



**Kumlarda ve Siltli Kumlarda Sıvılaştırmanın ve Sıvılaştırma
Sonrası Direncin Belirlenmesinde Sarsma Tablası
Deneyleri**

Proje No: 111M435

Yrd. Doç. Dr. Nurhan ECEMİŞ

KASIM 2012
İZMİR

ÖNSÖZ

Depremler sırasında sıvılaşmadan dolayı oluşan zemin göçmeleri milyar dolarlara mal olan büyük deformasyonlara sebep olmaktadır. Bu proje ile İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ndeki mevcut araştırma olanakları geliştirilmiş ve sıvılaşma sonrası zemine tekrar bir sismik yükleme verildiğinde zeminin direncindeki değişimlere etkiyen faktörler sarsma tablasında yapılan bir seri deneyler ile incelenmiştir.

Bu projede yapılan çalışmalar sıvılaşma sorunu için gerekli olan düzeltmeler ve sismik tasarımlar için yapılan harcamaların önemli ölçüde en aza indirgenmesinde bir basamak niteliğindedir.

Tamamlanmış olan proje bir yüksek lisans öğrencisinin eğitimine katkıda bulunmuştur. Bu proje sayesinde geliştirilmiş olan alt yapı ve büyük ölçekteki laminer kutu, ileride orijinal ve ileri seviyede yüksek lisans ve doktora tezlerinin yazılıp yayımlanmasını sağlayacak ve ileride yapılacak sismik deneyler ile bu çalışma genişletilecektir.

Bu proje aynı zamanda TÜBİTAK'ın deprem geotekniği araştırmalarına verdiği desteğin önemli bir örneğidir.

İçindekiler:

Şekil Listesi.....	3
Fotoğraf Listesi	4
Tablo Listesi	5
Özet.....	6
Abstract.....	7
1. GİRİŞ	8
2. GENEL BİLGİLER.....	9
2.1 Sıvılaşmanın Tayini	9
2.2 Eşdeğer Boşluk Oranı	10
2.3 Konsolidasyon Karakterleri	10
2.3.1 Zorlanma Modülü (M)	10
2.3.2 Konsolidasyon Katsayısı (c_v)	11
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	11
3.1 Laminer kutu	11
3.2 Koni penetrasyon deneyleri (CPT).....	12
3.3 Sensörlerin kutuya yerleştirilmesi.....	13
3.4 Sıvılaşma Deneyleri	16
3.4.1 Zemin Numunesinin Hazırlanması	16
4. Bulgular	20
4.1 Temiz kumda sıvılaşma deneyleri	20
4.1.1 Test 1.....	20
4.1.2 Test 2.....	23
4.1.3 Test 3.....	26
4.2 Siltli kumda sıvılaşma deneyleri.....	29
4.2.1 Test 4 (Silt oranı ağırlıkça~%15).....	29
4.3 Eşdeğer boşluk oranının sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direncin belirlenmesinde değerlendirilmesi	32
4.4 Konsolidasyon katsayısının sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direncin belirlenmesinde değerlendirilmesi	34
5. Sonuç/Tartışma ve Öneriler	36
Referanslar	40

Şekil Listesi

Şekil 1. Kum danelerinin oryantasyonunun (a) sıvılaşma öncesinde ve (b) sonrasındaki durumunun şematik gösterimi (Oda vd. 2001).....	8
Şekil 2. İzotrop konsolidasyonlu üç eksenli deneyde akma sıvılaşması örneği	9
Şekil 3. Sensörlerin laminer kutuya ve zemine yerleştirilme planı	14
Şekil 4. Numune hazırlama zamanı a) Temiz kum, b) %15 siltli kum, c) %25 siltli kum	17
Şekil 5. Sarsma tablası deneylerinde kullanılan zeminlerin özellikleri ve elek analizi eğrisi.....	18
Şekil 6. Test 1’de temiz kuma sarsma tablası deneylerinde uygulanan yatay deplasman	21
Şekil 7. Her bir deney öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen rölatif sıklıklar	21
Şekil 8. Test 1 (Temiz kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2 ve (c) Sarsma_3	22
Şekil 9. Test 1 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda boşluk oranındaki değişim.....	23
Şekil 10. Test 2’de temiz kuma sarsma tablası deneylerinde uygulanan yatay deplasman	24
Şekil 11. Her bir deney öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen rölatif sıklıklar	24
Şekil 12. Test 2 (Temiz kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2 ve (c) Sarsma_3	25
Şekil 13. Test 2 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda boşluk oranındaki değişim.....	26
Şekil 14. Test 3’de temiz kuma sırası ile uygulanan yatay deplasmanlar (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2, (c) -Sarsma_3, (d) Sarsma_4	27
Şekil 15. Her bir sarsma tablası deneyi öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen rölatif sıklıklar.....	27
Şekil 16. Test 3 (temiz kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Test 3-Sarsma_1, (b) Test 3-Sarsma_2, (c) Test 3-Sarsma_3 ve (d) Test 3-Sarsma_4.....	28
Şekil 17. Test 3 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda boşluk oranındaki değişim.....	29
Şekil 18. Test 4’de siltli kuma sırası ile uygulanan yatay deplasmanlar (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2, (c) Sarsma_3, (d) Sarsma_4.....	30
Şekil 19. Her bir deney öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen rölatif sıklıklar	30
Şekil 20. Test 4 (siltli kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2, (c) Sarsma_3, (d) Sarsma_4.....	31
Şekil 21. Test 4 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda eşdeğer boşluk oranındaki değişim	32
Şekil 22. (a) İlk sıvılaşma, (b) ikinci sıvılaşma ve (c) üçüncü sıvılaşma çevrim adedinin (N_L) eşdeğer boşluk oranı ile değişimi.....	33
Şekil 23. Temiz kum ve %15 silt muhtevası içeren siltli kumlarda eşdeğer boşluk oranının (a) hidrolik iletkenlik ile değişimi (b) sıkışabilirlik katsayısı ile değişimi (c) konsolidasyon katsayısı ile değişimi	35
Şekil 24. Tüm numunelerin ikinci sıvılaşma direncinin birinci sıvılaşma direncine oranının konsolidasyon katsayısı ile değişimi.....	36

Fotoğraf Listesi

Foto 1. Laminer Kutu	12
Foto 2. Laboratuvarda CPT deneyleri için kurulan düzenek	13
Foto 3. CPTU konisi, tijler ve veri toplama sistemi	13
Foto 4. (a) Suya dayanıklı ivmeölçer, (b) İvmeölçerler zemin içerisinde sabitlemek için ağırlara bağlanmıştır	14
Foto 5. Boşluk suyu basıncı ölçen sensörler.....	15
Foto 6. Katmanlara yerleştirilen ivmeölçerler ve potansiyometreler	16
Foto 7. Zemin numunesinin laminer kutuya yerleştirilmesi	18
Foto 8. Numunelerin SEM görüntüsü (a) %0 temiz kum, (b) %15 siltli kum ve (c) %25 silt kum	19

Tablo Listesi

Tablo 1. Hazırlanan zemin numunelerinin özellikleri	19
Tablo 2. Test 1’de sırası ile uygulanan sarsma tablası deneyleri sonuçları.....	22
Tablo 3. Test 2’de sırası ile uygulanan sarsma tablası deney sonuçları.....	25
Tablo 4. Test3’te sırası ile uygulanan sarsma tablası deney sonuçları.....	28
Tablo 5. Test 4’de sırası ile uygulanan sarsma tablası deneyleri sonuçları.....	31
Tablo 6. Önerilen iş maddeleri ve sonuçları	38

Özet

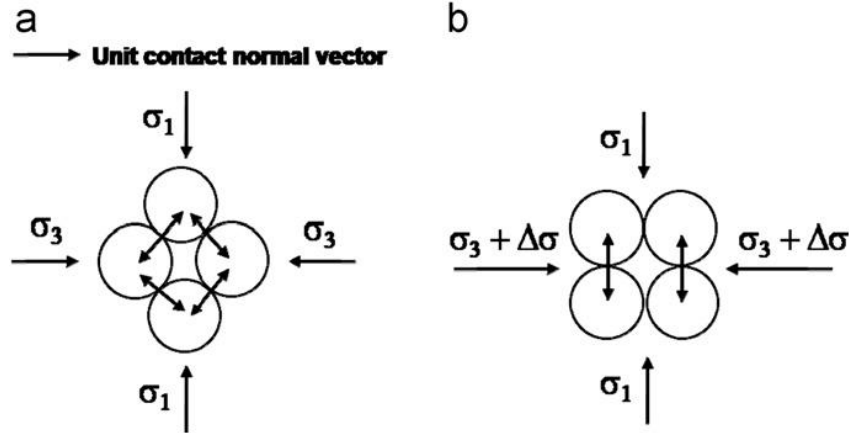
Sıvılaşma, suya doygun gevşek zeminlerin deprem veya sismik bir hareket sonucunda danelerinin birbirleri olan temasının kaybolması ve boşluk suyu basıncının artması olayıdır. Yapılan literatür araştırmasına göre, ilk sıvılaşma sonrası zemin tekrar aynı büyüklükteki sismik yüklemeye maruz kaldığında rölatif sıklık fazlasıyla artsa dahi sıvılaşma direncinde azalma veya çok az bir artış olur. Zeminin ilk sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direncindeki azalmanın nedeninin sadece daneler arası temas yoğunluğuna bağlı olmadığı aynı zamanda zeminin konsolidasyon karakterine bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu proje ile eşdeğer boşluk oranının ve konsolidasyon katsayısının sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direnç üzerindeki etkilerine 1-g salımlı laminer kutu (1.8x0.65x1.5m yükseklik) kullanılarak yapılan sınırlı sayıda sıvılaşma deneyleri ile açıklık getirilmeye çalışılmıştır. Bu proje kapsamında yapılan çalışmalarda, temiz kum ve %15 silt muhtevası içeren siltli kumlarda art arda bir seri sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir sarsma tablası deneyi öncesinde yapılan koni penetrasyon deneyleri (CPT) ile zeminin derinlik boyunca değişen rölatif sıklığı ve sıkışabilirliği belirlenmiştir. Birinci sıvılaşma deneyinden sonra rölatif sıklık çok arttığı halde ikinci sıvılaşma direncinde çok büyük bir artış olmamıştır. Ancak konsolidasyon katsayısının (c_v) belirli bir limit değerinden sonra zeminin birinci, ikinci ve üçüncü sıvılaşma dirençlerinde büyük bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

Abstract:

Liquefaction is a phenomenon that occurs when the contact between soil grains get lost and when pore water pressure increases in saturated loose soils as a result of an earthquake or a seismic movement. According to literature research, when the soil is exposed to same seismic loading, after the first liquefaction, there is a decrease or very little increase in liquefaction resistance even though the relative density of soil increases significantly. It is thought that the reason decrease in the first liquefaction resistance and the re-liquefaction resistance of soil not only depends on contact density between soil grains but also consolidation characteristics of the soils. This study was performed to clarify the effects of equivalent void ratio and the coefficient of consolidation on liquefaction and re-liquefaction resistance with the aid of the limited number of liquefaction tests by using the laminar box (1.8x0.65x1.5m height) which has 1-g oscillation within the scope of this project. A series of shake table tests were performed consecutively on clean sand and silty sand, which has 15% silt content, within the scope of this project. The change of compressibility and relative density along the depth were determined by using the cone penetration test (CPT) before each of the shake table tests. After the first liquefaction test there is no significant increase in second liquefaction resistance although relative density increases considerably. However, it is observed that there is a great increase in the first liquefaction and re-liquefaction resistance of the soil after a certain limit value of coefficient of consolidation (c_v).

1. GİRİŞ

Depremler sonucunda edinilen bilgilere göre, sıvılaşmış kumlu zemin tekrar bir sismik yüklemeye maruz kaldığında tekrar tekrar sıvılaşabilir (Kuribayshi vd., 1975; Yasuda vd., 1988; Sims vd., 1995). Genel olarak çok gevşek veya orta sıklıktaki bir zeminin sıvılaşması ile boşluk suyu basıncı artar ve sıvılaşma sonrası konsolidasyona bağlı olarak zeminde sıkışma oluşur. Ancak sıvılaşma sonrası konsolidasyona bağlı olarak artan relatif sıklık, tekrar bir sismik yüklemedeki sıvılaşma direncinde yeteri kadar artışa neden olmaz (Olson vd., 2001). Literatürde, bu durumu açıklayan en az üç hipotez mevcuttur (Oda vd.; 1972, 2001; Olson vd.; 2001, 2005; Ha vd., 2011). Oda vd. (1972, 2001)'nin hipotezine göre sıvılaşan zemin büyük kayma gerilmesine maruz kalır ve bu gerilme zeminin biraz anizotrop yapıdan fazlasıyla anizotrop yapıya dönüşmesini sağlar (Şekil 1). İlk sıvılaşma sonrasında oluşan bu tip anizotropi çok dayanıksızdır ve tekrar uygulanacak herhangi bir dinamik yükleme sonucunda çok çabuk deforme olabilir. Bu da zeminin ikinci bir dinamik yüklemeye tekrar hızlıca sıvılaşmasına ve sıvılaşma direncinin azalmasına sebep olur.



Şekil 1. Kum danelerinin oryantasyonunun (a) sıvılaşma öncesinde ve (b) sonrasındaki durumunun şematik gösterimi (Oda vd. 2001)

İkinci bir hipoteze göre sıvılaşmaya bağlı olarak oluşan yüksek kayma gerilmesi ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon ile dane etkileşimi azalır ve zemin genç çökelmiş gibi davranır (Olson vd.; 2001, 2005). Dolayısıyla, ikinci sıvılaşma direnci, ilk sıvılaşma direncinden daha az olur. Ancak üçüncü bir sarsma sonrası konsolidasyon ile boşluk oranının çok fazla azalmasıyla sıvılaşma direnci artar. Mesri vd. (1990) gevşek ve orta sıklıktaki zeminlerde sıvılaşma direncindeki artışın ancak rölatif sıklığın %20 ila %30 oranında artması ile mümkün olabileceğini belirtmişlerdir. Üçüncü bir hipoteze göre de sıvılaşma ve tekrar sıvılaşma dirençleri rölatif sıklık veya boşluk oranı ile bağıntılı değil, konsolidasyon katsayısı ile bağıntılıdır (Ha vd., 2011).

Yukarıda verilen bilgilere göre, kum numunesine art arda uygulanan aynı ve farklı ivmeli sarsmalar sonucunda zeminin gösterdiği sıvılaşma direncindeki değişimin tam olarak hangi parametrelere bağlı olduğu anlaşılmış değildir. Bu çalışma ile kumlu ve siltli kumlarda art arda bir seri 1-g sarsma tablası deneyleri yapılmıştır. Bu testlerde farklı derinliklere yerleştirilen piyezometreler ile boşluk suyu basıncı değişimi (Δu) belirlenmiştir. Bu değişim sıvılaşmanın kaçınıcı çevrimde gerçekleştiği hakkında bilgi vermektedir. Aynı zamanda her bir test sonrasında

yapılan koni penetrasyon deneyleri (CPT) ile zeminin sıvılaşma sonrası konsolidasyona bağlı olarak rölatif sıklığındaki değişimi ve sıkışabilirliği belirlenmiştir. Boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve konsolidasyonun tam olarak tamamlanması için her bir sarsma arasında yeteri kadar (en az 1 saat) beklenmiştir.

