

ÇOK GEVŞEK TEMİZ KUMLARIN STATİK SIVILAŞMASI VE DİLATİF DAVRANIŞINA SİLTLERİN ETKİSİ

Sinan GÜRBÜZ¹, Kamil Bekir AFACAN^{2*}

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-0800-7587>

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-3667-4432>

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Silt, gevşek temiz kum, dilatif davranış, statik sivilaşma, üç eksenli basınç deneyi</i>	<i>Suya doymun kohezyonsuz zeminlerin sivilaşması geoteknik mühendisliği açısından büyük öneme sahip bir olgu olmuştur. Dinamik veya statik yükler sonucu gerçekleşen bu olay çoğu zaman büyük yer değiştirmelere neden olarak ciddi ekonomik ve sosyal zararlara sebep olmaktadır. Tarih boyunca sivilaşma gerçekleştirmiş suya doymun gevşek kumların önemli bir çoğunluğunun belli miktarlarda silt muhteva ettiği görülmüştür. Siltlerin drenajsız koşulda monotonik yükleme altında statik sivilaşma potansiyeline etkisi araştırmacılar tarafından uzun süredir tartışma konusu olmuştur. Bu nedenle silt içeren kumlu zeminlerden oluşan su altı şevleri, kıyı ve liman zeminleri ve hidrolik dolgular gibi yapıların monotonik yükleme altında statik sivilaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında temiz kumlar ve siltli temiz kum karışımları üzerinde drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve siltlerin temiz kumların dilatif davranışına ve statik sivilaşması üzerine etkisi araştırılmıştır. Bunun için %6 ve %12 oranında hazırlanan siltli temiz kum karışımları, %0, %10 ve %20 rölatif sıklık oranlarında nemli sıkıştırma yöntemi ile yerleştirilip 50,100 ve 150 kPa çevre basınçları altında drenajsız üç eksenli basınç deneyiyle monotonik yükleme uygulanmıştır. Silt içeriğinin artışıyla temiz kumların dilatif davranışının arttığı ve buna bağlı olarak aşırı boşluk suyu basıncında artış gerçekleşerek gevşek kum zeminler için statik sivilaşma potansiyelini artırdığı açıkça görülebilmektedir.</i>

INFLUENCE OF SILTS ON VERY LOOSE CLEAN SAND'S STATIC LIQUEFACTION AND DILATIVE RESPONSE

Keywords	Abstract
<i>Silt, loose clean sand, dilative response, static liquefaction, triaxial compression test</i>	<i>The liquefaction of the saturated cohesionless soils is a very important phenomenon for geotechnical engineers. This event, which occurs under cyclic or static loadings mostly causes large deformations which leads to serious economic or social damages. Throughout history, it has been observed that a significant majority of liquefied saturated loose sands contain certain amount of silt. The effects of silts on the static liquefaction potential under monotonic loadings with undrained conditions have long been the subject of debate by researchers. For this reason, undrained triaxial compression tests are required to determine the potential of static liquefaction under monotonic loading of the structures such as submarine slopes, mine tailings and hydraulic fillings containing silty sands. In this study, undrained triaxial compression tests carried out on clean sands and silt clean sand mixtures and effects of the silts on dilative response and static liquefaction are investigated. For this purpose, silt clean sand mixtures prepared in 6% and 12% ratios were deposited %0, %10 and %20 relative densities with moist-tamping method and monotonic loading were applied with undrained triaxial compression tests under 50,100 and 150 kPa confining pressures. With the increasing silt content, it can be clearly seen that the dilative response of clean sands increases and therefore building more excess pore pressure which leads to increasing of the potential for static liquefaction for loose sand samples.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

* Sorumlu yazar; e-posta : kafacan@ogu.edu.tr

Başvuru Tarihi	: 16.02.2022	Submission Date	: 16.02.2022
Kabul Tarihi	: 01.04.2022	Accepted Date	: 01.04.2022

1. Giriş

Suya doymuş kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması durumu geoteknik mühendisliğindeki en çok merak edilen aynı zamanda da en karmaşık olgularından biri olmuştur. Aşırı boşluk suyu basıncının yükselmesi sonucu efektif gerilmenin sıfırlanarak zeminin viskoz özellik göstermesi halinde meydana gelen sıvılaşma, taşıma gücü kayıpları ve buna bağlı büyük yer değiştirmelere sebep olarak ciddi yapısal hasarlara neden olabilir. Literatür de sıvılaşma kavramı genellikle depremler nedeniyle meydana gelen dinamik yüklemeler sonucunda oluşan bir durum olarak bilinir. Castro (1969) yaptığı çalışma ile monotonik yükleme nedeniyle drenajsız koşullarda ani aşırı boşluk suyu basıncı geliştiren kumların da sıvılaşabileceğini göstermiş ve bunu statik sıvılaşma olarak tanımlamıştır. Lade ve Yamamuro (2011) yayınlarında bugüne kadar çeşitli yapılarda meydana gelmiş 20 statik sıvılaşma örneğinden bahsetmiştir. Literatürde çokça sıvılaşma potansiyeli SPT, CPT ve kuyu yöntemi gibi arazi deneylerine bağlı kayma dalgası hızı ilişkilendirilmiş olmasına rağmen, statik sıvılaşma potansiyeli için bu tür yöntemler önerilmemiştir. Arazi deneyleri dışında, kum zeminlerle teşkil edilmiş farklı dolgu yapılarının (setler, doğal şevler, kıyı ve liman zeminleri ve hidrolik dolgular vb.) statik sıvılaşma potansiyeleri klasik drenajsız üç eksenli deneylerle araştırılması mümkün olmaktadır. (Etminan, 2016) Bu çalışma da CEN standart kumu (TS EN 196-1) üzerinde drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve statik sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Lade ve Yamamuro (1997) yaptığı çalışmada temiz kumların çok düşük göreceli sıklık oranlarında dahi içerisinde silt bulunan kumlar kadar kolay sıvılaşmayacağını söylemiştir. Bunun sebebi olarak temiz kumların daha hızlı şekilde dilatif davranacağını ve bunun sonucu olarak da statik sıvılaşma potansiyelinin düşük olduğunu belirtmiştir. Temiz Ottawa kumunun statik yükler altında sıvılaşabilmesi için %0 rölatif sıklıkta numunelerle çalışmıştır. Fakat CEN temiz kumu %0 rölatif sıklıkta dahi tamamen sıvılaşmamıştır. Ishihara (1993) sıvılaşma meydana gelmiş zeminlerin içerisinde bir miktar ince dane bulduran gevşek kumlar olduğunu ifade etmiş ve temiz kumlardan ziyade siltli kumlar üzerine yoğunlaşmanın daha gerekli olduğunu savunmuştur. Buradan yola çıkarak bu çalışmada kuru kütle oranları farklı yüzdelerde silt temiz kuma eklenerek silt-temiz kum karışımları hazırlanmış ve siltin temiz kumların sıvılaşma potansiyeline etkisi araştırılmıştır. Siltlerin kumların drenajsız davranışına etkisi geçmiş yıllarda birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Fakat gözlemler ve sonuçlar hakkında ortak bir karar bulunmamaktadır bazı araştırmacılar siltlerin sıvılaşma potansiyelini artırdığını söylerken

