

## NONPLASTİK SİLT KUM KARIŞIMLARINDA BOOTSTRAP YÖNTEMİ İLE BOŞLUK SUYU BASINCI OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Eyyüb KARAKAN (ORCID: 0000-0003-2133-6796)<sup>1\*</sup>  
Selim ALTUN (ORCID: 0000-0002-9820-9106)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

Geliş / Received: 26.11.2016

Kabul / Accepted: 27.12.2017

### ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, tekrarlı yükler altında nonplastik silt kum karışımlarının boşluk suyu basıncı üretimini literatürdeki üç farklı modeli kullanarak incelemektir. Boşluk suyu basıncı oluşumunda, kumlu zeminlerde silt içeriğinin etkisini araştırmak amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Deneylerde sıvılaşma kriteri olarak, 200 çevrimdeki değer ya da birincil sıvılaşma başlangıcından hangisi daha önce gerçekleşir ise, o durum göz önüne alınmıştır. Altı farklı silt içeriğinde (FC=%0-100) hazırlanan örneklerden, farklı tekrarlı gerilme genliği oranlarında aşırı boşluk suyu basıncı üretiminin ölçülmesi için gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler  $D_r$ =%25-50 rölatif sıkılıkta ve 100 kPa efektif çevre gerilmesi altında yapılmıştır. Deney sonuçları siltli kumların drenajsız dinamik koşullar altında ne denli etkilendiğini bulmak için kullanılmıştır. Seed ve ark. [3], Booker ve ark. [2] ve Polito ve ark. [8] boşluk suyu basıncı üretimi model sonuçları çalışma kapsamında sunulmuştur. Boşluk suyu basınçları model katsayısı  $\alpha$ , silt içeriği, rölatif sıkılık ve tekrarlı gerilme genliği oranına bağlı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluk suyu basıncı, nonplastik silt-kum karışımı, dinamik üç eksenli deney, bootstrap yöntemi

## CYCLIC PORE WATER PRESSURE GENERATION IN NON-PLASTIC SILT-SAND MIXTURES

### ABSTRACT

The aim of this paper is to evaluate the applicability of the available three different models to predict excess pore water pressure generation in non-plastic silty sand mixtures during cyclic loading. Cyclic triaxial tests were performed to investigate the effect of silt content on the pore pressure generation in sand. These tests were carried to 200 cycles or to onset of initial liquefaction, whichever occurred first. Several stress-controlled cyclic triaxial tests were performed to measure excess pore water pressure generation at different levels of cyclic stress ratios for the specimens prepared at six different silt contents (FC=0% to 100%). The specimens were tested under 100 kPa confining pressures at two relative densities of 25% and 50%. Results of these tests were used to investigate the behavior of silty sands under undrained cyclic triaxial testing conditions. Seed et al. [3], Booker et al. [2] and Polito et al. [8] pore water pressure generation models based on test results are also presented in this paper. An attempt to estimate the pore pressure model coefficient  $\alpha$  as a function of silt content, relative density, cyclic stress ratio was made.

**Keywords:** Pore water pressure, non-plastic silt-sand mixtures, cyclic triaxial tests, bootstrap method

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 348 814 30 96; e-mail / e-posta: eyyubkarakan@kilis.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışının tahmin edilmesi önemli konulardan biridir. Zeminlerde tekrarlı yükler altında fazla boşluk suyu basıncı oluşumu geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [1, 2]. Bu araştırmacılar 1970 yılından bu yana aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu farklı kum zeminler için temel yönleriyle incelemiştir [3-7]. Nonplastik silt kum karışımlarının tekrarlı yükler altında davranışı son yıllarda özellikle dikkat çekmiştir. Ancak literatürde, nonplastik silt kum karışımlarının aşırı boşluk suyu basıncı üretimi hakkında yeterince araştırma bulunmamaktadır [8].

Aşırı boşluk suyu basıncı üretiminin daha iyi anlaşılabilmesi için, nonplastik silt kum karışımları ile 50 adet, temiz kumdan saf silte kadar farklı silt içeriklerinde, gevşek ve orta sıkı olmak üzere iki farklı rölatif sıklıkta ( $D_r$ =%25 ve 50) deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, nonplastik silt kum karışımlarında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu tahmin etmek için gerilme tabanlı modellerden üç mevcut modelin uygulanabilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, nonplastik silt kum karışımlarının dinamik davranışını tanımlayarak, bunların fazla boşluk suyu basıncı üretimi davranışını araştırmaktır. Çalışmanın ikinci amacı ise, literatürde yer alan gerilme tabanlı modellerden en çok kullanılanlardan üçü için farklı silt içeriklerinde oluşturulan siltli kumların silt içeriği ile boşluk suyu basıncı değişimlerinin incelenmesidir. Bu amaçla çalışma kapsamında temiz kum ve değişik ince dane içeriğine sahip nonplastik silt kum karışımları üzerinde yapılan dreajsız çevrimsel üç eksenli basınç deneylerinin sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada kullanılan zemin nonplastik siltli kumdur. Doğal zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma sistemine göre SW olarak sınıflandırılmıştır. Altı farklı karışım, zeminin temiz kum ile farklı yüzdelerde nonplastik silt eklenmesi ile elde edilmiştir. 74 mikrondan küçük parçalar (ince daneler) farklı karışımların hazırlanması için ayrılmıştır. Kum ve siltler farklı oranlarda (0, 20, 40, 60, 80 ve 100) karışımlar elde etmek üzere karıştırılmıştır. Kum ve silt için elde edilen dane çapı dağılımı Şekil 1’de gösterilmiştir. Deneyde kullanılan kum ve silte ait fiziksel özellikler ise Tablo 1’de özetlenmiştir.

