

# **Gevşek ve sıkı siltli kum zeminlerin durum parametresi üzerindeki ince dane etkisi**

## **The effect of fine content on state parameter of loose and dense silty sands**

Devrim Erdoğan<sup>(1)</sup>, Muhammed Mahmudi<sup>(1\*)</sup>

<sup>(1)</sup>*Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35100, Türkiye*

Received date: **15.12.2024**; Accepted date: **26.12.2024**; Published date: **28.12.2024**

**Turkish Journal of Hydraulic (Türk Hid. Der.)**, Vol (Cilt): **8**, Number (Sayı): **2**, Page (Sayfa), **16-29**, (2024)

e-ISSN: **2636-8382**

SLOI: <http://www.dergipark.org.tr>

\*Correspondence e-mail: [mu.mahmudi@hotmail.com](mailto:mu.mahmudi@hotmail.com)

### **Özet**

Zeminlerin tipik davranışları çerçevesinde akma davranışı, birçok geoteknik hasara sebep olmaktadır. Bu durum, sıvılaşma ve yüksek deformasyonlara neden olması açısından daha da önemlidir. Wachusett ve San Fernando barajlarında görülen akma göçmeleri, bu davranışı büyük ölçüde temsil eden gerçek örneklerdir. Bu çalışmada, gevşek ( $D_r = \%25$ ), ve sıkı ( $D_r = \%75$ ) sıklığındaki suya doygun siltli kum zeminlerin kayma dayanımı davranışı üzerindeki ince dane etkisi durum parametresi ile bağdaştırılarak incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak, temiz kum ile  $\%10$ ,  $\%20$ ,  $\%30$ ,  $\%40$  ve  $\%50$  oranlarında silt karıştırılmış kum örnekleri üzerinde konsolidasyonlu drenajsız (CU) statik üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 50, 100 ve 200 kPa başlangıç efektif konsolidasyon basınçlarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, drenajsız kayma dayanımı davranışının ve aşırı boşluk suyu basıncı değişiminin ince dane içeriğinden önemli ölçüde etkilendiğini durum parametresi ile birlikte ortaya koymuştur. Gevşek örnekler için elde edilen durum parametre değerleri pozitif bölgede yer almakta olup sıkışma türünde bir davranış ve sıkı örneklerde durum parametre değerleri negatif bölgede yer almakta olup genişleme türünde bir davranış sergilemektedir. Yapılan değerlendirmeler, ince dane içeriğinin, zemin dokusunun değiştirdiğini ve eşik ince dane değerinin iri dane matrisi veya ince dane matrisi davranışı anlamında önemli olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler** : Durum parametresi, Kayma dayanımı, Siltli kum.

## Abstract

In the context of typical soil behaviors, flow behavior causes many geotechnical failures. This is even more significant because it can lead to liquefaction and high deformations. The flow slides observed in the Wachusett and San Fernando dams are real examples that largely represent this behavior. In this study, the effect of fines content on the shear strength behavior of saturated loose ( $D_r = 25\%$ ) and dense ( $D_r = 75\%$ ) silty sands has been examined in conjunction with the state parameter. For this purpose, consolidated undrained (CU) static triaxial compression tests were performed on sand samples mixed with 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% silt and clean sand. The tests were conducted at initial effective consolidation pressures of 50, 100, and 200 kPa. The test results showed that the undrained shear strength behavior and the change in excess pore water pressure were significantly affected by fines content along with the state parameter. The state parameter values obtained for loose samples are in the positive region, indicating a flow behavior, while the state parameter values for dense samples are in the negative region, indicating dilative tendency behavior. The evaluations made show that the fines content changes the soil fabric and that the threshold fines value is important in terms of the behavior of coarse-grained matrix or fine-grained matrix soils.

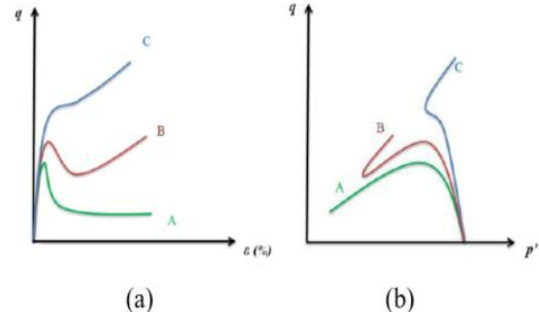
**Keywords:** State parameter, Shear strength, Silty sands.

## 1. GİRİŞ (Introduction)

Tipik olarak Akma, sınırlı akma ve sertleşme olarak tanımlanan üç farklı drenajsız kayma dayanımı davranışı izotrop olarak konsolide edilmiş kum örnekler üzerinde yapılan drenajsız statik üç eksenli basınç deneylerinden gözlenmektedir [1, 2]. Şekil 1'de görülen bu davranışlar, konsolidasyon aşaması sonrası ve kesme aşaması öncesi başlangıç durumuna önemli ölçüde bağlıdır. Bu kapsamda yapılan birçok deneysel çalışmada, drenajsız kayma dayanımı davranışının, konsolidasyon sonrası farklı başlangıç durumlarından (ortalama efektif konsolidasyon basıncı, ( $p_0'$ ), başlangıç boşluk oranı ( $e_0$ ), başlangıç deviator gerilmeleri) etkilendiği görülmüştür [3, 4, 5, 6, 7]. Şekil-1'de görüldüğü üzere gevşek örneklerde (A Örneği) düşük kayma birim deformasyonlarında boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte bir pik drenajsız kayma gerilmesi ( $q_{pik}$ ) göstermekte olup daha sonra sıkışma eğilimi (Contractive Tendency) sergilemektedir. Sıkışma eğilimi sırasında artan aşırı boşluk suyu basınçları ortalama efektif gerilme düzeyinin azalmasına ve buna bağlı olarak deviator gerilme düzeyinin de azalmasına neden olmaktadır. Deviator gerilmeleri azalmaya devam ederek yüksek deformasyonlarda rezidüel bir değere ulaşmaktadır [8]. Sözü edilen bu davranış sırasında, deviator gerilmelerde ani azalma ile birlikte yüksek kayma birim deformasyonları (Strain Softening) meydana geldiği için bu davranış akma davranışı (Flow Behavior) olarak adlandırılmaktadır. Zeminlerin tipik davranışları çerçevesinde akma davranışı, neden olduğu geoteknik hasarlar anlamında daha da önemlidir. Çünkü sıvılaşmaya ve yüksek deformasyonlara neden olmaktadır. Nerlerk berm [9, 10], Fraser River delta [11, 12], Jamuna River-deniz altı akma türü kaymaları [13, 14], Wachusett [15] ve

San Fernando [16, 17] barajlarında görülen akma göçmeleri bu davranışı büyük ölçüde temsil eden gerçek örneklerdir.

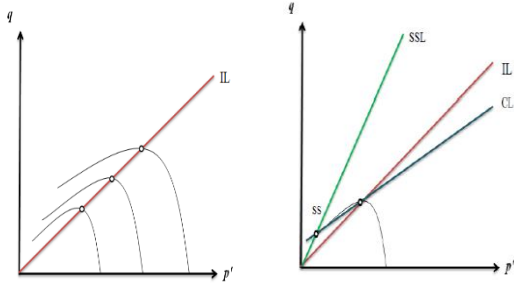
Dolayısıyla ile akma sıvılaşması davranışı üzerinde yapılan çalışmalar bu davranışın incelenmesi ile sonuçlanmaktadır. Literatürde bu davranış farklı ifadelerde, akma deformasyonu [2] ve statik sıvılaşma [18] olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, duraysızlık (Instability), bu tür davranışların tanımlanması için kullanılan ortak bir terim olarak tanımlanmaktadır.



