

Kumların sıvılaşmasında rölatif sıklık ve kesme birim deformasyonu etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of the relative density and shear strain on liquefaction of sands

Turgay BEYAZ^{1*}, Kamil KAYABALI², Yetiş Bülent SONMEZER³

¹Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
tbeyaz@pau.edu.tr

²Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
kayabali@ankara.edu.tr

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.
bsonmezer@kku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.03.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 09.04.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 09.04.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.53138
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, gerilme yaklaşımını kullanan SPT, CPT gibi arazi yöntemleri ve üç eksenli dinamik kesme, burulmalı kesme, rezonant kolon, bender eleman gibi laboratuvar deneyleri ile belirlenmektedir. Kumların sıvılaşma potansiyelinin tahmininde son zamanlarda, enerji kavramı kullanılmaya başlanmıştır. Bu yaklaşımda kullanılan başlıca parametreler, zeminin rölatif sıklığı ve efektif gerilmedir. Bu çalışmada, Devirsel Basit Kesme Düzenegi kullanılmıştır. Bu çalışmada, kumların sıvılaşma enerjisinin belirlenmesinde, kesme birim deformasyonu oranı ve rölatif sıklığın etkisi incelenmiştir. Çalışmada, temiz ince deniz kumu kullanılmıştır. Kum numuneleri 3 farklı rölatif sıklıkta ($D_r = \%40, \%55$ ve $\%70$); 4 ayrı düşey gerilme ($\sigma_v = 50, 100, 200$ ve 300 kPa) ve boşluk suyu basıncı ($u = 25, 50, 75$ ve 150 kPa) etkisinde bırakılmıştır. 3 ayrı kesme birim deformasyonu oranında ($\gamma = \%2, \%3.5$ ve $\%5$) toplam 36 deney yapılmıştır. Deney örneklerine, tek eksenli 0.1 Hz frekansta harmonik yükleme uygulanmıştır. Çalışma sonucunda rölatif sıklık, kesme birim deformasyonu oranı ve düşey gerilme şartlarının kumların sıvılaşma potansiyeline etkisi ince taneli deniz kumu için ortaya konmuştur. Kesme birim deformasyon oranındaki artış, sıvılaşma potansiyelini $\%3$ 'lük oranda azaltmaktadır. Rölatif sıklıktaki artış, kumun kesme direncini arttırmaktadır. Bu ise sıvılaşmayı geciktirmekte ve devir sayısında artışa neden olmaktadır.

Anahtar kelimeler: Devirsel basit kesme deneyi, Boşluk suyu basıncı, Kesme birim deformasyonu, Sıvılaşma potansiyeli, Düşey gerilme, Rölatif sıklık.

Abstract

Liquefaction potential of non-cohesive soils is determined by field tests such as SPT, CPT, which use the stress approach, and laboratory tests such as three-dimensional dynamic shear, torsional shear, resonant column, and bender element tests. Recently, the approach of energy has been used to estimate the liquefaction potential of sands. The main parameters used in this approach are relative density and effective stress of the ground. In this study, Cyclic Simple Shear Test arrangement is used. In this study, the effect of shear strain and relative density on the liquefaction energy of the sands were investigated. In the study, clean fine marine sands were used. In this study, 3 different relative densities for a sand sample ($D_r = 40\%, 55\%$ and 70%); 4 different stresses ($\sigma_v = 50, 100, 200$ ve 300 kPa), and pore water pressure ($u = 25, 50, 75$ ve 150 kPa). Totally of 36 experiments were performed in and 3 different deformation rates ($\gamma = 2\%, 3.5\%$, and 5%). The harmonic loading was applied to the experimental samples at a frequency (f) of 0.1 Hz. The effect of relative density, deformation rate and vertical stress conditions on the liquefaction energy of sands has been demonstrated for a type of fine-grained clean sea sand. The increase in the shear strain rate reduces the liquefaction potential by about 3%. The increase in relative density, increases the shear resistance of the sand. This delay liquefaction and causes an increase in the number of cycles.

Keywords: Cyclic simple shear test, Pore pressure, Shear strain, Liquefaction potential, Vertical stress, Relative density.

1 Giriş

Suya doymuş silt, kum gibi taneli zeminlerde, deprem anında ortaya çıkan dinamik yüklerin etkisiyle taneler sıkılaşma eğilimine geçer. Bu durum, boşluk suyu basıncı artışına neden olur. Artan boşluk suyu basıncı, efektif gerilme değerine eşit olunca ($\sigma' = \sigma - u = 0$) sıvılaşma olgusu gerçekleşmiş olur. Sıvılaşma esnasında, zeminde ve yapılarda deformasyonlar oluşabilmektedir. 1964-Niigata, 1989-Loma Prieta, 1995-Ceyhan, 1999-Chi-Chi, 1999-Gölcük depremlerinde sıvılaşma etkisiyle önemli yapısal hasarların olduğu gözlemlenmiştir.

Sıvılaşma olgusu, taneleri arasındaki boşluk suyunun drene olması engellenen veya geciken siltli, kumlu zeminlerde hızlı bir

şekilde ortaya çıkmaktadır. Depremlerin neden olduğu tekrarlı kesme gerilmelerinin, zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak oldukça farklı deformasyonlara ve mukavemet kayıplarına neden olmaktadır. Bu mukavemet kaybı, zemin türü ve özelliklerine bağlı olarak, zeminlerin birbirinden farklı dinamik davranış ve gerilme birim deformasyon özellikleri göstermelerine neden olmaktadır. Özellikle suya doymuş gevşek kumlarda, statik veya dinamik yükleme koşullarında gelişen aşırı boşluksuyu basıncı nedeniyle dayanımları hızla azalmakta ve üzerinde bulunan mühendislik yapılarında ciddi hasarlar oluşabilmektedir [1]. Bu hasarlar, binaların zemine gömülmesi, yan yatması veya istinat yapılarının ve şevlerin yanal olarak yer değiştirmesi şeklinde görülmektedir. Sıvılaşma olarak adlandırılan ve suya doymuş

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kumlu zeminlerde ortaya çıkan bu davranış biçimi, zemin dinamiğinin önemli araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Sıvılaşmayla eş zamanlı olarak zeminde kesme-şekil değiştirmeleri oluşmakta, zeminin yük taşıma yeteneği kaybolmaktadır [1].

1900'lerin başlarından günümüze gelinceye kadar mühendisler; zeminlerin gerilme-deformasyon davranışını, ardından tekrarlı yüklerin kohezyonsuz zeminlerin davranışları üzerindeki etkisini, çevirim sayısı, şekil değiştirme, rölatif sıklık (D_r) değeri, boşluk suyu basıncı değişimi (Δu) vb. konuları araştırmıştır.

Deprem büyüklüğü, zemin türü, kaynak mesafesi, çevre basıncı, zemin katmanlarının geometrisi ve sönümlemesi veya büyütmesi, zeminlere has diğer özellikler gibi birçok parametrenin etkisinden [2] dolayı sıvılaşma; çözümlenmesi karmaşık bir olgudur. Son birkaç on yılda sıvılaşma konusunda kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Birçok araştırmacı laboratuvar yöntemleri [3],[4]; arazi yöntemleri [5],[6] ve sayısal teknikler [7]-[9] kullanarak zeminin sıvılaşma potansiyelini araştırmışlardır.

Gerçek deprem kuvvetleri, arazide zemine (dolayısıyla zemin üzerindeki yapılar) genelde yatay olarak (daha az oranda düşey yönde) etki etmektedir. Tekrarlı yüklerin etkisindeki suya doygun kohezyonsuz zeminlerdeki boşluk suyu basıncı artar ve depremlerin oluş süresi kısa olduğundan yeraltı suyunun drenajı için yeterli olmaz, efektif gerilme azalır (ve sıfır olduğunda), zeminin taşıma gücü kaybolur, dolayısıyla sıvılaşma olgusu ortaya çıkar [10],[11]. Bunun sonucu olarak zeminlerde beklenenin dışında bir oturma (diğer bir deyişle rölatif sıklıkta ve yoğunlukta artış) meydana gelir.

