



## Geoteknik Mühendisliğinde 2016-2021 Yılları Arası Sıvılaşma Çalışmaları

### Liquefaction Studies In Geotechnical Engineering Between 2016-2021

Eren Bayrakçı<sup>1</sup>, Eren Balaban<sup>2</sup>, Mehmet İnanç Onur<sup>3</sup>, Hasan Burak Özmen<sup>4</sup>, Emrah Pekkan<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Sorumlu Yazar; Eskişehir Teknik Üniversitesi; erenbayrakci@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-8948-6590>; 0554 843 60 61

<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; erenb@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0001-9559-0127>

<sup>3</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; mionur@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-2421-4471>

<sup>4</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; hbozmen@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-5740-4618>

<sup>5</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; epekk@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-9414-8887>

#### Özet

Deprem kaynaklı olarak gerçekleşen sıvılaşma olayı, geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Bu olay, depreme maruz kalan suya doymuş, gevşek, kohezyonsuz zeminlerin artan boşluk suyu basıncından dolayı ani kayma mukavemeti kaybı yaşaması olarak özetlenebilir. Devirsel kayma gerilmelerinin etkisi ile aşırı boşluk suyu basıncı oluşmakta, zemin taneleri arasındaki bağın kaybolması ile zemin sıvı gibi davranmakta ve taşıma gücü kaybı yaşanmaktadır. Yapılar için, temel altı zeminde taşıma gücü kaybı yaşanması ağır neticeler doğurmaktadır. İlk kez Arthur Casagrande tarafından ortaya konulan sıvılaşma olgusu ile alakalı günümüzde hala araştırmalar devam etmektedir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin laboratuvar ve arazi testleri ile belirlenmesi, sıvılaşmaya karşı direncin artırılması ve 3D modelleme çalışmalarına sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada, geoteknik mühendisliği için büyük önem arz eden sıvılaşma konusu ile ilgili son beş yılda (2016-2021) yapılmış olan deneysel çalışmaların ve yeni yöntemlerin tanıtılması amaçlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Sıvılaşma, Deprem, Laboratuvar Denepleri

#### Abstract

Earthquake-induced liquefaction is one of the most important issues in geotechnical engineering. This phenomenon can be summarized as the sudden loss of shear strength due to increase in pore water pressure of saturated, loose, cohesionless soils subjected to earthquakes. Due to the effect of cyclic shear stresses, excessive pore water pressure occurs, the bond between soil grains is lost and the soil behaves like a liquid and a loss of bearing capacity is existed. Loss of bearing capacity in the subsoil of the foundations has serious problems for buildings. Researches regarding the liquefaction phenomenon are still continuing today, which was first introduced by Arthur Casagrande. It is frequently encountered with studies to determine the liquefaction potential of soils by laboratory and field tests, to increase resistance against liquefaction and 3D modeling studies. In this study, it is aimed to introduce experimental studies conducted in the last five years (2016-2021) and new methods about liquefaction, which is of great importance for geotechnical engineering.

**Keywords:** Liquefaction, Earthquake, Laboratory Experiments

#### 1. Giriş

Sıvılaşma; kohezyonsuz, gevşek ve suya doymuş zeminlerde, drenajsız şartlarda deprem kaynaklı devirsel kayma gerilmelerinin oluşturduğu aşırı boşluk suyu basıncından dolayı efektif gerilmenin azalması olarak tanımlanabilir. Deprem anında yükleme çok ani gerçekleştiği için, yük altında sıkılaşma eğiliminde olan zemin, bu fırsatı bulamaz. Bu durum boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmede azalmaya neden olur. Bu azalma ciddi boyutlara

ulaştığında ise, zemin sıvı gibi davranmaya başlar ve sıvılaşma olayı meydana gelir. Sıvılaşma sırasında, kum kaynaması, şevlerde akma göçmesi, daha az eğimli yamaçlarda yanıl yayılmalar, istinat yapılarında yenilmeler, taşıma gücü kaybına bağlı yapı hasarları gibi birçok tehlikeli durum meydana gelmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuşcu, 2006, Kramer, 2003).

Jefferies ve Been (2016) tarafından “Calaveras barajının göçmesi hazen tarafından incelenmiş ve sıvılaşmadan dolayı göçmenin gerçekleştiği belirtilmiştir. (Hazen, 1918, 1920)”. 1936 yılına gelindiğinde ise zeminlerin sıvılaşabilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan kritik boşluk oranı Casagrande tarafından tanımlanmıştır (Casagrande, 1936). Aynı çalışmada Casagrande akma sıvılaşması ve çevrimsel yumuşamayı da tanımlamıştır (Ledesma vd, 2021 ve Ismael vd 2020).

1964 yılında peş peşe yaşanan Alaska, Good Friday ve Japonya, Niigata depremlerinde sıvılaşma kaynaklı hasarlar oldukça dikkat çekmiştir. Deprem sonrası yapılan araştırmalar neticesinde, sıvılaşma 1965 yılında ilk kez Arthur Casagrande tarafından ortaya konulmuştur. 1970’li yıllarda ise sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için ilk detaylı çalışmalar yapılmıştır (Mollamahmutoğlu ve Babuşcu, 2006).

Sıvılaşma analizi; zeminin sıvılaşmaya yatkınlığının belirlenmesi, ilave kayma gerilmelerinin zemin direncini geçip geçemeyeceğinin hesaplanması ve olası deformasyonların tahminini kapsamaktadır. Zeminlerin sıvılaşma yatkınlığının belirlenebilmesi için boşluk oranı, dane çapı, dane şekli ve gradasyonu gibi zemin özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Sıvılaşmanın tetiklenip tetiklenmeyeceğine karar verebilmek için ilave kayma gerilmeleri hesaplanır ve zeminin mukavemeti ile karşılaştırılır. Son olarak, sıvılaşma nedenli olası deformasyonlar tahmin edilerek gerekli önlemlerin belirlenmesi aşmasına geçilir.

