

## DOYGUN OLMAYAN KUMLARDA BAŞLANGIÇ KOŞULLARININ SIVILAŞMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

### EFFECTS OF INITIAL CONDITIONS ON LIQUEFACTION BEHAVIOR IN UNSATURATED SANDS

Mert ERBAŞ<sup>1</sup>, Nabi Kartal TOKER<sup>2</sup>

#### ÖZET

Sıvılaşma, deprem yükü etkisi sonucunda yapılarda büyük zararlara yol açabilen geoteknik sorunlardan birisidir. Sıvılaşmanın gevşek ve doygun zeminlerde meydana geldiği kabul edildiğinden genellikle mühendislik uygulamalarında doygun olmayan zeminler için sıvılaşma riski değerlendirmesi göz önüne alınmamaktadır. Bununla birlikte, sıvılaşmanın doygun olmayan zeminlerde de gözlenebildiğini doğrulayan bazı deneysel, sayısal ve gerçek vaka çalışmaları bulunmaktadır. Bu nedenle, sıvılaşma riskinin doygun olmayan zeminler için de geçerli olduğu belirtilebilir. Bu makalede, konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar gözden geçirilerek başlangıç koşullarının sıvılaşma davranışı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Genel olarak, çalışmaların sonuçları tutarlı değerlendirmeler vermektedir. Azalan doygunluk oranı, artan bağıl sıklık ve artan çevre basıncı doygun olmayan zeminin sıvılaşma direncine katkı sağlamaktadır. Bu bildiri kapsamında, incelenen çalışmaların sonuçları ayrı ayrı özetlenmiş sonuçlarının birbirleri ile tutarlı olup olmadıkları incelenmiştir. Bu sayede doygun olmayan zeminler için bir sıvılaşma ön değerlendirilmesi yapılmasına olanak sunabilir.

*Anahtar Kelimeler: Doygun olmayan zemin, sıvılaşma, doygunluk oranı, çevre basıncı, bağıl sıklık, emme basıncı*

#### ABSTRACT

Liquefaction is one of the main geotechnical problems that may cause excessive damage on structures during earthquakes. Liquefaction is tacitly considered to occur in loose saturated soils, so liquefaction assessment is not done for partially saturated soils in engineering practice. However, there are some experimental, numerical and real-life case studies exemplifying that liquefaction may be observed in unsaturated soils as well. Hence, liquefaction is also a risk for unsaturated soils. This paper examines the effects of initial conditions on liquefaction behavior by reviewing the previous studies in the literature. Generally speaking, the outcomes of these studies lead to consistent results: Liquefaction

<sup>1</sup> Arş. Gör., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, [merte@metu.edu.tr](mailto:merte@metu.edu.tr) (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, [toker@metu.edu.tr](mailto:toker@metu.edu.tr)

resistance of an unsaturated soil rises with decreasing degree of saturation, increasing relative density and/or initial confining pressure. Within the scope of this paper, the results of the reviewed studies are summarized separately and their consistency with each other is examined. Findings of this study may allow a preliminary evaluation of liquefaction for unsaturated sands.

*Keywords: Unsaturated soil, liquefaction, degree of saturation, confining stress, relative density, suction*

## 1. GİRİş

Sıvılaşma, sismik ykleme altında efektif gerilmeye büyük bir azalmaya ve dolayısıyla zemin mukavemetinde ve rijitliğinde nemli kayba neden olan aşırı boşluk basıncı oluşumudur (Zeybek, 2022). Sıvılaşma, zemin mukavemetindeki kayıp nedeniyle binaların oturması, toprak kaymaları, toprak barajların yıkılması ve boru hatlarında kırıklar oluşması gibi üst ve altyapılar için önemli geoteknik hasar kaynaklarından biridir.

