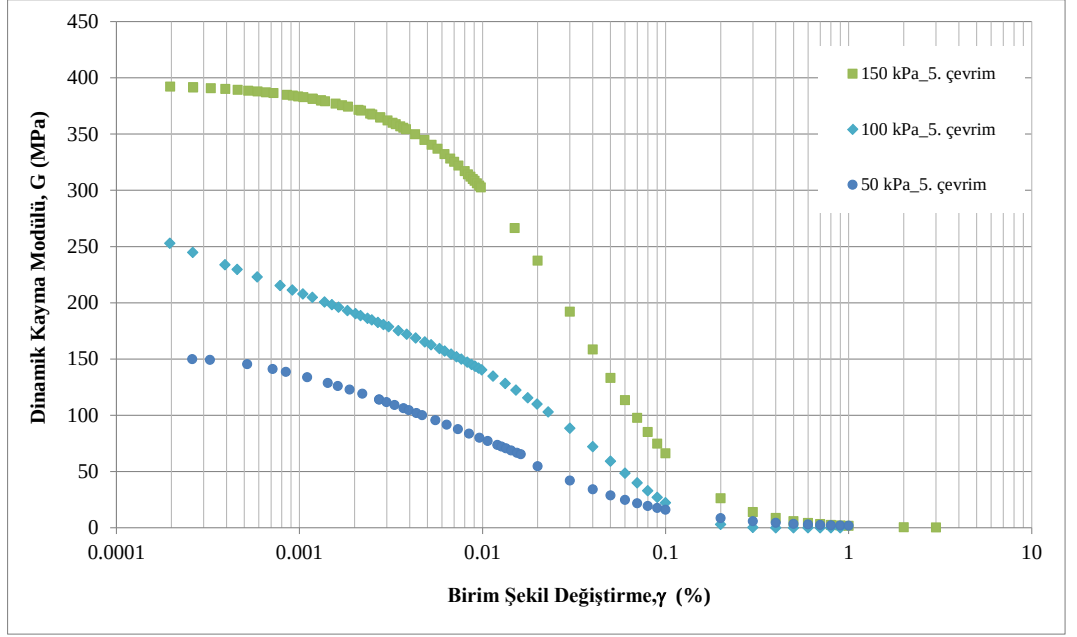
5.2 Siltli Kumlarda Gerilme Şekil Değiştirme Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Dinamik gerilme şekil değiştirme özellikleri denildiğinde akla ilk gelen başlangıçtaki dinamik kayma modülü, G_{maks} değeridir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde çevre basıncı, silt içeriği ve boşluk oranı değerlerinde oluşturulan değişikliklerin G_{maks} üzerinde yaptığı etkilerin ne boyutta olduğu incelenmeye çalışılmıştır. Ayrıca gerek bu farklılıkların ve gerekse çevrim sayısındaki değişikliklerin dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrileri üzerinde yaptığı etkiler de ortaya konmaya çalışılmıştır.

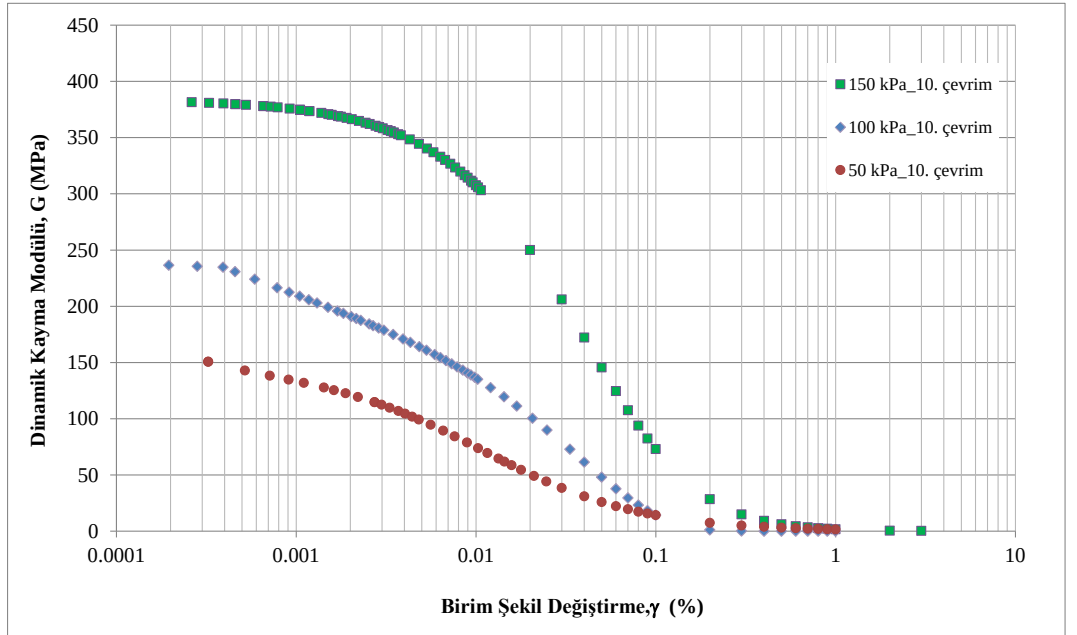
5.2.1 Çevre Basıncının Etkisi

Efektif çevre gerilmesi zeminlerin gerek monotonik gerekse dinamik davranış özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Zeminlerin tekrarlı yükler altında gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin başlangıç konsolidasyon koşullarından ne şekilde etkilendiği geçmişte birçok deneysel çalışmanın konusu olmuştur.

Bu çalışma kapsamında izotropik koşullarda ve artan gerilme genlikleri uygulanarak yürütülen deneyler ile suya doymun siltli kum zemine ait kayma modülü ve sönüm oranının birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak değişimi farklı çevre gerilmesi için elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da siltli kum için kayma modülünün birim şekil değiştirme genliğine göre değişimi farklı çevre gerilmelerine bağlı beşinci ve onuncu çevrimleri için gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Farklı çevre gerilmeleri altında oluşan siltli kumlar için beşinci çevrimde oluşan dinamik kayma modülü azalım eğrileri

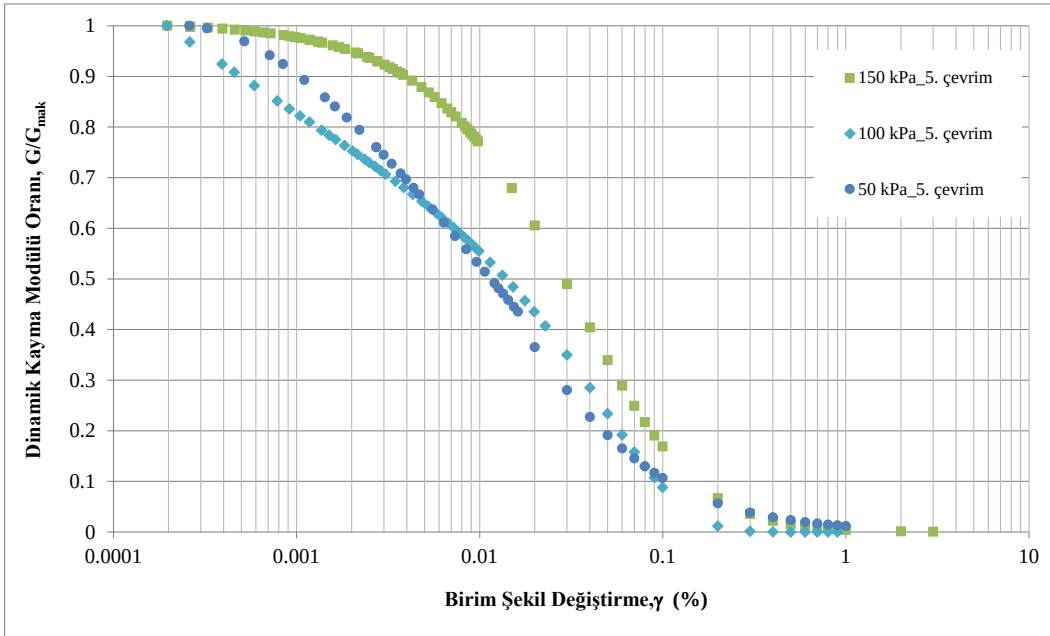


Şekil 5.6 Farklı çevre gerilmeleri altında oluşan siltli kumlar için onuncu çevrimde oluşan dinamik kayma modülü azalım eğrileri

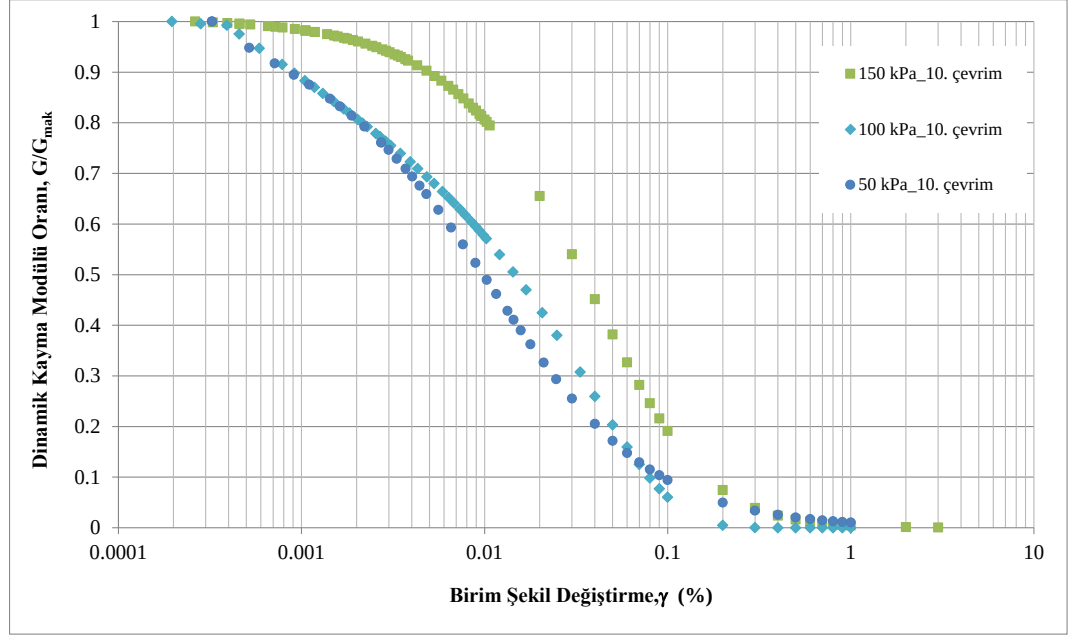
Bu şekilde çevre gerilmesinin siltli kumların dinamik kayma modülü azalım eğrisine olan etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir. Burada çevre basıncındaki artışla beraber siltli kumların başlangıçtaki dinamik kayma modülü değerlerinde bir artışın olduğu anlaşılmaktadır. Bu etkinin siltli kumların dinamik kayma modülü değerlerinde birim şekil değiştirmeye bağlı olarak gelişen azalım

eğrilerine başlangıçta oluşturulan konsolidasyon basıncının etkisi de olduğu bilinmektedir. Saptanan bu sonuca benzer olarak G_{maks} ile normalize edilmiş eksen takımında da çevre gerilmesinin etkisi beşinci ve onuncu çevrimler için açık bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8).

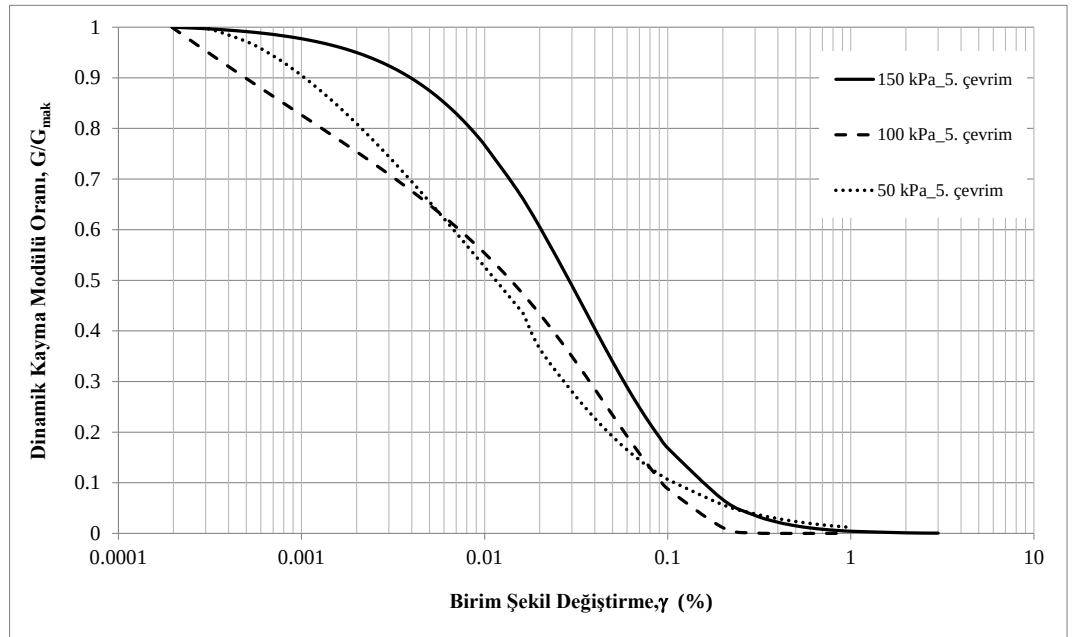
Artan şekil değiştirmeyeyle beraber dinamik kayma modülü oranındaki azalış çevre basıncı düşük olduğu durumlarda daha büyük olmaktadır. Bir başka deyişle çevre basıncındaki artışla beraber dinamik kayma modülü azalış eğrisinin sağa doğru kaymakta olduğu beşinci ve onuncu çevrimler kullanılarak Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da ki eğrilerle görülmektedir.



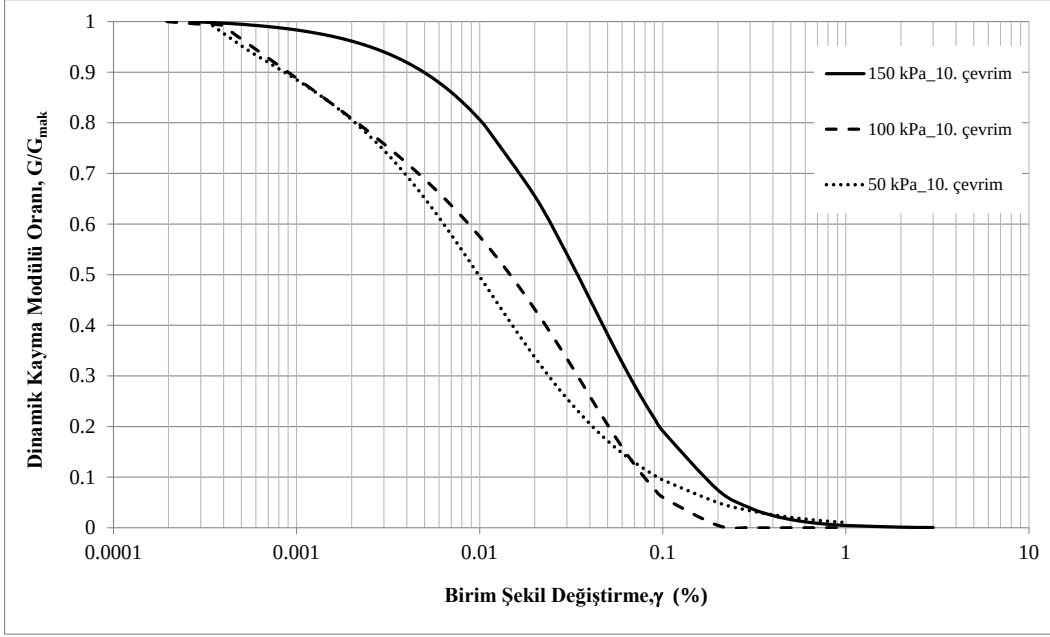
Şekil 5.7 Farklı çevre gerilmelerinde elde edilen beşinci çevrim için dinamik kayma modülü azalış eğrileri



Şekil 5.8 Farklı çevre gerilmelerinde elde edilen onuncu çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri

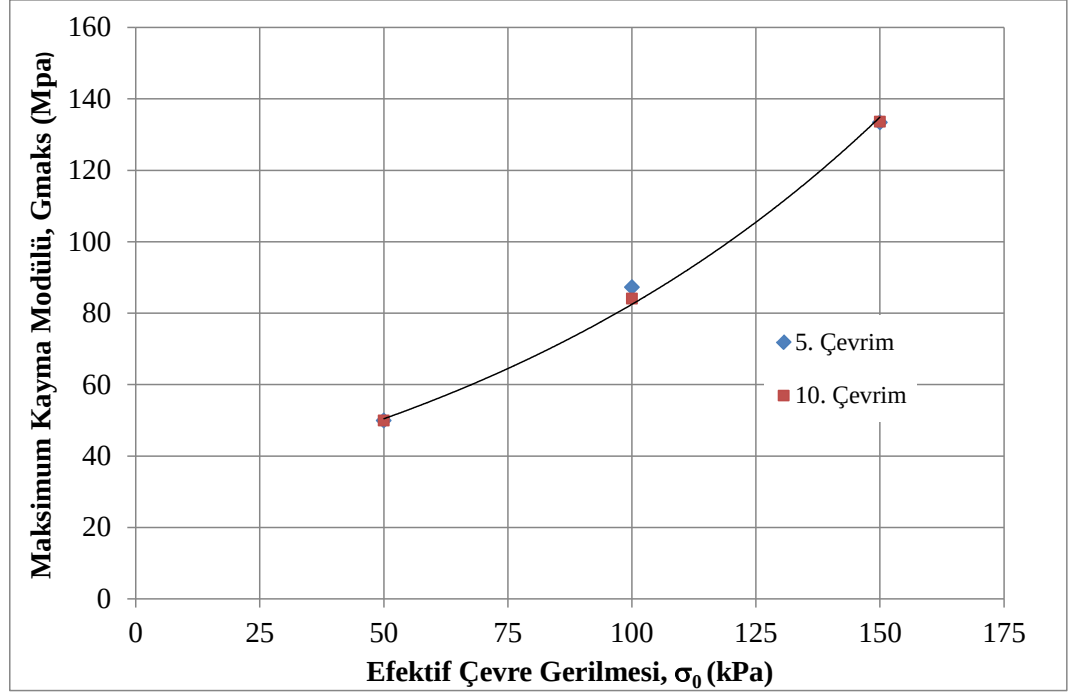


Şekil 5.9 Kayma modülü oranı için farklı çevre gerilmelerinde elde edilen beşinci çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri



Şekil 5.10 Kayma modülü oranı için farklı çevre gerilmelerinde elde edilen onuncu çevrim için dinamik kayma modülü azalım eğrileri

Aynı etki Şekil 5.11'deki maksimum kayma modülü-uygulanan çevre gerilmesi ilişkisinde de görülebilir. Bu şekilde de siltli kum zeminlerde başlangıçta oluşturulan konsolidasyon basınçlarına bağlı olarak farklı rölatif sıkılıklarda ve drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneylerle belirlenen maksimum kayma modülü değerlerindeki değişim görülebilmektedir. Aynı zamanda çevre gerilmesi ve saptanan maksimum kayma modülü arasında fonksiyonel bir ilişkinin olduğu şekilden görülebilmektedir.



Şekil 5.11 Çevre basıncı başlangıç kayma modülü ilişkisi

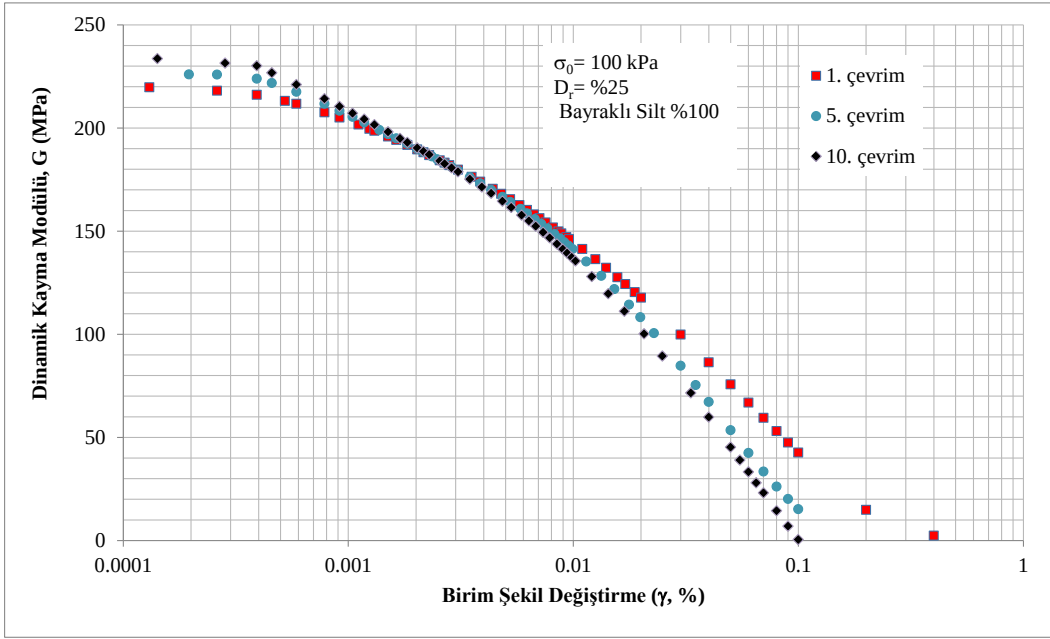
5.2.2 Çevrim Sayısının Etkisi

Tekrarlı yükler altındaki zeminlerin ortaya koydukları davranış şekillerinin gelişiminde büyük deformasyon seviyelerinde olduğu kadar küçük deformasyon seviyelerinde de tekrarlı gerilmenin uygulanan çevrim sayısı miktarının etkisi fazladır.

Siltli kum zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerini belirlemek ve bu özelliklere etki eden faktörleri saptayabilmek amacıyla her onbir çevrimde bir arttırılan tekrarlı gerilme genlikleri altında dinamik üç eksenli deney aleti ile deneyler gerçekleştirilmiştir. JGS 0542-2000 standardına uygun olarak tekrarlı gerilmeler arttırılırken her on bir çevrimden sonra drenaj vanaları açılarak numunenin konsolide edilmesi sağlanmıştır. Böylece her bir yükleme adımında yeni bir numune boyu ve yüksekliği elde edilmiştir.

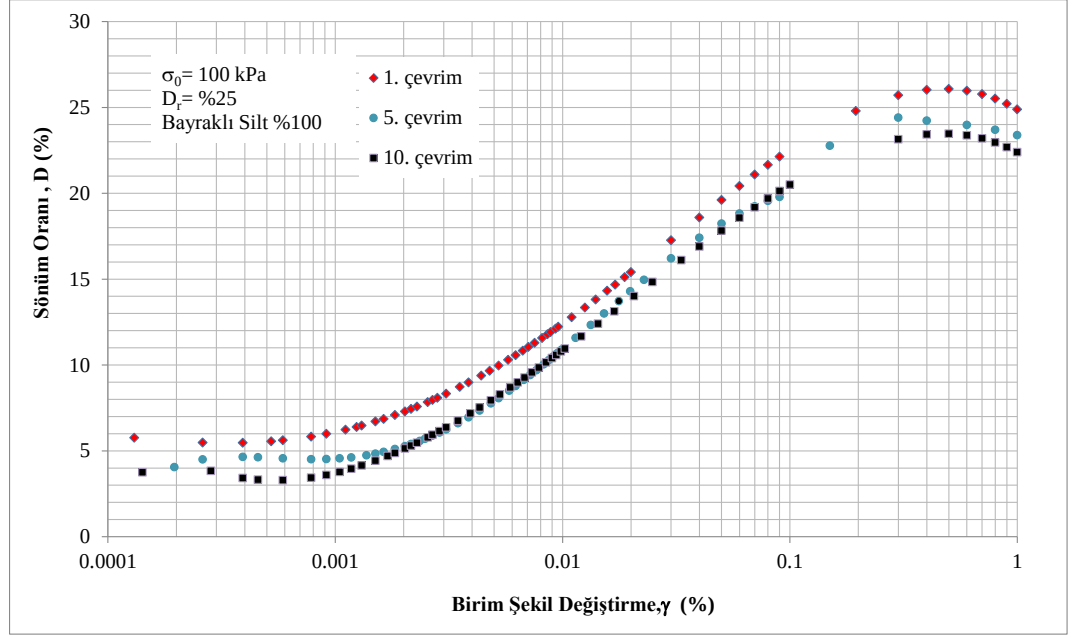
Zeminlerin gerilme şekil değiştirme özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden birisi de çevrim sayısıdır. Uygulanan tekrarlı yüklemeler altında çevrim sayısının ilerleyişi ile beraber zemine ait dinamik parametrelerde değişiklikler meydana gelmektedir. Bu amaçla on birer çevrimlik periyotlarda uygulanan gerilme artışları ile siltli kumlarda kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrileri bütün çevrim değerleri için elde edilmiştir.

Çevrim sayısının dinamik kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla bir örnek olarak yürütülen deneylerden birisine ait on birer çevrimlik periyotlardan birinci, beşinci ve onuncu çevrimlerine ait kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ayrı ayrı belirlenerek Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'deki eğrilerle gösterilmiştir. Bu şekillerden birinci, beşinci ve onuncu çevrim sayılarında kayma modülü ve sönüm oranlarının değişimi görülmektedir. Özellikle her iki parametrenin daha büyük değişim içinde olduğu süreçlerde çevrim sayısının etkisi daha belirgindir.



Şekil 5.12 Artan çevrim sayısının kayma modülüne etkisi

Çevrim sayısındaki artış kayma modülü değerlerinde doğru orantılı bir değişim etkisi oluştururken sönüm oranı değerlerinde bir azalmaya yol açmaktadır. Bir başka deyişle aynı gerilme genliğinin uygulanması durumunda artan çevrim sayıları ile beraber kayma modülü ve sönüm oranına ait değişim eğrileri sağa doğru kaymaktadır. On bir çevrimlik döngülerde elde edilen bu değerlerin çevrim sayısına bağlı olduğu gösterilmiştir.



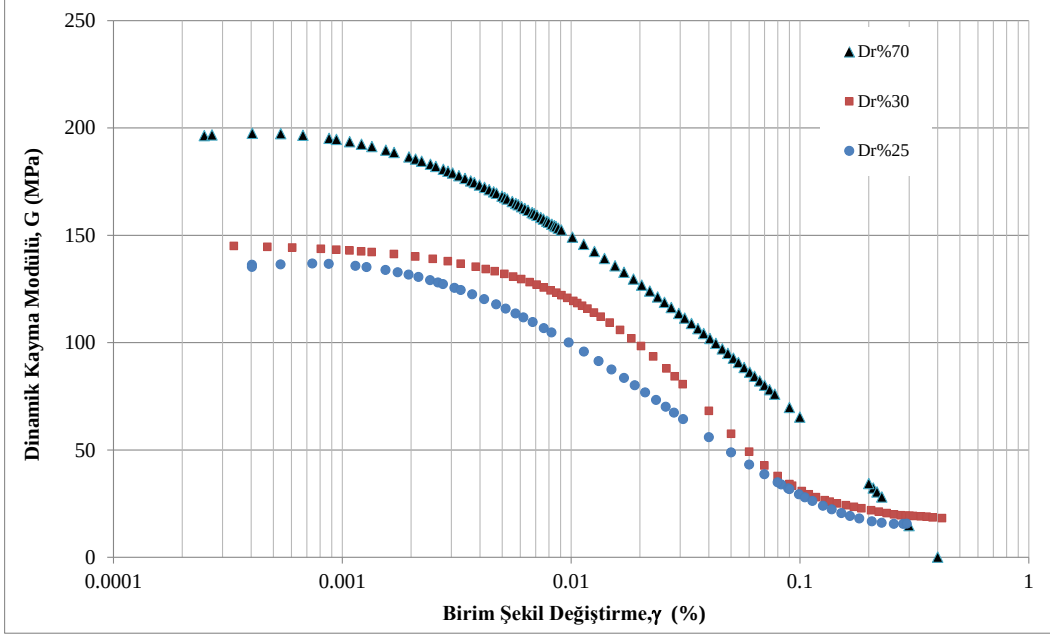
Şekil 5.13 Artan çevrim sayısının sönüm oranına etkisi

Çevrim sayısının özellikle yaklaşık 10^{-3} şekil değiştirme seviyelerinde birinci ve beşinci çevrimlerde oluşan dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri arasında yaklaşık $\%10$ - $\%15$ civarında bir farkın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte çevrim sayısının pratik olarak dinamik kayma modülü ve sönüm oranı üzerinde yaptığı etkilerin sınırlı değerde olduğu ve özellikle küçük şekil değiştirme seviyelerinde ihmal edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

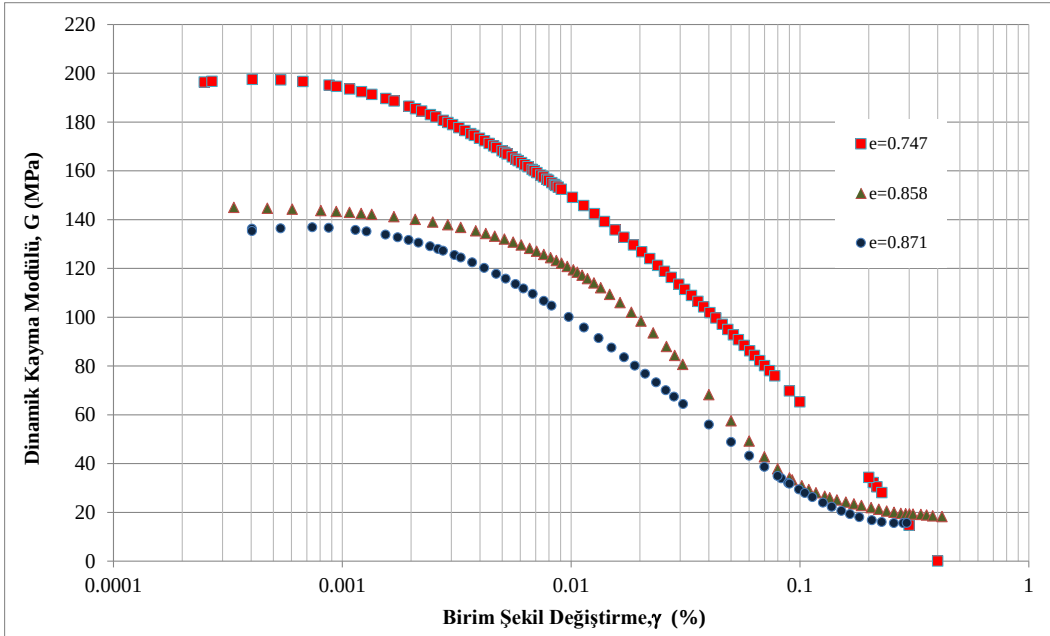
5.2.3 Rölatif Sıkılığın Etkisi

Değişik rölatif sıkılıktaki siltli kum numuneleri ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen G - γ ilişkisine ait azalım eğrileri Şekil 5.14'de gösterilmektedir. Bu şekilden farklı rölatif sıkılık değerlerinin dinamik kayma modülü üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Özellikle başlangıç kayma modülü değerlerindeki değişiklik dikkat çekicidir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda siltli kum zemine ait boşluk oranı değerinin zeminin dinamik parametreleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Boşluk oranının kayma modülü üzerindeki etkisini G - γ ilişkisinden yine Şekil 5.15'deki yaklaşımla da ele almak mümkündür. Burada değişik boşluk oranlarına sahip zeminlerin belirli bir çevre gerilmesi altında farklı birim kayma şekil değiştirme seviyelerinde maksimum kayma modülü değerlerindeki değişim gösterilmektedir. Yapılan bu deneyler sonucunda siltli kum zemine ait maksimum kayma modülü

değerleri numuneye uygulanan çevre gerilmesi azaldıkça artmakta, numunenin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı değeri arttıkça azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.14 Farklı rölatif sıklık değerleri için elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri

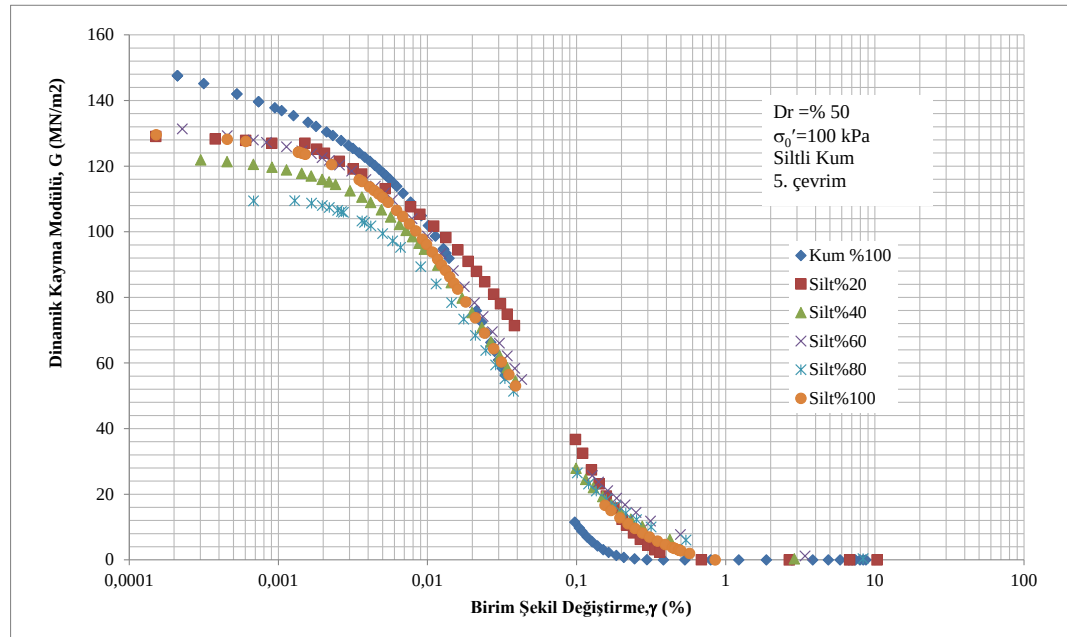


Şekil 5.15 Farklı boşluk oranları için elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri

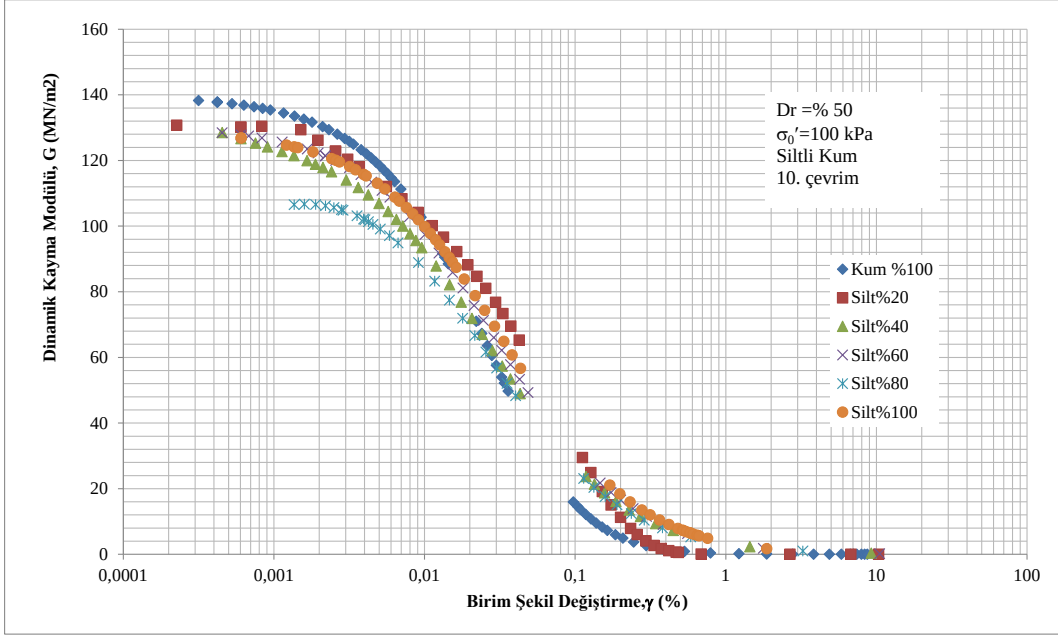
5.2.4 Silt İçeriğinin Etkisi

Zeminlerin tekrarlı yükler altında gerilme-birim şekil değiştirme parametreleri maksimum kayma modülü ve sönüm oranı değerleridir. Bir zemine ait tek bir maksimum kayma modülü ve sönüm oranı yoktur. Maksimum kayma modülü, efektif gerilme, boşluk oranı, dane özellikleri, dane çapı dağılımı ve ince dane gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Aynı rölatif sıkılıktaki siltli kum numuneleri ile gerçekleştirilen deneylerden farklı silt içerikleri için 5. ve 10. çevrimlerden elde edilen $G-\gamma$ ilişkisine ait azalım eğrileri Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Dinamik kayma modülü değerinin, temiz kumdan itibaren %40 silt içeriği değerine kadar başlangıç dinamik kayma modülü değerinin azaldığı, daha fazla silt içeriğinde ise başlangıç dinamik kayma modülü değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum 5. ve 10. çevrim sayılarında elde edilen her iki grafikte de gözlemlenmiştir.

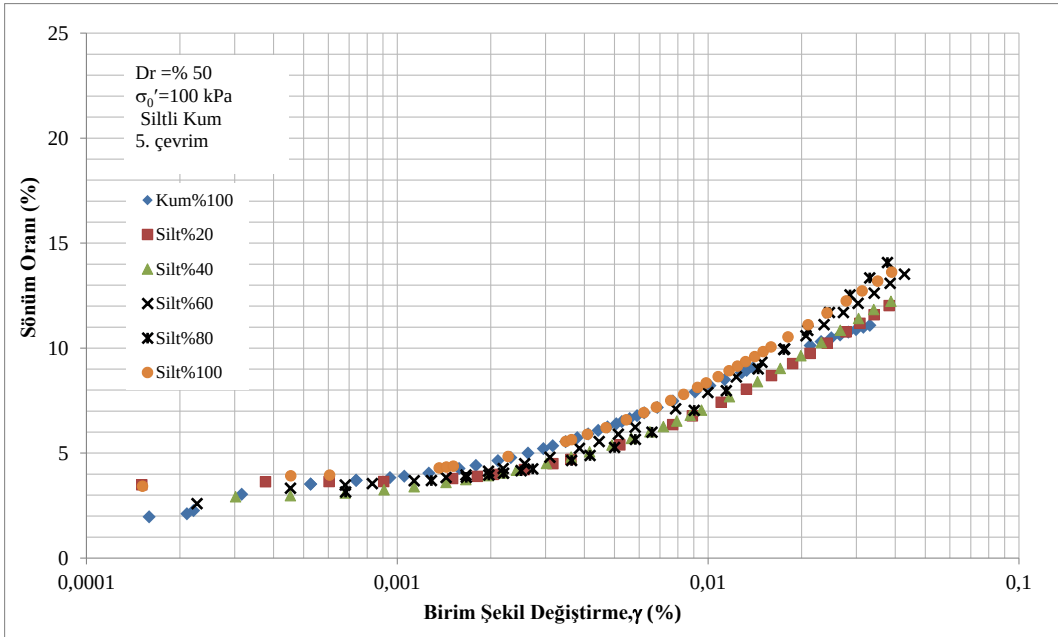
Farklı silt içeriklerinde sönüm oranı değerlerinin değişimi 5. ve 10. çevrim değerleri için Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Silt içeriği değerlerinin temiz kum ile %40 silt içeriğine kadar olan kısmı için bir grup ve %60 ile %100 arasındaki silt içerikleri ikinci bir grup olarak sıralanabilir. Silt içeriği %40’a kadar olan kısım için elde edilen maksimum sönüm oranı değeri %12, silt içeriği arttıkça sönüm oranı %14’e yükselmiştir.



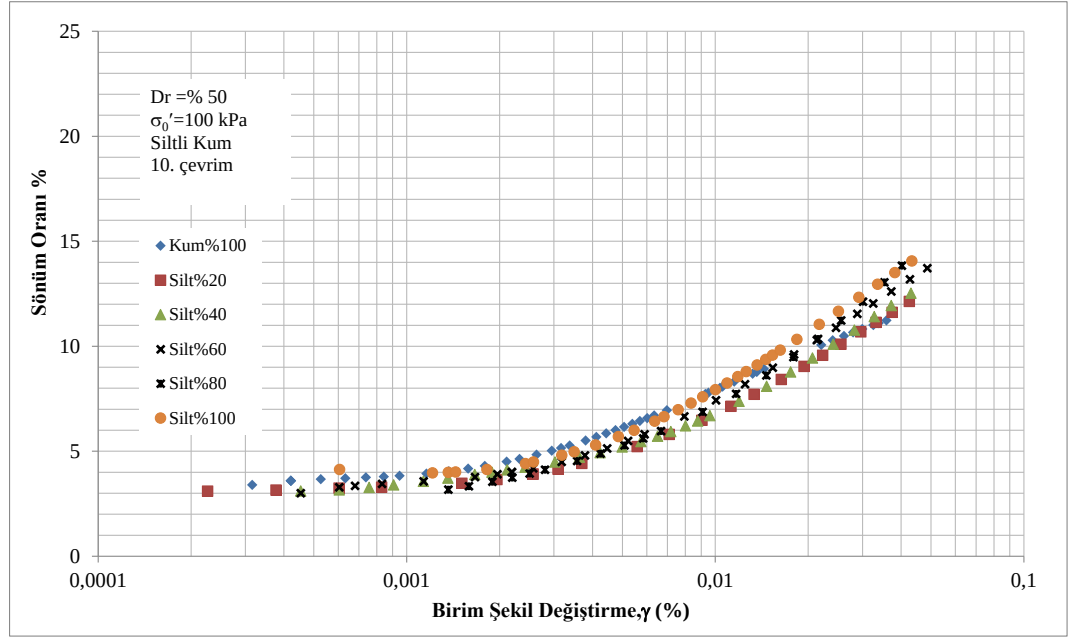
Şekil 5.16 Farklı silt içeriği için 5. çevrimde elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri



Şekil 5.17 Farklı silt içeriği için 10. çevrimde elde edilen dinamik kayma modülü azalım eğrileri



Şekil 5. 18 Farklı silt içeriği için 5. çevrimde elde edilen sönüm oranı azalım eğrileri

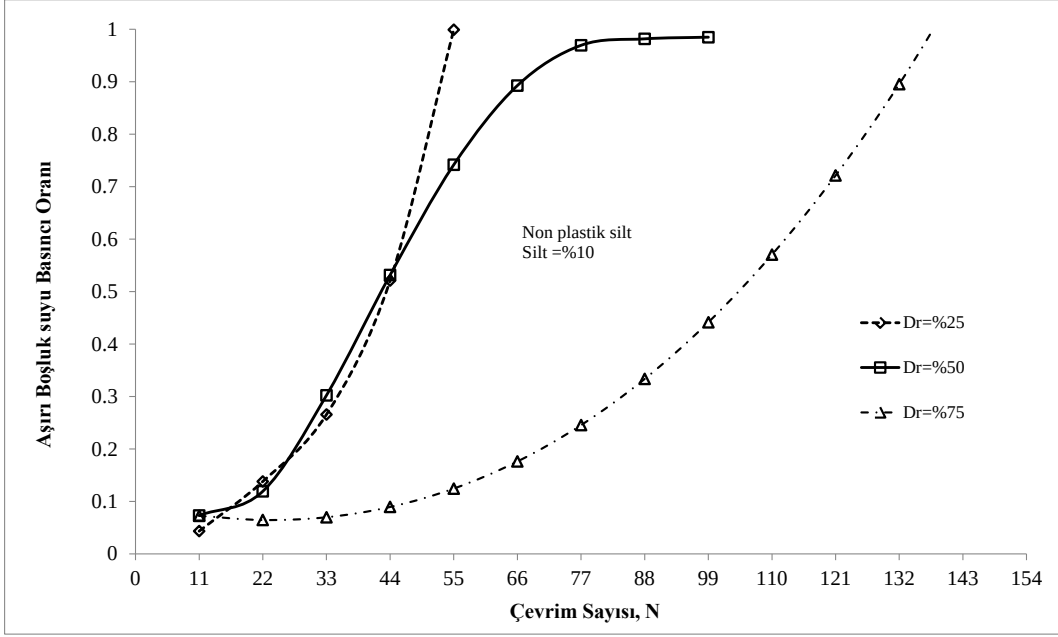


Şekil 5.19 Farklı silt içeriği için 10. çevrimde elde edilen sönüm oranı azalım eğrileri

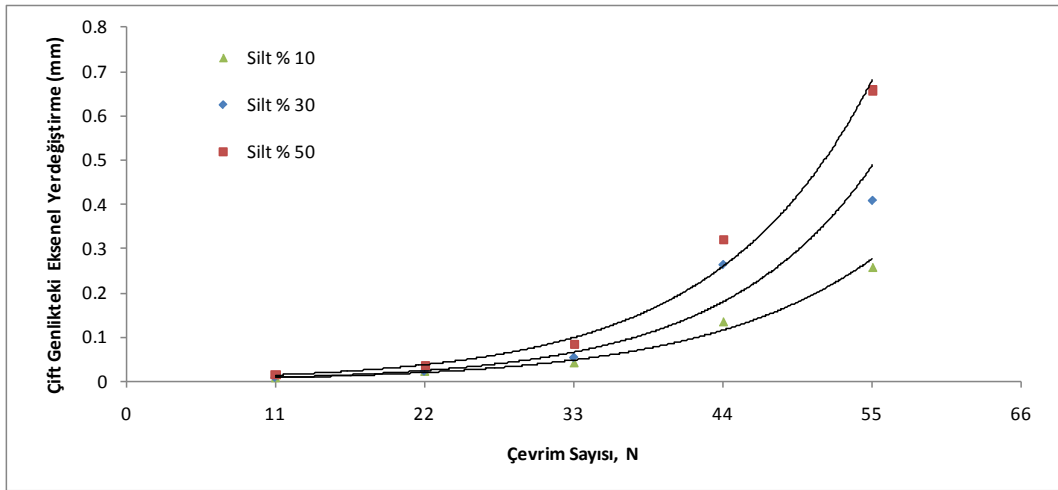
5.2.5 Boşluk Suyu Basıncı Oluşumu

Şekil 5.20’de aşırı boşluk suyu basıncı oranına karşılık çevrim sayısı ilişkisi görülmektedir. Yapılan deneylerde farklı rölatif sıkılıklarda her yükleme kademesi için 11 çevrimde bir, aşırı boşluk suyu basıncı oranı hesaplanmıştır. Rölatif sıkılık değeri arttıkça çevrim sayısı artmakta ve eğri sağa doğru kaymaktadır. Şekil 5.20’de görüldüğü gibi düşük rölatif sıkılıklar için gereken çevrim sayısının az olduğu görülmüş. Rölatif sıkılık arttıkça ($D_r = \%70$), boşluk suyu basıncının $\%100$ ’e ulaşması için gereken çevrim sayısı daha fazladır. Ayrıca şekilden de görüldüğü gibi boşluk suyu oluşum şekli exponential (üssel) olarak artmaktadır.

Ayrıca Şekil 5.21’de aynı rölatif sıkılıkta ($D_r = \%25$), silt içeriği ile çevrim sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi silt miktarı arttıkça çift genlikteki aksenal yer değiştirme miktarı da artmaktadır.