Sıvılaşma üzerine çalışmalar, laboratuvar ve arazi deneyleri, büyük ölçekli model testleri ile nümerik analizler olarak sıralanabilir (Onur, 2018). Arazi testleri ile büyük hacimli zemin kütleleri test edilirken laboratuvar deneyleri maliyet ve hız yönünden avantajlıdır. Arazi testleri olarak; SPT, CPT başta olmak üzere sismik yansıma, kuyu yukarı, kuyu içi gibi testler kullanılmaktadır. Laboratuvar deneyleri ise dinamik üç eksenli başta olmak üzere rezonant kolon, bender eleman, dinamik kesme, burulmalı kesme deneyleri olarak sıralanabilir. Model testlerinde ise sarsma tablası ve santrifüj testleri başta olmak üzere araştırmacıların geliştirdiği ölçekli modellerde bulunmaktadır. Nümerik yöntemler ise günümüzde bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişimi ile sonlu elemanlar, sonlu farklar, regresyon, yapay sinir ağı ve bulanık mantık gibi yöntemlerin veriler üzerinde uygulanmasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada, sıvılaşma konusu ile ilgili son beş yılda (2016-2021) yapılmış laboratuvar deneyleri içeren çalışmalar özetlenmiştir. Konu ile alakalı geliştirilen yeni nesil metodların tanıtılması ve tartışılması amaçlanmıştır.

## 2. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi Çalışmaları

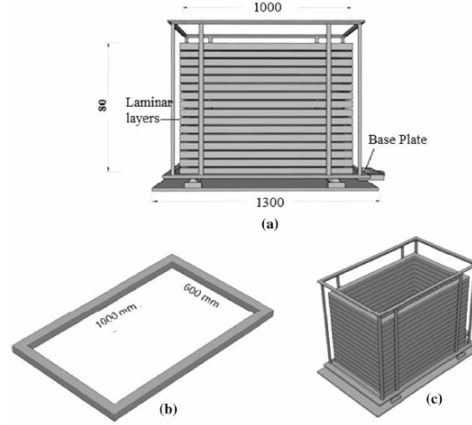
Abdallah vd. (2021) doyunluk derecesi ve rölatif yoğunluğun; Chlef kumunun sıvılaşma direncine etkisini araştırmışlardır. Drenajsız üç eksenli deneyleri, sırasıyla sıkı ve gevşek kuma karşılık gelen %12 ve %75’lik rölatif yoğunlukta ve %22, %45 ve %92’lik Skempton katsayıları için 100 kPa’lık bir çevresel basınç altında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin doyunluk derecesinin artmasıyla aşırı boşluk suyu basıncı logaritmik olarak artarken içsel sürtünme açısı logaritmik olarak azalmış, maksimum kesme mukavemeti lineer olarak azalmıştır. Her iki rölatif yoğunluk değerinde de oluşan aşırı boşluk suyu basıncı sıvılaşmaya neden olacak kadar yüksek olmamıştır. Ayrıca Skempton katsayısının azalmasıyla numunelerin sıvılaşma direnci artmıştır.

Zhu vd. (2021) yaptıkları çalışmada, çevrimsel üç eksenli testler yaparak kum zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerinde yüklem frekansının etkisini değerlendirmişlerdir. Suya doyun ve doyun olmayan kum numuneler üzerinde, farklı frekanslarda yüklemeler gerilme ve gerinim kontrollü olarak, yüklem yönleri de değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, kuru kumda yapılan gerilme kontrollü deneylerde frekans etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Doyun kumda ise gerilme kontrollü ve gerilme yönü değiştirilerek yapılan testlerde, aynı çevrim sayısında ölçülen aşırı boşluk suyu basıncının düşük frekansta daha fazla olduğu görülmüştür.

Zhu vd. (2021) Ayrık Eleman Metodu (Discrete Element Method – DEM) kullanarak gevşek kumların statik yükler altındaki gerilme tarihçesinin sıvılaşma davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Gerilme tarihçeleri drenajlı olarak çevrimsel ve saf kayma kuvvetleri olarak uygulanmış daha sonra drenajsız monotonik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, geçici sıvılaşma tüm numunelerde görülmüştür. Saf kesmeye maruz kalan numunelerde oluşan deviatör gerilmenin çevrimsel kaymaya maruz kalmış numunelere göre fazla olduğu belirlenmiştir.

Beena vd. (2021) Hindistan, Kerala’da bulunan kıyı kumlarının sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için tabakalı bir kutu sistemi kullanılarak sarsma tablası ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Sarsma tablası testleri için katmanlı bir zemin kabı (Şekil 1) geliştirilerek içerisindeki kumda oluşan aşırı boşluk suyu basıncı tepkilerini sunmuşlardır. Çalışmada, zeminin değişen rölatif yoğunluklarda, sabit sallama frekansında (1Hz) oluşan aşırı boşluk suyu basıncı üzerinde zemin gradasyonunun ve temel sarsıntısı genliğinin etkisi araştırılmıştır. Taban sarsıntısının genliği arttıkça

ve zeminin rölatif yoğunluğu azaldıkça zemin sıvılaşma direncinin azaldığı, daha düşük yüzdede ince kum içeriğine ve daha büyük ortalama tane boyutuna sahip kumun sıvılaşmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir.