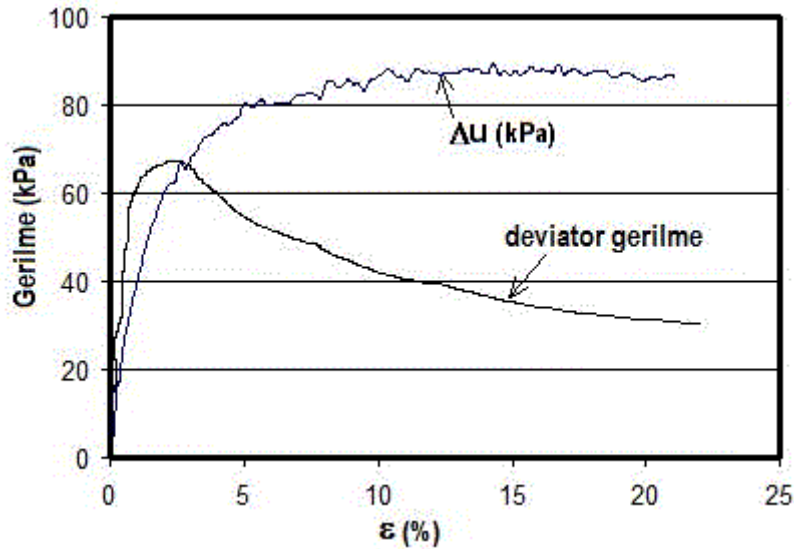
2. GENEL BİLGİLER

2.1 Sıvılaşmanın Tayini

Akma sıvılaşması, statik dengeyi sağlamak için gerekli gerilmenin zeminin kalıntı direncinden yüksek olduğu durumdur. Bu nedenle, sıvılaşmanın sadece düşük kalıntı direncine sahip gevşek zeminlerde oluşabileceği söylenebilir. Bu tür sıvılaşma çok büyük deformasyonlar oluşturabilir (örneğin akma heyelanları). Ancak, bu deformasyonların statik kayma gerilmelerince oluşturulduğunu unutmamak gerekmektedir. Akma sıvılaşması doğa ve laboratuvarında statik ve dinamik yüklemeye oluşabilir. Şekil 2’de gerilme kontrollü tekdüze yüklemeli bir deney sonucu verilmiştir. Burada artan deviyatör gerilmeyle boşluk suyu basıncının arttığı görülmektedir. Deformasyon seviyesinin küçük olduğu durumda deviyatör gerilme doruk noktasına ulaşmıştır ve bu noktada boşluk suyu basıncı oluşumu (Δu) hala düşüktür. Diğer bir değişle boşluk suyu oranı

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma_{vo}'} \quad (1)$$

yaklaşık 0.5 düzeyindedir. Deviyatör gerilme doruk noktasına ulaştıktan sonra deformasyon oranı ve boşluk suyu basıncı hızla yükselir. Zemin iskeletinin mevcut yapısı da böylece mevcut direncin kalıcı dirence eşit olmasına kadar bozulmaktadır. Deviyatör gerilmenin kalıcı dirençten daha büyük olması durumunda numune statik dengede kalamayabilir ve sıvılaşma gerçekleşir. Daha geniş açıdan bakıldığında, sıvılaşma boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi sıfıra düşürecek denli yükselmesidir. Bu nedenle bu çalışmada sıvılaşmanın başladığı an olarak boşluk suyu basıncı artışı değerlendirilmiştir.



Şekil 2. İzotrop konsolidasyonlu üç eksenli deneyde akma sıvılaşması örneği

Uygulanan ivmenin zemine etkisi çevrimsel gerilme oranı ile ifade edilir (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR=0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}'} \right) r_d \quad (2)$$

Burada a_{\max} maksimum yatay ivme, g yerçekimi ivmesi, σ_{vo} , σ_{vo}' incelenen derinlikte etkiyen toplam ve efektif gerilmeler ve r_d derinliğe bağlı azaltma faktörüdür. Seed (1970)'e göre sinüs dalgası verilerek yapılan laboratuvar deneyleri gerçek deprem hareketlerinden daha şiddetlidir. Dolayısıyla, zeminin davranışının gerçek deprem yükü ile karşılaştırılabilmesi için laboratuvar deneylerinde uygulanan maksimum yatay ivmenin 1/0.65 ile düzeltilmesi gereklidir.

2.2 Eşdeğer Boşluk Oranı

Sıvılaşma direnci gibi zeminlerin mekanik özellikleri daneler arası temas yoğunluğuna bağlıdır (Thevanayagam vd., 2000, 2007). Temiz kumlar için relatif sıkılık (D_r) ve global boşluk oranı (e) şüphesiz temas indeksleri olarak kabul edilebilir. Ancak siltli zeminlerde, D_r ve e 'nin temas indeksi olarak kabul edilmesi şüphelidir. Silt danelerinin ikincil etkisini göz önüne alarak Thevanayagam (2000) ince dane muhtevasının (FC) eşik ince dane muhtevasından ($FC_{th} \cong \%25$) az olduğu durumlar için aşağıda verilen temas yoğunluk indeksini önermiştir:

$$(e_c)_{eq} = \frac{e+(1-b)f_c}{1-(1-b)f_c} \quad \dots \quad FC \leq \%25 \quad (3)$$

burada $(e_c)_{eq}$ =eşdeğer daneler arası boşluk oranı, b =ince daneler için katkı faktörü ($0 \leq b \leq 1$), e =global boşluk oranı ve $f_c=FC/100$.

Aynı temas yoğunluk indeksine sahip kum ve kum-silt karışımlarının benzer mekanik özellikler (sıvılaşma direnci, drenajsız kesme dayanımı ve gerilme-birim deformasyon karakterlerine) sahip olduğu birçok araştırmacı tarafından gözlemlenmiştir (Polito ve Martin, 2001 Thevanayagam vd. 2000 ve Huang vd., 2005). Dolayısıyla, siltli zeminlerin sıvılaşma direnci ile temiz kumların sıvılaşma direnci ancak temas yoğunluk indeksleri kullanılarak karşılaştırılabilir. Bu çalışmada da, siltli kumların temas yoğunluğu bulunurken eşdeğer boşluk oranı kullanılmıştır.

2.3 Konsolidasyon Karakterleri

2.3.1 Zorlanma Modülü (M)

Zeminlerin sıkışabilirliği değişik zemin tipleri için farklı yollarla elde edilebilir. Zorlanma modülü (M) ile koni uç direnci arasında literatürde birçok bağıntı bulunmaktadır (Sanglerat, 1972; Kulhawy ve Mayne, 1990, Robertson, 2009). Kulhawy ve Mayne (1990) farklı zemin tipleri için zorlanma modülü (M) ve net koni uç direnci ($q_t - \sigma_{vo}$) arasında aşağıda verilen ilişkiyi önermiştir:

$$M=8.25(q_t - \sigma_{vo}) \quad (4)$$

Burada q_t düzeltilmiş toplam koni uç direncidir. Robertson, 2009'a göre;

$$M = \alpha_M (q_t - \sigma_{vo}) \quad (5)$$

$I_c > 2.2$ ve $q_{c1N} < 14$ olduğunda $\alpha_M = q_{c1N}$, $I_c > 2.2$ ve $q_{c1N} > 14$ olduğunda $\alpha_M = 14$. $I_c < 2.2$ ise $\alpha_M = 0.03 [10^{(0.55I_c + 1.68)}]$. Burada σ_v = düşey gerilme ve $I_c = [(3.47 - \log_{10} q_{c1N})^2 + (\log_{10} F + 1.22)^2]^{0.5}$ zemin davranış indeksidir (Robertson ve Wride, 1998). Ölçülen q_c ve f_s değerleri aşağıda verilen bağıntılara göre normalize edilmiştir (Youd ve Idriss, 2001);

$$q_{c1N} = \frac{q_{c1}}{P_a} = C_q \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \quad (5a)$$

$$C_q = \left(\frac{P_a}{\sigma_{vo}} \right)^n \quad (5b)$$

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_v} \quad (5c)$$

burada σ_{vo} = efektif düşey gerilme; q_{c1} = normalleştirilmiş CPT koni uç direnci; P_a = atmosfer basıncı ve n = zeminin özelliklerine bağlı olarak 0.5 ile 1 arasında değişen gerilme katsayısıdır.

2.3.2 Konsolidasyon Katsayısı (c_v)

Zeminin konsolidasyon özellikleri konsolidasyon katsayısı (c_v) ve hidrolik iletkenlik (k) ile ifade edilir. Bunlar aşağıdaki formülde görüldüğü gibi birbirleri ile ilişkilidir:

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (6)$$

Burada γ_w suyun birim hacim ağırlığıdır. Kumlu ve siltli zeminlerin hidrolik iletkenliği laboratuvarında farklı boşluk oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan sabit seviyeli permeabilite testleri ile belirlenebilir (ASTM E2396).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Laminer kutu

6cm kalınlığında 24 halkadan oluşan 1.8x0.65 taban alanında ve 1.5m yüksekliğinde geoteknik laminer kutu (Foto 1) ve sarsma tablası kullanılarak temiz kumlarda ve ağırlıkça %15 ve %25 silt muhtevası içeren siltli kumlarda bir seri sıvılaşma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laminer kutunun imalatı ve çalışma performansı ile ilgili detaylı bilgi BAP-2010İYTE14 raporunda ve bir yüksek lisans tezinde (Kahraman, 2013) ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu raporda laminer kutunun ve sarsma tablasının çalışma performansı ile ilgili bilgiye yer verilmemiştir.



Foto 1. Laminer Kutu

3.2 Piyezokonik penetrasyon deneyleri (CPTu)

Her bir sıvılaşma deneyi öncesinde arazide yapılan CPTu deneylerinin birebir aynısının laboratuvarında gerçekleştirilebilmesi için Foto 2’de verilen CPT koni penetrasyon düzeneği tasarlanmış ve bu proje kapsamında imal edilmiştir. Foto 2’de verildiği üzere CPT sistemi 2.8m uzunluğunda U-Profiliden oluşan 4 adet ayak üzerine oturtulmuştur. 0.75mx0.47m boyutlarındaki plaka bu dört ayağın üzerine vidalarla monte edilmiştir. CPT sisteminin ayakları ise sağlam zemin üzerinde bulunan I-Profillerin zerine vidalarla sabitlenmiştir. Plakanın üzerinde hidrolik pompa bulunmaktadır. Hidrolik pompanın itme kapasitesi 1m’dir ve tijin ucunda bulunan koni ucunun zeminin içine belirli bir sabit hızda (1.2cm/s) girmesiyle CPTu deneyi yapılır. CPTu konisi, tijleri ve veri toplama sistemi (Foto 3) AB 7.ereve kapsamındaki PIRG-GA-2009-248218 numaralı projesi ile alınmıştır. Zeminin içine girecek CPTu probunun uzunluğu 71cm, çapı ise 3.48cm’dir.

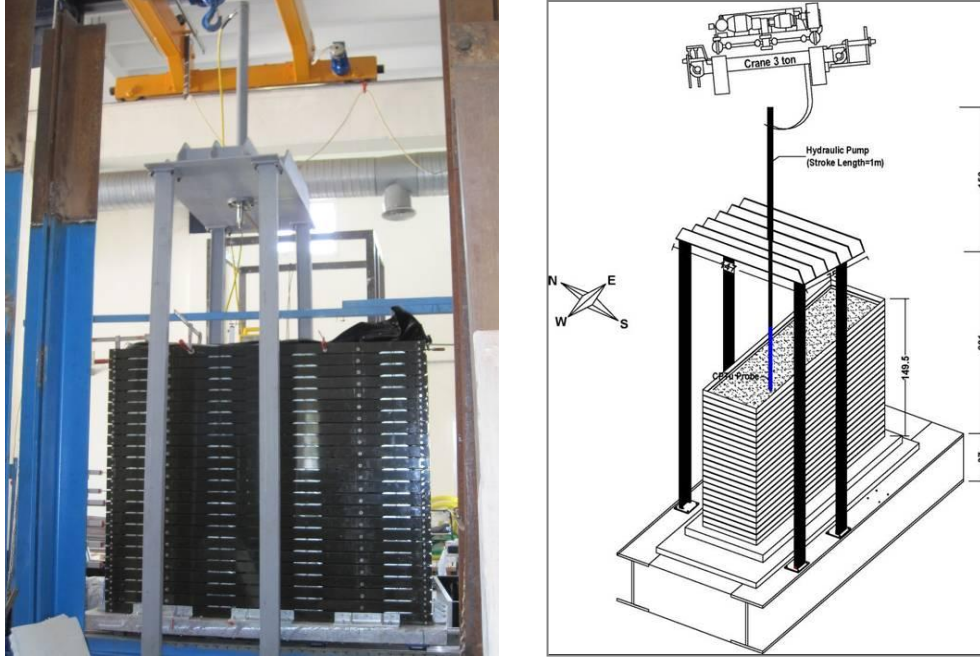


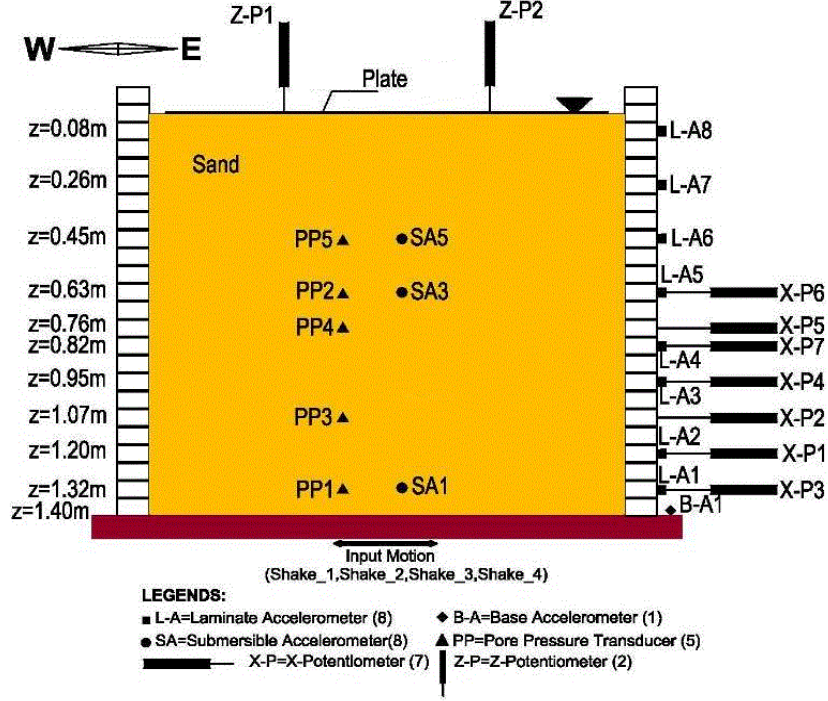
Foto 2. Laboratuvarda CPT deneyleri için kurulan düzenek



Foto 3. CPTU konisi, tijler ve veri toplama sistemi

3.3 Sensörlerin kutuya yerleştirilmesi

Sarsma tablası üzerine laminer kutunun ve kutunun içine membranın yerleştirilmesinden sonra sensörler zemine ve kutunun dışına yerleştirilmiştir. 3 adet suya dayanıklı ivmeölçer ve 5 adet boşluk basıncı ölçer zeminin içine ağırla bağlanarak yerleştirilmiştir. Kutunun hareketini gözlemlemek amacıyla 8 adet ivmeölçer kutunun üzerine silikonlanmıştır. Sarsma tablasının hareketi, sarsma tablasının üzerine yerleştirilen 1 adet ivme ölçer ile ölçülmüştür. Kutunun yapacağı deplasmanı ölçebilmek amacıyla 7 adet potansiyometre kutunun kısa kenarına bağlanmıştır. Zemindeki oturmaların ölçülmesi için 2 adet potansiyometre zeminin üzerine konulmuştur. Şekil 3’de sensörlerin laminer kutudaki yerleşim planı şematik olarak verilmiştir.

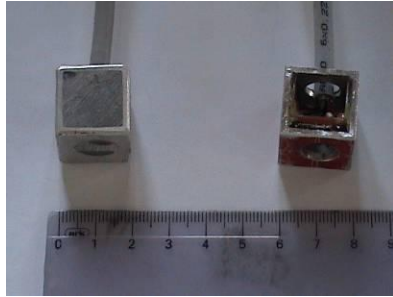


Not:

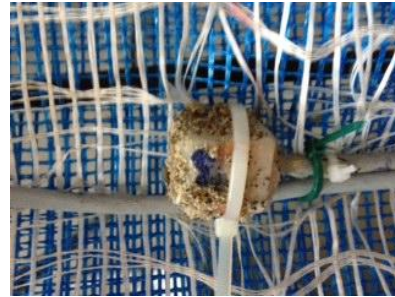
- L-A** : Laminare İvmeölçer (Adet: 8)
- B-A** : Sarsma Tablası İvmeölçer (Adet: 1)
- SA** : Suya Dayanıklı İvmeölçer (Adet: 3)
- PP** : Boşluk Basıncı Ölçer (Adet: 5)
- Z-P** : Potansiyometre (Adet: 2)
- X-P** : Potansiyometre (Adet: 7)

Şekil 3. Sensörlerin laminare kutuya ve zemine yerleştirilme planı

Suya dayanıklı ivmeölçerler: Zeminin sarsma deneyleri sırasında hareketini gözlemlemek amacıyla 3 adet suya dayanıklı 3D ivmeölçer (Foto 4) zeminin içine farklı yüksekliklerde yerleştirilmiştir. Bu ivmeölçerler İZTEK A.Ş.'nin ARGE çalışması sonucunda imal edilmiş ve ilk defa bu projede kullanılmıştır. Bu sensörler x, y, z yönünde ölçüm yapabilme kapasitesine sahiptirler ancak sarsma tablasının tek yönde hareket etmesi nedeniyle diğer yönlerdeki hareketler ölçülmemiştir. Dolayısıyla sensörler veri toplama sistemine sadece x yönünde veri aktaracak şekilde bağlanmıştır.