bazıları ise aksini savunmuştur. Bu fikir ayrılığının olası sebeplerinden bazıları farklı numune yerleştirme yöntemleri, kullanılan çevre basınçları, rölatif sıklıklar, silt içeriği, siltin dane dağılımından ve siltin karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Lade ve Yamamuro, 2011).

Kumların drenajsız koşullarda sıvılaşma potansiyelini etkileyen ne etkili faktörlerden biri numunenin yerleştirilme biçimidir. Bu çalışmada literatürde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan nemli sıkıştırma (Castro, 1969; Kramer ve Seed, (1988); Ishihara, 1993) yöntemi bütün numuneler için kullanılmıştır. Nemli sıkıştırma yöntemi numunede yapay bir kohezyon oluşmaktadır ve numune içerisinde hacimsel boşluklar yaratarak statik sıvılaşma potansiyelini artırdığı düşünülmektedir. Diğer önemli faktör ise kullanılan siltin dane dağılımıdır. Siltler statik sıvılaşma potansiyelini iki şekilde artırabilmektedirler. Bunlardan ilki iri daneler arasına yerleşip kesme esnasında iri daneleri temas halinde tutarak daha büyük hacimsel boşluklar oluşturmalarından kaynaklanmaktadır. İkinci durumda ise ince danelerin içsel çekim kuvveti yer çekim kuvvetinden daha etkili olarak ince danelerin bir arada kalma eğiliminde olması ve boşluk oranını artırmasıdır. Diğer faktörlerde ise literatürde bir fikir birliği sağlanmıştır. Statik sıvılaşma gevşek kumlarda ve düşük çevre basınçlarında gerçekleşen bir olaydır. Tekrarlı yükler altında sıvılaşma konusu da literatürde çokça araştırılmış ve Bayrakçı, Balaban, Onur, Özmen ve Pekkan. (2021) son yıllarda yapılan çalışmaları detaylı olarak sunmuşlardır. Bu çalışmada gevşek temiz kumların ve siltlerin gevşek temiz kumların statik sıvılaşma potansiyeline etkisini araştırmak amacıyla, iki farklı silt yüzdesiyle, üç farklı düşük çevre basıncında ve iki farklı rölatif sıklıkta konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

2. Teori

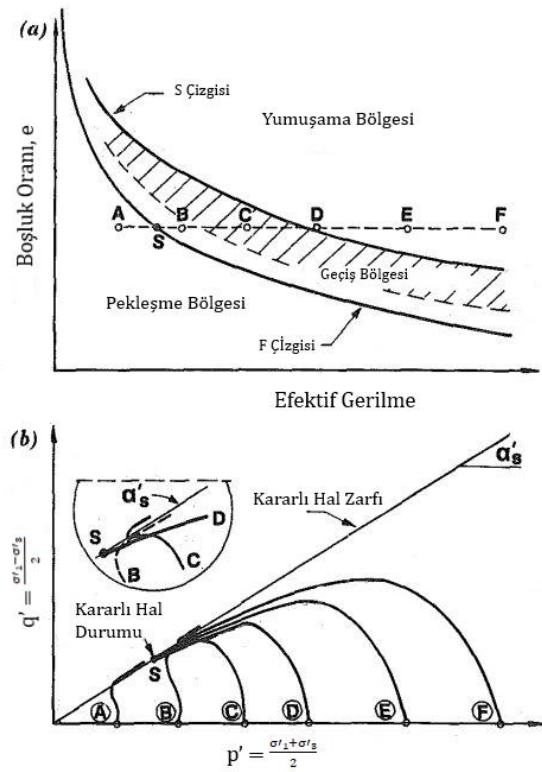
Castro ve Poulos (1977) tarafından ortaya konulan kararlı hal çizgisi; zeminlerin boşluk oranına karşı efektif çevre basıncı grafiğinden elde edilerek, zeminin daralma ya da genişleme eğiliminde olduğunu anlamak için kullanılmıştır. Buna göre çizgi üzerinde kalan numuneler akma tipi sıvılaşma gerçekleştirirken, çizgi altında kalan numuneler ise dinamik sıvılaşmaya maruz kalmaktadır. Ayrıca yazarlar bu çalışmada statik ve dinamik sıvılaşmayı etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Efektif çevre basıncının akma tipi sıvılaşma için en önemli faktörlerden biri olduğunu saptamışlardır.

