

## Farklı Kil Oranına Sahip Siltli Zeminlerin Dinamik Davranışı

<sup>1</sup>Aşkın Özocak ve <sup>2</sup>Merve Çetin

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, Turkey

<sup>2</sup>Graduate Student Science Institute, Sakarya University, Turkey

### Abstract

Approaches based on China criteria for seismic performance of silty soils have been re-evaluated and updated continuously by various researchers especially 1999 Marmara Earthquake. Initial liquefaction can not be reached easily like sands, because clay bridges occurred between the sand and granular silt grains decrease the hydraulic conductivity so limits the pore pressure regime and residual resistance of the mixture stays in extremely low values. Silty soils have been shown as the source of the soil failure after the 1964 Alaska Earthquake and 1999 Marmara Earthquake. In this study dynamic behavior of silty soils which reconstituted in different clay contents were investigated with dynamic triaxial tests (CTX).

Pore pressure ratios have been decreased with clay content was increased at 15<sup>th</sup> cycle of the dynamic loading that represents the earthquake magnitude of 7.5, for silty soils. Similarly the value of the deformation also decreases. Therefore it can be said that clay content of silts is an important parameter that it affect the seismic behavior of the silty soil.

**Keywords:** Silt, clay content, CTX, dynamic behaviour, liquefaction.

### Özet

Siltli zeminlerin deprem performansı için Çin kriteri olarak bilinen bilgiler özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında çeşitli araştırmacılar tarafından yeniden değerlendirilmekte olup sürekli güncellenmektedir. İnce daneli zeminlerde kumlarda olduğu gibi başlangıç sıvılaşmasına kolaylıkla erişilememesi kum ve iri silt daneleri arasında oluşan “kil köprüleri”nin geçirimsizliği azaltıp boşluk suyu basıncı rejimini kısıtlaması yanında, karışımın kalıntı direncinin aşırı düşük kalmamasından kaynaklanmaktadır. 1964 Alaska depreminden sonra 1999 Marmara depreminde Adapazarı’nda görülen zemin yenilmelerinin kaynağı olarak siltli zeminler gösterilmiştir. Bu çalışmada kil ve kum içeriği ayıklanan silt numune ile bu numunedan ayırtlanmış kil kullanılarak farklı kil oranlarında hazırlanan siltli numunelerin dinamik davranışı dinamik üç eksenli (CTX) deneyleri yardımı ile incelenmiştir.

Farklı kil oranına sahip siltli zeminlerde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre numune içerisindeki kil oranı azaldıkça 15. çevrimdeki boşluk suyu basınçlarının yüksek kil oranına sahip numunelere oranla daha hızlı artış gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde deformasyon büyüklüğü de azalmaktadır. Bu noktadan hareketle zemin içerisindeki kil oranının siltli zeminin dinamik davranışı üzerinde önemli bir parametre olduğunu yüksek kil oranına sahip numunelerin daha zor sıvılaşma eğilimini göstereceği anlaşılmaktadır.

**Keywords:** Silt, kil oranı, CTX, dinamik davranış, sıvılaşma.

## 1. Giriş

Dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremler sonucunda zeminlerde kayma direnci kayıpları ve yenilmeler meydana getirmekte olup, zeminlerin deprem sırasındaki davranışının anlaşılabilmesi ve izlenmesi için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Kumların ve killerin statik ve dinamik davranışları geçmişte birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Siltli zeminlerin dinamik davranışı ile ilgili çalışmalar ise son 15 yılda literatürde yerini almaktadır. Özellikle siltli zeminlerin deprem esnasındaki davranışıyla ilgili belirsizlikler ilgiyi bu yöne çekmektedir. Depremlerde tekrarlı kayma gerilmeleri alan zeminler bazı koşullar gerçekleştiğinde işlevlerini yitirirler. Bu kayıplar çevrimsel hareketlenme, sıvılaşma, taşıma gücünü yitirme, aşırı toplam ve farklı oturmalar ve yanal yayılma (akma) biçiminde belirmektedir. 1964 Alaska depreminden sonra 1999 Marmara depreminde Adapazarı'nda görülen zemin yenilmelerinin kaynağı olarak siltli zeminler gösterilmiştir [1], [2], [3]. Bu çalışmada kil ve kum içeriği ayıklanan silt numune ile bu numuneden ayırtlanmış kil kullanılarak farklı kil oranlarında hazırlanan siltli numunelerin dinamik davranışı dinamik üç eksenli (CTX) deneyleri yardımı ile incelenmiştir.