Sıvılaşma potansiyelinin laboratuvar, rölatif sıklık ve efektif gerilme parametreleriyle bulunabiliyor olması, fazla sayıda belirsizlik içeren ve gerilme yöntemine dayanan arazi teknikleri için önemli bir alternatiftir. Kumların sıvılaşma potansiyelinin laboratuvar, belirlenmesinde yaygın olarak; dinamik üç eksenli kesme yöntemi kullanılmaktadır. Dinamik üç eksenli deneyde, zemine sadece düşey yönde kuvvet/hareket uygulanmaktadır.

Araştırmacılar son birkaç on yılda sıvılaşma mekanizmasını anlamak ve zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için farklı yöntemler önermişlerdir. Dinamik yüklemeye koşulları için alternatif farklı laboratuvar yöntemleri de geliştirilmiştir. Bunlar:

- Bender elemanları deneyi,
- Rezonant kolonu deneyi,
- Dinamik üç eksenli basınç deneyi,
- İçi boş silindirik burulmalı kesme deneyi,
- Tekrarlı basit kesme deneyi ve
- Laboratuvar model deneyleridir. Bu yöntemleri üç ana grupta toplamak mümkündür [12]. Bunlar;

1.1 Gerilmeye dayalı yöntem

Genellikle arazi ve laboratuvar deney sonuçlarını kullanarak geliştirilmiş bu yaklaşım yaygın kullanılan sıvılaşmayı değerlendirme yöntemidir [13]. Ancak, yöntem depremin büyüklüğü, yüzeydeki maksimum yatay yer ivmesi ve kaynak mesafesi gibi birtakım belirsizlikleri barındırmakta ve yeni çalışmalarla sürekli güncellenmektedir [14]. Bu yöntemdeki esas ölçüt, döngü sayısı ve kesme gerilmesi düzeyidir. [13] tarafından basitleştirilmiş yöntemde, gerçek deprem hareketini

laboratuvar koşullarında harmonik yüklemeye ile ilişkilendirmek amacıyla eşdeğer gerilme değeri ve döngü sayısının tanımlanması önerilmiştir. Bu amaçla, uygulanan tekrarlı yükün 15 döngüsü için oluşan kesme gerilmesinin %65'inin alınması [15]; diğer bazı araştırmacılar ise uygulanan tekrarlı yükün 20 döngüsü için kesme gerilmesinin %57'sinin göz önüne alınması [16] önerilmektedir. Sıvılaşmayı Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Koni Penetrasyon Testi (CPT) gibi arazi deneylerine bağlı olarak belirlemek için [5],[17],[18] gibi araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Gerilmeye dayalı yaklaşımın, meydana gelen sıvılaşma olaylarından elde edilen verilerle sürekli olarak iyileştirilmesine ve güncellenmesine rağmen, rastgele yüklemeye ile ilgili belirsizlikleri halen devam etmektedir [12],[19].

1.2 Birim deformasyona dayalı yöntem

ilk önerildiğinde, iki etkileşimli ideal hale getirilmiş kum tanesinin mekanizmasından türetilip ilk defa gündeme getirilmiştir [20]. Daha sonra doğal zeminler için [12],[19],[21] tarafından genelleştirilmiştir. Bu yöntem esas itibarıyla boşluk suyu basıncına, kum türüne, rölatif sıklığa, başlangıç efektif gerilme değerine ve örnek hazırlama yöntemine bakılmaksızın, yaklaşık %0.01 gösterilen eşik kesme birim deformasyonu değerini aşması durumunda, gelişmeye başladığı hipotezine dayanmaktadır. Birim deformasyona 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 kesme gerilmesine kıyasla kesme birim deformasyonunun tahmin edilmesindeki güçlülüdür [22],[23].

1.3 Enerjiye dayalı yöntem

Kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyelini laboratuvar tekniklerini kullanarak belirlemede son zamanlarda enerji kavramı da kullanılmaya başlanmıştır. Bu yaklaşımda kullanılan başlıca parametreler, zeminin rölatif sıklığı (D_r) ve efektif gerilmedir (σ'). Deneylerden elde edilen sıvılaşma enerjisini, numuneye uygulanan frekans (f) ve öteleme miktarının (deformasyon oranının- γ) da etkilediği kabul edilmektedir. Bu çalışmada, enerji temeline dayanan ve üç yönlü dinamik hareket sağlayabilen; "Devirsel Basit Kesme Deneyi (DBKD)" düzeneği kullanılmıştır.

Enerjiye dayalı yaklaşım, zeminin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için, Nemat-Nassar ve Shokoh [24] tarafından gerilmeye dayalı yaklaşıma alternatif olarak önerilmiştir. Daha sonra çeşitli araştırmacılar tarafından sürekli olarak geliştirilmiştir [3],[6],[7],[12]. Bu yaklaşımda sıvılaşma olsun veya olmasın yüklemeye sürecinde birim hacimde biriken enerji aşırı boşluksuyu basıncının gelişmesiyle doğrudan ilişkilidir. Taneciklerinin kalıcı olarak yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilen birim hacimde biriken enerji (J/m^3): bir döngü sırasında geliştirilen histerez çevrimi içinde kalan alan olarak ifade edilmektedir [3],[4]. Sıvılaşma enerjisinin, uygulanan kesme gerilmesi ve kesme birim deformasyonunun büyüklüğüne bağlı olarak ifade edilebildiği için [8] sıvılaşmayı tanımlamada birim enerjinin kullanılması gayet mantıklıdır. Sıvılaşma enerjisi ile ilgili yukarıdakilerden başka birçok araştırma yapılmıştır.

Enerjiye dayalı yöntem kullanılarak kumlu zeminlerin sıvılaşması ve sıkışmasını açıklayan matematiksel bir model önerilmiştir [24]. İçi boş silindirik burulmalı kesme

düzeninde, Toyoura kumu ile yapılan drenajsız devirsel deneylere göre: farklı kesme gerilmesi genliklerinde zeminin birim hacminde biriken enerji ile aşırı boşluk suyu basıncı artışı arasında çok yakın bir ilişki olduğu gözlenmiştir [25].

İçer boş silindirik burulmalı kesme düzeninde, Reid Bedford kumu üzerinde deneyler yapan Figueroa ve diğ. [3]; sıvılaşmaya ulaşmak için zemine aktarılan birim hacim başına enerji dağılımının, etkin çevre basıncı, rölatif sıklık ve kesme birim deformasyonu genliği gibi parametrelerle bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. İçer boş silindirik burulmalı kesme deneyi düzeninde birim deformasyon kontrollü benzer deneyler yapan Liang [4]'a göre, sıvılaşmanın tetiklenmesi (başlangıcı) için gerekli olan birim hacim başına düşen enerji ve aşırı boşluksuyu basıncı artışı üzerinde kesme birim deformasyon genliğinin (oranının) bir etkisi yoktur.

Sıvılaşan bir zemin viskoz bir sıvı karakterine dönüşmekte olup; sıvılaşmayı yükleme koşulları, doygunluk derecesi ve zeminin jeoteknik özellikleri etkilemektedir [26]. Sıvılaşmanın oluşması için zeminin suya doygun olması gerekir.

