

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KUMLU ZEMİNLERİN SIVILAŞMA ENERJİSİNİN  
LABORATUVARDA BELİRLENMESİNDE NUMUNE  
BOYUTUNUN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ŞEYDA ÖZÇELİK**

**DENİZLİ, 2019**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**UYGULAMALI JEOLOJİ**



**KUMLU ZEMİNLERİN SIVILAŞMA ENERJİSİNİN**  
**LABORATUVARDA BELİRLENMESİNDE NUMUNE**  
**BOYUTUNUN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ŞEYDA ÖZÇELİK**

**DENİZLİ, 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Şeyda ÖZÇELİK tarafından hazırlanan “KUMLU ZEMİNLERİN SIVILAŞMA ENERJİSİNİN LABORATUVARDA BELİRLENMESİNDE NUMUNE BOYUTUNUN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 04.09.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği /oy-çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Turgay BEYAZ



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Suat TAŞDELEN  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Can BALCI  
Batman Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
10/09/2019 tarih ve 36/32 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL


Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (PAÜ-BAP) Koordinasyon Birimi tarafından 2018FEBE044 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tez çalışması Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) tarafından, PAÜ-BAP: 2018FEBE44 nolu projenin deneylerinin yapılabilmesi için laboratuvar ve altyapı imkânlarının kullanılmasına izin verilerek, desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim. 04.9.2019**

**şeyda ÖZÇELİK**



## ÖZET

### KUMLU ZEMİNLERİN SIVILAŞMA ENERJİSİNİN LABORATUVARDA BELİRLENMESİNDE NUMUNE BOYUTUNUN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEYDA ÖZÇELİK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ TURGAY BEYAZ)

DENİZLİ, 2019

Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyeli çoğunlukla SPT veya CPT gibi arazi yöntemlerini kullanan gerilme yaklaşımları ile belirlenmektedir. Gerilme yaklaşımı ve arazi yöntemleri ile ilgili belirsizlikler uzun zamandır tartışılmaktadır. Kumların sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarda belirlenmesinde çoğunlukla dinamik üç eksenli deney yöntemi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem, gerçek arazi koşullarını tam olarak temsil etmediği için araştırmacılar tarafından fazla kabul görmemiştir. Dinamik yükleme koşulları için kullanılan diğer laboratuvar yöntemleri; içi boş silindirik burulmalı makaslama, rezonans kolonu, bender elemanları ve tekrarlı basit makaslama deneyleridir. Günümüzde, enerji kavramı, laboratuvarda kum zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu araştırmanın amacı kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisinin tekrarlı basit makaslama deney düzeneği kullanarak belirlenmesinde, örnek boyut etkisinin incelenmesidir.

Çalışmada, üniform, temiz deniz kumu kullanılmıştır. Test edilecek örneklerin içerisine yerleştirildiği hücre çapları 50, 100 ve 150 mm olup, her bir farklı hücre de kendi içerisinde, boy/çap (H/D) oranları 1, 0,5 ve 0,25 olan 3 farklı yükseklikte deney örneği hazırlama hücresine sahiptir. Bu şekilde, kum örneği için 9 ayrı boyut denenmiştir. Her bir farklı ebata sahip deney örneği beş ayrı rölatif sıklık (Dr)'ta (Dr: %40, %50, %60 ve %70) hazırlanmıştır. Ayrıca, her bir deney örneğine 100 kPa düşey gerilme ve 50 kPa boşluk suyu basıncı altında, tek yönlü dinamik yükleme uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan yöntem, tekrarlı basit makaslama deneyidir. Harmonik yükleme işlemleri 0,1 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Her bir deney 3 kez tekrarlanmış, eşdeğer veya birbirine yakın sonuçlar anlamlı olarak kabul edilmiştir. 3 Deneyin ortalaması, nihai değer olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, 100 mm çap için 100 mm yükseklik ve 150 mm çap için 75 mm yüksekliğindeki örnek boyutlarında; aşırı boşluk suyu basıncının artışına bağlı olarak efektif gerilmenin sıfıra ulaştığı sonuçlar, tutarlı olarak kabul edilmiştir. Araştırma sonucunda elde edilecek yeni veriler, daha ileri düzey deneylerin yapılması için önemli bir referans olacaktır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Efektif Gerilme, Kum, Örnek Boyutu, Rölatif Sıklık, Sıvılaşma

## **ABSTRACT**

### **THE SAMPLE SIZE EFFECT ON THE DETERMINATION OF THE LIQUEFACTION ENERGY OF SANDY SOILS DEFINED BY A LABORATORY METHOD**

**MSC THESIS**

**ŞEYDA ÖZÇELİK**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
GEOLOGICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. TURGAY BEYAZ)**

**DENİZLİ, 2019**

Liquefaction potential of cohesionless soils has been evaluated almost unexceptionally using the field techniques such as SPT and CPT along with the stress approach. The uncertainties related to the stress approach and the in situ tests itself have long been discussed. The laboratory techniques to evaluate the liquefaction potential of sands employ mostly the dynamic triaxial test. This technique has not welcomed by the researchers because it does not represent the actual soil conditions. There are some other laboratory techniques used for dynamic loading such as hollow cylindrical torsional shear, resonant column, bender element and cyclic simple shear tests. Today, liquefaction energy approach is used as an alternative method for the evaluation of liquefaction potential of granular soils under laboratory conditions. The aim of this research is to investigate the sample size effect on the liquefaction energy using a cyclic triaxial simple shear device.

The material used for the investigation is a uniform, clean marine sand. The diameters of tested sample sizes are (D) of 50 mm, 100 mm and 150 mm. The sample heights are arranged such that the height to diameter (H/D) ratios are 1,0, 0,5 and 0,25. Thus, a total of 9 sizes is tried for the soil sample. Furthermore, uniaxial cyclic loading was applied at test samples having different height and diameter. Experimental samples were prepared in five different relative densities ( $D_r$ ) ( $D_r$ : 40%, 50%, 60% and 70%). In addition, one-direction (1-D) dynamic loading was applied to each test sample under a vertical stress of 100 kPa and a pore pressure of 50 kPa. The method used in the study is a cyclic simple shear test. Harmonic loading was carried out at a frequency of 0.1 Hz. Each experiment was repeated 3 times, with equivalent or similar results considered significant. The average of 3 experiments was accepted as the final value.

The results of which the effective stress reached zero due to the increase of excess pore pressure were considered to be consistent for the optimal test sample sizes of 100 mm height with 100 mm diameter, and 75 mm height with 150 mm diameter. The new data obtained as a result of the investigation will be an important reference for further research.

**KEYWORDS:** Effective Stress, Liquefaction, Relative Density, Sample Size, Sand

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>3</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>4</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>5</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>6</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>7</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	9
1.2 Çalışmanın Özgün Değeri .....	9
1.3 Çalışmanın Yaygın Etkisi ve Katma Değeri .....	10
<b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>12</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>24</b>
3.1. Deneyin Yapılışı .....	34
4.Rölatif sıklık nedir? .....	36
<b>4. DENEYSEL BULGULAR</b> .....	<b>37</b>
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>47</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>49</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>57</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1: Tekrarlı basit kesme deney düzeneği.....	25
Şekil 2: Kumların sıvılaşması deneyleri için öngörüsü yapılan arazi şartlarını gösteren enine kesit .....	25
Şekil 3: Numunenin yatay yönde makaslanması sırasında .....	27
Şekil 4: Kum numunesi hazırlama aparatı örneği .....	27
Şekil 5: Çalışmada kullanılan üniform, ince-orta tane boyundaki temiz deniz kumunun genel görünüşü .....	28
Şekil 6: Çalışmada kullanılan denizel kökenli kumun tane boyu dağılım grafiği ..	29
Şekil 7: Kuru yağmurlama tekniğiyle huni yardımıyla.....	31
Şekil 8: Numune Hazırlama Tablası .....	31
Şekil 9: Yassı Teflon Bilezik Seti .....	32
Şekil 10: Kauçuk Membran .....	32
Şekil 11: Başlık Taşıma ve Sabitleme Aparatı.....	33
Şekil 12: Numune Hazırlama ve Yassı Bilezik Sabitleme Hücresi .....	34
Şekil 13: O-ring .....	34
Şekil 14: Devir sayısı – boşluk suyu basıncı (kPa) grafiği .....	38
Şekil 15: Kesme deformasyonu (%) – kesme gerilmesi (kPa) grafiği .....	39
Şekil 16: Devir sayısı – boşluk suyu basıncı grafiği .....	40
Şekil 17: Kesme deformasyonu - kesme gerilmesi grafiği .....	41
Şekil 18: Devir sayısı – boşluk suyu basıncı grafiği .....	42
Şekil 19: Kesme deformasyonu - kesme gerilmesi grafiği .....	43
Şekil 20: $D_r = \%50$ numune için Sıvılaşma enerjisi (kJ/m <sup>3</sup> ) –.....	44
Şekil 21: $D_r = \%60$ numune için Sıvılaşma enerjisi (kJ/m <sup>3</sup> ) –.....	45
Şekil 22: $D_r = \%70$ numune için Sıvılaşma enerjisi (kJ/m <sup>3</sup> ) –.....	46

## SEMBOL LİSTESİ

$D_r$	:	Rölatif sıklık
$f$	:	frekans (Hz)
$u$	:	Boşluk suyu basıncı
$\gamma$	:	Kesme birim deformasyon oranı
$r_u$	:	Kesme birim deformasyon oranı
$\sigma_v$	:	Düşey gerilme
$\sigma'_v$	:	Efektif (etkin) düşey gerilme
$H$	:	Boy
$D$	:	Çap
$W$	:	Birim hacim başına sıvılaşma enerjisi ( $\text{kJ/m}^3$ )
mm	:	milimetre
m	:	metre
SPT	:	Standart Penetrasyon Deneyi
CPT	:	Konik Penetrasyon Deneyi
IPS	:	Kısmi Doyguna İndirgeme

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi (PAÜ) Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde gerçekleştirilen bir yüksek lisans tezi çalışması olup, Bilimsel Araştırma Projeleri (PAÜ-BAP) Koordinatörlüğü tarafından 2018FEBE044 proje numarasıyla maddi olarak desteklenmiştir.

Bu çalışmada gerekli olan laboratuvar alt yapısı sadece Ankara Üniversitesi (Mühendislik Fakültesi)'nde bulunmaktadır. Çalışma, Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) bünyesindeki laboratuvar ve altyapı imkânları da kullanılarak yürütülmüştür. İlgili kurum ve kuruluşların yönetici ve çalışanlarına; Özellikle, Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Jeoloji Müh. Bölümünden Sayın Prof. Dr. Kamil KAYABALI'ya ve Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Jeoloji Müh. Bölüm Başkanı ve aynı zamanda Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü Sayın Prof. Dr. Yusuf Kağan KADIOĞLU'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca uzun bir tez çalışması süresi boyunca bana yardım, teşvik ve gayretlerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmam esnasında karşılaştığım problemlere büyük bir içtenlikle çözüm bulan ve bana her konuda yardımcı olan kıymetli tez danışmanım Dr. Öğr. Üy. Turgay BEYAZ 'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında, bana sabırla katlanan, maddi ve manevi destek olan canım aileme; anneme, babama, kız kardeşime, sevgili eşime, biricik oğlum Ahmet Salih'e ve burada isimlerini sayamadığım ailemizin tüm fertlerine en içten sevgi, saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

# 1. GİRİŞ

Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyeli çoğunlukla SPT veya CPT gibi arazi yöntemlerini kullanan gerilme yaklaşımı ile belirlenmektedir. Gerilme yaklaşımı ve arazi yöntemleri ile ilgili belirsizlikler uzun zamandır tartışılmaktadır. Kumların sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarında belirlenmesinde çoğunlukla dinamik üç eksenli kesme yöntemi kullanılsa da, bu yöntem gerçek arazi koşullarını tam benzeştirememektedir. Gerçek arazi şartlarında deprem hasarını yatay yönde etkileyen kesme kuvvetlerinin meydana getirdiği bilinmektedir. Bu nedenle, deprem ivme kayıtlarında her iki yatay kayıtlar kullanılmaktadır. İstisnai bir durum olarak yakın kaynak alanlarda düşey bileşen, yatay bileşenlere göre daha baskın olabilmektedir. Ancak, genel olarak yatay ivme bileşenleri deprem yönetmeliklerinde deprem yükü/kuvveti hesaplamalarında göz önüne alınmaktadır. Bu nedenle, dinamik üç eksenli kesme yönteminin gerçek arazi koşullarını tam benzeştiremediği, uygulandığında belirsizlik olduğu öngörüsü yapılmıştır. Dinamik yükleme koşulları için kullanılan diğer laboratuvar yöntemlerinden bazıları; burulmalı kesme, rezonans kolonu ve bender elemanı deneyleridir.

Kum zeminlerin sıvılaşma potansiyelini laboratuvar tekniklerini kullanarak belirlemede, son zamanlarda, enerji kavramının kullanıldığı görülmektedir. Bu yaklaşımda başlıca gerekli parametreler zeminin rölatif sıklığı ve efektif gerilmedir.

Bu çalışmada, gerçek zemin koşullarını modellemede mevcut donanımlara göre daha üstün özelliklere sahip olan, kumların sıvılaşma enerjisinin hesaplanabilmesine imkân veren ve zemine iki yönde dinamik kesme gerilmesi, üçüncü yönde ise dinamik yük uygulayabilen "çok yönlü tekrarlı (dinamik) basit kesme deney düzeneği" kullanılmıştır.

Bu araştırmanın amacı, kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisinin "çok yönlü tekrarlı basit kesme deney düzeneği" kullanarak belirlenmesinde, test edilmek için hazırlanacak kumun/kumlu zemin numunesinin boyutunun (boyu ve çapının) elde edilecek sonuçlar üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Dolayısıyla elde edilen sonuçların, aynı özelliklerde hazırlanacak numunelerde, aynı şartlar altında

deneylerin tekrarlanması halinde; eş ve/veya en yakın sonuçların alınabildiği numune (örnek) boyutunun (ebatının) belirlenmesi bu çalışmadaki temel amaçtır.

Çalışmada kullanılacak malzeme farklı boylardaki temiz denizel kumlardır. Test edilmesi amacıyla hazırlanan örneklerin çapları 50 mm, 100 mm ve 150 mm olarak seçilmiştir. Bu seçimi etkileyen faktörlerden birisi, bu çaptaki membranların yaygın olarak kullanılıyor olması ve daha kolay temin edilebilmesidir.