Deprem anında sismik yk öncelikle boşluk havası ve boşluk suyu tarafından karşılanır. Drenajsız davranış sebebiyle boşluk suyu hızlıca dağılamaz ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Belli bir yük döngüsünden sonra aşırı boşluk suyu basıncı başlangıç toplam gerilme değerine ulaşmasıyla efektif gerilme sifıra düşer, zemin kayma mukavemetini kaybeder. Mühendislik uygulamalarında sıvılaşmanın yalnızca gevşek, kohezyonsuz ve doymun kumlarda veya düşük plastisiteli silt zeminlerde görüldüğü kabul edilmektedir. Unno ve diğerleri (2008) boşluk havasının sıkıştırılabilirliği nedeniyle doymun olmayan zeminlerin sıvılaşma yaşamayacağının düşünüldüğünü belirtmektedir. Ancak, bazı deneysel ve arazi vaka çalışmaları sıvılaşmanın doymun olmayan zeminlerde de görülebileceğini ortaya koymuştur. Bu durum doymun olmayan zeminlerde de sıvılaşma değerlendirmesi yapmayı gerekli kılmıştır.

Bu bildiri, doymun olmayan zeminlerde başlangıç koşullarının sıvılaşma davranışını nasıl etkilediğini daha iyi anlamak amacıyla geçmiş çalışmaların incelenmesini amaçlamaktadır. Bu alışmalar arasında altı farklı deneysel, numerik ve saha vaka çalışması yer almaktadır. alışmalar genel olarak doymun olmayan zeminlerde başlangıç doymunluk oranının, başlangıç bağıl sıklığının ve başlangıç efektif evre basıncının sıvılaşma davranışına etkilerini araştırmakta ve karşılaştırmaktadır.

Bu bildiri kapsamında başlangıç koşullarının sıvılaşmaya etkileri ayrı başlıklar altında değerlendirilecek ve ilgili çalışmaların sonuçları özetler halinde sunulacaktır.

## 2. TEMEL TANIMLAMALAR VE FORMÜLLER

Bu kısımda, incelenen çalışmalarda yer alan bazı temel tanımlar ve formüller bildiri içerisinde tekrar tekrar sunulmaması amacıyla verilmiştir. Doymun olmayan zeminlerde efektif gerilme Bishop (1959) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

$\sigma$  ve  $\sigma'$ , toplam ve efektif gerilmeleri,  $u_a$  ve  $u_w$  ise sırasıyla boşluk hava ve boşluk suyu basıncını temsil etmektedir.  $u_a - u_w$  farkı da matrik emme basıncını vermektedir.

Sıvılaşma durumuna karar verebilmek için efektif gerilme azalma oranı (veya aşırı boşluk suyu basıncı oranı) olarak tanımlanan  $r_u$  değeri kullanılmaktadır.

$$r_u = 1 - \frac{p'}{p'_0} = 1 - \frac{\Delta u}{p'_0} \quad (2)$$

$p'$  (bazen  $\sigma'_m$ ) ve  $p'_0$  (bazen  $\sigma'_{m0}$ ) sırasıyla ortalama efektif gerilme ve başlangıçtaki ortalama efektif gerilme olarak tanımlanmıştır.  $\Delta u$  değeri ise oluşan aşırı boşluk suyu basıncını temsil etmektedir.  $r_u$  değerinin 1'e ulaşması, efektif gerilmenin sıfıra düştüğü ve numunenin sıvılaşma durumuna geçtiğini göstermektedir.

Bazı çalışmalarda, boşluk havası basıncını hesaplamak için Boyle (1964) kanununa başvurulmuştur. Drenajsız durumlar için (sabit su içeriği) numunenin toplam hacim değişimi boşluk havasındaki hacim değişimine eşittir.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (3)$$

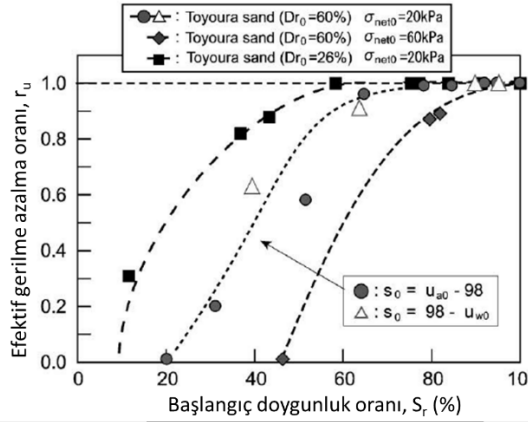
P ve V değerleri sırasıyla boşluk hava basıncı ve hacmidir.