**Şekil 1.** Tabakalı kutu tasarımı (a) Önden görünüm, (b) Tabaka ölçüleri, (c) 3D görünüm

Umar vd. (2021) Toyoura kumunun sıvılaşma sonrası drenajsız mukavemetini ve deformasyonunu, yüksek birim deformasyonlu burulma kesme testi kullanılarak incelemiştir. Zeminin saha gerilme koşullarını uygulamak amacıyla içi boş silindirik bir numune üzerinde basit kesme deneyleri uygulanmıştır. Hava püskürtme (air-pluviation method) yöntemiyle hazırlanan numuneler, ilk olarak sabit genlikli bir drenajsız çevrimsel kesme uygulanarak sıvılaştırılmıştır. Testler, farklı birim deformasyon genliklerinde sonlandırılmış ve ardından gerilme-şekil değiştirme ve aşırı boşluk suyu oluşturma tepkilerini elde etmek için drenajsız koşullarda monotonik olarak yüklenmiştir. Sıvılaşma sonrası drenajsız kesme mukavemetinin, kalıntı şekil değiştirmeden önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir.

Güler vd. (2021) 1999 depreminin etkisi ile sıvılaşmanın görüldüğü Adapazarı bölgesinden alınan örneklerden farklı boşluk oranları ile hazırlanan siltli kum numunelerde dinamik üç eksenli test sistemi ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. Aynı şartlarda hazırlanan numunelerin geçirimsizlik deneyleri yapılarak, hidrolik iletkenlik ile sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişkiyi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çevrimsel direnç oranı ile boşluk oranı ve geçirimsizlik katsayıları arasında bağıntı önermişlerdir.

Literatürdeki araştırmalar, bir kumun sıvılaşma yaşaması durumunda, artçı şoklarda kumun yeniden sıvılaşma davranışını büyük ölçüde etkileyebilecek anizotropinin meydana geleceğini göstermiştir. Iwai vd. (2020) Toyoura kumu üzerinde ardışık drenajsız üç eksenli çevrimsel yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Önce tüm numuneler sıvılaşana kadar aynı drenajsız tekrarlı yüklemeye tabi tutmuş, ardından sıvılaştırılmış numuneler farklı kalıntı deformasyonda sabitlenerek konsolide edilmiştir. Konsolide edilen numuneler tekrar drenajsız koşulda çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Kalıntı şekil değiştirmenin kumun yeniden sıvılaşma davranışını büyük ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Wei vd. (2020) siltli kumların boşluk oranı sabit tutularak, tane boyutu değişimi ve ince tane miktarının sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini açıklayabilmek için çevrimsel üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çevrimsel direncin azalması ile ince tane oranı arasında doğrusal ilişkili bir ifade tanımlanmıştır. Kumun karakteristik boyutları ile ince taneler arasındaki oranın bu ifade ile doğru orantılı olduğu ancak kum boyutları ile belirli bir ilişkisinin olmadığı görülmüştür.

Du vd. (2020) yaptıkları çalışmada, sıvılaşma sırasında meydana gelen kum kaynamalarının deney süreçlerine dahil edilebilmesi için üç eksenli test sisteminde kontrollü drenajın sağlandığı bir deney düzeneği tasarlamıştır. Drenajsız şartlarda geleneksel kesme, kontrollü drenaj altında kesme ve sıvılaşmaya kadar drenajsız kesme ardından kontrollü drenaj altında sürekli kesme olmak üzere üç farklı gerilme kontrollü üç eksenli deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yüksek kesme genlikleri altında bile zeminin artık sıvılaşmaya duyarlı olmadığı kritik bir boşluk oranına dikkat çekilmiştir. Sönmez (2020) çalışmasında, deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü testleri dinamik basit kesme test cihazı kullanılarak yapmış, ince tane dağılımının kumların sıvılaşma dirençleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Farklı silt içeriklerine sahip iki farklı kumun sıvılaşma davranışları karşılaştırılmıştır. Gerilme ve deformasyon kontrollü testlerin sıvılaşma enerjisinde meydana gelen değişim farklı çıkarsa da kümülatif sıvılaşma enerjisi birbirine çok yakın değerler vermiştir. İnce tane içeriğindeki artışın testlerde sıvılaşma enerjisini azalttığı görülmüştür. Rölatif sıklık arttıkça taneler arasındaki temasın ve sıklığın artmasına bağlı olarak sıvılaşma enerjisini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Keishing vd. (2020) Ayrık Eleman Metodu (Discrete Element Method – DEM) ile drenajsız üç eksenli deneylerde boşluk oranı, başlangıç ortalama efektif gerilme, ortalama deviatör gerilme, deviatör gerilme büyüklüğü ve yönü, boşluk suyu basıncı gelişimi parametrelerinin sıvılaşma davranışına olan etkisini modellemiştir. Yapılan

simülasyonlarda sıvılaşmaya en çok etki eden parametrenin boşluk oranı olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, sıvılaşma için gerekli olan enerji miktarı ile ilgili yeni bir denklem önerilmiştir. Denklemde ortalama deviatör gerilmeye yer verilmesiyle birlikte elde edilen modelin etkinliğinin arttığı belirtilmiştir.

