

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNCE DANELİ ZEMİNLERİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ÖZSAĞIR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertan BOL

Haziran 2015

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mustafa ÖZSAĞIR
15.06.2015

ÖNSÖZ

Deprem etkisi altında zeminlerin ne tür bir davranış sergileyeceği mühendislik ve geoteknik açısından çok önemlidir. Son yıllarda Dünyada meydana gelen çeşitli depremlerden sonra zeminde meydana gelen yenilmeler dolayısıyla dinamik yük etkisi altında zeminlerin davranışı yoğun olarak incelenmeye başlanmıştır. Bu çalışmada da ince daneli zeminlerin dinamik yükler etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Laboratuvar ortamında hazırlanan silt ağırlıklı numuneler farklı kil yüzdelerinde ve farklı frekanslarda yapılan deneyler sonucunda zeminin dinamik yük etkisi altındaki davranışı anlaşılmaya çalışılmıştır.

Tüm çalışmalarım boyunca tecrübeleriyle bana yol gösteren ve desteklerini gördüğüm danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL'a, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Bilim Dalı öğretim görevlileri Yrd. Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK ve Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, iyi bir birey olarak yetişmem için gayret eden aileme ve her zaman yanımda olan en büyük destekçim, kıymetli eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
FOTOĞRAF LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
BÖLÜM 2.	
İNCE DANELİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI.....	3
2.1. Sıvılaşma.....	6
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE METOD	10
3.1. Kullanılan Malzeme	10
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	14
3.2. Deney Sistemi ve Deney Aleti	16
3.3.1. Deney prosedürü	17
BÖLÜM 4.	
DENEY SONUÇLARI.....	20

4.1. Deney Sonuçlarının Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Parametreleri ile Değerlendirilmesi.....	34
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

C	: Kil yüzdesi
CTX	: Dinamik üç eksenli deney
CSR	: Çevrimsel gerilme oranı
ε	: Eksenel birim deformasyon (%)
G	: Kayma Modülü
I_p	: Plastisite indisi
N	: Çevrim sayısı
η	: Sönüm Oranı
r_u	: Boşluk suyu basıncı
σ_d	: Deviator gerilme
W_L	: Likit limit
W_P	: Plastik limit
γ	: Birim kayma

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Farklı kil içerikli numunelerde, $\pm\%2.5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısı – kil yüzdesi bağıntısı.....	6
Şekil 2.2. Zemin danelerinin dinamik yükleme öncesinde, esnasında ve sonrasında durumu.....	7
Şekil 3.1. Çöktürme tekniği aşamaları.....	11
Şekil 3.2. %7 kil oranına sahip numunenin dane dağılım grafiği.....	12
Şekil 3.3. %7 Kil içeriğine sahip numunenin likit limit deney sonucu.....	12
Şekil 3.4. %15 Kil içeriğine sahip numunenin dane dağılım grafiği.....	13
Şekil 3.5. %15 Kil içeriğine sahip numunenin likit limit deney sonucu.....	14
Şekil 3.6. Plastisite Kartı TS1500/2000.....	15
Şekil 4.1. %7 Kil 0.25 Hz deney grafikleri.....	25
Şekil 4.2. %7 Kil 0.50 Hz deney grafikleri.....	26
Şekil 4.3. %7 Kil 1.00 Hz deney grafikleri.....	27
Şekil 4.4. %15 Kil 0.25 Hz deney grafikleri.....	28
Şekil 4.5. %15 Kil 0.50 Hz deney grafikleri.....	29
Şekil 4.6. %15 Kil 1.00 Hz deney grafikleri.....	30
Şekil 4.7. Frekansa karşılık r_{uN15} değerleri.....	31
Şekil 4.8. Farklı kil oranındaki zeminlerin boşluk suyu basıncı, N grafiği.....	32
Şekil 4.9. Frekansa karşılık 15. çevrimdeki aksel deformasyon.....	33
Şekil 4.10. Frekansa karşılık maksimum boşluk suyu basıncına ulaşılan çevrim sayısı grafiği.....	34
Şekil 4.11. Elastisite modülünün hesaplandığı giriş.....	35
Şekil 4.22. Sönüm oranının tanımı.....	36
Şekil 4.33. % 7 Kil oranı için farklı frekanslarda G/G0-Çevrim Sayısı ilişkisi.....	37
Şekil 4.14. % 15 Kil oranı için farklı frekanslarda G/G0-Çevrim Sayısı ilişkisi.....	38

Şekil 4.15. % 7 Kil oranı için farklı frekanslarda Sönüm Oranı-Çevrim Sayısı ilişkisi.....	38
Şekil 4.16. % 15 Kil oranı için farklı frekanslarda Sönüm Oranı-Çevrim Sayısı ilişkisi.....	39
Şekil 4.17. Farklı Kil oranları için farklı frekanslarda G/G0-Çevrim Sayısı ilişkisi.....	40
Şekil 4.18. Farklı Kil oranları için farklı frekanslarda Sönüm oranı (η) - Çevrim Sayısı ilişkisi.....	41
Şekil 4.19. Çevrimdeki (N3) Eksenel deformasyon (%) – Deviatör Gerilme (σ_d , kPa) ilmikleri.....	42

FOTOĞRAF LİSTESİ

Foto 2.1 Sıvılaşmış bölgede yüzeyde oluşan kum konisi örneği.....	9
Foto 3.1. Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan deney numunesi.....	15
Foto 3.2. Dondurulmuş deney numunesi.....	16
Foto 3.3. CTX Deney sistemi.....	17
Foto 3.4. CTX deney cihazına yerleştirilmiş deney numunesi.....	18
Foto 3.5. Deney sonu numunenin görünüşü.....	19

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1 Deney numunelerinin fiziksel özellikleri	14
Tablo 4.1 Deney verilerinin özeti.....	31

ÖZET

Anahtar kelimeler: İnce daneli zeminler, dinamik davranış, siltli zeminler, sıvılaşma, frekans

Deprem etkisi altında zeminlerin nasıl bir davranış sergileyeceği mühendislik ve geoteknik açısından çok önemlidir. Son yıllarda Dünyada meydana gelen çeşitli depremlerden ve Türkiye’de de özellikle 1999 Kocaeli - Sakarya depreminden sonra zeminden kaynaklı meydana gelen yapısal hasarlar dolayısıyla dinamik yük etkisi altında zeminlerin davranışı yoğun olarak incelenmeye başlanmıştır.

Dinamik yükler altında yumuşak zeminlerde çevrimsel yumuşamanın etkisi ile taşıma gücü ve oturma problemleri olabileceği gibi; özellikle ince daneli kumlu zeminlerde ve plastik olmayan (non-plastik) siltlerde de sıvılaşma olayı meydana gelebilir. Sıvılaşma konusu daha çok kumlu zeminlerde çalışılmış olmakla birlikte ince daneli zeminlerin de belirli koşullar altında sıvılaşabilir olduğu gözlemlenmiş ve bu alanda da çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada da kumlar kadar üzerinde çalışma yapılmayan ince daneli zeminlerin dinamik davranış özellikleri incelenmiştir. Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında hazırlanan farklı kil yüzdeleri içeren silt zeminler 100 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyonunu tamamlayan numuneler hücre içine yerleştirilinceye kadar kendilerini ayakta tutabilmek için dondurulmuştur. Dondurulmuş numuneler dinamik üç eksenli kesme aletine (*CTX-Cyclic Triaxial Test*) yerleştirilerek uygun gerilme oranında dinamik deneyler yapılmıştır. Dinamik deneyler farklı kil oranlarında ve farklı frekans değerlerinde yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları değerlendirilmiş ve numunelerin dinamik özellikleri ortaya konmuştur. Kil oranının sıvılaşmayı etkilediği görülmüş olup kil oranı arttıkça boşluk suyu basınçlarının daha az arttığı ve numunelerin sıvılaşma eğiliminin azaldığı görülmüştür.

DYNAMIC BEHAVIOR OF FINE GRAINED SOILS

SUMMARY

Keywords: Fine grain soils, dynamic characteristic, silty soils, liquefaction, frequency

How will behavior the soil under earthquake effect? This is very very important for geotechnical engineering. Behavior of the soils under dynamic loadings started to investigate intensely after the last earthquakes in the World and especially 1999 Kocaeli-Adapazari earthquake in Turkey

One of the behavior of soils under dynamic loading is liquefaction. Liquefaction topic was usually working out in sandy soils but later fine soils may show liquefaction in certain circumstances idea is figured out as result of workings and investigators headed to this area. In this study fine silty soils dynamic behavior is investigated which is not worked as much as sand soils. Containing different clay percentage silty specimens prepared in Sakarya University Geotechnic Laboratory and consolidated under 100 kPa. After consolidation specimens put in the freezer for one day. Frozen specimens replaced to triaxial test system and applied dynamic loading on suitable strain rate. Test results evaluated and dynamic characteristics of specimens demonstrated. As a result of triaxial tests clay content is important parameter for liquefaction of silty soils.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremler sonucunda zeminlerde mukavemet kayıpları ve yenilmeler meydana gelmiş ve bu hareketlerin anlaşılması ve izlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Tekrarlı yük etkisi altında zeminlerin nasıl davranış sergileyeceği yerinde (in-situ) ve laboratuvarında yapılan deneylerle anlaşılmaya çalışılmıştır. Araziden alınan örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanan numuneler üzerinde deprem yüklerini temsil edecek yüklemelerle deneyler yapılmıştır. Tekrarlı yük etkisinde ince daneli ve iri daneli zeminler farklı davranışlar sergilemekte farklı türde yenilmeler göstermektedir. Tekrarlı yükler altında; zeminlerde mukavemet kayıpları, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma ve kohezyonlu zeminlerde ise çevrimsel yumuşama sonucunda aşırı deformasyonlar ve göçme durumları meydana gelebilir. Önceleri gevşek kumlarda meydana geldiği düşünülen sıvılaşmanın zaman içerisinde meydana gelen depremler sonucunda ince daneli zeminlerde de oluşabildiği gözlemlenmiştir. Bu konu bir çok araştırmacının ilgisini çekmiş ve bu alanda çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada da tekrarlı yükler etkisi altında iken siltli numuneler üzerinde ne tür etkilerin meydana geldiği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarla siltli zeminlerin ne tür davranışlar sergilediğinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Farklı kil oranlarında silt numuneler dinamik deneylere tabi tutulmuştur. Numuneler üzerinde frekans etkisinin de gözlemlenmesi için farklı frekanslarda dinamik deneylerde tatbik edilmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Son yıllarda yaşanan depremlere kadar sıvılaşmanın sadece kumlar üzerinde görüleceği düşünülürken meydana gelen depremler ve doğurduğu sonuçlara bakılarak ince daneli zeminlerde de sıvılaşmanın meydana geldiği gözlemlenmiş ve bu alanda yapılan çalışmalar yoğunlaşmaya başlamıştır. 1999 yılında Türkiye’de meydana gelen Kocaeli depreminden sonar özellikle Adapazarı merkezinde siltli zeminlerde de sıvılaşma meydana geldiği gözlenmiş ve bir laboratuvar ortamına dönüşen deprem bölgesinin farklı birçok yerinden numuneler alınarak deneyler ve araştırmalar yapılmıştır.

Yapılan çalışmaların daha çok kumlu zeminlerin dinamik davranışı üzerinde toplandığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte sıvılaşma incelenmesinde kumlu zeminlerin içinde bulunan ince dane oranının sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkileri üzerinde yoğunlaşıldığı görülmüştür. Daha önce yapılan araştırmalara bakıldığında kumlu zeminlerde silt oranının artışıyla birlikte sıvılaşmaya karşı olan direncinde artacağı, kayma direncinin azalma göstereceği sonuçları ortaya çıkarılmıştır [1].

Siltli zemin içerisindeki kil oranının sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkileri ile frekansın yine siltli zeminlerin dinamik özellikleri üzerindeki etkileri araştırmak bu tezin asıl amacını oluşturmaktadır.

BÖLÜM 2. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI

Geoteknik mühendisliğinde zeminin statik yükler altında davranışları sürekli incelenmekte olup bunun yanında özellikle deprem etkisiyle meydana gelen titreşimli, tekrarlı yükler etkisinde zemin davranışları da incelenmektedir. Zemindeki dinamik mukavemet kayıplarının ölçülmesi için zeminde meydana gelen deformasyonların ve boşluk suyu basıncında meydana gelen değişimlerin ölçülmesi gerekmektedir.

Kumlu ve killi zeminlerin dinamik yükler etkisinde davranışları son yüz yılda çokça incelenmiş olup bu zeminlerde ki yüklemelerin ne tür sonuçlar doğuracağı tahmin edilebilmektedir. Siltli zeminlerde ise bu kadar fazla çalışma yapılmamıştır ve bu nedenle son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar artmaktadır. Deprem etkisiyle meydana gelen sıvılaşma davranışının daha çok doymuş kohezyonsuz zeminlerde meydana geldiği düşünülmekteydi fakat 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı zeminlerinde meydana gelen yenilmelerin siltli zeminlerde olduğu gözlemlenmiştir [2]. Bu sonuçlar araştırmacıları siltli zeminlerin incelenmesine yönlendirmiştir.

Ural ve arkadaşları siltli zeminlerde sıvılaşmanın deneysel incelemesini yapmışlardır. Depremlerin çok değişkenli bir yapıya sahip olduğunu söyleyerek, deprem sonucu meydana gelen sıvılaşmanın kumlarda olan etkisinin kanıtlanabilir bir davranış olduğunu belirterek bunun yanında siltlerde meydana gelebilecek sıvılaşma davranışının henüz net olarak ne tür bir davranışa sahip olduğunu açıklamadığını dile getirmişlerdir. Çalışmalarını farklı kil yüzdeleri ilavesi ile siltli zeminler üzerine dinamik üç eksenli deneylerle yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları, ince daneli zeminlerin sıvılaşabileceği noktasında kullanılan kriterlerle kıyaslamışlardır [3].

Ural çalışmasında Adapazarı için önemli bir konu olan zemin sıvılaşma davranışını incelemiştir. İncelemedeki amacı depremlerden önce zeminlerin göstereceği davranışları belirlemek ve belirlenen davranışlara göre deprem sırasında meydana gelebilecek sıvılaşmanın etkisinden zeminlerin az etkilenmesini sağlamaktır. İnce taneli zeminlerin sıvılaşma yeteneğini belirlemede kullanılan Çin Kriteri yönteminin çalışma konusundaki amacı tam olarak karşılayamadığı düşüncesi ile laboratuvarında üç eksenli deneyler yapmıştır. Bu çalışmalar ile sıvılaşma belirtisi gösteren ve göstermeyen numuneler arasında kıyaslama yapmıştır [1].

Özay ve Erken killi zemin numunelerinde plastisitesinin dinamik mukavemet üzerinde ne tür değişimler göstereceğini anlamak amacı ile araziden piston numune alıcılarla örselenmemiş numuneler almışlardır. Alınan örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Dinamik deneyleri 0,5 Hz frekans sabitliğinde ve farklı genliklerde yapmışlardır. % 5 düşey boy değişimi değeri için, dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı ve N değişimleri oluşturmuşlardır. Deney sonuçlarına göre aynı kıvamda ve aynı oranda konsolide edilen numunelerden plastisitesi yüksek olan numunenin dinamik kayma gerilmesi oranının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [4].

Kaya ve arkadaşları Adapazarı zeminlerinin dinamik özellikleri belirlemek adına 17 Ağustos 1999 depremi sonra kent merkezinde sondaj çalışmaları yapmışlar ve alınan numuneler üzerinde deneyler yaparak zeminleri dinamik mukavemet özelliklerini belirlemişlerdir. Almış oldukları örselenmemiş suya doymuş silt, kil ve siltli kum numunelerini $f=0,1$ Hz frekansında değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarında deneylere tabi tutmuşlardır. Tekrarlı yük altında çevrim arttıkça şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncının arttığı, numunelerin plastisitesinin artması ile mukavemetin arttığı sonuçlarına ulaşmışlardır. Adapazarı zeminlerinin düşük dinamik kayma gerilmesi oranlarında sıvılaştığını ve göçtüğünü söyleyerek, bu tür zeminlerde yapılaşma olmadan önce araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir [5].