Bütün kum numuneleri 0,1 Hz frekansta (f) salınma tabi tutulmuştur. % 30, % 40, % 50, % 60 ve % 70 rölatif sıklıklarda ( $D_r$ ) hazırlanan kum numunelerin hepsi için % 5 kesme birim deformasyon oranında deneyler yapılmıştır. Bu şekilde deneye tabi tutulacak kum numunelerine her bir rölatif sıklık ve kesme birim deformasyonu oranı için  $r_u=1/2$  ( $=\gamma$ ) oranını sağlayacak şekilde; toplam düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) 100 kPa, boşluk suyu basıncı (u) 50 kPa olacak şekilde düşey gerilme etkisinde bırakılmıştır. Bu şartlar altında bir tür kum numunesi için 5 farklı rölatif sıklıkta ( $D_r$ ) ve 3 farklı çapta deneyler yapılmıştır. Ayrıca, her bir farklı çapa sahip numunelerin her biri; 3 farklı yükseklikte (Boy/Çap (H/D) oranı= 1; 0,5 ve 0,25 olacak şekilde) hazırlanan numuneler üzerinde deneyler tekrarlanmıştır. Dolayısıyla, toplamda 45 deney yapılmıştır. Yükleme şekli olarak, tek yönlü ve 0,1 Hz frekansta harmonik yükleme uygulanmıştır.

Çalışma sonucunda; 3 farklı çapta (D), 3 ayrı boyda (H) (toplam 9 ayrı H/D oranında) ve 5 ayrı rölatif sıklıkta ( $D_r$ ) hazırlanmış olan örneklerle yapılan deneylerle; örnek boyutunun (örnek ebatlarının) sıvılaşma enerjisine etkisi bir kum türü için ortaya konmuştur.

Bu çalışmayla elde edilen sonuçlar, grafiksel olarak birbiriyle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Araştırmadan elde edilen sonuçlar, kendi alanında az sayıda benzeri olan laboratuvar cihazında daha ileri düzey deneylerin yapılması için önemli ve temel bir aşamadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, bundan sonraki deneyler için hazırlanacak numunelerin ebatlarına karar verilmesinde referans olarak kullanılacaktır.

## 1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışma, kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması için gerekli enerjinin, "tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" ile belirlenmesinde; laboratuvarda hazırlanacak numune (örnek) boyutunun (boy ve çap ölçülerinin), deney sonuçlarına etkisinin araştırılması amacıyla yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, denizel kökenli, ince kum türünde tek tip numune kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin ve/veya bulguların istatistiksel olarak değerlendirilmesine dayalı olarak, kum zeminlerin sıvılaşmasında; örnek boyutunun etkisinin olup olmadığını araştırılmıştır.

## 1.2 Çalışmanın Özgün Değeri

Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin laboratuvar teknikleriyle belirlenmesinde birçok yöntem olmasına rağmen en çok başvurulan yöntemlerden bazıları:

- i) dinamik üç eksenli deney,
- ii) tek yönlü tekrarlı basit kesme deneyi ve
- iii) tekrarlı burulmalı halka deneyidir.

Bu deneyde kullanılmış olan "tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" daha önceki araştırmalarda kullanılmamıştır.

Daha önce çalışılmış olan deney düzeneklerinin hiçbirinde, örnek boyutları aynı ölçülere sahip olmadığı için elde edilen verilerin sağlıklı şekilde karşılaştırılması ve/veya yorumlanması gerçekçi olarak yapılamamaktadır. Araştırmalardan elde edilen verilerin sağlıklı şekilde karşılaştırılabilmesi/ yorumlanabilmesi için deneylerde kullanılan örnek boyutlarında ortak ölçülerin kullanılması zorunluluk haline gelmiştir.

Araştırmada kullanılacak düzeneğe, üç ortogonal yönde gerçek deprem verisi girilerek deney yapılabilmesi düzeneğin en ayrıcalıklı özelliğidir. Bu düzenek ile

sıvılaşma enerjisinin belirlenmesi için üzerinde çalışılacak olan bu yöntemin, diğer yöntemlerden daha güvenilir olacağı düşünülmektedir.

"Tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" ile kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisi üzerinde; deney için hazırlanan örnek boyutunun (çap ve boy ölçülerinin) ne tür bir etkisinin olduğunun belirlenmesi, gelecekte yapılacak ileri düzey araştırmalara önemli bir altyapı oluşturacaktır.

Kumların sıvılaşma enerjilerinin farklı yöntemlerle hesaplanmış olmasına rağmen, ilk defa "tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" verileri kullanılarak, hesaplanmış olacaktır.

### **1.3 Çalışmanın Yaygın Etkisi ve Katma Değeri**

Çalışmada kullanılan deney düzeneği özel olarak tasarlanmış olup, Ankara Üniversitesinde bulunmaktadır. Bilindiği kadarıyla dünyada “daha az özelliğe sahip önceki versiyonları” şeklinde çok az sayıda düşük özelliklerdeki benzeri bulunan bu cihaz, tekrarlı (devirsel) yüklemeye izin vermektedir (diğerlerine kıyasla daha fazla özelliklere haiz olarak üretilmiş olan ve çalışmada kullanılan cihaz modelinin bir üst versiyonunun 2019 yılında üretildiği, üretici firma tarafından duyurulmuştur). Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, bu cihazla daha sonra yapılacak deneyler için hazırlanacak numunelerin ebatlarına karar verilmesi için önemli bir veri sağlamış olacaktır.

Sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarında sadece rölatif sıklık ve efektif gerilme ile bulunabiliyor olması, fazla sayıda belirsizlik içeren ve gerilme yöntemine dayanan arazi teknikleri için önemli bir alternatif olacaktır. Yapılacak çalışmadan derlenecek bilgi ve sonuçların depremlerin neden olduğu maddi kayıpların azaltılmasında hem ekonomik katkılar sağlaması hem de toplum yararına bir durumun ortaya çıkması söz konusudur.

Araştırmadan elde edilen bulgular, ileri düzey araştırma konularına altlık teşkil edecek kapasitededir. Elde edilen verilere dayalı olarak daha ileri düzey çok sayıda araştırma konusu ortaya çıkmaktadır. Bu proje kapsamında sağlanan destekle

elde edilen ve daha sonra elde edilecek ek bulgular, ileriki zamanlarda yapılacak olası çalışmalara ve/veya araştırmalara önemli bir katkı sağlayacak değerdedir.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Modern zemin mekaniğinin 1910'larda Terzaghi ile başladığı kabul edilir. 1925'ten sonra zemin mekaniğinde deneysel yöntemlerin de uygulanmaya başladığı görülür ve bu alanda hızlı bir gelişme süreci başlar. Bu tarihten itibaren yer bilimciler, zeminlerin gerilme-deformasyon davranışı üzerine çalışmalar yapmaya başlamışlardır. 1960'lı yıllara gelindiğinde, tekrarlı yüklerin zeminlerin davranışları üzerindeki etkisini araştırmaya başlamışlardır.

Özellikle, 1970'li yılların sonlarına doğru kumların sıvılaşma enerjisi üzerinde araştırmalara başlanmıştır. Bu tarihten sonra, depremler sırasında oluşan kuvvetlere bağlı olarak; kohezyonsuz zeminlerde meydana gelen boşluk suyu basıncı-deformasyon ile gerilme-deformasyon ilişkileri temel olarak araştırma konularını oluşturmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, çevirim sayısı, olası şekil değiştirme, rölatif sıkılık ( $D_r$ ) değeri, boşluk suyu basıncı artışı/değişimi ( $r_u$ ) vb. konular önem taşımaya başlamıştır.

Depremlerin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin, zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak oldukça farklı deformasyonlara yol açtığı ve mukavemet kayıplarına neden olduğu öteden beri bilinmektedir. Bu mukavemet kaybı zemin türü ve özellikleri dikkate alındığında zeminlerin tekrarlı yüklemeler altında oldukça farklı dinamik davranış ve gerilme birim deformasyon özellikleri göstermelerine neden olmaktadır. Özellikle suya doygun gevşek kumlar gerek hızlı statik ve gerekse dinamik yükleme koşullarında aşırı boşluk suyu basıncının artması sebebiyle mukavemetlerini hızla kaybedebilmekte ve üzerinde bulunan mühendislik yapılarına ciddi hasarlar verebilmektedir. Bu hasarlar, binaların zemine gömülmesi, yan yatması veya istinat yapılarının ve şevlerin yanal olarak yer değiştirmesi şeklinde görülmektedir (Towhata 2008). Suya doygun kumlu zeminlerde ortaya çıkan bu davranış biçimi sıvılaşma olarak adlandırılmakta ve zemin dinamiğinin önemli araştırma konularından birini oluşturmaktadır.

1970'li yılların sonlarına doğru bilim adamlarının, kumların sıvılaşma enerjisi üzerine araştırmalara yoğunlaştığı görülmektedir. Sıvılaşma olgusunun suya doygun

kumlu zeminlerde gerçekeştiği göz önüne alındığında; birçok araştırmacı kumların sıvılaşma enerjisini kuru kumlarda çalışmış, ampirik ilişkilerle boşluk suyu basıncı değişimini hesaplamaya çalışmışlardır.

Araştırmacılar son birkaç on yılda sıvılaşma mekanizmasını anlamak ve zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için farklı yöntemler önermişlerdir. Bu yöntemleri üç ana grupta toplamak mümkündür (Green 2001). Bunlar; 1) Gerilmeye dayalı yöntemler, 2) Birim deformasyona dayalı yöntemler, 3) Enerjiye dayalı yöntemler olarak sıralanabilir. Gerilmeye dayalı yöntem (Seed ve Idriss 1971) en yaygın kullanılan sıvılaşmayı değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem genellikle arazi deney sonuçlarını ve laboratuvar deney sonuçlarını kullanmaktadır (Seed ve diğ., 1975). Ancak yöntem depremin büyüklüğü, yüzeydeki maksimum yatay yer ivmesi ve kaynak mesafesi gibi birtakım belirsizlikleri barındırmaktadır ve yeni çalışmalarla sürekli güncellenmektedir (Youd ve Idriss 2001). Bu yöntemdeki esas ölçüt, döngü sayısı ve kayma gerilmesi düzeyidir. Seed and Idriss (1971) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntemde gerçek deprem hareketini laboratuvardaki harmonik yükleme koşullarıyla ilişkilendirmek için eşdeğer gerilme ve döngü sayısı tanımlanmaktadır. Seed ve diğ. (2001), bunun için uygulanan tekrarlı yükün 15 döngüsü için oluşan kayma gerilmesinin % 65'ini önermişlerdir. Ishara and Yasuda (1975) ise uygulanan tekrarlı yükün 20 döngüsü için % 65 den ziyade % 57'sini önermişlerdir. Sıvılaşmayı Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Koni Penetrasyon Testi (CPT) gibi arazi deneylerine bağlı olarak da belirlemek için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir (etin ve diğ. 2004; Boulanger and Idriss 2012; Moss ve diğ. 2006). Gerilmeye dayalı yaklaşımın meydana gelen sıvılaşma vakalarındaki verilerle sürekli olarak genişletilmesine ve revize edilmesine rağmen, rastgele yükleme ile ilgili belirsizlikleri halen devam etmektedir (Green 2001; Baziar ve Cafarian 2007).

Birim deformasyona dayalı yöntem ise ilk defa Dobry ve diğ., (1982) tarafından önerilmiştir. İki etkileşimli ideal hale getirilmiş kum tanesinin mekaniğinden türetilip daha sonra doğal zeminler için genelleştirilmiştir (Baziar ve Cafarian 2007; Alavi ve Gandomi 2012; Green 2001). Bu yöntem esas itibariyle boşluk suyu basıncının, kum türüne, rölatif sıklığa, başlangıç efektif gerilme değerine ve örnek hazırlama yöntemine bakılmaksızın, yaklaşık % 0,01 gösterilen eşik kayma birim deformasyonu değerini aşması durumunda, gelişmeye başladığı

hipotezine dayanmaktadır. Birim deformasyon dayalı yaklaşım teorik olarak mümkün olsa da sıvılaşmanın meydana gelmesi için gerekli boşluk suyu basıncı artışının başladığı noktayı tahmin etmesi sebebiyle daha az kullanılmaktadır ve mutlaka sıvılaşmanın meydana geleceğini ifade etmemektedir. Bu yöntemin ana eksikliği, döngüsel kayma gerilmesine kıyasla kayma birim deformasyonunun tahmin edilmesindeki güçlüktür (Seed, 1980; Zhang ve diğ., 2015).

Enerjiye dayalı yaklaşım ise zeminin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için ilk defa 1970'lerde gerilmeye dayalı yaklaşıma alternatif olarak önerilmiştir (Nemat-Nasser ve Shokooh, 1979) ve daha sonra sürekli olarak geliştirilmiştir (Berrill ve Davis 1985; Figueroa ve diğ. 1994; Kokusho 2013; Green 2001). Bu yaklaşımda sıvılaşma olsun veya olmasın yükleme sürecinde birim hacimde biriken enerji aşırı boşluk suyu basıncının gelişmesiyle doğrudan ilişkilidir. Parçacıklarının kalıcı olarak yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilen birim hacimde biriken enerji ( $J/m^3$ ), bir döngü sırasında geliştirilen histerez çevrimi içinde kalan alan olarak verilmektedir. Sıvılaşmayı değerlendirmek için birim enerjinin kullanılması gayet mantıklıdır çünkü sıvılaşma enerjisi uygulanan kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonuna bağlıdır (Aminia ve Noorzad, 2018). Sıvılaşma enerjisini değerlendirmek için geçmişte yapılmış bazı çalışmalar mevcuttur.

Kovacs ve Leo (1981), kuru bir kum türü üzerinde drenajlı devirsel basit kesme deneyleri yapmışlardır. Örneklerini, **12 inç çapında ve Çap/Boy oranı (D/H) 1, 2 ve 4 olacak şekilde değişen yüksekliklerde** hazırlayarak; çap/boy oranının (yani örnek boyutunun) örneklerin kesme modülü ve çeşitli kesme gerilmesi değerlerinde, kritik histeretik sönümlenme değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kesme modülünün, döngü sayısı ve artan numune boyutu ile arttığını tespit etmişlerdir. D/H oranının, düşük kesme gerilmelerinde (<1%) kesme modülünü etkilediği ve daha yüksek kesme gerilmelerinde ise çok az etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Histeretik sönüm, döngü sayısı ve D/H oranı arttıkça test edilen tüm kayma gerilmesi değerleri (yüzde 0.01 ila 1) için azaldığını ifade etmektedirler.

Suya doymun kohezyonsuz zeminlerde tekrarlı yükler etkisinde, boşluk suyu basıncı artar, deprem süresi kısa olduğundan yeraltı suyunun drenajı için yeterli olmaz - efektif gerilme azalır (ve eğer sıfır olursa), zeminin taşıma gücü kaybolur, dolayısıyla sıvılaşma olgusu açığa çıkar. Bunun sonucu olarak zeminlerde

beklenenin dışında bir oturma (diğer bir deyişle rölâtif sıklıkta ve yoğunlukta artış) meydana gelir (Seed ve Lee, 1966; Hyodo ve diğ., 1994). Hyodo ve diğ. (1994) ortalama tane boyu ( $D_{50}$ ) = 0,18 olan ince taneli Toyoura kumu ile yaptıkları çalışmada, **çapı 50 mm ve yüksekliği 110 mm** boyutlarında olan numuneler hazırlayarak deney yapmışlardır.