[27],[28] tarafından, Ishihara ve Towhata'nın geliştirdiği "İçer Boş Silindirik Burulmalı Kesme" deney düzeniğinin [29] daha yeni bir tasarımı kullanılarak kumların gerilme-şekil değıştirme özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmalarını %30, %50, %60 ve %75 rölatif sıklıklarda, Japon Geoteknik Birliğinin (JGS); JGS 0543-2000 [30], JGS 0550-1998 [31] ve JGS 0551-1998 [32] standartlarına uygun olarak drenajsız, 0.1 Hz frekanslı sinüzoidal yükleme şartlarında yapmışlar. Deneyler sonucunda, sıvılaşmanın; rölatif sıklık, ince malzeme içeriğı, tekrarlı yüklerin çevrim sayısı ve çevre basıncının ortak etkisiyle geliştiğı tespit edilmiştir [27],[28].

"Deprem jeotekniğinde zemin davranışı" adlı eserde: Statik ve dinamik yükleme koşulları arasındaki farklar anlatılırken; deprem anında yerin yaklaşık 10-20 kez sarsıldığı, buna bağılı olarak uygulanan bir yükün dinamik harekete, özellikle de depreme karşılık gelebilmesi için uygulama süresinin yaklaşık 0.1-10 s aralığında olması gerektiğı ifade edilmektedir [33].

Kısmi doygun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışını araştırmak amacıyla; dinamik üç eksenli deney düzeniğinde iki ayrı rölatif sıklıktaki kuma tekrarlanan kuvvetler altında dinamik kesme gerilmesi uygulanmıştır. Araştırma sonucuna göre; kumların dinamik davranışı üzerinde rölatif sıklığın çok büyük etkisi bulunmakta ve kısmen doygun kum(lu) zeminler sıvılaşmaya karşı daha fazla direnç göstermektedir [34].

Dinamik üç eksenli deney frekansın etkisinin araştırıldığı çalışmada, Adapazarı'na ait ince taneli yumuşak akarsu çökellerinden alınan numuneler sıkıştırılarak; 1, 0.5, 0.05 Hz gibi 3 farklı frekansta deney yapılmıştır. Sıvılaşma için frekans artışının çevrim sayısını arttırdığı ve boşluk suyu basıncının düşük frekanslarda arttığı gözlenmiştir [35].

Adapazarı depreminin ($M_w=7.1$, $a=0.28$ g) arazideki -gerçek- özelliklerine benzeştirmek amacıyla laboratuvarda, çapı 38 mm, yüksekliğı 76 mm ve rölatif sıklığı %66 olan kum numuneler üzerinde 0.5 Hz frekansta, dinamik üç eksenli deneyi yapılmış ancak, numune sıvılaşmamıştır. Rölatif sıklığını, arazideki değerinin altına düşürdükten sonra numune sıvılaşmıştır [36]. Jafarian ve diğ. [9] gibi bazı araştırmacılar, gerilme enerjisi temelinde, kumların sıvılaşma direncini ve boşluk suyu basıncını hesaplamak amacıyla kumlara farklı rölatif sıklık ve farklı gerilme koşullarında drenajsız olarak "devirsel içer boş silindirik burulmalı kesme deneyi" uygulamışlardır. Deney sonunda, sıvılaşma başlangıcı

için birim hacimde biriken enerjinin, başlangıç efektif gerilme ve rölatif sıklığa bağılı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, elde edilen bulgular yardımıyla doğrusal olmayan bir denklem türetilerek; bir alandaki sıvılaşmanın tespiti için bir sınır eğrisi önerilmiştir [9].

Sıvılaşma tetikleme analizlerinde, düşey efektif gerilme etkisinin performans esaslı olarak belirlenmesi amacıyla farklı kum türleri üzerinde yapılan tekrarlı basit kesme deneylerinin sonucunda; yeni bir düşey efektif gerilme düzeltme faktörü ($K\sigma$) önerilmiştir [37].

"Özel sıvılaşma düzeniğinin içinde çevrimsel basit kesme deneyleri altında kum davranışının sayısal modellenmesi" ile ilgili bir çalışma yapan [38], depremler sırasında zemin sıvılaşmasını önlemek için önerilen Kısmi Doğruya İndirgeme (IPS) yöntemini kullanarak; inşa edilmiş yapıların zeminlerin iyileştirilmesinden önceki ve sonraki dinamik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşimiyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncı, oturma miktarı ve sıvılaşmanın hasar etkisini en aza indirmek için zemine uygulanması gereken kısmi doygunluk derecesinin tahmin edilmesine yönelik modelleme üzerinde durulmuştur. Sarsma tablası ve devirsel basit kesme deney düzeneklerinde farklı rölatif sıklıklarda elde edilen aşırı boşluk suyu basıncı, sıvılaşma için gerekli tekrarlanma sayısı vb. değıerleri yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda önerilen yöntem, zeminde sıvılaşmanın oluşup-oluşmayacağı tahmin edebileceğı belirtilmektedir [38].

Üç farklı temiz kum, plastik olmayan silt+kum karışımı ve üç ayrı ince taneli (silt) numune kullanarak; drenajsız üç eksenli basınc deneyleri yapan [39]: Kumun tane boyu dağılımının sıvılaşma üzerine oldukça etkisi olduğunu, ortalama tane boyu küçüldükçe kumların daha kolay sıvılaştiğı gözlemişler. Sıvılaşmış ve geçici sıvılaşmış zeminler için (devirsel gerilme ile üniformluluk katsayısına bağılı) iki denklem önermişler [39].

İzotropik olarak konsolide edilmiş kum numuneleri kullanan [40], aşırı boşluk suyu basıncı ve zeminde biriken enerji arasında farklı yükleme şekillerinin etkisini değıerlendirmek için bir dizi gerilme kontrollü dinamik üç eksenli test gerçekleştirmişlerdir. Sinüzoidal yüklemeye ek olarak üçgen kare düzenli simetrik ve düzensiz asimetrik farklı yükleme şekilleri için sıvılaşmaya neden olan yükleme döngüsü sayısında büyük farklılık olmasına rağmen, sıvılaşma başlangıcında normalize edilmiş birim hacim başına biriken enerjinin yükleme şekline bağımsız ancak yükleme süresine ise biraz bağımlı olduğunu belirtmişlerdir [40].

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

- 1) Enerjinin, yalnızca yer ivmesinin pik değıerini kullanan gerilmeye dayalı yaklaşıma karşın yer hareketinin tüm spektrumunu göz önüne alan skaler bir nicelik olmasıdır [19],[41],
- 2) Seçilen ortalama gerilme veya birim deformasyon seviyesine eşdeğer çevrim sayısını bulmak için kesme gerilmesinin zamansal ayrıştırılmasının gerekli olmamasıdır,
- 3) Hem birim deformasyonu, hem gerilmeyi ve hem de malzeme özelliklerini kapsamaktadır [2],[4]. Arazide deprem esnasında, zemin belirli frekans aralıklarında yer hareketini büyütür. Bazı frekans aralıklarında da sönümler. Bu, hareketin bir bölümünün büyütülmesi veya sönümlenmesine bakılmaksızın, zemin içinde dolaşan ve dağılan toplam enerjinin değışmediğini gösterir [2].

İçi boş silindirik burulmalı kesme deneyi, arazi yükleme koşullarını iyi modellemesine rağmen numune hacmine göre yüzey alanının yüksek olması, numune üzerinde uniform olmayan radyal birim deformasyon uygulaması ve uzun numune yüksekliği sebebiyle boşlukların tekrar dağıtılmasına ve düz olmayan kesit alanına neden olabilmektedir [42]. Ancak, devirsel basit kesme deneyi arazi yükleme koşullarını iyi modellemesinin yanı sıra anizotropik olarak konsolide edilen deney numunesi üzerine normal gerilme ve yatay yönde kesme gerilmesi uygulayabilmektedir. Yatay yönde kesme gerilmesi uygulaması özelliği eşsizdir ve devirsel basit kesme deneyine özgüdür [43]. Bu özelliği ile içi boş silindirik burulmalı kesme deneyinden ayrılmaktadır. Ayrıca, küçük numune yüksekliği sebebiyle numunenin aktif kısmı içinde nispeten düzgün gerilme dağılımına sahiptir.