### 3. BAŞLANGIÇ DOYGUNLUK ORANININ ETKİSİ

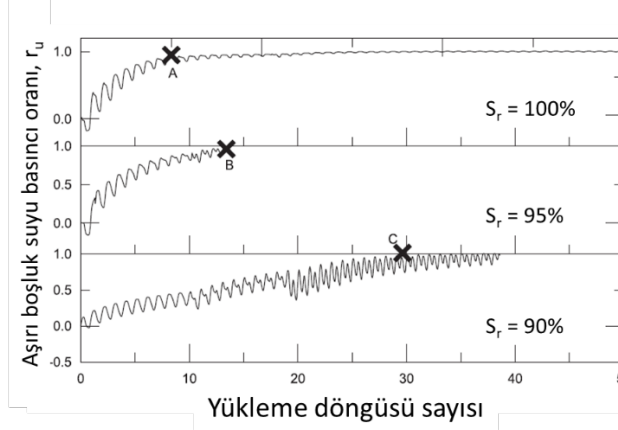
Unno ve diğerleri (2008), Toyoura kumu üzerinde bir dizi deformasyon kontrollü tekrarlı yüklü üç eksenli test yapmıştır. Testler başlangıç koşulları farklı toplamda 26 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının özeti olarak Şekil 1'de farklı başlangıç koşullarına sahip numunelerin nihai efektif gerilme azalma oranı – başlangıç doymunluk oranı grafiği verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere aynı yük altında diğer başlangıç koşullarından bağımsız olarak başlangıç doymunluk oranı arttıkça  $r_u$  değeri 1'e yaklaşmaktadır, bir diğer deyişle doymunluk seviyesi arttıkça sıvılaşma ihtimali de artmaktadır. Aynı durum Liu ve Xu'nun (2014) çalışmalarında da görülmektedir (Şekil 2). Zeybek (2022) ise farklı başlangıç koşullarına sahip Şile kumu numuneleri farklı CSR değerleri altında yüklemiş ve sıvılaşmanın gözlemlendiği yük döngüleri Şekil 3'te verilmiştir. Anlaşılacağı üzere aynı CSR değerlerine sahip numunelerde başlangıç doymunluk oranı düşük olan numuneler daha geç sıvılaşmaktadır. Başlangıç koşullarının etkilerini inceleyen bir başka çalışmada (Mele vd., 2019) da sıvılaşmaya direnç oranının (LRR) başlangıç doymunluk oranı ile ilişkisi verilmiştir (Şekil 4). LRR değeri aynı çevre basıncı ve yük döngü sayısı altında doymun olmayan numunenin döngüsel dayanım oranının ( $CRR_{unsat}$ ), doymun olan numunenin döngüsel dayanım oranına ( $CRR_{sat}$ ) bölünmesi olarak tanımlanabilir ( $LRR = CRR_{unsat} / CRR_{sat}$ ).

Konuyla ilgili farklı simülasyon modelleri hazırlanmış ve bu modeller önceki çalışmalardan seçilen deney verileri ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Komovilas ve Kikumoto (2017), van Genuchten (1980) zemin su tutma eğrisi modelini kullanarak bir simülasyon modeli tasarlamış ve Unno ve diğerlerinin (2013) deneysel çalışma verilerini kullanarak modellerini

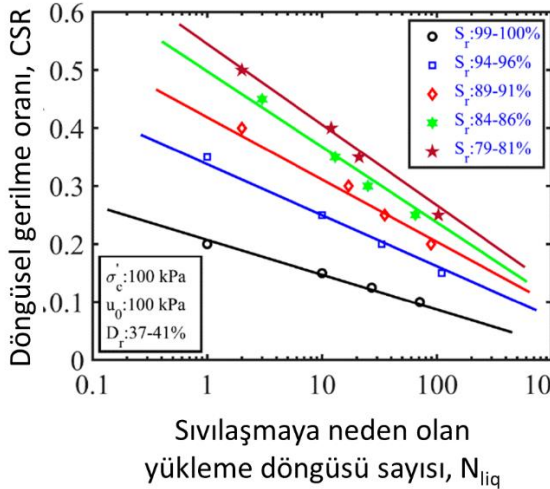
doğrulamışlardır. Bu model sonucunda başlangıç koşullarının sıvılaşmaya etkilerini gösteren 2 ve 3 boyutlu grafikler hazırlamışlardır. Bu çalışmada da başlangıç doygunluk oranı ile  $r_u$  değeri arasında ters bir bağıntı olduğu görülmektedir (Şekil 5a ve Şekil 5b). Liu ve Muraleetharan (2012) da oluşturdukları modelde aynı savı elde etmişlerdir.