## 2. Siltli Zeminlerin Dinamik Davranışı

Zeminin dinamik/sismik koşullar altındaki davranışını anlamada en kolay yol zemin yenilmelerinin tanımlanmasıdır. Zemin yenilmesi; batık veya doygun zeminin deprem sırası ve hemen sonrasında çevrimsel hareketlilik kazanması, sıvılaşması, temel altında taşıma gücünü yitirmesi, eğimli arazide akması, uzun süren deprem sırasında tekrarlı yükleme sonucu aşırı sıkışmalar göstermesi olaylarını kapsar. Bu olayları birbirinden ayırmak da her zaman kolay olmamaktadır. Kumlu ve killi zeminlerin dinamik yükler etkisinde davranışları son yüz yılda çokça incelenmiş olup bu zeminlerdeki yüklemelerin ne tür sonuçlar doğuracağı kısmen tahmin edilebilmektedir. Son yıllarda ise siltli zeminlerin dinamik davranışı konusundaki çalışmalar artmaya başlamıştır. ise bu kadar fazla çalışma yapılmamıştır ve bu nedenle son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar artmaktadır [4].

Siltlerde sıvılaşmanın, en azından başlangıç sıvılaşmasının, kumlarda görülen kolaylıkla oluşmadığı, hatta MI ve MH siltlerde olağan deprem koşullarında ( $M_w < 7$ ,  $t < 50s$ ) belki de hiç belirmediği yolunda kuşku vardır. Buna bağlı olarak da siltlerin kumsu (sand like) ve kilsu (clay like) olarak ayırtlanması ve sıvılaşabilir grubun daha ziyade kumsu'lar olduğu öne sürülmüştür [5]. Diğer bir deyişle, kilsu siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama (cycling softening) olası iken kumsu karışımlarda tipik sıvılaşma belirtileri ortaya çıkmaktadır. Kesin yargıya varılamayan birçok durumda da deney yapılması hemen tüm araştırmacılarca önerilmektedir.

Siltli zeminlerin deprem performansı için Çin kriteri olarak bilinen bilgiler özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında çeşitli araştırmacılar tarafından yeniden değerlendirilmekte olup sürekli güncellenmektedir. İnce daneli zeminlerin sıvılaşması konusunda gelinen son nokta Adapazarı Kriteri olarak tanımlanmıştır [6].

İnce daneli zeminlerde kumlarda olduğu gibi başlangıç sıvılaşmasına kolaylıkla erişilememesi kum ve iri silt daneleri arasında oluşan “kil köprüleri”nin geçirimsizliği azaltıp boşluk suyu basıncı rejimini kısıtlaması yanında, karışımın kalıntı direncinin aşırı düşük kalmamasından kaynaklanmaktadır [7]. Bu mantık tutarlı ise, ince daneli zeminin dinamik direncinin artan kil yüzdesi ile yükselmesi gerekecektir. Plastisite indisindeki değişimler aşırı olmadığından kil yüzdesinin CRR üzerindeki etkisinin öncelikle değerlendirilmesi daha tutarlı bir yol gibi gösterilebilir.

Ural siltli zeminlerde sıvılaşmanın deneysel incelemesini yapmışlardır. Depremlerin çok değişkenli bir yapıya sahip olduğunu söyleyerek, deprem sonucu meydana gelen sıvılaşmanın kumlarda olan etkisinin kanıtlanabilir bir davranış olduğunu belirterek bunun yanında siltlerde meydana gelebilecek sıvılaşma davranışının henüz net olarak ne tür bir davranışa sahip olduğunun açıklanamadığını dile getirmişlerdir. Çalışmalarını farklı kil yüzdeleri ilavesi ile siltli zeminler üzerine dinamik üç eksenli deneylerle yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları, ince daneli zeminlerin sıvılaşabileceği noktasında kullanılan kriterlerle kıyaslamışlardır [8].