Chang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada frekans değerinin 0.01 Hz'den başlayarak artış göstermesiyle birlikte dinamik yüklemenin her bir çevriminde meydana gelecek

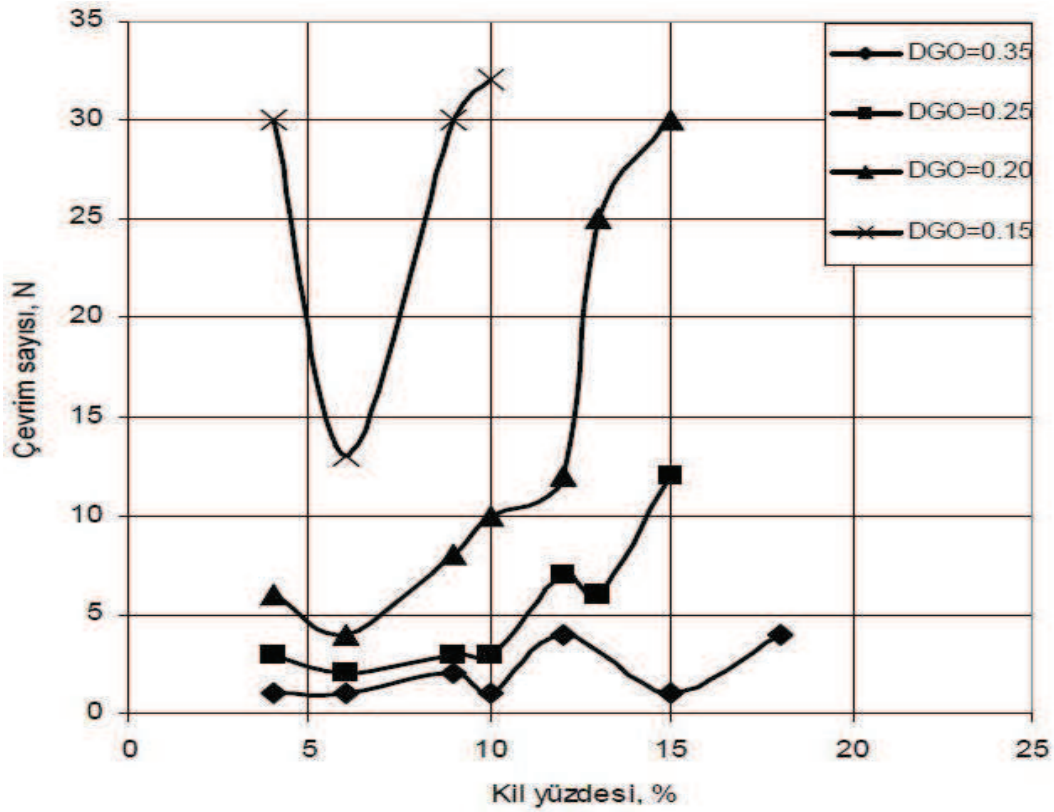
deformasyon miktarının düşeceğini ve sıvılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan çevrim sayısının artacağını söylemişlerdir [6].

Lee ve Fitton ile Mulilis gibi birçok araştırmacı dinamik yüklemenin frekans değerinin dinamik mukavemet üzerinde ki etkisini araştırmışlardır. Lee ve Fitton yaptıkları çalışmalarda daha yavaş yükleme frekanslarının nispeten daha düşük dinamik mukavemet ürettiğini söylemişlerdir, Mulilis ise doğru olamayacak kadar karşıt sonuçlar elde etmiştir. Çalışmalar 1 ile 60 Hz arasında değişen frekans değerlerinin dinamik mukavemeti %10 mertebelerinde etkilediğini göstermektedir. Bu durumda dinamik yüklem frekansı değerlerinde ki küçük değişimlerin, 0.5 Hz ile 1 Hz arasındaki değişim gibi, deneye tabi tutulan zemin numunesi üzerinde dinamik mukavemette kayda değer bir değişim meydana getiremeyeceği sonucu çıkartmak mümkün görünmektedir. Araştırmacılar tarafından Monterey No. 0/30 kumuyla yapılan dinamik yükleme deney sonucu da bu çıkarımı desteklemektedir. Bu deneylerin sonucunda 10. veya 15. çevrimde başlangıç sıvılaşmasına sebep olacak çevrimsel gerilme oranı değerlerinde ve 1 Hz ile 0.5 Hz dinamik yükleme frekans değerlerinde bir fark olmadığı ortaya çıkmıştır [7,8].

Bu çalışmalarla birlikte Lee ve Focht'da yaptıkları çalışmalarda düşük dinamik yükleme frekansı değerlerinin nispeten daha az dinamik mukavemet ürettiğini söylerlerken Wulilis ile Wong ve arkadaşları gibi araştırmacılar ise karşı görüş bildirmektedirler. Frekans değerlerinin 0,0001 Hz ile 1 Hz arasında değiştirildiği bir çalışma dinamik mukavemetin 0.01 Hz değerinin altındaki frekans değerlerinde frekans etkisinden bağımsız olduğunu, 0.01 Hz dinamik yükleme frekansı değerinin üzerindeki deneylerde ise frekans artışıyla dinamik mukavemetinde arttığını göstermiştir [9].

Ural çalışmasında dinamik mukavemet ile kil oranı arasında bir bağıntı kurmuştur. Buna göre kil oranı yüksek olan numunelerle yapılan deneylerde dinamik mukavemetin de yüksek olduğu görülmüştür. Kil oranı %10'dan küçük olan zeminlerde aynı çevrimsel gerilme oranı (CSR) değerinde \pm %2,5 eksenel birim deformasyon değerine ulaşmak için gereken çevrim sayısı birbirine yakın çıkmıştır. Bu hareket numunedeki kil oranının az olması dolayısıyla numunenin kumsu

davranış sergilediği şeklinde yorumlanabilir. Kil oranı %13'den fazla olan numunelerde $\pm\%2,5$ aksel birim deformasyonun CSR'ın 0,25'den büyük değerinde 15. çevrim sayısından önce elde edildiği CSR değerinin bundan daha düşük olduğu halde ise 15. çevrim sayısından sonra $\pm\%2,5$ aksel birim deformasyon değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple bu tür zeminlerin kilisi numuneler olarak adlandırılabilir düşülmüştür [1].

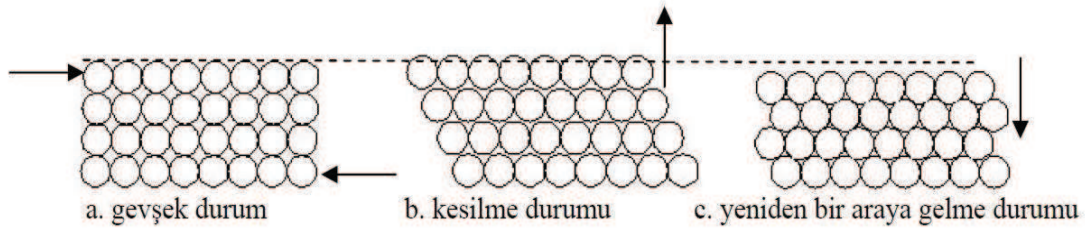


Şekil 2.3. Farklı kil içerikli numunelerde, $\pm\%2,5$ aksel deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli çevrim sayısı – kil yüzdesi bağıntısı [1]

2.1. Sıvılaşma

Sıvılaşma kelime manası olarak sıvı hale gelme sıvı gibi davranış sergileme olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte sıvılaşma; dinamik yük etkisi altındaki zeminde efektif gerilmenin sıfıra eşitlenmesi durumunda kayma gerilmelerinin ortadan kalkması sonucu zemin danelerinin etrafı su ile çevrilmesiyle sıvı gibi hareket etme eğilimi göstermesi olarak da nitelendirilebilir.

Sıvılaşma terimi daha çok suya doymun durumdaki sıkı olmayan kumlu zeminlerde sismik yükler etkisi altında boşluk suyu basıncının ani artış göstererek efektif gerilmeyi sıfıra düşürmesi durumunda kullanılır. Boşluk suyu basıncının artması ve efektif gerilmelerin sıfıra düşmesi ile zeminde kayma dirençleri kaybolmakta ve zemin sıvı gibi hareket etme eğilimine girmektedir. Bu hareketlenmeyle zeminin boşluklarındaki su yüzeye doğru çıkarken zemin içerisindeki ince daneleri de yukarıya doğru hareket ettirmektedir. Zemin üzerine deprem ya da farklı bir dinamik yük geldiğinde zemin daneleri arasındaki ve ince daneler zemin boşluklarındaki su ile beraber zemin yüzeyine doğru yönelmektedir. Bu tür bir hareketlenme ile doymun haldeki gevşek zemin taneleri daha sıkı bir hale geçme eğilimindedirler [1].



Şekil 2.4. Zemin danelerinin dinamik yükleme öncesinde, esnasında ve sonrasında durumu

Sıvılaşma zeminlerin mukavemetini ve rijitliğini, duraylılığını azaltan bir olgudur. Deprem yükleriyle meydana gelen çevrimsel hareketlilik veya ani bir yükleme durumu karşısında zemin mukavemetini ve rijitliğini kaybederek sıvı gibi davranış sergilemeye başlamaktadır.

Tarih boyunca depremler sonucunda sıvılaşma ve onunla alakalı hareketliliklerden dolayı büyük hasarlar oluşmuştur. Sıvılaşma zemin daneleri arasındaki boşlukların tamamen suyla dolması ve her bir zemin danesinin etrafının su ile kaplanmış olduğu doymun haldeki zeminlerde meydana gelir. Zemin boşluklarındaki bu su zemin daneleri üzerine bir basınç uygular ve bu basınç zemin danelerinin kendi aralarında ne kadar sıkı olduğu durumuna göre etkilenir. Bir deprem öncesinde su basıncı göreceli olarak düşüktür. Fakat deprem kuvvetleriyle meydana gelen titreşim su basınçlarını zemin danelerinin birbirlerine göre kolaylıkla hareket edebileceği bir noktaya kadar arttırabilir [10].

Sıvılaşma hareketlerinden birisi de akma sıvılaşmasıdır. Akma sıvılaşması olgusu düşük rezidüel mukavemet barındıran zemindeki statik dengenin statik veya dinamik yükler etkisiyle bozulmasıdır. Kalıntı mukavemet kavramı sıvılaşmış zeminlerdeki dayanımdır. Statik yüklemeye örnek verilecek olursa bir yamaçta inşa edilen binaların temelleri yardımıyla yamaca ek kuvvetler oluşturması gösterebilir. Akma sıvılaşmasını tetikleyen dinamik yüklere ise depremler, patlamalar ve kazık yüklemeleri örnek olarak verilebilir. Bir defa tetiklenen akma sıvılaşmasına duyarlı bir zemin artık yenilmeden önceki statik gerilemelere etkili bir karşılık verecek hale gelemeyecektir [11].

Sıvılaşmanın deprem sırasında zemin hasarlarına neden olan en önemli faktörlerden biri olduğunu söyleyen Karanlık, Hatay Samandağ Altıncöy ve çevresinin zemin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Elde ettiği SPT sonuçlarını, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan yer ivmesi, derinlik - SPT değerleri arasındaki ilişkileri veren abaklar yardımıyla değerlendirmiştir. Ayrıca, inceleme alanı zeminlerine ilişkin granülometrik analiz sonuçlarını da daha önce farklı depremler sonucu farklı bölgelerde sıvılaşan zeminlerde bilinen granülometri aralıklarıyla karşılaştırmıştır. Elek analizi sonucunda, inceleme alanı topraklarının %13,60 ile %48,74 arasında değişen oranlarda silt içeren siltli kum olduğu sonucuna ulaşmıştır. Zeminin doğal su içeriğinin %10,94 ile %19,70 arasında değiştiğini söyleyerek, 4.50 metrede statik yeraltı suyuna rastladığını belirtmiştir. Sonuç olarak sıvılaşma potansiyeline ilişkin elde edilen veriler çalışma alanının önemli oranda sıvılaşma riski taşıdığını belirtmiştir [12].

Sıvılaşmış bir bölgede sıvılaşma sonrasında kum konisi bölgeleri gözlemlenebilmektedir. Foto 2.1'de sıvılaşmış bölgede zemin yüzeyinde oluşan kum konisi örneği görülmektedir.



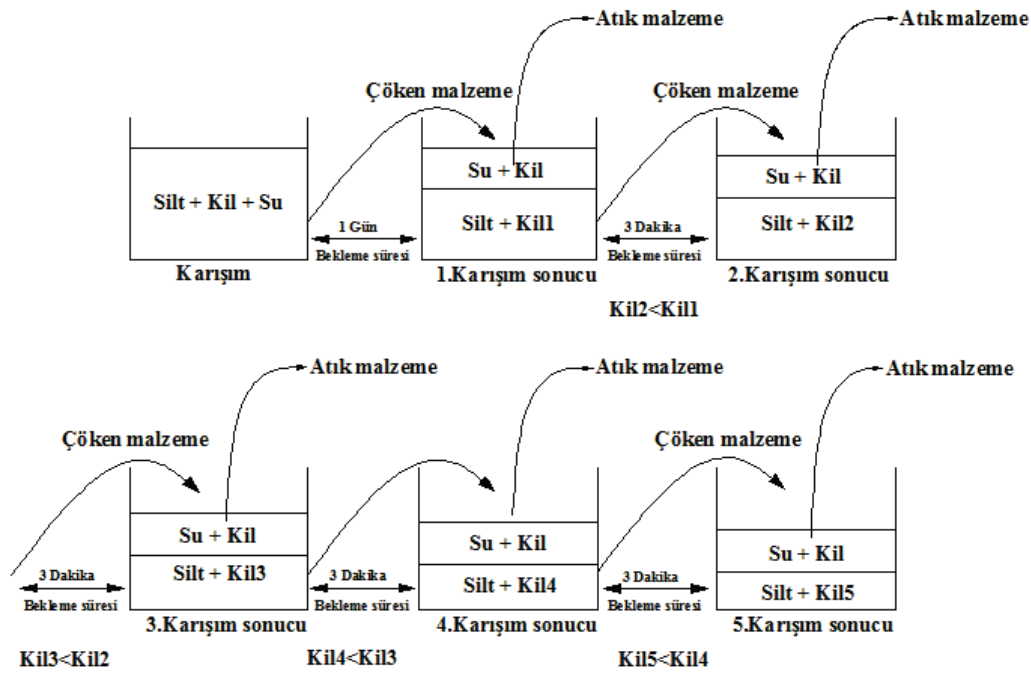
Foto 2.1 Sıvılaşmış bölgede yüzeyde oluşan kum konisi örneği [13]

BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOD

3.1. Kullanılan Malzeme

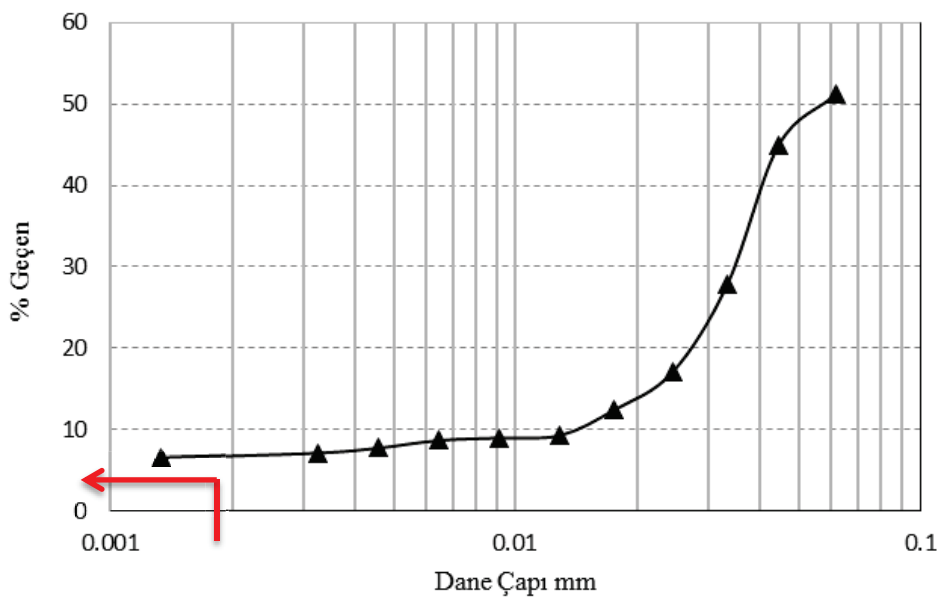
Bu çalışmada laboratuvar ortamında bulamaç yöntemiyle hazırlanan iki farklı kil oranına sahip Adapazarı Yenigün mahallesinden elde edilmiş silt numuneler kullanılmıştır. Silt genel manasıyla su ile taşınan çok ince daneli (2 mikron ile 74 mikron arasında) zeminler olarak tanımlanabilir (TS1500/2000) [13].