**Şekil 1.** Temiz kumların monotonik drenajsız kayma davranışı

Gevşek ve orta sıkı kum zeminlerin akma ve sınırlı akma davranışları ile ilgili olarak  $p'$ - $q$  düzleminde efektif gerilme izlerine bakıldığında, deviatorik gerilme değerinde geçici bir pik değer görülmektedir (Şekil 2). Bu gerilme değeri  $q$ - $e$  düzleminde geçici sıkışma eğilimi için başlangıç noktasıdır. Bu noktadan sonra faz dönüşüm noktasına kadar geçici bir akma eğilimi (pre-failure flow) gözlenmekte, faz transformasyon noktasından sonra sertleşme eğilimi ortaya çıkmaktadır. Sladen vd. (1985), tarafından gevşek ve orta sıkı kum zeminlerin drenajsız gerilme

izlerinde geçici olarak gözlenen bu pik gerilme durumu, duraysızlık durumu olarak tanımlanmıştır [19]. Ayrıca, Şekil 2'de görüldüğü gibi duraysızlık çizgisi (Instability Line, IL) p'-q düzleminde farklı efektif konsolidasyon basınçları altında elde edilen gerilme izlerinin pik noktalarından ve merkezden geçen bir doğrusal çizgi olarak tanımlanmaktadır [20, 21]. Duraysızlık çizgisi Leong vd. (2000) tarafından pik gerilme çizgisi (Peak Stress Line, PSL) ve Orense vd. (2004) tarafından göçme başlangıç çizgisi (failure initiation line) olarak ta tanımlanmıştır [22, 23].



Şekil 2. Durağan çizgisi, duraysızlık çizgisi ve göçme çizgisinin belirlenmesi

Klasik zemin mekaniği kapsamında ise, sıkılık kavramı, kumlu zeminlerin durumunu belirten bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıkılık, kum zeminin iki sınır boşluk oranına ( $e_{max}$ ,  $e_{min}$ ) göre relatif olarak ifade edilen bir indeks değeridir, başka bir deyişle bir durum parametresidir. Ancak, durumu tanımlarken, ortalama efektif gerilme etkisi ile birleştirilmemiştir. Ancak bilindiği üzere, zeminlerin mekanik davranışları, başlangıç konumlarındaki parametrelerine son derece bağlıdır. Bu anlamda, kumlu zeminlerin başlangıç durumları, başlangıç boşluk oranı ( $e_0$ ) ve efektif gerilme ( $p'$ ) düzeyi ile tanımlanması gerekmektedir. Boşluk oranı ve efektif gerilme düzeyi kavramlarının birleştirilmesi ile ancak tam anlamıyla tanımlanabilen "durum" kavramı ilk olarak kritik durum mekaniği çerçevesinde ortaya konmuştur. Bu kapsamda, Schofield ve Wroth (1968) kritik durumu zeminlerin mevcut durumlarına göre belirli bir sıkılıkta ve efektif gerilmeler altındaki davranışlarının tahmini için referans olarak almıştır [24].

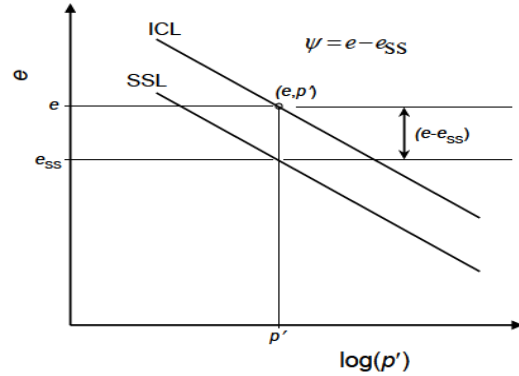
Buna göre, zemin durumu durağan (veya kritik) durumundan gevşek ise (SSL üstünde) sıkışma, kritik durumundan sıkı ise (SSL altında) genişleme davranışı göstermektedir. Böylece, belli bir başlangıç sıkılığı ve efektif gerilme düzeyi altında zemin davranışlarının açıklanabilmesi için durum parametresi [25], durum indeksi [8] ve modifiye durum parametresi [26] gibi çeşitli durum parametreleri alternatif olarak geliştirilmiştir.

## 2. DURUM PAAMETRESİ (State Parameter)

Kritik durum zemin mekaniği kapsamında, kumlu bir zeminin mekanik davranışı, zemin başlangıç durumunun (başlangıç boşluk oranı ve efektif gerilme durumu ile belirlenen durumun) durağan durum çizgisine (SSL) yakınlığı ile ifade edilmektedir [27].

Başka bir deyişle, durağan durum çizgisinden (SSL) aynı uzaklıkta olan zeminler benzer davranışlar sergilemektedir. Bu mantıktan yola çıkarak durum parametresi ( $\psi$ ) yarı ampirik bir parametre olarak Been and Jeffries (1985) tarafından tanımlanmıştır. Been ve Jeffries (1985) tarafından durağan durum çizgisi (SSL) zeminlerin drenajsız davranışlarının tahmin edilmesi için referans konum olarak alınmıştır [25].

Burada boşluk oranı ve gerilme seviyesi etkisi birleştirilerek durum parametresi ( $\psi$ ) tanımlanmıştır. Klasik zemin mekaniğinde ise sıkılık kavramı içerisinde tanımlanan boşluk oranının gerilme seviyesi ile ilişkisi bulunmamaktadır. Durum parametresi aynı ortalama efektif gerilme düzeyinde ( $p'$ ), mevcut durum ile durağan durumdaki (SS) boşluk oranları arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Durum parametresinin tanımlanması, (Been ve Jeffries, 1985)

$$\psi = e - e_{ss}$$

$\psi$  = Durum Parametresi

$e$  = Mevcut durumda örneğin boşluk oranı

$e_{ss}$  = Durağan durumunda boşluk oranı

Konsolidasyon sonunda elde edilen  $\psi$  değerine göre, zeminin kesme sırasındaki kayma gerilmesi-kayma birim deformasyon davranışı tahmin edilebilmektedir:

- Durum parametresi pozitif olduğunda ( $\psi > 0$ ) zemin sıkışma (contractive) davranışı göstermekte olup akma sınılaşmasına (limited flow to flow) duyarlı olabilir.

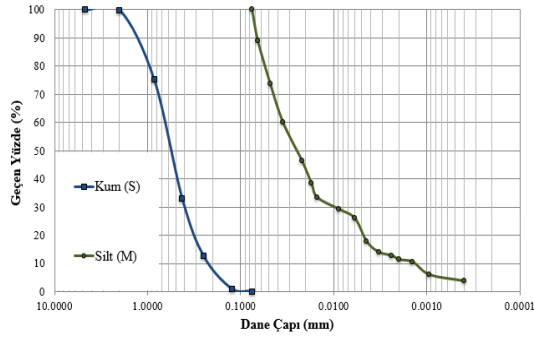
- Durum parametresi negatif olduğunda ( $\psi < 0$ ) zemin genişleme (dilative) davranışı göstermekte olup akma sıvılaşmasına duyarlı değildir (non-flow), aksine kayma dayanımı ve rijitliği artış göstermektedir.

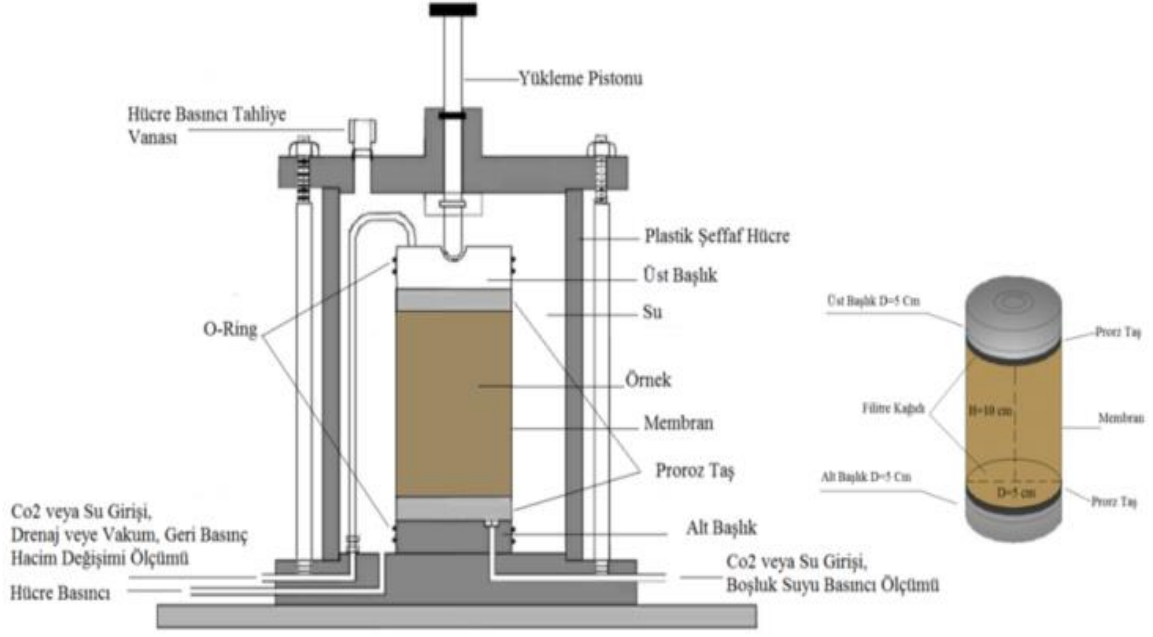
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM (Materials and Methods)

#### 3.1. Malzeme özellikleri

Bu çalışmada, kum-silt karışımlarının kaba dane matrisini temsil etmek için Gölarmara kumu kullanılmıştır. Dane çapı dağılım eğrisi incelendiğinde, kullanılan kumun zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre kötü derecelenmiş temiz kum (SP) olarak belirlenmiştir.

