

## Çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kumların dinamik davranışı The cyclic behavior of sand polluted by leachate

Aytaç YAŞARGÜN<sup>1\*</sup> , Ayfer ERKEN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Deprem Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
yasargunaytac@itu.edu.tr

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
erken@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.12.2022  
Kabul Tarihi/Accepted: 01.03.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: -

doi: 10.5505/pajes.2023.28828  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Kontrolsüz ve gelişigüzel depolanan katı atıkların yağmur suyu vasıtasıyla oluşturdukları sızıntı sularının içerdiği organik ve inorganik bileşenler, yer altı sularına ve zemin tabakalarına karışarak zeminin geoteknik özelliklerini ve dinamik davranışını etkilemektedir. Bu çalışmada çöp sızıntı suyunun ve kür süresinin kumlar üzerindeki etkisi, dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan araştırmalar ile incelenmiştir. Sonuçlar farklı doygunluk değerlerindeki temiz kum numuneleri ile yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Hem temiz hem de kirlenmiş kum numuneler için doygunluk  $B=45$  değerinin üstüne çıktığında sıvılaşmaktadır.  $B$  değerinin artması kumları daha erken çevrim sayılarında sıvılaştırmaktadır. Temiz ve kirlenmiş kumlarda doygunluk değerinin düşmesi sıvılaşma direncini artırmaktadır. Doymunluk değeri  $B=45$  'in altına düştüğünde ise temiz ve kirlenmiş kum numuneler sıvılaşmamıştır. Çöp sızıntı suyu içeriğindeki organik ve inorganik bileşenlerin kimyasal etkisinden ziyade fiziksel etkisinin numune davranışında etkili olduğu düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Kür süresi, Dinamik davranış, Çöp sızıntı suyu, Kirlenmiş kum zeminler, Sıvılaşma.

### Abstract

The organic and inorganic components of the leachate generated by the uncontrolled and haphazardly stored solid waste landfill through the rain mix with into the groundwater and soil layers and affect the geotechnical properties and dynamic behavior of the soil. In this study, the effect of leachate and the cure time on sandy soil were studied in dynamic triaxial test system. The results were compared clean sand samples tested at different saturation degrees. When the saturation degree is above  $B=45\%$  both the clean and polluted sand liquefies. As the  $B$  value increases sands liquefies at the small number of cycles. As the saturation degree decreases the strength against the liquefaction increases both clean and polluted sand samples. If the  $B$  value is below the 45% both the clean sand and the polluted sand cannot liquefy. As the cure time increases the polluted sands liquefies before the clean sands. The organic and inorganic components of the leachate affect sands rather than the chemical reaction with sands.

**Keywords:** Curing time, Cyclic behavior, Leachate, Polluted sand, Liquefaction.

## 1 Giriş

Depremler sırasında suya doygun gevşek kumlu zeminlerin sıvılaşması sonucu bina ve altyapılarda yapısal hasarlar oluşmaktadır. Bu nedenle kumların dinamik davranışları çoğu araştırmacı tarafından incelenmiştir [1]. 1999 Kocaeli depremi sonrasında Adapazarı, Gölcük ve Sapanca bölgelerinde sıvılaşma ve sıvılaşmaya bağlı yanal yayılmalar üzerinde birçok bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, araziden örselenmeden alınmış temiz zeminler ile laboratuvar ortamında hazırlanmış kum numuneler üzerinde yapılmıştır [2]-[4].

Bu çalışmada özensiz yapılan kil bariyerlerden sızan veya tamamen kontrolsüz depolama sonucu farklı zemin tabakalarına ulaşan evsel atıkların oluşturduğu çöp sızıntı sularının, kum zeminlerin yapısında meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır. Sızıntı suyu zeminin mühendislik parametrelerini değiştirdiği gibi, deprem gibi dinamik yükler altında da farklı zemin davranışlarına neden olmaktadır. Çöp sızıntı suyu zeminleri hem fiziksel hem de kimyasal etkileyerek yapısını bozmaktadır. Killi zeminlerin çöp sızıntı suları vasıtasıyla kirlenmesi çoğu araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Çöp sızıntı suyu ile yapılan çalışmalarda sızıntı suyu karıştırılmış kil numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları, drenajsız kayma mukavemeti ve geçirgenlikleri

incelenmiştir [5]. Kısa kür sürelerinde artan çöp suyu oranı ile drenajsız kayma mukavemeti artarken uzun kür sürelerinde kayma mukavemetinde azalma gözlenmiştir. Zemin pH değişikliğinin etkisinin incelendiği birçok çalışmada ise pH seviyesindeki değişimin zeminin yapısını değiştirerek sıvılaşma potansiyelini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir [6]. Bu araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda pH değişiminin sıvılaşma potansiyeline etkisinin büyük ölçüde kil tabakalarının mineralojik bileşenlerine göre değişiklik gösterdiğini savunmuşlardır. Ayrıca asidik fazda yaptıkları çalışmalarda kaolin-kum karışımı numunelerin sıvılaşma potansiyelinde küçük artışlar gözlenirken, illit ve bentonit kum karışımının sıvılaşma potansiyelini azalttığını gözlemlemişlerdir. Çoğu araştırmacı tarafından sızıntı suları ve çeşitli kirleticilerin kil zeminlerin davranışlarına olan etkileri geniş kapsamlı olarak incelenmiş olsa da kumlu zeminlere olan etkileri ile ilgili araştırmalar çok fazla bulunmamaktadır. Kum zeminlerin biyolojik etki ile iyileştirilmesinin davranış değişiklikleri monotonik drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılarak incelenmiştir [7],[8].

Bu çalışma kapsamında çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kum zeminler ile temiz kum zeminlerin dinamik davranışı araştırılmıştır. Çöp sızıntı suyuyla kirlenmiş zeminlerin yapılarının bozulmaması nedeni ile bu numunelerde vakum altında  $CO_2$  ve damıtık su geçirilmesi işlemleri yapılmamıştır.