Özay ve Erken killi zemin numunelerinde plastisitesinin dinamik mukavemet üzerinde ne tür değişimler göstereceğini anlamak amacı ile araziden piston numune alıcılarla örselenmiş numuneler almışlardır. Alınan örselenmiş numuneler üzerinde laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Dinamik deneyleri 0,5 Hz frekans sabitliğinde ve farklı genliklerde yapmışlardır. % 5 düşey boy değişimi değeri için, dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı ve N değişimleri oluşturmuşlardır. Deney sonuçlarına göre aynı kıvamda ve aynı oranda konsolide edilen numunelerden plastisitesi yüksek olan numunenin dinamik kayma gerilmesi oranının daha yüksek oluştuğunu tespit etmişlerdir [9].

### 3. Deneysel Çalışma

#### 3.1. Numune özellikleri

Çalışma kapsamında yürütülen deneylerde numune olarak, Adapazarı Yenigün Mah. Tacettin Sert arazisinden alınan siltli zemin kullanılmıştır. Doğal numune içindeki kil miktarı çöktürme yöntemi ile azaltılmış daha sonra bu numuneye çöktürülen kilden farklı oranlarda katılarak 8 ayrı numune elde edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan bu numunelerin TS 1900/2006 uyarınca belirlenen fiziksel özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Numunelerin fiziksel özellikleri

Num.No	Numune Tanımı	LL <sub>Cas</sub>	LL <sub>Koni</sub>	PL	PI	%C <sub>Hid</sub>	%C <sub>Pipet</sub>	Sınıf (TS1500)
1	Yüzdürülmüş silt	33	33	28	5	7.5	5.2	ML
2	% 100 silt	33	34	24	9	6	6.5	ML
3	%10 Kil katkılı silt	33	36	23	10	11	11.6	CL
4	%20 Kil katkılı silt	33	36	29	4	12.5	12.8	ML
5	%30 Kil katkılı silt	33	37	29	5	14	15.4	ML
6	%40 Kil katkılı silt	34	35	30	4	15.5	16.1	ML
7	%50 Kil katkılı silt	35	35	26	9	11	18.7	MI
8	% 100 Kil	48	50	33	15	20.5	21	MI

Dinamik üç eksenli deneyleri (CTX) yukarıda tanımlanan örneklerin 100 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanmış olan karışımların her birinden 1 kg alınarak içerisine su muhtevası değerinin likit limiti değerini geçmesini amaçlayarak 400 ml su ilave edilerek iyice karıştırılmış ve en az 2 saat boyunca desikatörde vakuma maruz bırakılmıştır. Bulamaç haline gelen numuneler 5 cm çaplı hürelere önce poroz taşı ardından filtre kağıdını takip ederek yerleştirilmiştir. Bulamaç halindeki numune önce kendi ağırlığı altında sonra yavaş yavaş artırılan düşey kuvvet ile 4-5 günlük bir süreç içinde 100 kPa altında konsolide edilmişlerdir (Şekil 1). Yeniden oluşturulan bu numuneler 50\*100 mm boyutlarında silindirik şekilde tıraşlanıp CTX deney aletine yerleştirilerek konsolidasyon deneyine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 1. Numunelerin bulamaçtan 100 kPa düşey gerilme altında yeniden oluşturulması

