

DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYLER İLE TEMİZ KUMUN SIVILAŞMA KARAKTERİSTİĞİNE DANE BOYUTUNUN ETKİSİ

EFFECT OF GRAIN SIZE ON LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF CLEAN SAND WITH DYNAMIC TRIAXIAL EXPERIMENTS

Zehra Ertosun KARABULUT¹, Abdülhakim ZEYBEK², Sabriye Banu İKİZLER³

ÖZET

Geçmişten günümüze birçok depremde zemin sıvılaşması olayı gözlemlenmiştir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Depremleri, geoteknik yapılarda ciddi hasarlara neden olan sıvılaşma olayının yıkıcı gücünü bir kez daha gözler önüne sermiştir. Sismik yükler altında suya doygun kumlu zeminlerdeki boşluk suyu basıncının artması ile doğrudan ilişkili olan sıvılaşma efektif gerilmelerin azalmasına ve dolayısıyla zeminin dayanım ve rijitliğini kaybetmesine neden olmaktadır. Zemin sıvılaşması olayının iyi anlaşılabilmesi için boşluk suyu basıncının oluşumu ile zemin sıvılaşması veya yumuşaması sürecini etkileyen parametrelerin araştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, drenajsız şartlarda ve tekrarlı yükler altında kumlu zeminlerin dane şekli ve boyutunun aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Farklı dane boyutları ve/veya şekillerine sahip üç farklı kum seçilmiştir. Kumlardan ikisi benzer köşeliliğe sahipken dane büyüklükleri farklıdır. Üçüncü kumun hem köşeliliği hem de dane boyutu diğer iki kumdan farklıdır. Gevşek halde silindirik üç eksenli test numuneleri hazırlanmış ve bir dizi gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler 100 kPa efektif gerilme altında izotropik olarak konsolide edilmiş ve 0,1 Hz frekansa sahip farklı tekrarlı gerilme oranlarında (CSR) teste tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, literatürde yaygın olarak kullanılan gerilme esaslı aşırı boşluk basıncı modellerinin tahminleri ile karşılaştırılmış ve farklı kum türleri için ampirik katsayılar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, sıvılaşma, temiz kum, dane büyüklüğü

ABSTRACT

Earthquake-induced liquefaction has been recurrently observed in many recent or historic events. 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Turkey have once again exemplified the destructive power of the liquefaction phenomenon, causing severe damage to geotechnical structures. Liquefaction is principally associated with the development of excess pore pressures in the event of seismic loading, which results in effective stress drop and therefore significant loss of strength and stiffness of sandy soils. Elucidation of the parameters affecting pore pressure generation and soil liquefaction or softening process is important for the comprehensive understanding of liquefaction. This study aims to investigate the influence of the shape and size of sand particles on the build-up of excess pore pressures under cyclic loading in undrained conditions. Three sands with different particle sizes and/or shapes were selected. The angularity of the two sands was similar, whereas their grain size was different. The third sand had different angularity and grain size. Loosely

¹Araştırma Görevlisi, Muş Alparslan Üniversitesi, z.ertosun@alparslan.edu.tr (Sorumlu yazar)

²Doktor Öğretim Üyesi, Muş Alparslan Üniversitesi, a.zeybek@alparslan.edu.tr

³ Profesör Doktor, Karadeniz Teknik Üniversitesi, banuh@ktu.edu.tr

packed cylindrical triaxial sand specimens were prepared using these sands, and a series of stress-controlled dynamic triaxial tests were performed. The specimens were isotropically consolidated to an effective confining stress of 100 kPa and subjected to different cyclic stress ratios (CSR) having loading frequencies of 0.1 Hz. The test results were compared with the estimation of stress-based excess pore pressure models widely used in design practice, and the empirical coefficients that provide the best fit to the experimental data were determined for different types of sand.