Kum malzemesinin No 200 elek altındaki ince dane oranı %0.21 olarak tespit edilmiştir. Bu oran düşük olmasına rağmen, karışım örneklerinde ince dane oranını etkilememesi için kullanılmamıştır. İnce dane matrisini temsil etmek amacıyla, Aydın ili Söke ilçesinden temin edilen doğal silt ince malzeme olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, %10, %20, %30, %40 ve %50 silt içeren kum-silt karışım örnekleri üzerinde farklı efektif konsolidasyon basınçları (50, 100 ve 200 kPa) altında konsolidasyonlu drenajsız (cu) statik üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışım örnekleri, laboratuvar ortamında gevşek ( $Dr=75$ ) ve sıkı ( $Dr=75$ ) rölatif sıklıkta hazırlanmıştır.





Şekil 5. Örnek boyutları ve üç eksenli deney aleti şeması

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (Research Findings and Discussion)

##### 4.1. Kayma Gerilmesi-Eksenel Birim Deformasyon Davranışları Üzerindeki Etkisi

Farklı yüzdelerde non-plastik silt içeren temiz kum karışım örnekleri üzerinde gerçekleştirilen CU üç eksenli basınç deneylerine ait kayma gerilmesi-eksenel birim şekil değiştirme davranışları, gevşek ve sıkı örnekler için sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7 ile gösterilmektedir. Bu şekillere göre, gevşek sıklıkta hazırlanmış temiz kum örnekleri, her üç efektif konsolidasyon basıncı altında akma türünde gerilme-deformasyon davranışı sergilemiştir. Bu davranış, Vaid ve ark. (1999) tarafından MT yöntemi ile hazırlanan örneklerin davranışı ile tutarlıdır [37].

Aynı davranış, %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde daha belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Öte yandan, %40 ve %50 oranında non-plastik silt içeren karışımların gerilme-deformasyon davranışları sınırlı akma şeklinde gelişmiştir. Sıkı sıklıkta hazırlanmış olan temiz kum örnekleri ise her üç efektif konsolidasyon basıncı altında sertleşme türünde gerilme-deformasyon eğilimi göstermiştir. Ancak, %40 ve %50 oranında non-plastik silt içeren karışımlarda sertleşme yönündeki gerilme-deformasyon eğrilerinin şekilleri diğerlerinden farklıdır. Bu örnekler, sertleşme ile birlikte bir miktar sıkışma eğilimi göstermektedir.

Gerilme-deformasyon eğrileri pik ve rezidüel açılardan incelendiğinde, gevşek sıklıkta hazırlanmış temiz kum ve non-plastik silt içeren karışım örneklerinde (özellikle %10, %20 ve %30 silt oranlarında) pik ve rezidüel kayma gerilmeleri arasında belirgin bir fark olduğu görülmüştür. Ancak sıkı örneklerde, rezidüel kayma gerilmesi değeri az da olsa temiz kum ve %10 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde gözlemlenmiştir.

Dolayısıyla, sıkı örneklerde akma türünde gerilme-deformasyon davranışı gözlenmemiştir. Bu örneklerde, genişleme hacim değişimi eğilimine bağlı olarak aşırı boşluk suyu basıncı azalmalarından kaynaklanan efektif gerilme artışları ve buna bağlı olarak sertleşme gerilme-deformasyon davranışı görülmüştür.

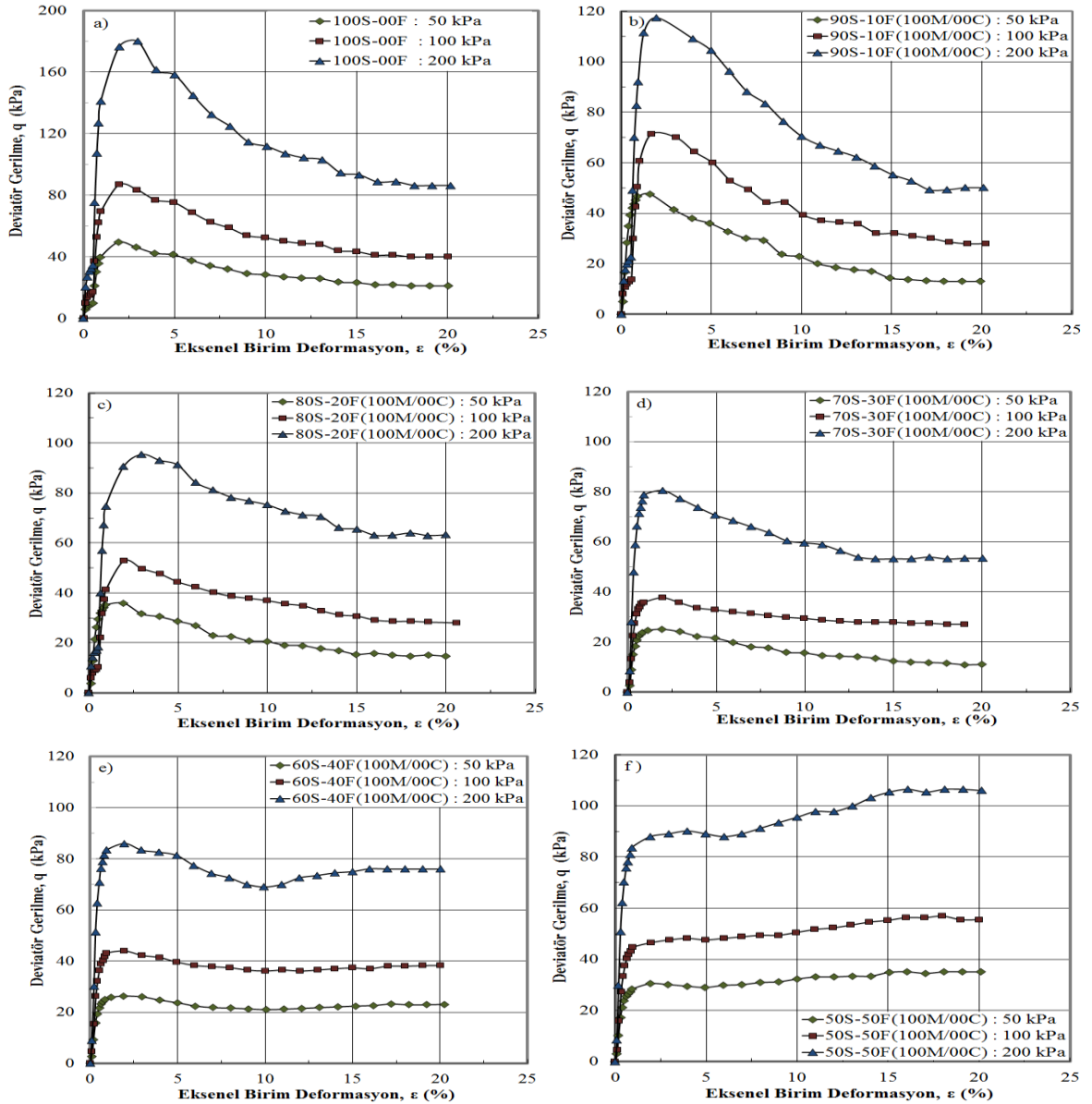
Gevşek örneklere ait deneysel veriler, hem temiz kumda hem de %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde, pik ve rezidüel kayma gerilmeleri arasındaki farkı net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu fark ne kadar büyükse, deney örneğinin akma türünde gerilme-deformasyon davranışı sergileme olasılığı o kadar yüksektir. %40 ve %50 non-plastik silt içeren örneklerde ise pik ve rezidüel değerler arasındaki fark azalmıştır.