### 3.2. Dinamik Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi (CTX)

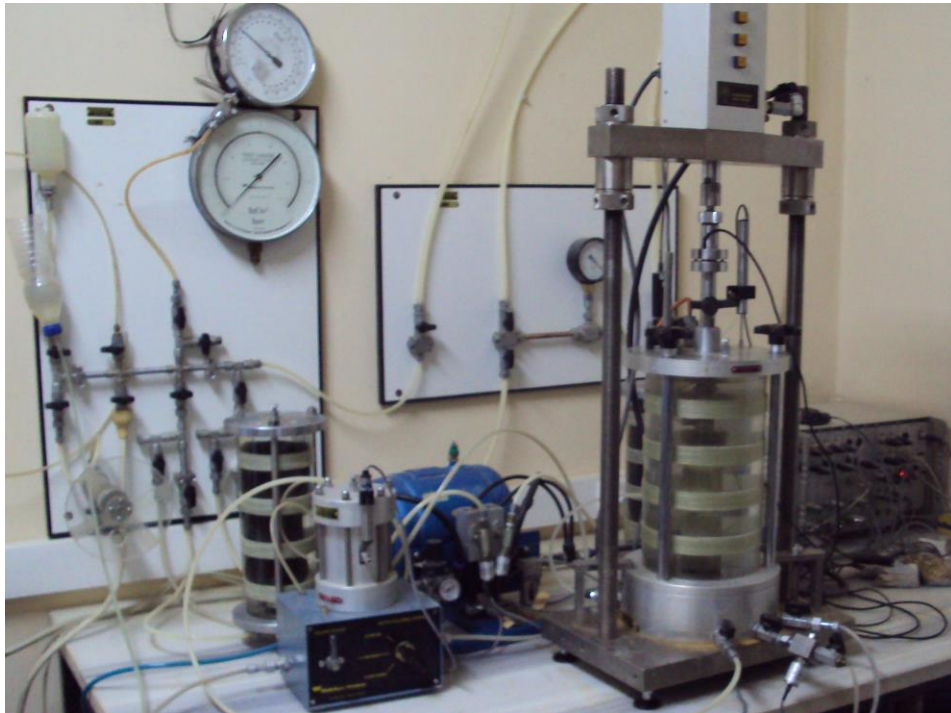
Üç eksenli deney ilk defa 1930'lu yıllarda Rendulic tarafından monoton yükleme yapmak üzere geliştirilmiştir. O tarihlerde numuneyi tek düzlemde kesen kesme kutusunun bu düzlemde dahi üniform olmayan gerilmeler oluşturduğu gerekçesi ile üç eksenli deney artan rağbet görmüştür. Kesme kutusundan farklı olarak kayma düzlemlerinde oluşan gerilmelerin bilinmesi yanında, drenajın çift taraflı kontrol edilebilmesi ve boşluk suyu basınçlarının sürekli izlenebilmesi deneyin ek olumlu yanları olarak gösterilmiştir. CTX, statik deney sisteminden esas itibarıyla yük uygulama biçimi ile farklıdır. Burada da numune önce doyurulmakta, sonra makul bir geri basınca (>200kPa) karşı konsolide edilmekte ve kesme aşaması drenajsız olarak gerçekleştirilmektedir. Yükleme tekrarlı olduğundan veri kayıtlarının elektronik olarak izlenmesi zorunluluğu vardır.

Çalışmada Wykeham Farrance (Controls) firması 1999 yılı imalatı CTX sistemi kullanılmıştır (Şekil 2). Özel yazılımı olan CTX sistem 50,100 mm çaplı numuneye  $\pm 5\text{kN}$  duyarlıkla 50-60 Hz frekansta hidrolik sistemle yükleme yapabilmektedir. Seçilen hücre sıvısı basıncı  $\sigma_3$  dinamik deneylerde etkili bir değişken olduğundan, Adapazarı deprem koşullarında sıvılaştığı belirlenmiş zeminlerin çoğunlukla üst 10 m'de bulunduğu göz önüne alınarak değişmez  $\sigma_3=100$  kPa seçimi yapılmıştır. Boşluk suyu basınçları  $u_w$  numunenin geri basınçla doyurulmasından sonra tam drenajsız koşulda ölçülmüştür. CTX deneyi sırasında alınan okumalar numunede oluşan konsolidasyon ( $\Delta V$ ), boşluk suyu basınçları ( $u_w$ ), deviator gerilme ( $\sigma_d$ ), eksenel birim boy değiştirme ( $\varepsilon_z$ ) olarak özetlenebilir. Dinamik yükleme sırasında deney  $\varepsilon_z=0.20$ 'ye kadar sürdürülebilmektedir.

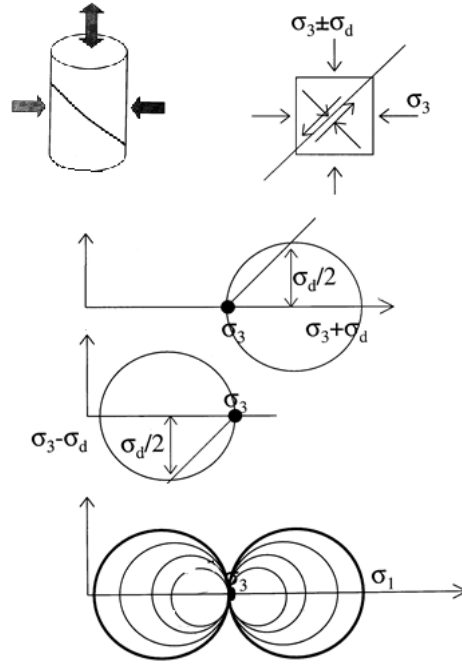
Şekil 3'te CTX deneyinde kesme sırasında uygulanan ve numunede oluşan gerilmeler gösterilmektedir. Buradan tekrarlı uygulanan deviator gerilmenin yön değiştirdiği ve gerilme dairelerinin giderek büyüdüğü izlenebilmektedir. Deviator gerilmenin uygulanması ile numune şekil değiştirmekte, ancak drenaja izin verilmediğinden boşluk suyu basınçları ve eksenel birim boy kısaltmalar  $\varepsilon_z$  çevrim sayısı N arttıkça yükselmektedir. Bu durumda olası kayma düzlemindeki çevrimsel gerilme,