Daha sonra Alarzon-Guzman, Leonards ve Chameau (1988) kararlı hal çizgisinin özellikle yüksek ölçüde daralma eğilimi gösteren kumlar için tek başına yeterli olmadığını ifade ederek yeni bir diyagram sunmuşlardır. Sunulan bu diyagram Castro ve Poulos (1977) tarafından sunulan iki bölümden oluşan (daralma ve genişleme) diyagrama göre daha detaylı olarak üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; yumuşama bölgesi, geçiş bölgesi ve pekleşme bölgesidir. Yazarların hipotezine göre drenajsız koşullarda yapılan üç eksenli deneylerde yumuşama bölgesinde bulunan numuneler kesme esnasında tamamen sıvılaşmaya maruz kalır. Öte yandan pekleşme bölgesinde bulunan numuneler ise genişleme eğilimindedirler ve kesme aşaması boyunca numune dayanım kazanmaya devam eder. Son olarak geçiş aşamasındaki numuneler ise geçici sıvılaşma görülen numunelerdir. Yani kesme esnasında dayanımda bir miktar azalma görülmesinin ardından dilatatif davranış kontrolü devralarak dayanım kaybını sona erdirir ve dayanım artışı gerçekleşir. Kumların sabit boşluk oranında drenajsız monotonik yükleme altındaki davranışına dair diyagram şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir.

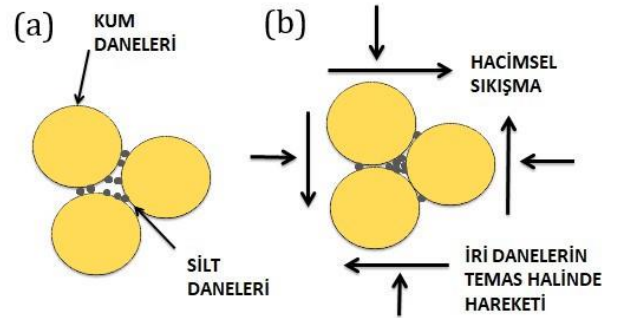
Şekilde görüldüğü gibi pekleşme bölgesinde yer alan A numunesi için, öncelikle daralma eğiliminde gibi davranarak çok az aşırı boşluk suyu basıncı oluşmuş daha sonra genişleme hemen devreye girerek grafik bir dirsek vermiş dayanım kazanımı gerçekleşmiştir. Bu diyagramda F çizgisi drenajsız deneylerden elde edilen dayanım sonuçlarıyla elde edilirken, S çizgisi ise drenajlı deneylerden elde edilir. F çizgisinin S çizgisinden bir miktar daha aşağıda yer almasının nedeni zemin içerisinde oluşan aşırı boşluk suyu basıncından kaynaklanmaktadır. Son olarak yumuşama bölgesinde bulunan numunelerde ise büyük dayanım kayıpları görülmektedir. Sadece A ve B numuneleri için hiçbir yumuşama görülmeden pekleşme gerçekleşmiştir.

Daha önceki bölümde de bahsedildiği üzere siltlerin kumların davranışına iki farklı etkisi bulunmaktadır. Bu bölümde bu etkiler detaylı biçimde irdelenecektir. Lade ve Yamamuro (1997) yaptıkları çalışmada siltli kumların davranışı için, karışımında bulunan silt daneleri iri kum danelerinin arasına yerleşerek boşluk oranını azaltır ve sıklığı artırır. Literatüre göre sıklık artışının sıvılaşma potansiyelini azaltması beklenir fakat statik sıvılaşma için durum farklıdır.

Şekil 2'de (a) durumu numunenin yerleştirildiği esnadaki halini (b) durumu ise konsolidasyon sonrası kesme aşamasındaki halini göstermektedir. Silt daneleri iri kum danelerini yükleme esnasında temas halinde tutarak komşu danelerin beraber hareket etmesini sağlar bu da daha büyük hacimsel boşluklar oluşmasına neden olarak genişleme davranışını artırır ve statik sıvılaşma gerçekleşmesine neden olur. Bu durum tersine davranış olarak bilinir.

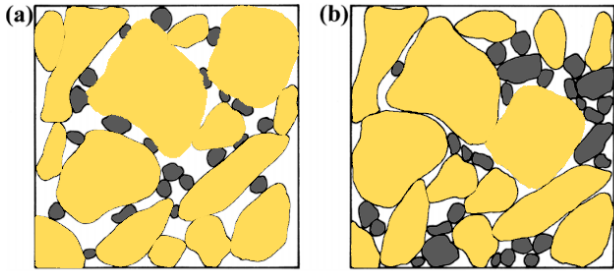


Şekil 1. Sabit Boşluk Oranında Drenajsız Monotonik Yükleme Davranış Diyagramı (Şematik) a) Hal Diyagramı b) q-p Grafığı



Şekil 2. Siltli temiz kumun şematik diyagramı (Lade ve Yamamuro, 1997)

Lade ve Yamamuro (2011) daha sonra yaptıkları bir diğer çalışmada **tersine davranışın** siltli kumların davranışını doğru şekilde yansıtmadığını ifade etmişlerdir, bu çalışmada elektron mikroskopu kullanarak 200'nolu elek altı ince danelerin boyutu küçüldükçe daneler arası çekim kuvvetinin yerçekimi kuvvetinden daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 3. Siltli temiz kumun şematik diyagramı (Lade ve Yamamuro, 2011)

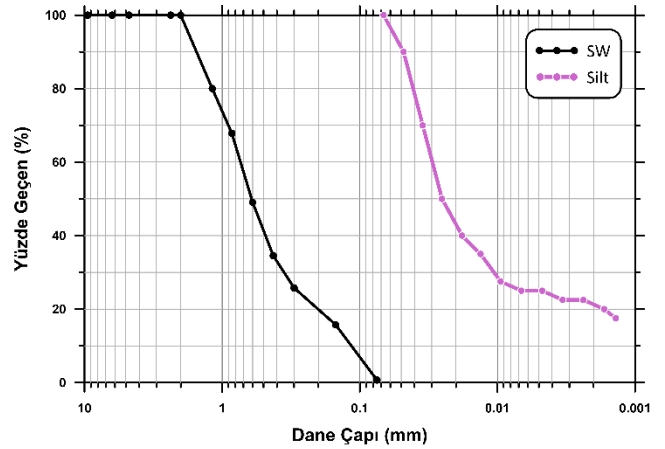
Bu nedenle Şekil 3 (a)'da görüldüğü gibi 200'ncü elek altı ince daneler iri danelerin arasına yer çekimi etkisiyle yerleşmekte (b)'deki gibi içsel çekim kuvvetiyle birbirlerine bağlı kalma eğiliminde olup sürtünme etkisinin de yardımıyla yüksek boşluk oranına sahip petek yapılar oluşturmaktadır. Bu da aşırı boşluk suyu basıncının artmasına sebep olarak numunelerin tamamen statik sıvılaşmasına neden olmaktadır.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Materyal