Bu da bu örneklerin kırılgenlik (brittleness) eğilimlerinin, yani akma türünde gerilme-deformasyon davranışı gösterme olasılıklarının sınırlı olduğunu göstermektedir.

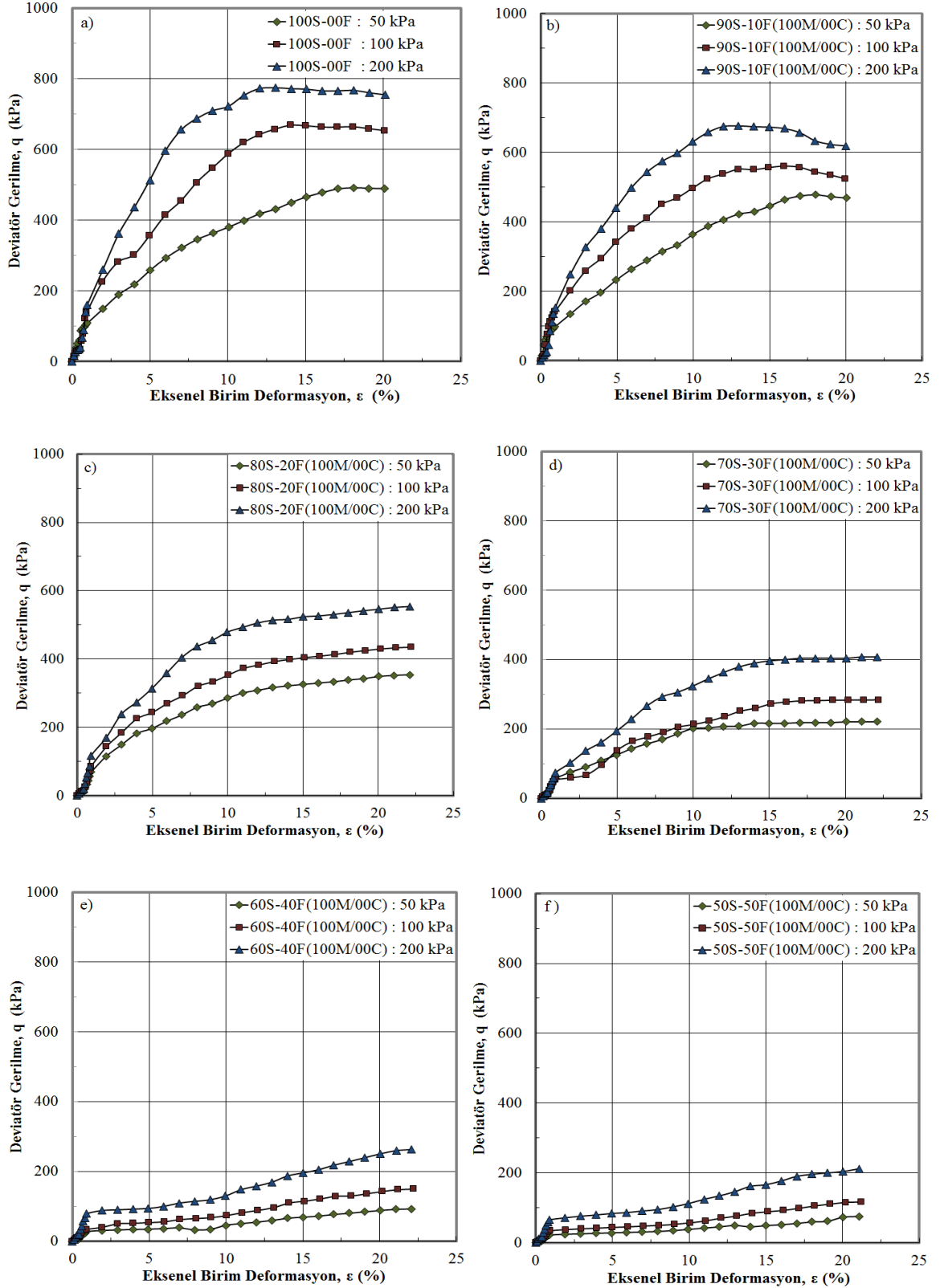
Gevşek örneklerde, efektif konsolidasyon basıncından bağımsız olarak, tüm karışım örneklerinde kayma gerilmeleri, yaklaşık %1.0 - %3.0 eksenel birim deformasyonlarda pik değere ulaşmıştır. % 0, %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren örneklerde kayma gerilmeleri eksenel birim deformasyonla birlikte sürekli azalmış (akma tipi), %40 silt içeren örneklerde önce azalıp sonra bir miktar artmış (sınırlı akma), %50 silt içeren örneklerde ise sınırlı akma hakim olmakla birlikte, sertleşme eğiliminin daha belirgin hale gelmeye başladığı görülmüştür.

Tüm örneklerde kayma gerilmeleri, %10-%15 eksenel birim deformasyon seviyelerinden itibaren neredeyse

sabit bir değerde kalmıştır. Sıkı örneklerde ise, efektif konsolidasyon basıncından bağımsız olarak, %0 ve %10 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde kayma gerilmeleri, %10-%15 eksenel birim deformasyon seviyelerinde pik değere ulaşmış ve ardından bir miktar azalma göstermiştir. %20, %30, %40 ve %50 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde ise eksenel birim deformasyon arttıkça kayma gerilmeleri sürekli artmış (genişleme davranışı, sertleşme tipi) ve yaklaşık %20 eksenel birim deformasyon seviyelerinde pik değere ulaşmıştır. Tüm örneklerde kayma gerilmeleri %20 eksenel birim deformasyon seviyelerinden itibaren nispeten sabit bir değerde seyretmişlerdir.



Şekil 6. Gevşek sıklıkta hazırlanmış kum-non-plastik silt karışımlarına ait kayma gerilmesi – eksenel birim şekil değiştirme davranışları

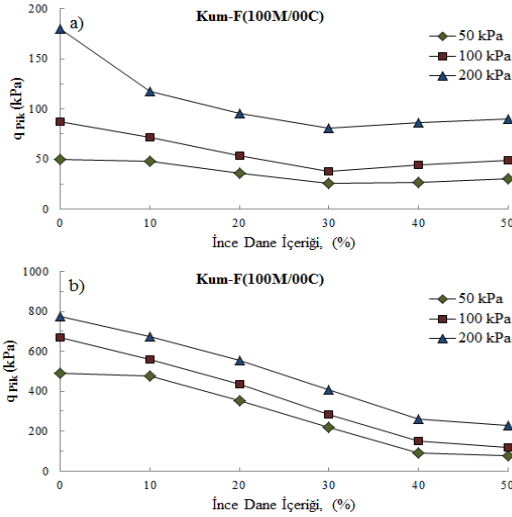


Şekil 7. Sıkı sıkılıkta hazırlanmış kum-non-plastik silt karışımlarına ait kayma gerilmesi – aksel birim şekil değiştirme davranışları

#### 4.2. Pik Deviatör Gerilme Değeri Üzerindeki Etkisi

Şekil 8’de sırasıyla gevşek ve sıkı karışım örneklerine ait pik deviatör gerilme ( $q_{pik}$ ) değerlerinin non-plastik silt içeriği ve efektif konsolidasyon basıncına göre değişimleri gösterilmektedir. Bu verilere göre; Efektif konsolidasyon basıncının artmasıyla birlikte, hem gevşek hem de sıkı örneklerde pik kayma gerilmeleri artış göstermiştir. Ancak, gevşek örneklerde bu artışın özellikle 100 kPa’dan daha yüksek efektif konsolidasyon basınçlarında daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Gevşek örneklerde, sabit efektif konsolidasyon basıncında non-plastik silt oranının artmasıyla birlikte pik deviatör gerilme değerlerinin %30 ince dane içeriğine kadar azaldığı, ardından ise bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Sıkı örneklerde ise, sabit efektif konsolidasyon basıncında non-plastik silt oranının artmasıyla birlikte pik deviatör gerilme değerlerinin %40 ince dane oranına kadar azaldığı ve %50 ince dane oranında yeniden bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Bu davranış, gevşek örneklerde ince dane matrisinin kayma dayanımı kontrolünü sıklara göre daha düşük ince dane içeriklerinde ele geçirebildiğini göstermektedir. Sıklık arttıkça, iri dane matrisinin hakimiyeti daha yüksek ince dane içeriklerine kadar sürebilmektedir. Bu şekilde, deneysel veriler gerilme-deformasyon davranışını açısından %30 ile %40 arasında non-plastik silt içeriğinin bir eşik değeri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu eğilim, pik değerler açısından da belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Gevşek örnekler üzerinde yapılan literatürdeki deneysel çalışmalar, bu davranışı güçlü bir şekilde desteklemektedir [38, 39, 40, 41, 42, 43, 44].