Şekil 5. 20 Farklı rölatif sıkılıklarda 11.çevrimde elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum eğrileri



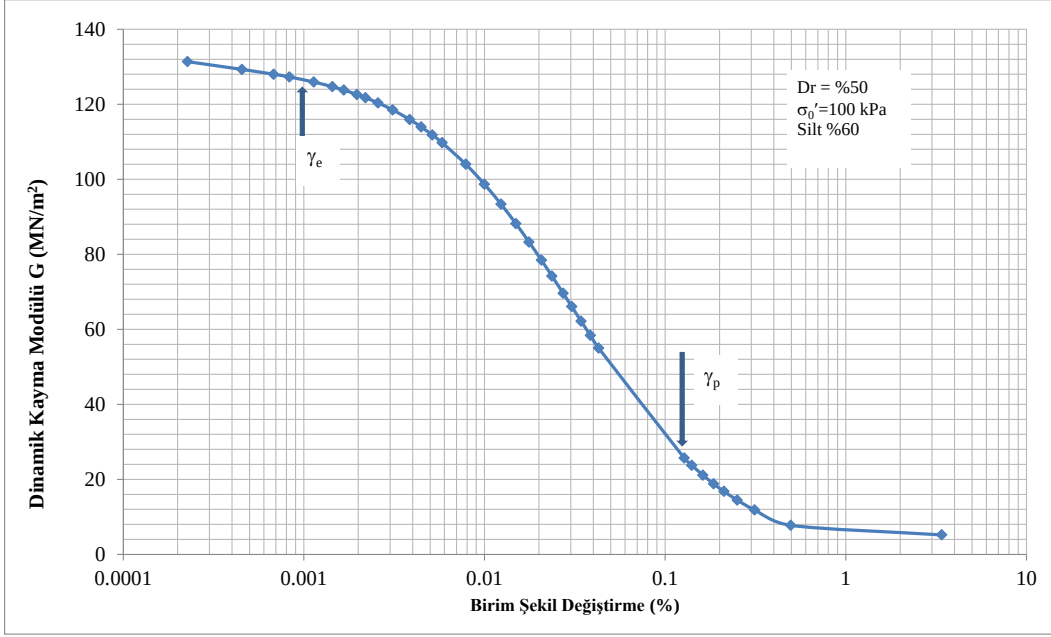
Şekil 5. 21 Aynı rölatif sıkılıkta ($D_r=25\%$), farklı silt içerikleri için 11.çevrimde elde edilen çift genlikteki eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı eğrileri

5.3 Elastik ve Plastik Eşik Değerleri

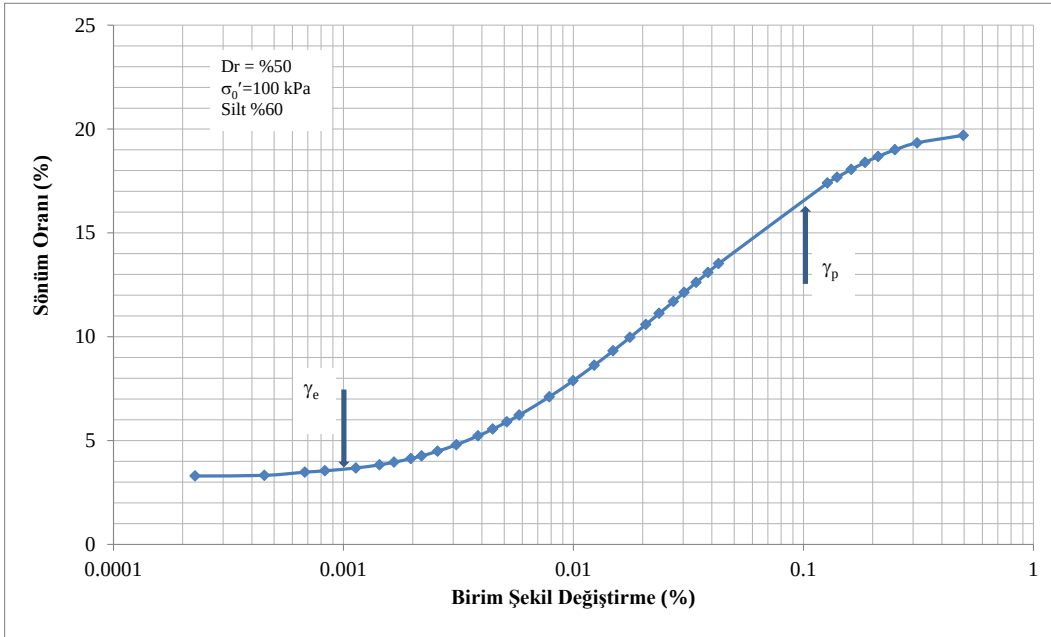
Tekrarlı yüklere maruz zeminlerde boşluk suyu basıncı ve hacim değişimleri genellikle birim kayma şekil değiştirme genliğinin belirli bir eşik değerinden sonra gerçekleşmektedir. Bu eşik değerinden sonra tekrarlı yükler altındaki zeminin mikro yapısı geri dönülmez bir deformasyon seviyesine ulaşarak boşluk suyu basıncı ve birim şekil değiştirme değerlerinde hızlı bir artış gösterir. Vucetic (1994), çalışmasında bu eşik değerinin altında zeminin mikro yapısının ve mühendislik özelliklerinin değişmediğini göstermiştir.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme şekil değiştirme ve mukavemet davranış özelliklerinin üç aşamada ele alınması gerekir. Birinci aşama, elastik eşik olarak nitelendirilen deformasyon seviyesinden önceki aşama olup bu kısımda zeminin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinde belirgin bir azalma olmadığı ve zeminin elastik özellik gösterdiği anlaşılr. Bu durum uygulanan tekrarlı kayma gerilmesinin küçük olması ve oluşan şekil değiştirme genliklerinin ihmal edilebilir boyutlarda oluşması ile açıklanır.

Zeminlerin dinamik davranış özelliklerindeki ikinci aşama ise elastik eşik değeri aşıldığında, zeminin elasto plastik davranış gösterdiği durumdur. Bu aşama süresince artan şekil değiştirmelerle beraber zemin yapısında bozulma ve rijitlikte yumuşama, boşluk suyu basıncı artışı, gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinde hızlı bir azalma meydana gelir. Elasto plastik aşama olarak isimlendirilen bu davranış özellikleri plastik eşik kadar devam eder. Plastik eşik aşıldıktan sonra dinamik kayma modülündeki azalmaya bağlı olarak zemin numunesinde büyük şekil değiştirmeler meydana gelir. Bu son aşama ise plastik akım aşaması olarak isimlendirilir. Bu aşamalar Şekil 5.22’de verilen kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrileri üzerinde gösterilmiştir. Bu eşik değerleri kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrilerinin eğrilik yarıçapı en küçük olan noktaları olarak saptanmıştır (Okur, 2002). Bu çalışma kapsamında yapılan diğer deneylerde benzer yapıda oluşan değişim eğrileri üzerinde elastik ve plastik eşik seviyeleri elde edilmiştir.



Şekil 5.22.a Elastik ve plastik eşiklerin kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrilerinde gösterimi



Şekil 5.22.b Elastik ve plastik eşiklerin kayma modülü ve sönüm oranı değişim eğrilerinde gösterimi

Elastik sınır geometrik olarak Şekil 5.22'de kayma modülü eğrisindeki başlangıç eğimi ile azalmanın yaklaşık lineer devam ettiği eğrinin eğiminin kesişimi olarak tanımlanır. Benzer şekilde histeresis ilmiklerinde "S" şeklinin başladığı nokta kullanılarak plastik sınır Şekil 5.22'deki eğrilerin azalım eğimi ile son kısmının eğimlerinin kesişim noktası olarak saptanır.

Gerçekte zeminlerin mikro yapısındaki bu değişiklikler suya doygun zeminlerde tekrarlı yükler altında ortaya çıkan kalıcı boşluk suyu basıncından kaynaklanır. Boşluk suyu basıncındaki bu artışın başlangıcına karşılık gelen birim şekil değiştirme genliğine elastik eşik denir. Elastik eşik değeri zeminlerde kalıcı ve kalıcı olmayan hacim değişimlerini ayıran şekil değiştirme değeridir.

Farklı zemin türlerinde elastik ve plastik eşik sınır değerleri farklı şekil değiştirme genliklerine karşılık gelir. Laboratuvar koşullarında bu eşik değerlerin saptanmasında zemin tür ve özelliklerine bağlı olarak değişik deney yöntemlerinden yararlanılır. Zeminlere ait elastik ve plastik eşik seviyelerinin belirlenmesi zeminlerin gerilmeler altındaki davranış özelliklerinden ve deney koşullarındaki farklılıklardan yararlanılarak kayma modülündeki azalış ve belirgin hacim ve boşluk suyu basıncı değişikliklerinin tespiti ile mümkün olabilir (Vucetic, 1994).

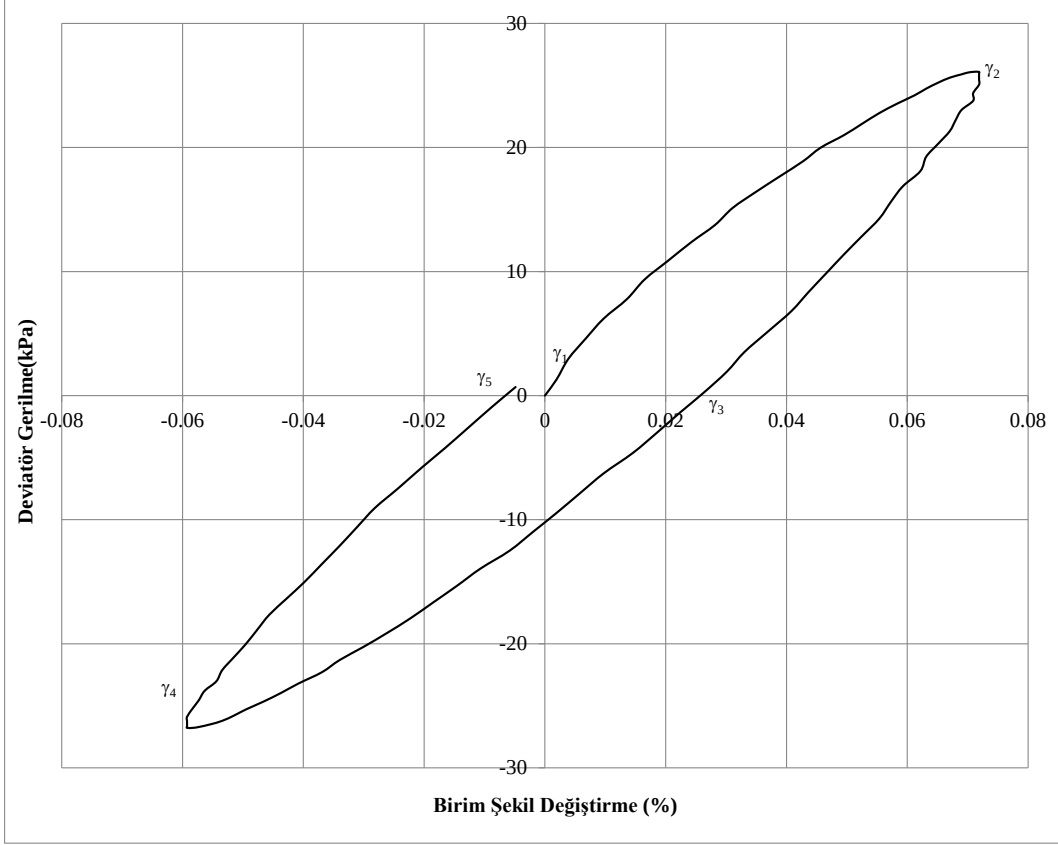
Suya doygun siltli kumlarda drenajsız koşullarda gerçekleştirilen gerilme kontrollü deneyler ile siltli kumların gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri belirlenirken silt içeriği, çevre gerilmesi ve rölatif sıkılığın etkisi incelenmiştir. Bu özelliklerin değişimi ile beraber elastik eşik seviyelerinin tespiti mümkün olmuştur.

5.4 Toplam ve Kalıcı Şekil Değiştirmelerin Gelişimi

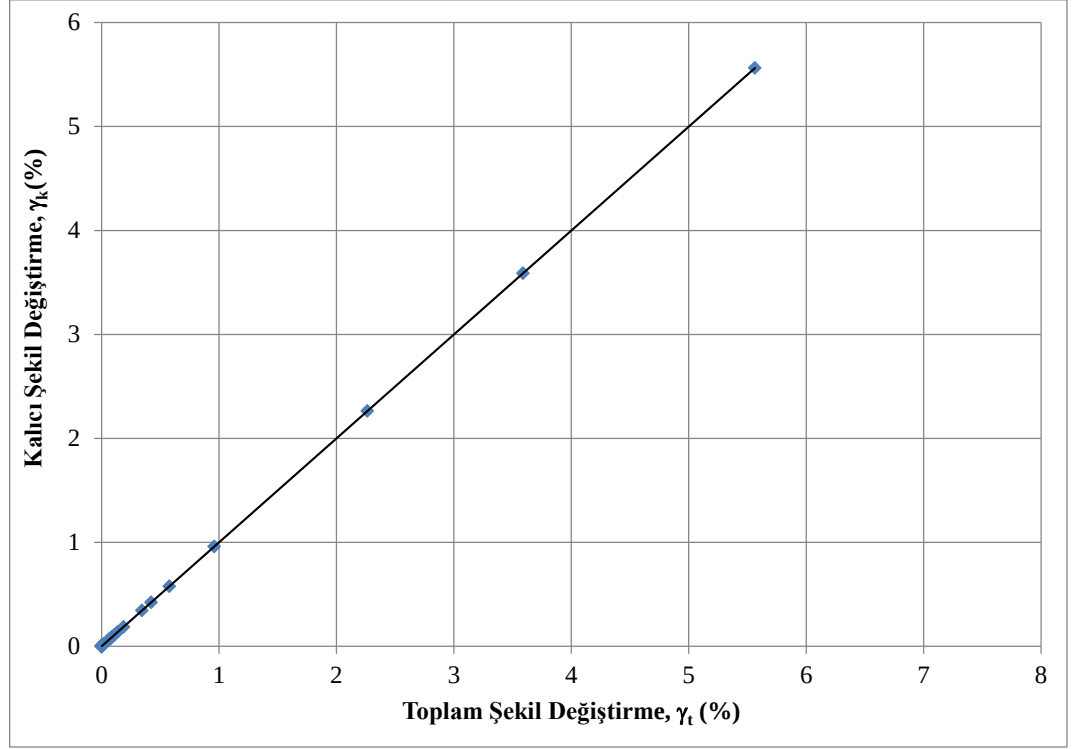
Tekrarlı yükler altında zeminde oluşan histeritik gerilme şekil değiştirme davranışını inceleyebilmek için tekrarlı yüklerden dolayı gelişen toplam ve kalıcı şekil değiştirmelerin boyutlarının tahmin edilmesi daha gerçekçi bir yaklaşım olarak düşünülür.

Zeminlerin gerilme şekil değiştirme özelliklerini temsil eden histerisis ilmiğini incelemek şekil değiştirmelerin nasıl ve hangi boyutlarda geliştiği hakkında fikir sahibi olunmasını sağlar. Üniform gerilmeli deneylerden birisine ait onuncu çevrimin histerisis ilmiği göz önüne alındığında (Şekil 5.23) birim şekil değiştirmelerin yükleme ve boşaltma safhalarındaki değişimleri görülür. Şekilde yükleme aşamasının başladığı ilk nokta birim şekil değiştirme genliğinin (γ_1) artan yükleme ile beraber (γ_2) değerine ulaştığı ve daha sonra başlayan boşaltma aşaması ile (γ_3) değerine sahip olduğu görülür. Bu ilk yükleme boşaltma aşamasında oluşan toplam birim şekil değiştirme ($\gamma_2 - \gamma_1$) ve kalıcı şekil değiştirme ($\gamma_3 - \gamma_1$) olarak bulunur.

İkinci yükleme boşaltma aşamasında ($\gamma_3-\gamma_4$) farkı toplam şekil değiştirme ve ($\gamma_3-\gamma_5$) farkı ise kalıcı şekil değiştirme değerlerini vermektedir. Bu iki yükleme boşaltma aşamasında oluşan birim şekil değiştirme bileşenlerinin toplanması ile bir çevrime ait toplam şekil değiştirme (γ_t) ve kalıcı şekil değiştirme (γ_k) değerlerine ulaşılır.



Şekil 5.23 Tipik gerilme şekil değiştirme histerisis ilmiği



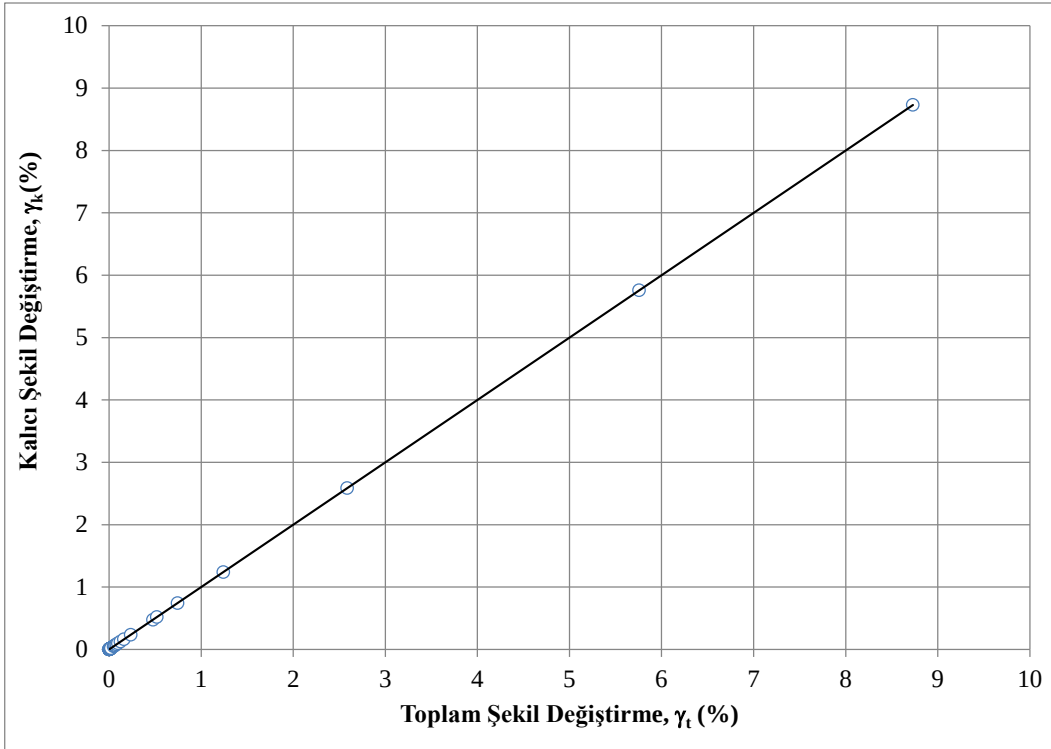
Şekil 5. 24 Üniorm tekrarlı yükler altında oluşan kalıcı ve toplam şekil değıştirmelerin değışimi

Şekil 5.24’de çalışma kapsamında yürütölen bir deneyin her bir çevrimde oluşan toplam birim şekil değıştirme genliklerinin yine o çevrimlere ait kalıcı şekil değıştirme genliklerine bağılı olarak değışimi gösterilmektedir. Bu iki değör arasındaki ilişkinin neredeyse orijinden geçecek düzgün bir doğru oluşturduğu görölür. Bu değörler arasında böyle bir ilişkinin olması (Talesnick et al., 1992) tarafından kil zeminler üzerinde gerçekleştirilen çalışmada da tespit edilmiştir.

Bu ilişkide ilginç olan bir zemine ait zemin özelliklerinde ve deney parametrelerinde oluşturulan değışikliklerin doğrusal ilişki üzerinde önemli bir etkisinin olmamasıdır. Farklı rölatif sıkılıklara sahip siltli kumlarda farklı efektif çevre gerilmelerinde gerçekleştirilen deneylere ait histerisis ilmiklerinden elde edilen toplam ve kalıcı şekil değıştirmeler arasında da hemen hemen aynı doğrusal ilişki oluşur.

Artan gerilme genlikli deneylere ait toplam ve kalıcı şekil değıştirme genlikleri arasındaki ilişkide Şekil 5.25’de seçilen bir deneye ait veriler kullanılarak gösterilmektedir. Bu iki değör arasında da üniform deneylerde görölen doğrusal ilişkinin oluştuğı görölmektedir.

Toplam ve kalıcı şekil değiştirmeler arasında böyle bir ilişkinin varlığını bilmek tekrarlı yükler altındaki zeminlerin elasto plastik davranışlarını modelleme çalışmalarının geliştirilmesi konusunda çok yararlı olacaktır. Kalıcı şekil değiştirmeler plastik, yenilenen şekil değiştirmeler ise elastik olarak tanımlanırsa tekrarlı yükler altında kalıcı şekil değiştirmelerin meydana geleceği ve bunların plastik şekil değiştirmelere sebep olacağı açıktır.



Şekil 5.25 Artan genlikli tekrarlı yükler altında oluşan kalıcı ve toplam şekil değiştirmelerin değişimi

6. SİLTİ KUM ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında düşük deformasyon seviyelerindeki gerilme şekil değiştirme özelliklerinin yanında, daha yüksek deformasyon seviyelerinde gösterdikleri mukavemet ve sıvılaşma özellikleri de zeminlerin genel dinamik davranışının tanımlaması ve ortaya konulmasında büyük önem taşımaktadır. Farklı türdeki zeminlerin tekrarlı yüklere karşı ortaya koydukları tepkiler farklı olabilmektedir. Özellikle suya doygun siltli kum zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin incelenmesi tekrarlı yükler altında oluşabilecek büyük şekil değiştirmelerin gelişme süreçlerinin tahmin edilmesinde büyük yarar sağlayacaktır.

Çalışma kapsamında elastoplastik ve plastik deformasyon aşamalarında suya doygun siltli kum zeminlerin değişik koşullardaki dinamik davranış özelliklerinin ve bu özelliklere etki eden bazı faktörlerin deneysel olarak tahmin edilmesi için dinamik üç eksenli deney aleti ile drenajsız koşullarda dinamik deneyler yapılmıştır. Deney aletinin genel özellikleri, genel olarak uygulanan deney yöntemi ve kullanılan deney malzemesinin özellikleri daha önceki bölümlerde verilmiştir. Ayrıca yürütülen deneylerin başlangıç koşulları ve yükleme özelliklerine ait bilgiler Bölüm 4.1’de ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Bu çalışmada, suya doygun siltli kumlar drenajsız şartlarda tekrarlı gerilmelere maruz kalırken artan boşluk suyu basıncı ve oluşan şekil değiştirme genlikleri ile numunede meydana gelen mukavemet kaybı gerilme izleri de kullanılarak parametrik olarak araştırılmıştır. Başlangıç koşullarındaki değişikliklerin bu zeminlerin özelliklerini ne şekilde etkilediği irdelenmiştir.

6.1 Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altında Mukavemet Özellikleri

Farklı türde zeminlerin değişen yükleme koşulları altında davranış özelliklerinin aynı olması mümkün değildir. Bu davranışları etkileyen yegâne faktörlerin zemin türü ve yükleme koşulları olmadığı, zemin davranışının daha birçok faktörden etkilendiği bilinmektedir.

Tekrarlı yükler altında suya doygun siltli kum zeminlerin dane boyu dağılım özellikleri, sahip olduğu boşluk oranı, konsolidasyon basıncı ve uygulanan

gerilmenin genlik değerinin belli şartları sağlaması halinde belirli bir çevrim sayısı sonunda siltli kum zeminlerin büyük şekil değiştirme oluşturduğu gözlenmiştir. Bu mukavemet kaybının başlıca nedeninin zemin içerisindeki boşluk suyu basıncının drenajsız koşullarda uygulanan tekrarlı kayma gerilmelerine bağlı olarak hızlı bir şekilde artması ve buna bağlı olarak ortalama efektif gerilmenin sıfır değerine kadar azalmasıdır. Genellikle suya doygun, üniform gevşek ince kum veya siltli zeminlerde görülen bu olaya ve ortaya çıkan sonuçlarına genel olarak sıvılaşma adı verilir. Bu yüzden sıvılaşma konusunda yapılan çalışmalar bu tür zeminler üzerinde de yoğunlaşmıştır.

Gerek laboratuvarda gerekse arazide yürütölen deneysel çalışmalar ışığında sıvılaşma olayının incelenmesi amacıyla geçmişte birçok araştırma yapılmıştır. Sismik etkiler ile sıvılaşma veya deformasyon yumuşaması olaylarının gerçekleşmesi yönündeki sonuca dayalı gözlemler bu olayların değerlendirilmesinde yeni yaklaşımların ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Özellikle sıvılaşabilen zemin türleri ve sıvılaşma koşulları üzerinde yapılan tartışmalar halen devam etmektedir.

Sıvılaşma olayının gelişimi ve mekanizmasının aydınlatılması belki de ilk olarak (Seed et al., 1966) tarafından dinamik üç eksenli deney aletinde yürütölen deneylerle ortaya konulmuştur. Yürütölen deneysel çalışmalarda belirli bir çevre basıncında konsolide edilmiş suya doygun gevşek temiz kum numuneleri üniform tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır.

Sıvılaşma konusunda laboratuvarda çeşitli dinamik deney aletleri ile sürdürölen deneysel çalışmalarda sıvılaşmaya karşı en hassas zemin türünün suya doygun kumlar olduğu bilinmektedir. (Peacock, et al., 1968), (Ladd, 1974) ve (Seed, 1979)'in laboratuvarda sonradan oluşturulmuş kum zeminler üzerinde yürüttükleri dinamik deneylerde zeminin sahip olduğu rölatif sıkılığın, uygulanan tekrarlı gerilmenin ve bu gerilmenin uygulanma tekrar sayısının kumların dinamik davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yine geçmiş yıllarda kum zeminlerde ortaya çıkan sıvılaşma ve deformasyon yumuşaması olaylarının belirlenmesi konusunda birçok deneysel ve teorik araştırmalar yürütölmüştür. (Drnevich, 1972), (Castro, 1975).

Son yıllarda zemin dinamiği konusundaki ilerlemeler ve laboratuvar deney aletlerindeki gelişmeler, bu konulardaki çalışmalarda daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Özellikle dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak

zeminlerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin saptanması ve bu özelliklere etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Yoshimine, et al., 1998), (Hyodo, et al., 1998).

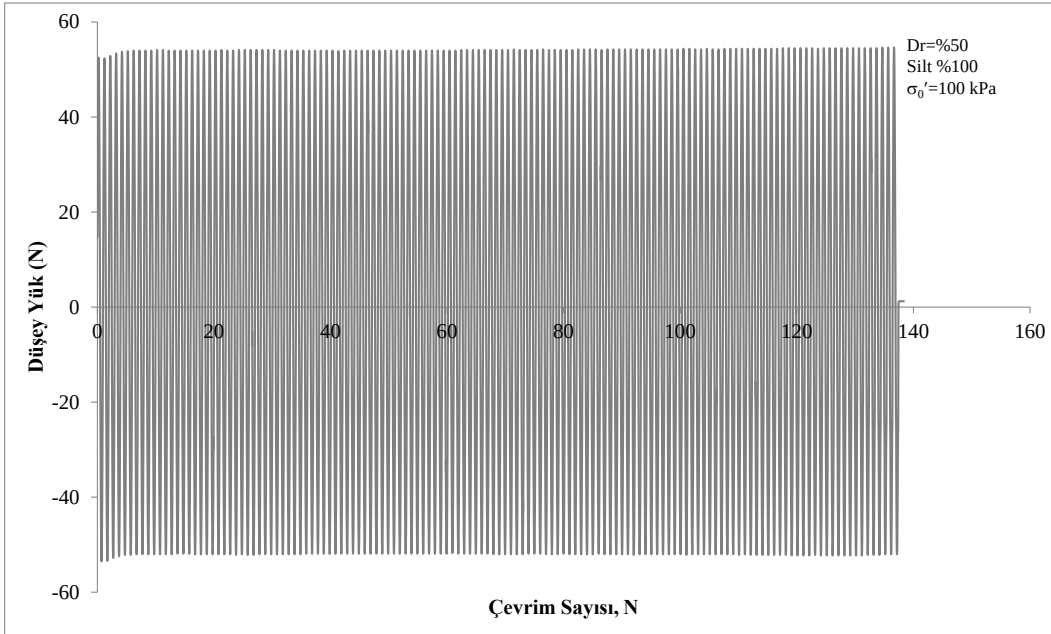
Zeminlerin sıvılaşmaya ulaşması için gereken koşullar üzerinde tartışmalar hala devam etmektedir. Uygulanan tekrarlı gerilmeyle beraber suya doygun zeminlerde ilave boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde çevre basıncına yaklaşması sonucunda zeminde oluşan birim şekil değiştirmelerin belirli bir değere ulaşması zeminin sıvılaştığı yargısına ulaşılmaktadır. Sıvılaşmaya neden olan bu birim şekil değiştirme değeri laboratuvarda yapılan çalışmalar doğrultusunda dinamik deney aletleri için çift yönlü % 10 olarak düşünülmüştür. Çift yönlü % 10 birim şekil değiştirme değerine ulaşmak için zemine belirli bir genlikte sabit gerilme değerinin yine belirli bir çevrim sayısında uygulanması gerekmektedir. Üniform gerilme genliğinin büyüklüğü sıvılaşmaya ulaşmak için uygulanması gereken çevrim sayısını etkilemektedir. Yapılan laboratuvar çalışmaları ve yaşanan depremlere ait kayıtların değerlendirilmesi doğrultusunda bir depremi temsil eden tekrarlı yükleme sayısının 10 - 20 arasında olabileceği saptanmıştır. Sonuç olarak zeminlerde sıvılaşmaya sebep olan gerilme genliğini bu zeminde 20 çevrimde çift yönlü %10 eksenel birim şekil değiştirme oluşturan genlik olarak tanımlanabilir.

Bu çalışma kapsamında siltli kumlarda sıvılaşmaya sebep olan gerek zemin özellikleri gerekse deney koşullarında yapılan değişikliklerin siltli kumların dinamik özelliklerine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Deneylerde laboratuvar koşullarında sonradan oluşturulan numuneler kullanılmıştır. Numune hazırlama yöntemi olarak kuru yağmurlama yöntemi kullanılmıştır. Suya doygun numuneler üzerinde drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneyler farklı silt içeriği, farklı rölatif sıkılık, çevre basıncı ve gerilme genlikleri kullanılarak yapılmıştır. Deneylerin tamamında dinamik gerilme uygulama frekansı 0.1 Hz olarak seçilmiştir. Yapılan bütün deneylerde numunelerin sıvılaşmaya ulaştığı birim şekil değiştirme değeri çift yönlü % 10 olarak tanımlanmıştır.

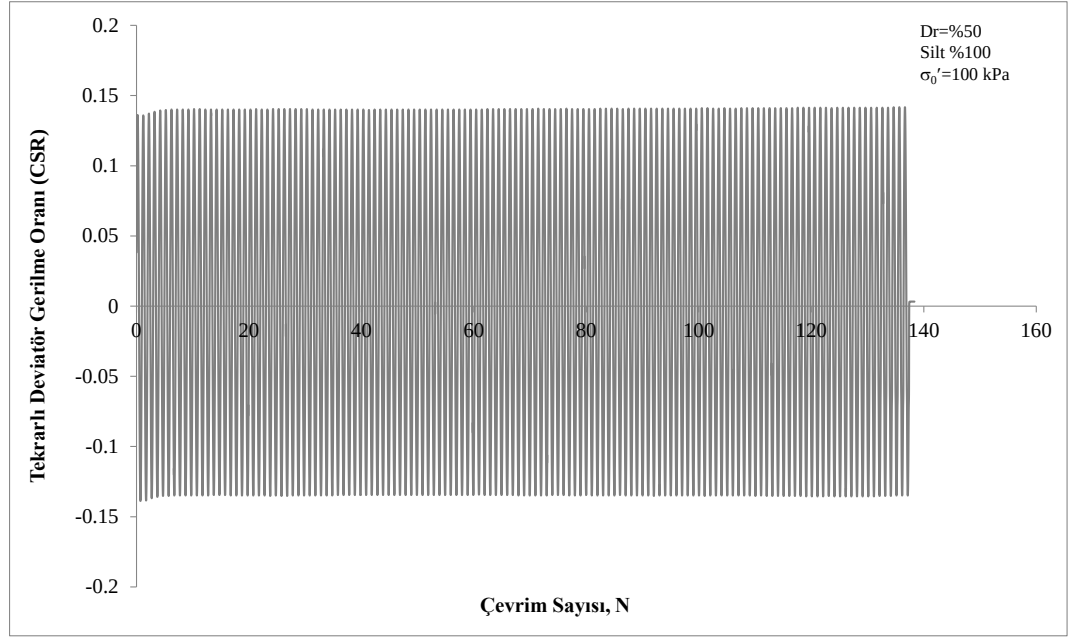
Yapılan deneylerde değişik üniform tekrarlı gerilme genliklerinde farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip ve izotropik koşullarda konsolide edilmiş zeminlerin mukavemet özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 6.1’de bu deneylerden birisine ait düşey yük, tekrarlı deviatör gerilme oranı, eksenel şekil değiştirme ve ilave boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ile değişimine ait deney kayıtları verilmiştir. Bu deneye ait gerilme şekil değiştirme gösteren

histerisis ilmikleri ve gerilme izinin değişimi sırasıyla şekil 6.2 ve şekil 6.3’de verilmektedir. Bu tür deney koşullarında asal eksen yönleri sabit olup -45° ve $+45^\circ$ arasında sıçramalı olarak değiştiği görölür. (şekil 2.9 b).

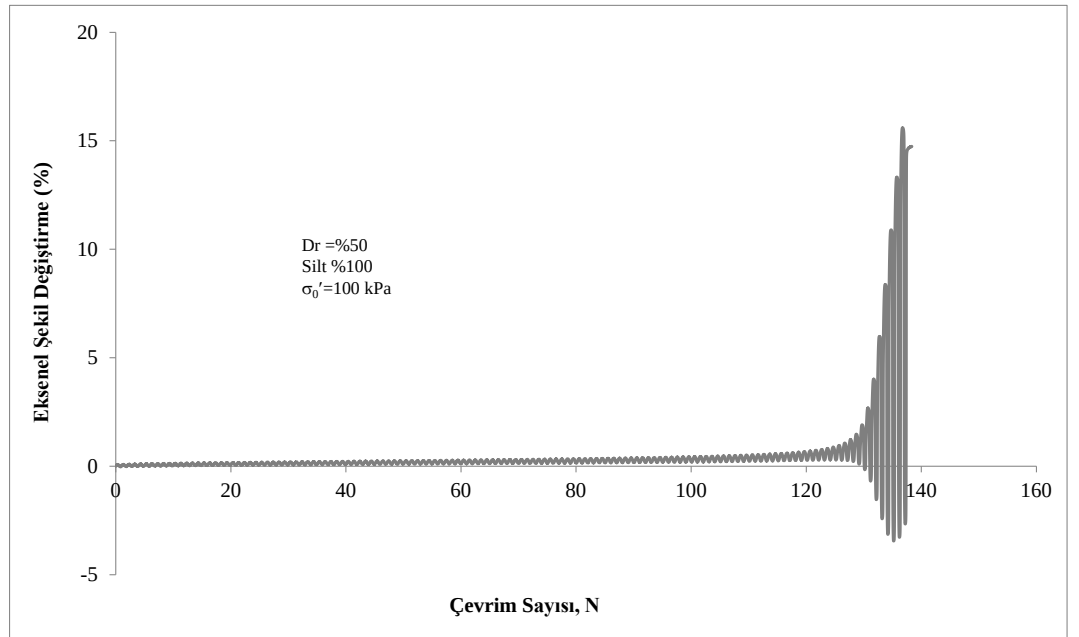
Üniform tekrarlı kayma gerilmeleri altında ve drenajsız koşullarda suya doygu siltli kumlara ait boşluk suyu basıncı ve şekil değiştirme özelliklerindeki değişim genellikle şekil 6.1’de görölün davranış özelliklerine benzer bir şekilde gelişmektedir. Bu amaçla şekil 6.1’de silt içeriği ($FC = \% 100$), rölatif sıkılığı ($Dr = \% 50$) ve $\sigma'_0 = 100$ kPa basınç altında yapılan bir deneye ait tipik grafikler gösterilmiştir. Konsolidasyon koşulları, zemin türü ve fiziksel özelliklerindeki değişiklikler yukarıdaki özelliklerin gelişiminde farklılıklara yol açmaktadır. Statik ve tekrarlı yükler altında zeminlerin bu farklı davranış özellikleri ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 2.1’de verilmiştir. Bu bölümde zeminlerin davranış özelliklerindeki bu farklılıklara etki eden bazı faktörler incelenmiştir.



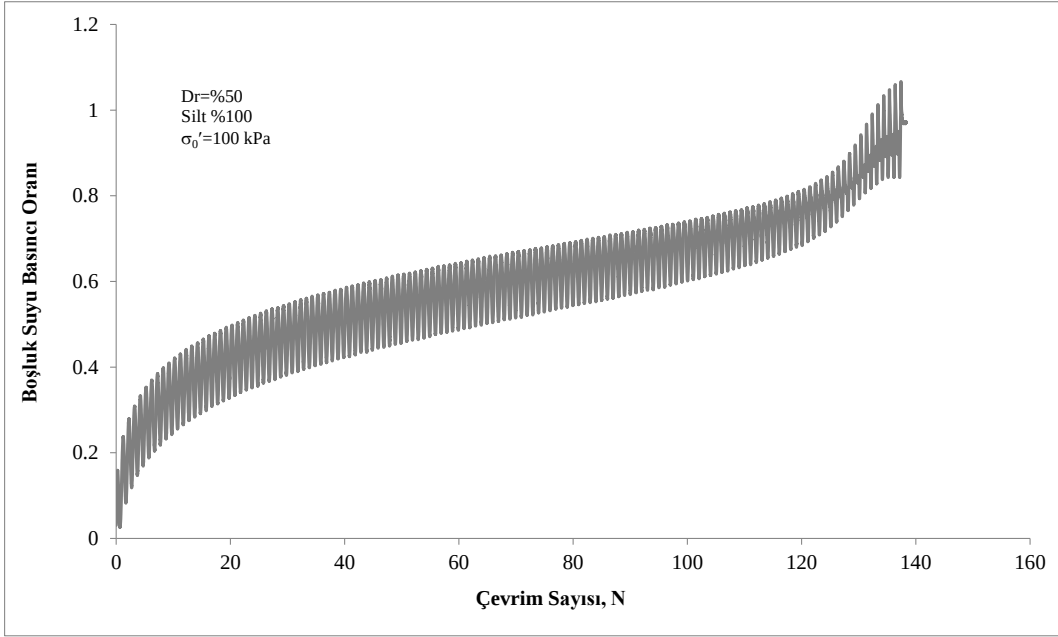
Şekil 6. 1.a Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin düşey yük ve çevrim sayısı



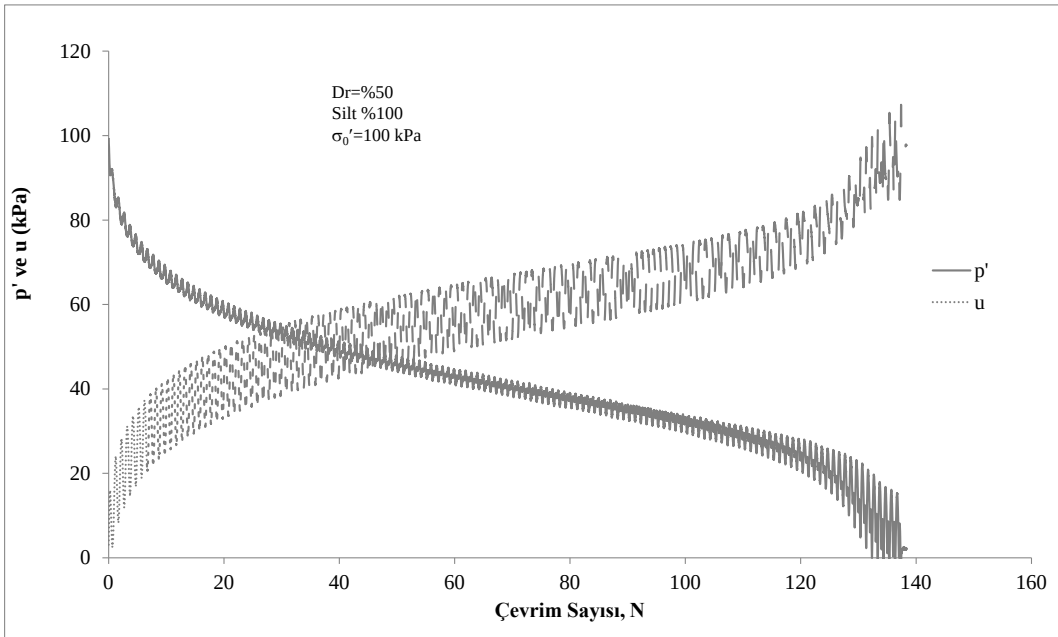
Şekil 6. 1.b Üniorm genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin tekrarlı deviyatör gerilme oranı ve çevrim sayısı



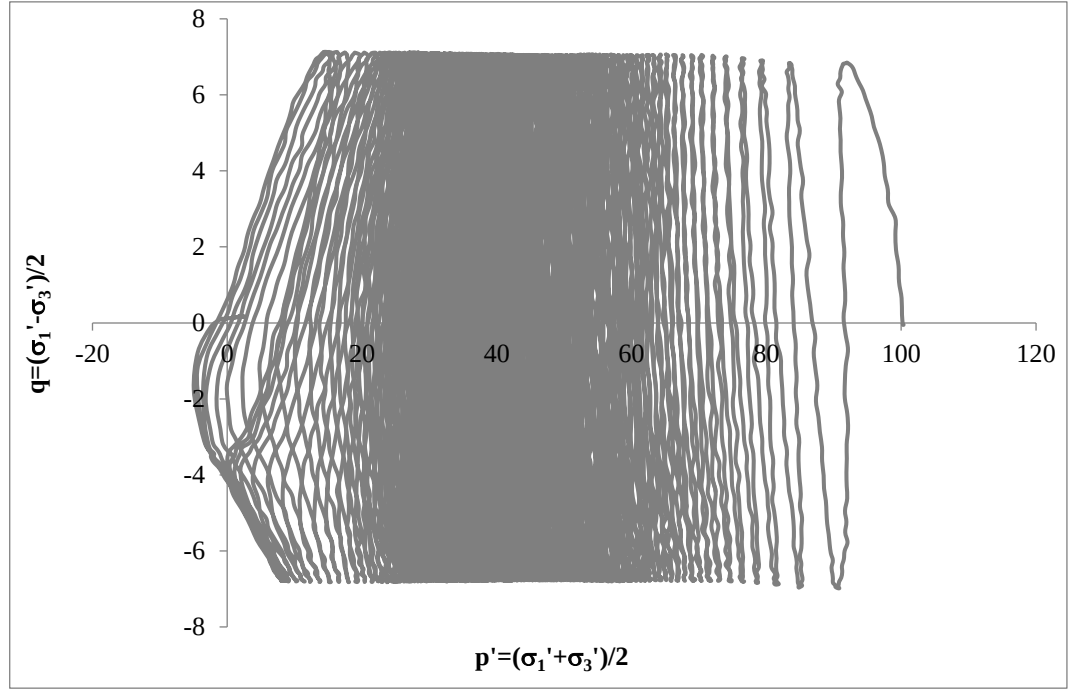
Şekil 6. 1.c Üniorm genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin eksenel şekil değışirme ve çevrim sayısı



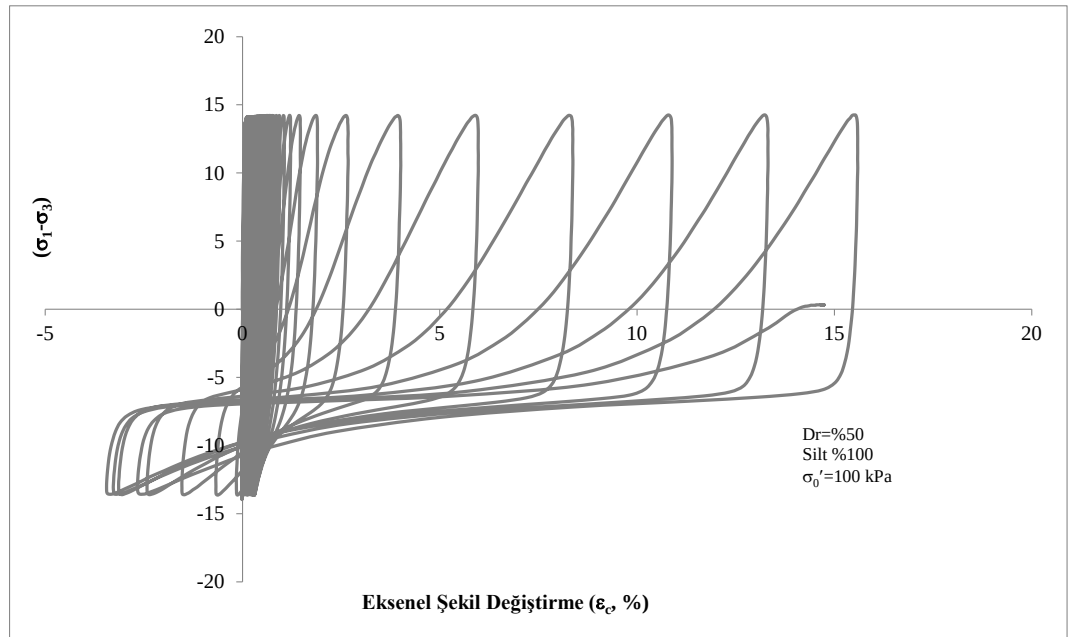
Şekil 6. 1.d Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı



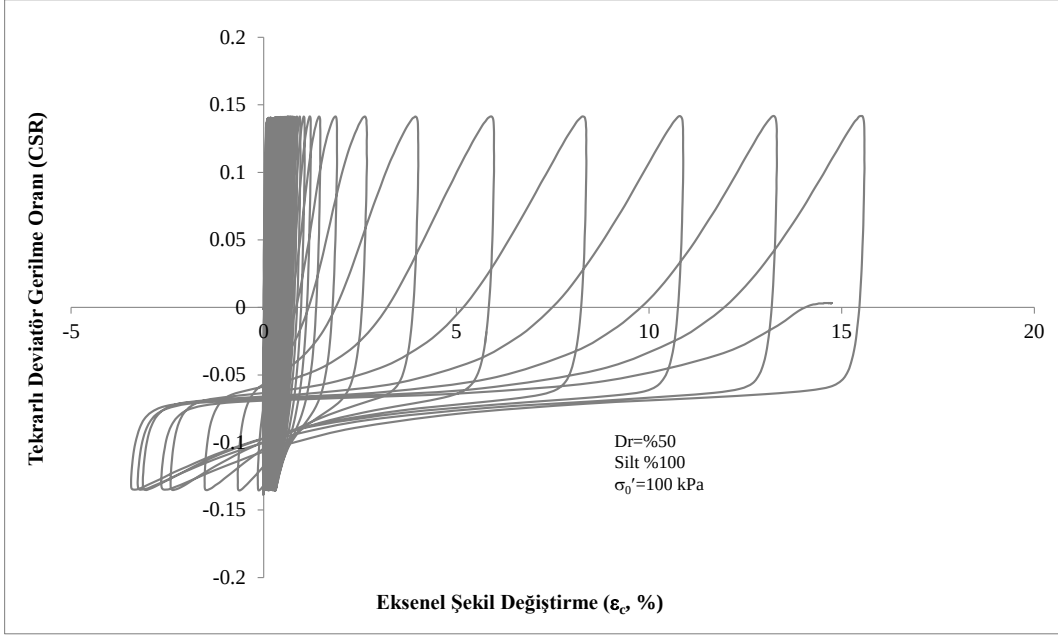
Şekil 6. 1.e Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin p' ve u ile çevrim sayısı



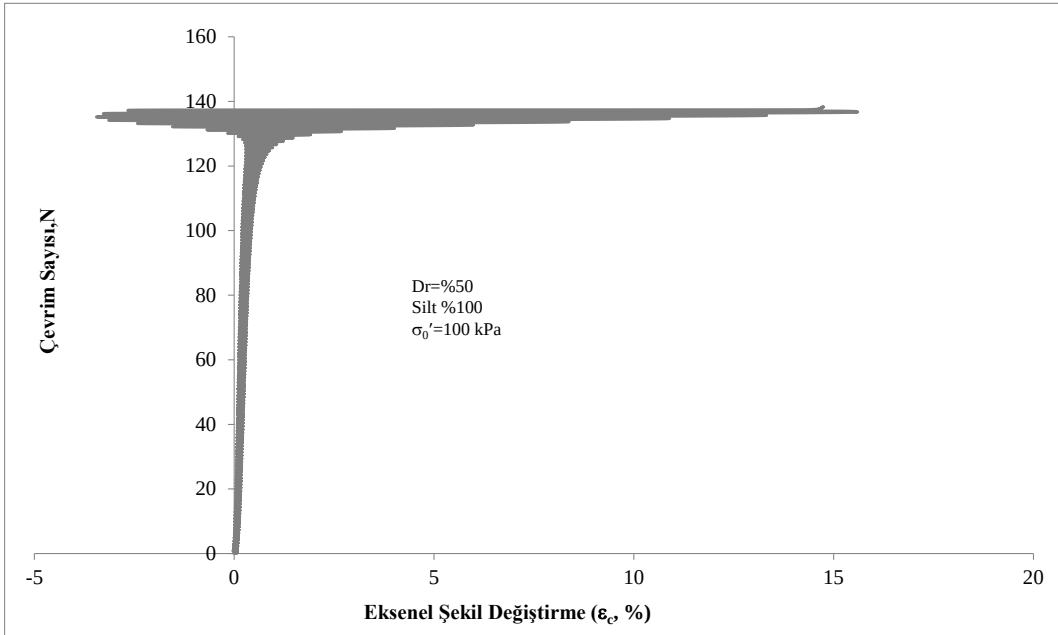
Şekil 6.2.a Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin gerilme izi



Şekil 6.2.b Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin deviator gerilme ve eksenel şekil değiştirmeye bağlı değişimi



Şekil 6.3.a Üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kum zeminin tekrarlı deviyatör gerilme oranının eksenel şekil değiştirmeye bağlı değişimi



Şekil 6.3.b Üniform Genlikli Tekrarlı Yükler altında siltli kum zeminin çevrim sayısını eksenel şekil değiştirmeye bağlı değişimi

Sıvılaşma suya doymun bir kum birikintisini oluşturan daneler arasındaki temasın kaybolması ve su içinde asılı konuma geçmesi olarak da ifade edilir. Çevre basıncı etkisi altında taneciklerin birbirleri arasındaki sürtünme ile oluşabilecek deformasyonlara karşı koymaları nedeniyle, zemin türü sıvılaşmaya karşı hassasiyetlerde en önemli faktörlerden birisidir. Eğer zemin ince daneli veya

ince dane içeriğine sahipse ince daneler arasındaki kohezyon oluşumu danelerin birbirinden ayrımını güçleştirecektir. Genellikle ince dane varlığının kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırıcı yönde etki etmesi beklenir.

