



**SUYA DOYGUN KUMLARIN DRENAJSIZ KOŞULLARDAKİ  
DAVRANIŞININ TEKRARLI YÜKLER ALTINDA BURULMALI  
KESME DENEY ALETİ İLE İNCELENMESİ**

**(THE INVESTIGATION OF UNDRAINED CYCLIC BEHAVIOR OF  
SATURATED SAND IN HOLLOW TORSIONAL SHEAR APPARATUS)**

**Selim ALTUN\***

**ÖZET/ABSTRACT**

Şu yıllarda meydana gelen özellikle Kocaeli 1999, Kobe 1995 ve daha birçok büyük depremde kum zeminlerde (ve hatta siltli kum veya kumlu silte) meydana gelen büyük kapsamlı sıvılaşma olayları tekrarlı yüklerin zeminlerde oluşturduğu dinamik etkinin önemini ve boyutunu bir kez daha ortaya koymuştur. Niigata ve Alaska 1964 depremlerinde suya doymuş zeminlerde ortaya çıkan büyük şekil değiştirmeler ve göçmeler sonucunda bu zeminlerin drenajsız şartlardaki dinamik davranış özellikleri incelenmeye başlamıştır.

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak zeminlerde oldukça farklı boyutlarda deformasyonlara yol açtığı ve bundan dolayı zeminin kayma mukavemetinin azaldığı, gerilme-deformasyon özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Bu mukavemet kaybı, zemin türü ve özellikleri ile ele alındığında zeminlerin tekrarlı yükler altında oldukça farklı dinamik davranış ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri gösterdikleri görülmektedir. Bu yüzden değişik türdeki yüklere maruz olan zeminlerin davranış özellikleri de her bir zemin türünde oldukça farklı tepkilerle ortaya çıkmaktadır. Özellikle suya doymuş gevşek kumların gerek hızlı monotonik gerekse tekrarlı yükler altında ortaya koydukları deformasyon yumuşaması ile beraber mukavemetlerini hızla kaybetme özellikleri bu tür zeminleri diğerlerinden oldukça farklı kılmaktadır. Oysa sıkı kumlarda bu özellik gözlenmemektedir. Bu amaçla zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini laboratuvar koşullarında araştırmak için geliştirilen deney aletlerinden birisi de içi boş burulmalı kesme deney aletidir. Bu çalışma kapsamında diğer zemin dinamiği deney aletlerine göre birçok avantaja sahip olan bu aletle, suya doymuş kum zeminlerin değişik fiziksel özellikler ve deney koşulları altında mukavemet özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

*Recently, strong earthquakes Kocaeli 1999, Kobe 1995 induced a range of liquefaction behaviour in sand (also silty sand or sandy silt) and this event emphasized the importance of dynamic effects of cyclic loading on soil behaviour. The results of serious deformation and failure occurring in saturated sand in Niigata and Alaska (1964) earthquakes, necessitated the investigation the undrained cyclic behaviour of this type of soil.*

*It is known that cyclic shear stresses induced by earthquake, cause a range of shear strain due to granular and index properties of soil and thus losing shear strength of soil and changing stress-strain behaviour. Considering this decreasing of shear strength and regarding the type and properties of soil, reviewed that soils under cyclic loading show quite different dynamic behaviour and stress-strain properties. Hence, soil behaviour under different type of loading, changes depending on soil type. In particular, saturated loose sands differ from the other type of soils because of losing quickly their shear strength due to strain softening under cyclic or fast monotonic loading. However, dense sands do not behave like this. Hollow cylindrical torsional shear apparatus is one of the test apparatus developed to investigate the stress-strain and strength properties of soils under cyclic stresses in laboratory. In this study, changing in strength properties of saturated sand having different physical characteristics under different test conditions was investigated with a series of torsional shear test.*

**ANAHTAR KELİMELELER / KEYWORDS**

Burulmalı deney, Kum, Kayma gerilmesi, Dinamik yükleme  
Torsional test, Sand, Shear stress, Dynamic loading

\* Ege Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bornova, İZMİR

## 1. GİRİŞ

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağı olarak zeminlerde oldukça farklı boyutlarda deformasyonlara yol açtığı ve bundan dolayı zeminin kayma mukavemetinin azaldığı, gerilme - deformasyon özelliklerinin değıştiğı bilinmektedir. Bu mukavemet kaybı, zemin türü ve özellikleri ile ele alındığında zeminlerin tekrarlı yükler altında oldukça farklı dinamik davranış ve gerilme-şekil değıştirme özellikleri gösterdikleri görülmektedir. Bu yüzden değışik türdeki yüklere maruz olan zeminlerin davranış özellikleri de her bir zemin türünde oldukça farklı tepkilerle ortaya çıkmaktadır.

Özellikle suya doygun gevşek kumların gerek hızlı momentik gerekse tekrarlı yükler altında ortaya koydukları deformasyon yumuşaması ile beraber mukavemetlerini hızla kaybetme özellikleri bu tür zeminleri diğerlerinden oldukça farklı kılmaktadır. Oysa sıkı kumlarda bu özellik gözlenmemektedir. Asal gerilme eksenlerinin döngüsü, gerilme seviyesi ve gerilme geçmişi gibi zemin ve yükleme özelliklerinin etkisi altında olan gevşek kumlarda ortaya çıkan deformasyon yumuşaması ve beraberindeki sıvılaşma olayı geoteknik mühendisliğinin ve zemin dinamiğinin en dikkat çekici konularından birisi olmuştur.

## 2. SUYA DOYGUN KUMLARIN DİNAMİK DAVRANIŞ ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, bir başka ifadeyle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme-şekil değıştirme ve mukavemet özellikleri diye iki gruba ayırabiliriz. Gerilme-şekil değıştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin ve bunların birim şekil değıştirmeye bağı olarak değışimlerinin bulunması anlaşılır. Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değıştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür deney sistemlerinden faydalanılır.

Bu dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan gerek deneysel, gerek teorik ve model çalışmalarında şekil değıştirme seviyelerinin farklı oluşu ve zeminlerin bu farklı şekil değıştirme seviyelerinde değışik gerilme-şekil değıştirme davranışı gösterdikleri bilinmektedir. Bundan dolayı bu farklılıklar dikkate alınarak her bir şekil değıştirme seviyesindeki dinamik davranış özelliklerinin tespitinde elastik, elastoplastik ve plastik teorilerin ayrı ayrı ele alınması gerekli olmaktadır.

Zeminleri, genel olarak ele alındığı zaman taneli bir yapı göstermelerine rağmen davranışlarındaki farklılıklardan ötürü, ince daneli-khezyolu ve kaba daneli-khezyolsuz zeminler diye iki ana grupta incelemek alışlagelmıştır. Özellikle tekrarlı yükler altında bu iki grup zemin birbirinden oldukça farklı davranış özellikleri göstermektedir. Bu nedenle zeminlerin dinamik davranış özellikleri incelenirken zemin gruplarını ayrı ayrı değerlendirip, kendi sınıfları içerisinde ele almak gereklidir.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranış özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda zeminin cinsi ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra yükleme koşullarının da bu özellikler üzerinde oldukça fazla etkisinin olduğu belirlenmiştir. Özellikle suya doygun gevşek kum zeminlerin tekrarlı yükler altında diğer zemin türlerinde rastlanmayan bir davranış özelliği gösterdiği bilinmektedir. Depremler veya hızlı yüklemeler esnasında zemin içerisindeki suyun drene edilememesi kum zeminlerin mukavemet özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu amaçla suya doygun kumların tekrarlı yükler altındaki dinamik davranış özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar koşullarında konsolidasyonsuz drenajsız dinamik deneyler yapmak uygun olmaktadır.