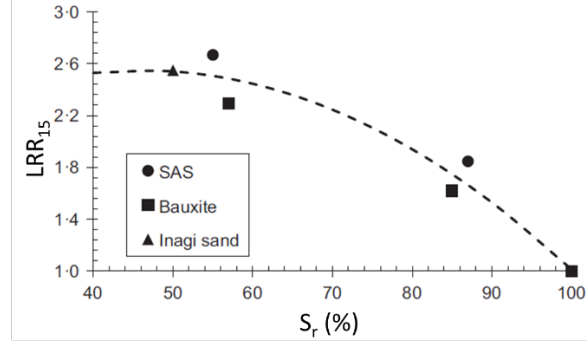
Şekil 1. Unno ve diğerlerinin (2008) deneylerinin sonuçlarının gösteren grafik



Şekil 2. Başlangıç doygunluk oranının  $r_u$  değerine etkisini gösteren grafik ( $D_r=30\%$  ve  $\sigma_{c,0}'=50$  kPa) (Liu ve Xu, 2014)



Şekil 3. Zeybek'in (2022) deneylerinin başlangıç doygunluk oranına bağlı sonuçlarını gösteren grafik

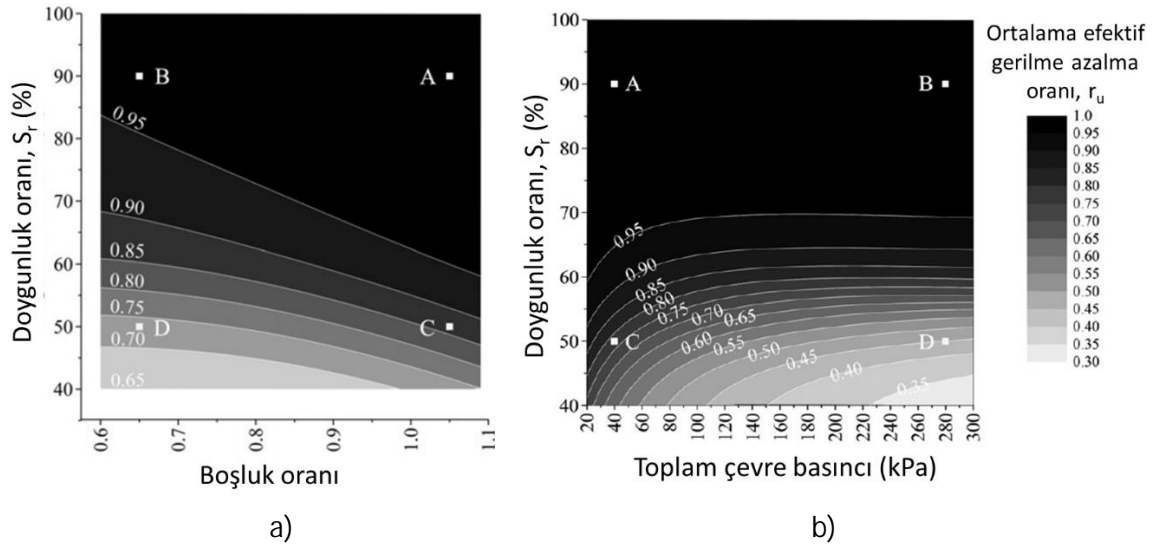


Şekil 4. Başlangıç doygunluk oranının sıvılaşmaya karşı dirence olan etkisini gösteren grafik (Mele vd., 2019)