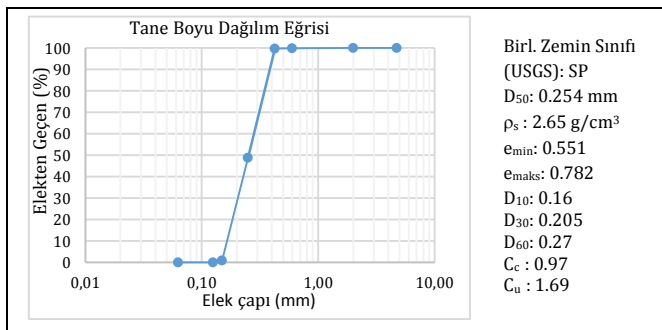
Literatür araştırmasında, bu çalışmada kullanılan "Devirsel Basit Kesme Deneyi (DBKD)" düzeneğinin" daha önce başka her hangi bir çalışmada kullanılmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, DBKD düzeneğinde yapılacak deneylerde uyulması gereken sınır şartların (ya da hazırlanacak numunelerin hangi koşullarda deneye tabi tutulması gerektiğinin) araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, DBKD düzeneğinde yapılan araştırmaların ilk aşamaları anlatılmaktadır.

DBKD düzeneğini kullanarak kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisinin laboratuvarında belirlenmesinde numune boyutunun (ebatlarının) deney sonuçları üzerine olan etkisinin araştırdığı çalışmada; farklı çap ve yüksekliklerde hazırlanan numuneler kullanılarak yapılan deney verilerine göre, tekrarlanabilir optimum sonuçlar 100 mm ve 150 mm çaplı deney örneklerinden elde edilebilmiştir [44].

İlgin (Konya) yerleşim alanı zeminleri ile ilgili hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasında [45]; İlgin (Konya) yerleşim alanında sıvılaşma potansiyeline sahip kumlu zemin tabakalarının bulunduğunu, DBKD düzeneğinin kullanılarak enerji yaklaşımı yöntemiyle gerçekleştirilen deneylerle ortaya koymuştur [45].

2 Materyal ve yöntem

Kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyelini laboratuvar tekniklerini kullanarak belirlemek amacıyla kullanılan başlıca parametreler; zeminin rölatif sıklığı (D_r) ve efektif gerilmedir (σ'). Bunun yanı sıra, numuneye uygulanan frekans (f) ve kesme birim deformasyonu oranının (γ) da sıvılaşma potansiyelini etkileyebileceği öngörülmektedir. Laboratuvarında bu parametreleri elde ederek; bir kum türünün tekrarlı yükler altındaki davranışı ve sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme ince taneli üniform temiz deniz kumudur (Şekil 1; Tablo 1).



Şekil 1. Kum numunesinin dane boyu dağılım grafiği.

Figure 1. Grain size distribution curve of the sand.

Tablo 1. Kum numunesinin elek analizi sonucuna göre tane boyu dağılımı [49].

Elek No	Elek Açıklığı (mm)	Elekte Kalan (g)	Elekten Geçen	
			(g)	(%)
4	4.75	0	1000	100
10	2	0	1000	100
30	0.6	0.33	999.67	99.97
40	0.425	0.44	999.23	99.92
60	0.25	511.84	487.39	48.74
100	0.15	479.77	7.62	0.76
120	0.125	6.66	0.96	0.10
230	0.063	0.9	0.06	0.01
Toplama Kabı	0	0.06	0	0

Deneyin yapılışı anında, elde edilen verilerin grafikleri gerçek zamanlı olarak bilgisayar ekranına çizdirilmiştir. Bu şekilde, deneyin gidişi kontrol altında takip edilebilmektedir.

2.1 Kumun jeoteknik özellikleri

Kum örneği içerisinde olası tuzlanma emarelerini önlemek amacıyla temiz suyla yıkanmış, kurutulmuş ve daha sonra sıvılaşma deneyine tabi tutulmuştur.

Numunelerin rölatif sıklığının (D_r) hesaplanabilmesi için öncelikle, çalışılan kumun boşluk oranı (e), ASTM D4253-16 [46]'ya uygun olarak minimum boşluk oranı (e_{min}), ASTM D4254-16 [47]'ya uygun olarak maksimum boşluk oranı (e_{max}), özgül ağırlık ve yoğunluk (G_s ve ρ_s) değerleri belirlenmiştir.

Deneyde kullanılan numune aparatının hacmi sabittir. Ancak, farklı rölatif sıklık değeri için kullanılması gereken numune miktarı değişmektedir. Bu nedenle, ASTM D4253 [46] ve ASTM-D4254 [47]'te anlatıldığı gibi D_r değeri [48] denklem (1) kullanılarak ve her bir farklı rölatif sıklık değeri için gerekli olan numune miktarı (m_s -g) denklem (2) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (1)$$

$$m_s = \rho_s \left(\frac{V_t}{1+e} \right) \quad (2)$$

Kum örneğinin elek analizi, ASTM C136 [49] standardına göre yapılmıştır.

2.2 Deney sınır şartları

Bu çalışmada yapılan deneyler; literatürde anılan Japon Geoteknik Birliğinin (JGS): JGS 0550-1998 [31] standardındaki esaslara benzer şekilde kum numuneleri hazırlanmış ve burulmalı kesme deneyinin anlatıldığı JGS 0551-1998 [32] standartında ifade edilen sınır şartlarda ön denemeler yapılmıştır. Deney için hazırlanan tüm numuneler, çevresi teflon kaplı 1 mm kalınlığındaki yassı bileziklerle kuşatılmış membran içerisine kumun havadan serbest düşmesi ile kuru yağmurlama tekniğiyle yerleştirilmiştir [30]-[33].

%40, %55 ve %70 rölatif sıklıklarda (D_r) [48] hazırlanan kum numunelerinin tümü için ayrı ayrı olmak üzere %2, %3.5 ve %5 kesme birim deformasyon oranlarında [30]-[32] deneyler yapılmıştır. Bu şekilde deneye tabi tutulan kum numuneleri, $r_u = \frac{u}{\sigma_v} = \frac{1}{2}$ oranını sağlamak üzere;

- Düşey gerilme-1 (σ_{v1})= 50 kPa, boşluk suyu basıncı-1 (u_1)=25 kPa;
- σ_{v2} : 100 kPa, u_2 : 50 kPa,
- σ_{v3} : 200 kPa, u_3 : 100 kPa ve
- σ_{v4} : 300 kPa, u_4 : 150 kPa

dört (4) ayrı gerilme etkisinde bırakılmıştır. Çalışma boyunca kullanılan tek tür kum numunesi üzerinde toplam 36 deney yapılmıştır.

Deneylerde, tipik deprem frekansından az olmasına rağmen bu tür deneyler için tavsiye edilen 0,1 Hz frekansla [33] üniform sinüzoidal [47] yatay yönde kesme gerilmesi [32]-[33] uygulanmıştır. Düşey gerilme (σ_v), kesme birim deformasyon oranı (γ) ve rölatif sıklık (D_r) değerinin sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2.3 Devirsel basit kesme deney düzeneği (DBKD)

Çalışmada kullanılacak olan başlıca ekipman "devirsel basit kesme deney düzeneğidir" (Şekil 2). Araştırmada kullanılan düzeneğe, üç ortogonal yönde gerçek deprem verisi girilerek deney yapılabilmesi mümkündür. Bu düzenek ile sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için üzerinde çalışılan bu tekniğin diğer yöntemlerden daha güvenilir olduğu düşünülmektedir.