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

Çalışmanın ilk aşamasında doymuş olarak hazırlanmış temiz kum numunelerin dinamik durumdaki gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basınçları incelenmiştir. İkinci aşamada çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş ve temiz kum numunelerde değişen doygunluklarda deneyler yapılmıştır. Kirlenmiş zeminlerle temiz kum numunelerin davranışları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

## 2 Malzeme ve yöntem

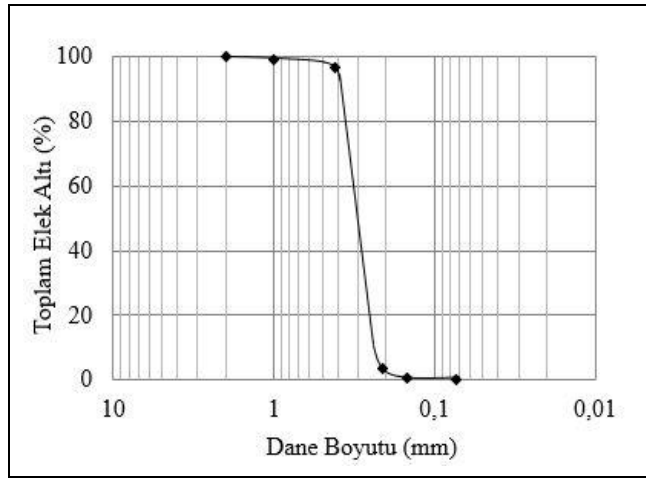
### 2.1 Akpınar kumu

Çalışmada İstanbul ili, Akpınar bölgesinden alınan Akpınar kumu kullanılmıştır. Kumun Özgül ağırlığı 2.69 dur. Numune üniform, kötü derecelenmiş (SP) kumdur. Tablo 1'de endeks özellikleri verilen kumda 200 No.lu elek altı bulunmamakta olup, dane boyutu dağılımı ise Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Zemin özellikleri.

Table 1. Soil sample.

| Zemin özellikleri         | Değer |
|---------------------------|-------|
| Özgül ağırlık             | 2.69  |
| Maksimum boşluk oranı     | 0.874 |
| Minimum Boşluk Oranı      | 0.558 |
| D50 (mm)                  | 0.30  |
| D10 (mm)                  | 0.23  |
| Üniformluk Katsayısı, Cu  | 1.434 |
| Derecelenme Katsayısı, Cc | 0.96  |
| İnce Dane İçeriği, FC     | 0     |



Şekil 1. Akpınar kumu dane boyu dağılım eğrisi.

Figure 1. Grain size distribution of Akpınar sand.

### 2.2 Çöp sızıntı suyu

Bu çalışmada İstanbul Kemerburgaz Katı Atık Depolama Tesisinden getirilen çöp sızıntı suyu kullanılmıştır. Getirilen sızıntı suyu analizleri İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında iki ayrı numune alınarak yapılmıştır. Tablo 2'de 1 haftalık ile 22 aylık çöp sızıntı sularının bileşenleri verilmektedir. Her iki numunenin özellikleri zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Bir haftalık numunenin pH değeri 7.30 iken 22 aylık numunede pH değeri 9.25 olmuştur. Toplam çözünmüş katı madde miktarı bir haftalık numunede 27950 mg/l iken 22 aylık numunede 12320 mg/l değerine düşmüştür.

Tablo 2. Çöp Sızıntı Suyu Bileşenleri.

Table 2. The composition of leachate.

| Parametre          | Birim                  | 1 Haftalık (genç) | 22 Aylık (yaşlı) |
|--------------------|------------------------|-------------------|------------------|
| pH                 | -                      | 7.30              | 9.25             |
| TKM                | Mg/l                   | 29710             | 15350            |
| TUKM               | Mg/l                   | 13055             | 2670             |
| TÇM                | Mg/l                   | 27950             | 12320            |
| TUÇM               | Mg/l                   | 13510             | 1385             |
| Alkalinite         | Mg/l CaCO <sub>3</sub> | 14300             | 7740             |
| KOİ                | Mg/l                   | 37665             | 3595             |
| Çöz. KOİ           | Mg/l                   | 30000             | 1570             |
| BOİ                | Mg/l                   | 24450             | 400              |
| T.P                | Mg/l                   | 30                | 10               |
| TKN                | Mg/l                   | 2780              | 1120             |
| NH <sub>3</sub> -N | Mg/l                   | 2550              | 820              |
| Klorür             | Mg/l                   | 3266              | 4190             |
| Sülfat             | Mg/l                   | 120               | 356              |
| Ca Sertliği        | Mg/l CaCO <sub>3</sub> | 6919              | 110              |
| Top. Sertlik       | Mg/l CaCO <sub>3</sub> | 8595              | 1808             |
| Ca                 | Mg/l                   | 2773              | 44               |
| Mg                 | Mg/l                   | 409               | 468              |
| Na                 | Mg/l                   | 2590              | 2853             |
| K                  | Mg/l                   | 1700              | 1700             |
| Fe                 | Mg/l                   | 41.2              | 184              |
| Ni                 | Mg/l                   | 0.82              | 1.16             |
| Cr                 | Mg/l                   | 0.64              | 0.76             |
| Zn                 | Mg/l                   | 1.27              | 3.04             |

## 3 Numunelerin hazırlanması

### 3.1 Doymuş ve doymuş olmayan kum numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde hem temiz hem de kirlenmiş kum numuneler kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Numunelerin rölatif sıklık aralığı  $D_r = \% 53 - 57$  arasında değişmektedir. Üç eksenli basınç deney sistemine yerleştirilen temiz kum numunelerden doymuş olması istenenlerden vakum altında numunelerin içerisinden CO<sub>2</sub> gazı ve daha sonra da damıtık su geçirilerek numuneler doymuş hale getirilmiştir. Doymuş olmayan temiz numuneler ve çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş numunelerde ise vakum altında CO<sub>2</sub> gazı ve damıtık su geçirme uygulaması yapılmamıştır. Bunun nedeni kirlenmiş zeminlerin yapısının bozmamak ve temiz zeminlerde kirlenmiş bu zeminleri karşılaştıracak eşdeğerde doymuşluk elde etmektir.