$$CSR = \frac{\sigma_{dev}}{2\sigma_3'} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sigma_3'} \quad (1)$$

ile ifade edilmektedir.

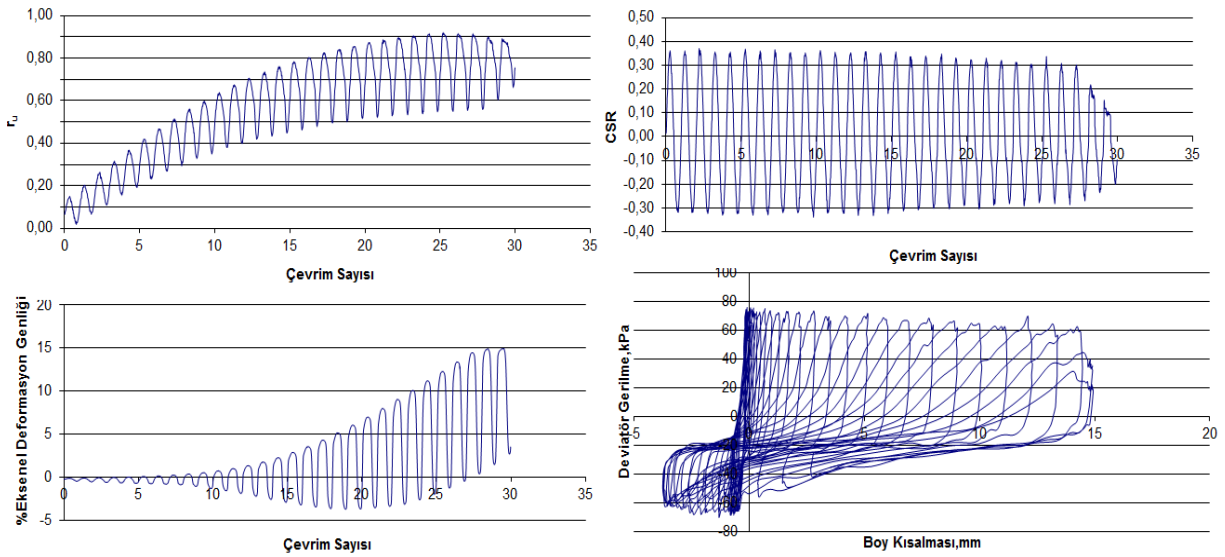


Şekil 2. Dinamik deneylerin yapıldığı CTX sistemi



Şekil 3. CTX deneyde yükleme ve oluşan gerilmeler

Şekil 4'te 3 nolu numunenin CTX deney verileri grafikler halinde verilmektedir. Bu grafiklerde çevrim sayısına karşılık boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u$ ), çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve % eksenel deformasyon genliği değerleri ile deviator gerilme değerine karşılık boy kısalması değerinin değişimi verilmektedir.

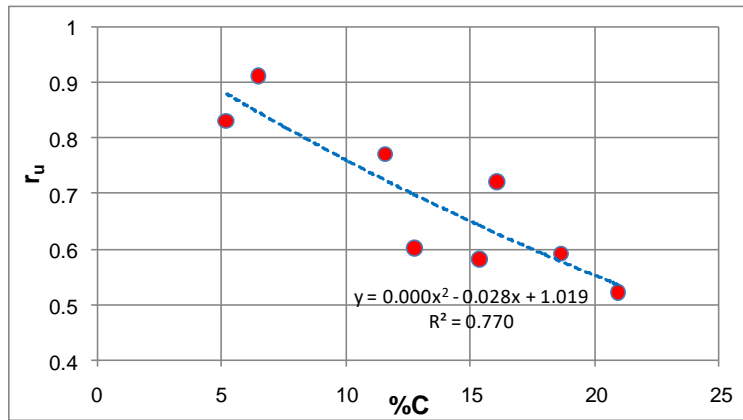


Şekil 4. 3 nolu numunenin CTX deney verileri (CSR=0.35,  $f=0.5\text{Hz}$ )