Iwasaki ve diğ. (1978), devirsel burulmalı kesme yükleri altında kumların kesme modülünü araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada; i) **resonant kolon testinde, iç ve dış çapı sırasıyla 60 mm ve 100 mm, yüksekliği 250 mm** olan içi boş silindirik numune, ii) **Burulmalı kesme deney düzeneğinde, iç çapı 60 mm, dış çapı 100 mm ve yüksekliği 100 mm** olan zemin örneklerini test etmişlerdir. Yaptıkları deney sonuçlarına dayanarak, kayma gerilmesi genliğindeki artış ile kesme modülündeki azalmayı tahmin etmek için basit bir prosedür önermişlerdir.

Nemat-Nasser ve Shoko (1979), enerjiye dayalı modeli kullanarak kumlu zeminlerin sıvılaşması ve sıkışmasını açıklayan matematiksel bir modeli önermişlerdir.

Simcock ve diğ. (1983), aşırı boşluk suyu basıncı ve zemine uygulanan enerji arasında ilişkiyi açıklamak için uniform kumlarda bir dizi dinamik üç eksenli deney gerçekleştirmişler ve onlar aşırı boşluk suyu basıncı ve biriken enerji arasında fonksiyonel bir ilişki olduğunu iddia etmişler ve bu ilişkinin çevrimsel deviatör gerilmeye kuvvetle bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Towhata ve Ishihara (1985), içi boş silindirik burulmalı kesme deney düzeneğini kullanarak; **içtekinin çapı 60 mm ve dıştağinin çapı 100 mm olan iki silindirik tüp** arasına yerleştirilmiş ve **yüksekliği 104 mm** olan numuneler hazırlayarak, Toyoura kumunda drenajsız devirsel kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kumların ortalama tane boyu ( $D_{50}$ )= 0,17 olup ince tanelidir. Çalışmalarında, farklı kayma gerilmesi genliklerinde zeminin birim hacminde biriken enerji ile aşırı boşluk suyu basıncı arasında çok yakın bir ilişki olduğunu gözlemişlerdir.

Yoshimi ve diğ. (1989a ve 1989b) tarafından yapılan çalışmalarda; doğal zeminlerin çeşitli faktörlere bağlı olarak tam doaygunlukta olmadığını veya bazen

kısmi doygunluk özelliği gösterdiği için kısmi doygun kumların burulmalı basit kesme deney yöntemiyle, drenajsız olarak sıvılaşma davranışlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri verilere göre, % 70 doygunluktaki (Sr) kum numunelerin, % 100 doygunluğa (Sr) sahip kum numunelerden 3 kat daha fazla sıvılaşmaya karşı direnç gösterdiklerini belirlemişler. Bu durumu, numune içinde bulunan hava kabarcıklarının çap ve miktarının tekrarlı yükler altında numunenin davranışını etkilemesine bağlamaktadırlar. Numune içerisindeki hava kabarcığı miktarının azalmasının, numuneye uygulanan gerilme artışını ve boşluk suyu basıncı değerini etkilediğini ileri sürmektedirler.

Yoshimi ve diğ. (1989b), Yoshimine ve Ishihara (1998), Okamura ve Noguchi (2009) gibi bazı araştırmacılar kısmen doygun zeminlerin tekrarlı yükleme durumunda sıvılaştığını ileri sürmüşlerdir. Ancak, Okamura ve Soga (2006), Okamura ve Noguchi (2009), Arab ve diğ. (2011)'nin çalışmalarında, kısmen suya doygun kum zeminlerde, sıvılaşmaya karşı direncin arttığı ifade edilmektedir.

Figuroa ve diğ. (1994), içi boş silindirik burulmalı kesme deney düzeneğinde (hollow torsional shear tests), Reid Bedford kumu üzerinde bir dizi deney yapmışlardır. Bu çalışmada **dış çapı= 71 mm, iç çapı= 51 mm, yüksekliği= 129 mm** ve hacmi=247,2 cm<sup>3</sup> olan iç-içe geçmiş iki tüpten oluşan ince-uzun burulmalı silindir kullanmışlardır. Sıvılaşmaya ulaşmak için zemine aktarılan birim hacim başına enerji dağılımının, etkin çevre basıncı, rölatif sıklık ve kesme birim deformasyonu genliği gibi parametrelerle bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir.

Hyodo ve diğ. (1994), gevşek, suya doygun kumun devirsel kesme dayanımı ve deformasyonunu araştırmışlardır. Bu amaçla, monotonic ve devirsel üç eksenli deney düzeneğini kullanmışlardır. Bu düzenekte kullanılan numune, **50 mm çapında ve 110 mm yüksekliğindedir**. Çalışmada, monotonic ve devirsel üç eksenli deney sonuçları karşılaştırılmış; akış deformasyonunun oluşmasının, başlangıç konsolidasyon ve faz dönüştürme noktaları arasındaki karşılıklı şartlara bağlı olduğunun gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Liang (1995), bir dizi birim deformasyon kontrollü içi boş silindirik burulmalı kesme deneyi (hollow torsional shear tests) gerçekleştirmiştir. Sıvılaşma başlangıcı için birim hacim başına düşen/biriken enerji ve aşırı boşluk suyu basıncı

arasındaki ilişki üzerinde, birim deformasyon (kesme birim deformasyonu) genliğinin bir etkisinin olmadığını tespit etmiştir.

Hadush ve diğ. (2000)'in yaptığı, sıvılaşmaya bağlı yanal yayılma analizinde viskoz akışkan özelliklerinin önemi hakkındaki araştırmada sıvılaşan bir zeminin, viskoz bir sıvı karakterine dönüştüğü belirtilmektedir. Sıvılaşmayı yükleme koşulları, doygunluk derecesi ve zeminin jeoteknik özellikleri etkiler. Sıvılaşmanın oluşması için zeminin suya doygun olması gerektiği kabul edilir. Yağış, yeraltı su seviyesindeki değişim, kapilerite vb. etkiyle zeminde kısmen suya doygun bölgelere rastlanabilmektedir.

Altun (2004), Altun ve Ansal (2005) çalışmalarında Ishihara and Towhata (1983) tarafından tasarlanan "İçi Boş Silindirik Burulmalı Kesme" deney düzeneğinin daha yeni bir modeli (tasarımı) üzerinde, kum numunelerinin gerilme-şekil değiştirme özelliklerini araştırdığını belirtmektedir. Çalışmada deneylerin farklı rölatif sıklıklarda, drenajsız, 0,1 Hz frekanslı sinüzoidal yükleme şartlarında yapıldığı ve sıvılaşmanın gelişmesi için rölatif sıklık, ince malzeme içeriği, tekrarlı yüklerin çevrim sayısı ve çevre basıncının etkili olduğu belirtilmektedir.

Ishihara ve diğ. (2001, 2004), sıvılaşma direncini etkileyen faktörler, sıvılaşma ile ilgili geliştirilen deney yöntemlerinden bahsettikleri çalışmalarında, kum numunelerinin doygunluk derecesinin sıvılaşma olgusu üzerindeki etkisine vurgu yapmaktadır.

Elibol (2005) çalışmasında, kısmi doygun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışlarını incelemiştir. İki ayrı rölatif sıklıktaki kuma, tekrarlanan kuvvetler altında dinamik kesme gerilmeleri uygulayarak, dinamik üç eksenli deneyi yapmıştır. Kumların dinamik davranışı üzerinde rölatif sıklığın çok büyük etkisinin olduğunu ve kısmen doygun kum zeminlerin sıvılaşmaya karşı daha fazla direnç gösterdiğini belirtmektedir.

Chen ve diğ. (2005), sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için geri-yayılmalı yapay sinir ağları (back-propagation neural networks) ile sismik dalga enerjisine dayalı modeli önermişlerdir. Model sıvılaşma enerjisinin tahmininde tutarlı sonuçlar vermektedir.

Gratchev ve diğ. (2006), kil içeren zeminlerin devirsel yükler altındaki sıvılaşma potansiyelini halka-kesme düzeneği (ring-shear apparatus) ile incelemiştir. Bu düzenekte numune, **iç ve dış çapı sırasıyla 210 mm ve 290 mm** olan içiçe geçmiş iki silindir arasına yerleştirilmiştir. Çalışmalarında, yapay kil-kum karışımı hazırlamışlar ve bentonit miktarı ( $\leq$  %7) olan zeminlerde hızlı bir sıvılaşma, bentonit içeriği ( $\geq$  %11) olan zeminlerde ise sıvılaşmaya karşı yüksek bir zemin direnciyle karşılaşmışlardır.

Baziar ve Jafarian (2007), sıvılaşma başlangıcı için birim hacimde biriken toplam enerjinin tahmini için yapay sinir ağları prosedürünü laboratuvar deney sonuçlarına uygulamışlardır. Hem saha gözlemleri hem de laboratuvar deney sonuçlarından sağlanan birim hacimde biriken enerji arasında tutarlılık olduğunu göstermişlerdir.

Ural ve diğ. (2007), dinamik üç eksenli deneyde frekansın etkisini araştırdıkları çalışmalarında; Adapazarı'na ait ince taneli yumuşak akarsu çökellerinden alınan numuneyi konsolide edip, **1; 0,5; 0,05 Hz gibi 3 farklı frekansta** deney yapmışlardır. Sıvılaşma için frekans artışının çevrim sayısını arttırdığını ve boşluk suyu basıncının düşük frekanslarda arttığını ifade etmişlerdir.

Unutmaz (2008) "zemin-yapı-deprem etkileşimi tarafından tetiklenen zemin sıvılaşmasının belirlenmesi" başlıklı doktora tezinde, yapılar-zeminler-deprem kayıtları arasındaki ilişkiyi araştırmak için modelleme yaparak 3-B'lu toplam gerilmeyi hesaplamıştır. Araştırma sonucunda, deprem anında yapıların sıvılaşmayı tetikleyebildiğini; deprem anında sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için yapı-zemin etkileşiminde kritik eşik değerini tahmin edecek önerilerde bulunmuştur.

Papadopoulou ve diğ. (2010), 12 Kasım 1999 depreminden sonra, Düzce zeminlerinin devirsel ve dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma, monotonic ve devirsel üç eksenli ve aynı zamanda rezonant kolon deneyleriyle gerçekleştirilmiştir. **Monotonik ve devirsel üç eksenli deneyin her ikisi de çapı (D) 50 mm ve yüksekliği (H) 100 mm** olan numuneler üzerinde; **Rezonant kolon deneyi ise çapı (D) 71 mm ve yüksekliği (H) 142 mm** olan numuneler üzerinde yapılmıştır. Üç eksenli deney, siltli kumların sıvılaşma direncinin ve kritik durum davranışlarının belirlenmesine izin vermektedir. Rezonant kolon deneyi ise

kohezyonlu zeminlerin kesme modülünün ve sönümlenme oranının belirlenmesini sağlamaktadır.

Zehtab (2010), devirsel basit kesme deney düzeneğini kullanmıştır. Adapazarı zeminlerinden alınmış, **çapı 63,5 mm ve yüksekliği 20 mm** olan deney örnekleri kullanarak; zeminlerin deprem sonrası dinamik davranışlarını araştırmıştır. 1999 Adapazarı depremindeki yer hareketine maruz kalan zeminlerin sekant kesme modülü ve sönümlenme oranlarının literatürde verilen ampirik yaklaşımlara göre daha düşük değerler verdiğini belirlemiştir.

Orhan ve Ateş (2012)'in çalışmasında,  $M_w=7,1$  ve  $a=0,28g$  olan deprem senaryosuna göre, laboratuvarında hazırladıkları kum örneğini arazideki-gerçek özelliklerine benzeştirmeye çalışmışlardır. Rölatif sıklığı %66, **çapı 38 mm ve yüksekliği 76 mm** olan kum numune üzerinde, 0,5 Hz frekansta, dinamik üç eksenli deneyi yapmışlardır. Ancak, numune sıvılaşmamıştır. Arazideki özelliğinden farklı olarak, rölatif sıklığını düşürdüktan sonra numunenin sıvılaştığı gözlenmiştir.

Jafarian ve diğ. (2012) kum örnekleri üzerinde, farklı rölatif sıklık ve farklı gerilme koşullarında drenajsız olarak "devirsel içi boş silindirik burulmalı kesme deneyi" yapmışlardır. Bu deneyde, içi boş burulmalı kesme deney düzeneğinde, **iç ve dış çapı sırasıyla 30 mm, 50 mm ve yüksekliği 180 mm** olan numuneler kullanmışlardır. Gerilme enerjisi kavramıyla, kumun sıvılaşma direncinin ve boşluk suyu basıncının hesaplanmasına çalışmışlardır. Deney sonuçlarına göre elde ettikleri veriler yardımıyla; sıvılaşma başlangıcı için birim hacimde biriken enerjinin, başlangıç efektif gerilme ve rölatif sıklığa bağlı olduğunu gösteren yeni bir nonlineer (doğrusal olmayan) denklem türetilmiştir. Bu denklem yardımıyla bir alanın sıvılaşmış-sıvılaşmadığının belirlenebileceği bir sınır eğrisinin çizilebileceğini belirtmişlerdir.

Kahraman (2013), 1-G Model deney düzeneği (santrifüj testi) ve sarsma tablası deney düzeneğini kullanarak sıvılaşmayı incelemiştir. "1-G Shake Sarsma Tablasında" dinamik kuvvet uyguladığı, **metrelik boyutlara (1,6 m x 0,8 m) sahip "sarsma kutusunda"** deneyler yapmıştır. Laboratuvarında, silt içeriği değişen kum numunelerle çalışmış ve şu sonuçları elde etmiştir:



Her bir sarsma ile rölatif sıklık artmıştır.

- ii) Rölatif sıklığın artmasına rağmen sıvılaşma direnci düşmektedir.
- iii) Silt içeriği artışı sıvılaşmaya direnci arttırmıştır.
- iv) Yuvarlak taneli ince kumlar sıvılaşmaya daha duyarlıdır.
- v) Silt miktarı arttıkça sıvılaşmanın tetiklenme süresi uzamaktadır.

Akın (2014) çalışmasında, plastisite ve ince dane oranının kumlu zeminlerin dinamik davranışına etkisini inlemiştir. Çalışma, tekrarlı basit kesme deney düzeneğinde; silt, düşük ve yüksek plastisiteli iki farklı kil temiz kumun içerisine % 5-10 oranında katılmış, numune suya doyurulmuş, 0,1 Hz frekansında ve sabit hacim şartlarında gerçekleştirilmiştir. Adapazarı zeminlerinden alınmış, **çapı 63,5 mm ve yüksekliği 20 mm** olan deney örnekleri kullanmıştır. Araştırmacı, ince dane oranının kumun daha kolay sıvılaşmasını sağladığını; ancak, plastisitenin sıvılaşma üzerine etkisi konusunda net bir sonuç elde edemediğini ifade etmektedir.

Bilge ve Çetin (2014), sıvılaşma tetikleme analizlerinde düşey efektif gerilme etkisinin performans esaslı olarak belirlenmesi çalışmalarında, farklı kum türleri üzerinde tekrarlı basit kesme deneyi yapmışlardır. Çalışma sonucunda, yeni bir düşey efektif gerilme düzeltme faktörü ( $K\sigma$ ) önermişlerdir.

