

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



**TEK TİP KUMDA ARTAN İNCE TANE YÜZDESİNİN**  
**SIVILAŞMA ENERJİSİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GÖKÇE KAHRAMAN**

**DENİZLİ, OCAK - 2021**

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



**TEK TİP KUMDA ARTAN İNCE TANE YÜZDESİNİN**  
**SIVILAŞMA ENERJİSİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GÖKÇE KAHRAMAN**

**DENİZLİ, OCAK - 2021**

**Bu tez çalışması, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (PAÜ-BAP) Koordinatörlüğü tarafından 2019FEBE025 proje numarasıyla maddi olarak desteklenmiştir.**

**Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) tarafından Laboratuvar ve Altyapı imkânlarının kullanılmasına izin verilerek -ayni olarak- 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.**

**Gökçe KAHRAMAN**

## ÖZET

### TEK TİP KUMDA ARTAN İNCE TANE YÜZDESİNİN SIVILAŞMA ENERJİSİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖKÇE KAHRAMAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞRETİM ÜYESİ TURGAY BEYAZ)

DENİZLİ, OCAK - 2021

Sıvılaşma özellikle silt ve kum boyutu ince-iri taneli ve kohezyonsuz zeminlerde gözlenen bir yenilme türüdür. Sıvılaşma potansiyeli konusunda çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen sıvılaşma enerjisi ile ilgili araştırma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışma kumlu birimlerde silt miktarının artırılmasıyla ince tane yüzdesinin sıvılaşma enerjisi üzerine etkisini araştırmaktadır. Çalışmada, üç yönlü tekrarlı basit kesme deney düzeneğinin kullanılması elde edilecek olan sonuçların güvenilirlik ve özgünlük değerini arttırmaktadır.

Deneyler için hazırlanan numunelerin çapı 100 mm'dir. Deneyler; kumlar için: %30, %40, %50, %60 ve %70 rölatif sıklıkta ( $D_r$ ), sırasıyla 50 kPa, 200 kPa düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) ve 25 kPa, 100 kPa boşluk suyu basıncı ( $u$ ) şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kum+Silt numuneler: %30, %40, %50, %60 ve %70 rölatif sıklıkta ( $D_r$ ), sırasıyla 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) ve 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa boşluk suyu basıncı ( $u$ ) şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Referans değer olarak kullanmak amacıyla temiz kum örnekleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Kum+silt karışımlarının sıvılaşma enerjisi genel olarak temiz kum numunelerinin sıvılaşma enerjisine göre daha düşüktür. Ancak, kuma eklenen silt oranı %10-%40 civarında iken sıvılaşma enerjisinin arttığı; %40-%60 arasında iken sıvılaşma enerjisinin azaldığı ve %60'tan daha fazla iken sıvılaşma enerjisinin tekrar artış gösterdiği gözlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Düşey gerilme, Rölatif sıklık, Sıvılaşma enerjisi, Kum Silt karışımı, Tekrarlı basit kesme deneyi

**ANAHTAR KELİMELER:**

**ABSTRACT**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INCREASING FINE GRAIN  
PERCENTAGE ON LIQUEFACTION ENERGY OF ONE TYPE SAND**

**MSC THESIS**

**GÖKÇE KAHRAMAN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
GEOLOGICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. TURGAY BEYAZ)**

**DENİZLİ, JANUARY 2021**

Liquefaction is a type of failure observed especially in silt and sand size fine-coarse grained and cohesionless soils. Although there are many studies on liquefaction potential, the number of studies on liquefaction energy is very limited. This study investigates the effect of fine grain percentage on liquefaction energy by increasing the amount of silt in sandy units. In this study, the use of three-directional (3D) cyclic simple shear test device, increases the originality value of the results to be obtained.

The diameter of the samples prepared for the experiments is 100 mm. Experiments was carried out under that conditions; for sand samples: 30%, 40%, 50%, 60% and 70% relative density ( $D_r$ ), respectively, under 50 kPa, 200 kPa vertical stress ( $\sigma_v$ ) and 25 kPa, 100 kPa pore water pressure ( $u$ ) conditions; For sand+silt samples: 30%, 40%, 50%, 60% and 70% relative density ( $D_r$ ), respectively 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa vertical stress ( $\sigma_v$ ) and 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa pore water pressure ( $u$ ) conditions.

Firstly, experiments were carried out on clean sand samples to use as reference values. Later, experiments on sand+silt mixtures were carried out. According to the findings obtained; The liquefaction energy of sand+silt mixture is generally lower than the liquefaction energy of clean sand samples. However, while the silt ratio added to the sand is around 10%-40%, the liquefaction energy has increased; It was observed that when it was between 40% and 60%, the liquefaction energy decreased and when it was more than 60%, the liquefaction energy increased again.

**KEYWORDS:** Vertical stress, Relative density, Liquefaction energy, Sand, Silt, Cyclic simple shear test

**KEYWORDS:**

## **İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

<b>ÖZET.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ.....</b>	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ .....</b>	<b>vi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÖNSÖZ.....</b>	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Amaç .....	6
1.2 Özgün Değer.....	6
1.3 Yaygın Etki – Katma Değer .....	8
1.4 Yöntem Seçimi .....	9
1.5 Deney Parametreleri .....	10
<b>2. KURAMSAL TEMELLER – ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>12</b>
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>24</b>
3.1 Materyal.....	24
3.2 Yöntem .....	28
3.2.1 Laboratuvar Deneyleri .....	28
3.2.2 Sönüm Oranı .....	30
3.2.3 Dinamik Basit Kesme Deney Düzenegi (DBKDD) .....	30
3.2.4 Kum ve Silt Hakkında Genel Bilgiler .....	35
3.2.4.1 Silt ve Kum Numuneler - Gerilme Şartları .....	36
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>38</b>
4.1 Numune Hazırlama.....	42
4.2 Deney Parametreleri ve Elde Edilen Bulgular.....	45
4.3 Verilerin Yorumlanması.....	48
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>52</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>55</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>63</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Sıvılaşmanın gözleendiği bazı depremlere ait görüntüler	1
Şekil 1.2: Sıvılaşma olgusu gerçekleşirken zemin tanelerinin gevşemesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006).	4
Şekil 1.3: Sıvılaşma deney düzeneklerine örnekler	7
Şekil 1.4: Üç yönlü tekrarlı basit kesme deney düzeneği (3D) <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Şekil 3.5: Sıvılaşma deneylerinde kullanılan kum, silt ve kum+silt karışımları	26
Şekil 3.6: Tipik bir “Kesme gerilme (kPa)-Kesme birim deformasyon oranı” elipsoidal halkası (histerezis) (Figueroa ve diğ. 1994; Liang, 1995)	29
Şekil 3.7: Numunenin yatay yönde makaslanması sırasında oluşan gerilme döngüsü ve bu döngüye ait sönümlenme oranı hesaplaması için kullanılan alan (taralı alan) ve ilgili bağıntı	30
Şekil 3.8: Dinamik basit kesme deney düzeneği	31
Şekil 3.9: Tekrarlı basit kesme deney düzeneğine ait çevre birimlerinden bazıları	32
Şekil 3.10: Dinamik basit kesme deney düzeneğinin üstten görünüşü (Bu düzenekte; 1D: sadece sağ yönlü piston dinamik hareketi uygularken, düşey piston numuneye sadece gerilme uygular. 2D: sağ ve sol yöndeki pistonlar dinamik hareket uygularken, düşey piston sadece gerilme uygular. 3D: her üç piston birlikte dinamik hareket uygulayabilir veya 2D ile benzer hareketi uygulayabilir. Pistonların hareketi, deney yöntemlerindeki sınırlamalar dahilinde uygulayıcının tercihinin bırakılmıştır)	32
Şekil 3.11: Dinamik basit kesme deney düzeneğinin karşıdan görünüşü (1D: sağ yönlü piston çapraz yönde doğrusal hareket; 2D: yatay -sol ve sağ-pistonlar- birlikte i) doğrusal, ii) elipsoidal veya iii) dairesel hareket üretmektedir; 3D: düşey piston gerilme veya devirsel hareket uygulamaktadır. 1D ve 2D deneylerinde düşey piston, numuneye sadece gerilme uygulamaktadır)	33
Şekil 3.12: Dinamik basit üç eksenli deney düzeneğinin sol yandan-çapraz görünüşü (CO <sub>2</sub> gazı ile doyurma işlemi sırasında çekilmiştir. Bu işlemde sonra mevcut bağlantılar; i) suya doyurma bağlantıları ve ii) sıvılaşma deneyi ölçüm düzeneği bağlantıları ile değiştirilmektedir)	34
Şekil 3.13: Deney yöntemi ve parametrelerinin sisteme tanıtıldığı ekran görüntüsü (Bu deneyde; 1D: Bir yönlü hareketi; Amplitude: kesme birim deformasyonunun, numune yüksekliği-mm cinsinden değerini; 0,1 Hz frekans: 1 devirsel hareketin 10 s’de bir gerçekleştiğini belirtmektedir)	35
Şekil 3.14: Sıvılaşma deneylerinde kullanılan kum, silt ve kum+silt karışımları	36
Şekil 3.15: Kumların sıvılaşma deneyleri için öngörüsü yapılan arazi şartları: Dikme kesit, derinliğe bağlı düşey gerilme ve gözenek su basıncı değişimini göstermektedir	37



Şekil 4.16: Kum için tane boyu dağılım grafiği	39
Şekil 4.17: Silt için tane boyu dağılım grafiği	40
Şekil 4.18: Özgül ağırlık deneyinde kullanılan piknometre	40
Şekil 4.19: Kum içerisine katılan silt oranı (%) - Boşluk oranı ( $e_{min}-e_{maks}$ ) grafiği (grafikte alt alta gelen noktalarda, kum+silt'in karışım oranları aynıdır)	42
Şekil 4. 20: Sıvılaşma deneyleri için numune hazırlama aparatı ve bazı işlem aşamaları (kumlarda deney örneği hazırlanmasına örnek)	43
Şekil 4.21: Sıvılaşma deneyleri için numune hazırlama aparatı ve bazı işlem aşamaları (siltlerde deney örneği hazırlanmasına örnek)	44
Şekil 4.22: Sıvılaşma deneyleri yapılan kum örneklerine ait bir deneyin ekran görüntüsü (bu örnek deneyde numune çapı- $\emptyset$ : 100 mm, görelî sıklık-Dr: %70, düşey gerilme- $\sigma_v$ : 100 kPa, gözenek su basıncı-u: 50 kPa; kesme birim deformasyonu oranı: %5'tir. Grafiklerin türü ve sayısı, kullanıcı isteğine bağılı olarak değışmektedir)	46
Şekil 4.23: Sıvılaşma deneyleri yapılan kum+silt numunesine ait bir deneyin ekran görüntüsü (Bu örnek deneyde numune çapı- $\emptyset$ : 100 mm, görelî sıklık-Dr: %50, düşey gerilme- $\sigma_v$ : 100 kPa, gözenek su basıncı-u: 50 kPa; kesme birim deformasyonu oranı- $\gamma$ : %5'tir. Bazı deneylerde, aşırı boşluk suyu basıncının geliştiğı, taban ve tavan basıncının farklı değerlerde olduğı gözlenmiştir.)	47
Şekil 4.24: Bir çevrimde sıvılaşma için sistemin kullandığı-açığa çıkan enerjiye ( $\text{kJ/m}^3$ ) ait sütun grafik	48
Şekil 4.25: Bir deneyde çevrimler sırasında sıvılaşma için sistemin kullandığı-açığa çıkan enerji ( $\text{kJ/m}^3$ ) grafiğı (sıvılaşmanın başlaması için büyük enerji harcanırken, devam etmesi daha küçük enerjilerle mümkün olmaktadır.	48
Şekil 4.26: Deneylerden elde edilen verilerin "Boşluk oranı-Düşey gerilme (kPa)" faktörlerine bağılı olarak hesaplanan sıvılaşma enerjisi değerlerinin üç boyutlu grafiğı	49
Şekil 4.27: 100 kPa düşey gerilme etkisinde, laboratuvarında belirlenen sıvılaşma enerjisi ile Liang (1995)'e göre hesaplanan enerji değerinin karşılaştırılması	50
Şekil 4.28: 200 kPa düşey gerilme etkisinde, laboratuvarında belirlenen sıvılaşma enerjisi ile Liang (1995)'e göre hesaplanan enerji değerinin karşılaştırılması	51

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan kumun tane boyu dağılımı .....	38
Tablo 4.2: Çalışmada kullanılan siltin tane boyu dağılımı. ....	39
Tablo 4.3: Kum ve Kum+Silt karışım oranları için numunelerin gevşek durumdaki bazı özellikleri .....	41
Tablo 4.4: Kum ve Kum+Silt karışım oranları için numunelerin sıkı durumdaki bazı özellikleri.....	41
Tablo 4.5: Deneylerde kullanılan kum ve kum+siltin bazı özellikleri ve rölatif sıkılığa göre hesaplanan numune miktarları.....	42
Tablo 4.6: Sıvılaşma deneylerine ait veri dosyası kayıt örneği (dosya, Geozip adlı programda açılarak *.txt uzantılı dosyaya dönüştürüldükten sonra *.xls uzantılı yeni bir dosya olarak açılmaktadır. Daha sonra, elde edilen verilerle, sıvılaşma enerjisi hesaplamaları yapılmaktadır).....	47
Tablo 4.7: Dünyadaki bazı sismik olaylar ve bazı özellikleri ile 1 m <sup>3</sup> zemine aktarılan enerji (kJ/m <sup>3</sup> ) değeri (M <sub>w</sub> : moment büyüklüğü, a <sub>maks</sub> : pik yatay yer ivmesi, R: deprem üreten faya olan uzaklık, W: yapılan iş, *:M <sub>L</sub> 'dir) (Kayabalı ve diğ. 2018) .....	50

## SEMBOL LİSTESİ

<b>Sembol</b>	<b>Açıklama</b>
$\sigma_v$	: Düşey gerilme ( $\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$ )
$\sigma_v'$	: Efektif -etkin- düşey gerilme ( $\text{kPa}$ )
$\tau$	: Kesme (kayma) gerilmesi ( $\text{kPa}$ )
%	: Yüzde
$\rho$	: Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )
$\gamma$	: Birim hacim ağırlığı ( $\text{kN/m}^3$ )
$\Sigma$	: Toplam(ı)
u	: Boşluk suyu basıncı ( $\text{kPa}$ )
e	: Boşluk oranı (%)
$e_{\min}$	: Minimum (en küçük) boşluk oranı (%)
$e_{\max}$	: Maksimum (en büyük) boşluk oranı (%)
$\rho_{\min}$	: Minimum (en küçük) yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho_{\max}$	: Maksimum (en büyük) yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )
$\gamma$	: Kesme (kayma) birim deformasyon oranı (%)
$\sigma'_{\text{ort}}$	: Başlangıçtaki ortalama etkin çevre basıncı ( $\text{kPa}$ )
$\delta W$	: Sıvılaşmayı tetiklemek için gerekli olan gerilme enerji ( $\text{J/m}^3$ )
W	: Sıvılaşma enerjisi (zeminin birim hacminde biriken enerji) ( $\text{kJ/m}^3$ )
1-D	: Tek yönlü (deney)
2-D	: İki yönlü (deney)
3-D	: Üç yönlü (deney)
n	: Sıvılaşmaya ulaşılan kadar kaydedilen okuma sayısı (tekrarlanma sayısı)
n	: Porozite (%)
$\emptyset$	: Çap (mm)
$D_r$	: Rölatif (görel) sıkılık (%)
$G_s$	: Özgül yoğunluk (özgül ağırlık) (birimsiz)
Hz	: Hertz (= frekans birimi)
$S_r$	: (Suya) Doygunluk oranı (%)
$D_{10}$	: Zemin danelerinin %10'unun geçtiği elek çapı (mm)
$D_{30}$	: Zemin danelerinin %30'unun geçtiği elek çapı (mm)
$D_{60}$	: Zemin danelerinin %60'ının geçtiği elek çapı (mm)
$D_{50}$	: Ortalama dane çapı (mm)
$\text{CO}_2$	: Karbondioksit (gazı)
ASTM:	Amerika Deney Yöntemi Standardı
LSFB	: Lower San Fernando Barajı
$\mu$	: Mikron ( $= 10^{-3}$ )
R	: Korelasyon katsayısı
$R^2$	: Korelasyon katsayısının karesi
$C_u$	: Üniformluk katsayısı
$C_c$	: Derecelenme katsayısı

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında büyük destek ve teşviklerini gördüğüm tez danışmanım, Dr. Öğr. Üyesi Turgay Beyaz'a;

Eğitim hayatım boyunca mesleki gelişmemde destek olan, bilgi ve birikimlerini paylaşan bütün hocalarıma;

Tez çalışmam sırasında, çeşitli şekillerde desteklerini gördüğüm bütün arkadaşlarıma;

Fikir ve önerileri ile tezimin şekillenmesine katkıda bulunan değerli jüri üyeleri Doç. Dr. Levent Selçuk'a ve Doç. Dr. Ali Bülbül'e;

en içten dileklerle teşekkür ederim.

Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde gerçekleştirilen bir yüksek lisans tezi olan bu çalışmaya maddi destek veren Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (PAÜ-BAP) Koordinatörlüğü'nün ve PAÜ-FBE'nin yönetici ve çalışanlarına;

Bu yüksek lisans tezi kapsamındaki bütün laboratuvar deneyleri Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ile Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)'nin laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları katkıdan dolayı; Ankara Üniversitesinin ilgili kurum ve kuruluşlarının yönetici ve çalışanlarına ile özellikle Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Jeoloji Müh. Bölümünden Sayın Prof. Dr. Kamil Kayabalı'ya ve Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Jeoloji Müh. Bölüm Başkanı ve YEBİM Müdürü olan Sayın Prof. Dr. Yusuf Kağan Kadioğlu'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında, bana sabırla katlanan, maddi ve manevi destek olan canım aileme; anneme, kardeşim Samet'e, sevgili eşime, biricik oğlum Yiğit Veli'ye ve isimlerini saymadığım ailemizin tüm fertlerine en içten sevgi, saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

# 1. GİRİŞ

Sıvılaşma; depremlere, nükleer patlatmalara ve bazı volkanik aktivitelere bağlı olarak açığa çıkan güçlü yer sarsıntılarının etkisiyle, suya doymun kumlu zeminlerde gözlenen bir olgudur. Sıvılaşma, mühendislik yapısına bağlı olarak farklı hasarlara neden olabilmektedir. Sıvılaşma olgusunu anlayabilmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Sıvılaşma mekanizmasını anlamak, zeminlerin sıvılaşma duyarlılığını belirlemek veya sıvılaşma enerjisini hesaplayabilmek için çok yönlü araştırmalar halen devam etmektedir.

Sıvılaşma, deprem etkisiyle suya doymun gevşek zeminlerde görülen ve zeminin dayanımını kaybetmesine sebep olan bir olaydır (Şekil 1.1). Sıvılaşmanın gerçekleştiğinin rapor edildiğii bazı depremler: 1964-Alaska, 1964-Niigata, 1971-San Fernando, 1989-Loma Prieta, 1999-İzmit Körfezi-Gölcük (Mollamahmutoğlu ve diğ. 2003) ve 1999-Bolu-Düzce (Jefferies ve Been 2016), 1995-Kobe, 1998-Ceyhan ve 2011- Tohoku-Büyük Doğu Japonya (Uncoh ve diğ. 2012) depremleridir.



1964-Niigata (Japonya)



1989-Loma Prieta (USA)



1995-Kobe (Japonya)



1999-Gölcük-Adapazarı (Türkiye)

Şekil 1.1: Sıvılaşmanın gözlemlendiğii bazı depremlere ait görüntüler

Sıvılaşmanın suya doymun kumlu, siltli veya kohezyonsuz zeminlerde meydana geldiği kabul edilmektedir. Su, kum ve/veya silt taneleri arasındaki gerilmeyi direkt olarak etkileyen basınca gözenek suyu basıncı denilmektedir. Herhangi bir dinamik hareketten önce gözenek suyu basıncı düşüktür. Deprem anında açığa çıkan sarsıntılar nedeniyle zemin taneleri hareketlenerek, gözenek suyu basıncının artmasına sebep olabilmektedir. Su basıncındaki artış nedeniyle, efektif gerilme sıfıra doğru düşmekte, zemin daneleri arasındaki temas kuvveti (gerilme değeri) kaybolmakta ve zemin dayanımını kaybederken taşıma gücü de sıfıra doğru hızla azalmaktadır. Bu olaya/olguya sıvılaşma denmektedir. Sıvılaşma esnasında, zeminin taşıma gücü genelde azalmakta ve üst yapıda farklı şekillerde tahribata veya yapının yenilmesine-devrilmesine neden olabilmektedir.