Zemin karışımlarının maksimum ve minimum boşluk oranlarını belirlemek için standart ASTM prosedürü kullanılmıştır (ASTM D). Her karışım için ölçümler üçer kez tekrarlanmış, elde edilen maksimum ve minimum boşluk oranları Tablo 1’de gösterilmiştir. Karışımında belirli bir miktara kadar ince dane ilave edilirse “e” değerinin azalma eğilimi gösterdiği, daha fazla ince dane ile ise artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca ince dane oranının (%0-100) tüm aralığı için geçerli maksimum ve minimum boşluk oranını belirlemek için herhangi bir standart olmadığı bilinmektedir. ASTM D4254 ve ASTM D4253 standartları en çok %15 ince dane oranına sahip malzemeler için geçerlidir. Ancak, birçok araştırmacının ince dane oranı %15’den daha fazla olan zeminlerde de, maksimum ve minimum boşluk oranını belirlemek için ASTM prosedürünü kullandıkları görülmektedir [9-13].

**Tablo 1.** Kum-nonplastik silt karışımı fiziksel özellikleri

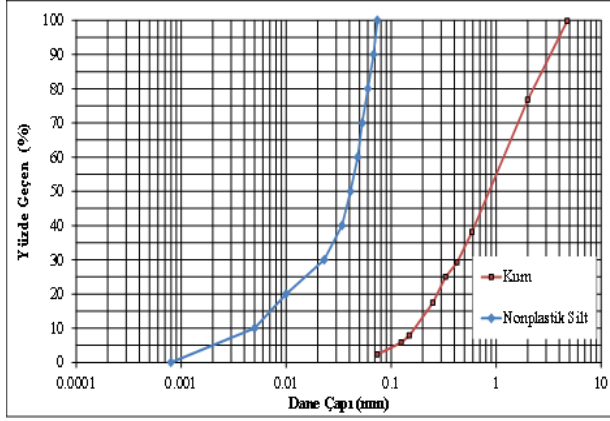
Zemin Parametresi/Tipi	Kum	Nonplastik silt
( $D_{10}$ ) mm	0,17	0,0045
( $D_{30}$ ) mm	0,48	0,0135
( $D_{60}$ ) mm	1,30	0,022
Üniformluk Katsayısı, $C_u$	7,65	4,88
Süreklilik Katsayısı, $C_c$	1,05	1,84
Zemin Sınıfı	SW	ML
$G_s$	2,660	2,679
$e_{min}$	0,466	0,992
$e_{maks}$	0,755	1,186

## NONPLASTİK SİLT KUM KARIŞIMLARINDA BOOTSTRAP YÖNTEMİ İLE BOŞLUK SUYU BASINCI OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

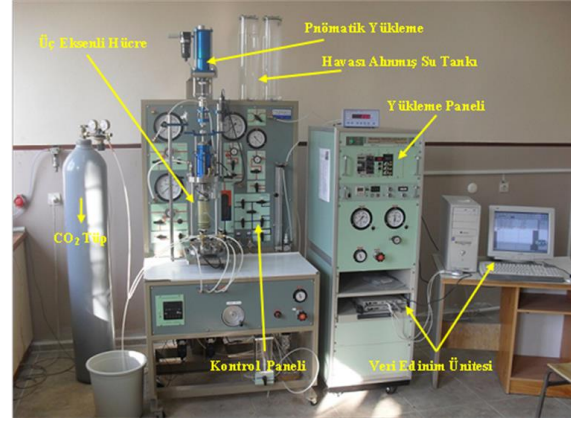
### 2.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi

Siltli kumların dinamik davranışı üzerindeki aşırı boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı oranı ilişkisini araştırmak için, dört takım halinde, 50 dinamik üç eksenli deney yapılmıştır. Rutin deney programına ek olarak rastgele seçilen bazı deneyler, aynı rölatif sıklıkta, numune hazırlama ve aynı yükleme koşullarında sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için tekrarlanmıştır. Deneyler 50 mm'lik bir çapa ve 100 mm'lik bir yüksekliğe sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm örnekler kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış ve tüm deneyler 100 kPa efektif çevre gerilmesi altında yapılmıştır.

Deneyler gerilme kontrollü olarak Seiken firmasına ait tam otomatik dinamik üç eksenli deney sistemi (DTC367, Tokyo, Japonya) kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sırasında sürekli olarak boy değişimi, çevre basıncı, boşluk suyu basıncı, geri basınç, hacim değişimi ve uygulanan yük değerleri sürekli olarak kaydedilmiştir (Şekil 2). Örnekler JGS 0520-2000 standardına uygun olarak hazırlanmış ve deneyler JGS 0541-2000 standardına uygun olarak yapılmıştır. Daygunluğu sağlamak için örneklerden ilk olarak CO<sub>2</sub> daha sonra su geçirilmiştir. Numunelere geri basınç uygulanarak, tüm deneylerde Skempton B değerinin 0,96'dan daha büyük olması sağlanmıştır. İzotrop olarak 100 kPa efektif gerilme altında konsolide edilen numunelere daha sonra drenajsız koşullarda gerilme kontrollü olarak çevrimsel yüklemeler uygulanmıştır.