Şekil 8. Pik deviatör gerilme değerlerinin non-plastik silt içeriği ve efektif konsolidasyon basıncına göre değişimleri, a) Gevşek örnekler, b) Sıkı örnekler.

Şekil 9’da farklı efektif konsolidasyon basınçları altında, ince dane içeriğinin artışıyla birlikte gevşek ve sıkı karışım örneklerinde temiz kuma oranla (temiz kuma göre normalize edilmiş) pik deviatör gerilme değerlerindeki değişimler gösterilmektedir. %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde bu değişimler %97-%45 arasında iken, %40 ve %50 non-plastik silt içeren örneklerde %16-%34 arasında değişmektedir.

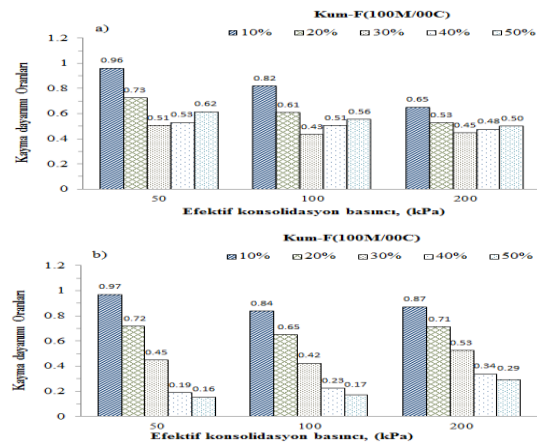
#### 4.3. Aşırı Boşluksuyu Basıncı Ve Efektif Gerilme İzi Davranışları Üzerindeki Etkisi

50, 100 ve 200 kPa efektif konsolidasyon basınçları altında gevşek ve sıkı durumlar için oluşan aşırı boşluksuyu basıncı oranlarının ( $\Delta u/p_0'$ ) eksenel birim deformasyona göre değişimleri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11’de, verilmiştir.

Deneysel verilere göre, hem gevşek hem de sıkı durumda non-plastik silt içeriği, drenajsız yükleme sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının seviyeleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gevşek ve sıkı örneklerin sergiledikleri farklılıklar, iki sıklık durumunda gösterilen farklı hacim değişimi eğilimlerinden kaynaklanmaktadır.

Sıkı karışım örnekleri, gevşeklere göre daha yüksek genişleme hacim değişimi eğilimi göstermektedir. Gevşek örneklerde, ince dane içeriğinin artışı, karışım örneklerini genişleme yönünde hacim değişimi eğilimine yöneltmiştir. Sıkı örneklerde ise, ince dane içeriğinin artışı, karışım örneklerinde sıkışma yönünde hacim değişimi eğilimine neden olmuştur.

Gevşek örneklerde, efektif konsolidasyon basıncından bağımsız olarak, non-plastik silt içeriği %0 (temiz kum)’dan %30’a kadar yükseldikçe aşırı boşluk suyu basıncı oranlarında ( $ru$ ) bir artış gözlenmiştir.



Şekil 9. Farklı efektif konsolidasyon basınçlarında, temiz kuma oranla pik deviatör gerilme değerlerinin değişimleri, a) Gevşek örneklerde, b) Sıkı örneklerde



Başka bir deyişle, non-plastik silt içeriğindeki artışla birlikte, karışım örneklerinin sıkışma eğilimleri (contractive volume change tendency) ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncı üretme eğilimleri artmıştır. Bu durum, iri ve ince daneler arası boşluk oranı kavramları ile Thevanayagam (2003)'te gösterilen şablon çerçevesinde açıklanabilir [45].

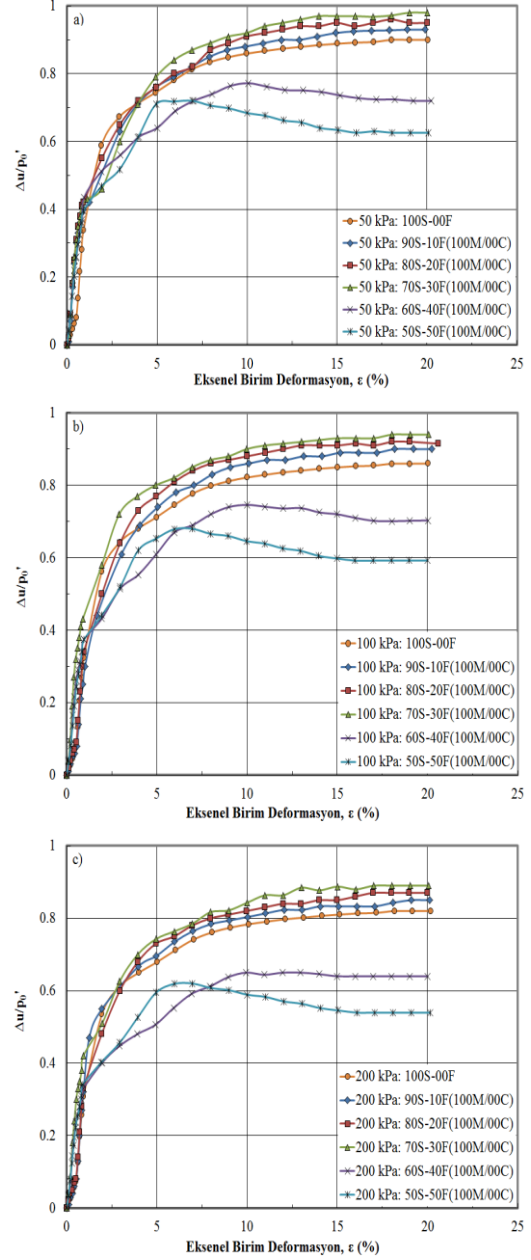
Non-plastik silt içeriği %40-%50 oranlarına yükseldikçe, aşırı boşluk suyu basıncı oranlarında bir düşüş gözlemlenmektedir. Başka bir deyişle, %40 ve %50 non-plastik silt içeren örneklerin boşluk suyu basıncı üretme eğilimleri daha düşüktür.

Bu örneklerin aşırı boşluk suyu basıncı davranışlarına bakıldığında, önce bir miktar sıkışma ve ardından sınırlı düzeyde genişleme eğilimi sergiledikleri söylenebilir. Sıkı durumda, %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren karışım örnekleri, temiz kuma benzer aşırı boşluk suyu basınçları gelişimi sergilemişlerdir.

Şöyle ki, aşırı boşluk suyu basınçları %2-%3 eksenel birim deformasyon seviyelerine kadar artmış,  $r_u = %40$  seviyelerine ulaşmış ve ardından azalmıştır. Farklılık ise %40 ve %50 non-plastik silt içeren örneklerde ortaya çıkmıştır; bu örneklerde, yaklaşık %7-%10 eksenel birim deformasyon seviyelerine kadar aşırı boşluk basınçlarında bir artış (%40 için  $r_u = 0.50$ , %50 için  $r_u = 0.60$ ) ve ardından bir azalma gözlemlenmiştir.

Bununla birlikte, tüm örneklerde aşırı boşluk suyu basınçları %20-%22 eksenel birim deformasyon sonrası hemen hemen sabit seviyelerde kalmıştır. Sıkı durumda, 50 kPa ve 100 kPa efektif konsolidasyon basınçları altında, temiz kum ve %10, %20, %30 non-plastik silt içeren örneklerde aşırı boşluk suyu basıncı oranları  $r_{u(kum)} = r_{u(%10)} > r_{u(%20)} > r_{u(%30)}$  şeklinde bir eğilim sergilemektedir. Ancak, 200 kPa efektif konsolidasyon basıncı altında, aşırı boşluk suyu basıncı oranları yaklaşık olarak  $r_{u(kum)} = r_{u(%10)} = r_{u(%20)} = r_{u(%30)}$  şeklinde bir eğilim göstermektedir. Başka bir deyişle, yüksek efektif konsolidasyon basınçları altında, benzer aşırı boşluk suyu basıncı davranışı sergileyen iki grup ortaya çıkmaktadır.