(a)



(b)

Foto 4. (a) Suya dayanıklı ivmeölçer, (b) İvmeölçerler zemin içerisinde sabitlemek için ağlara bağlanmıştır

Boşluk suyu basıncı ölçen sensörler: 500 kPa kapasiteli boşluk suyu basıncı ölçen sensörler (Foto 5) zeminin içine farklı yüksekliklerde zeminin boşluk suyu basıncındaki değişimi gözlemlemek amacıyla yerleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncındaki değişim zeminin sıvılaşmaya ulaştığı çevrim adedi hakkında bilgi verecektir. Suya dayanıklı ivmeölçer ve boşluk suyu basıncı ölçerler ağların üzerine bağlanarak dolum yapmadan önce laminer kutunun içine yerleştirilmiştir.

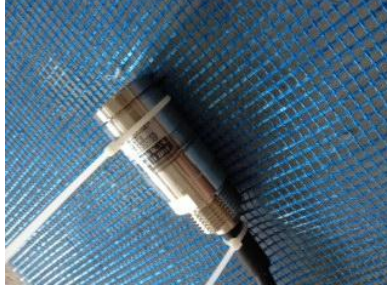


Foto 5. Boşluk suyu basıncı ölçen sensörler

Potansiyometre: 7 adet potansiyometre sarsma deneyleri sırasında belirlenen katmanların yapacağı deplasmanı ölçmek için kutunun kısa kenarına yerleştirilmiştir. 2 adet 400'lük, 4 adet 300'lük, 1 adet 100'lük potansiyometre kullanılmıştır. 400'lük potansiyometre en fazla 40cm ölçüm alabilecek kapasitededir. 300'lük 30cm, 100'lük ise 10cm ölçüm yapabilmektedir. Bu nedenle 13. kata kadar potansiyometre yerleştirilmiştir. 13. kat kutunun her iki tarafında azami 18.2cm deplasman yapmaktadır. Diğer potansiyometreler de katların yapacağı azami deplasmana göre yerleştirilmiştir. Foto 6b'de deney sırasında kullanılan potansiyometreler verilmiştir. 2 adet 100'lük potansiyometre (Foto 6c) zeminde sarsma sırasında oluşacak oturmayı ölçecektir. Potansiyometrelerin uçları zeminin üzerine yerleştirilen kompozit bir malzemeye bağlanmıştır. Bu malzemenin zemin yüzeyi ile beraber hareket etmesi ve zemine batmaması için malzeme yoğunluğu 1.5kg/m^3 olacak şekilde tasarlanmıştır.

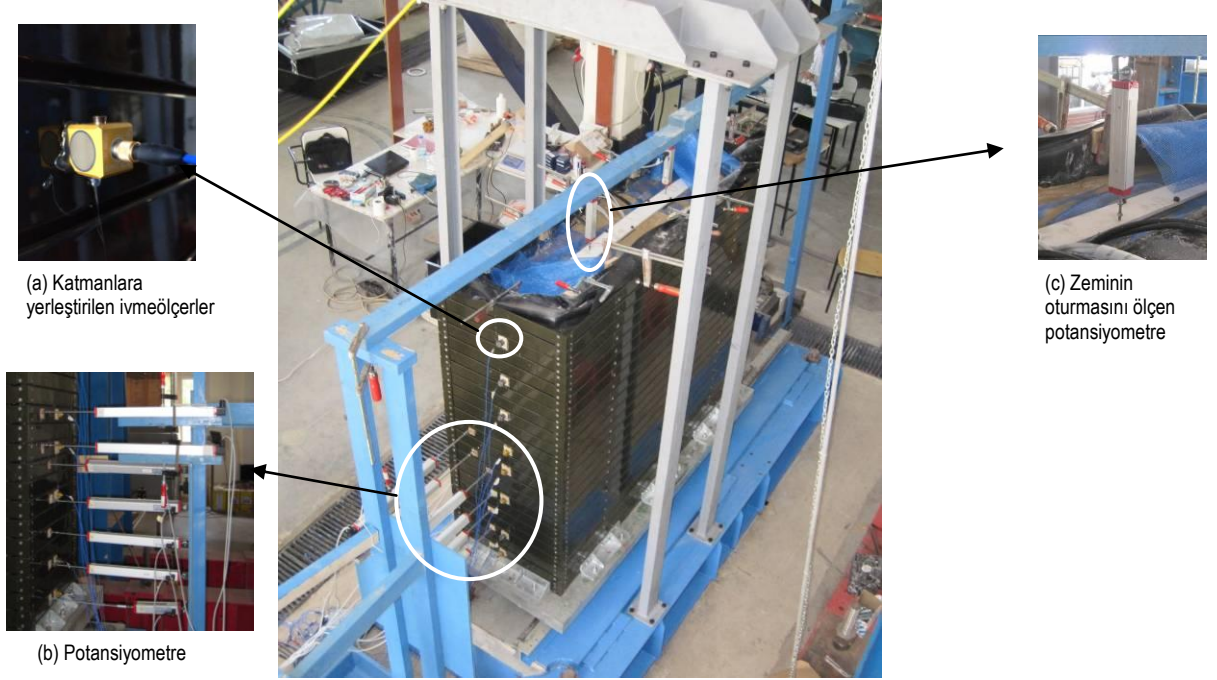


Foto 6. Katmanlara yerleştirilen ivmeölçerler ve potansiyometreler

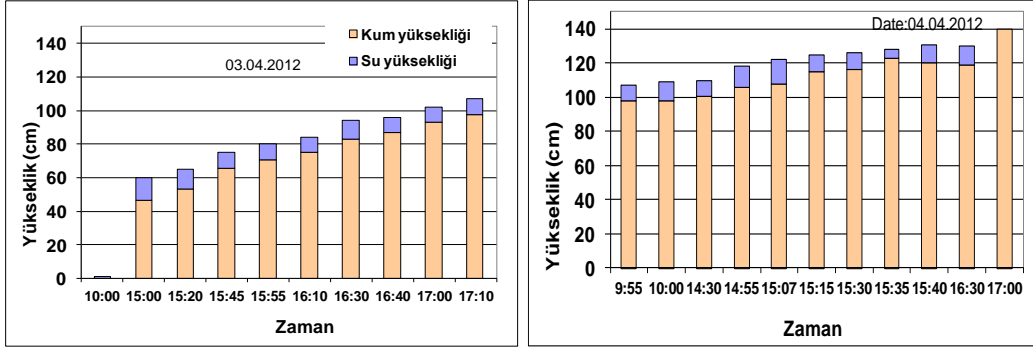
İvmeölçer: 8 adet ivmeölçer (Foto 6a) kutunun kısa kenarına yapıştırılmıştır. Bu ivmeölçerler de kutunun sarsma sırasında davranışıyla ilgili bilgiler verecektir. Sarsma tablasının deneyler sırasındaki davranışı hakkında bilgi edinebilmek için 1 adet ivmeölçer de sarsma tablasının üzerine yerleştirilmiştir.

3.4 Sıvılaşma Deneyleri

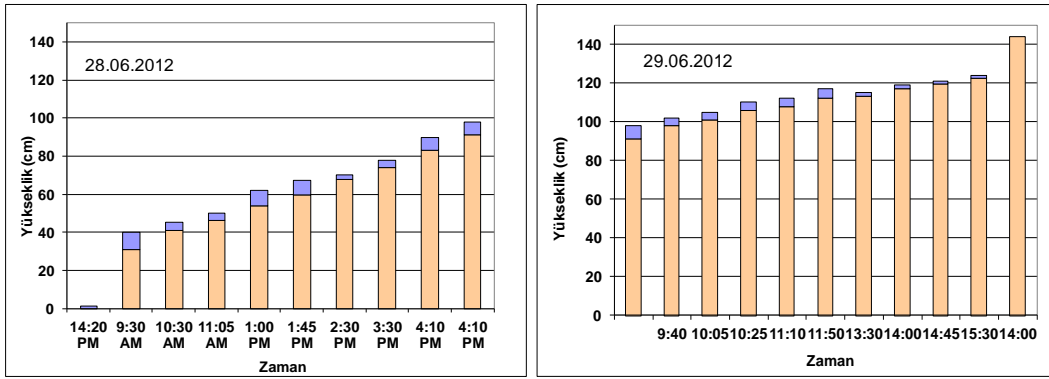
3.4.1 Zemin Numunesinin Hazırlanması

Sıvılaşma deneylerinde kullanılacak olan 5 ton dere kumu ve 5 ton silt bu proje kapsamında alınmış ve sarsma tablası deneyleri için yeterli olmuştur. Sarsma tablası deneyleri için kullanılacak olan numuneler temiz kum, %15 silt içeren kum ve %25 siltten daha az silt muhtevası içeren numuneler hazırlanarak yapılmıştır. Her bir numune hazırlama kabında hazırlanmış ve yağmurlama yöntemi ile 1.4m derinliğe kadar laminer kutunun içerisine yerleştirilmiştir. Numune hazırlama kaplarında zemin su ile karıştırılmış ve buradan çamur pompası sayesinde laminer kutunun içine pompalanmıştır. Laminer kutudaki numune üzerindeki su seviyesi değişmekle beraber 4 cm'den az olmamasına dikkat edilmiştir. Çamur pompası belirli bir açı ile su üzerinde tutulmuş ve yüksek hız ile pompalanmıştır. Pompalama tamamlandıktan sonra her bir zemin danesinin zamanla dingin hale gelmesi beklenmiştir. İlk deneyde kullanılacak olan temiz kumun hazırlanması 1.5 gün sürmüştür (Şekil 4a). İkinci deneyde yaklaşık %15 silt muhtevası içeren numuneler hazırlanmış ve iki buçuk günde 1.44m yükseklikte numune hazırlanmıştır (Şekil 4b). Üçüncü deneyde de %25 silt muhtevası içeren numune hazırlanmak istenmiş ve beş günde istenilen yüksekliğe ulaşılmıştır (Şekil 4c). Silt içeren numunelerin hazırlanmasının daha uzun sürmesi, silt danelerinin laminer kutuda oturması için belirli bir süre geçmesi için beklenmesi ve laminer kutudan hazırlama kabına su pompalama işleminin daha geç yapılmasındandır. Ancak silt danelerinin çökmesi için yeteri kadar beklenmesine rağmen %25 silt muhtevası

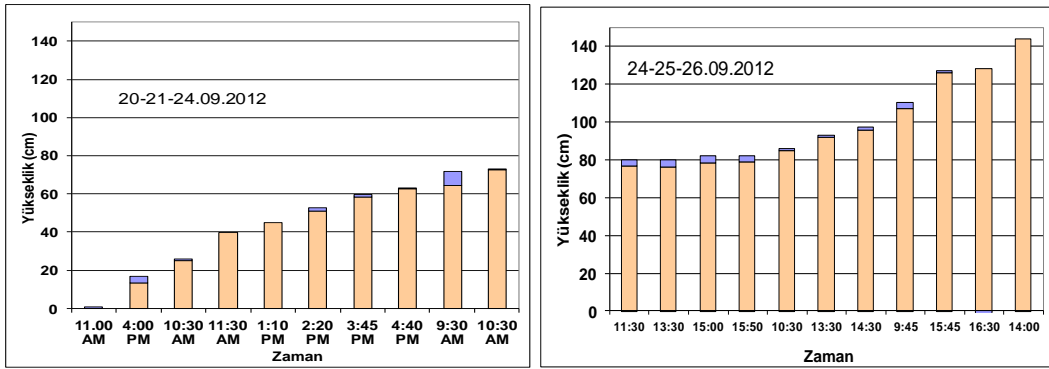
içeren numune bu yöntem ile homojen olarak hazırlanamamıştır. Laminer kutunun üst katmanlarında silt yoğunluğu daha fazla bulunmuştur. %25 ve daha fazla silt içeren numune hazırlamak için farklı bir metodun uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada numunenin homojen olması gerektiği için, 3. deney numunesinin sonuçları bu raporda hatalı bulunduğundan verilmemiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. Numune hazırlama zamanı a) Temiz kum, b) %15 siltli kum, c) %25 siltli kum

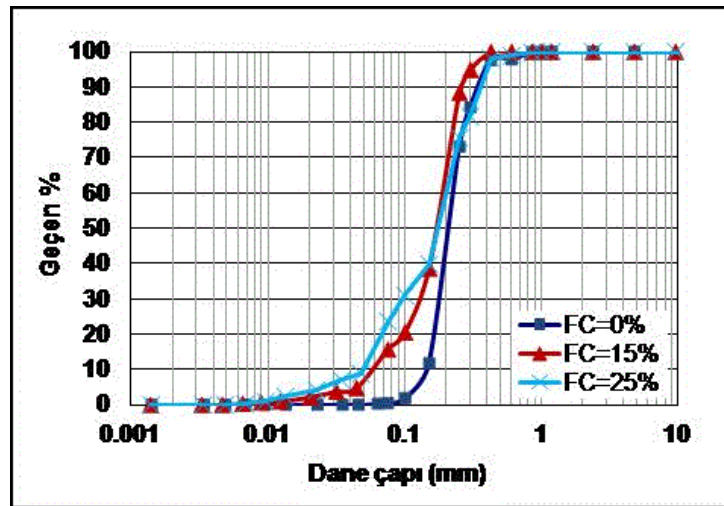
Zemin daneleri dingin hale geldikten sonra laminer kutunun içine pompalanan su, su pompası ile tekrar numune hazırlama kabına aktarılmış ve ilave su eklemeyen belirli bir döngü oluşturulmuştur. Foto 7'de bu döngü verilmiştir. Bu yöntem ile gevşek zemin numunesi elde edilmiştir. Mitchell vd.'nin (1999) bu metod kullanılarak yapılan doldurma ile ilgili önerdikleri yoğunluk %30-%53

arasındadır. Numune 1.2 m'den sonra kuru olarak zemin üzerindeki yaklaşık 5cm su üzerinden dökülmüştür. Suya doygun zemin numunesinin kutuya yerleştirilmesi sırasında katmanlar arasından taşmaması için plastik EPDM membran kullanılmıştır. Seçilen membranın laminar kutunun hareketini engellememesi için ince (1mm kalınlığında) ve elastik olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir sarsma deneyi öncesinde koni penetrasyon testleri (CPT) yapılmış ve yerleştirilmiş olan zemin numunesinin rölatif sıklığı ve yoğunluğu derinlik boyunca tespit edilmiştir. Ağırlıkça %25 siltli kum numuneleri hazırlanırken, homojen numuneler elde edilememiştir. Numune dolumu sırasında 12cm yüksekliğinde ve 5cm çapındaki silindir kovalar belirli derinliklerde indirilmiş ve kovalar zeminle dolunca yukarı çekilmiştir. Bu kovalardaki numuneler üzerinde yapılan elek analizlerine göre %25 silt içeren numunenin bazı derinliklerindeki silt muhtevaları daha düşük çıkmış ve homojen bir dağılım elde edilememiştir. Bu yöntemin %25 ve daha fazla silt içeren numuneler hazırlanması amacıyla kullanılması uygun değildir.