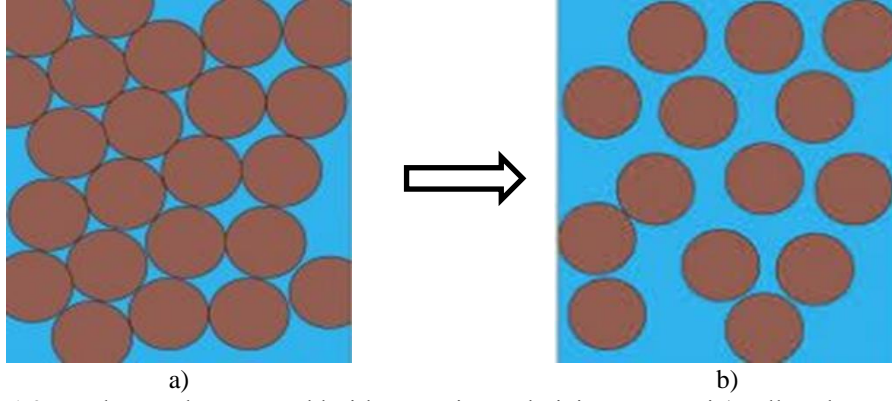
Sıvılaşmanın, killi-siltli zeminlerde (Gratchev ve diğ. 2006), çakıllı zeminlerde de (Zhou ve diğ. 2020) gözlendiği rapor edilmesine rağmen, genel olarak yalnızca suya doymun kumlu-siltli veya kohezyonsuz zeminlerde meydana geldiği kabul edilmektedir. Özellikle, gevşek alüvyoner zeminleri ifade eden ve Pliyosen-Kuvaterner çökelleri olarak adlandırılan siltli ve/veya killi kum zeminler, suya doymun olmaları durumunda; sıvılaşma açısından oldukça riskli alanlardır (Selçuk ve Çiftçi 2007). Yerleşim yerlerinin zeminini oluşturan, farklı tane şekline ve çapına sahip çimentosuz siltli-killi kum birimlerin kalınlıkları ve yanal yayılımı arttıkça sıvılaşma riskine paralel olarak, can ve mal kayıplarının da artmasına neden olmaktadır (Selçuk ve diğ. 2010). Kumlu zeminlere sahip yerleşim alanlarındaki zemin şartları dikkate alındığında hem depreme bağlı devirsel yüklerin hem de zeminin özelliklerinin etkisiyle ortaya çıkan zemin büyütmesi, sıvılaşma vb. gibi olgular; yerleşim alanlarındaki hasarın ve kayıpların artmasına neden olabilmektedir (Selçuk ve Aydın 2012). Ayrıca nehirler, göller, koylar veya deniz(ler) gibi suya doymun zeminlerde (alanlarda) sıvılaşmanın daha sık veya daha fazla gözlenebileceği kanaati yaygındır. Bu gerekçeye bağlı olarak, liman ve iskele gibi mühendislik yapı temellerinin çoğunun sıvılaşmaya yatkın alanlara inşa edildiği söylenebilir. Bu gibi yapıların birçoğu geçmiş depremlerde sıvılaşmanın olumsuz etkisine maruz kalmış ve/veya hasar görmüştür (Yamaguchi ve diğ. 2012). Liman veya iskele yapılarının büyük bölümünde istinat/rıhtım duvarları inşa edilmektedir (Çetin ve diğ. 2016). Bu tür bir yapı zemininin sıvılaşması; duvarda bir itki kuvvetinin oluşmasına, duvarın daha zayıf olan deniz, göl veya nehir tarafına eğilmesine neden olabilmektedir. Sıvılaşma, köprü ve

benzeri ulaşım yapılarını da tahrip etmektedir. Ulaşım yapılarında meydana gelen hasarlar, afetlerden sonraki yardım, arama-kurtarma çalışmalarını zorlaştırabilir veya engelleyebilir. Bu ise ekonomik kayıplarda önemli artışa yol açar.

Herhangi bir doğal afetin oluşturacağı etkileri önceden tahmin edebilmek veya oluşabilecek zararları en aza indirebilmek, o bölgenin jeolojik ve tektonik özelliklerini iyi tanımlamaktan geçmektedir. Bu da yapılaşma öncesinde, zeminin mühendislik özelliklerinin yanı sıra, olası tehlike ve risklerinin analiz edilmesiyle sağlanabilir (Nalbantçılar ve diğ. 2019<sup>a</sup>).

Deprem bölgelerinde, kil içeriğine sahip ve yeraltı su seviyesi yüzeye yakın alüvyon zeminler de, yapılaşma için önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu tür alanlarda, deprem kaynaklı sıvılaşma ve oturma problemleri ile karşılaşılması muhtemeldir (Nalbantçılar ve diğ. 2019<sup>b</sup>).

Sıvılaşmayı anlayabilmek ve tanımlayabilmek için, bir depremden önce zemin profilinde var olan koşulları belirlemek önemlidir. Zemin tabakaları, tanelerin yığılması ile oluşur. Zemindeki taneler incelendiğinde her birinin diğer komşu tanelerle temas ettiği, dokanak oluşturduğu görülür. Zemin tanelerine etki eden dış ağırlık, zemin taneleri arasında bir temas kuvveti (gerilme) oluşturur. Sıvılaşma, gevşek, suya doymun kumlu bir zeminde tekrarlı yüklemeler sonucu zemin taneleri arasındaki temas kuvvetinin (gerilmenin) azalmasına bağlı olarak gelişir. Gevşek haldeki zemin taneleri tekrarlı (dinamik) davranış sırasında daha sıkı bir şekilde paketlenme davranışı sergilerler. Depremin oluş süresinin kısalığı ve taneler arasındaki kanalların darlığı zemin bünyesindeki suyun drenajını engeller. Yeraltı suyu basıncı artarak zemindeki tanelerin birbirine yaklaşmasını (sıkılaşmasını) engelleyen bir fonksiyon kazanır. Bu esnada, zemin içindeki su basıncının artması, zemin taneleri arasındaki temas gerilmesinin azalmasına yani zemin tanelerinin birbirinden ayrılmasına etki eder (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006; Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Sıvılaşma olgusu gerçekleşirken zemin tanelerinin gevşemesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006).

Literatürde yapılan sıvılaşma 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. Ancak, dinamik üç eksenli deney, yaygın olarak kullanılmasına rağmen sadece tek yönde kuvvet veya dinamik etki uyguladığı için (özellikle de düşey yönde kuvvet/yük/gerilme uyguladığı için) tarafımızca arazi yükleme koşullarını tam olarak modelleyemediği kabul edilmektedir. İçi boş silindirik burulmalı kesme deneyi ise arazi yükleme koşullarını iyi modellemesine rağmen numune hacmine göre yüzey alanının yüksek olması, numune üzerinde üniform olmayan radyal birim deformasyon uygulaması ve uzun numune yüksekliği sebebiyle boşlukların tekrar dağıtılmasına ve doğrusal 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 (sıkıştırılan) deney numunesi üzerine normal gerilme ve yatay yönde kayma gerilmesi uygulayabilmektedir. Yatay yönde kayma gerilmesi uygulayabilme özelliği eşsizdir ve devirsel basit kesme deneyine (cyclic simple shear test) özgüdür. Bu özelliği ile içi boş silindirik burulmalı kesme deneyinden (hollow torsional shear test) ayrılmaktadır. Ayrıca, küçük numune yüksekliği sebebiyle numunenin aktif kısmı içinde nispeten düzgün gerilme dağılımına sahiptir (Kammerer ve Pestana 2002).

Sıvılaşma analizlerinde enerjiye dayalı yaklaşımın; 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 ve 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 kapsamı 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).

Bu çalışma, kumlu zeminler içerisindeki "artan ince tane oranının (silt içeriğinin)" zeminin sıvılaştırma enerjisine bir etkisinin olup-olmadığının araştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu konuda gerçekleştirilmiş çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, önceki araştırmaların laboratuvar çalışmalarında genel olarak:

i) içi boş burulmalı halka deneyi, rezonant kolon deneyi, bender elemanları deneyi vb. düzenekler,

ii) içerisine maksimum % 45 arasında silt katılmış kum numuneleri,

iii) bazı deneylerde silt yerine kil katılmış kum numuneleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak;

i) tekrarlı basit kesme deney düzeneği,

ii) temiz kum içerisine non-plastik, kohezyonsuz siltten % 15, %30, %45, %60, %75 ve %90 oranında katılarak hazırlanmış altı ayrı kum+silt karışımı kullanılmıştır.

iii) kullanılan silt, kuvars kökenli olup silt-kil tane boyuna getirilinceye kadar öğütülmüştür. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda; kum içerisine katılmış artan silt içeriğinin zeminlerin sıvılaştırma enerjisi

üzerindeki etkisi laboratuvarında devirsel basit kesme deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen sıvılaşma deneyleri ile ortaya konmuştur.

## 1.1 Amaç

Bu çalışma; 1) Kumlu zeminler içerisindeki "artan silt içeriğinin" zeminin sıvılaşma enerjisine bir etkisinin olup-olmadığının araştırılması,

2) Kum içerisindeki silt içeriğinin zeminlerin sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisinin tekrarlı basit kesme deney düzeneğiyle ortaya konması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

## 1.2 Özgün Değer

Bu tez çalışmasıyla, kumlu zeminler içerisindeki "artan ince tane (silt oranının" zeminlerin sıvılaşma enerjisine ne tür bir etkisinin olduğu araştırılmaya çalışılmıştır. Deneylerden elde edilen verilerin grafiksel ve istatistiki açıdan değerlendirilmesi ve yorumlanması sonucunda, kumlu zeminler içerisindeki ince tane oranının artışının zeminlerin sıvılaşma enerjisi üzerindeki etkisi ortaya konmasına çalışılmıştır. Kum ve silt gibi kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma enerjisinin laboratuvar teknikleriyle belirlenmesinde; tekrarlı üç eksenli deney, tek eksenli çevrimsel basit kesme deneyi ve çevrimsel burulmalı halka deneyi gibi birçok deney düzeneği kullanılmaktadır (Şekil 1.3). Bu araştırma, özel olarak imal edilmiş olan "üç yönlü tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.4). Bu düzeneğe, meydana gelmiş ve kaydedilmiş deprem ivme kaydı kullanılarak dinamik hareket yapması sağlanabilmektedir. Bu şekilde hareket verilerek deney yapılabilmesi onu farklılaştırmakta ve özgünleştirmektedir. Artan silt oranının, sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisinin tahmininde kullanılacak olan bu yöntemin diğer yöntemlere veya deney düzeneklerine göre daha güvenilir olacağı ve daha hassas sonuçlar vereceği düşünülmektedir.



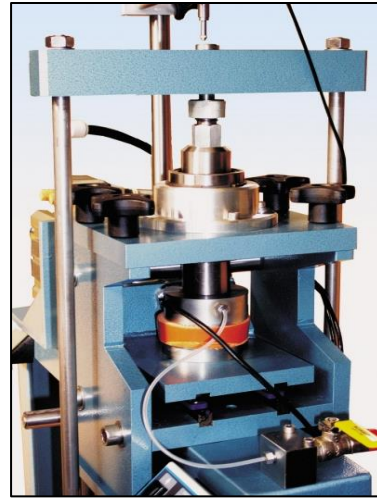
a) Dinamik üç eksenli deney düzeneği



b) Silindirik burulmalı kesme deney düzeneği



c) Rezonant kolonu deney düzeneği



d) Dinamik basit makaslama deney düzeneği (1-D)

Şekil 1.3: Sıvılaşma deney düzeneklerine örnekler

Birçok araştırmacı tarafından, ince ve orta kumlar ile düşük plastisiteli ince taneler içeren kum çökellerinin sıvılaşmaya en duyarlı zemin türleri olduğu ifade edilmesine rağmen; bu tür zeminlerin sıvılaşma enerjisi ile ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. Daha önce yapılmış olan araştırmalarda ise ince tane içeriğinin (oranının) sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisi yeterince araştırılmamıştır. Dolayısıyla, elde edilen verilerin karşılaştırılması ve yorumlanması deney sırasında elde edilen verilerle yapılmaya çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında öncelikle, hiçbir şey katılmamış denizel bir kum türü üzerinde "referans alınacak" deneyler yapılmıştır. Daha sonra içindeki ince tane oranı arttırılan 6 ayrı kum+silt karışımı ile deneyler yapılması bu çalışma için bir diğer özgün değerdir. Çünkü daha önce bu kadar küçük aralıklarda ve hassas oranlarda deneyler yapılmamıştır. Çalışma sonucunda elde edilecek verilerin/bulguların hesaplanması, grafiğe aktarılması ve yorumlanmasına bağlı olarak; artan ince tane yüzdesinin kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisine olan etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır. Silt içeriğinin kumların sıvılaşma enerjilerine olan etkisi, değişik araştırmacıların önerdiği formüllerle hesaplanabilmektedir. Ancak, ilk

defa DBKDD'den elde edilen bulgular kullanılarak hesaplanması bu çalışmaya ayrı bir özgün değer katmaktadır. Ayrıca, bu çalışmayla elde edilen bulgular, gelecekte yapılacak ileri düzey araştırmaların ilk adımı olacak ve önemli bir altyapı verisi sağlamış olacaktır.



şekil 1.4: Üç yönlü tekrarlı basit kesme deney düzeneği (3D)

### 1.3 Yaygın Etki – Katma Değer

Laboratuvarda, kum+silt karışımının sıvılaşma enerjisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, kum içine farklı oranlarda katılan siltin sıvılaşma enerjisi üzerine etkisi dikkate alınmıştır. Bu durumu araştırmak maksadıyla, bir miktar kumlu zemin örneği kullanılarak, ön denemeler (ilk deneyler) gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, silt içeriğinin artmasına bağlı olarak kumların sıvılaşma enerjisinin değiştiği belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasındaki temel amaç kum+silt karışımından oluşan örnekler üzerinde deneyler yaparak sıvılaşma enerjisi gibi birtakım bulguları elde etmektir. Deney aşamalarından her birinde, kum içerisine katılan silt oranını arttırarak; değişik göreliliklerde (Dr) numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, birbirinden değişik efektif gerilme değerlerinde deneye tabi tutulmuştur. Farklı gözenek basıncı değerlerine maruz bırakılan kum+silt örnekleri, % 5 kesme birim deformasyona maruz bırakılmıştır. Sunulan bu parametrelere bağlı olarak, kum+silt karışımından oluşan zeminlerin sıvılaşma enerjisinin değişimi araştırılmıştır. Bu tez çalışması bir tür kum ve farklı oranlarda hazırlanmış olan kum+silt karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Artan ince tane içeriğinin kumların sıvılaşma enerjisine olan etkisinin daha hassas değerlendirilebilmesi amacıyla aynı veya benzer çalışmanın farklı şekil ve boyuttaki kum türleri kullanılarak deneyler yapılması araştırmanın hassasiyetini arttıracaktır.

#### **1.4 Yöntem Seçimi**

Kohezyonsuz zeminler olarak kabul edilen kum ve silt gibi zeminlerin, laboratuvar ortamında sıvılaşma potansiyelinin (veya enerjisinin) belirlenmesinde çok sayıda deney düzeneği kullanılmaktadır. En çok başvurulan yöntemler; dinamik üç eksenli deney (bir eksen: 1-D, genelde düşey yönde hareket), rezonant kolon deneyi, (rezonant column test; içi boş halka deneyi -hollow cylinder test- düzeneğinde yapılmaktadır), tekrarlı-burulmalı kesme deneyi (torsional shear test), bender elemanlar deneyi (bender element test) (SzilvÁgyi ve diğ. 2016) ve devirsel basit kesme deneyidir (yatay yönde bir eksen: 1-D veya yatay yönde iki eksen: 2-D hareket). Bu yöntemlerin bir kısmında hesaplamalar dolaylı şekilde yapılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneyler, yukarıda sıralananlardan farklı olarak üç yönlü “Devirsel Basit Kesme Deney Düzeninde” (DBKDD) gerçekleştirilmiştir. Bu düzeneğin üç yönde hareket yeteneği bulunmaktadır. Ayrıca, gerçek bir depreme ait ivme kaydı kullanılarak deney düzeninde hareket/sarsıntı/titreşim oluşturularak deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum kullanılan deney düzenini diğerlerine göre daha özgün hale getirmektedir. Bu özelliği sayesinde diğer deney düzeneklerinden ayrılmaktadır. Sıralanan özelliklerinden dolayı bu yöntemin, “artan ince tane oranının, sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisinin tahmininde” diğer yöntemlere göre daha güvenilir olacağı ve daha hassas sonuçlar vereceği ön görüldüğü için deneylerin bu yöntemle yapılması tercih edilmiştir.

## 1.5 Deney Parametreleri

Birçok araştırmacı tarafından, sıvılaşmaya en duyarlı zemin türlerinin ince ve orta kumlar ile düşük plastisiteli ince taneler içeren kum çökellerinin olduğu (Ishihara 1985) ifade edilmektedir. Bu tür zeminlerin sıvılaşma duyarlılığı (veya sıvılaşma indeksi, sıvılaşma hassasiyeti) ile ilgili yoğun araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, sıvılaşma enerjisi üzerine yeterli çalışma yapılmamıştır. Daha önce yapılmış olan araştırmalarda ise ince tane içeriğinin (oranının) sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisi yeterince araştırılmamıştır. Dolayısıyla, elde edilen verilerin karşılaştırılması ve yorumlanması deney sırasında elde edilen verilerle yapılacaktır. Tez çalışması bulgularının tatmin edici şekilde kıyaslanması ve değerlendirilmesi amacıyla ince tane içeriği değişik yüzde oranlarında arttırılarak deneyler yapılmasının daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesini sağlayacağı kanaati hasıl olmuştur. Bu amaçla, kum içerisine; %15, %30, %45, %60, %75 ve %90 (=kum: %0 - silt: %100) oranlarında ince tane (silt) eklenerek deneyler yapılmıştır. DBKDD düzeninde, artan silt içeriğinin bir kum zeminin sıvılaşma enerjisine etkisinin araştırılması çalışmanın ilk basamağıdır.

Bu çalışma kapsamında, öncelikle hiçbir şey katılmamış denizel bir kum türü üzerinde "referans alınacak" deneyler yapılmıştır. Daha sonra kum içindeki silt içeriği arttırılarak: altı ayrı kum+silt karışımı elde edilmiş ve bu örnekler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ana malzemeler olan;

i) Kum: %30, %40, %50, %60 ve %70 görelî sıklıkta, 50 kN/m<sup>2</sup> ile 200 kN/m<sup>2</sup> düşey gerilme ve 25 kN/m<sup>2</sup> ile 100 kN/m<sup>2</sup> gözenek su basıncı değerlerinde;

ii) Kum+Silt karışımı: %30, %40, %50, %60 ve %70 görelî sıklıkta, 50 kN/m<sup>2</sup>, 100 kN/m<sup>2</sup>, 200 kN/m<sup>2</sup> düşey gerilme ve 25 kN/m<sup>2</sup>, 50 kN/m<sup>2</sup>, 100 kN/m<sup>2</sup> gözenek su basıncı değerlerinde deneye tabî tutulmuştur.

Bütün deney numuneleri, % 5 kesme birim deformasyonu oranında (bu değer bilgisayar yazılımına her bir deney için numunenin yüksekliği ile orantılı olarak, milimetre-mm birim türünde girilmektedir) ve 0,1 Hz frekansta harekete maruz bırakılmıştır. Bütün örnekler, 100 mm çaplı numune hazırlama aparatı ile hazırlanmıştır. Deney sonucunda elde edilen verilerin/bulguların hesaplanması, grafiğe aktarılması ve yorumlanmasıyla; artan ince tane yüzdesinin kumlu zeminlerin sıvılaşıma enerjisine olan etkisi ortaya konmuştur.

Buna bağlı olarak, 1. aşamada: sadece kum numunede 5 ayrı görelî sıklık ve 2 ayrı düşey gerilme-gözenek su basıncı şartlarında 10 deney; 2. aşamada: kum+silt karışımında 7 ayrı karışım oranında, 5 ayrı görelî sıklık ve 3 ayrı düşey gerilme-gözenek su basıncı şartlarında 105 deney yapılmıştır. Her iki aşama için toplam 115 deney yapılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER – ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zemin mekaniğinde uzun zamandan beri, deprem gibi dinamik yüklerin etkisine maruz kalan veya kalma riski olan kum çökelleri, zayıf zemin olarak kabul edilmektedir. Kohezyonsuz olarak kabul edilen kum(lu) zeminlerin, dinamik yüklerin (dinamik kuvvetlerin) etkisine maruz kaldığındaki tepkisini (veya davranışını); tane boyu dağılımı, görelî sıklık ( $D_r$ ) oranı, çevirim sayısı, gözenek su basıncı artışı/değişimi ( $\Delta u$ ), gerilme, kesme birim deformasyonu oranı, olası şekil değiştirme vb. gibi parametreler etkilemekte ve/veya belirlemektedir. Yaklaşık 1970'li yıllardan beri kumların sıvılaşma potansiyeli/enerjisi üzerinde yoğun araştırmalar yapılmıştır.

