

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI GRADASYONLU KUMLARIN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN
DİNAMİK BASİT KESME TESTİ İLE ARAŞTIRILMASI

ABDUSSAMED AKYÜZ

TEMMUZ 2019

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Abdussamed AKYÜZ tarafından hazırlanan FARKLI GRADASYONLU KUMLARIN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DİNAMİK BASİT KESME TESTİ İLE ARAŞTIRILMASI adlı Yüksek Lisans Tezinin Ana Bilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN
Ana Bilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Y. Bülent SÖNMEZER
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. İlker KALKAN_____

Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Y. Bülent SÖNMEZER _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Turgay BEYAZ_____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Her zaman en büyük destekçim sevgili annem Selma AKYÜZ'e...



ÖZET

FARKLI GRADASYONLU KUMLARIN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DİNAMİK BASİT KESME TESTİ İLE ARAŞTIRILMASI

AKYÜZ, Abdussamed

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Y. Bülent SÖNMEZER

Temmuz 2019, 87 sayfa

Geoteknik deprem mühendisliğinde deprem esnasında zemin sıvılaşması, yapılara verdiği kalıcı hasarlar sebebiyle önemli ve iyi irdelenmesi gereken bir konu olarak ön plana çıkmaktadır. Başta Alaska, Niigata, San Fernando, Loma Prieta, Kobe ve 17 Ağustos depremleri olmak üzere birçok depremde zemin sıvılaşmasının tipik örnekleri görülmüştür. Literatürde ince kumlara ait birçok sıvılaşma çalışmaları görülürken, bu tez kapsamında farklı tane çaplarındaki üniform kumların sıvılaşma enerjisi enerjiye dayalı yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Bu amaçla kümülatif sıvılaşma enerjisini etkileyen rölatif sıkılık(Dr), efektif gerilme(σ'_v) ve ortalama tane çapı(D_{50}) parametreleri kullanılarak dinamik basit kesme test cihazı ile suya doymun numuneler üzerinde drenajsız koşullarda deformasyon kontrollü olarak 0.1 Hz frekans, %3 kayma birim deformasyonu altında 36 tane test gerçekleştirilmiştir. Testler 0.11 mm, 0.26 mm, 0.45 mm ve 0.85 mm ortalama tane çapına sahip numuneler üzerinde %30, %50, %70 rölatif sıkılıklarda 50 kpa, 100 kpa, 150 kpa efektif gerilmeler altında yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki ortalama tane çapı azaldıkça kumun sıvılaşma potansiyeli artmaktadır. Ayrıca artan efektif gerilme ve rölatif sıkılıkla birlikte kumun sıvılaşmaya karşı potansiyeli azalmaktadır. Test sonuçları üzerinde çoklu regresyon analizi yapılarak 0.11-0.26 mm ve 0.45-0.85 mm ortalama tane çapına sahip numuneler için ayrı ayrı bağıntılar önerilmiştir. 0.11-0.26 mm aralığındaki numuneler için elden edilen bağıntı literatürde 0.26 mm tane çapına sahip kum numuneleri üzerinde yapılan

sıvılaşma testlerinden elde edilen bağıntılarla karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Sıvılaşma, Sıvılaşma Enerjisi, Dinamik Basit Kesme Deneyi, Kum, ortalama tane çapı, efektif gerilme, rölatif sıklık



ABSTRACT

INVESTIGATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL OF DIFFERENT GRADED SANDS BY CYCLIC SIMPLE SHEAR TEST

AKYÜZ, Abdussamed

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Y. Bülent SÖNMEZER

July 2019, 87 pages

In geotechnical earthquake engineering soil liquefaction, during earthquakes emerges as an important and well-considered issue due to the permanent damages to buildings. Typical examples of soil liquefaction have been observed in many earthquakes including Alaska, Niigata, San Fernando, Loma Prieta, Kobe and August 17 earthquakes. While many liquefaction studies of fine sands are seen in the literature, liquefaction energy of uniform sands of different grain diameters was investigated by using energy based method. For this purpose, by using parameters of relative density (D_r), effective stress (σ'_v) and mean grain size (D_{50}) which affect cumulative liquefaction energy, 36 tests were performed on samples saturated with water under undrained conditions by controlling deformation under 0.1 Hz frequency and 3% shear strain with cyclic simple shear tester. Tests were carried out on samples with mean grain size of 0.11 mm, 0.26 mm, 0.45 mm and 0.85 mm under effective stresses of 50 kpa, 100 kpa, 150 kpa at 30%, 50%, 70% relative density. The results showed that as the mean grain size decreases, the liquefaction potential of the sand increases. In addition, with increasing effective stress and relative density, the potential of sand against liquefaction decreases. Multiple regression analysis was performed on the test results and individual correlations were proposed for samples with mean grain size of 0.11-0.26 mm and 0.45-0.85 mm. The correlation obtained for the samples in the range of 0.11-0.26 mm was compared with those obtained from the liquefaction tests

performed on sand samples having 0.26 mm grain size in the literature and consistent results were obtained.

Key Words: Liquefaction, Liquefaction Energy, Cyclic simple shear test, Sand, Mean Grain Size, Effective stress, Relative density



TEŞEKKÜR

Tez alıŐmam boyunca hibir Şekilde bilgi birikimini ve deneyimini esirgemeyen her zaman biz gen araştırmacılara büyük destek olan tez yneticisi hocam Sayın Dr. ğretim yesi Y. Bülent SÖNMEZER'e, en iten teŐekkrlerimi sunarım.

Deneysel alıŐmalar Ankara Üniversitesi Zemin Mekaniki Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarı kullanıma açan Prof. Dr. Kamil Kayabalı'ya teşekkür ederim.

Tez çalıŐmam süresince ismini sayamadığım emeği geçen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özetleri.....	4
1.2. Sıvılaşma.....	9
1.3. Sıvılaşma Türleri.....	12
1.3.1. Akma türü sıvılaşma.....	12
1.3.2. Devirsel Hareketlilik	12
1.4. Sıvılaşma Direncini Etkileyen Faktörler.....	13
1.4.1. Deprem Şiddeti Ve Süresi	13
1.4.2. Yer Altı Su Seviyesi	13
1.4.3. Zemin Tipi	13
1.4.4. Zeminin Rölatif Sıklığı.....	14
1.4.5. Tane Boyu Gradasyonu	14
1.4.6. Yerleştirme Ve Çökelme Ortamı.....	15
1.4.7. Drenaj Şartları	15
1.4.8. Çevre Basınçları	15
1.4.9. Tane Şekli.....	16
1.4.10. Yaş Ve Çimentolanma.....	16
1.4.11. Tarihsel Ortam.....	16

1.5. Sıvılaşma Direncinin Tespitinde Kullanılan Deneyler	16
1.5.1. Sıvılaşma Analizi İçin Arazi Deneyleri.....	17
1.5.1.1. Standart Penetrasyon Deneyi	17
1.5.1.2. Koni Penetrasyon Deneyi.....	19
1.5.1.3. Kayma Dalga Hızı Deneyi	20
1.5.2. Sıvılaşma Analizi İçin Laboratuvar Deneyleri	21
1.6. Sıvılaşmayı Belirleme Yöntemleri.....	23
1.6.1. Gerilmeye Dayalı Yöntem.....	23
1.6.2. Birim Deformasyon Değişimine Dayalı Yöntem	24
1.6.3. Enerjiye Dayalı Yöntem	24
2. MATERYAL VE METOT	31
2.1. Malzemeler	31
2.2. Metot.....	32
2.3. Piknometre Deneyi	32
2.4. Maksimum Kuru Yoğunluk Belirleme Deneyi.....	34
2.5. Minimum Kuru Yoğunluk Belirleme Deneyi.....	36
2.6. Cihaz Tanıtımı	37
2.7. Numune Hazırlanması	38
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	43
3.1 Ortalama Tane Çapı (D_{50}) Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi	46
3.2. Efektif Gerilme Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi.....	50
3.3 Rölatif Sıklık Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi	54
3.4 Kayma Modülü Ve Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi	58
3.5. Regresyon Analizi.....	63
3.5.1. Basit Doğrusal Regresyon Analizi	64
3.5.2. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi.....	67
3.5.3. Doğrusal Olmayan Regresyon Analizi	67

3.6. Literatürdeki Sıvılaşma Enerjisi Veren Denklemlerle Karşılaştırma	68
4.SONUÇLAR	75
KAYNAKLAR	77



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

1.1. Taneler arasında gelişen su basıncının taneler arası temas kuvvetine olan etkisi [6].....	2
1.2. Sıvılaşmanın fiziksel süreci [29].....	11
1.3. Sıvılaşma alt ve üst sınırlarını gösteren tane boyu dağılımı eğrileri [36]	15
1.4. $M=7.5$ için devirsel direnç oranı ve arasındaki ilişki [46]	19
1.5. Dinamik basit kesme test aleti [47].....	22
1.6. Tipik Histerezis ilmiği	29
2.1. Numunelerin gradasyon eğrileri.....	31
2.2. Deney sırasında kullanılan piknometre.....	33
2.3. Deneylerde kullanılan dinamik basit kesme test cihazı	38
2.4. Membran, oring ve yarım hücrenin ve teflon halkaların yerleştirilmesi.....	41
2.5. a) Kağıt filtrenin yerleştirilmesi b) Numunenin yerleştirilmesi	41
2.6. a) Başlığın yerleştirilmesi b) kelepçelerin bağlanması.....	42
3.1. Çevrim sayısına karşılık gelen kayma gerilmesi birim deformasyonu	43
3.2. 100 kpa efektif gerilmede %30 rölaf sıklıkta 0,26 mm tane çapındaki numunenin aşırı boşluksuyu basıncı ve çevrim sayısı ilişkisi	44
3.3. %30 rölaf sıklık için boşluk suyu basınç oranı ile enerji değişimi a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa.....	44
3.4. Sıvılaşma boyunca döngü sayısına karşılık gelen kayma gerilmesi	45
3.5. Farklı tane çaplarına göre %30 rölaf sıklıkta kümülatif sıvılaşma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi a) 50 kpa b) 100 kPa c) 150 kPa.....	47
3.6. Farklı tane çaplarına göre %50 rölaf sıklıkta sıvılaşma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi.....	49
a) 50 kpa b) 100 kPa c) 150 kPa.....	49

3.7. Farklı efektif gerilmelerde enerji ile rölatif sıkılık değişimi	49
a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa	49
a) $Dr=30\%$ b) $Dr=50\%$ c) $Dr=70\%$	50
3.9. 30% rölatif sıkılıkta ve farklı efektif gerilmeler altında enerji ile çevrim sayısı ilişkisi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm	51
3.10. 50% rölatif sıkılıkta ve farklı efektif gerilmeler altında enerji ile çevrim sayısı ilişkisi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm	53
3.11. Farklı rölatif sıkılıktaki numunelerin 50, 100 ve 150 kpa efektif gerilme değerlerine bağlı ortalama tane çapı(D_{50})-kümülatif sınıvlaşma enerjisi değişimi a) 30% b) 50% c) 70%	53
3.12. 100 kpa efektif gerilme ve farklı rölatif sıkılıklarda enerji ile çevrim sayısı ilişkisi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm	54
3.13. 150 kpa efektif gerilme ve farklı rölatif sıkılıklarda enerji ile çevrim sayısı ilişkisi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm	56
3.14. Farklı efektif gerilme ve 30% , 50% ve 70% rölatif sıkılık değerlerindeki her bir numunenin tane çapı ile enerjinin değişimi a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa	57
3.15. Farklı tane çap değerleri ile 30% , 50% ve 70% rölatif sıkılık değerlerindeki her bir numunenin efektif gerilme ile enerjinin değişimi a) 0.85 mm ... b) 0.45 mm c) 0.26 mm d) 0.11 mm	58
3.16. Farklı rölatif sıkılık değerleri (30% , 50% , 70%) için 100 kpa efektif gerilme altında kayma modülü oranı ile kümülatif sınıvlaşma enerjisi değişimi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm	60
3.17. Farklı rölatif sıkılık değerleri (30% , 50% , 70%) için 150 kpa efektif gerilme altında kayma modülü oranı ile kümülatif sınıvlaşma enerjisi değişimi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm	60
3.18. 150 kpa efektif gerilme altında kayma modülü oranı ile kümülatif sınıvlaşma enerjisi değişimi a) 30% b) 50% c) 70%	61
3.19. 0.45 mm tane çaplı numune için kayma modülü oranı ile enerjinin değişimi a) 30% b) 50% c) 70%	62

3.20. 0.26 mm tane çaplı numune için kayma modülü oranı ile enerjinin değişimi a) %30 b) %50 c) %70	62
3.21. Deney sonuçları ile denklem 3.12'den elde edilen sonuçların ilişkisi	69
3.22. Deney sonuçları ile denklem 3.13'den elde edilen sonuçların ilişkisi	69
3.23. Farklı efektif gerilmeler için tane çapı ve rölatif sıklık ile enerji değişimi a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa.....	70
3.24. Farklı efektif gerilmeler için tane çapı ve rölatif sıklık ile enerji değişimi.....	70
a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa	70
3.25. Farklı efektif gerilmeler için farklı çalışmaların rölatif sıklığa bağlı kümülatif sıvılaşma enerjilerinin değişimi a) 25 kpa b) 50 kpa c) 100 kpa d) 150 kpa	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Kullanılan kumların fiziksel özellikleri	32
3.1. Test Sonuçları.....	46



1. GİRİŞ

Sıvılaşma, depremlerin, okyanus dalgalarının, patlamanın vb. neden olduğu güçlü yer hareketine maruz kalan gevşek ve suya doymun kumlu zeminlerde meydana gelmektedir. Sıvılaşma, çeşitli yapı tiplerinde önemli bir hasar kaynağıdır. Son 30 yılda, bu olgunun mekanizmalarını anlamak ve sıvılaşmaya duyarlı zemin koşullarını belirlemek için kapsamlı araştırmalar yapılmış ve hala da araştırılmaya devam edilmektedir.

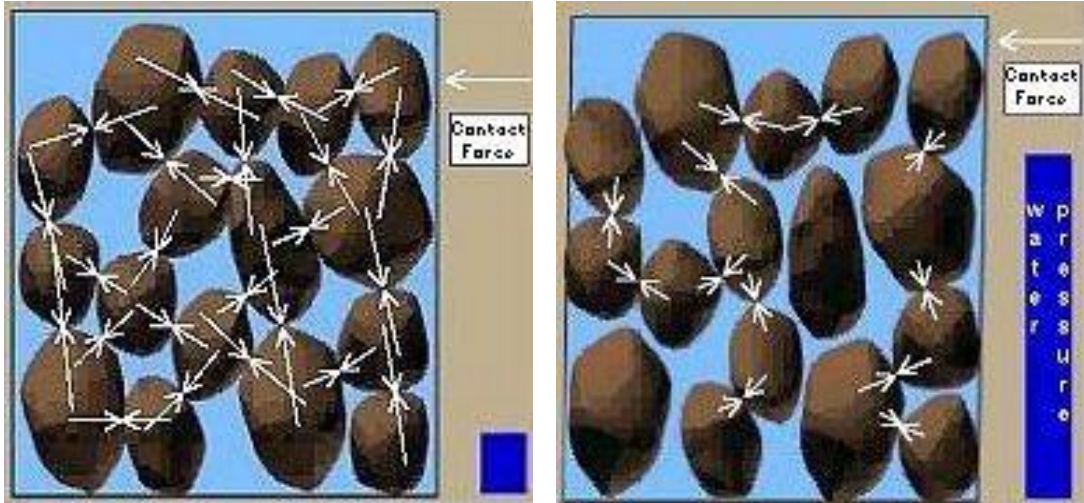
Sıvılaşma, suya doymun zeminlerde meydana gelmektedir. Su zemin tanelerinin kendi aralarındaki efektif gerilmeyi doğrudan etkileyen bir basınç uygular ve bu basınca literatüre baktığımızda araştırmacılar boşluk suyu basıncı olarak tanımlamaktadır. Bir deprem öncesinde boşluk suyu basıncı nispeten düşük olmakla birlikte depremden kaynaklı sismik titreşimler sebebiyle zemin taneciklerinin birbiri üzerinde hareket etmeye zorlanması sebebiyle boşluk suyu basıncında artışa neden olabilmektedir. Bu su basıncı artışı sebebiyle taneler arası temas azalmakta ve zemin dayanımını kaybederek bir sıvı gibi davranmaktadır. Bu olaya sıvılaşma denilmektedir. Sıvılaşma meydana geldiğinde zeminin taşıma gücü azalmakta ve üst yapıda devrilmelere; istinat yapılarında eğilmelere, kaymalara; barajların ise çökmesine neden olmaktadır.

Sıvılaşma, aslında yüzlerce ve hatta binlerce yıl öncesine dayanan yazılı kayıtlarda anlatılan doğal felaketlerin sıvılaşma ile ilişkili olduğu bilinen deprem etkilerini tanımlamaktadır. Sıvılaşmaya neden olan ve bilinen ilk depremler Alaska (1964) [1], Niigata (1964) [2], San Fernando (1971), Loma Prieta (1989) [3], Kobe (1995) [4] ve 17 Ağustos (1999) [5] depremleridir.

Sıvılaşma yalnızca suya doymun kumlu zeminlerde meydana geldiğinden etkileri nehir, göl, koylar ve okyanuslar gibi su kütlelerine yakın alçak zeminlerde görülmektedir. Liman ve iskele tesisleri çoğunlukla sıvılaşmaya yatkın bölgelerde bulunur ve çoğu geçmiş depremlerde sıvılaşmadan zarar görmüştür. Çoğu liman ve iskele istinat yapılarına veya rıhtım duvarlarına sahiptir. Böyle bir duvarın arkasında ve/veya altındaki toprak sıvılaştığında duvara uyguladığı basınç büyük ölçüde

artabilir. Aynı zamanda duvarın suya doğru kaymasına ve/veya eğilmesine neden olabilir. Sıvılaşma ayrıca nehirleri ve diğer su kütlelerini geçen köprülere de hasar verebilmektedir. Bu yapılarda meydana gelen hasarlar, deprem sonrası kısa vadede kurtarma çalışmalarını engelleyebilmekte ve uzun vadede ciddi ekonomik kayıplara neden olabilmektedir.

Sıvılaşmayı anlamak için, bir depremden önce zemin profilinde var olan koşulları belirlemek önemlidir. Bir zemin tabakaları her bir zemin tanesinin bir araya gelmesi ile oluşur. Bu zemin tanelerine yakından bakıldığında her tanenin diğer zemin komşu taneleriyle temas halinde olduğu görülebilir. Zemin tanelerinin üzerine etkiyen zati ağırlık zemin taneleri arasında bir temas kuvveti oluşturur ve bu kuvvet zemin profiline mukavemet kazandırır. Sıvılaşma, gevşek, doygun bir kumlu zeminde tekrarlı yüklemeler sonucu zemin taneleri arasındaki temas kuvvetinin azalması ile meydana gelir. Gevşek haldeki zemin taneleri tekrarlı yükleme sırasında daha sıkı bir şekilde paketlenme davranışı sergilerler. Deprem sırasında zemin bünyesindeki suyun kaçabilmesi için zemin taneleri suyun kaçışını engeller ve oluşan su basıncı zemin tanelerinin birbirine yaklaşmasını engelleyici bir bariyer görevi görür. Ayrıca Şekil 1.1'de görüldüğü üzere zemin taneleri arasındaki temas kuvvetinin azalmasına zemin profilini yumuşatıp zayıflatan su basıncında bir artış eşlik eder.



Şekil 1.1. Taneler arasında gelişen su basıncının taneler arası temas kuvvetine olan etkisi [6]

Taneler arasında gelişen boşluk suyu basıncının fazlalığı öyle bir noktaya gelebilir ki artık zemin taneleri arasında hiçbir temas kalmaz ve zemin profili bir sıvı gibi davranır. Zeminin bu davranışı sebebiyle bu olaya sıvılaştırma adı verilmiştir.

Zeminin sıvılaştırılabilirliğinin ölçüsü çeşitli in-situ ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu testlerde her zaman zemin profiline deprem tarafından gelen enerjinin zemin profili tarafından ne kadarının sönmüneceğinin belirlenmesi üzerine durulmuştur. Laboratuvar deneyleri ile saha koşulları simüle edilmeye çalışılmış ve in-situ deneyler ile desteklenmiştir. Laboratuvar deneylerindeki en büyük problem saha koşullarına ait gerilme ve şekil değiştirme koşullarının simüle edilememesinden kaynaklanmaktadır.

Zemin profilinin sıvılaştırılabilmesinde önemli bir etkende mevcut boşluk oranının zeminin kritik boşluk oranından ne kadar fazla olduğudur. Casagrande [7], 1936'da gevşek ve sıkı kumlar üzerinde yapmış olduğu dreajsız birim deformasyon kontrollü üç eksenli testlerde aynı çevre basıncında numunelerin aynı boşluk oranına yaklaştığını keşfetmiştir. Daha küçük tane boyutlarında artan yüzey alanı zemin tanelerinin boşluk oranlarının ortalama tane çapı ile ters orantılı olmasına neden olmaktadır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında sıvılaştırma için dinamik üç eksenli testi, içi boş silindirik burulma kesme, santrifüj ve sarsma tablası test aletlerinin kullanıldığı görülmüştür. Zeminlerin mukavemet ve dinamik gerilme-şekil değiştirme özelliklerini laboratuvar koşullarında araştırmak için geliştirilen deney aletlerinden biriside dinamik basit kesme test aletidir. Bu deney aleti ile statik ve dinamik yüklemeli deneyler yapılabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, farklı gradasyonlu kumların farklı çevre koşulları altında sıvılaştırma potansiyellerinin değerlendirilmesidir. Sıvılaştırma potansiyelinin değerlendirilmesinde öne sürülen gerilmeye dayalı yöntem ve birim deformasyon değişimine dayalı yöntemin aksine enerjiye dayalı yöntemin avantajları sebebiyle bu yöntem tercih edilmiştir.

Çalışmanın diğere bir amacı, yapılan testler sonucunda efektif gerilme, rölatif sıkılık ve ortalama tane çapına bağılı matematiksel modeller geliştirmektir. Elde edilen matematiksel modeller literatürdeki bağıntılarla karşılaştırılmış ve benzer ilişkiler olduğu gözlenmiştir. Birinci bölümde, sıvılaşmanın matematiksel ifadesi ile birlikte sıvılaşmayı etkileyen faktörler, sıvılaşma direncinin tespitinde kullanılan deneyler ve sıvılaşmayı belirleme yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır. İkinci bölümde, sıvılaşma testleri öncesinde numunelerin tanıtılması ve numunelerin tane birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi için yapılan deney anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, test sonuçlarına ait grafikler verilmiştir. Test sonuçları doğrultusunda geliştirilen matematiksel modellerin literatürdeki modellerle karşılaştırılması yapılmıştır. Test sonuçları yorumlanmıştır. Dördüncü bölümde ise test hakkında bilgi verilmiş ve gelecekte çalışma yapacak araştırmacılara öneride bulunulmuştur.

1.1. Literatür Özetleri

Literatürde sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için birçok laboratuvar testi ve arazi çalışması yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmalardan bazıları özet halinde verilmiştir.

Law vd. [8], granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için geçmiş büyük depremlerden elde edilen laboratuvar verileri ve gözlemsel verilere dayanarak bir enerji yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen enerji yöntemi ile sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin sıvılaşabilmesi için gereken enerji miktarı belirlenmiştir. Bu testlerde aşırı olarak gelişen boşluk suyu basıncı ile yükleme sırasında harcanan enerji arasında bir ilişkinin olduğunu bulmuşlardır.