Kum içerisinde bulunan silt türü zeminler kumun dinamik yükler altındaki davranışını etkilediği son yıllarda bilinmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda ince dane içeriğinin ve plastisitenin kumların sıvılaşmaya karşı direncini ne şekilde etkilediği konusunda tam bir fikir birliği sağlanmış değildir. Özellikle plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltlerin olması durumunda birçok farklı çalışmadan çıkan sonuçların uyumsuzluğunda söz edilebilmektedir. Silt içeriğinin kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı çalışmalar (Ishihara et al., 1978), (Finn et al., 1994), (Dobry et al., 1985), (Garga et al., 1984) literatürde görülürken, silt içeriği oranındaki artışın kumların sıvılaşmaya karşı olan direncini azalttığı yönünde ise (Shen et al., 1977), (Ishihara et al., 1980), (Erken et al., 1994), (Vaid, 1994) literatürde yapılan çalışmalar mevcuttur.

Sıvılaşmaya yönelik etki incelenirken ince danenin mühendislik özelliklerinin bu zıtlıklara sebep olabileceği düşünülür. İnce malzemenin sahip olduğu plastisite, adhezyon ve kohezyon değerleri bazen bu malzemeleri sıvılaşmaya karşı kumlardan daha dirençli hale getirmektedir. Bu yüzden siltlerin veya siltli kumların dinamik özellikleri incelenirken ince danelerin kendi fiziksel ve endeks özelliklerinin öne çıkabileceğinin dikkate alınması gerekir. Literatürde yapılan çalışmalar ışığında ortaya çıkan görüş plastik olmayan silt içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı (Erken, et al., 1994), plastik içeriğindeki artışın ise kumların sıvılaşma direncini arttırdığı şeklindedir (Ishihara, 1996). Yapılan bazı çalışmalarda silt içeriğindeki belirli oranların sıvılaşmaya karşı kritik değerler ifade ettiğini bildirmiştir (Koester, 1994).

Sıvılaşmanın uzun yıllar sadece kohezyonsuz kumlu zeminlerde oluştuğunun düşünülmesine rağmen son yıllarda yapılan çalışmalar düşük plastisiteli siltler (Ishihara 1984, 1985) ve çakıllı zeminlerde de (Yegian et al., 1994) sıvılaşmanın ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Ansal and Erken'in (1987) ve Guo and Prakash'ın (1999) çalışmalarında siltli kum tabakasının sıvılaşması incelenmiştir. İnce taneli zeminlerde plastisitenin etkisi Okur (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmalarla araştırılmıştır.

Ishihara et al., (1980) ince taneli plastik olmayan zeminlerin çevrimsel dayanımlarının plastisite indeksi 15 - 20 olan zeminlerden çok daha düşük

olduğunu göstermiştir. Troncoso (1986) farklı silt içeriğine sahip kum atıkların devirsel dayanımını bulmak amacıyla ve %15 ince içeren siltli kumların sıvılaşma dayanımlarının aynı efektif çevre gerilmesinde temiz kumların 1.5 katı olduğunu göstermiştir. Koester (1994) sıvılaşma dayanımına ince tane etkisini araştırdığı çalışmada, aynı boşluk oranında ince tane artışının sıvılaşma dayanımını ilk olarak azalttığı, daha fazla ince tane artışında ise tersine döndüğünü göstermiştir.

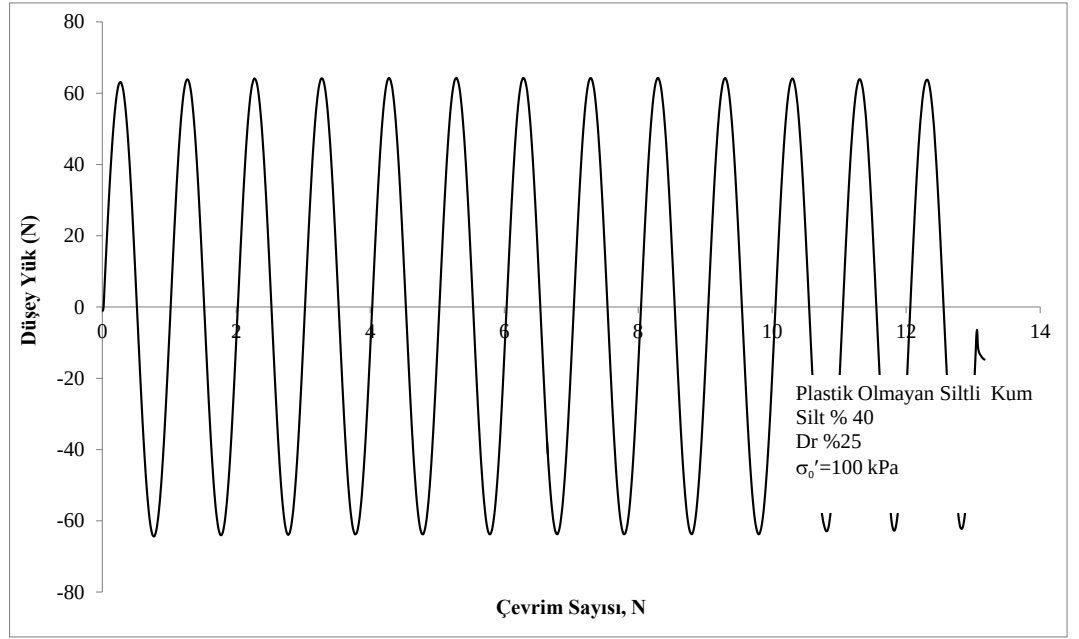
Das et al., (1999) siltli zeminlerde plastisite indeksi % 15 veya daha fazla olması durumunda başlangıç sıvılaşması durumunun aşılamaz olduğunu göstermişlerdir. Xenaki and Athanasopoulos (2003) tarafından yürütülen çalışmalarda, ince taneliden orta taneliye kadar farklı miktarlarda plastik olmayan doygun kum karışımlarının sıvılaşma dayanımları hesaplanmıştır. % 0- % 44'e kadar artan ince tane içeren karışımların, temiz kumlarla kıyaslandığında sıvılaşma dayanımlarının azaldığını, bu eğilim % 44'den daha fazla ince tane içeren karışımlarda tersine döndüğünü göstermiştir. Erten and Maher (1995), hem plastik hem de plastik olmayan ince tane etkisi üzerine yapılan çalışmalarda, boşluk suyu basıncı üretiminin, % 30'a karşılık gelen bir sınır değer silt içeriğinde olduğunu söylemişlerdir.

Kumlu zeminlerin içindeki kil ve silt oranı bu zeminlerin sıvılaşma potansiyelini ve davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Siltli kum tabakalarının sıvılaşması ile ilgili çalışmalar Ansal ve Erken (1987), ve Guo and Prakash (1999), tarafından yapılmıştır. İnce daneli zeminlerin tekrarlı gerilme genlikleri altında davranışları ve plastisitenin etkisi Okur (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda araştırılmıştır. Ansal depremlerde zemin tabakalarında meydana gelen tekrarlı gerilmelerin, depremin ve zeminin özelliklerine göre değişik frekanslarda olduğunu bu nedenle kohezyonlu zeminlerde frekansının etkisinin göz önüne alınması gerektiğini söylemiştir.

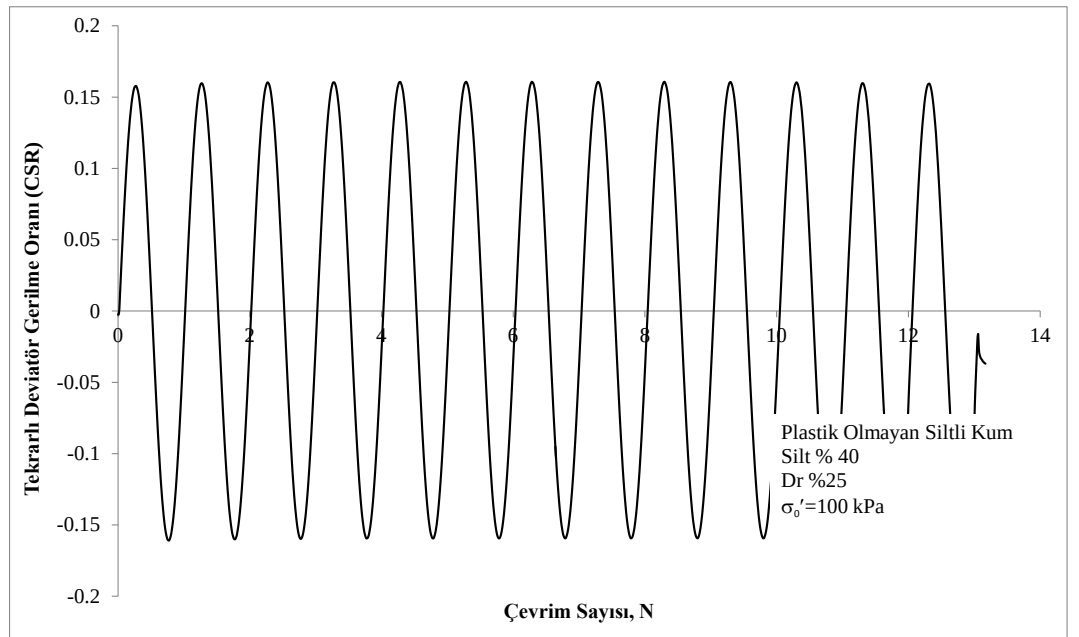
Siltli zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin laboratuvar koşullarında belirlenmesi amacıyla çalışma kapsamında incelenen malzemelerden birincisi plastik olmayan silt-kum karışımı bir diğeri ise düşük plastisiteli siltli kumdur. Malzemelerin fiziksel ve endeks özellikleri dördüncü bölümde ele alınmıştır. Malzemeler silt içerikleri farklı (F.C % 0, 20, 40, 60, 80, 100) ve farklı dane çapı dağılımı eğrilerine sahiptirler.

Plastik olmayan numuneler kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Suya doyurulan siltli numuneler drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneylerle

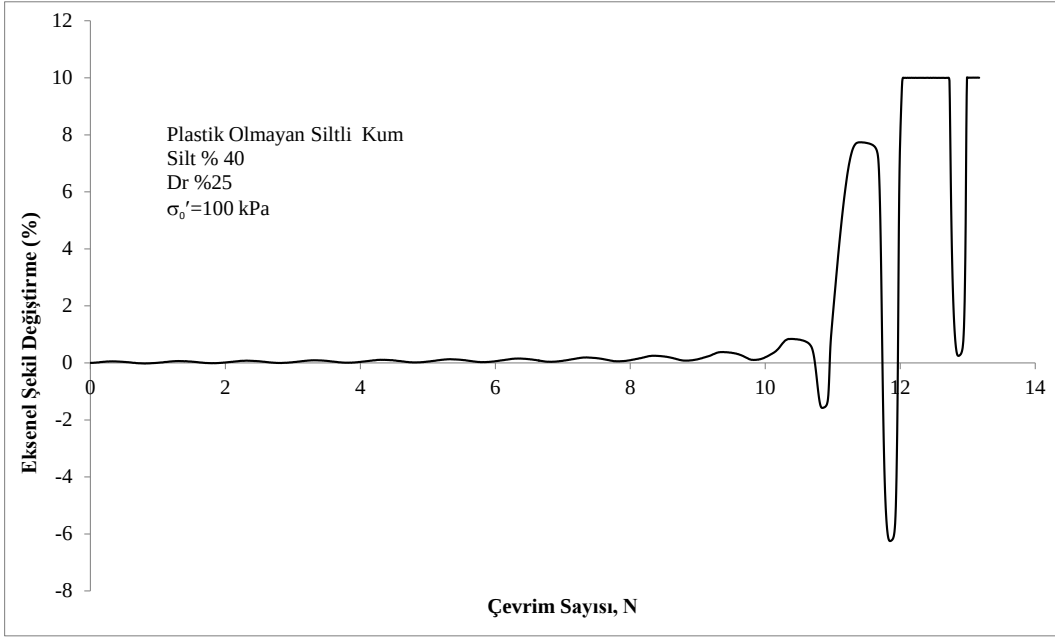
silt içeriğindeki değişikliklerin ve izotropik koşulların siltli zeminlerin dinamik davranış özelliklerine etkisi incelenmiştir. Deneyler 0.1 Hz frekanstaki üniform tekrarlı sinüzoidal gerilmeler altında ve belirli bir rölatif sıkılık değerinde hazırlanan numuneler ile yapılmıştır. Üniform genlikteki tekrarlı gerilmeler altında plastik olmayan siltli kum malzemesi ile gerçekleştirilen deneylerden birisine ait kayıtlar Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da görülmektedir.



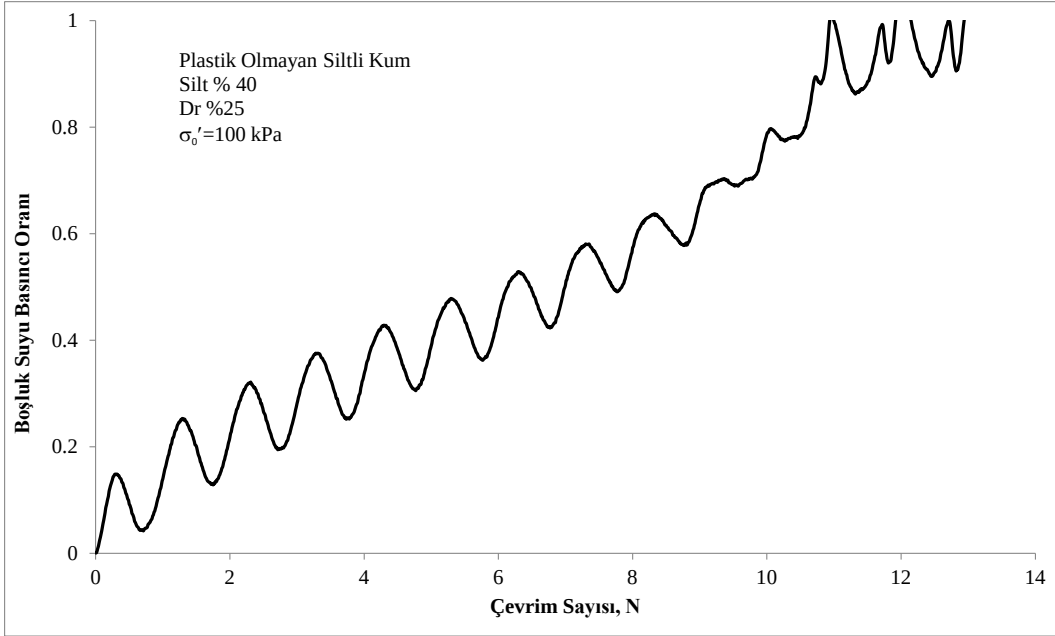
Şekil 6.4.a Plastik olmayan siltli kum zeminin düşey yük çevrim sayısı



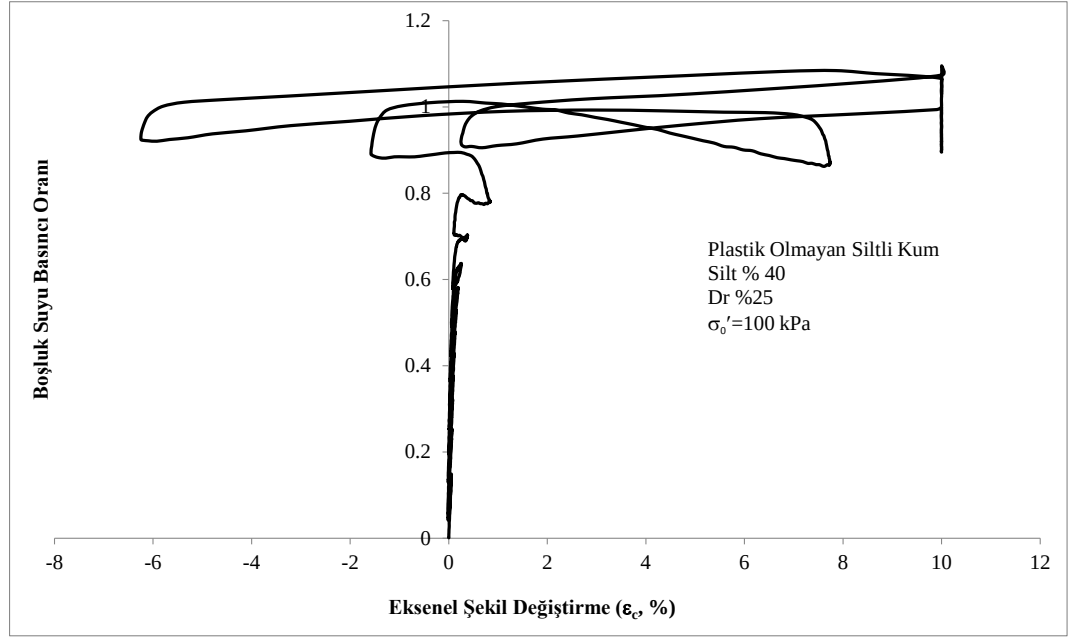
Şekil 6.4.b. Plastik olmayan siltli kum zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı çevrim sayısı



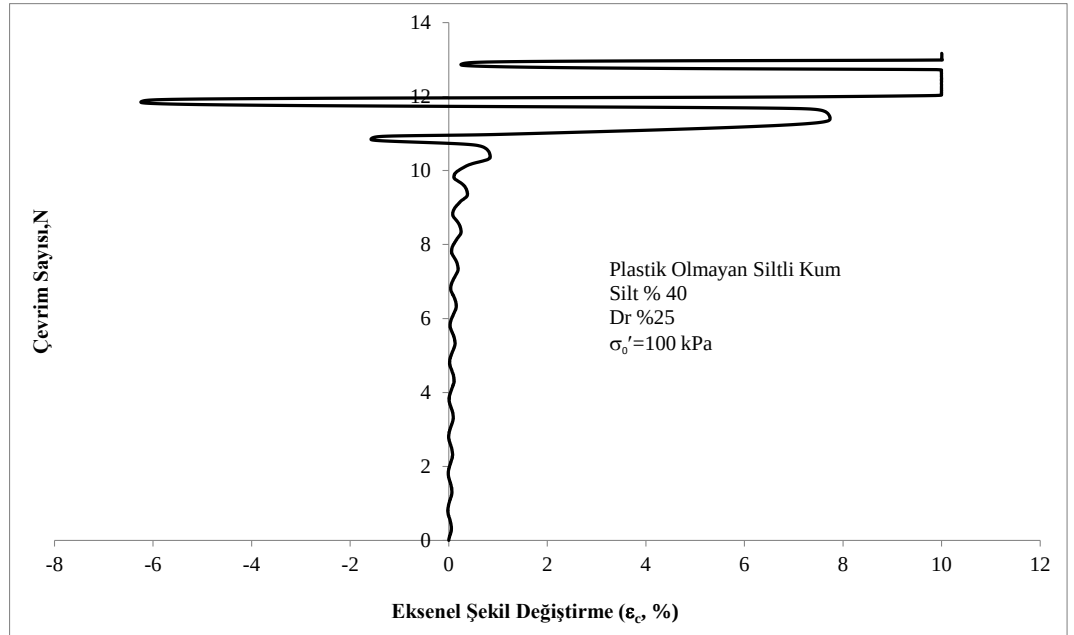
Şekil 6.4.c. Plastik olmayan siltli kum zeminin eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı



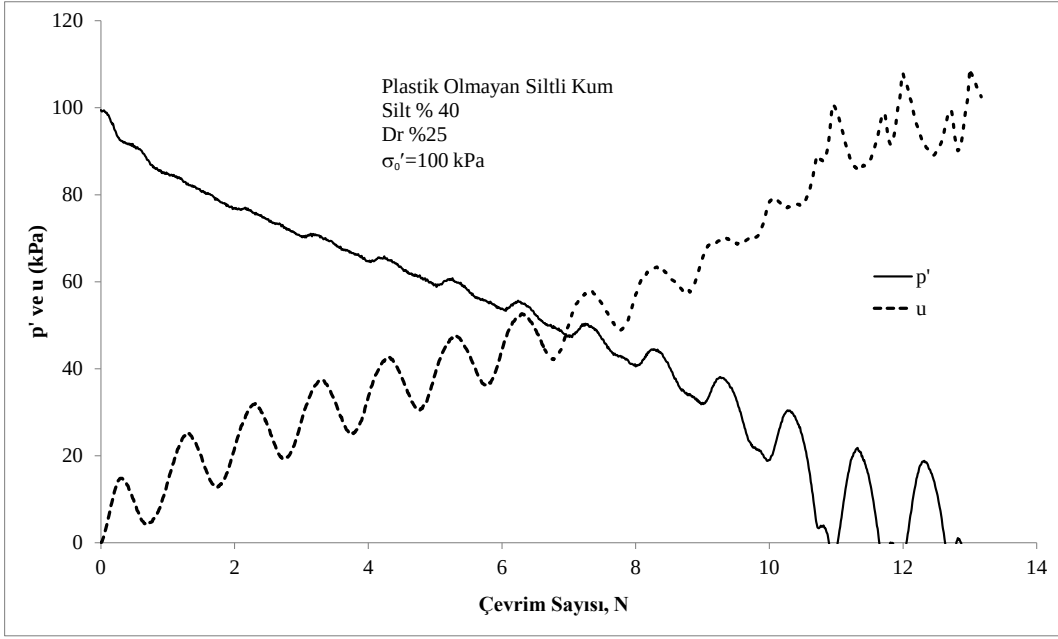
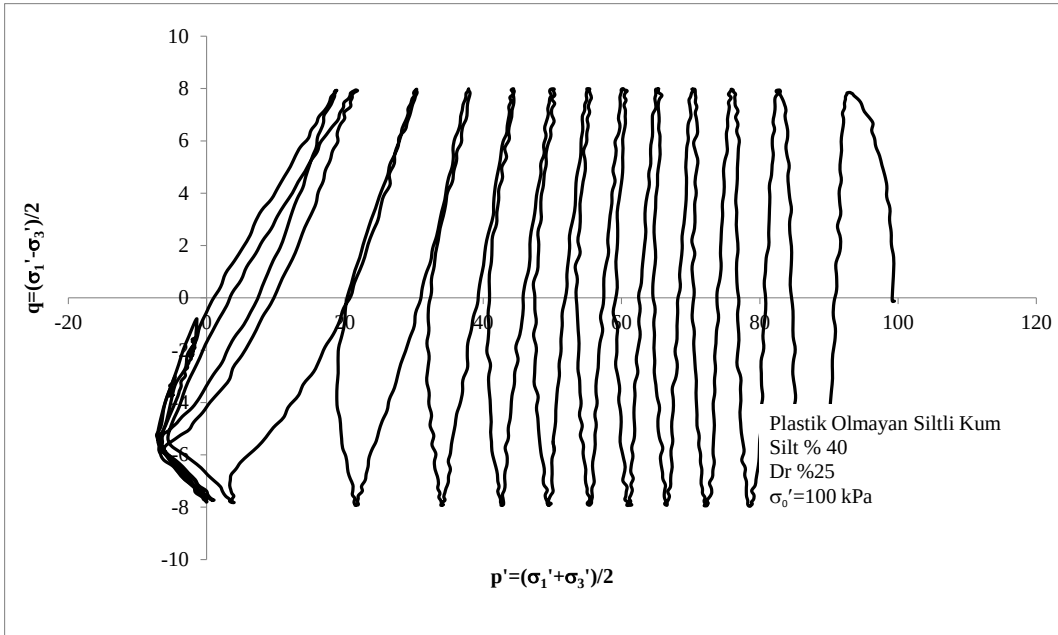
Şekil 6.5.a Plastik olmayan siltli kum zeminin boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı



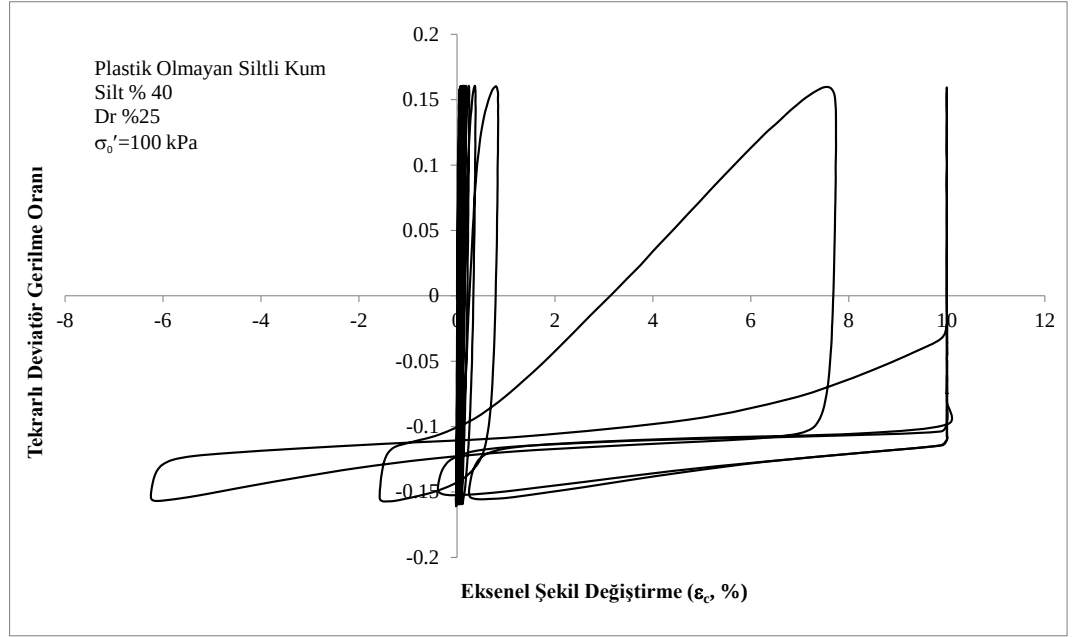
Şekil 6.5.b. Plastik olmayan siltli kum zeminin boşluk suyu basıncı oranı eksenel şekil değiştirme



Şekil 6.5.c Plastik olmayan siltli kum zeminin çevrim sayısı eksenel şekil değiştirme grafiği

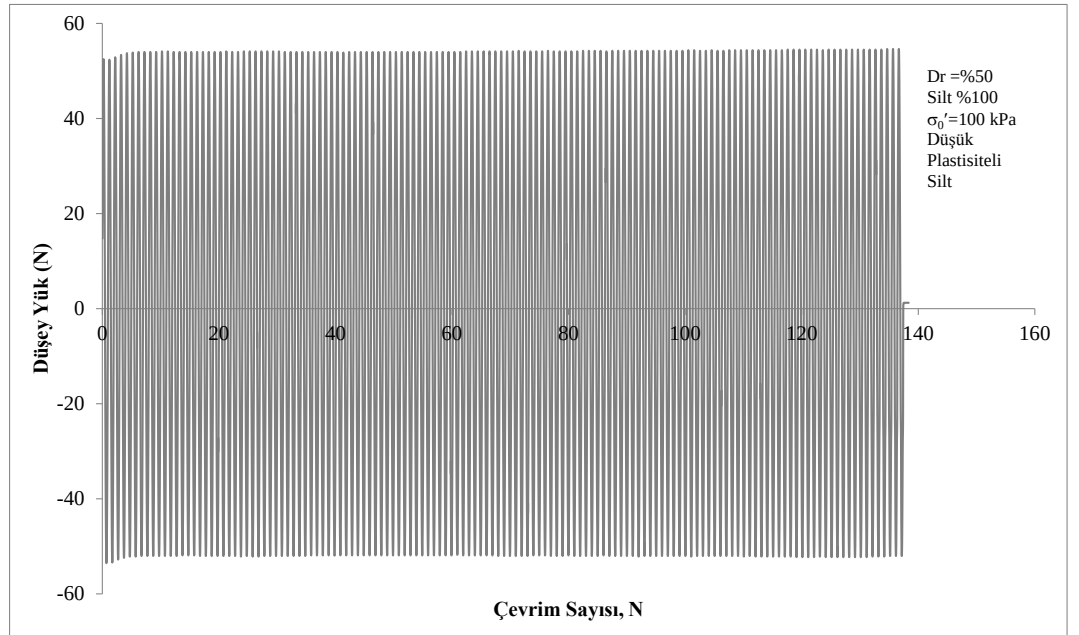
Şekil 6.5.d Plastik olmayan siltli kum zeminin p' ve u ile çevrim sayısı

Şekil 6.6.a Plastik olmayan siltli kum zeminin gerilme izi

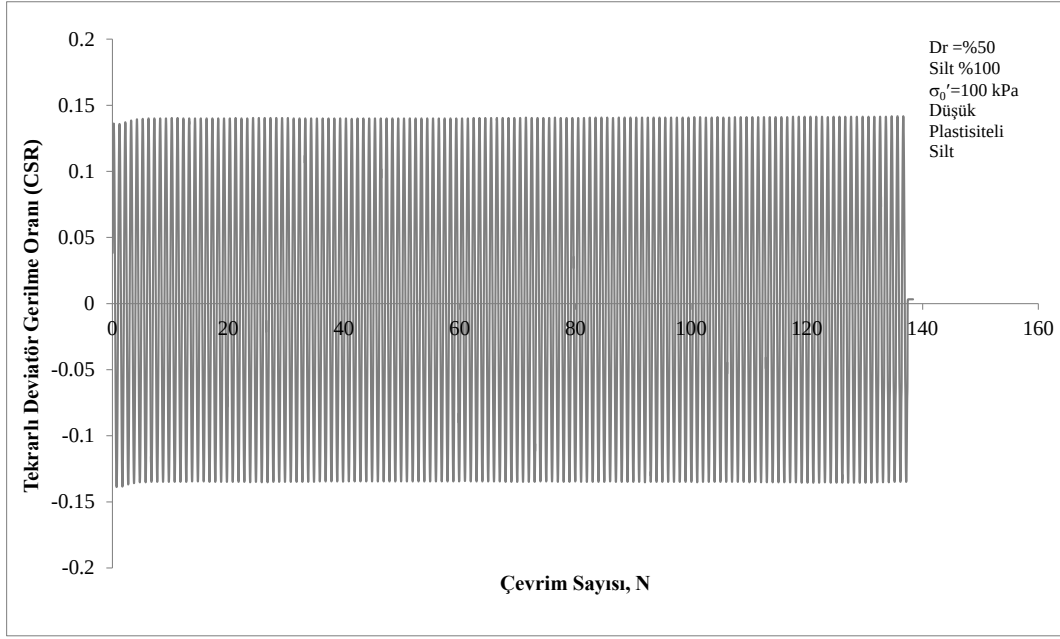


Şekil 6.6.b Plastik olmayan siltli kum zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı eksenel şekil değişirme grafiği

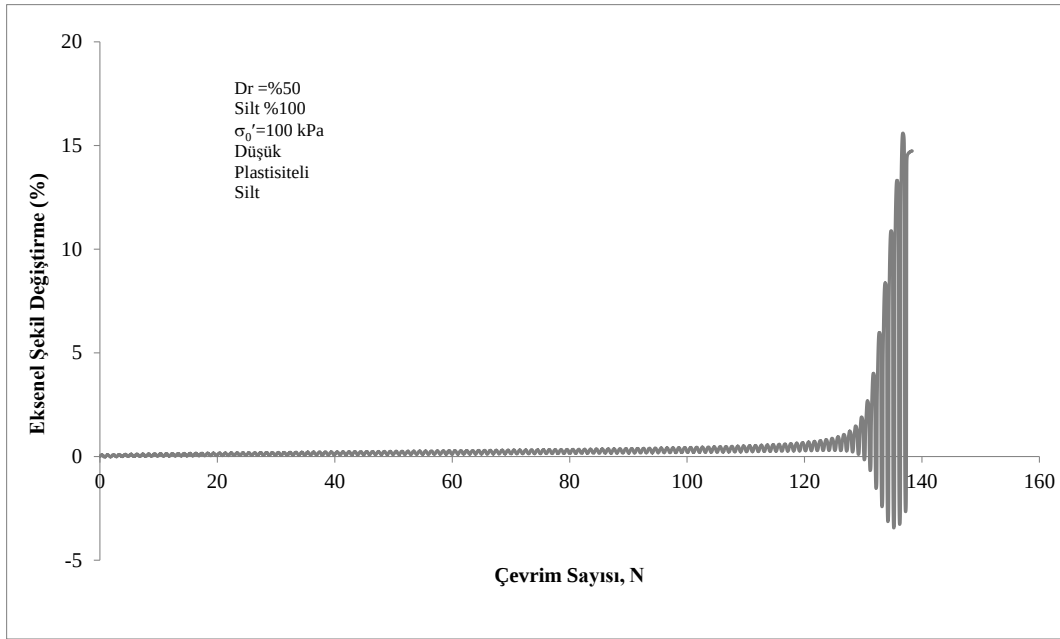
Yine düşük plastisiteli silt türü malzeme ile de değişik koşullarda bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Bu malzeme ile de numuneler benzer yöntemler ile hazırlanmış ve izotropik koşullarda konsolide edilen suya doymun numuneler drenajsız koşullarda tekrarlı yüklemelere maruz bırakılmıştır. Yapılan deneylerden birisine ait kayıtlar, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da görülmektedir.



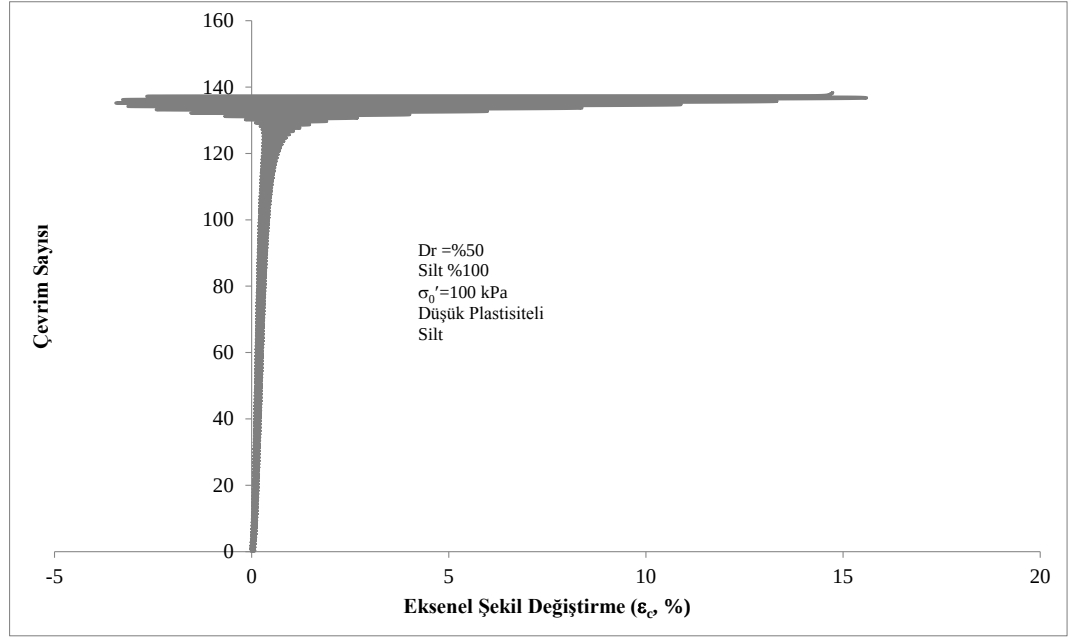
Şekil 6.7.a Düşük plastisiteli silt zeminin düşey yük çevrim sayısı



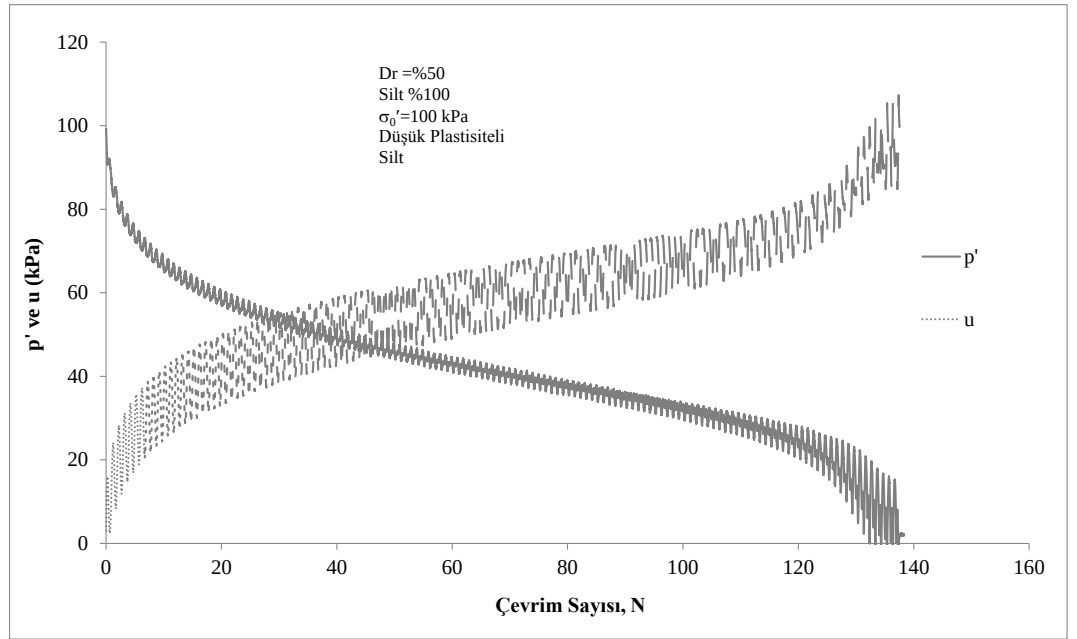
Şekil 6.7.b. Düşük plastisiteli silt zeminin tekrarlı deviator gerilme oranı çevrim sayısı



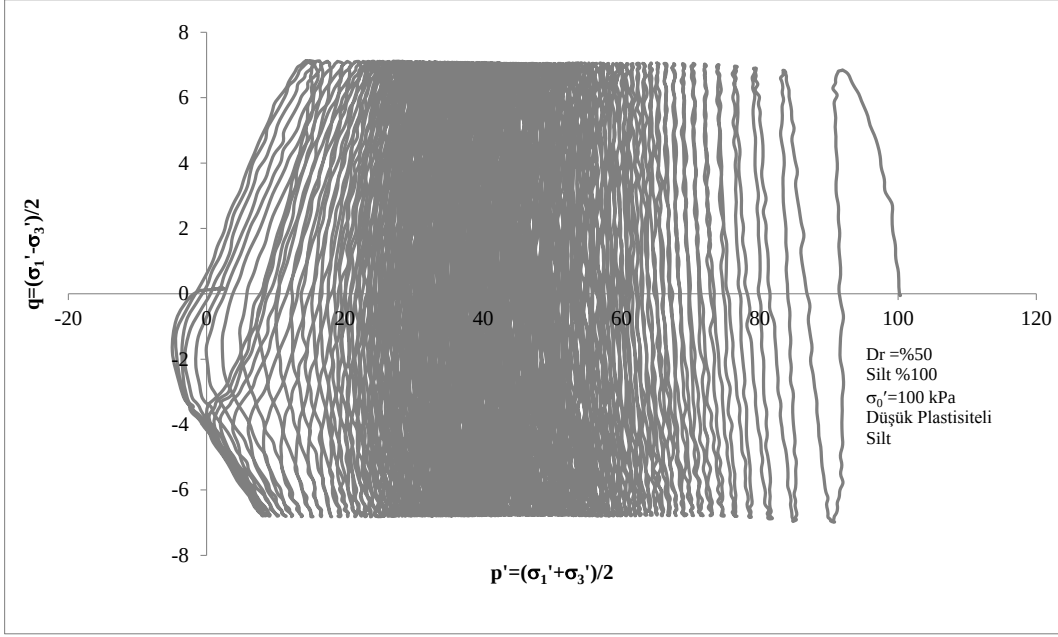
Şekil 6. 7.c Düşük plastisiteli silt zeminin eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı



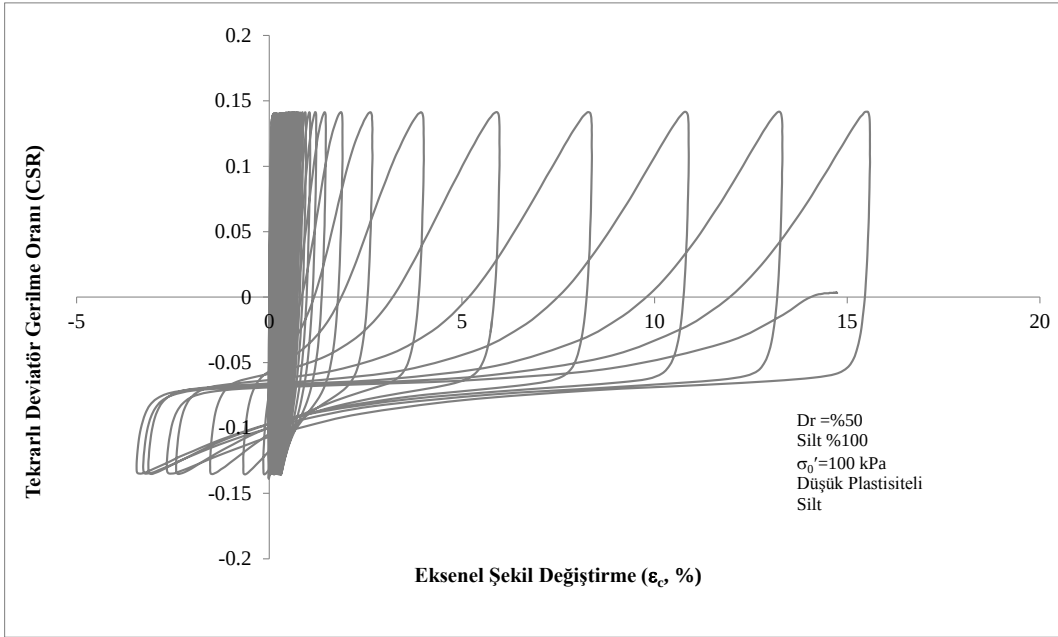
Şekil 6. 8.a. Düşük plastisiteli silt zeminin çevrim sayısı eksenel şekil değıştirme



Şekil 6. 8.b. Düşük plastisiteli silt zeminin p' ve u ile çevrim sayısı



Şekil 6. 9.a. Düşük plastisiteli silt zeminin gerilme izi davranışı



Şekil 6. 9.b Düşük plastisiteli silt zeminin tekrarlı deviatör gerilme oranı eksenel şekil değiştirme grafiği

Numune hazırlama yöntemlerindeki benzerlik dolayısı ile plastik olmayan siltli numunelerin dinamik özellikleri aynı rölatif sıkılığa sahip düşük plastisiteli siltli kumların dinamik özellikleri ile karşılaştırılabilmektedir. Böylece plastik olmayan siltli kumlar ile düşük plastisiteli siltli kumların dinamik özellikleri birbirleri ile mukayese edebilme olanağı elde edilmiştir.

6.2 Plastik Olmayan Siltli Kumlar ve Düşük Plastisiteli Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altında Mukavemet Özelliklerine Etki Eden Faktörler

Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranış özelliklerinin incelenmesinde hem arazi hem laboratuvar deneyleri, hem de teorik modellerden faydalanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilen laboratuvar deney aletlerinde gerek teknolojiye gelişmeler gerekse geliştirilen daha gerçekçi modeller sayesinde, hazırlanan numuneler mümkün olduğunca doğadaki koşullara uygun gerilmelere maruz bırakılmaya çalışılmakta ve uygulanan gerilmelerinde olabildiğince yine doğa gerçekleşen gerilmeleri temsil edebilme olanağına yaklaşılmıştır. Elbette zeminin çok fazlı karmaşık yapısı dolayısı ile zeminlerin gerilmeler altındaki dayanım ve deformasyon özellikleri konusundaki araştırmalar yapılan tüm gelişmelere rağmen halen en doğruya yakın olmaktan öteye gidememektedir.

Laboratuvar deneylerinin yürütülmesinde sonucu etkileyen birçok faktörden söz edebilmek mümkündür. Kullanılan deney aletinin sınır koşulları, seçilen numune hazırlama yöntemi, uygulanan yüklemenin türü ve numunede oluşturduğu gerilme koşulları, ölçümleme ve veri edinim sistemindeki farklılıklar yürütülen deneylerden elde edilecek sonuçlar üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Örneğin aynı zemin özellikleri ve deney koşullarında dinamik üç eksenli deney aleti ve burulmalı kesme deney aletinde yürütüldüğü belirtilen deney sonuçları birbirinden oldukça farklı çıkabilmektedir (Tatsuoka et al., 1986b). Bu farklılığın deney aletinin sınır koşulları ve numunede yaratılan gerilme koşullarındaki değişikliklerden kaynaklandığını söylemek mümkündür. Numune hazırlama yöntemlerindeki farklılıklarda deney sonuçlarını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Böylece laboratuvarda yapılacak çalışmanın amacı doğrultusunda sonuçları etkileyecek bu faktörlerin iyi bilinmesi ve amaca uygun şekilde kullanılması gerekmektedir.

Bu faktörlerin etkisi incelenirken sonucu etkileyecek diğer faktörlerin sabit kalmasına dikkat edilmelidir. Siltli kum numunelerin dinamik özellikleri karşılaştırılırken aynı numune hazırlama yöntemi ile benzer rölatif sıkılıktaki numuneler elde edilecek şekilde deney yapılmalıdır.

Sıvılaşma olayının oluşup oluşmamasına ve oluşum sürecinin gelişimine etki eden birçok zemin özelliği ve deneysel faktörlerin olduğu bilinir. Bu faktörlerden bazılarının sıvılaşma olayını ve sürecini ne şekilde etkilediği bu çalışmada yürütülen deneylerle incelenmiştir. Daha sonra siltli kum numunelerin

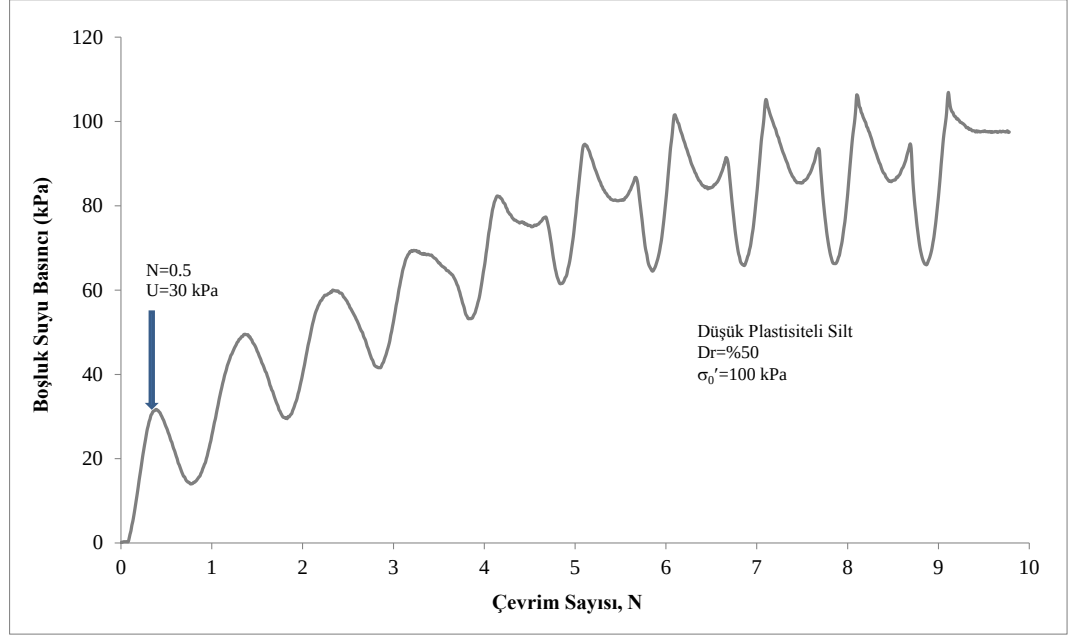
mukavemet özellikleri ile dinamik yükler altında boşluk suyu basıncı değişimleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

6.2.1 Çevrim Sayısının Etkisi

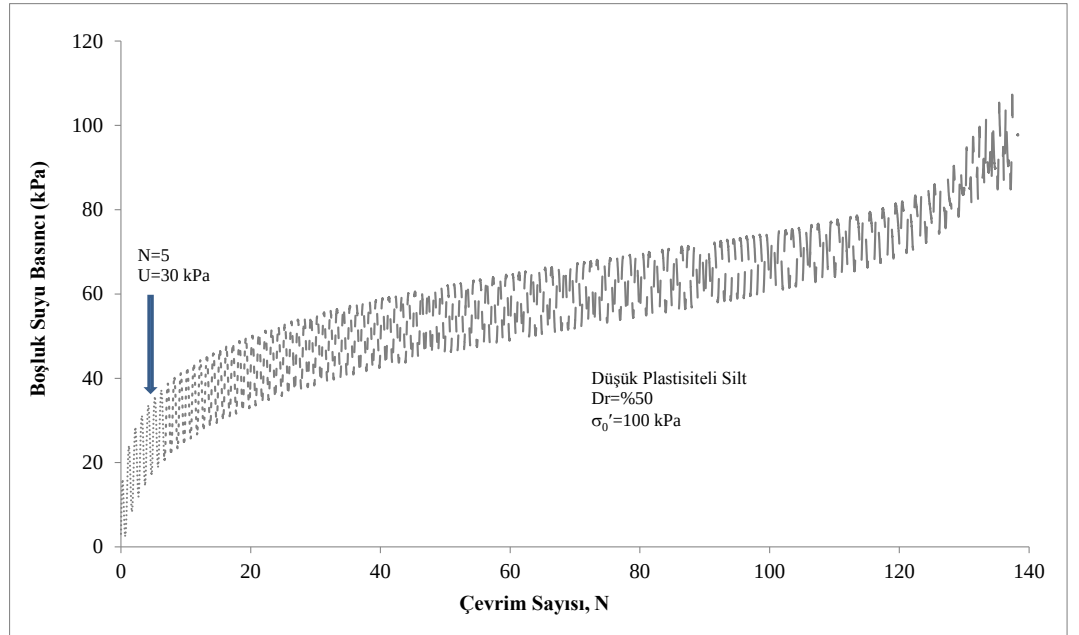
Zeminlerin etkisi altında bulundukları yüklere göre ortaya koydukları davranışlar birbirlerinden farklı olmaktadır. Dinamik yükleri statik yüklerden ayıran en temel farklılık dinamik yüklemenin çevrimsel olarak uygulanmasıdır. Bu nedenle tekrarlı yüklemelerdeki en önemli parametrelerden birisi de uygulanan yükün çevrim sayısı olmaktadır.

Zeminlerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerindeki değişikliklere neden olan tekrarlı yüklerin genlik değeri ve zeminin fiziksel özellikleri kadar yükün uygulanma süresinin ve çevrim sayısının da önem taşıdığı bilinmektedir. Suyu doymuş siltli kumlarda tekrarlı yükler dolayısı ile ortaya çıkan mukavemet kaybı veya sıvılaşma olayı uygulanan gerilmenin çevrim sayısı miktarı ile çok yakından ilişkilidir. Zeminler üzerinde dinamik etkiler oluşturan depremlerin de belirli sürelerle etkisini gösterdiği düşünülürse özellikle depremin sebep olduğu mukavemet kaybı incelenirken uygulanan yükün çevrim sayısının etkisinin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Zeminlerde tekrarlı yükleme durumunda deformasyon yumuşaması başlangıcından önce gerilme koşullarında ve birim şekil değiştirmelerde çok büyük değişiklikler görülmez. Ancak belirli yükleme koşullarında suya doymuş zeminlerde boşluk suyu basıncının çevrim sayısının ilerlemesi ile beraber arttığı görülmektedir. Özellikle boşluk suyu basıncındaki toplam artışın ilk çeyreğinin tekrarlı yüklemelerin hemen başında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu olay Şekil 6.10'da açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6. 10.a Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi



Şekil 6. 10.b Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi

Tekrarlı yüklemelerin ilerleyişi ile beraber bu başlangıçtaki hızlı artış belirli bir şekilde yavaşlamaktadır. Bu periyotta uygulanan tekrarlı yüklerin gerilme izleri arasındaki boşluklarının gittikçe azaldığı görülmektedir (Şekil 6.10.a; Şekil 6.10.b). Bu olayın tekrarlı yüklere maruz zeminlerin gevşek yapıdaki zemin danelerinin ilave yeni temas noktaları oluşturarak bölgesel duyarsızlıkların

ortadan kaldırılması ile meydana gelen rijitlik etkisine bağılı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte artan çevrim sayıları ile beraber gerilme izleri kritik bir gerilme oranına yaklaştıkça boşluk suyu basıncı artışında yeniden bir hızlanma görülür. Zeminin kırılma noktasına yaklaşıldıkça da boşluk suyu basıncında keskin bir artış oluşmaktadır. Zaten tekrarlı yükler altındaki zeminlerde deformasyon yumuşamasının belirgin bir şekilde başlangıcı boşluk suyu basıncında ve birim şekil değiştirme genliklerindeki bu keskin artışla kendini göstermektedir. Yapılan deneyler sonucunda plastik olmayan silt içeren siltli kumlarla yapılan deneylerde görülmektedir (Şekil 6.5). Ancak düşük plastisiteli siltli kumlar ile yapılan deneylerde daha farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. İlk çevrimlerde boşluk suyu basıncındaki hızlı artışın numunede oluşan deformasyonların artışı ile beraber hızını gittikçe azaltmakta olduğu görülmektedir (Şekil 6.8).

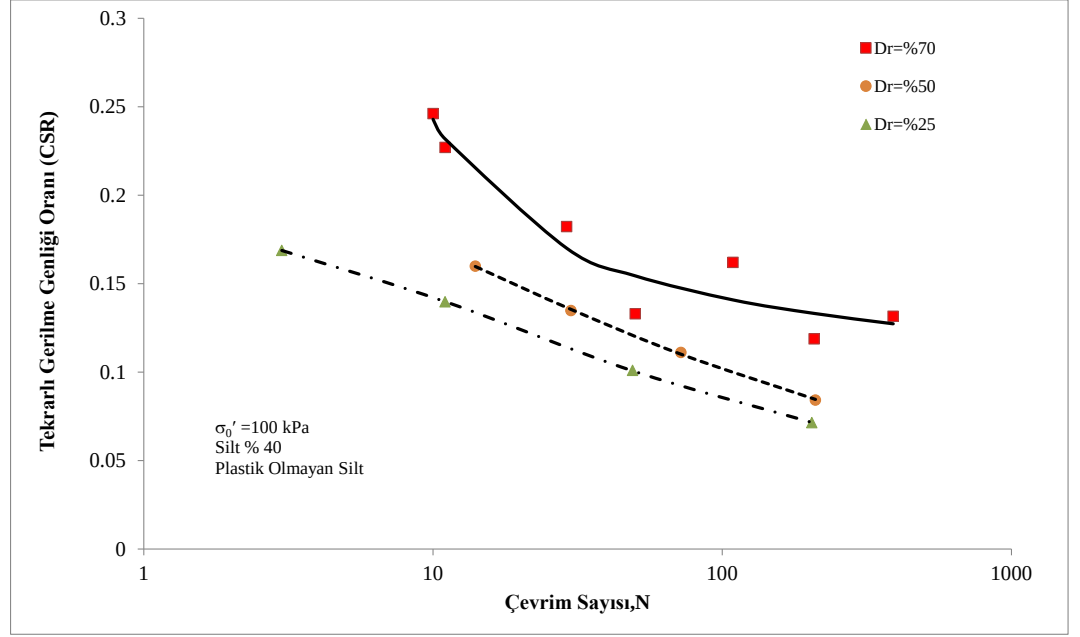
6.2.2 Rölatif Sıkılığın Etkisi

Tekrarlı yükler altında suya doymuş zeminlerde oluşan birim şekil değiştirme genliklerindeki değişim Şekil 6.1’de görülen artışa benzer bir şekilde gelişmektedir. Belirli bir genlikteki üniform kayma gerilmelerine maruz zemin içerisinde artan boşluk suyu basınçları ile beraber efektif gerilme değerinde meydana gelen azalmaların zeminin mukavemet özelliklerindeki etkisi birim şekil değiştirmelerin ani bir şekilde artışı ile kendini göstermektedir.

Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, statik yükleme durumunda olduğu gibi, belirleyen en temel faktörlerden biri zeminin sıkılık oranıdır. Kohezyonsuz zeminlerin yapısal davranışlarını rölatif sıkılığa bağılı olarak açıklamak alışlagelmiş bir uygulamadır. Zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı tekrarlı yükler altında zeminde oluşacak mukavemet kaybının süreci ve şeklini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Literatürde (Seed, 1979), ve (Ishihara, et al., 1972) sıvılaşma konusunda farklı türde zeminlerde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda sıvılaşma olasılığının büyük ölçüde rölatif sıkılığa bağılı olduğunu göstermişlerdir.

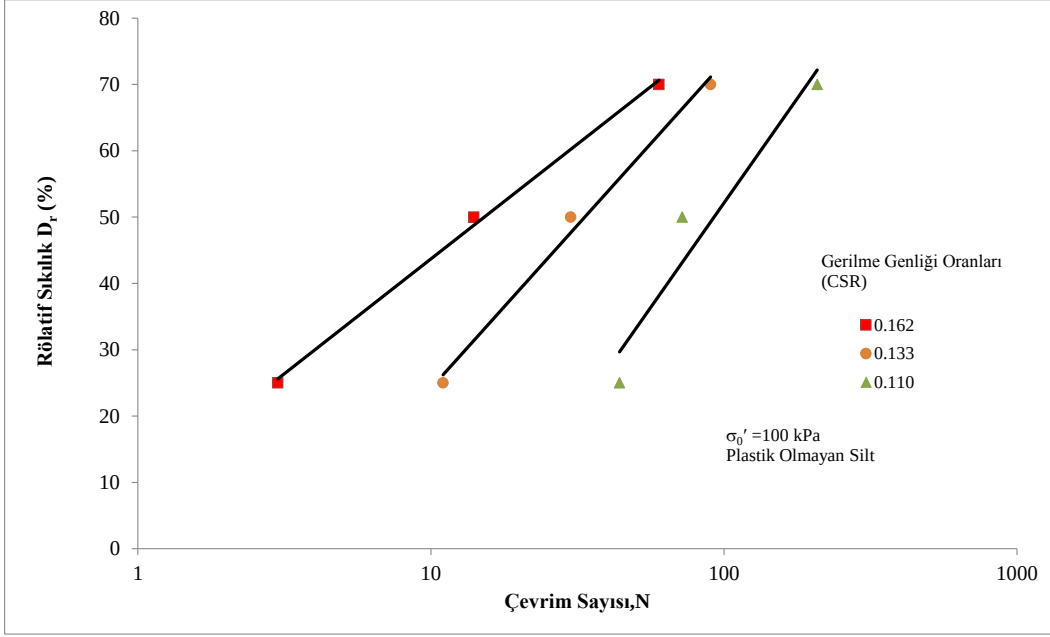
Farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip ve izotropik koşullarda konsolide edilmiş suya doymuş plastik olmayan silt kum karışımlarının drenajsız koşullarda belli bir üniform tekrarlı gerilme değerinde kesilmeye çalışıldığında sıvılaşmaya ulaşması için gereken çevrim sayıları Şekil 6.11’de gösterilmektedir. Burada rölatif sıkılığın plastik olmayan silt kum karışımı zeminlerin sıvılaşabilirlikleri üzerindeki etkisini görebilmek mümkündür. Bu sonuca göre rölatif sıkılıktaki azalma ile plastik olmayan silt kum karışımı zeminin sıvılaşmaya ulaşmasının

daha az bir çevrim sayısı gerektirdiği görülmektedir. Şekil 6.11’de de görüldüğü gibi rölatif sıklık değerinin artması ile sıvılaşmaya ulaşmak için gereken tekrar sayısı ve uygulanan gerilmenin arttırılması gerekmektedir. Belirlenen bu etki daha önce literatürde yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Ishihara, et al., 1975), (Tatsuoka, et al., 1986c).



Şekil 6. 11 Farklı tekrarlı gerilme genliğine maruz plastik olmayan siltli kumların sıvılaşmaya neden olan rölatif sıklık değerlerindeki değişim

Yapılan deneylerde zeminlerin sıvılaşma özelliğine ulaşp ulaşmadığına ya oluşan birim şekil değiştirme genliğinin çift yönlü %10 değerine eriştiğine ya da artan ilave boşluk suyu basıncının başlangıç çevre gerilmesinin %95'ine eşit olduğuna bakılarak karar verilmiştir (JGS 0542-2000).



Şekil 6.12 Farklı rölatif sıklık değerlerine sahip plastik olmayan siltli kumların sıvılaşmaya neden olan CSR değerlerindeki değişim

Şekil 6.12'de farklı üniform tekrarlı gerilme değerlerinde aynı rölatif sıklıklara sahip plastik olmayan siltli kumların sıvılaşmaya neden olan çevrim sayıları ile ilişkili elde edilen eğriler görülmektedir. Bu şekilde sıvılaşmaya veya deformasyon yumuşamasına ulaşırken gerekli olan çevrim sayısının uygulanan gerilme oranına karşı çok hassas bir şekilde değiştiği görülmektedir. Deprem süresince meydana gelen büyük kayma gerilme genliklerinin 5-20 çevrim arasında uygulandığı düşünülürse bu hassasiyetin deprem yüklerinin neden olduğu büyük şekil değiştirmelerin tahmini için geliştirilecek pratik yöntemlere belirgin bir engel olduğu söylenebilir.

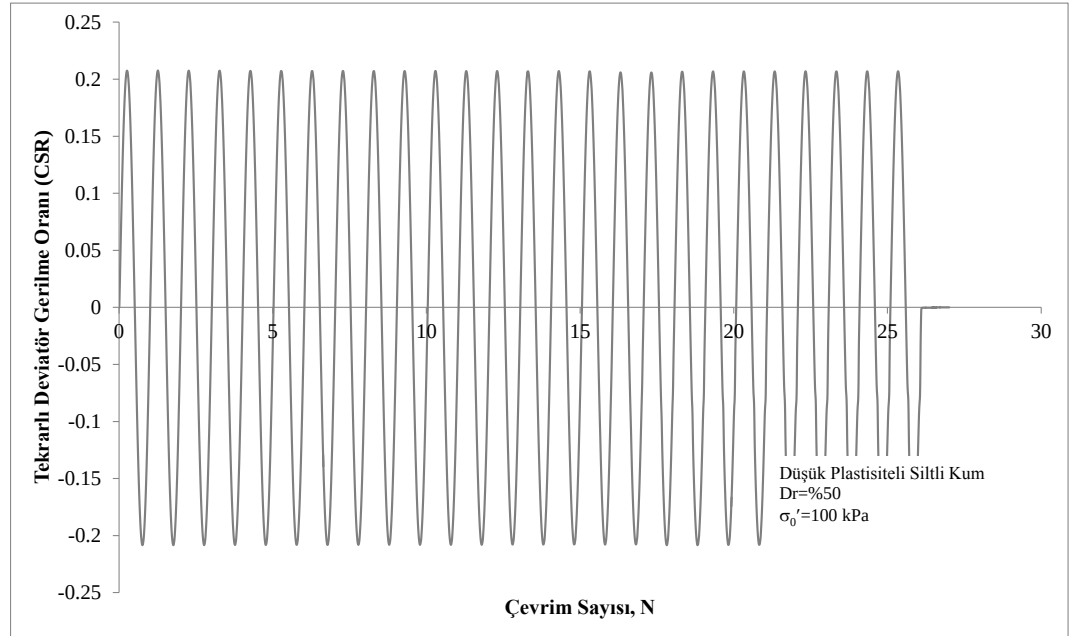
6.2.3 Çevre Basıncının Etkisi

Zeminlerin sıvılaşma davranışına etki eden deneysel parametrelerden birisi de farklı çevre basıncı değerleri olduğu bilinmektedir. Zeminlerin doğada aynı çevre gerilmesi altında olmadığı düşünülürse bu farklılığın tekrarlı yükler altındaki mukavemet kaybı olayını ne şekilde etkilediğinin incelenmesi gerekir. Değişik zemin türleri için farklı deney aletleri kullanılarak çevre basıncının etkisi laboratuvarında (Yoshimi, et al., 1989), (Bhatia, et al., 1985), (Hyodo, et al., 1998) tarafından incelenmiştir.

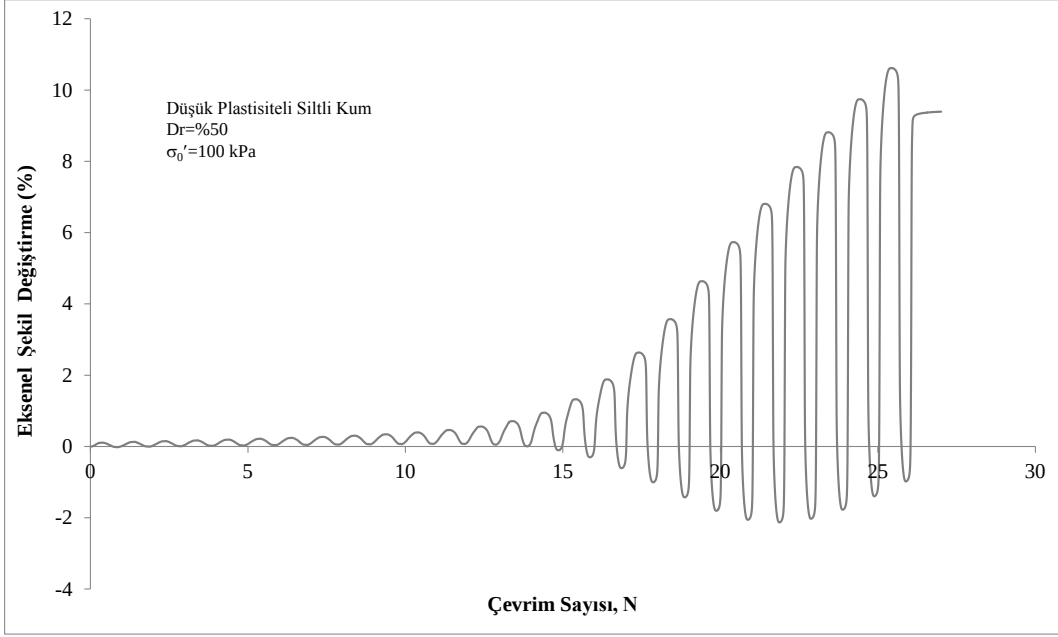
Aynı deney yöntemi kullanılarak izotropik koşullarda farklı çevre gerilmelerinde konsolide edilmiş siltli kum numuneleri üzerinde belirli bir

genlikte üniform tekrarlı gerilmeler uygulanarak sıvılaşması için gereken çevrim sayıları belirlenmiştir. Bu koşullarda yürütülen deneylerden birisine ait deney kayıtları Şekil 6.13’de görülmektedir.

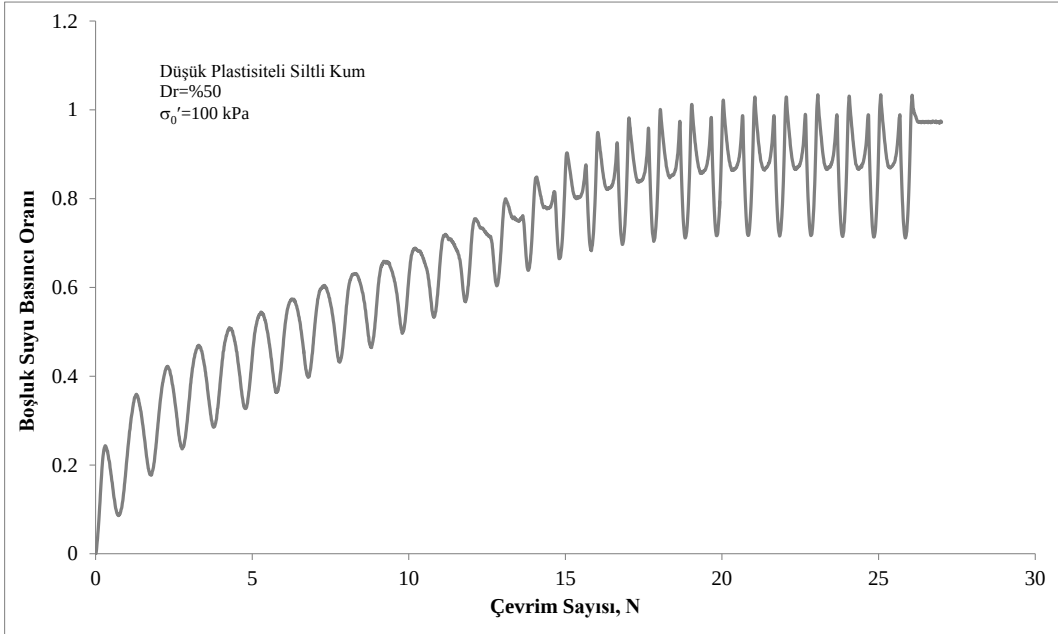
Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ile çevre gerilmesinin siltli kum zeminlerin sıvılaşma özelliklerine olan etkisini gösteren Şekil 6.14’deki değişim eğrileri elde edilebilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi çevre basıncındaki artış siltli kum zeminlerin aynı tekrarlı gerilme genliğinde daha küçük çevrim sayılarında veya aynı çevrim sayısında daha küçük genlikte kayma gerilmesinde sıvılaşmasına neden olmaktadır. Yani artan çevre basınçları siltli kumların sıvılaşma direncini azaltmaktadır. Şekil 6.14’de 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için sıvılaşma değeri 20 çevrime karşılık geldiği düşünüldüğünde 50 kPa efektif çevre gerilmesi altında tekrarlı gerilme genliği oranının (CSR) değerinin 0.167, 100 kPa efektif çevre gerilmesi altında CSR değerinin 0.144 ve 150 kPa efektif çevre gerilmesi altında ise CSR değerinin 0.129 olarak bulunmuştur. Bu durum aynı rölatif sıkılıkta artan çevre basınçlarında gereken tekrarlı gerilme genliği oranı değerinin daha az olduğudur.



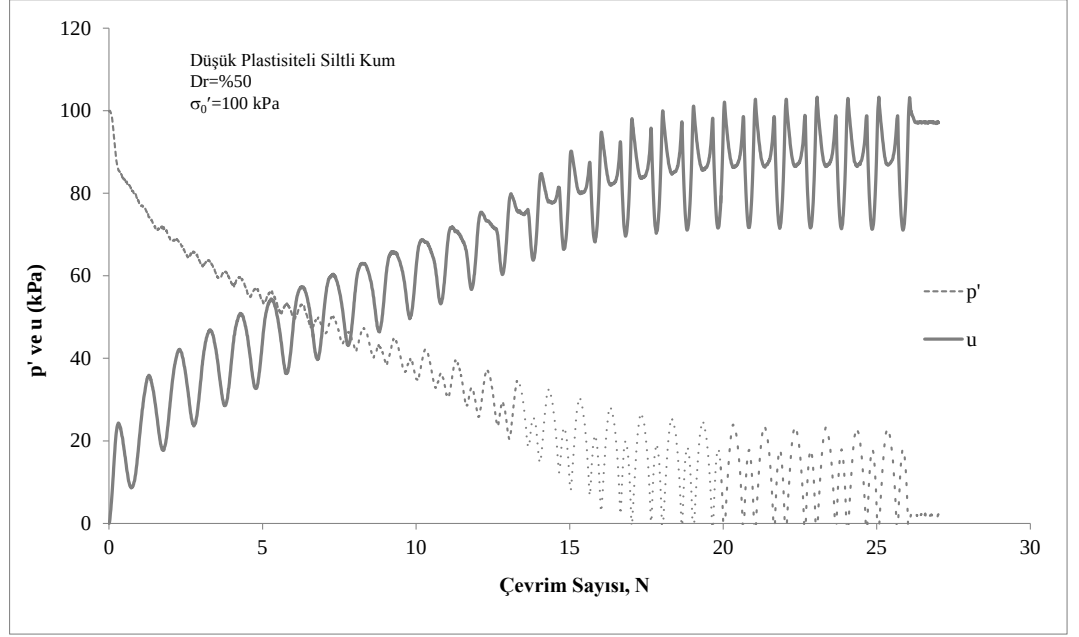
Şekil 6. 13.a İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden tekrarlı deviatör gerilme oranı çevrim sayısı



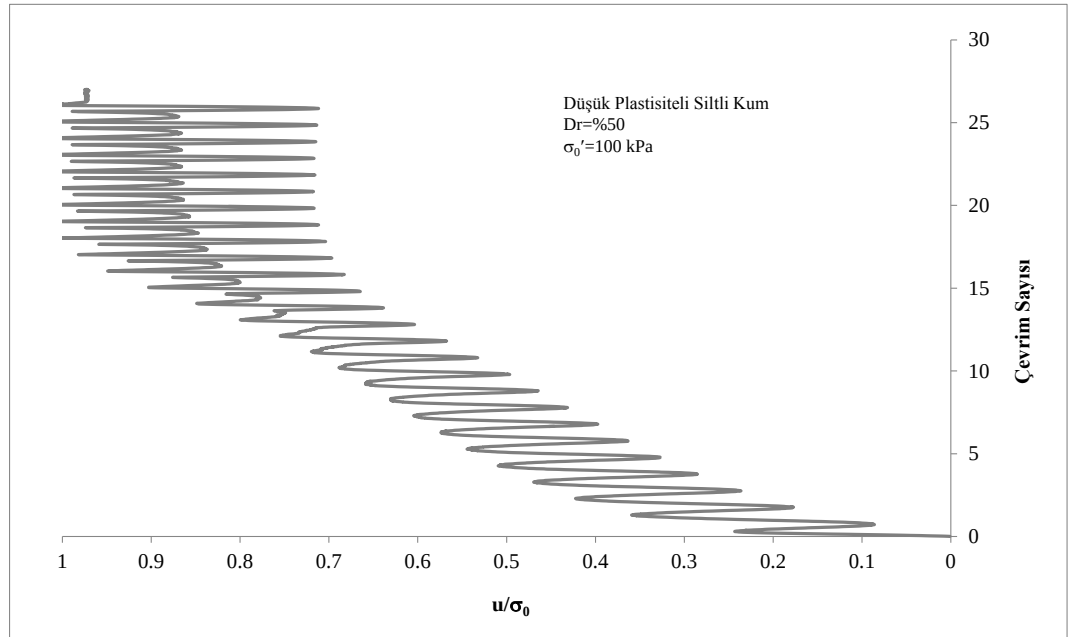
Şekil 6. 13.b İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden eksenel şekil değişirme çevrim sayısı



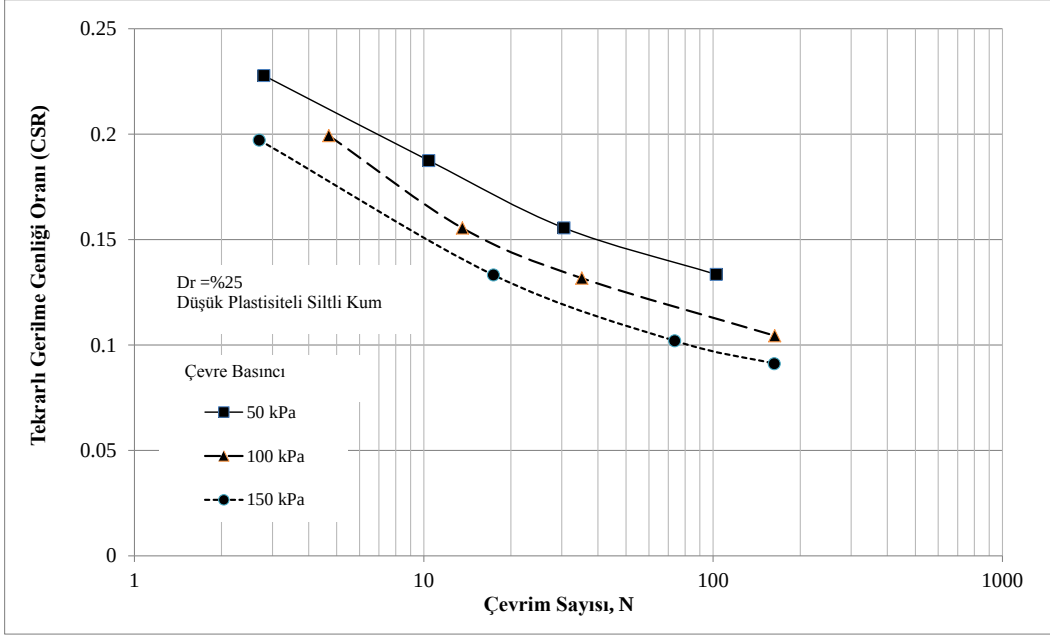
Şekil 6. 13.c İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı



Şekil 6. 13.d İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden p' ve u çevrim sayısı

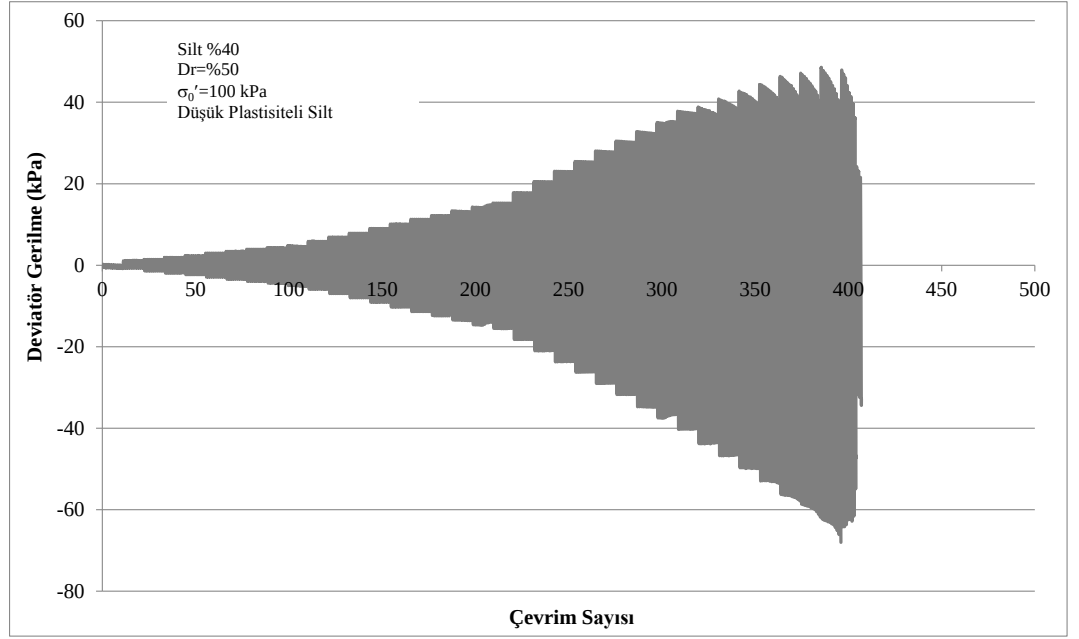


Şekil 6. 13.e İzotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerle gerçekleştirilen deneylerden çevrim sayısı normalize edilmiş boşluk suyu basıncı

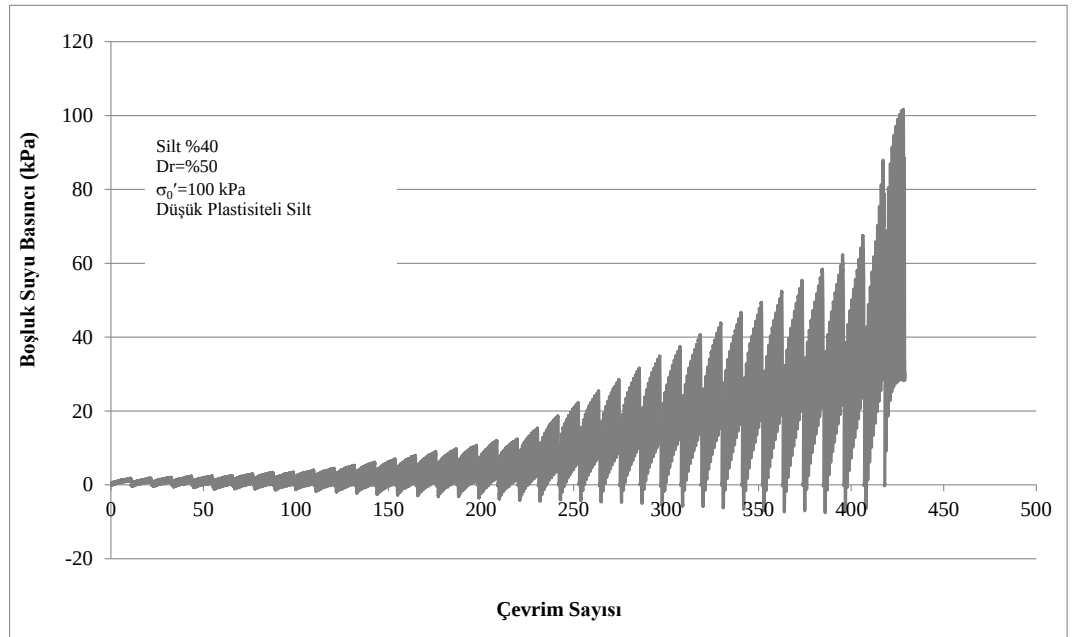


Şekil 6.14 Farklı çevre gerilmelerinde izotropik konsolidasyon koşulları altında üniform tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin çevre basıncı etkisi

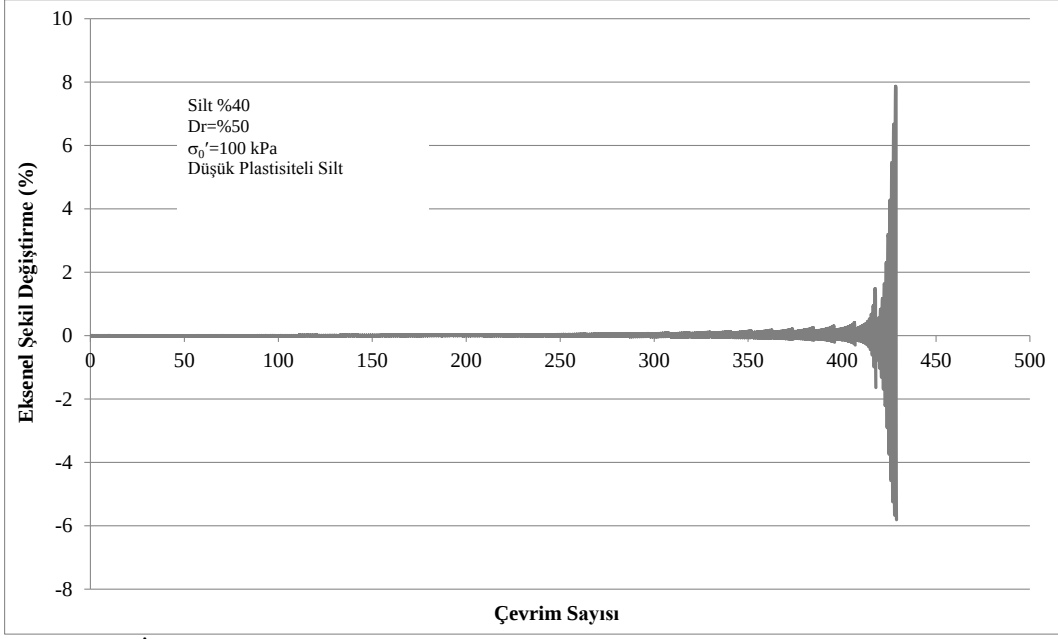
Ayrıca izotropik koşullarda fakat artan gerilme genlikleri uygulanarak yürütülen deneylerde de farklı çevre basınçlarının sıvılaşma özelliğine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Bu deneylerde artan gerilme genliklerinin artım oranları yaklaşık olarak eşit tutulmuştur. Bu deneylerden birisine ait deney kayıtları Şekil 6.15’de görülmektedir. Bu tür gerilme koşullarında çevre gerilmesinin sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ilişkinin de üniform yükleme yapılan deneylerde elde edilen ilişkiye benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.15.a İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerden deviatör gerilme çevrim sayısı



Şekil 6.15.b İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerden boşluk suyu basıncı çevrim sayısı



Şekil 6.15.c İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerden eksenel şekil değiştirme çevrim sayısı

6.2.4 Silt İçeriğinin Etkisi

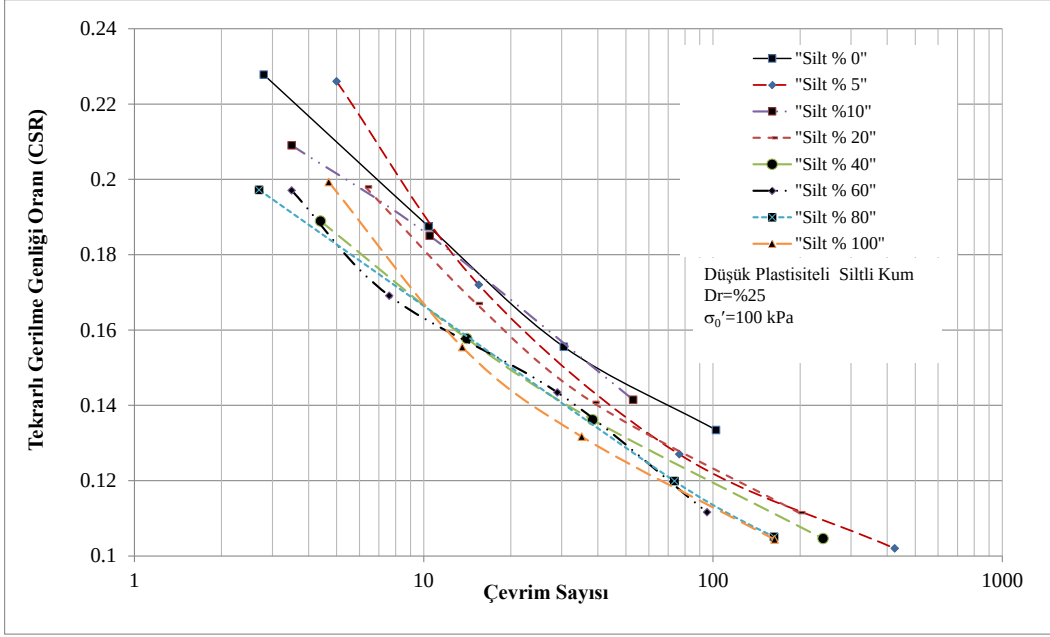
İnce daneli veya bir başka deyişle kohezyonlu zeminlerin varlığının, granüler zeminlerin gerek statik ve gerekse dinamik davranış özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu etkinin büyüklüğü ince malzemenin kendi özelliklerine de oldukça bağlıdır. Dolayısı ile bu etki araştırılırken öncelikle ince daneli zeminlerin kendisine ait fiziksel ve endeks özelliklerinin ortaya konması gerekir.

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneylerin bir kısmı plastik olmayan siltler ile değişik silt içeriğine sahip malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen ikinci kısım deneyler ise düşük plastisiteli siltler ile gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin ve yürütülen deneylerin genel özellikleri dördüncü bölümde verilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneylerle kumlu zeminde bulunan farklı oranlardaki silt içeriğinin farklı koşullar altında zeminin dinamik davranış özelliklerine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda bu malzemelerin davranışları ile plastik olmayan siltler ve düşük plastisiteli siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının karşılaştırılabilmesi mümkün olmuştur.

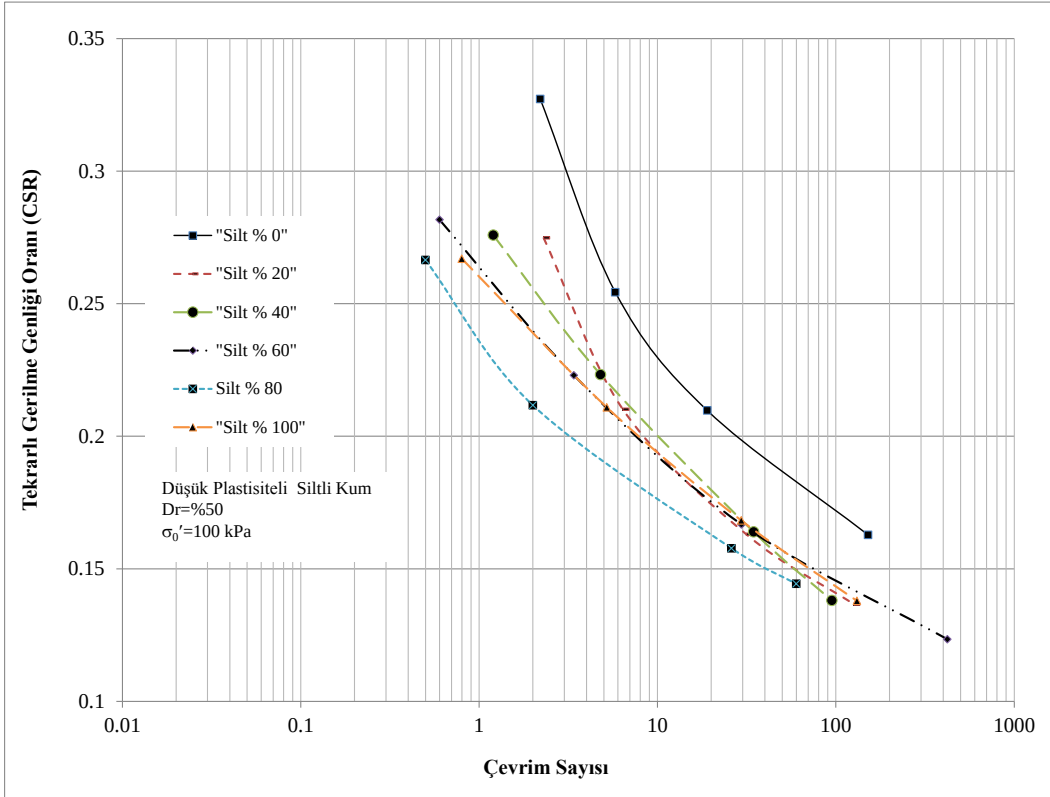
Daha önce de belirtildiği gibi silt içeriğinin kumların dinamik davranışına olan etkisi konusunda günümüze kadar yapılan çalışmalarda tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Literatürdeki genel eğilim plastik olmayan ince malzeme

içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı, plastik ince malzemenin ise tam tersine kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı yönündedir. Ancak siltli kumların fiziksel ve endeks özellikleri bu etkinin yönünü ve büyüklüğünü değiştirmektedir.

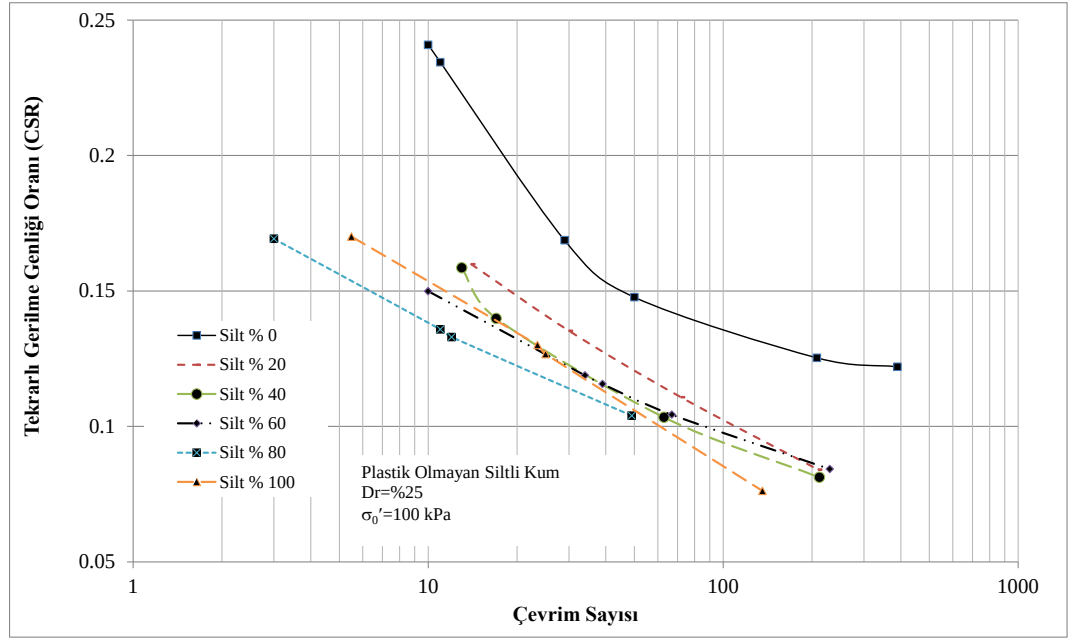
Çalışmada ilk olarak plastik olmayan siltli kum numuneleri ile değişik oranlardaki (F.C. %0, 20, 40, 60, 80, 100), silt içeriklerinde dinamik üç eksenli deney aleti ile drenajsız koşullarda ve gerilme kontrollü olarak farklı başlangıç koşulları altında ve gerilme genliklerinde deneyler yürütülmüştür. Bu malzemeler ile izotropik koşullarda gerçekleştirilen deneylerden birisine ait kayıtlar Şekil 6.3’de görülmektedir. Çalışma kapsamında ikinci deney seti düşük plastisiteli siltli kumlar ile gerçekleştirilmiştir. Düşük plastisiteli siltli kumların değişik oranlardaki (F.C. %0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100), silt içeriklerinde dinamik üç eksenli deney aleti ile drenajsız koşullarda ve gerilme kontrollü olarak farklı başlangıç koşulları altında ve gerilme genliklerinde deneyler yürütülmüştür. Şekil 6.16’da %25 rölatif sıklıkta, farklı silt içeriği oranlarında ve farklı tekrarlı gerilme genliklerinde yürütülen deneylerle sıvılaşmaya neden olan çevrim sayılarına göre silt içeriğinin sıvılaşmaya etkisi izotropik koşullarda konsolide edilen numuneler ile incelenmiştir. Tekrarlı gerilme genliği oranı çevrim sayısı ilişkisinde %0 ile %20 arasındaki silt içeriklerinde kum tanelerinin özellikleri daha baskın olduğu için, sıvılaşma davranışı kaba danelerin kontrolü altındadır. Ancak %40 silt içeriğinden itibaren sıvılaşma davranışı değişmiştir. Silt içeriği %40 ile %100 arasında iken silt danelerinin etkisi daha belirgindir. Artık sıvılaşma davranışında ince dane oranının daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.16’da 20 çevrime karşılık gelen sıvılaşma davranışları incelendiğinde elde edilen CSR değerleri için, silt içeriği %0-20 arasında ortalama CSR değeri 0.17 civarındadır. Silt içeriği %40 -100 arasında ise bu CSR değeri 0.15 olduğu gözlemlenmiştir. Yine Şekil 6.17’de , %50 rölatif sıklık değerlerinde ve 100 kPa altında izotropik koşullarda, düşük plastisiteli siltli kumlar için yapılan sıvılaşma deneyleri sonucu elde edilen tekrarlı gerilme genliği oranı çevrim sayısı ilişkisi gösterilmiştir. Burada 20 çevrime karşılık gelen, temiz kum için elde edilen tekrarlı gerilme genliği oranı değerinin 0.21’dir. Silt içeriğinde artış ile birlikte CSR değerinde belirgin bir azalma görülmüştür. Bu durumda 20 çevrim için silt içeriğindeki artış, sıvılaşmayı kolaylaştıracak şekilde bir etki göstermiştir. Şekil 6.18’de izotropik koşullarda konsolide edilmiş belli oranlarda silt içeriğine sahip plastik olmayan siltli kumlar için dinamik üç eksenli deneylere ait sıvılaşma çevrim sayılarının uygulanan gerilme genliği ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Farklı silt içeriğine sahip ve izotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %25 rölatif sıklıkta sıvılaşma çevrim sayıları



Şekil 6.17. Farklı silt içeriğine sahip ve izotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %50 rölatif sıklıkta sıvılaşma çevrim sayıları



Şekil 6.18 Farklı silt içeriğine sahip ve izotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip plastik olmayan siltli kum zeminlerin sıvılaşma çevrim sayıları

Şekil 6.18’de verilen değişim eğrileri incelendiğinde plastik olmayan siltli kum ile izotropik koşullarda gerçekleştirilen deneylerde silt içeriğindeki artışın numunenin sıvılaşmaya karşı direncini azalttığı görülmektedir. Plastik olmayan siltlerin bu davranışının geçmiş çalışmalarda belirlenen genel eğilime uygun olduğu söylenir.

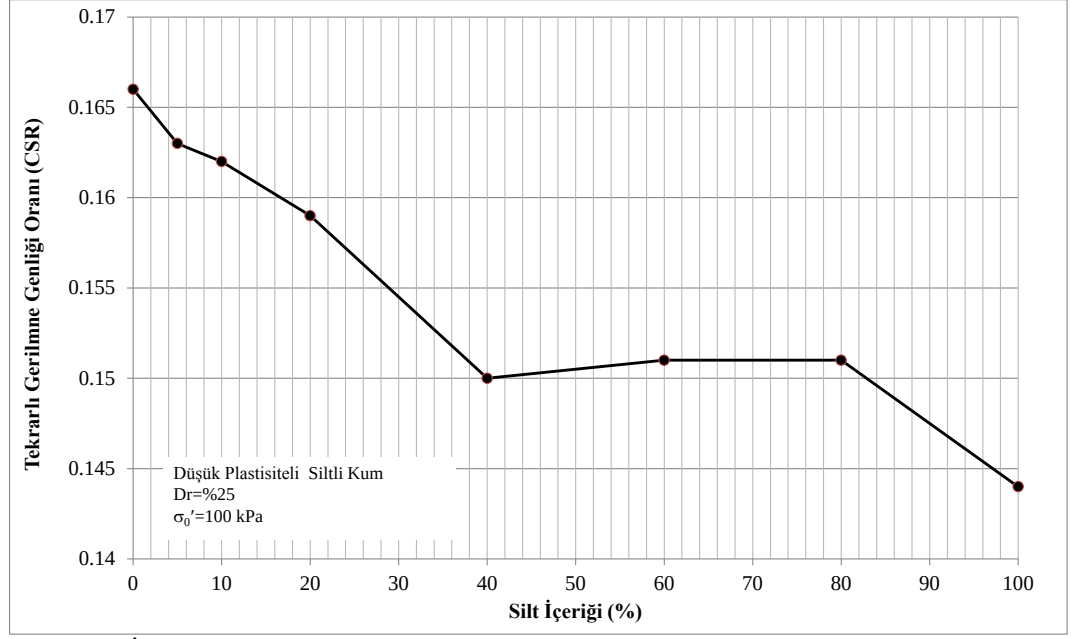
Ancak Şekil 6.16 ve 6.17’de ise verilen değişim eğrileri incelendiğinde düşük plastisiteli siltli kumların sıvılaşma davranışlarının, plastik olmayan siltli kumlarda çok daha farklı olduğu görülmüştür. Burada düşük plastisiteli siltli kumların izotropik koşullarda gerçekleştirilen deneylerde silt içeriğindeki artışın belirli bir eşik değere kadar sıvılaşmaya karşı direnci azalttığı, bu eşik değerden sonra ise sıvılaşmaya karşı direncin arttığı görülmüştür.