Elde edilen zemin içerisindeki silt ve kili ayırmak için deneysel çalışmanın başında öncelikle çöktürme yöntemi uygulanmıştır. Çöktürme yöntemi ile kile nazaran daha ağır olan siltli zeminin dibe çökmesi ve üst kısımda suda asılı halde kalan killi kısmın ayrıştırılması hedeflenmiştir. Bu yöntemde, zemin numunesi boş bir kova içerisine koyulmuş ve üzerine su eklenerek karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım bir gün bekletilerek karışımın dinlenmesi ve çökmesi sağlanmıştır [14]. Tamamen çöken zemin numunesi 3 dakika ara ile 5 defa karıştırıcı ile karıştırılmış ve her karıştırma - bekleme aşaması sonunda karışımın bulunduğu kovanın üst kısmındaki killi süspansiyon boşaltılmıştır. Her defasında bu süspansiyon içerisinde kalan kil numuneleri siltli zeminden ayrılmıştır. Bu sayede süreç sonunda kovaların dibinde mümkün olduğunca az kil oranına sahip siltli zemin elde edilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra elde edilen zemin numunesine sınıflandırma amaçlı hidrometre ve likit limit deneyleri yapılmış ve elde edilen zemin sınıfı ile kil oranı belirlenmiştir. Uygulanan çöktürme yönteminin aşamaları Şekil 3.1'de gösterilmiştir [15].



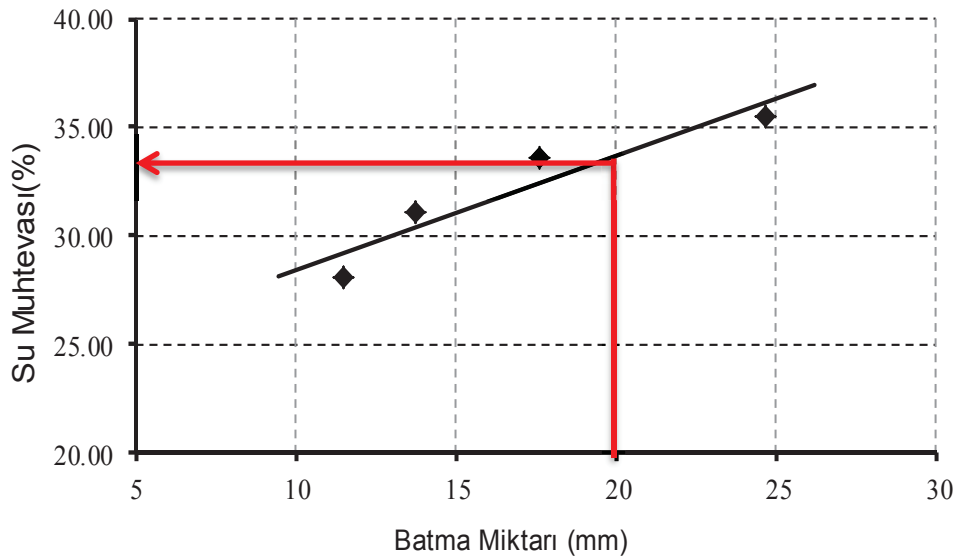
Şekil 3.1. Çöktürme tekniği aşamaları [15]

Beş aşamalı çöktürme yöntemi sonucunda elde edilen zemin numunesine hidrometre (çöktürme analizi) deneyi uygulanmıştır. Hidrometre deneyi sonucu Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Çöktürme yöntemi sonucu elde edilen numuneye uygulanan hidrometre deneyleri sonucunda içerisinde %7 civarında kil bulunan silt bir malzeme elde edilmiştir.



Şekil 3.2. %7 kil oranına sahip numunenin dane dağılım grafiği

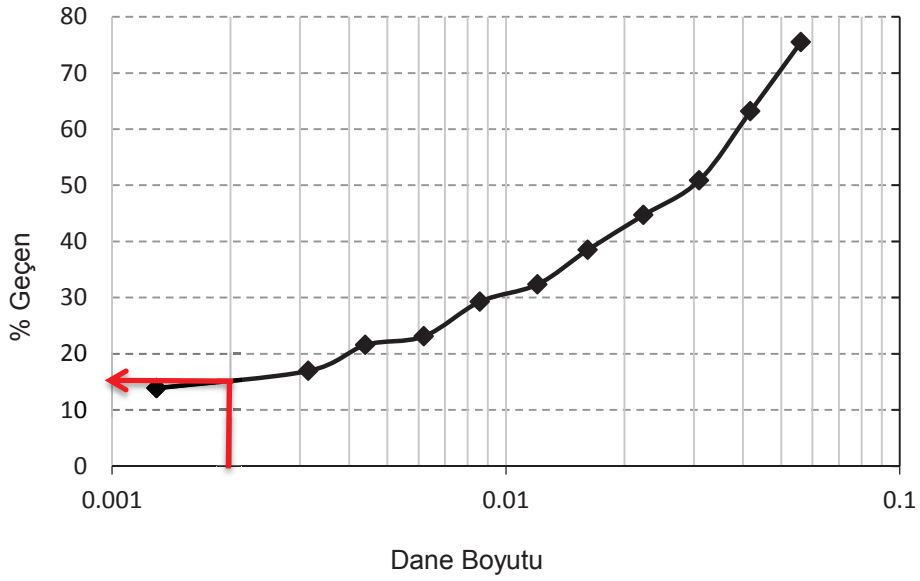
Çöktürme yöntemi sonucunda elde edilen numunenin zemin sınıfını belirleyebilmek için TS 1900-1'e göre kıvam limiti deneyi yapılmıştır [16]. Kil oranı düşük siltli bir zemin olduğu için likit limit değerleri Casagrande aletiyle belirlenememiş ve likit limiti ölçümleri düşen koni yöntemiyle yapılmıştır. Düşen koni yöntemi ile elde edilen likit limit değerleri şekil 3.3'de gösterilmiştir. Kıvam limiti deneyi sonucuna göre silt ağırlıklı zemin numunesinin likit limit değeri %33,5 olarak bulunmuştur. Plastik limit deneyleri de yapılmaya çalışılmış olup denemeler sonunda numunenin NP (plastik olmayan) olduğu anlaşılmıştır.



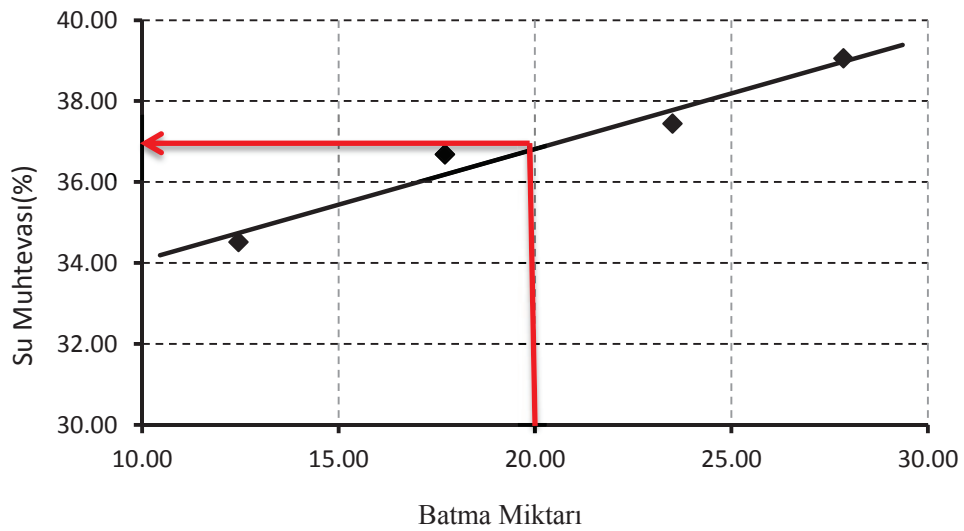
Şekil 3.3. %7 Kil içeriğine sahip numunenin likit limit deney sonucu

Araziden alındığı haliyle bu çalışmada kullanılan zemin numunesine hidrometre yöntemiyle dane dağılımını belirlemek amacıyla çöktürme deneyi yapılmış ve yapılan deney sonucu Şekil 3.4'de ki grafikte verilmiştir. Yapılan deney sonucunda araziden alınan zemin numunesinin %15 kil oranına sahip olduğu görülmüştür. %15 kil oranına sahip numuneye sınıflandırma yapabilmek için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Numunede silt oranının fazla olması ve %7 kil oranına sahip numunede likit limiti belirlemek için düşen koni yöntemiyle likit limit deneyi yapıldığından %15 kil oranına sahip numunede de bu yöntem kullanılmıştır. Yapılan

deney sonucu Şekil 3.5’de görülmektedir. %15 kil oranına sahip numunenin likit limiti $w_L=36,8$ olarak elde edilmiştir. %15 kil oranına sahip numunenin plastik limiti ise $w_p= 25,78$ olarak belirlenmiştir. Bu numunenin plastisite indisi de $I_p= 11,02$ olarak kaydedilmiştir. %15 kil oranına sahip numunenin likit limit ve plastisite indisi değerleri TS 1500’de bulunan plastisite kartına konulduğunda zemin sınıfının MI olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. %15 Kil oranına sahip numunenin dane dağılım grafiği

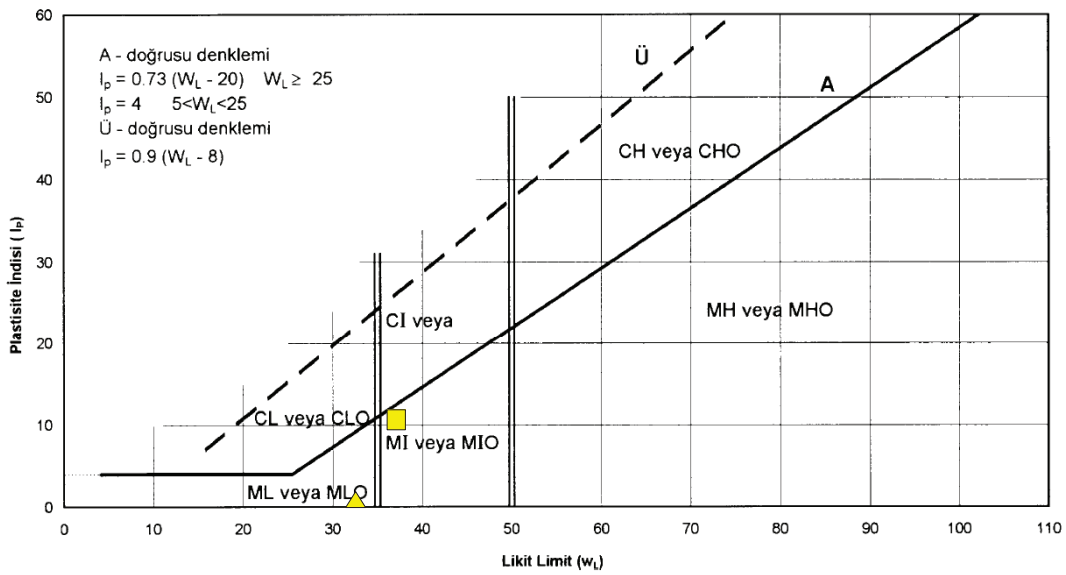


Şekil 3. 5. %7 Kil içeriğine sahip numunenin likit limit deney sonucu

Sınıflandırma için yapılabilecek koni penetresyon (likit limit) ve plastik limit deneyleri sonucu TS1500/2000 standardı içerisinde bulunan plastisite kartına konularak elde edilen zeminin sınıfı belirlenmiştir. %7 kil oranına sahip numunenin likit limit değeri (w_L) 33 ve plastik limiti (w_P) NP (plastik olmayan) olduğu için bu değerler Şekil 3.4' de verilen plastisite kartına konulduğunda %7 kil oranına sahip numunenin ML zemin sınıfına girdiği görülmektedir.

Tablo 3.1. Deney numunelerinin fiziksel özellikleri

Numune No-Simge	Kil Oranı %Kil	Likit Limit w_L	Plastik Limit w_P	Plastisite İndisi I_p
1 - Δ	7	33	NP	NP
2 - \square	15,00	36,80	28,78	11,02



Şekil 3.6. Plastisite Kartı TS1500/2000

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Çöktürme yöntemiyle elde edilen numunelerin deneye hazırlanması için bulamaç yöntemi uygulanmıştır. Bulamaç hazırlanırken numunelere ağırlıkça %40 oranında yani 1000 g numune için 400 g su eklenmiştir. İyice karıştırılan bulamaç su muhtevasının homojen bir şekilde numunenin her tarafında eşit olması için

beklemeye bırakılır. Homojen su muhtevasına eriştiği dűřünűlen numune desikatűre koyularak bulamaç içindeki hava kabarcıkları çıkarılmıştır. Bu işlem esnasında birkaç defa numune karıştırılarak daha iyi bir sonuç alınmaya çalışılmıştır.

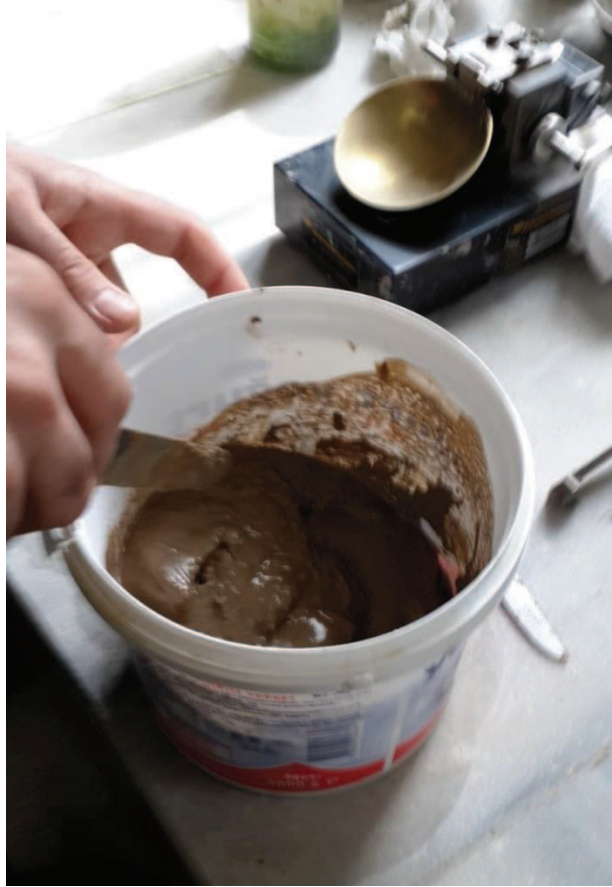


Foto 3.1. Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan deney numunesi

Konsolidasyon için hazır hale getirilen numunelerin boyu konsolidasyon sonunda 10 cm civarında kalacak řekilde 5 cm çapındaki saydam sert plastik tűplere yerleřtirilmiřtir. Deney numuneleri için 100 kPa konsolidasyon basıncı uygulanması için tűp içerisindeki numune gerekli basınç deđeri için eklenecek yűkler konulmadan űnce kendi ađırlıđında biraz bekletilmiřtir. Daha sonra 100 kPa konsolidasyon basıncı için gereken ađırlıklar ařamalı bir řekilde hűcre içindeki numuneye uygulanmıřtır. Konsolidasyon sűreci tamamlanan numuneler 24 saat sűreyle dondurucuya konulmuřtur. Dondurulmuř numuneler deney için hűcreden çıkartılarak deney hűresine yerleřtirilmiřtir.



Foto 3.2. Dondurulmuş deney numunesi

3.3. Deney Sistemi ve Deney Aleti

Deneyin uygulamadaki kolaylığından dolayı üç eksenli hücre kesme deneyleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan Wykeham Farrance firması yapımı üç eksenli deney sistemi (*CTX-Cyclic Triaxial Test*) kullanılmıştır. Cihazla birlikte sürekli okuma ve kontrol sağlayan UTM yazılımı bulunmaktadır. Program sayesinde her bir verinin veri toplama sistemine (*CDAS*) aktarımı sağlanmaktadır. Cihaz ile 50-100 mm çaplı numunelere 50-60 Hz frekans değerlerine kadar yüklemeler hidrolik sistemle yapılabilmektedir.