Bu çalışmada CEN standart kumu (TS EN 196-1) kullanılmıştır ve drenajsız üç eksenli deneyi ile sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Sıvılaşma potansiyeline etki eden en önemli faktörlerden biri de dane dağılımıdır. Dane dağılımının tespiti için deneysel süreç elek analizi ile başlatılmıştır ve zemin sınıfı iyi derecelendirilmiş kum (SW) olarak belirlenmiştir. Daha sonra dane özgül ağırlığı belirlenmiş ve rölatif sıklık değerlerinin belirlenebilmesi için e_{maks} ve e_{min} değerleri bulunmuş ve numunelerin deney için hazırlanışında bu değerler kullanılmıştır. Lade ve Yamamuro (1997) yaptıkları çalışmalar sonucu temiz kumların sıvılaşma direncinin siltli kumlara göre çok daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Rölatif sıklığı düşük çok gevşek temiz kumlarda bile sıvılaşma gerçekleşmezken çalışmalarında kullandıkları %6 silt içeriğine sahip Nevada kumu %22 rölatif sıklıkta sıvılaşmıştır. Silt içeriği yüksek zeminlerin %60 rölatif sıklıkta dahi monotonik yükleme altında sıvılaşabileceklerini belirtmişlerdir. Buradan yola çıkarak bu çalışma da silt oranları %6 ve %12 olarak belirlenmiştir. Karışım oluşturmak amacı ile Sakarya bölgesinden alınan siltli kum numunesi 200'ncü elekten yıkanarak siltler ve kumlar ayrıştırılmıştır daha sonra elde edilen silt numunesi temiz kumun kuru kütlesine oranla farklı yüzdelerde karıştırılmış ve karışımlar içinde özgül ağırlık ve e_{maks} , e_{min} deneyleri tekrarlanarak gerekli değerler bulunmuştur. Böylece bütün numuneler için aynı rölatif sıklık oranında deneyler gerçekleştirilmiştir. Temiz kumun ve kullanılan silt

numunesinin dane dağılım eğrisi Şekil 4'te ve kullanılan temiz kumun fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 4. Temiz Kum ve Siltin Dane Dağılım Eğrisi

Tablo 1

Temiz Kumun Zemin Sınıflandırması ve Fiziksel Özellikleri

Çakıl (%)	0,000
Kum (%)	99,310
Silt ve Kil (%)	0,690
D_{60} (mm)	0,750
D_{30} (mm)	0,360
D_{10} (mm)	0,115
C_c	6,520
C_u	1,500
USCS	SW
G_s	2,650
e_{maks}	0,705
e_{min}	0,460

3.2. Deneysel Yöntem

Deneysel süreç Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Zemin Mekaniği laboratuvarında yürütülmüştür. Deneyler esasında veya deney sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Gevşek kumların drenajsız monotonik yükleme altında sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için bir dizi üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

Literatürde numune yerleştirme yönteminin statik sıvılaşma da büyük bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında deneye tabi tutulmuş bütün numuneler nemli sıkıştırma yöntemi ile yerleştirilmiştir. 50 mm çap ve 100 mm yüksekliğe sahip kalıbın hacmi hesaplanır ve %0, %10 ve %20 rölatif sıklığa karşılık gelen kuru numune ağırlığının %5'i kadar saf su ile homojen bir biçim alana kadar karıştırılır. Daha sonra karışım eşit tabakalar halinde kauçuk sıvı geçirmez membran sarılmış kalıbın içerisine nazikçe yerleştirilir ve her tabaka yerleştirilmesinin ardından üzerine tokmak yardımıyla yavaşça vurulur bu esnada tabakalar arası rölatif sıklık farkı olmamasına özen gösterilmelidir ve mümkün olduğunca aynı

miktarda enerji uygulanarak yerleştirilmeye çabalanmalıdır. Yerleştirme işlemi bittikten sonra kalıp içerisindeki numuneye vakum uygulaması yapılır, nemli sıkıştırma yöntemi yapay bir kohezyon oluştursa dahi numuneyi ayakta tutmak için yetersiz kalabilir bu yüzden -10 kPa'a kadar vakum işlemi uygulandıktan sonra ancak kalıp çıkarılabilmektedir. Üç eksenli deney hücresi yerine yerleştirilip sabitleme vidaları sıkılarak deformasyon saati ayarlanır ve hücre içerisi damıtık su ile doldurulur.

Yerleştirme aşaması sona erdikten sonra 20 kPa hücre basıncı uygulanır bu işlem verilen CO₂'in membran ve numune arasından geçerek numuneyi doyurmadan çıkmaması için önemlidir. Numune CO₂ gazı ile alt kısmından üst kısmına doğru 30 dakika boyunca doyurulur. Doğunluk aşaması esnasında hücre içerisindeki basınç ve numune içerisindeki basınç farkının yani efektif gerilmenin 30 kPa'ı geçmemesi ve aşırı konsolidasyon gerçekleşmemesine özen gösterilmiştir. Doğunluk işlemine B değeri 0.95-1 olana kadar devam edilmiştir. Doğun hale gelmiş numuneler 50,100 ve 150 kPa çevre basınçları altında konsolide edilir. Konsolidasyon işlemi biter bitmez **hacimsel sıkışmayı** engellemek amacıyla hemen kesme işlemi başlatılır. Bütün kesme işlemleri deformasyon kontrollü olarak 1 mm/dk olacak şekilde yapılmıştır ve deformasyon seviyesi %20 olana kadar sürdürülmüştür.