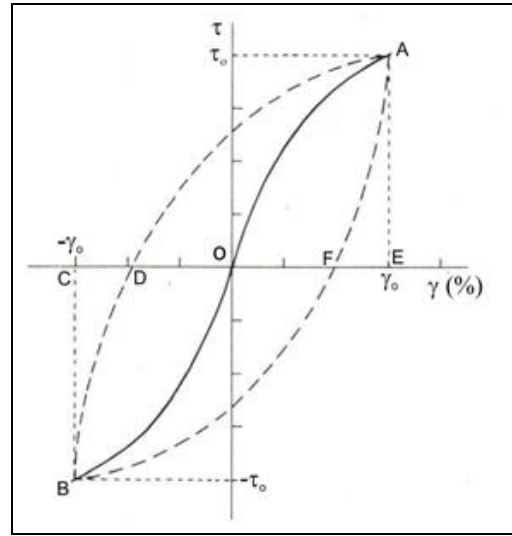
Şekil 2. Devirsel basit kesme deney (DBKD) düzeneği.

Figure 2. Cyclic simple shear test (CSST) device.

Literatür araştırmasında, bu çalışmada kullanılan "Devirsel Basit Kesme Deney (DBKD)" düzeneğinin" daha basit alt modellerine rastlanmıştır. Ancak, bu cihazın sahip olduğu özelliklerdeki bir model, daha önceki hiç bir çalışmada kullanılmamıştır. Bu nedenle, DBKD düzeneğinde yapılacak deneylerde uyulması gereken sınır şartların deneysel yöntemlerle araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada devirsel basit kesme deney (DBKD) düzeneğinde elde edilen bulgular anlatılmaktadır.

Cihaz, yaygın olarak kullanılan, sadece düşey yönde tekrarlı yük uygulayan cihazlardan farklı olarak, yatayda iki yönde dinamik kesme kuvveti, düşey yönde ise dinamik yük uygulayabilmektedir. Yatay ve düşey yöndeki yüklemeye kapasitesi 10 kN olan cihazın dinamik koşullardaki yüklemeye hızı her yönde 10 Hz'e kadar çıkabilmektedir. Cihaz, harmonik veya rasgele yüklemeye izin vermektedir. Cihaz, dinamik pompaların pistonlarıyla birlikte hareket eden ve 50 mm'ye kadar ölçüm alabilen deformasyon ölçerlerle teçhiz edilmiştir. Boşluk suyu basıncı oluşturulmasına ve ölçümüne de olanak veren sistemde basınç ölçüm kapasitesi 1 MPa'dır.

Membran içinde ve teflon kaplı bileziklerle kuşatılan zemine tek yönde ve yatay harmonik yüklemeye yapılmıştır. Bu yüklemeye sırasında tipik olarak farklı araştırmacılar tarafından literatürde verilenlere benzer kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüleri [3],[4] oluşur (Şekil 3).



Şekil 3. Gerilme-kesme birim deformasyonu histerezis döngüsü [3],[4].

Figure 3. Shear stress-strain hysteresis loop [3],[4].

Numune tekrarlı yüklemeye altında makaslandıkça başlangıçta sıfır olan boşluk suyu basıncının giderek artacağı kabul edilmektedir. Dinamik yüklemeye etkisi ile gelişen boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeye ulaşana kadar artmaya devam eder ve sonuçta belli sayıda kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüsü oluşur. Devirsel yüklemeye sırasında numuneye uygulanan kesme gerilmesinin bir bölümü döngü (histerezis) içinde soğurulur. Soğurulan bu gerilme (diğer bir deyişle soğurulan enerji), zeminde boşluk suyu basıncı artışına sebep olan "iş"e (δW) karşılık gelmektedir.

Her bir döngü sırasında kesme birim deformasyonuna karşılık uygulanan kesme gerilmesi, aşağıdaki denklem (3) yoluyla toplandığında numunenin sıvılaşması için gerekli olan iş, metreküp başına Joule (J/m^3) cinsinden hesaplanmış olur [3].

$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i+1}) (\gamma_i + \gamma_{i+1}) \quad (3)$$

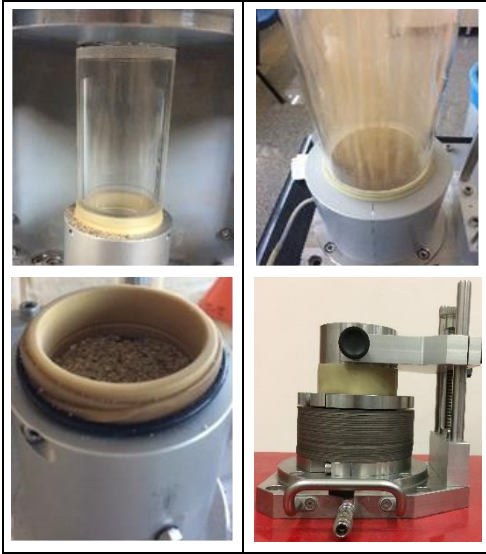
Bu çalışmada, ince taneli kumların sıvılaşma potansiyeli üzerinde; rölatif sıklık, kesme birim deformasyon oranı ve gerilme değerlerinin etkisinin olup-olmadığı araştırılmıştır. "Tekrarlı basit kesme deney düzeneğine" ait 100 mm çaplı numune hazırlama kalıbı kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Kum numunesi hazırlama aparatı örneği.

Figure 4. Sand sample preparation apparatus.

Numunelerin hedeflenen rölatif sıklıklarda (D_r) deney düzeneğine yerleştirilmesi sırasında; dışarı sıçramaması için kalıpla eşit çapa sahip şeffaf bir boru ile kuşatılmıştır. (Şekil 5).



Şekil 5. Kum numunesinin deneye hazırlanması.

Figure 5. Preparation of the sand sample for the experiment.

Kum numunelerinin bütünlüğünü sağlamak, dağılmasına engel olmak, su sızmasını ve basınç azalmasını önlemek amacıyla latex membranlar içerisine yerleştirilerek deneyler yapılmıştır (Şekil 4 ve 5).

Deneye başlamadan önce tüm numuneler suya doymuş hale getirilmiştir. Deney numunelerinde hava kabarcığı kalmaması için suya doyurma işleminden önce CO_2 gazı ile doyurma işlemi yapılmıştır.

Doyurma işlemi sırasında, suda çözülmüş havanın olumsuz etki yapmaması amacıyla, deneyde kullanılacak suyun havası alınmıştır. Bu işlem, suyun havasını alma amacıyla geliştirilen bir düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Havası alınmış su yardımıyla numune doymuş hale getirildikten sonra deney başlamıştır. Deneyler, birbirinden farklı efektif düşey gerilme etkisinde ve 0.1 Hz harmonik yüklemeye [30]-[33] şartlarında

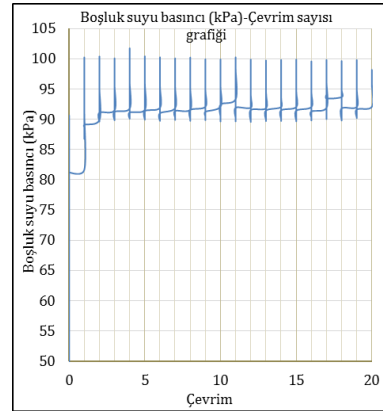
yapılmıştır. Ayrıca, deneylere başlamadan önce, numunelere uygulanması planlanan parametrelerin tutarlı sonuç verip-vermeyeceği ön-deneylerle araştırılmıştır. Bütün deneylere, efektif gerilmenin sıfıra ulaştığı anda son verilmiştir.