Suya doygun kumların drenajsız koşullarda tekrarlı veya hızlı momentik yüklemeler altındaki dinamik davranış özelliklerini belirlemek amacıyla son yıllarda birçok deneysel ve

teorik araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar doğrultusunda kumların gerilme–şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerindeki değişimin farklı gerilme seviyelerinde ayrı ayrı ele alınması gerekliliği de ortaya konmuştur (Ashour ve Norris, 1999; Erken ve Ansal, 1994; Erten ve Maher, 1995; Konrad, 1990; Meneses-Loja vd., 1998; Mohamad ve Dobry, 1986; Sivathayalan ve Vaid, 1998; Tatsuoka vd, 1989; Verdugo ve Ishihara, 1996; Yoshimine vd., 1999).

Deprem dalgaları gibi tekrarlı yükler altında zemin tabakaları geniş sınırlar içerisinde değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında kalırlar. Bu durumda zemin boşluklarındaki suyun yer değiştirebilmesi için yeterli zaman olmadığından zemin tabakalarında boşluk suyu basıncı artışı ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen bu gerilme durumunu ve davranış biçimini laboratuarda inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir (Ansal ve Erken, 1985).

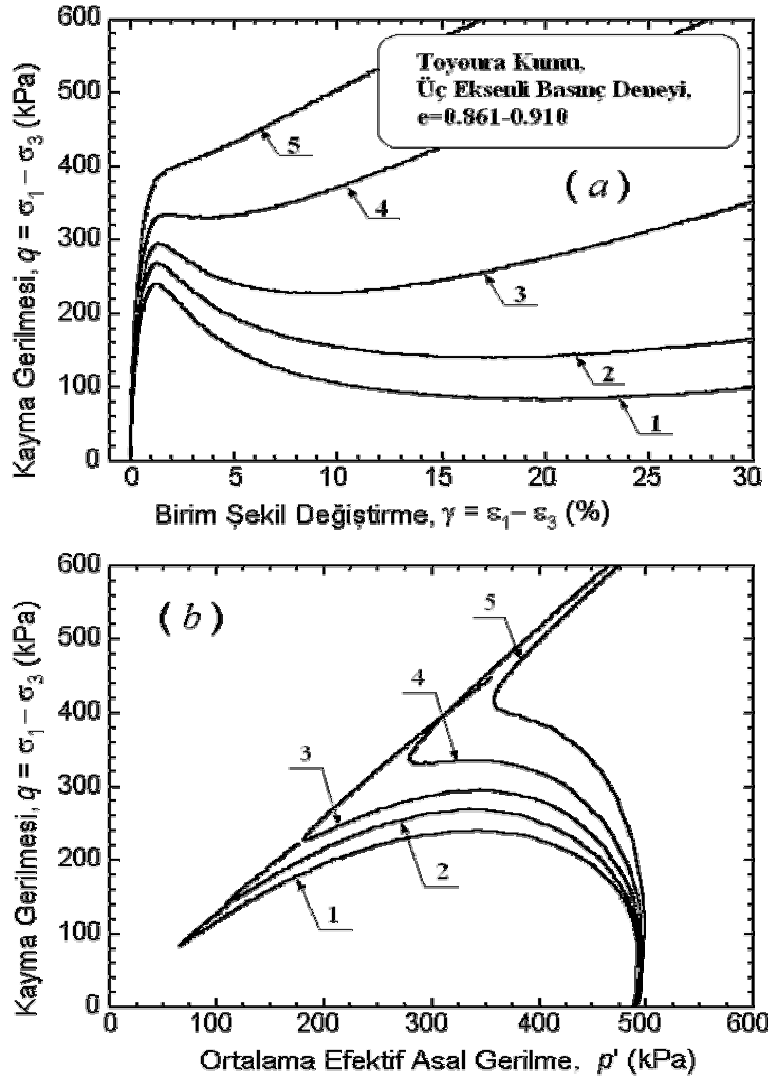
Tekrarlı yüklemeler altında suya doygun kumların dinamik davranış özellikleri ile ilgili yürütülen çalışmalarda, tekrarlı yükler altında kumlarda meydana gelen bu büyük şekil değiştirmelerin sebebini dinamik yüklemenin belli koşul ve aşamalarında zemindeki efektif gerilmenin geçici olarak sıfıra düşmesine bağlayarak, bu olguyu sıvılaşma olarak tanımlamışlardır (Seed, 1979; Alarkon-Guzman vd., 1988; Hyodo vd., 1994; Talaganov, 1996). Bununla birlikte zeminlerin dinamik davranış özelliklerini tam olarak anlayabilmek için statik yükler altındaki davranışları ile beraber ele almak ve incelemek doğru bir yaklaşım olmaktadır. Bu amaçla suya doygunkum zeminlerin gerilme–şekil değiştirme davranışlarının kumun fiziksel özelliklerine ve yüklemenin türüne göre farklılık gösterdiği, birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur.

Buna göre drenajsız koşullarda üç eksenli deney sistemiyle belli bir evre gerilmesi altında izotropik olarak konsolide edilmiş, suya doygun kumlarda gerçekleştirilen statik yüklemeli deneylerden saptanan zeminin davranış özellikleri gerilme izleri ile beraber şekil 1’de gösterilmektedir (Verdugo ve Ishihara, 1996). Yapılan deneylerden elde edilen gerilme–şekil değiştirme eğrilerindeki davranış farklılıkları bu deneylerde kullanılan zeminlerin değişik rölatif sıklıklara sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Benzer davranış özellikleri anizotropik gerilme koşullarında yapılan deneylerde de gözlenmiştir (Vaid ve Chern, 1985).

şekil 1’de 1, 2 ve 3 ile gösterilen zemin türleri zirveye ulaştıktan sonra kayma mukavemetini kaybetmesi ile ortaya çıkan ve deformasyon yumuşması ile isimlendirilen bir davranış göstermektedirler. Bu davranış şekline büzülme denmektedir. Bu tür davranışlar *sıvılaşma* veya *sınırlı sıvılaşma* olarak da isimlendirilmiştir. Özellikle 1 ve 2 nu eğrilerde görüldüğü gibi kayma mukavemetinin azalmasıyla zemin sabit kayma gerilmesi altında şekil değiştirmesini sürdürmektedir. Bu safhaya *sabit gerilme durumu deformasyonu* veya *akma deformasyonu* denir.

Bu davranış özelliklerini yansıtın efektif gerilme izlerine bakıldığında, özellikle 3 nu eğrilerdeki keskin dönüşle beraber zeminin kayma direnci artmaya, boşluk suyu basıncı azalmaya başlamaktadır. Bu safhaya *faz dönüşümü evresi* denilir (Ishihara ve Yasuda, 1975). Faz dönüşümü evresine ulaşıldığında efektif gerilme izi kırılma zarfına Oduka yaklaşır.