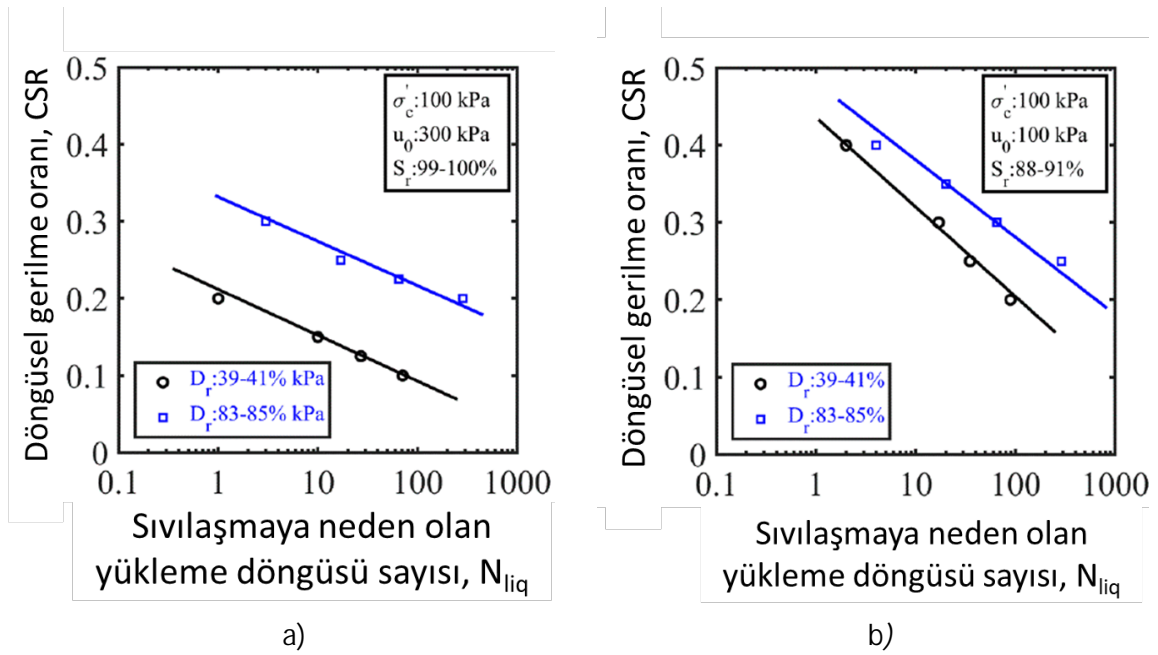
#### 4. BAŞLANGIÇ BAĞIL SIKILIĞIN ETKİSİ

Komovilas ve Kikumoto (2012) oluşturdukları simülasyon modelinde diğer koşullar sabitken boşluk oranı arttıkça sıvılaşma ihtimalinin de arttığını göstermişlerdir (Şekil 5a). Deneysel çalışmalara baktığımızda da Unno ve diğerlerinin (2008) ve Mele ve diğerlerinin (2019) çalışmaları da başlangıç bağıl sıklığının sıvılaşma direncine katkısı olduğunu doğrulamaktadır. Sonuçları grafiksel olarak sunulan diğer deneysel çalışmalarda da gevşek numunelerin daha erken sıvılaştığı görülmektedir (Şekil 6a, Şekil 6b, Şekil 7a ve Şekil 7b).

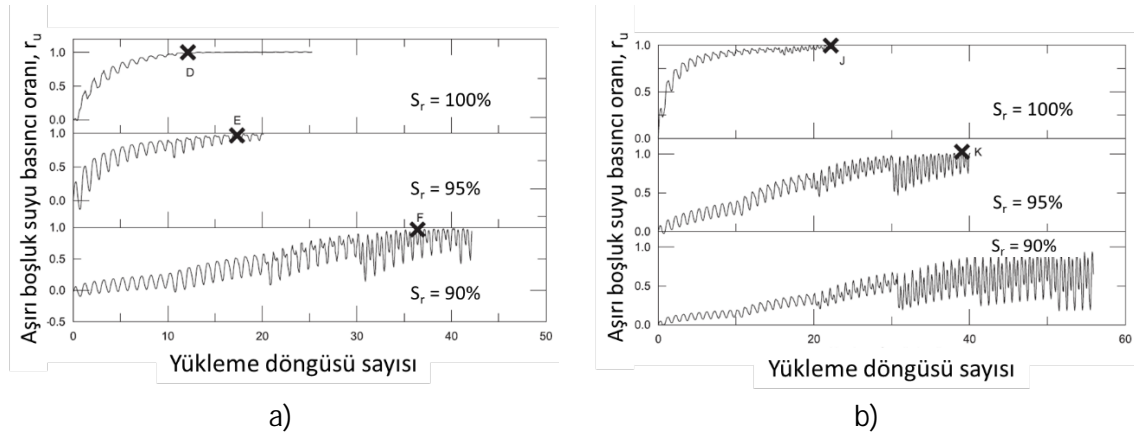
Burada dikkat çekilmesi gereken husus %70 bağıl sıklılık ve %90 doygunluk oranına sahip kum numunenin 200 kPa başlangıç efektif çevre basıncı altında sıvılaşmadığıdır.