Selim ALTUN ve Atilla M. ANSAL [9], içi boş silindiri burulma kesme aleti ile kumlar üzerinde yaptıkları çalışmada uygulanan gerilme genliği ile çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır. Yapmış oldukları laboratuvar çalışmaları ve geçmiş deprem kayıtlarını inceleyerek deprem büyüklüğüne bağılı olarak çevrim sayısının 10-20 arasında olması gerektiği yargısına ulaşmışlardır. Onlar çalışmalarında 20 çevrim sayısında ve çift yönlü %10 birim deformasyon oluşturacak şekilde genlik tanımlamışlardır.

Eyyüb KARAKAN vd. [10], dinamik üç eksenli test cihazında gevşek kum, orta sıklıkta kum ve sıkı kumlarda farklı boyutta ve miktarda fiber katkısının sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Orta sıkı kumlarda fiber katkısının sıvılaşma potansiyelini azaltma yönündeki etkisi gevşek kumlarda yapılan deney sonuçlarına göre daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca deney sonuçlarından yola çıkarak çevrim sayısının aşırı boşluk suyu basıncının gelişimine olan katkısı belirtmişlerdir.

Tuğba ESKİŞAR vd. [11], yapmış oldukları çalışmada fiber takviyeli kumun sıvılaşma potansiyeline olan katkısını araştırmışlardır. Bu amaçla %50 ve %70 rölatif sıklıkta iki kum numunesinde sabit 100 kpa yükleme altında fiber katkılı ve katkısız deneyler yapmışlardır. Fiber katkılı deneylerde değişen fiber boyu (6 ve 12 mm) ve değişen oranlarda fiber (%0.25, %0.5, %1) kullanmışlardır. Deney sonunda fiber içeriğinin ve uzunluğunun artmasının sıvılaşma için gereken çevrim sayısını artırdığını ortaya koymuşlardır.

Mehmet ORHAN ve Ali ATEŞ [12], Manisa (Saruhanlı) ilçesinden aldıkları zeminleri laboratuvar koşullarında dinamik üç eksenli deneye tabi tutmuşlardır. Mevcut arazi rölatif sıklığında (%66) gerçekleştirilen deneyde sıvılaşmanın olmadığı tüm koşullarda değişiklik yapılmadan %50 rölatif sıklığa düşürülerek tekrar test edildiğinde sıvılaşmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada literatürü tasdik ediyor ki sıvılaşma gerek arazide gerek laboratuvarında değişen birçok parametreye bağlı kalmaktadır.

Abdul HAKAM [13], yapmış olduğu çalışmasında zeminin fiziksel özelliklerinin sıvılaşma direncine etkisini araştırmak için titreşim tablasında bir deney gerçekleştirmiştir. Sıvılaşma için gereken birçok parametre olmakla birlikte yapmış olduğu çalışmada rölatif sıklık ve dane büyüklüğünü ele almıştır. Numuneye bir gösterge çubuğu yerleştirerek gerçekte arazide sıvılaşma meydana geldiğinde yapıların nasıl davranacağını simüle etmek istemiştir. Deneylerde titreşim tablası frekansı 13 Hz ve 25 saniye süre ile uygulanmıştır. Numunelerdeki oturma miktarına bağlı rölatif sıklık ve D_{50} ile olan ilişkisinden sıvılaşmada artan rölatif sıklık ve artan tane büyüklüğünün sıvılaşma direncini artırdığını ortaya koymuştur.

Wang Y. vd. [14], yapmış oldukları çalışmada drenajsız dinamik üç eksenli deney aletinde çakıl içeriğinin sıvılaşma direncine olan etkisini araştırmışlardır. Bunun için ağırlıkça %50, %60, %70, %80 oranlarında eklenen çakıl miktarına bağlı sıvılaşma direncini gözlemlemişlerdir. Çakıl yüzdesi ve ilk sıvılaşma için gereken döngü sayısına bağlı grafikten artan çakıl miktarının sıvılaşma direncini ciddi bir şekilde artırdığı ortaya konulmuştur. Ayrıca yapılan computed tomography tarama testi ile çakıl muhtevasının %50-%80 arasında artmasına bağlı olarak çakıl taneler arasındaki temasın daha güçlü olduğunu gözlemlemişlerdir.

Simcock vd. [15], üniform kumlarda aşırı boşluksuyu basıncı ve sıvılaşma başlangıcına kadar zeminde biriken enerji arasındaki ilişkiyi açıklamak için 21 adet dinamik üç eksenli test gerçekleştirmişlerdir. İlave boşluksuyu basıncı ve enerji arasında fonksiyonel bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin deviatör gerilmeye bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Nemat-NASSER ve A. SHOKOOH [16], yaptıkları sıvılaşma deneylerinde enerjiye dayalı modeli kullanarak kumlu zeminlerin sıvılaşması ve danelerin daha sıkı duruma geçmesini açıklayan matematiksel modeli önermişlerdir.

Berrill ve Davis [17], belirli sıvılaşma bölgesinden elde edilmiş standart Penetrasyon değerleri ile daha önceki Simcock vd. nin enerjiye dayalı sıvılaşma çalışmasından faydalanarak sıvılaşma enerjisi için deprem büyüklüğüne dayalı bir sayısal model geliştirmişlerdir.

Towhata ve Ishihara [18], içi boş silindirik burulma kesme aleti ile Toyoura kumunda drenajsız bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Kesme gerilmesinden kaynaklı oluşan aşırı boşluk suyu basıncı ile zeminin birim hacminde biriken enerji arasında karakteristik bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Her ne kadar bu ilişki tek yönlü yükleme ile oluşan aşırı boşluk suyu basıncını artırsada hala kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Figuroa vd. [19], içi boş silindirik burulma kesme aletini kullanarak Reid Bedford kumu üzerinde üç farklı rölatif sıklık, (%50, %60, %70) üç farklı genlik, (%1.02, %0.47, %0.15) ve üç farklı efektif gerilme, (41.4kpa, 82.7kpa, 124.1kpa) altında 27

adet deney yapmışlardır. Deneylerde çevre basıncının, rölatif sıkılığın ve kayma birim deformasyonu genliğinin zeminin sıvılaşması için gereken enerjiye olan etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçlarından belirgin olarak zeminin sıvılaşması için gereken enerjinin efektif gerilme ve rölatif sıkılık ile doğru orantılı olduğu ancak kayma birim deformasyonu genliği ile belirgin bir ilişkinin gözlenmediğini ortaya koymuşlardır.

Liang [20], içi boş silindirik burulma kesme aleti ile zeminlerde sıvılaşma için gereken enerjiye etki eden faktörlerin belirlenmesi için üç farklı kum numunesi üzerinde dört farklı genlikte (%0.15, %0.3, %0.47, %0.58, %1.02) farklı rölatif sıkılıkta 74 adet deney gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma başlangıcı için birim hacim başına biriken enerji ve aşırı boşluk suyu basıncı arasındaki ilişki üzerinde kayma birim deformasyonu genliğinin bir etkisinin olmadığını tespit etmiştir.

Chen vd. [21], sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için back-propagation neural networks ile sismik dalga enerjisine dayalı modeli önermişlerdir. Modern sıvılaşma enerjisinin tahmininde tutarlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Baziar ve jafarian [22], sıvılaşma başlangıcı için birim hacimde biriken toplam enerjinin tahmininde neural network prosedürünü daha önce cyclic triaxial, torsional ve basit kesme ile edilen 284 laboratuvar test sonuçlarına uygulamışlardır. Hem saha gözlemleri hem de laboratuvar test sonuçlarından ilk sıvılaşma anı için gereken enerji arasında tutarlılık olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca sıvılaşmada birim hacim için gereken enerji hesabı için rölatif sıkılık, ince tane içeriği yüzdesi, efektif gerilme, üniformluk katsayısı ve ortalama dane çapı parametrelerine bağlı bir bağıntı elde etmişlerdir.

Jafarian vd. [23], farklı rölatif sıkılık ve farklı gerilme koşullarında içi boş silindirik burulma kesme aletini kullanarak drenajsız koşullarda bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarından sıvılaşma başlangıcı için birim hacimde biriken enerjisinin başlangıç efektif gerilme ve rölatif sıkılığa bağlı olduğunu gösteren yeni bir nonlinear denklem türetmişlerdir. Bu denklemin sıvılaşmış ve sıvılaşmamış sahada yapılan analizlerde vakaları ayırt etmede sınır eğrisi olarak iyi çalıştığını belirtmişlerdir.

Polito vd. [24], izotropik olarak konsolide edilmiş kum numuneleri üzerinde aşırı boşluksuyu basıncı ve zeminde sıvılaşma başlangıcına kadar biriken enerji arasında, farklı yükleme şekillerinin etkisini değerlendirmek için bir dizi gerilme kontrollü dinamik üç eksenli test gerçekleştirmişlerdir. Sinüzoidal yüklemeye ek olarak üçgen, kare, düzenli simetrik ve düzensiz asimetrik farklı yükleme şekilleri için sıvılaşmaya neden olan yükleme döngüsü sayısında büyük farklılık olmasına rağmen, sıvılaşma başlangıcında normalize edilmiş birim hacim başına biriken enerjinin yükleme şekliyle bağımsız ancak süresine ise biraz bağımlı olduğunu belirtmişlerdir.

Liang vd. [25], içi boş silindirik burulma kesme aleti ile Reid Bedford kumu üzerinde 3 farklı rölatif sıklıkta (%50, %60, %70) ve üç farklı efektif gerilme (41.4kpa, 82.7kpa, 124.1kpa) altında ve üç farklı genlikte (%0.15, %0.47, %1.02) 27 tane sinüzoidal yükleme deneyi yapmışlardır. Ayrıca 9 adet random yükleme deneyi de yaparak sıvılaşma için gereken enerjiye etki eden faktörleri araştırmak istemişlerdir. Deney sonucunda aynı efektif gerilme altında rölatif sıklık arttıkça ve aynı rölatif sıklıkta efektif gerilme arttıkça birim hacim başına düşen enerjinin arttığını göstermişlerdir. Sinüzoidal ve random yükleme altında birim hacim başına düşen enerjideki değişimin çok az bir fark olduğunu göstermişlerdir. Bu farkın önemini değerlendirmek için ise regresyon analizi yapmışlardır.

Dief vd. [26], yapmış oldukları çalışmada Nevada ve Reid Bedford kumları üzerinde %50, %60, %65, %70 ve %75 rölatif sıklıkta santrifüj modeli ile sıvılaşma testi gerçekleştirmişlerdir. Deney sırasında ivme, yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı gibi parametreleri araştırmışlardır. Özellikle deney sırasında farklı derinliklerdeki kaydedilen ivmeler ve yanal birim değiştirmeleri sıvılaşma başlangıcına kadar ki enerjiyi tahmin etmek için kullanmışlardır. Sıvılaşma için rölatif sıklık ve efektif gerilme etkisini incelemişlerdir. Ayrıca daha ince daneli kumların sıvılaşma için ihtiyaç duyduğu enerjinin daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Figuroa ve Dahisaria [27], içi boş silindirik burulma kesme aleti ile sıvılaşma deneyi gerçekleştirmişlerdir. Reid Bedford kumu ile üç farklı rölatif sıklıkta (%50, %60, %70) üç farklı efektif gerilme ve üç farklı kayma birim deformasyonda hazırlanan 27 numune üzerinde deneyler yapmışlardır. Boşluk suyu basıncının ilk

döngülerde ani bir sıçrama yaparak yükseldiğini sonra artış miktarının azalarak sabit kaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca sıvılaşmada birim hacim için gereken enerji hesabı için bir denklem elde etmişlerdir.

Y. B. Sönmezer [28], yapmış olduğu laboratuvar çalışmasında üç farklı rölatif sıklık (%40, %55, %70) dört farklı efektif gerilme (25kpa, 50kpa, 100kpa, 150 kpa) ve üç farklı kayma birim deformasyonu genliği (%2, %3.5, %5) uygulayarak kumların sıvılaşma potansiyelini enerjiye dayalı yaklaşım ile araştırmıştır. Deneyler sonucunda sıvılaşma başlangıcında zemine birim hacim başına aktarılan enerji ile efektif gerilme, rölatif sıklık ve kayma birim deformasyonu genliği arasındaki ilişkileri göstermiştir. Bu ilişkilerden kayma birim deformasyonu genliğinin, zeminin sıvılaşması için gereken enerji üzerinde ihmal edilebilecek seviyede olduğunu göstermiştir. Buna karşın artan efektif gerilme ve artan rölatif sıklığın ise sıvılaşma için gereken enerji üzerinde artırıcı bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca deney sonuçları üzerinde yapılan çoklu regresyon analizi ile kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisini rölatif sıklık ve efektif gerilme parametrelerine bağlı olan bir bağıntı önermiştir.

1.2. Sıvılaşma

Sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliğinin en önemli ve karmaşık konularından biridir. Literatürde, sıvılaşmanın bazı özel durumlarda statik şartlarda da meydana gelebileceğinden bahsedilse de asıl deprem kaynaklı sismik koşullardaki sıvılaşma büyük risk taşımaktadır. Sismik sıvılaşma deprem kaynaklı olup büyük bir bölgede etkili olabilmektedir. Sismik sıvılaşma, 27 Mart 1964'de Alaska [1], Good Friday, ($M_w=9.2$) ve 16 Haziran 1964'de Japonya Niigata [2], ($M_w=7.6$) depremleri ardından, ilk kez 1965'de Arthur Cassagrande tarafından ortaya konulmuştur. Bu depremlerde birçok bina, temel zemininin taşıma gücünü yitirmesinden dolayı, yan yatmış, devrilmiş veya battığı, istinat duvarlarının oluşan aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle ötelendiği veya devrildiği gözlenmiştir. Ayrıca eğimli alanlarda sıvılaşma kökenli akma veya yanal yayılmalar olduğu ve gömülü yapılar yüzeye doğru hareket ettiği de kayıtlara geçmiştir [29].

17 Ağustos 1999’da meydana gelen deprem [5], ($M_w=7.6$) sıvılaşmayı bir kez daha en çarpıcı yönleriyle etkisini ortaya koymuştur. Yapıların taşıyıcı sisteminde hasar meydana gelmemesine rağmen zeminin sıvılaşma ile birlikte taşıma gücü kaybına bağlı olarak yapıda devrilmeler, oturmalar meydana gelmiştir. Bu yüzden sıvılaşma iyi irdelenmesi gereken bir zemin davranışıdır.

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi ile ilgili ilk detaylı çalışma 1970’li yıllarda yapılmıştır. Son elli yılda ise, sıvılaşma ile ilgili birçok araştırma yapılmış, farklı analiz yöntemleri geliştirilmiştir.

Sıvılaşma:

Bir deprem sırasında kayma dalgalarının yayılımı sebebiyle aşırı boşluk suyu basıncı artmakta ve gevşek haldeki kumun daha sıkı konuma gelmesine neden olmaktadır. Sismik salınımın çok hızlı meydana gelmesi nedeniyle, kohezyonsuz zemin drenajsız yüklemeye maruz kalmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki artış, suyun çamur fişkirmaları veya kum kaynamaları şeklinde ortaya çıktığı zemin yüzeyine doğru yukarı akışına neden olmaktadır. Yer sarsıntısı ve suyun yukarı doğru akışı nedeniyle yüksek boşluk suyu basınçlarının gelişimi, kumu “sıvılaşma” diye adlandırılan bir duruma dönüştürmektedir [30].

Statik şartlarda,

$$\sigma'_v = \sigma_v - U_s \quad (1.1)$$

Dinamik şartlarda,

$$\sigma'_v = \sigma_v - (U_s + U_d) \quad (1.2)$$

Şeklinde olacaktır.

Burada,

σ_v = Toplam gerilme

σ'_v = Efektif gerilme

U_s = Statik durumda boşluk suyu basıncı

U_d = Dinamik durumda boşluk suyu basınç fazlalığı

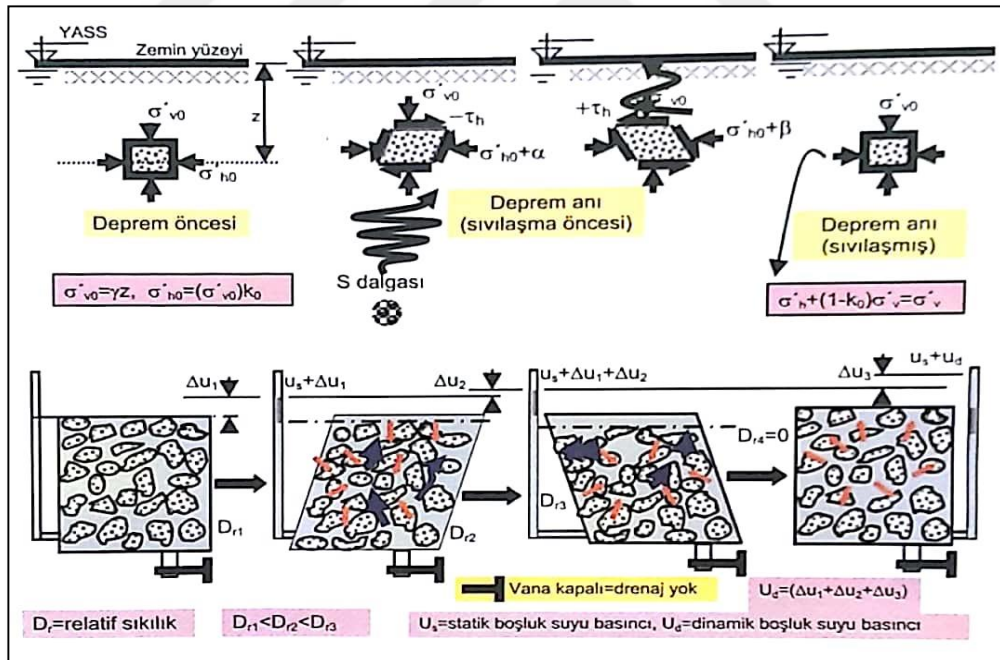
Eğer,

$$(U_v + U_s) = \sigma_v \quad (1.3)$$

olursa

$$\sigma'_v = 0 \quad (1.4)$$

Bu durumda zemin mukavemetini kaybeder ve bir sıvı gibi davranır. Bu fenomen geoteknik deprem mühendisliğinde sıvılaşma olarak adlandırılır.



Şekil 1.2. Sıvılaşmanın fiziksel süreci [29]

1.3. Sıvılaşıma Türleri

Neden olduğu hasar tipleri göz önüne alındığında iki çeşit sıvılaşımadan bahsedilir:

1. Akma türü sıvılaşıma
2. Devirsel hareketlilik (mobilité)

1.3.1. Akma türü sıvılaşıma

Akma türü sıvılaşıma, büyük hasarların gözlemlendiği akma yenilmelerini oluşturur. Zeminin statik dengesi için gerekli kayma gerilmelerinin, sıvılaşımış zeminin dayanımından büyük olduğu durumlarda oluşur. Genellikle büyük bir zemin kütlelerinin onlarca metre deplasman yapması şeklinde oluşan akma türü sıvılaşıma, bir kez tetiklendikten sonra, tamamen statik kayma gerilmeleri tarafından sürdürülür [31].

1.3.2. Devirsel Hareketlilik

Devirsel hareketlilik diğer bir ismi ile mobilité kavramını Kramer (1996) [31] şöyle açıklamıştır.

“Devirsel hareketlilik, deprem sarsıntısı sırasından kabul edilemeyecek düzeyde büyük ve kalıcı deformasyonlara neden olan bir olaydır. Devirsel hareketlilik, akma sıvılaşımasının aksine, statik kayma gerilmesinin, sıvılaşımış zeminin kayma dayanımından küçük olduğu zaman gelişmektedir. Devirsel hareketlilik türü yenilmenin neden olduğu deformasyonlar deprem sarsıntısı sırasından kademeli olarak gelişir. Akma sıvılaşımasının aksine, devirsel hareketlilik ile oluşan deformasyonlara neden olan faktör, hem devirsel gerilme hem de statik kayma gerilmeleridir. Yanal yayılma olarak adlandırılan bu deformasyonlar çok az eğimli yamaçlarda veya su kütlelerine komşu düzlüklerde gelişmektedir. Yapıların bulunduğu yerlerde yanall yayılma büyük hasarlara yol açabilmektedir.”

1.4. Sıvılaşma Direncini Etkileyen Faktörler

Sıvılaşma kompleks bir zemin davranışı olmakla birlikte sıvılaşmayı etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler depremin büyüklüğü ve şiddeti, sismik sönümleme özellikleri, iç merkezden uzaklığı, zemin tipi ve özellikleri, çevre basıncı, yayılım yolu etkileri, zeminin katmanlarının geometrisi ve sahaya özgü diğer koşullardan oluşur [8].Alt başlıklarda bu faktörler açıklanmıştır.

1.4.1. Deprem Şiddeti Ve Süresi

Zemin sıvılaşmasının gerçekleşmesi için bir yer sarsıntısı gerekmektedir. Zemin partiküllerinin hacimsel büzülmesine ve aşırı boşluk suyu basıncının gelişmesine neden olan kayma deformasyonlarını belirleyen şey, yer hareketinin ivme ve sarsıntı süresi gibi özellikleridir. Sıvılaşmanın en yaygın nedeni, deprem anında açığa çıkan sismik enerjidir. Deprem şiddeti ve sarsıntı süresi artarken, sıvılaşma potansiyeli de artmaktadır.

1.4.2. Yer Altı Su Seviyesi

Sıvılaşma için en elverişli koşullar yeraltı su seviyesi yüzeye yakın olduğu zaman ortaya çıkmaktadır. Yeraltı su seviyesi üzerinde yer alan ve suya doymun olmayan zeminlerin sıvılaşması söz konusu değildir. Yeraltı su seviyesinin zaman içinde alçalıp yükseldiği yerlerde, sıvılaşma potansiyeli de azalır ve artar.

1.4.3. Zemin Tipi

Sıvılaşmaya en duyarlı zemin tipleri, ince taneli kum ve plastik olmayan siltli zeminlerdir. Seed vd. [32], kohezyonlu zeminlerin büyük bir kısmının deprem esnasında sıvılaşmayacağını belirtmiştir. Başlangıçta Seed ve Idriss [33], tarafından açıklanan ve sonradan Youd and Gilstrap [34] tarafından pekiştirilen kriterler

kullanılarak, kohezyonlu bir zeminin sıvılaşması için, aşağıdaki üç kriterin tamamının karşılanması gerekmektedir.

- 0,005 mm'den daha ince partiküllerin zemindeki kuru ağırlıkça yüzdesi 15'den daha az olmalıdır.
- Zeminin likit limiti 35'den küçük olmalıdır.
- Zeminin su muhtevası likit limitin 0,9'undan daha büyük olmalıdır.