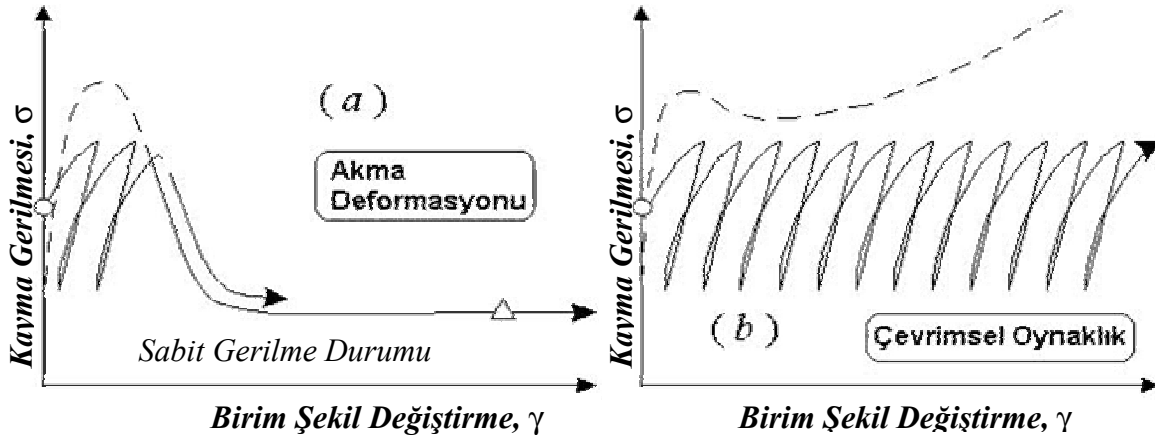
4 ve 5 ile gösterilen eğrilerde ise zemin, deformasyon pekleşmesi ile isimlendirilen bir davranış özelliği gösterir. Bu tür davranışlara da genleşme adı verilir. Özellikle 5 nu eğri ile temsil edilen davranış türünde büzülme davranışının aksine kayma mukavemeti azalması görülmemektedir. Bu gerilme–şekil değiştirme durumlarını yansıtın gerilme izlerinde önceki durumlarda görülen keskin dönüşler tam olarak görülemeyebilir. Sıvılaşma olarak isimlendirilen birinci tür deformasyon davranışından farklı bir gelişim gösteren bu olaya *evrimsel oynaklık* denilmektedir (Vaid ve Chen, 1985).



Şekil 1. Üç eksenli deney sisteminde statik yüklemeler altında zeminde oluşan gerilme-şekil değiştirme davranış özellikleri (Verdugo ve Ishihara, 1996)

Statik yüklenme durumunda kumların gösterdiği bu davranış özellikleri ile beraber deprem gibi dinamik yüklere maruz kumların davranışlarını anlayabilmek için tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin de ele alınması gerekmektedir. Örneğin yukarıdaki statik yüklemeler altında görülen özelliklere benzeri davranışlar tekrarlı yükler altındaki zeminlerde de görülmektedir (Şekil 2).

Birbirinden farklı bu iki davranış türü (akma deformasyonu ve çevrimsel oynaklık) tekrarlı yüklemeler altındaki zeminlerde ayrı ayrı görülebileceği gibi, oluşan şekil değiştirmeler bu iki türün kombinasyonu da olabilir. Her iki olayın oluşum mekanizmalarının ve bu davranışlara etki eden faktörlerin farklılığı, olaylara karşı alınacak önlemlerin ve hatta kullanılan direnç ifadelerinin dahi farklı olmasını gerektirmektedir (CastrO, 1975).



Şekil 2. Tekrarlı yükler altında zeminin ortaya koyduğu farklı davranış özelliklerinin gelişimi

### 3. DENEY ALETİ, KULLANILAN MALZEME VE DENEY YÖNTEMİ

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler, Ishihara ve Towhata tarafından kullanılan ve İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan içi boş silindirik burulmalı kesme deney aletinin yükleme ve veri edinimi yönünden gelişmiş bir modeliyle gerçekleştirilmiştir (Ishihara ve Towhata, 1983). Deney sistemi düşey eksenel kuvvet,  $F_z$ , burulma momenti,  $T$ , iç hücre basıncı,  $p_i$  ve dış hücre basıncı,  $p_o$  dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilebilmesinin yanı sıra düşey eksenel yer değiştirme,  $\Delta H$ , burulma açısı,  $\Delta\theta$ , iç hücre hacim değişimi,  $\Delta V_i$  ve numune hacim değişimi,  $\Delta V_s$ 'nin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu hassas ölçümler numunenin gerilme ve şekil değiştirme büyüklüklerini tam olarak ortaya koymaktadır. Bu gelişmeyle beraber gerilme izlerinin belirlenmesinde daha kesin sonuçlar elde edilebilmektedir.

#### 3.1. İçi Boş Silindirik Numunede Gerilme ve Şekil Değiştirme Bileşenlerinin Hesabı

İçi boş silindirik bir numuneye etki eden dört yüzeysel dış kuvvetin, yani düşey eksenel kuvvet,  $F_z$ , burulma momenti,  $T$ , iç hücre basıncı,  $p_i$  ve dış hücre basıncı,  $p_o$  'ın olduğu söylenebilir. Bu dış kuvvetler numune duvarından alınan bir elemanda  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  ve  $\sigma_{z\theta}$  gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar. Benzer olarak dört şekil değiştirme bileşeni, numunede oluşan düşey eksenel yer değiştirme,  $\Delta H$ , burulma açısı,  $\Delta\theta$ , iç hücre hacim değişimi,  $\Delta V_i$  ve numune hacim değişimi,  $\Delta V_s$  'dir.

İçi boş burulmalı kesme deneyinden elde edilen sonuçların yorumları, tüm numuneyi tam dairesel bir silindirmiş gibi düşünüp, deformasyona uğrayan tek bir elemanmış gibi dikkate alarak yapılır. Silindirin duvarı boyunca farklı yükleme koşullarında gerilmeler değiştiği için, hesaplamaları ortalama gerilme ve şekil değiştirme kavramlarına göre yapmak gerekli olur. Genel olarak gerilmelerin duvar boyunca değişimi 'zeminin bünyesel kuralları'na bağlıdır.

Numune duvarı boyunca gerilme bileşenlerinin en son numune boyutları ve uygulanan yükler cinsinden ortalamalarının hesaplanması ve ifadeleri aşağıda verilmiştir. Bu gerilme bileşenlerinin ortalama değerler olduğu ve bu çalışmadaki bütün gerilmelerin efektif gerilmeleri temsil ettiği her zaman hatırlanmalıdır (Hight vd., 1983). Buna göre ortalama düşey eksenel gerilme

$$\sigma_z = \frac{P}{A_s} + z\gamma' + \Delta\sigma_z \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Yukarıdaki formülde  $P$  numunenin üst yüzeyine (membran dahil) gelen toplam aksenal yük,  $A_s$  numunenin ortalama kesit alanı,  $z$  numunenin üst kısmından aşağıya doğru olan mesafe,  $\gamma'$  numunenin efektif birim hacim ağırlığı ve  $\Delta\sigma_z$  membran düzeltme kuvvetidir.