### 3.2 Modifiye edilmiş çelik kalıplarda kirlenmiş numunelerin hazırlanması

Temiz zeminler için standart dinamik üç eksenli deney aleti kalıbı kullanılırken, çöp sızıntı suyunda değişik sürelerde bekletilen kum numunelerin hazırlanmasında standart kalıba benzer modifiye edilmiş kalıplar kullanılmıştır. Bu kalıplar deney aletine numunenin örselenmeden konulması için ortadan dikey olarak iki parçaya ayrılabilen şekilde üretilmiştir. Bir adet altta ve bir adet üstte olmak üzere iki adet

kapağı bulunmaktadır. Kapakların üzerinde suyun drenajına izin veren 3 mm çapında delikler bulunmaktadır. Bu kapaklara kendi çapında kesilen poroz kâğıtlar yerleştirilerek numune hazırlama işlemi başlanmaktadır. İlk önce çelik kalıplara iki üstte iki altta olmak üzere O-ringler geçirilerek, ardından lateks membran gergin bir şekilde kalıbın içine yerleştirilmektedir. Daha sonra alt kapağa poroz kâğıt yerleştirilerek membranı ve O-ringi geçirilmiş olan kalıp, kapağa oturtulur. Daha önceden hazırlanmış ve tartılmış olan kum numunesi JGS 0520-2000 standardına uygun bir şekilde huni yardımı ile üç tabaka halinde kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanır [9] ve poroz kâğıt konularak üst kapak kapatılır. Taşıma sırasında çelik kalıbın kapaklardan ayrılması için üstten alta lastikler geçirilerek kapaklar sağlamaştırılır (Şekil 2). Bu aşamadan sonra numuneler kür havuzunda değişen kür sürelerinde (gün) bekletilmektedir.

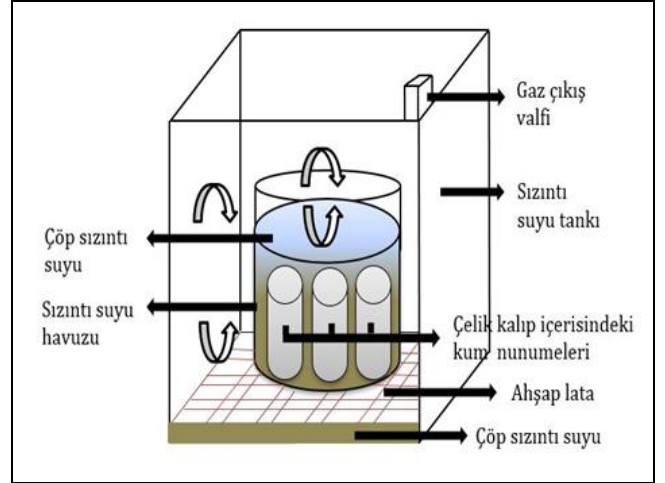


Şekil 2. Modifiye edilmiş çelik kalıplarda numune hazırlama.

Figure 2. Sample preparation in modified steel mold.

### 3.3 Çöp sızıntı suyu ile kumların kirlenmesi

Kirlenmiş kum numuneleri %100 kür oranında hazırlanmıştır. Zemin numuneleri Şekil 3'teki şemada görüldüğü gibi kalıp üst seviyesini kapatacak şekilde üstü açık olan sızıntı suyu havuzuna daldırılarak kür süresi başlatılmıştır. Kuru yağmurlama ile hazırlanan numunelerin içerisinde drenaj deliklerinden giren çöp sızıntı suyu sonucu, numunelerdeki havanın bir kısmının numuneden çıktığı görülmüştür. Sızıntı suyu tankı içerisinde kimyasal reaksiyon sonucu gaz artışı gözlemlenmiştir. Özellikle oluşan metan gazının sıkışmaması için belli zaman aralıklarında gaz çıkış valfi açılarak ortamdaki sıkışan hava alınmıştır.



Şekil 3. Sızıntı suyu tankı şeması.

Figure 3. Leachate tank diagram.

## 4 Deney sistemi

### 4.1 Dinamik üç eksenli basınç deney sistemi

Dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde numune çapları 50 mm'den 75 mm kadar ve boyları 100 mm'den 150 mm'e kadar olacak şekilde numune hazırlanabilmektedir. Deney sistemi pnömatik gerilme kontrollü olup, 0,001 Hz ve 2 Hz aralığındaki frekanslarda döngüsel eksenel gerilme üretme kapasitesine sahiptir. Deney sistemi ayrı ayrı eksenel düşey yük, eksenel düşey yer değiştirme, boşluk suyu basıncı ve numune hacmi değişiminin ölçülmesini ve kaydedilmesini sağlar. Zemin numunelerindeki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, sinüzoidal yükler uygulanarak izotropik ve anizotropik koşullar altında belirlenebilir. Üç eksenli hücrenin üzerine bağlanan gap sensörlerle  $10^{-5}$ -  $10^{-6}$  düşey deformasyon seviyesinde başlangıç elastisite modülünü hesaplamaya olanak sağlar.

### 4.2 Dinamik üç eksenli basınç deneyleri

Dinamik üç eksenli deney hücresine koyulan temiz ve kirlenmiş numuneler su alma işlemine kadar başlıklardan verilen vakum ile ayakta dururken bu aşamadan sonra vakum kapatılarak çevre basıncı ile ayakta kalması sağlanır.  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  çevre basıncı verilerek numune ayakta tutulur ve üst piston başlığı gevşetilerek numune serbest bırakılır. Bu aşamadan sonra temiz zeminlerde tam doyumluk için  $\text{CO}_2$  gazı ve damıtık su geçirme işlemleri yapılırken kirlenmiş ve doyum olmayan numuneler için bu aşamalar atlanmıştır. Tüm kalibrasyonlar yapıldıktan sonra önce ters basınç 300 kPa'a artırılırken bias (denge) konumundaki sistemde çevre basıncında eş zamanlı olarak artmaktadır. Daha sonra yavaş ve kademeli bir şekilde çevre basıncı 400 kPa'a getirilerek konsolidasyon basıncının 100 kPa olması sağlanır.