Şekil 6.18’de plastik olmayan siltli kum malzemesinin değişik silt oranlarında (F.C. %0, 20, 40, 60, 80, 100), izotropik koşullarda ve üniform tekrarlı yüklerle gerçekleştirilen deneylerdeki sıvılaşmaya neden olabilecek 20. çevrimlere ait tekrarlı gerilme genliği (CSR) değerleri silt içeriğine bağlı olarak birbirleri ile karşılaştırılabilmektedir. Bir başka deyişle bu şekilde silt içeriğinin farklı oranlarının sıvılaşmaya sebep olabilecek gerilme genliklerinde oluşturduğu değişiklik açıkça görülmektedir. Buna göre plastik olmayan siltlerde %0’dan %80’e kadar artan oranlardaki silt miktarı sıvılaşma direncini sürekli olarak

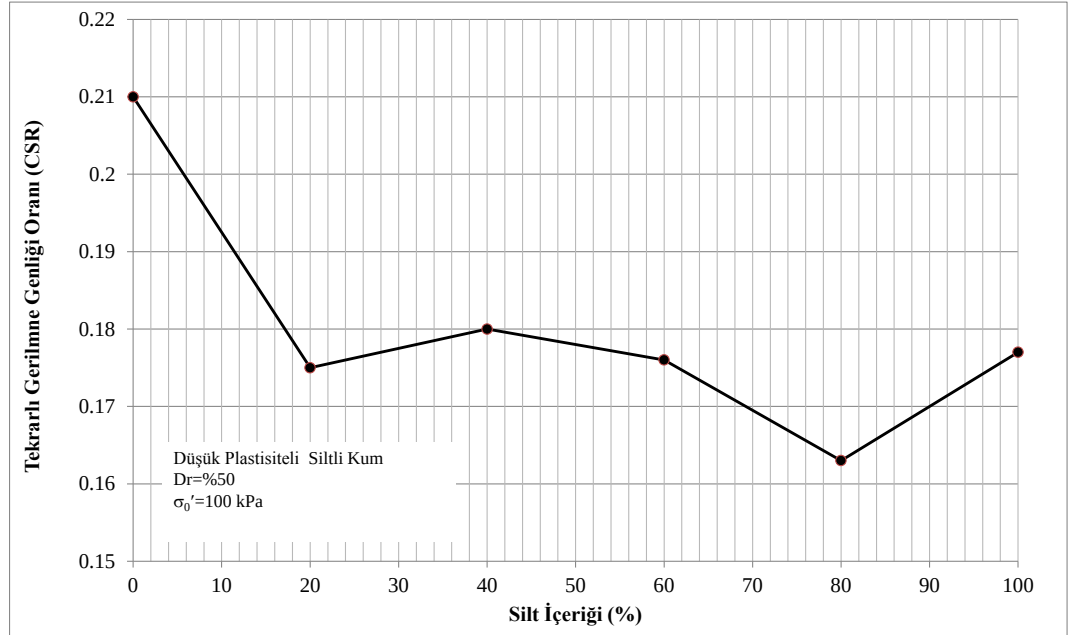
arttırmıştır. Bu sonuç geçmişte yapılan ve plastik olmayan siltli zeminlerde gerçekleştirilen deney sonuçları ile uyumluluk sağlamaktadır.

Şekil 6.17’de düşük plastisiteli siltli kum malzemesinin değişik silt oranlarında (F.C. %0, 20, 40, 60, 80, 100), izotropik koşullarda ve üniform tekrarlı yüklerle gerçekleştirilen deneylerdeki sıvılaşmaya neden olabilecek 20. çevrimlere ait tekrarlı gerilme genliği (CSR) değerleri silt içeriğine bağlı olarak birbirleri ile karşılaştırılabilmektedir. Buna göre düşük plastisiteli siltlerde %0’dan %80’e kadar artan oranlardaki silt miktarı sıvılaşma direncini eşik değere kadar arttırdığı, eşik değerden sonra azalttığı görülmektedir. Bu sonuç geçmişte yapılan ve plastik olmayan siltli zeminlerde gerçekleştirilen deney sonuçları ile uyumluluk sağlamaktadır.

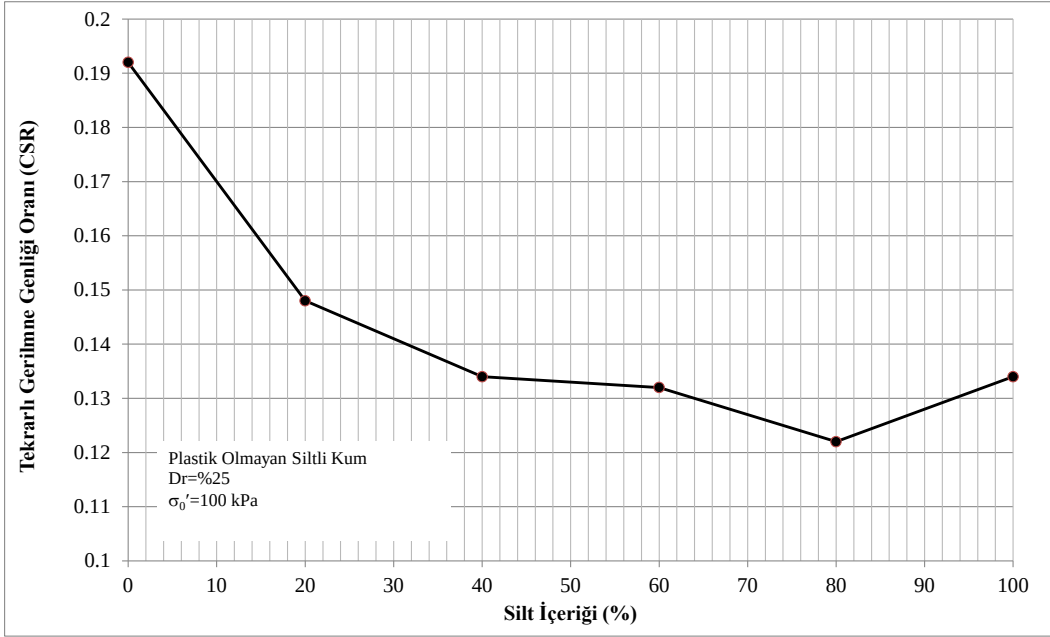
Ayrıca Şekil 6.19 ve 6.20’de düşük plastisiteli siltli kumlar için %25 ve %50 rölatif sıkılık değerlerinde 100 kPa izotropik koşullar altında konsolide edilmiş numuneler üzerinde 20. çevrime karşılık gelen CSR değerlerinin silt içeriğine bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Benzer grafik Şekil 6.21’de %25 rölatif sıkılık ve 100 kPa izotropik koşullar altında konsolide edilmiş numuneler üzerinde 20. çevrime karşılık gelen CSR değerlerinin silt içeriğine bağlı olarak nasıl değişimi plastik olmayan siltli kumlar için de yapılmıştır. Silt içeriği % 80’e kadar arttıkça CSR değeri azalmıştır.



Şekil 6.19 İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %25 rölatif sıkılıktaki 20. çevrime karşılık gelen silt içeriği değişimi



Şekil 6.20 İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip düşük plastisiteli siltli kum zeminlerin %50 rölatif sıkılıktaki 20. çevrime karşılık gelen silt içeriği değişimi



Şekil 6.21 İzotropik konsolidasyon koşulları altında artan tekrarlı gerilme genliğine sahip plastik olmayan siltli kum zeminlerin 20. çevrime karşılık gelen silt içeriği değişimi

6.3. Plastik Olmayan Siltli Kumlar ve Düşük Plastisiteli Siltli Kumların Tekrarlı Yükler Altında Mukavemet Kaybının Gerilme İzleri ile Açıklanması

Suya doymuş zeminlerin drenajsız koşullarda ve tekrarlı yükler altındaki mukavemet özelliklerindeki farklı davranış şekilleri ve bu özelliklerin değişimine neden olan bazı faktörler 2. bölümde ele alınmıştır. Suya doymuş zeminlere ait daneli yapı özellikleri ve boşluk oranı sıvılaşma veya çevrimsel oynaklık davranışlarının ortaya çıkmasına neden olan en önemli etkenlerdir (Castro, 1975), (Castro et al., 1977). Bu faktörlerin yanı sıra zeminin etkisi altında olduğu konsolidasyon koşulları ve maruz kaldığı gerilmelerin büyüklüğü mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde belirleyici parametreler olmaktadır.

Zemine ait dinamik davranış özelliklerinin saptanabilmesi amacıyla belirli başlangıç koşulları altında siltli kum zeminlerin deformasyon yumuşaması veya sıvılaşma davranışına ulaşması için gerekli monotonik veya tekrarlı gerilme koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Uygulanan gerilmeler altında zeminde oluşan şekil değiştirmelerin ve gerilme izlerinin gelişim şekilleri de zeminin mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde önem kazanmaktadır.

Üniform genlikli tekrarlı gerilmeler altında suya doygun siltli kum zeminde meydana gelen şekil değiştirme genliklerinin deney sürecinin başlangıç ve büyük bir kısmında belirgin bir şekilde değişmediği belirlenmiştir. Oysa aynı koşullar altında kum zeminlerde meydana gelen boşluk suyu basıncı artışı deneyin başlangıcından itibaren başlamaktadır. Gerilme genliği ve diğer koşulların uygun olması halinde yeterince uygulanan çevrim sayısının belirli bir değerinden itibaren boşluk suyu basıncında görülecek ani artış ile beraber zemine ait efektif gerilme değeri sıfıra yaklaşmakta ve bununla birlikte zemin hızlı bir şekilde dayanımını kaybederek birim şekil değiştirme genliğinde de ani değişimler oluşmaktadır. Zeminin danelerel özelliklerine ve boşluk oranına bağlı olan bu davranış şekli deformasyon yumuşaması veya sıvılaşma olayının genel gelişim süreci olarak tanımlanır.

İkinci bölümde belirtildiği gibi zeminin fiziksel özellikleri, başlangıç konsolidasyon koşulları ve uygulanan gerilme genliğindeki değişikliklerden dolayı tekrarlı yükler altındaki zeminler sıvılaşmadan daha farklı özelliklerdeki davranış şekilleri ortaya koyabilmektedir (Ishihara et al., 1975; Vaid et al., 1985). Bu davranış türlerinin oluşmasında zeminin sahip olduğu boşluk oranı, ortalama efektif çevre gerilmesi değeri ve uygulanan tekrarlı gerilme genliğinin büyüklüğü en belirleyici rolü oynamaktadır.

Tekrarlı gerilmeler altında zeminlerin deformasyon yumuşaması, deformasyon pekleşmesi veya bu iki davranış türünün arasında gelişen deformasyon özellikleri efektif gerilme izlerinin gelişimi incelenerek saptanabilir. Uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi ile beraber efektif gerilme izi sıfır değerine doğru ilerlerken, zeminin türü fiziksel özelliklerine bağlı olarak oluşturulan kırılma zarfına yaklaştığı andan itibaren yukarıda bahsedilen davranış türlerinden birisine uygun bir şekilde davranışını sürdürür. Zemine ait efektif gerilme izi zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı değeri ve uygulanan gerilme genliği değerinin zemine ait kalıcı mukavemet değerinden küçük veya büyük olup olmadığına bağlı olarak gelişimini sürdürür.

Bu çalışma kapsamında plastik olmayan siltli kum ve düşük plastisiteli siltli kum zeminleri ile gerçekleştirilen dinamik üç eksenli deneyleri ile zeminlerin şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri saptanmaya çalışılmıştır. İzotropik koşullarda farklı çevre basınçlarında konsolide edilen suya doygun zeminler drenajsız şartlarda artan gerilme genlikli tekrarlı yükler altında kesilmiştir. Bu deneylerden elde edilen gerilme, şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncının

gelişimini gösteren kayıtlar sırasıyla plastik olmayan siltli kum ve düşük plastisiteli siltli kum karışımları için Şekil 6.5 ve Şekil 6.8’de görülmektedir.

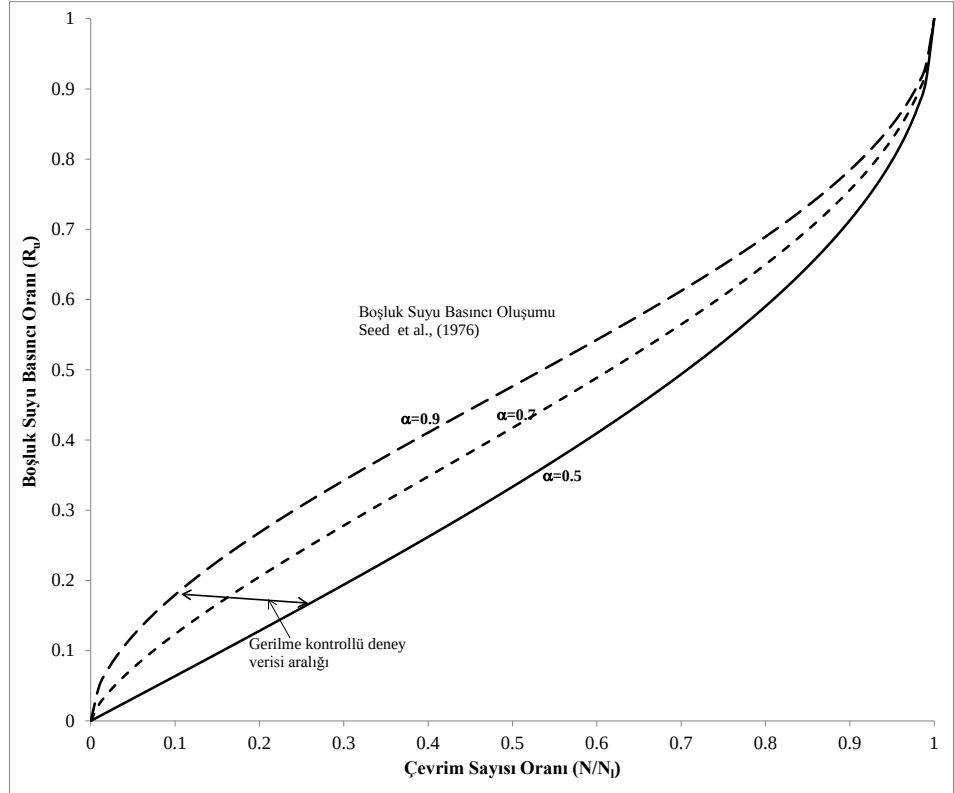
Artan gerilme genlikleri ile yürütülen çalışmada farklı çevre basınçları ve boşluk oranlarından dolayı zeminlere ait gerilme izlerinde meydana gelen farklılıklar ile zemin numunesinde oluşan mukavemet kaybının oluşum süreçlerindeki farklı davranış türleri incelenmiştir. Bu amaçla 100 kPa ve 200 kPa çevre basınçlarında izotropik olarak konsolide edilen ve tekrarlı gerilmeye maruz bırakılan zeminlere ait gerilme izleri incelendiğinde çevre basıncının zeminin dinamik davranışları üzerinde etkisi görülebilir. Bu sonuçlar incelendiğinde çevre basıncındaki azalma ile sıvılaşma davranışından çevrimsel oynaklık davranışına doğru bir kaymanın olduğu görülmektedir.

6.4. İlave Boşluk Suyu Basıncının Gelişimi

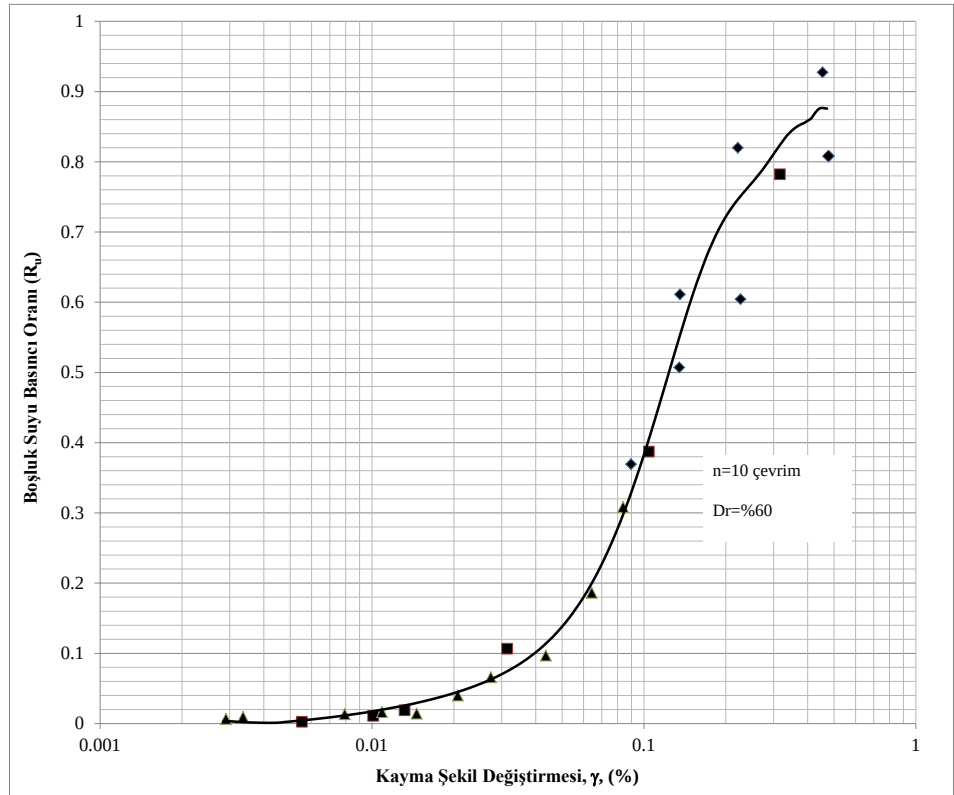
Suya doymuş zeminlerin tekrarlı yükler altında sıvılaşma yolundaki en önemli etkenlerden birisi de hiç şüphesiz artan boşluk suyu basıncıdır. Sıvılaşma analizleri yapılırken suya doymuş zeminlerin drenajsız koşullarda tekrarlı yükler altındaki gerilme - şekil değiştirme özellikleri ile beraber boşluk suyu basıncının artım şekli de zeminin dinamik davranış özelliklerinin daha iyi anlaşılması bakımından incelenmesi gereken önemli bir konudur. Tekrarlı gerilmeler altında boşluk suyu basıncı artışının gelişim şekli ve bu artışın diğer deformasyon koşulları ile ilişkilendirilerek incelenmesi zeminde oluşacak şekil değiştirmelerin gelişimi hakkında daha detaylı bir fikir verecektir.

6.4.1 Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısı ile Değişimi

Boşluk suyu basıncının tekrarlı yükler ile beraber artışı literatürde birçok çalışmaya konu olmuştur. Laboratuvarda dinamik deney aleti ile gerçekleştirilen deneylerde tekrarlı yüklere maruz bırakılan suya doymuş zeminlerin sıvılaşma yolunda boşluk suyu basınçlarının çevrim sayıları ile beraber artış şekli tespit edilmiş ve çizilmiştir. (Lee et al., 1974) ve (De Alba et al., 1976) değişik rölatif sıklıklara sahip temiz kumlarda farklı kayma gerilmesi genlikleri altında yaptıkları çalışmalarda boşluk suyu basıncının çevrim sayısının sıvılaşmaya neden olan toplam çevrim sayısına oranına göre değişimini inceleyerek olası değişim aralıklarını tespit etmişlerdir. Aynı şekilde bu çalışmada plastik olmayan siltli kum ve düşük plastisiteli siltli kumlar için değişik rölatif sıklıklara ait boşluk suyu basıncı gelişim aralığı gösterilmiştir.



Şekil 6.22.a Boşluk suyu basıncı oluşum modelleri Seed et al., (1975)

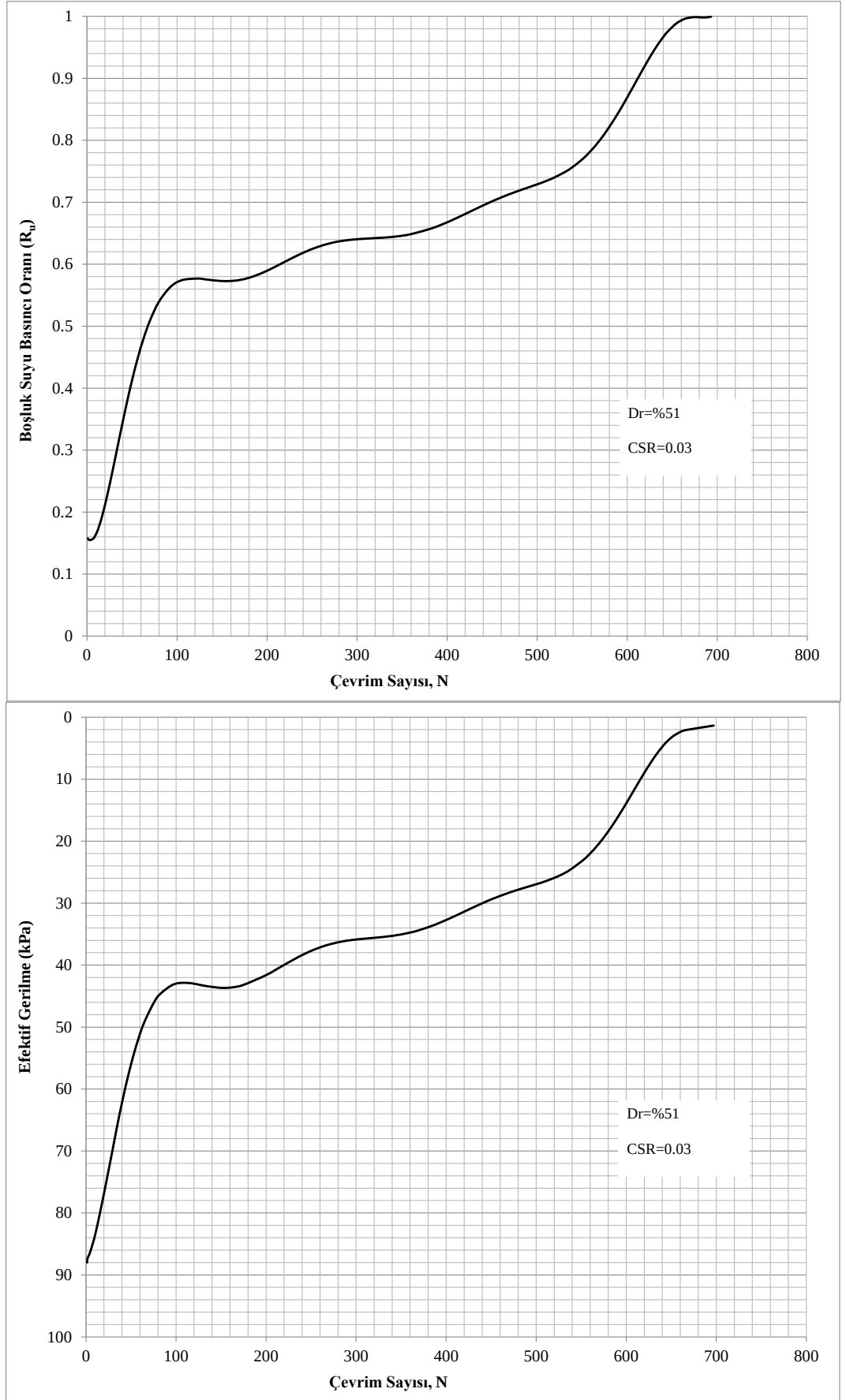


Şekil 6.22.b Boşluk suyu basıncı oluşum modelleri Dobry et al., (1982)

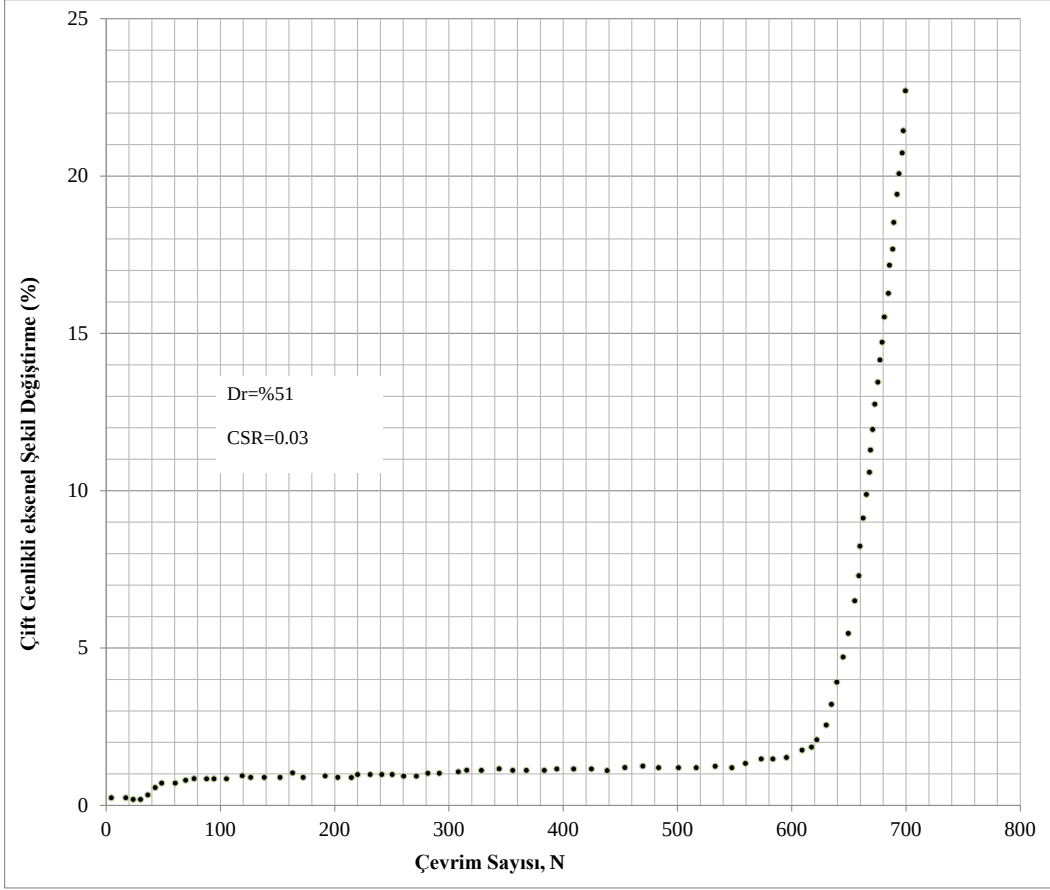
Şekil 6.22’de gösterildiği gibi Seed, et al., (1975), gerçekleştirdiği drenajsız gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler ile artık boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı arasında, Dobry et al. (1982) ise drenajsız şekil değiştirme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler ile boşluk suyu basıncı oranı ile kayma şekil değiştirmesi arasında ilişkiler kurmuştur.

Erten and Maher, (1995), kumlarda boşluk suyu basıncı oluşumuna ince dane miktarının etkisini incelemek amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Silt miktarı, plastisite indisi ve boşluk oranı deney sonuçlarına etkileyen en önemli parametreler olarak belirlenmiştir. Silt miktarının ve plastisitenin, boşluk suyu basıncı oluşumunda 10^{-2} birim kayma deformasyonundan küçük değerlerde önemsenecek oranda etkisinin olmadığı, siltli kumlarda ise akma deformasyonu eşik değerinin, suya doymuş, temiz kumlardaki değeri ile yaklaşık aynı olduğu görülmüştür. Prakash ve Guo (1999), ise silt ve kil karışımlarının tekrarlı yükler altındaki davranışlarını belirlemişlerdir. Plastik olmayan siltlerde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı oluşumunun kumdakine benzediğini söylemişler, ancak az miktarla da olsa yüksek plastisiteli kil eklendiğinde zeminde oluşan kohezyon mukavemeti etkisiyle sıvılaşma dayanımının önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir.

Şekil 6.23’de, % 51 rölatif sıklıkta hazırlanan zemin örneğinde, tekrarlı gerilme oranı ($CSR=0.03$), uygulandığında boşluk suyu basıncı sürekli yükselmektedir ve sonuçta başlangıçta uygulanan çevre basıncına ($r_u=1$), 645 devirde ulaşır. Boşluk suyu basıncı artışı sonucunda efektif gerilme azalır ve efektif gerilme sıfırlanınca boşluk suyu basıncı oranı 1 değerini alır. Bu duruma karşılık gevşek zeminlerde çift genlikteki eksenel deformasyon %5’dir (Şekil 6.24).



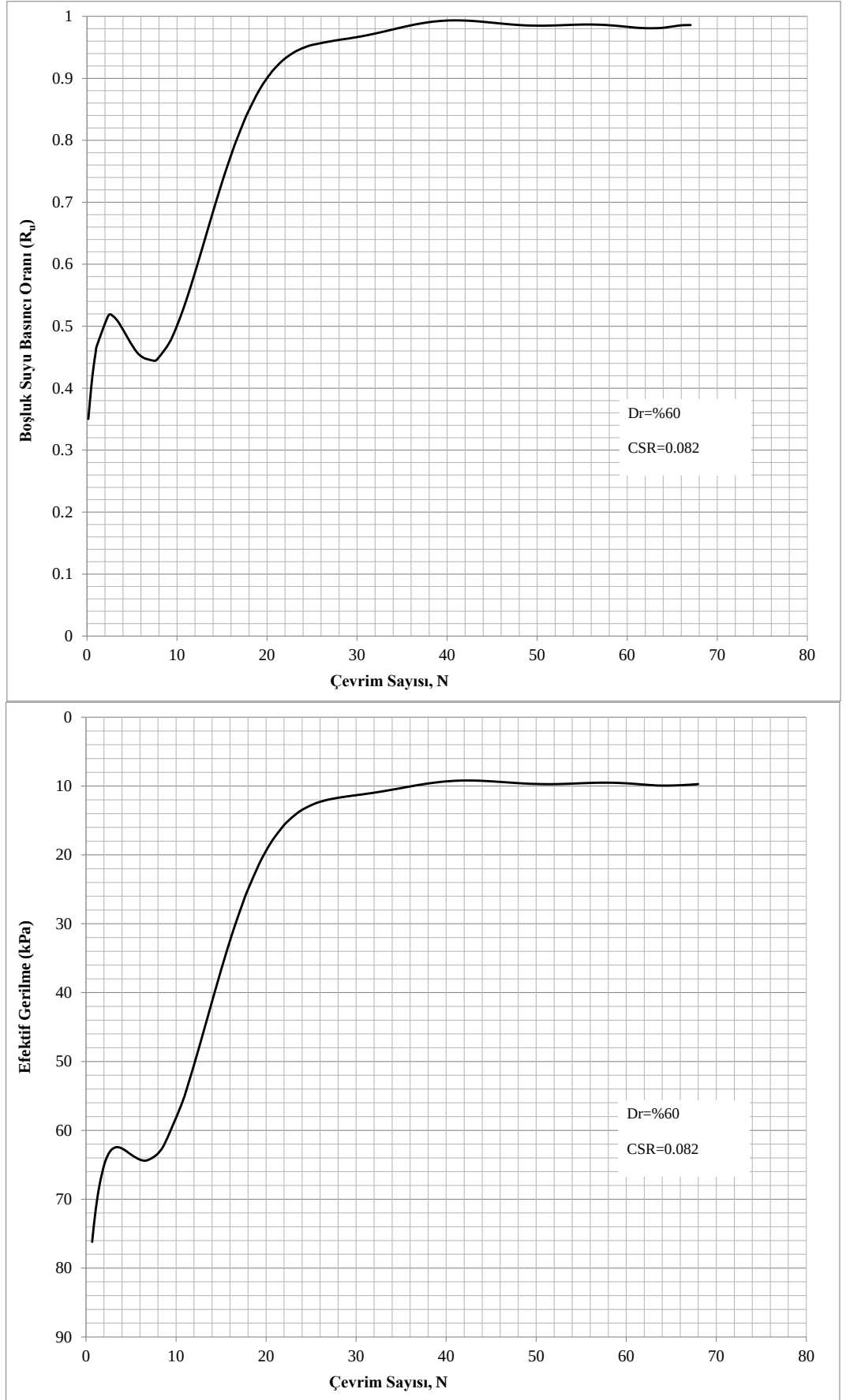
Şekil 6.23 Boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmenin çevrim sayısı ile değişimi (Sitharam 2004)



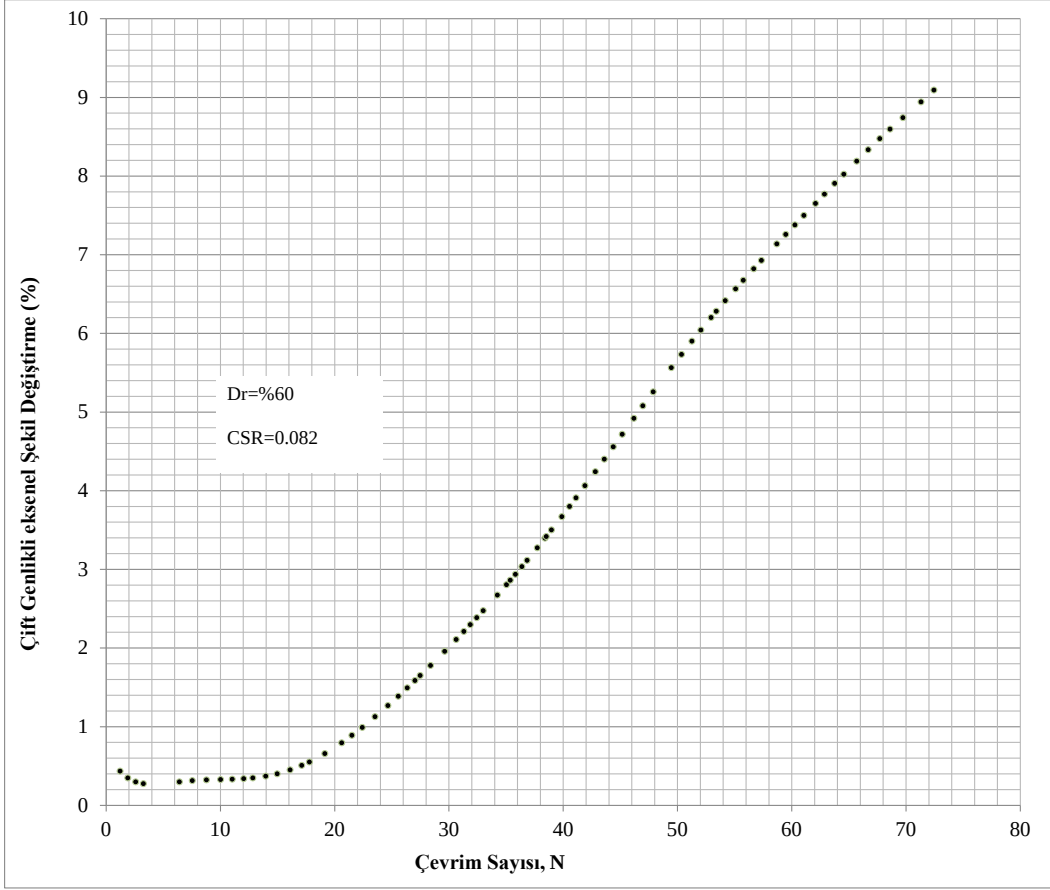
Şekil 6. 24 Çift genlikteki eksenel şekil değiştirme ile çevrim sayısı değişimi (Sitharam, 2004)

Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da görüldüğü gibi tekrarlı gerilme oranı $CSR=0.082$ ve %60 rölatif sıkılık değerleri için 40 çevrimde zeminin sıvılaşmış olduğu gözükmemektedir. Düşük boşluk oranlarında ($D_r = \%60$ ile %51 karşılaştırıldığında) sıvılaşmaya neden olan gerekli çevrim sayısı daha fazladır. Aynı kum örneklerle rölatif sıkılığı % 69.7 ve $CSR=0.14$ için elde edilen sonuçlar Şekil 6.34’de gösterilmiştir. Grafik her 10 çevrime karşılık çizilmiştir.

Şekil 6.27’de sabit genlikteki tekrarlı deviyatör gerilme ile gerilme izi grafiği gösterilmiştir. Her ilave çevrimde kayma dayanımının sürekli kaybı gerilme izini sola taşımıştır. Ortalama efektif gerilme (p') sıfır değerine 60 devir sonunda ulaşarak zemin sıvılaşmıştır. Zemin sıkılığının yanı sıra tekrarlı yüklemenin büyüklüğüne bağlı olarak, başlangıçta uygulanan çevre gerilmesine ulaşılır. Yüksek tekrarlı gerilme oranlarında, boşluk suyu basıncı hızlı yükselir ve sıvılaşma azaltılmış gerilme döngüleri ile tetiklenir.

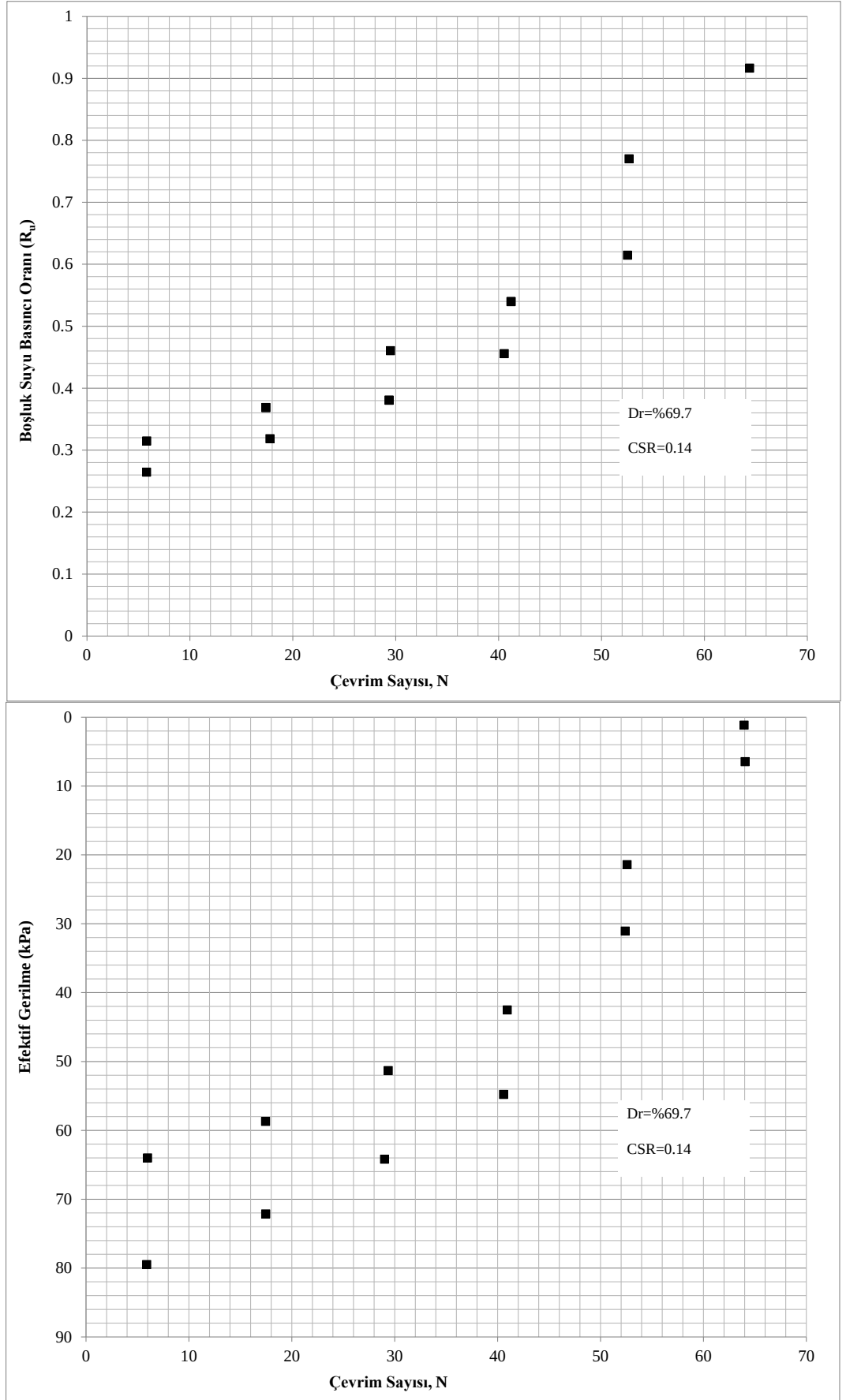


Şekil 6.25 Boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmenin $D_r = \%60$ ve $CSR = 0.082$ için çevrim sayısı ile değişimi (Sitharam 2004)

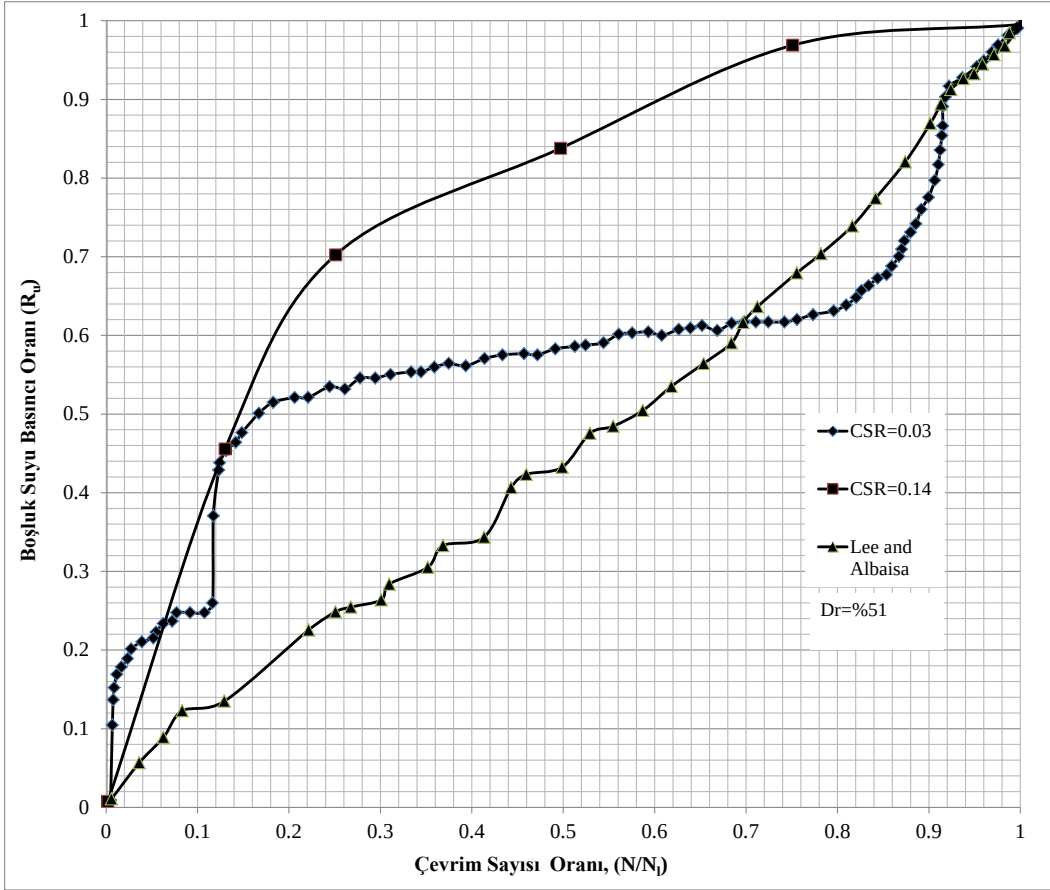


Şekil 6.26 Çift genlikteki eksenel deformasyon ile çevrim sayısı değişimi (Sitharam 2004)

Şekil 6.28’de boşluk suyu basıncı değişimi ile zemin örneğindeki (%20 silt ve %2 kil), %51 rölatif sıkılık ile tekrarlı gerilme oranı $CSR=0.03$ ve 0.14 için yapılan deney sonucu gösterilmiştir. Yüksek silt içeriğinin varlığı zemin içindeki drenaj hızını geciktirmekte, granüler yapıyı bozmakta, gevşek parçacıkların göçmesine sebep olmaktadır Bu çöküşler taneler arasındaki boşluk basıncını arttırmaktadır. $CSR=0.03$ için boşluk basıncı değişimi farklıdır.



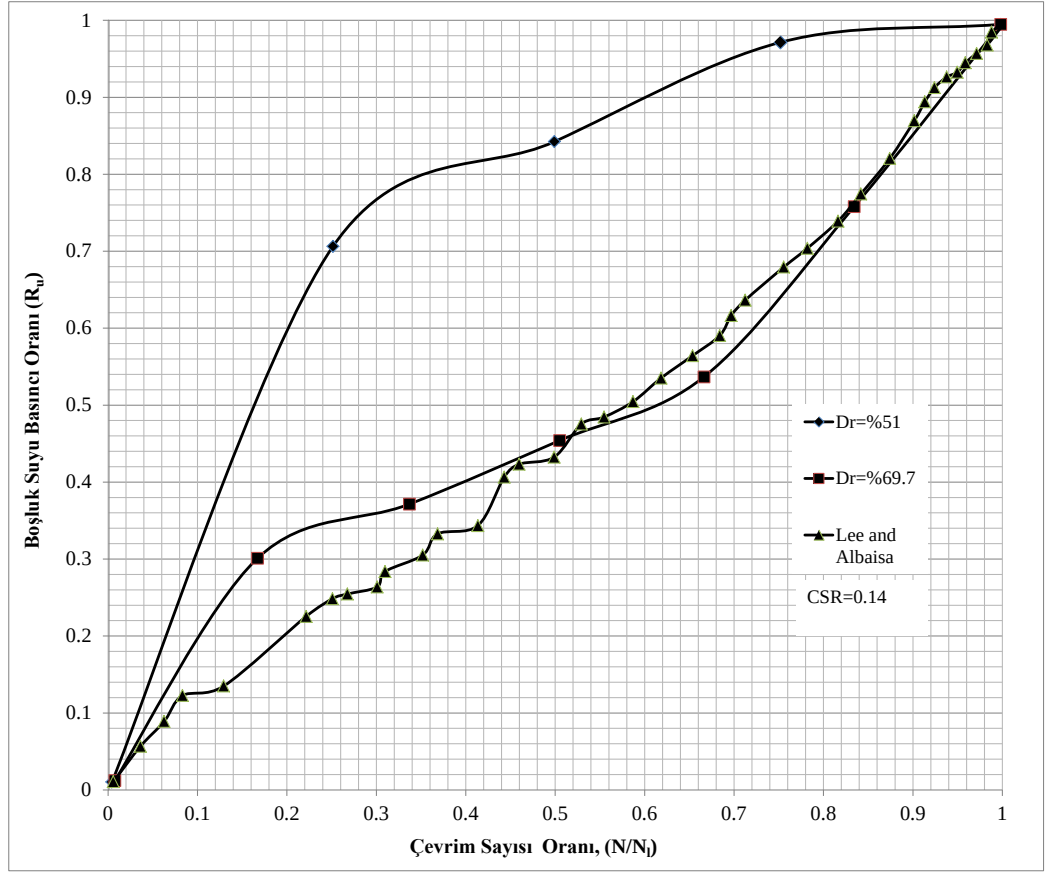
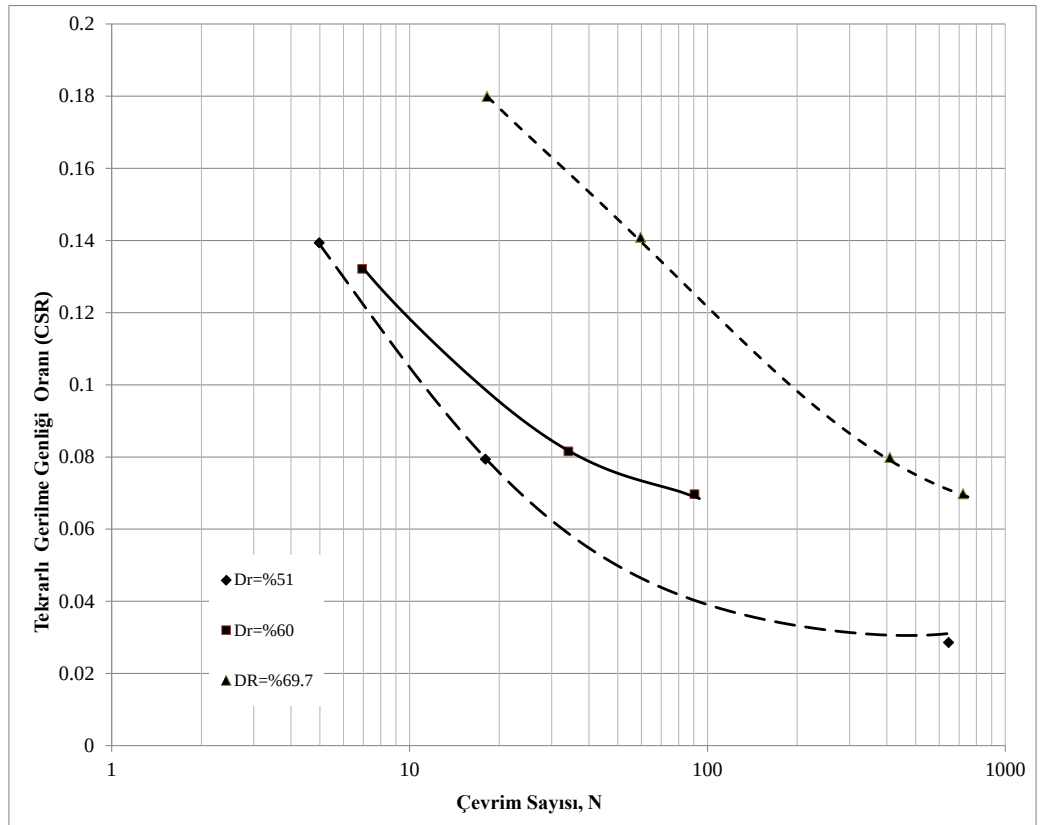
Şekil 6.27 Boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmenin $D_r = 69.7\%$ ve $CSR = 0.14$ için 10 çevrimde bir değişimi (Sitharam 2004)



Şekil 6.28 Boşluk suyu basıncı ile CSR ilişkisi (Sitharam 2004)

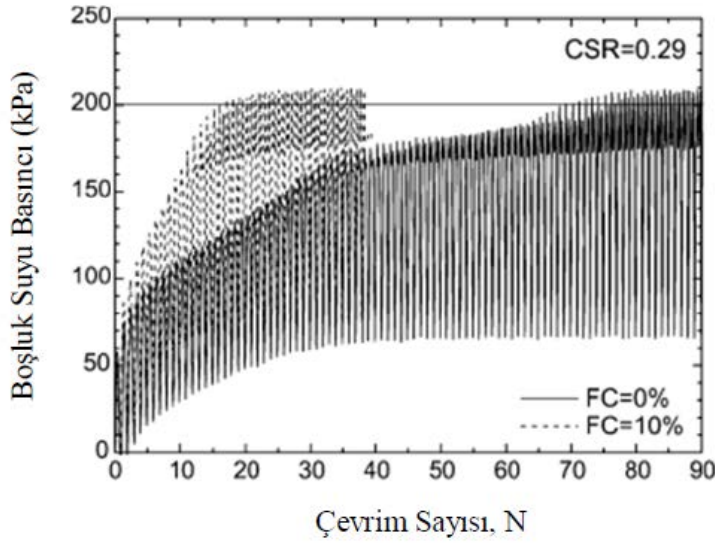
Şekil 6.29’da farklı rölatif sıkılık değerleri ($Dr=51$ ve 69.7) boşluk basıncı oranı ile çevrim oranı (N/N_L) karşılaştırılması yapılmıştır. Sitharam (2004) yaptığı çalışmada sıkı siltli kumla, temiz kumların benzer davranış gösterdiğini söylemiştir.