Morimoto vd. (2019) başlangıçta statik kayma gerilmesi altında bulunan numuneler üzerinde uygulanan dinamik yükün büyüklüğüne göre sıvılaşma davranışını incelemişlerdir. Deneyler yeni geliştirilen «stacked-ring apparatus» cihazıyla ardışık olarak yapılarak, gerilme tarihçesi etkisi ortaya konmuştur. Deneyler sonucunda, geçmişte uygulanan dinamik yükün büyük olması durumunda, sıvılaşmadan sonra numunenin rölatif sıklığının daha fazla arttığı belirlenmiştir. Yüksek anizotropiye sahip numunelerde sıvılaşma daha erken gerçekleşmiştir.

Mele vd. (2019) üç ince taneli malzemenin gevşek, doymuş ve doymamış numuneleri üzerinde çevrimsel drenajsız üç eksenli testler gerçekleştirmiştir. Doygunluk derecesi azaldıkça sıvılaşma direncinin keskin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Sıvılaşmanın başlangıcını ve bitişini tanımlayan viskozitenin karakteristik değerlerinin, zeminin tane dağılımına bağlı olduğu ve üniformluk katsayısı arttıkça arttığı gösterilmiştir.

Wu and Kiyota (2019) yaptıkları çalışmada, kayma dalgası hızı ile sıvılaşma direnci arasındaki ilişkiyi bulabilmek için farklı yük geçmişlerine sahip, farklı yoğunluklarda ve zemin yapısındaki Toyoura kumları üzerinde dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde drenajlı tekrarlı yüklerin kayma dalgası hızında artışa sebep olduğu, ilk sıvılaşma deneyinden sonra numunelerin rölatif yoğunluklarının arttığı ancak kayma dalgası hızının azaldığı belirlenmiştir. Sıvılaşma nedeniyle Toyoura kumunda meydana gelen deformasyonların kayma dalgası hızından ziyade yoğunluktan etkilendiği görülmüştür. Ye vd. (2019) akma sıvılaşması davranışını açıklayabilmek ve göçme öncesi son yükleme çevrimini belirleyebilmek için Toyoura kumu üzerinde dinamik üç eksenli testler gerçekleştirmiştir. Farklı rölatif yoğunluklarda nemli sıkıştırma metodu ile hazırlanmış numunelerin bir grubuna klasik gerilme kontrollü testler uygulanırken diğer grubuna iki aşamalı olarak önce belirlenen düzeye kadar gerilme kontrollü çevrimsel yükleme, daha sonra deformasyon kontrollü monotonik yükleme uygulanmıştır. Bu yükleme yöntemi ile akma sıvılaşması meydana geldiğinde numunelerin ani çökmesini önenebilir ve gevşek kumların akma sıvılaşma davranışlarının ayrıntılı bir incelemesinin yapılmasına yardımcı olabileceği belirtilmiştir.

Mase vd. (2019) Osaka'da bulunan çalışma alanından aldıkları Izumio kumunun sıvılaşma direnci ve çevrimsel davranışını üç eksenli deney yöntemini kullanarak incelemişlerdir. 12,5m kadar olan derinlikten standart penetrasyon testi ile deney numunelerini elde etmişler ve SC ve SM olarak iki farklı zemin sınıflandırmışlardır. Dinamik üç eksenli deneyinden elde ettikleri sıvılaşma direnci eğrileri SC ve SM zemin sınıfındaki her iki kumun da daha önceden sıvılaşmış kumların sıvılaşma eğrileri ile aynı eğilimi gösterdiğini belirlemişlerdir.

Licata vd. (2018) İtalya'nın Napoli bölgesinden elde edilen siltli kumun drenajsız çevrimsel davranışını, monoton ve çevrimsel üç eksenli testler ile örselenmemiş numuneler ve sıkıştırılmış zemin karışımları üzerinde analiz etmiştir. Zeminin doğal tane boyu dağılımı korunarak, plastik olmayan kül, plastik ince tane ile veya piroklastik kum, silisli malzeme ile değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Doku, tanelerin kırılması ve plastik olmayan ince tane içeriği gibi özel yapısal faktörlerin drenajsız çevrimsel davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla tüm testler aynı konsolidasyon oranına ve aynı sıklıktaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, plastik olmayan ince kül eklenmesinin, plastik ince tanelere göre çevrimsel direnci belirgin ölçüde arttırdığını, tanelerin kırılma miktarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

Asadi vd. (2018) Yeni Zelanda'nın Kuzey Adası'ndaki Waikato Havzası'nda bulunan doğal pomzalı kumların drenajsız çevrimsel davranışı üzerine tane şekli ve ezilmenin etkisini araştırmışlardır. Doğal pomzalı kum ve farklı rölatif yoğunluklardaki Toyoura kumu üzerinde gerçekleştirilen drenajsız çevrimsel üç eksenli deneyler neticesinde, aynı rölatif yoğunlukta pomzalı kumların sıvılaşma direncinin Toyoura kumuna göre oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Pomzalı kumlar, çevrimsel yükleme uygulaması altında başlangıçta büzülme davranışı göstermiş, ancak birkaç döngüden sonra bu, çok güçlü bir genleşme davranışına dönüşmüştür. Pomzalı numunelerin içinde kararlı bir zemin iskeleti oluşması nedeniyle, duraysızlık gözlenmemiştir.

Yang ve Pan (2018) izotropik ve farklı oranlarda anizotropik olarak konsolide edilmiş numunelere dinamik üç eksenli deney yaparak, farklı konsolidasyon oranları ile birlikte farklı büyüklüklerdeki çevrimsel yüklerin boşluk suyu basıncı gelişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde, farklı rölatif yoğunlukların ve yükleme koşullarının numuneler üzerinde üç farklı göçme moduna (Akma sıvılaşması, Çevrimsel hareketlilik ve Kalıntı deformasyon göçmesi) yol açtığı görülmüştür. Bir numunenin çevrimsel yükler altında yenilmesi için gerekli olan enerji miktarının çevrimsel gerilme büyüklüğüne bağlı olduğu belirtilerek, literatürdeki bazı verilerle de çeliştiği ifade edilmiştir.