Bir gün süre ile 100 kPa konsolidasyon basıncında bekleyen tüm numunelerde ertesi gün büretteki hacim değişimleri not edilerek B kontrolleri yapılmakta ve deney öncesi sıklık değerleri hesaplanmaktadır. Bu çalışmada Tablo 3'te dinamik deney verileri paylaşılan rölatif sıklıklar  $D_r = \% 53 - 57$  ve doyumluk değerleri  $B = \% 25 - 100$  arasında değişkenlik gösteren temiz ve çöp sızıntı suyuyla kirlenmiş kum numuneler kullanılmıştır.

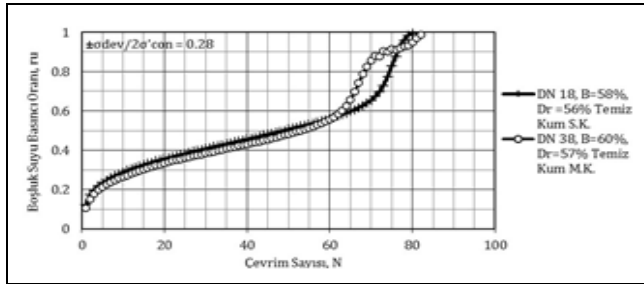
Tablo 3. Dinamik üç eksenli deney verileri.

| Deney No | Kür Oranı (%) | $\bar{\tau}\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ | $N_{\varepsilon=\pm\%2.5}$ | $r_{u_{\varepsilon=\pm\%2.5}}$ | Kür Süresi (Gün) | Dr (%) | B    | $\sigma_{ef}$ (kPa) |
|----------|---------------|--|----------------------------|--------------------------------|------------------|--------|------|---------------------|
| DN 39    | 0             | 0.30                                       | 6                          | 0.96                           | 0                | 55     | 1.00 | 100                 |
| DN 48    | 0             | 0.30                                       | 13                         | 0.92                           | 0                | 55     | 0.98 | 100                 |
| DN 57    | 0             | 0.30                                       | 39                         | 1.00                           | 0                | 53     | 0.84 | 100                 |
| DN 52    | 0             | 0.30                                       | 52                         | 0.99                           | 0                | 54     | 0.72 | 100                 |
| DN 16    | 0             | 0.28                                       | 62                         | 1.00                           | 0                | 56     | 0.64 | 100                 |
| DN 38    | 0             | 0.28                                       | 77                         | 0.93                           | 0                | 57     | 0.60 | 100                 |
| DN 18    | 0             | 0.28                                       | 82                         | 1.00                           | 0                | 56     | 0.58 | 100                 |
| DN 66    | 0             | 0.30                                       | 212                        | 1.00                           | 0                | 57     | 0.47 | 100                 |
| DN 88    | 0             | 0.30                                       | -                          | -                              | 0                | 57     | 0.37 | 100                 |
| DN 77    | 100           | 0.28                                       | -                          | -                              | 1                | 54     | 0.25 | 100                 |
| DN 72    | 100           | 0.28                                       | 58                         | 0.97                           | 3                | 57     | 0.70 | 100                 |
| DN 76    | 100           | 0.28                                       | 596                        | 0.97                           | 7                | 54     | 0.40 | 100                 |
| DN 63    | 100           | 0.30                                       | 29                         | 0.99                           | 8                | 53     | 0.80 | 100                 |
| DN 83    | 100           | 0.28                                       | 101                        | 1.00                           | 9                | 57     | 0.50 | 100                 |
| DN 64    | 100           | 0.30                                       | 38                         | 1.00                           | 15               | 57     | 0.70 | 100                 |

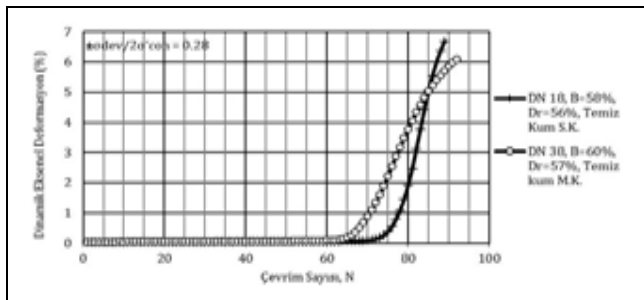
## 5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

### 5.1 Standart ve modifiye numune kalıpları ile hazırlanmış numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması

Numune hazırlama kalıbının yapı üzerindeki etkisini incelemek için aynı şartlarda standart kalıp ile modifiye kalıpta hazırlanan temiz kum numunelerine  $\bar{\tau}\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$  gerilme seviyesinde dinamik yük uygulanarak, boşluksuyu basıncı oranı - çevrim sayısı ve dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı Şekil 4'te karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4. Aynı koşullarda standart ve modifiye numune kalıbında hazırlanarak yapılan temiz kum numunelerine ait; (a): Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı. (b): Dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı.

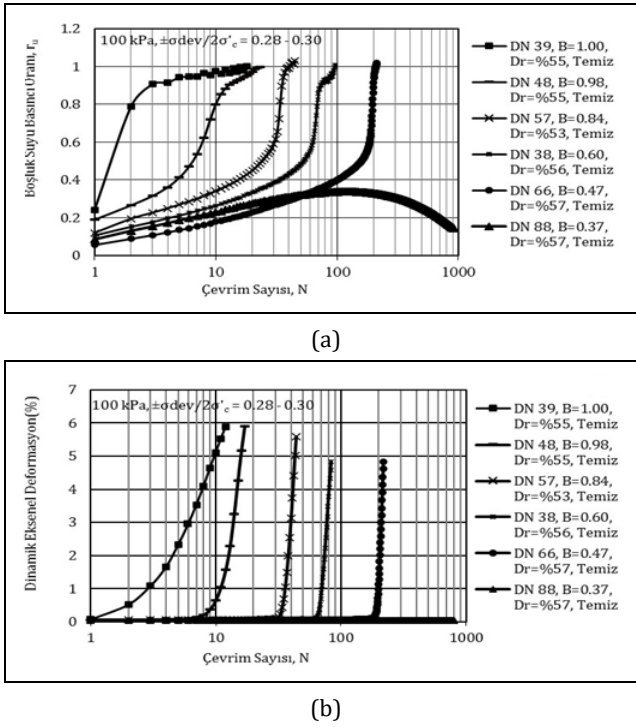
Figure 4. The clean sand samples prepared into the standard and modified mold under the same conditions;(a): Pore water pressure ratio-number of cycles. (b): Cyclic axial deformation-number of cycles.