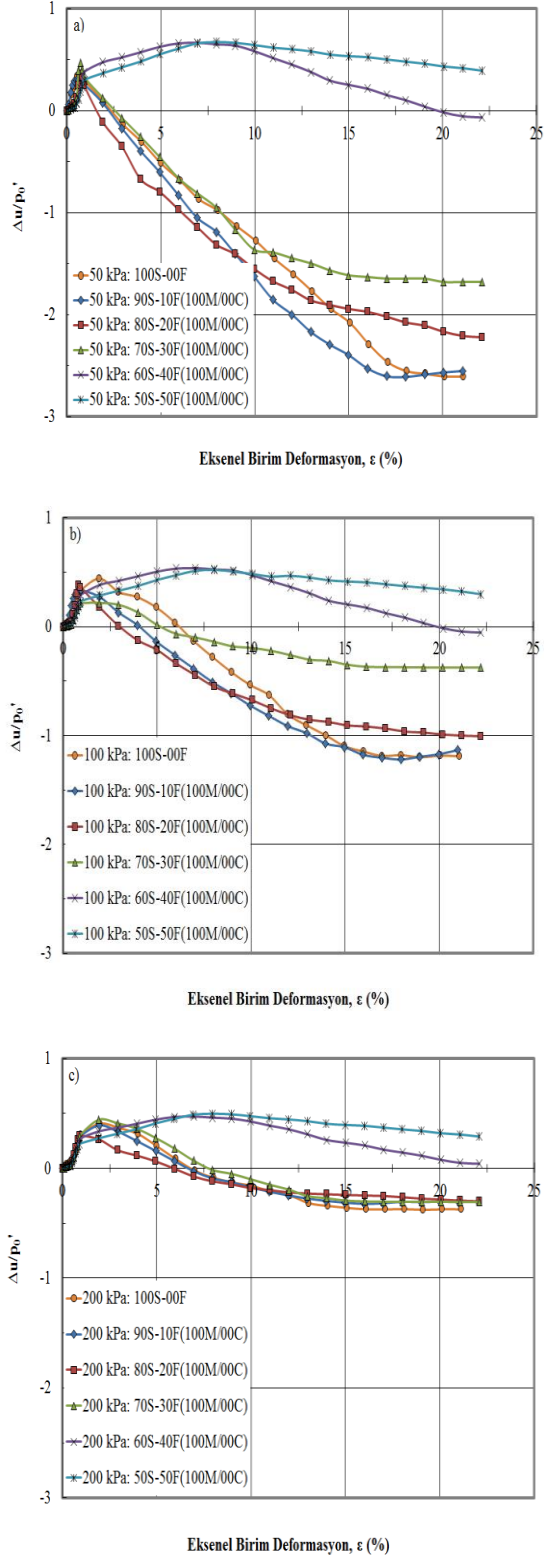
Aşırı boşluk suyu basıncı benzer olan ilk grup %10, %20 ve %30 silt içeren örnekler, ikinci grup ise %40 ve %50 non-plastik silt içeren örneklerdir. Sıkı durumda, efektif konsolidasyon basıncından bağımsız olarak, temiz kum ve %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren örneklerde önce bir miktar sıkışma ve ardından sınırlı düzeyde genişleme eğilimi gözlemlenmiştir. Bu örneklerde, aşırı boşluk suyu basıncı oranlarında ( $r_u$ ) %1-%2 eksenel birim deformasyon seviyelerine kadar bir miktar artış (+0.25 ve +0.50 oranlarında) olmuş, ardından %15-%20 eksenel birim deformasyon seviyelerine kadar azalma ve sonrasında hemen hemen sabit seviyelerde seyretme durumu görülmüştür.



Şekil 10. Gevşek sıkılıkta hazırlanmış kum-non-plastik silt karışımlarına ait normalize boşluk suyu basıncı oranı– eksenel birim şekil değiştirme davranışı.

Başka bir deyişle, bu örneklerde non-plastik silt içeriğindeki artış ile birlikte karışım örneklerinin sıkışma eğilimleri ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncı üretme eğilimleri azalmıştır.

Non-plastik silt içeriği arttıkça (%40-%50), aşırı boşluk suyu basıncı oranlarında %5-%10 eksenel birim deformasyon seviyelerine kadar bir artış ve ardından %20 eksenel birim deformasyon seviyelerine kadar bir miktar azalma eğilimi gözlemlenmiştir, sonrasında ise



**Şekil 11.** Sıkı sıklıkta hazırlanmış kum-non-plastik silt karışımlarına ait normalize boşluk suyu basıncı oranı–eksenel birim şekil değiştirme davranışı.

hemen hemen sabit seviyelerde kalmıştır. Başka bir deyişle, aşırı boşluk suyu basıncı eğilimlerine bakıldığında, sıkı durumda %40 ve %50 non-plastik silt içeren örneklerin sıkışma ve sonrasında genişleme eğilimleri gösterdiği anlaşılmaktadır.

Hem gevşek ve hem de sıkı örneklerde, efektif konsolidasyon basıncından ve non-plastik silt içeriğinden bağımsız olarak, tüm karışımlar yaklaşık olarak %1 ekstenel birim deformasyona kadar benzer aşırı boşluksuyu basıncı davranışı (sıkışma yönünde) sergilemişlerdir.

%1 ekstenel birim deformasyonda gevşek örneklerde ulaşılan aşırı boşluksuyu basıncı oranı değeri yaklaşık  $\Delta u/p_0' = 0.40$  iken sıkı örneklerde oluşan oran  $\Delta u/p_0' = 0.25-0.50$  arasında'dır. Ekstenel birim deformasyon seviyesi yükseldikçe efektif konsolidasyon basıncı ve non-plastik silt içeriğinin aşırı boşluksuyu basıncı davranışı üzerindeki etkisi belirginleşmeye başlamaktadır. Bu davranışa göre, %1 deformasyon seviyesine kadar aşırı boşluk suyu basıncı davranışı sıklıktan bağımsızdır.

#### 4.4. Pik Aşırı boşluksuyu basıncı üzerindeki etkisi

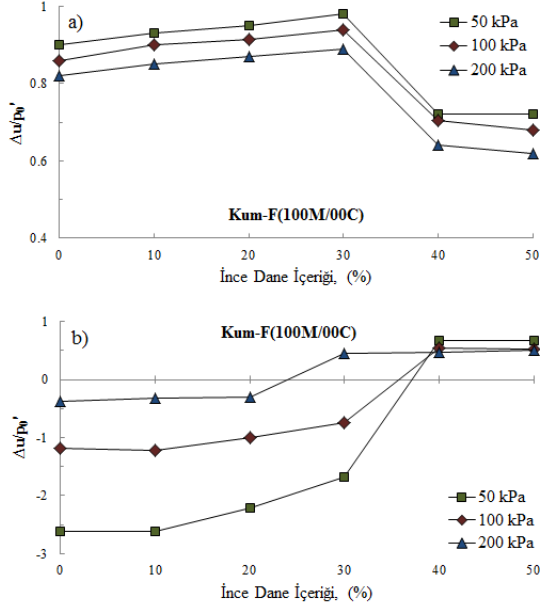
Şekil 12'de gevşek ve sıkı non-plastik silt içeren örneklerinde oluşan pik aşırı boşluk suyu basıncı oranları verilmiştir. Bu şekiller dikkate alındığında; 50, 100 ve 200 kPa efektif konsolidasyon basınçları altında non-plastik silt içeriğinin değişimiyle birlikte boşluk suyu basıncı üretme eğilimlerinde benzer bir davranış gözlemlenmiştir.

Şöyle ki, gevşek temiz kumun aşırı boşluk suyu basıncı oranları ( $\Delta u/p_0'$ ) 0.80 ile 0.90 arasında görülmüştür. %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren örnekler, temiz kuma kıyasla daha yüksek boşluk suyu basıncı üretmiştir. Bu örneklerde aşırı boşluk suyu basıncı oranları ( $\Delta u/p_0'$ ) 0.83 ile 0.95 arasında değişmektedir. %40 ve %50 silt içeren örnekler ise daha az boşluk suyu basıncı üretme kapasitesine sahip çıkmıştır.

Bu davranış, %10, %20 ve %30 ince dane içeren örneklerin temiz kuma kıyasla daha yüksek sıkışma eğilimine (contractive volume change tendency) sahip olduğunu, %40 ve %50 ince dane içeren örneklerin ise önce bir miktar sıkışma ve ardından sınırlı düzeyde genişleme eğilimi sergilediğini göstermektedir.

