

## Anizotropik Yükleme Koşullarında Eksenel Deformasyon İle Sıvılaşma İlişkisi

*Relationship Between Axial Strain and Liquefaction under Anisotropic Loading Conditions*

**Koray ULAMIŞ<sup>1</sup>, Horng Jyh YANG<sup>2</sup>, Gary NORRIS<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ANKARA

<sup>2</sup>West Virginia University, Institute of Technology, College of Engineering & Sciences WV, USA

<sup>3</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, NV, USA

Geliş (received) : 22 Mart (March) 2012  
Düzeltilme (revised) : 04 Haziran (June) 2012  
Kabul (accepted) : 07 Temmuz (July) 2012

### ÖZ

Zemin sıvılaşması arazi ve laboratuvar deneyleri ile ayrıntılı olarak incelenmektedir. İzotrop ve anizotrop gerilme koşullarında eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı gelişimine bağlı olarak farklı sıvılaşma tanımları geliştirilmiştir. Bu çalışmada, konsolidasyonlu-drenajlı anizotropik devirsel üç eksenli deneyler üç farklı tane boyu dağılımına sahip, iki farklı bağıl yoğunlukta hazırlanan suya doygun örselenmiş kumda yapılarak, sıvılaşma davranışları incelenmiştir. Deneylerde uygulanacak gerilmeler farklı derinliklerde, yüzeyde tekil bir temel bulunacak şekilde hesaplanmıştır. Deneylerde yükleme frekansı 1 saniye (s), devir sayısı ise sabit bir deprem büyüklüğüne göre 26 olarak seçilmiştir. Üç farklı kum için eksenel düşey deformasyonun değişimi takip edilerek sıvılaşma ile ilişkilendirilmiştir. Kum örneklerinde gevşek veya sıkı durumda farklı eksenel deformasyonlar gelişmiştir. İone kumu ve sahil kumunda sıkışma evresinde gelişen kabarmalar, sıvılaşma başlangıcına ulaşılmasını engellemiştir. En iri taneli ve uniform olmayan beton kumunda eksenel deformasyona göre % 90 izafi sıklıkta sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Anizotrop gerilme, Devirsel üç eksenli deney, Eksenel deformasyon, Sıvılaşma.

### ABSTRACT

*Soil liquefaction has been extensively defined via the laboratory and in-situ tests, regarding to either the generation of excess pore water pressure or the soil vertical strain reaching a particular level under*

K.Ulamış

E-Posta: ulamis@ankara.edu.tr

*isotropic and anisotropic conditions. In this study, consolidated-drained anisotropic loading conditions were applied herein to simulate the stresses under a shallow foundation at representative depths. Three different particle size of sandy soils with two different relative density conditions were adopted for the saturated drained cyclic tests. The number of cycle load (26 cycles) within a frequency of 1second was chosen depending on a constant earthquake magnitude. The variation of axial strain during the tests was monitored in order to evaluate the liquefaction behaviour of the three types of the sands. The axial strain is found to be relative density dependent. Ione sand and beach sand samples could not reach the initial liquefaction state due to dilation. Especially, the least uniform and coarsest concrete sand with 90 % relative density tends to liquefy based on the axial strain.*