Deneylerde kullanılan CTX deney sistemi Foto 3.3'de görülmektedir. Deney sisteminde;

- Su ve hava dolaşım sistemi
- Hava kurutucu
- Yükleme çerçevesi

- Basınç sağlayıcılar
- Hacim değişim ölçer
- Kontrol ve veri alıcı sistemi (CDAS) bulunmaktadır.

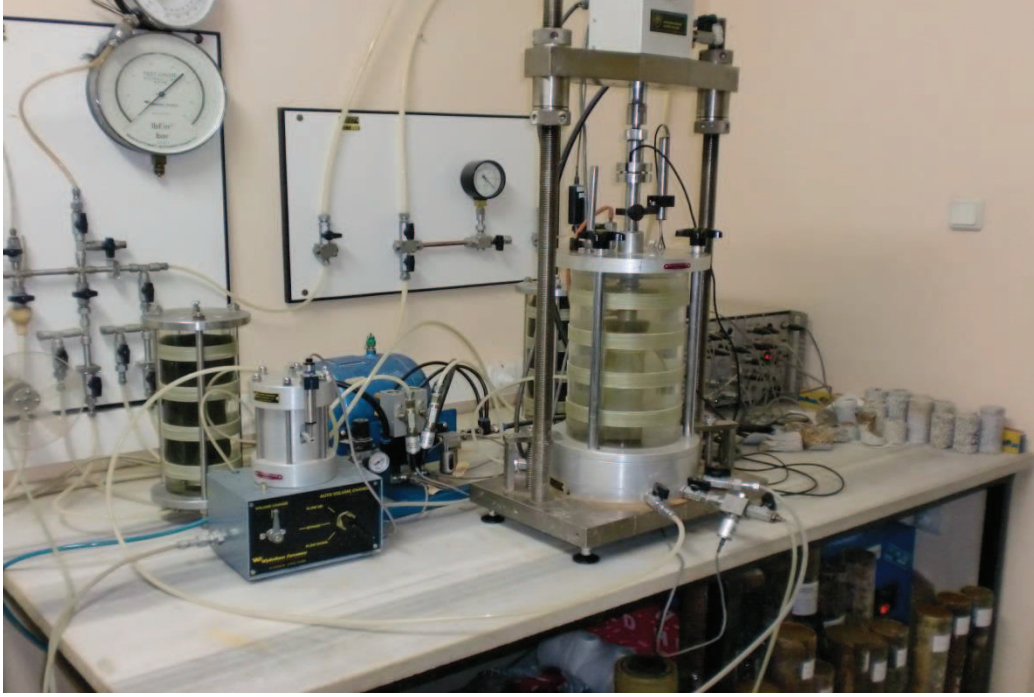


Foto 3.3. CTX Deney sistemi

3.3.1. Deney prosedürü

CTX deney hücresine numune yerleştirildikten sonra (Foto 3.4) kontrol programına deney ve numune verileri (numune boyutu, dinamik yük değeri, yükleme frekansı) girilir. Deneye başlamak için gerekli düzenlemeler yapılır. Deney düzeneği hazırlandıktan sonra deneyin ilk aşaması olan doyurma aşamasına geçilir.



Foto 3.4. CTX deney cihazına yerleştirilmiş deney numunesi

Doyurma işleminde numunenin boşluklarının tamamen suyla doyurulması amaçlanır. Numunede şişme meydana gelmemesi için hücre basıncı ve geri basınç sürekli birlikte yükseltilerek kontrol altında tutulur. Bu çalışmada doyurma esnasında çevre basıncı ile geri basınç farkı 10 kPa da tutulmuştur. Her doyurma kademesinde de çevre basıncı 50 kPa arttırılmıştır. Numunenin türüne, boşluk yapısına göre doyurma süreci farklı sürelerde tamamlanmaktadır. Doyurma aşaması boşluk suyu basıncı parametresi ($B = \Delta u / \Delta \sigma_3$) değeri 0,95'e ulaştığında sonlandırılmış ve konsolidasyon aşamasına geçilmiştir.

Bu çalışmada hücre basıncı daha önceki çalışmalardan hareketle Adapazarı zeminleri için deprem koşullarında uygun olduğu düşünülen 100 kPa olarak belirlenmiş ve konsolidasyonda bu değerde yapılmıştır.

Konsolidasyon süreci tamamlandıktan sonra dinamik kesme aşamasına geçilmiştir. Bu çalışmada çevrimsel gerilme oranı (CSR) 0,35 olarak sabit alınmış buna karşın her farklı kil yüzdesine sahip numuneler üzerinde 0.25, 0.50 ve 1.00 Hz frekansta deneyler yürütülmüştür. Deney sonlarında hücreden çıkartılan (Foto 3.5) numuneler su muhtevası tayini için etüve atılmıştır.



Foto 3.5. Deney sonu numunenin görüntüsü

BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI

Çalışma kapsamında laboratuvar ortamında bulamaç yöntemiyle hazırlanan %7 ve %15 kil oranına sahip silt numuneler önce 100 kPa gerilmeye karşılık gelecek şekilde aşamalı olarak konsolide edilmiştir. Konsolidasyon sürecini tamamlayan numuneler dondurucuya konulmuş ve 24 saat dondurucuda bırakılarak dondurulmuştur. Dondurma aşaması bittikten sonra deneye hazır hale getirilen numuneler deney aletine yerleştirilerek dinamik üç eksenli deneylere tabi tutulmuştur. Dinamik yüklemeler 0.25 Hz, 0.50 Hz ve 1.00 Hz olmak üzere 3 ayrı frekans değerinde yapılmıştır.

Şekil 4.1’de %7 kil oranına sahip numunenin 0.25 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının grafikleri verilmiştir. %7 kil oranına sahip numune 0.25 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 10. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN10}) 0,88 olarak görülürken 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,94 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00’a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,94’tür maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 13’tür. Bu sonuca göre %7 kil oranına sahip numunede 0.25 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1.00’a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) %17,47’dir. Numunede %2,5 ve %5 eksenel birim deformasyonlara (ϵ) çok düşük çevrim sayılarında ulaşılmıştır. %2.5 eksenel birim deformasyona 1. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 1,5 çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 4.2’de %7 kil oranına sahip numunenin 0.50 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının grafikleri verilmiştir. %7 kil oranına sahip numune 0.50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 10. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN10}) 0,98 olarak görülürken 15. çevrimdeki

boşluk suyu basıncı oranının (r_{uN15}) 1,00'a ulaştığı görülmektedir. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 1,00'dır, maksimum boşluk suyu basıncına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 11'dir. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmıştır. Bu sonuçlara bakarak %7 kil oranına sahip olan numunede 0.50 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaştığı ve numunede sıvılaşıma meydana geldiği söylenebilir. 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) %17,00'dır. Numunede %2,5 ve %5 eksenel birim deformasyonlara (ϵ) çok düşük çevrim sayılarında ulaşılmıştır. %2,5 eksenel birim deformasyona 1. çevrimde, %5 eksenel birim deformasyona 2. çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 4.3'de %7 kil oranına sahip numunenin 1.00 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının grafikleri verilmiştir. %7 kil oranına sahip numune 1.00 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 1,00'a ulaşmıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 1,00'dır, maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 3'dür. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmıştır. Bu sonuçlara bakarak %7 kil oranına sahip olan numunede 1,00 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaştığı ve numunede sıvılaşıma meydana geldiği söylenebilir. 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) %20,30'dur. Numunede %2,5 ve %5 eksenel birim deformasyonlara (ϵ) düşük çevrim sayılarında ulaşılmıştır. %2,5 eksenel birim deformasyona 1,5 çevrim değerinde, % 5 eksenel birim deformasyona ise 2,3 çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.

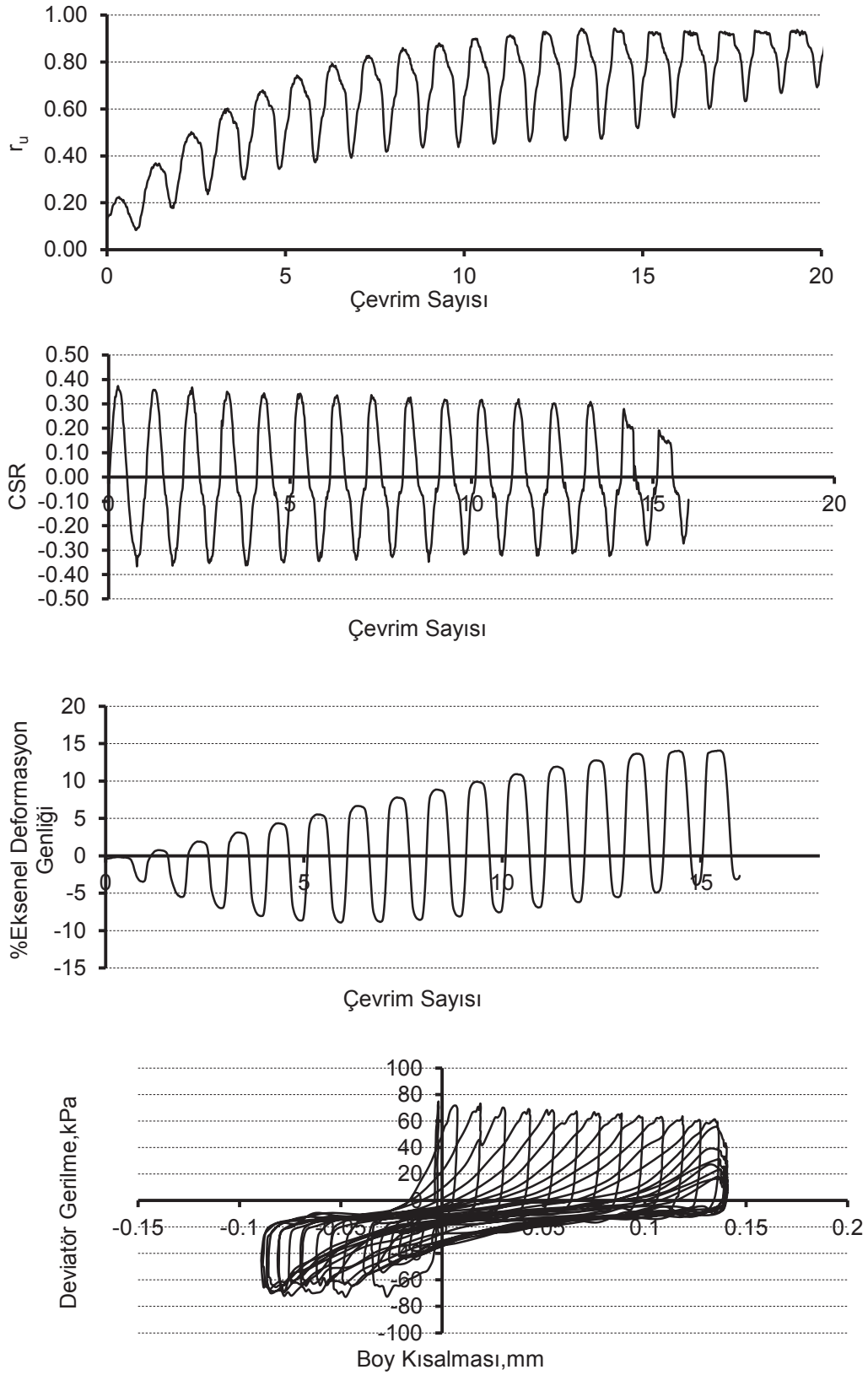
Şekil 4.4'de %15 kil oranına sahip numunenin 0.25 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının grafikleri verilmiştir. %15 kil oranına sahip numune 0.25 Hz frekansta dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 10. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN10}) 0,91 olarak görülürken 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,89'a ulaşmıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,91'dir, maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 7'dir. Bu sonuçlara göre %15 kil oranına sahip numunede 0.25 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve

numunede sıvılaştırmanın meydana gelmediği söylenebilir. 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon %14,80'dir. Numunede %2,5 ve %5 eksenel birim deformasyonlara (ϵ) düşük çevrim sayılarında ulaşılmıştır. %2,5 eksenel birim deformasyona 1. çevrim değerinde, % 5 eksenel birim deformasyona ise 2. çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.

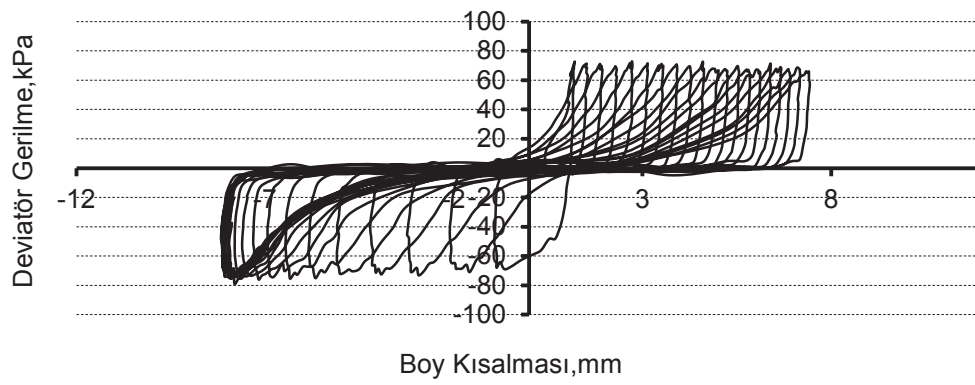
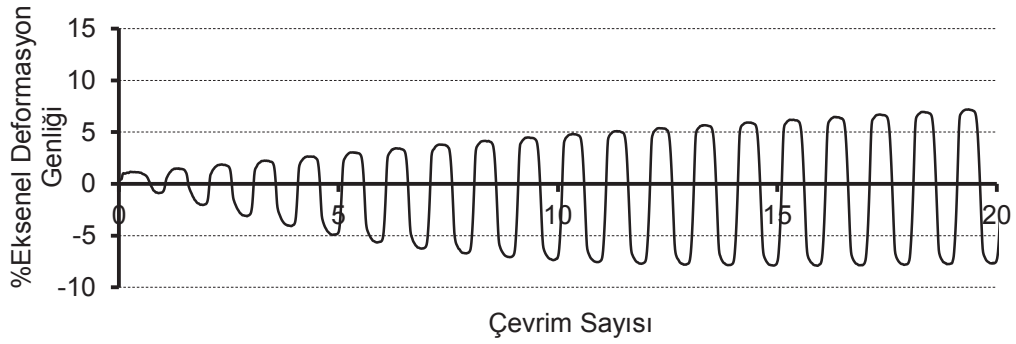
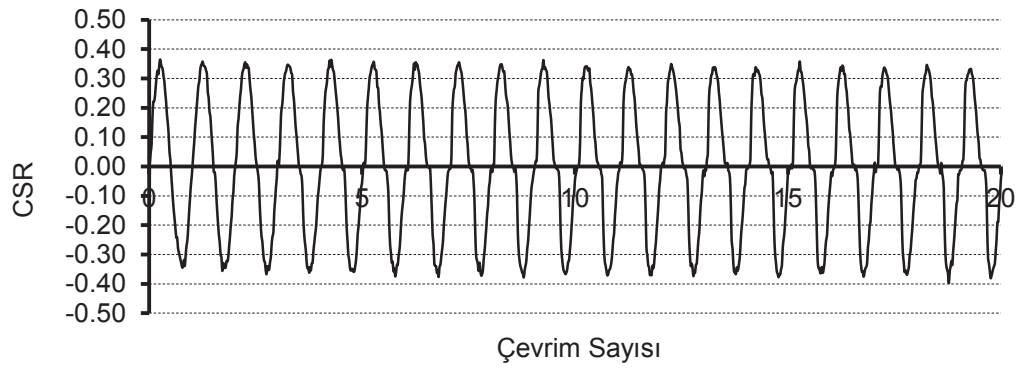
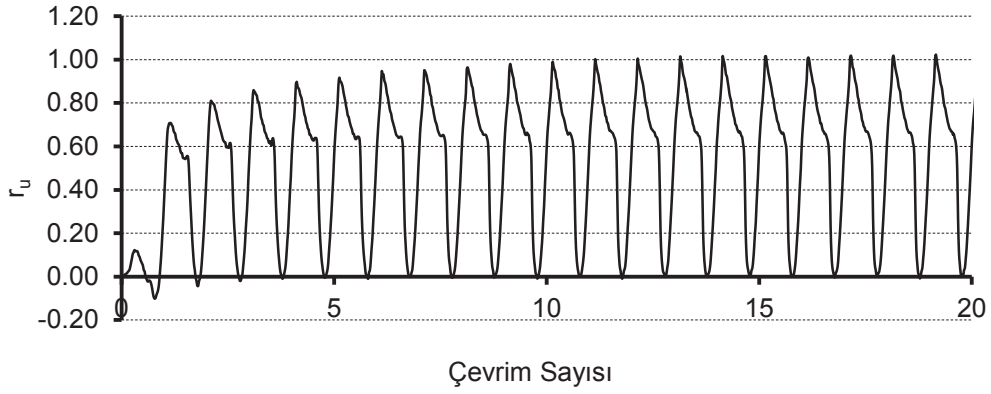
Şekil 4.5'de %15 kil oranına sahip numunenin 0.50 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının grafikleri verilmiştir. %15 kil oranına sahip numune 0.50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 10. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN10}) 0,85 olarak görülürken 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,92 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,92'dir ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 14'tür. Bu sonuçlara göre %15 kil oranına sahip numunede 0.50 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaştırmanın meydana gelmediği söylenebilir. 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) %19,79'dir. Numunede %2,5 ve %5 eksenel birim deformasyonlara (ϵ) çok düşük çevrim sayılarında ulaşılmıştır. %2,5 eksenel birim deformasyona 1. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 2. çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 4.6'da %15 kil oranına sahip numunenin 1.00 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının grafikleri verilmiştir. %15 kil oranına sahip numune 1.00 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 10. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN10}) 0,87 olarak görülürken 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,97 olmuştur. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 1,00'dir ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 17'dir. Bu sonuçlara göre %15 kil oranına sahip numunede 1,00 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaştığı ve numunede sıvılaştırmanın meydana geldiği söylenebilir. 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) %18,24'dür. Numunede %2,5 ve %5 eksenel birim deformasyonlara (ϵ) çok düşük çevrim sayılarında ulaşılmıştır. %2,5 eksenel