Şekil 6.30’da Sitharam (2004) tarafından yapılan çalışmada kumların üç farklı sıkılıkta tekrarlı dayanım eğrileri gösterilmiştir. Kumların tekrarlı dayanımı 20 çevrimdeki üniform yükleme %5 çift genlikteki aksenal deformasyon üreten gerekli tekrarlı gerilme oranı büyüklüğü açısından belirtilmiştir. Rölatif sıkılık %51,60 ve 69.7 için tekrarlı dayanımlar 0.075, 0.09 ve 0.182 elde edilmiştir. Sonuçta sıkılığın artmasının tekrarlı dayanım değerlerinde artışa yol açtığını göstermiştir.

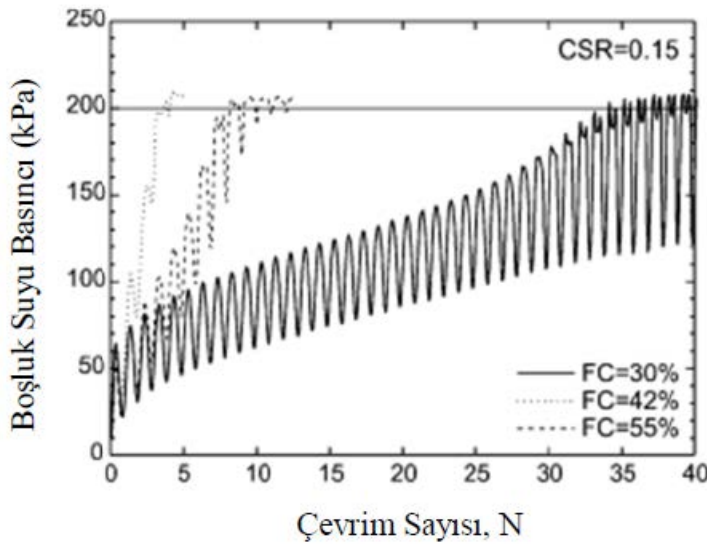
Şekil 6.29 Boşluk suyu basıncı oranı ile D_r ilişkisi (Sitharam 2004)

Şekil 6.30 Tekrarlı gerilme genliği oranı ile çevrim sayısı ilişkisi (Sitharam 2004)

Şekil 6.31’de aşırı boşluk suyu basıncına karşı çevrim sayısının ince tane içeriği %0 ve %10 değerleri için $CSR=0.29$ kullanılarak grafiği çizilmiştir. İlave olarak, Şekil 6.32’de ince tane oranları %30, 42 ve 55 için, $CSR=0.15$ kullanılarak bulunmuştur (Sitharam, 2004). Sonuçlar sabit boşluk oranı için kum-ince tane karışımlarının, saf kumlarla kıyaslandığında boşluk suyu basıncını arttırdığını göstermiştir. Ayrıca ince tane içeriğinin eşik değerden düşük ya da yüksek olmasına göre davranışın değiştiği gözlenmiştir.



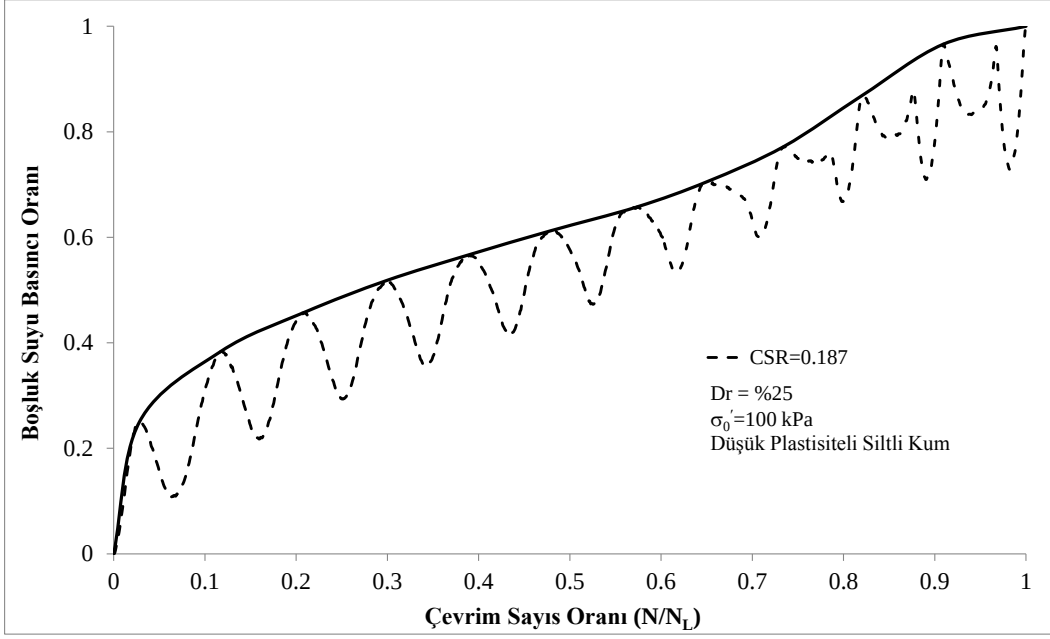
Şekil 6.31 FC=%0 ve %10 için aşırı boşluk suyu basıncı grafiği (Sitharam 2004)



Şekil 6.32 FC=%30, %42 ve %50 için aşırı boşluk suyu basıncı grafiği (Sitharam 2004)

Bu çalışma kapsamında değişik koşullar altında yürütölen deneylerde oluşın aşırı boşluk suyu basıncının gelişim şekli incelenmiştir. Bu amaçla gerek plastik olmayan siltli kum gerekse düşük plastisiteli siltli kum zeminlerde gerçekleştirilen deneylerin tamamında boşluk suyu basıncındaki artışın hangi zemin ve deney parametrelerinden ne şekilde etkilendiği sorgulanmıştır. Böylelikle sıvılaşma veya çevrimsel oynaklık davranış türlerinin belirlenmesinde en önemli rollerden birisi olan boşluk suyu basıncının artım şeklinin gerek zemin türlerine gerekse diğer deney koşullarına bağlı olarak belirlenmesi sağlanmıştır.

Bu amaçla zemin türünün, konsolidasyon basıncının, zeminin rölatif sıkılığının ve yükleme türünün boşluk suyu basıncının oluşumu üzerinde yaptığı etkiler incelenmiştir. İlk olarak düşük plastisiteli siltli kumlar ile yapılan deneyler ele alınmış ve farklı koşullarda yürütölen deneylere ait boşluk suyu basıncının gelişim şekilleri çevrim sayısından bağımsız bir şekilde birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre aynı konsolidasyon basıncında fakat farklı rölatif sıkılıklarda düşük plastisiteli siltli kumlar ile yürütölen deneylere ait boşluk suyu basınçlarının her çevrime ait en büyük değerleri ile oluşturulan gelişim eğrileri Şekil 6.33’de verilmiştir. Şekilden de göröldüğü gibi eğriler dar bir bant oluşturarak artışlarını tamamlamaktadır. Düşük plastisiteli siltli kumlar ile yürütölen hemen hemen bütün deneylerde boşluk suyu basınçları ilk önce hızlı bir artışla yükselmekte, daha sonra bu artışın hızı yavaşlamakta ve sıvılaşmaya yakın kısımda yeniden hızlanmaktadır (Şekil 6.34-Şekil 6.39). Sınır eğrileri çizildiğinde ilk çevrimlerde oluşın kısmın aşağı iç bükey, son kısmın ise yukarı içbükey olarak oluştuğu görölmektedir (Şekil 6.34- Şekil 6.39). Düşük rölatif sıkılığa sahip numunelerin boşluk suyu basıncı eğrilerinin alt sınırı yüksek rölatif sıkılığa sahip numunelerin ise üst sınırı yakın bir şekilde oluştuğu görölmüştür.



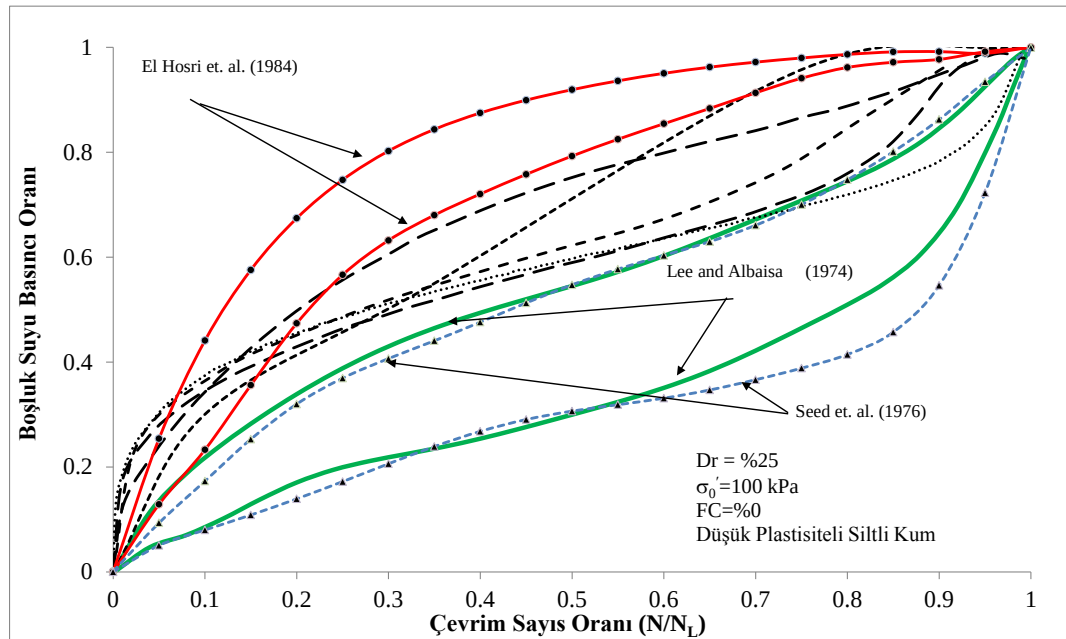
Şekil 6.33 Boşluk suyu basıncı oranı - Çevrim sayısı oranı grafiği elde etme

Aynı şekilde düşük plastisiteli siltli kumlarla aynı rölatif sıkılığa sahip numunelerde farklı çevre basınçlarında yürütülen deneylerde de çevre basıncının boşluk suyu basıncının gelişimine etkisi görülebilmektedir. Üç farklı çevre basıncında yürütülen deneylerde boşluk suyu basıncının artışlarının oldukça dar bir bantta ilerlemek suretiyle birbirlerine çok benzer şekilde olduğu saptanmıştır. Bu anlamda çevre basıncındaki farklılıkların ilave boşluk suyu basıncı gelişimine neredeyse hiç etkisinin olmadığı söylenebilir.

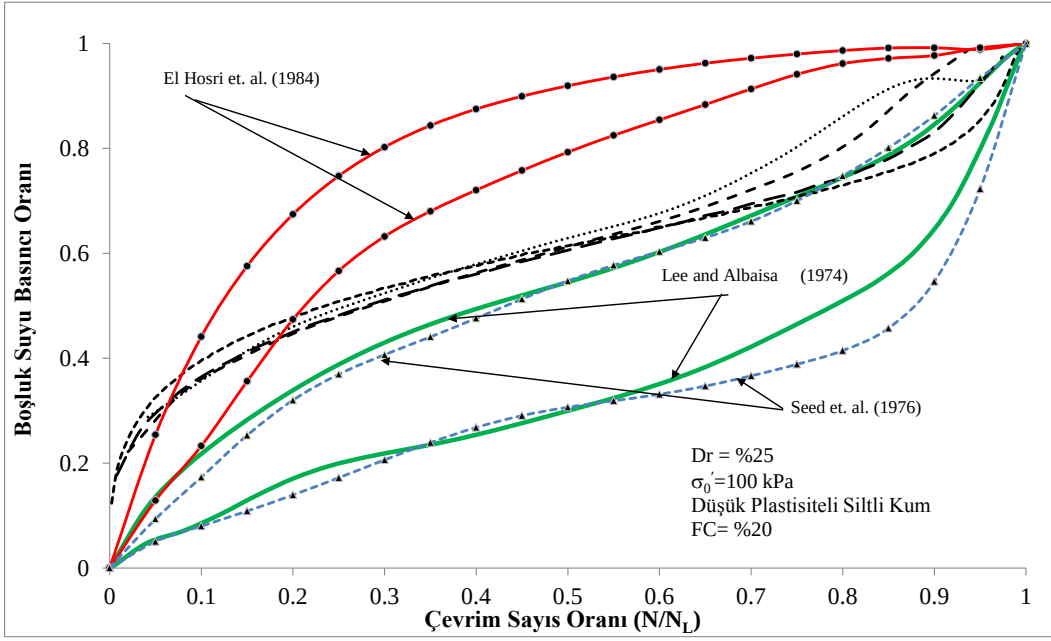
Boşluk suyu basıncı gelişim şekline zemin türünün ve ince malzeme içeriğinin etkisini gösterebilmek amacıyla çalışma kapsamında izotropik koşullarda konsolide edilmiş düşük plastisiteli siltli kumlarla yürütülen deneylerden elde edilen sonuçların birbiri ile karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 6.34-Şekil 6.39). Aynı çevre basıncı altında yürütülen deneylerle silt içeriğindeki değişimin etkileri ve plastik olmayan siltli zeminler ile düşük plastisiteli siltli zeminlerin davranış şekillerindeki farklılıklar gösterilmiştir. Şekil 6.40'da görüldüğü gibi silt içeriğindeki değişiklikler oluşan boşluk suyu basınçlarının gelişim şeklinde oldukça büyük farklılıklara yol açmaktadır. Silt içeriği arttıkça boşluk suyu basıncını temsil eden eğriler nispeten daha büyük bir bant aralığı oluşturarak yukarı doğru kaymaktadır.

Çalışma kapsamında suya doymun düşük plastisiteli siltli kumların dinamik boşluk suyu basıncı gelişimlerini modellemek ve yaygın kullanımı olan mevcut bazı yöntemlerin tahmin hassasiyet ve kesinliklerini değerlendirmek

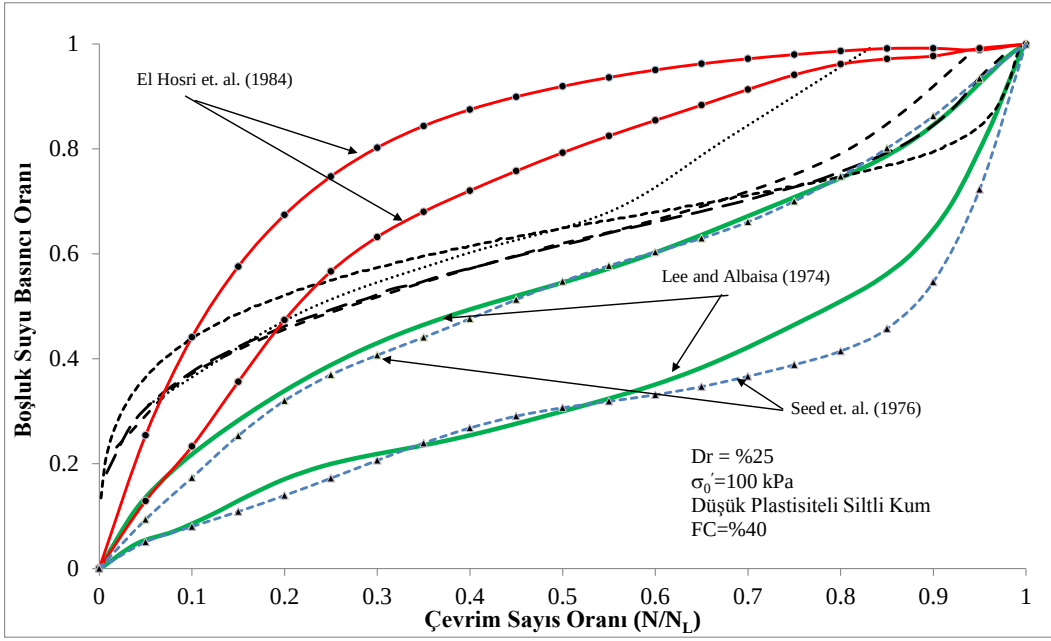
hedeflenmiştir. Bu amaçla, gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deney sonuçları düzenlenerek, literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Lee and Albaisa (1974), Monterey ve Sacramento kumlarını kullanarak, boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile çevrim sayısı oranını (N/N_{liq}) ilişkilendirmiş, kısa süre sonra Seed vd. (1975), iyi derecelenmiş kumlar ile yaptığı çalışmalar ile hem bu çalışmanın sonuçlarını hem de o dönemin mevcut deney verisini kullanarak Denklem 6.1'de sunulan ilişkiyi geliştirmiştir. El Hosri et al., (1984), killi siltler ile bir seri deney yaparak boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı oranı arasında alt ve üst limitleri göstermişlerdir. Bu çalışmada Şekil 6.34 ile Şekil 6.39 arasında farklı silt içerikleri için literatürde yer alan 3 farklı boşluk suyu basıncı oranı ve çevrim sayısı oranı grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6.48'de toplu olarak gösterilen, tüm silt içerikleri için elde edilen alt ve üst limitlerin Lee and Albaisa (1974), ve Seed et al., (1975), grafiklerinin üst limit değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Ancak yapılan çalışmada El Hosri et al., (1984)'nin yaptığı alt ve üst limitlere de uygun olmadığı gözlenmiştir. Boşluk suyu basıncı oranı- çevrim sayısı oranının eğiminin %40'a kadar çok daha dik bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Boşluk suyu basıncı oranı %50 civarında iken El Hosri et al., (1984)'nin alt limit değerine denk geldiği ve daha sonra %100'e ulaşınca kadar Lee and Albaisa (1974), ve Seed et al., (1975), üst limitleri ile El Hosri et al., (1984)'nin alt limiti arasında kaldığı bulunmuştur (Şekil 6.40-6.41).



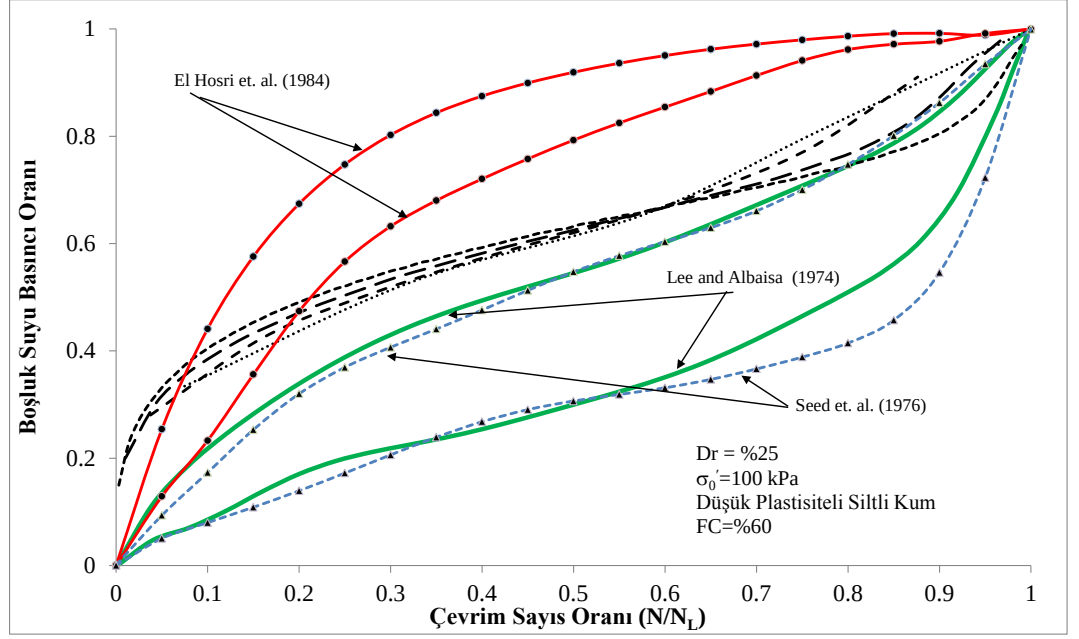
Şekil 6.34 FC=%0, Dr=%25 ve $\sigma_0'=100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği



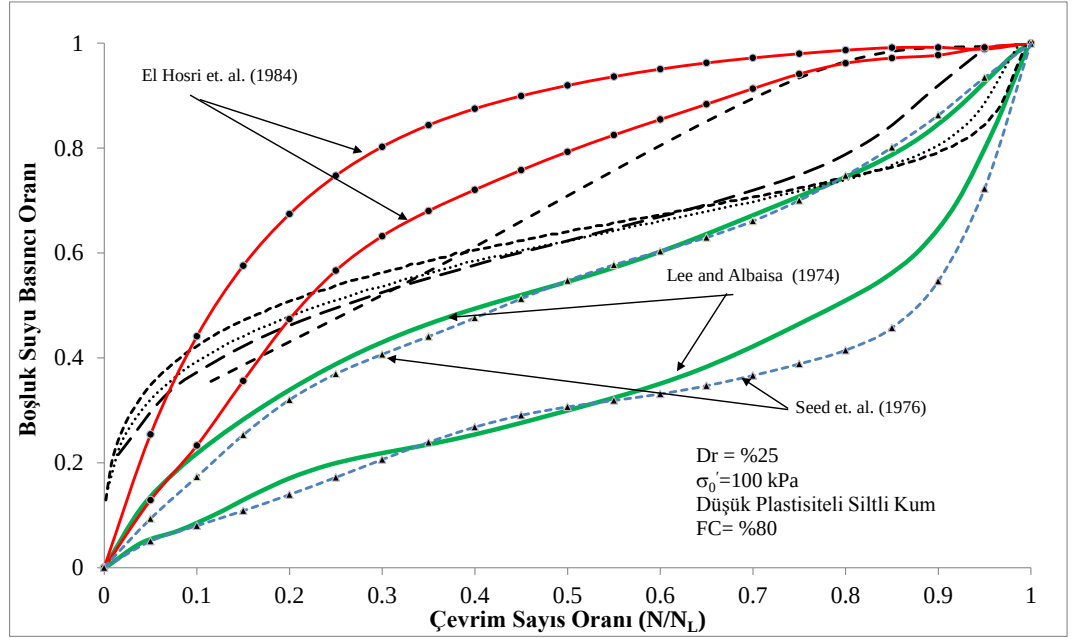
Şekil 6.35 FC=%20, Dr=%25 ve $\sigma'_0 = 100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği



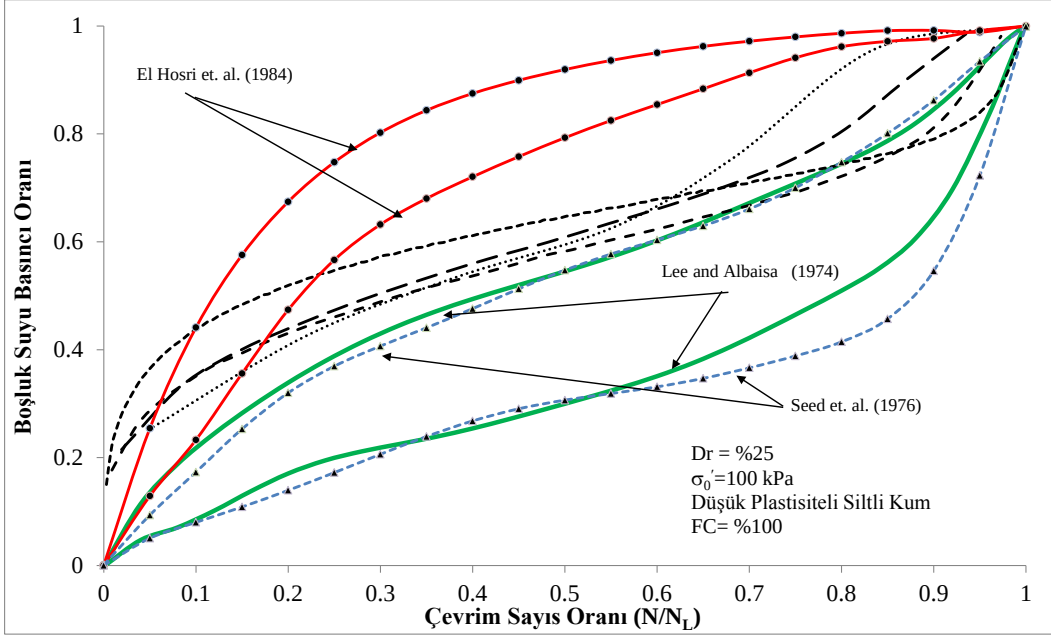
Şekil 6.36 FC=%40, Dr=%25 ve $\sigma'_0 = 100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği



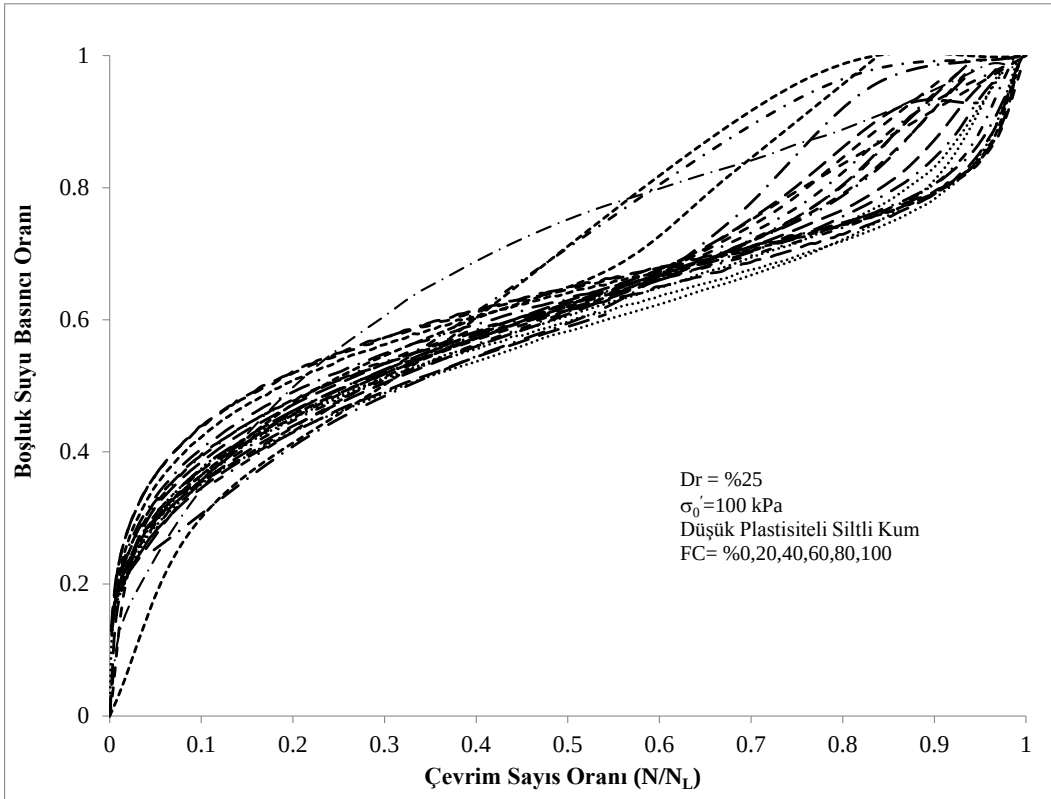
Şekil 6.37 FC=%60, D_r =%25 ve σ'_0 =100 kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği



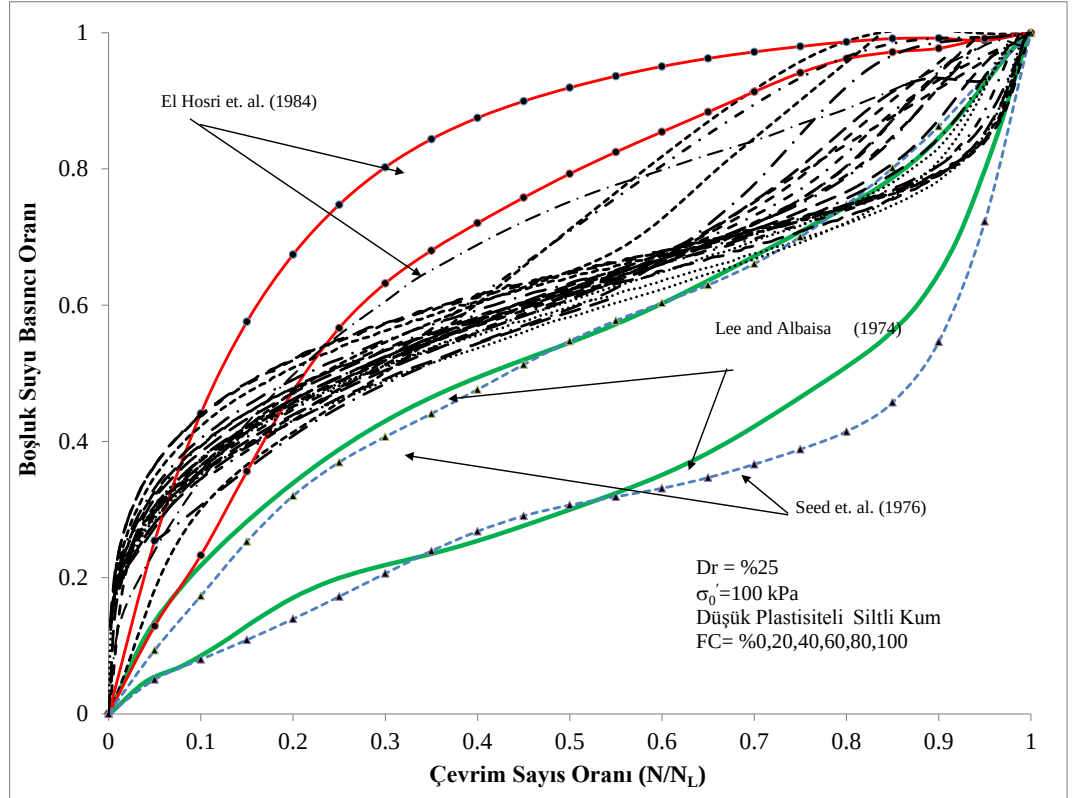
Şekil 6.38 FC=%80, D_r =%25 ve σ'_0 =100 kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği



Şekil 6.39 $FC=\%100$, $Dr=\%25$ ve $\sigma_0'=100 \text{ kPa}$ için Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Çevrim Sayısı oranı grafiği



Şekil 6.40 $FC=\%0-\%100$, $Dr=\%25$ ve $\sigma_0'=100 \text{ kPa}$ için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği



Şekil 6.41 FC=%0-%100, Dr=%25 ve $\sigma'_0=100$ kPa için Boşluk suyu basıncı oranı-Çevrim sayısı oranı grafiği karşılaştırması

6.4.2 Boşluk Suyu Basıncı Modelleri ve Karşılaştırma

Deprem dalga yayılımının neden olduğu drenajsız kayma gerilmeleri zemin danelerinin deformasyonlara maruz kalmasına ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncının artışına sebep olmaktadır. Artan boşluk suyu basıncı, efektif gerilmenin bir fonksiyonu olan zemin rijitliğinin düşmesine neden olmakta, böylece daha yüksek kayma deformasyonu ve boşluk suyu basınçları üretecek bir kısır döngüyü başlatır. En son durumda ise, artan boşluk suyu efektif gerilmenin sıfıra düşmesine ve zemin sıvılaşmasının tetiklenmesine neden olacaktır. Tekrarlı yükleme devam ederken boşluk suyu basıncının değişiminin belirlenmesi önemli bir durum oluşturmıştır. Seçilen deney tipi ve verilerin değerlendirilmesine göre literatürde en çok yer alan gerilme tabanlı çalışmalardan üç tanesi seçilerek, boşluk suyu basıncı modelleri oluşturulmuştur.

Bu kısımda tekrarlı boşluk suyu basıncının sayısal olarak modellenmesi amacıyla geliştirilmiş gerilme tabanlı yöntemlerden üç tanesi için denklemler elde edilmiştir.

1) Seed et al., (1975):

Lee and Albaisa (1974), boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile çevrim sayısı oranını (N/N_{liq}) ilişkilendirerek gerilme tabanlı modellerin ilk temelini atmışlardır. Kısa süre sonra Seed et al., (1975), hem bu çalışmanın sonuçlarını hem de o dönemin mevcut gerilme kontrollü deney verisini kullanarak aşağıdaki denklemde sunulan ilişkiyi geliştirmiştir.

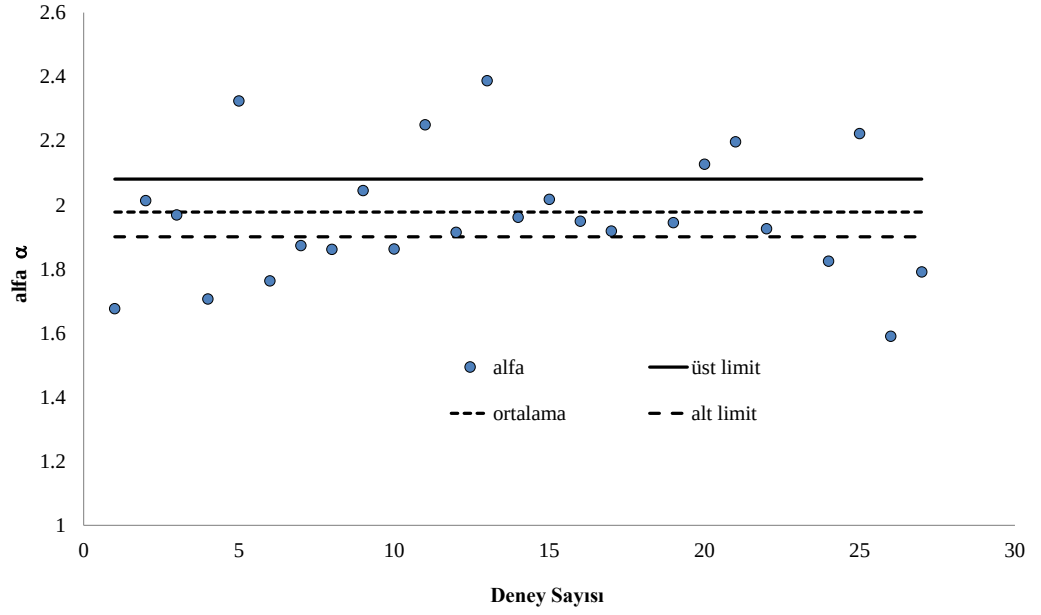
$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (6.1)$$

Burada α parametresinin zemin özellikleri ve deney koşullarını temsil ettiğini söylemiştir. Temiz kumlar için $\alpha = 0.7$ olarak ortalama bir değer kullanılmasını söylemişlerdir. N ve N_{liq} sırasıyla uygulanan ve sıvılaşma için gerekli çevrim sayılarını temsil etmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak, Seed et al., (1975), tarafından yapılan çalışmada kullanılan denklemdeki sabit değerin değişimi % 95 güven aralığında bootstrap yöntemi ile incelenmiştir. Bunun için Denklem 6.1'de yer alan katsayıların bootstrap yöntemi ile analizi yapılmıştır. Burada;

$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (6.2)$$

ile gösterilen denklem 6.2'dir. Denklem 6.2 için gösterilen α katsayısının bootstrap yöntemi ile %95 güven aralığında değişimi incelenmiştir. Denklem 6.2 kullanılarak yapılan çalışma kapsamında alfa (α) katsayısı değişiminin Şekil 6.42'de gösterildiği gibi oluşmuştur.



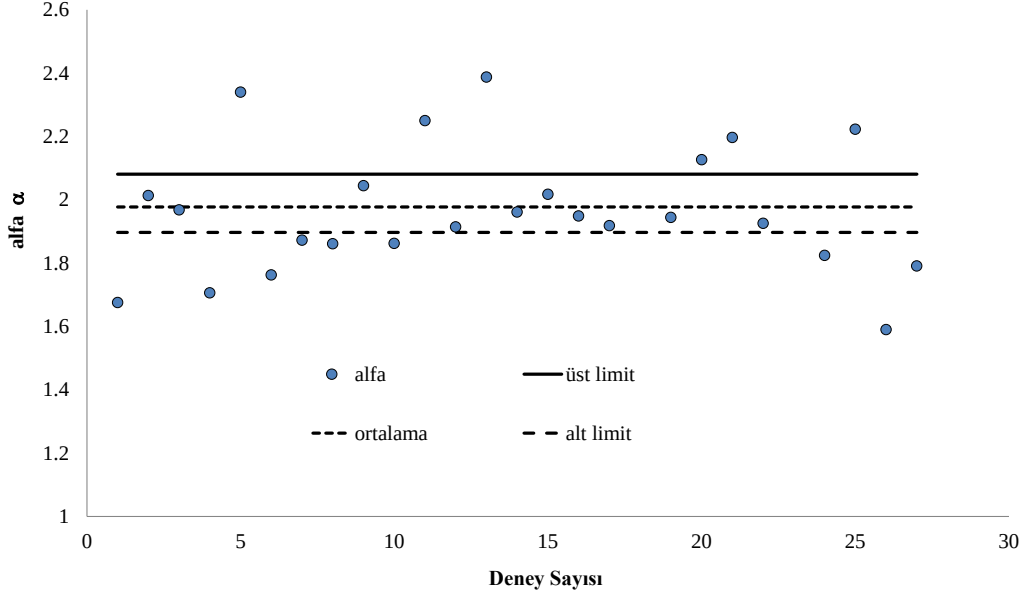
Şekil 6.42 α katsayısının değişimi Seed et. al (1975)

2) Booker et al., (1976):

Booker et al., (1976)'da Seed et al., (1975) çalışmasına Denklem 6.3 ile gösterilen alternatif bir model önermişlerdir.

$$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2+\alpha}} \right] \right\} \quad (6.3)$$

Bu denklemde önerilen katsayılardan α , N ve N_{liq} Seed et al., (1975) tarafından önerilen denklem ile aynı parametrelerdir. Denklem 6.3 için gösterilen alfa katsayısının bootstrap yöntemi ile %95 güven aralığında değişimi incelenmiştir. Denklem 6.3 kullanılarak yapılan çalışma kapsamında alfa (α) katsayısı değişiminin Şekil 6.43'de gösterildiği gibi oluşmuştur.



Şekil 6.43 α katsayısının değişimi Booker et. al (1976)

3) Polito et al., (2008):

Birçok araştırmacı tarafından kullanılan Seed et al., (1975) ifadesi Polito et al., (2008) tarafından istatistiki yöntemler ile değerlendirilmiş ve α parametresi tekrarlı gerilme oranı (CSR), ince dane oranı (FC) ve rölatif sıklık (Dr) cinsinden

$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (6.4)$$

şeklinde tanımlamış ve alfa katsayısını;

$$\alpha = 0.01166 * FC + 0.007397 * Dr + 0.01034 * CSR + 0.5058 \quad (6.5)$$

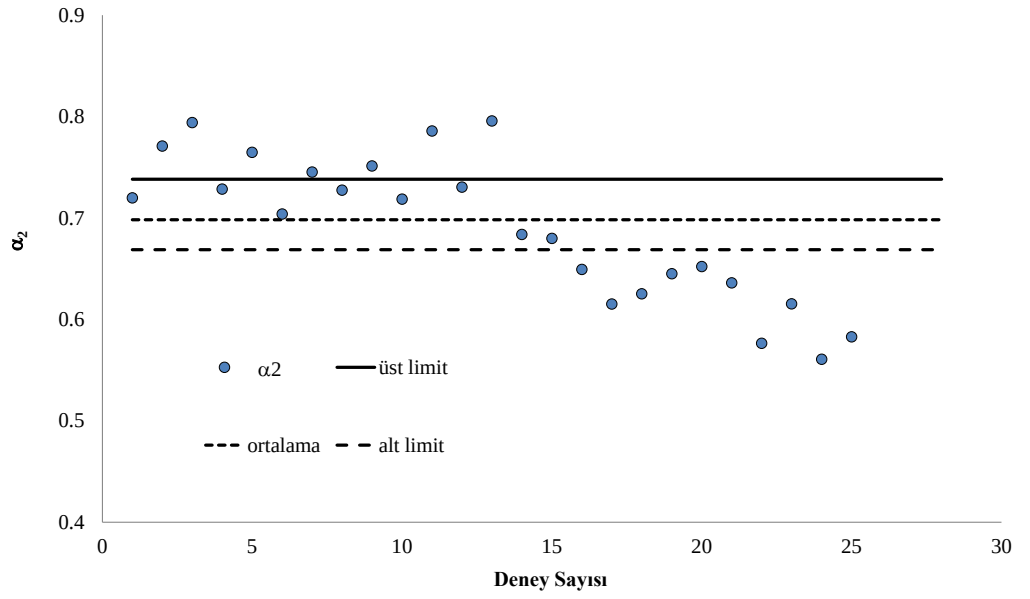
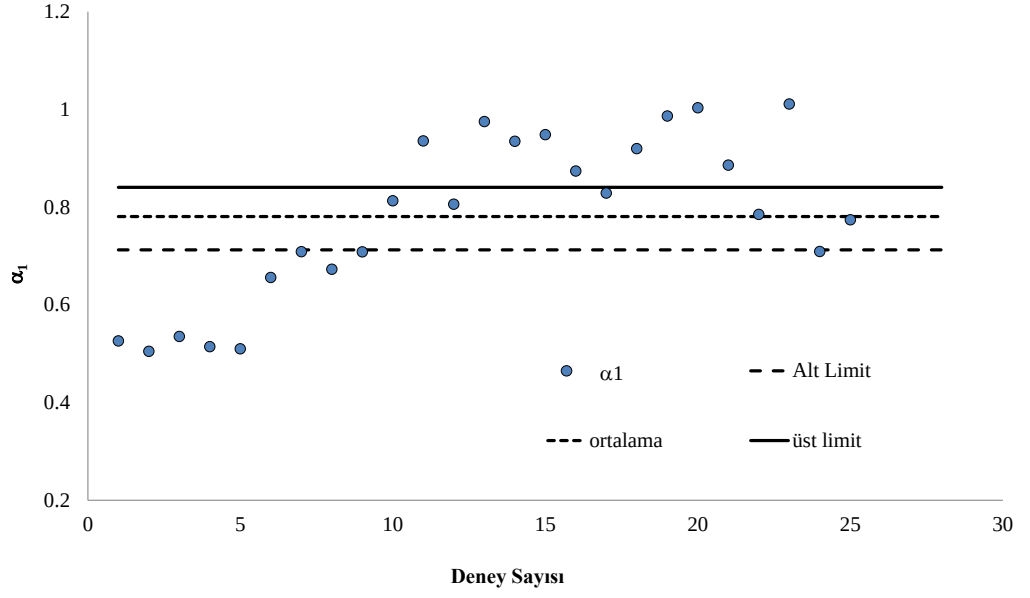
denklem 6.5 olarak göstermiştir. Bu çalışma kapsamında boşluk suyu basıncı değişimi

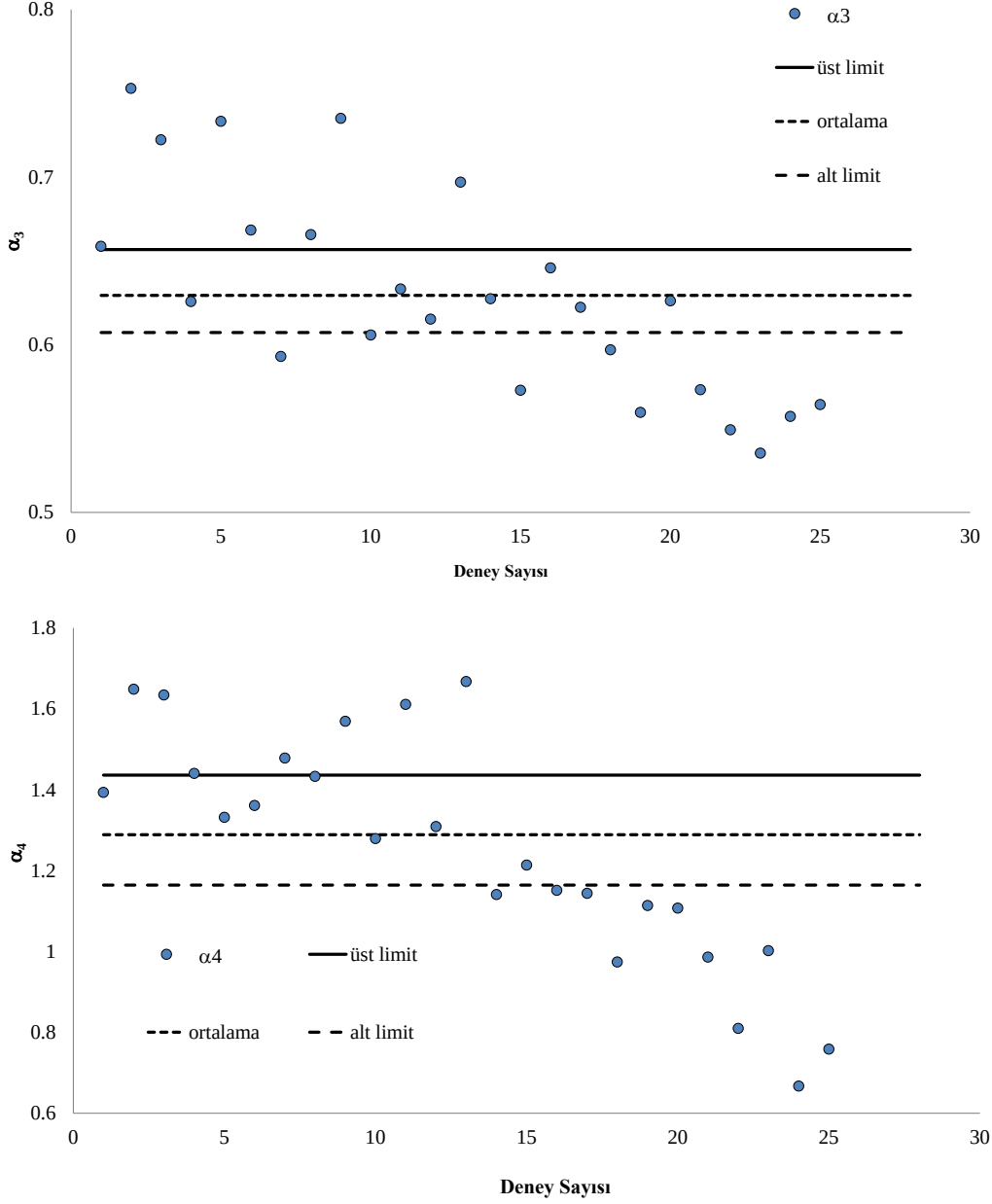
$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (6.6)$$

şeklinde ve alfa (α) denklem 6.7 ile tanımlanmıştır.

$$\alpha = \alpha_1 * FC + \alpha_2 * Dr + \alpha_3 * CSR + \alpha_4 \quad (6.7)$$

Bu çalışma kapsamında % 95 güven aralığında bootstrap yöntemi ile α_1 , α_2 ve α_3 , α_4 'ün değişimi Şekil 6.44'de gösterilmiştir.