Şekil 1. Dane çapı dağılımı



Şekil 2. Kullanılan deney sistemi

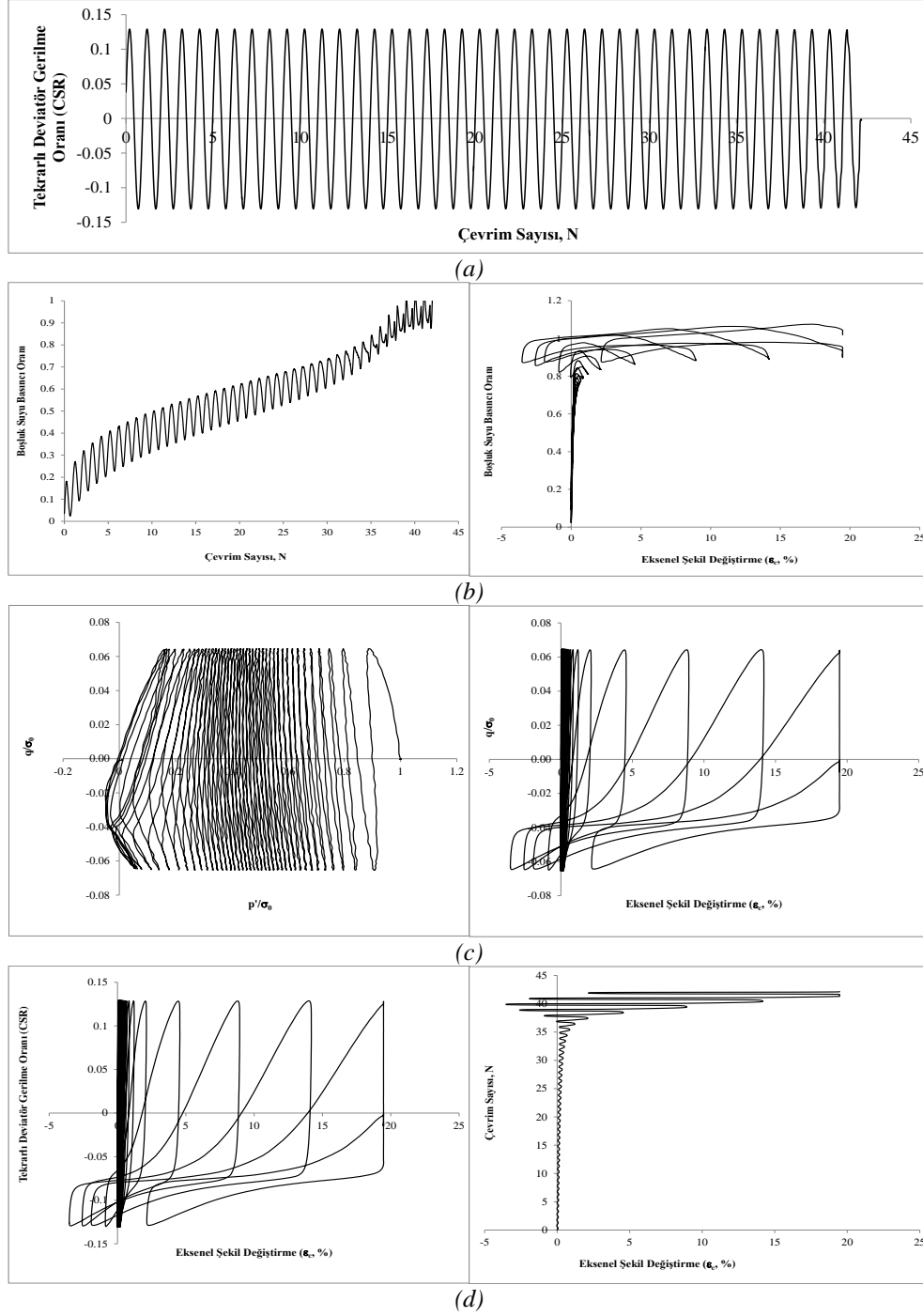
Tekrarlı yüklemeler sırasında sürekli kayıt alınarak, numunedeki boşluk suyu basıncı, tekrarlı şekil değiştirme ve tekrarlı deviyör gerilme oranları elde edilmiştir. JGS 0541-2000 standardında sıvılaşmayı tanımlamak için iki ölçüt dikkate alınmaktadır. Tekrarlı yüklemenin genliği büyük ise, sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı, efektif çevre gerilmesinin %95'ine ulaşmak için gereken en büyük fazla boşluk suyu basıncı olarak, aksi takdirde, numunedeki çift genlikteki eksenel şekil değiştirme %5 seviyesine ulaştığı takdirde kabul edilir. Nonplastik siltli kum zeminlerde yapılan bir dinamik üç eksenli deneyden elde edilen tipik test sonuçları Şekil 3a-e arasında gösterilmiştir. Numuneye uygulanan tekrarlı deviyör gerilme oranı ile çevrim sayısı Şekil 3a'da gösterilmiştir. Şekil 3a'dan görüldüğü gibi çift yönlü dinamik koşulları benzetebilmek için, tekrarlı yüklemeye basınç ve çekme şeklinde uygulanmıştır. Çevrimsel yükün şiddeti, tekrarlı gerilme oranı (CSR) ve buna karşılık gelen çevrim sayısını geniş bir aralıkta üretebilmek için değiştirilmiştir. Bu çalışmada gerekli çevrim sayısının 1 ile 1000 arasında değiştiği görülmüştür. Şekil 3b'de tekrarlı eksenel şekil değiştirmenin pozitif olmasından dolayı, normalize edilmiş gerilme izi basınç tarafından. Şekil 3c'de, uygulanan deviyör gerilme oranı düşük deformasyon seviyelerinde iken örnekler stabilitelelerini korurken, artan deformasyonlar ile artan çevrim sayısı ile beraber zeminin sıvılaştığı görülmektedir. Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi Şekil 3d'de gösterilmiştir. Çevrim sayısı ile boşluk suyu basıncı oranı artış hızı sürekli bir seyir izlemektedir. 30 çevrimden sonra, boşluk suyu basıncı oranı %95'in üzerine çıkmakta, bu durumda tekrarlı eksenel şekil değiştirmeler geniş bir aralıkta değişiklikler göstermektedir. Şekil 3e'de tekrarlı eksenel şekil değiştirmenin çevrim sayısı ile bağıntısı gösterilmiştir. Burada sona yakın çevrim sayılarında elde edilen eksenel şekil değiştirmelerin çok büyüdüğü gözlemlenmiştir.