Nateghi (2015), "özel sıvılaşma düzeneği içinde devirsel basit kesme deneyleri altında kum davranışının sayısal modellenmesi" çalışmasında, depremler sırasında zemin sıvılaşmasını önlemek için önerilen Kısmi Doyguna İndirgeme (IPS) yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin önce ve sonra inşa edilmiş yapılar etkisindeki dinamik davranışını incelemiştir. Araştırmacı bu çalışmasında, yapı-zemin etkileşimiyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncı, oturma miktarı ve sıvılaşmanın hasar etkisini en aza indirmek için zemine uygulanması gereken kısmi doygunluk derecesinin tahmin edilmesine yönelik modelleme üzerinde durmuştur. Sarsma tablası ve çevrimsel basit kesme deney düzeneklerinde farklı rölatif sıklıklarda elde edilen aşırı boşluk suyu basıncı, sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı vb. değerleri yorumlamıştır. Çalışmada önerilen bir yöntemin, zeminde sıvılaşmanın oluştuğunu tahmin edebileceği ifade edilmektedir.

Monkul ve diğ. (2016), üç farklı temiz kum, plastik olmayan siltin kumlarla karıştırılmış hali ve üç ayrı ince tane içeriğine sahip numunelerle drenajsız üç eksenli basınç deneyi yapmıştır. Kumun gradasyonunun sıvılaşma üzerine oldukça etkisi olduğunu, ortalama tane boyutu küçüldükçe kumların daha kolay sıvılaştığını gözlemişlerdir. Sıvılaşmış ve geçici sıvılaşmış zeminler için (devirsel gerilme ile üniformluluk katsayısına bağlı) iki denklem önermişlerdir.

SzilvÁgyi ve diğ. (2016) çalışmalarında silt ve mika içeren ince kumda deneyler yapmışlar, deneylerini üç farklı yöntemle tekrarlamışlar ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada kayma modülünü belirlemek için rezonans kolon deneyi, burulmalı basit kesme deneyi ve bender elemanı deneyi yöntemlerini kullanmışlar. Rezonans kolon ve burulmalı makaslama deneyleri, içi boş silindirik numunede gerçekleştirilmiş; bender elemanı deneyi ise diğer deneylerle aynı boşluk oranı ve aynı çevre basıncı şartlarında tekrarlı gerilmeler uygulanarak üç eksenli numune üzerinde yapılmıştır. Çalışmada çevre basıncı, kesme gerilmesinin genliği ve anizotropik özellikleri araştırmışlardır. Araştırma sonucunda rezonans kolon deneyi ile burulmalı basit kesme deneyinden aynı kayma modülü değerini elde etmişlerdir. Ancak, bender elemanı deneyinde kayma modülü değerinin farklı olduğunu tespit etmişlerdir.

Polito ve diğ. (2013), izotropik olarak konsolide edilmiş kum numuneleri üzerinde, aşırı boşluk suyu basıncı ve zeminde biriken enerji arasında farklı yükleme şekillerinin etkisini değerlendirmek için bir dizi gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deney gerçekleştirmişlerdir. Sinüsoidal yüklemeye ek olarak üçgen, kare düzenli-simetrik ve düzensiz-asimetrik farklı yükleme şekilleri için sıvılaşmaya neden olan yükleme döngüsü sayısında büyük farklılık olmasına rağmen, sıvılaşma başlangıcında normalize edilmiş birim hacim başına biriken enerjinin yükleme şekline bağımsız olduğunu; Ancak, yükleme süresine ise biraz bağımlı olduğunu belirtmişlerdir.

Sıvılaşma analizlerinde enerji dayalı yaklaşım, gerilmeye dayalı ve birim deformasyona dayalı yaklaşımlarla kıyaslandığında başlıca avantajları şunlardır;

1) Enerjinin, yalnızca yer ivmesinin pik değerini kullanan gerilmeye dayalı yaklaşıma karşın yer hareketinin tüm spektrumunu göz önüne alan skaler bir nicelik olması (Baziar and Jafarian 2007; Baziar ve diğ. 2011);

2) Seçilen ortalama gerilme veya birim deformasyon seviyesine eşdeğer çevrim sayısını bulmak için kesme gerilmesinin zamansal ayrıştırılmasının gerekli olmaması;

3) Kullanımının hem birim deformasyon hem de gerilmeyi ve aynı zamanda malzeme özelliklerini de kapsaması olarak gösterilebilir (Law ve diğ., 1990; Liang, 1995). Arazide deprem esnasında, zemin belirli frekans aralıklarında yer hareketini büyütür. Diğer frekans aralıklarında da sönümler. Bu, hareketin bir bölümünün büyütülmesi veya sönümlenmesine bakılmaksızın, zeminin içinde dolaşan ve dağılan toplam enerjinin değişmediğini gösterir (Law ve diğ., 1990).

Literatürde yapılan sıvılaşıma ile ilgili çalışmalara bakıldığında dinamik üç eksenli test ve içi boş silindirik burulmalı kesme deneyi (hollow torsional shear test), devirsel basit kesme deneyine (cyclic simple shear test) göre daha fazla kullanılmaktadır. Depreme dayanıklı yapı tasarımlarında/projelerinde veya zemin-yapı etkileşimi hesaplamalarında, genel olarak deprem yatay yer ivmeleri kullanılmaktadır. Düşey yer ivmesinin kullanılması yaygın değildir, pek tercih edilmemektedir. Bina deprem yönetmeliklerindeki hesaplamalarda kullanılması önerilmemektedir. Dinamik üç eksenli deneyde, devirsel (tekrarlı) hareket düşey yönde uygulanmaktadır. Bu nedenle, dinamik üç eksenli deney, gerçek arazi yükleme koşullarını tam olarak doğru modelleyememektedir. Laboratuvar şartlarında oluşturulmuş model üzerine etkiyen kuvvetleri/gerilmeleri, arazi koşullarında oluşan kuvvetlere/gerilmelere/devirsel harekete gerçekçi olarak benzeştirememektedir. İçi boş silindirik burulmalı kesme deneyi ise arazi yükleme koşullarını iyi modellemesine rağmen numune hacmine göre yüzey alanının büyük olması, numune üzerinde uniform olmayan radyal birim deformasyon uygulaması ve uzun numune yüksekliği sebebiyle boşlukların tekrar dağıtılmasına ve doğrusal olmayan (veya düz olmayan) kesit alanına neden olabilmektedir (Kammerer ve Pestana 2002). Ancak, devirsel basit kesme deneyi (cyclic simple shear test) arazi yükleme koşullarını iyi modellemesinin yanı sıra anizotropik olarak konsolide edilen deney numunesi üzerine normal gerilme ve yatay yönde kayma gerilmesi uygulayabilmektedir. Yatayda birbirine dik iki yönde kayma gerilmesi uygulaması, bu cihazı farklı kılan eşsiz bir özelliktir. Bu özelliği sayesinde, numuneleri:

i) Tek yönde (1D) kuvvet uygulayarak doğrusal (ileri-geri),

ii) iki yönde (2D) kuvvet uygulayarak; herhangi bir doğrultuda düz, elipsoidal veya dairesel hareket ettirebilme imkanı sağlamaktadır. Bu özellik, devirsel basit kesme deneyine (Cyclic Simple Shear Test: CSST) özgüdür ve bu özelliği ile içi boş silindirik burulmalı kesme deneyinden (Hollow Torsional Shear Test: HTST) ayrılmaktadır. Ayrıca, numune yüksekliğinin daha küçük olması sayesinde, numunenin aktif kısmı içinde nispeten düzgün gerilme dağılımına sahiptir (Kammerer ve Pestana 2002).

Literatür araştırmaları bu çalışmada kullanılacak olan "tekrarlı (devirsel) basit kesme düzeneğinin" başka hiç bir çalışmada kullanılmadığını ortaya koymuştur.

Literatür taramasında da görüleceği üzere; daha önce çalışılmış olan deney düzeneklerinde, örnek boyutları standart ebatlarda değildir (birbiriyle aynı ölçülere-ebatlara sahip değildir). Bu durum, sonuçların karşılaştırılmasında bir belirsizlik olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvılaşma enerjisinin laboratuvarında tespit edilmesinde boyut etkisinin olup-olmadığını araştırmak amacıyla, sınırlı miktarda kum üzerinde, ön çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada, örnek boyutunun kumların sıvılaşma enerjisini oldukça etkilediği belirlenmiştir. Ancak, bu çalışmalarda numune hazırlamak için gerekli ekipman ve/veya donanım tam olarak temin edilemediğinden, farklı boyutlarda örnekler üzerinde deneylerin yapılacağı ek (takviye edici) araştırmalara ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla, bu çalışmanın yapılması fikri ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, üç farklı çapa sahip numune hazırlama aparatlarının üç farklı boydaki modelleri ile numune hazırlanarak deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, devirsel basit kesme deneyinden elde edilen verileri kullanarak, farklı rölatif sıklık ( $D_r$ ), efektif gerilme ve birim deformasyon  $\square$  parametrelerine bağlı olarak kum zeminlerin sıvılaşma enerjisini ve özellikle farklı Çap/Boy ( $D/H$ ) oranlarının numunelerin sıvılaşma enerjisi üzerine bir etkisinin olup olmadığını araştırmaktır. Yine bu çalışma sonuçlarına bağlı olarak, literatürde verilen sıvılaşma enerjisine en yakın değeri veren örnek boyutunun standart numune ebatı olarak kullanılması için daha detay araştırmalara devam edecektir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılacak olan başlıca materyal:

- 1) Devirsel basit kesme deney düzeneği,
- 2) Denizel kökenli, ince-orta taneli kum ve
- 3) Farklı çap ve farklı boyda numune hazırlama aparatlarıdır.

#### 1) Devirsel Basit Kesme Deney Düzeneği:

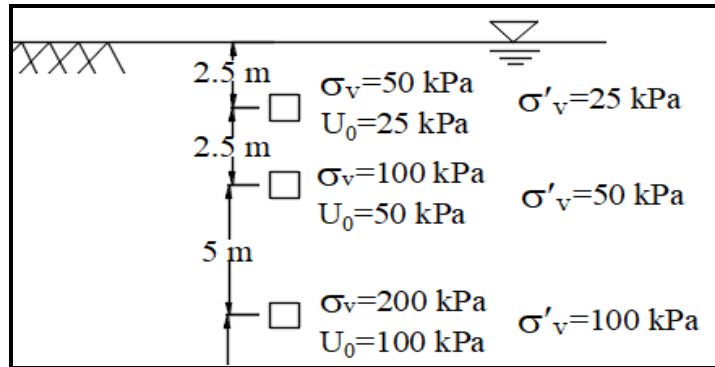
Çalışmada kullanılan başlıca ekipman "tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği"dir (Şekil 1). Cihaz, yaygın olarak kullanılan, sadece düşey yönde tekrarlı yük uygulayan cihazlardan farklı olarak, iki yatay yönde dinamik kesme kuvveti, üçüncü yönde (düşey yönde) ise dinamik yük uygulayabilmektedir. Yatay ve düşey yöndeki yükleme kapasitesi 10 kN olan cihazın dinamik koşullardaki yükleme hızı her yönde 10 Hz'e kadar çıkabilmektedir. Cihaz hem harmonik yüklemeye hem de rasgele (random) yüklemeye izin vermektedir. Cihaz dinamik pompaların pistonlarıyla birlikte hareket eden ve 50 mm'ye kadar ölçüm alabilen deformasyon ölçerler ile teçhiz edilmiştir. Boşluk suyu basıncı uygulamasına ve ölçümüne de olanak veren sistemde kapasite 1 MPa'dır.

Çalışmada kullanılan malzeme üniform temiz deniz kumudur. Bu kumlardan ince-orta taneli olmak üzere bir tür kum kullanılmıştır. Deney numuneleri % 30, % 40, % 50, % 60 ve % 70 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Numune hazırlamada, kumun havadan serbest düşmesi ile sağlanan "havada kuru yağmurlama tekniği" kullanılmıştır. Belirlenen rölatif sıklıkta hazırlanan numune, dinamik kesme düzeneğine yerleştirildikten sonra 100 kPa gibi bir düşey gerilme uygulanmıştır. Daha sonra su ile doyurulmuş ve  $r_u = 1/2$  şartını sağlayacak şekilde, gerilme değerinin yarısı kadar, yani 50 kPa, boşluk suyu basıncı uygulanmıştır (Şekil 2). Bu durumda, efektif gerilme toplam gerilmeye eşit kabul edilerek; membran içinde kalan ve teflon kaplı bileziklerle kuşatılan zemine 0,1 Hz harmonik yükleme yapılmıştır. Bu

yükleme sırasında tipik olarak Şekil 3'de verilene benzer kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüleri oluşmaktadır.



Şekil 1: Tekrarlı basit kesme deney düzeneği



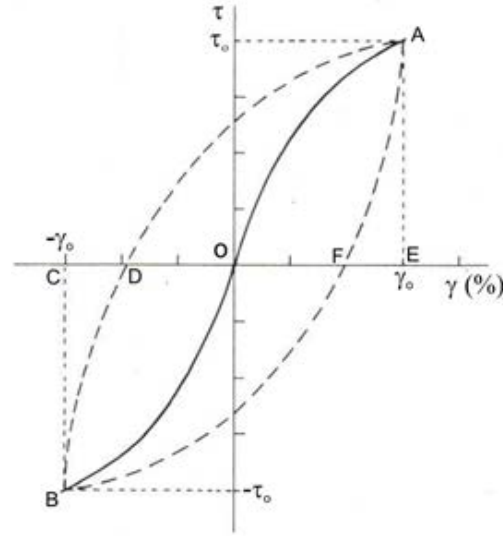
Şekil 2: Kumların sıvılaşması deneyleri için öngörüsü yapılan arazi şartlarını gösteren enine kesit

Numune tekrarlı yükleme altında makaslandıkça, boşluk suyu basıncının başlangıçtaki değeri giderek artmakta; dinamik yükleme etkisi ile gelişen boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeye ulaşana kadar artmaya devam etmekte ve sonuçta belli sayıda kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüsü oluşmaktadır/gelişmektedir. Her bir döngü sırasında numuneye uygulanan enerjinin bir bölümü döngü (histerez) içinde soğurulur. Soğurulan bu enerji zeminde boşluk suyu basıncı artışına sebep olan "iş"e ( $\delta W$ ) karşılık gelmektedir. Her bir döngü sırasında harcanan enerji, aşağıdaki denklem (1) yoluyla toplandığında numuneyi sıvılaştırmak için gerekli olan iş, metre küp başına Joule ( $J/m^3$ ) cinsinden hesaplanmış olmaktadır.

Bu şekilde 0,1 Hz frekansta test edilen bir tek zemin numunesi için; **3 farklı çapa (D)** sahip numune hazırlama hücresi yardımıyla, **3 farklı D/H oranında** numuneler hazırlanmıştır (H: numune boyunu temsil etmektedir). **5 farklı rölatif sıklıkta (Dr)**, 0.5 kesme birim deformasyon oranında, 100 kPa düşey gerilme ve 50 kPa boşluk suyu basınç şartlarında **45 deney yapılmıştır**.