**Key Words:** *Anisotropic stress, Cyclic triaxial test, Axial strain, Liquefaction.*

## GİRİŞ

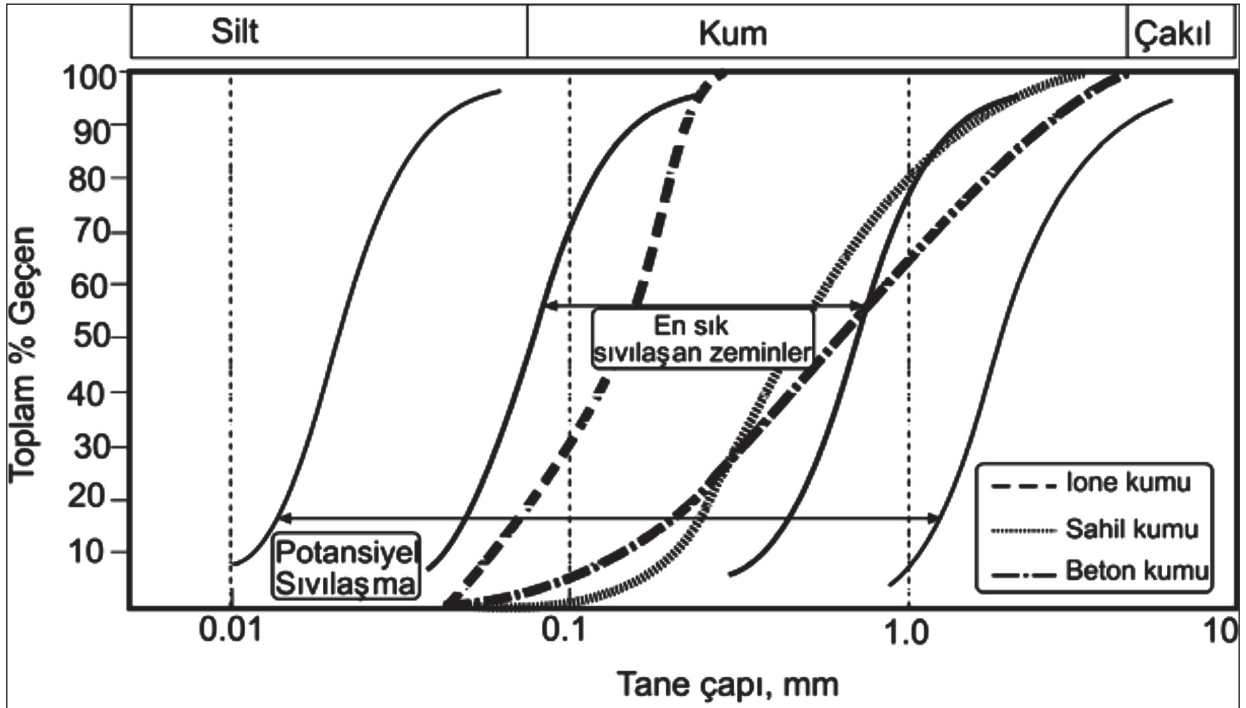
Sıvılaşmaya bağlı olarak oluşan hasarlar oturma, yanal yayılma ve farklı türlerde temel yenilmeleri olarak sınıflandırılabilir. Sıvılaşmanın deneysel olarak oluşum mekanizması ve farklı tanımları izotrop ve anizotrop koşullarda yapılmıştır (Seed ve Lee, 1966; Lee ve Seed 1967; Seed vd. 1975; Seed vd., 1983; Castro, 1975; Castro ve Poulos, 1977; Mohamad ve Dobry, 1986). Konrad ve Wagg (1993), kum ve kil oranları farklı siltli örneklerde anizotropik konsolidasyonlu-drenajsız (CU) devirsel üç eksenli deneyler yapmış ve deformasyonun devirsel gerilme oranına (CSR) ve ince tane yüzdesine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Ghionna ve Porcino (2006), örselenmemiş ve örselenmiş kumlu örneklerde anizotropik CU devirsel deneyler yapmış ve suda sedimentasyon ile hazırlanan örneklerde yapılan deneylerde alınan sonuçların, örselenmemiş örneklerde yapılanlara yakın olduğunu belirtmişlerdir. Bouferra vd. (2007), farklı bağıl yoğunluktaki kumlarda devirsel

izotropik ve anizotropik CU deneyler yapmış ve ön yükleme koşullarının sıvılaşma direncini arttırdığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, Seed, vd. (1975) tarafından önerilen farklı sıvılaşma tanımları göz önünde bulundurularak, çift genlikte (sıkışma ve çekme gerilmesi altında) oluşacak % 5'lik toplam eksenel deformasyon değeri "Limitli deformasyona sahip sıvılaşma başlangıcı (devirsel mobilite)" sınır olarak alınmış ve değerlendirmeler bu deformasyon miktarına göre yapılmıştır. Drenajsız devirsel üç eksenli deneyler anizotropik konsolide edilen üç farklı kumda yapılmıştır. Örnekler yüzeyden örselenmiş şekilde alınmıştır. Deneylerde devirsel gerilme oranı (CSR) 0.2 ile 0.5 aralığında değişecek şekilde makaslama gerilmeleri uygulanmıştır. Eksenel deformasyonun devir sayısına göre değişimi incelenerek, farklı kum örneklerinin sıvılaşma davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarının yorumunda örneklerin gerilme tarihçesi, efektif tane çapı, geçirimsizlik vb. özellikleri değerlendirmeye alınmamış, sadece eksenel deformasyonlar drenajsız koşullarda dikkate alınmıştır. Üç farklı

kum örneğinden en ince taneli ve uniform olan Ione kumunda en az, uniform olmayan ve ince çakıllar içeren beton kumunda ise en fazla aksel deformasyon gelişmiştir. Beton kumu % 50 bağıl yoğunlukta, ilk birkaç devirde, kompresyon evresinde statik olarak yenilmeye uğramıştır.

## LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışmaları kapsamında, farklı tane boyu dağılımına sahip (Şekil 1) üç adet kum örneğinin (Ione kumu, beton kumu ve sahil kumu) fiziksel özellikleri (Çizelge 1) belirlenmiştir. Ione kumunun sıvılaşma potansiyeli ve fiziksel



Şekil 1. Kum örneklerinin tane boyu dağılımının sıvılaşma abağındaki konumları (Tsuchida, 1970'ten değiştirilerek).

Figure 1. Particle size distribution of the samples on the liquefaction chart (adopted from Tsuchida, 1970).

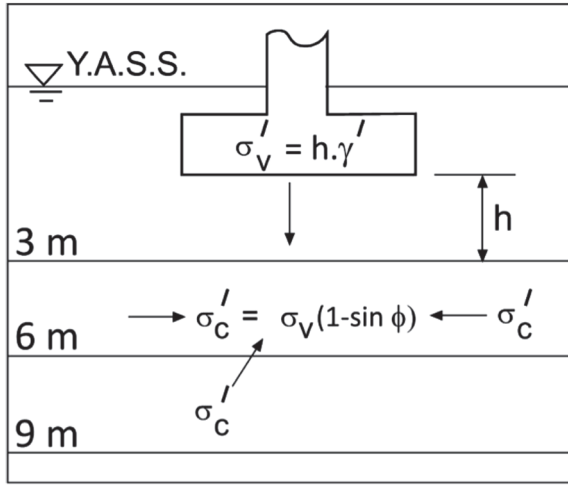
Çizelge 1. Örneklerin fiziksel özellikleri ve sınıflamaları.

Table 1. Physical properties of the samples and their classifications.

	Ione kumu	Beton kumu	Sahil kumu
G <sub>s</sub>	2.67	2.65	2.67
e <sub>min</sub> , %	0.72	0.43	0.62
e <sub>max</sub> , %	1.07	0.96	0.86
D <sub>50</sub> , mm	0.195	0.90	0.70
USCS	SP	SP	SP
D <sub>r</sub> , %	50 ve 90	50 ve 90	50 ve 90

özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur (Norris, vd. 1995; Palmer, 1997; Yang, 2005; Ulamis ve Yang, 2010; Ulamis ve Yang, 2011). Örnekler içinde en ince taneli ve uniform olan Ione kumu olup, beton kumu ince çakıllar da barındıran en iri taneli türdür. Sahil kumu da uniform olup, tane çapı diğerlerinin arasında değerdedir. Tüm örnekler örselenmiş olup, kötü derecelenmiş kum olarak sınıflandırılmışlardır. Anizotropik gerilme koşullarını oluşturmak

üzere, 1.5 m x 1.5 m'lik tekil bir temelin suya doymun ortamda 3 m, 6 m ve 9 m derinliklerde oluşturacağı gerilmeler hesaplanmıştır (Şekil 2). Örneklerin içsel sürtünme açıları statik üç eksenli deneylerden elde edilmiştir. Bu değerler



Şekil 2. Suya doymun kumda anizotrop gerilmelerin oluşturulduğu ortam ve derinlikler.

Figure 2. Anisotropic stress conditions for the representative depths in saturated sand.

ise daha sonra devirsel deneylerde kullanılacak hücre basıncını belirlemede kullanılmıştır. Deneylerde uygulanacak düşey efektif gerilmeler ise yukarıda verilen derinlikler ve zeminlerin yoğunluğu kullanılarak hesaplanmıştır. Üç farklı derinlik için deneylerde uygulanacak devirsel deviatör gerilmeler ise  $0.2 \leq CSR \leq 0.5$  aralığında hesaplanmıştır ( $CSR = t_{av}/s'_v$ ). Burada;  $t_{av}$  makaslama gerilmesi,  $s'_v$  düşey efektif gerilmedir. Örnek değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. CSR=0.4 ve 3 m derinlikteki gerilme değerleri.