### 2.3. Dinamik Üç Eksenli Deneyde Boşluk Suyu Basıncı Oluşumu

Çalışma kapsamında yapılan dinamik üç eksenli deneylerin her birinde, önce boşluk suyu basıncı ile çevrim sayısı grafiği elde edilmiştir. Şekil 4'te FC=%20, D<sub>r</sub>=%25 CSR= 0,112 ve  $\sigma'_0$ =100 kPa olan bir deneyde elde

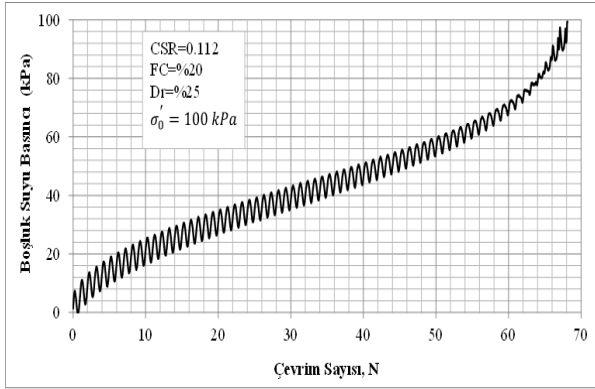
E. KARAKAN, S. ALTUN

edilen boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı grafiği gösterilmiştir. Burada 100 kPa boşluk suyu basıncına ulaşılması için gereken çevrim sayısı 68'dir. Daha sonra boşluk suyu basıncı efektif çevre gerilmesine bölünerek normalize edilmiş ve çevrim sayısı ile sıvılaşması için gereken çevrim sayısı normalize edilerek Şekil 5'te noktali çizgi ile gösterilen eğri oluşturulmuştur. Şekil 5'te boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı oranının üst sınırlarından geçen en uygun eğri elde edilerek, kesikli çizgi ile gösterilen değişim bulunmuştur. Şekil 5'teki yöntemde gösterildiği gibi, tüm deneylerden elde edilen boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı oranı değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

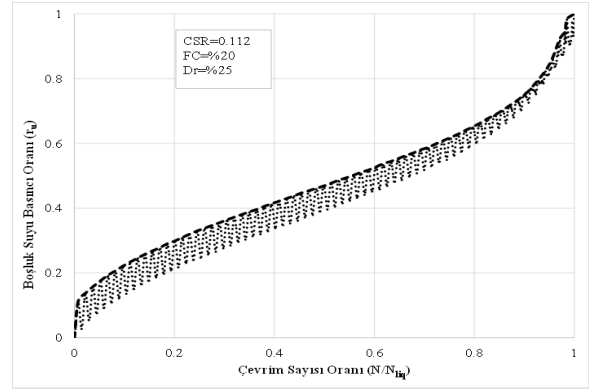


**Şekil 3.** a) CSR- çevrim sayısı değişimi; b) Boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı; boşluk suyu basıncı oranı ile eksenel şekil değiştirme, c) Normalize edilmiş gerilme izi;  $q/\sigma'_0$  ile eksenel şekil değiştirme; d) CSR ile eksenel şekil değiştirme ve çevrim sayısı ile eksenel şekil değiştirme

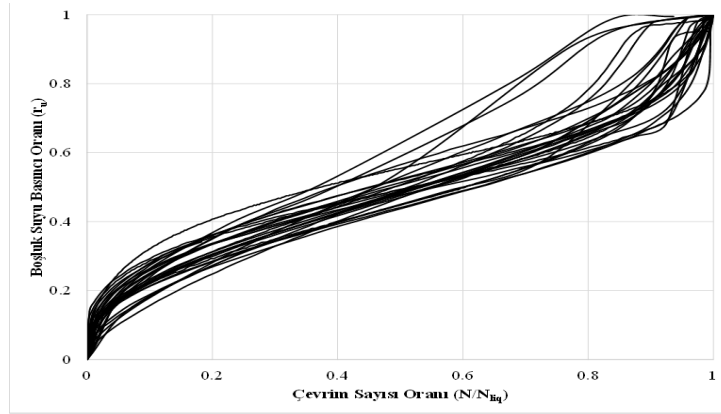
**NONPLASTİK SİLT KUM KARIŞIMLARINDA BOOTSTRAP YÖNTEMİ İLE BOŞLUK SUYU BASINCI OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ**