Numunenin deney süresince içi boş silindirik yapısını sürdürdüğü kabul edilerek numunenin yükseklikçe orta kısmındaki ortalama aksenal efektif gerilme bileşeni aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sigma_z = \left( F_z + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) \right) \frac{1}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{1}{2} \gamma' \cdot H + \Delta\sigma_z \quad (2)$$

Burada  $F_z$  yük hücresi kullanarak ölçülen ve numunenin üst yüzeyindeki gerilme koşullarının üniform olduğu kabul edilerek belirlenen deviatorik aksenal yüküdür (Şekil 1). Düşey aksenal yükün belirlenmesinde kullanılan yük hücresi üç eksenli hücre içerisinde olduğu için yükleme barının alanı hesaplarda dikkate alınmaz. Burada  $r_i$  ve  $r_o$  ise, hacim değişim değerleri, numunenin düşey deformasyonu ve numunenin iç silindir kısmının hacim değişiminin ölçülmesiyle elde edilen numunenin en son iç ve dış yarıçaplarıdır.  $H$  ise numunenin yüksekliğidir.

Ortalama efektif radyal ve çevre gerilmeleri sırasıyla aşağıdaki ifadeler yardımıyla elde edilir.

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} + \Delta\sigma_r \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} + \Delta\sigma_\theta \quad (4)$$

Bu ifadeler Hight vd. tarafından lineer elastisite kabulleri ve herhangi bir  $r$  yarıçapında,  $\sigma_\theta$  ve  $\sigma_z$  arasındaki ilişki kullanılarak türetilmiştir (Hight vd., 1983). Yine  $\Delta\sigma_r$  ve  $\Delta\sigma_\theta$  elastik ince kabuklar teorisine dayanarak hesaplanan, membranlar için düzeltme kuvvetleridir (Tatsuoka vd., 1986).

Herhangi bir gerilme dağılımı için çevre gerilmesi, aşağıdaki eşitliğin koşullarını sağlamaktadır.

$$T = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} [\sigma_{z\theta}(r) \cdot r] \cdot r dr \cdot d\theta \quad (5)$$

Bu koşullara dayanarak lineer elastik ve ideal plastik dağılıma uyan ve numune duvarı boyunca sabit olduğu kabul edilen ortalama kayma gerilmesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right\} + \Delta\sigma_{z\theta} \quad (6)$$

Bu ifadede  $T$  burulma momentini ve  $\Delta\sigma_{z\theta}$  ise membran düzeltme kuvvetlerini temsil etmektedir.

Eşitlik 6'da, denklemin ilk kısmı ideal plastik dağılım kabulüne uymaktadır. İkinci kısım ise lineer elastik izotropik bir malzemeyi temsil etmektedir. Küçük kayma gerilmesi ve deformasyon seviyelerinde lineer elastik dağılım en iyi sonucu verdiği için ifadenin ilk kısmı kullanılması daha uygun olmaktadır. Bununla beraber kırılmaya yakın seviyelerde ideal plastik dağılımın daha uygun olduğu görüldüğünden denklemin ikinci kısmının kullanımı daha doğru olmaktadır. Bu çalışmada, Ortalama çevre gerilmesini elde etmek için bu iki çözümün Ortalaması olan ve membran düzeltme kuvvetlerini de içeren 6 eşitliği kullanılmıştır.

Ortalama şekil değiştirme bileşenleri, numunenin düzgün silindirik yapısını sürdürdüğü kabulüyle, düşey aksel yer değiştirme,  $\Delta H$ , numunenin açısal sapması,  $\Delta\theta$ , iç hücre hacim değişimi,  $\Delta V_i$  ve numune hacim değişimi,  $\Delta V_s$ 'den hesaplanan numunenin iç ve dış yarıçaplarının değişimi,  $\Delta r_o$  ve  $\Delta r_i$  ve numunenin ilk boyutları,  $r_o$  ve  $r_i$  cinsinden hesaplanır. Böylece Ortalama birim şekil değiştirme artımı,  $\gamma_{z\theta}$

$$\gamma_{z\theta} = 2 \cdot \varepsilon_{z\theta} = \frac{2 \cdot \Delta\theta \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3h \cdot (r_o^2 - r_i^2)} \quad (7)$$

şeklinde elde edilir.  $\Delta r_o$  ve  $\Delta r_i$  yer değiştirmeleri, membran penetrasyonu kalibrasyonları dikkate alınarak, iki bütütle ölçülen numune ve iç hücre hacim değişimlerinden elde edilir. Sonuç olarak burulmalı kayma deneyi süresince içi boş silindirik numunede ölçülebilen dikuz bileşen belirlenebilmektedir. Bunların dört tanesi gerilme bileşeni, dört tanesi şekil değiştirme bileşenleri ve sonuçsuz oluşan boşluk suyu basıncı,  $u$  dur.

### 3.2. Deneyde Kullanılan Malzemenin Özellikleri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen bütün deneylerde Japonya standart kumu olan "Toyoura kumu" kullanılmıştır. Kuartz özellikli ve çoğunlukla yarı yuvarlak-yarı köşeli tane yapısına sahip Toyoura kumu üniform ince kum sınıfına girmektedir. Kumun fiziksel özellikleri Çizelge 1'de gösterilmektedir. Böylece deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları ile geçmişte bir çok araştırmacı tarafından bu kum üzerinde yapılan incelemelerin karşılaştırılması da mümkün olmuştur.

Çizelge 1. Toyoura kumunun fiziksel özellikleri

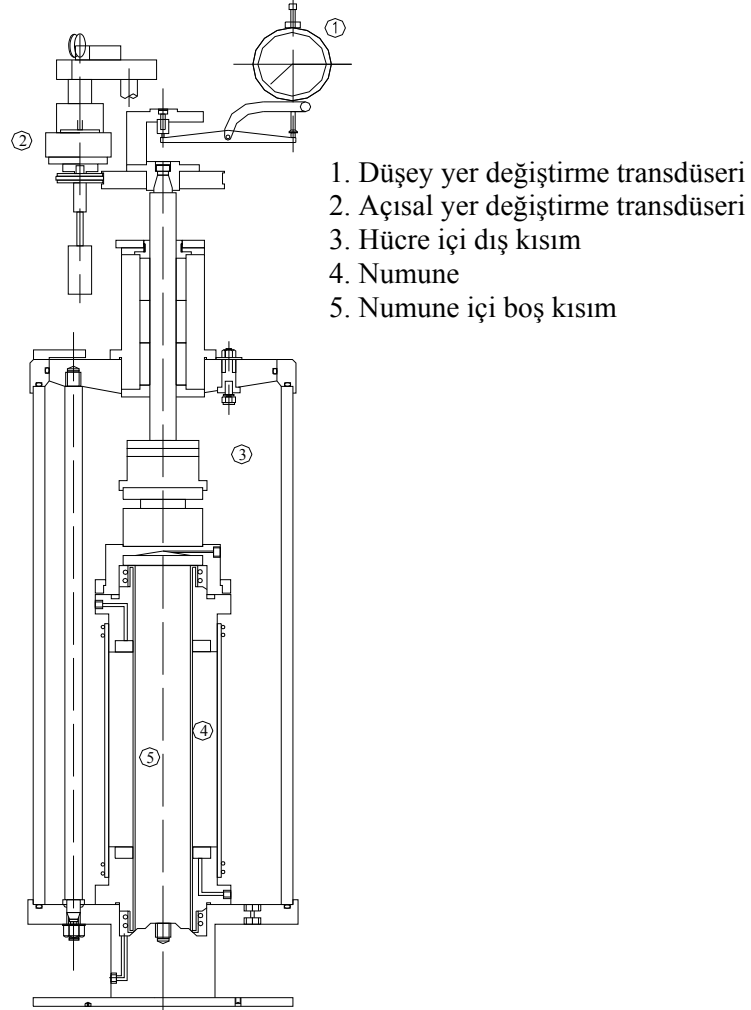
Mineraloji	Kuartz
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Özgül Ağırlık, $G_s$	2.65
Maksimum Boşluk Oranı; $e_{max}$	0.977
Minimum Boşluk Oranı, $e_{min}$	0.605
Ortalama Tane Çapı, $D_{50}$	0.17 mm.
Efektif Çap, $D_{10}$	0.13 mm.
Üniformluk Katsayısı, $U_c$	1.43