Membran içinde ve teflon kaplı bileziklerle kuşatılan zemine 0,1 Hz harmonik yükleme yapılmıştır. Bu yükleme sırasında tipik olarak Şekil 3'de verilene benzer kesme gerilmesi - kesme birim deformasyonu döngüleri oluşmaktadır. Numune tekrarlı yükleme altında makaslandıkça başlangıçta sıfır olan boşluk suyu basıncı giderek artmaktadır. Dinamik yükleme etkisi ile gelişen boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeye ulaşana kadar artmaya devam etmektedir. Sonuçta belli sayıda kesme gerilmesi - kesme birim deformasyonu döngüsü oluşmaktadır. Her bir döngü sırasında numuneye uygulanan enerjinin bir bölümü döngü (histerez) içinde soğurulmaktadır. Soğurulan bu enerji zeminde boşluk suyu basıncı artışına sebep olan "iş"e ( $\delta W$ ) karşılık gelmektedir. Her bir döngü sırasında kullanılan/harcanan enerji, aşağıdaki denklem (1) yoluyla toplandığında numuneyi sıvılaştırmak için gerekli olan iş, metre küp başına Joule ( $J/m^3$ ) cinsinden hesaplanmış olmaktadır.

$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i+1}) (\gamma_i + \gamma_{i+1}) \quad (\text{Denklem - 1})$$



**Şekil 3:** Numunenin yatay yönde makaslanması sırasında oluşması beklenen gerilme döngüsüne tipik bir örnek (Hardin ve Drenevich, 1972'den değiştirilerek alınmıştır).

Bu çalışmada, ince taneli kumların sıvılaştırma enerjisi üzerinde; rölatif sıkılık, deformasyon oranı ve gerilme değerlerinin etkisinin olup-olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla "tekrarlı basit kesme deney düzeneği" kullanılmıştır. Deney düzeneğinin numune hazırlama aparatına örnek aşağıdadır (Şekil. 4).



**Şekil 4:** Kum numunesi hazırlama aparatı örneği

Deneye başlamadan önce tüm numuneler suya doygun hale getirilmiştir. Deney numunelerinde hava kabarcığı kalmaması için suya doyurma işleminden önce CO<sub>2</sub> gazı ile doyurma işlemi yapılmıştır. Doyurma işlemi sırasında, suda bulunan hava kabarcıklarının olumsuz etki yapmaması amacıyla, deneyde kullanılacak suyun havası alınmıştır. Bu işlem, suyun havasını alma amacıyla geliştirilen bir düzenek ile



gerçekleştirilmiştir. Havası alınmış su yardımıyla numune doymun hale getirildikten sonra deneye başlanmıştır.

Deney, 100 kPa efektif düşey gerilme, 50 kPa boşluk suyu basıncı etkisinde ve 0.1 Hz harmonik yükleme şartlarında uygulanmıştır. Efektif gerilmenin sıfıra ulaştığı anda deneye son verilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen veriler yorumlanarak; rölatif sıkılık, düşey gerilme ve deformasyon oranı parametrelerinden hangisinin, kumların sıvılaşıma enerjisi üzerinde nasıl veya ne tür bir etkisi olduğu araştırılmıştır.

## 2) Denizel kökenli ince-orta taneli kum:

Çalışmada, tek tür ince-orta tane boyuna sahip kum kullanılmıştır (Şekil5). Bu kum, Antalya ili, Alanya ilçesi sınırları içerisinde bulunan sahillerdeki plajlardan alınmıştır. Bu kum sarımsı renkli, fosil kavkı parçalarının öğütülmüş-ufalanmış kırıntılarını da içerebilmektedir.

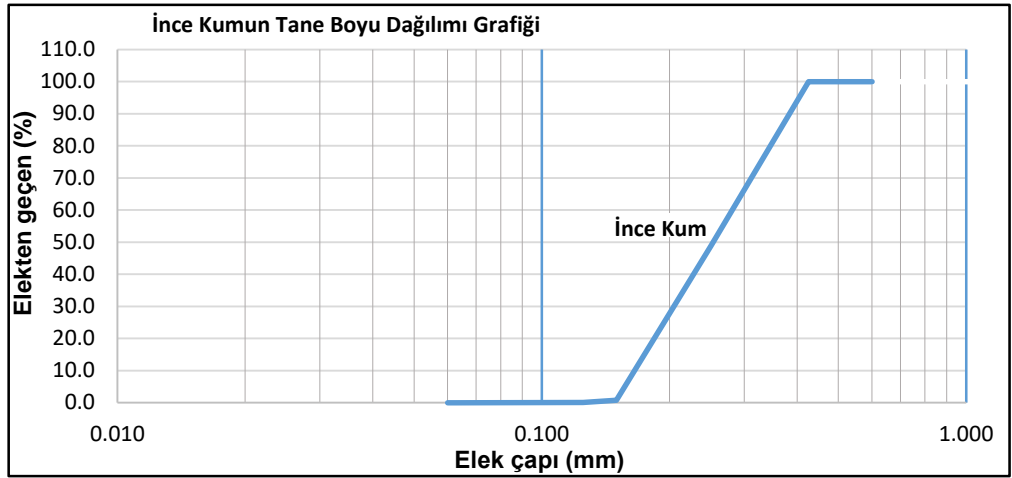


**Şekil 5:** Çalışmada kullanılan üniform, ince-orta tane boyundaki temiz deniz kumunun genel görünüşü

Kumların tane boyu dağılımını belirlemek için elek analizi yapılmıştır (Tablo 1, Şekil 6).

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan üniform, ince-orta taneli deniz kumunun tane boyu dağılımı ve özellikleri

Elek No	Elek Açıklığı	Elekten Geçen
	(mm)	(%)
4	4.750	100.0
10	2.000	100.0
30	<b>0.600</b>	100.0
40	<b>0.425</b>	100.0
60	<b>0.250</b>	<b>48.7</b>
100	<b>0.150</b>	<b>0.8</b>
120	0.125	0.1
230	0.063	0.0
Tane boyu dağılımına bağlı özellikler:		
$D_{10} : 0,16$	$D_{50} : 0,254$	$G_s (=r_s) : 2,65$
$D_{30} : 0,205$	$C_c : 0,97$	$e_{min} : 0,551$
$D_{60} : 0,27$	$C_u : 1,69$	$e_{maks} : 0,782$



Şekil 6: Çalışmada kullanılan denizel kökenli kumun tane boyu dağılım grafiği

Kumun;

i) Özgül ağırlığı, piknometre deneyi yapılarak hesaplanılmıştır. Deneyde kullanılan piknometreye kum katılarak işaretli seviyeye kadar su doldurulup tartılmıştır. Kum ve su karışımı sallanarak hava kabarcıklarının su ve kum karışımından uzaklaşması sağlanmıştır. Etüve konularak malzeme kuruduktan sonra alınmış ve tartılmıştır. Aradaki fark da bize özgül ağırlığı vermiştir.

ii) Minimum boşluk oranı, ASTM D 4254'e uygun olarak sarsma tablası kullanılarak belirlenmiştir. Üzerine ağırlık konularak, sarsma tablasında yaklaşık 8 dakika titreşime maruz bırakılmıştır. Bu standartta yazılı bağıntılar yardımıyla minimum boşluk oranı hesaplanmıştır (ASTM D 4254, 2000).

iii) Maksimum boşluk oranı, ASTM D 4253'te anlatılan yöntemine uygun olarak belirlenmiştir.

iv) CO<sub>2</sub> doyurma işlemi: Deney için hazırlanan kum örnekleri, suya doyurma işleminden önce, karbondioksit ile (CO<sub>2</sub> ile) doyurulmuştur. Suyu doyurma işleminde boşluklar içindeki havanın tamamını suyla ortamdan uzaklaştırmak zor olmaktadır. Bu işlemde önce kum taneleri arasına gönderilen CO<sub>2</sub> gazı, havadan daha ağır olduğu için havayı daha kolay ortamdan uzaklaştırmaktadır. CO<sub>2</sub> ile doyurulan kum daha sonra suyla doyurulmuştur.

Deneylerde kullanılan kum numuneleri % 30, % 40, % 50, % 60 ve % 70 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Numune hazırlamada, kumun havadan serbest düşmesi ile sağlanan "havada kuru yağmurlama tekniği" kullanılmıştır (Şekil 7).



**Şekil 7:** Kuru yağmurlama tekniğiyle huni yardımıyla kumun numune hazırlama kalıbına yerleştirilmesi

Bu kumlar kullanılarak üç farklı çapta, üç farklı boyda ve beş farklı rölatif sıklık değerinde toplam 45 adet deney yapılmıştır. Sıvılaştırma enerjisini rölatif sıklık, efektif gerilme ve ortalama tane çapının bir fonksiyonu olarak ifade eden 45 adet "iş" değeri elde edilmiştir. Elde edilen "iş" parametreleri ilgili denklemler yardımıyla hesaplanmış, grafikleri çizdirilerek değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

### **3) Farklı çap ve farklı boyda numune hazırlama aparatları:**

Bu çalışmada, devirsel üç eksenli deney düzeneği için numune hazırlanması ve farklı amaçlarla kullanılmasına ihtiyaç duyulan diğer yardımcı malzemeler aşağıda sıralanmıştır:

**i) Numune Hazırlama Tablası:** Kum numunelerin üzerinde hazırlandığı ve deney süresince cihaz üzerinde kalabilmesi amacıyla kullanılan ve numunenin üzerine yerleştirildiği malzemelerden birisidir (Şekil 8).



**Şekil 8:** Numune Hazırlama Tablası

ii) **Numune Sabitleme ve Yük Uygulama Başlığı:** Deneye tabi tutulacak tüm kum numunelerin üzerinde bulunması zorunlu olan, numuneye düşey gerilmenin/kuvvetin uygulandığı aparattır.

iii) **Alt ve Üst Başlık Kelepçesi:** Membran içerisine yerleştirilen kum numunelerin dökülmesini/akmasını engelleyen, su sızmasını ve basınç kaybını önleyen bağlantı/sıkma aparatıdır.

iv) **Yassı Teflon Bilezik Seti:** Numunelerin membran içerisinde içine yerleştirildiği aparat olup; numunelerin yatay yöndeki hareketinde kesme deformasyonuna izin vermesi için 1 mm kalınlığında imal edilen yassı-enli bileziklerdir. Numune yüksekliğinden daha fazla sayıda olmalıdır. (Şekil 9)



Şekil 9: Yassı Teflon Bilezik Seti

v) **Kauçuk Membran:** Ø100x100mm ölçülerinde, 0,8mm kalınlığa sahip zemin test membranıdır. Kumların dağılmasını önlemek amacıyla numunelerin içerisine yerleştirildiği geçirimsiz, elastik malzemedir. Bu malzemeyle, hücre içerisine uygulanan basınç kaybı ve su sızması önlenmiş olmaktadır. (Şekil 10)



Şekil 10: Kauçuk Membran

**vi) Numune Düzleştirme ve Sıkıştırma Tokmağı:** Devirsel Basit Kesme Deney Düzeneği Ø100mm Numune Düzleştirme ve Sıkıştırma Tokmağıdır. Membran içerisinde yassı bilezik içine yerleştirilen kum numunelerin sıklığını bozmadan, örselemeden üst yüzeyinin düzleştirilmesi amacıyla kullanılan düztabanlı tokmaktır.

**vii) Başlık Taşıma ve Sabitleme Aparatı:** Devirsel Basit Kesme Deney Düzeneği Ø100mm Başlık Taşıma ve Sabitleme Aparatıdır. Deneye hazırlanan kum numunelerin taşıma sırasında başlığın veya yassı bileziklerin yatay yönde hareket etmesine engel olmak için ve ayrıca başlığın deney öncesinde numuneleri sıkıştırmasını veya numunelerin rölatif sıklığını değiştirmesini önlemek için numune hazırlama tablasındaki metal taşıma bacaklarına sabitlenen, numune yüksekliğine bağlı olarak yüksekliği ayarlanabilen metal başlık tutucusudur. (Şekil 11 )



Şekil 11: Başlık Taşıma ve Sabitleme Aparatı

**viii) Numune Hazırlama ve Yassı Bilezik Sabitleme Hücresi:** Devirsel Basit Kesme Deney Düzeneği Ø100mm Numune Hazırlama ve Yassı Bilezik Sabitleme Hücresidir. Yassı bilezikler bu hücre içerisine yerleştirilmektedir. Alüminyum Gövdeye Sahiptir, 2 parçaya ayrılabilir. Vidalar yardımıyla tek parça biçiminde yassı bileziklerin yatay hareketini dolayısıyla numunelerin rölatif sıklığının bozulmasını önlemektedir. Kumların membran içerisine yerleştirilmesi için membrana dışa doğru vakum uygulayabilecek şekilde gövdesinde vakum çıkışı yer bulunmaktadır. Gövde 4 noktadan M6 cıvata ile bağlantılıdır. Tabanında ve tavanında o-ring sıkıştırma kanalları bulunmaktadır.(Şekil 12)



**Şekil 12:** Numune Hazırlama ve Yassı Bilezik Sabitleme Hücresi

**ix) O-ring:** 100 mm çapında plastik/kauçuk o-ring'tir. Latex membran içerisine yerleştirilen kum numunenin üzerine yerleştirildiği tablanın ve numuneyi üstten sınırlayan başlığın birbirini tutmasını sağlamak ve su sızmasını önlemeye yarayan sıkıştırma elemanıdır.(Şekil 13)



**Şekil 13:** O-ring

### 3.1. Deneyin Yapılışı

Deneye başlamadan, kumların genel jeoteknik-fizikomekanik özellikleri araştırılır/belirlenir. Önce kum numunesi hazırlama kalıbı oluşturulur. Bu kalıp oluşturulurken en altta numune hazırlama tablası bulunur. Daha sonra Kumların dağılmasını önlemek amacıyla numunelerin içerisine yerleştirildiği geçirimsiz, elastik malzeme olan membran numune hazırlama tablasına takılır ve membran içerisine yerleştirilen kum numunelerin dökülmesini engelleyen, su sızmasını ve basınç kaybını önleyen alt başlık kelepçesi takılır. Numune yüksekliğinden daha fazla sayıda olmak üzere 1 mm kalınlığında yassı-enli bilezikler, membran içine yerleştirilir. Ve sonra numune hazırlama ve yassı bilezik sabitleme hücresi takılır.

Daha sonra membran içerisine yerleştirilen kum numunenin üzerine yerleştirildiği tablanın ve numuneyi üstten sınırlayan başlığın birbirini tutmasını sağlamak ve su sızmasını önlemek için O-ring dediğimiz plastik takılır. Membran içerisinde yassı bilezik içine yerleştirilen kum numunelerin sıklılığını bozmadan, örselemeden st yüzeyinin düzleştirilmesi amacıyla sıkıştırma tokmağı kullanılır. Dzleştirilen numunenin üstüne membran içerisine yerleştirilen kum numunelerin dökülmesini engelleyen, su sızmasını ve basınç kaybını önleyen st başlık kelepçesi takılır. Ve son olarak da deneye tabi tutulacak tüm kum numunelerin üzerinde bulunması zorunlu olan, numuneye düşey gerilmenin uygulandığı numune sabitleme ve yük uygulama başlığı takılır.