Foto 7. Zemin numunesinin laminar kutuya yerleştirilmesi

Şekil 5'te sarsma deneylerinde kullanılan temiz kumun ve siltli kumların dane dağılım eğrisi ve Tablo 1'de zemin özellikleri verilmiştir. Foto 8'de İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) Malzeme ve Araştırma Laboratuvarında (MAM) temiz kumun, %15 silt içeren numunenin ve %25 silt içeren numunenin SEM mikroskobu altında çekilen görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5. Sarsma tablası deneylerinde kullanılan zeminlerin özellikleri ve elek analizi eğrisi

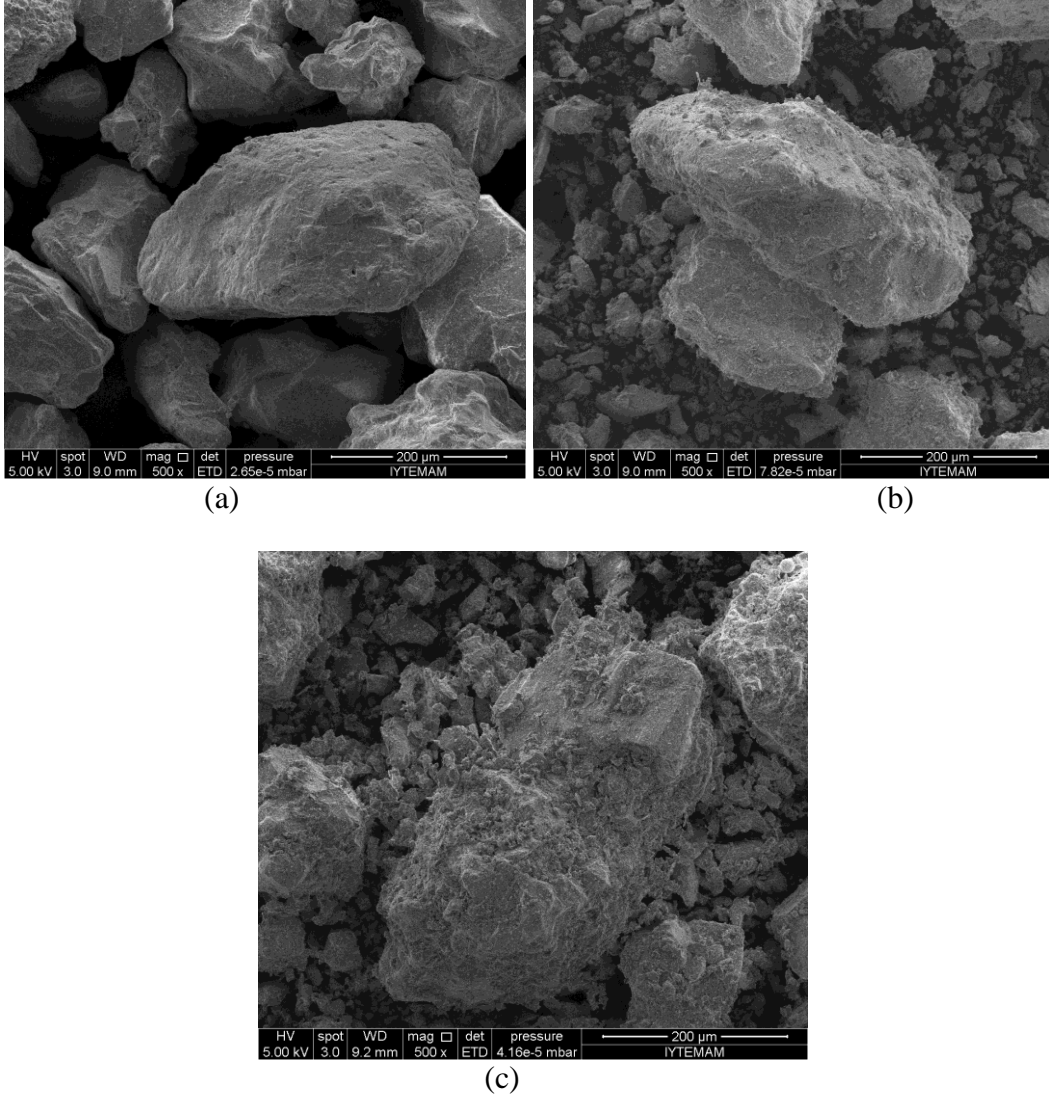


Foto 8. Numunelerin SEM görüntüsü (a) %0 temiz kum, (b) %15 siltli kum ve (c) %25 silt kum

Tablo 1. Hazırlanan zemin numunelerinin özellikleri

Parametreler	Silt oranı=%0	Silt oranı=%15	Silt oranı=%25
G_s	2.61	2.59	2.74
e_{max}	0.80	0.77	0.92
e_{min}	0.60	0.42	0.45
D_{10} (mm)	0.12	0.065	0.05
D_{30} (mm)	0.18	0.13	0.1
D_{50} (mm)	0.21	0.19	0.18
C_u	1.17	1.46	1.80
C_c	1.29	1.37	1.11

Not: G_s : Özgül ağırlık (ASTM D854), e_{min} = minimum boşluk oranı (ASTM D4254), e_{max} = maksimum boşluk oranı (ASTM D4253), D_{10} : %10 geçen; D_{30} : %30 geçen; D_{50} : %50 geçen, $C_u = D_{60}/D_{10}$, ve $C_c = D_{30}^2/(D_{10}D_{60})$

Her bir sarsma deneyi öncesinde CPTu deneyi yapılmıştır. Koni ucu zemin içine girerken radyo frekansları kullanılarak veri toplama kutusunda koni ucu direnci

(q_c) ve boşluk suyu basıncı (u_2) değerleri kaydedilmiştir. Bu ölçülen q_c değerlerinden Robertson ve Powell (1997)'nin önerdiği formül kullanılarak zeminin yoğunluğu (D_r) aşağıda verildiği üzere elde edilmiştir:

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{q_c}{C_o \sigma_v' C_1} \right] \quad (7)$$

Burada, C_o , C_1 ve C_2 boyutsuz faktörlerdir; σ_v' =efektif gerilme ve P_a =atmosfer basıncıdır.

4. Bulgular

Toplam 5 adet zemin numunesi hazırlanmış ve her bir numune üzerinde bir seri sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu sarsma deneylerinden üçü temiz kum, biri %15 siltli kum ve biri %25 siltli kum numunesi hazırlanarak yapılmıştır. %25 siltli kum numunesi üzerinde yapılan deneyler dışındaki tüm testlerin sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir. Homojen olarak hazırlanmak istenen %25 siltli kum numunesi hidrolik doldurma metoduyla homojen olarak hazırlanamamış ve deney sonuçlarının yanıltıcı olmaması için bu raporda verilmemiştir.

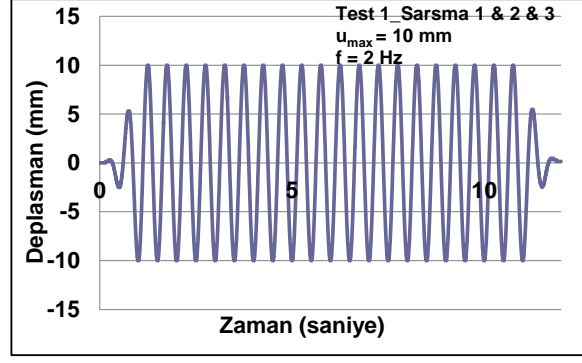
4.1 Temiz kumda sıvılaşma deneyleri

1.4m derinlikte toplam 3 adet temiz kum numunesi hazırlanmış ve her bir numune üzerinde bir seri sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

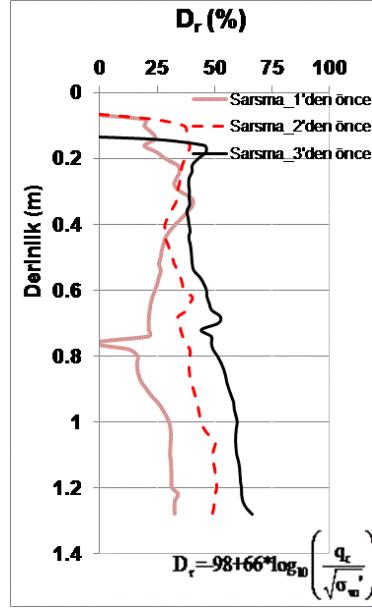
4.1.1 Test 1

Laminer kutunun içerisine ilk olarak temiz dere kumu yerleştirilmiştir (ağırlıkça silt muhtevası<0%). 2 Hz frekansında ve 12 saniye süre ile aynı numuneye aynı maksimum ivmeye sahip (PGA=0.16g) sinüs dalgası uygulanmıştır. Zeminin davranışının gerçek deprem yükü ile karşılaştırılabilmesi için laboratuvar deneylerinde uygulanan PGA 1/0.65 ile düzeltilmiştir. Eşdeğer pik ivme değeri (PGA)_{eq} 0.25g olan sarsmanın çevrimli gerilme oranı (CSR) 0.35 olarak bulunmuştur. Şekil 6'da temiz kuma uygulanan deplasman–zaman grafiği verilmiştir.

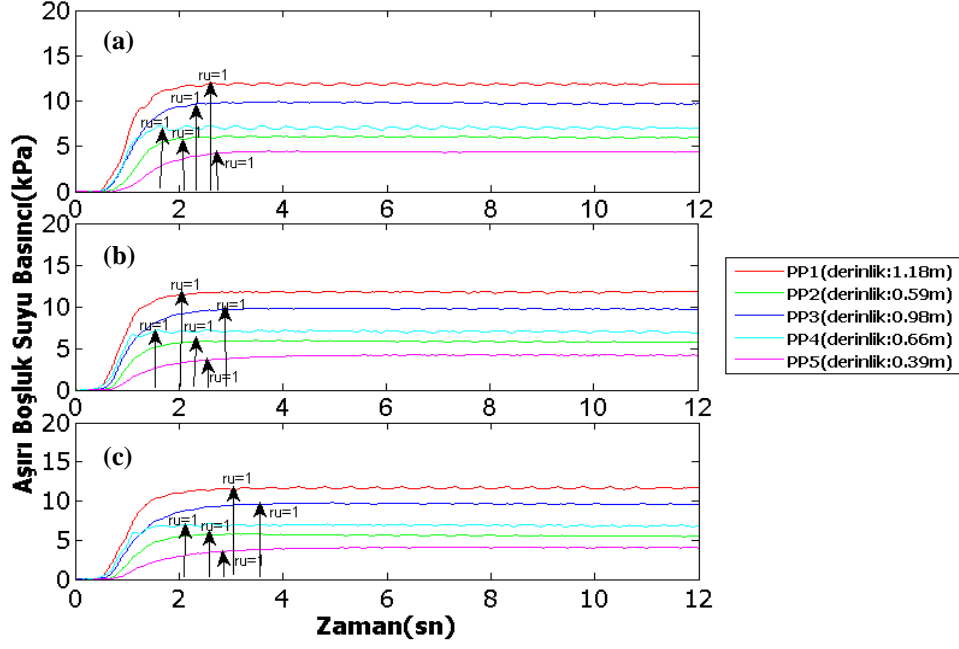
Her bir sarsma deneyi öncesinde CPT deneyi zemin numunesinin tek noktasında uygulanmış ve her bir sarsma deneyi öncesinde hesaplanan relatif sıkılık değerleri derinlik boyunca Şekil 7'de verilmiştir. 0.7m derinliğinde t_{ij} değişimi yapıldığı için bu derinlikte bulunan relatif sıkılık düşük çıkmıştır. Her bir dinamik yükleme sonucunda su basıncı değişimi gözlemlenmiş ve Şekil 8'de zamanla boşluk suyu basıncı değişimi (Δu) verilmiştir. Bu grafikler yardımı ile boşluk suyu oranı ($r_u = \Delta u / \sigma_{vo}'$) 1'e yaklaştığında sıvılaşmanın hangi zamanda meydana geldiği belirlenmiştir. Tablo 2'de test 1 numunesi üzerinde yapılmış deney bulguları (farklı derinliklerdeki relatif sıkılık, sıvılaşma çevrim adedi vs.) özet halinde verilmiştir.



Şekil 6. Test 1’de temiz kuma sarsma tablası deneylerinde uygulanan yatay deplasman



Şekil 7. Her bir deney öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen rölatif sıklıklar



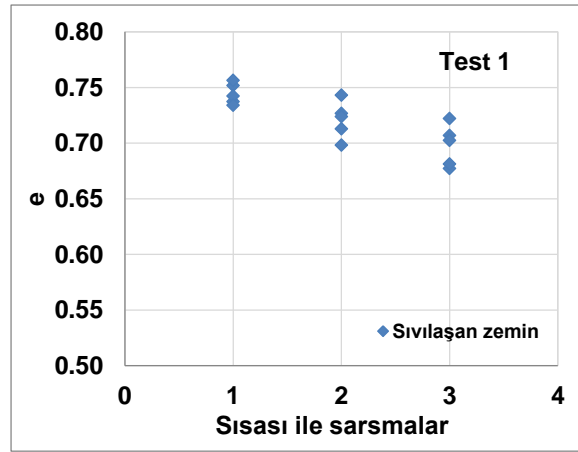
Şekil 8. Test 1 (Temiz kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2 ve (c) Sarsma_3

Tablo 2. Test 1’de sırası ile uygulanan sarsma tablası deneyleri sonuçları

Sarsma No.	PGA	(PGA) _{eq}	CSR	Derinlik	N _L	D _r	e	k
--	<i>g</i>	<i>g</i>		<i>m</i>	-	(%)	-	<i>m/sn</i>
Sarsma_1	0.16	0.25	0.35	1.18	5.1	31	0.74	0.0001095
	0.16	0.25	0.35	0.59	4.0	24	0.75	0.0001283
	0.16	0.25	0.35	0.98	4.6	29	0.74	0.0001156
	0.16	0.25	0.35	0.66	3.1	22	0.76	0.0001350
	0.16	0.25	0.33	0.39	5.2	33	0.73	0.0001055
Sarsma_2	0.16	0.25	0.35	1.18	4.0	51	0.70	0.0000712
	0.16	0.25	0.35	0.59	4.6	37	0.73	0.0000973
	0.16	0.25	0.35	0.98	5.6	44	0.71	0.0000837
	0.16	0.25	0.35	0.66	3.0	38	0.72	0.0000943
	0.16	0.25	0.35	0.39	4.8	28	0.74	0.0001166
Sarsma_3	0.16	0.25	0.33	1.18	6.0	61	0.68	0.0000565
	0.16	0.25	0.33	0.59	5.0	47	0.71	0.0000783
	0.16	0.25	0.33	0.98	7.0	59	0.68	0.0000591
	0.16	0.25	0.33	0.66	4.1	49	0.70	0.0000745
	0.16	0.25	0.33	0.39	5.4	39	0.72	0.0000926

Not: N_L = sivilaşma çevrim adedi, PGA=pik ivme değeri, (PGA)_{eq}=eşdeğer pik ivme değeri, D_r=rölatif sıkılık, e=boşluk oranı, CSR=Çevrimli gerilme oranı k=hidrolik iletkenlik (ASTM E2396)

Sıra ile aynı ivmelerde salınım uygulanan test 1 numunesinin salınım uygulanmadan önceki ve sonraki boşluk oranlarındaki değişimi Şekil 9’da verilmiştir. Hazırlanan temiz kum numunesinin boşluk oranı derinlikçe 0.73-0.76 arasında değişmektedir. 0.25g’lik maksimum ivmeli ilk sarsma uygulandıktan sonra boşluk suyu basıncının sönmülmesi, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon oturması ile boşluk oranı yaklaşık 0.70–0.74 değerlerine düşmüştür. Tekrar uygulanan 0.25g’lik maksimum ivmeli salınım ile tüm derinliklerde tekrar sıvılaşma gözlemlenmiş ve boşluk oranında yaklaşık 0.68 – 0.72 arasında değişen bir azalma olmuştur. Bu verilere göre, birinci sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon ile boşluk oranında çok büyük bir azalma gözlemlenmiştir. İkinci sıvılaşmadan sonra sırası ile uygulanan aynı ivmeli sarsmalarda boşluk oranında tekrar bir azalma gözlemlenmiştir.