### 3.3. Deney Aleti ve Deney Yöntemi

Bu çalışmada kullanılan içi boş silindirik dinamik burulmalı kesme deney aletinin genel görünüşü Şekil 3'te görülmektedir. Bu deney aleti ile içi boş numuneye drenajsız şartlarda, izotropik veya anizotropik üç eksenli gerilme koşullarında 0.1 Hz. frekansında tekrarlı burulma yüklemesi yapılarak zeminin dinamik gerilme ve şekil değiştirme ve mukavemet

özellikleri laboratuvar koşullarında belirlenmeye çalışılmıştır. Burulmalı kesme deneyleri gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir.

Deneyde kullanılan numunelerin iç yarıçapı  $r_i=3.0$  cm, dış yarıçapı  $r_o=5.0$  cm ve yüksekliği  $H\approx 20$  cm'dir. Numune içerden ve dışardan 0.3 mm kalınlığındaki boyutları numune boyutlarına uygun membranlarla çevrelenmektedir.



Şekil 3. Deney hücresi içerisine yerleştirilmiş numunenin görünüşü

### 3.3.1. Numune Hazırlama

Bu çalışma sürecinde yürütülen bütün deneylerde Japonya Geoteknik Birliği (JGS) tarafından yayınlanan standartlara (JGS 543-2000) uygun bir numune hazırlama metodu kullanılmıştır. Buna göre deneyler, kuru yağmurlama metoduyla  $D_r \approx \%30, \%50, \%60$  ve  $\%75$  rölatif sıkılık değerlerini elde edebilmek için sırasıyla 10–15, 15–20, 20–25 ve 25–30 cm. yükseklikten sekiz tabaka halinde dökülerek oluşturulan ve boşluk oranı  $e_o=0.605-0.977$  olan gevşek ve orta sıkılıktaki numuneler ile gerçekleştirilmiştir.  $CO_2$  geçirme tekniği kullanılarak ve  $20 \text{ kN/m}^2$  değerinde ters basınç uygulanarak numunenin, *Skempton B değeri* 0.96 ve üstü olacak şekilde doyunlaşması sağlanmıştır.



### 3.3.2. Deney Yöntemi

İçi boş burulmalı kesme deney sistemi diğer dinamik deney aletlerine kıyasla çok yönlü ve daha kompleks bir yapıya sahiptir. Bu nedenle deney yöntemlerinde de bazı farklılıklar oluşmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi burulmalı kesme deneyi ile değişik koşul ve gerilme durumlarında farklı amaçlara yönelik deneyler yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında kum numuneler üzerinde drenajsız koşullarda izotropik ve anizotropik olarak konsolide edilmiş dinamik burulmalı kesme deneyleri yapılarak zeminin gerilme ve şekil değiştirme özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Zeminlerin dinamik özelliklerinin incelenmesinde burulmalı kesme deney aleti ile amaca bağlı olarak değişik yükleme koşullarında deneyler yapılabilmektedir. Deney aleti, araştırmacının incelenen konunun hedefi doğrultusunda, konsolide edilen zemin numunesine istenilen tür ve koşullarda yükleme yapabilmesine ve diğer birçok deneysel parametreyi değiştirebilmesine izin vermektedir. Kısaca yapılacak deneyin yöntemi ve yükleme özellikleri araştırma konusuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

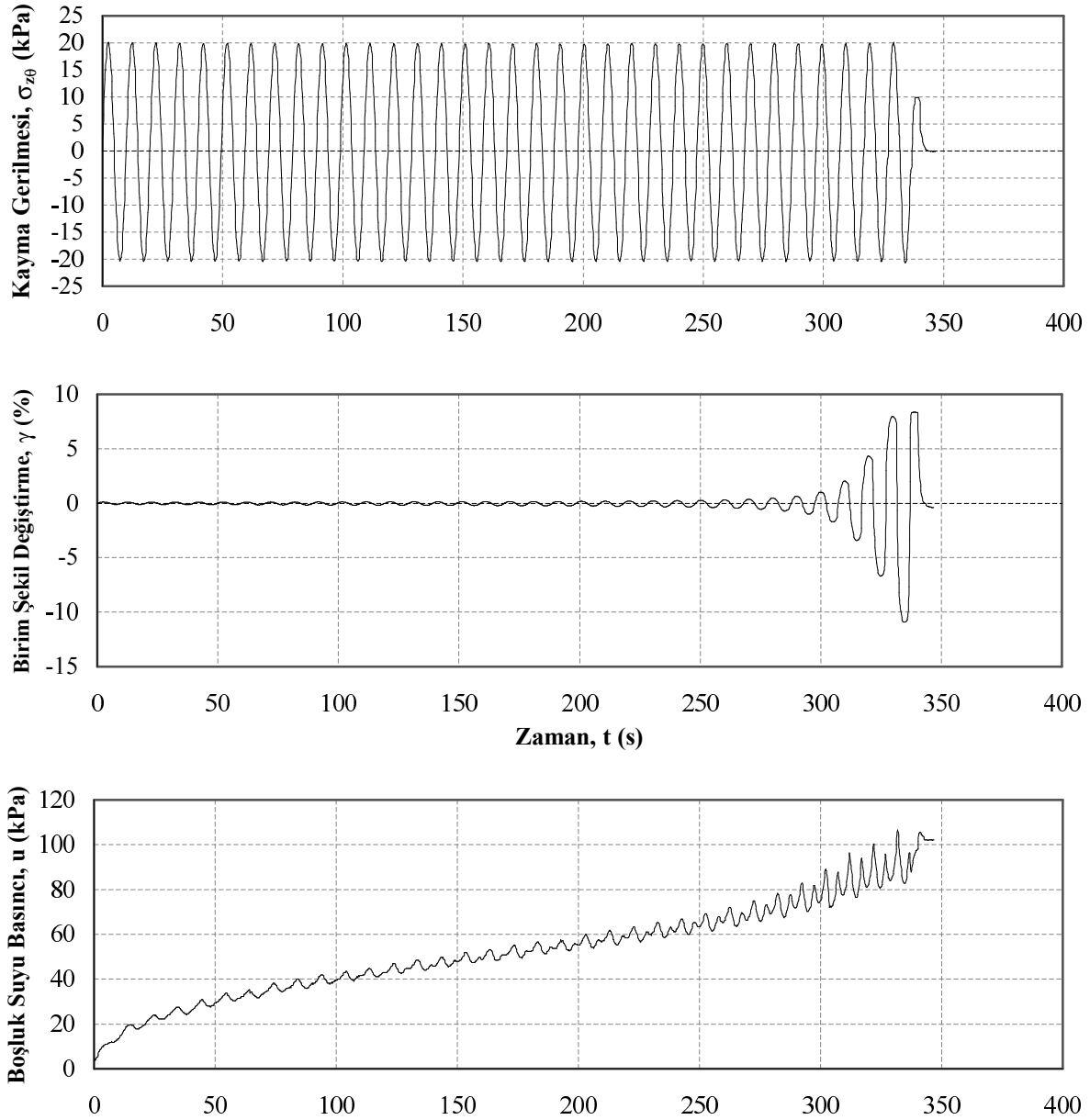
Bu çalışmada, belirlenen amaç doğrultusunda yürütülen deneyler, yine Japonya Geoteknik Birliği (JGS) tarafından yayınlanan deney standartlarına ve yöntemlerine (JGS 550-2000 ve JGS 551-1998) uygun olarak gerçekleştirilmiş ve sonrasında yorumlanıp değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan bütün deneyler gerilme kontrollü olarak drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiştir. Yine deneylerin tamamı 0.1 Hz sabit frekansında sinüzoidal dinamik yükleme koşullarında yapılmıştır. Yapılan deneylerde dinamik burulma gerilmesi belirli bir değerde sabit tutularak (üniform yükleme) numuneler kesilmiştir.