Hazırlanmış olan kum numune kalıbı deneyin yapıldığı mekanizmaya yerleştirilir. Deneyde 100 kPa efektif düşey gerilme, 50 kPa boşluk suyu basıncı ve 0,1 Hz harmonik yükleme yapılmıştır. Efektif gerilmenin sifıra ulaştığı anda deneye son verilmiştir.

Gelecekteki araştırmacılar için  $D_{50}$  ile ilgili zemin tanelerinin mineralojik yapısı ve şekli de ele alınarak daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir. Özellikle rölatif sıklılığı ayarlama noktasında gelişen teknoloji ile birlikte daha tutarlı sonuçların alınabileceği standartlar geliştirilecektir.



#### **4.Rölatif sıkılık nedir?**

Rölatif Sıkılık; Kum, çakıl gibi ayırık daneli (kohezyonsuz) zeminlerde, zeminin sıkılık durumunu yansıtan bir terimdir. Yani zeminin arazideki Sıkılık derecesinin aynı zemin danelerinin en gevşek ve en sıkı yerleşim konumlarına karşılık gelen sıkılık dereceleri ile karşılaştırılması olarak tanımlanır.

Deneylerde kullanılan kum numuneleri ASTM standartlarına uygun olarak kumların; % 30, % 40, % 50, % 60 ve % 70 rölatif sıkılık için gerekli numune ağırlıkları (gr) hesaplanmıştır. Kumları sabit hacimli kalıba aynı rölatif sıkılıkta (Dr) yerleştirebilmek için ön deneyler yapılmıştır.

#### 4. DENEYSEL BULGULAR

Bu çalışma kapsamında, üniform ince- orta tane boyuna sahip denizel kum için;

- 3 farklı çapta ve (her bir çap için)
- 3 farklı boyda numuneler kullanılmıştır.

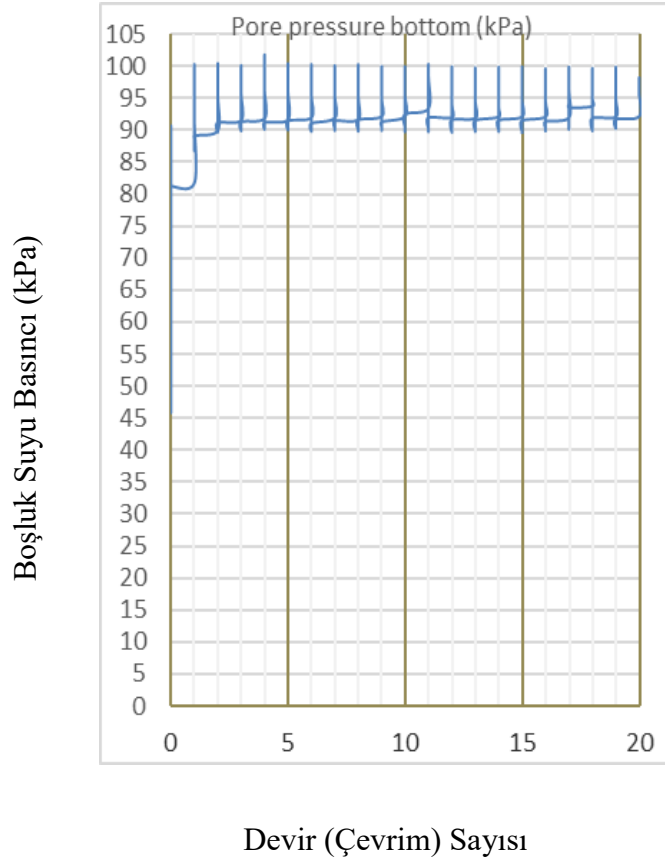
1) Elek analizi bulguları: Yapılan tane boyu dağılım analizine göre deneylerde kullanılan malzeme; ince-orta tane boyuna sahip denizel kökenli kumdur.

2) Bir kum türü için 50 mm çap ve 50 mm boy numune hazırlama hücresi ile hazırlanan örnek üzerinde yapılan deneylerden veriler elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla, detayları aşağıda anlatılacak olan bazı grafikler çizdirilmiştir. Bunlar;

i) “Devir sayısı – Boşluk suyu basıncı (kPa)” grafiği (Şekil 14) ve

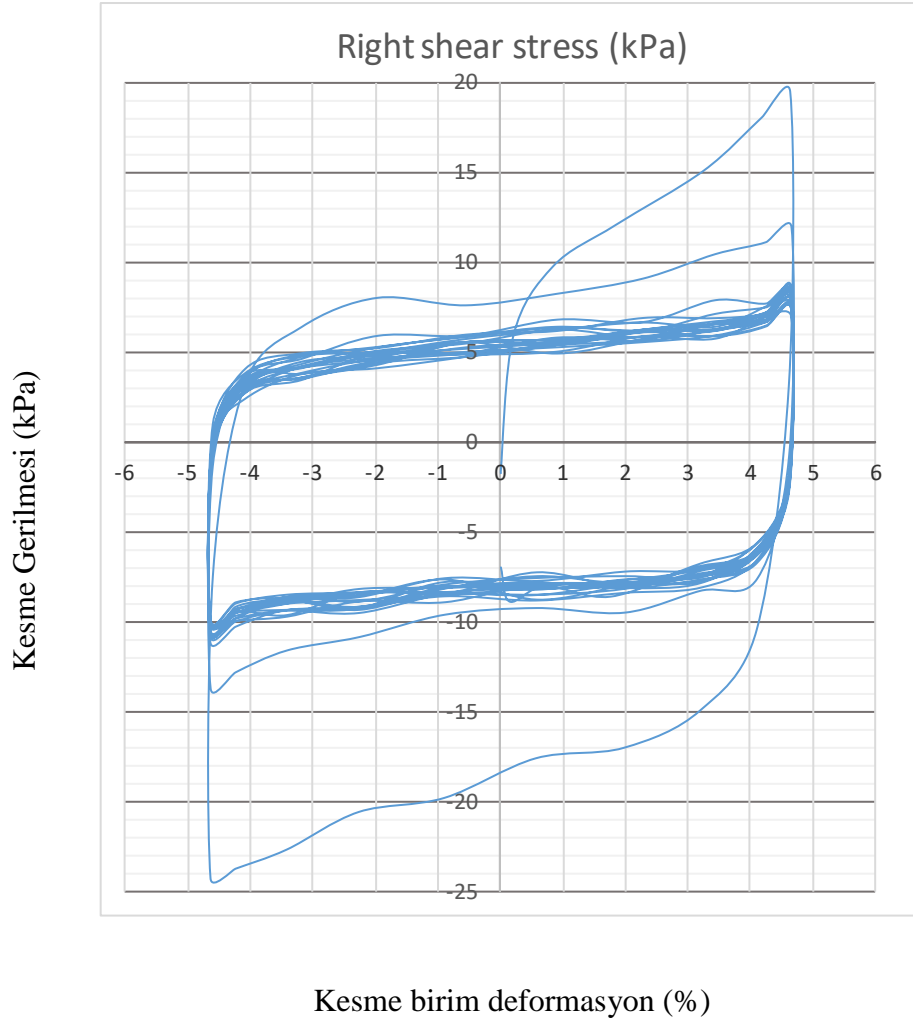
ii) “Kesme birim deformasyonu (%) – Kesme gerilmesi (kPa)” grafiğidir (Şekil 15).

i) “Devir sayısı – Boşluk suyu basıncı (kPa)” grafiğine göre: devir sayısı arttıkça yani numuneye uygulanan sarsıntı devam ettikçe; boşluk suyu basıncı artmakta ve düşey gerilmeye eşit değere geldiğinde, efektif gerilme sıfıra yaklaşmaktadır (0-sıfır olmaktadır. Yani:  $\sigma'_v = \sigma_v - u = 0$ ). Aşağıdaki grafiğe göre, boşluk suyu basıncı 1. devir (çevrim) sonunda 100 kPa değerine ulaşmıştır. Bu durumda, 1. çevrimde boşluk suyu basıncı, düşey gerilme değerine ulaşmıştır. Bu durum efektif (etkin) gerilme değerinin sıfıra düşmesine etki etmektedir. Buna bağlı olarak sıvılaşma olgusunun gerçekleştiği kabul edilebilir. Sarsıntı (çevrim) devam ettiği sürece uygulanan enerji, kumun sıvılaşmış konumunu (durumunu) koruması işlemine harcadığı varsayılmıştır (kabul edilmiştir) (Şekil 14).



**Şekil 14:** Devir sayısı – boşluk suyu basıncı (kPa) grafiği

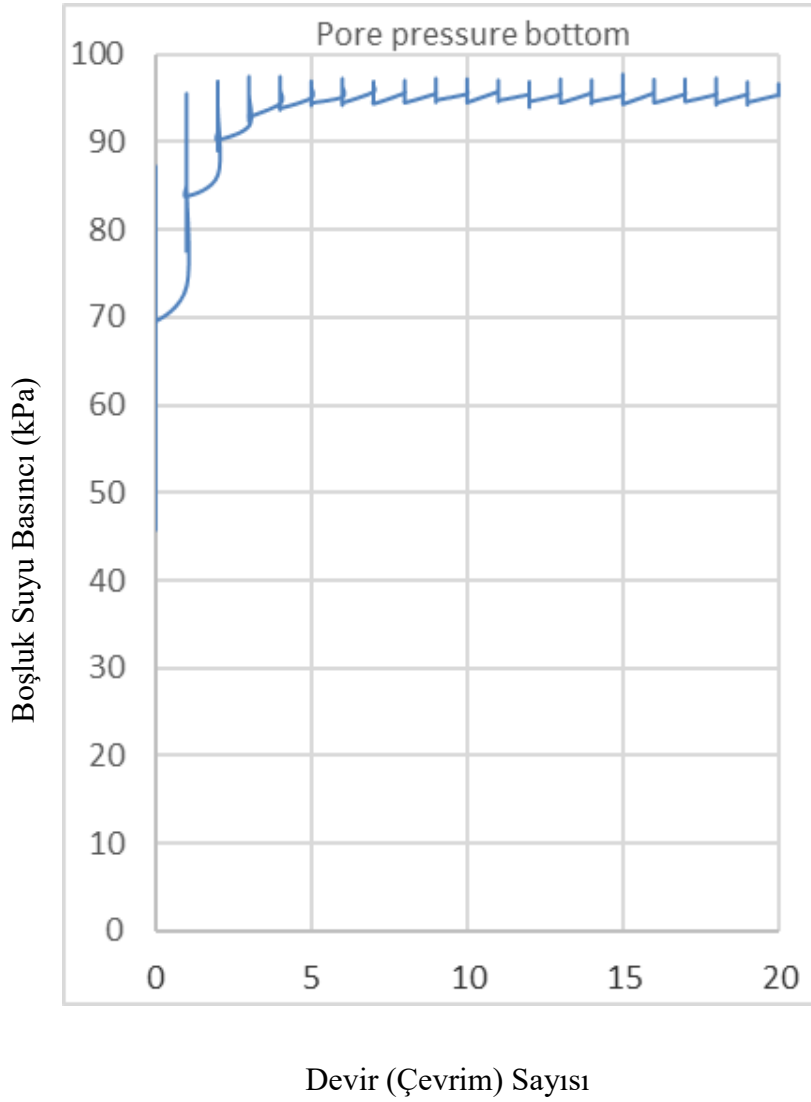
ii) Kesme deformasyonu (%) - kesme gerilmesi (kPa) grafiğine göre: Deneye tabi tutulan kumun deney başlangıcında sıvılaşmaya karşı, yaklaşık 20 kPa değerinde bir kesme gerilmesi direnci gösterdiği görülmektedir. Bu durum zemin içerisindeki kum tanelerinin sıvılaşmaya karşı başlangıçta bir direnç gösterdiğinin işaretidir. 3. Devirden sonra, kumun kesme gerilmesi değerinin yaklaşık 8-10 kPa eş değeri bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu aralıkta iken sarsıntı devam ettiği süre boyunca, kum taneleri, uygulanan/etkiyen kuvveti/sarsıntıyı, sıvılaşma durumunu korumak için harcadığı gözlenmektedir (Şekil 15).



**Şekil 15:** Kesme deformasyonu (%) – kesme gerilmesi (kPa) grafiği

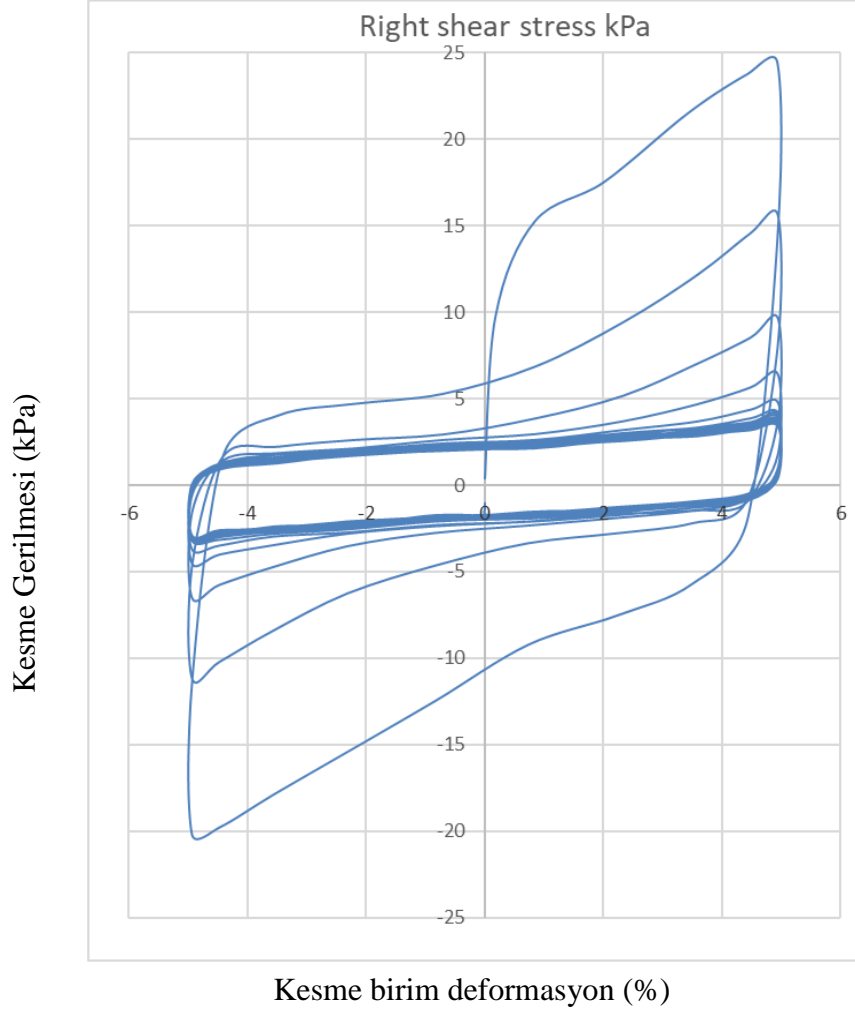
3) Bir kum türü için 100 mm çap ve 100 mm boy numune alıcı kalıbı ile hazırlanan örnekten elde edilen grafikler;

i) “Devir sayısı – Boğluk suyu basıncı (kPa)” grafiğine göre , boşluk suyu basıncı 3. devir (çevrim) sonunda 98 kPa değerine ulaşmıştır. Bu durumda, 3. çevrimde boşluk suyu basıncı, düşey gerilme değerine ulaşmıştır. Bu durum efektif (etkin) gerilme değerinin sıfıra düşmesine etki etmektedir. Buna bağlı olarak sıvılaşma olgusunun gerçekleştiği kabul edilebilir. Sarsıntı (çevrim) devam ettiği sürece uygulanan enerji, kumun sıvılaşmış konumunu (durumunu) koruması işlemine harcadığı varsayılmıştır (kabul edilmiştir) (Şekil 16 ).