Latex membran içerisine yerleştirilen kum numunesinin alt ve üst tarafından su sızdırmasını engellemek için başlık ve membran üzerine yerleştirilen, esnek o-ring halka kullanılmıştır. Bu halka, dışarıdan vidalanan metal bir kelepçe ile sıkıştırılmaktadır. Latex membran içerisindeki kum numunelerinin sabit hacimde bütün olarak durmasını sağlamak amacıyla yassı teflon bilezikler kullanılmıştır. Kum numunesinin deney sırasında ileri-geri veya sağa-sola hareketini sağlaması için 1 mm kalınlığında olup, bileziklerin birbiri üzerinden rahat hareket etmesi ve sürtünmenin en aza indirilmesi amacıyla teflon kaplıdır.

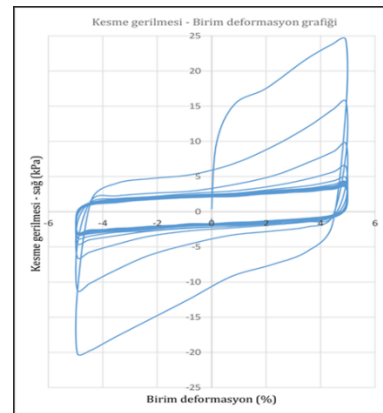
3 Bulgular

Çalışma sonucunda, tek tip kum numune üzerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler yardımıyla; "rölatif sıklık, kesme birim deformasyon oranı ve düşey gerilme değerleri" ile "kumların sıvılaşma potansiyeli" arasındaki ilişki ortaya konmuştur.

Deneyler yapılırken çok sayıda veri sağlanmaktadır. Deneyler esnasında, kontrol amaçlı olarak ekranda bazı verilerin grafikleri de çizdirilerek deneylerin ilerleyişi eş zamanlı olarak bilgisayar ekranından izlenebilmektedir (Şekil 6a ve b).



(a). Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı grafiği.



(b). Kesme gerilmesi (kPa)-kesme birim deformasyonu (%) grafiği.

Şekil 6(a): ve (b): DBKD'den elde edilen grafik örnekleri.
Figure 6(a): and (b): Graphic examples obtained from CSST.

Deney başlangıcında kum, rölatif sıklığı etkisiyle, sıvılaşmaya karşı direnç gösterir. Tekrarlanan kesme gerilmesi etkisiyle boşluk suyu basıncı artar. Bu artış düşey gerilme değerine yaklaşıncaya, efektif gerilme sıfır olmaktadır; sıvılaşmanın gerçekleştiği kabul edilmektedir (Şekil 6a). Bu olay gerçekleşirken, kesme birim deformasyonu-kesme gerilmesi grafiğinde; uygulanan kesme birim deformasyonu oranında (\pm) yönlere hareket etmekte, kesme gerilmesi oluşmaktadır. Kumun sıvılaşmaya gösterdiği direnç nedeniyle kesme gerilmesi başlangıçta yüksek değerdedir. Tekrarlanan yük etkisiyle, kumun kesme direnci azalmakta ve sıvılaşma gerçekleşmektedir. Bu durum küçülen histerez eğrileri (halkaları) şeklinde grafiğe yansımaktadır. Devirsel hareket devam ettikçe, oldukça küçük kesme gerilmesi etkisiyle sıvılaşma devam etmektedir (Şekil 6b). Tekrarlı basit kesme deney düzeneğinde, planlanan deneyleri sorunsuz biçimde gerçekleştirmek için azami gayret gösterilmiştir. Ancak, deneyler sırasında membran yırtılması, suya doyurulmuş

numunede hava kabarcıklarının kalması, deney düzeneğinin istem dışı kendini kapatması vb. gibi sorunlarla karşılaşmıştır. Bu gibi durumlarda deneyler tekrar yapılmıştır. Suya doyurma işleminde, hava kabarcıkları kalması durumunda veya sonuçların sağlıklı olduğu konusunda şüpheye düşülmesi durumunda deneyler tekrarlanmıştır. Devirsel Basit Kesme Düzeneğinde yapılan deneyler sırasında elde edilen veriler tablo haline getirilmiştir (Tablo 3, 4 ve 5). Bu veriler kullanılarak; 40, 50 ve 70 kPa düşey gerilme değerlerinin her biri için %2, %3.5 ve %5 birim deformasyon oranlarına ait grafikler karşılaştırılmıştır (Şekil 7, 8, 9). Şekil 7, 8 ve 9'daki grafikler ile Tablo 2, 3 ve 4'teki değerler incelendiğinde; Kesme birim deformasyon oranındaki değişimin, boşluk suyu basıncında ortalama %1-2 oranında artışa neden olduğu görülmektedir. Bu değer ihmal edilebilir olduğu düşünülmektedir. Ancak, farklı özelliklerde daha çok sayıda örnek üzerinde deney yapılması daha tutarlı sonuçlara varılmasına katkı sağlayacaktır.

Tablo 2. Rölatif sıklığı (Dr) %40 olan kumun DBKD'den elde edilen bazı verileri.

Table 2. Some data obtained from the CSST liquefaction test of sand with a relative density (Dr) 40%.

Rölatif Sıklık (Dr)	Deformasyon Oranı (γ - %)	Düşey Gerilme (σ_v -kPa)	Boşluk Suyu Basıncı (u-kPa)	Sıvılaşma Devir Sayısı	Kesme Gerilmesi (kPa)	Boşluk Suyu Basıncı ($u_{max} - kPa$)
40	2.0	50	25	1	4.06	65.2
		100	50	1	7.76	101.4
		200	100	1	10.2	203.2
		300	150	2	14.49	300
		50	25	1	4.7	48.3
	3.5	100	50	1	11.8	101.1
		200	100	2	17.87	200.9
		300	150	3	26.32	302.5
		50	25	1	7.76	46.68
		100	50	3	16.4	99.87
	5.0	200	100	5	21.8	198.6
		300	150	7	27.61	294.7

Tablo 3. Rölatif sıklığı (Dr) %55 olan kumların DBKD'de sıvılaşma deneyine ait veriler.

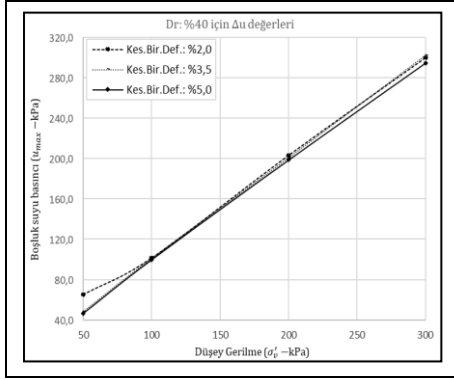
Table 3. Some data obtained from the CSST liquefaction test of sand with a relative density (Dr) 55%.

Rölatif Sıklık (Dr)	Deformasyon Oranı (γ - %)	Düşey Gerilme (σ_v -kPa)	Boşluk Suyu Basıncı (u-kPa)	Sıvılaşma Devir Sayısı	Kesme Gerilmesi (kPa)	Boşluk Suyu Basıncı ($u_{max} - kPa$)
55	2.0	50	25	1	10.96	50.04
		100	50	1	14.42	105.2
		200	100	9	20.25	200.76
		300	150	11	21.47	300.1
		50	25	1	11.42	51.2
	3.5	100	50	2	17.6	101
		200	100	9	20.83	200.7
		300	150	11	25.92	300.3
		50	25	1	12.9	52.9
		100	50	1	18.2	99.87
	5.0	200	100	2	22.37	192.4
		300	150	4	26.5	306

Tablo 4. Rölatif sıklığı (Dr) %70 olan kumların DBKD'de sıvılaşma deneyine ait veriler.