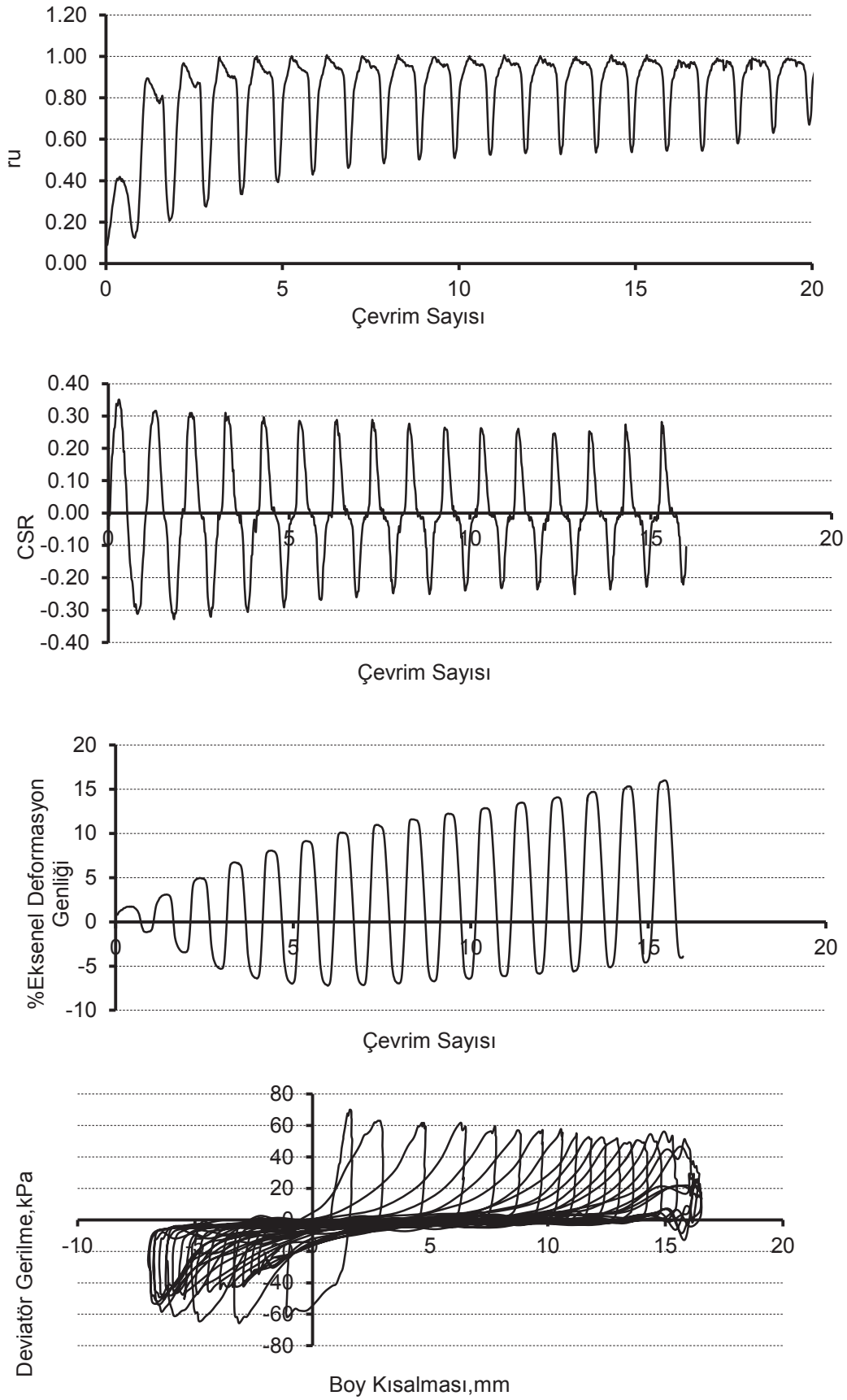
birim deformasyona 1. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 2. çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.



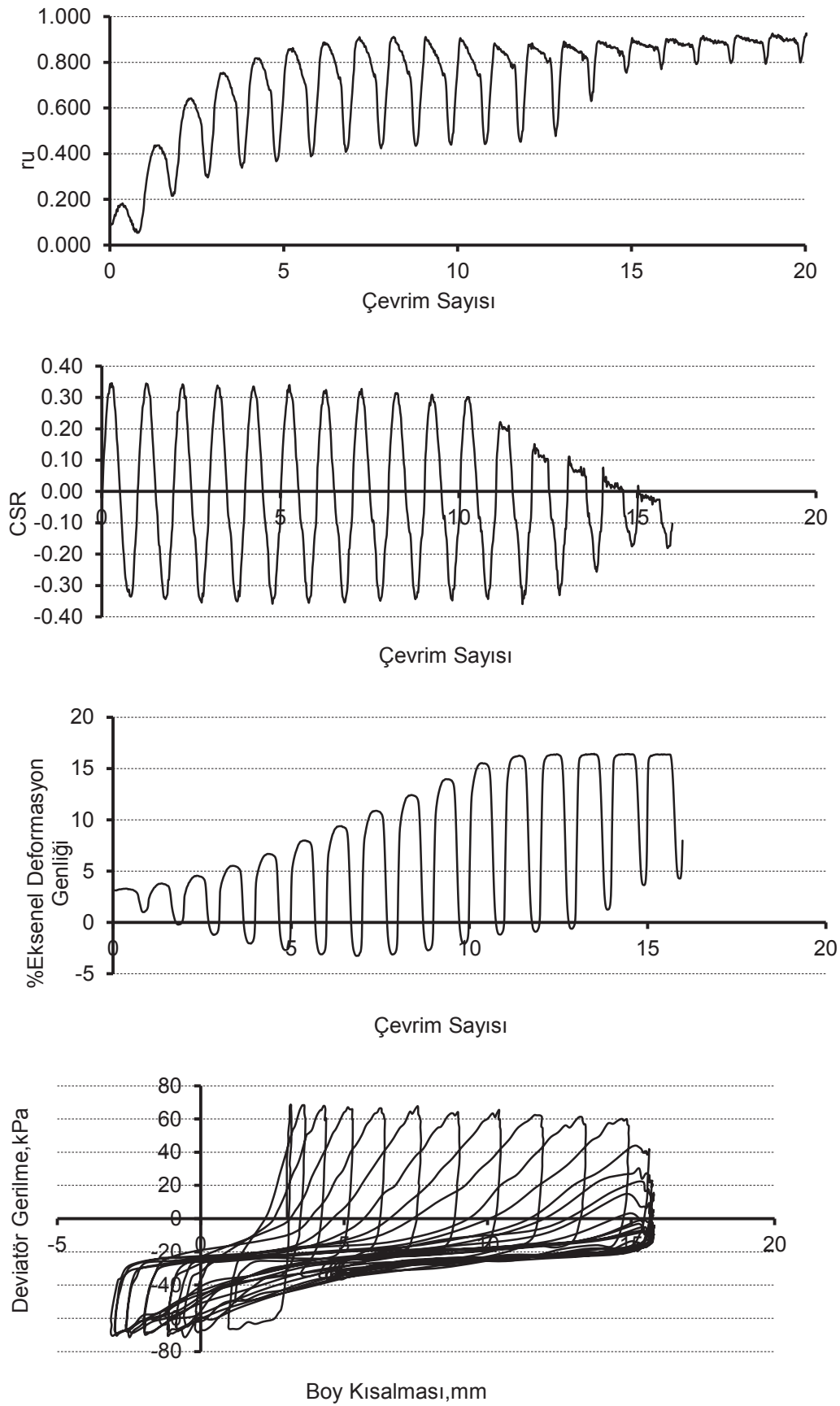
Şekil 4.1. %7 Kil 0.25 Hz deney grafikleri



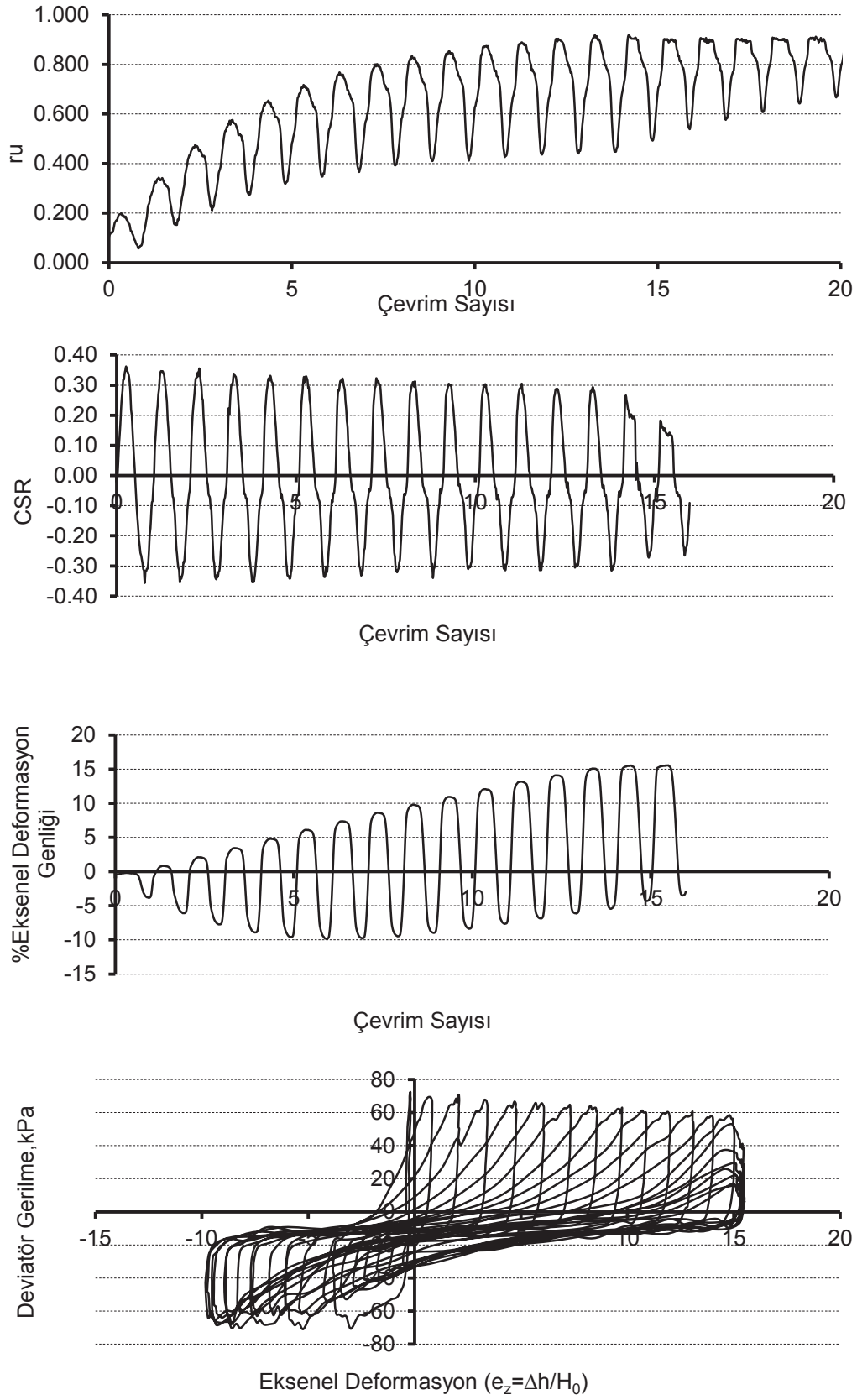
Şekil 4.2. %7 Kil 0.50 Hz deney grafikleri



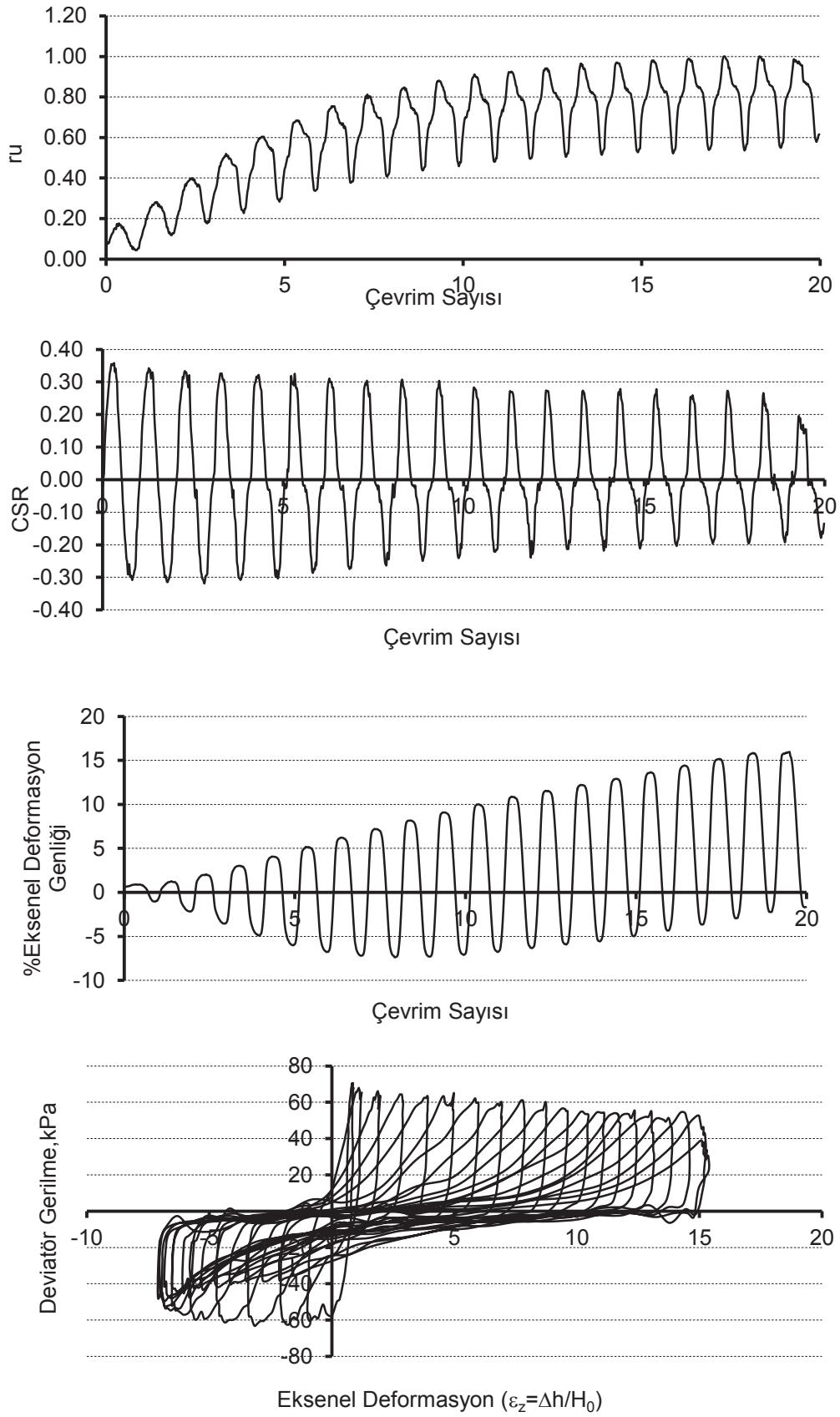
Şekil 4.3. %7 Kil 1.00 Hz deney grafikleri



Şekil 4.4. %15 Kil 0.25 Hz deney grafikleri



Şekil 4.5. %15 Kil 0.50 Hz deney grafikleri



Şekil 4.6. %15 Kil 1.00 Hz deney grafikleri

Yukarıda Şekil 4.1'den Şekil 4.6'ya kadar olan grafiklerde deney sonuçlarının değerlendirilmesi neticesinde elde edilen grafikler verilmiştir. Bu şekillerde N çevrim sayısına karşı r_u boşluk suyu basıncı, N' e karşı CSR (*cyclic stress ratio*) çevrimsel gerilme oranı, N'e karşı % aksenal deformasyon genliği ve aksenal deformasyona ($\varepsilon_z = \Delta h / H_0$) karşı deviator gerilme (σ_d) verileri grafik olarak sunulmuştur.