Sıvılaşma olgusu, gözenekleri kısmen veya tamamen suyla dolu kumlu zeminde meydana gelmektedir. Ancak, çok sayıda bilim insanı kumlu zeminlerin sıvılaşabilme enerjisini kuru şartlarda çalışmıştır. Türetilen basit formüllerle gözenek su basıncındaki farklılaşmayı belirlemeye odaklanmışlardır.

Doğal boşluk oranı kritik boşluk oranından büyük olan zeminlerin boşluk oranı tekrarlı yükler (deprem gibi) etkisinde kritik boşluk oranı seviyesine inme eğiliminde olur, yani zemin yeniden yerleşerek sıkılaşır. Suyu doygun veya yarı doygun zeminlerin (tekrarlı yükler etkisiyle) sıkılaşması sırasında taneler arasındaki boşluklar azalmakta ve boşluğa yerleşmiş olan suyun sıkışmasına neden olmaktadır. Sıkışma katsayısı çok küçük olan suyun drene olması beklenir. Ancak, depremin uzun olmayan zaman aralığı (süresi), gözenek suyunun tahliyesi için yeterli olmamaktadır. Buna bağlı olarak, daneler arasındaki suyun basıncı artar. Gözenek su basıncında meydana gelen artış efektif gerilmenin azalmasına etki eder. Efektif gerilmeye bağlı olarak kesme dayanımını kaybeden zemin, sıvı benzeri akışkan davranış sergiler. Zeminin gösterdiği bu davranışa sıvılaşma denmektedir. Bunun sonucu olarak zeminlerde beklenenin dışında bir oturma (diğer bir deyişle görelî sıklıkta ve yoğunlukta artış) meydana geldiği kabul edilmektedir (Seed ve Lee 1966; Hyodo ve diğ. 1994).

Depremlerin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin, zeminin fiziko-mekanik ve/veya jeoteknik özelliklerine bağlı olarak oldukça farklı deformasyonlara neden olduğu ve zeminin dayanım parametresinin azalmasına etki ettiği (Altun ve Ansal 2003) öteden beri bilinmektedir. Zeminlerin türü, özellikleri ve dayanım kaybı dikkate alındığında; zeminler devirsel yüklemeler karşısında birbirinden değişik



tepkiler göstermektedir. Birbirlerinden farklı gerilme-birim deformasyon davranışı sergilemektedir. Bilhassa suya doymuş gevşek kumlar, hem hızlı statik ve hem de dinamik yükleme koşullarında aşırı boşluksuyu 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).

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 (Green 2001; Alavi ve Gandomi 2012; Zhang ve diğ. 2015) olarak sıralanabilir.

İlk defa Seed ve Idriss (1971) ile Whitman (1971) tarafından önerilen **gerilmeye dayalı yöntem (Green 2001)**; en yaygın kullanılan sıvılaşmayı değerlendirme yöntemidir. Basitleştirilmiş bu yöntemde, gerçek deprem hareketini laboratuvardaki harmonik yükleme koşullarıyla ilişkilendirmek için eşdeğer gerilme ve döngü sayısı tanımlanmaktadır (Seed ve Idriss 1971). Bu yöntem genellikle arazi deney sonuçları ile laboratuvar deney sonuçlarını kullanmaktadır (Seed ve diğ. 1975). İvme vektörel bir büyüklük olup üç bileşeni vardır. Gerilme temelli yaklaşım iki yatay ivmeden ( $a_{max}$ ) sadece büyük olanını dikkate almaktadır. Bazı araştırmacılar düşey bileşenin de dikkate alınması gerektiğini savunmaktadır (Atkinson 1986; Law ve diğ. 1990). Ancak, bu yöntemde; depremin büyüklüğü, yüzeydeki maksimum yatay yer ivmesi ve kaynak mesafesi gibi parametreler yöntemdeki belirsizlikler olarak kabul edilmektedir (Youd ve Idriss, 2001). Bu yöntemdeki esas ölçüt, döngü sayısı ve kayma gerilmesi düzeyidir. Seed ve diğ. (2001), bunun için uygulanan tekrarlı yükün 15 döngüsü için oluşan kayma (kesme) gerilmesinin % 65'ini önermişlerdir. Ishihara ve Yasuda (1975) ise uygulanan tekrarlı yükün 20 döngüsü için kesme gerilmesinin % 65'inden ziyade % 57'sini önermişlerdir. Sıvılaşmayı Standart Penetrasyon Testi

(SPT) ve Koni Penetrasyon Testi (CPT) gibi arazi deneylerine bağılı olarak da belirlemek için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir (Çetin ve diğ. 2004; Boulanger and Idriss 2012; Moss ve diğ. 2006). Gerilmeye dayalı yaklaşımla ilgili olarak bilgi birikiminin meydana gelen sıvılaşma olaylarındaki verilerle sürekli olarak artmasına ve buna bağılı olarak yöntemin güncellenmesine rağmen, bu yöntemdeki rastgele yükleme ile ilgili belirsizlikler halen devam etmektedir (Green 2001; Baziar ve Jafarian 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 Jafarian 2007; Alavi ve Gandomi 2012; Green 2001). Bu yöntem esas itibarıyla gözenek su basıncının, kum türüne, rölatif sıkılığa, 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 boşluksuyu 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 yöntem** ise zeminin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için ilk defa 1970'lerde gerilmeye dayalı yöntemle 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 boşluksuyu 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 bağılıdır (Aminia ve Noorzad 2018).

Sıvılaşıma analizlerinde enerjiye dayalı yaklaşımın; gerilmeye dayalı ve birim deformasyona dayalı yaklaşımlarla kıyaslandığında başlıca avantajları şöyle sıralanabilir:

1. Gerilmeye dayalı veya birim deformasyona dayalı yöntemlerin aksine enerjiye dayalı yöntemde histerezis (gerilme elipsoidi) alanı için kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu kullanıldığından, gerilme ve birim deformasyonun etkilerini birleştirebilmektedir. Bunun yanında, seçilen ortalama gerilme veya kesme birim deformasyonu seviyesine eşdeğer çevrim sayısını bulmak için kesme gerilmesinin zamansal ayrıştırılması gerekli değildir.
2. Kullanımında kesme birim deformasyonunu, gerilmeyi ve aynı zamanda malzeme özelliklerini de kapsamaktadır (Law ve diğ. 1990; Liang 1995).
3. Aşırı gözenek su basıncı ve kum üzerinde yükleme boyunca harcanan enerji arasında önemli derecede bir ilişki vardır ve bu ilişki matematiksel olarak ifade edilebilmektedir.
4. Diğer iki metodun aksine enerjiye dayalı yöntemde sıvılaşıma için harcanan enerjinin miktarı yükleme şekline bağımsız olduğu için rastgele yükleme ile deneyleri gerçekleştirmek daha kolaydır.
5. Enerjinin, yalnızca yer ivmesinin pik değerini kullanan gerilmeye dayalı yaklaşıma karşın yer hareketinin tüm spektrumunu göz önüne alan skaler bir nicelik olması (Baziar ve Jafarian 2007; Baziar ve diğ. 2011) nedeniyle; enerjiye dayalı yöntem, sıvılaşıma yenilmesine yol açan yer hareketlerinin tüm spektrumunu için açıklanabilir.
6. 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).

Sıvılaşıma enerjisini değerlendirmek için geçmişte yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bunların tamamını tanıtmak veya anlatmak çok zor olacağı için aralarından seçilmiş bazı çalışmalar özet olarak şöyle sıralanabilir:

Iwasaki ve diğ. (1978), rezonant kolon ve devirsel burulmalı kesme deney düzeneklerini kullanarak, iki (2) farklı yöntemle, dinamik yükler altında kumların kesme modülünü araştırmışlardır. Bu çalışmalarında, her iki deney düzenğinde, içi

boş silindir şeklindeki zemin örnekleri test edilmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak, kayma gerilmesi genliğindeki artış ile kesme modülündeki azalmayı tahmin etmek için basit bazı işlem önerisinde bulunmuşlardır.

Nemat-Nasser ve Shoko (1979), enerjiye dayalı modeli kullanarak kumlu zeminlerin sıkılaşması ve sıvılaşması arasındaki olguyu açıklayıcı bir matematiksel model önermişlerdir. Bu çalışmaya göre, kumların tane boyu dağılımı, sıkılaşmayı yani yoğunluğu ve dolayısıyla da sıvılaşmayı etkilemektedir.

Simcock ve diğ. (1983), aşırı boşluksuyu basıncı ve zemine uygulanan enerji arasında ilişkiyi açıklamak için üniform kumlarda bir dizi dinamik üç eksenli test gerçekleştirmiş ve aşırı gözenek su basıncı ile biriken enerji arasında fonksiyonel bir ilişki olduğunu ileri sürmüşler; bu ilişkinin, döngüsel deviatör gerilmeye kuvvetle bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Ishihara (1985), sıvılaşmaya en duyarlı zemin türleri olarak; ince ve orta kumlar ile düşük plastisiteli ince taneler içeren kum çökellerinin olduğunu belirtmektedir. Bunların, diğer zemin türlerine göre daha kolay sıvılaşabileceğini ifade etmektedir. Ancak, bu tür zeminlerin sıvılaşma enerjisi konusunda yeterli çalışma bulunmamaktadır.

Towhata ve Ishihara (1985), üç eksenli içi boş silindirik burulmalı kesme deney düzeneğini kullanarak; iç içe geçmiş iki silindirik tüp arasına yerleştirilmiş Toyoura kumunda drenajsız devirsel deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kumların ortalama tane boyu ( $D_{50}$ )= 0,17 mm olup ince tanelidir. Çalışmada, farklı kayma gerilmesi genliklerinde zeminin birim hacminde biriken enerji ile aşırı gözenek suyu basıncı arasında çok yakın bir ilişki olduğu gözlenmiştir.

Doğal zeminlerin çeşitli etkilerle tam doyumlukta olmadığını veya bazen kısmi doyumluk özelliği gösterdiği için kısmi doyum kumların burulmalı basit kesme deney yöntemiyle, drenajsız olarak sıvılaşma davranışlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri verilere göre, %70 doyumlukta (Sr) kum numunelerin, %100 doyumluğa (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 gözenek su basıncı değerini etkilediği ileri sürülmektedir (Yoshimi ve diğ. 1989<sup>a</sup> ve 1989<sup>b</sup>).

Yoshimi ve diğ. (1989b), Yoshimine ve Ishihara (1998), Okamura ve Noguchi (2009) gibi bazı araştırmacılar kısmen doymuş zeminlerin tekrarlı yükleme durumunda sıvılaşmasını ileri sürmüşlerdir. Ancak, Okamura ve Soga (2006), Okamura ve Noguchi (2009), Arab ve diğ. (2011)'nin çalışmalarında, kısmen suya doymuş 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 iç-içe geçmiş iki tüpten oluşan ince-uzun burulmalı silindir kullanmışlardır. Sıvılaşmaya ulaşmak için zemine aktarılan birim hacim başına enerji dağılımının, etkin çevre basıncı, görelî sıklık ve kesme birim deformasyonu genliği gibi parametrelerle bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir.

Liang (1995), Figuroa'nın yaptığı çalışmaya benzer şekilde; Reid Bedford (RB) kumu ve Lower San Fernando Barajı (LSFB) siltli kumu ile bir dizi kayma birim deformasyon kontrollü içi boş silindirik burulmalı kesme deneyi gerçekleştirmiştir. Sıvılaşma başlangıcı için birim hacim başına biriken enerji ve aşırı gözenek su basıncı arasındaki ilişki üzerinde kayma birim deformasyon genliğinin (oranının) bir etkisinin olmadığını tespit etmiştir. Rastgele yükleme durumu ile yaptığı çalışma sonucu Reid Bedford kumu için sıvılaşma enerjisini (iş türünden) denklem 1'de; Lower San Fernando Barajı siltli kumu için sıvılaşma enerjisini (iş türünden) denklem 2'de önermektedir. Liang'ın çalışmasında kullandığı Reid Bedford kumunun:  $e_{max}=0.85$ ,  $e_{min}=0.58$ ,  $D_{50}=0.26$  mm; LSFB siltli kumunun ince tane içeriği %28,  $e_{max}=1.22$ ,  $e_{min}=0.71$ ,  $D_{50}=0.13$  mm'dir. LSFB siltli kumu, 1994-Northridge depreminde oluşan kum kaynaması konilerinden alınmıştır.

$$\text{Log}_{10}(\delta W) = 2.062 + 0.0039\sigma'_{ort} - 0.0124D_r \quad (R^2 = 0.925) \quad (\text{Denklem-1})$$

$$\text{Log}_{10}(\delta W) = 2.484 + 0.00471\sigma'_{ort} - 0.000052D_r \quad (R^2 = 0.995) \quad (\text{Denklem-2})$$

Burada;

$\delta W$  : Sıvılaşmayı tetiklemek için gerekli olan gerilme enerji ( $J/m^3$ ),

$\sigma'_{ort}$ : Başlangıçtaki ortalama etkin çevre basıncı (kPa),

$D_r$  : Başlangıçtaki görelî sıklık (%)'dir.

Gelişen araştırma altyapısı ve artan bilgi birikimine bağılı olarak; sıvılaşma olgusu araştırmacılar tarafından; akma sıvılaşması ve tekrarlı hareketler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir (Kramer 1996).

Amini ve Qi (2000), sıvılaşma geçmişi olan alüvyoner ortamlarda bulunan fakat devirsel davranışı hala yeterince anlaşılabilen tabakalı ve homojen siltli kumlu zeminlerin, farklı silt içeriklerinde ve değışik çevre basıncındaki sıvılaşma davranışlarını karşılaştırdıkları bir çalışma yapmışlardır. Toplam 150 adet gerilme kontrollü elastik olmayan devirsel üç eksenli deney yapmışlardır. Her zemin türü için iki numune hazırlama yöntemi kullanmışlardır. Bunlar, nemli sıkıştırma veya tokmaktama (üniform zemin koşullarını temsil ettiği kabul edilir) ve sedimantasyon veya çökeltme (tabakalı zemin şartlarını temsil ettiği kabul edilir) yöntemleridir. Deneyleri, % 10 - %50 arasında değışen silt içeriğinde ve 50-250 kPa arasındaki çevre basınçlarında yapmışlardır. Sonuçta, iki farklı yöntemle deneyler için hazırlanan numunelerin zemin dokusunun tamamen farklı olmasına rağmen; tabakalı ve üniform zeminlerin sıvılaşma dirençleri arasında önemli bir farklılığın olmadığını tespit etmişlerdir.

Hadush ve diğı. (2000)'in yaptığı, sıvılaşmaya bağılı 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 gerektiğı kabul edilir. Yağış, yeraltı su seviyesindeki değışim, kapilerite vb. etkiyle zeminde kısmen suya doygun bölgelere rastlanabilmektedir.

Andrews ve Martin (2000), sıvılaşabilen ve sıvılaşabilen siltli zeminlerin birbirinden ayırt edilebilmesine yardımcı olan "temel" zemin parametrelerine dayanan basit kriterler ileri sürmüşlerdir. Kil içeriğı ve likit limit değıerini, sıvılaşabilen ve sıvılaşabilen siltli zeminlerin ayırt edilebilmesi için iki "temel" zemin parametresi olarak kabul edilmesini önermişlerdir. Kil içeriğinin ve likit limit değıerinin sıvılaşma duyarlılığının göreceli bir ölçüsü olabilecek ve bir "anahtar" parametre olarak kabul

edilebileceğini göstermek için örnekler vermişler; "kil içeriğini ve likit limit parametresini" bir arada kullanarak; siltli zeminlerin sıvılaşması için basit kriterler önermişlerdir.

Altun (2004), Altun ve Ansal (2005) çalışmalarında Ishihara ve Towhata (1983) tarafından tasarlanan "İçi Boş Silindirik Burulmalı Kesme" deney düzeneğinin daha yeni bir tasarımı üzerinde, kum numunelerinin gerilme-şekil değiştirme özelliklerini araştırdığını belirtmektedir. Çalışmada deneylerin farklı görelî sıklıklarda, drenajsız, 0,1 Hz frekanslı sinüzoidal yükleme şartlarında yapıldığı ve sıvılaşmanın gelişmesi için görelî 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 görelî 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.

Gratchev ve diğ. (2006), kil içeren zeminlerin devirsel yükler altındaki sıvılaşma potansiyelini halka-kesme düzeneği (ring-shear apparatus) ile incelemiştir. 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.

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 gözenek su basıncının düşük frekanslarda arttığını ifade etmişlerdir.

Papadopoulou ve diğ. (2010), 12 Kasım 1999 Bolu-Düzce (Türkiye) depreminden sonra, Düzce zeminlerinin devirsel ve dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma, monotonic ve devirsel üç eksenli ve aynı zamanda rezonant kolon deneyleriyle gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli deneyler, siltli kumların sıvılaşma direncinin ve kritik durum davranışlarının belirlenmesine izin verirken, rezonant-kolon testleri, kohezyonlu zeminlerin kesme modülünün ve sönümlenme oranının belirlenmesini sağlamaktadır.

Prakash ve Puri (2010), siltlerin ve silt-kil karışımlarının sıvılaşma davranışı belirlemek için belirli bir plastisite özelliği olan ince tane içeren bir dizi numune üzerinde, devirsel üç eksenli deneyler yapmıştır. Elde edilen bulgular, kum örneklerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Plastik ince tane içeriğine sahip suya doygun siltlerin, hem gözenek su basıncı artış hızı hem de devirsel yükün eksenel deformasyona etkisi açısından kumlardan farklı davrandığı bulunmuştur. Ayrıca, sonuçlar, siltlerin sıvılaşma duyarlılığının, plastisite indisi değerlerinin değişmesine bağlı olarak belirgin şekilde değiştiğini de göstermiştir. %2-4'lük bir PI aralığı için, siltin sıvılaşma direncinin plastisitede bir artış ile azaldığı bulunmuştur. Bazı yeni kriterler, ince taneli zeminlerin sıvılaşma duyarlılığına karar vermede yardımcı olabilir. Bununla birlikte, basit alan ve/veya laboratuvar testlerine dayanarak sıvılaşma duyarlılıklarının saptanmasında hala önemli bir karışıklık vardır.

Zehtab (2010), devirsel basit kesme deney düzeneğini kullanmıştır. Adapazarı zeminlerinden alınmış 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, laboratuvarda hazırladıkları kum örneğini arazideki-gerçek özelliklerine benzeştirmeye çalışmışlardır. Rölatif sıklığı %66 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 görelî sıklık ve farklı gerilme koşullarında drenajsız olarak "devirsel içi boş silindirik burulmalı kesme deneyi" yapmışlardır. Gerilme enerjisi kavramıyla, kumun sıvılaşma direncinin ve gözenek su basıncının hesaplanmasına çalışmışlardır. Deney sonuçlarına göre elde ettikleri veriler yardımıyla; sıvılaşma başlangıcı için birim hacimde biriken enerjinin, başlangıç efektif gerilme ve rölâtif sıklığa bağılı olduğunu gösteren yeni bir nonlineer (doğrusal olmayan) denklem türetilmiştir. Bu denklem yardımıyla bir alanın sıvılaşp-sıvılaşmadığının belirlenebileceğı bir sınır eğrisinin çizilebileceğini belirtmişlerdir.

Kahraman (2013), 1-G Model deney düzeneğı (santrifüj testi) ve sarsma tablası deney düzeneğini kullanarak sıvılaşmayı incelemiştir. Laboratuvarında, silt içeriğı değışen kum numunelerle çalışmış ve şu sonuçları elde etmiştir: i) Her bir sarsma ile görelî sıklık artmıştır. ii) Rölâtif sıklığın artmasına rağmen sıvılaşma direnci düşmektedir. iii) Silt içeriğı 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 incelemiştir. 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 deney örnekleri kullanılmıştır. Araştırmacı, ince dane oranının kumun daha kolay sıvılaşmasını sağladığını; ancak, plastisitenin sıvılaşma üzerine etkisi konusunda net bir sonuç elde edemediğini ifade etmektedir.

Nateghi (2015), "özel sıvılaşma düzeneğı 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 gözenek su 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 görelî sıklıklarda elde edilen aşırı gözenek su 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 tane boyu dağılımının sıvılaşma üzerinde oldukça etkisi olduğunu, ortalama tane boyutu küçüldükçe kumların daha kolay sıvılaştığını gözlemişlerdir. Sıvılaşmış ve geçici sıvılaşmış zeminler için (devirsel gerilme ile üniformluk katsayısına bağlı) iki denklem önermişlerdir.

SzilvÁgyi ve diğ. (2016) çalışmalarında silt ve mika içeren ince kumda yapılan üç farklı test yöntemiyle elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlar: Kayma modülünü belirlemek için Rezonans Kolon, Burulmalı Basit Kesme ve Bender Elemanı deney yöntemlerini uygulamışlar. 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 deney düzeneğinde yapılmıştır. Çalışmada, çevre basıncı, kesme gerilmesinin genliği ve anizotropik özellikleri araştırmışlardır. Araştırma sonucunda, Rezonans Kolon ile Burulmalı Basit Kesme deneylerinden aynı kayma modülü değerini elde etmişler; ancak, Bender Elemanı deneyinde kayma modülü değerinin farklı olduğunu tespit etmişlerdir.