Zhuang vd. (2018) Yangtze Nehri vadisi boyunca yoğun bir şekilde biriken şistli Nanjing kumunun farklı yükleme durumları altında sıvılaşma sonrası kayma modülü azalmasını araştırmak için çevrimsel burulmalı kesme testi gerçekleştirmişlerdir. Karşılaştırma amacıyla Toyoura kumu ile deneyler tekrar edilmiştir. Ayrıca, membranın numunenin mukavemeti üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Kayma birim deformasyon seviyesi %20'den büyük olduğunda membran etkisinin ihmal edilemeyeceği görülmüştür. Sıvılaştırılmış haldeki Toyoura ve Nanjing

kumlarının kayma modülü eğrilerinin benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Noorzad ve Shakeri (2017) yapmış oldukları çalışmada, genellikle temiz kum gibi davrandığı düşünülen siltli kumun sıvılaşma sonrası davranışlarını incelemek ve silt içeriğinin kumlarda çevrimsel yüklemeye ile elde edilen mukavemeti nasıl değiştireceğini belirlemek için monotonik üç eksenli testler gerçekleştirmişlerdir. %15 siltli kumda dayanım azalırken %30 siltli kumda dayanımın arttığını, temiz kumda veya %5 siltli kumda ise dayanımdaki değişimin ihmal edilebilir derecede olduğunu gözlemlemişlerdir.

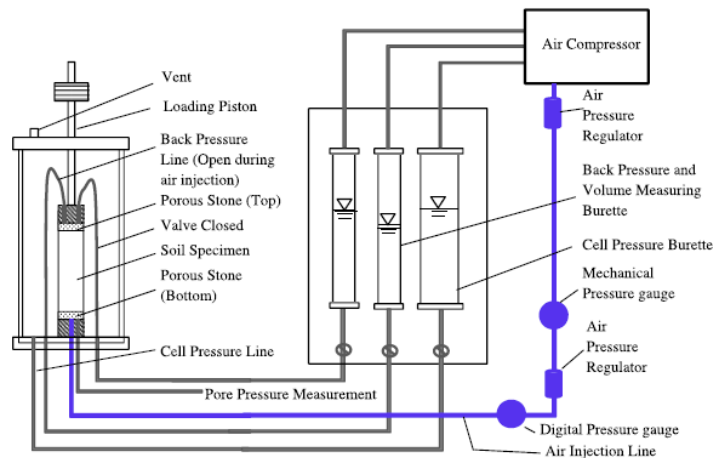
Azeiteiro vd. (2017) yaptıkları çalışmada, dinamik üç eksenli deneyinde numuneler üzerine uygulanan yüklerin düzensiz olmaları durumunda numunelerin sıvılaşma davranışına olan etkilerini incelemiştir. Ünlü yüklemeye ve büyük genlikli tek bir pik yüklemeye döngüsü içeren drenajsız çevrimsel üç eksenli deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Tek bir yüksek genlikli gerilme uygulanmasının numunede gerçekleşen deformasyonu hızla arttırdığı, benzer şekilde boşluk suyu basıncında ani artış meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca, böyle bir yüklemenin daha erken uygulanmasının numunenin sıvılaşması için gerekli çevrim sayısını azalttığı belirlenmiştir.

Chang vd. (2017) plastik olmayan siltli kumun sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme davranışını araştırmak için Tayvan'daki Hsinhwa bölgesini araştırma alanı olarak seçmişlerdir. Laboratuvar testleri için yüksek kaliteli örselenmemiş zemin numuneleri elde edilmiş, boşluk oranı, ince tane içeriği ve örselenme derecesinin plastik olmayan siltli kumun sıvılaşma sonrası hacimsel birim deformasyonuna etkisi araştırılmıştır. Boşluk oranı, ince tane içeriği ve örselenme derecesinin yükselmesi, sıvılaşma sonrası daha yüksek hacimsel deformasyon olacağını göstermektedir. %20~35 ince tane içeriğinin bir geçiş bölgesi olduğu ve dinamik davranışın değiştiğini gösteren çalışmalar ile uyumlu davranış gözlemlenmiştir.

Arab vd. (2016) doygunluk derecesinin kumun sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisini belirlemek için drenajlı, drenajsız monotonik ve çevrimsel üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Testler farklı rölatif yoğunluklarda Hostun RF kumu (Fransa) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, Skempton katsayısı B'nin azalmasıyla sıvılaşma direncinin arttığını göstermektedir. Sıvılaşma direncini Skempton B katsayısı ile ilişkilendirmek için basit bir matematiksel ilişki önerilmiştir.