Şekil 5. Başlangıç doygunluk ve (a) boşluk oranlarının (b) çevre basıncının sıvılaşmaya etkisini gösteren grafikler (Komolvilas ve Kikumoto, 2017)



Şekil 6. Bağıl sıklığın (a) doygun ve (b) doygun olmayan numuneler için sıvılaşma davranışına etkisini gösteren grafikler (Zeybek, 2022)

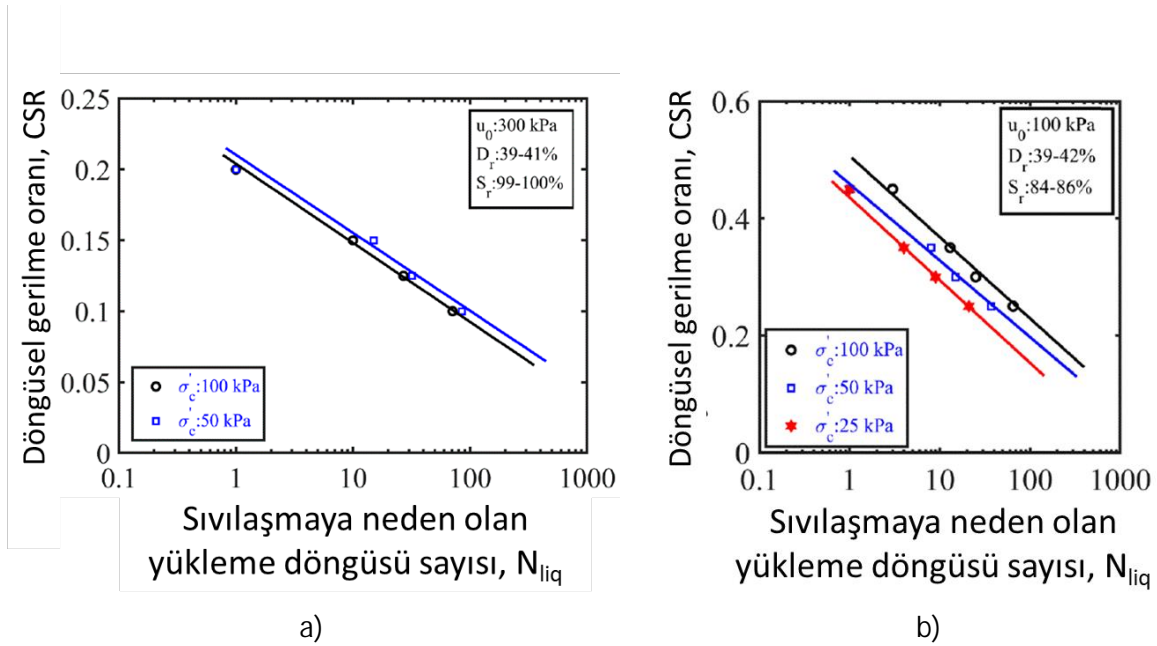


Şekil 7. (a) %30 ve (b) %70 bağıl sıkılıktaki kum numunelerin farklı doygunluk oranlarında ve 200 kPa başlangıç efektif çevre basıncında sıvılaşma davranışlarını gösteren grafikler (Liu ve Xu, 2014)