4.Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında temiz kum ve siltli temiz kum karışımlarından oluşan numunelerden %0, %10 ve %20 rölatif sıklığa sahip toplam 13 adet deney yapılmış olup sonuçları özet olarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

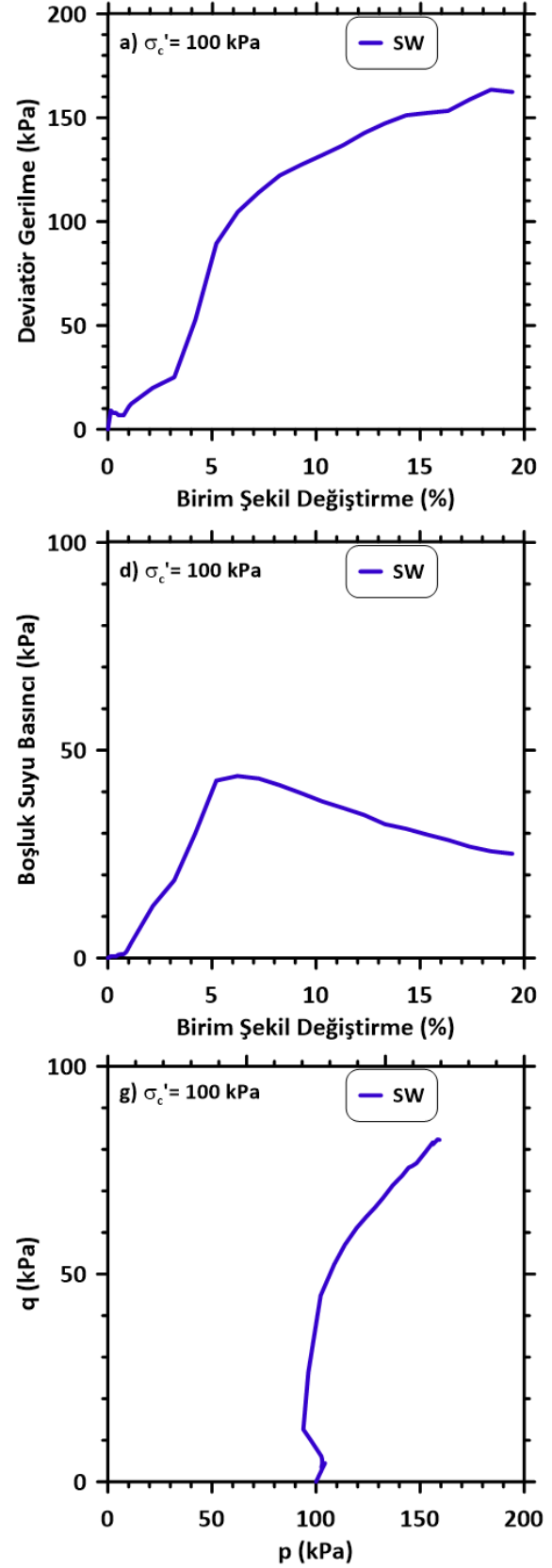
Konsolidasyonlu Drenajsız Statik Üç Eksenli Deney Sonuçları Özeti

No.	Numuneler	Sembol	Rölatif Sıklık	Çevre Basıncı	q _{max}	Aşırı Boşluk Suyu Basıncı
1	Temiz Kum	T. K	0	100	82,4	22,9
2	Temiz Kum	T. K	10	50	67,8	-14,9
3	Temiz Kum	T. K	10	100	97,1	39,0
4	Temiz Kum	T. K	10	150	132,1	95,6
5	Temiz Kum + %6 Silt	%6 S.T. K	10	50	50,5	-3,3
6	Temiz Kum + %6 Silt	%6 S.T. K	10	100	104,6	40,1
7	Temiz Kum + %6 Silt	%6 S.T. K	10	150	126,8	52,2
8	Temiz Kum + %12 Silt	%12 S.T. K	10	50	35,4	50
9	Temiz Kum + %12 Silt	%12 S.T. K	10	100	61,3	100
10	Temiz Kum + %12 Silt	%12 S.T. K	10	150	81,0	150
11	Temiz Kum + %12 Silt	%12 S.T. K	20	50	41,4	27,0
12	Temiz Kum + %12 Silt	%12 S.T. K	20	100	66,1	82,9
13	Temiz Kum + %12 Silt	%12 S.T. K	20	150	157,2	28,9

4.1 Temiz Kumların Davranışı

Daha önce yapılan çalışmalar statik sıvılaşmanın düşük çevre basınçlarında gerçekleşen bir olay olduğunu göstermiştir. Bu gözlem tarihte yaşanan statik sıvılaşma olayları ile de örtüşmektedir. Tarih boyunca bildirilen kıyı ve liman zeminleri, su altı şevleri ve barajlar gibi birçok statik sıvılaşma örneği 5-40 metre derinlikler arasında meydana gelmiş bulunup bunların çoğunluğunu ise 20 metreden düşük derinlikler oluşturmaktadır. (Middlebrooks 1942; Peck ve Kaun 1948; Andresen ve Bjerrum 1968; Bjerrum 1971; Troncoso 1988; Lade 1993). Bu sonuçlar ışığı altında statik sıvılaşma araştırmaları genellikle 0-250 kPa arasında efektif gerilmeye maruz kalmış gevşek doymuş kumlar üzerinde yapılmıştır. Lade ve Yamamuro, (1997) %6 silt içerikli Newada kumu üzerinde %22 rölatif sıklıkta yaptıkları çalışmalar sonucu statik sıvılaşmanın 125 kPa ve altındaki çevre basınçlarında gerçekleşeceğini belirtmiş, Sabbar, Chegenizadeh ve Nikraz, (2017) ise Perth temiz kumuyla yaptıkları çalışmalar sonucunda bu sınırı 100 kPa olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada CEN temiz kumu için %0 ve %10 rölatif sıklıklarda yerleştirilen numunelere 50,100 ve 150 kPa çevre basınçları altında kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerden hiçbirinde tamamen sıvılaşma görülmemiştir. Doymuş kumlar yüklemeye altındayken önce su daneleri yükü alır ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Aşırı boşluk suyu belli bir seviyeye geldikten sonra kum danelerinin birbirlerinde ayrılmasına sebep olur ve yük su danelerinden kum danelerine geçer. Aşırı boşluk suyu basıncı düşmeye başlar ve bu olay dilatif davranış olarak bilinir. Şekil 3'te görüldüğü üzere %0 rölatif sıklıkta dahi temiz kum üzerinde tam statik sıvılaşma gerçekleşmemiştir. Aşırı boşluk suyu basıncının ani artışı sonucu dayanım bir miktar düşmüş ardından dilatif davranışa geçerek boşluk suyu basıncı azalmıştır bu efektif gerilmenin tekrardan artmasına sebep olarak dayanımın da artmasına neden olmuştur. Dilatif davranış gösteren suya doymuş kumlar için eğer çevre basıncı yeterince düşük ise kumlar gevşek olsa dahi dilatif davranıştan ötürü sıkı gibi davranış göstermektedirler (Holtz ve Kovacs, 1981).