### 3. Sıvılaşmanın Önlenmesine Yönelik Çalışmalar

Amanta ve Dasaka (2021) yaptıkları çalışmada, suya doygun granüler zeminin çevrimsel üç eksenli cihaz ile sıvılaşmasına karşı hava enjeksiyon yönteminin etkinliğini araştırmışlardır. Değişken olarak gerinim genliği, çevresel basınç ve hava enjeksiyon basınçları dikkate alınarak Hint standart kumu üzerinde gerinim kontrollü çevrimsel üç eksenli testler gerçekleştirilmiştir. Desatürasyon işlemi gerçekleştirilebilmek ve hava enjeksiyon işlemi kolaylaştırmak için, Şekil 2'de gösterildiği gibi üç eksenli deney cihazı modifiye edilmiştir. Görsele mavi renkle vurgulanan hat ile numune tabanına hava kompresörü bağlanmıştır. Konsolide edilmiş suya doygun zemin numunelerine hava enjekte edilmiştir. Tamamen suya doygun ve hava enjeksiyonu uygulanmış zeminlerin dinamik özellikleri karşılaştırılmıştır. Zeminin hava enjeksiyon yöntemiyle desatürasyonunun zeminin sıvılaşma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Farklı çevresel basınçların ulaşılabilecek nihai desatürasyon seviyesinde çok etkili olmadığı, hava enjeksiyonu durdurulduktan 30 gün sonra bile zemin içerisindeki havanın sistemi terk etmediği çalışmanın diğer bulguları arasındadır.



Şekil 2. Hava enjeksiyonu için modifiye edilmiş üç eksenli deney cihazı

Geoteknik mühendisliği alanında zeminlerin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için biyopolimerlerin kullanımı son yıllarda popüler bir araştırma konusu olmuştur. Smitha ve Rangaswamy (2020) yaptıkları çalışmada Kalpetta, Kerala, Hindistan'dan elde edilen agar biyopolimeri ile farklı kütleme sürelerinde işlenmiş doğal siltli kum üzerinde gerinim kontrollü dinamik üç eksenli bir dizi konsolidasyonlu drenajsız test gerçekleştirilmiştir. 7 gün kürlenmiş, %2 agar biyopolimer uygulanmış zeminin kayma modülünün 50. yükleme döngüsünde işlenmemiş zemin örneklerinden %317 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sıvılaşmadan kaynaklı zemin hasarlarının hafifletilmesi için biyopolimerlerin çevre dostu bir alternatif olarak kullanılma potansiyeli olduğu tespit edilmiştir.

He vd. (2020) sıvılaşmaya karşı zemini iyileştirmek için kullanılan biyosementasyon uygulamasında, doğrudan canlı bakteri kullanmak yerine üreolitik bakterilerin parçalanmasından elde edilen ham üreaz kullanarak yeni bir metod geliştirmişlerdir. Ultrasonik hücre parçalama yöntemi kullanılarak bakterilerden ham üreazın başarıyla elde edilebileceği bulunmuştur. Üreaz ile muamele edilen siltli kum numunelerinin canlı bakteri ile muamele edilen numunelere göre daha yüksek kesme mukavemetlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Zhang ve Russell (2020) ayrık aglomera Loksand liflerini kumla karıştırarak zeminin sıvılaşmaya karşı direncini arttırmak üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Karışımlara drenajlı ve drenajsız üç eksenli basınç testleri uygulayarak yüklerin kum iskeleti, lifler ve boşluk suyu boyunca dağıtıldığı ve paylaşıldığı mekanizmaları göstermişlerdir. Liflerin kum iskeletinin maruz kaldığı yük yollarını nasıl değiştirdiği gösterilmiştir. Liflerin sıvılaşmayı nasıl önlediği ve geleneksel olarak tanımlanan boşluk suyu basıncı oranının yanlış bir şekilde aksini belirtebileceği tespit edilmiştir.

Ciardi vd. (2020) koloidal silika jelinin zemin sıvılaşmasına, hidrolik geçirgenliğine ve oturmasına olan etkilerini incelemiştir. Dinamik üç eksenli deneyleri, farklı çevrimsel gerilim oranları (CSR-cyclic stress ratio) ve koloidal silika jeli yüzdeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde kesme kutusu deneyi ve ödometre testi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar zeminin sıkışabilirliğinin azaldığını ve %2 koloidal silika oranının zeminin sıvılaşma direncini iyileştirmede katkı sağladığını göstermiştir.

Bai vd. (2019) yaptıkları çalışmada polipropilen fiberlerin temiz kum zeminlerin sıvılaşma davranışına olan etkilerini halka kesme testi (ring shear test) ile incelemiştir. Deney programı kapsamında 2 farklı yoğunlukta ve 3 farklı yüzdesel içerikte polipropilen kum karışımları test edilmiştir. Deneyler sırasında normal gerilme, kesme gerilmesi, aşırı boşluk suyu basıncı, kayma gerinimi ve düşey deplasman sürekli olarak ölçülmüştür. Polipropilen fiberlerin etkisinin daha yoğun numunelerde daha belirgin olduğu, sıvılaşma direncinin arttığı ve kumun sıvılaşma sonrasındaki yayılım davranışını engellediği belirlenmiştir.

Keramatikerman vd. (2018) yaptıkları çalışmada, uçucu külün kum-bentonit karışımının sıvılaşma davranışına etkisini bir dizi drenajsız monotonik üç eksenli testler uygulayarak araştırmışlardır. Uçucu kül ilavesinin daha büyük bir deviatorik gerilmeye ve akışsız bir davranış oluşumuna neden olduğunu gösterilmiştir. Uçucu kül ile muamele edilmiş numunelerde, rölatif yoğunluk arttıkça maksimum deviatorik gerilmenin de arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma, kum-bentonit numunelerinin uçucu kül uygulanmış numunelere göre daha düşük sıvılaşma mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir.

Simatupang vd. (2018) enzimatik olarak indüklenmiş, kalsit çöktürme işlemi görmüş kumun drenajsız çevrimsel davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamak için kapsamlı deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Keisha ve Toyoura kumu kullanılarak tanecik boyutu, çevre basıncı, kalsit içeriği ve çöktürme sırasındaki doyma derecesinin sıvılaşma direnci üzerinde etkisi incelenmiştir. Kalsitin kum tanelerini bağlayarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesine doğrudan katkıda bulunduğu görülmüştür.