**Şekil 4.** Boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi



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



**Şekil 6.** Tüm dataların boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı oranı değişimi

## 2.4. Bootstrap Yöntemi ile Boşluk Suyu Basıncı Üretimi

### 2.4.1. Bootstrap Yöntemi

Bootstrap yöntemi ilk olarak Efron [14] tarafından parametrik olmayan bir yaklaşım olarak tanıtılmıştır. Yöntemde Jackknife metodundaki [15] iadesiz olarak yapılan yeniden örnekleme yaklaşımı iadeli olarak yapılmakta ve bu yaklaşımın Jackknife yönteminin geliştirilmiş bir hali olduğu ifade edilmektedir [14, 16]. Yöntem, günümüzde hızlı işlem yapabilen bilgisayarların yardımı ile birçok bilim dalında yaygın olarak kullanılan bir yeniden örnekleme yöntemi haline gelmiştir. Bunun nedeni, yöntemin oldukça basit olması, verilerin dağılımı ile ilgili önceden bir varsayım gerektirmemesi ve karmaşık analitik ifadeler içermemesidir [17-21].

Veri-temelli bir simülasyon yöntemi olarak anılan Bootstrap yönteminin temel prensibi,  $\theta$  ve rassal değişken  $\theta(X)$  arasındaki ilişki hakkında bilgi elde etmektir. Bu bilgi örnekten tekrarlı olarak çekilmiş alt örnekler ( $X^*$ ) kullanarak,  $\theta(X)$  ve  $\theta(X^*)$  arasındaki ilişkiden elde edilmektedir. ( $X^*$ ), veri vektöründen iadeli olarak çekilerek parametrik olmayan Bootstrap yöntemi ile elde edilebileceği gibi, parametrikleştirilebilen dağılım fonksiyonu ifadesinden örneklendirilerek, diğer bir deyişle parametrik Bootstrap yöntemiyle de oluşturulabilmektedir. Bootstrap yönteminin işleyişi aşağıdaki iki temel adım yardımı ile gerçekleştirilmektedir.

1) N hacimli  $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  anakütleden iadeli olarak n hacimli ( $n \leq N$ ) Bootstrap örnekleri çekilmektedir ( $X^*_1, X^*_2, \dots, X^*_n$ ).

2) Tekrar sayısı  $i=1,2,\dots,B$  olmak üzere  $\hat{\theta}$  istatistiğinin Bootstrap yinelemeleri gerçekleştirilmektedir.

$$\hat{\theta}_i^* = \hat{\theta}(X^*_1, X^*_2, \dots, X^*_n) \quad (1)$$

E. KARAKAN, S. ALTUN

B için en uygun değerin seçimi ise tartışmaya açık bir konu olmakla beraber % 90-95 güvenilirlikteki güven aralıkları için bu değer 1000 veya üzeri alınabilmektedir [19].  $\hat{\theta}$  istatistiğinin ve standart hatasının (SE) Bootstrap tahmini hesaplanmaktadır (Denklem 2).

$$SE = \sqrt{\left\{ \frac{1}{B-1} \sum_{i=1}^B (\hat{\theta}_i^* - \hat{\theta}^*)^2 \right\}} \quad (2)$$

Burada,  $\hat{\theta}^* = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \hat{\theta}_i^*$  'dir. Böylece seçilen bir yöntem ile  $\hat{\theta}$  istatistiğinin güven aralıkları belirlenmektedir.

Bootstrap yöntemi literatürde çeşitli yayınlarda kapsamlı şekilde çalışılmıştır [17, 22-25]. Bu çalışmada Alfa ( $\alpha$ ) değişkeni bootstrap yöntemi korelasyonu ile analiz edilerek Bootstrap tahminlerinin yakınsama ve doğruluğu deney verileri ile karşılaştırılmış, nonplastik siltli kumlar için aşırı boşluk suyu basıncı ile tekrarlı çevrim sayısı bootstrap yeniden örnekleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Fazla boşluk suyu basıncı üretimi sürecinde geçici (transient) ve kalıcı (residual) olmak üzere iki bileşen vardır. Uygulanan ortalama normal gerilme, geçici boşluk suyu basıncı bileşeni olarak tanımlanır [26]. Aksine, kalıcı boşluk suyu basıncı doğrudan zeminin dayanım ve rijitliğini etkiler. Aşağıda tekrarlı yüke maruz kalan zeminlerde boşluk suyu basıncı oluşumu için literatürde yer alan üç model incelenmiştir.

Bootstrap tahmini için izleyen yöntem aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilir;

1) Rastgele sayı üreticisi, boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u$ ) verilerinden  $r_u=1, 2, 3, \dots, 200$ 'e kadar kullanarak geniş bir aralıkta  $\alpha$  katsayısı elde edilir. Rastgele sayı üretici herhangi bir çekişte, her veri ölçümünün seçilerek aynı olasılığa sahip olduğundan emin olmak için üniform bir dağılım takip etmektedir.

2) Her bir örnek için bootstrap  $r_u(j)$ ,  $j=1,2,3,4,\dots,200$ 'e kadar  $r_u^*=r_u(\alpha)$  istatistikleri tahmin edilmektedir.

3) Beklenen  $\alpha$  değeri ve hataların ortalamasının karesi,  $r_u^*$ 'için,  $j=1,2,3,4,\dots,200$ 'e kadar hesaplanır.