Keywords: Earthquake, liquefaction, clean sand, grain size

1. GİRİŞ

Sıvılaşma, deprem sarsıntıları esnasında zeminlerin mukavemetini ve rijitliğini önemli ölçüde kaybettiği bir olgudur. Dinamik yükler altında artan aşırı boşluk suyu basıncı, zemin içindeki efektif gerilmelerde ve dolayısıyla zeminin mukavemetinde önemli bir azalmaya neden olur. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Depremleri gibi birçok depremde zemin sıvılaşması, aşırı temel oturmalarına, zemin göçmelerine ve binalarda, toprak barajlarda, liman tesislerinde ve diğer kritik altyapılarda ciddi hasarlara sebep olmuştur.

Kumların dane boyutu zemin sıvılaşmasını etkileyen parametrelerden bir tanesidir. İnce daneli zeminlerin kaba daneli zeminlere göre sıvılaşma direncinin daha az olduğu önceki çalışmalarda belirlenmiştir (Hakam, 2016). Dane boyutunun yanı sıra kum taneciklerinin köşeselliği ve yuvarlaklığı da (tanecikli malzemelerin mekanik tepkisini etkileyen önemli bir şekil tanımlayıcısı) sıvılaşma direncini etkileyen faktörlerdendir. Holtz ve Gibbs (1956) farklı yüzdelerde çakıl içeriğine sahip kum ve çakıl karışımları üzerinde konsolide drenajlı üç eksenli testler gerçekleştirmiş ve çakıl içeriğinin %50-60'a kadar artmasıyla çakıllı zeminlerin kayma mukavemetinin arttığını bulmuşlardır. Ayrıca artan parçacık açısallığının çakıllı zeminin kayma mukavemetini arttırdığını bulmuşlardır. Evans ve Zhou (1995) çakıl içeriği %0-60 arasında değişen çakıl-kum karışımlarının drenajsız üç eksenli testlerini gerçekleştirmişler ve çakıl partiküllerinin dahil edilmesinin sıvılaşma direncini arttırdığını bulmuşlardır. Ashmawy vd. (2003) parçacık yuvarlaklığının sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir. Benzer çalışmalar Wei vd. (2014) tarafından yapılmış ve her iki çalışmada köşeli parçacıkların sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğu sonucuna varmışlardır. Yang ve Wei (2012) yuvarlak şekilli ince danelerin temiz kuma eklenmesi, daha köşeli şekle sahip ince danelerin eklenmesiyle karşılaştırıldığında, sıvılaşma potansiyelinde belirgin bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürde, tekrarlı yüklemelerden kaynaklanan aşırı boşluk suyu basınçlarının tahmini için bazı modeller önerilmiştir. Gerilme tabanlı modeller (Lee vd., 1974; Seed vd., 1975; Booker vd., 1976; Polito vd., 2008; Baziar vd., 2011; Khashila vd., 2017), deformasyon tabanlı modeller (Dorby vd., 1985) ve enerji tabanlı modeller (Green vd., 2000) boşluk suyu basıncı oluşumunu tahmin etmek için kullanılan başlıca yöntemlerdir. Bu çalışmada, drenajsız şartlarda ve tekrarlı yükler altında kumlu zeminlerin dane şekil ve boyutunun aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Farklı dane boyut ve/veya şekline sahip üç farklı kum ile gevşek test numuneleri hazırlanmış ve gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, literatürde yaygın olarak kullanılan gerilme esaslı aşırı boşluk basıncı modellerinin tahminleri ile karşılaştırılmış ve farklı kum türleri için bu modellerin performansları incelenmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM

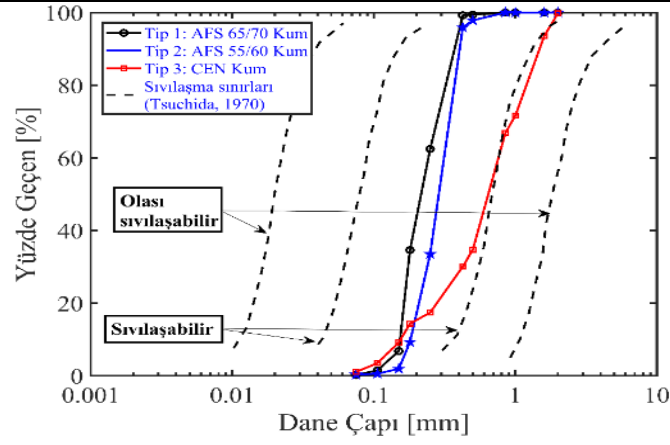
2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri ve Deney Yöntemi

Deneylerde Muş Alparslan Üniversitesi İnşaat Analiz Laboratuvarı bünyesinde bulunan dinamik üç eksenli test aleti kullanılmıştır. Cihazın özellikleri ve çalışma prensipleri hakkında detaylı bilgi Zeybek ve Eyin (2023) tarafından verilmiştir. Deneylerde üç farklı dane çapına sahip kum kullanılmıştır. Kumlara ait dane çapı granülometresi Şekil 1'de ve deneylerde kullanılacak kumların fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

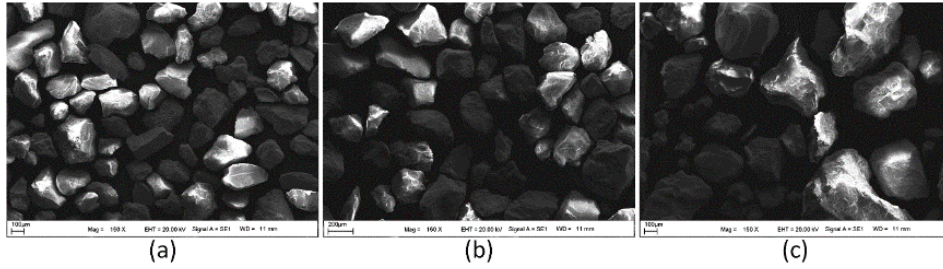
Kum Tipi	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c	G_s	e_{min}	e_{max}
Tip 1 (AFS 65/70)	0.170	0.185	0.205	0.25	1.470	0.805	2.65	0.612	0.947
Tip 2 (AFS 55/60)	0.185	0.220	0.296	0.31	1.676	0.844	2.65	0.574	0.885

Tip 3 (CEN)	0.160	0.426	0.600	0.76	4.750	1.490	2.63	0.398	0.630
----------------	-------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------



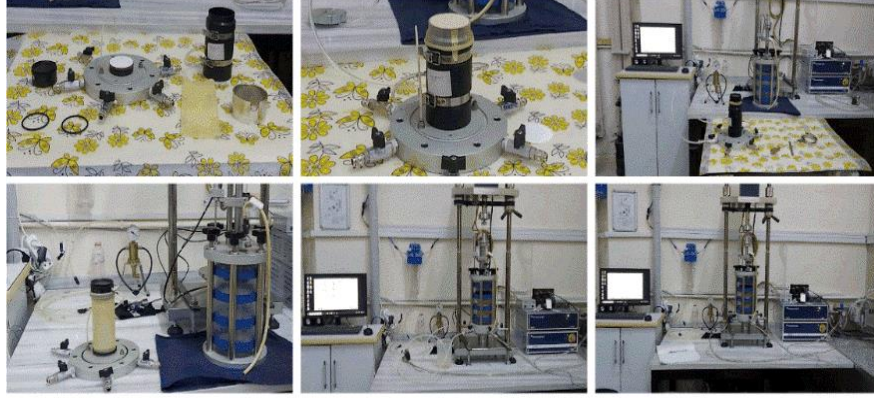
Şekil 1. Deneysel malzemelere ait dane dağılım eğrileri