Table 2. Stress values for CSR =0.4 and 3.0 m depth.

	Ione kumu	Beton kumu	Sahil kumu
$\sigma'_v$	28	25.7	28.95
$\sigma'_c$	12.6	9.88	11.87
$\sigma_{cons}$	15.4	15.82	16.39
$\sigma'_{cy}$	21.29 - 15.4	17.6 - 15.8	18.85 - 16.385
$\phi^\circ$	36	40	38
$k_0$	0.38	0.42	0.41

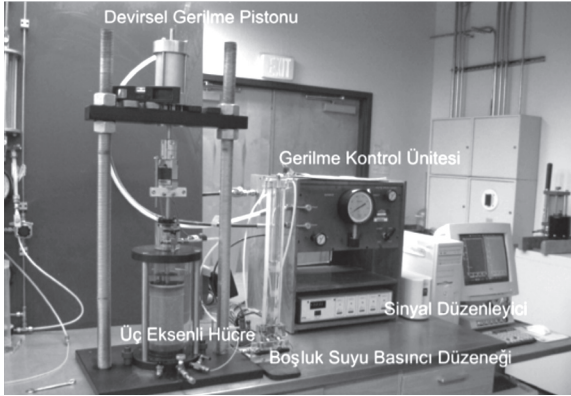
uygulanacak devirsel deviatör gerilmeler ise  $0.2 \leq CSR \leq 0.5$  aralığında hesaplanmıştır ( $CSR = \tau_{av}/\sigma'_v$ ). Burada;  $\tau_{av}$ : makaslama gerilmesi,  $\sigma'_v$ : düşey efektif gerilmedir. Örnek değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

Not: Highlight edilenler düzeltilmiş şekilleridir.

## KONSOLİDE VE DRENAJSIZ (CU) DEVİRSEL ÜÇ EKSENLİ DENEYLER

Devirsel üç eksenli deney, zeminlerin dinamik yükleme koşullarında davranışlarını belirlemede en sık uygulanan deneylerden birisidir. Deneyler için, kuru sedimantasyon yöntemi ile, % 50 ve % 90 bağıl sıklıkta örselenmiş kum örnekleri hazırlanmıştır. Vakumla havası alınan örneklere en son  $CO_2$  uygulanarak hava yüzdesinin sıfır olması sağlanmıştır. Doymunluk oranının en az % 95 olması amacı ile ters basınç uygulanmıştır. Deney için öncelikle tamamen doymun ( $S_r = 1.0$ ) örneklere hücre basıncı uygulanır. Anizotrop gerilme koşullarını sağlamak için ise düşey yük uygulanarak örneklerin konsolide olması sağlanır. Bu sınır koşullarının etkisiyle örnek içindeki asal gerilmeler her zaman yatay ve düşey eksenler