Dilatif davranış nedeniyle temiz kumlar düşük çevre basınçları altında tamamen sıvılaşma potansiyeli göstermeyebilirler. Dilatif davranış göstermeyecekleri çevre basınçları ise statik sıvılaşmanın gerçekleşmesi için çok yüksektir. Bu nedenle çok gevşek temiz kumların monotonik yüklemeler altında tamamen sıvılaşmayacağını söylemek mümkündür. Şekil 6'da %0 rölatif sıklıkta ve 100 kPa çevre basıncında gerçekleştirilen deneyin deney sonuçları verilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncı en fazla 45 kPa olarak ölçülmüş ve statik sıvılaşma söz konusu olmamıştır.



Şekil 6. %0 Rölatif Sıklıkta Hazırlanan Numunenin Deney sonuçları

4.2 Siltli Temiz Kumun Davranışı

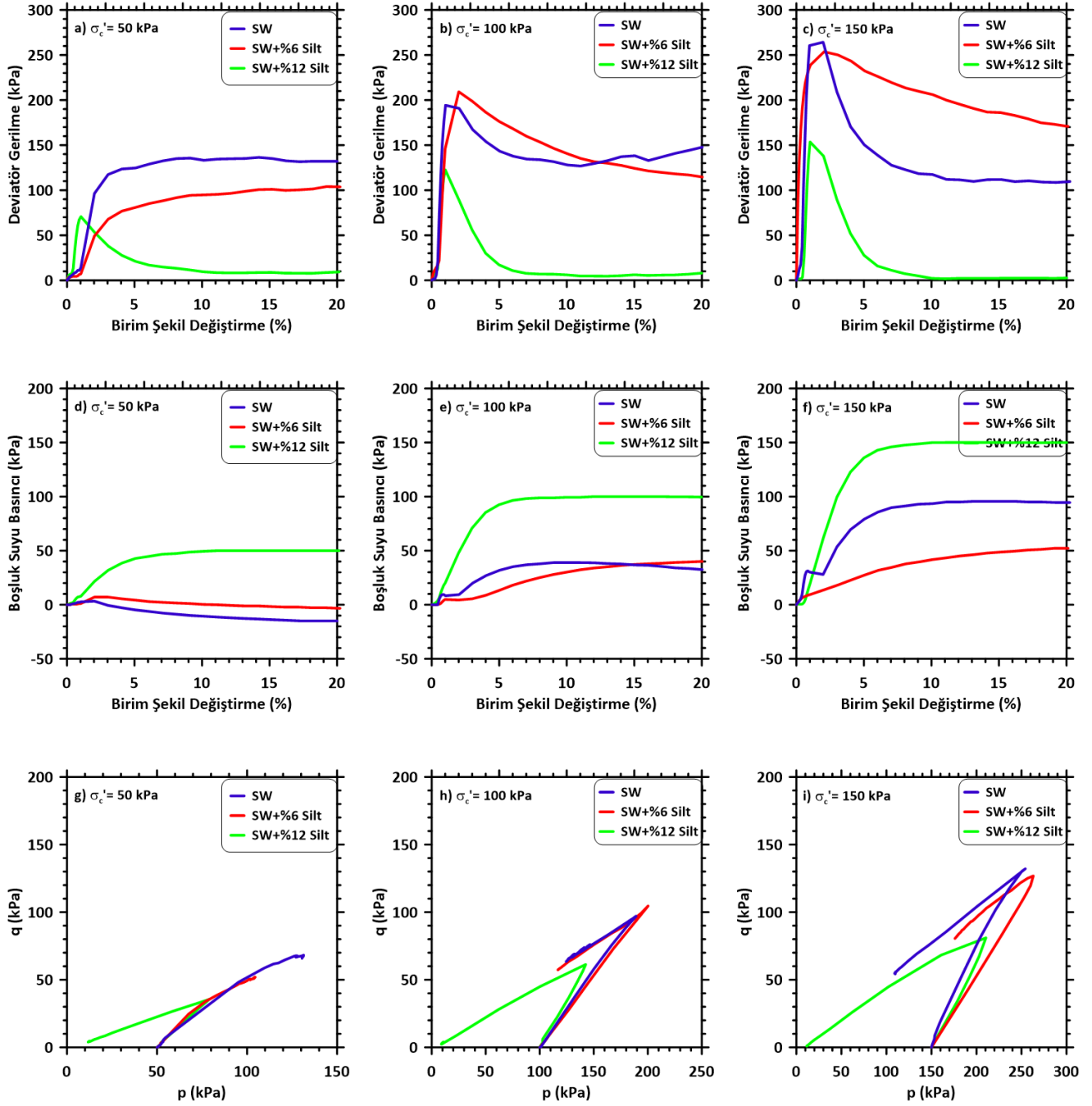
Bu çalışmada 200'nolu elekten yıkanarak elde edilen silt numunesi temiz kumların statik sıvılaşma potansiyeline silt danelerinin etkisini araştırmak amacıyla temiz kumla karıştırılmıştır. Oluşturulan silt-temiz kum karışımlarında 2011'de yapılan çalışmayla benzerlik göstermiş olup oluşturulan siltli temiz kum karışımların da boşluk oranı artışı gözlemlenmiştir. Buda davranışın değişmesine neden olarak numunelerde tamamen sıvılaşmaya neden olmuştur. Karışımların boşluk oranları Tablo 3'te ve deney sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 3