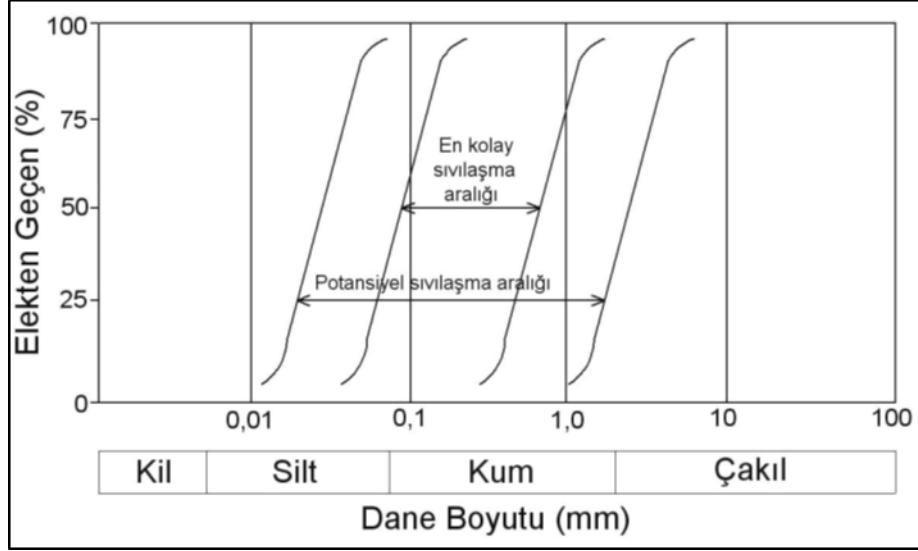
1.4.4. Zeminin Rölatif Sıklığı

Gevşek durumdaki kohezyonsuz zeminler sıvılaşma potansiyeli göstermektedir. Gevşek ve plastik olmayan zeminler, aşırı boşluk suyu basıncı gelişimine neden olan sismik titreşimler sırasında hacimsel azalma eğilimi gösterir. Bu esnada da aşırı oluşan boşluk suyu basıncı ani kesme gerilmesinden dolayı drenajsız şartlar geçerli olur ve zeminde sıvılaşma meydana gelir.

Sıkı kumlarda ise sismik titreşimler sonucu hacimsel olarak genişleme eğilimi göstereceğinden aşırı boşluk suyu basıncı gözlenmez. Poulos vd. [35], arazideki zeminde hacimsel artış olduğu gösterilebildiği takdirde, sıvılaşmaya duyarlı olmayacağı için, sıvılaşma açısından değerlendirmeye gerek olmadığını belirtmektedir.

1.4.5. Tane Boyu Gradasyonu

Üniform derecelenmiş plastik olmayan zeminler rastgele dane dizilimi oluşturma eğilimindedir. Bu yüzden bu tip zeminlerin sıvılaşmaya karşı direnci zayıftır. İyi derecelenmiş zeminlerde ise büyük daneler arasına boşlukları dolduracak daha küçük daneler de mevcut olduğu için daha sıkı bir profil oluşmasını sağlar ve deprem sırasında aşırı boşluk suyu basıncı daha az oluşur. Kramer [31], sıvılaşma yenilmelerinin çoğunun üniform derecelenmiş granüle zeminlerde geliştiğini gösteren arazi kanıtlarının bulunduğunun belirtmektedir.



Şekil 1.3. Sıvılaşma alt ve üst sınırlarını gösteren tane boyu dağılımı eğrileri [36]

1.4.6. Yerleştirme Ve Çökme Ortamı

Hidrolik dolgular, su içinde düşen zemin partikülleri ile oluşturulan gevşek ve dağınık zemin yapısı nedeniyle sıvılaşmaya oldukça duyarlı olma eğilimindedir. Göllerde, nehirlerde veya denizlerde oluşan doğal çökeller gevşek ve dağınık zemin yapısı oluşturma eğiliminde olup, sıvılaşmaya daha duyarlıdır. Sıvılaşmaya özellikle duyarlı zeminler gölsel, alüvyal ve denizel çökme ortamlarında oluşur [37].

1.4.7. Drenaj Şartları

Aşırı boşluk suyu basıncının hızlı sönümlenmesi durumunda zemin sıvılaşmayabilir. Böylece, çok yüksek geçirimli çakıl drenler veya çakıl zeminlerin sıvılaşma potansiyelini azaltabilir [37].

1.4.8. Çevre Basınçları

Çevre basıncı ne kadar büyükse, zeminin sıvılaşmaya duyarlılığı da daha azdır. Zemin içerisinde daha derin noktalarda üstteki zemin profili bir sürşaj görevi görmektedir.

Bu da zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmaktadır [37].

1.4.9. Tane Şekli

Zemin tane şekli de sıvılaşma potansiyelini etkileyebilir. Yuvarlak daneli zeminler köşeli danelerine göre daha çok sıkışma eğilimi göstermektedirler. Buda beraberinde yuvarlak daneli zeminlerin sıvılaşmaya daha duyarlı olmasına neden olmaktadır [37].

1.4.10. Yaş Ve Çimentolanma

Yeni çökelmiş zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı eski zemin çökellerinden daha fazladır. Zemin ne kadar uzun süre çevre basıncı ve sürşaj yükü altında kalırsa konsolide olarak bünyesindeki suyu uzaklaştıracağından sıvılaşmaya karşı olan direnci de artacaktır [38-40].

1.4.11. Tarihsel Ortam

Zeminin tarihsel ortamının sıvılaşma potansiyelini etkileyebileceği de belirlenmiştir. Daha önce sismik sarsıntıya maruz kalmış zemin çökelleri daha yüksek rölatif sıklığa ulaştığı için sıvılaşmaya karşı olan direnci de artar [41-42].

1.5. Sıvılaşma Direncinin Tespitinde Kullanılan Deneyler

Deprem kaynaklı sismik titreşimlerin, sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde ciddi mukavemet kaybına sebep olduğu bilinmektedir. Bu olay yapılarda geri dönüşü olmayan ciddi hasarlara neden olmaktadır. Bu amaçla yapıların zarar görmemesi için zeminin olası deprem sırasındaki sıvılaşma direnci tespit edilmelidir. Bu bağlamda sıvılaşma direncinin tespiti için laboratuvar ve arazi deneyleri yapılmaktadır.

1.5.1. Sıvılaşma Analizi İçin Arazi Deneyleri

Arazi deneylerinin önemi zeminin tabii koşullarında test edilmesidir. Daha büyük ölçekte yapılan deneyler sayesinde sıvılaşma riski olan bölgeye ölçeklenmesi daha kolay ve mantıklı sonuçlar elde edilmesini sağlar. Ayrıca istenilen derinliğe inilerek zemin profili oluşturup sıvılaşma potansiyeli olan katmanlar tespit edilebilir. Arazide sismik aktiviteyi göstermek güç olduğundan sıvılaşma direncine ait parametrelere ulaşamaz. Değerlendirme kriterlerine ulaşmak için, daha önce sıvılaşmaya neden olmuş depremler ve bölgeler incelenerek ampirik denklemler geliştirilmiştir [43].

1.5.1.1. Standart Penetrasyon Deneyi

1927 yılında geliştirilen SPT deneyi dinamik bir sonda deneyidir. Deney önceden açılmış bir sondaj kuyusunda yapılan bir arazi deneyidir. SPT deneyi tüm zemin çeşitleri için kullanılabilir. Fakat, Coduto [44], SPT'nin yalnızca granüle zeminler için kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Sondayı çakmak için standart bir enerji uygulanır. Bunun için 76 cm yükseklikten serbestçe düşen 63,5 kg kütlede bir tokmak kullanılır. Sonda önce zemine 15 cm çakılır. Böylece kuyu tabanındaki örselenmiş derinlik geçilir. Sonra 30 cm çakılır. İlk 15 cm'den sonra sondanın 30 cm çakılması için gereken vuruş sayısı SPT-N sayısı olarak ifade edilir [45]. Ölçülen SPT-N değeri zemindeki ince dane miktarı ve çakıl boyutlu partiküller gibi zemin tipinden etkilenebilmektedir. Gevşek kumlarda kayma gerilmeleri altında hacimsel azalış meydana gelmekte iken sıkı kumlarda ise hacimsel artış meydana gelmektedir. Bu yüzden siltli veya killi kumlar gibi kayda değer ince zemin partikülleri içeren suya doymun kumlar, eğer hacimsel artış eğiliminde ise, anormal derecede yüksek N değerleri veya SPT numune alıcısını çakma ile birlikte drenajsız kayma şartları esnasında zemin hacimsel azalış eğilimine sahipse, anormal derecede düşük N değeri verebilir. Ölçülen SPT-N değerini etkileyebilen bir faktör de yeraltı suyudur. Sondaj kuyusunda, arazideki doğal yeraltı suyu seviyesinde veya üzerinde bir su seviyesini muhafaza etmek önemlidir. Bunun nedeni, granüle zemini gevşetebilecek ve ölçülen düşük N değerlerine neden olabilecek yeraltı suyunun sondaj kuyusu tabanına hücum etmesini önlemektir.

Zemin ve yeraltı suyu şartlarına ek olarak, birçok farklı deney faktörleri SPT okumalarını etkileyebilmektedir.

$$N_{60} = 1,67E_m C_b C_r C_s N \quad (1.5)$$

N_{60} = Arazi prosedürlerine göre düzeltilmiş SPT-N değeri

E_m = Şahmerdan etkinliği (A.B.D. ekipmanında güvenli şahmerdan için $E_m = 0,6$ ve halka tipi şahmerdan için $E_m = 0,45$ dir.)

C_b = Kuyu çapı düzeltmesi (65 ile 115 mm çaplı sondaj kuyuları için, $C_b = 0,15$; 150mm çap için 1,05 ve 200 mm çaplı kuyu için 1,15)

C_r = Tij uzunluğu düzeltmesi (4 m'ye kadar tijlerde $C_r = 0,75$; 4 ile 6 m'lik tijlerde 0,85; 6 ile 10 m'lik tijlerde 0,95 ve 10 m'den uzun tijlerde 1 dir.)

C_s = Numune alıcısı düzeltmesi (Standart numune alıcısı için $C_s = 1$ ve astarsız numune alıcısı için $C_s = 1,2$ dir.)

N = Ölçülen ham SPT-N değeri

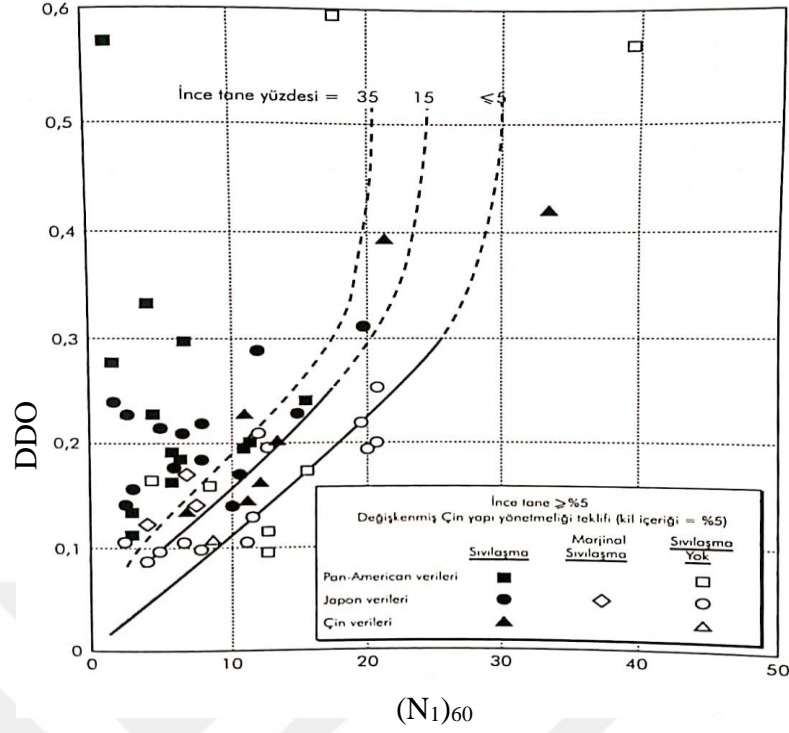
Sıvılaşma analizleri gibi birçok deprem mühendisliği değerlendirilmesinde standart Penetrasyon deneyi N_{60} değeri düşey efektif gerilme düzeltmesi olan C_N değeri ile çarpılarak düzeltilir.

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} = \left(\frac{100}{\sigma'_v}\right)^{0,5} N_{60} \quad (1.6)$$

$(N_1)_{60}$ =Arazi deney prosedürleri ve örtü basıncının ikisi için de düzeltilmiş standart Penetrasyon deneyi N değeri

C_N = Örtü basıncını dikkate alan düzeltme faktörü

N_{60} = Arazi prosedürlerine göre düzeltilmiş SPT-N değeri



Şekil 1.4. M=7.5 için devirsel direnç oranı ve arasındaki ilişki [46]

Elde edilen (N₁)₆₀ değerinden tablo yardımı ile DDO elde edilir.

1.5.1.2. Koni Penetrasyon Deneyi

Bu deney statik bir sonda deneyidir. Hollanda koni veya koni Penetrasyon deneyi olarak da adlandırılan deneyde tepe açısı 60° olan bir metal konik ucun zemine itilerek batırılması ile gerçekleşir. Deney sırasında konik uç 1-2 cm/s hızla zemine itilirken kaydedilen veriler; konik girme uç direnci q_c , koni çevre dayanımı q_s ve derinliktir. Deney taşlı, iri çakıllı, zeminler için uygun değildir. Daha çok kumlar için uygundur. Deney sırasında zeminden örnek alınamaması dezavantajıdır.

$$q_{c1} = C_N q_c \quad (1.7)$$

q_{c1} = Düzeltilmiş CPT uç direnci

C_N = Örtü basıncını dikkate almak için düzeltme faktörü

q_c = Koni girme uç direnci

1.5.1.3. Kayma Dalga Hızı Deneyi

Kayma dalga hızı; kuyu yukarı, kuyu aşağı veya kuyudan kuyuya yöntemleri gibi birkaç farklı jeofizik teknik kullanılarak ölçülebilir. Arazideki kayma dalgası hızını belirlemek amacıyla kullanılabilen diğer yöntemler sismik penetrometresi ve süspansiyon logmasıdır. Bu deneylerdeki amaç enerji kaynağından gönderilen S ve P dalgalarının alıcıya olan ulaşma süresinin tespitidir.

$$V_{s1} = V_s C_v = V_s \left(\frac{100}{\sigma'_v} \right)^{0,25} \quad (1.8)$$

V_{s1} =Düzeltilmiş kama dalgası hızı

C_v =Örtü basıncını dikkate almada kullanılan düzeltme faktörü

σ'_v = Efektif düşey gerilme

V_s =Arazide ölçülen kayma dalgası hızı

SPT, CPT ve kayma dalgası hızı aracılığıyla bulunan değerler ilgili abaklarda yerine konularak DDO tespit edilir. Daha sonra DGO bulmak için eşitlik 2.9 kullanılır.

$$DGO = 0,65 r_d \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \left(\frac{a_{mak}}{g} \right) \quad (1.9)$$

DGO = Devirsel Gerilme Oranı

a_{mak} = Genellikle pik yer ivmesi olarak da söz edilen ve depremin neden olduğu zemin yüzeyindeki maksimum yatay ivme(m/sn²)

g = Yerçekimi ivmesi (9,81 m/sn²)

σ_v = Sıvılaşma analizinin yapıldığı belirli bir derinlikteki toplam düşey gerilme(kpa)

σ'_v = Zemin çökeline σ_v 'in hesaplandığı aynı derinlikteki düşey efektif gerilme

r_d = Derinlik azaltma faktörü

$$EF = \frac{DDO}{DGO} \quad (1.10)$$

EF = Emniyet faktörü ($EF \leq 1$ ise sıvılaşma potansiyeli yüksek, $EF \geq 1$ ise sıvılaşma potansiyeli düşük)

DDO= Devirsel Direnç oranı

DGO= Devirsel Gerilme Oranı

Emniyet faktörü ne kadar yüksek ise zemin de sıvılaşmaya karşı o kadar dirençlidir. Bununla birlikte, emniyet faktörünün 1'in hafifçe üzerinde olduğu zeminler yine de bir deprem anında sıvılaşabilir olarak düşünülmektedir.

1.5.2. Sıvılaşma Analizi İçin Laboratuvar Deneyleri

Deprem anında yapılarda meydana gelecek hasarlarda zemin koşullarının önemli bir etkisi bulunmaktadır. Özellikle sıvılaşmada belirgin hacim değişimleri ve aşırı su basıncı gelişimi bilindiği için laboratuvar ortamında bu değişkenleri gözlemlemek arazi deneylerine kıyasla daha genel geçer sonuçlar elde etmemize yardımcı olacaktır. Özellikle suya doymun gevşek kumlu zeminlerde tekrarlı yükler altında sıvılaşma direnci dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme ve burulmalı dinamik kesme test aletleri ile incelenebilmektedir.

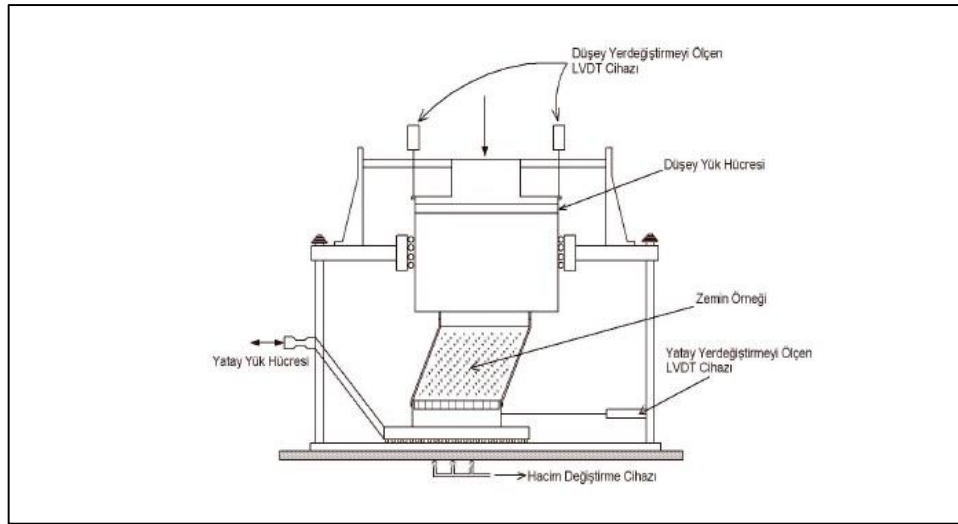
Dinamik Basit Kesme Testi

Dinamik basit kesme deneyinde gerilmeler numunenin taban ve başlık kısmında biriktiği için aşırı su basıncı dağılımında düzensizliğe yol açmaktadır. Bu yüzden De

Alba, Seed ve Chan (1976), tek yönde ardışık gerilme uygulayarak zemin numunesinde basit kesme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Numune, kablo-donatılı membran ile ya da teflon vb. halkalar yardımı ile yanal genişlemeye karşı engellenir.

Dinamik basit kesme testi Mollamahmutoğlu ve Babuçcu tarafından şöyle açıklanmaktadır [29].

“Dinamik basit kesme testi, arazide oluşan deprem yüklerine çok benzer sonuçlar vermektedir. Deney, suya doygun kum numunesine, düşey yönde efektif gerilmenin uygulanması, daha sonra da devirsel kayma gerilmesinin zemin numunesine uygulanması şeklinde yapılmaktadır. Devirsel yükleme süresi boyunca, boşluk suyu basıncındaki artış ve aksenal deformasyon, yatay yönde uygulanan devirsel kayma gerilmesinin devri ile ölçülmektedir. Sıvılaşmaya neden olan gerilme devir sayısı, uygulanan kayma gerilmesi ve başlangıç efektif gerilme değerinin büyüklüklerine bağlıdır.” [29]



Şekil 1.5. Dinamik basit kesme test aleti [47]

1.6. Sıvılaşmayı Belirleme Yöntemleri

Herhangi bir deneysel araştırmanın ve modellemenin nihai amacı, belirli tasarım koşullarında ne olacağını tahmin etmenin bir yolunu bulmaktır. Aşağıda, bir toprak yatağının sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için mevcut yöntemler kısaca anlatılmıştır.

1.6.1. Gerilmeye Dayalı Yöntem

Seed ve Idriss [48], kesme gerilmesi seviyesi ve ölçüt olarak döngü sayısını kullanan ilk yöntemlerden birini önermişlerdir. Bu yöntem en yaygın kullanılan yöntem olmuştur. Önerilen prosedür aşağıdaki gibidir.

1) Şiddet ve süre anlamında düzensiz gerilme tasarım geçmişini temsil eden devirsel kesme gerilmesi ve bu kesme gerilmesine karşılık gelen döngü sayısının belirlenmesi. Kesme gerilmesi seviyesi zemin yüzeyinde ve derinlikteki yatay tepe ivmenin bir fonksiyonu olan maksimum kesme gerilmesinin %65'i olarak tanımlanmaktadır. Eşdeğer döngü sayısı, depremin büyüklüğü ile ilgilidir ve bu DGO(devirsel gerilme oranı) olarak tanımlanmaktadır.

2) Zeminin DDO(devirsel direnç oranı), laboratuvar testlerinde numunenin farklı sınırlayıcı basınçlar ve farklı kesme amplitütleri altında ilk döngüden son döngü sayısına kadar her döngü için kesme gerilmesinin belirlenmesi ile elde edilir.

3) DGO'nun DDO'nun dan büyük olması durumunda o bölgede sıvılaşma potansiyelinden söz edilmektedir.

Bu yöntem hakkında daha fazla ayrıntılı bilgi ve eleştiri Valera and Donovan [49], Dobry vd. [50], Koester ve Franklin [51] ve Ishihara [52] tarafından yapılmıştır.

1.6.2. Birim Deformasyon Değişimine Dayalı Yöntem

Dobry vd. [50], kayma gerilme seviyesi yerine kayma gerilmesi birim deformasyon seviyesi metodunu önermişlerdir. Önerilen prosedür aşağıdaki gibidir.

1) Düzensiz gerilme şiddeti ve süresine sahip deprem kaydını temsil eden üniform kayma gerilmesinin eşdeğer çevrim sayısı ve çevrim kayma birim deformasyonunun belirlenmesi. Kayma birim deformasyonunu hesaplama denklemi gerilmeye dayalı metot da kayma deformasyonunu hesaplamada kullanılan yöntemle benzerdir. Ancak gerilmeye dayalı yöntem zemin sıklılığını dikkate almaktadır. Eşdeğer çevrim sayısı gerilmeye dayalı yöntemdeki aynı yolla belirlenir.

2) Çoğu zemin için yaklaşık %0,02 olan eşik kayma birim deformasyonu ile son adımdaki hesaplanan kayma birim deformasyonunu karşılaştırmaktadır. İlk hesaplanan son hesaplanandan daha az ise sıvılaşma olmaz; aksi takdirde bir sonraki adıma geçin.

3) 1. Adımdan elde edilen kayma birim deformasyonu amplitüdü ve çevrim sayısı altında boşluk suyu basını belirlemek için deneysel eğriyi kullanın.

4) Eğer boşluk suyu basıncı toplam gerilmeye eşit ya da daha fazla ise sıvılaşma meydana gelmektedir.

1.6.3. Enerjiye Dayalı Yöntem

Enerji kavramı esneklik ve plastisite teorilerinde, avantajlı taraflarının açıklanmasında, temel kural ve enerji ilkeleri için potansiyel enerji yüzeyi açıklamada yaygın olarak kullanılmıştır [53-57]. Bu yöntemde mekanik davranış iş ve enerji arasında bir dönüşüm gerçekleştirdiği için önceki iki yöntemle göre daha uygundur. Depremler, Gutenberg ve Richter [58-59] tarafından deprem büyüklüğü ile ilgili olan enerji salınımının bir süreci olarak kabul edilir. Bu yüzden enerji salınımının miktarı, bir depremin şiddetini pratik anlam ve ölçü ile tanımlamada önemli bir parametredir. Depremin odak noktasından yüzeye yakın zemine ya da yer yüzeyinden yapıya salınan

enerjinin miktarı bir yük ölçüsü olarak kullanılabilir. Yüzeye yakın zemin ya da yapı boyunca non lineer deformasyon ya da sönümlenme yoluyla harcanan enerjinin bir kısmı yapıdaki hasarın büyük bir kısmını oluşturur ve bunlar arasında bir ilişki bulunabilir ve pratik tasarımda kullanılabilir [60-65]. Kohezyonsuz zeminlerin devirsel davranışının incelenmesinde ilk kez enerji konsepti girişimi Nemat-Nasser ve Shokoo [16] tarafından yapılmıştır. Enerji dayalı yöntemin temel fikri aşağıda özetlenmiştir.