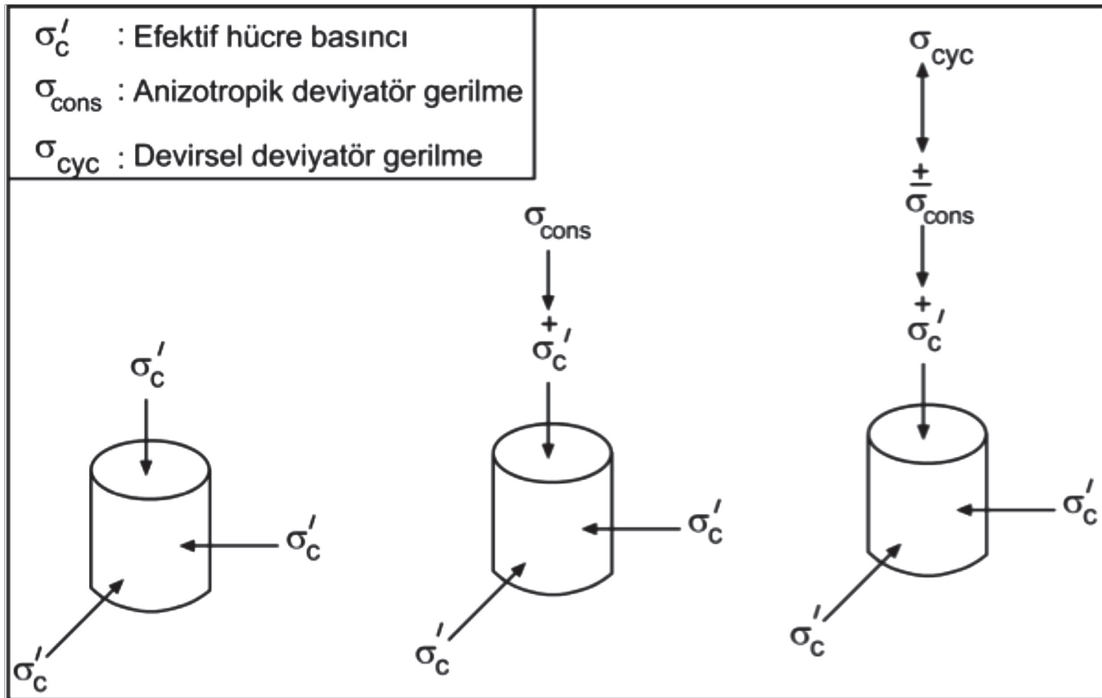
üzerindedir. Tekrarlı üç eksenli deneyde gerilme kontrollü koşullarda da deformasyon kontrollü koşullarda da deviyatör gerilme tekrarlı olarak



Şekil 3. Çalışmada kullanılan devirsel üç eksenli deney düzeneği.

Figure 3. The cyclic triaxial test system used in for the study.

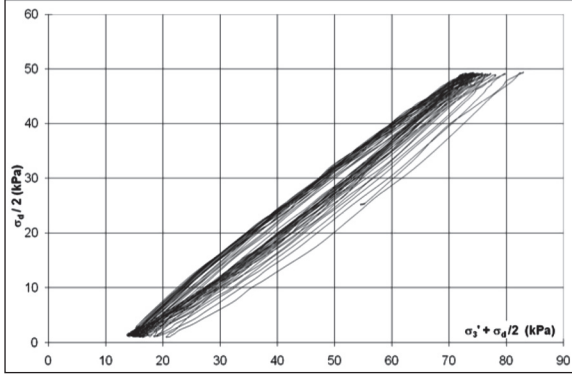
uygulanır. Tekrarlı üç eksenli deneyler sıklıkla sabit radyal gerilme ve tekrar frekansı 1 Hz olan eksenel gerilme altında gerçekleştirilir. Tipik bir deney için hazırlanmış düzenek ve parçaları Şekil 3'te verilmiştir. Anizotropik konsolidasyon için üç farklı derinlikte gerilmeler hesaplanmıştır (Şekil 4). Deneylerde yükleme frekansı 1.0 Hz, devir sayısı ise büyüklüğü 8.5 olan bir deprem için 26 olarak seçilmiştir (Seed ve Idriss, 1982). Şekil 5'te örnek olarak % 90 izafi sıkılık ve CSR = 0.5 için beton kumunda yapılan anizotrop devirsel üç eksenli deney sonucu verilmiştir. Efektif gerilme izi incelendiğinde, 26 devir sonunda %5'ten daha az bir deformasyon seviyesinde bile yenilme zarfına yaklaştığı görülmektedir. Burada örneğin yenilmesini engelleyen membranın da oluşturduğu çekme gerilmesidir.



Şekil 4. Anizotropik gerilme koşulları.

Figure 4. Representation of the anisotropic stress conditions.

Ulamiş, Yang ve Norris



Şekil 5. Beton kumunda yapılan anizotrop devirsel üç eksenli deneydeki efektif gerilme izi.