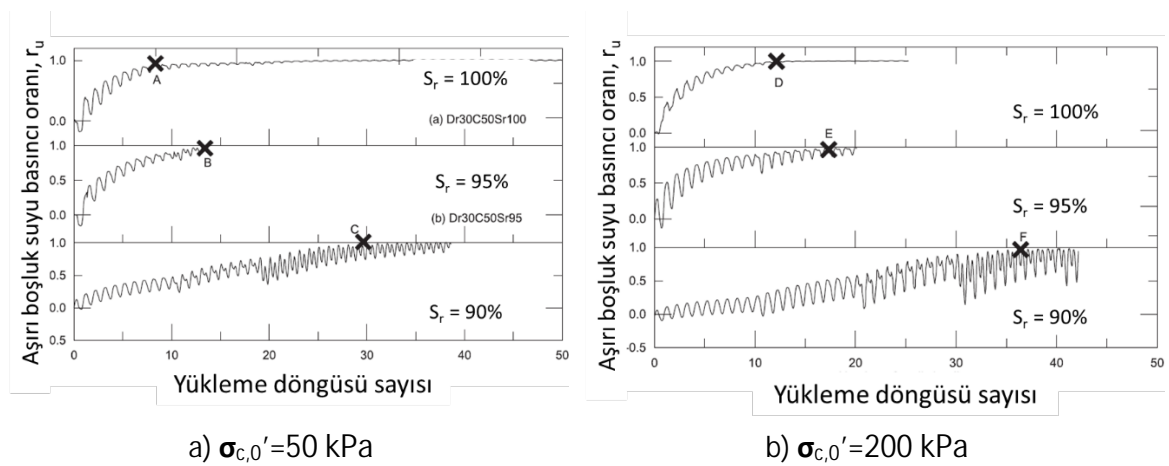
Tüm çalışmalardan görüleceği üzere yüksek bağıl sıklık (veya düşük boşluk oranı) numunelerin sıvılaşmaya karşı direncine olumlu katkıda bulunmaktadır. Ancak yine de Liu ve Muraleetharan (2012) değişim oranı aynı olmak kaydı ile başlangıç doygunluk oranındaki azalmanın sıvılaşma direncine etkisinin, başlangıç bağıl sıklığındaki artmaya göre daha baskın olduğunu göstermişlerdir.

## 5. BAŞLANGIÇ EFEKTİF ÇEVRE BASINCININ ETKİSİ

Unno ve diğerlerinin (2008) çalışmasından görüleceği gibi başlangıç bağıl sıklığı 60% olan iki farklı Toyoura kumu örneğinde başlangıç efektif çevre basıncı düşük olan numunenin  $r_u$  değeri 1'e daha yaklaşmıştır (Şekil 1). Bu da başlangıç efektif çevre basıncının da sıvılaşma direncine olumlu katkısını göstermektedir. Zeybek (2022) hem doymuş hem doymuş olmayan kum numuneler üzerinde yaptığı deneylerde yine çevre basıncının sıvılaşma direncine katkısını göstermiş, ayrıca doymuş olmayan numunelerde bu parametrenin dirence etkisinin daha belirgin olduğunu göstermiştir (Şekil 8a ve Şekil 8b). Yine Liu ve Xu (2014) çalışmalarında aynı doygunluk oranı ve bağıl sıklığa sahip numuneler arasında çevre basıncı yüksek olan numunelerin daha geç sıvılaştığını göstermişlerdir (Şekil 9a ve Şekil 9b). Komovilas ve Kikumoto'nun (2017) simülasyon modeli de çevre basıncının  $r_u$  değerine etkisini gösteren bir grafik sunmaktadır (Şekil 5b). Görüleceği üzere aynı doygunluk ve boşluk oranlarına sahip numunelerden çevre basıncı yüksek olanlar daha düşük  $r_u$  değerine ulaşmıştır. Bu da çevre basıncının sıvılaşma direnci ile doğrudan bağlantılı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 8. Başlangıç çevre basıncının (a) doymun ve (b) doymun olmayan numunelerde sıvılaşma davranışına etkisi (Zeybek, 2022)



Şekil 9. Çevre basıncının sıvılaşma davranışına etkisini gösteren grafikler (Liu ve Xu, 2014)

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sıvılaşmanın pratik mühendislik uygulamalarında yalnızca gevşek ve doymun kumlarda görüleceği kabul görmektedir. Ancak daha önceden yapılan birçok çalışmadan da görüleceği üzere sıvılaşma doymun olmayan zeminlerde de vuku bulabilir ve ciddi hasarlara neden olabilir. Bu nedenle doymun ve doymun olmayan tüm zeminlerde sıvılaşma değerlendirmesi yapılması şarttır.