**Şekil 16:** Devir sayısı – boşluk suyu basıncı grafiği

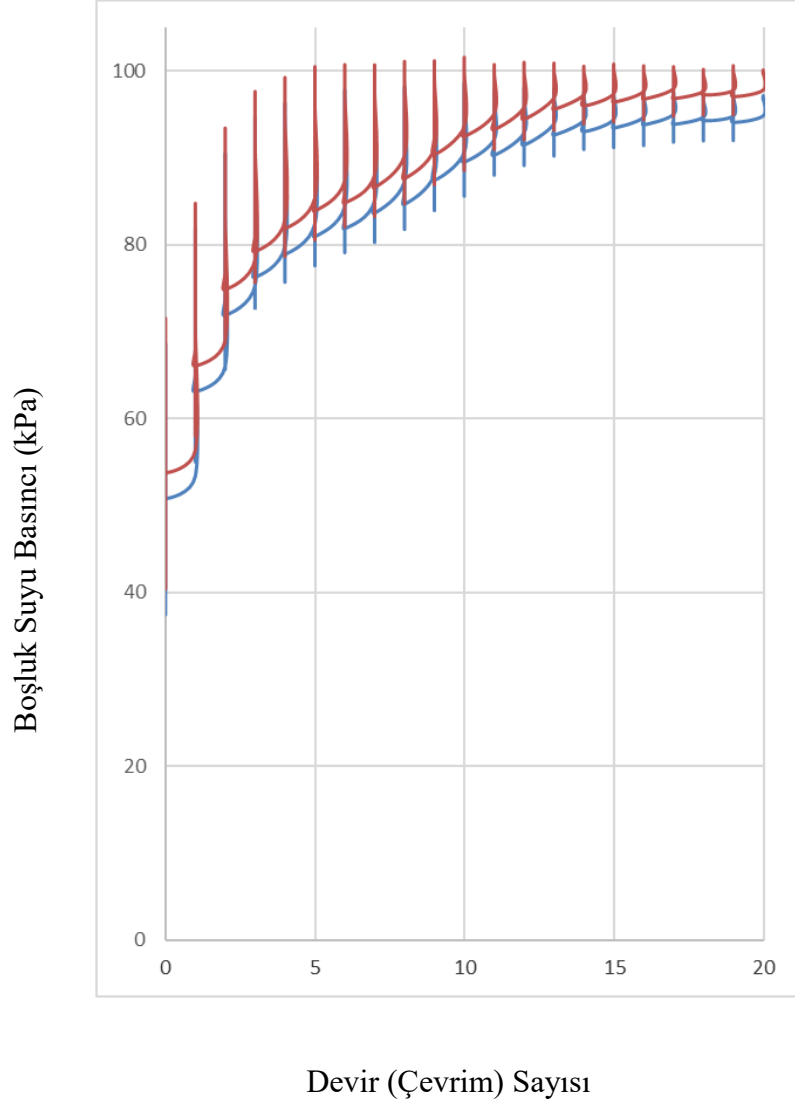
ii) Kesme deformasyonu (%) - kesme gerilmesi (kPa) grafiğine göre: Deneye tabi tutulan kumun deney başlangıcında sıvılaşmaya karşı, yaklaşık 25 kPa değerinde bir kesme gerilmesi direnci gösterdiği görülmektedir. Bu durum zemin içerisindeki kum tanelerinin sıvılaşmaya karşı başlangıçta bir direnç gösterdiğinin işaretidir. 5. Devirden sonra, kumun kesme gerilmesi değerinin yaklaşık 2,5-2 kPa eş değeri bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu aralıkta iken sarsıntı devam ettiği süre boyunca, kum taneleri, uygulanan/etkiyen kuvveti/sarsıntıyı, sıvılaşma durumunu korumak için harcadığı gözlenmektedir (Şekil 17).



**Şekil 17:** Kesme deformasyonu - kesme gerilmesi grafiği

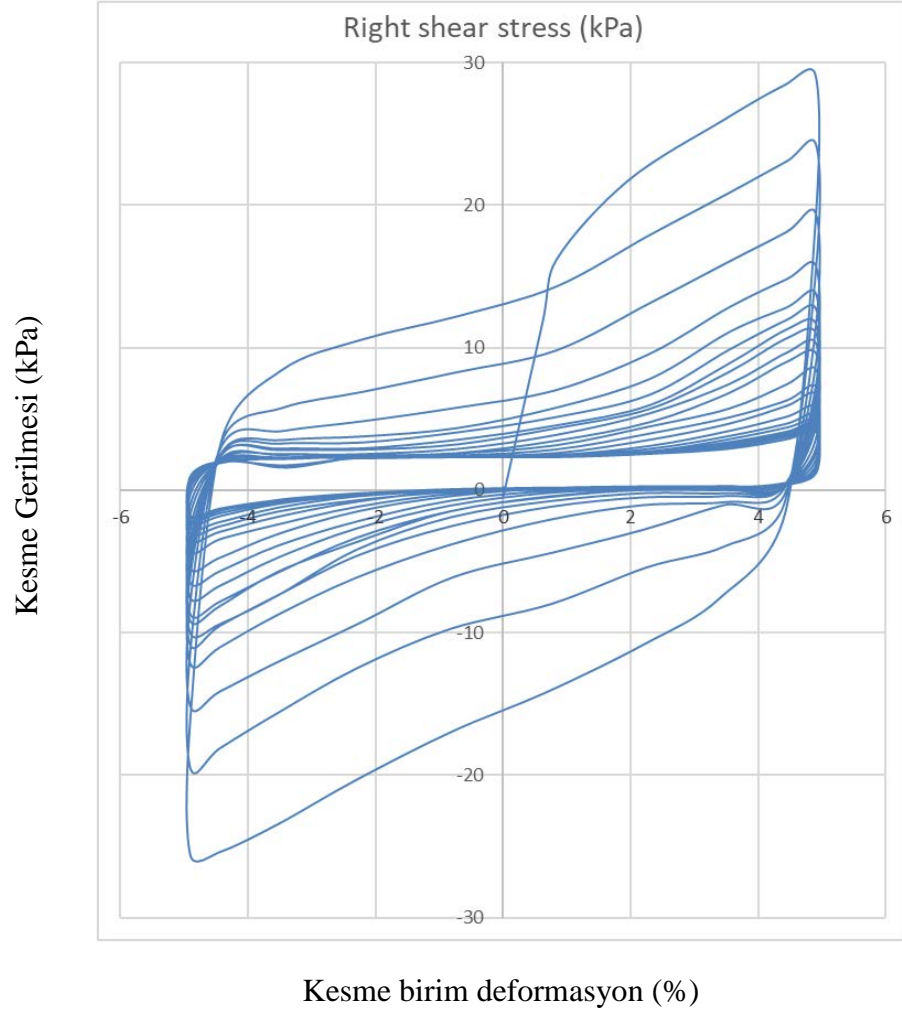
4) Bir kum türü için 150 mm çap ve 150 mm boy numune alıcı kalıbı ile hazırlanan örnekten elde edilen grafikler,

i) “Devir sayısı – Boşluk suyu basıncı (kPa)” grafiğine göre , boşluk suyu basıncı 5. devir (çevrim) sonunda 100 kPa değerine ulaşmıştır. Bu durumda, 5. çevrimde boşluk suyu basıncı, düşey gerilme değerine ulaşmıştır. Bu durum efektif (etkin) gerilme değerinin sıfıra düşmesine etki etmektedir. Buna bağlı olarak sıvılaşma olgusunun gerçekleştiği kabul edilebilir. Sarsıntı (çevrim) devam ettiği sürece uygulanan enerji, kumun sıvılaşmış konumunu (durumunu) koruması işlemine harcandığı varsayılmıştır (kabul edilmiştir) (Şekil 18).



**Şekil 18:** Devir sayısı – boşluk suyu basıncı grafiği

ii) Kesme deformasyonu (%) - kesme gerilmesi (kPa) grafiğine göre: Deneye tabi tutulan kumun deney başlangıcında sıvılaşmaya karşı, yaklaşık 30 kPa değerinde bir kesme gerilmesi direnci gösterdiği görülmektedir. Bu durum zemin içerisindeki kum tanelerinin sıvılaşmaya karşı başlangıçta bir direnç gösterdiğinin işaretidir. 17. Devirden sonra, kumun kesme gerilmesi değerinin yaklaşık 2-1,5 kPa eş değeri bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu aralıkta iken sarsıntı devam ettiği süre boyunca, kum taneleri, uygulanan/etkiyen kuvveti/sarsıntıyı, sıvılaşma durumunu korumak için harcadığı gözlenmektedir (Şekil 19).

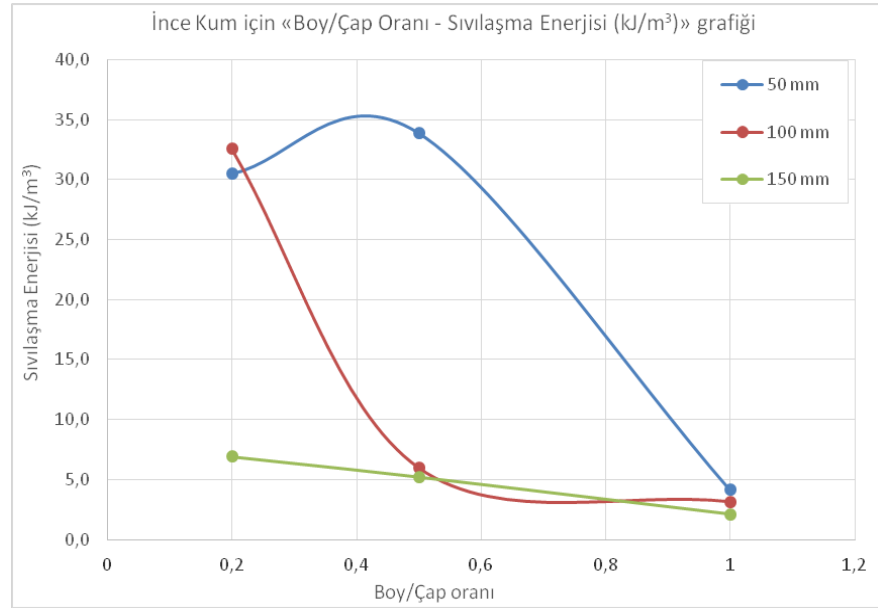


**Şekil 19:** Kesme deformasyonu - kesme gerilmesi grafiği

5) Bir kum türü için 50 mm çap ve 50 mm boy, 100 mm çap ve 100 mm boy 150 mm çap ve 150 mm boy numune alıcı kalıbı ile hazırlanan %50, %60, %70 rölatif sıkılıktaki numune için **Sıvılaşma enerjisi (kJ/m<sup>3</sup>)- (boy/çap) oranı** grafikleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

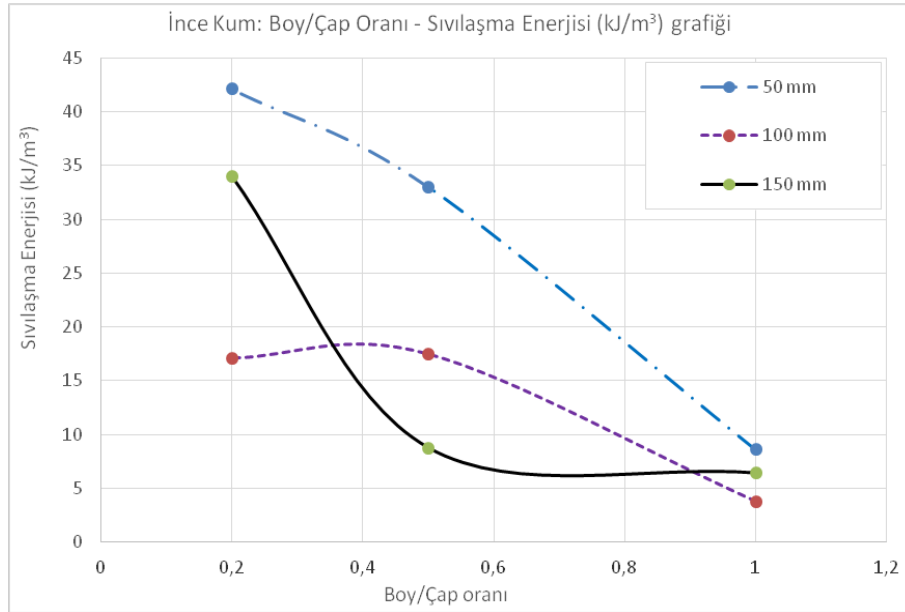


- i)  $D_r = \%50$  (rölatif sıklıkta) numune için, en uygun sıvılaşma enerjisini 150 mm çap ve 150 mm boy numune alıcı kalıbında görmek mümkündür (Şekil 20).



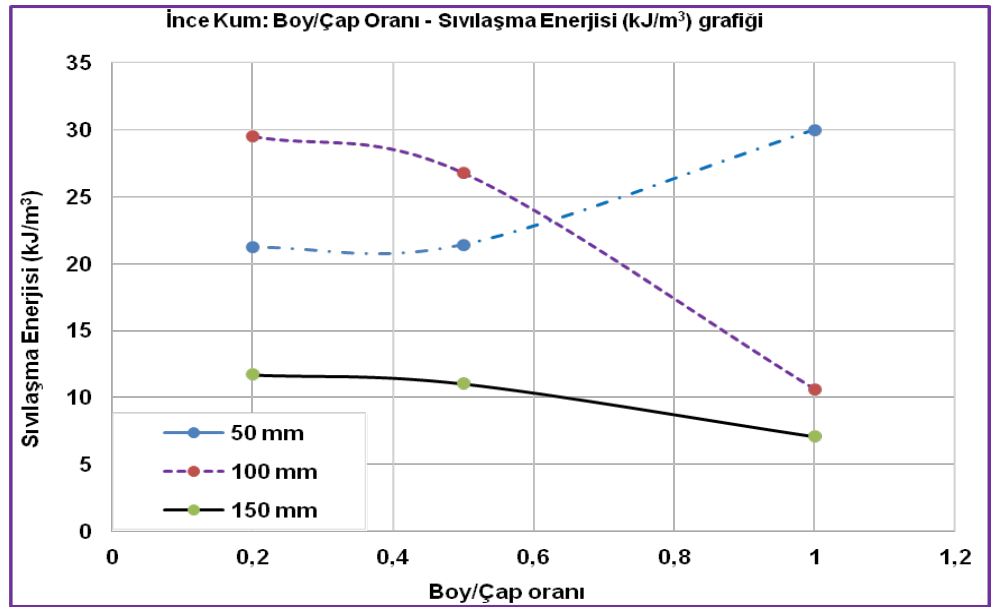
Şekil 20:  $D_r = \%50$  numune için Sıvılaşma enerjisi (kJ/m<sup>3</sup>) – (boy/çap) oranı grafiği

ii)  $D_r = \%60$  (rölatif sıklıkta) numune için, en uygun sıvılaşma enerjisini gösteren numune alıcı kalıbını söylemek pek mümkün değildir. 3 ayrı kalıp içinde grafikte çok fazla sapmalar gözlemlenmektedir (Şekil 21).