## 4. KUMLARIN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında küçük deformasyon seviyelerindeki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanı sıra daha büyük deformasyon seviyelerinde gösterdikleri mukavemet ve sıvılaşma özellikleri de zeminlerin genel dinamik davranışını tanımlamak ve ortaya koymakta büyük önem taşımaktadır. Özellikle suya doymuş kum zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin incelenmesi tekrarlı yükler altında oluşabilecek büyük şekil değiştirmelerin gelişme süreçlerinin tahmin edilmesinde büyük yarar sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında elasto-plastik ve plastik deformasyon safhalarında suya doymuş kumların değişik koşullardaki dinamik davranış özelliklerinin ve bu özelliklere etki eden bazı faktörlerin hem deneysel hem de model olarak tahmin edilmesi için içi boş silindirik burulmalı deney aleti ile drenajsız koşullarda belirli bir sayıda dinamik deneyler yapılmıştır. Suyu doymuş kumlar drenajsız şartlarda tekrarlı gerilmelere maruz kalırken artan boşluk suyu basıncı ve oluşan şekil değiştirme genlikleriyle beraber numunede meydana gelen mukavemet kaybı gerilme izleri de kullanılarak, bu çalışmada yürütülen farklı türdeki deneylerle belirlenmeye çalışılmıştır. Başlangıç koşullarındaki değişikliklerin bu zemin özelliklerini ne şekilde etkilediği de bu koşullarda yapılan değişikliklerle incelenmiştir.

Bu amaçla yapılan ilk kısım deneylerde değişik üniform tekrarlı burulmalı gerilme genliklerinde farklı rölatif sıklık değerlerine sahip ve izotropik koşullarda konsolide edilmiş zeminlerin mukavemet ve sıvılaşma özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4'te bu deneylerden birisine ait gerilme, şekil değiştirme ve ilave boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimine ait deney kayıtları verilmiştir. Yine bu deneye ait histerisis ilmiklerinin oluşumu ve gerilme izleri de Şekil 5'te verilmiştir.

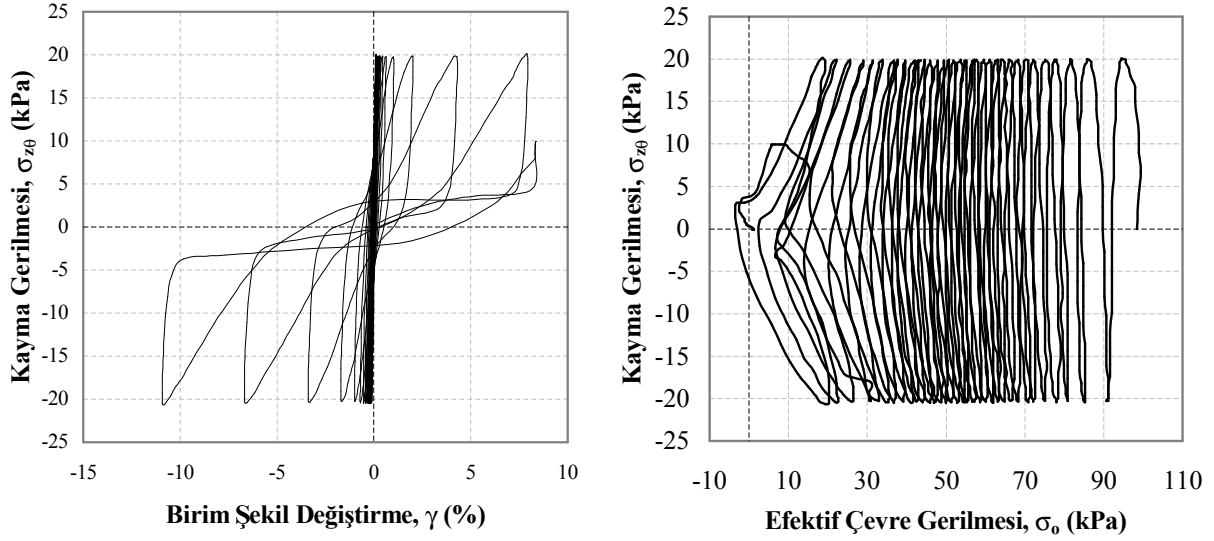


Şekil 4. Üniform tekrarlı yükleme yapılan deneylerden birisine ait gerilme, boşluk suyu basıncı ve birim şekil değişirme genliklerinin zamanla değişimi

Statik yükleme durumunda olduğu gibi, kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını belirleyen en temel etkenlerden birisi zeminin rölatif sıkılığıdır. Zaten kohezyonsuz zeminlerin yapısal davranışlarını rölatif sıkılığa bağlı olarak açıklamak alışlagelmiş bir uygulamadır.

Farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip ve izotropik koşullarda konsolide edilmiş suya doygun kumların drenajsız koşullarda belli bir üniform burulmalı gerilme değerinde kesilmeye çalışıldığında sıvılaşmaya ulaşması için gereken çevrim sayıları Şekil 6'da gösterilmektedir. Burada rölatif sıkılığın kum zeminlerin sıvılaşabilirlikleri üzerindeki etkisini görebilmek mümkündür. Buna göre rölatif sıkılıktaki azalma ile kum zeminin sıvılaşmaya ulaşmasının daha az bir çevrim sayısı gerektirdiği söylenebilir. Yapılan deneylerde zeminlerin sıvılaşma özelliğine ulaşıp ulaşmadığı ya oluşan birim şekil değişirme genliğinin çift yönlü

% 10 değerine eriştiğine yada artan ilave boşluk suyu basıncının başlangıç çevre gerilmesinin % 95'ine eşit olduğuna bakılarak karar verilmiştir.