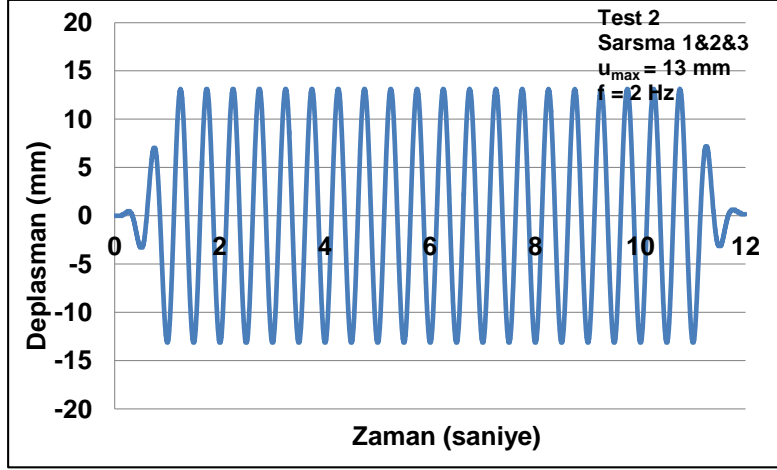


Şekil 9. Test 1 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda boşluk oranındaki değişim

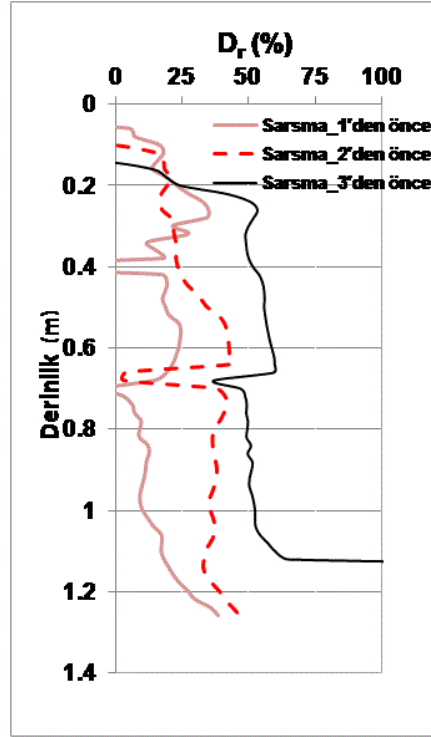
4.1.2 Test 2

Laminer kutunun içerisine ikinci olarak aynı temiz dere kumu yerleştirilmiştir (ağırlıkça silt muhtevası <0%). 2 Hz frekansında ve 12 saniye süre ile aynı numuneye aynı ivmede ($PGA=0.21g$) sinüs dalgası uygulanmıştır. İkinci sarsma sırasında veri toplama sistemi ile olan bağlantı hatasından dolayı 6 saniye sonraki veriler kaydedilememiştir. Ancak zeminde 6 saniyeden önce sıvılaşma olduğu boşluk suyu basıncı değişimlerinden görülmüştür. Zeminin davranışının gerçek deprem yükü ile karşılaştırılabilmesi için laboratuvar deneylerinde uygulanan PGA 1/0.65 ile düzeltilmiştir. Eşdeğer pik ivme değeri ($PGA)_{eq}$ 0.32g olan sarsmanın çevrimli gerilme oranı (CSR) 0.46 olarak bulunmuştur. Şekil 10’da temiz kuma uygulanan deplasman – zaman grafiği verilmiştir.

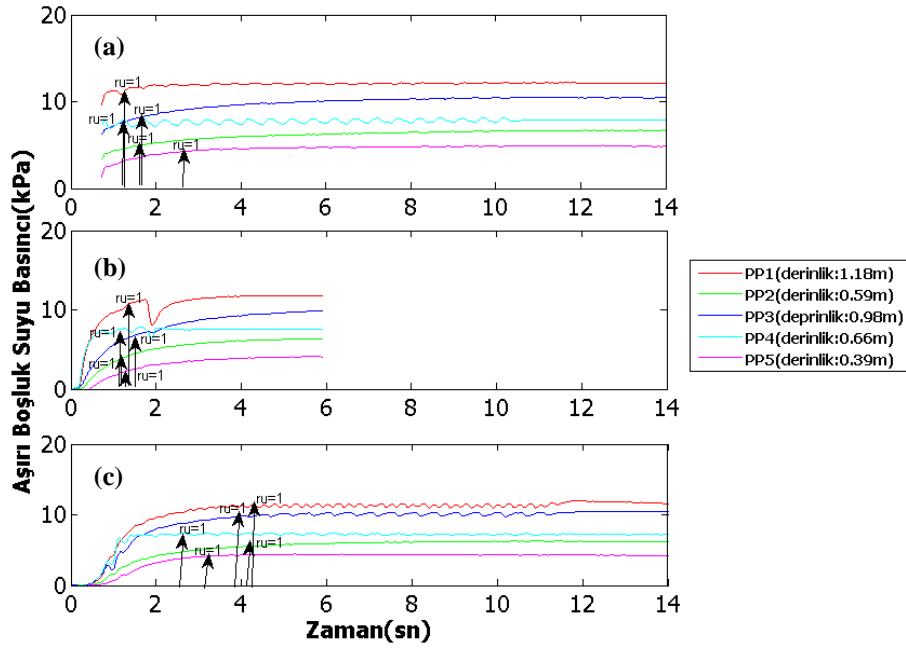
Her bir sarsma deneyi öncesinde CPT deneyi zemin numunesinin tek noktasında uygulanmış ve her bir sarsma deneyi öncesinde hesaplanan D_r değerleri derinlik boyunca Şekil 11’de verilmiştir. Her bir dinamik yükleme sonucunda su basıncı değişimi gözlemlenmiş ve Şekil 12’de zamanla boşluk suyu basıncı değişimi (Δu) verilmiştir. Bu grafikler yardımı ile boşluk suyu oranı ($r_u = \Delta u / \sigma_{vo}'$) 1’e ulaştığında sıvılaşmanın hangi zamanda meydana geldiği belirlenmiştir. Tablo 3’te test 2 numunesi üzerinde yapılmış deney bulguları (farklı derinliklerdeki rölatif sıkılık, sıvılaşma çevrim adedi vs.) özet halinde verilmiştir.



Şekil 10. Test 2’de temiz kuma sarsma tablası deneylerinde uygulanan yatay deplasman



Şekil 11. Her bir deney öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen relatif sıklıklar



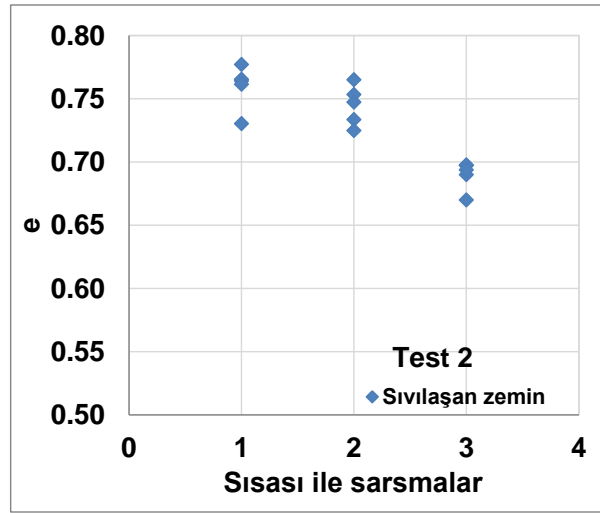
Şekil 12. Test 2 (Temiz kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2 ve (c) Sarsma_3

Tablo 3. Test 2’de sırası ile uygulanan sarsma tablası deney sonuçları

Sarsma No.	PGA	(PGA) _{eq}	CSR	Derinlik	N _L	D _r	e	k
--	g	g	-	m	-	(%)	-	m/sn
Sarsma_1	0.21	0.32	0.46	1.12	2.4	18	0.76	0.0001469
	0.21	0.32	0.46	0.40	3.1	17	0.77	0.0001490
	0.21	0.32	0.46	0.87	3.2	11	0.78	0.0001694
	0.21	0.32	0.46	0.44	2.2	19	0.76	0.0001427
	0.21	0.32	0.46	0.25	5.2	35	0.73	0.0001013
Sarsma_2	0.21	0.32	0.46	1.12	2.5	33	0.73	0.0001049
	0.21	0.32	0.46	0.40	2.0	23	0.75	0.0001304
	0.21	0.32	0.46	0.87	2.6	38	0.72	0.0000954
	0.21	0.32	0.48	0.44	2.0	26	0.75	0.0001222
	0.21	0.32	0.46	0.25	2.2	17	0.77	0.0001484
Sarsma_3	0.21	0.32	0.43	1.12	8.4	65	0.67	0.0000521
	0.21	0.32	0.43	0.40	8.2	51	0.70	0.0000703
	0.21	0.32	0.43	0.87	7.6	51	0.70	0.0000707
	0.21	0.32	0.43	0.44	5.0	55	0.69	0.0000649
	0.21	0.32	0.43	0.25	6.2	53	0.69	0.0000678

Not: N_L=sıvılaşma çevrim adedi, PGA=pik ivme değeri, (PGA)_{eq} = eşdeğer pik ivme değeri, D_r = rölatif sıklık, e=boşluk oranı, CSR= Çevrimli gerilme oranı, k=hidrolik iletkenlik (ASTM E2396)

Şekil 13, sıra ile aynı ivmede salınım uygulanan test 2 numunesinin salınım uygulanmadan önceki ve sonraki boşluk oranlarındaki değişimi göstermektedir. Hazırlanan temiz kum numunesinin boşluk oranı derinlikçe 0.73-0.78 arasında değişmektedir. 0.32g'lik maksimum ivmeli ilk sarsma uygulandıktan sonra boşluk suyu basıncının sönümlenmesi, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon oturması ile boşluk oranı yaklaşık 0.72–0.77 değerlerine düşmüştür. Tekrar uygulanan 0.32g'lik maksimum ivmeli salınım ile boşluk oranı yaklaşık 0.67–0.70 değerlerine düşmüştür. Bu verilere göre, birinci sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon ile boşluk oranında çok büyük bir azalma gözlemlenmiştir. İkinci sıvılaşmadan sonra sırası ile uygulanan aynı ivmeli sarsmalarda boşluk oranında tekrar bir azalma gözlemlenmiştir.

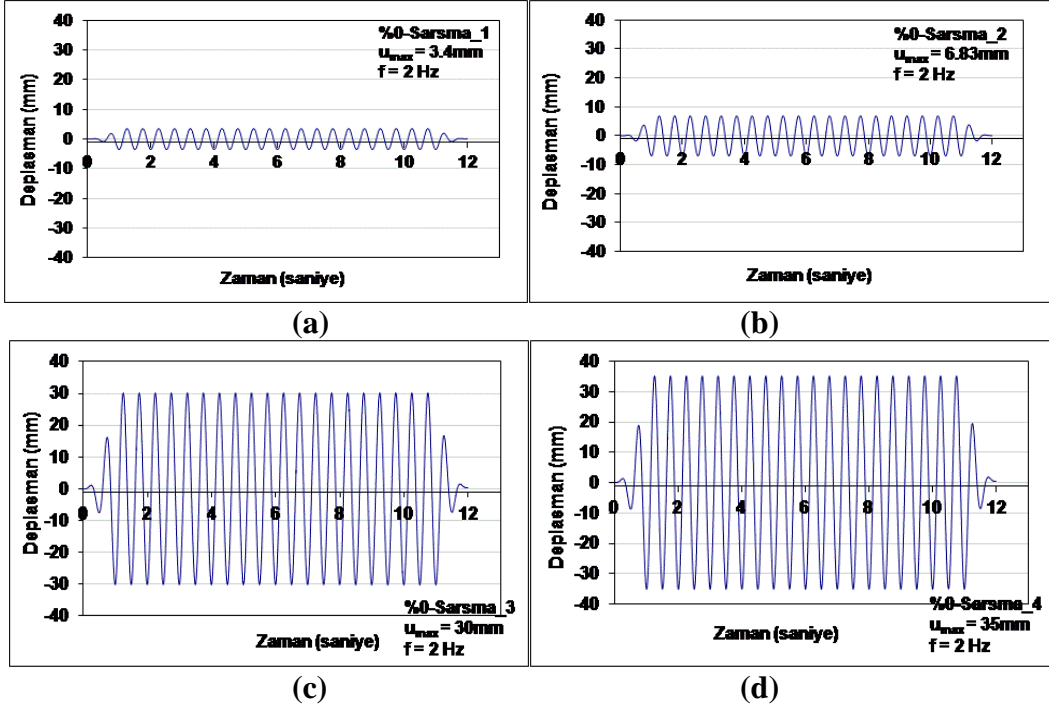


Şekil 13. Test 2 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda boşluk oranındaki değişim

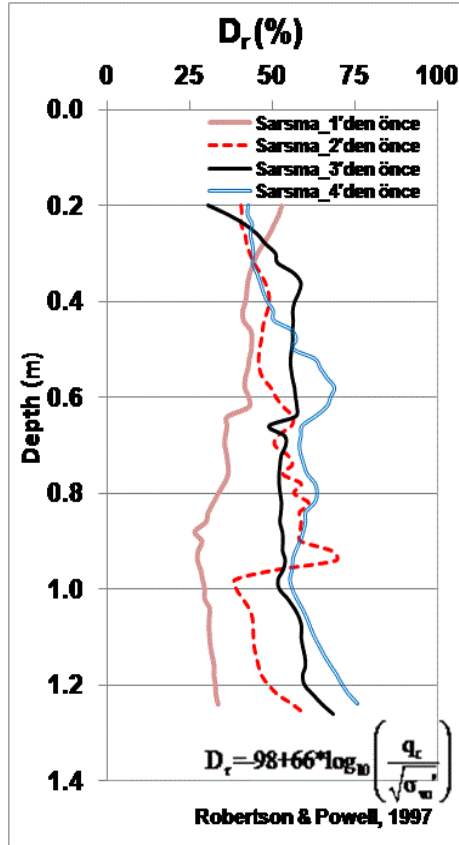
4.1.3 Test 3

Laminer kutu üçüncü olarak aynı temiz dere kumu ile doldurulmuştur (ağırlıkça silt muhtevası < 0%). 2 Hz frekansında ve 12 saniye süre ile aynı numuneye farklı ivmelerde sıra ile bir seri sinüs dalgası uygulanmıştır. Farklı ivmelerin sıvılaşma üzerindeki etkisine bakılmıştır. Zeminin davranışının gerçek deprem yükü ile karşılaştırılabilmesi için laboratuvar deneylerinde uygulanan PGA 1/0.65 ile düzeltilmiştir. Farklı eşdeğer pik ivme değerli sarsmaların çevrimli gerilme oranı (CSR) farklı bulunmuştur. Şekil 14a-d'de temiz kuma sırası ile uygulanan deplasman – zaman grafikleri verilmiştir.

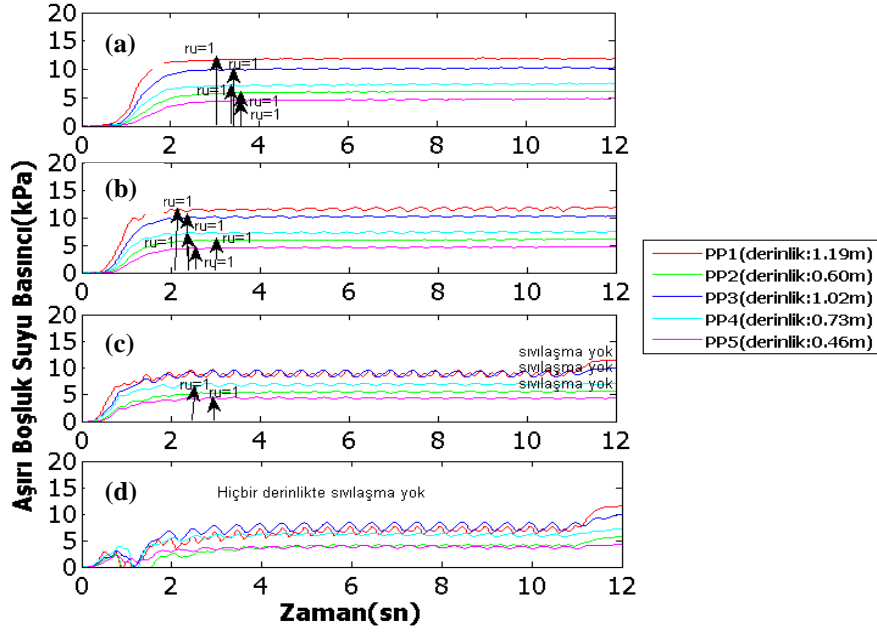
Şekil 15'te her bir sarsma deneyi öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından bulunan rölatif sıklık derinlik boyunca verilmiştir. Her bir dinamik yükleme sonucunda su basıncı değişimi gözlemlenmiş ve Şekil 16'da zamanla boşluk suyu basıncı değişimi (Δu) verilmiştir. Bu grafikler yardımı ile boşluk suyu oranı ($r_u = \Delta u / \sigma_{v0}$) 1'e ulaştığında sıvılaşmanın hangi zamanda meydana geldiği belirlenmiştir. Tablo 4'te test 3 numunesi üzerinde yapılmış deney bulguları (farklı derinliklerdeki rölatif sıklık, sıvılaşma çevrim adedi vs.) özet halinde verilmiştir.