Şekil 21:  $D_r = \%60$  numune için Sıvılaşma enerjisi ( $\text{kJ/m}^3$ ) – (boy/çap) oranı grafiği

iii)  $D_r = \%70$  (rölatif sıkılıkta) numune için, en uygun sıvılaşma enerjisini 100 mm çap ve 100 mm boy, 150 mm çap ve 150 mm boy numune alıcı kalıbında görmek mümkündür (Şekil 22).



Şekil 22:  $D_r = \%70$  numune için Sıvılaşma enerjisi (kJ/m<sup>3</sup>) – (boy/çap) oranı grafiği

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

1) Laboratuvarda yapılan bu ilk aşama çalışmalarda; bir kum türü üzerinde çalışılmıştır. Numune kalıplarının çapı piyasada kolay temin edilebilecek, kolay satın alınabilecek membran ebatlarına uygun olarak seçilmiştir (seçilmek zorunda kalınmıştır)

2) Zemin sıvılaşması üzerine laboratuvar ortamında yapılacak deneyler için en uygun çap ve en uygun boy'a bağlı örnek boyutları hakkında bir ön kestirimde bulunmuş olmaktadır.

3) Çap ve boy oranlamasında, tam boy olarak adlandırılan numunelerde, daha istikrarlı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, literatürde 1'e 1 (birebir) ebatlardaki sonuçların güvenilir olmayacağı, en uygun **boy/çap oranının 1/5 olacağı** ifade edilmektedir. Fakat, bunu iddia eden **hiçbir araştırmacı deneylerinde bu oranı kullanmamıştır**. Buna rağmen böyle bir öneride bulunulmaktadır.

4) «**Aşırı boşluk suyu basıncının artışına bağlı olarak efektif gerilmenin sifıra ulaştığı sonuçlar**», tutarlı olarak kabul edilmiştir.

$$s_v' = s_v - u = 0$$

Elde edilen sonuçlara göre; 100 mm çap için: **100 mm yükseklik** ve 150 mm çap için: **150 mm ve 75 mm yüksekliğindeki** örnek boyutlarında birbirine yakın ve **literatürle uyumlu sıvılaşma enerjisi değerleri** elde edilmiştir.

5) Ayrıca, 100 mm için yarım boy olarak kabul edilen 50 mm yükseklikteki numune ebatı, zaman zaman sapmalar göstermesine rağmen, numune miktarının yeterli olmadığı durumlarda numunelerin özenle hazırlanması ve deneylerin dikkatli bir şekilde yapılması şartıyla kullanılabilir. Bu numune hazırlama aparatının kullanılması sırasında deneyler birden fazla (en az 3 kez, gerektiğinde daha çok) tekrarlanmalı ve birbirine yakın sonuçlar alındıktan sonra ortalaması alınarak kullanılması önerilir.

6) Rölâtif sıklık değeri artıkça kumların sivilâşması zorlaşmaktadır. Sivilâşma olgusu daha sonraki çevrimlerde gerçekleşmiştir. Rölâtif sıklık değeri artıkça kesme birim deformasyonu-kesme gerilmesi grafiği üzerinde daha büyük kesme direncinin oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum rölâtif sıklık değeri artıkça, kumun sivilâşabilmesi için daha yüksek kesme gerilmesi değerinun uygulanması gerektiğini ifade eder.

7) Bu çalışmanın;  $D_{50} = 0.254$  mm olan, ince-orta taneli kum özelliğindeki 1 kum türü üzerinde yapılmıştır. Bu çalışma farklı tane çapına sahip değişik kum türleri üzerinde denendikten sonra daha sağlıklı sonuçlara varılabilecektir.

## 6. KAYNAKLAR

Akın, Ö., “Influence of plasticity and fines content on cyclic behaviour of sand”, M.Sc. Thesis, *ITU, Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul-TR, (2014).

Alavi, A.H and Gandomi, A.H. “Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction” *Geoscience Frontiers*, 3(4), 541-555, (2012).

Altun, S., “Suya doygun kumların drenajsız koşullardaki davranışının tekrarlı yükler altında burulmalı kesme deney aleti ile incelenmesi.” *DEÜ, Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (1), 145-158, (2004).

Altun, S. and Ansal, A.M., “Anizotropik konsolidezeminlerin dinamik davranışı.” *İMO Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 16 (29), 3523-3545, (2005).

Aminia, P.F. and Noorzad, R., “Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic Soil Dynamics and Earthquake Engineering” 104, 45-53, (2018).

Arab, A., Shahrour, I., and Lancelot, L., “A laboratory study of liquefaction of partially saturated sand” , *Journal of Iberian Geology*, 37 (1), 29-36, (2011).

Baziar, M.H. and Jafarian, Y., “Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model, capacity energy.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 1056–1072, (2007).

Baziar, M.H., Jafarian, Y., Shahnazari, H., Movahed, V. and Tutunchian, M.A., “Prediction of strain energy-based liquefaction resistance of sand–silt mixtures: an evolutionary approach.” *Comput. Geosci.* 37 (11), 1883–1893, (2011).

Berrill, J.B. and Davis, R.O., “Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model.” *Soils and Foundations*, 25(2): 106–118, (1985).

Bilge, H.T. ve Çetin, K.Ö., “Sıvılaşma tetikleme analizlerinde düşey efektif gerilme etkisinin performans esaslı olarak belirlenmesi” , Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara-TR, (2014).

Boulangier, R.W. and Idriss and I.M., “Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure.” *J. Geotech. Geoenviron.* 138, 1185–1195, (2012).

Cetin, K.O., Seed, R.B. ,Der-Kiureghian, A., Tokimatsu, K.Harder , Jr. L.F., Kayen R.E. and Moss R.E.S., “Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (12), (2004).

Chen, Y.R., Hsieh, S.C., Chen, J.W. and Shih C.C., “Energy-based probabilistic evaluation of soil liquefaction.” *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 25 (1), 55–68, (2005).

Dobry, R., Ladd, R., Yokel, F., Chung, R. and Powell. D., “Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method.” *National Bureau of Standards Building Science Series*, US Dept of Commerce, 138, (1982).

Elibol, B., “ Kısmi doygun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışları.” Yük. Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul-TR, (2005).

Figuroa, J., Saada, A., Liang, L. and Dahisaria, N., "Evaluation of soil liquefaction by energy principles." *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9): 1554–1569, (1994).

Green, R.A., "Energy-based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils." (PhD dissertation). *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, VA, (2001).

Hadush, S., Yashima, A. and Uzuoka, R., "Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis." *Computers and Geotechnics*, 27, 199-224, (2000).

Hardin, B.O. and Drenevich, V.P., "Shear modulus and damping in soils – design and curves." *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (SM3), 689-708, (1972).

Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. and Murata, H., "Undrained cyclic and monotonic triaxial behavior of saturated loose sand." *Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Soils and Foundations, 34(1), 19-32, (1994).

Ishihara, K. and Yasuda, S., "Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation." *Soils Found.* 15 (1), 45–59, (1975).

Ishihara, K. and Towhata, I., "Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads." *Soils and Foundations*, 23 (4), 11-26, (1983).

Ishihara K., Tsuchiya, H. Huang, Y. and Kamada K., "Recent studies on liquefaction resistance of sand effect of saturation." *Proc. 4th Int. Conf. Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1-7, (2001).



Ishihara K., Tsukamoto, and Kamada K., “Undrained behavior of near-saturated sand in cyclic and monotonic loading, Proceedings of the International Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena.” *Edited by: Triantafyllidis, Th. A. A. Balkema Publishers,* (2004).

Iwasaki T. Tatsuoka, F. and Takagi, Y., “Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, Soils and Foundations.” *Japan Soc. Of Soil Mech. and Found. Eng.*, 18, 39-56, (1978).

Jafarian Y. Towhata I. Baziar, M.H. Noorzad A. and Bahmanpour, A., “Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments”, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, 35: 13-28, (2012).

Kahraman İ., “Seismic Liquefaction: 1-G Model Testing System and Shake Table Tests”, MSc. Thesis, *İzmir Inst. Of Technolgy*, Graduate School of Engineering and Science, İzmir-TR (2013).

Kammerer A. and Pestana, J.M., “Undrained Response of Monterey 0/30 Sand Under Multidirectional Cyclic Simple Shear Loading Conditions”, *Technical Report, University of California, Berkeley*, (2002).

Kokusho, T., “Liquefaction potential evaluation: energy-based method compared to stress-based method.” In Proceedings of the Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Chicago, Ill. , (2013).

Kovacs, W.D. and Leo, E., “Cyclic simple shear of large scale sand samples: Effects of diameter to height ratio.” Proceedings: 1st International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, April 26-May 3, St. Louis, Missouri, (1981).

Law K.T. Cao Y.L. and He. G.N., “An energy approach for assessing seismic liquefaction potential.” *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 320–329, (1990).

Liang, L., “Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit [ Ph. D. dissertation].” *Cleveland, Ohio: Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University*, (1995).

Monkul, M.M., Etminan, E. and Şenol, A., “Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 185-197, (2016).

Moss, R.E.S., Seed, R.B., Kayen, R.E. Stewart, J.P. Der Kiureghian, and A. Cetin, K.O., “CPT based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential.” *J. Geotech. Geoenviron.* 132, 1032–1051, (2006).

Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A., “A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing.” *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4): 659–678. doi:10. 1139/t79-076, (1979).

Nateghi, A., “Numerical modelling of sand behavior under cyclic simple shear tests in a special liquefaction box.” MSc. Thesis, *İTÜ, Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul-TR, (2015).

Okamura, M. and Soga, Y., “Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand.” *Soils and Foundations*, 46(5), 695-700, (2006).

Okamura, M. and Noguchi K., “Liquefaction resistances of unsaturated non-plastic silt.” *Soils and Foundations*, 49(2), 221-229, (2009).

Orhan M. ve Ateş A., “Rölatif Sıkılığın Saruhanlı (Manisa) İlçesi Zeminlerinin Sıvılaşmasına Etkisinin Dinamik Üç Eksenli Deneyi ile Araştırılması.” Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler Dergisi, 2(1), 26-41, (2012.).

Papadopoulou, A. Kallioglou, P., Tika , T.H. Papadopoulos, S. and Batum, E., “Liquefaction resistance of silty sands and dynamic properties of cohesive soils from Düzce, Turkey.” *Journal of Earthq. Engineering*, 14, 351-362, (2010).

Polito, C., Green, R.A., Dillon, E. and Sohn, C., “Effect of load shape on relationship between dissipated energy.” *Can. Geotech. J.* , 50, 1118-1128, (2013).

Seed, R.B., “Closure to soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes.” *J. Geotech. Eng.* , ASCE, 106 (GT6), 724, (1980).

Seed, R.B. and Idriss, I.M., “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97, 1249-1274 (SM8), (1971).

Seed, R.B., Idriss, I.M., Makdisi, F. and Banerjee, N., “Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses Report No.” UCB/EERC-75/29. *Earthquake Engineering Research Centre*, U.C. Berkeley, (1975).

Seed, R.B. and Lee, K.L., “Liquefaction of saturated sands during cyclic loading.” *Proc. ASCE*, 92 (SM6), 105-134, (1966).

Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M. and Reimer, M.F., “Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation.” 4th Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthq. Eng. And Soil Dynamics (Mar 26th – Mar 31st), Paper No: SPL-2, (2001).

Simcock, J., Davis, R.O., Berrill, J.B. and Mallenger, G., “Cyclic triaxial tests with continuous measurement of dissipated energy.” *Geotech Test J*, GTJODJ, 6(1): 35–9, (1983).

Szilvgyi, Z., Hudacsek, P. and Ray, R.P., “Soil Shear Modulus from Resonant Column, Torsional Shear and Bender Element Tests.” *Int. J. of GEOMATE*, 10-2 (Sl. No. 20) , 1822-1827, *Geotech. , Const. Mat. and Env. , ISSN: 2186-2982(P), 2186-2990(O)*, Japan, (2016).

Towhata, I., “Geotechnical earthquake engineering.” *Berlin Heidelberg: Springer-Verlag*, p. 698, (2008).

Towhata, I. and Ishihara, K., “Shear work and pore water pressure in untrained shear.” *Soils and Foundation*, 25(3): 73–84, (1985).

Unutmaz, B., “Assessment of Soil-Structure-Earthquake Interaction Induced Soil Liquefaction Triggering.” PhD. Thesis, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU*, Ankara-TR, (2008).

Ural, N. and zocak, A. and nalp, A., “Dinamik ç eksenli deneyde frekansın etkisi.” 6. Ulusal Deprem Mhendisliği Konferansı: İstanbul-TR, (2007).

Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Hosaka, Y., “Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples.” *Soils and Foundations*, 29(1), 93-104, (1989).

Yoshimi, Y. and Tanaka, K. and Tokimatsu, K., “*Liquefaction resistance of a partially saturated sand.*” *Soils and Foundations*, 29(3), 157-162, (1989).

Yoshimine, M. and Ishihara, K., “Flow potential of sand during liquefaction.” *Soils and Foundations*, 38(3), 189-198, (1998).

Youd, T.L. and Idriss, I.M., “Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction Resistance of Soils.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (4), 297-313, (2001).

Zehtab, K.H., “An Assessment of the dynamic properties of Adapazari soils by cyclic direct simple shear tests.” M.Sc. Thesis, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU*, Ankara-TR, (2010).

Zhang, W., Goh, A.T.C., Zhang, Y., Chen, Y. and Xiao, Y., “Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines.” *Engineering Geology*, 188, 29-37, (2015).

## **7. ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : ŞEYDA ÖZÇELİK

Doğum Yeri ve Tarihi : DENİZLİ / 11.06.1991

Lisans Üniversite : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

Elektronik posta : seydatahraci@gmail.com

İletişim Adresi : Çünür mah. 275. Cd. Türk Eğitimsen Sit.  
B-Blok N:1/23 ISPARTA/ Merkez

## **EĞİTİM**

**LİSE** : Denizli - Hasan Tekin Ada Lisesi (2009)

**ÜNİVERSİTE** : Denizli - Pamukkale Üniversitesi (2015)

**YÜKSEK LİSANS** : Denizli – Pamukkale Üniversitesi (2019)