Gevşek durumda, sabit ince dane içeriğinde efektif konsolidasyon basıncı arttıkça aşırı boşluk suyu basıncı oranları azalmaktadır. Başka bir deyişle, efektif konsolidasyon basıncı arttıkça zemin (iri ve ince) danelerinin yer değiştirme kapasiteleri sınırlanmakta ve dolayısıyla boşlukları doldurarak sıkışma eğilimleri

baskılanmaktadır. Literatürde yaklaşık olarak 100 kPa' dan daha düşük efektif konsolidasyon basınçları altında sıvılaşma eğiliminin arttığı belirtilmektedir [8]. Deney sonuçları bu bulguyu desteklemektedir. Şöyle ki, temiz kum, %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren karışım örnekleri 50 ve 100 kPa efektif konsolidasyon basınçları altında 0.85'ten yüksek ( $\Delta u/p_0' \geq 0.85$ ) aşırı boşluksuyu basıncı oranları sergilemişlerdir.



Şekil 12. Aşırı boşluk suyu basıncı ( $u/p_0'$ ) pik değerleri, a) Gevşek örnekler, b) Sıkı örnekler.

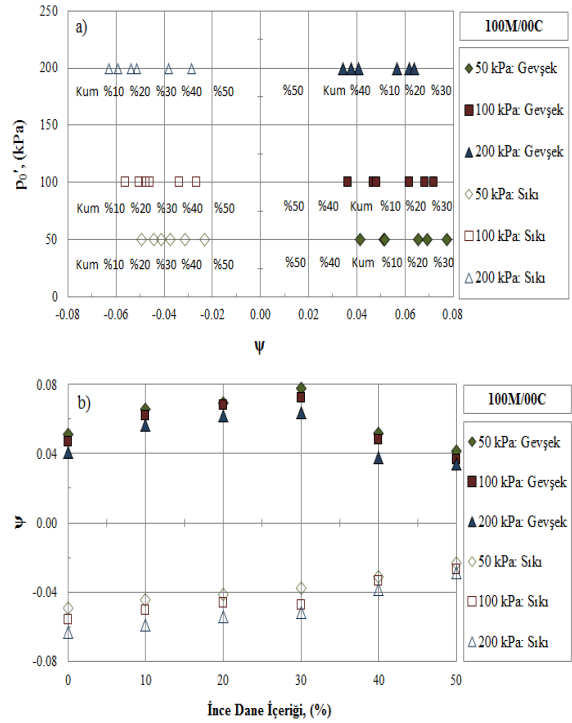
#### 4.5. Durum Parametresi Üzerindeki Etkisi

Şekil 13'te, gevşek ve sıkı durumlarda %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 non-plastik silt içeren karışım örnekleri için 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa efektif konsolidasyon basıncı altındaki durum parametre değerlerinin dağılımı gösterilmektedir. Bu değerleri örneklerin gevşek ve sıkı durumlarda sergiledikleri davranışlarla birlikte değerlendirdiğimizde önemli bulgular elde edilmiştir.

Gevşek örnekler için elde edilen durum parametre değerleri pozitif bölgede ( $\psi > 0$ ) yer almakta olup sıkışma (akma veya sınırlı akma) türünde bir davranış sergilediklerini göstermektedir. Diğer taraftan sıkı örneklerde durum parametre değerleri farklı seviyelerde negatif bölgede ( $\psi < 0$ ) yer almakta olup genişleme (dilative) davranışının sergilenmesi anlamına gelmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, gevşek ve sıkı örnekler için açıklanan kayma davranışları ile uyum göstermektedir. Görüldüğü üzere kritik durum zemin mekaniği çerçevesinde tanımlanan durum parametre değeri ile zeminlerin kayma dayanımı

davranışı hakkında önemli bilgiler elde edilmektedir. Özellikle sıkışma (contractive) türde davranış sergileyebilen gevşek zeminlerde, zemin örneğinin mevcut boşluk oranının belirlenmesi ile o zeminin sıvılaşma potansiyeli (akma veya sınırlı akma) hakkında önemli bilgiler elde edilmektedir.

Drenajsız kayma dayanımı davranışlarını ve durum parametre değerlerini birlikte değerlendirdiğimizde, akma davranışı için  $\psi$  değerinin sınırlı akma davranışına kıyasla nispeten büyük (durağan durum çizgisinden daha uzak mesafede) olduğu görülmüştür. Ayrıca, deney sonuçları genişleme türünde davranış sergileyen örneklerde  $\psi$  değerinin mutlak değeri ne kadar büyükse, genişleme davranışının o kadar baskın olduğu ve dolayısıyla sıkışma eğilimi gösterme potansiyelinin az olduğu ortaya koymaktadır.



Şekil 13. Gevşek ve sıkı sıklıklarda kum-silt karışım örneklerde  $\psi$  değerinin değişimi, a) Efektif konsolidasyon basıncına göre, b) İnce dane içeriğine göre.

Şekil 13'ten görüldüğü üzere, gevşek ve sıkı örneklerde durum parametre değeri ince dane içeriği ve efektif konsolidasyon basıncı değişiminden etkilenmektedir. Dolayısıyla, ince dane içeriği ve efektif konsolidasyon basıncına bağlı olarak durum parametre değerindeki değişim, örneklerin sergiledikleri davranışın da değiştiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, bir zemin örneğinin konsolidasyon sonrası başlangıç durumu (başlangıç boşluk oranı ve efektif gerilme

durumu ile belirlenen durum) bilinerek, üç eksenli basınç deney verileri ile elde edilen  $\psi$  değeri sayesinde zeminin drenajsız koşullarda kayma gerilmesi-kayma birim deformasyon davranışı hakkında önemli bilgiler elde edilebilmektedir.

##### **5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (Results and Evaluation)**

Bu çalışmada, suya doygun gevşek ve sıkı siltli kum zeminlerin drenajsız durumdaki kayma dayanımı davranışı ve aşırı boşluk suyu basıncı üzerindeki ince dane etkisi deneysel olarak incelenmiştir. bununla birlikte kayma dayanımı davranışı değerlendirilmesi sonucu elde edilen durum parametresi ile siltli kum zeminlerin akma veya genişleme türündeki davranışlar araştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler, ince dane içeriğinin, zemin dokusunun değiştirdiğini ve eşik ince dane değerinin iri dane matrisi veya ince dane matrisi davranışı anlamında önemli olduğunu göstermektedir. Çalışma sonucu vurgulanan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Gevşek sıklıkta temiz kum örnekleri, 50, 100 ve 200 kPa efektif konsolidasyon basıncı altında akma türünde gerilme-deformasyon davranışı sergilemiştir. Aynı davranış, %10, %20 ve %30 non-plastik silt içeren karışım örneklerinde daha belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Öte yandan, %40 ve %50 oranında non-plastik silt içeren karışımların gerilme-deformasyon davranışları sınırlı akma şeklinde gelişmiştir. Sıkı sıklıkta hazırlanmış olan temiz kum örnekleri ise her üç efektif konsolidasyon basıncı altında sertleşme türünde gerilme-deformasyon eğilimi göstermiştir. Ancak, %40 ve %50 oranında non-plastik silt içeren karışımlarda sertleşme yönündeki gerilme-deformasyon eğrilerinin şekilleri diğerlerinden farklıdır. Bu örnekler, sertleşme ile birlikte bir miktar sıkışma eğilimi göstermektedir.
- Gevşek örneklerde, sabit efektif konsolidasyon basıncında non-plastik silt oranının artmasıyla birlikte pik deviyör gerilme değerlerinin %30 ince dane içeriğine kadar azaldığı, ardından ise bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Sıkı örneklerde ise, sabit efektif konsolidasyon basıncında non-plastik silt oranının artmasıyla birlikte pik deviyör gerilme değerlerinin %40 ince dane oranına kadar azaldığı ve %50 ince dane oranında yeniden bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.
- Deneysel verilere göre, hem gevşek hem de sıkı durumda non-plastik silt içeriği, drenajsız yükleme sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının seviyeleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gevşek ve sıkı örneklerin sergiledikleri farklılıklar, iki sıklık durumunda gösterilen farklı hacim değişimi eğilimlerinden kaynaklanmaktadır. Sıkı

karışım örnekleri, gevşeklere göre daha yüksek genişleme hacim değişimi eğilimi göstermektedir. Gevşek örneklerde, ince dane içeriğinin artışı, karışım örneklerini genişleme yönünde hacim değişimi eğilimine yöneltmiştir. Sıkı örneklerde ise, ince dane içeriğinin artışı, karışım örneklerinde sıkışma yönünde hacim değişimi eğilimine neden olmuştur.