Bu bildiri kapsamında doymun olmayan kum numunelerde başlangıç koşullarının sıvılaşma davranışına etkileri 6 farklı deneysel ve sayısal çalışmanın sonuçları özetlenerek ortak bir payda olup olmadığı incelenmiştir. Genel olarak başlangıç koşullarından doymunluk oranı, bağıl sıkılık ve efektif çevre basıncı parametrelerinin sıvılaşma direncine etkileri araştırılmış

ve tatmin edici düzeyde ortak sonuçlara varılmıştır. Sunulan çalışmalar arasında bazı ampirik denklemler veya grafikler de sunulmaktadır. Bu sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sıkı numuneler (boşluk oranı düşük veya bağıl sıklığı yüksek) gevşek numunelere göre daha geç sıvılaşır veya aynı yük altında sıvılaşma ihtimalleri daha düşüktür. Belli bir seviyenin üzerinde bağıl sıklığa ve belli bir düzeyin altında doygunluk oranına sahip kum numunelerin sıvılaşmadığı da bazı deneysel çalışmalar sonucunda gözlenmiştir. Başlangıç efektif çevre basıncının da sıvılaşma direncine olumlu katkısı bulunmaktadır. Hem doygun hem de doygun olmayan numunelere yapılan deneyler kıyaslanınca çevre basıncının etkisinin doygun olmayan numunelerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Başlangıç boşluk oranı ve efektif çevre basıncının sıvılaşma davranışına olan bu etkileri doygun zeminler için zaten bilindiğinden gözlenen bu sonuçlar da beklentiye paralel şekildedir.
- Başlangıç doygunluk oranı azaldıkça sıvılaşma direnci de artmaktadır. Hatta bazı çalışmalarda sıvılaşma davranışına en büyük etkiye doygunluk oranındaki değişimin sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca şekil 1 ve şekil 4'ten görüldüğü üzere bu etki yüksek doygunluk oranlarında ( $S_r = \%85 - \%100$ ) kendini daha belirgin göstermektedir. Bir diğer deyişle doygunluk oranındaki değişimin sıvılaşma direncine etkisinin yüksek doygunluk oranlarında daha kuvvetli olduğu görülmüştür.

Bu bildiri kapsamında yapılacak ileriki çalışmalarda, eldeki geçmiş çalışma örneklerinin genişletilip sayısal olarak sonuçların karşılaştırılması ve önerilen denklem ve grafiklerin diğer çalışmalara da uygulanabilirliğinin denetlenmesi önerilmektedir. Bu sayede doygun olmayan kum zeminlerin sıvılaşma tayini pratik mühendislik hayatına da sunulabilir.



## KAYNAKLAR

- Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Geotech Nique*, 13(3), 177-179.
- Boyle, R. (1964). *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air, and Its Effects*. F.G.
- Chiaradonna, A., & Reder, A. (2020). Influence of initial conditions on the liquefaction strength of an earth structure. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(2), 687-698. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01594-z>
- Komolvilas, V., & Kikumoto, M. (2017). Simulation of liquefaction of unsaturated soil using critical state soil model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(10), 1217-1246. <https://doi.org/10.1002/nag.2669>
- Liu, C., & Muraleetharan, K. K. (2012). Numerical study on effects of initial state on liquefaction of unsaturated soils. In *GeoCongress 2012: State of the art and practice in geotechnical engineering* (pp. 2432-2441). <https://doi.org/10.1061/9780784412121.249>
- Liu, C., & Xu, J. (2015). Experimental study on the effects of initial conditions on liquefaction of saturated and unsaturated sand. *International Journal of Geomechanics*, 15(6), 04014100. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000350)
- Mele, L., Tian, J. T., Lirer, S., Flora, A., & Koseki, J. (2019). Liquefaction resistance of unsaturated sands: experimental evidence and theoretical interpretation. *Géotechnique*, 69(6), 541-553. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.042>
- Terzaghi, K. V. (1936). The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. In *First international conference on soil Mechanics, 1936* (Vol. 1, pp. 54-59).
- Unno, T., Kazama, M., Uzuoka, R., & Sento, N. (2008). Liquefaction of unsaturated sand considering the pore air pressure and volume compressibility of the soil particle skeleton. *Soils and Foundations*, 48(1), 87-99. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.87>
- Unno, T., Uzuoka, R., Sento, N., & Kazama, M. (2013). Pore air pressure effect on cyclic shear behavior of undrained sandy soil. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 69(3), 386-403.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Zeybek, A. (2022). Experimental and empirical studies to evaluate liquefaction resistance of partially saturated sands. *Applied Sciences*, 13(1), 81. <https://doi.org/10.3390/app13010081>