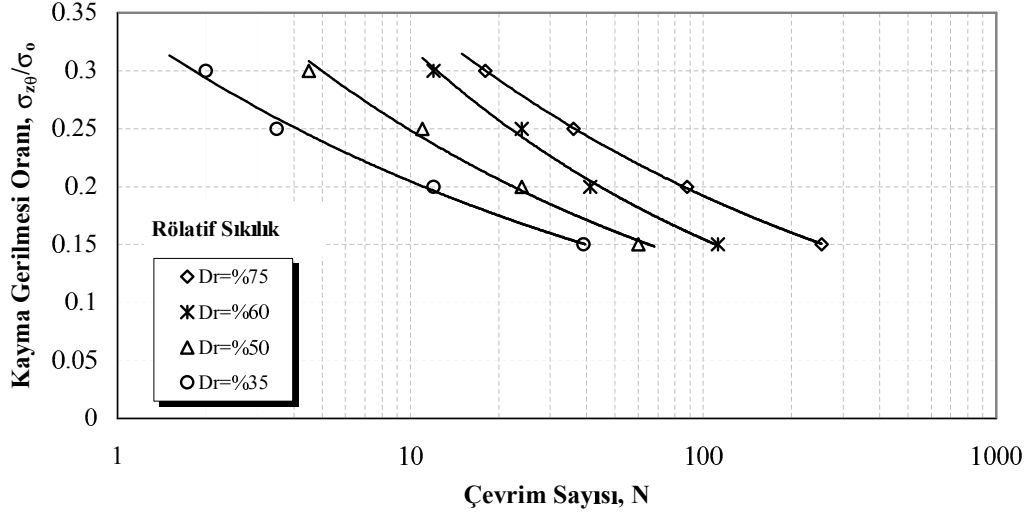
Şekil 5. Tekrarlı yüklemeler altında kum zeminde oluşan histeresis ilmikleri ve gerilme izleri

Sıvılaşmaya etki eden deneysel parametrelerden birisinin de farklı çevre basıncı değerleri olduğu düşünülmektedir. Zeminlerin doğada aynı çevre gerilmesi altında olmadığı düşünülürse bu farklılığın tekrarlı yükler altındaki mukavemet kaybı olayına ne şekilde etkideğinin incelenmesi gerektiği açıktır.

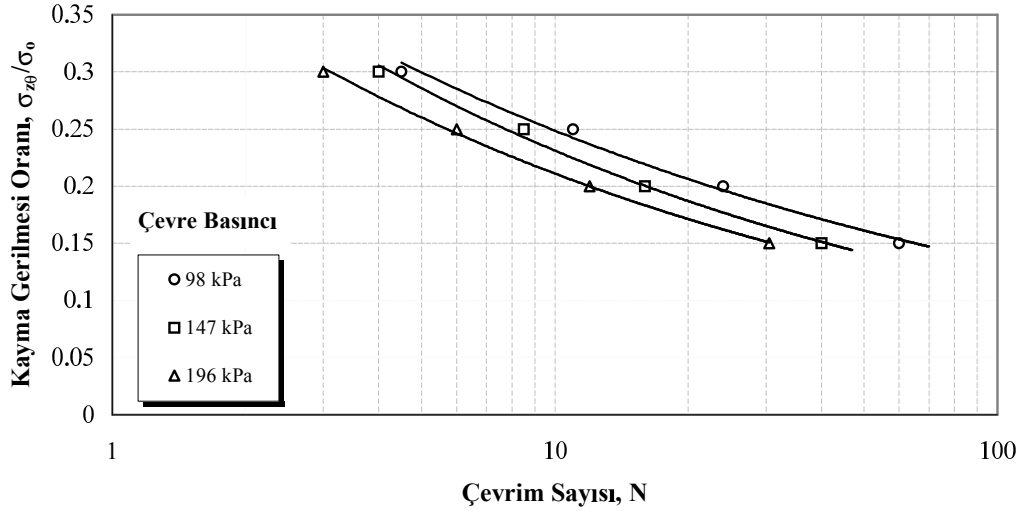
Aynı deney yöntemi uygulanarak izotropik koşullarda farklı çevre gerilmelerinde konsolide edilmiş kum numuneleri belirli bir genlikteki üniform burulmalı gerilme uygulanarak sıvılaşması için gereken çevrim sayıları belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ile çevre gerilmesinin kum zeminlerin kum zeminlerin sıvılaşma özelliklerine olan etkisini gösteren Şekil 7'deki değişim eğrileri elde edilebilir. Bu şekilden de görüldüğü gibi çevre basıncındaki artış kum zeminlerin aynı tekrarlı gerilme genliğinde daha küçük çevrim sayılarında veya aynı çevrim sayısında daha küçük kayma gerilmesi genliklerinde sıvılaşmasına yol açmaktadır. Yani artan çevre basınçları kumların sıvılaşma potansiyelini artırmaktadır.

Doğadaki zeminlerin büyük bir kısmının anizotropik gerilme koşulları altında olduğu düşünüldüğünde bu gerilme farklılığının tekrarlı yükler altındaki zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini dikkate almamak doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Sıvılaşmaya tesir eden bir diğer önemli etkenin de yanal zemin basıncı olduğu bilinmektedir. Nitekim geçmişte farklı zemin türleri ile yapılan bir çok deneysel çalışmada anizotropik gerilme koşullarının statik ve dinamik yükler altındaki zeminlerin davranış özelliklerinin ne şekilde etkilediği araştırılmıştır.

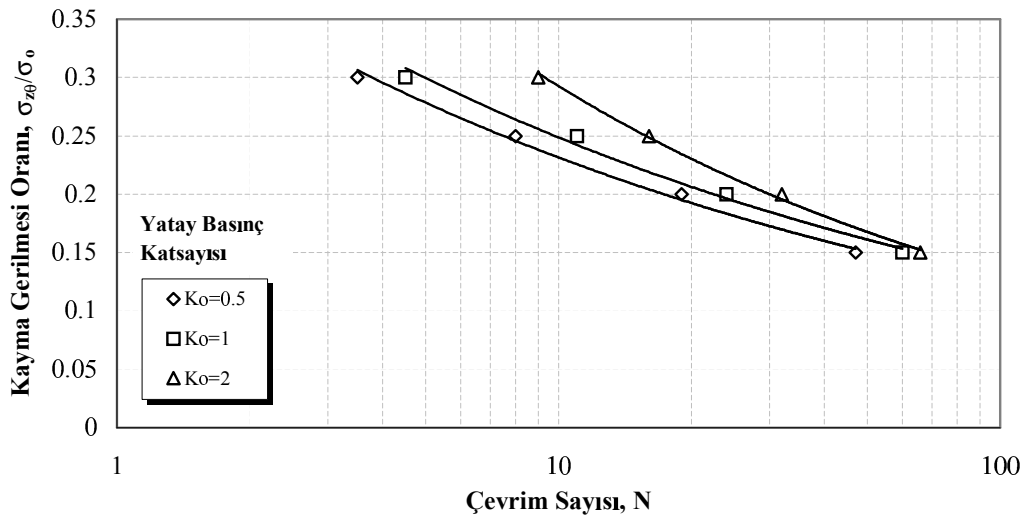
Bu çalışma kapsamında yürütülen ikinci kısım deneylerde yanal zemin basıncının tekrarlı yükler altındaki zeminlerin davranışlarına yaptığı tesirleri belirlemek amacıyla başlangıçta anizotropik koşullarda konsolide edilen kum numunelerin farklı üniform burulmalı gerilmeler altında mukavemet ve sıvılaşma özelliklerinin saptanmasına çalışılmıştır. Şekil 8'de ise farklı yanal zemin basıncı,  $K_0$  değerlerinin kumların sıvılaşma özelliklerine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 6. Tekrarlı yükler altındaki kum zeminlerde sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısının zeminin rölatif sıklığına bağlı olarak değişimi