Tip 1 ve Tip 2 kumu Şile-İstanbul bölgesinde bulunan ocaklardan temin edilmiştir. Tip 3 veya CEN referans kumu ise TS EN 196-1 standardına göre hazırlanmış bir kumdur. Kumların şekilsel (köşelilik/yuvarlaklık) özelliklerini anlamak için Malatya İnönü Üniversitesi İBTAM laboratuvarında SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 2). Tip 1 ve Tip 2 kumları benzer yuvarlaklık özelliği gösterirken Tip 3 kumu daha köşeli bir yapıya sahiptir. Kumların ortalama dane çapına (D_{50}) bakıldığında 0.205 mm ile en ince kum Tip 1, 0.60 mm değeri ile Tip 3 en kalın dane boyutuna sahip kumdur.



Şekil 2. SEM görüntüleri: (a) Tip 1: AFS 65/70 kumu, (b) Tip 2: AFS 55/60 kumu, (c) Tip 3: CEN kumu

Kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış gevşek zemin numuneleri ters (geri) basınç yöntemi ile doygunluğa ulaştırılmıştır. Numunelerin doygunluk derecesini belirlemek için Skempton (1954) tarafından önerilmiş olan B parametresi kontrolü yapılmış ve testlerde B değerinin 0.98-1 olduğu tespit edilmiştir. 100 kPa efektif basınç altında izotropik olarak konsolide edilen numuneler üzerinde gerilme kontrollü drenajsız dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Testlerde ASTM D5311 (2013) standardı tarafından önerilen yöntem ve esaslara uyulmuştur. Konsolidasyon ve yükleme koşulları ve tipik deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Deney numunelerinin hazırlanması ve tekrarlı yükler altında test edilmesi

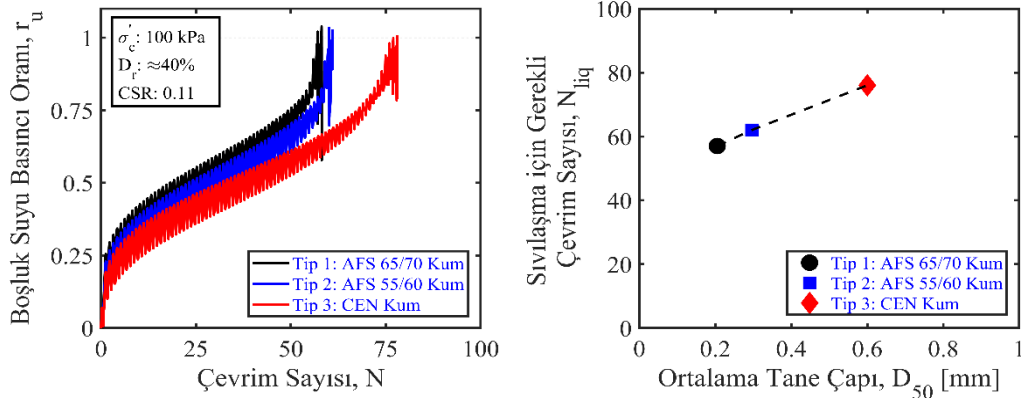
Tablo 2. Konsolidasyon ve yükleme koşulları ve tipik deney sonuçları

Deney No	Deney ID	Kum Tipi	D_r (%)	u_0 (kPa)	σ'_c (kPa)	Frekans (Hz)	CSR	N_{liq}
1	ZEK1	Tip 1 (AFS 65/70)	42	300	100	0.1	0.10	80
2	ZEK2		43	300	100	0.1	0.11	57
3	ZEK3		42	300	100	0.1	0.125	28
4	ZEK4	Tip 2 (AFS 55/60)	40	300	100	0.1	0.10	92
5	ZEK5		39	300	100	0.1	0.11	62
6	ZEK6		39	300	100	0.1	0.125	13
7	ZEK7	Tip 3 (CEN)	40	300	100	0.1	0.15	4
8	ZEK8		41	300	100	0.1	0.11	76
9	ZEK9		39	300	100	0.1	0.125	47
10	ZEK10		40	300	100	0.1	0.15	12