Mikrobiyal kaynaklı kalsit çöktürme, dinamik yüklemeye maruz kalan kumların davranışını iyileştiren yeni bir zemin iyileştirme tekniğidir. Feng ve Montoya (2017) kayma dalgası hızının yalnızca kalsitin kütlelerinden etkilenmediğini, aynı zamanda parçacık temaslarında kalsit çöktürmesinin dağılımından da etkilendiğini göstermeyi amaçlamıştır. Mikrobiyal kaynaklı kalsit çöktürme ile aynı kalsit değerinde ancak farklı kayma dalgası hızlarına sahip olacak şekilde numuneler hazırlanmış ve ardından çevrimsel olarak yüklenmiştir. Daha yüksek kayma dalgası hızına sahip numunenin daha büyük sıvılaşma direncine sahip olduğu gösterilmiştir. Davranışın sadece kalsit kütlelerinden değil, aynı zamanda kalsit dağılım modelinden de etkilendiği belirtilmiştir.

Li vd. (2016) kum zeminlerin sıvılaşmaya karşı performansının iyileştirilmesinde geri dönüştürülmüş kauçuk kırıntılarının potansiyel kullanımını değerlendirmek için, kauçuk-kum karışımlarının dinamik davranışını rezonant kolon ve çevrimsel üç eksenli testleri uygulanarak incelenmiştir. Kauçuk-kum karışımlarının sonuçları literatürden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karışım oranının, dinamik kesme modülünü ve sıvılaşma duyarlılığını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir.

#### 4. Yorumlar

Sıvılaşma önlem alınmadığında büyük deformasyonlara neden olmaktadır. Sıvılaşmaya karşı önlem alınabilmesi için sıvılaşma mekanizmasının tam olarak ortaya konulması gerekmektedir. Sıvılaşma davranışının belirlenebilmesi için çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Özellikle sıvılaşma davranışını etkileyen parametrelerin belirlenmesi ile sıvılaşma sonrası tekrar yüklemeye maruz kalan zeminlerin davranışının test edilmesine yönelik deneysel çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmada sıvılaşma konusu ile ilgili son beş yılda (2016-2021) yapılmış olan deneysel çalışmalar özetlenmiştir. Çalışmalardan deprem tehlikesi bulunan ve sıvılaşma potansiyeli olan zeminler için sıvılaşma analizlerinde laboratuvar deneylerinin halen kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca sıvılaşma davranışı için genel mekanizmalar benzer olsa da her zemin numunesi için deneysel analizlerin gerekli olduğu ve sıvılaşma direncinin birçok farklı parametreye bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

#### Referanslar

- Abdallah K., Abdelkader B., Ahmed A., Eddine B.D., Marwan S. (2021) A laboratory study of shear strength of partially saturated sandy soil. *Geomechanics and Geoenvironmental Engineering*, <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1864034>.
- Amanta A.S., Dasaka S.M. (2021) Air injection method as a liquefaction countermeasure for saturated granular soils. *Transportation Geotechnics*, 30, 100622, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100622>.
- Arab A., Belkhatir M., Sadek M. (2016) Saturation Effect on Behaviour of Sandy Soil Under Monotonic and Cyclic Loading: A Laboratory Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34: 347-358, <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9949-6>.
- Asadi M.S., Asadi M. B., Orense R. P., Pender M. J. (2018) Undrained Cyclic Behavior of Reconstituted Natural Pumiceous Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001912](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001912).
- Azeiteiro J.N.R., Coelho P. A. L. F., Taborda D. M.G., Grazina J. C.D. (2017) Energy-based evaluation of liquefaction potential under non-uniform cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 650-665, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.005>.
- Bai Y., Liu J., Song Z., Bu F., Qi C., Qian W. (2019) Effects of Polypropylene Fiber on the Liquefaction Resistance of Saturated Sand in Ring Shear Tests. *Applied Sciences*, 9(19):4078, <https://doi.org/10.3390/app9194078>.
- Beena K.S., Jayakrishnan V., Alex A., Bindu C.S. (2021) Analysis of Liquefaction Potential of Coastal Sands Using Lamina Box System. *Indian Geotech J* 51, 1209–1224, <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00503-0>.
- Casagrande A. (1936) Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Earth Fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23, 257-276.
- Chang M.H. Chen J.W., Lee W.F. (2017) Post-liquefaction volumetric strain behavior of non-plastic silty sand - A case study of Hsin-Hwa liquefaction. *Journal of Applied Science and Engineering*, 20(1), 63-72, <https://doi.org/10.6180/jase.2017.20.1.08>.
- Ciardi G., Bardotti R., Vannucchi G. and Madiati C. (2020) Effects of high-diluted colloidal silica grouting on the behaviour of liquefiable sand. *Geotechnical Research* 7(4): 193–208, <https://doi.org/10.1680/jgere.20.00010>.
- Du S., Chian C. S., Qin C. (2019) Post-liquefaction Pore Pressure Dissipation in Sand under Cyclic Stress Triaxial Testing. *Géotechnique*, 70(2), 1-42, <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.p.205>.
- Feng K. and Montoya B.M. (2017) Quantifying Level of Microbial-Induced Cementation for Cyclically Loaded Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001682).
- Güler E., Savaş H., Afacan K.B. (2021). Effect of permeability on liquefaction potential of silty sands. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:1410, 2-9, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07822-9>.
- Hazen, A. (1918) A study of the slip in the Claveras Dam. *Engineering News Record*, 81(26), 1158-1164.