#### 2.4.2. Boşluk Suyu Basıncı Modeli (Seed ve ark.[3])

Lee ve Albaisa [1] Sacramento kumunu kullanarak yaptıkları çalışmada kalıntı (residual) boşluk suyu basıncı oranı için alt ve üst sınır değerler önermişlerdir. Seed ve ark. [3], temiz kumlar için Denklem 3'te gösterilen boşluk suyu basıncı oranını tahmin etmek için ampirik bir model geliştirmişlerdir.

$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

Bu modelde  $r_u$ , çevrim sayısı oranının bir fonksiyonudur. Burada N değeri sabit genlikte uygulanan çevrim sayısını,  $N_{liq}$  ise sıvılaştırma için gereken çevrim sayısını gösterir. Denklem 3'te kullanılan  $\alpha$  parametresi ise deneysel koşulları ve zemin özelliklerini temsil etmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak Seed ve ark. [3] tarafından önerilen Denklem 3 kullanılmıştır. Çalışmada  $\alpha$  değeri %95 güven aralığında bootstrap yöntemi kullanılarak nonplastik silt kum karışımları için elde edilmiştir. Nonplastik siltli kumlarla yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları için elde edilen  $\alpha$  parametresi değerleri, alt sınır, ortalama sınır ve üst sınır için Şekil 7'de gösterilmiştir.

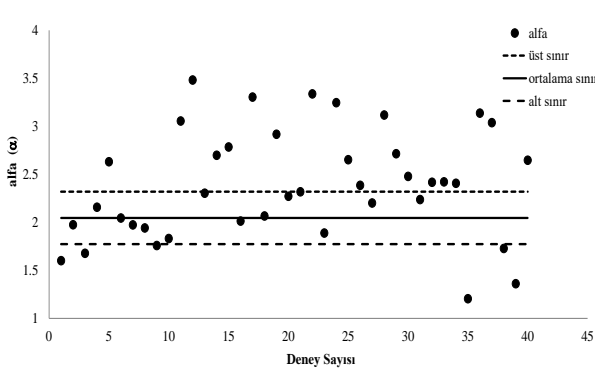
#### 2.4.3. Boşluk Suyu Basıncı Modeli (Booker ve ark. [2])

Booker ve ark. [2] da Seed ve ark. [3]'ün modeline alternatif bir boşluk suyu basıncı modeli önerdiler. Bu model denklem 4'te gösterilmiştir.

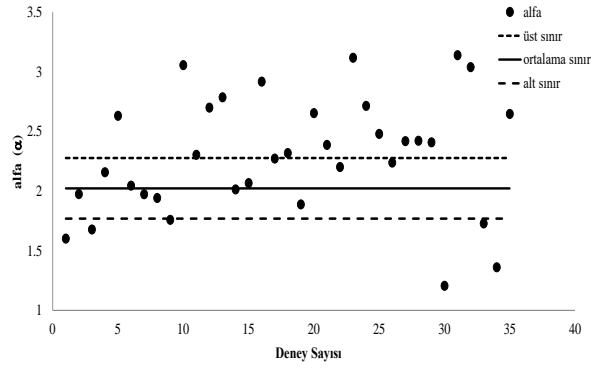
$$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[ \left( \frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2+\alpha}} \right] \right\} \quad (4)$$

Denklem 4'teki model parametreleri olan  $r_u$ , N,  $N_{liq}$  ve  $\alpha$  parametreleri Denklem 3'tekilerin aynısıdır. Bu çalışmada nonplastik silt kum karışımları için bootstrap yöntemi kullanılarak Denklem 4'teki  $\alpha$  parametresinin %95 güven aralığında alt sınır, üst sınır ve ortalama değerleri deney sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir.

**NONPLASTİK SİLT KUM KARIŞIMLARINDA BOOTSTRAP YÖNTEMİ İLE BOŞLUK SUYU BASINCI OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ**



Şekil 7. Seed ve ark [3]'nın modelindeki alfa (α) için üst, ortalama ve alt sınır değerleri



Şekil 8. Booker ve ark. [2]'nin modelindeki alfa (α) için üst, ortalama ve alt sınır değerleri

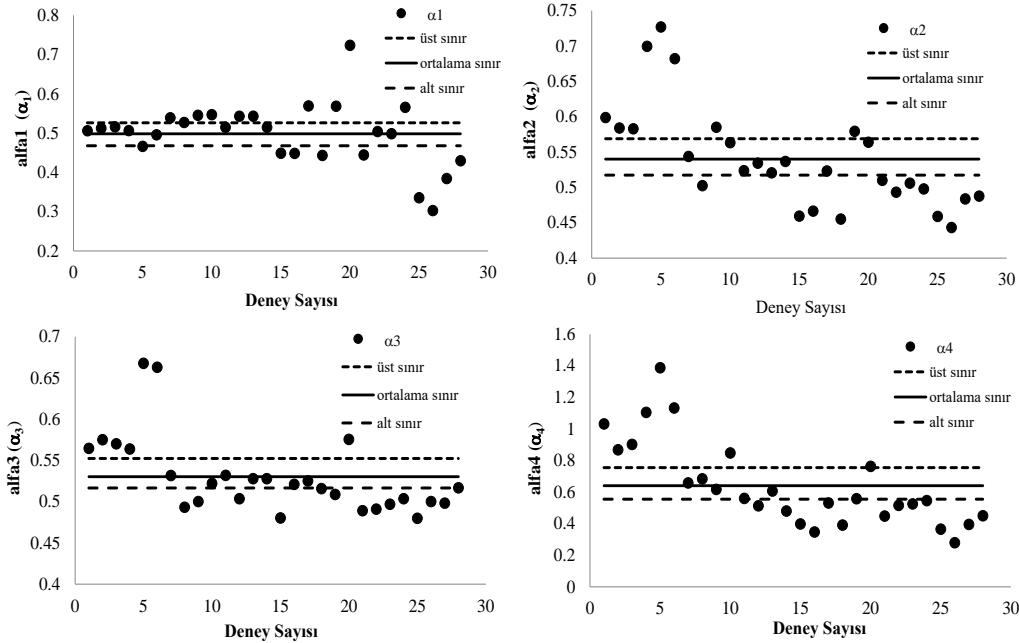
**2.4.4. Boşluk Suyu Basıncı Modeli (Polito ve ark. [8])**