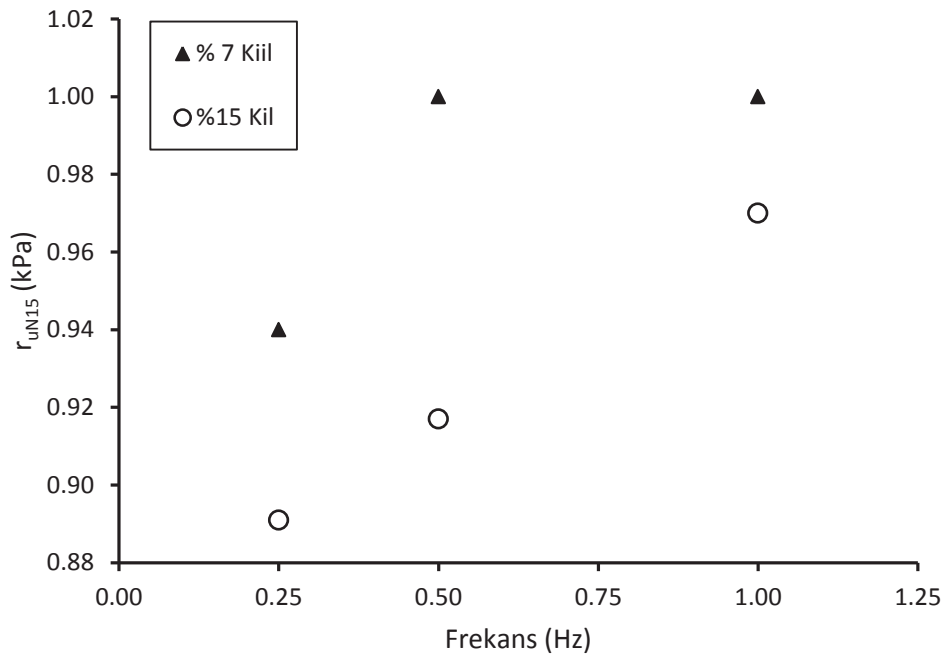
Deney sonuçlarından elde edilen özet şeklindeki veriler Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Deney verilerinin özeti

Deney No	% Kil	CSR	Frekans (Hz)	$r_{u(max)}$	$N_{u(max)}$	u_{N5} (kPa)	u_{N10} (kPa)	u_{N15} (kPa)	$N_{\varepsilon=\pm\%2.5}$	$N_{\varepsilon=\pm\%5}$	ε_{N15}
1	7	0.35	0.25	0,94	13,28	0,68	0,88	0,94	1,00	1,5	17,47
2	7	0.35	0.50	1,00	11,00	0,9	0,98	1,00	1,00	2,00	13,68
3	7	0.35	1.00	1,00	3,22	1,00	1,00	1,00	1,00	1,8	20,3
4	15	0.35	0.25	0,89	7,18	0,818	0,911	0,891	1,00	3,00	12,68
5	15	0.35	0.50	0,917	14,22	0,654	0,854	0,917	1,00	2,00	19,79
6	15	0.35	1.00	1,00	17,32	0,6	0,87	0,97	1,5	3,00	18,24

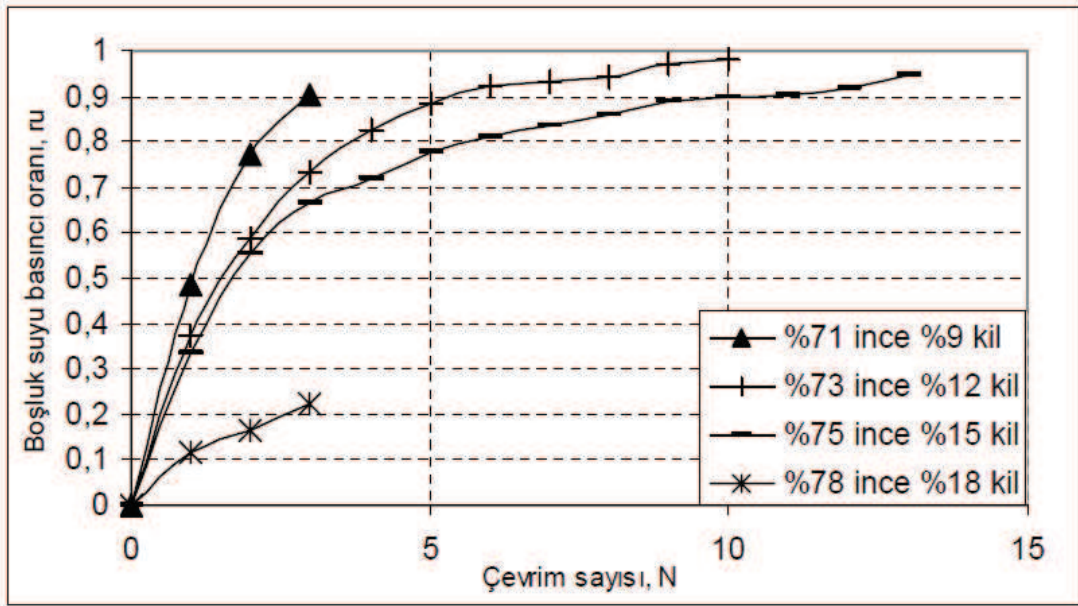
Tabloda 4.1'de görülen deney sonuçları değerlendirilerek iki farklı kil oranına sahip numuneler için frekansa karşılık (F, Hz) 15. çevrimdeki boşluk su basıncı değerleri (r_{uN15}) karşılaştırılmış ve Şekil 4.7'de ki grafikte gösterilmiştir. Bu grafikten görülebileceği üzere dinamik üç eksenli deneyde kesme esnasında uygulanan dinamik yükün frekans değeri arttıkça 15. çevrimdeki (N15) boşluk suyu basınçlarının da her iki tip numunede de (%7 kil oranına sahip ve %15 kil oranına sahip) artış gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda numune içerisindeki kil oranı azaldıkça 15. çevrimdeki (N15) boşluk suyu basınçlarının yüksek kil oranına sahip numunelere (%15) oranla daha hızlı artış gösterdiği görülmektedir. Bu noktadan hareketle zemin içerisindeki kil oranının zeminin sıvılaşması üzerinde önemli bir parametre olduğunu yüksek kil oranına sahip numunelerin daha zor sıvılaşma eğilimini gösterdiğini söylemek mümkün olacaktır.

Zeminlerin maruz kaldığı dinamik yükün frekansının da sıvılaşmanın değerlendirilmesinde önemli bir etken olduğu söylenebilir. Aynı kil oranına sahip numunelerde frekans arttıkça boşluk suyu basıncı oranlarının da artış gösterdiği ve sıvılaşmanın başlaması için gereken $r_u=1,00$ değerine ulaştığı veya yaklaştığı görülmektedir.



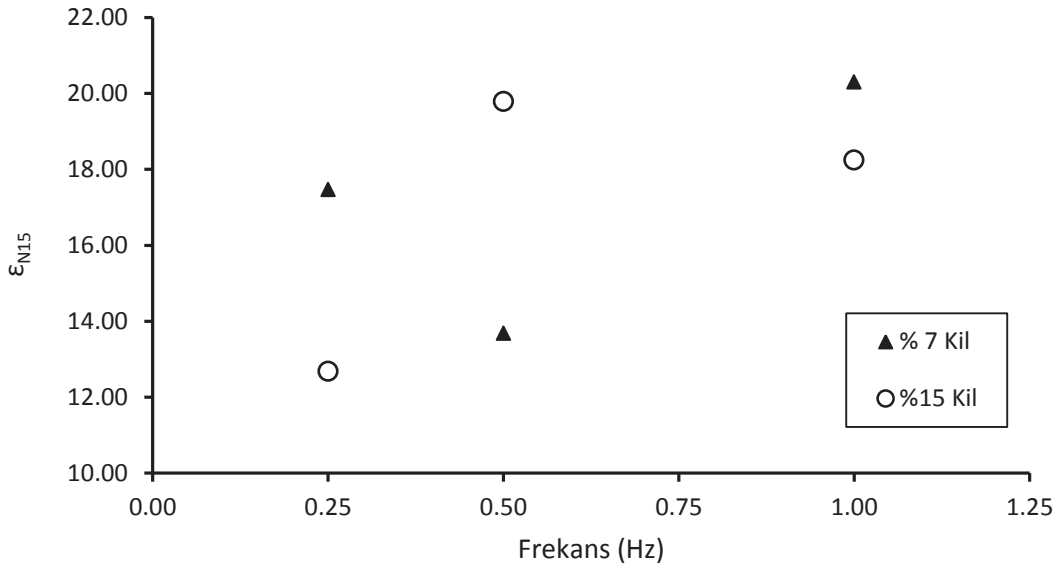
Şekil 4.7. Frekansa karşılık r_{uN15} değerleri

Ural'ın yapmış olduğu çalışmanın sonuçlarına bakıldığında aynı çevrimsel gerilme oranında farklı kil yüzdelere sahip numuneler üzerinde yaptığı dinamik üç eksenli deney sonuçlarında numunelerdeki kil oranının artışıyla boşluk suyu basınçlarının daha az arttığı görülmekte ve bu çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. [1]. Araştırmacının deney sonuçlarıyla ilgili boşluk suyu basıncı oranına karşılık çevrim sayısı değerlerinin gösterildiği grafik Şekil 4.8'de verilmiştir.



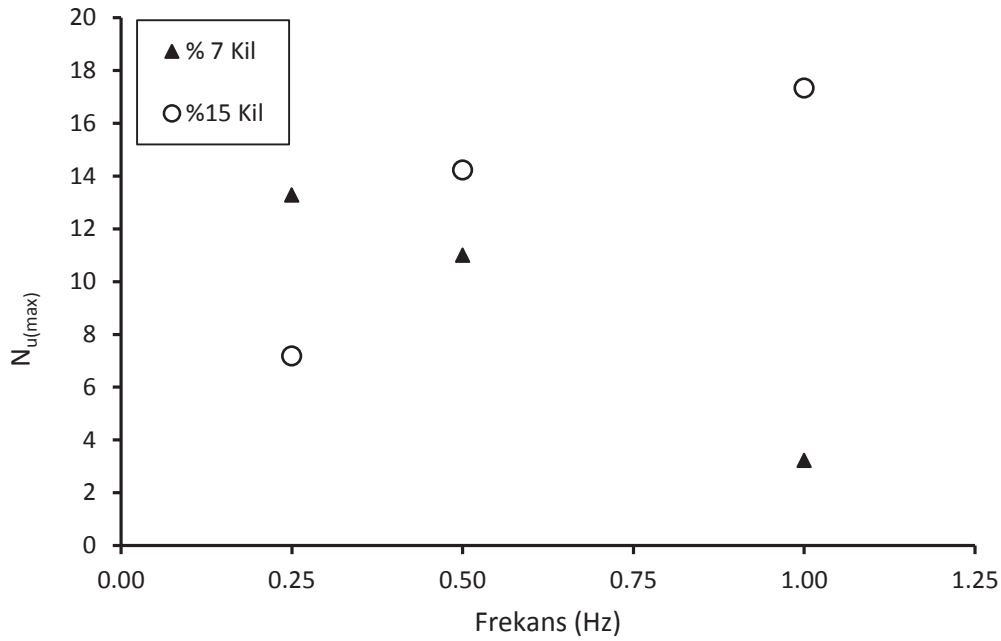
Şekil 4.8. Farklı kil oranında ki zeminlerin boşluk suyu basıncına karşılık çevrim sayısı grafiği [1]

Deney sonuçlarının değerlendirilmesiyle elde edilecek diğer bir veri frekansa karşılık (F, Hz) 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) grafiğidir. Şekil 4.9'da gösterilmiş olan grafiğe bakıldığında her iki tipte numuneler için (%7 kil oranına sahip ve %15 kil oranına sahip) dinamik kesme deney frekansı değişikçe numunelerin gösterdiği 15. çevrimdeki eksenel birim deformasyon (ϵ_{N15}) değerleri farklı davranış sergilemiştir. 0.25 Hz frekans değerinde yapılan deneylerde kil oranının artmasıyla numunelerin 15. çevrimdeki eksenel deformasyon değerlerinin azaldığı görülürken 0.5 Hz frekans değerinde yapılan deneylerde numunelerin tam tersi bir davranış sergilediği; numunelerde kil oranı arttıkça 15. çevrimdeki eksenel deformasyon değerlerinin arttığı görülmektedir. 1.00 Hz frekans değerindeki deneyde ise 0.25 Hz frekans değerinde olduğu gibi numunede kil oranının artmasıyla numunelerin 15. çevrimdeki eksenel deformasyon değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlardan kesin bir yargıya varmak zor olsa da numunedeki kil oranı arttıkça numunelerin daha az eksenel deformasyon sergilediğini söylemek mümkün olabilir.



Şekil 4.9. Frekansa karşılık 15. çevrimdeki aksenal deformasyon

Sonuç tablosundan elde edilebilecek grafiklerden biride frekansa karşılık numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı olan $N_{u(max)}$ grafiğidir. Şekil 4.10'da verilen grafiğe bakıldığında frekans değerleri arttıkça %7 kil oranına sahip numuneler ile %15 kil oranına sahip numunelerin birbirine zıt bir davranış sergiledikleri görülmektedir. %7 kil oranına sahip numunelerde frekans değerleri arttıkça numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısının azaldığı görülmektedir. %15 kil oranına sahip numunelerde ise frekans değerleri artış gösterirken numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısının da arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara bakarak numune içerisindeki kil oranının numunenin boşluk yapısını değiştirebileceği düşük kil oranına sahip numunelerde frekans artışıyla birlikte numunenin daha çabuk maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı söylenebilir. Fakat kil oranının artmasıyla frekans değerinde ki artışla numune üzerine gelen yüklerin daha hızlı geldiği fakat numunenin boşluk yapısından dolayı boşluk suyu basıncının o kadar hızlı yükselmediği yorumu yapılabilir.



Şekil 4.10. Frekansa karşılık maksimum boşluk suyu basıncına ulaşılan çevrim sayısı grafiği

4.1. Deney Sonuçlarının Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Parametreleri ile Değerlendirilmesi

Zeminlerin dinamik davranışlarının incelenmesinde ve deprem mühendisliği alanında zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin anlaşılmasında kayma modülü (G) ve sönüm oranı (η) parametreleri göz önüne alınmaktadır. Histerezis ilmikleri ile gerilme-şekil değiştirme davranışları ortaya konmaktadır (Şekil 4.10). Zeminlerin ve zeminler ile yapılar arasındaki etkileşimin dinamik yüklerden (deprem yükleri, tekrarlanan yükler, patlama etkileri, trafik yükleri) nasıl etkilendiğini ve ne tür değişimler sergileyeceğinin anlaşılmasında kayma modülü ve sönüm oranı değişkenleri önemli iki değişkendir [17].