Temiz Kum ve Siltli Temiz Kum Karışımların Boşluk Oranları ve Özgül Ağırlıkları

Numune	G_s	e_{min}	e_{maks}
T. K	2,650	0,460	0,705
%6 S.T. K	2,680	0,530	0,730
%12 S.T. K	2,693	0,540	0,740

Şekil 7'de %10 rölatif sıklıkta 50, 100 ve 150 kPa çevre basınçları altında konsolide edildikten sonra, drenajsız durumda yüklenmiş temiz kumun ve siltli temiz kumların deney sonuçları verilmiştir. %6 siltli temiz kum için küçük miktarlarda değişimler gözlenmiştir fakat statik sıvılaşma potansiyelini artırdığı görülmektedir. Silt yüzdesi %12'ye çıkarıldığında ise numunelerin tamamen statik sıvılaşığı görülmektedir ve statik sıvılaşma sadece 100 kPa ve altındaki çevre basınçları için değil 150 kPa çevre basıncında da gerçekleşmiştir. Monotonik yüklemeler altında drenajsız koşulda doymuş kum numuneleri fıçılama özelliği göstermektedirler. Statik sıvılaşmanın gerçekleştiği numunelerde membran üzerinde kırışıklar oluşmaktadır; (Şekil 8) bu numunenin tekdüze bir formda içsel deformasyonlara maruz kaldığının göstergesidir.



Şekil 7. Temiz Kum ve Farklı Oranda Silt İçeriğine Sahip Numunelerin Deney Sonuçları

4.3 Rölatif Sıklık Etkisi

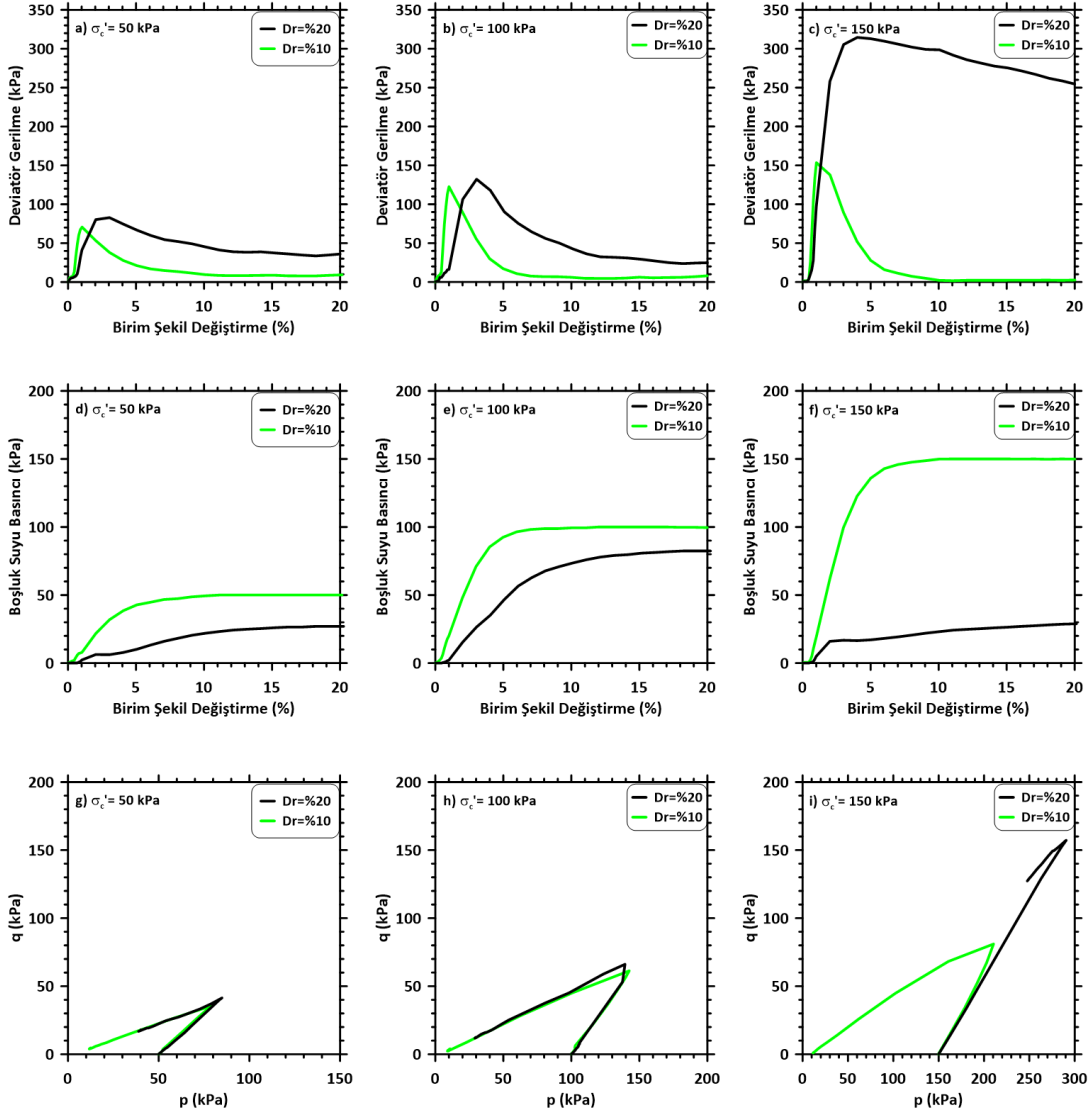
Literatürde yapılan deneysel çalışmalar ve tarihte bildirilen statik sıvılaşma vakalarının hepsi düşük sıklığa sahip çok gevşek zeminler ve numuneler üzerinde gerçekleşmiştir. Statik sıvılaşma düşük rölatif sıklıklarda gerçekleşen bir olaydır. Tamamen statik sıvılaşma efektif gerilmenin sıfırlanması olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan %12 siltli

temiz kumla %10 ve %20 rölatif sıklıkta deneyler yapılmıştır. %10 rölatif sıklıktaki numunelerin hepsi tamamen statik sıvılaşmıştır, Rölatif sıklık artırıldığında ise numunelerde geçici sıvılaşma görülmüştür. Sıklık değişiminin numunelerin davranışı üzerindeki etkisini görebilmek mümkündür. Deney sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8(a) Statik Sıvılaşma Gerçekleşmemiş Numune