Beyaz (2004) çalışmasında, depremler sırasında can ve mal kayıplarına da etki eden yapısal hasarlarda; tasarım ve inşaat kusurlarının yanında yerel zemin şartlarının (Kayabalı 1997) çok daha fazla önem arz ettiğini ifade etmektedir. Bu gerekçeyle, yapılarda hasarlara neden olan yerel zemin şartlarından zemin büyütmesi ve deprem enerjisi azalım bağıntılarının geliştirilmesi gerekmektedir (Beyaz 2004; Kayabalı ve Beyaz 2011). Ancak, araştırılması gereken zemin özellikleri bununla sınırlı olmayıp; silt, kum vb. gibi kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, sıvılaşma enerjisi gibi farklı özelliklerinin de araştırılması büyük önem arz etmektedir (Kayabalı ve diğ. 2018; Kayabalı ve diğ. 2020).

Özçelik (2019) yaptığı çalışmasında; i) literatürdeki sıvılaşma araştırmalarında birçok farklı deney düzeneğinin kullanıldığına; ii) aynı tür deney düzeneklerinin her birinde kullanılan numune haznelerinin (hücrelerinin) bile birbirinden farklı ebatlarda

(farklı boy ve çapta veya farklı yükseklik ve uzunlukta) olduğuna; iii) farklı ebatlardaki bu deney hücreleri kullanılarak elde edilen sonuçların birbiriyle kıyaslanabilir olup-olmadığının araştırılmadığına dikkat çekerek; sıvılaşma deney düzeneklerinde kullanılan numune haznelerinin ebatlarının deney sonuçlarına etkisinin olup-olmadığının araştırılması gerektiğini ifade etmektedir. Bu amaçla, devirsel basit kesme deney (DBKD) düzeneğini kullanarak; kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisinin laboratuvarında belirlenmesinde numune boyutunun (ebatlarının, yani numune haznesinin boy ve çap ölçülerinin) deney sonuçları üzerine olan etkisini araştırmıştır. Üç farklı çap (mm) ve üç farklı yükseklikte (mm) hazırladığı (dokuz (9) farklı ebattaki) numuneleri kullanarak yaptığı deneylerden elde ettiği verilere dayanarak; sıvılaşma deneyleri için 100 mm ve 150 mm çaplı deney örneklerinin kullanılmasını önermektedir (Özçelik 2019; Beyaz ve Özçelik 2019).

Özlen (2019) tarafından yapılan çalışmada; Ilgın (Konya) yerleşim alanındaki kumlu zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyeline sahip olduğunu devirsel basit kesme deney (DBKD) düzeneğinde gerçekleştirdiği sıvılaşma deneyleri ile tespit etmiştir. Araştırmacı deneylerden elde ettiği verileri, enerji yaklaşımı yöntemine göre değerlendirmiş ve yorumlamıştır (Özlen 2019).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

Bu çalışmada, kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması için gerekli enerjinin, çok yönlü tekrarlı (dinamik) üç eksenli basit kesme deney düzeneği ile belirlenmesinde; kum içerisine katılmış farklı oranlardaki (artan ince tane oranının) silt içeriğinin deney sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deprem hareketini üç yönde uygulayabilmek (arazideki-gerçek deprem hareketine nispeten benzeştirebilmek) amacıyla tasarlanan “tekrarlı basit kesme deney düzeneği” kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Araştırmada kullanılan ana malzeme, literatürdeki çalışmalarla kıyaslanabilir olması amacıyla; içerisine ağırlıkça yaklaşık %15’lik oranlarda artan silt katılmış tek tür kumdur. Yani, test edilecek materyal “kum ve kum+silt”tir.

Bunun haricinde sıvılaşma deneylerinin yapılabilmesi için;

- Devirsel Basit Kesme Deney Düzeneği ve çevre birimleri,
  - Taneli numuneyi deneye hazırlama seti,
  - Taneli numune ile deney yapma hücresi (veya seti),
  - Kauçuk membran (100 mm çapında, elastik),
  - Teflon bilezikler (1 mm kalınlığında, teflon kaplı, içi boş, dairesel),
  - Suyu havasızlaştırma (sudaki gaz zerreciklerini çekme) düzeneği,
  - Air blader (hava balonu: gözenek su basıncı oluşturma) düzeneği,
  - CO<sub>2</sub> gazı (tüp içerisinde)
  - Su (havasız alınmış-havasız vakumlanmış)
- Elek seti (kum ve silt danelerine uygun göz açıklığında),
- Terazi (0.001 hassasiyette),
- Sarsma Tablası,
- Büret, beher, piknometre,
- Vakum pompası,
- Kompresör vb. bir takım cihazlar kullanılmıştır.

Deneylerden elde edilen verilerin yorumlanması ve/veya değerlendirilmesi sonucunda, kumlu zeminler içerisindeki ince tane oranındaki artışın zeminlerin sıvılaşma enerjisi üzerindeki etkisi ortaya konmuştur.

Kum ve silt gibi kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma enerjisinin laboratuvar teknikleriyle belirlenmesinde; dinamik üç eksenli deney, tek yönlü tekrarlı basit kesme deneyi ve tekrarlı burulmalı halka deneyi gibi birçok deney düzeneği kullanılmaktadır.

Bu araştırmada, özel olarak imal edilmiş olan "tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" kullanılmıştır. Artan ince tane oranının, sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisinin tahmini amacıyla kullanılan bu deney düzeneğinin veya yaklaşımın diğer yöntemlere veya deney düzeneklerine göre daha güvenilir olacağı ve daha hassas sonuçlar vereceği beklenilmektedir.

Birçok araştırmacı tarafından, ince ve orta kumlar ile düşük plastisiteli ince taneler içeren killi kum çökellerinin sıvılaşmaya en duyarlı zemin türleri olduğu ifade edilmektedir. Bu konuda, içi boş burulmalı kesme deney düzeneğinde ve rezonant kolon deney düzenekleri ile bir kısım araştırmalar yapılmıştır. Ancak, devirsel basit kesme deney düzeneği kullanılarak; bu tür zeminlerin sıvılaşma enerjisi ile ilgili hiçbir çalışma yapılmamıştır. Diğer taraftan daha önce yapılmış olan araştırmalarda ise ince tane içeriği ancak %30 civarında olan numunelerle deneyler yapılmış olup, %30'dan daha büyük oranlardaki silt içeriğinin sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisi yeterince araştırılmamıştır. Dolayısıyla, elde edilen verilerin karşılaştırılması ve yorumlanması deney sırasında elde edilen verilerle yapılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışma için, kohezyonsuz olarak kabul edilen İzmir ili sahillerinden alınan denizel ince kum malzeme içerisine farklı oranlarda artan silt eklenerek birbirinden farklı altı (6) ayrı karışım oranına sahip deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler kuru halde olup, deney başlangıcında ilk önce suya doyurma işlemi uygulanmaktadır. Araştırmada kullanılan ana malzeme, içerisine farklı oranlarda artan (yaklaşık ağırlıkça %15'lik oranlarda artan) ince taneli malzeme (silt) katılmış tek tür kumdur. Yani, test edilecek materyal "kum ve kum+silt"tir (Şekil 3.5). Silt içerisinde kil olmaması için yapay üretilmiş (öğütülerek silt tane boyuna indirgenmiş) bir malzeme olması tercih edilmiştir. Bu amaçla ticari amaçlı üretim yapan işletmelerden; kuvars kökenli (kohezyonsuz ve non-plastik özellikte) silt temin edilmiştir.



**Şekil 3.5:** Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan kum, silt ve kum+silt karışımları

Bu çalışma kapsamında, öncelikle hiçbir şey katılmamış denizel bir kum türü üzerinde "referans alınacak" deneyler yapılmıştır. Daha sonra içindeki ince tane oranı arttırılan 6 ayrı kum+silt karışımı ile farklı rölatif sıklıklarda deney yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen verilerin/bulguların hesaplanması, grafiğe aktarılması ve yorumlanmasından sonra; artan ince tane yüzdesinin kumlu zeminlerin sıvılaştırma enerjisine olan etkisi ortaya konulmuştur ve tartışılmıştır. Silt içeriğinin kumların sıvılaştırma enerjilerine olan etkisi, farklı yöntemlerle hesaplanmış olmasına rağmen, ilk defa "devirsel basit kesme deney düzeneğinde" deneyler yapılmış, elde edilen veriler kullanılarak hesaplamalar ve yorumlar yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, kumlu zeminler içerisindeki "artan ince tane (silt) oranının" zeminlerin sıvılaşma enerjisine ne tür bir etkisinin olduğu araştırılmıştır. Deneylelerden elde edilen verilerin grafiksel ve istatistikî açıdan değerlendirilmesi ve yorumlanması sonucunda, kumlu zeminler içerisindeki ince tane oranının artışının zeminlerin sıvılaşma enerjisi üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Kum ve silt gibi kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma enerjisinin laboratuvar teknikleriyle belirlenmesinde; dinamik üç eksenli deney, tek yönlü tekrarlı basit kesme deneyi ve tekrarlı burulmalı halka deneyi gibi birçok deney düzeneği kullanılmaktadır. Bu araştırma, özel olarak imal edilmiş olan "tekrarlı (devirsel) basit kesme deney düzeneği" kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu düzeneğe, üç yönde gerçek deprem verisi girilerek deney yapılabilmesi onu ayrıcalıklı yapan özelliğidir. Artan ince tane oranının, sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisinin tahmininde kullanılacak olan bu yöntemin diğer yöntemlere veya deney düzeneklerine göre daha güvenilir olacağı ve daha hassas sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Birçok araştırmacı tarafından, ince ve orta kumlar ile düşük plastisiteli ince taneler içeren kum çökellerinin sıvılaşmaya en duyarlı zemin türleri olduğu ifade edilmesine rağmen; bu tür zeminlerin sıvılaşma enerjisi ile ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. Daha önce yapılmış olan araştırmalarda ise silt boyutu tane içeriğinin (oranının) sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisi yeterince araştırılmamıştır. Dolayısıyla, elde edilen verilerin karşılaştırılması ve yorumlanması deney sırasında elde edilen verilerle yapılacaktır. "Devirsel basit kesme deney düzeneği" ile kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisi üzerinde; artan ince tane içeriğinin ne tür bir etkisinin olduğunun belirlenmesi, gelecekte yapılacak ileri düzey araştırmalara önemli bir altyapı verisi sağlamış olacaktır. Bu çalışma kapsamında, öncelikle hiçbir şey katılmamış denizel bir kum türü üzerinde "referans alınacak" deneyler yapılacaktır. Daha sonra içindeki ince tane oranı arttırılan 7 ayrı kum+silt karışımı ile deney yapılacaktır. Deney sonucunda elde edilecek verilerin/bulguların hesaplanması, grafiğe aktarılması ve istatistikî olarak yorumlanmasından sonra; artan ince tane yüzdesinin kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisine olan etkisi ortaya konmuş olacaktır. Silt içeriğinin kumların sıvılaşma enerjilerine olan etkisi, farklı yöntemlerle hesaplanmış olmasına rağmen, ilk defa "devirsel basit kesme deney düzeneği" verileri kullanılarak hesaplanmış olacaktır.

## 3.2 Yöntem

### 3.2.1 Laboratuvar Deneyleri

Enerji temelli yöntem, zeminin sıvılaşması için bünyesine alması gereken birim hacim başına enerji değerini referans almaktadır ( $J/m^3$ ). Enerji tabanlı yöntem, yöntemin uygulanması ve enerji hesaplamaları ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Enerji tabanlı yöntemde; zemin sıvılaşması için gerekli birim deformasyon enerjisi “kapasite”, deprem sırasında zemin katmanına aktarılan enerji “talep” olarak adlandırılmaktadır (Green 2001). Bu konudaki hesaplamalarda bu iki temel parametre göz önüne alınmaktadır. Yöntemde veriler; laboratuvarında tekrarlı basit kesme, tekrarlı üç eksenli vb. deneylerle ya da arazi çalışmalarıyla elde edilir. Kesme gerilmesi-birim deformasyon kayıtlarından türetilen histerez döngüsünün içindeki alan tarafından enerji ve gerilme kavramları tanımlanır (Şekil 3.6). Bu alan birim hacim başına düşen enerjiyi gösterir (Ostadan ve diğ. 1996; Green 2001; Alavi ve Gandomi 2012).

Enerji temelli yöntem, zeminin sıvılaşması için bünyesine alması gereken birim hacim başına enerji değerini referans almaktadır ( $J/m^3$ ).

Bir depremden kaynaklanan toplam enerji ( $E$ , Joule) Gutenberg ve Richter (1956)'in denklemiyle (Denklem-3) verilmektedir:

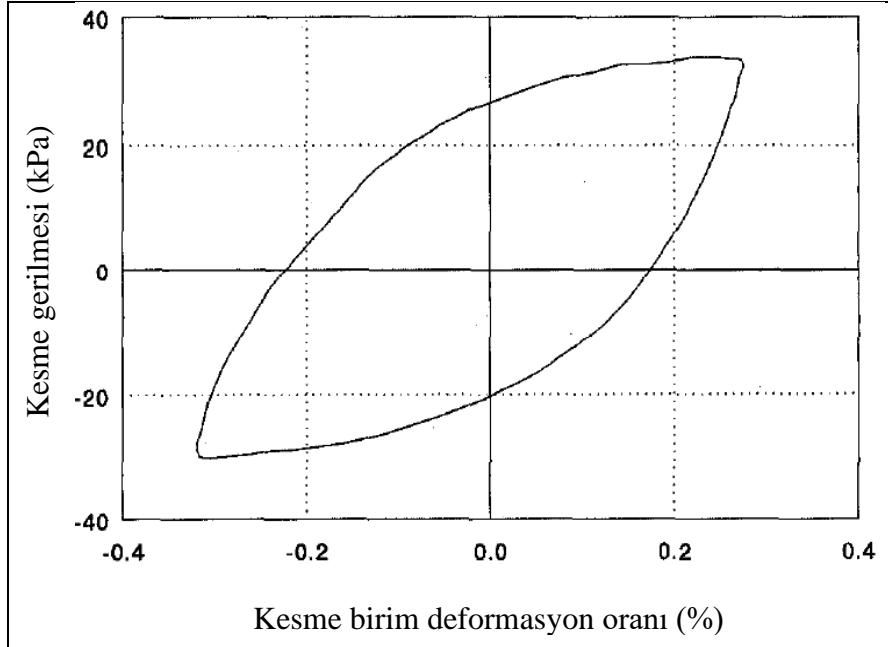
$$E = 10^{4,8+1,5M} \quad (\text{Denklem-3})$$

Bu denklem haricinde, laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere göre, enerji yöntemi ile yapılan başlıca sıvılaşma hesaplama çalışmaları; Figueroa ve diğ. (1994), Liang (1995) ve Dief ve diğ. (2001)'dir.

Devirsel (tekrarlı) yüklemeye maruz kalan bir zeminde, kesme birim deformasyon oranı (%) etkisiyle, zemin iç direncinin yansıması olarak bir kesme gerilmesi (kPa) ortaya çıkmakta ve tipik bir histerezis çevrimi (elipsoidal halkası) olarak grafiklere yansımaktadır (Şekil 5). Devirsel yükleme sırasında oluşan hareketlenme, zemin danelerinde de hareketliliğe neden olur, danelerde yeniden düzenlenme eğilimi başlar (yeniden istiflenme olarak ifade edilen bu olgu sırasında



zemin danelerinin çoğunlukla sıkılaştığı gözlenir). Buna bağlı olarak zemin bir miktar deforme olur ve belirli bir miktarda enerji saçılımı olur. Bir yükleme döngüsünde zeminde birim hacim başına biriken enerjinin, histerezis çevrimi içinde kalan alana karşılık geldiği kabul edilmektedir (Şekil 5) (Figuroa ve diğ. 1994; Liang 1995).



Şekil 3.6: Tipik bir “Kesme gerilme (kPa)-Kesme birim deformasyon oranı” elipsoidal halkası (histerezis) (Figuroa ve diğ. 1994; Liang 1995)

Figuroa ve diğ. (1994) ve Liang (1995), içi boş burulmalı kesme düzeneği ile yaptıkları çalışmada zemine bir miktar enerji aktarıldığını kabul eder ve zemine aktarılan enerjiyi (veya zemin tarafından soğurulan enerji ki bu da, birim hacim başına zeminde biriken enerji olarak da kabul edilebilir) hesaplamaya çalışırlar. Numune tarafından sıvılaşmaya kadar soğurulan birim hacimde biriken enerji ( $\delta W$ ) temel fizik kurallarından yola çıkılarak aşağıdaki şekilde verilir (Denklem-4) (Figuroa ve diğ. 1994; Liang 1995):

$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i+1}) (\gamma_i + \gamma_{i+1}) \quad (\text{Denklem-4})$$

Burada:

$\tau$  = kesme (kayma) gerilmesi,

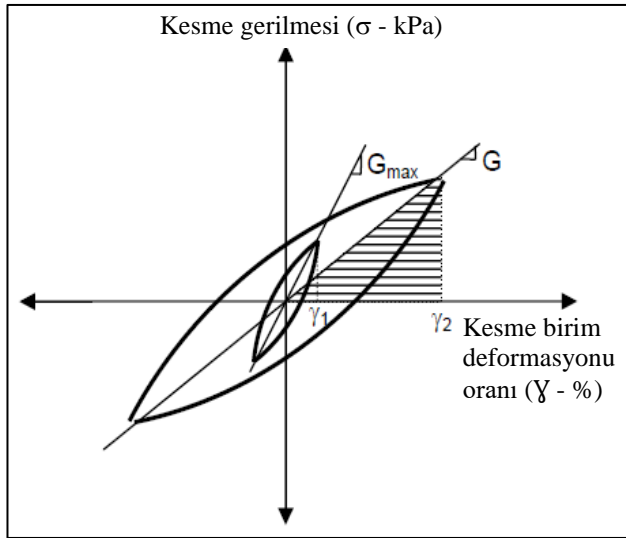
$\gamma$  = kesme (kayma) birim deformasyonu ve

$n$  = sıvılaşmaya ulaşılan kadar kaydedilen okuma sayısı'dır.

Figuroa ve diğ. (1994), Reid Bedford kumu kullanarak laboratuvarında, içi boş silindirik burulmalı kesme deney düzeneğinde, 27 adet deney yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda, zeminin sıvılaşmaya ulaşması için birim hacim başına zemine aktarılan enerji ile etkin çevre basıncı, görelî sıklık ve kesme birim deformasyonu oranı gibi parametrelerle arasında bir ilişkileri kurmuşlardır.

### 3.2.2 Sönüm Oranı

Plastik şekil değiştirmelerin varlığı sürtünme gibi nedenlerle enerji kayıplarının olduğunu göstermektedir. Her bir çevrim sonunda bir miktar enerji sönümlenmekte ve bu ilişki sönümlenme oranı olarak tanımlanmaktadır. Sönümlenme oranı; histerez ilmiği alanının (histerez ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun altında kalan alan), üçgenin alanına oranı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.7).



$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} 0.5(\tau_i + \tau_{i+1})(\gamma_{i+1} - \gamma_i)$$

Şekil 3.7: Numunenin yatay yönde makaslanması sırasında oluşan gerilme döngüsü ve bu döngüye ait sönümlenme oranı hesaplaması için kullanılan alan (taralı alan) ve ilgili bağıntı

Suya doygun kumlarda sönümlenme oranı birim deformasyon düzeyi arttıkça artmakta; doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Sönüm oranı, artan kesme birim deformasyonu genliği ile artarken, artan çevrim sayısı ve dişey gerilme ile çok yavaş azalır (Silver ve Seed 1971).

### 3.2.3 Dinamik Basit Kesme Deney Düzeneği (DBKDD)

Çalışmada kullanılan başlıca donanım üç yönlü “Dinamik Basit Kesme Deney Düzenegi” (Şekil 3.8) ve çevre birimleridir (Şekil 3.9).

Cihaz, yaygın olarak kullanılan, sadece düşey yönde tekrarlı yük uygulayan cihazlardan farklı olarak, iki yönde dinamik kesme kuvveti, üçüncü 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 rastgele (random) yüklemeye izin vermektedir. Cihaz, dinamik pompaların pistonlarıyla birlikte hareket eden ve 50 mm'ye kadar ölçüm alabilen deformasyon ölçerler ile teçhiz edilmiştir. Gözenek su basıncı uygulamasına (Şekil 3.9.c) ve ölçümüne de olanak veren sistemde kapasite 1 MPa'dır.