Şekil 14. Test 3’de temiz kuma sırası ile uygulanan yatay deplasmanlar (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2, (c) -Sarsma_3, (d) Sarsma_4



Şekil 15. Her bir sarsma tablası deneyi öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen relatif sıkılıklar



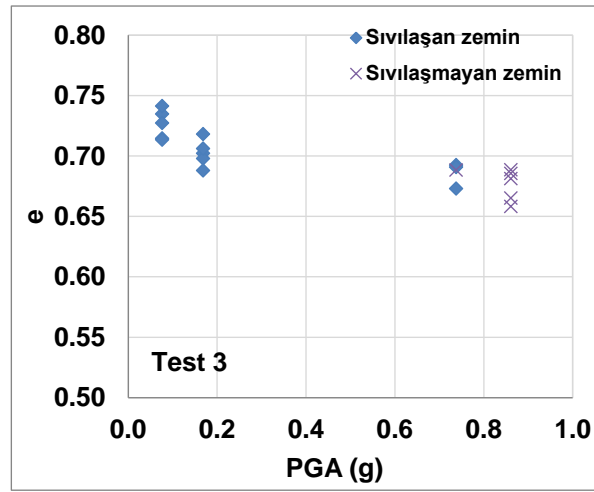
Şekil 16. Test 3 (temiz kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Test 3-Sarsma_1, (b) Test 3-Sarsma_2, (c) Test 3-Sarsma_3 ve (d) Test 3-Sarsma_4

Tablo 4. Test 3'te sırası ile uygulanan sarsma tablası deneyleri sonuçları

Sarsma No.	PGA	(PGA) _{eq}	CSR	Derinlik	N _L	D _r	e	k
--	g	g	--	m	-	%	-	m/sn
Sarsma_1	0.05	0.08	0.11	1.19	6.0	33	0.73	0.0001064
	0.05	0.08	0.11	0.60	7.1	43	0.71	0.0000853
	0.05	0.08	0.11	1.02	6.7	29	0.74	0.0001143
	0.05	0.08	0.11	0.73	6.6	36	0.73	0.0000979
	0.05	0.08	0.10	0.46	6.9	43	0.71	0.0000841
Sarsma_2	0.11	0.17	0.24	1.19	4.2	49	0.70	0.0000744
	0.11	0.17	0.23	0.60	6.0	51	0.70	0.0000710
	0.11	0.17	0.24	1.02	4.7	41	0.72	0.0000885
	0.11	0.17	0.23	0.73	4.6	56	0.69	0.0000636
	0.11	0.17	0.23	0.46	4.9	47	0.71	0.0000776
Sarsma_3	0.48	0.74	0.99	1.19	No-Liq	63	0.67	0.0000540
	0.48	0.74	0.99	0.60	No-Liq	60	0.68	0.0000586
	0.48	0.74	0.99	1.02	No-Liq	56	0.69	0.0000638
	0.48	0.74	0.99	0.73	5.0	54	0.69	0.0000668
	0.48	0.74	0.99	0.46	5.8	55	0.69	0.0000655
Sarsma_4	0.56	0.86	1.16	1.19	No-Liq	71	0.66	0.0000458
	0.56	0.86	1.16	0.60	No-Liq	67	0.67	0.0000494
	0.56	0.86	1.16	1.02	No-Liq	57	0.69	0.0000619
	0.56	0.86	1.16	0.73	No-Liq	59	0.68	0.0000590
	0.56	0.86	1.16	0.46	No-Liq	56	0.69	0.0000640

Not: N_L=sıvılaşma çevrim adedi, No-Liq=sıvılaşma olmamış, PGA=pik ivme değeri, (PGA)_{eq}=eşdeğer pik ivme değeri, D_r=rölatif sıklık, e=boşluk oranı, CSR=Çevrimli gerilme oranı, k=hidrolik iletkenlik (ASTM E2396)

Şekil 17 sıra ile farklı ivmelerde (PGA) salınım uygulanan Test 3 numunesinin salınım uygulanmadan önceki ve sonraki boşluk oranlarındaki değişimi göstermektedir. Hazırlanan temiz kum numunesinin boşluk oranı 0.71-0.74 arasında değişmektedir. 0.08g'lik maksimum ivmeli sarsma uygulandıktan sonra boşluk suyu basıncının sönmülmesi, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon oturması ile boşluk oranı yaklaşık 0.69–0.72 değerlerine düşmüştür. 0.17g'lik maksimum ivmeli sarsma uygulandıktan sonra ise iki derinlik dışındaki derinliklerde sıvılaşma gözlemlenmemiş ve boşluk oranı yaklaşık 0.67–0.69 değerlerine düşmüştür. Daha sonra 0.74g'lik sarsma uygulandıktan sonra ise hiçbir derinlikte sıvılaşma olmamış ve boşluk oranında değişim 0.66-0.69 değerine düşmüştür. Bu şekilde cross işareti ile verilen semboller sıvılaşmanın olmadığı derinlikleri göstermektedir. Bu verilere göre, birinci sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon ile boşluk oranında çok büyük bir azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 17. Test 3 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda boşluk oranındaki değişim

4.2 Siltli kumda sıvılaşma deneyleri

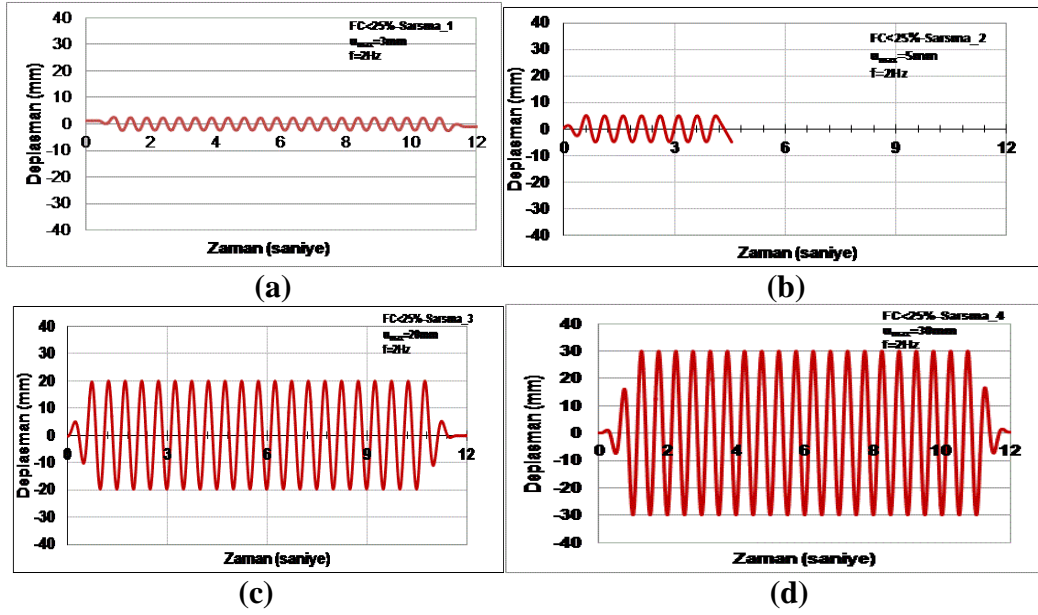
Siltli kumda toplam 2 adet sarsma deneyi yapılmıştır. Bunlardan biri ağırlıkça %15 silt içeren numune, diğeri de %35 silt içeren numunedir. Ancak bu numunelerden %35 silt içeren numune hidrolik doldurma metoduyla yeteri kadar homojen olmamış ve derinlik boyunca silt muhtevası farklı olan numuneler elde edilmiştir. Dolayısıyla homojen olmayan zemindeki sonuçların doğru olmayacağı düşünülerek bu raporda sadece %15 siltli kumda yapılan deney sonuçları verilmiştir.

4.2.1 Test 4 (Silt oranı ağırlıkça~%15)

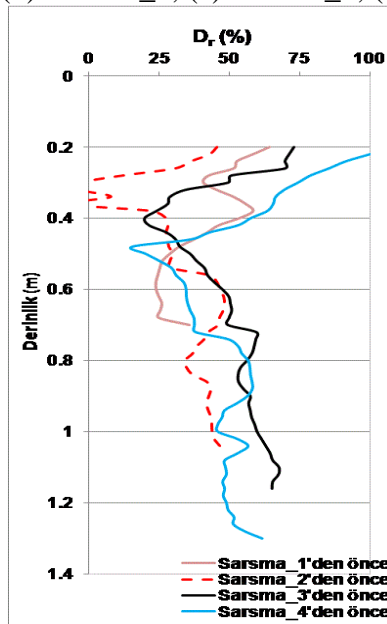
Laminer kutunun içerisine dördüncü olarak ağırlıkça ince dane oranı yaklaşık %15 olan plastik olmayan siltli dere kumu yerleştirilmiştir. İkinci uygulanan sarsma dışında aynı numuneye 12 saniye 2Hz frekansında farklı ivmelerde bir seri sinüs dalgası uygulanmıştır. Sarsma tablasındaki arızadan dolayı ikinci sarsma 2Hz frekansında ancak 5 saniye sürmüştür. Zeminin davranışının gerçek deprem yükü ile karşılaştırılabilmesi için laboratuvar deneylerinde uygulanan PGA 1/0.65 ile

düzeltilmiştir. Farklı eşdeğer pik ivme değerli sarsmaların çevrimli gerilme oranı (CSR) farklı bulunmuştur. Şekil 18a-d'de siltli kuma sırası ile uygulanan deplasman – zaman grafikleri verilmiştir.

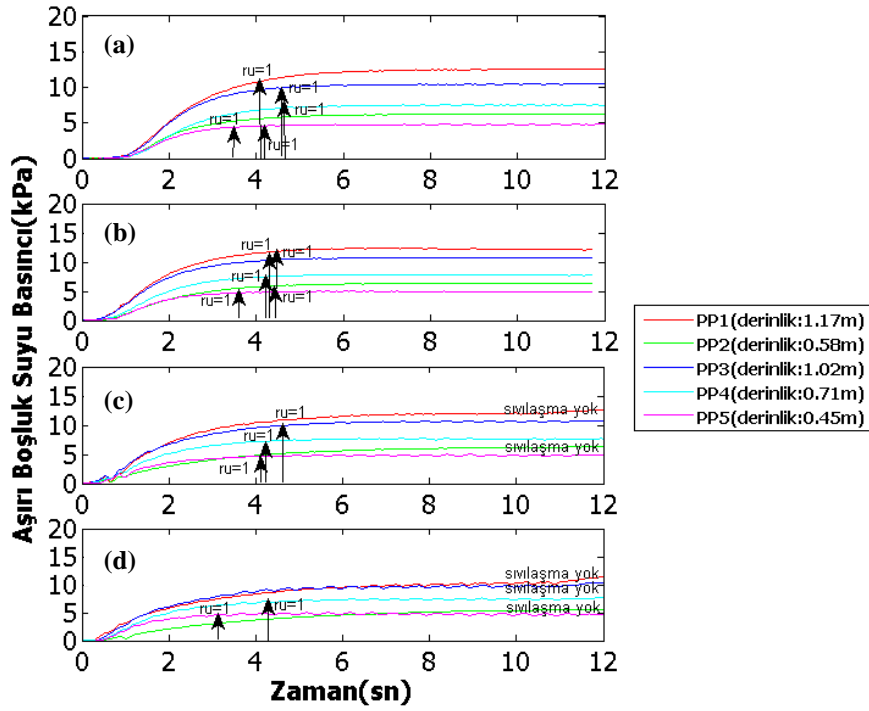
Her bir sarsma deneyi öncesinde CPT deneyi zemin numunesinin tek noktasında uygulanmış ve her bir sarsma deneyi öncesinde hesaplanan rölatif sıkılık değerleri derinlik boyunca Şekil 19'da verilmiştir. Her bir dinamik yükleme sonucunda su basıncı değişimi gözlemlenmiş ve Şekil 20'de zamanla su basıncı değişimi verilmiştir. Bu grafikler yardımı ile boşluk suyu oranı ($r_u = \Delta u / \sigma_{vo}'$) 1'e ulaştığında sıvılaşmanın hangi zamanda meydana geldiği belirlenmiştir. Tablo 5'te test 4 numunesi üzerinde yapılmış deney bulguları (farklı derinliklerdeki rölatif sıkılık, sıvılaşma çevrim adedi vs.) özet halinde verilmiştir.



Şekil 18. Test 4'de siltli kuma sırası ile uygulanan yatay deplasmanlar (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2, (c) Sarsma_3, (d) Sarsma_4



Şekil 19. Her bir deney öncesinde yapılan CPT deney sonuçlarından elde edilen rölatif sıkılıklar



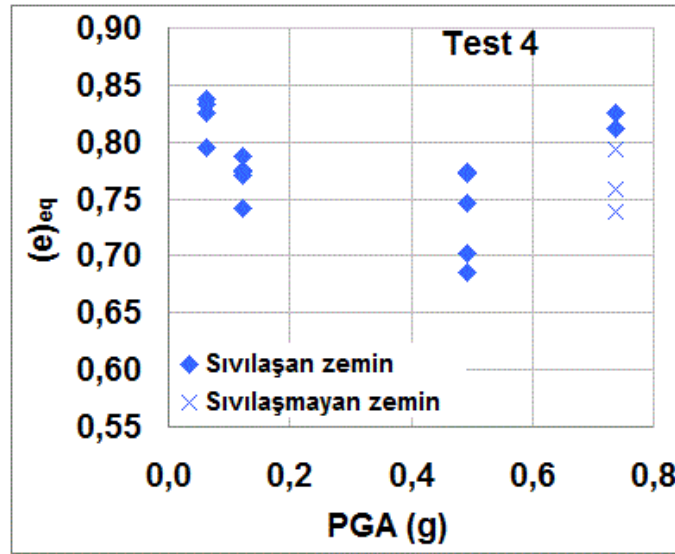
Şekil 20. Test 4 (siltli kumda) sarsma tablası deneyleri sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (a) Sarsma_1, (b) Sarsma_2, (c) Sarsma_3, (d) Sarsma_4

Tablo 5. Test 4’de sırası ile uygulanan sarsma tablası deneyleri sonuçları

Sarsma No.	PGA	(PGA) _{eq}	CSR	Derinlik	N _L	D _r	e	(e _c) _{eq}	k
--	g	G	--	m	-	%	-	-	m/sn
Sarsma_1	0.04	0.06	0.08	1.17	8.0	33	0.66	0.80	0.0000141
	0.04	0.06	0.09	0.58	6.7	24	0.69	0.84	0.0000176
	0.04	0.06	0.08	1.02	9.0	33	0.65	0.80	0.0000140
	0.04	0.06	0.08	0.71	9.0	36	0.65	0.79	0.0000132
	0.04	0.06	0.09	0.45	8.2	37	0.64	0.79	0.0000127
Sarsma_2	0.08	0.12	0.18	1.17	8.6	46	0.61	0.76	0.0000104
	0.08	0.12	0.17	0.58	8.6	46	0.61	0.76	0.0000104
	0.08	0.12	0.18	1.02	8.4	45	0.61	0.76	0.0000106
	0.08	0.12	0.18	0.71	8.2	42	0.62	0.77	0.0000112
	0.08	0.12	0.18	0.45	7.0	28	0.67	0.82	0.0000158
Sarsma_3	0.32	0.49	0.66	1.17	No-Liq	65	0.54	0.68	0.0000065
	0.32	0.49	0.66	0.58	No-Liq	50	0.60	0.74	0.0000094
	0.32	0.49	0.66	1.02	9.0	65	0.54	0.68	0.0000066
	0.32	0.49	0.66	0.71	8.2	59	0.56	0.70	0.0000075
	0.32	0.49	0.66	0.45	8.0	36	0.64	0.79	0.0000130
Sarsma_4	0.48	0.74	0.99	1.17	No-Liq	48	0.60	0.75	0.0000098
	0.48	0.74	1.05	0.58	No-Liq	34	0.65	0.80	0.0000138
	0.48	0.74	0.99	1.02	No-Liq	53	0.59	0.73	0.0000087
	0.48	0.74	0.99	0.71	8.3	38	0.64	0.78	0.0000125
	0.48	0.74	0.99	0.45	6.0	36	0.64	0.79	0.0000131