- Hazen, A. (1920) Hydraulic fill dams. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 83, 1713-1745
- He J., Gao Y., Gu Z., Chu J., Wang L. (2020) Characterization of Crude Bacterial Urease for CaCO<sub>3</sub> Precipitation and Cementation of Silty Sand. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003100).
- Ismael B., Lombardi D., Bhattacharya S., Ahmad S.A. (2020) Use of Instability Curves for the Assessment of Post Liquefaction Stability and Deformation of Sloping Grounds. Engineering Geology 265
- Iwai H., Ni X., Ye B., Nishimura N., Zhang F. (2020) A new evaluation index for reliquefaction resistance of Toyoura sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 136: 106206, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106206>.
- Jefferies M., and Been K. (2016) Soil Liquefaction A Critical State Approach Second Edition CRC Press, ISBN 9780367873400
- Keishing J., Huang X., Hanley K. (2020) Energy dissipation in soil samples during cyclic triaxial simulations. Computers and Geotechnics, 121: 103481, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103481>.
- Keramatikerman M., Chegenizadeh A., Nikraz H., Sabbar A.S. (2018) Effect of flyash on liquefaction behaviour of sand-bentonite mixture. Soils and Foundations, 58(5), 1288-1296, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.004>.
- Kramer S.L. (2003). Geoteknik Deprem Mühendisliği. (Çev. K. Kayabalı). Ankara: Gazi Kitapevi. (Orijinal yayın tarihi, 1996)
- Ledesma O., Manzanal D., and Sfriso A. (2021) Formulation and Numerical Implementation of a State Parameter-Based Generalized Plasticity Model for Mine Tailings. Computers and Geotechnics, 135.
- Li B., Huang M. and Zeng X. (2016) Dynamic Behavior and Liquefaction Analysis of Recycled-Rubber Sand Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(11), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001629](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001629).
- Licata V., D'Onofrio A., Silvestri F. (2018) Microstructural factors affecting the static and the cyclic resistance of a pyroclastic silty sand. Géotechnique, 68(5), 434-441, <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.319>.
- Mase L. Z., Likitlersuang S., Tobita T. (2019) Cyclic behaviour and liquefaction resistance of Izumio sands in Osaka, Japan. Marine Georesources & Geotechnology, 37(7), 765-774, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1485793>.
- Mele L., Tian J.T., Lirer S., Flora A., Koseki J. (2018) Liquefaction resistance of unsaturated sands: Experimental evidence and theoretical interpretation. Géotechnique, 69. 1-44, <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.042>.
- Mollamahmutoğlu M. ve Babuşcu F. (2006). Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri. Ankara: Gazi Kitapevi.
- Morimoto T., Aoyagi Y., Koseki J. (2019) Effects of small and large shear histories on multiple liquefaction properties of sand with initial static shear. Soils and Foundations, 59,2024-2035, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.001>.
- Noorzad R., Shakeri M. (2017) Effect of silt on post - cyclic shear strength of sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 97, 133-142, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.013>.
- Onur M. (2018) Eskişehir Kohezyonlu Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi. 2ND International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management 04-06 May 2018. Sakarya, Turkey.
- Simatupang M., Okamura M., Hayashi K., Yasuhara H. (2018) Small-strain shear modulus and liquefaction resistance of sand with carbonate precipitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 115, 710-718, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.027>.



- Smitha S. and Rangaswamy K. (2020) Effect of Biopolymer Treatment on Pore Pressure Response and Dynamic Properties of Silty Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003285).
- Sönmezer, Y. B. (2020) Siltli Kumlarda Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Sıvılaşma Testlerinin Karşılaştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 322-337, <https://doi.org/10.31202/ecjse.621605>.
- Umar M., Kiyota T., Chiaro G., Duttine A. (2021) Post-liquefaction deformation and strength characteristics of sand in torsional shear tests. *Soils and Foundations*, 61:5, 1207-1222, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.009>.
- Wei X., Yang J., Zhou Y. G., Chen Y. (2020) Influence of particle-size disparity on cyclic liquefaction resistance of silty sands. *Géotechnique Letters*, 10(2), 155-161, <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00076>.
- Wu C., Kiyota T. (2019) Effects of specimen density and initial cyclic loading history on correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance of Toyoura sand. *Soils and Foundations*, 59, 2324-2330 <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.018>.
- Yang Z. X., Pan K. (2018) Energy-Based Approach to Quantify Cyclic Resistance and Pore Pressure Generation in Anisotropically Consolidated Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002419).
- Ye B., Ni X., Ye G., Huang Y., Lu P. (2019) Prediction of the initial point of the last cycle in undrained cyclic triaxial tests on flow liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 12-22, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.028>.
- Zhang X. and Russell A.R. (2020) Assessing Liquefaction Resistance of Fiber-Reinforced Sand Using a New Pore Pressure Ratio. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002197](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002197).
- Zhu M., Gong G., Xia J., Liu L., Wilkinson S. (2021) Effects of deviator strain histories on liquefaction of loose sand using DEM. *Computers and Geotechnics*, 136: 104213, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104213>.
- Zhu Z., Zhang F., Peng Q., Dupla J.C., Canou J., Cumunel G., Foerster E. (2021) Effect of the loading frequency on the sand liquefaction behaviour in cyclic triaxial tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147:106779, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106779>.
- Zhuang H., Wang R., Chen G., Miao Y., Zhao K. (2018) Shear modulus reduction of saturated sand under large liquefaction - induced deformation in cyclic torsional shear tests. *Engineering Geology*, 240, 110-122, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.018>.