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Dane Boyutunun ve Şeklinin Boşluk Suyu Basıncının Oluşumu ve Gelişimi Üzerindeki Etkisi

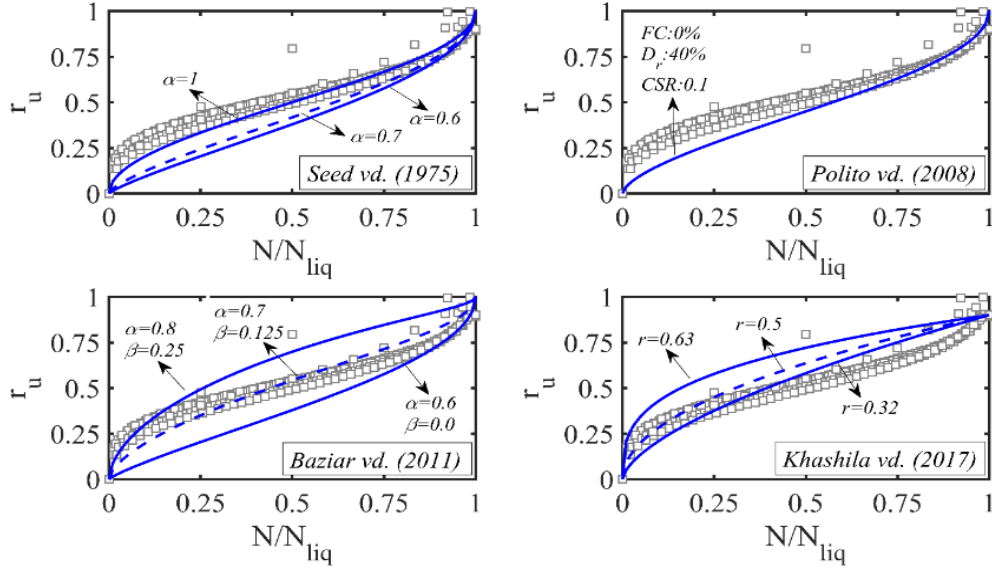
Farklı dane boyutuna ve şekline sahip kumlu zeminlerde boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi Şekil 4'de verilmektedir. Görüldüğü üzere, dane boyutunun azalması ile zemin numuneleri daha düşük çevrim sayılarında ön sıvılaştırma ($r_u = 1$) seviyesine ulaşmaktadır. Tüm numunelerde, boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 0.25$ değerine kadar hızlı şekilde artmış daha sonra bu hız yavaşlamıştır. $r_u = 0.75 - 0.80$ değerinden sonra tekrar hızlı şekilde artmış ve en nihayetinde $r_u = 1$ değerine ulaşmıştır. Ayrıca dane yuvarlaklığı arttıkça sıvılaştırma seviyesine daha erken çevrim sayılarında ulaşıldığı görülmektedir. Dane boyutu en büyük ve köşeselliği en fazla olan CEN kumunun sıvılaştırma direnci diğer kumlara göre daha yüksektir.