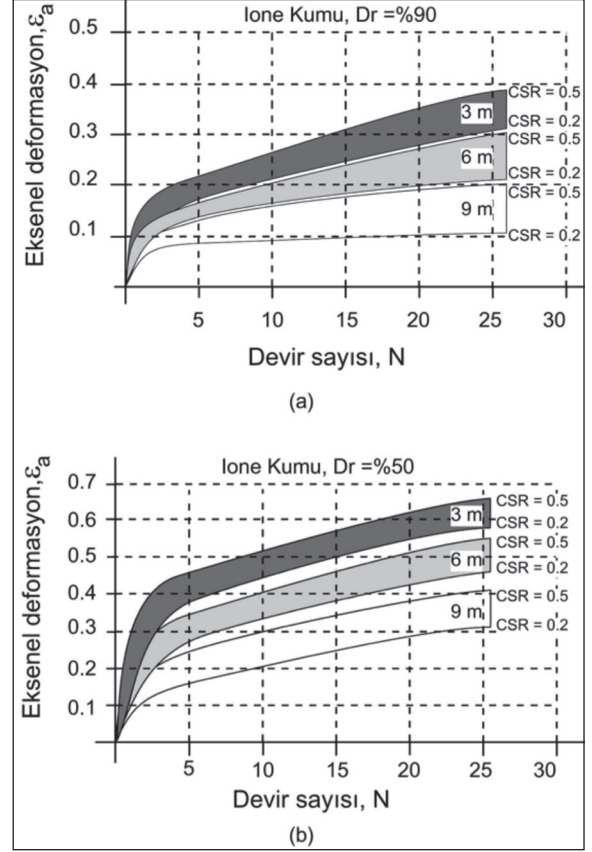
Figure 5. Effective stress path for an anisotropic cyclic triaxial test of the concrete sand.

## EKSENEL DEFORMASYON İLE SIVILAŞMA İLİŞKİSİ

Bu çalışmada, çift genlikte, % 5 eksenel deformasyon değeri sınır olarak alınarak, efektif gerilme ile beraber değerlendirilmiştir. Zira devirsel mobilite kavramı, devirlerin herhangi bir anında aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi sonrası efektif gerilmenin sıfıra yaklaşması ve kalıcı bir deformasyon oluşması olarak tanımlanabilir. İstenilen eksenel deformasyon değerine ulaşan örneklerde kabarma etkisi ile her zaman aşırı boşluk suyu basıncı gelişemeyebilir.

En ince taneli ve uniform olan Ione kumu hem % 50 hem de % 90 izafi sıklıkta sıvılaşma davranışı göstermemiştir. Yükleminin ilk devirlerinde örneklerde kabarmalar oluşarak negatif boşluk suyu basıncı gelişmiştir (Şekil 6). Artan derinlik ile beraber hücre basıncı da artmış ve eksenel deformasyon kısmen azalmıştır.

Çok sıkı sahil kumunda ( $D_r = \% 90$ ) Ione kumuna benzer bir davranış izlenmiştir. Sahil kumunun tane boyu daha iri fakat uniformdur.

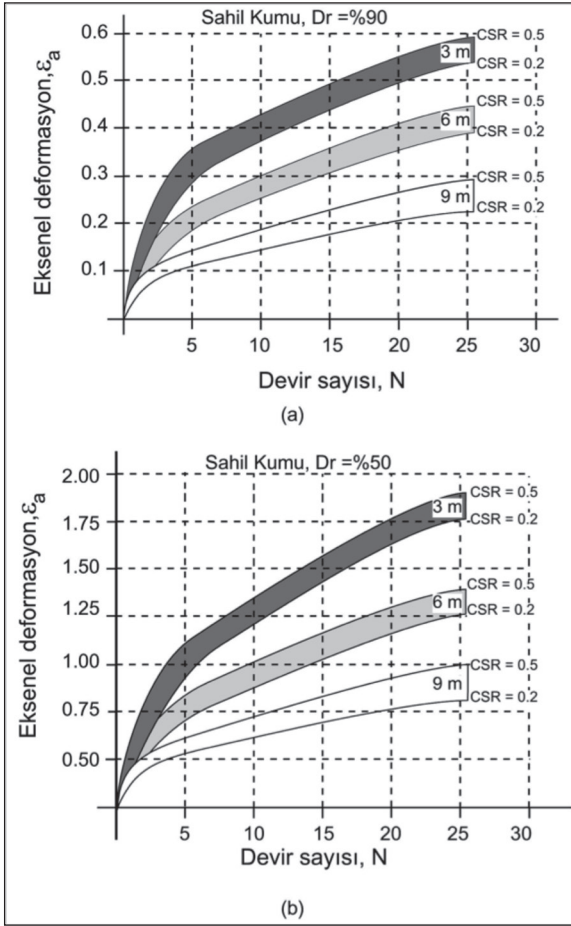


Şekil 6. Ione kumunda eksenel deformasyonun devir sayısına göre değişimi.