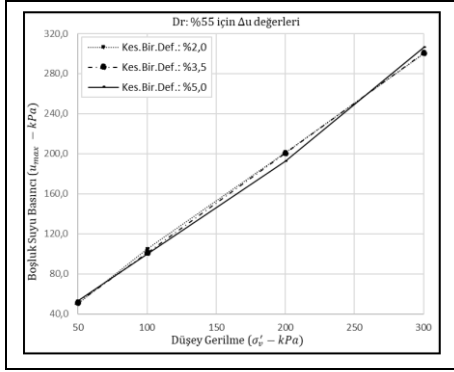
Table 4. Some data obtained from the CSST liquefaction test of sand with a relative density (Dr) 70%.

Rölatif Sıklık (Dr)	Deformasyon Oranı (γ - %)	Düşey Gerilme (σ_v -kPa)	Boşluk Suyu Basıncı (u-kPa)	Sıvılaşma Devir Sayısı	Kesme Gerilmesi (kPa)	Boşluk Suyu Basıncı ($u_{max} - kPa$)
70	2.0	50	25	1	14.49	53.92
		100	50	9	20.13	105.2
		200	100	11	22.6	203.4
		300	150	13	29.1	305.1
		50	25	1	23.59	55.14
	3.5	100	50	9	31.2	105.7
		200	100	12	40.9	212.8
		300	150	15	54.1	308.1
		50	25	1	29.13	50.97
		100	50	9	36.5	102.1
	5.0	200	100	15	65.32	212.8
		300	150	18	71.47	311.6



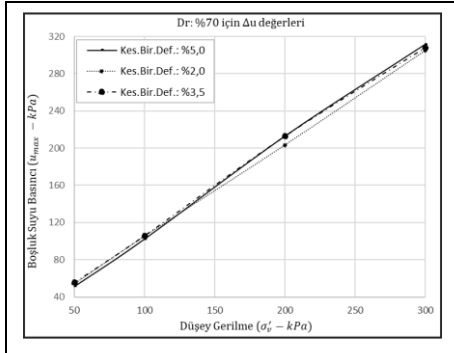
Şekil 7. %40 rölatif sıklıktaki kumların %2, %3.5 ve %5 kesme birim deformasyon oranındaki boşluk suyu basıncı grafikleri.

Figure 7. Pore water pressure graphs of sand at 40% relative density (Dr) and under effects of 2%, 3.5%, 5% shear strain.



Şekil 8. %55 rölatif sıklıktaki kumun %2, %3.5 ve %5 kesme birim deformasyon oranındaki boşluk suyu basıncı grafikleri.

Figure 8. Pore water pressure graphs of sand at 55% relative density (Dr) and under effects of 2%, 3.5%, 5% shear strain.



Şekil 9. %70 rölatif sıklıktaki kumun %2, %3.5 ve %5 deformasyon oranındaki boşluk suyu basınçlarına ait grafikler.

Figure 9. Pore water pressure graphs of sand at 70% relative density (Dr) and under effects of 2%, 3.5%, 5% shear strain.

Şekil 7, 8 ve 9'daki grafikler ile Tablo 2, 3 ve 4'teki değerler incelendiğinde; Kesme birim deformasyon oranındaki değişimin, boşluk suyu basıncında ortalama %1-2 oranında artışa neden olduğu görülmektedir. Bu değer ihmal edilebilir olduğu düşünülmektedir. Ancak, farklı özelliklerde daha çok sayıda örnek üzerinde deney yapılması daha tutarlı sonuçlara varılmasına katkı sağlayacaktır.

Tablo 2, 3 ve 4 incelendiğinde; rölatif sıklıktaki artışın, zeminin sıvılaşma başlangıcındaki kesme direncinin artmasına etki ettiği görülmektedir. Buna bağlı olarak, kumun sıvılaşabilmesi için uygulanması gereken çevrim (tekrar) sayısının artmasına neden olmaktadır.

4 Sonuçlar

Devirsel Basit Kesme Deneyi düzeneğinde, 36 deney yapılması planlanmış ve sorunsuz biçimde gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler tablo halinde sunulmuş, grafikleri çizilmiş ve yorumlanmıştır. Deneylerden elde edilen bulgulara göre;

Düşük rölatif sıklıktaki bir numune daha sıkı bir numuneye göre daha az sayıdaki dinamik tekrarlanma etkiyle sıvılaşabilmektedir. Kumun rölatif sıklığı arttıkça sıvılaşabilmesi için tekrarlanma sayısı da artmaktadır. Dolayısıyla, kumun rölatif sıklığı arttıkça kesme dayanımı da artmaktadır.

Kesme birim deformasyon oranının artması, boşluk suyu basıncında ortalama %1-2 oranında artışa neden olmuştur. Bu değer ihmal edilebilir olduğu düşünülmektedir. Ancak, farklı özelliklerde daha çok sayıda örnek üzerinde deney yapılması sonuçların güvenilirliğini arttıracaktır.

Deneyler sırasında, kesme birim deformasyon oranı aşamalı olarak artırılmıştır. Sıralı artış yerine, aynı numune üzerinde rastgele artış/azalış ya da büyük kesme birim deformasyonundan küçüğe doğru oran azaltılarak deneylerin yapılması; tekrarlanma sayısını ve zemin sıvılaşma potansiyelini nasıl etkileyeceğinin araştırılması farklı bir yaklaşım olacaktır.

Kesme birim deformasyon oranındaki artışla, rölatif sıklıktaki artış kıyaslandığında; rölatif sıklıktaki artışın kumların sıvılaşma direncini oldukça arttırdığı belirlenmiştir. Bu veriler ışığında kumların sıvılaşmasında, rölatif sıklığın deformasyon oranından daha fazla etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarında, rölatif sıklık ve efektif gerilme gibi bazı parametrelerle belirlenebilmesi; çok sayıda belirsizlik içeren ve gerilme yöntemine dayanan arazi teknikleri için önemli bir alternatif olacaktır.

Bu çalışmanın değişik özelliklere sahip kum, silt veya bunların farklı oranlarda karışımında oluşan çok sayıda örnek üzerinde tekrarlanması sonuçların güvenilirliğini arttıracaktır.

Çok sayıda deney yapıldıktan sonra, zeminlerin sıvılaşma enerjisini tahmin denklemleri üzerine çalışmaların yoğunlaştırılması hedeflenmektedir.

5 Conclusions

Thirty-six experiments were planned to conduct using the cyclic simple shear test device and tests were performed successfully. The results were listed in a table, presented through graphs and interpreted. The results of this research are as follows:

For the liquefaction of a sample with a lower relative density the required number of loading cycles are fewer than that required for a sample of higher relative density. The number of cycles for liquefaction increases as the relative density increases which means that the shear strength increases along with the relative density.

An increase with the shear strain ratio caused an increase of pore water pressure with an average of 1-2%. Although this can be considered as negligible, a clear judgement can only be made after running tests on increased number of samples with different characteristics.

The ratio of shear strain was increased gradually during cyclic tests. Random application of the cyclic load on samples instead of an orderly increased shear strain ratio would be an interesting approach to see the effects on the results.

Upon the comparison between the increase in the ratio of shear strain and the increase with the relative density, it was observed that an increase with the relative density increased the resistance against liquefaction.

An attempt to determine the liquefaction potential in a laboratory using certain parameters such as the relative density and the effective stress would be a significant alternative to the field methods which are based on the stress method and accompany a number of uncertainties.

An investigation using higher number of sand and silts with different characteristics and the mixtures of those two would significantly improve the quality of results obtained herein.