Şekil 4. Boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi

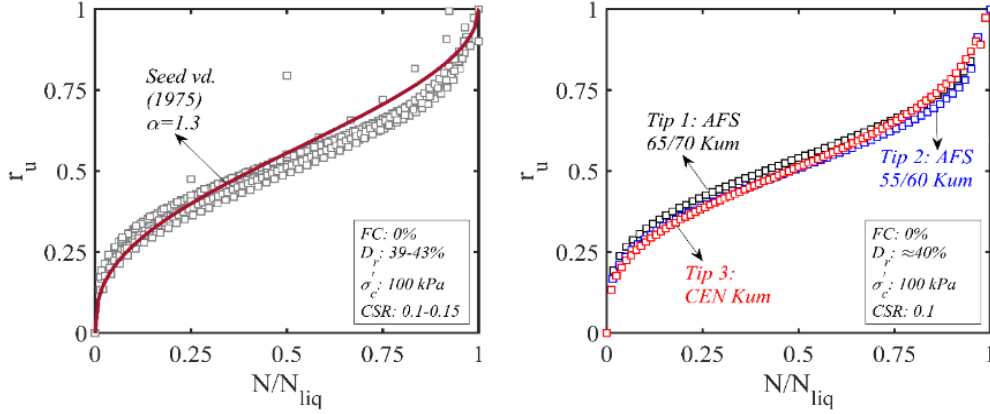
3.2. Boşluk Suyu Basıncının Tahmini

Şekil 5'te deneysel sonuçların literatürde yaygın kullanılan dört farklı boşluk suyu basınç modelinden elde edilen tahminler ile karşılaştırılması verilmektedir. Görüldüğü üzere, deneysel olarak elde edilen $r_u - N$ eğrileri önce azalan sonra artan eğimde ilerlemektedir. Khashila vd. (2017) tarafından önerilen model dışındaki yöntemler bu eğilime uygun davranış göstermektedir. Deneysel sonuçların, Seed vd. (1975) ve Polito vd. (2008) modelleri kullanılarak elde edilen alt, üst ve ortalama sınır eğrilerinin genellikle üstünde kaldığı görülmektedir. Baziar vd. (2011) modelinden elde edilen ortalama sınır eğrisinin deneysel verilere en yakın sonuç verdiği görülmüş; ancak, alt ve üst limitlerin sırasıyla çok daha düşük ve yüksek bir eğimde artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Khashila vd. (2017) modeli için, deneysel verilerin $r_u \approx 0,30$ değerine kadar ortalama sınır eğrisi ile uyum sağlamakta olduğu ancak sonrasında deneysel veriler arasında uyum sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 5. Boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı oranı ile değişimi

Şekil 5'den görüleceği üzere aşırı boşluk basıncı modellerinin performansının ampirik parametrelere dayandığı ve yeni bir α katsayısına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Literatürde α katsayısının ince dane oranı (FC), rölaf sıklık (D_r), tekrarlı gerilme oranı (CSR) gibi faktörlere bağlı olduğu belirtilmiş; ancak, dane çapı ve şeklinin α katsayısı üzerindeki etkisine dair az sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, dane çapı ve şeklinin α katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 6'da benzer D_r ve farklı CSR altında teste tabi tutulan farklı dane çapına ve şekline sahip temiz kum ($FC = \%0$) numunelerinden elde edilen sonuçlar Seed vd. (1975) modelinden elde edilen tahminler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara en yakın eğriyi veren α katsayısını tespit etmek için basit istatistiksel yöntemler kullanılmış ve bu analizler ışığında ortalama α değeri katsayının 1.3 olduğu görülmüştür. Farklı çap ve şekle sahip kumlu zeminler aynı deneysel koşullar altında (aynı CSR , D_r , FC) test edilmiş ve dane çapı ve şeklinin α katsayısı üzerindeki etkisinin dikkate alınması ile çok daha iyi tahminlerin elde edilebileceği görülmüştür.

Şekil 6. Deneysel sonuçlar için ortalama α katsayısı değeri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, drenajsız şartlarda ve tekrarlı yükler altında kumlu zeminlerin dane şekli ve boyutunun sıvılaşma direnci ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmış ve elde edilen deneysel veriler literatürde yaygın olarak kullanılan boşluk suyu modellerinin tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen önemli bulgular şu şekilde sıralanabilir:

Farklı dane boyutları ve şekillerine sahip üç farklı kum için deneyler yapılmış ve dane çapının küçülmesiyle sıvılaşma potansiyelinin arttığı gözlemlenmiştir.