DN18 numunesi standart kalıpta hazırlanmış olup  $Dr = \%56$  sıklıkta ve B değeri 0.58 elde edilmiştir. DN38 numunesi modifiye numune hazırlama kalıbında hazırlanmış olup, kirlenmiş numunelerde benzer koşulda olması için 1 gün temiz su tankına daldırılarak bekletilmiş ve tanktan çıkarılıp dinamik üç eksenli deney hücresine yerleştirilmiştir. DN38 numunesi, DN18 numunesinde olduğu gibi aynı şartlar altında 100 kPa'a konsolide edilerek  $Dr = \%57$  bulunmuştur ve B değeri 0.60 olarak ölçülmüştür. Skempton-B değeri 0.58 olan standart kalıpta hazırlanan DN18 numunesi ile Skempton-B değeri 0.60 olan modifiye kalıpta hazırlanan Şekil 4(a)'da boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki verilmektedir. İkisi de  $N=60$  çevrime kadar benzer davranış göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 4(b)'deki dinamik deformasyon-çevrim sayısı grafiğinde göçme kriteri olarak tanımlanan  $\varepsilon = \pm\%2.5$  deformasyon seviyesine DN38 numunesi  $N=77$  çevrimde ulaşılırken boşluksuyu basıncı oranı  $r_{u_i} = 0.95$ , DN18 numunesi ise  $N=82$  çevrimde ulaşılırken boşluksuyu basıncı oranı  $r_{u_i} = 1.00$  dir. Davranışlar genel olarak benzerdir.

### 5.2 Doygunluğun temiz kumların sıvılaşması üzerine etkisi

Bu çalışmanın ilk aşamasında farklı doygunluklarda olan kum numunelerine  $\bar{\tau}\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28 - 0.30$  gerilme aralığında dinamik yükler uygulanarak boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ve dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı davranışları incelenmiş ve Şekil 5'te deney sonuçları verilmiştir. Kumların doygunluğu  $B=\%37$  ile  $\%100$  aralığında, rölatif sıklık ise  $Dr=\%53$  ile  $\%57$  arasında değişmektedir.

Şekil 5(a)'da boşluk suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki ve Şekil 5(b)'de ise dinamik deformasyon oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki verilmektedir. Şekil 5(a)'da doymun durumdaki temiz zemin numunelerine göre doymun olmayan numunelerde boşluk suyu basıncı artışının daha yavaş oluştuğu gözlemlenmektedir. Benzer şekilde doymunluk azaldıkça deformasyonlardaki artış uzun çevrim sayılarında oluşmaktadır. Doygunluğu  $\%100$  olan DN39 numunesinde  $N=2$  çevrimde boşluk suyu basıncı oranı  $r_u=0.80$  olmakta ve  $\varepsilon = \pm\%2.5$  deformasyon seviyesine  $N=5$  çevrimde ulaşmaktadır. Bu çevrimde boşluk suyu basıncı oranı  $r_u=0.95$  seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 5. Doymunluğun temiz kumların dinamik davranışına etkisi. (a): Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı. (b): Dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı.

Figure 5. The effect of saturation on the cyclic behavior of clean sand a) Pore water pressure ratio-number of cycles. (b): Cyclic axial deformation-number of cycles.

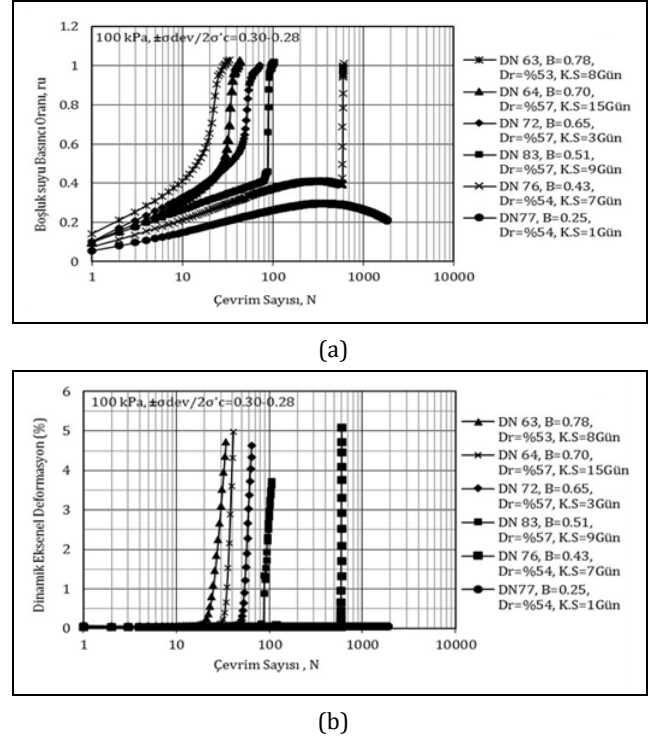
Doymunluk değeri %98 olan DN48 numunesinde  $\varepsilon = \pm\%2.5$  deformasyon seviyesine  $N=13$  çevrimde ulaşmıştır ve bu çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı  $r_u=0.90$  dır. Doymunluk değeri %84' e düştüğünde  $\varepsilon = \pm\%2.5$  deformasyon seviyesine DN57 numunesi  $N=40$  çevrimde ulaşmaktadır ve boşluk suyu basıncı oranı  $r_u=0.95$  olmuştur. Doymunluğu %60 ölçülen DN38 numunesinde  $N=77$  çevrimde ve doymunluğu %47 olan DN66 numunesinde  $N=212$  çevrimde göçme deformasyonu çevrim sayısına ulaştığı gözlemlenmiştir. DN88 numunesi ise 900 çevrime kadar deney devam ettirilmesine rağmen çok küçük deformasyon değerlerinde kalmıştır. Boşluksuyu basıncı oranı ise maksimum değeri olan  $r_u=0.35$ 'e  $N=150$  çevrim civarında ulaşarak tekrar düşüşe geçmiştir. Boşluk suyu basıncındaki azalmanın nedeni tekrarlı çevrimler sonucunda kumun genişlemeye başlamasıdır.