Deney sonuçlarına dayanarak kum tanelerinin yeniden düzenlenmesi için gerekli olan birim hacim başına düşen enerjinin, efektif gerilme, boşluk oranı, boşluk oranındaki artış ve gözenek su basıncının bir fonksiyonu olduğu kabul edilebilir [20].

$$W = v \frac{e \Delta e}{f(1+u)g(1+e)} \quad (1.11)$$

W= Enerji

v = Efektif çevre gerilmesi ve malzeme sabitlerinin bir fonksiyonu

e= Boşluk oranı

u= Boşluk suyu basıncı

Harcanan enerji, histerezis döngü alanı ve çevrim sayısı ile ilgilidir. Yayılan enerji histerezis döngüsünün alanı ve şeklini dikkate alarak kayma gerilmesinin amplitüdü ve çevrim sayısının fonksiyonu olarak açıklanabilir.

Enerjideki değişim drenajlı testlerde kayma birim deformasyonu ve çevrim sayısının fonksiyonu olarak veya drenajsız testler için başlangıç boşluk oranı ve çevrim sayısı kayma gerilmesinin bir fonksiyonu olarak boşluk suyu basıncı ifadesi ile oluşturulabilir [20].

Liang [20], yapmış olduğu araştırmada, histerezis döngüsü içinde kalan alanın drenajlı testlerde hacim değişimi ve drenajsız testlerde boşluk suyu basıncının artmasına neden olan kum tanelerinin yeniden yerleşimi için gerekli olan enerjiye eşit olduğu varsayımının makul olduğunu göstermiştir.

Davis ve Berrill [66], boşluk suyu basıncı artışı ile harcanan enerji arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve depremden salınan enerji ile bağlantılı olduğunu, SPT'nin bilinmeyen bir fonksiyonu, efektif gerilme, deprem merkezine olan uzaklığı ve deprem büyüklüğü ile de ilişkisi olduğunu varsaymışlardır.

$$\Delta u = \frac{C(N_1)}{R^2 \sqrt{\sigma'_c}} 10^{1.5M} \quad (1.12)$$

Δu = Boşluk suyu basıncındaki artış

N_1 = SPT'nin sayım numarası

$C(N_1)$ = N_1 ' in bilinmeyen fonksiyonu

M = Richter deprem büyüklüğü

R = Depremin merkezine olan uzaklığı

σ'_c = Efektif çevre gerilme

$C(N_1)$ ' in bilinmeyen fonksiyonu depremden gelen enerjinin ne kadarının kum katmanına yayılacağını belirler. $\Delta u = \sigma'_c$ eşit olduğunda $C(N_1)$ değeri sıvılaşmanın olup olmadığını belirlemektedir. Sıvılaşma olması için kriter ve alan çalışmaları ile $C(N_1)$ ' i bulmuşlardır [20].

$$C(N_1) \geq r^2 \sigma'_c \frac{3}{2} 10^{-1.5M} \quad (1.13)$$

$$C(\bar{N}) = 450 \bar{N}^{-2} \quad (1.14)$$

$$\bar{N} = \left(0.77 \log_{10} \frac{2,000}{\sigma'_c} \right) N_1 \quad (1.15)$$

\bar{N} = N_1 'nin düzeltilmiş halidir.

Simcock vd. [15], Law vd. [8], Figueroa ve Dahisaria [27], Dahisaria [67] yapmış oldukları testlerde Davis and Berrill'in [66] çalışmasında kullanılan birim hacim başına harcanan enerji ile aşırı boşluk suyu basıncı arasında doğrusal bir fonksiyonu

olduğu varsayımını desteklememişlerdir. Berrill ve Davis [17] eşitlik (2.16)'yı doğrusal olmayan bir ilişki ile değiştirmişleridir.

$$\frac{\Delta u}{\sigma_c} = \alpha \left(\frac{\Delta W}{\sigma_c} \right)^\beta \quad (1.16)$$

$\alpha, \beta =$ pozitif sabitlerdir.

$\Delta W =$ Harcanan enerji

Simcock vd. [15], Figueroa [68], Law vd. [8] Figueroa ve Dahisaria [27], Dahisaria [67], Figueroa vd. [19] ve Okada ve Nemat-Nasser [69] tarafından boşluk suyu basıncındaki artış ile harcanan enerji arasında eşsiz bir ilişki olduğunu doğrulamak için kapsamlı deneysel çalışmalar yapmışlardır.

Simcock vd. [15] bir dizi üç eksenli test yapmış ve boşluk suyu basıncı gelişimi ile harcanan enerji işlevsel olarak ilişkili olduğunu bulmuştur ancak bu ilişki güçlü bir şekilde devirsel deviator gerilmeye bağlıdır.

Law vd. [8] deneysel sonuçları verirken uygun olarak enerji konsepti ile türetilen M, R ve Δu arasında takip eden bağıntıda $F_1(K_c)$ ve $F_2(D_r)$ 'nin fonksiyonunu bulmuşlardır.

$$\frac{\Delta u}{\sigma_c} = \alpha \left(\frac{F_1(K_c) F_2(D_r) \lambda(\sigma_c, K_c, D_r) \theta \times 10^{1.5M+4.8}}{\sigma_c R^B} \right)^\beta \quad (1.17)$$

Burada;

$\alpha, \beta, \theta, B =$ malzeme sabitleri

$\lambda(\sigma_c, K_c, D_r) =$ Söz konusu alana ulaşan enerjinin ne kadarının zemine verileceğini belirleyen zemin durumu karakteristik fonksiyonu

$\lambda(\sigma_c, K_c, D_r)$ bilinmediğinden (2.21)'deki eşitlik kullanılamamıştır. Zemin durumunun etkisi (σ_c, K_c, D_r) , $\eta(\bar{N})$ olarak (\bar{N}) ile ilgili bir fonksiyonda birleştirmiştir.

$$\frac{\Delta u}{\sigma_c} = \left(\frac{10^{1.5M}}{\eta(\bar{N})R^B} \right)^\beta \quad (1.18)$$

$\Delta u/\sigma_c \geq 1$ olduğunda sıvılaşma kriteri sağlanmaktadır.

$$\frac{10^{1.5M}}{\eta(\bar{N})R^B} \geq 1 \quad (1.19)$$

Benzer çalışma Davis ve Berrill tarafından yapılmıştır. $\eta(\bar{N})$, takip edilen analizlerden Law vd. [8] tarafından türetilmiştir. $\eta(\bar{N})$ 'nin kritik değerinde $\eta_L(\bar{N})$ Sıvılaşan ve sıvılaşmayan alanları ayıran çizgi $\frac{10^{1.5M}}{R^B}$ formülü ile \bar{N} koordinat sisteminde çizmiştir.

$$\eta_L(\bar{N}) = 2.28\bar{N}^{11.5} \times 10^{-10} \quad (1.20)$$

$F_1(K_c)$ ve $F_2(D_r)$ bir zemin tabakasının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılmamıştır.

Figuroa [68] 1990 yılında sıvılaşma için gereken enerji ile sıvılaşmayı etkileyen parametreler arasında bir ilişki kurulması gerektiğini fark etmiştir. Figuroa ve Dahisaria [27], Dahisaria [67] ve Figuroa vd. [19] tarafından farklı kayma birim deformasyonu amplitüdü, rölatif sıklık ve efektif gerilme parametrelerini dikkate alınarak kum numunelerinde birim deformasyon kontrollü üç eksenli içi boş silindirik burulma kesme testleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel verilerin regresyon analizi, sıvılaşma için gereken enerji ile kayma birim deformasyonu amplitüdü, rölatif sıklık ve efektif gerilme arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Okada ve Nemat-Nasser [69] boşluk suyu basıncı ve uygulanan birim hacim başına enerji arasında bir ilişki bulmak için yaptıkları çalışmada birim hacim başına enerjinin kuvvetle boşluk suyu basıncı gelişimine bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Tekrarlı yükleme koşulları esnasında kum parçacıklarının yeniden düzenlenmesi ve yerleşmesi ile ilgili olan enerji, sıvılaşmaya yol açan belli koşullar altında sabit bir miktar olarak varsayılmaktadır [19]. Tipik bir tekrarlı yük testi, gerilme, birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı verilerini sağlamaktadır. Kayma gerilmesi-birim

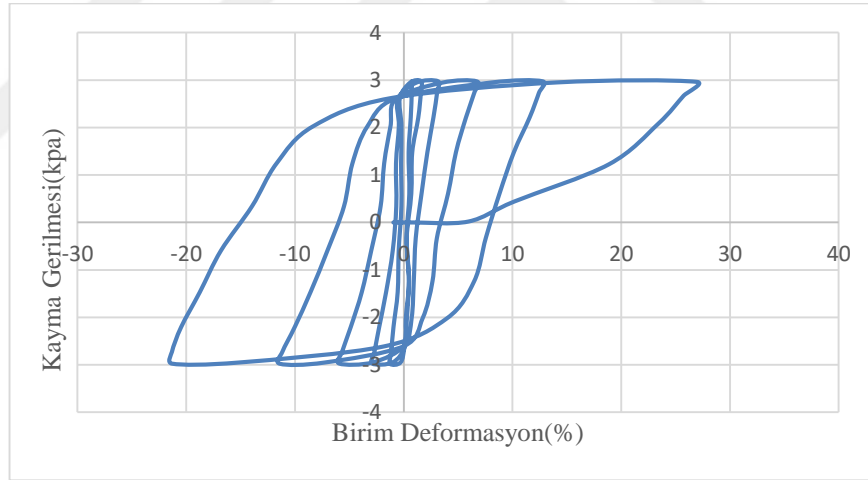
deformasyon histerezis döngüsü zamanın bir fonksiyonu olarak Şekil 1.6'da gösterildiği gibi elde edilmektedir. Her bir yükleme döngüsündeki birim deformasyon enerjisi şekil 1.6'deki histerezis çevrimi içinde kalan alana eşdeğer olmaktadır [70-72]. Her döngüdeki enerji ve bu enerjilerin sıvılaşma başlangıcına kadarki toplamı, zemin örneğinin sıvılaşmaya karşı kapasitesinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır [73]. Literatürde tipik histerezis döngüsü içinde kalan alan hesaplanırken eşitlik 1.21'deki denklem sıklıkla kullanılmaktadır.

$$\delta W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\tau_n + \tau_{n+1})(\gamma_{n+1} - \gamma_n) \quad (1.21)$$

τ = Kayma gerilmesi

γ = Kayma birim deformasyonu

n = Sıvılaşmaya kadar kaydedilen döngü sayısı



Şekil 1.6. Tipik Histerezis ilmiği

Enerji yönteminin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Gerilme tabanlı veya birim deformasyon tabanlı metotların aksine enerji tabanlı metot da histerezis alanı için kayma gerilmesi ve kayma birim

deformasyonu kullanıldığından gerilme ve birim deformasyonun etkilerini birleştirir.

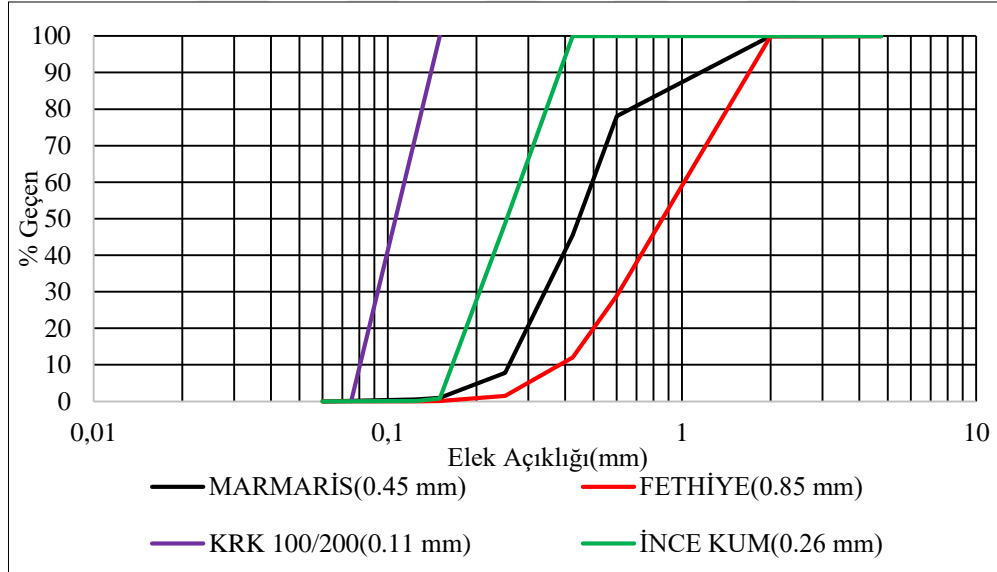
- Harcanan enerji, kayma birim deformasyonu amplitüdünden büyük ölçüde etkilenmediğinden hem kayma birim deformasyonu amplitüdü hem de çevrim sayısı dikkate alınarak belirlenen sıvılaşma enerjisi geleneksel metotlarda kullanılır. Diğer iki metodun aksine enerji tabanlı metotta sıvılaşma için harcanan enerjinin miktarı yükleme şeklinden bağımsız olduğu için rastgele yükleme ile testleri gerçekleştirmek mümkündür.
- Enerji metodu sıvılaşma yenilmesine yol açan yer hareketlerinin tüm spektrumu için açıklanabilir.
- Aşırı boşluk suyu basıncı ve kum üzerinde yükleme boyunca harcanan enerji arasında önemli derecede bir ilişki bulunmaktadır ve bu ilişkinin matematiksel bir şekilde ifade edilebilmesi mümkündür.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzemeler

Çalışma kapsamında ortalama tane çapı farklı 4 adet numune kullanılmıştır. Her bir zemin numunenin özgül ağırlığı ASTM D854 [74], minimum boşluk oranı ASTM D4253 [75] ve maksimum boşluk oranı ise ASTM D4254 [76]'e göre belirlenmiştir.

Şekil 2.1'de numunelere ait gradasyon eğrileri verilmiştir. Laboratuvar testleri ve saha çalışmaları sıvılaşmış zeminlerde ortalama tane çapı aralığının 0.01-2 mm olduğunu göstermektedir [77]. Bu sebeple bu çalışmada 0.11, 0.26, 0.45 ve 0.85 mm ortalama tane çapına ait numuneler seçilmiştir.



Şekil 2.1. Numunelerin gradasyon eğrileri

Fethiye (0.85 mm), Marmaris (0.45 mm), İnce (0.26 mm) ve KRK 100/200 (0.11 mm) kumları için sırasıyla fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kullanılan kumların fiziksel özellikleri

Özellik	Fethiye	Marmaris	İnce Kum	100/200 KRK
Ortalama Dane Çapı, D_{50} (mm)	0,85	0,45	0,26	0,11
Özgül ağırlık(g/cm^3)	2,65	2,67	2,65	2,68
Maksimum boşluk oranı, e_{max}	0,667	0,792	0,782	1,03
Minimum boşluk oranı, e_{min}	0,43	0,54	0,516	0,763
Uniformluluk katsayısı, C_u	2,58	1,89	1,64	1,48
Eğrilik katsayısı, C_c	1,57	2,61	4,17	1,27

2.2. Metot

Zemin sıvılaşmasının laboratuvar şartlarında değerlendirilmesinde deneyler gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir. Birçok araştırmacı, gevşek ve orta sıkı kumların sıvılaşma potansiyelini incelemek için gerilme kontrollü [78] ve deformasyon kontrollü testler [79, 50] gerçekleştirmiştir. Gerilme kontrollü testlerde belirlenen devirsel kayma gerilmesi numuneye uygulanmakta ve bu esnada deformasyon miktarı kontrol edilmektedir. Deformasyon kontrollü testlerde ise seçilen bir deformasyon genliğinde zemin numunesine devirsel kayma gerilmesi uygulanmakta ve aşırı boşluk suyu basıncı ölçülmektedir. Deformasyon kontrollü dinamik basit yükleme, doğrudan boşluksuyu basıncını ve sonuç olarak da sıvılaşmayı kayma deformasyonunun genliği ile ilişkilendirmektedir [80] ve bu test sahadaki deprem yüklemesini daha iyi simüle edebilmektedir [81].

2.3. Piknometre Deneyi

Deney numunesinin birim hacim ağırlığını ASTM D854 “Standart Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer” standardına göre elde edilmiştir [74]. Aşağıda deney prosedürleri anlatılmıştır.

Deneyde Kullanılan Malzemeler

Hassas Terazî

Piknometre

Saf Su İçeren Yıkama Pipeti

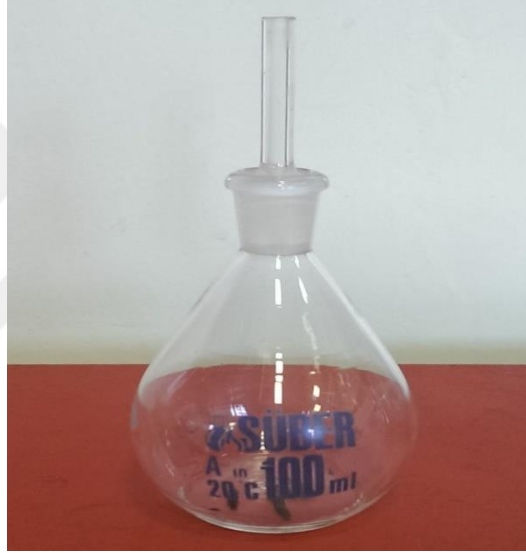
Vakum Aleti

Huni

Kuru Numune

Etüv

13 cm uzunluğunda ve 3 mm çapında bir adet cam ubuk



Şekil 2.2. Deney sırasında kullanılan piknometre

Deneyin Yapılışı

1-) Öncelikle içi temiz kurulanmış piknometre hassas terazide tartılır. Tartılan ağırlık W_1 ile sembolize edilmiştir.

2-) Sonra içerisine üstünden su çıkacak kadar havası alınmış su eklenerek tekrar tartılır. Bu değer W_2 ile sembolize edilmiştir.

3-) Daha sonra piknometredeki saf su bir miktar boşaltılır. Ve içerisine 50 gr numune eklenip tekrar üst delikten su çıkacak kadar ekleme yapıp tartılır. Bu değer W_3 ile sembolize edilmiştir.

$$W_4 = W_2 - W_1 \quad (2.1)$$

$$W_5 = W_3 - W_1 - 50 \text{ gr} \quad (2.2)$$

$$W_6 = W_4 - W_5 \quad (2.3)$$

W_6 burada 50 gr eklenen numunenin hacmini sembolize etmektedir.

$$G_s = \frac{50}{W_6} \quad (2.4)$$

G_s = özgül ağırlık (g/cm^3)

Deneyde dikkat edilmesi gereken bir hususta, terazi ölçümleri öncesi piknometrede hava kabarcığının olmamasına dikkat edilmelidir. Bunun için çalkalama, cam çubuk ile numune karıştırma ve etüvde kurutma işlemleri yapılarak hava kabarcığını ortadan kaldırmaktır.

2.4. Maksimum Kuru Yoğunluk Belirleme Deneyi

Numunelerin maksimum kuru yoğunluğu ASTM D 4253 “Standart Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table” standardına göre düşey yönde titreşim uygulayan bir sarsma tablası kullanılarak elde edilmiştir [75].

ASTM D 4253 standardına göre deney ıslak veya kuru bir şekilde yapılabilir. Bu çalışmada deney numunesi kuru olarak seçilmiştir.

ASTM D 4253 standardına göre mold ölçüleri; 152,4 mm çapında, 1552,2 mm yüksekliğinde ve $2830 \pm 42,45 \text{ cm}^3$ hacminde olmalıdır. Mold içindeki numuneye uygulanacak sürşarj yükü de 151 mm çapında, 150 mm yüksekliğinde ve $25,6 \pm 0,2 \text{ kg}$ ağırlığında olmalıdır. Deneysel hataların mümkün olduğunca önüne geçmek için birden fazla deney yapılmalıdır.

ASTM D 4253 standardına göre titreşim tablası; aşırı titreşimlerin diğer test alanlarına iletilmediği bir beton zemine veya yeterli büyüklükteki bir yapıya monte edilmelidir. Tabla molda 8 dakika boyunca $0,33 \pm 0,05 \text{ mm}$ genlikte ve frekansı 60 Hz olan sinüzoidal titreşim uygulamaktadır.

Etüvde tamamen kurutulan her bir numune mold içine gevşek olacak şekilde yerleştirilir. Sonra sürşarj yükü mold üzerine vidalanır. Daha sonra sarsma tablası sekiz dakika boyunca çalıştırılır. Sekiz dakika çalıştırdıktan sonra mold çıkarılıp tartılır. Moldun darası toplam kütlede çıkarılarak numune kütlesi tespit edilir. Daha sonra numune kütlesi mold hacmine bölünerek maksimum kuru birim hacim ağırlığı bulunur.

$$M_s = M_1 - M_m \quad (2.5)$$

M_s = Mold içindeki numune kütlesi, g

M_1 = Mold ve numune kütlesi, g

M_m = Mold kütlesi, g

$$\rho_{\text{kuru(max)}} = \frac{M_s}{(\pi \times D^2) / 4} \quad (2.6)$$

$\rho_{\text{kuru(max)}}$ = Numunenin maksimum kuru yoğunluğu

M_s = Mold içerisindeki numune kütlesi, g

D = Mold çapı, cm

$$e_{\text{min}} = \frac{G_s}{\rho_{\text{kuru(max)}}} - 1 \quad (2.7)$$

e_{\min} = Numunenin minimum boşluk oranı, birimsiz

$\rho_{\text{kuru(max)}}$ = Numunenin maksimum kuru yoğunluğu, g/cm³

G_s = Numunenin özgül ağırlığı, g/cm³

2.5. Minimum Kuru Yoğunluk Belirleme Deneyi

Minimum kuru yoğunluk belirleme deneyi, ASTM D 4254 “Standart Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density” standardına göre yapılmıştır [76]. ASTM D 4254 standardına göre minimum kuru yoğunluk üç farklı yöntemle belirlenmektedir.

Yöntem A

Numune huni yardımı ile veya el kepçesi kullanılarak mold içerisine en gevşek haliyle aktarılır.

Yöntem B

Mold içerisine çapı molddan daha küçük bir silindir tüp konulur. Numune tüp içerisine doldurulur. Daha sonra silindir tüp hızlı bir şekilde yukarı doğru çekilir. Ve numune en gevşek haliyle aktarılmış olur.

Yöntem C

Bu yöntemde ise yine mold içerisine yerleştirilen silindir tüp mold ile birlikte ters düz edilerek numune en gevşek halde yerleştirilir.

Her bir yöntem denenerek en fazla boşluk oranının C yönteminden elde edildiği gözlenmiştir.