Figure 6. Variation of axial strain in the Ione sand with the number of cycles.

Bağıl yoğunluk %50 seviyesindeyken ilk devirdeki sıkışmada ani artan eksenel deformasyon pozitif boşluk suyu basıncı geliştirmiş ve deney sonuna kadar bu durum devam etmiştir. En yüksek devirsel gerilme oranında yapılan ( $CSR = 0.5$ ) deneyde örnek yenilme zarfına yaklaşmış fakat 26 devir sonunda sıvılaşma gerçekleşmemiştir (Şekil 7).

Ione kumu ve sahil kumunda, devirsel yüklemenin ilk sıkışma evresinde hacim azalması görülmekte, fakat aşırı boşluk suyu basıncı

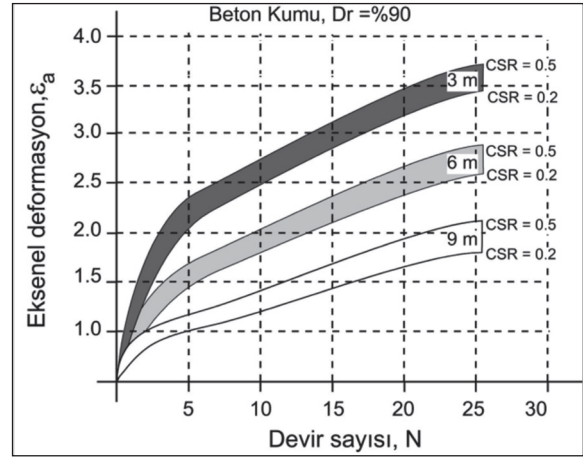


Şekil 7 Sahil kumunda eksenel deformasyonun sayısına göre değişimi.

Figure 7. Variation of axial strain in the beach sand with the number of cycles.

gelişimini engelleyecek şekilde kabarmalar ve çatlaklar oluşmaktadır. Bu da, sıvılaşma başlangıcı oluşturacak deformasyonların oluşmasını engellemiştir.

En iri taneli ve en az uniform olan beton kumu, % 50 izafi sıklıkta devirsel yüklemenin başlarında % 15 ile % 20 seviyesinde eksenel deformasyona maruz kalmıştır. Bu da, gevşek durumdaki bu kumun sıvılaşmadan, statik yük altında bile yenildiğini ifade etmektedir. Beton



Şekil 8. Beton kumunda eksenel deformasyonun devir sayısına göre değişimi.

Figure 8. Variation of axial strain in the concrete sand with the number of cycles.

kumu % 90 bağıl yoğunlukta 7. devir sonunda sıvılaşma ifadesi olan eksenel deformasyon değerine ulaşmıştır (Şekil 8). Beton kumunda yapılan deneylerde, diğerlerinden farklı olarak, ilk sıkışma evresinde kalıcı deformasyon oluşmamış ve ilerleyen devirlerde de çekme etkili olmamıştır. Şekil 6,7 ve 8'de deformasyonların değişim aralığı kapalı alanlar olarak çizilmiştir. Alt ve üst sınırlar, en az ve en çok CSR değerini ifade etmektedir. Kapalı alanlar içinde deformasyonların değişimi devirsel olarak değiştiğinden yorumda kolaylık olması açısından alt ve üst sınırlar verilmiştir.

## SONUÇ VE TARTIŞMA

Deneylerde, artan derinlikle beraber eksenel deformasyon azalmaktadır. Zira örneklere uygulanan hücre basıncı da derinlikle beraber artmaktadır. CSR değerinin artışıyla devirsel deviyatör gerilme de artmış, buna koşut olarak eksenel deformasyonlar da artmıştır.

En ince taneli ve uniform olan Ione kumunda çok sıkı ve gevşek durumda en çok deformasyon artışı ilk 2–3 devirde gerçekleşmiştir. Özellikle, sıkışmada, hacim azalarak devam eden yükleme boyunca deformasyon artışı azalmıştır. Gevşek durumda oluşan hacim azalması yanında, çok sıkı durumda ufak kabarmalar gelişerek boşluk suyu basıncını azaltmıştır.