Her iki şekilde de görüldüğü üzere temiz numunelerdeki doymunluk değeri düştükçe tekrarlı yükler altında numunelerin dinamik eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranı değerlerindeki artış süreleri uzamaktadır. Yani doymunluk değerleri azaldıkça sıvılaşmaya karşı direnç artmış, çok düşük  $B$  değerlerinde ise sıvılaşma gözlemlenmemiştir.

### 5.3 Doymunluğun çöp sızıntısı suyu ile kirlenmiş kumların sıvılaşması üzerine etkisi

Kür süresi 1 ile 15 gün arasında olan kum numunelere deney sistemine yerleştirilip basınçlar uygulandıktan sonra doymunluk için bir gün beklenmiştir. Bu numunelerin rölatif sıklığı  $Dr = \%53 - 57$  ve doymunlukları %25 ile %78 arasında değişmektedir. Şekil 6(a)'da boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ve Şekil 6(b)'de dinamik eksenel deformasyon yüzdesinin çevrim sayısı ile olan ilişkilerinin yer aldığı

grafikleri incelediğimizde en yüksek doymunluk değerine sahip ( $B=0.78$ ) 8 günlük DN63 numunesi  $N=29$  çevrimde  $\varepsilon = \pm\%2.5$  dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşırken, doymunluk değeri  $B=0.70$  olan 15 gün kür süresine sahip DN 64 numunesi  $N=38$  çevrimde, daha düşük kür süresine sahip 3 günlük DN72 numunesi ise  $N=59$  çevrimde göçme deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Bu numunelerin göçme deformasyon seviyelerine ulaştıklarındaki boşluk suyu basıncı oranları ise sırasıyla  $r_u=0.99, 1.00$  ve  $0.97$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 6. Doymunluğun kirlenmiş zeminlerin dinamik davranışına etkisi. (a): Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı. (b): Dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı.

Figure 6. The effect of saturation on the cyclic behavior of polluted sand. (a): Pore water pressure ratio-number of cycles. (b): Cyclic axial deformation-number of cycles.

Diğer numunelerden doymunluk değerinin %51 olarak ölçüldüğü 9 günlük DN83 numunesi  $N=101$  çevrimde ve doymunluk değeri %43 olarak hesaplanan 7 günlük DN 76 numunesi  $N=596$  çevrimde  $\varepsilon = \pm\%2.5$  dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Kür süresi 1 gün olan DN77 numunesi ise doymunluk değerinin %25 olması nedeniyle boşluk suyu basıncı oranı maksimum  $r_u=0.30$  değerlerine çıkarak tekrar azalmaya başlamış ve dinamik eksenel deformasyonlar küçük seviyelerde kalarak sıvılaşma gözlemlenmemiştir. Boşluk suyu basıncı oranı ile dinamik eksenel deformasyonların çevrim sayısı ile olan ilişkisi genel olarak incelendiğinde kısa kür sürelerindeki kirlenmiş numunelerde doymunluk değeri düştükçe boşluk suyu basıncı oluşum süreleri uzamakta ve sıvılaşmaya karşı direnç artmaktadır. Grafiklerden  $B$  doymunluk değeri %43 olarak ölçülen DN76 numunesinin sıvılaşması için çok uzun çevrim sayıları gerektiği ve diğer bir numune olan DN77 numunesinde ise doymunluğun %25 değerine düşmesi ile sıvılaşma oluşmadığı gözlemlenmektedir. Düşen  $B$  değeri ile birlikte sıvılaşabilirlik azalmıştır.

#### 5.4 Kirlenmiş zeminin temiz zemin ile karşılaştırılması

Gerilme oranı sabit tutularak ( $\mp\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28$ ) kirlenme etkisinin araştırıldığı Şekil 7(a) ve Şekil 7(b)'deki grafiklerde boşluksuyu basıncı oranı-çevrim sayısı ve dinamik eksenel deformasyon oranı-çevrim sayısı ilişkileri gösterilmektedir. Kür süresi 3 gün olan DN 72 numunesinin, doygunluk değeri  $B=0.65$ , rölatif sıklığı  $Dr=\%57$  ve temiz olan DN16 numunesinin doygunluk değeri  $B=0.64$  ve rölatif sıklık  $Dr=\%56$ 'dır. Aynı gerilme oranında dinamik yük uygulanan deneyler sonucunda her iki numunedeki  $N=48$  çevrim sonrasında dinamik eksenel deformasyon değerlerinde artışlar hızlanmış olup, bu çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı  $r_u = 0.60$  değerini aşmıştır. Kirlenmiş DN72 numunesi  $\varepsilon = \pm\%2.5$  dinamik eksenel deformasyon seviyesine  $N=58$  çevrimde ulaşırken, temiz DN16 numunesi ise bu değere  $N=62$  çevrimde ulaşmıştır. Göçme deformasyon çevrim sayılarındaki boşluk suyu basıncı oranı değerleri ise DN72 numunesinde  $r_u=0.97$  ve DN16 numunesinde  $r_u=0.99$  olarak ölçülmüştür. 3 günlük kirlenmenin dinamik deformasyon ve boşluksuyu basıncı oluşumu bakımından temiz kum numunesine yakın davranış gösterdiği görülmüştür. Kür süresi az olduğu zaman sızıntı suyunun kuma etkisi de az olmaktadır.