Deneyde maksimum kuru yoğunluk deneyine ait mold kullanılmıştır.

$$M_s = M_1 - M_m \quad (2.8)$$

M_s = Mold içindeki numune kütlesi, g

M_1 = Mold ve numune kütlesi, g

M_m = Mold kütlesi, g

$$\rho_{\text{kuru(min)}} = \frac{M_s}{(\pi \times D^2)/4} \quad (2.9)$$

$\rho_{\text{kuru(min)}$ = Numunenin minimum kuru yoğunluğu

M_s = Mold içerisindeki numune kütlesi, g

D = Mold çapı, cm

$$e_{\text{max}} = \frac{G_s}{\rho_{\text{kuru(min)}}} - 1 \quad (2.10)$$

e_{max} = Numunenin maksimum boşluk oranı, birimsiz

$\rho_{\text{kuru(min)}$ = Numunenin minimum kuru yoğunluğu, g/cm³

G_s = Numunenin özgül ağırlığı, g/cm³

2.6. Cihaz Tanıtımı

Cihaz, Wille Geotechnik şirketi tarafından üretilmiştir. Cihaz 1, 2 ve 3 yönlü deplasman uygulayabilen dinamik basit kesme yapabilmektedir. 1 ve 2 yönlü yüklemeler cihazın sol ve sağ tarafında bulunan pistonlar vasıtasıyla yapılırken 3 yönlü yüklemelerde cihaz üzerinde dik pozisyonda duran piston vasıtasıyla yapılmaktadır ve bu piston 10 kN kuvvet uygulama kapasitesine sahiptir. Cihazda yüklemeler sinusoidal olabildiği gibi herhangi bir depremin deplasman kaydı girilerek random yüklemelerde yapılabilmektedir. Çalışmada kullanılan cihazın görünümü Şekil 3.3.' de verilmiştir. Devirsel yükleme sırasında, tipik deprem frekansından az olmasına rağmen bu tip deney aletleri için tavsiye edilen 0.1 Hz'lik frekansla uniform sinusoidal yatay yönde kayma gerilmesi uygulanmıştır [82]. Movahed vd. [83], yapmış oldukları çalışmada

değişen frekans aralığında yapmış oldukları birim deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü deneylerde frekansın sıvılaşma için harcanan enerji üzerinde kayda değer bir değişime neden olmadığını göstermişlerdir. Kusky [84], içi boş silindirik burulma kesme aleti ile Reid Bedford kumu üzerinde 0.2 ile 1.0 Hz arasında değişen frekans aralıklarında gerçekleştirdiği testlerde frekansın başlangıç sıvılaşma için harcanan enerji üzerinde önemsiz bir etkisi olduğunu göstermiştir. Polito [85], cyclic triaxial test cihazı ile Monterey No. 0/30 kumuz üzerinde 1.0 ve 0.5 Hz yükleme frekansı altında gerçekleştirdiği testlerde 10 ve 15 çevrim için ilk sıvılaşmayı başlatmak için gereken CSR'nin değişmediğini göstermiştir.



Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan dinamik basit kesme test cihazı

2.7. Numune Hazırlanması

Numune hazırlama yöntemi laboratuvar koşullarında zemin tanelerinin diziliminde ve sıvılaşma direncinde önemli bir etkiye sahiptir [86] Dinamik basit kesme testi için istenilen rölatif sıkılıktaki kum numuneleri, slurry deposition, moist tamping veya air pluviation metodlarıyla hazırlanabilmektedir [87]. Bu çalışmada, kum numunelerinin istenen rölatif sıkılık değerleri air pluviation yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, istenilen rölatif sıkılık için gerekli numune miktarı belli bir yükseklikten düşürülmektedir [88]. Bu işlem sonucunda numune yüksekliğinin her zaman aynı (46 mm) olmasına özen gösterilmiştir.

Öncelikle her bir numune için istenilen rölatif sıklığa karşılık gelen gram cinsinden miktarı belirlenir. Bunun için e_{\max} , e_{\min} numune özgül ağırlığı ve numunenin yerleştirildiği hücre hacmi kullanılmıştır. Numune miktarını hesaplamak için kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.11)$$

D_r = Rölatif sıklık (%)

e_{\max} = Maksimum boşluk oranı, birimsiz

e_{\min} = Minimum boşluk oranı, birimsiz

e = İstenilen rölatif sıklık için boşluk oranı, birimsiz

$$\rho_d = \frac{G_s}{1 + e} \quad (2.12)$$

ρ_d = Kuru yoğunluk, g/cm^3

G_s = Özgül ağırlık, g/cm^3

e = İstenilen rölatif sıklık için boşluk oranı, birimsiz

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.13)$$

ρ_d = Kuru yoğunluk, g/cm^3

M_s = Numune kütlesi, g

V_s = Numunenin yerleştirildiği hücre hacmi, cm^3

$$e_{\max} = \left(\frac{G_s}{\delta_{dr_{gevşek}}} \right) - 1 \quad (2.14)$$

e_{\max} = Maksimum boşluk oranı, birimsiz

G_s = Özgül ağırlık, g/cm^3

$\delta_{dr_{gevşek}}$ = Numunenin en gevşek haldeki yoğunluğu, g/cm^3

$$e_{\min} = \left(\frac{G_s}{\delta_{\text{dr}_{\text{sıkı}}}} \right) - 1 \quad (2.15)$$

e_{\min} = Minimum boşluk oranı, birimsiz

G_s = Özgül ağırlık, g/cm³

$\delta_{\text{dr}_{\text{sıkı}}}$ = Numunenin en gevşek haldeki yoğunluğu, g/cm³

$$M_s = \frac{G_s V_s}{1 + e} \quad (2.16)$$

M_s = Numune kütlesi, g

G_s = Özgül ağırlık, g/cm³

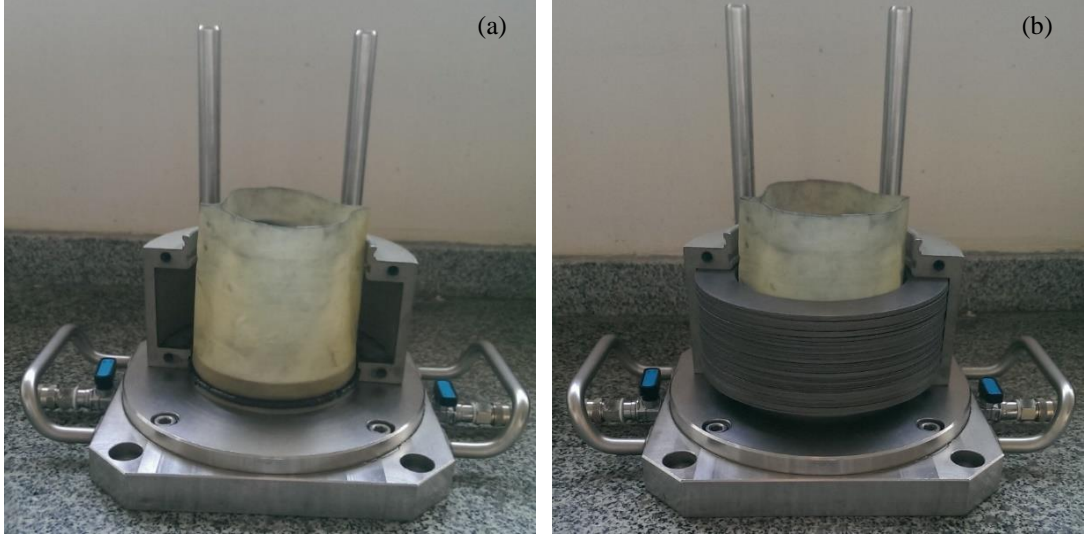
V_s = Numunenin yerleştirildiği hücre hacmi, cm³

e = İstenilen rölatif sıkılık için boşluk oranı, birimsiz

Numune hazırlanması detaylı bir şekilde ileride bu cihazda deney yapmak isteyen araştırmacılara kılavuzluk etmek amacıyla maddeler halinde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

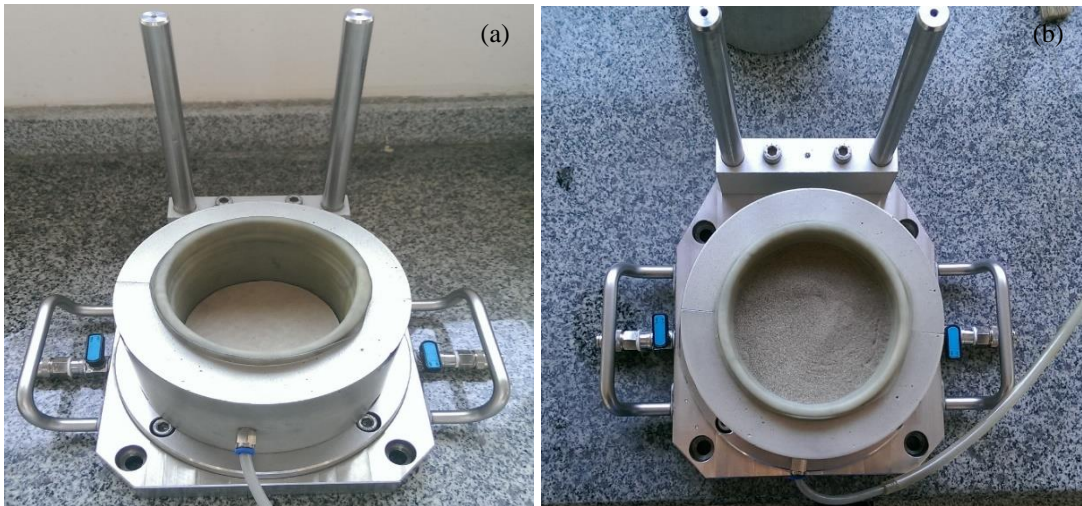
Deney için hazırlanan numuneler 100 mm çapta ve 46 mm yüksekliğe sahiptir. Numuneler, latex membran etrafına dizilmiş teflon kaplı ringlerle yanal olarak sınırlandırılmıştır.

100 mm çapındaki deney setine önce numunenin yerleştirileceği membran yerleştirilir. Sonra deney sırasından su çıkışını engellemek için alt oring takılır. Daha sonra hücrenin yarısı yerleştirildikten sonra teflon halkalar dikkatli bir şekilde membran arada kalmayacak şekilde yerleştirilir. Şekil 2.4 a'da membran, oring ve yarım hücrenin takılışı gösterilmektedir. Daha sonra Şekil 2.4 b'deki gibi teflon halkalar yerleştirilir. Hava emişi yapan motor, hücre vidalarla sıkıldıktan sonra membran ile teflon halkalar arasındaki havayı çekmesi için çalıştırılır. Bu sayede membran teflon halkalara yapışarak numunenin yerleştirileceği hacim oluşturulmuş olur. Sonra alt kâğıt filtre Şekil 2.5. a'daki gibi yerleştirilir.

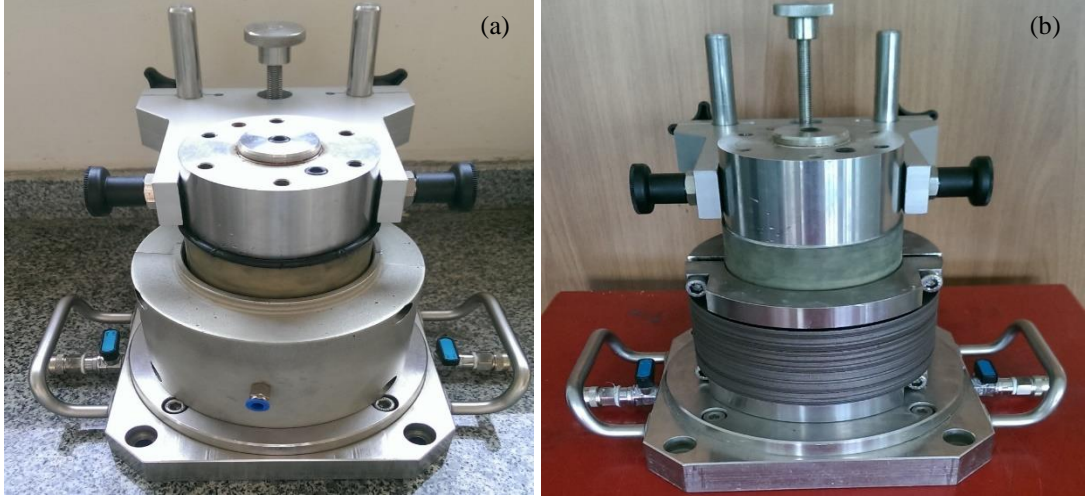


Şekil 2.4. Membran, oring ve yarım hücrenin ve teflon halkaların yerleştirilmesi

Daha sonra istenilen rölatif sıklık ve değişen numune tipine bağlı olarak farklı yüksekliklerden serbest bir şekilde kumun düşmesi sağlanır. Bu şekilde istenilen rölatif sıklık elde edilmeye çalışılır. İstenen rölatif sıklıkta yerleştirilen numune örneği Şekil 2.5 b’de gösterilmektedir. Numune yerleştirildikten sonra üst kâğıt filtre yerleştirilir. Daha sonra Şekil 2.6 a’daki gibi üst başlık dikkatli bir şekilde numune üst yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilir.



Şekil 2.5. a) Kağıt filtrenin yerleştirilmesi **b)** Numunenin yerleştirilmesi



Şekil 2.6. a) Başlığın yerleştirilmesi b) kelepçelerin bağlanması

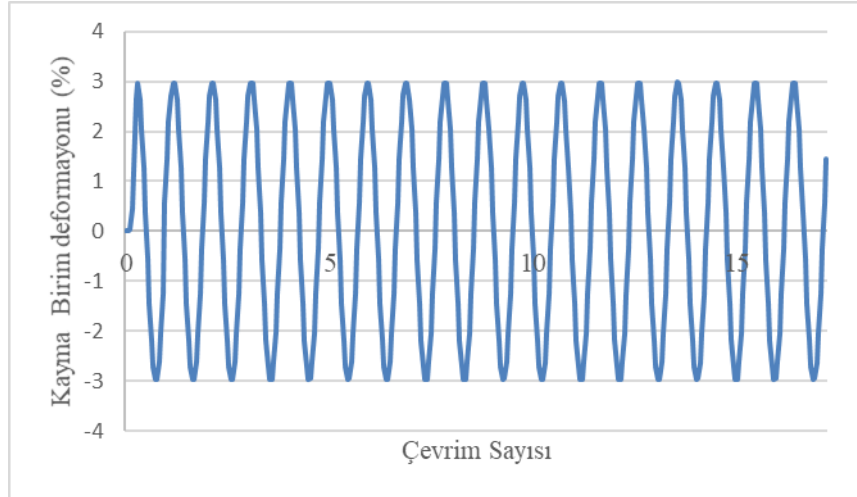
Hava emişi yapan motor kapatılıp hücreler söküldükten sonra aşırı boşluk suyu basıncı gelişiminde su çıkışını engellemek için önce alt kelepçe daha sonra üst kelepçeler yerleştirilir. Kelepçeler bağlandıktan sonraki numunenin son hali Şekil 2.6. b'de gösterilmektedir.

Son olarak hazırlanan numune cihaza yerleştirilir. Vidalar yardımı ile numune cihaza sabitlendikten sonra suya daha çabuk doyması için önce 20 dk boyunca CO_2 verilmiştir. CO_2 ile doyurma işleminden sonra, su havasızlaştırma cihazından düşük basınç altında havasızlaştırılmış su numuneye alttan üste doğru verilerek numunenin suya tam doymuş olması sağlanmıştır. Ve numune içerisinden en az numune hacminin 5 katı kadar havasızlaştırılmış su geçirilmiştir.

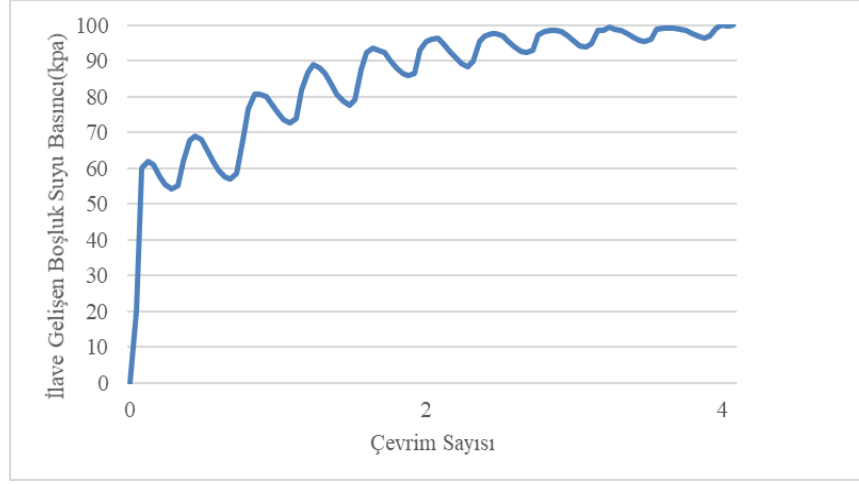
Alt ve üst su basınç ölçerler takıldıktan sonra her deney için belirlenen efektif gerilme değeri altında konsolide edilmiştir. Daha sonra boşluk suyu basıncı ve toplam gerilme birlikte artırılarak istenilen deney standardına ulaşılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

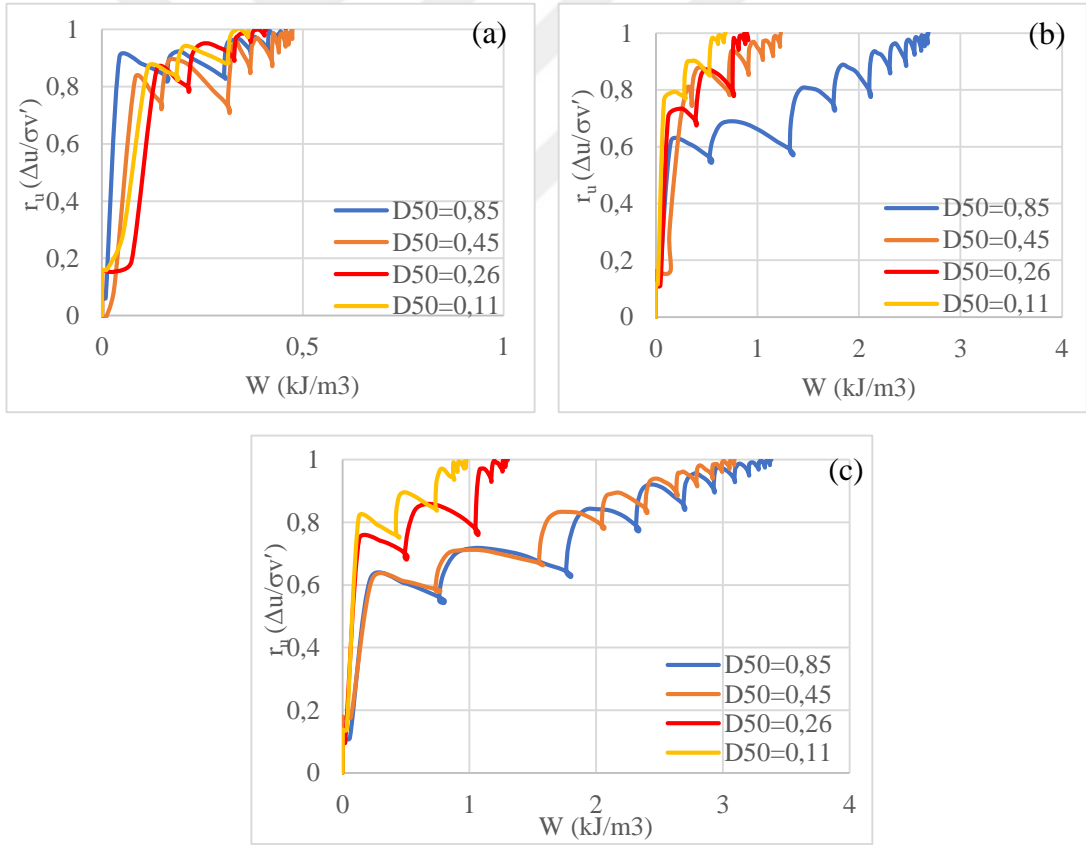
Bu çalışmada sıvılaşmayı doğrudan etkileyen rölatif sıkılık, efektif gerilme ve ortalama dane çapı dikkate alınarak deneyler drenajsız şatlarda deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada zeminin sıvılaştığı ilk an olarak aşırı boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye eşit olduğu durumda sıvılaştığı kabul edilmiştir [19]. Deneyler 4 farklı kum numunesi üzerinde 3 farklı efektif gerilme (50 kpa, 100 kpa, 150 kpa) ve 3 farklı rölatif sıkılık (%30, %50, %70) altında gerçekleştirilmiştir. Kayma birim deformasyonu genliğinin kümülatif sıvılaşma enerjisini etkilemediği yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [19, 20, 28]. Bu sebeple deneylerde %3'lük kayma birim deformasyonu ile gerçekleştirilmiş ve uygulanan çevrim sayısına göre değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Deformasyon kontrollü deneylerde kayma deformasyonunun genliği deney başlangıcından sonuna kadar sabit uygulanmaktadır. Uygulanan kayma birim deformasyonu nedeniyle numune içindeki aşırı boşluk suyu basıncı, düşey efektif gerilmeye eşit olana kadar sürekli artmıştır. Şekil 4.2'de aşırı boşluk suyu basıncının döngü sayısına göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.3'de ise aşırı boşluksuyu basıncı oranı ve kümülatif yayılan enerji arasındaki ilişki verilmiştir. Her döngüdeki enerji ve bu enerjilerin sıvılaşma başlangıcına kadarki toplamı, zemin örneğinin sıvılaşmaya karşı kapasitesinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır [73].



Şekil 3.1. Çevrim sayısına karşılık gelen kayma gerilmesi birim deformasyonu

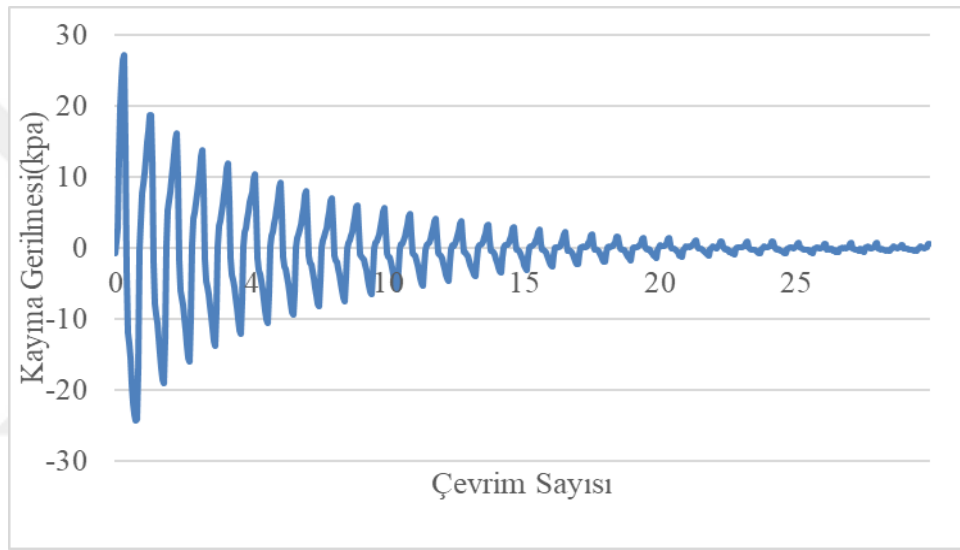


Şekil 3.2. 100 kpa efektif gerilmede %30 rölatif sıklıkta 0,26 mm tane çapındaki numunenin aşırı boşluksuyu basıncı ve çevrim sayısı ilişkisi



Şekil 3.3. %30 rölatif sıklık için boşluk suyu basınç oranı ile enerji değişimi a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa

Deneysel enerji hesabı için aşırı boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi sıfırladığı noktaya kadar ki olan histerezis ilmiği arasında kalan alanlar kümülatif bir şekilde toplamıştır. Bu alan hesabı için ise literatürde sıklıkla kullanılan denklem 1.21’de verilmiştir. Şekil 4.4’de kayma gerilmesinin döngü sayısına göre değişimi verilmiştir. Kontrollü olarak uygulanan kayma birim deformasyonu nedeniyle sıvılaşmaya yaklaştıkça zemin direncindeki azalma nedeniyle kayma gerilmesi azalmakta ve sonunda sabit değere ulaşmaktadır. Teorik olarak bir sıvıda olduğu gibi tam olarak sıfır olmamaktadır bunun test sisteminde var olan sürtünmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.4. Sıvılaşma boyunca döngü sayısına karşılık gelen kayma gerilmesi

Çalışmalar, sıvılaşmaya neden olan kümülatif enerjinin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için mükemmel bir endeks olduğunu göstermiştir [89]. Buna göre, bu parametreyi incelemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır [22, 20]. Çizelge 4.1’de çalışma kapsamında yapılan tüm testlerin sonuçları ortalama tane çapı, efektif gerilme ve rölatif sıklık değerlerine karşılık gelen kümülatif sıvılaşma enerji değerleri verilmiştir.