Not: N_L=sıvılaşma çevrim adedi, No-Liq=sıvılaşma olmamış, PGA=pik ivme değeri, (PGA)_{eq}=eşdeğer pik ivme değeri, D_r=rölatif sıkılık, e=boşluk oranı, CSR=Çevrimli gerilme oranı, (e_c)_{eq}=eşdeğer boşluk oranı, k=hidrolik iletkenlik (ASTM E2396)

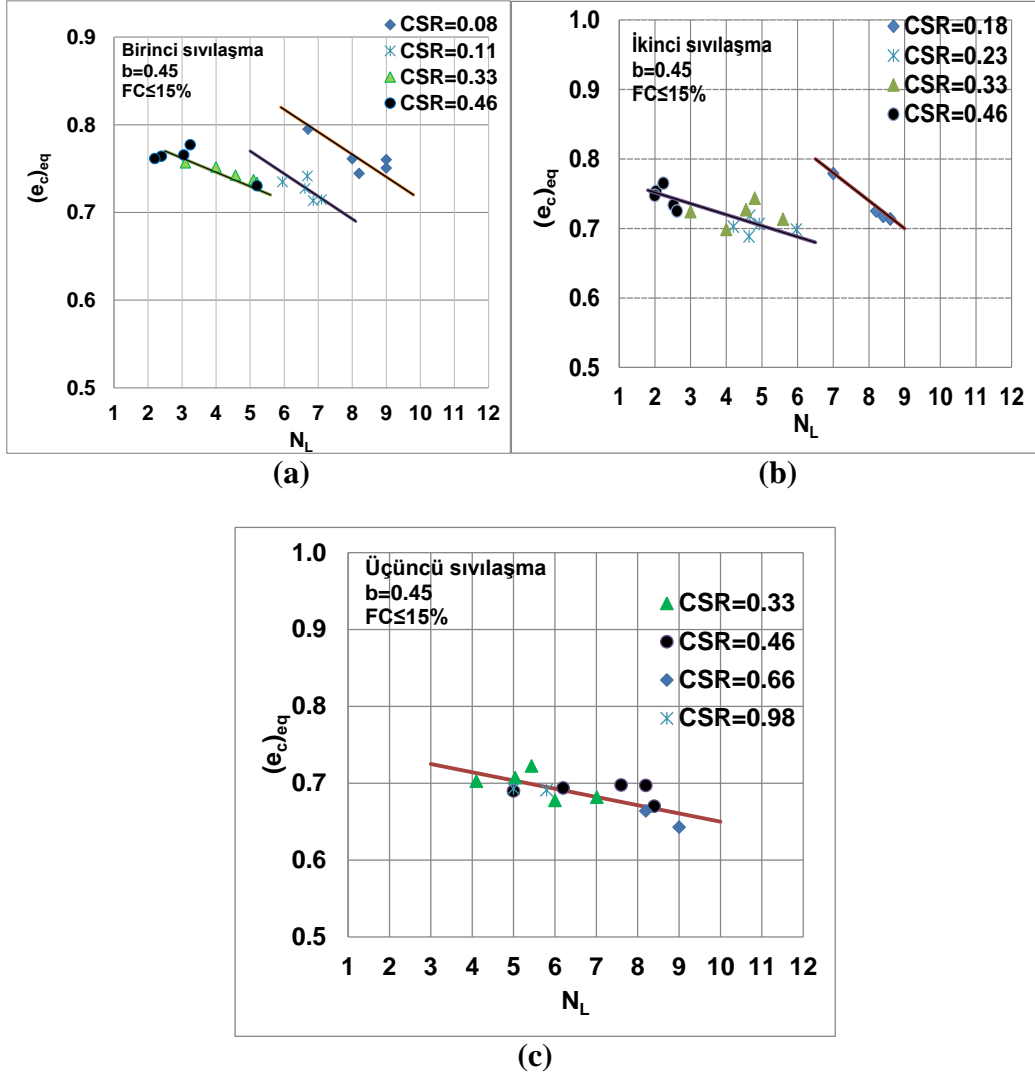
Şekil 21, sıra ile farklı ivmelerde salınım uygulanan test 4 numunesinin salınım uygulanmadan önceki ve sonraki boşluk oranlarındaki değişimi göstermektedir. Test 4'te ağırlıkça %15 silt muhtevası içeren siltli kum numunesinin temiz kum ile karşılaştırılabilmesi için global boşluk oranı yerine eşdeğer boşluk oranı kullanılacaktır. Numune ilk hazırlandığında $(e_c)_{eq}$ değeri derinlikçe 0.79-0.84 arasında değişmektedir. 0.06g'lik maksimum ivmeli sarsma uygulandıktan sonra boşluk suyu basıncının sönümlenmesi, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon oturması ile boşluk oranı yaklaşık 0.76-0.82 değerlerine düşmüştür. Daha yüksek bir ivme uygulandığında (0.12g) tüm derinliklerde sıvılaşma olmuş ve boşluk oranı yaklaşık 0.68-0.79 değerlerine düşmüştür. Uygulanan 0.49g'lik salınım ile toplam üç derinlikte sıvılaşma olmamış ve boşluk oranında bir azalma olmamıştır (0.73-0.80). Bu şekilde cross işareti ile verilen semboller sıvılaşmanın olmadığı derinlikleri göstermektedir. Bu verilere göre, birinci sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon ile boşluk oranında çok büyük bir azalma gözlemlenmiştir. İkinci sıvılaşmadan sonra sırası ile uygulanan yüksek ivmeli sarsmalarda boşluk oranında çok fazla bir azalma gözlemlenmemiştir. Ancak üçüncü sarsmadan sonra boşluk oranı artmış ve üç derinlik haricindeki derinliklerde sıvılaşma gözlemlenmiştir.



Şekil 21. Test 4 numunesine sırası ile uygulanan sarsmalar sonucunda eşdeğer boşluk oranındaki değişim

4.3 Eşdeğer boşluk oranının sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direncin belirlenmesinde değerlendirilmesi

Birinci, ikinci ve üçüncü deneylerde hazırlanan temiz kum numunelerinin sıvılaşma direnci ile test 4'de hazırlanan siltli kumun sıvılaşma dirençlerinin karşılaştırılabilmesi için sıvılaşma dirençlerinin eşdeğer boşluk oranı $(e_c)_{eq}$ ile değişimine bakılmıştır. Tüm testlerin ilk sıvılaşma çevrim adedinin eşdeğer boşluk oranına göre değişimi Şekil 22a'da verilmiştir. Sırasıyla Şekil 22b ve 22c'de ikinci ve üçüncü sıvılaşma için gerekli olan çevrim adedinin eşdeğer boşluk oranına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 22. (a) İlk sınıflama, (b) ikinci sınıflama ve (c) üçüncü sınıflama çevrim adedinin (N_L) eşdeğer boşluk oranı ile değişimi

Şekil 22a'da verilen ilk sınıflamada, her bir çevrimli gerilme oranında (CSR) eşdeğer boşluk oranı ile ilk sınıflama için gerekli olan çevrim adedi arasında doğrusal bir bağıntı vardır (Thevanayagam vd. 2000, Zlatovic ve Ishihara 1997, Koester 1994, Vaid 1994). Her bir çevrimli gerilme oranında daneler arası temas yoğunluğunun artması ile ya da başka bir değişle eşdeğer boşluk oranının azalması ile sınıflama çevrim adedinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca CSR değeri büyüdükçe doğrular birbirine çok yaklaştığı ve CSR=0.33 ve 0.46'da aynı boşluk oranında aynı çevrim adedine sahip olduğu görülmüştür. Ha vd. 2011'de yaptığı çalışmalardan farklı olarak daneler arası temas birinci sınıflama direncinin belirlenmesinde önemli bir faktördür.

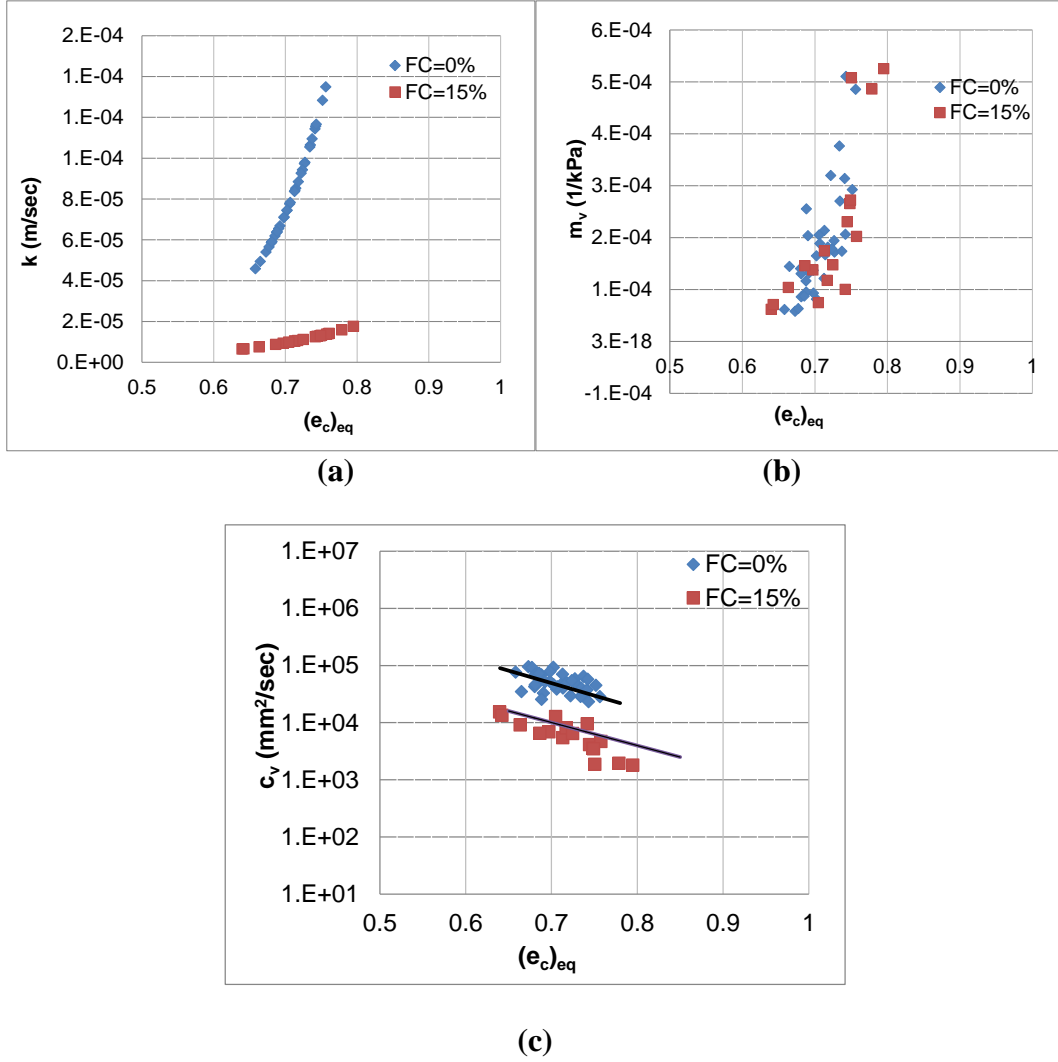
Şekil 22b'de farklı CSR değerlerinde eşdeğer boşluk oranı azaldıkça sınıflama için gerekli olan çevrim adedinin arttığı bulunmuştur. Sınıflamada gözlemlenen bu değişim eşdeğer boşluk oranının azalması ile sınıflama direncinin artması varsayımına uymaktadır. Ancak her bir teste ilk sınıflama ve sonrasında meydana gelen konsolidasyon oturması ile fazlasıyla azalan boşluk oranına rağmen ikinci sınıflama için gerekli olan çevrim adedinde çok fazla bir artış gözlemlenmemiş

hatta bazı derinliklerde sıvılaşma direnci düşmüştür. İlk sıvılaşmadan sonra ikinci sıvılaşma direncinin azalması durumu Kuribayshi vd, 1975, Yasuda vd., 1988, Sims vd., 1995, Oda vd., 2001, Olson vd. 2005, Ha vd., 2011'in laboratuvar ve arazi deney sonuçlarına göre bulunduğu sonuçlarla tutarlıdır. Birinci sıvılaşma ve konsolidasyon oturması sonrasında uygulanan ikinci salınım sonucunda oluşan sıvılaşma direncinin azalması veya değişmemesi tamamen daneler arası temas ile bağıntılı değildir.

Şekil 22c'de verildiği üzere her bir numune, ilk sıvılaşma sonundaki kadar olmasa dahi, ikinci sarsmadan sonra az da olsa sıkılaştı, zeminin sıvılaşma direnci artmış ve hatta bazı derinliklerde sıvılaşma olmamıştır. Rölatif sıklık çok artmadığı halde ikinci sıvılaşmadan sonraki sarsmalarda sıvılaşma direncinin artması Oda vd. (2001) hipotezine (kumun kolon yapıda olması) uymamaktadır. Bu hipoteze göre ilk sıvılaşmadan sonra oluşan genç çökel benzeri numune yapısı, ikinci ve üçüncü sıvılaşmalar sonunda da gözükmeye beklenir ve sıvılaşma çevrim adedinin azalması beklenir ancak üçüncü sarsma deneylerinde sıvılaşma direnci çok artmış ve hatta bazı derinliklerde numune sıvılaşmamıştır. Dördüncü sarsmanın uygulandığı hiçbir numunede sıvılaşma olmamıştır. Ha vd. 2011'de yaptığı çalışmalara paralel olarak eşdeğer boşluk oranı veya rölatif sıklık ikinci sıvılaşma direncinin belirlenmesinde yeterli bir belirleyici değildir. İlk sıvılaşma sonunda danelerin yerleşimlerinin/oryantasyonunun değişmesi göz önüne alındığında konsolidasyon karakterlerinin ya da zeminin drenaj karakterlerinin sıvılaşma direncindeki artışı belirlemede daha önemli bir faktör olacağı düşünülmektedir. Buna göre ikinci sıvılaşma direncindeki değişim konsolidasyon katsayısına veya zeminin drenaj karakterlerine göre belirlenmelidir.

4.4 Konsolidasyon katsayısının sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direncin belirlenmesinde değerlendirilmesi

Yukarıda verilen temiz kumdan ve %15 silt muhtevası içeren kumdan hazırlanan tüm numunelerin hidrolik iletkenliğinin (k), sıkışabilirliğinin ve konsolidasyon katsayısının eşdeğer boşluk oranına karşılık değişimi Şekil 23a-b-c'de verilmiştir. Bu çalışmada, hidrolik iletkenlik değerleri sabit seviyeli permeabilite testi ile laboratuvarında belirlenmiştir (ASTM E2396). k değeri eşdeğer boşluk oranının artmasıyla artmaktadır. Sıvılaşma direnci ile eşdeğer boşluk oranı arasındaki ilişkinin aksine konsolidasyon katsayısı ile eşdeğer boşluk oranı arasında görünür bir ilişki bulunmamaktadır. Konsolidasyon katsayısı silt içeriğinin artması ile azalma eğilimi göstermektedir. Ayrıca aynı ince dane içeriğinde daneler arası temas yoğunluğu artarken konsolidasyon katsayısı azalmaktadır. İnce dane içeriğinin sıkışabilirliğe olan etkisi, permeabilite ve konsolidasyon katsayısına olan etkisine kıyasla oldukça azdır.