- Gevşek örnekler için elde edilen durum parametre değerleri pozitif bölgede ( $\psi > 0$ ) yer almakta olup sıkışma (akma veya sınırlı akma) türünde bir davranış sergilediklerini göstermektedir. Diğer taraftan sıkı örneklerde durum parametre değerleri farklı seviyelerde negatif bölgede ( $\psi < 0$ ) yer almakta olup genişleme (dilative) davranışının sergilenmesi anlamına gelmektedir.

##### **Kaynaklar**

- [1]. Castro, G. (1969) "Liquefaction of sands", (Doctoral dissertation), Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- [2]. Vaid, Y.P., Chern, J.C. (1983) "Effect of static shear on resistance to liquefaction", Soils Found, 23/1: 47-60.
- [3]. Been, K., Jefferies, M.G. (1985) "A state parameter for sands, Geotechnique", 35/2: 99-112.
- [4]. Alarcon-Guzman, A., Leonards, G.A., Chameau, J.L. (1988) "Undrained monotonic and cyclic strength of sands", ASCE J. Geotech. Eng, 114/10: 1089-1109.
- [5]. Vaid, Y.P., Chung, E.K.F., Kuerbis, R.H. (1990) "Stress path and steady state", Canadian Geotechnical Journal, 21/1: 1-7.
- [6]. Lade, P.V. (1992) "Static instability and liquefaction of loose sandy slopes", Journal of Geotechnical Engineering, 118/1: 51-71.
- [7]. Yamamuro, J.A., Lade, P.V. (1997) "Instability of granular materials at high pressures, Soils and Foundations", Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 37/1: 41-52.
- [8]. Ishihara, K. (1993) "Liquefaction and flow failure during earthquakes", Geotechnique, 43/3: 351-415.
- [9]. Sladen, J.A., D'Hollander, R.D., Krahn, J. and Mitchell, D.E. (1985) "Back analysis of the Nerlerk berm liquefaction slides", Can Geotech J, 22/4: 579-88.
- [10]. Olson, S.M. and Stark, T.D. (2002) "Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories", Can Geotech J, 39/3:629-47.
- [11]. Christian, H.A. and Woeller, D.J. (1996) "Triggering of submarine flow slides in sands", Fraser River delta, Canada. In Environmental Geotechnics, Kamon, Balkema, Rotterdam.

- [12]. Chillarige, A.V., Morgenstern, N.R., Robertson, P.K. and Christian, H.A. (1997) "Seabed instability due to flow liquefaction in the Fraser River delta", *Can Geotech J*, 34/4:520–33.
- [13]. Robertson, P.K. (1996) "Submarine slope instability at the West Guide Bund Jamuna Bridge, Bangladesh, Jamuna Multipurpose Bridge Project" Bangladesh.
- [14]. Ishihara, K. (1996) "Evaluation of slope instability at the west guide bund in Jamuna bridge project, Jamuna Multipurpose Bridge Project", Bangladesh.
- [15]. Gefferies M. and Been K. (2006) "Soil liquefaction: a critical state approach", London and New York: Taylor & Francis.
- [16]. Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, I.M. and Makdisi, F. (1971) "Analysis of the slides in the San Fernando Dams during the earthquake of Feb. 9, 1971", Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- [17]. Castro, G., Keller, T.O. and Boynton, S.S. (1989) "Re-evaluation of the Lower San Fernando Dam Report 1 an investigation of the February 9, 1971 slide", Vicksburg, Mississippi: US. Army Corps of Engineers Contract.
- [18]. Bobei, D.C., Lo, S-C.R (2001) "Static liquefaction of Sydney sand mixed with both plastic and non-plastic fines", In proceedings of the 14th Southeast Asian Geotechnical Conference, 485-491.
- [19]. Sladen, J.A., D'Hollander, R.D. and Krahn, J. (1985) "The liquefaction of sands, a collapse surface approach, *Can Geotech J*, 22:564-78.
- [20]. Lade, P.V., (1992) "Static instability and liquefaction of loose sandy slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, 118/1:51–71.
- [21]. Chu, J. and Leong, W.K. (2002) "Effect of fines on instability behaviour of loose sand", *Géotechnique* 52 /10: 751–755.
- [22]. Leong, W.K., Chu, J. and The, C.I. (2000) "Liquefaction and instability of a granular fill material" *Geotechnical Testing Journal*, 23/2: 178-192.
- [23]. Orense, R., Farooq, K. and Towhata, I. (2004) "Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration", *Soils and Foundations*, 44/2: 15-30.
- [24]. Schofield, A. and Wroth, P. (1968) "Critical state soil mechanics", McGrawHill, London, UK.
- [25]. Been, K. and Jefferies, M.G. (1985) "A state parameter for sands", *Geotechnique*, 35/2:99–112.
- [26]. Bobei, D., Lo, S., Wanatowski, D., Gnanendran, C., Mizanur Rahman, M. (2009) "Modified state parameter for characterizing static liquefaction of sand with fines", *Geology, Engineering Canadian Geotechnical Journal* .
- [27]. Roscoe, K. H., Poorooshasb, H. B. (1963) "A fundamental principle of similarity in model tests for earth pressure problems", *Proc. 2nd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan.
- [28]. ASTM D7928. Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, American Society for Testing and Materials.
- [29]. ASTM D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, American Society for Testing and Materials.
- [30]. Miura, S., Toki, S. (1982) "Sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", *Soils Found*, 22/1: 61-77.
- [31]. Vaid, Y.P., Sivathayalan, S., Stedman, D. (1999) "Influence of specimen reconstituting method on the undrained response of sand", *Geotech. Test. J.*, 22/3:187-195.
- [32]. Høeg, K., Dyvik, R., Sandbækken, G. (2000) "Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens". *ASCE J. Geotech. And Geoenv. Engrg.*, 126/7: 606-617.
- [33]. Wood, F. M., Yamamuro, J. A., Lade, P.V. (2008) "Effect of depositional method on the undrained response of silty sand". *Canadian Geotechnical Journal*, 45: 1525-1537.
- [34]. Frost, J.D., Park, J.Y. (2003) "A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique", *Geotech. Test. J.*, 26/1: 57-70.
- [35]. Sadrekarimi, A., Olson, S.M. (2012) "Effect Effect of sample-preparation method on critical-state behavior of sands". *Geotechnical Testing Journal*, 35/4: 1-15.
- [36]. Ladd, R.S. (1978) "Preparing test specimens using under compaction", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 1/1: 16-23.
- [37]. Vaid, Y.P., Sivathayalan, S. and Stedman, D. (1999) "Influence of specimen reconstituting method on the undrained response of sand", *Geotech. Test. J.*, 22/3:187-195.
- [38]. Zlatovic, S., Ishihara, K. (1995), "On the influence of nonplastic fines on residual strength", *Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Netherlands, 239-44.
- [39]. Lade, PV., Yamamuro JA. (1997) "Effects of non-plastic fines on static liquefaction of sands", *Canad Geotech J*, 34: 918-28.

- [40]. Thevanayagam, S., Ravishankar, K., Mohan, S. (1997) "Effects of fines on monotonic undrained shear strength of sandy soils", *Geotech Test GTJODJ*, 20/4: 394-406.
- [41]. Thevanayagam, S. (1998) "Relative roles of coarse and fine grains on the mechanical response of granular mixes", *ASCE, J. Geotech. & Geoenv. Eng.* in review.
- [42]. Yamamuro, J.A., Lade, P.V. (1998) "Steady state concepts and static liquefaction of silty sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124/9: 868-877.
- [43]. Baziar, M.H., Dobry, R. (1995, "Residual strength and largeDeformation potential of loose silty sands", *JGT ASCE*, 121/12: 896–906.
- [44]. Naeini, S.A. Baziar, M.H. (2004) "Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24:181-187.
- [45]. Thevanayagam, S., Shenthan, T., Kanagalingam, T. (2003) "Role of Intergranular contacts on Mechanisms causing Liquefaction and Slope Failures in Silty Sands", *Buffalo, University of Buffalo*.