2008'de Polito ve ark. [8], Seed ve ark. [3]'nin boşluk suyu basıncı modelini istatistiksel olarak yeniden değerlendirmişler ve α katsayısının, tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR), ince dane oranı (FC) ve rölatif sıklık (Dr) değerlerinin bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır. Denklem 5'te gösterilen bağıntıdaki α katsayısı, Denklem 6'da gösterilen α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, ve α<sub>4</sub>, şeklinde dört kısma ayrılmıştır. Burada α<sub>1</sub> katsayısı ince dane oranına, α<sub>2</sub> katsayısı rölatif sıklığa, α<sub>3</sub> katsayısı tekrarlı gerilme genliği oranına bağlı olup α<sub>4</sub> katsayısı kalıntı terimidir.

$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

$$\alpha = \alpha_1 * FC + \alpha_2 * Dr + \alpha_3 * CSR + \alpha_4 \quad (6)$$

Bootstrap yöntemi kullanılarak nonplastik silt kum karışımları için, α katsayısının fonksiyonları olan (α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, α<sub>4</sub>) değerleri %95 güven aralığında Polito ve ark. [8]'nin denklemi kullanılarak alt sınır, üst sınır ve ortalama değerler olarak elde edilmiş olup Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Polito ve ark. modelindeki alfa (α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, α<sub>4</sub>) için üst, ortalama ve alt sınır değerleri

### 3. BULGULAR VE TARIŞMA

#### 3.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Boşluk suyu basıncındaki model katsayılarının ( $\alpha$ ) tahmini için bu çalışmada bootstrap yöntemi kullanılmış ve güncellenen model katsayıları Tablo 2’de gösterilmiştir. Bootstrap yöntemi ile tutarlı olarak, model katsayısı ( $\alpha$ )’nın %95 güven aralığında alt ve üst sınır değerleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Yeniden değerlendirme sonucunda Seed ve ark. [3]’nin yaklaşımında boşluk suyu basıncı alt ve üst sınırın orijinalinden daha büyük değerler aldığı görülmüştür. Benzer sonuçlar Booker ve ark. [2]’nin modelinde de elde edilmiştir. Bu sonuçların daha büyük çıkmasının temel nedeni Seed ve ark. [3] ve Booker ve ark. [2]’nin çalışmalarında kullanılan numune temiz kum iken bu çalışma kapsamında temiz kumdan saf silte kadar değişen oranlarda ince daneli malzemenin kullanılmış olmasıdır.

Özetle, yapılan çalışmada öncelikle çevrim sayısı ile sıvılaşması gereken çevrim sayısı oranı ( $N/N_{liq}$ ) ve buna karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranları ( $r_u$ ) Şekil 6’da gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Denklem 3, 4 ve 5’teki  $\alpha$  değerleri her bir deneyde hata karelerinin ortalamasının (MSE) en küçük değeri için elde edilmiştir. Böylece en iyi  $\alpha$  değeri için, en küçük MSE değeri hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Boşluk suyu Basıncı fonksiyonları, sınır değerleri, model katsayıları ve performansları

Model	Boşluk Suyu Basıncı Fonksiyonu	Sınır Değer	Model Parametreleri					mse
			$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	
Seed et al. (1975)	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\}$	Üst	2,5479	--	--	--	--	0,027712
		Ortalama	2,3868	--	--	--	--	0,024631
		Alt	2,2214	--	--	--	--	0,021425
Booker et al. (1976)	$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[ \left( \frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2+\alpha}} \right] \right\}$	Üst	2,4350	--	--	--	--	0,025557
		Ortalama	2,2933	--	--	--	--	0,022822
		Alt	2,1163	--	--	--	--	0,019377
Polito et al. (2008)	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\}$ $\alpha = \alpha_1 * FC + \alpha_2 * Dr + \alpha_3 * CSR + \alpha_4$	Üst	---	0,526372	0,568858	0,55239	0,754671	0,005895
		Ortalama	---	0,498066	0,539854	0,53022	0,639935	0,005471
		Alt	---	0,467836	0,517343	0,51644	0,555026	0,005917

### 4. SONUÇLAR

Model parametresi  $\alpha$  ve bunlara karşılık gelen MSE değerleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu tablodan görülebileceği gibi, bütün MSE değerleri Denklem 1 ve 2 için 0,02’den daha küçük elde edilmiştir. En küçük MSE değerleri ise Denklem 3 ile elde edilmiştir. Denklem 5 başlangıçta ince dane oranı ( $FC < 15$ ) olan kumlar için geçerli olmasına rağmen, bu çalışmadaki nonplastik silte kum karışımları için de uygulanmıştır. Denklem 5 için boşluk suyu basıncı model parametreleri ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ), farklı içeriklerdeki ince dane oranı (FC), rölatif sıklık (Dr), ve tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR) için mükemmel sonuçlar vermiştir.