Şekil 3.8: Dinamik basit kesme deney düzenegi



a) CO<sub>2</sub>'e doyurma tüpü



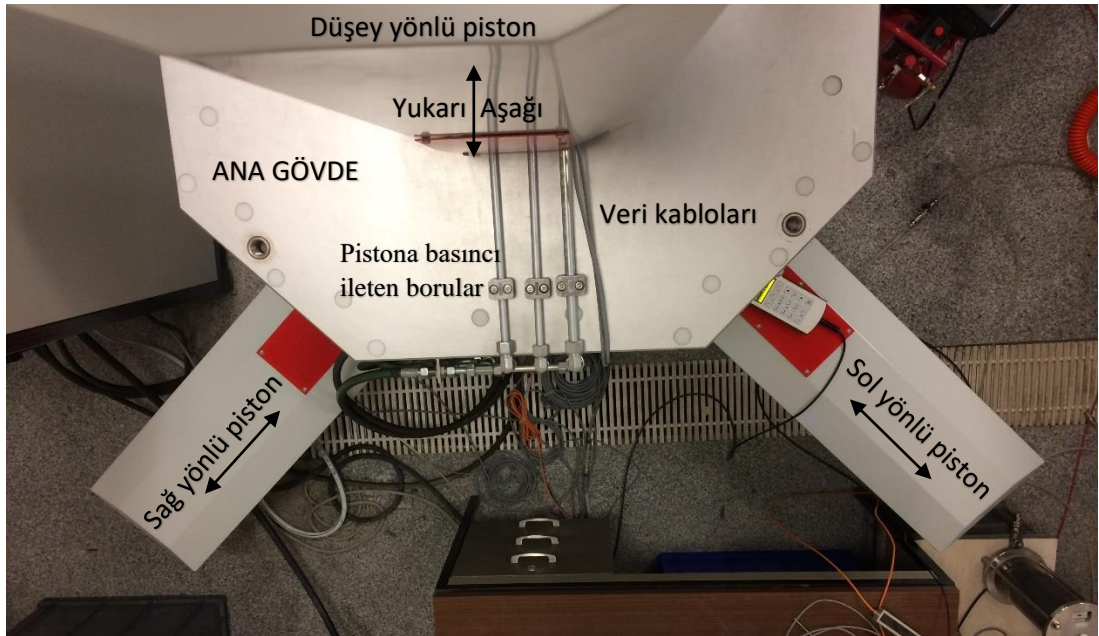
b) Suyu havasızlaştırma düzeneği



c) Air Blader (hücre içi su basıncı)

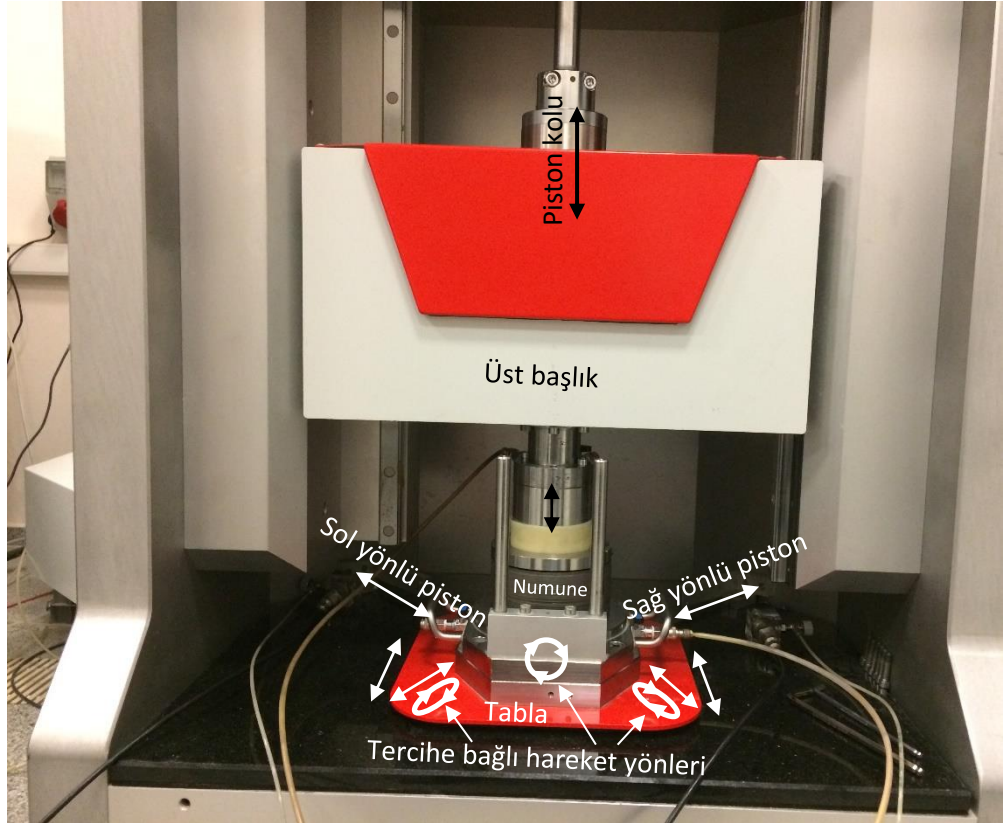
**Şekil 3.9:** Tekrarlı basit kesme deney düzeneğine ait çevre birimlerinden bazıları

Numune deney düzeneğinde tablaya yerleştirilir, cihazın başlığı numunenin üst yüzeyine bağlanır, civatalarla sabitlenir. Cihaz tarafından üç yönde monte edilmiş pistonlar aracılığıyla; numuneye yatayda birbirine dik iki yönde (x ve y yönlerinde), düşeyde ise tek yönde (z yönünde; yataydakilere dik konumda) hareket (sarsıntı) uygulanabilmektedir (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10:** Dinamik basit kesme deney düzeneğinin üstten görünüşü (Bu düzenekte; 1D: sadece sağ yönlü piston dinamik hareketi uygularken, düşey piston numuneye sadece gerilme uygular. 2D: sağ ve sol yöndeki pistonlar dinamik hareket uygularken, düşey piston sadece gerilme uygular. 3D: her üç piston birlikte dinamik hareket uygulayabilir veya 2D ile benzer hareketi uygulayabilir. Pistonların hareketi, deney yöntemlerindeki sınırlamalar dahilinde uygulayıcının tercihine bırakılmıştır)

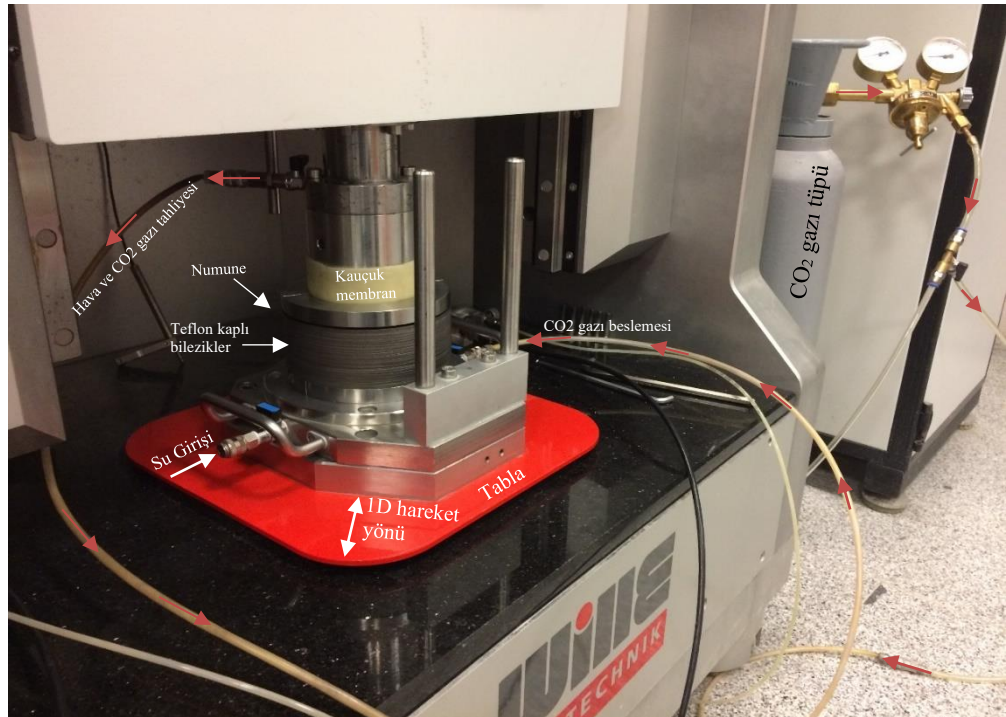
Cihaza yerleştirilen bir numune, yatayda hareket edebilen bir tablanın üzerine yerleştirilmektedir, üstüne yatay yönde hareket etmeyen bir başlıkla düşey gerilme veya dinamik hareket uygulanabilmektedir. Deney düzeneğindeki numune, üst başlık tarafından uygulanan gerilme ile sabit tutulurken alttaki tablanın yatay yönde farklı şekillerdeki hareketiyle dinamik etkiye maruz bırakılmaktadır. Cihazın üst başlığı, deney yöntemine göre; i) sabit bir gerilme uygulayabilmektedir. Bu özelliğin kullanılması durumunda, numune yüksekliği sabit kabul edilmektedir. ii) Numuneye düşey (yukarı-aşağı) yöndeki hareketlerle dinamik yük uygulayabilmektedir (Şekil 3.11). Bu özelliğin kullanılması durumunda, numuneye uygulanan düşey harekete bağlı olarak oluşan sıkıştırma-gevşetme etkisiyle, deney süresince numunenin hacmi değişmektedir. 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.



**Şekil 3.11:** Dinamik basit kesme deney düzeneğinin karşıdan görünüşü (1D: sağ yönlü piston çapraz yönde doğrusal hareket; 2D: yatay -sol ve sağ- pistonlar- birlikte i) doğrusal, ii) elipsoidal veya iii) dairesel hareket üretmektedir; 3D: düşey piston gerilme veya devirsel hareket uygulamaktadır. 1D ve 2D deneylerinde düşey piston, numuneye sadece gerilme uygulamaktadır)



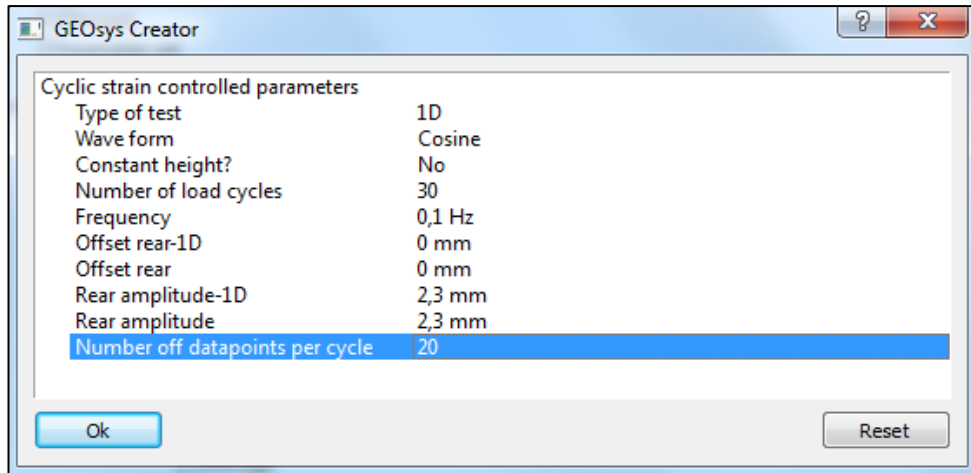
Deney düzeneğindeki tablaya yerleştirilen bir numunenin deneye başlamadan önce suya doymun hale getirilmesi gerekmektedir. Ancak, numuneye su verildiğinde kum taneleri arasındaki boşlukta bir miktar havanın sıkıştığı gözlenmiştir. Deneylerden sağlıklı sonuçlar alınabilmesi için kum taneleri arasında sıkışan havanın tamamının ortamdaki havadan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla, suya doyurma işlemine başlamadan önce, numunelerden CO<sub>2</sub> gazı geçirilerek, ortamdaki havanın CO<sub>2</sub> gazı ile yer değiştirmesi bir nevi CO<sub>2</sub> gazı ile doyurma işlemi gerçekleştirilmektedir (bu işlemde, CO<sub>2</sub> gazının havadan daha ağır olması özelliğinden yararlanılmaktadır). Hava ile yer değiştiren CO<sub>2</sub> gazı, daha sonra numuneye gönderilen su tarafından ortamdaki havadan uzaklaştırılmaktadır (Şekil 3.12). Ortamda bir miktar CO<sub>2</sub> gazı kalabileceği ihtimaline karşılık, ortama verilen suyun basıncı (boşluk suyu basıncının değeri) yaklaşık 5 kPa'a kadar artırılarak CO<sub>2</sub> gazının suda çözünmesi için bir süre beklenmektedir.



**Şekil 3.12:** Dinamik basit üç eksenli deney düzeneğinin sol yandan-çapraz görünüşü (CO<sub>2</sub> gazı ile doyurma işlemi sırasında çekilmiştir. Bu işlemden sonra mevcut bağlantılar; i) suya doyurma bağlantıları ve ii) sıvılaştırma deneyi ölçüm düzeneği bağlantıları ile değiştirilmektedir)

CO<sub>2</sub> gazı ile doyurma işlemi sırasında numuneye düşey gerilme uygulanmakta, ardından numune içerisindeki boşluk suyu basıncı, deney başlangıç şartlarına uygun değere gelinceye kadar arttırılmaktadır. Numuneye uygulanan düşey gerilme ve

boşluk suyu basıncı, Bölüm- 3.2.5'te detaylı olarak anlatılan zemin şartlarına uygun değere getirilmiştir. Daha sonra deney düzeneği için hazırlanmış yazılım üzerinden deney yöntemi ve deney uygulama parametreleri/değerleri sisteme tanıtılmıştır (Şekil 13). Bu işlemler sırasıyla şu şekilde yapılmaktadır: i) Numuneye uygulanacak sınılaşma deney türü (bir yönde hareket: 1D, iki yönde hareket: 2D veya üç yönde hareket: 3D) girilmektedir. ii) Numuneye uygulanacak hareketin veya dalganın türü (sabit dalga türü: cosinüs veya bir deprem kaydı) seçilmektedir. iii) Deney sırasında numune yüksekliğinin sabit tutulup-tutulmayacağı girilmektedir (E/H). iv) Deney sırasında numuneye tekrarlı-devirsel yükün kaç kez uygulayacağı, v) Hareketin frekans değeri (Hertz-Hz cinsinden: 1 saniyede kaç devirsel hareketin uygulanacağı), vi) numuneye uygulanacak kesme birim deformasyonu miktarı (mm), vii) deney sırasında kaç veri okuması yapılacağı vb. bilgiler sisteme tanıtılmaktadır (Şekil 3.13).



**Şekil 3.13:** Deney yöntemi ve parametrelerinin sisteme tanıtıldığı ekran görüntüsü (Bu deneyde; 1D: Bir yönlü hareketi; Amplitude: kesme birim deformasyonunun, numune yüksekliği-mm cinsinden değerini; 0,1 Hz frekans: 1 devirsel hareketin 10 s'de bir gerçekleştiğini belirtmektedir)

### 3.2.4 Kum ve Silt Hakkında Genel Bilgiler

Bu çalışma için, kohezyonsuz olarak kabul edilen İzmir ili sahillerinden alınan denizel ince kum malzemeye içerisine farklı oranlarda artan silt eklenerek birbirinden farklı 6 ayrı karışım oranına sahip deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler kuru halde olup, deney başlangıcında ilk önce suya doyurma işlemi uygulanmaktadır. Araştırmada kullanılan ana malzeme, içerisine farklı oranlarda artan (yaklaşık ağırlıkça %15'lik oranlarda artan) ince tane (silt) katılmış tek tür kumdur. Yani, test edilecek materyal "kum ve kum+silt"tir (Şekil 14). Silt içerisinde kil olmaması için

yapay üretilmiş (öğütülerek silt tane boyuna indirgenmiş) bir malzeme olması tercih edilmiştir. Bu amaçla ticari amaçlı üretim yapan işletmelerden; kuvars kökenli (kohezyonsuz ve non-plastik özellikte) silt temin edilmiştir.



Şekil 3.14: Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan kum, silt ve kum+silt karışımları

#### 3.2.4.1 Silt ve Kum Numuneler - Gerilme Şartları

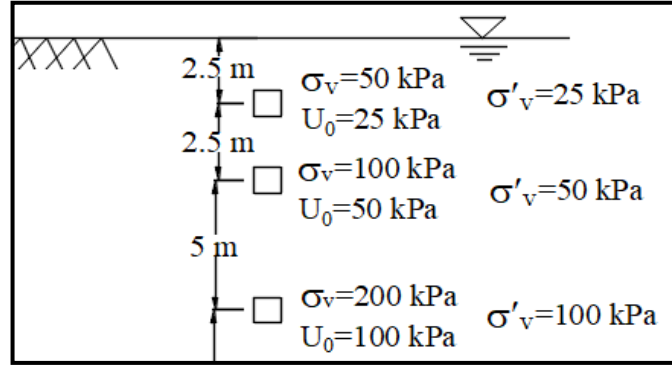
Çalışmada kullanılan malzeme üniform temiz deniz kumu ve sildir. Silt, silis (kuvars) kökenli olup, 75 µm dane boyutuna kadar (veya biraz daha küçük) öğütülmüş yapay bir malzemedir. Kum ve silt ile şu şekilde deney numuneleri hazırlanmıştır:

- i) Sadece kum ve



ii) Kum+Silt karışımları kullanılarak, deneyler iki aşamalı olarak yapılmıştır.

1) Bu aşamada, içerisinde hiç ince tane içermeyen (silt veya kil içermeyen) denizel bir kum numune üzerinde bütün deneyler yapılmıştır. Bu deneyden elde edilecek sonuçlar, karşılaştırma yapmak amacıyla "referans" değerler olarak kullanılmıştır. Bu deneyde kum numuneler: %30, %40, %50, %60 ve %70 görelî sıklıkta, 50 kPa ile 200 kPa düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) ve  $r_u=1/2$  oranını sağlayacak şekilde 25 kPa ile 100 kPa gözenek su basıncı (u) etkisi altında (Şekil 3.15), %5 deformasyon oranında deneye tabî tutulmuştur. Bu aşamada toplam 10 deney yapılmıştır.



Şekil 3.15: Kumların sıvılaşma deneyleri için öngörüsü yapılan arazi şartları: Dikme kesit, derinliğe bağılı düşey gerilme ve gözenek su basıncı değişimini göstermektedir (Beyaz ve Özçelik 2019)

2) Çalışmanın bu ikinci aşamasında, araştırmalardan elde edilen verilerin tatmin edici şekilde karşılaştırılabilmesi-yorumlanabilmesi ve sağlıklı sonuçlar elde edilmesi için; ince tane (silt) içeriği farklı yüzdeler oranlarda artırılarak deneyler yapılmıştır. Bu amaçla, kum içerisine; %10, %25, %40, %55, %70, %85 ve %100 (=kum:%0 - silt:%100) oranlarında ince tane içeriği artırılan altı (6) ayrı kum+silt karışımı hazırlanmıştır. Kum+silt karışımı: %30, %40, %50, %60 ve %70 görelî sıklıkta ( $D_r$ ), 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa düşey gerilme ( $\sigma_v$ ) ve  $r_u=1/2$  oranını sağlayacak şekilde 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa gözenek su basıncı (u) değerlerinde deneye tabî tutulmuştur (Şekil 3.15). Bu aşamada toplam 105 deney yapılmıştır.

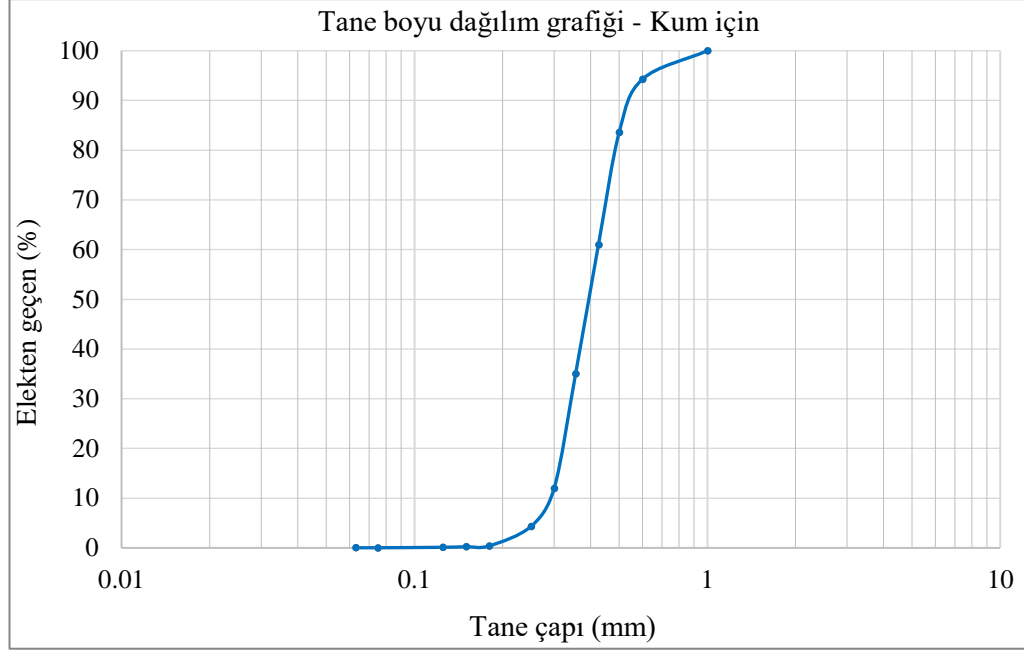
## 4. BULGULAR

Sıvılaşma deneylerine başlamadan önce;

- Kum ve silt, ASTM D422 (1996) ve ASTM D6913 (2018)'e uygun olarak elek setinde elenmiş (silt için ayrıca hidrometre deneyi de yapılmıştır) ve ‘‘geçen-%’’ cinsinden tane boyu dağılım grafiği hazırlanmıştır (Tablo 4. 1, Şekil 4.16).