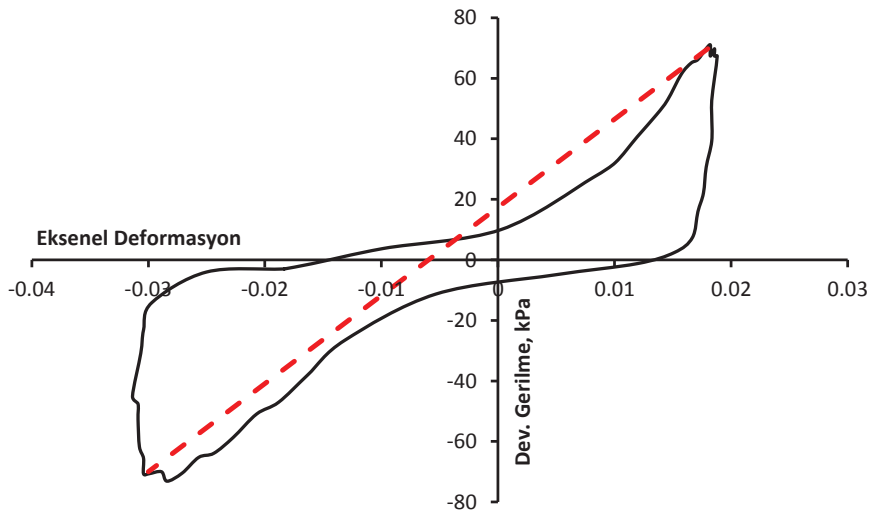
Doğrusal elastik olarak davranan malzemelerde elastik alanda kayma gerilmesi-birim kayma şekil değiştirme ilişkisi (bünye denklemi) doğrusaldır:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (4.1)$$

Burada τ kayma gerilmesini, G kayma modülünü, γ birim kaymayı ifade etmektedir. Bu ilişkideki orantı sabiti G ye “Kayma Modülü” adı verilir. Kayma modülünün boyutu gerilme boyutundadır [18].

Yukarıdaki yöntem daha çok kayma modülünün dinamik basit kesme (DSS) aleti çözümlerinde kullanılır. Bununla birlikte bu çalışmada olduğu gibi CTX deneyinden kayma modülünü elde etmek biraz dolaylı olmaktadır. Önce Şekil 4.11’de görüldüğü gibi kiriş elastisite modülünün hesaplanması gerekmektedir. Kiriş elastisite modülü Denklem 4.2’ de verilmiştir.

$$E_{sec} = \frac{\pm\sigma}{\pm\varepsilon_z} \quad (4.2)$$

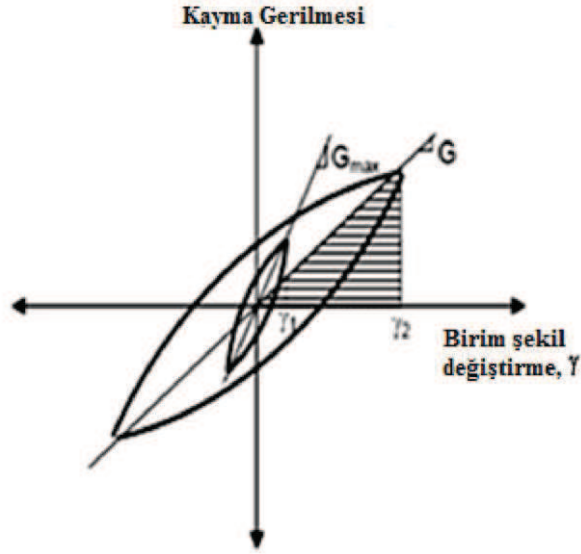


Şekil 4.11. Elastisite modülünün hesaplandığı kiriş

ASTM D3999-91’de elastisite modüllerinden kayma modülüne geçiş verilmektedir (Denklem 4.3) [19]. Bu çalışma kapsamında yapay yollara hazırlanan numunelerin Poisson oranı $\nu=0,30$ kabul edilmiştir.

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} \quad (4.3)$$

Sürtünme gibi nedenler ile enerji kayıplarının olduğu plastik şekil değiştirmelerin varlığı ile açıklanabilir. Her bir çevrim sonunda bir miktar enerji sönmülmekte ve bu ilişki sönmüleme oranı olarak tanımlanmaktadır [20]. Sönüm oranı Şekil 4.12' de görülen grafikteki taralı alanla tanımlanmaktadır. Taralı alanın denklemi Denklem 4.4 ile ifade edilir.



Şekil 4.12. Sönüm oranının tanımı [17]

$$\eta = \frac{A_L}{4\pi A_T} * 100 \quad (4.4)$$

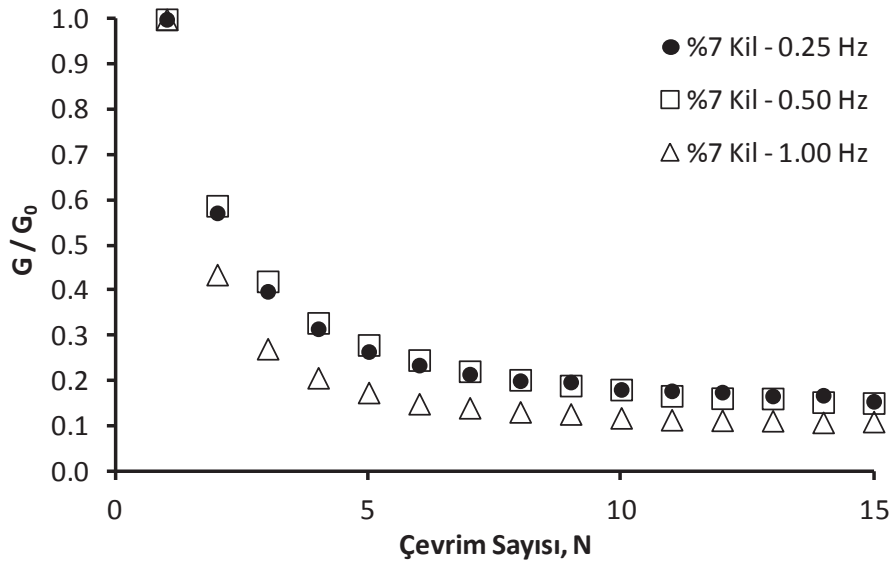
Burada, A_L histerezis ilmeğinin alanını, A_T grafik altında kalan taralı alanı, η ise % olarak sönüm oranını göstermektedir.

Numunelerin fiziksel özelliklerinin ve rijitlik parametrelerinin bir fonksiyonu olarak da sönüm oranı denklem 4.5'den de hesaplanabilmektedir.

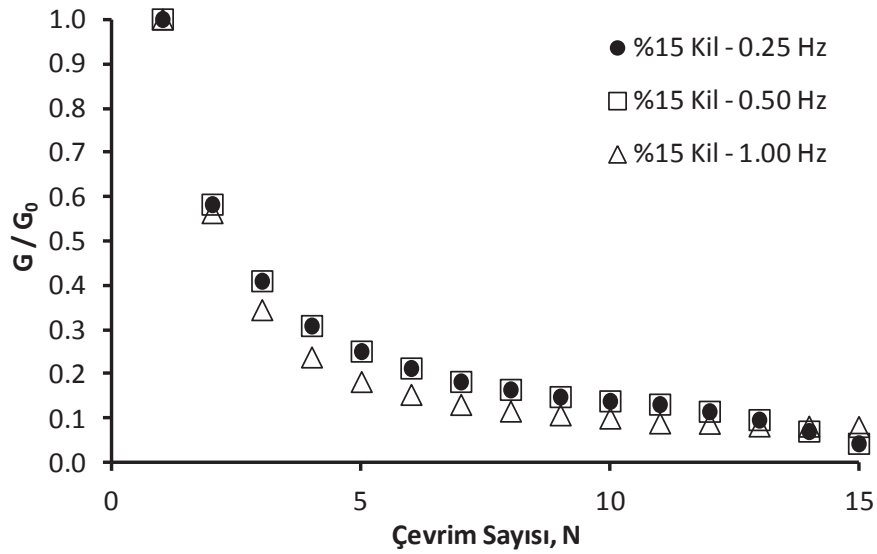
$$\eta = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 J_p^{1.3})}{2} x \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (4.5)$$

Başlangıç kayma modülü ($G_{max}=G_0$) değerinin artan birim kayma şekil değiştirmesi ile değişimi, genellikle normalize edilmiş boyutsuz parametre ile ifade edilir [20]. Artan çevrim sayısına karşılık gelen kayma modülü (G) başlangıç kayma modülüne (G_0) oranlanarak bu boyutsuz parametre elde edilebilir.

Çalışmanın bu kısmında kayma modülünün başlangıç kayma modülüne oranına (G/G_0) karşılık çevrim sayısının (N) farklı frekanslardaki değişimi incelenmiştir. G/G_0 oranları çevrim sayıları arttıkça düşmektedir. Şekil 4.13’de % 7 Kil oranı için farklı frekanslarda G/G_0 -Çevrim Sayısı ilişkisi ve Şekil 4.14’de ise % 15 Kil oranı için farklı frekanslarda G/G_0 -Çevrim Sayısı ilişkisi görülmektedir. Her iki kil yüzdesinde (%7 ve %15) de 0.25 ve 0.50 Hz deney sonuçları birbirlerine yakın çıkmasına rağmen 1.00 Hz ile elde edilen G/G_0 oranlarının düşük frekanstakilere göre çevrim sayısının artışı ile daha hızlı bir düşüş gösterdiği görülmektedir.

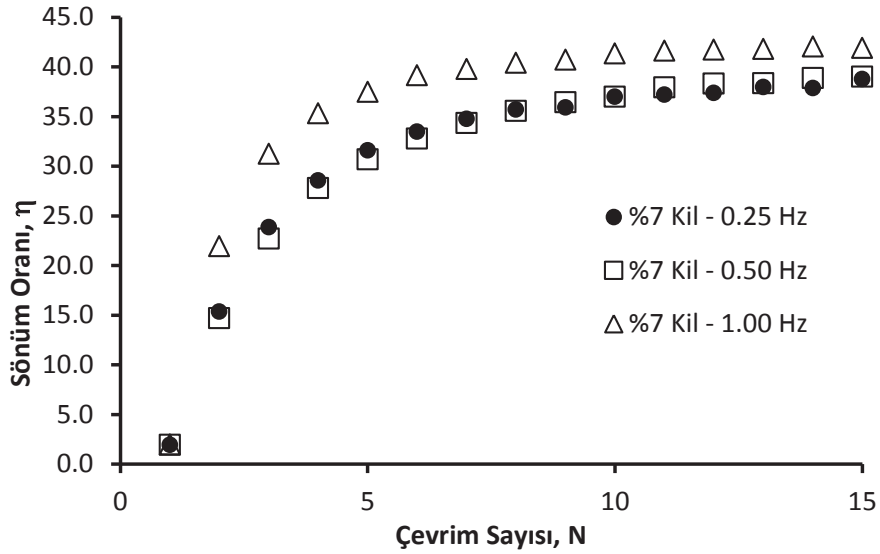


Şekil 4.13. % 7 Kil oranı için farklı frekanslarda G/G_0 -Çevrim Sayısı ilişkisi

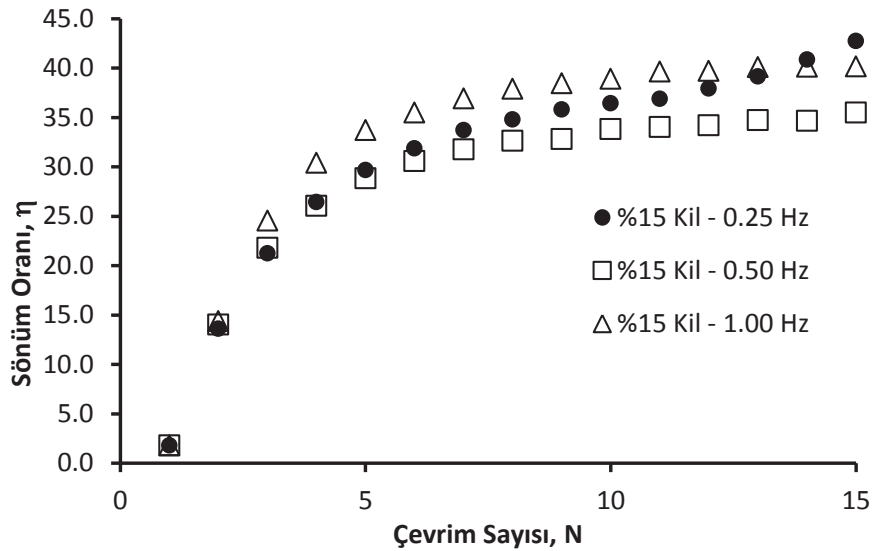


Şekil 4.14. % 15 Kil oranı için farklı frekanslarda G/G_0 -Çevrim Sayısı ilişkisi

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sönüm oranına (η) karşılık çevrim sayısının (N) farklı frekanslardaki değişimi incelenmiştir. Sönüm oranları çevrim sayıları arttıkça artmaktadır. Şekil 4.15'de % 7 Kil oranı için farklı frekanslarda Sönüm Oranı-Çevrim Sayısı ilişkisi ve Şekil 4.16'da ise % 15 Kil oranı için farklı frekanslarda Sönüm Oranı-Çevrim Sayısı ilişkisi görülmektedir. Burada da G/G_0 oranlarına benzer olarak; her iki kil yüzdesinde (%7 ve %15) de 0.25 ve 0.50 Hz deney sonuçları birbirlerine yakın çıkmasına rağmen 1.00 Hz ile elde edilen sönüm oranlarının düşük frekanstakilere göre çevrim sayısının artışı ile daha hızlı bir artış gösterdiği görülmektedir.

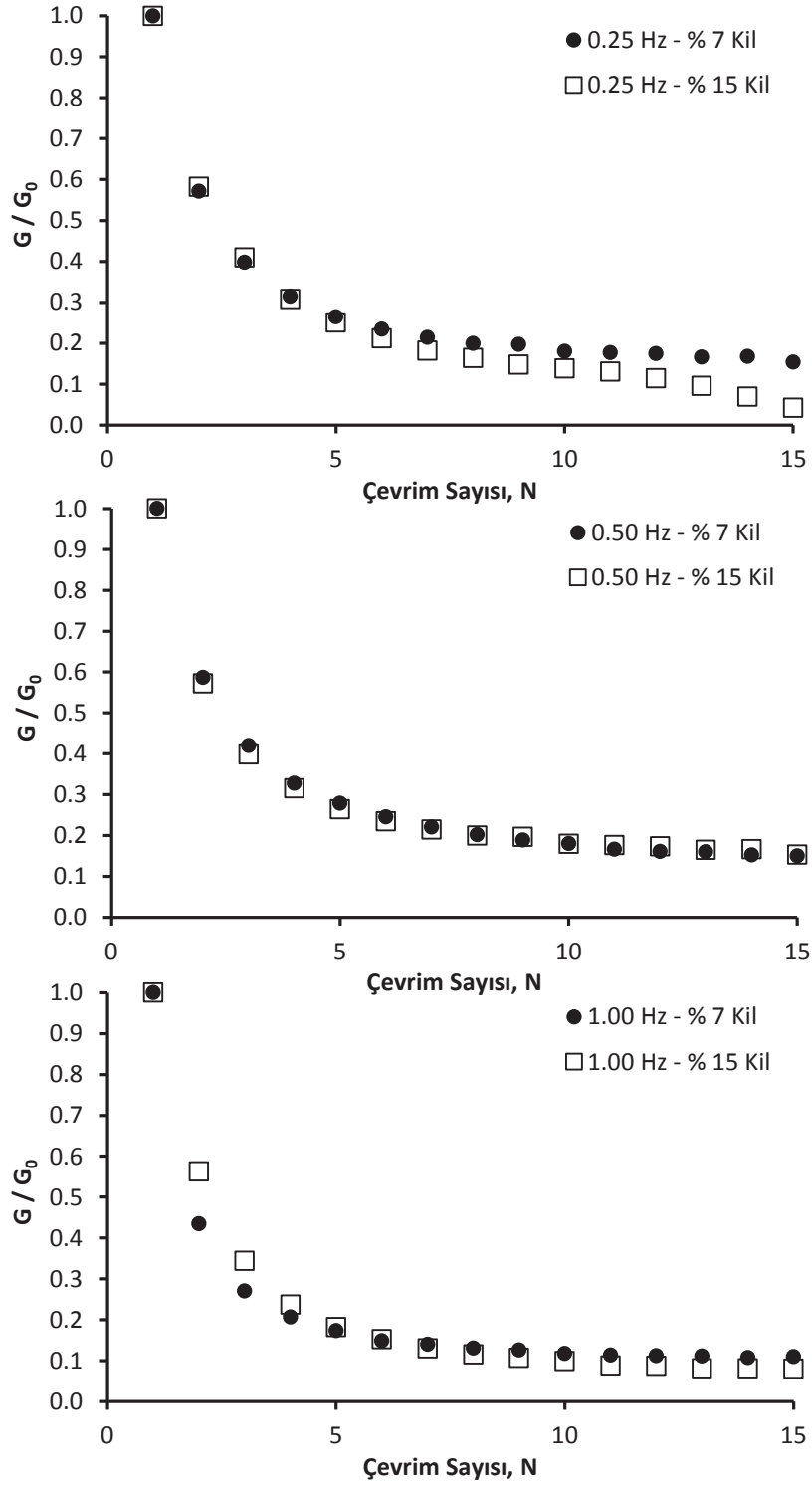


Şekil 4.15. % 7 Kil oranı için farklı frekanslarda Sönüm Oranı-Çevrim Sayısı ilişkisi