The next step after this research is to concentrate on establishing predictive equations of liquefaction energy by increasing the variety of test samples as well as test parameters.

6 Teşekkür

Bu araştırma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2018HZDP020 nolu proje ile desteklenmiştir. Deneyler, Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ve Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, ilgili kurum ve kuruluşların yönetici ve çalışanları ile Ankara Üniversitesi'nden Prof. Dr. Yusuf Kağan KADIOĞLU'na teknik destek ve katkıları için teşekkür ederler.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Turgay BEYAZ, fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, kullanılan malzemelerin temini, deneylerin gerçekleştirilmesi, veri derlenmesi, sonuçların incelenmesi, yorumlanması, makale yazımı ve içeriğinin kontrol edilmesi; Kamil KAYABALI, fikrin oluşması, tasarımın yapılması, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi gibi başlıklarda; Yetiş Bülent SÖNMEZER: bazı deneylerin gerçekleştirilmesinde katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Towhata I. *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 2008.
- [2] Law KT, Cao YL, He GN. "An energy approach for assessing seismic liquefaction potential". *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 320-329, 1990.
- [3] Figueroa J, Saada A, Liang L, Dahisaria N. "Evaluation of soil liquefaction by energy principles". *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9), 1554-1569, 1994.

- [4] Liang L. Development of an Energy Method for Evaluating the Liquefaction Potential of a Soil Deposit. PhD Dissertation. Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, USA, 1995.
- [5] Cetin KO, Seed RB, Der-Kiureghian A, Tokimatsu K, Harder Jr F, Kayen RE, Moss RES. "Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314-1340, 2012.
- [6] Berrill JB, Davis RO. "Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model". *Soils and Foundations*, 25(2), 106-118, 1985.
- [7] Kokusho T. "Liquefaction potential evaluation: energy-based method compared to stress-based method". *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Chicago, Illinois, USA, 29 April-4 May 2013.
- [8] Amini PF, Noorzad R. "Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53, 2018.
- [9] Jafarian Y, Towhata I, Baziar MH, Noorzad A, 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.
- [10] Seed HB, Lee KL. "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading". *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 92(6), 105-134, 1966.
- [11] Hyodo M, Tanimizu H, Yasufuku N, 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.
- [12] Green RA. Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils. PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2001.
- [13] Seed HB, Idriss IM. "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(8), 1249-1274, 1971.
- [14] Youd TL, Idriss IM, "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996-NCEER and 1998-NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313, 2001.
- [15] Martin GR, Finn WDL, Seed HB. "Fundamentals of liquefaction under cyclic loading". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 101(5), 423-438, 1975.
- [16] Ishihara K and Yasuda S. "Sand liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under irregular excitation". *Soils and Foundations*, 15(1), 45-59, 1975.
- [17] Boulanger RW, Idriss IM. "Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(10), 1185-1195, 2012.
- [18] Moss RES, Seed RB, Kayen RE, Stewart JP, Der Kiureghian A, Cetin KO. "CPT based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, 132, 1032-1051, 2006.

- [19] Baziar MH, Jafarian Y. "Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model, capacity energy". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 1056-1072, 2007.
- [20] Dobry R, Ladd RS, Yokel FY, Chung RM, 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 Report, Washington DC, USA, NBS-BSS-138/176, 1982.
- [21] Alavi AH, Gandomi AH. "Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction". *Geoscience Frontiers*, 3(4), 541-555, 2012.
- [22] Seed HB. "Closure to soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 106(GT6), 720-724, 1980.
- [23] Zhang W, Goh ATC, Zhang Y, Chen Y, Xiao Y. "Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines". *Engineering Geology*, 188, 29-37, 2015.
- [24] Nemat-Nasser S, Shokoh A. "A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing". *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4), 659-678, 1979.
- [25] Towhata I, Ishihara K. "Shear work and pore water pressure in untrained shear". *Soils and Foundations*, 25(3), 73-84, 1985.
- [26] Hadush S, Yashima A, Uzuoka R. "Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis". *Computers and Geotechnics*, 27, 199-224, 2000.
- [27] Altun S. "Suya doygun kumların drenajsız koşullardaki davranışının tekrarlı yükler altında burulmalı kesme deney aleti ile incelenmesi". *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 139-152, 2004.
- [28] Altun S, Ansal AM. "Anizotropik konsolide zeminlerin dinamik davranışı". *İMO Teknik Dergi*, 16(2), 3523-3545, 2005.
- [29] Ishihara K, Towhata I. "Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads". *Soils and Foundations*, 23(4), 11-26, 1983.
- [30] Japanese Geotechnical Society. "Method for Cyclic Torsional Shear Test on Hollow Cylindrical Specimens to Determine Deformation Properties of Soils". Standarts of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test, JGS 0543, Japan, 2000.
- [31] Japanese Geotechnical Society. "Preparation of hollow Cylindrical Soil Specimens for Torsional Shear Tests". *Standarts of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test*, JGS 0550, Japan, 1998.
- [32] Japanese Geotechnical Society. "Method for Torsional Shear Test on Hollow Cylindrical Specimens". *Standarts of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test*, JGS 0551, Japan, 1998.
- [33] Ishihara K. *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*. 2nd ed. New York, USA, Oxford University Press, 1996.
- [34] Elibol B. Kısmi Doygun Kumların Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [35] Ural N, Özocak A, Önalp A. "Dinamik üç eksenli deneyde frekansın etkisi". 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim 2007.
- [36] Orhan M, Ateş A. "Rölatif sıklığın Saruhanlı (Manisa) ilçesi zeminlerinin sıvılaşmasına etkisinin dinamik üç eksenli deneyi ile araştırılması". *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2(1), 26-41, 2012.
- [37] Bilge HT, Çetin KÖ. "Sıvılaşma tetikleme analizlerinde düşey efektif gerilme etkisinin performans esaslı olarak belirlenmesi". *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi*, Ankara, Türkiye, 16-17 Ekim 2014.
- [38] Nateghi A. Numerical Modelling of Sand Behavior Under Cyclic Simple Shear Tests in a Special Liquefaction Box. MSc Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 2015.
- [39] Monkul MM, Etmian E, Şenol A. "Influence of coefficient of uniformity and bases and gradation on static liquefaction of loose sands with silt". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 185-197, 2016.
- [40] Polito C, Green RA, Dillon E, Sohn, C. "Effect of load shape on relationship between dissipated energy". *Canadian Geotechnical Journal*, 50, 1118-1128, 2013.
- [41] Baziar MH, Jafarian Y, Shahnazari H, Movahed V, Tutunchian MA. "Prediction of strain energy-based liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An evolutionary approach". *Computers and Geosciences*, 37(11), 1883-1893, 2011.
- [42] Arab A, Shahrour I, Lancelot L. "A laboratory study of liquefaction of partially saturated sand". *Journal of Iberian Geology*, 37(1), 29-36, 2011.
- [43] Kammerer A, Pestana JM. "Undrained Response of Monterey 0/30 Sand Under Multidirectional Cyclic Simple Shear Loading Conditions". University of California, Berkeley, USA, Geotechnical Engineering Report No UCB/GT/02-01, 2002.
- [44] Özçelik Ş. Kumlu Zeminlerin Sıvılaşma Enerjisinin Laboratuvarında Belirlenmesinde Numune Boyutunun Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2019.
- [45] Özlen N. "İlgün (Konya) Yerleşim Alanı Zeminlerinin Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması". Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2019.
- [46] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table". ASTM D4253-16. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.
- [47] Lo Presti DCF, Pedroni S, and Crippa V. "Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D4253-83: A Comparative Study". *Geotechnical Testing Journal*. 15(2), 180-189, 1992.
- [48] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density". ASTM D4254-16. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.
- [49] American Society for Testing and Materials. "Standart Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates". ASTM C136. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2006.