Şekil 23. Temiz kum ve %15 silt muhtevası içeren siltli kumlarda eşdeğer boşluk oranının (a) hidrolik iletkenlik ile değişimi (b) sıkışabilirlik katsayısı ile değişimi (c) konsolidasyon katsayısı ile değişimi

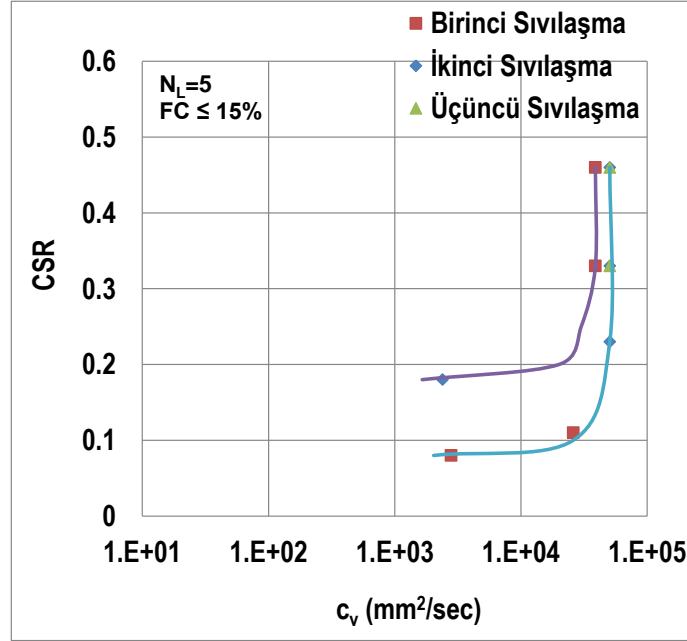
Bu çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak her bir numunenin farklı derinliklerdeki konsolidasyon katsayısındaki değişimin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisine bakılmıştır. Birinci, ikinci ve üçüncü sıvılaşma direnci ile konsolidasyon katsayısı arasındaki bağıntı Şekil 24’de verilmiştir

Bunun için ilk olarak;

1. Şekil 22a-b-c kullanılarak 5. sıvılaşma çevrim adedine ($N_L=5$) karşılık gelen birinci, ikinci ve üçüncü sıvılaşma direncindeki eşdeğer boşluk oranı bulunmuştur.
2. Şekil 23c kullanılarak bulunan eşdeğer boşluk oranına denk gelen konsolidasyon katsayısı belirlenmiştir.

Şekilde 24’te verildiği üzere konsolidasyon katsayısının 5×10^4 mm²/s’den küçük olduğu değerlerde sıvılaşma gözlemlenmiş ve sıvılaşma direnci düşük çıkmıştır. Konsolidasyon katsayısının 5×10^4 mm²/s’den büyük olduğu durumlarda birinci,

ikinci ve üçüncü sıvılaşmalarda deneylerinde sıvılaşma direnci çok artmış hatta bazı derinliklerde sıvılaşma olmamıştır. Bulunan bu değerler Ha vd. (2011)'nin kumlu zeminlerde yaptığı çalışmalara uymaktadır. Ha vd.'e göre c_v değeri 10^4 'e ulaşana kadar ikinci sıvılaşma direnci düşmüş ve daha büyük konsolidasyon katsayısı değerlerinde sıvılaşma direnci çok artmış hatta sıvılaşma gözlemlenmemiştir.



Şekil 24. Tüm numunelerin ikinci sıvılaşma direncinin birinci sıvılaşma direncine oranının konsolidasyon katsayısı ile değişimi

5. Sonuç/Tartışma ve Öneriler

1. Bu çalışmada, toplam 5 adet zemin numunesi hazırlanmış ve her bir numune üzerinde bir seri sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu sarsma deneylerinden üçü temiz kum, biri %15 siltli kum ve biri %35 siltli kum numunesi hazırlanarak yapılmıştır. %35 siltli kum numunesi üzerinde yapılan deneyler dışındaki tüm testlerin sonuçları raporda ayrıntılı olarak verilmiştir. Homojen olarak hazırlanmak istenen %35 siltli kum numunesi hidrolik doldurma metoduyla homojen olarak hazırlanamamış ve deney sonuçlarının yanıltıcı olmaması için bu raporda verilmemiştir.
2. Her bir hazırlanan zemin numunesine sırası ile verilen dinamik yüklemeler ile ilk sıvılaşma ve sonraki sıvılaşma dirençlerinin değişimi ve bu değişimi belirleyen faktörler belirlenmiştir.
3. Her bir çevrimli gerilme oranında eşdeğer boşluk oranı ile ilk sıvılaşma için gerekli olan çevrim adedi arasında beklendiği gibi doğrusal bir bağıntı bulunmuştur (Thevanayagam vd. 2000, Zlatovic ve Ishihara 1997, Koester 1994, Vaid 1994). Her bir çevrimli gerilme oranında daneler arası temas yoğunluğunun artması ile ya da başka bir deyişle eşdeğer boşluk oranının azalması ile sıvılaşma çevrim adedinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca

çevrimli gerilme oranı değeri büyüdükçe doğruların birbirine çok yaklaştığı görülmüştür.

4. Eşdeğer boşluk oranı ve konsolidasyon katsayısının sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası direnç üzerindeki etkilerine deneysel veriler değerlendirilerek bakılmıştır. Yukarıda verilen bulgulara göre, birinci ve ikinci sıvılaşma dirençlerinin sadece relatif sıkılığa bağlı olmadığı bulunmuştur. Konsolidasyon katsayısının 5×10^4 mm²/s'den küçük olduğu değerlerde sıvılaşma gözlemlenmiş ve sıvılaşma direnci düşük çıkmıştır. Konsolidasyon katsayısının 5×10^4 mm²/s'den büyük olduğu durumlarda birinci, ikinci ve üçüncü sıvılaşmalarda sıvılaşma direnci çok artmış hatta bazı derinliklerde sıvılaşma olmamıştır.
5. Zeminlerde sıvılaşma sonrası kaymayı ve 'etkin' sıvılaşma sonrası dayanımı etkileyen durumlar laminer kutuya statik bir yanal yükleme verilmesindeki zorluklardan dolayı gerçekleştirilememiştir.
6. Tüm önerilen iş paketleri gerçekleştirilme ve gerçekleştirilememe durumlarına göre Tablo 6'da verilmiştir. Yapılamayan deneylerin nedenleri söz konusu tabloda açıklanmıştır.
7. Bu bilgiler ve gözlemler ışığında;

Öneri 1: İnce dane muhtevası arttırılarak sarsma deneyleri genişletilebilir. %15'den daha fazla silt içeren homojen numunelerin hazırlanması için hidrolik doldurma yöntemi dışında bir yöntem uygulanmalıdır.

Öneri 2: Bu çalışmada ince kum numunesi kullanılmıştır. Farklı dane çapındaki zemin numuneleri kullanıldığında sıvılaşma direncindeki değişimler gözlemlenebilir.

Tablo 6. Önerilen iş maddeleri ve sonuçları

İş Paketi Ad/Tanım	Açıklama	Sonuç raporunda bulunduğu başlık
CPT Koni Penetrasyon düzeneğinin imalatı	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.2 Piyezokonik penetrasyon deneyleri - CPTu
6 ton silis kumunun (Elek aralığı = 0.045-0.120 mm) laboratuvara getirilmesi ve istiflenmesi	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin hazırlanması
6 ton siltin (Elek aralığı = 0.005-0.075 mm) laboratuvara getirilmesi ve istiflenmesi	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin hazırlanması
İş Tanımı 1: 1-g Sarsma Deneyleri – Kum:		
1. Temiz kum numunesinin hazırlanması	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin hazırlanması
2. Sensörlerin kutuya yerleştirilmesi	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.3 Sensörlerin kutuya yerleştirilmesi
3. Hidrolik olarak kum numunesinin laminer kutuya yerleştirilmesi	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin Hazırlanması
4. Sarsma deneyi öncesi CPTu deneyleri	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin Hazırlanması
5. Laminer kutu sarsma tablası deneyleri	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	4.1.1 Test 1 4.1.2 Test 2 4.1.3 Test 3
6. Sarsma deneyi sonrası SCPTu deneyleri	Gerçekleştirilememiştir: Sismik piyezokonik penetrasyon deneyi (SCPTu) Test 1 için yapılmış ancak zemin yüzeyinde bulunan sismik plakaya çekiç ile uygulanan dalgaların kutu içerisinde geri yansımından dolayı veriler düzgün çıkmamıştır. Dolayısıyla bu deney verileri raporda verilmemiş ve diğer yapılan sarsma tablası testlerinde de SCPTu deneyi tekrarlanmamıştır.	---
7. Kumda sıvılaşma sonrası kayma deneyleri	Gerçekleştirilememiştir: Bu iş tanımına göre boşluk suyu basınç oranının (r_u) 0.9'u geçtiği katmanın yukarısında salınım kutunun altında devam ettiği sırada kademeli olarak artan statik yatay kayma kuvveti verilecek ve bu kuvvet halkaların kaymasına neden olacaktır. Bu veriler daha sonra sıvılaşma sonrası kayma dayanımı çalışması ve kayma tabakası etrafındaki zeminin davranışı için kullanılacaktır. Ancak sarsma sırasında sıvılaşan zeminde yanal yüklerin fazlasıyla artmasıyla tekrar bir statik yatay kuvvet verilmesi riskli görülmüş, kutunun kapasitesini zorlamaması açısından bu deneyler gerçekleştirilmemiştir. Söz konusu deneylerin gerçekleştirilebilmesi için laminer kutu etrafına riskli bir durumda kutuya destek sağlayacak düşey plakaların olması gerekmektedir.	---
8. Numunenin laminer kutudan çıkartılması	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin hazırlanması

İş Paketi Ad/Tanım	Açıklama	Sonuç raporunda bulunduğu başlık
İş Tanımı 2: 1-g Sarsma Deneyler – Siltli Kumda Sıvılaştırma ve Sıvılaştırma Sonrası Kayma Deneyleri:		
1. %15 Silt+%85 kum muhtevalı numunenin hazırlanması	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin hazırlanması
2. Sensörlerin kutuya yerleştirilmesi	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.3 Sensörlerin kutuya yerleştirilmesi
3. Hidrolik olarak numunenin laminer kutuya yerleştirilmesi	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin Numunesinin Hazırlanması
4. Sarsma deneyi öncesi CPTu deneyleri	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin Numunesinin Hazırlanması
5. Laminer kutu sarsma tablası deneyleri	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	4.2.1 Test 4 (Silt oranı ağırlıkça~%15)
6. Sarsma deneyi sonrası SCPTu deneyleri	İş tanımı 1:6'da verilen nedenlerden dolayı gerçekleştirilememiştir.	---
7. Kumda sıvılaştırma sonrası kayma deneyleri	İş tanımı 1:7'de verilen nedenlerden dolayı gerçekleştirilememiştir.	---
8. Numunenin laminer kutudan çıkartılması	Başarı ile gerçekleştirilmiştir.	3.4.1 Zemin numunesinin hazırlanması
9. Yukardaki maddelerin %35 silt & 65 kum muhtevaları için tekrar edilmesi	Gerçekleştirilememiştir: Ağırlıkça %35 silt içeren numune hazırlanması için çalışılmıştır. Ancak bu numunelerden %35 silt içeren numune hidrolik doldurma metoduyla yeteri kadar homojen olmamış ve derinlik boyunca silt muhtevaları %5 - %45 arasında değişiklik gösteren numune elde edilmiştir. Dolayısıyla homojen olmayan zemindeki sonuçların doğru olmayacağı düşünülerek bu raporda %35 silt muhtevaları içeren sarsma deney sonuçları verilmemiştir.	---

Referanslar

- HA I.S., Olson S.M., Seo M.W., Kim M.M., Evaluation of reliquefaction resistance using shaking table tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31:682–691, (2011).
- HUANG, A. B., Huang, Y. T. and Ho, F. J., Assessment of liquefaction potential for a silty sand in Central Western Taiwan, 16th ICSMGE, 2653-2657, (2005).
- KAHRAMAN İ., Preparation and Preliminary Testing of a Small Scale Laminar Box for a Study of Soil Liquefaction, M.S Thesis, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, (2013).
- KULHAWY F.H., Mayne P.W., Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, (1990).
- KOESTER J. P., The influence of fine type and content on cyclic resistance, Ground failures under seismic conditions, Geotech. Spec. Publ. No. 44, ASCE, New York, 17–33, (1994).
- KURIBAYSHI E., Tatsuoka F., Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan, *Soils Found*, 15(4):81–91, (1975).
- MESRI G., Feng T.W., Benak J.M., Postdensification penetration resistance of clean sands, *J Geotech Eng*, 116(GT7):1095–115, (1990).
- MITCHELL, J. K., Lee, K. M., Shen, C. K. and Leung, D. H. K., Effects of placement method on geotechnical behavior of hydraulic fill sand, *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.*, Vol. 125(10), 832-846, (1999).
- ODA M., The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand. *Soils Found*, 12(2):416–23, (1972).
- ODA M., Kawamoto K., Fujimori H., Sato M., Microstructural interpretation on reliquefaction of saturated granular soils under cyclic loading, *J Geotech Geoenviron Eng*, 127(5):416–23, (2001).
- OLSON S.M., Obermeier S.F., Stark T.D., Interpretation of penetration resistance for back-analysis at sites of previous liquefaction, *Seismol Res Lett*, 72(1):46–59, (2001).
- OLSON S.M., Green R.A., Obermeier S.F., Geotechnical analysis of paleoseismic shaking using liquefaction effects: a major updating, *Eng Geol*, 76:235–61, (2005).
- POLITO C.P., and Martin J. R., The effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(5): 408–415, (2001).
- ROBERTSON P.K., Wride C.E., Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459, 10.1139/t98-017, (1998).
- ROBERTSON P.K., Interpretation of cone penetration tests-a unified approach, *Can. Geotech. J.*, 46:1337-1355, (2009).
- SANGLERAT G., The penetrometer and soil exploration, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, (1972).

- SEED H.B., Idriss I.M., A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, p. 38, (1970).
- SEED H.B., Idriss I.M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J Geotech Eng, SM9:1249–73, (1971).
- SIMS J.D., Garvin C.D., Recurrent liquefaction induced by the 1989 Loma Prieta earthquake and 1990 and 1991 aftershocks: implications for pleoseismicity studies, B Seismol Soc Am, 85(1):51–65, (1995).
- THEVANAYAGAM, S., Intergrain contact density indices of granular mixes-I: Liquefaction Resistance, Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibrations, June, (2007).
- THEVANAYAGAM, S., Liang, J. and Shenthan, T., Contact index and liquefaction potential analysis of silty and gravely soils, Proc. 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, Austin, TX, (2000).
- VAID V. P., Liquefaction of silty soils, Ground failures under seismic conditions, Geotech. Spec. Publ. No. 44, ASCE, New York, 1–16, (1994).
- YASUDA S., Tohno I., Sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, Soils Found, 28(2):61–72, (1988).
- YOU D T.L., Idriss I.M., Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(4), 297–313, (2001).
- ZLATOVIC S. and Ishihara, K., Normalized behavior of very loose non-plastic soils: Effects of fabric, Soils and Found., Tokyo, Vol. 37(4), 47-56, (1997).

TÜBİTAK

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 111M435
Proje Başlığı: Kumlarda ve Siltli Kumlarda Sıvılaşmanın ve Sıvılaşma Sonrası Direncin Belirlenmesinde Sarsma Tablası Deneyleri
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yürütücü: Yrd. Doç.Dr. Nurhan Ecemiş
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Urla, İzmir, 35430
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: ----
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/11/2011 – 01-11-2012
Öz (en çok 70 kelime) Sıvılaşma gevşek suya doygun zeminlerin sismik bir hareket sonucunda danelerinin birbirleri olan temasının kaybolması ve fazla boşluk suyu basıncının oluşması olayıdır. Depremler sırasında sıvılaşmadan dolayı oluşan zemin göçmeleri milyar dolarlara mal olan büyük deformasyonlara sebep olmaktadır. Bu proje ile İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü inşaat mühendisliği laboratuvarında bulunana sarsma tablası ve laminer kutu kullanılmış ve sıvılaşma sonrası zemine tekrar bir sismik yükleme verildiğinde zeminin direncindeki değişimler bir seri deney ile incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: sarsma tablası, konsolidasyon katsayısı, sıvılaşma direnci, eşdeğer boşluk oranı, sıvılaşma sonrası direnç
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil x Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: Henüz yayın yapılmamıştır.

1. Proje yürütücüsü iletişim bilgileri:

Adı – Soyadı : Nurhan ECEMİŞ
Unvanı : Yardımcı Doçent
Telefon : 0232 750 6812
E-posta adresi : nurhanecemis@iyte.edu.tr