Şekil 8(b) Statik Sıvılaşma Gerçekleşmiş Numune



Şekil 9. Farklı Sıvılık Oranlarında Hazırlanmış Silt-Temiz Kum Karışımlarının Deney Sonuçları

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında siltlerin temiz kumların statik sıvılaşması ve dilatif davranışına etkisini gözlemlemek amacıyla temiz kumlarda ve temiz kumun kuru kütle oranla iki farklı yüzdede (%6 ve %12) hazırlanan siltli temiz kum karışımları üzerinde üç farklı rölatif sıklıkta (%0, %10 ve %20) ve üç farklı çevre basıncı altında (50, 100 ve 150 kPa) drenajsız konsolidasyonlu üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Akabinde şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- CEN temiz kumu monotonik yükleme altında statik sıvılaşma göstermemektedir. Statik sıvılaşma gösterebileceği düşük çevre basınçlarında dilatif davranış göstermektedir. Buda aşırı boşluk suyu basıncının belirli bir seviyeye kadar artış gösterip daha sonra azalmasına neden olmaktadır. Bu durum %0 gibi gerçek dışı bir rölatif sıklık miktarı için bile bu şekilde gerçekleşerek statik sıvılaşma görülmemiştir.
- Dilatif davranış nedeniyle gevşek kumlar sıkı kum davranışı göstermektedirler. 50 kPa çevre basıncı altındaki numune sıkı kum gibi davranmış ve 150 kPa çevre basıncındaki davranışla benzerlik göstermiştir. Kumların drenajsız durumda statik sıvılaşmalarını incelemek için en uygun çevre basıncı 100 kPa olarak belirlenmiştir.
- Kullanılan silt numunesi için; silt daneleri yer çekimi etkisiyle kum daneleri arasına yerleşerek sıklığı artırmak yerine içsel çekim kuvvetinin etkisiyle bir arada kalma eğilimi göstererek boşluk oranının artmasına sebep olarak statik sıvılaşma potansiyelini artırmaktadır.
- Temiz kumun içerisindeki silt miktarı arttıkça statik sıvılaşma potansiyelinin arttığı görülmüştür. %6 siltli numuneler için davranış az miktarda değişse dahi %12 siltli numuneler tamamen sıvılaşarak silt miktarındaki değişimin sıvılaşma potansiyeli için önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.
- Statik sıvılaşma düşük çevre basınçlarında gerçekleşen bir olaydır. Çevre basıncı artışıyla sıvılaşma potansiyeli azalmaktadır. Bunun sebebi yüksek çevre basınçlarında numunelerin daha iyi sıkışmasından kaynaklanmaktadır.
- Statik sıvılaşma çok düşük rölatif sıklıktaki zeminlerde gerçekleşmektedir. %10 rölatif sıklıktaki bütün numuneler tamamen statik sıvılaşırken %20 rölatif sıklıkta aşırı boşluk suyu basıncında düşüş yaşanmış hiçbir numune de tamamen statik sıvılaşma gerçekleşmemiştir. 150 kPa çevre basıncı altındaki numune ise hem rölatif sıklık artışı

hem de yüksek çevre basıncının etkisiyle statik sıvılaşmaya karşı büyük bir direnç görülmüştür.

Teşekkür

Bu tez Sinan Gürbüz'ün yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Deneyler esnasında teknik desteğini esirgemeyen Doç.Dr. Hasan Savaş'a teşekkürü bir borç biliriz.

Araştırmacıların Katkısı:

Bu çalışmada; Sinan Gürbüz, deneylerin gerçekleştirilmesi, literatür araştırması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında, Kamil Bekir Afacan, deneylerin tasarlanması, literatür araştırması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A., ve Chameau, J. L. (1988). Undrained monotonic and cyclic strength of sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(10), 1089-1109.
- Andresen, A., ve Bjerrum, L. (1968). Slides in subaqueous slopes in loose sand and silt. *Norwegian Geotechnical Institute Publ.*
- Bayrakçı, E. , Balaban, E. , Onur, M. İ. , Özmen, H. B. , Pekkan, E. "Geoteknik Mühendisliğinde 2016-2021 Yılları Arası Sıvılaşma Çalışmaları". *Disaster Science and Engineering* 7 (2021) : 11-19
- Bjerrum, L. (1971). Subaqueous slope failures in Norwegian fjords. *Norwegian Geotechnical Institute Publ*, (88).
- Castro. (1969). Liquefaction of Sands. (Doktora Tezi) Harvard Üniversitesi, Cambridge Massachusetts.
- Castro, G., ve Poulos, S. J. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(6), 501-516.
- Etminan, E. (2016). *Effects of Gradation, Fines Content and Silt Shape Characteristics on Static Liquefaction of Loose Sands*. (Doktora Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., ve Sheahan, T. C. (1981). An introduction to geotechnical engineering (Vol. 733). Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-415. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>
- Kramer, H. B. S. (1988). Initiation of Soil Liquefaction Under Static Loading Conditions, 114(4), 412-430. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:4\(412\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:4(412))
- Lade, P. V. (1993). Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 895-904. <https://doi.org/10.1139/t93-088>
- Lade, P. V. ve Yamamuro, J. A. (1997). Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 918-928. <https://doi.org/10.1139/t97-052>
- Lade, P. V. ve Yamamuro, J. A. (2011). Evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), 247-264. <https://doi.org/10.1139/T10-063>
- Middlebrooks, T. A. (1942). Fort peck slide. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107(1), 723-742. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005519>
- Peck, R. B., ve Kaun, W. V. (1948). Description of a flow slide in loose sand. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam* (Vol. 2, pp. 31-33).
- Sabbar, A. S., Chegenizadeh, A. ve Nikraz, H. (2017). Static liquefaction of very loose sand-slag-bentonite mixtures. *Soils and Foundations*, 57(3), 341-356. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.05.003>
- Troncoso, J. H. (1988). Evaluation of seismic behavior of hydraulic fill structures. In *Hydraulic Fill Structures* (pp. 475-491). ASCE.