Şekil 7. Tekrarlı yükler altındaki kum zeminlerde sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısının zemine uygulanan çevre basıncı ile değişimi



Şekil 8. Tekrarlı yükler altındaki kum zeminlerde sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısının yatay zemin basıncı katsayısına bağlı olarak değişimi

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında suya doymun kum zeminlerin drenajsız koşullardaki gerilme – şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla üniform ince kumdan oluşturulan içi boş silindirik numuneler üzerinde değişik başlangıç ve deneysel koşullarda belirli bir sayıda dinamik burulmalı gerilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zemin ve deney özelliklerinde yapılan değişikliklerin bu davranış özelliklerini ne şekilde etkilediği araştırılmaya çalışılmıştır. Buna göre yapılan deneysel çalışmaların sonucunda aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. İçi boş silindirik burulmalı gerilme deney aleti ile diğer laboratuvar dinamik deney aletlerine göre, sahip olduğu birçok avantajlara bağlı olarak, küçük ve büyük deformasyon seviyelerinde, belirli başlangıç ve sınır şartlarında ve birçok zemin türünde monotonik ve tekrarlı deneyler yapabilmek mümkündür. Bu deney sisteminde, oldukça üniform gerilme dağılımları ile zeminlerin gerilme – şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri farklı koşullar altında belirlenebilmektedir.
2. Özellikle suya doymun kum zeminlerin tekrarlı yükler altında ve büyük deformasyon seviyelerinde ortaya koydukları dayanım özellikleri ve bunların yükleme sayısına bağlı olarak değişimi, sıvılaşma, çevrimsel oynaklık ve diğer benzeri olayların meydana gelmesinde belirleyici olmaktadır. Yeterli koşullar oluşturulduğunda tekrarlı yükler altındaki kumlar, içerisindeki boşluk suyu basıncının artışı ile beraber mukavemetini kaybederken, değişik faktörlere bağlı olarak farklı davranış türleri ortaya koyabilmektedirler. Özellikle yükleme sayısının miktarı, çevre basıncının değeri, zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı ve anizotropik koşullar bu davranış türlerinin oluşmasında etken faktörler olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, suya doymun kum zeminler ile gerçekleştirilen deneylerde yukarıda sıralanan faktörlerin kumların dinamik davranışları üzerinde yaptığı etkiler, gerilme izleri de kullanılarak, grafiklerle beraber saptanmaya çalışılmıştır. Bu etken faktörlerin kum zeminlerin dinamik dayanımları üzerinde oldukça belirleyici etkileri olduğu tespit edilmiştir. Bu etkilerin belirlenmesi, zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyellerinin saptanmasında önemli olmaktadır. Yine saptanan bu etkiler geçmişte yapılan birçok benzeri çalışma ile uyumluluk göstermektedir.
3. Yapılan deneysel çalışmalarla Toyoura kumuna ait belirlenen bu özellik ve etkilerin, gelecekte benzeri konularda gerçekleştirilecek deneysel ve teorik model çalışmalarının geliştirilmesi konusunda yararlı olabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Alarkon-Guzman A., Leonards G.A., Chameau J.L. (1988): “Undrained Monotonic and Cyclic Strength of Sands”, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, V.114, p. 1089-1109
- Ansal A., Erken A. (1985): “Killerin Tekrarlı Gerilmeler Altında Davranışı”, Deprem Araştırma Bülteni, V.48, s. 5-81.
- Ashour M., Norris G. (1999): “Liquefaction and Undrained Response Evaluation of Sands from Drained Formulation”, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V.125, p. 649-658.
- Castro G. (1975): “Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands”, ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, V.101, p. 552-569.

- Erken A., Ansal A. (1994): "Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands", The XIII. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, V.1, p. 165-170
- Erten D., Maher M.H. (1995): "Cyclic Undrained Behavior of Silty Sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V.14, p. 115-123.
- Hight D.W., Gens A., Symes M.J. (1983): "The Development of a New hollow Cylinder Apparatus for Investigating The Effects of Principal Stress Rotation in Soils", Géotechnique, V.33, p. 355-383.
- Hyodo M., Hyde A.F.L., Aramaki N. (1998): "Liquefaction of Crushable Soils", Géotechnique, V.48, p. 527-543.
- Ishihara K., Towhata I. (1983): "Sand Response to Cyclic Rotation of Principal Stress Directions as Induced by Wave Loads", Soils and Foundations, V.23, p. 11-26.
- Ishihara K., Yasuda S. (1975): "Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion Under Irregular Excitation", Soils and Foundations, V.15, p. 45-59.
- Konrad J.M. (1990): "Minimum Undrained Strength of Two Sand", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, V.116, p. 932-947.
- Meneses-Loja J., Ishihara K., Towhata I. (1998): "Effects of Superimposing Cyclic Shear Stress on the Undrained Behavior of Saturated Sand Under Monotonic Loading", Soils and Foundations, V.38, p. 115-127.
- Mohamad R., Dobry R. (1986): "Undrained Monotonic and Cyclic Triaxial Strength of Sand", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, V.112, p. 941-958.
- Seed H.B. (1979): "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes", ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, V.105, p. 201-255.
- Sivathayalan S., Vaid Y.P. (1998): "Truly Undrained Response of Granular Soils with No membran-penetration Effects", Canadian Geotechnical J., V.35, p. 730-739.
- Talaganov K.V. (1996): "Stress-Strain Transformations and Liquefaction of Sands", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V.15, p. 411-418.
- Tatsuoka F., Pradhan T.B.S., Yoshi-Ie H. (1989): "A Cyclic Undrained Simple Shear Testing Method for Soils", ASTM Geotechnical Testing Journal, V.12, p. 269-280.
- Vaid Y.P., Chern J.G. (1985): "Undrained Cyclic Behaviour of Saturated Sand", Proc. of ASCE Annual Convention, Session on the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, p. 74-91
- Verdugo R., Ishihara K. (1996): "The Steady State of Sandy Soils, Soils and Foundations", V.36, p. 81-92.
- Yoshimine M., Özay R., Sezen A., Ansal A. (1999): "Undrained Plane Strain Shear Tests on Saturated Sand Using a Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus", Soils and Foundations, V.39, p. 131-136.