Şekil 6.44 α_1 , α_2 , α_3 , α_4 katsayısının değişimi Polito et. al., (2008)

Çalışma kapsamında literatürde en çok kullanılan 3 adet gerilme tabanlı boşluk suyu basıncı modelleri karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Gerilme tabanlı boşluk suyu basıncı modelleri karşılaştırılması

Model	Boşluk Suyu Basıncı Fonksiyonu	Sınır Değer	Model Parametreleri					mse
			α	α_1	α_2	α_3	α_4	
Seed et al. (1975)	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\}$	Üst	2.08093	--	--	--	--	0.002351
		Ortalama	1.97760	--	--	--	--	0.002251
		Alt	1.90054	--	--	--	--	0.002279
Booker et al. (1976)	$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2+\alpha}} \right] \right\}$	Üst	2.08090	--	--	--	--	0.002350
		Ortalama	1.97762	--	--	--	--	0.002250
		Alt	1.89688	--	--	--	--	0.002283
Polito et al. (2008)	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\}$ $\alpha = \alpha_1 * FC + \alpha_2 * Dr + \alpha_3 * CSR + \alpha_4$	Üst	---	0.012137	0.007481	0.010445	2.077891	0.002362
		Ortalama	---	0.012029	0.007475	0.010433	1.968302	0.002252
		Alt	---	0.011931	0.007471	0.010424	1.890381	0.002281

Seed et al., (1975)'de temiz kumlar için yaptığı çalışmada denklem 6.1'de gösterilen α parametresinin ortalama olarak 0.7 olduğunu söylemiştir. Bu çalışmada farklı silt içerikleri, rölatif sıkılık ve çevre gerilmesi altında yapılan deneylerde ortalama α değerinin 1.977 olduğu görülmüştür. Bu değer temiz kumlara göre daha büyük olmasındaki sebep ise kullanılan silt içeriğinin çok daha etkin rol oynamasıdır. İkinci analiz ise Booker et al., (1976) yılında Seed et al., (1975)'de yaptığı çalışmaya bir alternatif önermiştir. Burada Booker et al., (1976) tarafından önerilen denklem için de ortalama α değerinin 1.977 olduğu görülmüştür. Bu iki denklemin birbirine çok yakın olmasından dolayı ortalama α değerinin de birbirine çok yakın çıkması doğal bir sonuçtur. Polito et al., (2008) istatistiki yöntemler kullanarak yaptığı çalışmada α parametresinin, tekrarlı gerilme genliği oranı, ince dane oranı, rölatif sıkılık ve sabit değere bağlı olarak yeniden tanımlamıştır. Yaptığı analizler sonucu en büyük katkıyı α_4 olarak tanımladığı sabit değer aldığını görmüştür. Bu çalışmada Bootstrap yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarına göre de en büyük etkiyi α_4 parametresinin yaptığı görülmüştür. Polito et al., (2008) sonucunda α_4 parametresinin 0.5058 olduğu, bu çalışmada ise α_4 parametresinin ortalama olarak 1.9683 olduğu görülmüştür. Bu farklılığın sebebi ise deneylerde kullanılan ince dane oranının çok fazla olmasıdır.

6.5. Boşluk Oranına Bağlı Sıvılaşma Analizi

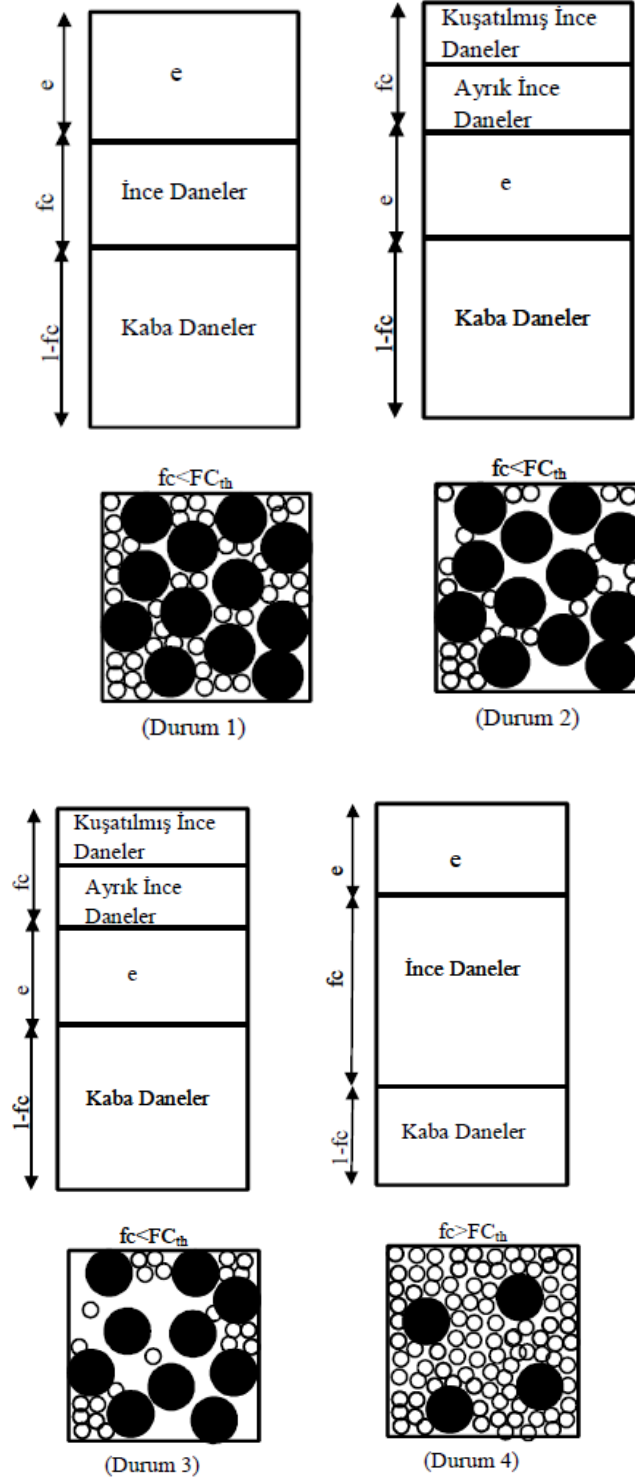
Yapılan arazi çalışmaları siltli kum ve kumlu silt zeminlerde depremler süresince sıvılaşmaya bağlı göçmelerin olduğu gözlemlenmiş (Seed et al., 1980; Perlea V.G., 2000; Perlea et al., 1999). Bu sebeple son 20 yıldır sıvılaşma dayanımında ince dane etkisi çok önem kazanmıştır ve literatürde bu konuda çalışmalar yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmaların kendi aralarında tartışmalı olduğu ve farklı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Sıvılaşma dayanımında ince dane etkisi incelenirken elde edilen sonuçların farklı olmasının sebebi ise karşılaştırmalarda kullanılan kriterlerin farklı olmasıdır (Finn et al., 1994).

Chang et al., (1982) sıvılaşma dayanımına düşük plastisiteli siltli kumların etkisini araştırmıştır. Aynı global boşluk oranı kullanılarak yapılan karşılaştırma sonuçlarına göre, ince dane miktarı arttıkça sıvılaşma dayanımı artmıştır. Tam tersine Troncoso (1990), aynı global boşluk oranında, nonplastik ince dane

miktarı %30'a kadar arttıkça sınılaşma dayanımının azaldığını söylemiştir. Thevanayagam (2000) ve Thevanayagam et al., (2000) kum nonplastik ince dane karışımlarının etkisini geniş bir şekilde araştırmışlardır ve davranışın daneler arası boşluk oranına göre yorumlanması gerektiğini deneysel gözlemler sonucunda önermişlerdir. Bu önemli parametre Kenny (1970) tarafından da onaylanmıştır. Daha belirgin olarak, Thevanayagam'ın önerdiği kavramsal çerçevede zemin karışımlarının (silt-kum), kaba daneler (coarse grains) ve ince daneler (fine grains) olmak üzere iki farklı çapa sahip küre parçacıklarından oluştuğu farzedilmiştir. Kaba ve ince daneler arasında bu etkileşim göz önüne alındığında intergranüler (e_s) ve interfine (e_f) boşluk oranları, karışımlardaki yüksek ve düşük ince dane içeriği, daneler arası ve inceler arası boşluk oranlarının öncelikli endeks özellikleri olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.45'de kaba ve ince dane etkisi mikroyapısal olarak yukarıda açıklanan kavramsal çerçeveye göre dört sınır durum için tanımlanmıştır. Durum (1); bu durumda ince dane miktarı (FC), eşik (sınır) ince dane miktarından (FC_{th}) daha azdır ve ince danelerin, kaba daneler arasındaki boşluklarda hareket etmesi tamamen engellenmiştir. Bu durumda da davranışın etkisi kaba danelerin birbiri ile teması ile olur. Böylece ince dane etkisi ihmal edilir ve aktif parçacıkların teması için kaba daneler arası (e_s) boşluk oranı kullanılır. Durum 2 ve 3'de ince dane, hala eşik (sınır) (FC_{th}) ince dane miktarından daha az olmasına rağmen global boşluk oranı artmıştır. Bu durumda hala kaba daneler arasındaki temas daha önemli rol oynar. Bununla birlikte, bir miktar ince dane (ayrık daneler) iç kuvvetler zincirine aktif olarak katılırken, geri kalan kuşatılmış ince daneler (confined fines) ise kaba daneler arasındaki boşlukları doldurur. Sonuçta, durum 4 için, ince dane miktarı eşik (sınır) (FC_{th}) değeri aşmaktadır. Bu durumda ince daneler daha önemli bir rol oynamaya başlarken, kaba danelerin etkisi azalmaya başlar. Böylece ayrık olan kaba danelerin etkisi ihmal edilir, parçacıklar arasındaki temas etkisi için ince dane boşluk oranı (e_f) kullanılır.

Söz konusu kavramsal çerçeveye bağlı olarak, kumlarda sınılaşma dayanımının artış veya azalış göstermesi, ince dane oranına bağlı olarak e_s veya e_f boşluk oranları ile ifade edilir.



Şekil 6.45. Mikroyapısal ve kaba ve ince daneler arası matris, Thevanayagam (2000).

Birçok çalışmada ince dane içeren kumlu zeminlerin iki matristen oluştuğunu ve bunların birbirleri ile ilişkili davranışları analiz edilmiştir (Vaid 1994; Thevanayagam et al., 2000; Polito and Martin 2001). Kum ve ince dane

matrisleri sırasıyla kaba ve ince daneler arası boşluk oranları olarak isimlendirilirler.

Kaba daneler arası boşluk oranı e_s , kum-silt karışımının davranışına kum danelerinin göreceli olarak katkısını ifade eder ve aşağıdaki denklem ile tanımlanır (Mitchell, J.K, 1975).

$$e_s = \frac{V_{ince} + V_{boşluk}}{V_{kum}} = \frac{F.C + w * (\frac{G_{sf}}{S_r})}{(1-F.C) * (\frac{G_{sf}}{G_{sg}})} \quad (6.8)$$

Burada;

V_{ince} : ince danelerin hacmi,

$V_{boşluk}$: boşlukların hacmi;

V_{kum} : kum danelerinin hacmi;

$F.C$: ince dane oranı;

w : su muhtevası;

G_{sf} : ince danelerin özgül yoğunluğu;

G_{sg} : kum danelerinin özgül yoğunluğu dur.

Doygun örneklerde ($S_r=1$) ve $G_{sf}=G_{sg}$ olduğundan, konsolidasyon sonrası intergranüler boşluk oranı;

$$e_s = \frac{FC + e}{(1-FC)} \quad (6.9)$$

olarak tanımlanır. Burada e , global boşluk oranıdır.

Eğer silt kum karışımlarında ince dane miktarı daha fazla ise, ince daneler arası boşluk oranını, e_f , kullanmak daha uygun olur (Thevanayagam and Mohan, 2000).

$$e_f = \frac{V_{boşluk}}{V_{ince}} \quad (6.10)$$

Benzer şekilde doymuş zeminlerde ($S_r=1$) olduğundan,

$$e_f = \frac{e}{FC} \quad (6.11)$$

olarak tanımlanır.

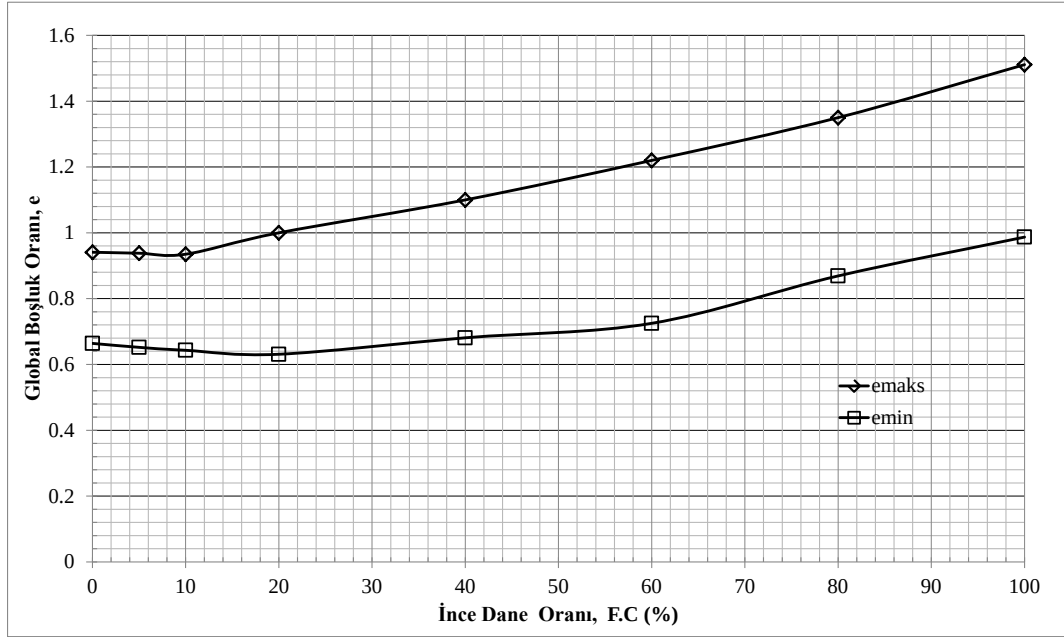
Tablo 6.2’de düşük plastisiteli siltler için kaba ve ince daneler arası boşluk oranlarına göre yapılan deneylere ait sonuçlar gösterilmektedir. Çalışma kapsamında düşük plastisiteli siltler için maksimum ve minimum boşluk oranlarının, ince dane oranına bağlı olarak değişimi Şekil 6.46’da gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Kaba- İnce daneler arası boşluk oranına göre yapılan deney sonuçları

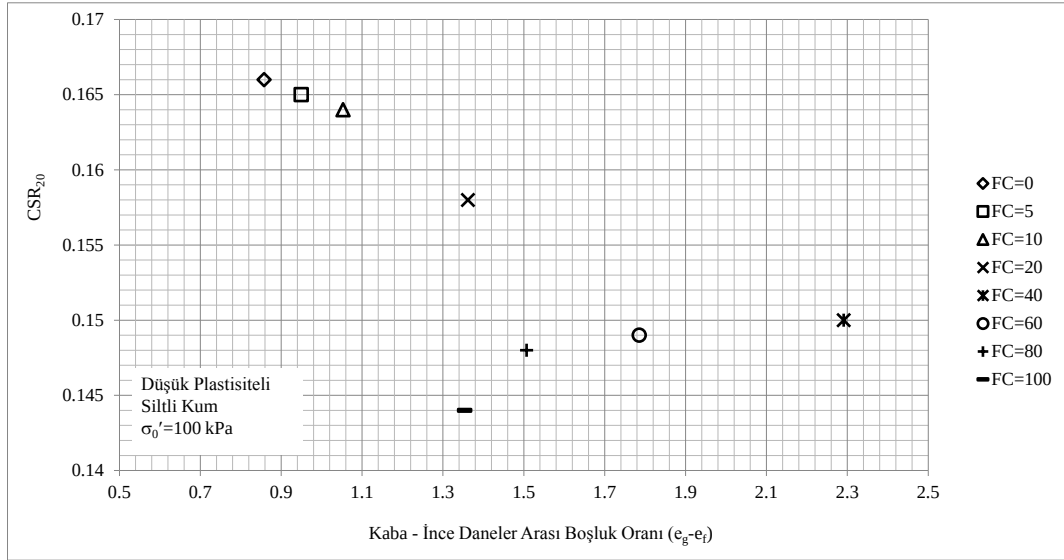
Test No	Numune Boyutları		Silt içeriği (%)	Boşluk Oranı e	İntergranular es	interfine ef	emaks	emin	Doygunluk Katsayısı, B	Hücre Basıncı (kPa)	Geri Basıncı (kPa)	CSR	Çevrim Sayısı N
1	50	99	0	0.858	0.858		0.941	0.664	0.997	275	175	0.156	30
2	48.52	99.76	0	0.858	0.858		0.941	0.664	1	180	80	0.222	2.5
3	49.18	99.11	0	0.858	0.858		0.941	0.664	1	200	100	0.187	10.5
4	49.59	99	0	0.858	0.858		0.941	0.664	0.97	270	170	0.133	103
5	49.32	99.18	0	0.858	0.858		0.941	0.664	1	280	180	0.105	29
6	49.7	99.09	5	0.852	0.95		0.938	0.652	1	225	125	0.226	5
7	50	98.89	5	0.852	0.95		0.938	0.652	0.96	360	260	0.246	2.5
8	49.96	98.98	5	0.852	0.95		0.938	0.652	0.987	250	150	0.127	76.5
9	49.92	99	5	0.852	0.95		0.938	0.652	0.982	250	150	0.172	15.5
10	49.44	99.1	5	0.852	0.95		0.938	0.652	1	175	75	0.102	425
11	50	98.88	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.965	300	200	0.258	1.5
12	49.84	98.88	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.977	225	125	0.209	3.5
13	49.56	98.98	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.983	175	75	0.185	10.5
14	49.67	98.97	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.984	200	100	0.141	53
15	49.88	99.01	20	0.889	1.362		1	0.631	0.993	275	175	0.140	38.5
16	50	99	20	0.889	1.362		1	0.631	0.997	300	200	0.111	199
17	49.7	98.91	20	0.889	1.362		1	0.631	1	275	175	0.167	15
18	49.48	98.96	20	0.889	1.362		1	0.631	1	175	75	0.197	6.5
19	49.57	98.8	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	250	150	0.130	38.5
20	49.52	98.78	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	250	150	0.108	241
21	49.52	98.78	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	275	175	0.163	14.5
22	49.57	98.77	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	250	150	0.187	4.5
23	49.54	98.71	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	225	125	0.142	28.5
24	49.53	98.65	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	225	125	0.114	95.5
25	49.39	98.41	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	200	100	0.171	7.5
26	49.75	98.56	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	275	175	0.197	3.5
27	49.52	98.14	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	250	150	0.131	17.5
28	49.35	98.23	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	175	75	0.112	163
29	49.33	98.45	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	175	75	0.197	2.5
30	49.78	98.22	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	225	125	0.125	73.5
31	49.63	98.26	100	1.354		1.354	1.511	0.987	1	225	125	0.156	13.5
32	49.5	98.45	100	1.354		1.354	1.511	0.987	1	175	75	0.105	163.5
33	49.47	98.94	100	1.354		1.354	1.511	0.987	0.985	375	275	0.133	35.5
34	49.42	98.47	100	1.354		1.354	1.511	0.987	1	200	100	0.198	4.5
35	49.92	99.44	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.981	225	125	0.208	19
36	50	99.34	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.973	400	300	0.255	6
37	49.71	99.42	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.978	200	100	0.162	151
38	49.64	99.38	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.995	200	100	0.327	2.5
39	50	99.12	20	0.816	1.269		1	0.631	0.978	275	175	0.273	2.7
40	49.52	99.21	20	0.816	1.269		1	0.631	1	175	75	0.209	7
41	49.53	99.2	20	0.816	1.269		1	0.631	1	175	75	0.163	32
42	49.6	99.22	20	0.816	1.269		1	0.631	1	200	100	0.136	126.5
43	49.7	99.12	40	0.891	2.151		1.1	0.681	0.992	225	125	0.274	1.5
44	49.52	99.08	40	0.891	2.151		1.1	0.681	0.995	175	75	0.221	5
45	49.92	98.97	40	0.891	2.151		1.1	0.681	1	250	150	0.163	35
46	49.55	99.15	40	0.891	2.151		1.1	0.681	1	175	75	0.137	95
47	49.6	98.78	60	0.973		1.621	1.22	0.725	1	175	75	0.279	0.5
48	49.58	99.07	60	0.973		1.621	1.22	0.725	1	180	80	0.225	3.5
49	49.55	99.02	60	0.973		1.621	1.22	0.725	0.995	175	75	0.164	29.5
50	49.51	99.02	60	0.973		1.621	1.22	0.725	0.992	175	75	0.124	423
51	49.95	98.77	80	1.11		1.387	1.35	0.869	0.987	250	150	0.265	0.5
52	49.72	98.79	80	1.11		1.387	1.35	0.869	0.995	250	150	0.210	4
53	49.69	98.85	80	1.11		1.387	1.35	0.869	0.992	225	125	0.164	26
54	49.54	98.86	80	1.11		1.387	1.35	0.869	1	200	100	0.140	61
55	49.4	98.79	100	1.249		1.249	1.511	0.987	1	175	75	0.138	132
56	49.41	98.81	100	1.249		1.249	1.511	0.987	1	175	75	0.210	5.5
57	49.48	98.99	100	1.249		1.249	1.511	0.987	1	175	75	0.169	30
58	49.82	98.91	100	1.249		1.249	1.511	0.987	0.992	250	150	0.265	0.5

Yapılan çalışmada kaba ve ince daneler arası boşluk oranlarına göre 20 çevrime karşılık gelen tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR) değerlerinin değişim grafiği Şekil 6.47’de gösterilmiştir. Burada ince dane oranı FC=%40’a kadar arttıkça tekrarlı gerilme genliği oranı azalmaktadır. İnce dane oranı %40’dan sonra daha

fazla arttığında ise CSR değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece yapılan deneylerde sınır ince dane oranının %40 olduğu bulunmuştur.



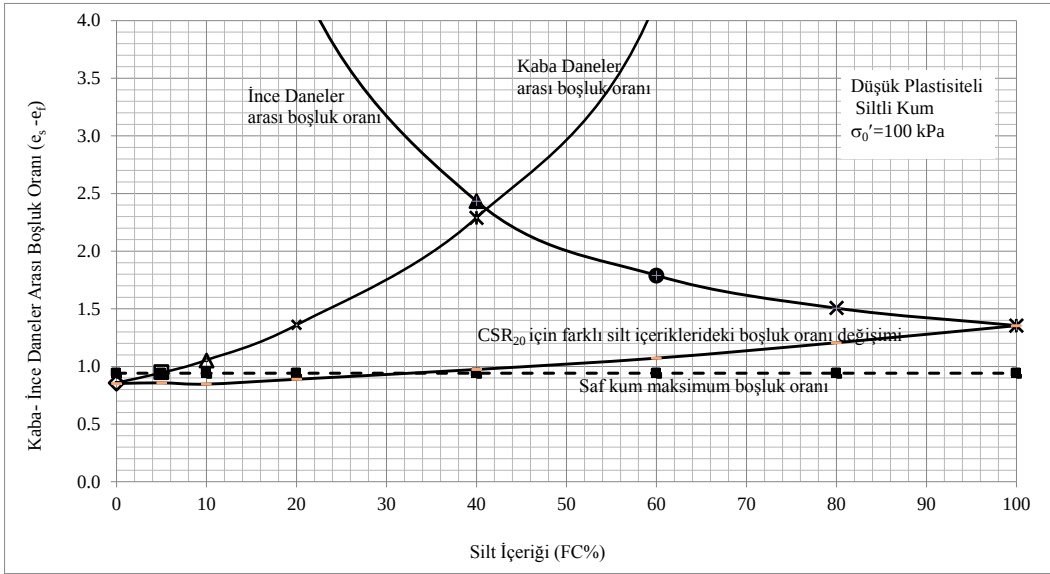
Şekil 6.46. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının ince dane oranı ile değişimi



Şekil 6.47. Kaba ve ince daneler arası boşluk oranlarının CSR ile değişimi

Sabit boşluk oranı değeri için, e , silt içeriği arttıkça, kaba daneler arası boşluk oranı değeri, e_s , artarken, ince daneler arası boşluk oranı değeri, e_f , azalır. Eğer silt içeriği eşik silt içeriğinden daha az ise ($FC < FC_{th}$), siltli kum karışımlarının davranışı kum daneleri tarafından kontrol edilir, ince danelerin kaba danelerin

etkileri sınırlı olacağı için sıvılaşma dayanımları azalır. Silt içeriği eşik değerin üzerinde olursa, kaba daneler sadece bir takviye etkisi yapar ve ince daneler arası boşluk oranının etkisi önemli hale gelir (Şekil 6.48). Ayrıca, saf kum için maksimum boşluk oranı için çizilen silt içeriği doğrusu ile farklı silt içeriklerindeki CSR_{20} değerlerinden elde edilen boşluk oranı değerlerinin değişimi çizilmiştir. Bu iki doğrunun kesişimi de eşik silt içeriği değerine karşılık gelmektedir (Şekil 6.48).



Şekil 6.48. Kaba ve ince daneler arası boşluk oranlarının CSR ile değişimi

7. SİLTİLİ KUM ZEMİNLERİN SIVILAŞMA SONRASI OTURMA DAVRANIŞLARI

Deprem yüklerine maruz kalan kumların sıkılaşıma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Deprem sonrasında zemin alt tabakalarında meydana gelen sıkılaşıma ise zemin yüzeyinde toplam ve farklı oturma olarak kendini göstermektedir. Deprem nedeniyle oluşan oturmalar sığ temeller üzerine inşa edilmiş yapılarda ve genellikle sığ derinliklerde yer alan alt yapı sistemlerinde büyük hasarlara yol açmaktadır. Kuru kum zeminler çok çabuk sıkışır, böylece deprem sonunda oturma işlemi hemen gerçekleşir. Suya doymun kum zeminlerin oturması ise ince tane etkisine bağlı olarak daha uzun sürmektedir. Bu tür zeminlerde oturma deprem nedeniyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmelenmesi ile gerçekleşir. Oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmelenmesi ince dane oranına, zeminin rölatif sıkılığına, drenaj boyuna, efektif çevre gerilmesi gibi parametrelere bağlıdır.

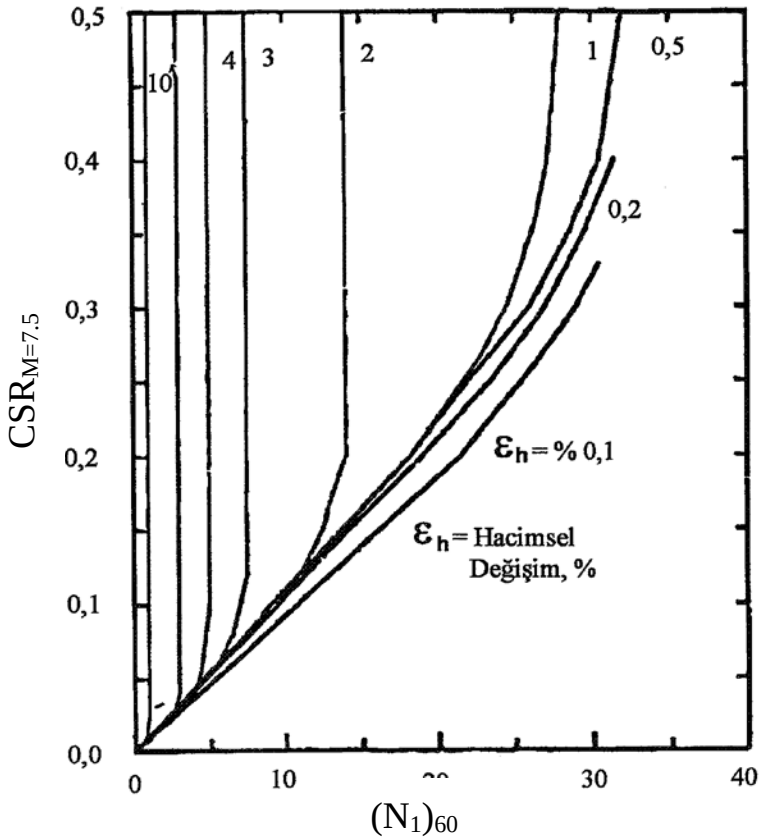
Lee and Albaisa (1974), Tatsuoka et al., (1984) ve Nagasa and Ishihara (1988), tarafından laboratuvarda kum zeminlerde yapılan dinamik tekrarlı yükleme deneyleri ile aşırı boşluk suyu basıncının oluşmasından dolayı meydana gelen hacim değişim özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, zeminlerde sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirmenin sadece zeminlerin birim hacim ağılıkları değil, daha önemlisi dinamik deneylerde tekrarlı yükler boyunca oluşan maksimum kayma birim deformasyonun etkilediği görülmüştür. Bu mantık temelinde Tokimatsu and Seed (1987), sıvılaşma sonrası oturmaların tahmininde bir yöntem geliştirdiler. Daha sonra Ishihara and Yoshimine (1992), sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirmeyi etkileyen temel parametre olarak maksimum kayma birim deformasyonu olarak güvenlik faktörüne bağlı olarak zemin yüzeyindeki oturmaların tahmini için bir yöntem geliştirdiler.

Literatürde suya doymun kumların sıvılaşma sonucu oturmaları için iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Bunlar;

1. Tokimatsu ve Seed Yöntemi (1987),
2. Ishihara ve Yoshimine (1992) dir.

7.1 Tokimatsu ve Seed Yöntemi

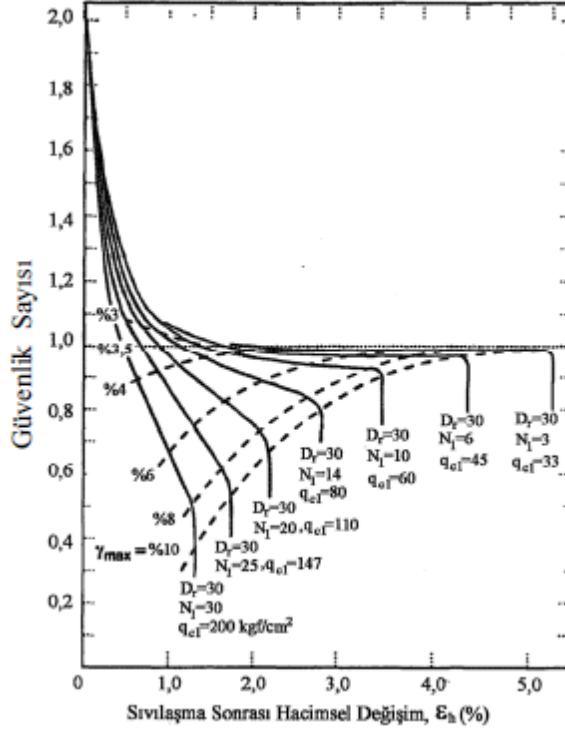
Suya doymun kumlarda deprem sonrasında meydana gelen sıkılaşıma kumun yoğunluğunda, maksimum kayma birim şekil değişiminden ve deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncından etkilenmektedir. Tokimatsu et al., (1987), laboratuvar deneyleri sonucunda sıvılaşmadan sonra oluşan hacimsel değişimin, relatif sıkılık ve maksimum kayma birim şekil değiştirme ile değiştiğini göstermektedir. Tokimatsu et al., (1987), düzeltilmiş SPT darbe sayısı, $(N_1)_{60}$ ve tekrarlı gerilme oranı arasında bir korelasyon geliştirmişlerdir (Seed et al., 1984). Böylece tekrarlı gerilme oranı ve SPT direnci kullanılarak $M=7.5$ büyüklüğündeki bir deprem nedeniyle oluşan hacimsel birim şekil değişimini gösteren bir grafik oluşturmuşlardır (Şekil 7.1).



Şekil. 7.1 Doygun kumlarda tekrarlı gerilme oranı ile SPT direnci ile hacimsel birim deformasyon hesaplanması (Tokimatsu and Seed, 1987).

7.2 Ishihara ve Yoshimine Yöntemi

Ishihara et al., (1992), deprem sonrasında oluşan hacimsel şekil değiştirmeyi hesaplamak için, sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü, maksimum tekrarlı kayma birim şekil değiştirme, relatif sıkılık ve SPT direncini kullanmışlardır (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 Sıvılaşma sonrası hacimsel değişim ile güvenlik sayısı ilişkisi (Ishihara and Yoshimine 1992).

7.3 Drenajsız Tekrarlı Yüklemeyi İzleyen Rekonsolidasyon Süresince Hacim Değişimi

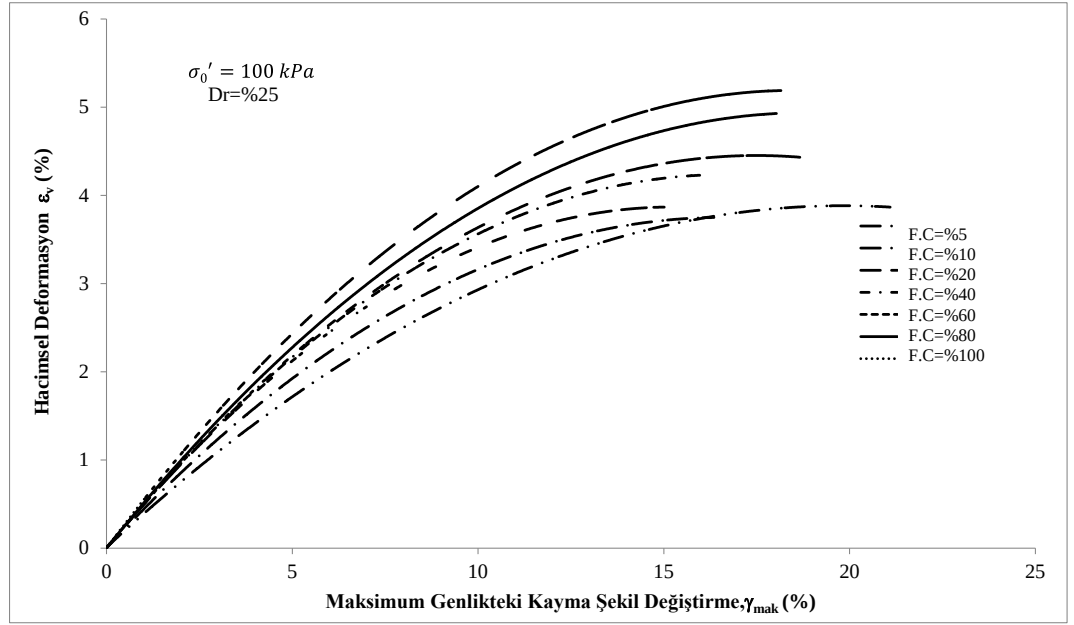
Birçok laboratuvar deneyi kumların hacim değişim özellikleri boşluk suyu basıncı gelişiminin dağılması süresince drenajsız koşullardaki tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu yapılmıştır. Siltli kum örneklerle dinamik üç eksenli deney aleti ile 100 kPa çevre basıncı altında izotropik olarak konsolide edilmiş ve farklı silt içerikleri ve rölatif sıkılıklar için gerilme kontrollü olarak drenajsız durumda kesme gerilmelerine maruz bırakılmıştır. Tablo 7.1'de yapılan deneylere ait deney şartları, yükleme koşulları, elde edilen kayma gerilmeleri ve hacimsel deformasyon değerleri gösterilmiştir. Drenajsız durumda yükleme tamamlandıktan sonra artan boşluk suyu basıncının sönmülmesi için drenaj vanaları açılarak zemin örneklerindeki hacim değişimleri ölçülmüştür. Hacim

değişimi, dinamik yükleme süresince sıvılaştıran zeminlerin oturma karakterleri ile ilgili olduğunu göstermiştir.

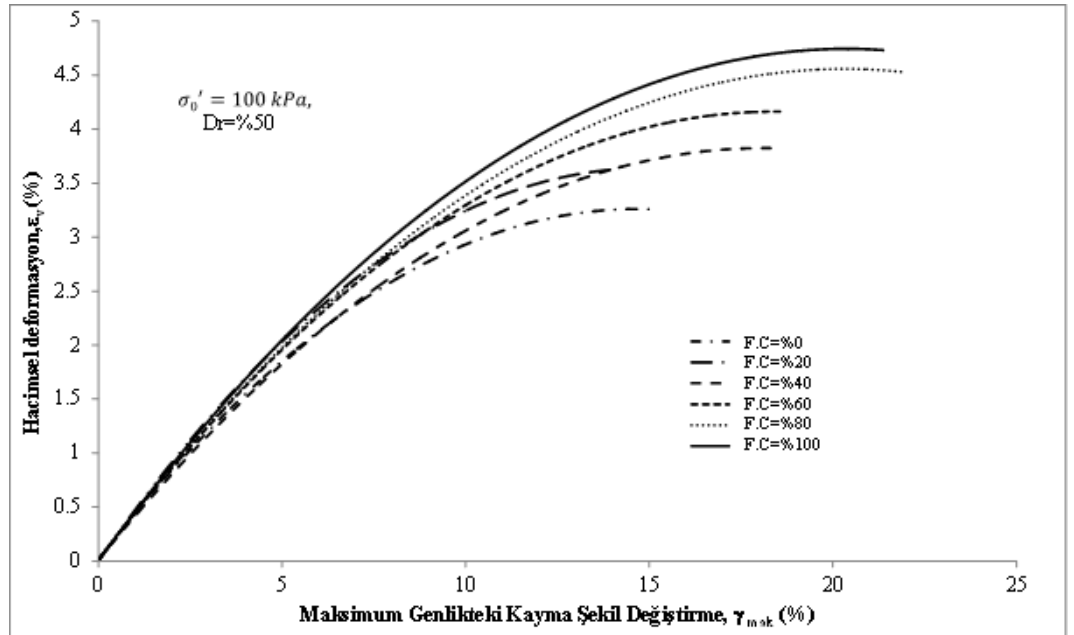
Tablo 7.1.Deneylerden elde edilen sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme ve güvenlik sayısı değerleri

Test No	Silt içeriği (%)	Rölatif Sıkılık Dr (%)	Konsolidasyon Basıncı (kPa)	Tekrarlı Gerilme	CSR	Çevrim Sayısı, N	Hacimsel Şekil Değiştirme (%)	Eksenel Şekil Değiştirme (e) (a) (%)	DA %5 için CSR_N20 çevrimde elde edilen CSR değerleri	Güvenlik sayısı $F_1 = C S_{R_{N20}} / CSR$	Kayma Gerilmesi (%)
1	0	25	100	31.123	0.156	30	3.198	7.176	0.167	1.073	10.76
2	0	25	100	44.35	0.222	2.5	3.188	10.731	0.167	0.753	16.10
3	0	25	100	37.414	0.187	10.5	3.246	8.467	0.167	0.893	12.70
4	0	25	100	26.669	0.133	103	3.044	8.824	0.167	1.252	10.15
5	0	25	100	21.073	0.105	29	3.003	5.075	0.167	1.585	7.61
6	5	25	100	45.111	0.226	8	3.486	10.467	0.164	0.727	15.70
7	5	25	100	49.243	0.246	5	3.556	10.687	0.164	0.666	16.03
8	5	25	100	25.445	0.127	76.5	3.100	10.898	0.164	1.289	12.53
9	5	25	100	34.481	0.172	15.5	3.215	10.114	0.164	0.951	15.17
10	5	25	100	20.351	0.102	425	3.080	7.909	0.164	1.612	11.86
11	10	25	100	51.543	0.258	1.5	3.896	14.059	0.168	0.652	21.09
12	10	25	100	41.802	0.209	3.5	3.752	12.794	0.168	0.804	19.19
13	10	25	100	37.000	0.185	10.5	3.960	12.961	0.168	0.908	16.20
14	10	25	100	28.292	0.141	53	3.957	8.704	0.168	1.188	13.06
15	20	25	100	28.016	0.140	38.5	3.714	8.169	0.157	1.121	12.25
16	20	25	100	22.276	0.111	199	3.568	6.971	0.157	1.410	10.46
17	20	25	100	33.409	0.167	15	3.661	7.866	0.157	0.940	12.98
18	20	25	100	39.434	0.197	6.5	3.804	10.009	0.157	0.796	15.01
19	40	25	100	25.943	0.130	38.5	4.398	8.728	0.15	1.156	13.09
20	40	25	100	21.516	0.108	241	4.330	8.480	0.15	1.394	12.72
21	40	25	100	32.553	0.163	14.5	4.347	10.692	0.15	0.922	14.43
22	40	25	100	37.378	0.187	4.5	4.384	10.414	0.15	0.803	15.62
23	60	25	100	28.337	0.142	28.5	4.297	8.865	0.151	1.066	13.30
24	60	25	100	22.707	0.114	95.5	4.426	7.744	0.151	1.330	11.62
25	60	25	100	34.258	0.171	7.5	4.471	11.561	0.151	0.882	17.34
26	60	25	100	39.357	0.197	3.5	4.199	12.438	0.151	0.767	18.66
27	80	25	100	26.161	0.131	17.5	5.048	9.901	0.15	1.147	14.85
28	80	25	100	22.349	0.112	163	5.142	9.835	0.15	1.342	14.75
29	80	25	100	39.336	0.197	2.5	5.159	12.097	0.15	0.763	18.15
30	80	25	100	24.948	0.125	73.5	4.930	9.820	0.15	1.203	14.73
31	100	25	100	31.112	0.156	13.5	4.978	12.018	0.144	0.926	18.03
32	100	25	100	20.976	0.105	163.5	5.138	10.111	0.144	1.373	15.17
33	100	25	100	26.556	0.133	35.5	4.976	10.234	0.144	1.085	16.89
34	100	25	100	39.525	0.198	4.5	4.988	10.504	0.144	0.729	19.43
35	0	50	100	41.544	0.208	19	2.890	5.800	0.208	1.001	8.70
36	0	50	100	50.941	0.255	6	2.767	6.304	0.208	0.817	9.46
37	0	50	100	32.497	0.162	151	2.812	5.719	0.208	1.280	8.58
38	0	50	100	65.376	0.327	2.5	2.769	10.075	0.208	0.636	10.13
39	20	50	100	54.675	0.273	2.7	3.358	9.356	0.174	0.636	14.03
40	20	50	100	41.738	0.209	7	3.631	8.327	0.174	0.834	12.49
41	20	50	100	32.605	0.163	32	3.473	7.242	0.174	1.067	10.86
42	20	50	100	27.174	0.136	126.5	3.541	7.758	0.174	1.281	10.47
43	40	50	100	54.732	0.274	1.5	3.445	12.236	0.179	0.654	15.29
44	40	50	100	44.136	0.221	5	3.623	9.424	0.179	0.811	14.14
45	40	50	100	32.541	0.163	35	3.640	8.014	0.179	1.100	12.02
46	40	50	100	27.491	0.137	95	3.596	8.234	0.179	1.302	12.35
47	60	50	100	55.888	0.279	0.5	3.908	12.411	0.176	0.630	18.62
48	60	50	100	44.968	0.225	3.5	3.993	11.931	0.176	0.783	17.90
49	60	50	100	32.84	0.164	29.5	4.073	9.050	0.176	1.072	13.57
50	60	50	100	24.709	0.124	423	4.053	8.779	0.176	1.425	13.17
51	80	50	100	52.969	0.265	0.5	4.210	14.609	0.163	0.615	21.91
52	80	50	100	41.981	0.210	4	4.230	11.288	0.163	0.777	19.75
53	80	50	100	32.779	0.164	26	4.199	9.126	0.163	0.995	17.80
54	80	50	100	27.947	0.140	61	4.261	12.799	0.163	1.166	17.28
55	100	50	100	27.656	0.138	132	4.649	9.433	0.177	1.280	14.15
56	100	50	100	42.043	0.210	5.5	4.552	10.679	0.177	0.842	16.02
57	100	50	100	33.712	0.169	30	4.498	9.554	0.177	1.050	14.33
58	100	50	100	53.068	0.265	0.5	4.629	14.249	0.177	0.667	19.24

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen dinamik üç eksenli deney özet sonuçları drenajsız tekrarlı yüklemelerde elde edilmiştir. Rekonsolidasyon süresince hacimsel deformasyona karşılık, ε_v , maksimum genlikteki kayma deformasyonu, γ_{mak} , çizilmiştir. İki farklı rölatif sıklıkta ve yedi farklı silt içeriğinde hazırlanan düşük plastisiteli siltli kum örnekleriyle dinamik üç eksenli deney gerçekleştirilmiş ve böylece elde edilen eğriler Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 $Dr=25\%$ için hacimsel deformasyon maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 7.4 $Dr=50\%$ için hacimsel deformasyon maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi

İki farklı rölatif sıkılık için ($Dr=25\%$ ve $Dr=50\%$), yapılan deneylerde hacimsel deformasyona karşılık, maksimum genlikteki kayma deformasyonunun ince dane oranına göre değişimi gösterilmiştir. Burada sabit maksimum kayma deformasyonu için, ince dane oranı arttıkça hacimsel deformasyonların da arttığı görülmüştür. Literatürde Tatsuoka et al., (1984), Sasaki et al., (1982), ve Kokusho et al., (1984)'de temiz kumlar için dinamik üç eksenli ve burulmalı kesme deneyleri ile hacimsel deformasyon değerinin rölatif sıkılık azaldıkça arttığını göstermişlerdir.

Yapılan çalışmada hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu arasında;

$$\varepsilon_v = \log(a + b * \gamma_{mak}) \quad (7.1)$$

şeklinde bir ilişkisi olduğu saptanmıştır. Burada a ve b parametrelerinin silt içeriğine (F.C) bağlı olarak değiştiği görülmüştür. İki farklı rölatif sıkılık ve yedi farklı silt içeriğine göre a ve b parametrelerinin değişimi, determinasyon katsayıları ile birlikte Tablo 7.2 ve Tablo 7.3’de gösterilmiştir. Yapılan regrasyon analizleri sonucunda a ve b parametreleri için elde edilen determinasyon katsayısının (R^2) 0.95’den daha büyük olduğu görülmüştür. Elde edilen sabitlerden a parametresinin silt içeriğine bağlı olmaksızın yaklaşık olarak 1 civarında olduğu bulunmuştur. Regrasyon analizi sonucunda b parametresinin ise silt içeriğine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Silt içeriği %0 (temiz kum) iken b parametresinin 3 civarında olduğu ve silt içeriği arttıkça (%100), b değerinin yaklaşık 10 değerini aldığı bulunmuştur.