Benzer şekilde kirlenme etkisinin araştırıldığı doygunluk değeri  $B=0.70$  ve rölatif sıklığı  $Dr=\%57$  olan 15 günlük DN64 numunesi ile  $B=0.72$  ve rölatif sıklığı  $Dr=\%54$  hesaplanan temiz DN52 numunesine  $\mp\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.30$  gerilme seviyesinde dinamik eksenel yük uygulanmıştır. Boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ilişkisi verilen Şekil 7(c)'de her iki numunedeki boşluk suyu basıncı oranı benzer hızla artarak devam ederken  $N=30$  çevrimde  $r_u=0.55$  değerinde eşitlenmiştir.  $N=30$  çevrim sonrasında 15 günlük kirlenmiş DN64 numunesinde, temiz DN52 numunesine göre boşluk suyu basıncı artışı hız kazanmıştır. Artan boşluk suyu basıncı ile birlikte  $N=31$  çevrim sonrasında DN64 numunesinde deformasyon değerleri büyüyerek  $N=38$  çevrimde  $\varepsilon = \pm\%2.5$  dinamik eksenel deformasyon seviyesine ulaşmıştır. Bu seviyeye temiz DN52 numunesi ise  $N=52$  çevrim sonunda ulaşmıştır Şekil 7(d).

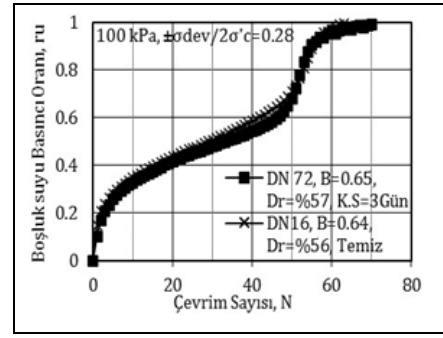
15 gün sızıntı suyu beklemiş numunedeki, temiz kum numunesine göre boşluk suyu basıncı ile birlikte deformasyonlar hızlanmış ve sıvılaşma davranışı daha erken çevrim sayılarında gözlemlenmiştir.

#### 5.5 Kirlenmenin sıvılaşma davranışına etkisi

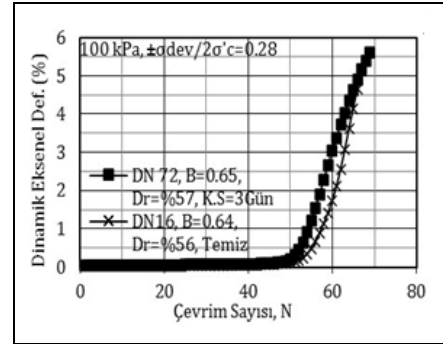
Temiz ve kısa kür süreli kirlenmiş numunelerin göçme deformasyon seviyesi olan  $N_{\varepsilon=\mp\%2.5}$  seviyesindeki çevrim sayıları ve doygunluk değeri ilişkisi grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir.

Farklı doygunluk değerlerine sahip temiz ve kirlenme süreleri 3-15 gün arasında değişen numunelere, aynı şartlar altında konsolide edildikten sonra  $\mp\sigma_{dev}/2\sigma'_c = 0.28 - 0.30$  gerilme oranında dinamik yükler uygulanmıştır. Rölatif sıklık değerleri  $\%53$  ile  $\%57$  arasında değişmekte olan temiz kum numunelerinde en yüksek doygunluk değeri  $B=\%100$  ve en düşük doygunluk değeri  $B=\%47$  olarak hesaplanmış olup, yine aynı sıklık aralığındaki kirlenmiş numunelerde ise en yüksek doygunluk değeri  $B=\%78$  ve en düşük doygunluk değeri  $B=\%43$  olarak bulunmuştur.

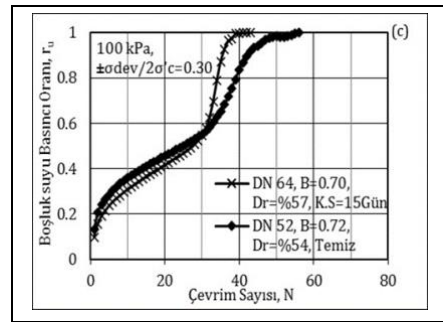
Şekil 8'de görüldüğü gibi doygunluk değerinin azalması ile hem temiz hem de kirlenmiş numunelerde göçme deformasyonu olan  $\varepsilon = \pm\%2.5$  dinamik eksenel deformasyon seviyesine daha uzun çevrim sayılarında ulaşılmaktadır.



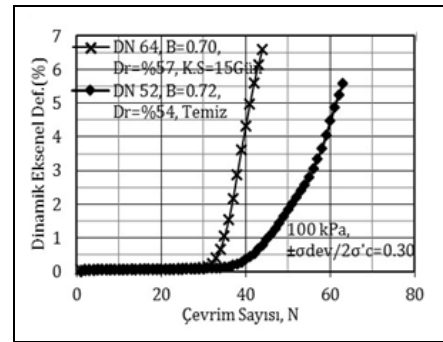
(a)



(b)



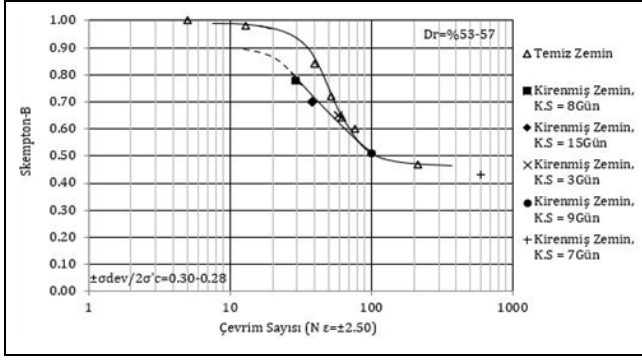
(c)



(d)

Şekil 7. Kirlenmenin dinamik davranışına etkisi. (a): DN72-DN16 boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı. (b): DN72-DN16 dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı. (c): DN64-DN52 boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı. (d): DN64-DN52 dinamik eksenel deformasyon-çevrim sayısı.