Şekil 4.16. % 15 Kil oranı için farklı frekanslarda Sönüm Oranı-Çevrim Sayısı ilişkisi

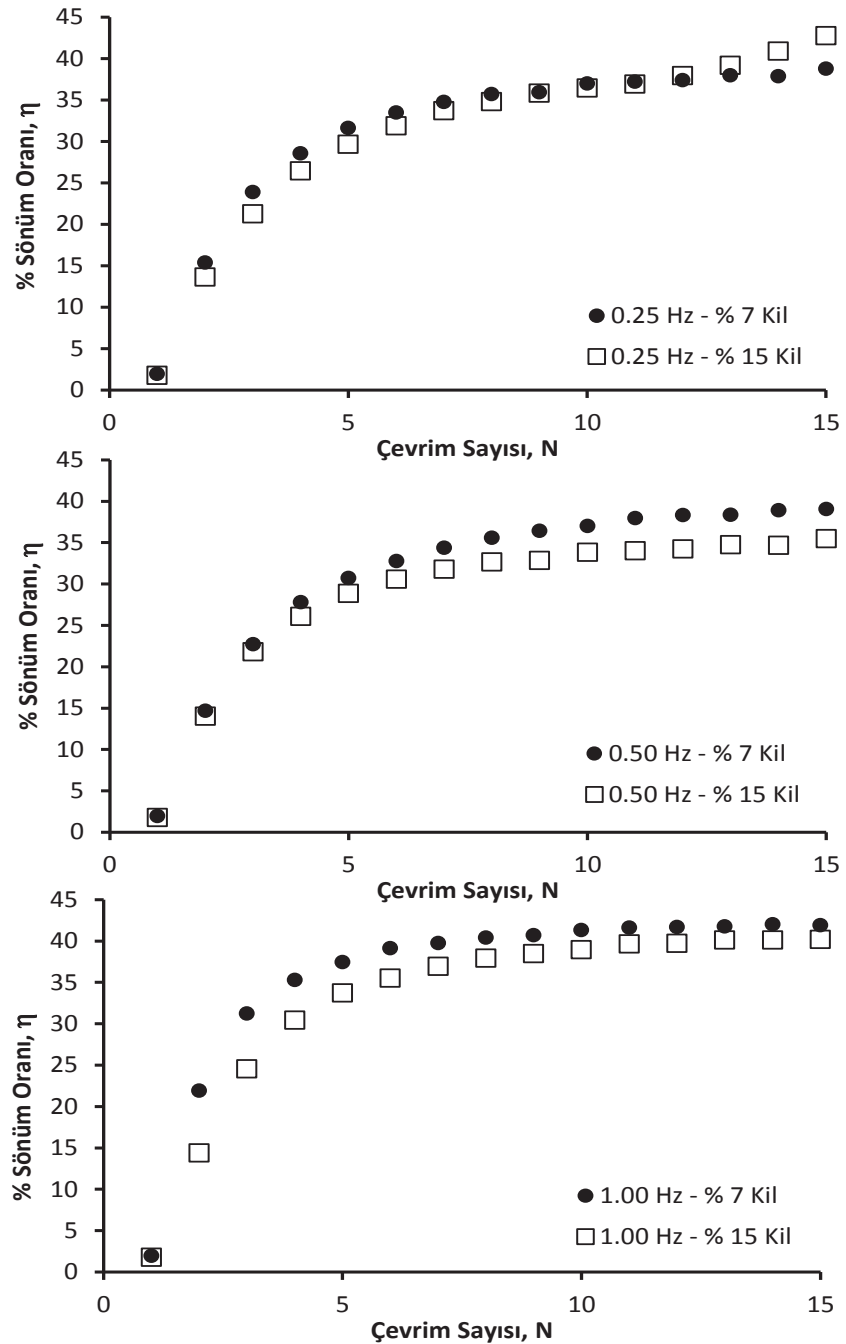
Kayma modülünün başlangıç kayma modülüne oranına (G/G_0) karşılık çevrim sayısının (N), frekans sabit tutularak, % kil oranının değişimine vereceği tepkiyi anlamaya yönelik çizilmiş grafikler toplu olarak Şekil 4.17'de sunulmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere değişen kil yüzdesinin (G/G_0) oranına hatırı sayılır derecede bir katkısı olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.17. Farklı Kil oranları için farklı frekanslarda G/G_0 -Çevrim Sayısı ilişkisi

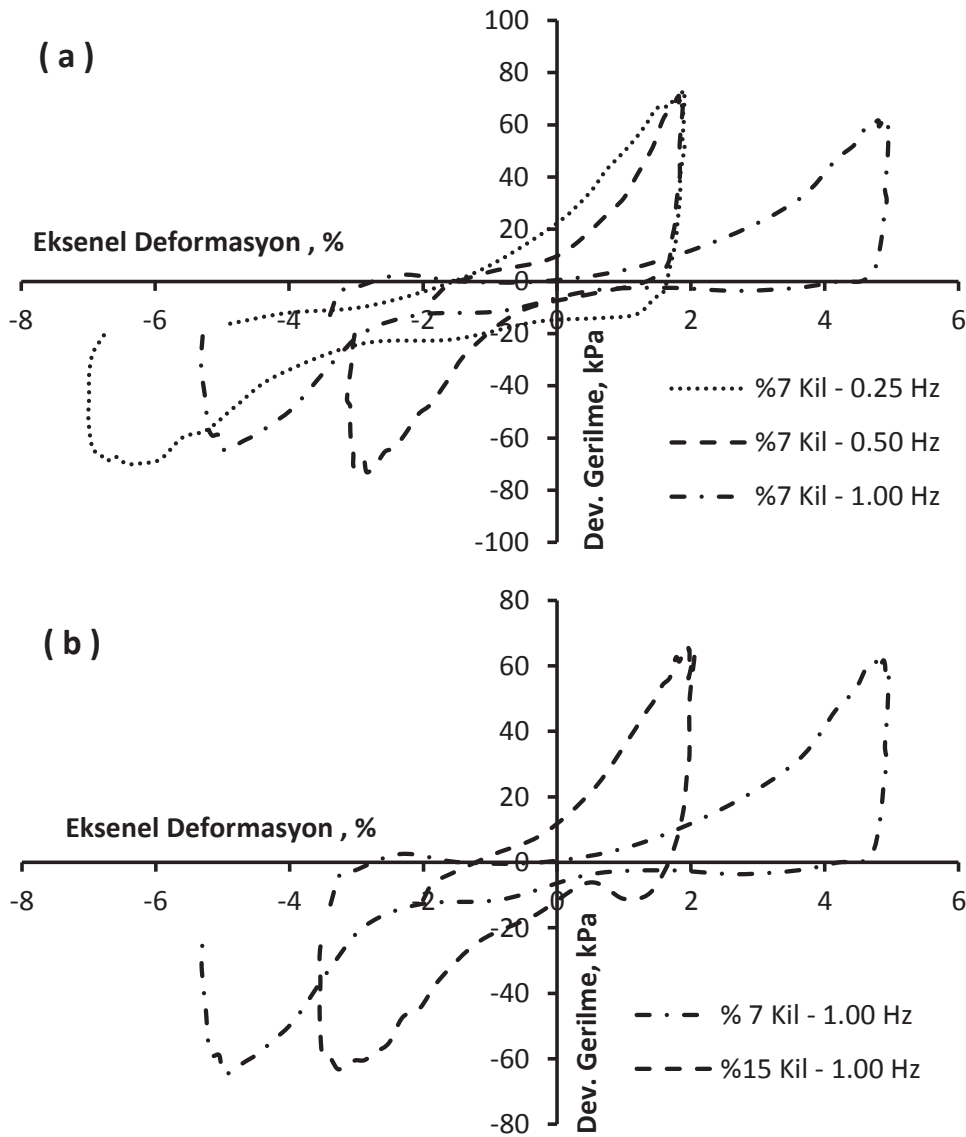
Sönüm Oranına (η) karşılık çevrim sayısının (N), frekans sabit tutularak, % kil oranının değişimine vereceği tepkiyi anlamaya yönelik çizilmiş grafikler toplu olarak Şekil 4.18'de sunulmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere frekans arttıkça sönüm

oranındaki artışın hızı azalmaktadır. Ancak bu durum sönüm oranında bulunan plastisite indisi parametresinin denkleme katkısından ileri gelebilir. Zira %7 kil oranına sahip ML numune plastik değilken (NP), % 15 silt numunesine sahip MI numunesinde plastisite indisi 10,32'dir. Bu da sönüm oranı ile plastisite indisi arasında ters ilişki olduğundan grafiğin aşağı doğru ötelenmesine neden olabilir.



Şekil 4.18. Farklı Kil oranları için farklı frekanslarda Sönüm oranı (η) - Çevrim Sayısı ilişkisi

Şekil 4.19a'da %7 kil oranına sahip numuneler üzerinde yapılmış deney sonuçlarından elde edilmiş 3. çevrimdeki (N_3) Eksenel Deformasyon (%) – Deviyatör Gerilme (σ_d , kPa) ilmikleri görülmektedir. Buradan frekans arttıkça ilmiklerin sağa doğru kaçtığı genliğinin ise nispeten azaldığı görülmektedir. Şekil 4.19b'de ise 1.00 Hz frekans ile denenmiş numunelerin sonuçlarından elde edilmiş 3. çevrimdeki (N_3) Eksenel deformasyon (%) – Deviyatör Gerilme (σ_d , kPa) ilmikleri görülmektedir. Buradan kil oranı arttıkça ilmiklerin sola doğru kaçtığı ve genliklerinin azaldığı izlenebilir ve kil oranı arttıkça eksenel deformasyonun azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.19. Çevrimdeki (N_3) Eksenel deformasyon (%) – Deviyatör gerilme (σ_d , kPa) ilmikleri.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma ve deneyler sonucunda ince daneli zeminlerde kil oranının sıvılaşma potansiyelinde ve zeminin sergileyeceği deformasyon üzerinde etken olan önemli bir parametre olduğunu söylemek mümkündür. Artan kil oranıyla yapılan CTX deneylerde boşluk suyu basıncı artışlarının daha yüksek kil oranına sahip numunelerde daha az kil oranına sahip numunelere göre daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Kil oranı yükseldikçe zeminin sıvılaşma göstermesi daha zor olmaktadır.

Değişen frekans değerleri de numuneler üzerinde ciddi farklı sonuçlar alınmasına yol açmıştır. Daha yüksek frekans değerleriyle yapılan deneylerde boşluk suyu basınçlarının daha fazla artış gösterdiği, her iki tip, %7 ve %15 kil oranına sahip, numunelerde 15. çevrimdeki boşluk suyu basınçlarının yüksek frekansta yüksek düşük frekansta düşük değerler gösterdiği görülmektedir.

Aynı çevrimsel gerilme oranında (CSR) yapılan deneyler göstermişti ki %7 kil oranına sahip ve %15 kil oranına sahip numunelerde %2,5 eksenel birim deformasyona ulaştıkları çevrim sayısı ($N_{\epsilon_{\pm 2.5}}$) ve %5 eksenel birim deformasyona ulaştıkları çevrim sayıları ($N_{\epsilon_{\pm 5}}$) 1, 2 gibi düşük ve birbirine çok yakın değerler çıkmaktadır. Değişen frekans değerleriyle de çok farklı sonuçlar çıkmamaktadır. Dinamik yükleme frekans değerleri arttıkça $N_{\epsilon_{\pm 2.5}}$ ve $N_{\epsilon_{\pm 5}}$ değerleri de bir miktar artış göstermiş olsa da çok ciddi miktarda artışlar göstermemişlerdir. Kil oranı yüksek olmayan deney numuneleri için %2,5 ve %5 eksenel deformasyonların olduğu çevrim sayıları arasında bir kıyaslama yapmak mümkün olmamıştır.

%7 ve %15 kil oranına sahip numunelerde frekans değeri yükseldikçe G/G_0 oranlarının düşük frekans değerlerine göre daha düşük, sönüm oranı değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Buradan hareketle frekans değeri yüksek olan dinamik yüklemelerde numunelerin daha fazla kalıcı deformasyon gösterdiğini

söylemek mümkün olacaktır. Kil oranı arttıkça numunelerdeki sönüm oranının azaldığı gözlenmiş olup yüksek kil oranına sahip numunelerin daha düşük kalıcı deformasyon göstereceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ural, N., İnce Taneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2008.
- [2] Bol, E., Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Doktora Tezi, 2003.
- [3] Ural, N., Önalp, A., Bol, E. Siltlerde Sıvılaşmanın Deneysel İncelenmesi, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1525.pdf>, Erişim Tarihi: 14.02.2015.
- [4] Özay, R., Erken, A. Killerde Plastisitenin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi; İTÜ Dergisi/d mühendislik Cilt:2, Sayı:1, 55-63, 2003
- [5] Kaya, Z. IRISAWA, T., ERKEN, A., Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Davranışı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2002.
- [6] Chang, N. Y., Hsieh, P., Samuelson, L., Horita, M. Effect of Frequency on Liquefaction Potential of Saturated Monterey No. O Sand, Computational Methods and Experimental Measurements, 1982, pp 433-446, 1982.
- [7] Lee, K.L., Fitton, J.A., Factors Affecting The Cyclic Loading Strength Of Soil, Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM STP 450, American Society for Testing and Materials, pp. 71-95, 1968.
- [8] Mulilis, J. P., The Effect Of Sample Preparation On The Cyclic Stress-Strain Behavior Of Sands, University of California, Civil Engineering Department, at Berkeley, California, Doctor of Philosophy Thesis, 1975.
- [9] Jungang Liu, B.S., Liquefaction Resistant On Monterey No.0/30 Sand, Wuhan University of Technology, China, Department of Civil Engineering, Master of Science Thesis, 2007.
- [10] Serdar. E., Comparative Liquefaction Analyses on Adapazari Soil, Istanbul Technical University, Institute Of Science and Technology, Civil Engineering Department, M. Sc. Thesis, 2006.

- [11] Flow Liquefaction & Cyclic Mobility, Civil Engineering Department of University of Washington,
<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html>
Erişim tarihi: 15.03.2015
- [12] Karanlık, S. Hatay Altinkoy Çevresinin Zemin Sıvılaşma Riskinin Belirlenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [13] TSE, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması: TSE1500, Ankara, 2000.
- [14] Tapan, M. Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Yanal Konsolidasyon Özelliğinin Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [15] Onturk, K., Bol, E., Ozsagir, M. Doygun Olmayan İnce Taneli Zeminlerin Kayma Direnci, 3rd International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science, Polytechnic University of Valencia, 2015.
- [16] TSE, İnşaat Mühendisliği Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, TSE1900-1, Ankara, 2006.
- [17] Duran, B., Sismik Etkiler Alan İnce Daneli Zeminlerin Rijitlik Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi 2010.
- [18] Dikicioğlu, A., İstanbul Teknik Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Ders Notları, 2011.
- [19] ASTM D3999-91, Standart Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus, 1996.
- [20] Özener, P. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ders Notları, 2014
- [21] PHRI, Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A.A.Balkema, Rotterdam, 1997.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ÖZSAĞIR 11.09.1988 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk ve orta eğitimini Kahramanmaraş'ta lise eğitimini Osmaniye'de tamamladı. 2006 yılında Osmaniye Fen Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında mezun oldu. 2012 yılından beri Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.