**Tablo 4.1:** alışmada kullanılan kumun tane boyu dağılımı

Elek No	Elek apı (mm)	Elekten Geçen (%)	Parametre	Değer
18	1	100		
30	0.6	94	D <sub>50</sub> :	0.370
35	0.5	84		
40	0.425	61	D <sub>10</sub> :	0.260
45	0.355	35	D <sub>30</sub> :	0.315
50	0.3	12	D <sub>60</sub> :	0.425
60	0.25	4.3		
80	0.18	0.4	Cu:	1.630
100	0.15	0.2	Cc:	0.900
120	0.125	0.1		
200	0.075	0.03	G <sub>s</sub> :	2.60
230	0.063	0.04	e <sub>maks</sub> :	0.9487
			e <sub>min</sub> :	0.6030
Toplama Kabı		0		



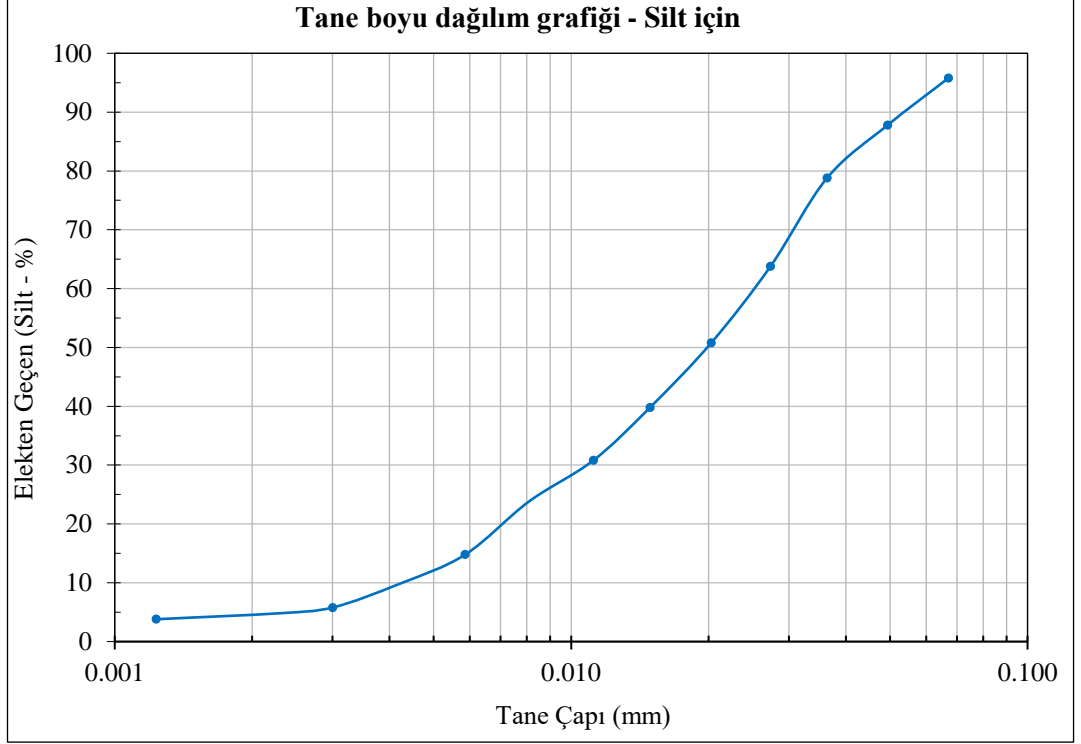
Şekil 4.16: Kum için tane boyu dağılım grafiği

Kum içerisine farklı oranlarda silt eklenerek, 6 ayrı kum+silt karışımı hazırlanmıştır (Şekil 10, Tablo 3 ve 4). Bu amaçla kullanılan silt, kuvars kökenli olup, öğütülerek silt tane boyutuna getirilmiştir. Ticari amaçla üretim yapan özel bir şirketten temin edilmiştir. ASTM D6913 (2018)'e uygun olarak siltin elek analizi yapıldıktan sonra -hidrometre deneyi de yapılmış- elde edilen verilerden hareketle tane boyu dağılım grafiği çizilmiştir (Tablo 2, Şekil 17).

Tablo 4.2: Çalışmada kullanılan siltin tane boyu dağılımı.

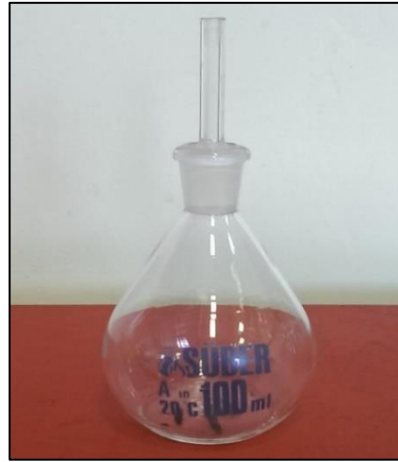
Elek çapı (mm)	Elekten Geçen (%)	Parametre* - Değer
0.0750	100	$D_{50}$ : 0.020  $G_s$ : 2.56 $e_{maks}$ : 1.5491 $e_{min}$ : 0.6594
0.0671	96	
0.0494	88	
0.0364	79	
0.0274	64	
0.0203	51	
0.0150	40	
0.0112	31	
Toplama Kabı	4	

\*: Silt kuvars kökenli olup, non-plastiktir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine göre, silt ve kil gibi ince taneli zeminler için  $C_c$  ve  $C_u$  hesaplanmamaktadır.



**Şekil 4.17:** Silt için tane boyu dağılım grafiği

- Kum, kum+silt ve siltin; yoğunluğu ( $\rho$ ,  $g/cm^3$ ) ve özgül ağırlığı ( $G_s$ , birimsiz) belirlenmiştir (Şekil 4.18). Deney numunelerinin özgül ağırlığı, ASTM D854 - “Piknometreyle Zeminlerin Özgül Ağırlığının Belirlenmesi İçin Deney Yöntemi Standartı” (Standart Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer) standardına uygun şekilde belirlenmiştir.



**Şekil 4.18:** Özgül ağırlık deneyinde kullanılan piknometre

- Kum, Kum+Silt karışım numuneleri ve Silt'in; minimum boşluk oranı ( $e_{min}$ ) ve maksimum boşluk oranı ( $e_{maks}$ ) değerleri, ASTM D4253 ve ASTM D4254'e uygun olarak hesaplanmış, elde edilen değerler tabloya aktarılmıştır (Tablo 3 ve 4; Şekil 19).

**Tablo 4.3:** Kum ve Kum+Silt karışım oranları için numunelerin gevşek durumdaki bazı özellikleri

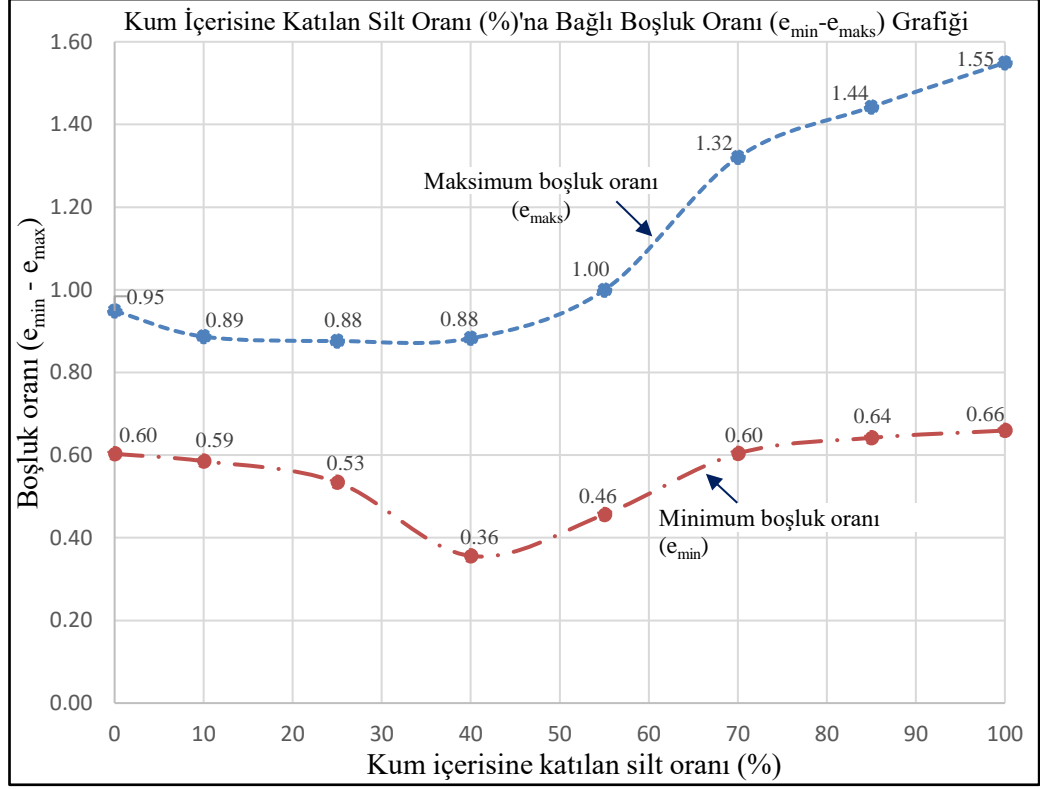
GEVŞEK DURUM	$m_d$ (g)	$v_d$ (cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Gs	$e_{maks}$
%100 Kum	200	150	1.33	13.08	2.60	<b>0.9487</b>
%90 Kum-%10 Silt	200	142	1.41	13.81	2.57	<b>0.8866</b>
%75 Kum-%25 Silt	200	135	1.48	14.53	2.78	<b>0.8761</b>
%60 Kum-%40 Silt	200	140	1.43	14.01	2.67	<b>0.8825</b>
%45 Kum-%55 Silt	200	153	1.31	12.82	2.58	<b>0.9992</b>
%30 Kum-%70 Silt	200	180	1.11	10.90	2.58	<b>1.3203</b>
%15 Kum-%85 Silt	200	185	1.08	10.60	2.53	<b>1.4424</b>
%100 Silt	200	200	1.00	9.81	2.56	<b>1.5491</b>

$m_d$ : kuru numune kütlesi (g),  $v_d$ : kuru numune hacmi (cm<sup>3</sup>),  $v_a$ : daneler arasındaki boşluk hacmi (cm<sup>3</sup>),  $v_s$ : dane hacmi (cm<sup>3</sup>),  $\rho_d$ : kuru dane yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>), Gs: özgül ağırlık,  $e_{maks}$ : maksimum boşluk oranı

**Tablo 4.4:** Kum ve Kum+Silt karışım oranları için numunelerin sıkı durumdaki bazı özellikleri

SIKI DURUM	$m_d$ (g)	$v_d$ (cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Gs	$e_{min}$
%100 Kum	200	125	1.60	15.69	2.60	<b>0.6030</b>
%90 Kum-%10 Silt	200	123	1.63	15.95	2.57	<b>0.5853</b>
%75 Kum-%25 Silt	200	114	1.75	17.21	2.78	<b>0.5343</b>
%60 Kum-%40 Silt	200	110.5	1.81	17.75	2.67	<b>0.3560</b>
%45 Kum-%55 Silt	200	112	1.79	17.51	2.58	<b>0.4563</b>
%30 Kum-%70 Silt	200	128	1.56	15.32	2.58	<b>0.6038</b>
%15 Kum-%85 Silt	200	130	1.54	15.09	2.53	<b>0.6418</b>
%100 Silt	200	130	1.54	15.09	2.56	<b>0.6594</b>

$m_d$ : kuru numune kütlesi (g),  $v_d$ : kuru numune hacmi (cm<sup>3</sup>),  $\rho_d$ : kuru dane yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>), Gs: özgül ağırlık,  $e_{min}$ : minimum boşluk oranı



**Şekil 4.19:** Kum içerisinde katılan silt oranı (%)-Boşluk oranı ( $e_{min}$ - $e_{maks}$ ) grafiği (grafikte alt alta gelen noktalarda, kum+silt'in karışım oranları aynıdır)

İstenilen göreceli sıkılıkta ( $D_r$ ) numuneler hazırlamak için özgül yoğunluk ( $G_s$ ), minimum boşluk oranı ( $e_{min}$ ), maksimum boşluk oranı ( $e_{maks}$ ) değerleri kullanılarak 100 mm çapında numune alıcı içerisinde yerleştirilmesi gereken numune miktarı (ağırlığı-gr) hesaplanarak aşağıda sunulmuştur (Tablo 4. 5).

**Tablo 4.5:** Deneilerde kullanılan kum ve kum+siltin bazı özellikleri ve rölatif sıkılığa göre hesaplanan numune miktarları

Kum (%)	Silt (%)	$G_s$	$e_{min}$ (%)	$e_{maks}$ (%)	$D_r$ (%) için gereken numune ağırlığı (g)				
					% 30	% 40	% 50	% 60	% 70
100	-	2.60	0.6030	0.9487	486.7	496.0	505.6	551.7	526.1
90	10	2.57	0.5853	0.8866	494.1	502.6	511.3	520.3	529.7
75	25	2.78	0.5343	0.8761	541.3	552.0	563.0	574.6	586.6
60	40	2.67	0.3560	0.8825	534.7	551.5	569.5	588.6	609.1
45	55	2.58	0.4563	0.9992	485.2	500.0	515.7	532.4	550.3
30	70	2.58	0.6038	1.3203	423.2	438.1	454.1	471.3	489.9
15	85	2.53	0.6418	1.4424	396.8	411.7	427.9	445.3	464.3
-	100	2.56	0.6594	1.5491	387.4	403.1	420.2	438.7	459.0

#### 4.1 Numune Hazırlama

Bu çalışmada, kumların sıvılaşma enerjisi üzerinde; görelî sıklık, deformasyon oranı ve gerilme değerlerinin yanında artan ince tane içeriğinin (oranının) etkisinin olup-olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla "tekrarlı basit kesme deney düzeneği" kullanılmıştır. Deney numuneleri 100 mm çaplı numune hazırlama aparatı kullanılarak hazırlanmıştır. Bütün deneyler, Wille Geotechnic marka 2016 model üç yönlü “devirsel basit kesme deney düzeneği”nde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8 – 3.13).

Belirli görelî sıklıklarda hazırlanan numuneler su sızmasını önlemek amacıyla kauçuk membran içerisine alınmaktadır. Kauçuk membran ise yatay yönde harekete izin vermesinin yanında membranın basınç etkisiyle balon gibi şişmesini önlemek için teflon kaplı yassı bileziklerle kuşatılmıştır (yassı bileziklerin içine yerleştirilmiştir). Yassı bilezikler, sürtünmeyi azaltmak için teflon kaplanmıştır. Basınç azalmasını ve su kaçağını önlemek amacıyla, kauçuk membranın alt ve üst uçları O-ring ile sıkıştırılmaktadır. O-ring ise vidalı çelik kelepçeler içerisine hapsedilmektedir (Şekil 4.20).



**Şekil 4. 20:** Sıvılaşma deneyleri için numune hazırlama aparatı ve bazı işlem aşamaları (kumlarda deney örneği hazırlanmasına örnek)

Sıkıştırma işlemi sırasında kum numunelerin ilgili rölatif sıklığa ( $D_r$ ) getirilebilmesi için belirli bir yükseklikten gerdirilmiş membran içerisine “kuru yağmurlama” tekniğiyle yerleştirilmiştir. Kuru yağmurlama tekniği ile rölatif sıklığa uygun sıkıştırma yaparken kum tanelerinin hücre dışına saçılmasını veya dağılmasını önlemek gerekmektedir. Numunelerin, hücre çapına uygun ve eklenip-çıkarılabilen farklı boylardaki parçalarla yüksekliği ayarlanabilen akrelik (pleksiglas) boru

içerisinden hücre içerisine dökülerek, görelî sıklıklarının standart olarak ayarlanmasına gayret sarf edilmiştir (Şekil 4.21).

Silt numunelerden de, benzer şekilde örnekler hazırlanmış olmasına rağmen bazı farklı işlemler uygulanmıştır. Numuneler, birbiri üzerinde kayabilen teflon kaplı yassı bileziklerin içinde vakumla gerdirilmiş membran içerisine (D=100 mm, h≈40-46 mm ölçülerinde) kuru olarak tabakalar halinde sıkıştırılmıştır (Şekil 3.16).



**Şekil 4.21:** Sıvılaştırma deneyleri için numune hazırlama aparatı ve bazı işlem aşamaları (siltlerde deney örneği hazırlanmasına örnek)

Kalıp içine alınan kumlu ve/veya siltli numuneler, tekrarlı basit kesme deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

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 (Şekil 3.9<sup>a</sup> ve Şekil 3.12). Yaklaşık ≈2 saat süresince numuneler, CO<sub>2</sub> gazı ile doyurulmaya çalışılmıştır (CO<sub>2</sub> gazının, boşluklardaki hava ile yer değiştirmesi sağlanmaya çalışılmıştır).



Suya doymurma işlemi sırasında, sudaki hava kabarcıklarının olumsuz etki yapmaması amacıyla, deneyde kullanılacak suyun -vakumlanarak- havası alınmıştır. Bu işlem, sudaki hava kabarcıklarını almak amacıyla geliştirilen bir vakumlama düzeneği ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.9<sup>b</sup>). Suya doymurma işlemi sırasında, silt numunelerin geçirgenliği çok düşük olduğu için suyun numunelere nüfuz etmesini hızlandırmak amacıyla suya yaklaşık 2 atm basınç uygulanmıştır. Numunelerin yaklaşık 3-4 saatlik bir zaman diliminde suya doymun hale geldiği kabul edilmektedir (yapılan ön denemelerde 3-4 saatlik süre sonunda silt numunelerin suya doymun hale geldiği gözlemlendiği için bu sürenin yeterli olacağı kabul edilmiştir/öngörülmüştür). Ancak, suya doymurma işleminde numuneden suyun geçtiğinin gözlenmesi yani tahliye vanasından su çıkışının gözlenmesi temel kural olarak kabul edilmiştir. Havası alınmış su yardımıyla numune doymun hale getirildikten sonra deney öncesi işlemlere devam edilmektedir.