Benzerlikleri dolayısı ile Seed ve ark. [3] ve Booker ve ark. [2]’nin modellerinin karşılaştırılması kolaylıkla yapılabilir. İki model için göreceli doğruluk hata karelerinin ortalaması değerleri karşılaştırılarak elde edilir. Tablo 2’den görüldüğü gibi iki model arasındaki MSE değerleri birbirine oldukça yakındır. Ancak Polito ve ark. [8]’nin modeli için MSE değerleri çok daha yakın sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte yazarlar tarafından yapılan dinamik üç eksenli deneylerde  $\alpha$  değerinin ince dane oranı (FC), rölatif sıklık (Dr) ve tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR)’na bağlı olduğu görülmüştür.



**NONPLASTİK SİLT KUM KARIŞIMLARINDA BOOTSTRAP YÖNTEMİ İLE BOŞLUK SUYU BASINCI OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ****KAYNAKLAR**

- [1] LEE, K.L., A. ALBAISA., “Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands”, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 100(4), 387-406, 1974.
- [2] BOOKER, J.R., RAHMAN, M. S., SEED, H.B., “A Computer Program for the Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation During Cyclic or Earthquake Loading”, Rep. No. EERC 76-24, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, California, USA, 1976.
- [3] SEED, H.B., MARTIN, P.P., LYSMER J., “Pore Water Pressure Change During Soil Liquefaction”, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 102(4), 323-346, 1976.
- [4] ISHIHARA, K., “Stability of Natural Deposits During Earthquakes”, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 321–376. San Francisco, CA, USA, 1985.
- [5] EVANS, M. D., ZHOU, S., “Liquefaction Behavior of Sand-Gravel Composites”, J. Geotech. Eng. Div., 121, 3, 287–298, 1995.
- [6] IDRIS, R.M., BOULANGER, R.W., “Soil Liquefaction During Earthquakes”, Report No. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, California, USA, 2008.
- [7] ÇETİN, K., BİLGE, H., “Cyclic Large Strain and Induced Pore Pressure Models for Saturated Clean Sands” J. Geotech. Geoenviron. Eng., 138(3), 309–323, 2012.
- [8] POLITO, C.P., MARTIN, J.R., “The Effects of Nonplastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands”, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127, 408–415, 2008.
- [9] THEVANAYAGAM, S., “Effect of Fines and Confining Stress on Undrained Shear Strength of Silty Sands”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124, 479–491, 1998.
- [10] AMINI, F., QI, G.Z., “Liquefaction Testing of Stratified Silty Sands”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126, 208–217, 2000.
- [11] XENAKI, V.C., ATHANASOPOULOS, G.A., “Liquefaction Resistance of Sand-Silt Mixtures: An Experimental Investigation of the Effect of Fines”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 183–194, 2003.
- [12] HUANG, J., ZHANG, J., ZHANG, Z., XU, C.Y., WANG, B., YAO, J., “Estimation of Future Precipitation Change in the Yangtze River Basin by Using Statistical Downscaling Method”, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 25, 781–792, 2011.
- [13] STAMATOPOULOS, C., “An Experimental Study of the Liquefaction Strength of Silty Sands In Terms Of the State Parameter”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 662–678, 2010.
- [14] EFRON, B., “Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife”, The Annals of Statistics, 1-26, 1979.
- [15] QUENOUILLE, M., “Approximation Tests of Correlation in Time Series”, Journal of the Royal Statistical Society, 11(1), 68-84, 1949.
- [16] EFRON, B., “Computers and the Theory of Statistics: Thinking the Unthinkable”, Siam Review, 21.4, 460-480, 1979.
- [17] EFRON, B., TIBSHIRANI, R., “Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals and Other Measures of Statistical Accuracy”, Stat. Sci. 1, 54-77, 1986.
- [18] EFRON, B., TIBSHIRANI, R.J., An Introduction to the Bootstrap, Chapman and Hall, Inc., New York, USA, 1993.
- [19] DAVISON, A.C., HINKLEY, D.V., Bootstrap Methods and Their Application (1th ed.), Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics, Cambridge University Press, 1994.
- [20] TERCAN, A.E., “Global Rezerv Kestirimine İlişkin Güven Aralıklarının Uzaklık Bağımlı Bootstrap Yöntemi ile Belirlenmesi”, Madencilik, 41(3), 35-42, 2002.
- [21] KHAN, M.S., COULIBALY, P., DIBIKE, Y., “Uncertainty Analysis of Statistical Downscaling Methods”, Journal of Hydrology, 319, 357–382, 2006.
- [22] EFRON, B., Nonparametric Estimates of Standard Error: the Jackknife, the Bootstrap, and Other Resampling Methods”, Biometrika 68, 589-599, 1981.
- [23] EFRON, B., “The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans”, SIAM Monograph No. 38. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982.
- [24] HINKLEY, D.V., “Bootstrap Methods”, Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 321-337, 1988.
- [25] LEPAGE, R., BILLARD, L., Exploring the Limits of Bootstrap, John Wiley & Sons, New York, USA 1992.
- [26] LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V., Soil mechanics, Wiley, New York, USA 1969.
- [27] ASTM 4254-91, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.
- [28] ASTM 4253-93, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.
- [29] JGS0541-2000, Preparation of Soil Specimens for Triaxial Tests
- [30] JGS 0541-2000, Method for Cyclic Undrained Triaxial Test on Soils