Tablo 7.2. Dr=%25 için hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları

Silt İçeriği (F.C)	a	b	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Kalıntıların Kareleri Toplamı
0	1.0031	3.0456	0.9751	0.2798
5	1.0026	2.5905	0.9697	0.3481
10	1.0061	2.3529	0.9525	0.5481
20	1.0005	3.1696	0.9991	0.0087
40	1.0008	4.2507	0.9812	0.2582
60	1.0022	4.6580	0.9659	0.50631
80	1.0005	7.6152	0.9811	0.3551
100	1.0007	9.8097	0.9698	0.6239

Tablo 7.3. Dr=%50 için hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları

Silt İçeriği (F.C)	a	b	Determinasyon Katsayısı (R ²)	Kalıntıların Kareleri Toplamı
0	1.0148	1.6566	0.9367	0.4268
20	1.0014	2.6338	0.9894	0.1038
40	1.0041	2.4749	0.9783	0.2222
60	1.0024	3.4514	0.9858	0.1824
80	1.0009	3.4507	0.9976	0.0299
100	1.0005	5.3346	0.9881	0.1915

7.4 Siltli Kumlar İçin Maksimum Genlikteki Kayma Deformasyonu ve Güvenlik Sayısı Arasındaki İlişki

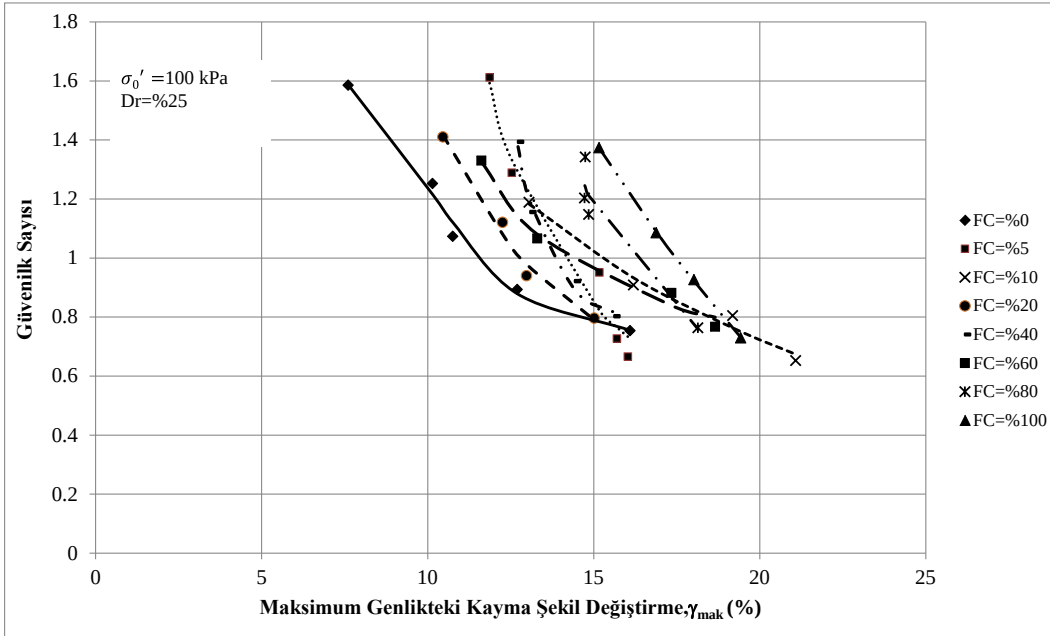
Zeminlerin sıvılaşmadan sonra doğan oturmaların tahmin edilmesi için maksimum genlikteki kayma deformasyonlarının bilinmesi gerekir. Bilindiği gibi tekrarlı dayanım özellikle tanımlanmak gerekirse, belirli sayıda kayma gerilmeleri altında başlangıç çevre gerilmesinin, gelişen boşluk suyu basıncına eşit olduğu durumdaki gereken tekrarlı gerilme oranıdır. Bu durum sıvılaşma başlangıcı veya %100 boşluk suyu basıncı gelişimi olarak tanımlanır. Laboratuvarında bu işlem çift genlikteki eksenel şekil değiştirmenin %5 olduğu duruma ya da 20 çevrime karşılık gelmektedir. Sonuç olarak, sıvılaşma için tanımlanan güvenlik sayısı;

$$G_s = \frac{\tau_{dev,L}}{\tau_{dev}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{dl}}{2\sigma'_0}\right)_{20}}{\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0}\right)_{20}} = \frac{CSR_L}{CSR} \quad (7.2)$$

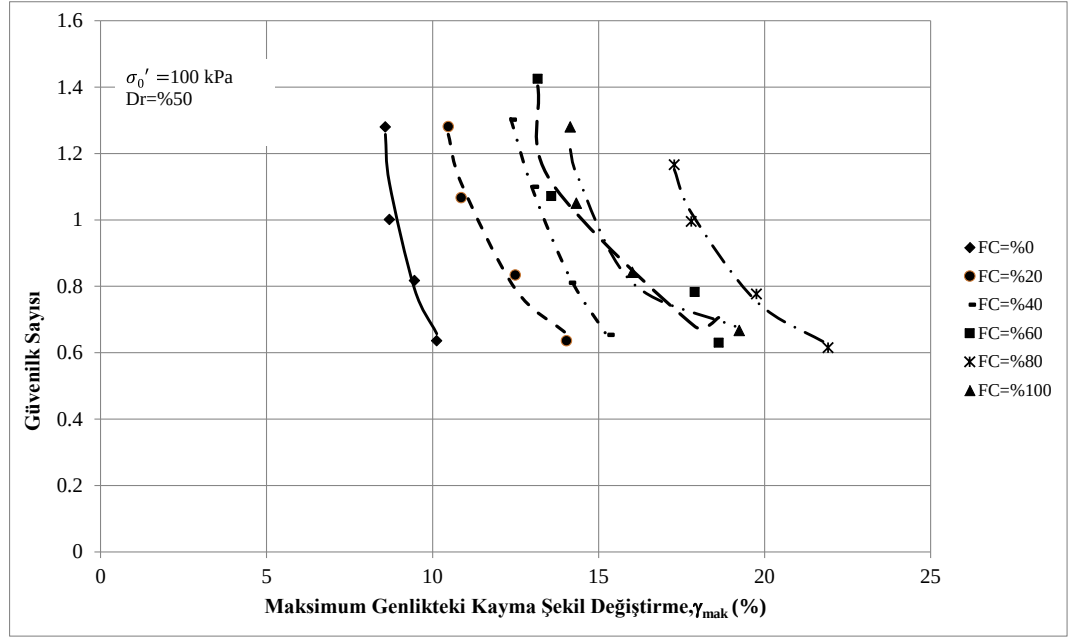
Burada CSR_L: sıvılaşma için gereken 20 çevrime karşılık gelen CSR değeridir. Denklem 7.2’de σ_{dl} , sıvılaşma başlangıcına sebep olan gerekli eksenel gerilmeyi veya 20 çevrim için %5 çift genlikteki eksenel şekil değiştirmeyi gösterir ve σ_d , eksenel gerilmenin genliğine karşılık deprem kaynaklı kayma gerilmesini göstermektedir. Yukarıdaki denklemde tanımlanan güvenlik sayısının biri belirtmesi tekrarlı yumuşamanın %5 çift genlikteki eksenel şekil değiştirme üretme durumu ve güvenlik faktörünün birden az olması %5’den daha az çift genlikteki eksenel şekil değiştirme üretilerek zeminde yumuşama durumunu gösterir. Böylece güvenlik sayısı çift genlikteki eksenel deformasyonun fonksiyonu olarak değerlendirilir ve bir bölgedeki güvenlik sayısı bilinir ise zeminlerdeki sıvılaşma süresince sıvılaşma süresince çift genlikteki kayma şekil değiştirmesinin gelişimi bilinebilir. Bu kayma şekil değiştirmesinin yarısı, tek

genlikteki eksenel şekil değiştirmenin sıvılaşma esnasında zeminin maksimum kayma şekil değiştirmeye maruz kaldığı kabul edilir.

Dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak, iki farklı rölatif sıkılıktaki ($Dr=\%25$ ve $Dr=\%50$), ve farklı silt içeriklerindeki siltli kum örnekleri üzerinde yapılan deneylerde güvenlik sayısına karşılık elde edilen maksimum genlikteki kayma şekil değiştirme sonuçları Şekil 7.5 ve 7.6’da gösterilmiştir. Şekillerde $Dr=\%25$ ve $Dr=\%50$ için yapılan deneylerde silt içeriği arttıkça, maksimum genlikteki kayma şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür. Böylece silt içeriği artışının çok daha büyük kayma şekil değiştirme oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.5 $Dr=\%25$ için güvenlik sayısı maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 7.6 Dr=%50 için güvenlik sayısı maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda güvenlik sayısı ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu arasında;

$$G_s = \frac{\gamma_{mak}}{(a+b*\gamma_{mak}+c*\sqrt{\gamma_{mak}})} \quad (7.3)$$

şeklinde bağıntı elde edilmiştir. Burada, a, b ve c parametrelerinin silt içeriğine (F.C) bağlı olarak değiştiği görülmüştür. İki farklı rölatif sıkılık ve yedi farklı silt içeriğine göre a, b ve c parametrelerinin değişimi, determinasyon katsayıları ile birlikte Tablo 7.4’de gösterilmiştir. Yapılan regrasyon analizleri sonucunda a, b ve c parametreleri için elde edilen determinasyon katsayısının (R^2) 0.92’den daha büyük olduğu görülmüştür.

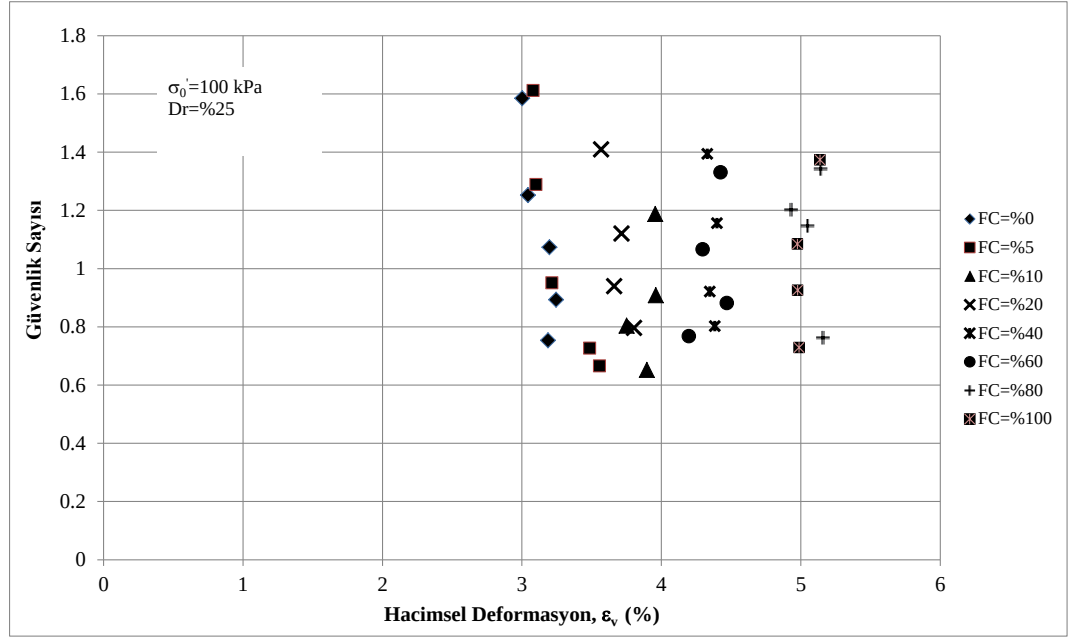
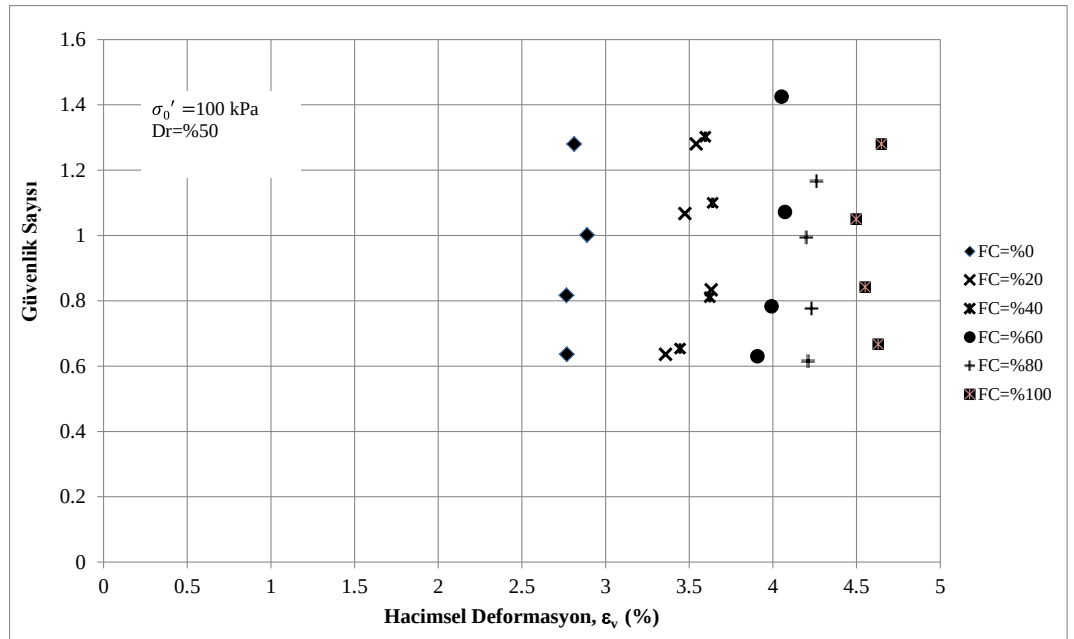
Tablo 7.4. Dr=%50 için güvenlik sayısı ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları

Silt İçeriği (F.C)	a	b	c	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Kalıntıların Kareleri Toplamı
0	-583.247	-53.1311	357.1486	0.9237	0.0172
20	-42.4158	2.632625	7.159983	0.9800	0.0046
40	312.1531	31.19776	-195.77	0.9983	0.0004
60	-716.301	-40.6086	347.3401	0.9490	0.0187
80	-189.093	-2.30841	58.69417	0.9916	0.0014
100	-373.164	-17.1754	166.9143	0.9349	0.0136

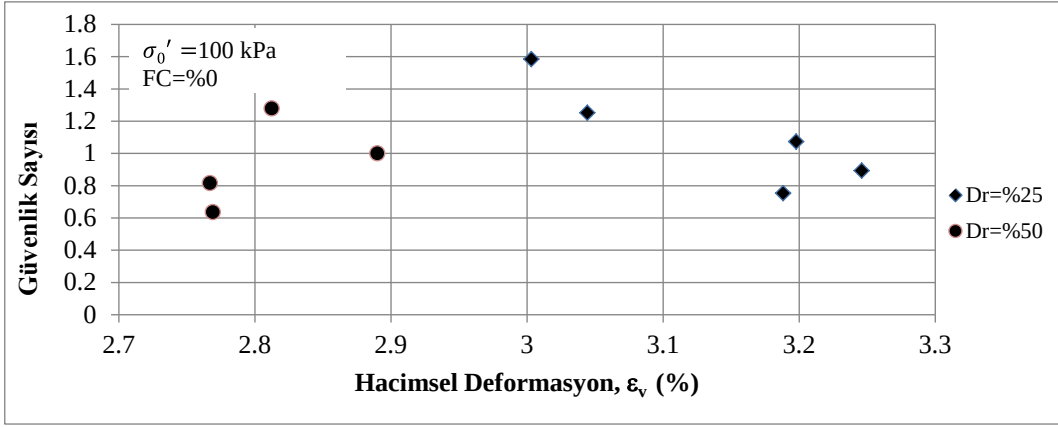
7.5 Siltli Kumlar İçin Güvenlik Sayısı ile Hacimsel Deformasyon Arasındaki İlişki

Sıvılaşma analizlerinde geleneksel yöntemlerle güvenlik sayısı biliniyor ise maksimum genlikteki kayma şekil değiştirmenin saptanmasına gerek kalmaz ve sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon direk olarak tahmin edilebilir. Çalışma kapsamında farklı silt içeriği ve rölatif sıkılık değerlerinde güvenlik sayısına karşılık hacimsel deformasyon grafiği Şekil 7.7 ve 7.8’de elde edilmiştir. Burada İki farklı rölatif sıkılık için de aynı silt içeriğinde hacimsel deformasyon değerlerinin değişmediğini göstermiştir. Aynı silt içeriğinde ve aynı efektif çevre gerilmesi altında, farklı tekrarlı gerilme genliğinde (CSR) dinamik üç eksenli deney cihazı ile yapılan deneylerde güvenlik sayısı 0.6 ile 1.6 arasında değiştiği görülmüştür. Bu değerlere karşılık deneylerde zemin göçme durumuna gelene kadar tekrarlı yüklere maruz kaldığı için büyük deformasyon değerleri elde edilmiş ve bu değerler için elde edilen hacimsel deformasyonların birbirine çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Örnek vermek gerekirse Tablo 7.1’de gösterilen 1 ve 2 nolu deneyler kıyaslandığında tekrarlı gerilme genliği (CSR) değerleri sırasıyla 0.156 ve 0.222’dir. Bu CSR değerlerine karşılık elde edilen güvenlik sayısı değerleri ise yine sırasıyla 1.073 ve 0.753 olarak hesaplanmıştır. Ancak deney sonunda elde edilen hacimsel deformasyon değerleri sırasıyla 3.198 ve 3.188’dir. Hacimsel deformasyon değerleri arasındaki fark sadece %0.01 kadardır. Böylece aynı silt içeriğinde farklı CSR değerlerine sahip deneylerde birbirine benzer hacimsel deformasyon değerleri elde edilmiştir. Şekil 7.7 ve 7.8’de elde edilen grafiklerde aynı silt içeriğinde belirli güvenlik sayısı aralığında hacimsel deformasyonların aynı değerlerde olduğu sonucunu göstermiştir.

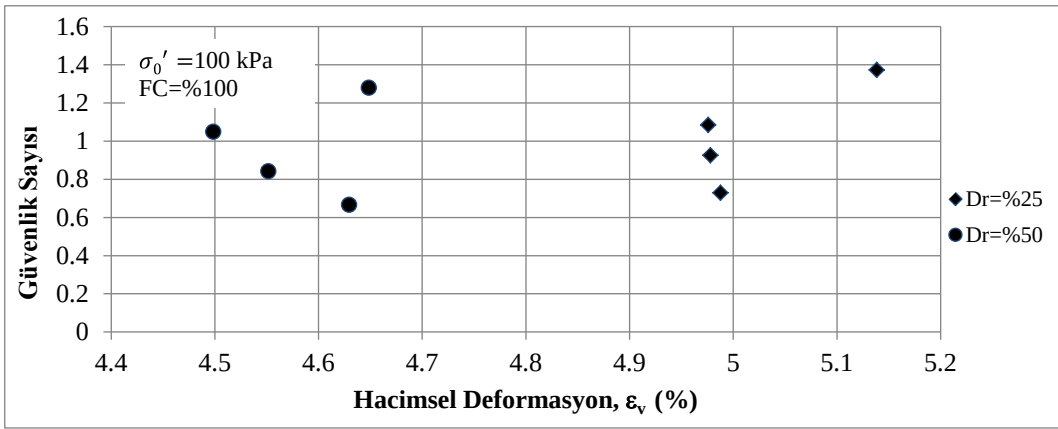
Ayrıca silt içeriğinde meydana gelen artışın hacimsel deformasyon değerlerini de aynı ölçüde arttırdığını göstermiştir. Tablo 7.1’den farklı silt içeriğine sahip deneyler için karşılaştırma yapabilmek amacıyla 1 ve 31 nolu deney setleri karşılaştırılmıştır. 1 nolu deneyde silt içeriği (F.C=%0), tekrarlı gerilme genliği (CSR=0.156)’dir. 31 nolu deney içinse deneyde silt içeriği (F.C=%100), tekrarlı gerilme genliği (CSR=0.156) yine 1 nolu deneyle aynı değere sahiptir. Deneyler incelendiğinde hacimsel deformasyon değerleri 1 ve 31 nolu deneyler için sırasıyla %3.198 ve %4.978’dir. Hacimsel deformasyon değerleri arasında %1.780 gibi çok büyük bir fark meydana gelmiştir. Bu durum zeminde silt içeriği arttıkça, ince danelerin su tutma kapasitelerinin arttığını, yükleme sonunda drenaj vanaları açılarak çok daha büyük miktarda su çıkışının meydana geldiğini ve hacim değişimlerinin arttığını göstermiştir.

Şekil 7.7 $Dr=\%25$ için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisiŞekil 7.8 $Dr=\%50$ için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi

Aynı silt içeriğine sahip zeminlerde farklı rölatif sıkılıklar ($Dr=\%25$ ve $Dr=\%50$) için elde edilen güvenlik sayısı ile hacimsel deformasyon grafikleri Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Şekil 7.9'da silt içeriği ($F.C=\%0$) ve Şekil 7.10'da ise ($F.C=\%100$) değerlerine ait grafikler elde edilmiştir. Her farklı silt içeriği değeri için rölatif sıkılık arttıkça güvenlik sayısı ile hacimsel deformasyon ilişkisinde elde edilen hacimsel deformasyon değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum literatürde elde edilen sonuçlar ile uyum göstermektedir.



Şekil 7.9 FC=%0 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi



Şekil 7.10 FC=%100 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi

8. SONUÇLAR

Deprem gibi tekrarlı yükler altında, özellikle suya doymun zeminlerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin ne şekilde değiştii ve hangi mekanizma ve koşulların etkisi altında olduğu zemin dinamiğinin önemli konularından birisi olmuştur. Bu özelliklerin değişim ve etkileşimleri hem teorik hem de deneysel anlamda birçok araştırmacı tarafından günümüze kadar incelenmiştir (Altun 2004). Son yıllarda laboratuvar şartlarında geliştirilen birçok deney aleti ile zeminlerin doğadakine benzer şartlarda yeniden oluşumları sağlanarak, bu tür davranış özelliklerinin daha kapsamlı ve gerçek anlamda incelenebilmesi mümkün olmuştur. Özellikle örselenmemiş veya yeniden oluşturulmuş zeminlerde hem statik hem de dinamik gerilmeler oluşturularak zeminlerin dinamik özelliklerinin araştırılabilmesine olanak sağlayan dinamik üç eksenli deney aleti bunlardan bir tanesi olmuştur.

Bu çalışma kapsamında suya doymun kum - plastik olmayan silt ve kum - düşük plastisiteli silt karışımlarının, belirli oranlarda silt eklenerek drenajsız koşullardaki gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla değişik başlangıç ve deneysel koşullarda belirli bir sayıda dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Zemin ve deney özelliklerinde yapılan değişikliklerin bu davranış özelliklerini ne şekilde etkilediği araştırılmaya çalışılmıştır. Buna göre yapılan deneysel çalışmaların sonucunda aşağıdaki maddeler halinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Dinamik üç eksenli deney aleti ile diğler laboratuvar dinamik deney aletlerine göre, sahip olduğu birçok avantajlara bağılı olarak, küçük ve büyük deformasyon seviyelerinde, belirli başlangıç ve sınır şartlarında ve birçok zemin türünde monotonik ve tekrarlı deneyler yapabilmek mümkündür. Bu deney sisteminde üniform gerilme dağılımları ile zeminlerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri farklı koşullar altında belirlenebilmektedir.
2. Değişik başlangıç ve sınır koşullarında, artan genlikli gerilmelerle yapılan dinamik üç eksenli yükleme deneyleri ile siltli kumların dinamik yükler altındaki gerilme şekil değiştirme özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmada dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri elde edilirken JGS 0541-2000 deney standardı kullanılmıştır. JGS 0541-2000 standardında en az kırk kez yüklemenin gerçekleştirilmesi gerektiği söylenmiştir. Bu deney standardına göre on birer çevrimlik yüklemeler

gerçekleştirilmiştir. Yükleme sırasında drenaj vanaları kapatılarak boşluk suyu basıncı gelişimi sağlanmış; ancak yükleme tamamlandıktan sonra drenaj vanaları açılarak zeminin konsolide edilmesine izin verilmiştir. Böylece her bir yükleme kademesinde zemin başlangıç koşullarına yeniden döndürülmüştür. On birer çevrimlik bu gerilme artışları ile siltli kum zemine ait dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri, farklı çevre gerilmesi ve boşluk oranı değerlerinde belirlenerek, bu değişimlerin dinamik parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna göre çevre gerilmesindeki ve boşluk oranındaki farklılıkların siltli kumların dinamik davranış özelliklerini ortaya koyan dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde oluşturduğu değişiklikler belirlenmiştir.

3. Özellikle suya doymuş zeminlerin tekrarlı yükler altında ve büyük deformasyon seviyelerinde ortaya koydukları dayanım özellikleri ve bunların yükleme sayısına bağlı olarak değişimi, sıvılaşma, çevrimsel oynaklık ve diğer benzeri olayların meydana gelmesinde belirleyici olmaktadır. Yeterli koşullar oluşturulduğunda tekrarlı yükler altındaki zeminler içindeki boşluk suyu basıncının artışı ile beraber mukavemetini kaybederken değişik faktörlere bağlı olarak farklı davranış şekilleri ortaya koyabilmektedir. Özellikle yükleme sayısının miktarı, silt içeriği, çevre basıncının değeri, zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı bu davranış şekillerini oluşmasında etken faktörler olmaktadır. Çalışma kapsamında suya doymuş siltli kumlar ile gerçekleştirilen deneylerde yukarıda sıralanan faktörlerin siltli kumların dinamik davranışları üzerinde yaptığı etkiler, gerilme izleri de kullanılarak grafiklerle beraber saptanmaya çalışılmıştır. Bu etken faktörlerin siltli kum zeminlerin dinamik dayanımları üzerinde oldukça belirleyici etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu etkilerin belirlenmesi, zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyellerinin saptanmasında önemli olmaktadır. Yine saptanan bu etkiler literatürde yer alan çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir.
4. Silt içeriği zeminlerin dinamik davranış özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Çalışma kapsamında belirli oranlarda plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltli kumlar ile üniform tekrarlı yüklemelerle farklı deneysel koşullar altında deneyler yürütülmüş ve silt içeriğinin zeminin dinamik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Silt içeriğinin farklı oranlarında gerçekleştirilen deneylerde silt yüzdesinin dinamik davranışa yaptığı etki ortaya konmaya çalışılmıştır. Sıvılaşma direncinin silt içeriğine karşı oldukça hassas olduğu saptanmıştır. Çalışmada tekrarlı gerilme genliği oranı çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda silt içeriğinin sıvılaşma direncine karşı bir eşik değeri olduğu ve bu eşik değere kadar sıvılaşmayı kolaylaştırdığı, eşik değer aşıldıktan sonra sıvılaşması için gereken çevrim sayısının arttığı görülmüştür. Çalışmada düşük plastisiteli siltler için eşik değerinin %40 silt içeriği olduğu bulunmuştur.

5. Tekrarlı yükler altında suya doygun plastik olmayan siltli kumlar ile düşük plastisiteli siltli kumların drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneylerde oluşan aşırı boşluk suyu basıncı ve şekil değiştirme genlik değerlerinin yükleme sayısı ile beraber değişim şekillerine zeminin dinamik davranış özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi mümkün olmaktadır. Yapılan her deney ait boşluk suyu basınçlarının artış şekilleri belirlenerek zemin türleri ve deney koşullarına bağlı olarak bu artışın ne şekilde geliştiği ve hangi faktörlerden etkilendiği saptanmaya çalışılmıştır. Buna göre yeterli koşullar sağlandığında üniform genlikli tekrarlı yükler altında siltli kumlarda oluşan boşluk suyu basıncı oranının %40'lık kısmının 0.1 çevrim sayısı oranında oluştuğu gözlemlenmiştir. Daha sonra boşluk suyu basıncı oranının %80 seviyesine ulaştığında ise çevrim sayısı oranının 0.8 olduğu görülmüştür. Literatürde temiz kumların boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı oranı incelendiğinde (Seed et al., 1976, Lee and Albaisa 1974), dar bir bant aralığında olduğu görülmüştür. Halbuki düşük plastisiteli siltli kumlarda bu değişimin çok daha farklı olduğu bulunmuştur. Düşük plastisiteli siltli kumlarda boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı oranı ilişkisinde Seed et al., 1976, Lee and Albaisa 1974'nin tanımladığı temiz kumlar için üst sınır ile El Hosri et al. 1984, nın tanımladığı killi kumların alt sınırı arasında oluştuğu gözlenmiştir.

Zeminlerin boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı oranı ilişkisi incelenirken, gerilme tabanlı modellerden literatürde yer alan üç model Seed et al.,(1975), Booker et al., (1976), ve Polito et al., (2008) için α katsayılarının değişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda α parametresi temiz kumlara göre, düşük plastisiteli siltli kumlar için daha büyük çıkmıştır.

Dinamik etkilere maruz suya doygun kumlarda yükleme sayısının ilerleyişi ile beraber, oluşan birim şekil değiştirme değerindeki artış yüklemenin büyük bir kısmında oldukça sınırlı kalmaktadır. Boşluk suyu basıncının efektif evre gerilmesine eşitlenmek için yaptığı ani artışla beraber birim şekil değiştirme genlikleri de hızlı bir şekilde artarak büyük değerlere ulaşmaktadır. Bununla birlikte düşük plastisiteli siltli zeminlerde yavaş yavaş artarak son değerine ulaşmaktadır. Bu durum düşük plastisiteli siltli zeminlerde histerisis ilmiklerini ve gerilme izlerini kumlara göre oldukça farklı kılmaktadır.

Zeminlerde oluşan birim şekil değiştirme değerlerinin tekrarlı yükler altındaki gelişiminin belirlenmesi ve bu şekil değiştirme değerlerinin elastik ve plastik eşik değerlerinin tespit edilmesi zeminin dinamik davranış özelliklerinin saptanması açısından önemli olmaktadır. Bu eşik değerlerinin hangi irdelemeler sonucu ortaya konabileceği yapılan deneylere ait sonuçlar üzerinde verilmeye çalışılmıştır.

Tekrarlı yükler altındaki zeminlerde oluşan toplam ve kalıcı şekli değiştirme değerlerinin miktarı ve çevrim sayısı ile beraber değişimleri incelemeye çalışılmıştır. Birim şekil değiştirme genliklerinin artışı ile beraber, hem üniform yüklemeli hem de artan genlikli yükleme deneylerinde toplam ve kalıcı şekil değiştirme değerleri arasında lineer artımlı doğruya yakın bir ilişki saptanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarla belirlenen plastik olmayan siltli kum ve düşük plastisiteli siltli kumun, gelecekte benzeri konularda gerçekleştirilecek deneysel ve teorik model çalışmaların geliştirilmesi konusunda yararlı olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alarkon-Guzman A.**, 1986, A New Apparatus for Investigating the Stress–Strain Characteristics of Sand. *Geotechnical Testing Journal* (9), pp.204-212.
- Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. and Rosenbrand, W.F.**, 1980, Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106, pp.499-529.
- Altun, S.**, 2002, Burulmalı Kesme Deney Aleti ile Zeminlerin Dinamik Davranış Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi. İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altun, S. ve Ansal, A.**, 2004, Kumlarda Dinamik Kayma Modülünün Belirlenmesi, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 403-406.
- Altun, S. and Göktepe, A.B.**, 2006, Dependence of dynamic shear modulus of uniform sands on stress level and density, *Civil Engineering and Environmental Systems*, Volume 23, Issue 2, June 2006, pp. 101-116.
- Amini, F. and Qi, G.Z.**, 2000, Liquefaction testing of stratified sity sands, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 126, pp.208-217.
- Ampadu, S., and Tatsuoka, F.**, 1993, A Hollow Cylinder Torsional Simple Shear Apparatus Capable of a Wide Range of Shear Strain Measurement. *Geotechnical Testing Journal* (16), pp.3-17.
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1982, Rate dependent dynamic behavior of normally consolidated clay, 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, 20-25 September, Greece, pp.329-336.
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989, Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, 115, pp.968-983.
- Ansal, A.**, 1985 An Endochronic Model For Cyclic Behaviour”, *Special Volume on Constitutive Models for Soils*, 11th Int.Con. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, pp.123-127.
- Ansal, A.M. ve Tuncan, M.**, 1987, Killerde Tekrarlı Kayma Gerilmelerinin Yol Açtığı Konsolidasyon Oturmaları”, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 2. Ulusal Kongresi*, 1. Cilt, s.113-119, Boğaziçi Üniversitesi, Bebek, İstanbul.
- Ansal, A., İyisan, R., and Yıldırım , H.**, 2001, The Cyclic Behaviour of Soils and Effects of Geotechnical Factors in Microzonation. *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, 21, pp.445-452.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Azzouz, AS., Malek, AM., and Baligh, MM.,** 1989, Cyclic behavior of clays in undrained simple shear. J Geotech. Eng ASCE, 115(5):pp.637-57.
- Bhatia, S., Schwab, J., and Ishibashi, I.,** 1985, Cyclic Simple Shear Torsional Shear and Triaxial a Comparative Study. A. A. Convention (Dü.), Proceedings of the Session on Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions içinde, pp.232-254, Dertoit.
- Boulanger, R., and Idriss, I.,** 2004, Evaluating the liquefaction or cyclic failure of silts and clays. University of California,. Davis: Center of Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Eng.
- Boulanger, R., Meyers, M., Mejia, L., and Idriss, I. M.,** 1998, Behavior of a fine-grained soil during Loma Prieta earthquake. Canadian Geotechnical Journal (35), pp.146-158.
- Bray, J. D., Sancio, R., Durgunoglu, H., Önalp, A., Seed, R., Stewart, J.,** 2001, Ground failure in Adapazarı, Turkey. Proceedings of Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. Istanbul.
- Castro, G.,** 1975, Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sand. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division (101), pp.552-569.
- Castro, G., and Poulos, S.,** 1977, Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility . ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division (103), pp.501-516.
- Chang NY, Yeh ST, and Kaufman LP.,** 1982, Liquefaction potential of clean and silty sands. Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, USA, vol. 2., p. 1017-32.
- Chang, N.Y.,** 1988, Liquefaction susceptibility of fine grained soils-preliminary study report, Misc. Paper, GL-87-24, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Chang, N.Y.,** 1990, Influence of fines content and plasticity on earthquake induced soil liquefaction, Contract Report to U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Chen, Y. I.,** 1988, Dynamic Shear Modulus and Fabric: Part I, Depositional and Induced Anisotropy. Géotechnique (38), pp.25-32.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chu, D. B., Stewart, J., Lee, S., Tsai, J., Lin, P., Chu, B., et al.** 2004, Documentation of soil conditions at liquefaction and non-liquefaction sites from 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 9-10 (24), pp.647-657.
- Christakos, G.,** 2003, Soil behaviour under dynamic loading conditions: experimental procedures and statistical trends, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17, pp.175-190.
- Das, M.B., Puri, V.K. and Prakash, S.** 1999, Liquefaction of silty soils, *Proceedings of Second Earthquake Geotechnical Eng. Int. Conf. Lisbon, Portugal*, pp.619-623.
- De Alba, P., Seed, H., and Chan, C.,** 1976, Sand Liquefaction in Large Simple Shear Tests. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Divisions* (102), pp.909-927.
- Dobry, R., Vasquez-Herrera, A., Mohamad,, R., and Vucetic, M.,** 1985, Liquefaction Flow failure of Silty Sand by Torsional Cyclic Tests. *Proceedings of the Session on Advances in the art of Testing Soil Under Cyclic Conditions*, pp.29-50.
- Drnevich, V.,** 1972, Undrained Cyclic Shear of Saturated Sand . *ASCE Journal of the Soil Mec. and Found. Eng. Division* (98), pp.807-825.
- El Hosri, M.S., Biarez, H., and Hicher, P.Y.,** 1984, Liquefaction characteristics of silty clay, *Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng., Prentice Hall, NJ*, pp.277-284.
- Erken, A., Alhas, E. ve Ansal, A.M.,** 1994, Suya doygün siltli kumların deprem sırasındaki davranışı, zemin mekaniği ve temel mühendisliği 5. ulusal kongresi, s. 184-193, ODTÜ, Ankara.
- Erken, A., and Ansal, A.,** 1994, Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands. *XIII. Int. Conf. on Soil Mechanics and foundation Engineering*, 1, pp.165-170, New Delhi.
- Erten, D., and Maher, M.,** 1995, Cyclic Undrained Behavior of Silty Sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (14), pp.115-123.
- Finn, W., Ledbetter, R., and Wu, G.,** 1994, Liquefaction in Silty Soils: Design and Analysis, *Ground Failures under Seismic Conditions. ASCE Geotechnical Special Publications* (44), pp.51-76.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Garga, V., and McKay, L.,** 1984, Cyclic Triaxial Strength of Mines Tailings . ASCE Journal of Geotechnical Engineering (110), pp.1091-1105.
- Hardin, , B., and Richart, F.,** 1963, 'Elastic wave velocities in granular soils. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 89(1), pp.33-65.
- Hardin, B. O.,** 1978, The nature of stress-strain behavior of soils. Proc., ASCE Geotech. Engrg. Div., Spec. Conf., pp.3-90, ASCE.
- Hardin, B., and Drenevich, V.,** 1972b, Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects. ASCE Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering (98), pp.603-624.
- Hardin, B., and Richart, F.,** 1963, "Elastic wave velocities in granular soils," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering (89), pp.35-39.
- Hardin, B., and Drenevich, V.,** 1972, Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves,. ASCE Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering (98), pp.667-692.
- Holzer, T. L., Bennett, M., Ponti, D., and Tinsley, J.,** 1999, Liquefaction and soil failure during 1994 Northridge earthquake. (ASCE, Dü.) J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 125(6), pp.438-452.
- Hyodo, M., Hyde, A., and Aramaki, N.,** 1998, Liquefaction of Crushable Soils. Geotechnique (48), pp.527-543.
- Ishibashi, I., Chen, Y., and Jenkins, J.,** 1988, Dynamic Shear Modulus and Fabric: Part II, Stress Reversal. Géotechnique (38), pp.33-37.
- Ishibashi, I., and Zhang, X.,** 1993, Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay. Soils and Foundations (33), pp.182-191.
- Ishihara, K.,** 1996, Soil Behavior and Earthquake Geotechnics. New York: Oxford University Press.
- Ishihara, K., and Li, S.,** 1972, Liquefaction of Saturated Sand Under Cyclic Torsional Shear Loading. Soils and Foundations (12), pp.19-39.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., and Yasuda, S.,** 1975, Undrained Deformation and Liquefaction of Sands Under Cyclic Stress. Soils and Foundations (15), pp.29-44.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ishihara, K., Tatsuoka, F., and Yasuda, S.,** 1978, Effects of Overconsolidated Sand and Liquefaction Characteristic of Sands Containings Fines. Dynamic Geotechnical Testing (654), pp.246-264.
- Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y., and Takahashi, Y.,** 1980, Cyclic Strength Characteristics of Tailings Materials . Soils and Foundations, pp.127-142.
- Ishihara, K., Yasuda, 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, pp.53-58.
- Iwasaki, T., and Tatsuoka, F.,** 1977, Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. Soils and Foundation, 3(17), pp.19-35.
- Jamiolkowski, M., Leroueil, S., and Lo Presti, D.,** 1991, Theme lecture: Design parameters from theory to practice, pp.1-41.
- 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.,** 1992, Cyclic strength and pore pressure generation characteristics of fine-grained soils, PhD Thesis, University of Colorado at Boulder, UMI, Ann Arbor.
- Koester, J.,** 1994, The Influence of Fine Type and Content on Cyclic Strength, Ground Failures Under Seismic Conditions . ASCE Geotechnical Special Publications(44), pp.17-33.
- 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.
- Kondoh, M., Sasaki, Y. and Matsumoto, H.** 1987, Effects of fines contents on soil liquefaction strength, Proceedings Annual Meeting of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tsukuba, Japan.
- Konrad, J.M. and Wagg, B.T.,** 1993, Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 119, pp.929-947.
- Ladd, R.,** 1974, Specimen Preparation Method and Liquefaction on Sands. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, pp.1180-1184.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lade, P.V. and Yamamuro, J.A.,** 1997. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands, Canadian Geotech. J., 34, pp.918-928.
- Lanzo G., Vucetic, M., and Doroudian, M.,** 1997, Reduction of Shear Modulus at Small Strain in Simple Shear. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, pp.1035-1042.
- Lanzo, G., Vucetic, M., and Doroudian, M.,** 1997, Reduction of Shear Modulus at Small Strains in Simple Shear. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (123), pp.1035-1042.
- Lee, K., and Albaisa, A.,** 1974, Earthquake Induced Settlement in Saturated Sands. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Divisions (100), pp.387-406.
- Li, X. S., Chan, C. K., and Shen, C. K.,** 1988, An automated triaxial testing system. R. C. R.T.Donaghe, Advanced Triaxial Testing of Soils and Rocks, pp.95-106, ASTM.
- Lin, M., Huang, T., and You, J.,** 1996, The Effects of Frequency on Damping Properties of Sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering (15), pp.269-278.
- Liu, H.C.,** 1992, Liquefaction resistance of soils containing fines, PhD Thesis, University of Colorado.
- Lo Presti, D., Pallara, O., and Lancellotta, R.,** 1993, Monotonic and Cyclic Loading Behavior of Two Sands at Small Strains. Geotechnical Testing Journal (16), pp.409-424.
- Lo, P., D.C., F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A., and Pedroni, S.,** 1997, Shear Modulus and Damping of Sand. Geotechnique (47), pp.603-617.
- Mitchell J.K,** 1975 Fundamentals of soil behaviour, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.
- Mulilis J.P., Seed H. B., Chan K. C., Mitchell J. K., Arulanandan, K.,** 1977, Effects of sample preparation on sand liquefaction, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp. 91-107.
- Okur, V.,** 2002, Farklı Dinamik Gerilme Genlikleri Altında Kil Zeminlerin Gerilme Şekil Değiştirme ve Mukavemet Davranışları, Doktora Tezi. İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Okur, D.V., Ansal, A.,** 2007, Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: pp.843-854
- Özay, R., Erken, A. ve Ansal, A.M.,** 1998, Kumların Dinamik Mukavemeti, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, Cilt II*, s.592-598, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Peacock, W., and Seed, H.,** 1968, Sand Liquefaction Under Cyclic Loading Simple Shear Conditions. *ASCE Journal of The Soil Mech. and Foundation Eng.* (94), pp.689-708.
- Perlea VG.** 2000, Liquefaction of cohesive soils. In: Pak RYS, Yamamura J, editors. *Soil dynamics and liquefaction 2000. Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000. ASCE Geotechnical Special Publication*, vol. 107.; p. 58–76.
- Perlea VG, Koester JP, and Prakash S.,** 1999, How liquefiable are cohesive soils? In: Se^co, Pinto PS, editors. *Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisboa, Portugal, June 1999, Balkema*, vol. 2. p. 611–8.
- Polito, C.P. and Martin, J.R.,** 2001, Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 127, pp.408-415.
- Prakash, S., and Guo, T.,** 1999, Evaluation. Liquefaction Resistance of Sands in the Field, *Proc. 11th Asian Regional Conference on SM&FE Seoul (Korea)* Vol. 1 pp 541-546 August.
- Prakash, S., and Sandoval, J.A.,** 1992. Liquefaction of low plasticity silts, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, pp.373-379.
- Puri, V.K.,** 1984, Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, PhD Thesis, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Randolph, M. F., Dolwin, J., and Beck, R.,** 1994, Design of driven piles in sand. *Ge´otechnique*, 3(44), pp.427–448.
- Roesler, S. K.,** 1979, Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 7(105), pp.871-880.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rollins, K., Evans, M., and Diehl, N.,** 1998, Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (124), pp.396-405.
- Sancio, R. B.,** 2003, Ground Failure and Building Performance in Adapazarı, Turkey, Ph.D.Thesis, University of California, Berkeley, USA
- Sanjay G.,** 1991, Characterization of dynamic shear strength of soils and seismic slope stability, PhD, Arizona State University, USA
- Sandoval, S.J.A.,** 1989, Liquefaction and settlement characteristics of silt soils, PhD Thesis, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Salgado, R., Bandini, P. and Karim, A.,** 2000, Shear strength and stiffness of silty sand, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 126, pp.451-462.
- Seed, H.,** 1979, Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division* (105), pp.201-255.
- Seed, H. B., and Lee, K. L.,** 1966, Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *J. Soil Mechanics and Foundations Div.*, 97(8), pp.1099-1119.
- Seed, H. B., Martin, P.P. and Lysmer J.,** 1976, Pore water pressure changes during liquefaction, *J. of Soil Mechanics And Foundation Eng. Div.*, ASCE, 102, pp.323-347.
- Seed, H. B., Romo, M., Sun, J., Jaime, A., and Lysmer, J.,** 1987, Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of September 19, 1985. Berkeley: University of California,.
- Seed, H., and Idriss, I.,** 1970, Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis. *Earthquake Engineering and Research Center*. Berkeley: University of California.
- Seed, H., Wong, R., Idriss, I., and Tokimatsu, K.,** 1986, Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering* (112), pp.1016-1032.
- Sherif, M.A., Tien, Y.B. and Pan, Y.W.,** 1983. Liquefaction potential of silty sand, *Soil Engineering Research Report No. 26*, University of Washington College of Engineering, Seattle, Washington.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shen, C., Vrymoed,, J., and Uyeno, C.,** 1977, The effects of Fines on Liquefaction of Sands. Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., pp.381-385, Tokyo.
- Silver, M. L.,** 1977, Laboratory triaxial testing procedures to determine the cyclic strength of soils. NUREG-0031.
- Sunitsakul, J.,** 2004, Dynamic Behavior of Silty Soils, PhD Thesis, Oregon State University, USA.
- Şener, A., Özmen, M., Kaya, Z. ve Erken, A.,** 2007, Zeminlerin dinamik üç eksenli ve burulmalı deney sistemlerinin davranışı, 2. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Talesnick, M., and Frydman, S.,** 1992, Irrecoverable and Overall Strains in Cyclic Shear of Soft Clay. Soils and Foundations (32), pp.47-60.
- Tan, K. and Vucetic, M.,** 1989, Behavior of medium and low plasticity clays under simple shear conditions, Proceedings of the 4th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Mexico City, pp.131-141.
- 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, pp.55-70.
- Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S., and Okamoto, M.,** 1986a, Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Shear Strength of Sands for Different Sample Preparation Methods. Soils and Foundations (26), pp.23-41.
- Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S., and Okamoto, M.,** 1986b, Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Shear Strength of Sands for Different Sample Preparation Methods. Soils and Foundations (26), pp.23-41.
- Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S., and Pradhan, T.,** 1986c. Failure and Deformation of Sand in Torsional Shear . Soils And Foundations (26), pp.79-97.
- Tatsuoka, F., Shibuya, S., and Teachavorasinskun, S.,** 1991, Discussion on "Shear Modulus and Cyclic Undrained Behavior of Sands". Soils and Foundations (31), pp.202-209.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Thevanayagam S.** 2000, Liquefaction potential and undrained fragility of silty soils. Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand. p. 8.
- Thevanayagam, S. and Mohan, S.** 2000, Intergranular state variables and stress strain behaviour of silty sands, *Geotechnique*, (50) 1, pp 1-23.
- Thevanayagam S, Fiorillo M, and Liang J.,** 2000, Effect of non-plastic fines on undrained cyclic strength of silty sands. In: Pak RYS, Yamamura J, editors. *Soil Dynamics and Liquefaction 2000. Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000.* ASCE Geotechnical Special Publication, vol. 107., p. 77–91.
- Thevanayagam, S. and Martin, G.R.,** 2002. Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 22, pp.1035-1042.
- Towhata, I.,** 2008, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer.
- Troncoso, J.H. and Verdugo, R.,** 1985, Silt content and dynamic behavior of tailingsands, *Proceedings of Twelfth Int. Conf. On Soil Mechanics And Foundation Engineering*, San Francisco, USA, pp.1311-1314.
- Troncoso, J.H.,** 1990, Failure risks of abandoned tailings dams, *Proceedings Int. Sym. On Safety And Rehabilitation of Tailings Dams*, Int. Commission on Large Dams, Paris, pp.82-89.
- Ural, N. ve Önalp, A.,** 2005, Dinamik Üç Eksenli Kesme Deneyinin Monterey Kumu ile Kalibrasyonu, *Deprem Sempozyumu Kocaeli*.
- Vaid, V.,** 1994, Liquefaction of Silty Soils, Ground Failures under Seismic Conditions. ASCE Geotechnical Special Publication (44), pp.1-16.
- Vaid, Y., and Chern, J.,** 1985, Cyclic and Monotonic Undrained Response of Saturated Sands. *Proceedings of the Session on Advances in the Art of Testing soils Under Cyclic Conditions*, pp.120-147.
- Verdugo, R., and Ishihara, K.,** 1996, The Steady State of sandy Soils. *Soils and Foundations* (36), pp.81-92.
- Vucetic, M.,** 1994, Cyclic Threshold Shear Strains in Soils. *Journal of Geotechnical Engineering* (120), pp.2208-2228.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vucetic, M., Lanzo, G. and Dorouian, M.,** 1998, Effect of the shape of cyclic loading on damping ratio at small strains, *Soils and Foundations*, 38, pp.111-120.
- Xenaki, V. C. and Athanasopoulos, G. A.,** 2003, Liquefaction Resistance of Sand-Mixtures: an Experimental Investigation of the Effect of Fines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 23, 2003, pp. 183–194.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.** 1997b, Static liquefaction of very loose sands, *Canadian Geotech. J.*, 34, pp.905-917.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.** 1998, Steady state concept and static liquefaction of silty sands, *J. of Geot. And Geoenv. Eng.*, 124, pp.868-877.
- 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 Engineering*, 127, pp.314-324.
- Yoshimi, Y., Tanaka, K., and Tokimatsu, K.,** 1989, Liquefaction Resistance of a Partially Saturated Sand. *Soils and Foundations* (29), pp.157-162.
- Yoshimine, M., and Ishihara, K.,** 1998, Flow Potential of Sand During Liquefaction. *Soils and Foundations* (38).
- Yoshimine, M., Özay, R., Sezen, A., and Ansal, A.,** 1999, Undrained Plain Strain Shear Tests on Saturated Sand Using Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus. *Soils and Foundations* (39), pp.131-136.
- Yu, P. V.,** 1984, Stress ratio effect on shear modulus of dry sands. *J. Geotech. Eng., ASCE*, 3(110), pp.331-345
- Zavoral, D., and Campanella, R.,** 1994, Frequency Effects on Damping/Modulus of Cohesive Soils. *Dynamic Geotechnical Testing II* (1213), pp191-201.
- 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.
- JGS 0542-2000** (Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials)

ÖZGEÇMİŞ

Eyyüb Karakan 1980 yılında Gaziantep’te doğdu. İlköğretiminin bir kısmını Aydın ve diğer kısmını Hatay’da tamamladı. Lise eğitimini Adana İncirlik Süper Lisesinde tamamladı. Lisans eğitimini Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat mühendisliği bölümünden 2004 yılında mezun oldu. Daha sonra yüksek lisans eğitimini İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde 2008 yılında yaptı. Yüksek lisans eğitiminden sonra doktorayı Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim dalında Doç. Dr. Selim ALTUN danışmanlığında tamamlamıştır.