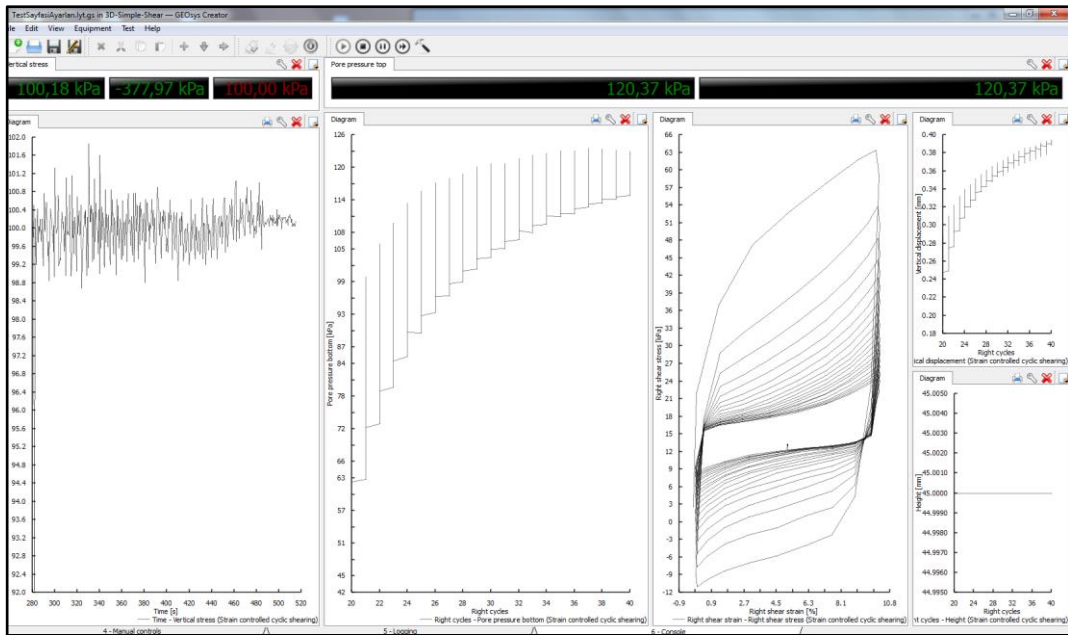
#### 4.2 Deney Parametreleri ve Elde Edilen Bulgular

Bütün deney numunelerine, Kammerer vd. (2006)'da anlatıldığı şekilde % 5 kesme birim deformasyon oranında ve ASTM D5311 (1996)'ya uygun olarak 0,1 Hz harmonik yükleme (sarsıntı) uygulanmıştır. Bu yükleme sırasında, kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüleri oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4.22 ve 4.23). Bu döngüler, genel olarak tipik bir şekle sahiptir ve sıvılaşma deneylerine özgüdür. Numuneler tekrarlı yükleme altında makaslandıkça, gözenek su basıncının başlangıçta sıfır (0) olan değeri giderek artmaktadır. Dinamik yükleme etkisi ile gelişen gözenek su basıncı, efektif gerilmeye ulaşana kadar artmaya devam etmekte ve sonuçta belli sayıda kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüsü oluşmaktadır. Deney, değişik görelî sıklık ( $D_r$ ) (siltler için rölatif yoğunluk değeri göz önüne alınmıştır) ve efektif düşey gerilme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Efektif gerilmenin ( $\sigma_v'$ ) sıfıra ulaştığı anda deneye son verilmiştir. Her bir döngü sırasında numuneye uygulanan enerjinin bir bölümü döngü (histerez) içinde soğurulur. Soğurulan bu enerjinin, zeminde gözenek suyu basıncı artışına sebep olan "iş"e ( $\delta W$ ) karşılık geldiği kabul edilmektedir. Her bir döngü sırasında yapılan/harcanan enerji, Denklem-3 yardımıyla toplanarak numuneyi sıvılaştırmak için gerekli olan iş, metreküp başına Joule ( $J/m^3$ ) cinsinden hesaplanmıştır.

DeneySEL çalışmalar süresince; farklı düşey gerilme ve sıklıkta, “Tek yönlü (1-D): 115 adet” deney yapılmıştır. Detaylandırmak gerekirse; çalışma programında:

- 1. aşamada: sadece kum numunede 5 ayrı görelı sıklık ve 2 ayrı düşey gerilme-gözenek su basıncı şartlarında 10 deney;
- 2. aşamada: kum+silt karışımında 7 ayrı karışım oranında, 5 ayrı görelı sıklık ve 3 ayrı düşey gerilme-gözenek su basıncı şartlarında 105 deney gerçekteştirilmiştir.

Bu çalışma boyunca, toplam 115 deney yapılmıştır. Dolayısıyla, sıvılaşma enerjisini görelı sıklık, efektif gerilme ve ortalama tane çapının bir fonksiyonu olarak ifade eden 115 adet "iş" değeri elde edilmiştir.

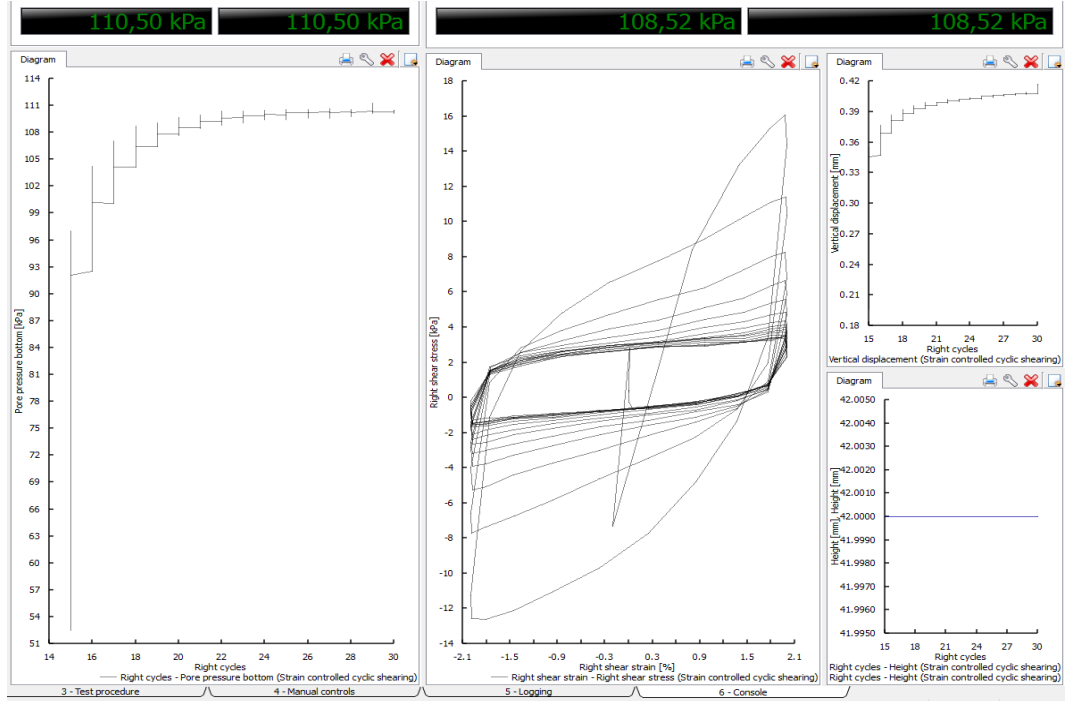


**şekil 4.22:** Sıvılaşma deneyleri yapılan kum örneğine ait bir deneyin ekran görüntüsü (bu örnekte deneyde numune çapı- $\phi$ : 100 mm, görelı sıklık- $D_r$ : %70, düşey gerilme- $\sigma_v$ : 100 kPa, gözenek su basıncı- $u$ : 50 kPa; kesme birim deformasyonu oranı: %5'tir. Grafiklerin türü ve sayısı, kullanıcı isteğine bağlı olarak değişmektedir)

Kum+Silt karışımı numuneler ile beraber temiz kum örneğleri üzerinde sıvılaşma deneyleri yapılarak, araştırmanın laboratuvar deneyleri kısmı tamamlanmıştır.

şekil 4.22'de verilen örnekte deneyde kum numune 1. çevrimde; şekil 4.23'de verilen örnekte deneyde kum+silt numune 2. çevrimde sıvılaşmıştır.

Şekil 4.22’de verilen örnek deneyde kum numunenin kesme dayanımı 63 kPa’dır. Şekil 4.23’de verilen örnek deneyde ise kum+silt numunenin kesme dayanımı 16 kPa olup; kuma göre 1/4 oranı kadar daha düşüktür.



Şekil 4.23: Sıvılaştırma deneyleri yapılan kum+silt numunesine ait bir deneyin ekran görüntüsü (Bu örnek deneyde numune çapı- $\phi$ : 100 mm, göreceli sıkılık-Dr: %50, düşey gerilme- $\sigma_v$ : 100 kPa, gözenek su basıncı-u: 50 kPa; kesme birim deformasyonu oranı- $\gamma$ : %5’tir. Bazı deneylerde, aşırı boşluk suyu basıncının geliştiği, taban ve tavan basıncının farklı değerlerde olduğu gözlenmiştir.)

Her iki deney düzeneğinde de sıvılaştırma başlangıcından sonra (1. ve 2. çevrimden sonra) sistem enerji uygulamaya devam etmektedir. Bu enerji deney düzeneğinin iç direnci (membran etkisi, yassı bileziklerin birbiri üzerinde kayma direnci vs.) olarak değerlendirilmektedir.

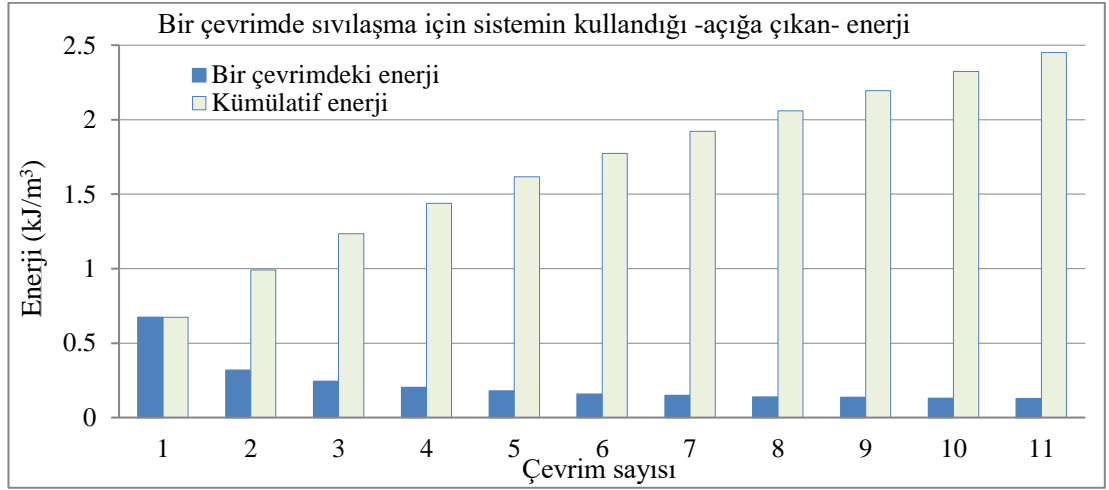
**Tablo 4.6:** Sıvılaştırma deneylerine ait veri dosyası kayıt örneği (dosya, Geozip adlı programda açılarak \*.txt uzantılı dosyaya dönüştürüldükten sonra \*.xls uzantılı yeni bir dosya olarak açılmaktadır. Daha sonra, elde edilen verilerle, sıvılaştırma enerjisi hesaplamaları yapılmaktadır)

#	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
1	Height	Backpress Burette	Vertical sti	Cell pressu	Drainage v	Sample An	Piston Are	Vertical cy	Right cycle	Left cycles	Tare Value	test	Deviator	Right shea	Left shear	Vertical sti	Pore press	Pore press	Pore press	Global Cox	Type of te	Actual height	
2	mm	kPa	ml	kPa	kPa	bool	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>					µm	mm	kPa	%	%	kPa	kPa	kPa	int	mm	
3	100	0.408471	0.258852	100.0229	50.7003	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.32257	-0.015	0.051	0.45	52.755	49.861	52.755	2880181	5	99.55	
4	100	0.408523	0.212212	100.1813	50.79061	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.39071	-0.014	0.051	0.451	52.646	49.754	52.646	2880680	5	99.549	
5	100	0.408545	0.234472	100.0625	50.80098	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.2615	-0.012	0.05	0.451	52.649	49.526	52.649	2881180	5	99.549	
6	100	0.408561	0.251222	101.3697	50.80089	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	50.56078	0.39	0.052	0.493	64.085	61.187	64.085	2881680	5	99.507	
7	100	0.408582	0.22154	100.3058	50.81062	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.49519	0.994	0.051	0.48	59.461	56.583	59.461	2882180	5	99.52	
8	100	0.408785	0.239984	99.93516	50.80753	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.12762	1.712	0.05	0.47	56.65	53.715	56.65	2882680	5	99.53	
9	100	0.40885	0.209244	99.93799	50.75131	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.18668	2.211	0.05	0.465	55.529	52.355	55.529	2883180	5	99.535	
10	100	0.409028	0.251432	100.0399	50.50806	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.53178	2.463	0.05	0.464	55.238	52.371	55.238	2883680	5	99.536	
11	100	0.409041	0.222176	100.0229	50.34713	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.67574	2.469	0.05	0.47	56.784	53.798	56.784	2884180	5	99.53	
12	100	0.409061	0.238288	100.17	50.30767	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.86233	2.213	0.05	0.488	62.175	59.005	62.175	2884680	5	99.512	
13	100	0.409111	0.219208	99.98043	50.2578	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.72263	1.741	0.051	0.504	67.048	64.083	67.048	2885180	5	99.496	
14	100	0.409123	0.23426	99.88423	50.24942	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	49.63781	1.097	0.051	0.505	66.649	63.849	66.649	2885680	5	99.495	
15	100	0.409149	0.25864	97.71406	50.22662	false	17671.46	17671.46	0	0	0	100	47.48745	0.28	0.051	0.505	66.233	63.212	66.233	2886180	5	99.495	

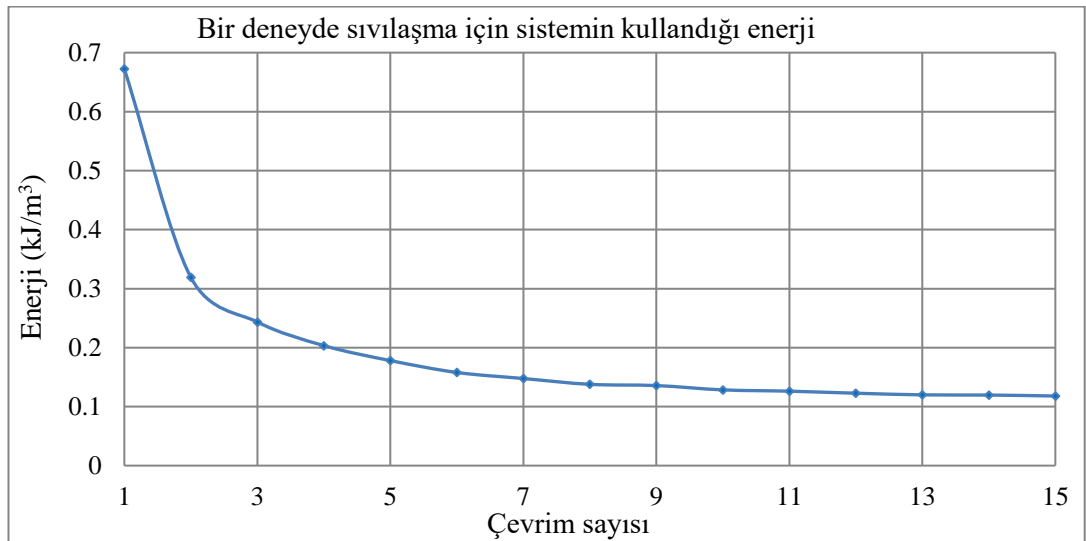
### 4.3 Verilerin Yorumlanması

Şekil 4.22’de verilen örnek deneyde 1. çevrimde sıvılaştığı gözlenen numunenin absorbe ettiği enerji hesaplanırken: İlk 1 çevrimdeki enerji toplanır, 1’nci çevrimden sonraki ortalama enerji (iç direnç) ilk 1 çevrim enerjisi toplamından çıkartılır (Şekil 4.24 ve 4.25).

Şekil 23’de verilen örnek deneyde 2’nci çevrimde sıvılaştığı gözlenen numunenin soğurduğu enerji hesaplanırken: İlk 2 çevrimdeki enerji toplanır, 2’nci çevrimden sonraki ortalama enerji (iç direnç) ilk 2 çevrim enerjisi toplamından çıkartılır (Şekil 4.24 ve 4.25).



Şekil 4.24: Bir çevrimde sıvılaşma için sistemin kullandığı-açığa çıkan enerjiye ( $\text{kJ/m}^3$ ) ait sütun grafik



Şekil 4.25: Bir deneyde çevrimler sırasında sıvılaşma için sistemin kullandığı-açığa çıkan enerji ( $\text{kJ/m}^3$ ) grafiği (sıvılaşmanın başlaması için büyük enerji harcanırken, devam etmesi daha küçük enerjilerle mümkün olmaktadır).

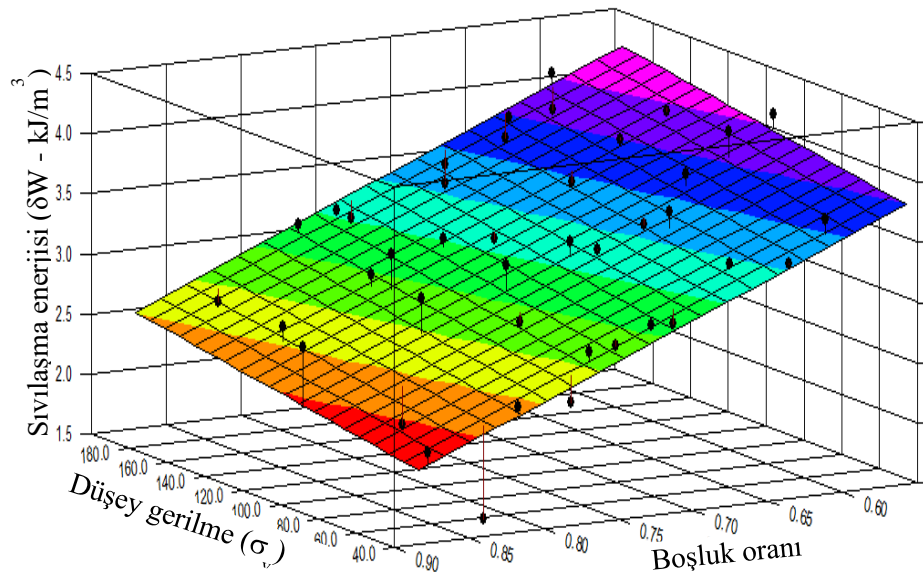
Deney sonucunda elde edilen verilerin/bulguların hesaplanması, grafiğe aktarılması ve istatistiki olarak yorumlanmasından sonra; artan ince tane yüzdesinin kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisine olan etkisi (iş parametresi) ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, diğer bir deyişle "iş" parametreleri; “Data Fit” programında analiz edilerek yorumlanmıştır. Enerji seviyelerindeki değişimi grafiğe aktararak sunulmuştur (Şekil 26).

Dünyadaki meydana gelen bütün depremlerde enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu enerji, Figueroa ve diğ. 1994, Liang (1995) gibi araştırmacılar tarafından önerilen yöntemlerle hesaplanabilmektedir (Kayabalı ve diğ. 2018; Tablo 4.7) .

Dünyadaki önemli sismik olaylarda zemine aktarılan enerji (Kayabalı ve diğ. 2018);

- i) Kocaeli depremi dışındaki depremlerde, zeminin birim hacmine 3-21 kJ/m<sup>3</sup> enerji aktarıldığı,
- ii) Laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen sıvılaşma enerjisinin ise 0.12-36 kJ/m<sup>3</sup> aralığında olduğu hesaplanmıştır.

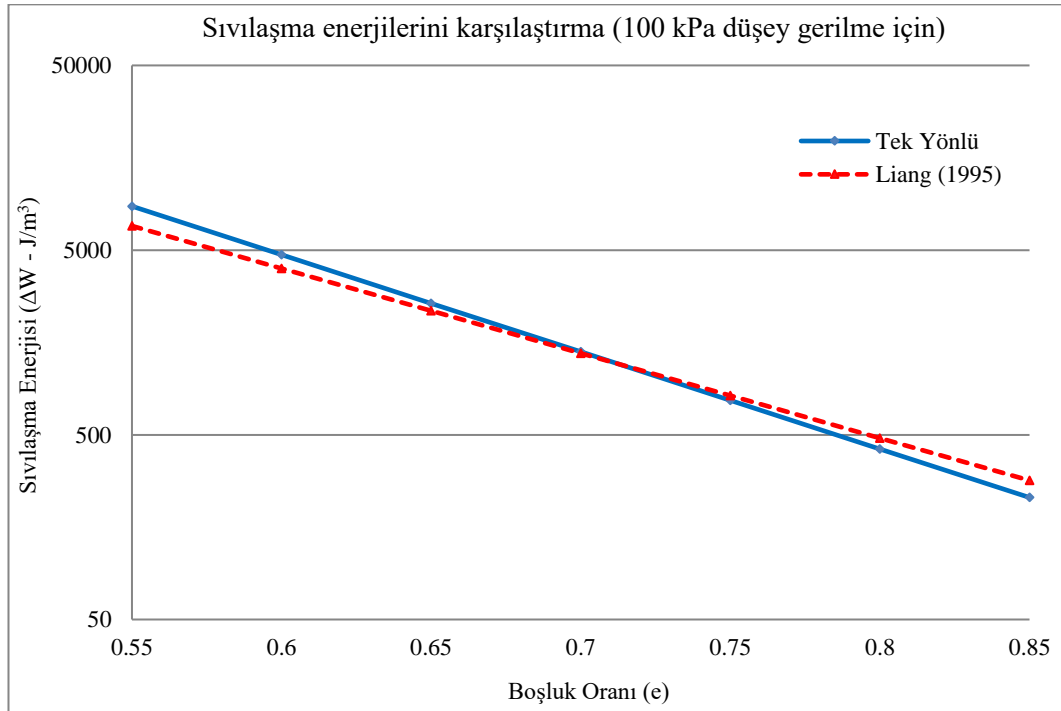
Yapılan deney sonuçlarına göre, numunelerdeki sıvılaşma enerjisi değişimi Liang (1995) denklemiyle karşılaştırıldığında; laboratuvar deney sonuçlarıyla Liang (1995)’e göre yapılan hesaplamaların birbirine yaklaşık uyumlu bir gidiş sergilediği görülmektedir (Şekil 4.27 ve 4.28).