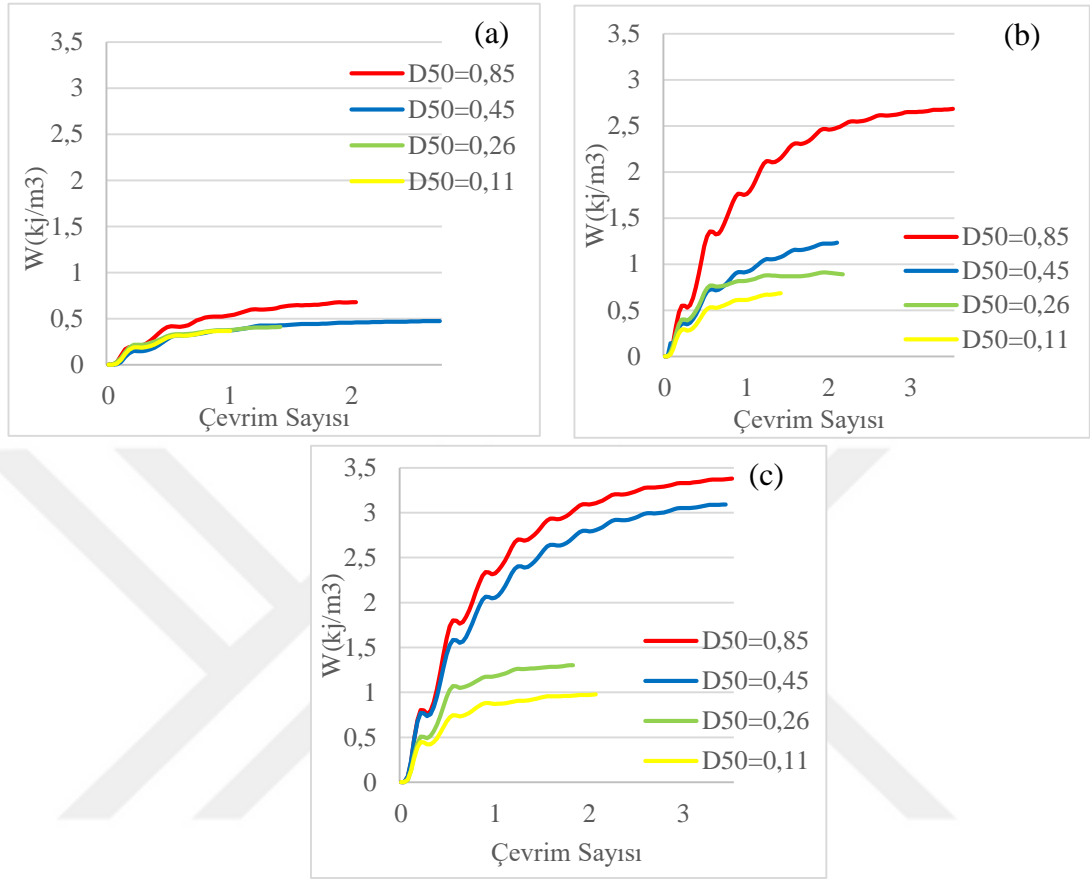
Çizelge 3.1. Test Sonuçları

Deney	D ₅₀	Efektif Gerilme	Hedef Dr(%)	Gerçekleşen Dr(%)	W(j/m ³)
1	0.85	50	30	31	695
2	0.85	100	30	29	2685
3	0.85	150	30	27	3381
4	0.85	50	50	50	3730
5	0.85	100	50	47	9034
6	0.85	150	50	55	15356
7	0.85	50	70	70	14481
8	0.85	100	70	67	21653
9	0.85	150	70	64	34769
10	0.45	50	30	36	474
11	0.45	100	30	28	1232
12	0.45	150	30	25	3092
13	0.45	50	50	55	1057
14	0.45	100	50	57	2024
15	0.45	150	50	49	3555
16	0.45	50	70	75	2565
17	0.45	100	70	73	2872
18	0.45	150	70	72	6503
19	0.26	50	30	30	409
20	0.26	100	30	31	890
21	0.26	150	30	28	1304
22	0.26	50	50	54	682
23	0.26	100	50	55	2058
24	0.26	150	50	62	3068
25	0.26	50	70	76	1437
26	0.26	100	70	71	3391
27	0.26	150	70	71	5220
28	0.11	50	30	32	364
29	0.11	100	30	34	686
30	0.11	150	30	35	978
31	0.11	50	50	56	577
32	0.11	100	50	47	1265
33	0.11	150	50	47	1311
34	0.11	50	70	71	710
35	0.11	100	70	67	2107
36	0.11	150	70	67	2655

3.1 Ortalama Tane Çapı (D₅₀) Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi

Daha önce yapılan çalışmalar ortalama tane çapı artışının sıvılaşma enerjisinin artmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır [13, 25, 22, 26]. Ortalama tane çapı ile e_{max} ve e_{min} arasında ters bir orantı vardır. Tane çapı küçüldükçe artan boşluk oranı sayesinde tanelerin göstermiş olduğu direnç azalmakta ve bu da kümülatif sıvılaşma enerjisini düşürmektedir. Bu çalışmada 0.85 mm, 0.45 mm, 0.26 mm ve 0.11 mm tane çaplarına ait grafikler sırasıyla %30 ve %50 rölatif sıklık değerleri için Şekil 3.5. a

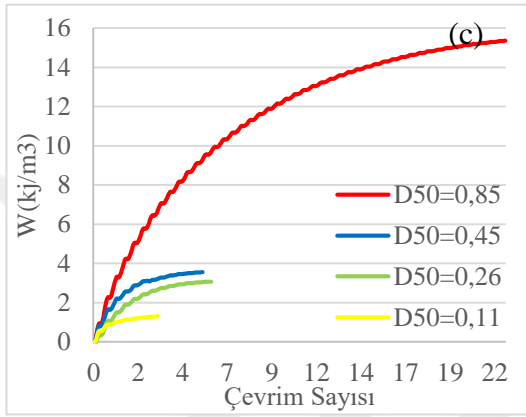
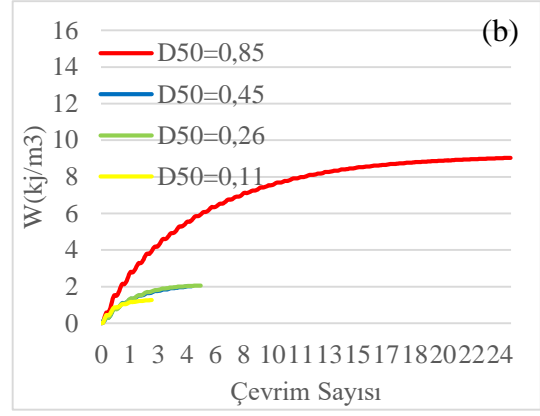
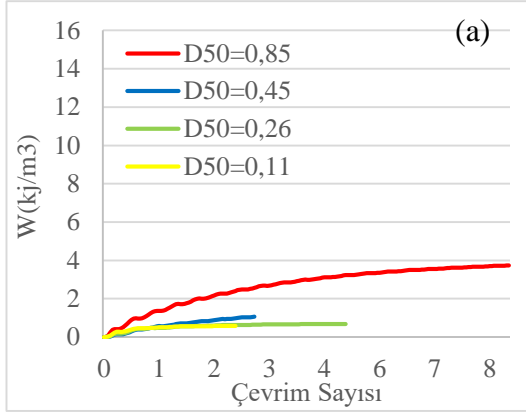
Şekil 3.5. b, Şekil 3.5. c ve Şekil 3.6. a, Şekil 3.6. b, Şekil 3.6. c’de çevrim sayısına bağlı kümülatif sıvılaşma enerji değişimleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Farklı tane çaplarına göre %30 rölatif sıklıkta kümülatif sıvılaşma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi **a)** 50 kpa **b)** 100 kPa **c)** 150 kPa

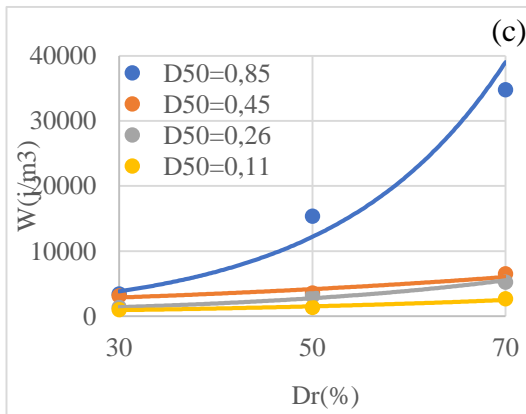
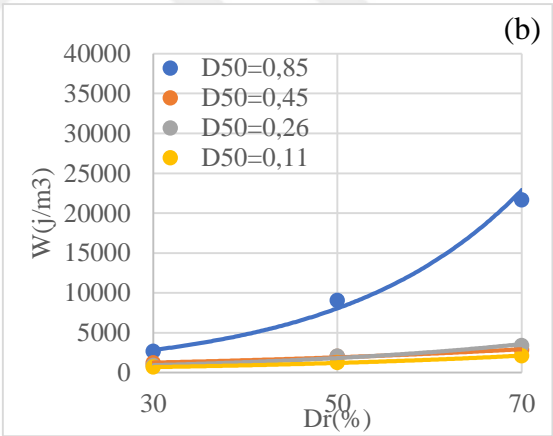
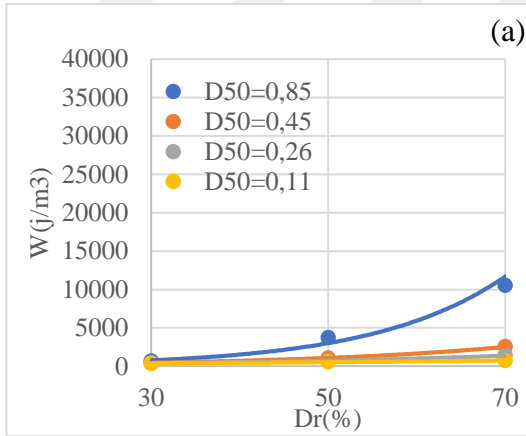
Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da tüm efektif gerilme değerlerinde tane çapının artışıyla birlikte kümülatif sıvılaşma enerjisi artmaktadır. Şekil 3.5 a’da %30 rölatif sıklık ve 50 kpa gerilme altında 0.11 mm çaplı numunenin kümülatif sıvılaşma enerjisi 364 j/m³, 0.26 mm çaplı numunenin kümülatif sıvılaşma enerjisi 409 j/m³, 0.45 mm çaplı numunenin kümülatif sıvılaşma enerjisi 474 j/m³ iken 0.85 mm çaplı numunenin kümülatif sıvılaşma enerjisi 695 j/m³ olmaktadır. Şekil 3.5 a’da %30 rölatif sıklık ve 50 kpa gerilme altındaki numunelerin kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 0.11 mm ve 0.26 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %12, 0.26 mm ve 0.45 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %15, 0.45 mm ve 0.85

mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %46 olmaktadır. Benzer şekilde Şekil 3.6 a'da % 50 rölatif sıklıkta ve 50 kpa efektif gerilme altında 0.11 mm tane çapına sahip numunenin kümülatif enerji değeri 577 j/m^3 , 0.26 mm çaplı numunenin kümülatif sıvılaşma enerjisi 682 j/m^3 , 0.45 mm çaplı numunenin kümülatif sıvılaşma enerjisi 1057 j/m^3 iken 0.85 mm tane çapına sahip numunenin kümülatif enerji değeri 3730 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.6 a'da %30 rölatif sıklık ve 50 kpa gerilme altındaki numuneleri kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 0.11 mm ve 0.26 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %18, 0.26 mm ve 0.45 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %54 ve 0.45 mm ve 0.85 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %252 olmaktadır. Bu durum kümülatif sıvılaşma enerjisinin ortalama tane çapına kuvvetle bağlı olduğunun önemli bir göstergesidir. % 30 rölatif sıklık ve 50 kpa efektif gerilme için 0.11 mm ve 0.85 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artış oranı %90 iken %50 rölatif sıklık ve 50 kpa efektif gerilme için % 546 olması ortalama tane çapının etkisinin yüksek rölatif sıklık değerleri altında daha belirgin olduğunu göstermektedir. Farklı rölatif sıklıklar altında artan ortalama tane çapının etkisi Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Şekil 3.5. b'de %30 rölatif sıklıkta ve 100 kpa efektif gerilme altında 0.11 mm tane çapına sahip numunenin kümülatif enerji değeri 686 j/m^3 , 0.26 mm tane çapına sahip numunenin kümülatif enerji değeri 890 j/m^3 , 0.45 mm tane çapına sahip numunenin kümülatif enerji değeri 1232 j/m^3 , 0.85 mm tane çapına sahip numunenin kümülatif enerji değeri 2685 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.5 b'de %30 rölatif sıklık ve 100 kpa gerilme altındaki numuneleri kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 0.11 mm ve 0.26 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %29, 0.26 mm ve 0.45 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %38, 0.45 mm ve 0.85 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artışı %117 olmaktadır. 0.11 mm ve 0.85 mm çaplı numuneler arasındaki enerji artış oranı % 30 rölatif sıklık ve 50 kpa efektif gerilme için %90 iken %30 rölatif sıklık ve 100 kpa efektif gerilme için % 291 olması ortalama tane çapının etkisinin yüksek efektif gerilme değerleri altında daha belirgin olduğunu göstermektedir. . Farklı efektif gerilmeler altında artan ortalama tane çapının etkisi Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



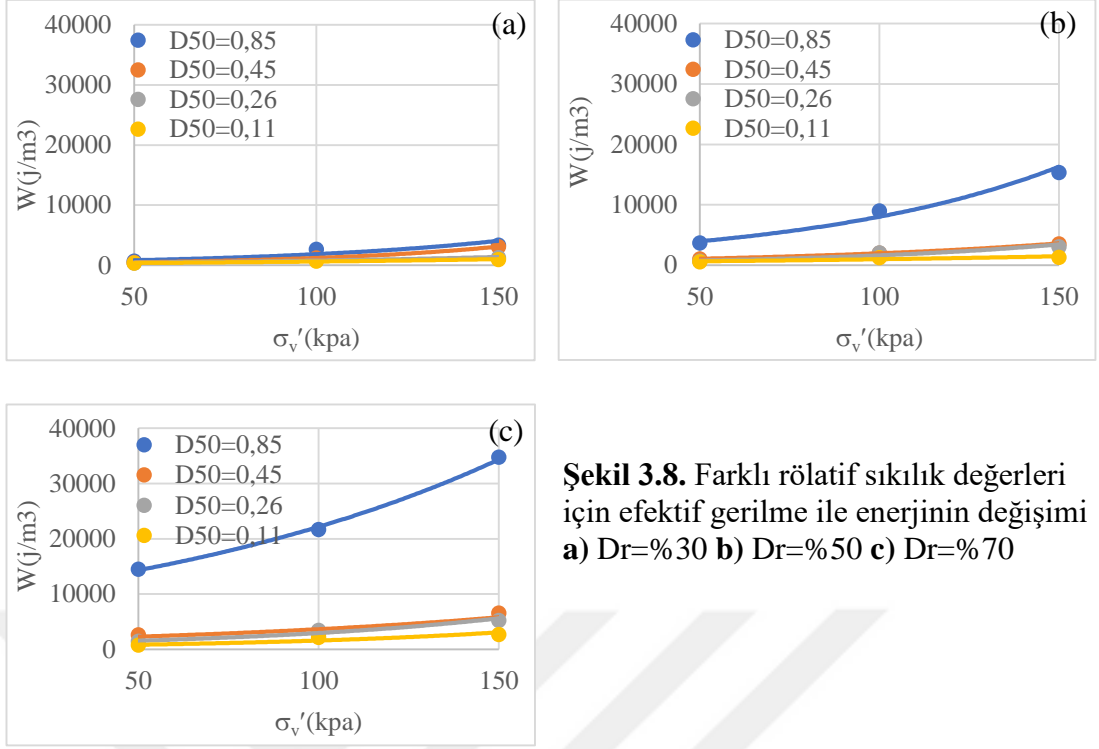
Şekil 3.6. Farklı tane çaplarına göre %50 rölâtif sıkılıkta sıvılaştırma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi

a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa



Şekil 3.7. Farklı efektif gerilmelerde enerji ile rölâtif sıkılık değişimi

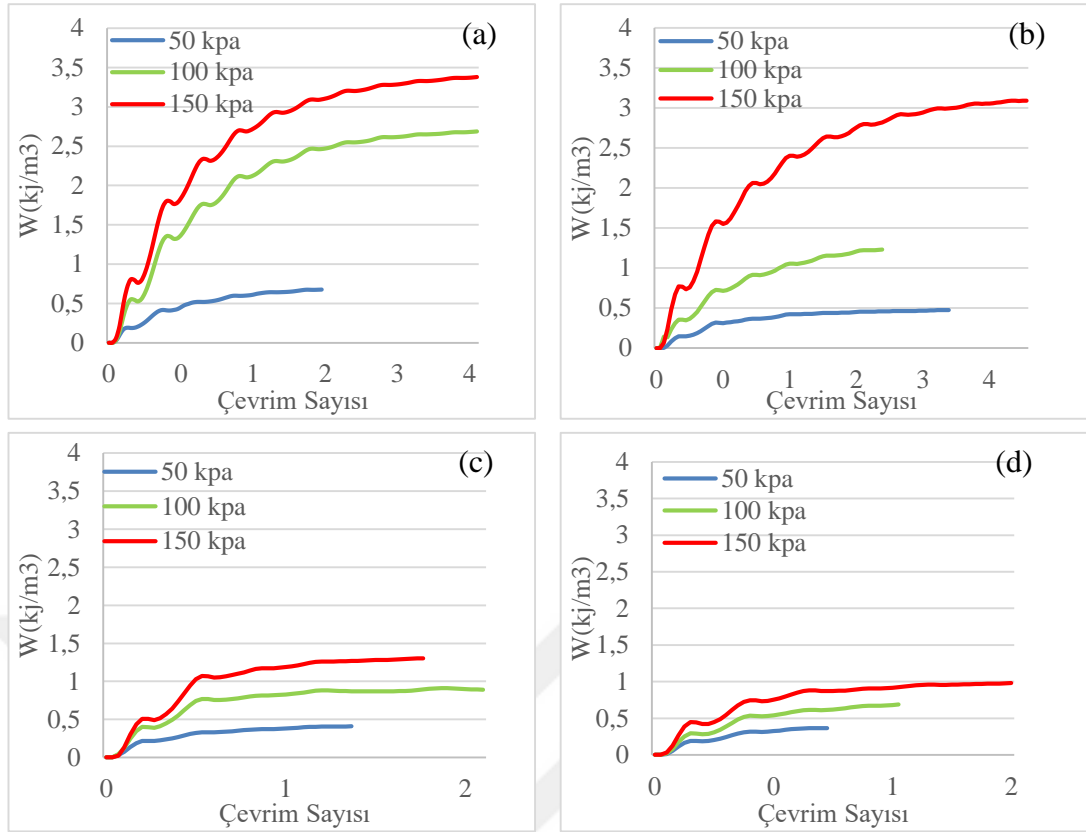
a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa



Şekil 3.8. Farklı rölatif sıklık değerleri için efektif gerilme ile enerjinin değişimi
a) $D_r = 30\%$ b) $D_r = 50\%$ c) $D_r = 70\%$

3.2. Efektif Gerilme Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi

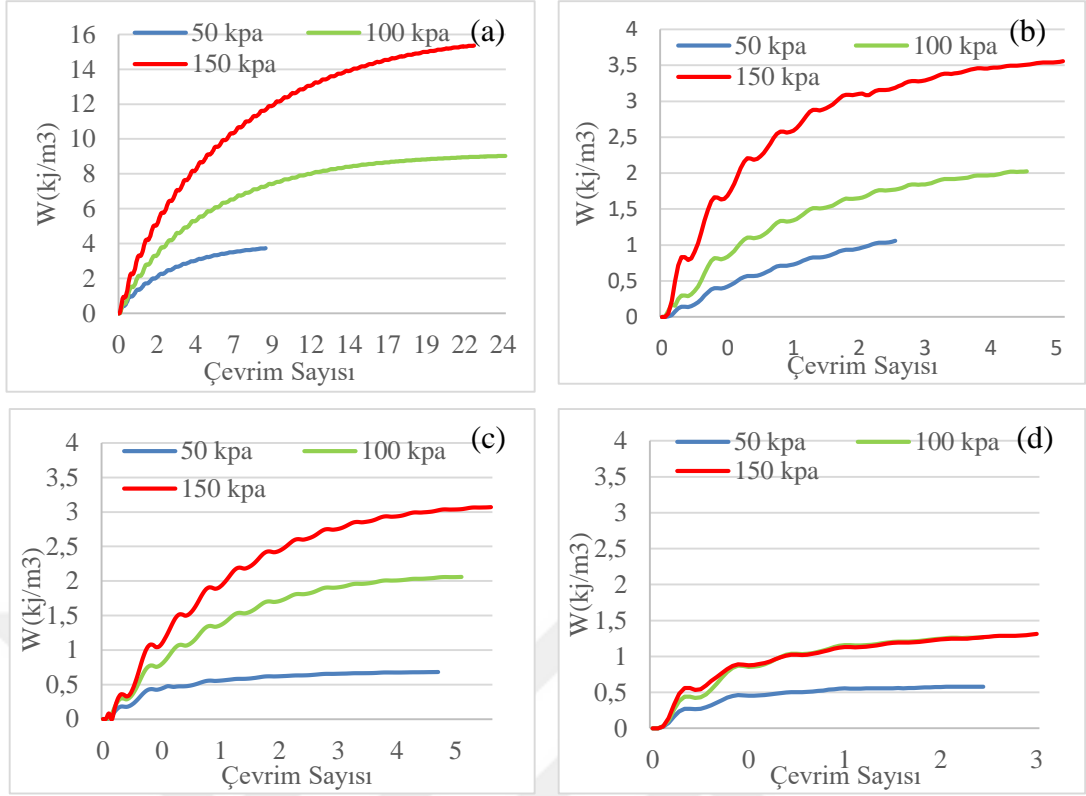
Sıvılaşma enerjisi artan efektif gerilme değeri ile birlikte arttığı daha önce yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [19, 22]. Efektif gerilme artışı ile zemin tanelerinin üzerine gelen yük artmakta ve zemin tanelerinin kayma birim deformasyonuna karşı gösterdikleri direnç artmakta bu da kümülatif sıvılaşma enerjisini artırmaktadır. Bu çalışmada da 50,100,150 kpa efektif gerilme değerlerine bağlı sırasıyla %30 ve %50 rölatif sıklık değerleri için Şekil 3.9. a, Şekil 3.9. b, Şekil 3.9. c, Şekil 3.9. d ve Şekil 3.10. a, Şekil 3.10. b, Şekil 3.10. c, Şekil 3.10. d'de çevrim sayısına bağlı kümülatif sıvılaşma enerji değişimleri verilmiştir. Çalışmada aynı zamanda yine farklı efektif gerilme değerleri için D_{50} 'nin değişimine bağlı kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi Şekil 3.11. a, Şekil 3.11. b ve Şekil 3.11. c'de verilmiştir.