Benzer durum, daha iri taneli, daha köşeli fakat uniform olan sahil kumunda da izlenmiştir. Gevşek durumda, boşluk oranı Ione kumundan fazla olan sahil kumunda daha fazla deformasyon gelişmiştir. Devir sayısının sabit olması, özellikle 3 m derinlikte sıvılaşma oluşumunu sınırlamıştır.

Beton kumu ise diğerlerinden farklı olarak en az uniform olup, yer yer çakıllar da içermektedir. Gevşek durumda hazırlanan örnekler, yüklemenin ilk sıkışma aşamasında çok yüksek deformasyon değerlerine ulaşmıştır. Statik yükleme ile bu örnekler yenilmiştir. Çok sıkı durumda ise 3 m ve 6 m için % 5'lik deformasyon sınırına ulaşarak, örneklerde sıvılaşma (devirsel mobilite) gerçekleşmiştir.

Bu çalışmada, kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı sadece anizotrop gerilme koşullarında eksenel deformasyon ile ilişkilendirilmiş, permeabilite, efektif tane çapı, gerilme tarihçesi vb. parametreler göz önünde bulundurulmamıştır.

Eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncının değişimi ile zeminlerin jeoteknik özelliklerinin beraber yorumlanması kumlu zeminlerin sıvılaşma mekanizmasına daha anlamlı bir yorum getirecektir. Herhangi bir yapı temelinde bulunabilecek zeminlerin çoğunlukla

anizotrop gerilmelere maruz kalacağı da dikkate alınmalıdır. Laboratuvar ortamında izotrop gerilmeler altında herhangi bir kumlu zemin doğal koşulları sağlamayacak şekilde de sıvılaşmaya maruz bırakılabilmektedir. Ortalama deprem sürelerinin laboratuvar deney yapılırken dikkate alınması ve deney sırasında hem frekans hem de çevrim sayısının buna göre ayarlanması uygun olacaktır. Devirsel deneylerde zaman ve gerilme koşullarının dikkate alınmaması zemin sıvılaşmasında yanlış yorumlara neden olabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Bouferra, R., Benseddiq, N., Shahrour, I., 2007. Saturation and preloading effects on the cyclic behavior of sand. *International Journal of Geomechanics*, 7 (5), 194-202.
- Castro, G., 1975. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101 (GT6), 551-569.
- Castro, G., Poulos, S.J., 1977. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103, 501-516.
- Ghionna, V.N., Porcino, D., 2006. Liquefaction resistance of undisturbed and reconstituted samples of a natural coarse sand from undrained cyclic triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (2), 194-202.
- Konrad, J.M., Wagg, B.T., 1993. Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (5), 929-947.



- Lee, K.L., Seed, H.B., 1967. Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 93, 47-70.
- Mohamad, R., Dobry, R., 1986. Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112 (10), 941-958.
- Norris, G.M., Siddharthan, R., Zafir, Z., Madhu, R., 1995. Liquefaction and residual strength of sands from drained triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 123 (3), 220-228.
- Palmer, J., 1997. Undrained lateral compression response from drained lateral compression test. University of Nevada, Reno, USA, Ph.D. Thesis, 440 p.
- Seed, H.B., Lee, K.L., 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 92, 105-113.
- Seed, H.B., Mori, K., Chan, C.K., 1975. Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands. UCB/EERC-75/25 Report, University of California, Berkeley, CA., 33p.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute Monograph, EERI, Oakland, CA., 134 p.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 109 (3), 458-482.
- Tsuchida, H., 1970. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. Seminar in the Port and Harbor Research Institute, Abstracts, 3.1 - 3.33, Japan (In Japanese).
- Ulamis, K., Yang, H. J., 2010. The prediction of the excess pore water pressure generation and the vertical strain in different cyclic stress ratio loadings under anisotropic undrained conditions. GSA Annual Meeting - Denver Colorado, USA ( In DVD).
- Ulamis, K., Yang, H. J., 2011. Soil permeability related to liquefaction potential under anisotropic cyclic triaxial test, 43rd Engineering Geology and Geotechnical Engineering Symposium, 1 (1), 481-489.
- Yang, H.J., 2005. Extension/compression test stress-strain-volume change characterization under drained conditions. University of Nevada, Reno, Ph.D. Thesis, 431 p.