- (1) Tekrarlı gerilme oranının artmasıyla kum numuneler daha düşük çevrimlerde sıvılaşma seviyesine ulaşmıştır.
- (2) Aynı tekrarlı gerilme oranında sıvılaşmaya karşı en yüksek direnci dane boyutu en yüksek ve göreceli olarak daha köşeli olan Tip 3 (CEN) kumu göstermektedir.
- (3) Deneysel veriler literatürde yaygın olarak kullanılan gerilme esaslı aşırı boşluk basıncı modellerinin tahminleri ile karşılaştırılmış ve deneysel sonuçlara uygun ampirik katsayılar (α vb.) belirlenmiştir. Boşluk suyu basıncının tahmininde dane çapı ve şeklini dikkate alan ampirik katsayıların kullanılması ile çok daha iyi sonuçlar alınabileceği görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Çalışma için bütçe sağlayan MŞÜ BAP (BAP-20-MMF-4901-01/ Mikrobiyolojik Yöntemlerle Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi) ve KTÜ BAP (FDK-2022-10406/Mikrobiyolojik İyileştirme Yapılan Zeminlerin Deprem ve Sıvılaşmaya Karşı Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi) birimlerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Ashmawy, A. K., Sukumaran, B., Vinh Hoang,(2003),” V.: Evaluating the influence of particle shape on liquefaction behavior using discrete element modeling”, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, no. June, pp. 1089–1096
- ASTM International (2013), “Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil”, D5311/D5311M-13, West Conshohocken, PA: ASTM International, updated November 1, 2013.
- Baziar M.H., Shahnazari, H., Sharafi, H. (2011), “A Laboratory Study on the Pore Pressure Generation Model For Firouzkooh Silty Sands Using Hollow Torsional Test”, International Journal of Civil Engineering, Vol 9, 2, 126-134.
- Booker, J.R., Rahman, M.S., Seed, H.B. (1976), “A Computer Program for the Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation during Cyclic or Earthquake Loading”, Berkeley, Earthquake Engineering Center, University of California.
- Dobry, R., Vasquez-Herrera, A., Mohamad, R. and Vucetic, M. (1985),” Liquefaction flow failure of silty sand by torsional cyclic tests”, Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions, ASCE, 29-50
- Evans MD, Zhou S.(1995),” Liquefaction behavior of sand-gravel composites”, J Geotech Engrg ;121(3):287–98.

- Green RA, Mitchell JK, Polito CP (2000), "An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils", Proceedings of the John Booker memorial symposium, Sidney Australia, AA BalkemaPublishers, Rotterdam, Netherlands
- Hakam A.(2016)," Laboratory Liquefaction Test of Sand Based on Grain Size and Relative Density", J. Eng. Technol. Sci., Vol. 48, No. 3, 2016, 334-344.
- Holtz WG, Gibbs HJ. (1956)," Triaxial shear tests on pervious gravelly soils", J Soil Mech Found Div, ASCE; 82(SM1):1–22.
- Khashila, M., Hussien, M.N., Karray, M., Chekired, M. (2017), "Use of Pore Pressure Build-Up as Damage Metric in Computation of Equivalent Number of Uniform Strain Cycles", Canadian Geotechnical Journal, Vol 55, 4, 538-550. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0231>
- Lee, K.L., Albaisa, A. (1974), "Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 100, 4.
- Polito, C.P., Green, R.A., Lee, J. (2008), "Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 134, 10, 1490-1500.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., Makdisi, F., Banerjee, N. (1975), "Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses", EERC 75-29. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Wei, L.M., Yang, J.(2014),"On the role of grain shape in static liquefaction of sand–fines mixtures", Geotechnique 64(9), 740–745
- Yang, J. & Wei, L. M. (2012)," Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape", Geotechnique 62, No. 12, 1111–1125
- Zeybek A. ve Eyin M.(2023)," Experimental Study on Liquefaction Characteristics of Saturated Sands Mixed with Fly Ash and Tire Crumb Rubber", Sustainability 2023, 15(4), 2960