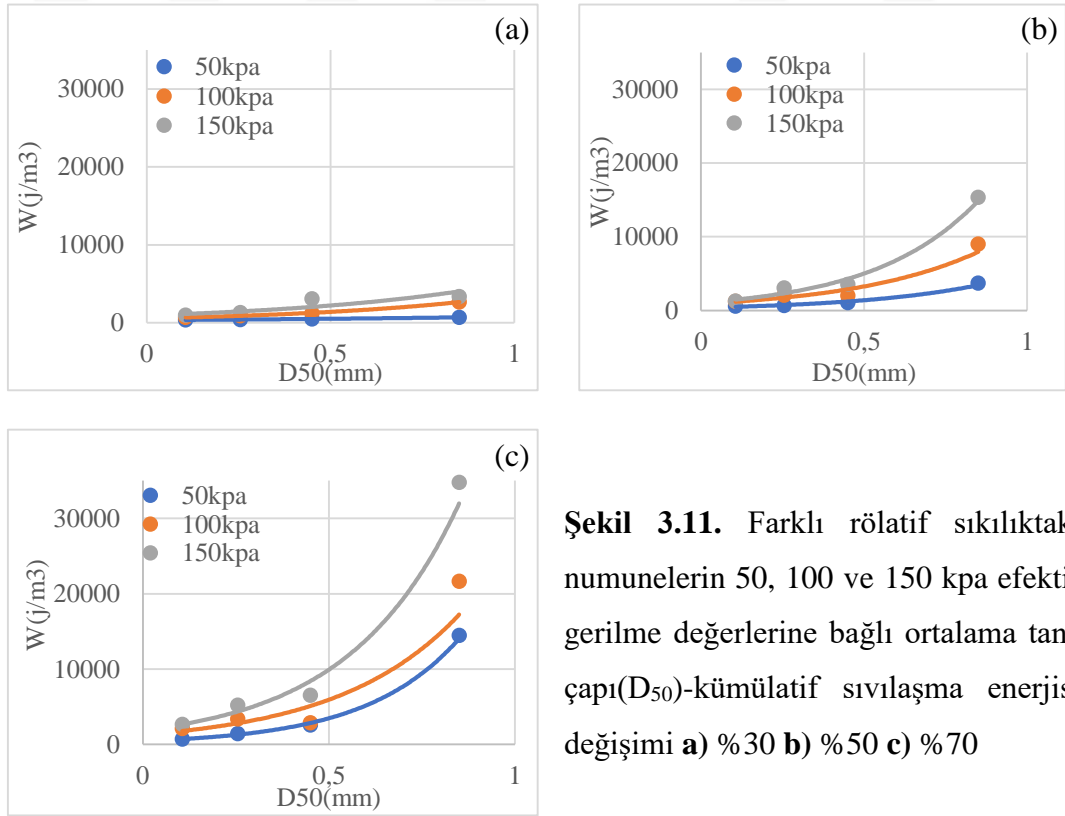
Şekil 3.9. %30 rölatif sıklıkta ve farklı efektif gerilmeler altında enerji ile çevrim sayısı ilişkisi **a)** 0,85 mm **b)** 0,45 mm **c)** 0,26 mm **d)** 0,11 mm

Şekil 3.9 ve şekil 3.10'da tüm numunelerde efektif gerilmenin artışı ile birlikte kümülatif sıvılaşma enerjisi artmaktadır. Şekil 3.9 a'de 50 kpa altında enerji değeri 695 j/m^3 , 100 kpa altında enerji değeri 2685 j/m^3 , 150 kpa altında enerji değeri 3381 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.9 a'de %30 rölatif sıklık altındaki 0.85 mm çapa sahip numunelerin kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 50 kpa ve 100 kpa efektif gerilmeye ait numuneler arasındaki enerjideki artış %286.33 iken 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilmeye ait numuneler arasındaki enerjideki artış %25.92 olduğu görülmektedir. Şekil 3.9 b'de 50 kpa altında enerji değeri 474 j/m^3 , 100 kpa altında enerji değeri 1232 j/m^3 , 150 kpa altında enerji değeri 3092 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.9 b'de %30 rölatif sıklık altındaki 0.45 mm çapa sahip numunelerin kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 50 kpa ve 100 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış %159.92 iken 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış %150.97 olduğu görülmektedir. Şekil 3.9 c'de 50 kpa

altında enerji değeri 409 j/m^3 , 100 kpa altında enerji değeri 890 j/m^3 , 150 kpa altında enerji değeri 1304 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.9 c’de %30 rölatif sıklık altındaki 0.26 mm çapa sahip numunelerin kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 50 kpa ve 100 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış %117.6 iken 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış %46.52 olduğu görülmektedir. Şekil 3.9 d’de 50 kpa altında enerji değeri 364 j/m^3 , 100 kpa altında enerji değeri 686 j/m^3 , 150 kpa altında enerji değeri 978 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.9 d’de %30 rölatif sıklık altındaki 0.11 mm çapa sahip numunelerin kümülatif sıvılaşma enerjilerindeki artış oranı karşılaştırıldığında 50 kpa ve 100 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış %88.46 iken 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış %42.57 olduğu görülmektedir. Şekil 3.9’da tüm tane çaplarında 50 kpa ve 100 kpa efektif gerilme değerleri arasında enerji artış oranları ile 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilme değerleri arasında enerji artış oranları karşılaştırıldığında efektif gerilmenin 2 katına çıktığı durumdaki enerjideki artış oranı efektif gerilmenin 1.5 katına çıktığı durumdaki enerjideki artış oranı ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum enerji artış oranının efektif gerilmeye kuvvetle bağlı olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Bu ilişki benzer şekilde Şekil 3.10’da da görülmektedir. Şekil 3.9’da 50 kpa ve 100 kpa efektif gerilme arasındaki enerjideki artış oranı 0.11 mm tane çapına ait numune için %88.46, 0.26 mm tane çapına ait numune için %117.6, 0.45 mm tane çapına ait numune için %159.92, 0.85 mm tane çapına ait numune için %286.33 olması efektif gerilmenin yüksek tane çapına sahip zeminlerde sıvılaşma enerjisini daha belirgin bir şekilde artırdığını göstermektedir. Farklı ortalama tane çapları için artan efektif gerilmenin kümülatif sıvılaşma enerjisi üzerindeki değişimi Şekil 3.11’de görülmektedir. Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de elde edilen sonuçlar kümülatif sıvılaşma enerjisinin efektif gerilmeye kuvvetle bağlı olduğunun önemli bir göstergesidir.



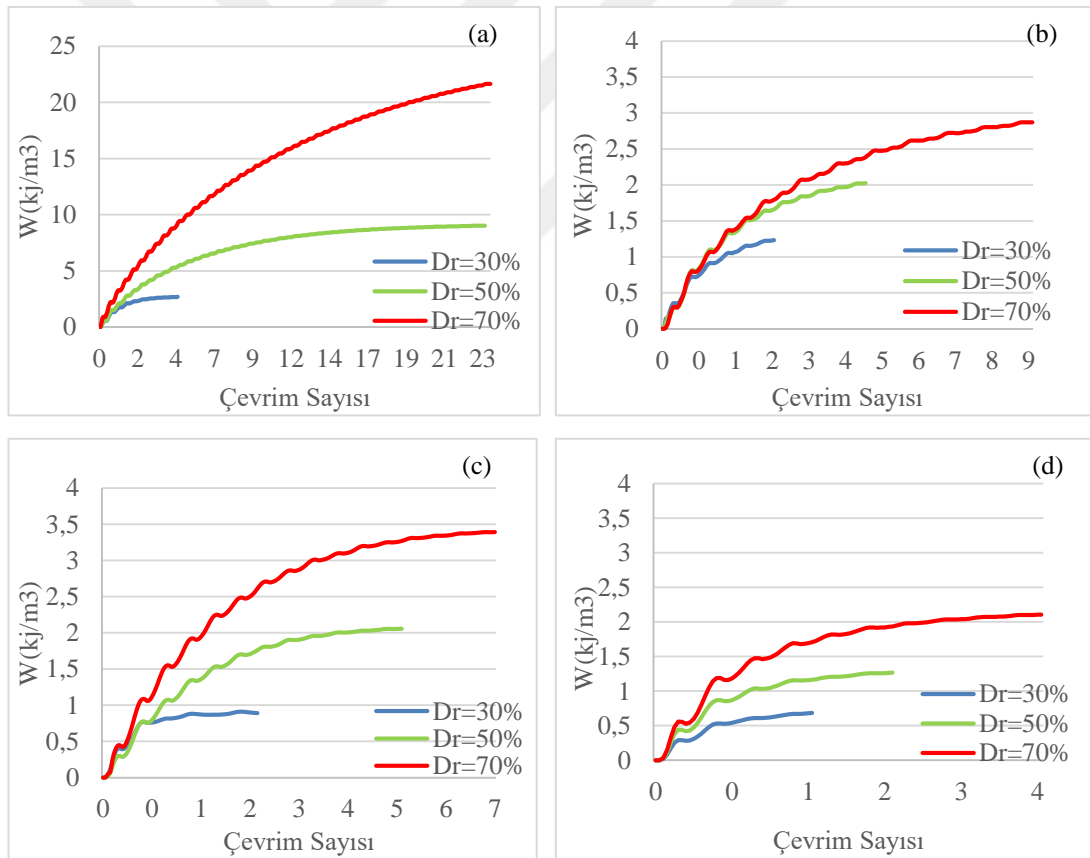
Şekil 3.10. %50 rölâtif sıkılıkta ve farklı efektif gerilmeler altında enerji ile çevrim sayısı ilişkisi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm



Şekil 3.11. Farklı rölâtif sıkılıktaki numunelerin 50, 100 ve 150 kpa efektif gerilme değerlerine bağlı ortalama tane çapı(D_{50})-kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi a) %30 b) %50 c) %70

3.3 Rölatif Sıklık Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi

Zemin sıvılaşma analizlerinde rölatif sıklığın karşılaştırma için uygun bir parametre olduğu diğer başka çalışmalar da belirtilmiştir [90, 91]. Beklenildiği gibi rölatif sıklık arttıkça zeminin sıvılaşması için gerekli kümülatif sıvılaşma enerjisi de artmaktadır. %70 rölatif sıklıktaki enerjiler %30 ve %50 rölatif sıklık değerlerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Rölatif sıklığın artması ile zemin taneleri daha sıkı düzende yerleştikleri için sıvılaşmaya ulaşmaları için gerekli kümülatif sıvılaşma enerjileri artmaktadır. Sırasıyla 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilme değerleri için Şekil 3.12. a, Şekil 3.12. b, Şekil 3.12. c, Şekil 3.12. d ve Şekil 3.13. a, Şekil 3.13. b, Şekil 3.13. c, Şekil 3.13. d’de farklı rölatif sıklık (%30, %50, %70) değerleri için kümülatif sıvılaşma enerjisinin çevrim sayısı ile değişimi verilmiştir.

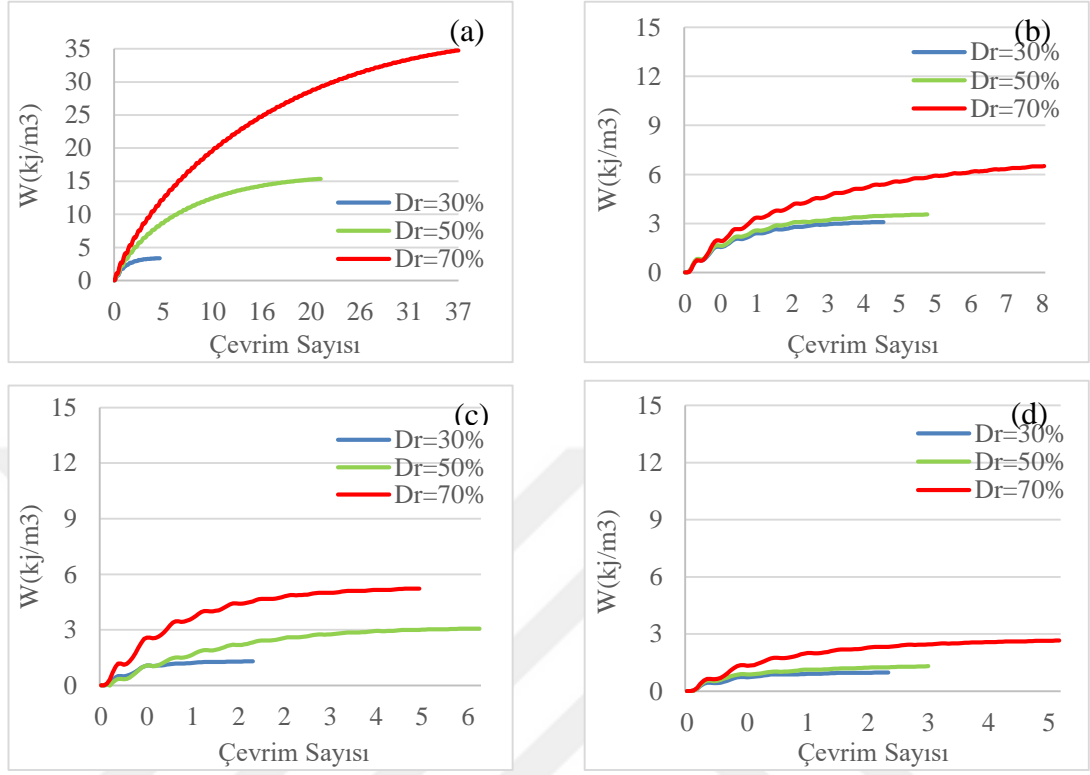


Şekil 3.12. 100 kpa efektif gerilme ve farklı rölatif sıklıklarda enerji ile çevrim sayısı ilişkisi a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm

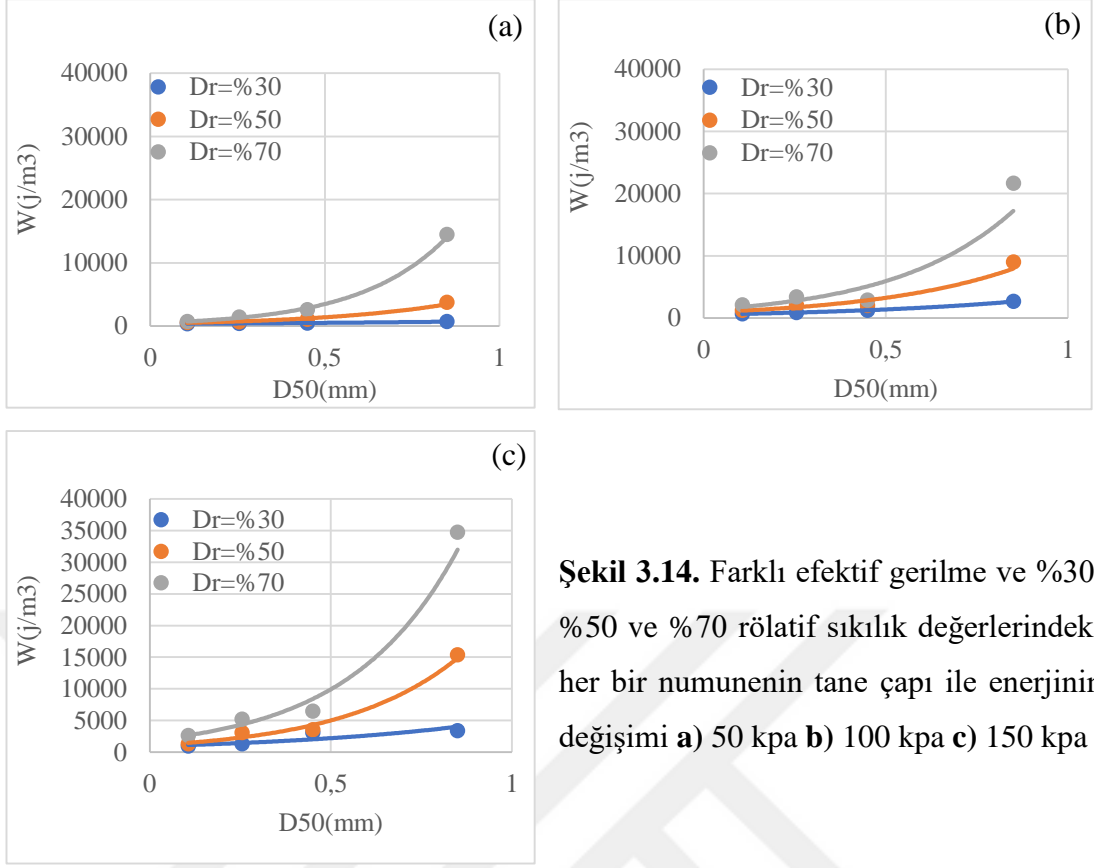
Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de sırasıyla 100 ve 150 kpa efektif gerilme altında ve farklı ortalama tane çaplarında hazırlanan numunelerde artan rölatif sıklık ile birlikte kümülatif sıvılaşma değerleri atmaktadır. Şekil 3.12. a’da 0.85 mm tane çapına sahip numunenin %30 rölatif sıklıktaki enerji değeri 2685 j/m^3 , %50 rölatif sıklıktaki enerji değeri 9034 j/m^3 ve %70 rölatif sıklıktaki enerji değeri 21653 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.12. b’de 0.45 mm tane çapına sahip numunenin %30 rölatif sıklıktaki enerji değeri 1232 j/m^3 , %50 rölatif sıklıktaki enerji değeri 2024 j/m^3 ve %70 rölatif sıklıktaki enerji değeri 2872 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.12. c’de 0.26 mm tane çapına sahip numunenin %30 rölatif sıklıktaki enerji değeri 890 j/m^3 , %50 rölatif sıklıktaki enerji değeri 2058 j/m^3 ve %70 rölatif sıklıktaki enerji değeri 3391 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.12. d’de 0.11 mm tane çapına sahip numunenin %30 rölatif sıklıktaki enerji değeri 686 j/m^3 , %50 rölatif sıklıktaki enerji değeri 1265 j/m^3 ve %70 rölatif sıklıktaki enerji değeri 2107 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.12’de %30 ve %50 rölatif sıklıktaki numunelerin enerji artışları 0.85 mm çaplı numune için %236, 0.45 mm çaplı numune için %64, 0.26 mm çaplı numune için %131 ve 0.11 çaplı numune için %84 olmaktadır. Şekil 3.12’de %50 ve %70 rölatif sıklıktaki numunelerin enerji artışları 0.85 mm çaplı numune için %139, 0.45 mm çaplı numune için %41, 0.26 mm çaplı numune için %64 ve 0.11 çaplı numune için %66 olmaktadır. %30 ve % 50 rölatif sıklık arasındaki enerji artış oranları %50 ve %70 rölatif sıklık arasındaki enerji artış oranlarından yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum düşük rölatif sıklıklarda enerji artış oranının yüksek rölatif sıklıklardan daha etkin olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer ilişki Şekil 3.13’de 150 kpa efektif gerilme altında hazırlanan numuneler içinde görülmektedir.

Farklı rölatif sıklık değerleri için sırasıyla D_{50} ve efektif gerilme değerleri ile kümülatif sıvılaşma enerjileri değişimi Şekil 3.14. a, Şekil 3.14. b ve Şekil 3.14. c ve Şekil 3.15. a, Şekil 3.15. b, Şekil 3.15. c ve Şekil 3.15. d’de verilmiştir. Şekil 3.14.’de tüm tane çaplarında farklı efektif gerilme değerlerinde artan rölatif sıklık ile birlikte kümülatif sıvılaşma enerjisi artmaktadır. Şekil 3.14 b’de 100 kpa efektif gerilme altında 0.45 mm tane çapındaki %30 rölatif sıklıktaki enerji değeri 1232 j/m^3 , %50 rölatif sıklık enerji değeri 2024 j/m^3 , %70 rölatif sıklıktaki enerji değeri 2872 j/m^3 olmaktadır. Şekil 3.14 c’de 150 kpa efektif gerilme altında 0.85 mm tane çapındaki

%30 rölâtif sıklıktaki enerji değeri 3730 j/m^3 , %50 rölâtif sıklık enerji değeri 15356 j/m^3 , %70 rölâtif sıklıktaki enerji değeri 34769 j/m^3 olmaktadır.

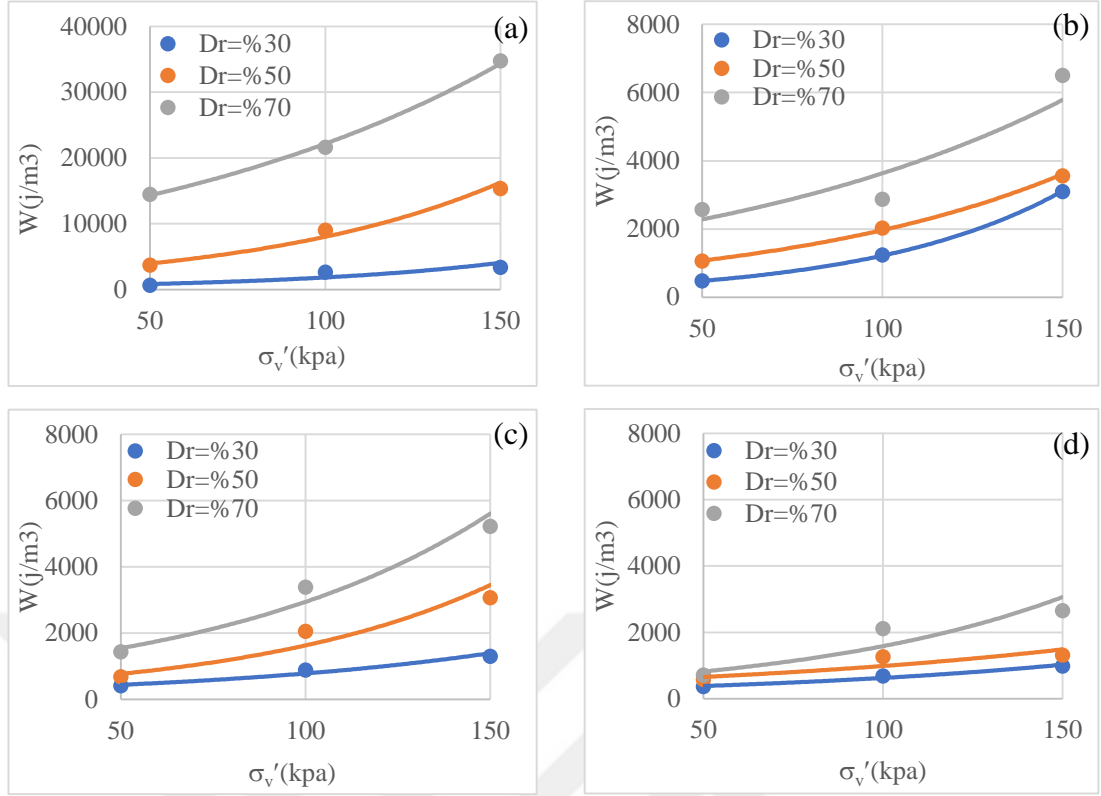


Şekil 3.13. 150 kpa efektif gerilme ve farklı rölâtif sıklıklarda enerji ile çevrim sayısı ilişkisi **a)** 0,85 mm **b)** 0,45 mm **c)** 0,26 mm **d)** 0,11 mm



Şekil 3.14. Farklı efektif gerilme ve %30, %50 ve %70 rölatif sıkılık değerlerindeki her bir numunenin tane çapı ile enerjinin değişimi **a)** 50 kpa **b)** 100 kpa **c)** 150 kpa

Şekil 3.15’de tüm efektif gerilme değerlerinde farklı tane çaplarındaki numunelerde rölatif sıkılık artışı ile birlikte kümülatif sıvılaşma enerjisi artmaktadır. Şekil 3.15.c’de 50 kpa efektif gerilme altında 0.26 mm tane çapındaki %30 rölatif sıkılıktaki enerji değeri 409 j/m³, %50 rölatif sıkılık enerji değeri 682 j/m³, %70 rölatif sıkılıktaki enerji değeri 1437 j/m³ olmaktadır. Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de elde edilen sonuçlar kümülatif sıvılaşma enerjisinin rölatif sıkılığa kuvvetle bağlı olduğunun önemli bir göstergesidir.