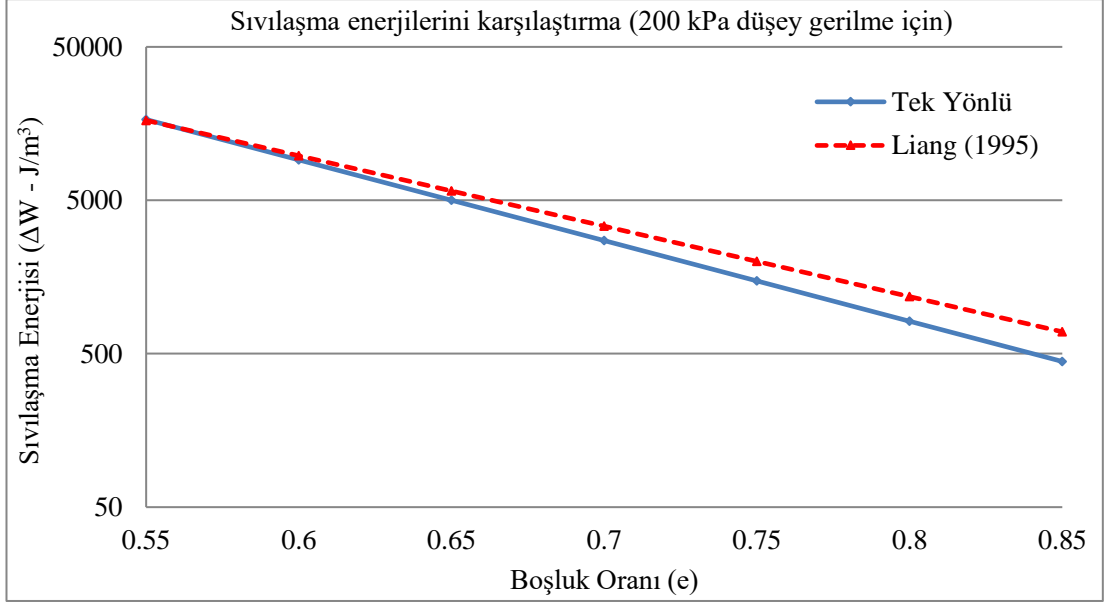
**Şekil 4.26:** Deneylerden elde edilen verilerin “Boşluk oranı-Düşey gerilme (kPa)” faktörlerine bağlı olarak hesaplanan sıvılaşma enerjisi değerlerinin üç boyutlu grafiği

**Tablo 4.7:** Dünyadaki bazı sismik olaylar ve bazı özellikleri ile 1 m<sup>3</sup> zemine aktarılan enerji (kJ/m<sup>3</sup>) değeri ( $M_w$ : moment büyüklüğü,  $a_{maks}$ : pik yatay yer ivmesi, R: deprem üreten faya olan uzaklık, W: yapılan iş, \*:  $M_L$ 'dir) (Kayabalı ve diğ. 2018)

Olay	$M_w$	İstasyon No.	$a_{maks}$ (g)	R (km)	W (kJ/m <sup>3</sup> )
Chi-Chi Taiwan 20 Eylül 1999	7,6	TCU045	0,34	25	7,9
Hollister (USA) 9 Nisan 1961	5,6*	USGS1028	0,18	21	3,0
Imperial Valley (USA) 15 Ekim 1979	6,5	USGS5115	0,37	16	3,0
Kobe (Japan) 16 Ocak 1995	6,9	CUE90	0,34	22	17
Kocaeli (Turkey) 17 Ağustos 1999	7,4	KOERI330	0,32	23	103
Landers (USA) 28 Haziran 1992	7,3	SCE24	0,73	2,0	12,4
Loma Prieta (USA) 18 Ekim 1989	7,0	CDMG47381	0,37	6,3	18,4
Northridge (USA) 17 Ocak 1994	6,7	CDMG24278	0,58	24	21,1



**Şekil 4.27:** 100 kPa düşey gerilme etkisinde, laboratuvarında belirlenen sıvılaşma enerjisi ile Liang (1995)'e göre hesaplanan enerji değerinin karşılaştırılması



**Şekil 4.28:** 200 kPa düşey gerilme etkisinde, laboratuvarında belirlenen sıvılaşma enerjisi ile Liang (1995)'e göre hesaplanan enerji değerinin karşılaştırılması

Tek yönlü tekrarlı basit kesme deney sonuçları ile Liang (1995) tarafından tespit edilen enerji değerlerine daha benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca, Liang (1995) denklemi ile incelenen Reid Bedford kumunun ( $D_{50}=0,26$  mm) sıvılaşma direncinin bu çalışma kapsamında incelenen silt ( $D_{50}=0,020$  mm) numunelerden genel olarak yüksek olduğu gözlemlense de artan sıkılık durumunda silt numunelerin sıvılaşma direncinin kumların sıvılaşma direncini geçtiği gözlemlenmiştir.

Doğal şartlarda, siltlerin boşluk oranı kumlara göre geniş bir yelpazede olmasına rağmen siltlerin boşluk oranındaki değişimin siltlerin sıvılaşma direncinde büyük öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tekrarlı basit kesme deney sonuçlarının, Liang (1995) tarafından tespit edilen enerji değerlerine yaklaşık olarak paralellik gösterdiği (benzerlik gösterdiği) gözlemlenmiştir.

Liang (1995) tarafından incelenen kumun ( $D_{50}= 0,26$  mm) sıvılaşma direncinin, bu çalışma kapsamında incelenen kum+silt karışımlarında kullanılan ( $D_{50-kum}: 0.37$  mm ve  $D_{50-silt}= 0,02$  mm) numunelerden genel olarak farklı olmasına rağmen; görelî sıklık değeri arttıkça, kum+silt numunelerin sıvılaşma direncinin Liang'ın incelediği kumun sıvılaşma direncini geçtiği hesaplanmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgularla, Liang (1995) ve ya diğer araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçların birbirinden farklıdır. Bu durumun temel nedeni, kullanılan deney düzeneklerinin farklı olması, deney düzeneklerinin çalışma (sarsıntı hareketi) prensiplerinin birbirinden farklı olmasıdır.

Doğal şartlarda, siltlerin boşluk oranı kumlara göre geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu durumun sonucu olarak siltlerin boşluk oranındaki değişim, siltlerin sıvılaşma direncinde büyük öneme sahiptir. Bu durumun sonucu olarak, kum+silt numunelerdeki silt oranı artışının sıvılaşma direncini de etkilediği grafiklere de yansımaktadır.

Kümülatif sıvılaşma enerjisi, aynı görelî sıklık ve aynı tane çapına ait numuneler üzerinde efektif gerilme artışı ile birlikte artmaktadır. Bu durumun nedeninin artan efektif gerilme, tanelerin deformasyon esnasında yeniden dizilimine karşı direnç oluşturarak kümülatif sıvılaşma enerjisini artırdığı düşünülmektedir.

Kümülatif sıvılaşma enerjisi, aynı tane çapındaki numunelerde aynı efektif gerilme değeri ve artan görelî sıklık değerinin etkisiyle artış göstermektedir. Görelî sıklık değerindeki artışın, tanelerin daha sıkı bir şekilde istiflenmesine etki ettiği ve taneler arası teması artırdığı, dolayısıyla, sıvılaşmaya karşı bir direnç oluşturduğu düşünülmektedir.



Kum+silt numunelerde, silt oranının artmasına bağlı olarak kum oranı azalmaktadır. Buna bağlı olarak, ortalama tane apı ( $D_{50}$ ) küülmeindedir. Ortalama tane çapının küçülmesi ise kümülatif sıvılaşma enerjisinin azalmasına (düşmesine) neden olmaktadır. Ancak, ortalama tane çapının ( $D_{50}$ ) küçülmesi yani silt içeriğinin artması; boşluk oranının artmasına etki etmektedir. Boşluk oranı artışının, numunelerin kümülatif sıvılaşma enerjisi değerindeki değişimin ana faktörlerinden birisi olduğunun kabul edilebileceğinin göstergesidir. Bunun gerekçesi olarak; ortalama tane çapının azalması ile artan boşluk oranının, taneler arasındaki etkileşimi azalttığı ve sıvılaşmanın daha düşük enerji değerlerinde ortaya çıkmasına neden olduğu düşünölmektedir.

Kum içerisine katılan silt içeriğinin artmasına bağlı olarak kumların sıvılaşma enerjisinin değiştiği belirlenmiştir.

Artan rölatif sıklığa bağlı olarak, kesme modöl oranında azalma (düşüş) meydana gelmektedir. Bu durum bütün düşey gerilme kademelerinde gözlenebilmektedir. Ayrıca, ortalama tane çapının düşmesine bağlı olarak kesme modöl oranında benzer düşüşler gözlenmiştir.

Gelecekte yapılacak araştırmacılar, değişik ortalama tane çapına ( $D_{50}$ ) sahip numunelerle; farklı geometrik şekilli (köşeli, yuvarlak, uzamış vb.) zemin danelerine sahip zeminlerin mineralojik bileşimi de göz önüne alınarak gerçekleştirilecek daha kapsamlı çalışmalarla elde edilen sonuçların güvenilirliği ve hassasiyeti artacaktır. Bunun yanında, değişik oranlardaki kil içeriğinin kumların sıvılaşma enerjisi üzerine olan etkisinin de araştırılması, bu gibi araştırmalara farklı bir boyut katacaktır.

Deneyisel çalışmalarda, kum numunelerinin deney hüccesine yerleştirilmesi sırasında, ayarlamalar gözlemsel ve insan eliyle yapılmak durumundadır. Dolayısıyla, hücre içerisine yerleştirilen kumun hedeflenen rölatif sıklıkta ( $D_r$ ) olabilmesi için mümkün olan en hassas şekilde ayarlanabilmesi temel hedeftir. Bunu sağlayabilmek için deneylere başlamadan önce rölatif sıklığın kolayca ayarlanabilmesi amacıyla çok sayıda ön deneme yapılmıştır. Buna rağmen rölatif sıklığın, hassas şekilde ayarlanamadığı konusunda kayęı duyulmaktadır. Ancak, gelişen veya geliştirilecek hassas teknolojik cihazlarla rölatif sıklığın ayarlanabilmesinin, deney sonuçlarının daha tutarlı olarak elde edilebilmesine büyük katkılar sağlayacağına inanılmaktadır.

Daha önceki araştırmacılar tarafından geliştirilen denklemler sayesinde rölatif sıklığı, efektif gerilmesi ve ortalama tane çapı bilindiği takdirde istenilen sahanın sıvılaşabilmesi için gereken kümülatif sıvılaşma enerjisi bulunabilmektedir. Ayrıca bu enerji, gerçekte muhtemel bir deprem tarafından üretilecek dinamik hareket sebebiyle zemine aktarılacak birim hacim başına enerji ile karşılaştırılarak bir sahanın sıvılaşıp sıvılaşmayacağı belirlenebilmektedir. Bu çalışma sonuçlarına bağlı olarak, sıvılaşma enerjisi tahmin denklemlerinin türetilmesi-geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir. Geliştirilecek olan bu tür denklemlerde önceki araştırmacılar tarafından farklı olarak;  $D_{50}$ , ince tane oranı, vb. gibi parametrelere de yer verilmelidir.

Bu tez çalışması bir tür kum ve farklı oranlarda hazırlanmış olan kum+silt karışımları üzerinde gerçekte gerçekleştirilmiştir. Artan ince tane içeriğinin kumların sıvılaşma enerjisine olan etkisinin daha hassas değerlendirilebilmesi amacıyla aynı veya benzer çalışmanın farklı tane şekline (köşeli, yassı, uzamış vb. gibi) ve farklı boyutlara sahip (ince, orta ve iri taneli) kum türleri kullanılarak deneylerin yapılması araştırmanın hassasiyetini arttıracaktır.

## 6. KAYNAKLAR

Akın, Ö., “Influence of plasticity and fines content on cyclic behaviour of sand.” MSc Thesis, *Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering and Technology*, İstanbul, (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.” *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (1), 145-158, (2004).

Altun, S. ve Ansal, A.M., “Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri.” *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi/d-Mühendislik*, 2 (4), 25-34, (2003).

Altun, S. ve Ansal, A.M., “Anizotropik konsolide zeminlerin dinamik davranışı.” *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği İnşaat Mühendisleri Odası*, 16 (29), 3523-3545, (2005).

Amini, F. and Qi, G.Z., “Liquefaction testing of stratified silty sands.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126 (3): 208-217, (2000).

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).

Andrews, D.C.A. and Martin, G.R., “Criteria for liquefaction of silty soils.” *Proceeding 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (12. WCEE-2000)*, (0312), 1-8, (2000).

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).

ASTM D422, “Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.” *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, Volume 04-08, (1996).

ASTM D854-14, “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.” *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2018).

ASTM D4253-16, “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.” *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM

International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2018).

ASTM D4254-16, “*Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.*” Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2018).

ASTM D5311-92, “Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil.” Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (1996).

ASTM D6913, “*Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.*” Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2018).

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.” *Computers and Geosciences*, 37 (11), 1883–1893, (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).

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

Beyaz, T., “Zemin Etkisinden Arındırılmış Deprem Kayıtlarına Göre Türkiye İçin Yeni Bir Deprem Enerjisi Azalım Bağıntısı Geliştirilmesi.” Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2004).

Beyaz, T., Kayabali, K. ve Sönmezer, Y.B., “Kumların sıvılaşmasında rölatif sıklık ve kesme birim deformasyonu etkisinin incelenmesi.” Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: 2018HZDP020, Denizli, (2018).

Beyaz, T. ve Özçelik, Ş., “Kumlu Zeminlerin Sıvılaşma Enerjisinin Laboratuvarda Belirlenmesinde Numune Boyutunun Etkisinin Araştırılması.” Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: 2018FEBE044, Denizli, (2019).

Boulanger, R.W. and Idriss, I.M., “Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 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).

Çetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgac, M. and Chowdhury, K., "Summary of SPT based field case history data of Cetin (2016) Database." Middle East Technical University, Soil Mechanics and Foundation Engineering Research Center. Report No: METU/GTENG 08/16-01, Ankara, (2016).

Dief, H.M., Figueroa, J.L. and Saada, A.S., "Validation of the Energy-Based Method for Evaluating Soil Liquefaction in Centrifuge." (March 26, 2001). *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. Paper 11, (2001).

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 Department of Commerce, 138, (1982).

Elibol, B., "Kısmi doygün kumların tekrarlı yükler altındaki davranışları." Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2005).

Figueroa, 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).

Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I. and Sokolov, V.N., "The liquefaction of clayey soils under cyclic loading." *Engineering Geology*, 86, 70-84, (2006).

Gutenberg, B. and Richter, C.F., "Magnitude and energy of earthquakes." *Annali di Geofisica*, 9, 1-15, (1956).

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).

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., "Stability of natural deposits during earthquakes." *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, USA, (1985).

Ishihara, K. and Yasuda, S., "Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation." *Soils and Foundations*. 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." *Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conferences on Recent Advances 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*. Ed. by: Triantafyllidis, Th, A.A. Balkema Publishers, (2004).

Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y., "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading," *Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundations*, 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 Dynamics and Earthquake Engineering*, 35: 13-28, (2012).

Jefferies, M. and Been, K., "Soil *Liquefaction: A Critical State Approach*." *Applied Geotechnics Series* (Series Editor: William Powrie), 2<sup>nd</sup> Edition. CRC Press, Taylor and Francis Group, (2016).

Kahraman, İ., "Seismic Liquefaction: 1-G Model Testing System and Shake Table Tests." MSc. Thesis, *İzmir Institute of Technology, Graduate School of Engineering and Sciences*, İzmir, (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).

Kayabali, K., "The role of soil behavior on damage caused by the Dinar earthquake (Southwestern Turkey) of October 1, 1995." *Environmental and Engineering Geosciences*, III (1), 111-121, (1997).

Kayabali, K. and Beyaz, T., "Strong motion attenuation relationship for Turkey-a different perspective." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **70**, 467-481, (2011).

Kayabalı, K., Selçuk, L. and Beyaz, T., “An approach for the application of energy-based liquefaction procedure using field case history data.” *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 163 (163), 99-114, (2020).

Kayabalı, K., Yılmaz, P., Fener, M., Aktürk, Ö. and Habibzadeh, F., “Assessment of soil liquefaction using the energy approach.” *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 156, 193-204, (2018).

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., 29 April-4 May 2013*, (2013).

Kramer, S.L., “*Geotechnical Earthquake Engineering*.” Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653, (1996).

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.” PhD Dissertation, *Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio*, (1995).

Mollamahmutoğlu, M. ve Babuçcu, F., “*Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*.” Gazi Kitabevi, Ankara, (2006).

Mollamahmutoğlu, M., Kayabalı, K., Beyaz, T. and Kolay, E., “Liquefaction-related building damage in Adapazari during the Turkey earthquake of August 17, 1999.” *Engineering Geology*, 67, 297–307, (2003).

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, A. and Cetin, K.O., “CPT based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential.” *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 132, 1032-1051, (2006).

Nalbantçılar, M., Beyaz, T. and Özlen, N.. “İlgın (Konya) Yerleşim Alanı Zeminlerinin Taşıma Gücü Özellikleri.” *Academic Perspective Procedia*, 2 (2), 102-109, (2019<sup>a</sup>).

Nalbantçılar, M., Beyaz, T. and Özlen, N.. “Consolidation Problem on the Clayey Soil With Containing High Groundwater Level. *Academic Perspective Procedia*, 2 (3), 642-649.” *Academic Perspective Procedia*, 2 (2), 102-109, (2019<sup>b</sup>).

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

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, (1979).

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 Sıklığın Saruhanlı (Manisa) İlçesi Zeminlerinin Sıvılaşmasına Etkisinin Dinamik Üç Eksenli Deneyi ile Araştırılması." *Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler Dergisi*, 2(1), 26-41, (2012).

Özçelik, Ş., "Kumlu Zeminlerin Sıvılaşma Enerjisinin Laboratuvarında Belirlenmesinde Numune Boyutunun Etkisinin Araştırılması." *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye*, (2019).

Özlen, N., "İlgin (Konya) yerleşim alanı zeminlerinin jeoteknik özelliklerinin araştırılması." *Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye*, (2019).

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 Earthquake Engineering.*, 14, 351-362, (2010).

Prakash, S. and Puri, V.K., "Recent advances in liquefaction of fine grained soils." Fifth Int. Conf. on Recent Adv. in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California. Paper No: 4.17a, 1-7, (2010).

Seed, R.B., "Closure to soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes." *J. Geotechnical Engineering*, 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." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 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." 4<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (Mar 26<sup>th</sup> – Mar 31<sup>st</sup>), Paper No: SPL-2, (2001).



Selçuk, L. ve Aydın, H., “Kuvaterner Yaşlı Alüvyal Zeminlerin Kuvvetli Yer Hareketine Etkisi: 2011 Van Depremleri.” *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36 (2), 75-97, (2012).

Selçuk, L. and Çiftçi, Y., “Microzonation of the Plio-Quaternary soils: a study of the liquefaction risk potential in the Lake Van Basin, Turkey.” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 161-176, (2007).

Selçuk, L., Selçuk-Sağlam, A. and Beyaz, T., “Probabilistic seismic hazard assessment for Lake Van basin, Turkey.” *Natural Hazards*, 54, 949-965, (2010).

Silver, M.L. and Seed, H.B., “Deformation characteristics of sands under cyclic loading.” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97, SM8, 1081-1098, (1971).

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

SzilvÁgyi, Z., Hudacsek, P. and Ray, R.P., “Soil Shear Modulus from Resonant Column, Torsional Shear and Bender Element Tests.” *International Journal of GEOMATE*, 10-2 (Sl. No. 20), 1822-1827, Geotechnical Construction Materials and Environmental, 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).

Unjoh, S., Kaneko, M., Kataoka, S., Nagaya, K. and Matsuoka, K., “Effect of earthquake ground motions on soil liquefaction.” *Soils and Foundations*, 52 (5), 830–841, (2012).

Ural, N., Özocak, A. and Önalp, A., “Dinamik üç eksenli deneyde frekansın etkisi.” 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı: 16-20 Ekim 2007. İstanbul, (2007).

Whitman, R.V., “Resistance of soil to liquefaction and settlement.” *Soils and Foundations*, 11(4), 59-68, (1971).

Yamaguchi, A., Mori, T., Kazama, M. and Yoshida, N., “Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake.” *Soils and Foundations*, 52 (5), 811-829, (2012).

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<sup>a</sup>).

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

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 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." MSc. Thesis, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU*, Ankara, (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).

Zhou, Y.-G., Xia, P., Ling, D.-S. and Chen, Y.-M., "Liquefaction case studies of gravelly soils during the 2008 Wenchuan earthquake." *Engineering Geology* 274, 105691, 1-20, (2020).