Şekil 4'e benzer şekilde tüm numuneler için hazırlanmış olan grafiklerden numunelerin farklı boşluk suyu basıncı oranı değerleri ve farklı eksenel deformasyon yüzdesi değerlerine (%2.5, 5 ve 10) ulaşması için gerekli çevrim sayısı değerleri ve 15 çevrim sayısı sonunda ölçülen boşluk suyu basıncı oranı değerleri belirlenmiştir. Bu veriler Tablo 2'de verilmektedir. Şekil 5'te ise 15. çevrimde ölçülen boşluk suyu basıncı oranının kil oranı ile değişimi çizilmiştir. Bu grafikten kil oranının dinamik davranış üzerindeki önemli etkisi 2. dereceden bir denklem ile temsil edilmiştir.

**Tablo 2.** Numunelerin CTX deney sonuçları

Num.No	Numune Tanımı	$N_{ru=0.9}$	$N_{ru=0.8}$	$N_{ru=0.7}$	E.d=%2.5	E.d=%5	E.d=%10	N=15 için $r_u$
1	Yüzdürülmüş silt	-	8	7	13	16	19	0.83
2	%100 silt	10	7	5	3	5	8	0.91
3	%10 Kil katkılı silt	23	17	13	16	19	24	0.77
4	%20 Kil katkılı silt	>50	48	27	5	9	16	0.60
5	%30 Kil katkılı silt	>50	>50	31	4	6	9	0.58
6	%40 Kil katkılı silt	37	19	14	8	12	19	0.72
7	%50 Kil katkılı silt	>50	38	24	9	12	19	0.59
8	%100 Kil	>50	>50	>50	38	>50	>50	0.52



Şekil 5. Boşluk suyu basıncı oranının kil oranı ile değişimi

#### 4. Sonuçlar

Farklı kil oranına sahip siltli zeminlerde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre numune içerisindeki kil oranı azaldıkça 15. çevrimdeki boşluk suyu basınçlarının yüksek kil oranına sahip numunelere oranla daha hızlı artış gösterdiği görülmektedir. Bu noktadan hareketle zemin içerisindeki kil oranının siltli zeminin dinamik davranışı üzerinde önemli bir parametre olduğunu yüksek kil oranına sahip numunelerin daha zor sıvılaşma eğilimini göstereceği anlaşılmaktadır. İnce daneli zeminlerde kil oranının artmasıyla belirli bir çevrim sayısı sonunda ulaşılan boşluk suyu basıncı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde zeminin sergilediği deformasyon büyüklüğü de azalım eğilimi göstermiştir.

## Kaynaklar

- [1] Wang, W.S. Some Findings in Soil Liquefaction. Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, 1979.
- [2] Özocak, A., Önalp, A. Siltlerde Sıvılaşma Davranışına Yapay ve Doğal Numune Kullanımının Etkisi. 7<sup>th</sup> Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran 2011, İstanbul, 2011.
- [3] Özocak, A., Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., Duran, İ.B. Siltlerde Sıvılaşma Davranışının İncelenmesinde Dinamik Deney Yönteminin Etkisi. 4. Geoteknik Sempozyumu, 1-2 Aralık 2011, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2011.
- [4] Özsağır, M. İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. SAÜ, FBE, 2015.
- [5] Idriss, I.M., Boulanger, R.W. Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 26:115-130, 2006.
- [6] Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., Özocak, A. Liquefaction of Silts: The Adapazarı Criteria. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:859-873, 2010
- [7] Mitchell, J.K., Soga, K. Fundamentals of Soil Behaviour, 3<sup>rd</sup> ed., J.Wiley, New York, 2005.
- [8] Ural, N. İnce Taneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi. Doktora Tezi. SAÜ, FBE, 2008.
- [9] Özay, R., Erken, A. Killerde Plastisitenin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi. İTÜ Dergisi/d mühendislik Cilt:2, Sayı:1, 55-63, 2003.