Figure 7. Effect of pollution on cyclic behavior. (a): DN72-DN16 Pore water pressure ratio-number of cycles. (b): DN72-DN16 cyclic axial deformation-number of cycles. (c): DN64-DN52 Pore water pressure ratio-number of cycles. (d): DN64-DN52 cyclic axial deformation-number of cycles.



Şekil 8. Kirlenmenin sıvılaşma davranışına etkisi.

Figure 8. Effect of pollution by leachate on liquefaction.

3 günlük kirlenmenin olduğu numune benzer temiz zemin numunesi ile aynı deformasyon seviyelerinde sıvılaşma davranışı gösterirken, doygunluğun ve kirlenmenin artması ile birlikte 15 ve 8 günlük kirlenmiş numunelerde göçme deformasyonu daha erken çevrim sayılarında oluşmaktadır. Doymuluk değerinin  $B = \%45$  ve daha düşük hesaplandığı diğer numunelerde ise kirlenmenin dinamik davranışa etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

## 6 Sonuçlar

Bu çalışmada çöp sızıntı suyunun kum zeminler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.  $Dr = \% 53 - 57$  rölaf sıklıkta hazırlanmış olan ve 100kPa basınca konsolide edilen temiz ve çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kum numuneleri kullanılmıştır. Kirlenmiş zeminin yapısının bozulmaması için numune hazırlama işlemi sırasında numunenin içerisinden  $CO_2$  gazı ve damıtık su geçirilmemiştir. Bu nedenle numuneler değişik doygunluklarda elde edilmiştir. Doymuk temiz kum numunelerde ise  $CO_2$  gazı ve damıtık su geçirme uygulaması yapılmıştır. Temiz kum numuneler ile kirlenmiş kum numunelerin karşılaştırması yapılarak kirliliğin etkisi araştırılmış ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Doymuluğun azalması ile hem temiz hem de çöp sızıntı suyu ile kirlenmiş kum zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençleri artmaktadır,
- Doymuluk  $B = \%45$ 'den az ise hem kirlenmiş hem de temiz kumlar sıvılaşmamaktadır,
- Kür süresi 3 gün ve daha az ise sızıntı suyu ile kirlenmiş kumlar ile temiz kumlar benzer davranış biçimine sahip olmaktadır. Kür süresinin kısalığı zeminin kirlenmesi üzerinde çok etkili olmamaktadır,
- Daha uzun kür sürelerinde kalan kumların sıvılaşma direnci aynı doymuluk değerinde olan temiz kumlardan önce meydana gelmektedir,
- Çöp sızıntı suyunun kimyasal ve biyolojik reaksiyonundan ziyade, içerdiği organik ve inorganik malzemelerin çökmesinden dolayı fiziksel etki ile kum zeminlerin sıvılaşabilirliği artmaktadır,
- Sızıntı suyu ile kirlenmiş zeminlerde kür süresi arttıkça sıvılaşma daha küçük çevrim sayılarında olmaktadır.

## 7 Conclusions

In this study, the effects of leachate on sandy soil were investigated. Polluted with leachate and clean sand samples

prepared  $Dr = \% 53 - 57$  relative density and consolidated to 100kPa pressure were used. During the sample preparation  $CO_2$  gas and distilled water were not applied the polluted sand samples to avoid change of its characteristics. Therefore, the samples were obtained at different saturation degree.  $CO_2$  and distilled water were applied to saturated clean sand samples. The effect of pollution was investigated by comparing the clean and polluted sand samples with similar properties, and the results were summarized below.

- Liquefaction resistance of both clean sand and the polluted sand specimens increases as the degree of saturation decreases,
- If the saturation degree is below 45%, liquefaction cannot occur both specimens,
- If the cure time is shorter than 3 days both the pore water pressure and the axial cyclic deformation of both the polluted sand and the clean sand are close to each other,
- The liquefaction resistance of longer cure time polluted sand occurs before the clean sand with the same saturation degree,
- The liquefaction of sand soils increases with the physical effect due to the precipitation of organic and inorganic materials contained in the leachate rather than the chemical and biological reaction,
- As the curing time increases, liquefaction occurs smaller number of cycles at polluted sand.

## 8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Aytaç YAŞARGÜN, deneysel çalışmaların yapılması, literatür taraması, makale hazırlama ve yazma işleri; Ayfer ERKEN, fikrin oluşturulması, deneylerin kontrolleri, elde edilen sonuçların yorumlanması konularında katkı sunmuşlardır.

## 9 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".

## 10 Kaynaklar

- [1] Ishihara K. *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, Great Britain, Clarendon, 1996.
- [2] Kaya Z, Erken A. "Cyclic and post-cyclic monotonic behavior of Adapazari soil". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 83-96, 2015.
- [3] Erken A, Kaya Z, Erdem A. "Ground deformations in Adapazari during 1999 Kocaeli Earthquake". *In 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August 2004.
- [4] Elibol B, Erken A. "Doymuk, kısmi doymuk, kuru kum numunelerin dinamik davranışlarının incelenmesi". *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, 22-24 Eylül 2005.
- [5] Tuncan M, Khan L, Pamukçu S. "The effect of leachate on geotechnical properties of clay liner". *Hazardous and industrial Waste, 20<sup>th</sup> Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, Howard University, Washington, 19-21 June 1988.
- [6] Gratchev I, Sassa, K. "Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 271-279, 2009.

- [7] Fritzges M. Biologically Induced Improvements of the Response of Sands to Monotonic and Impact Loading. MSc Thesis, University of Massachusetts Amherst, New York, USA, 2005.
- [8] Dejong J, Fritzges M, Nüsslein, K. "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, 132(11), 1381-1392, 2006.
- [9] Japanese Geotechnical Society Standards Laboratory Testing Standards of Geomaterials, vol. 1. "Preparation of soil specimens for triaxial tests". The Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan, JGS 0520, 2015.