Şekil 3.15. Farklı tane çap değerleri ile %30, %50 ve %70 rölâtif sıklık değerlerindeki her bir numunenin efektif gerilme ile enerjinin değişimi **a)** 0.85 mm **b)** 0.45 mm **c)** 0.26 mm **d)** 0.11 mm

3.4 Kayma Modülü Ve Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi Değişimi

Kayma modülü(G), yer hareketlerinin ve bir sahanın yorumlanmasında önemli bir zemin parametresidir. Kayma modülü(G), kayma gerilmesinin birim deformasyon oranına bölünmesi ile bulunur. Zeminlerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelenirken özellikle kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı zemin ortamlarında simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan zeminlerin davranışları genellikle kayma modülü ve sönüm oranı özellikleri ile belirlenmektedir [28]. Kayma modülü oranı (G/G_{max}) sıvılaşmanın meydana geldiği çevrimdeki kayma modülünün (G) maksimum kayma modülüne (G_{max}) oranı olarak tanımlanmaktadır. Kayma modülüne etki eden en önemli faktörler çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranıdır [92].

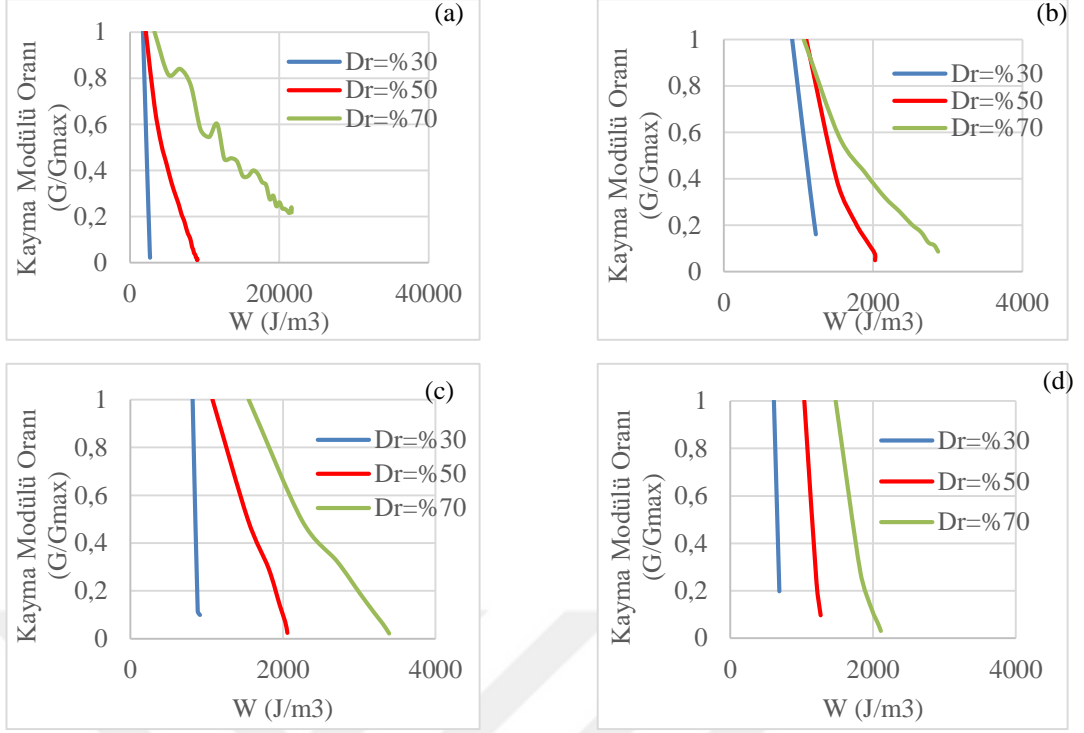
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.1)$$

G= Kayma modülü

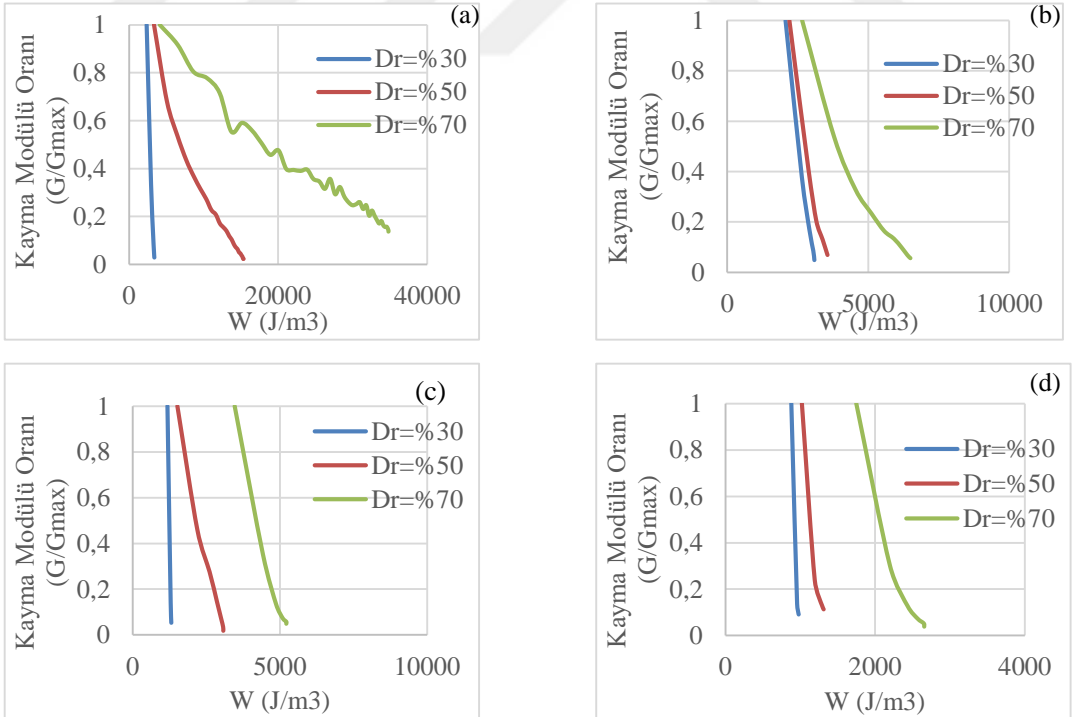
τ = Kayma gerilmesi

γ = Birim deformasyon oranı

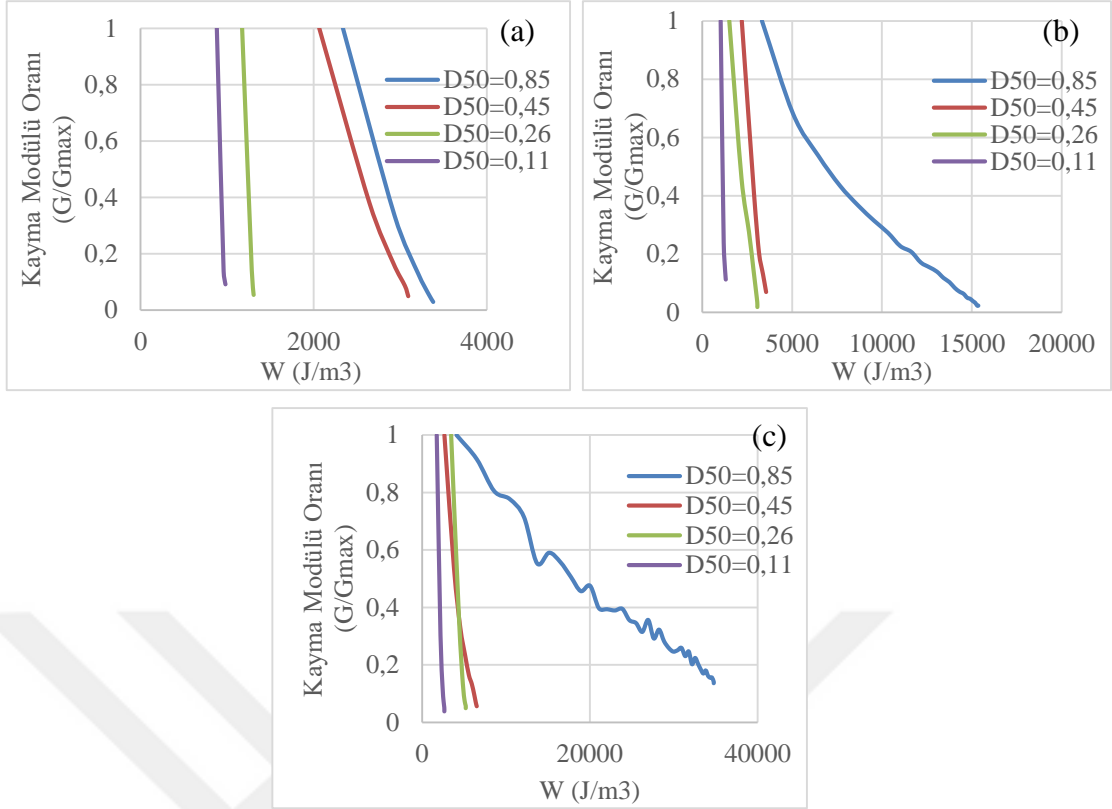
Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de artan çevrim sayısı ile beraber kayma modülü oranları rölatif sıklılık ile beraber azalmaktadır. Ancak %30 rölatif sıklılıktaki numunede modül azalım değeri hızla aşağı doğru gelirken %70 rölatif sıklılık değeri için kayma modülündeki azalım hızı yavaş olmakta ve bu durum numunenin sıvılaşması için gereken enerji miktarını artırmaktadır. Sırasıyla 100 ve 150 kpa efektif gerilme değerleri için Şekil 3.16.a, Şekil 3.16.b, Şekil 3.16.c, Şekil 3.16.d ve Şekil 3.17.a, Şekil 3.17.b, Şekil 3.17.c, Şekil 3.17.d’de farklı tane çaplarına sahip numunelerin %30, %50, %70 rölatif sıklılık değerleri için kümülatif sıvılaşma enerjisinin kayma modülü oranı ile değişimi verilmiştir. Şekil 3.16 ve şekil 3.17’de artan rölatif sıklılık ile birlikte kayma modülünde ki azalım daha yavaş olmaktadır. Şekil 3.18.a, Şekil 3.18.b ve Şekil 3.18.c’de 150 kpa efektif gerilme altında farklı tane çaplarına (0.85 mm, 0.45 mm, 0.26 mm, 0.11 mm) ait kayma modülü oranı ile kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi grafiği verilmiştir. Şekil 3.18’de artan tane çapı ile birlikte kayma modülündeki azalım daha yavaş olmaktadır. Bu durumun nedeninin artan tane çapının taneler arasındaki etkileşimi artırdığı düşünülmektedir.



Şekil 3.16. Farklı rölatif sıklık değerleri (%30, %50, %70) için 100 kpa efektif gerilme altında kayma modülü oranı ile kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi
a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm

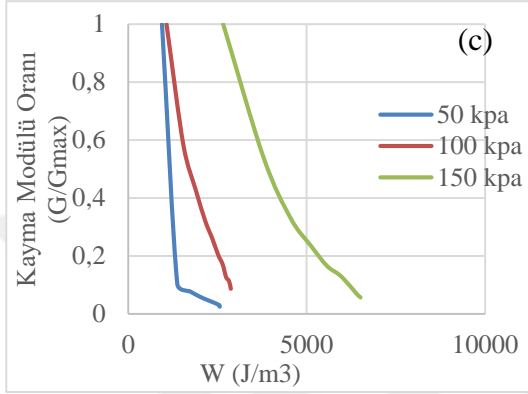
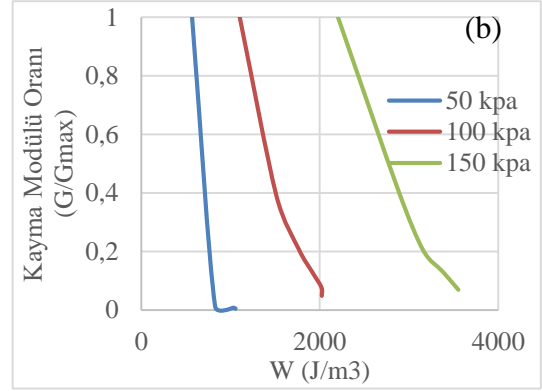
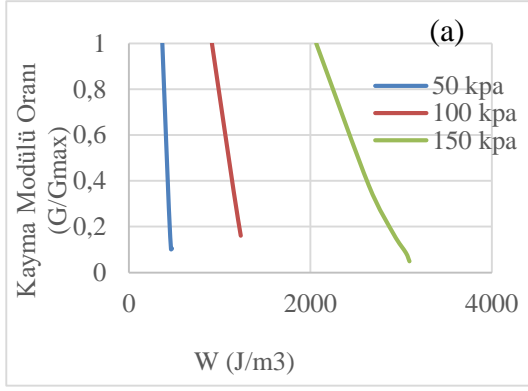


Şekil 3.17. Farklı rölatif sıklık değerleri (%30, %50, %70) için 150 kpa efektif gerilme altında kayma modülü oranı ile kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi
a) 0,85 mm b) 0,45 mm c) 0,26 mm d) 0,11 mm

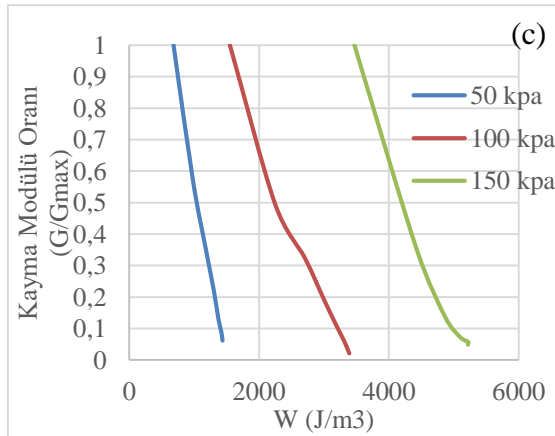
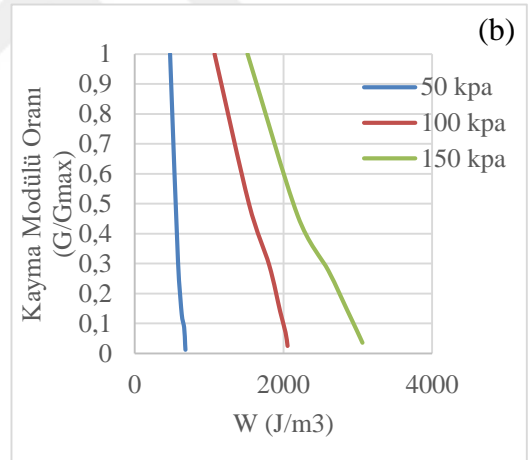
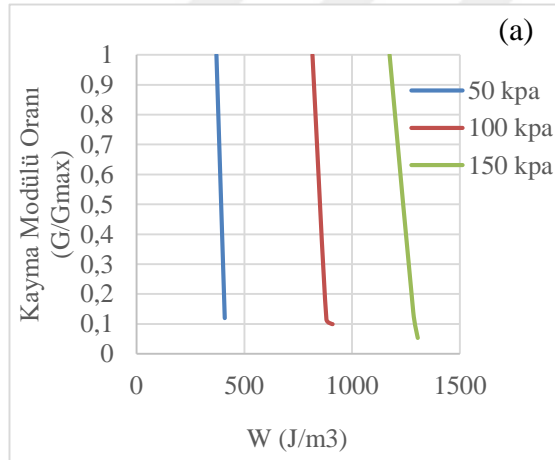


Şekil 3.18. 150 kpa efektif gerilme altında kayma modülü oranı ile kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi **a) %30 b) %50 c) %70**

Sırasıyla 0.45 mm ve 0.26 mm tane çapı için Şekil 3.19. a, Şekil 3.19. b, Şekil 3.19. c ve Şekil 3.20. a, Şekil 3.20. b, Şekil 3.20. c'de %30, %50, %70 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerin 50 kpa, 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilmelere ait kayma modülü oranı ile kümülatif sıvılaşma enerjisi değişimi verilmiştir. Bütün tane çapı değerleri içinde artan efektif gerilme ile birlikte kayma modülünde ki azalış daha yavaş olmaktadır. Bu durumun nedeninin efektif gerilme artışının taneler arasındaki etkileşimi artırarak kayma gerilmesine karşı daha fazla bir direnç gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 3.19. 0.45 mm tane çaplı numune için kayma modülü oranı ile enerjinin değişimi **a) %30 b) %50 c) %70**



Şekil 3.20. 0.26 mm tane çaplı numune için kayma modülü oranı ile enerjinin değişimi **a) %30 b) %50 c) %70**

3.5. Regresyon Analizi

Birçok mühendislik problemlerinde iki (ya da daha çok sayıda) rastgele değişkenin aynı gözlem sırasında aldıkları değerlerin birbirinden istatistik bakımdan bağımsız olmadığını, dolayısıyla bu değişkenler arasında bir ilişki bulunduğu görülmektedir. İki değişken arasında bir ilişki bulunması bunlardan birinin diğerlerinden etkilenmesi, ya da her iki değişkenin başka değişkenlerden birlikte etkilenmelerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin bir akarsu havzasındaki akıyla yağış arasındaki ilişki akışın yağışın etkisiyle ortaya çıkmasından doğmaktadır. Komşu iki havzada akışlar arasında akışlar arasındaki ilişki ise her ikisinin de o bölgedeki yağıştan etkilenmelerine bağlı olmaktadır.

Ancak söz konusu ilişkiler deterministik (fonksiyonel) nitelikte değildir, yani değişkenlerden biri belli bir değer aldığı anda diğerinin her zaman aynı değeri alacağı söylenemez. Söz konusu ilişkide göz önüne almadığımız diğer değişkenlerin etkisiyle bu değer çeşitli gözlemlerde az çok farklı olabilir. Örneğin komşu iki havzanın birinde akım belli bir değeri aldığı anda diğerindeki akım her zaman aynı değerde olmaz. Yine de değişkenler arasındaki akım her zaman aynı değerde olmaz. Yine de değişkenler arasında fonksiyonel olmayan bağıntının varlığının ortaya çıkarılması ve biçiminin belirlenmesi pratikte büyük önem taşır. Zira bu bağıntıyı kullanarak bir değişkenin alacağı değeri diğer bir (ya da birden fazla) değişkenin bilinen değerlerine bağlı olarak tahmin etmek mümkün olur. Bu tahmin söz konusu değişkenin alacağı gerçek değeri kesin olarak vermemekle birlikte bu değere yakın en iyi tahmin olur. Tahmin edilen değerlerin gerçek değerden olan farkının (hata) da belli bir olasılıkla hangi sınırlar içinde kalacağı söylenebilir.

Yukarıda sözü edilen tipten bir bağıntıyı gösteren matematik ifadeye regresyon denklemi denir. Regresyon analizinin amacı göz önüne alınan değişkenler arasında anlamlı bir ilişki bulunup bulunmadığını belirlemek, böyle bir ilişki varsa bu ilişkiyi ifade eden regresyon denklemini elde etmek ve bu denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin güven aralıklarını hesaplamaktır.

Regresyon analizine başlarken aralarında bir ilişki aranacak olan iki (ya da daha fazla sayıda) değişkenin hangileri olduğuna karar vermek, sonra da bu değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren denklemin biçimi için bir kabul yapmak gerekir. Buna göre regresyon analizi şu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Basit Doğrusal Regresyon Analizi:

En çok kullanılan bu en basit analizde iki değişken arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu kabul edilir.

2. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi:

İkiden daha fazla sayıda değişken arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu kabul edilir.

3. Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Regresyon Analizi:

Burada iki ya da daha fazla sayıda değişken arasında doğrusal olmayan ve biçimi önceden seçilen bir denklemlle ifade edilen bir ilişkinin varlığı kabul edilir.

3.5.1. Basit Doğrusal Regresyon Analizi

Aşağıda ilgili kavramlar açıklanmıştır.

Bağımsız Değişkenler:

Başka bir değişkeni belirleyen değişkendir.

Bağımlı Değişken:

Bağımsız değişkenin değişimlerinden etkilenen ve onun verileri ile tahmin edilmeye çalışılan değişken çeşididir.

Dağılımın Grafiği:

Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirlerine göre aldıkları değerleri gösteren grafiklerdir. Bu grafikte genellikle x eksenini bağımsız değişkeni y eksenini de bağımlı değişkeni gösterir.

Korelasyon Katsayısı:

X ve Y aralarında doğrusal bir bağımlılık bulunmasını beklediğimiz iki rastgele değişken olduğuna göre, aynı gözlemde ölçülen (X_i, Y_i) değer çiftlerini x-y düzleminde birer nokta ile işaretleyelim. Elde edilen noktaların bir doğru çizgi çevresinde küçük bir yayılma ile dağılımları X ile Y arasında doğrusal bir ilişki bulunduğunu gösterir.

Bu iki rastgele iki değişken arasındaki doğrusal bağımlılığın bir ölçüsü olarak korelasyon katsayısı kullanılmaktadır. Bu katsayı 2 değişken arasındaki ilişkinin derecesini ve yönünü belirlemek için hesaplanan ve birimi olmayan bir katsayıdır.

$r = 0$ ise doğrusal bir ilişki yok.

$r = -1$ veya $r = 1$ ise tam doğrusal bir ilişki (deterministik ilişki)

$r > 0$ ise aynı yönde ilişki X artarsa Y de artar.

$r < 0$ ise ters yönde bir ilişki X artarsa Y azalır.

Değişkenler arasında dağılım grafiği çizildiğinde oluşan dağılımın eğimi pozitif ise (sağa yatık doğru) pozitif korelasyon vardır. Oluşan doğrunun eğimi negatif ise (sola yatık doğru) negatif korelasyon söz konusudur.

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n(\sum X^2) - (\sum X)^2][n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2]}} \quad (3.2)$$

r = Korelasyon katsayısı

n = Gözlem sayısı

X = Bağımsız değişken

Y = Bağımlı değişken

En Küçük Kareler Toplamı:

Tahmin edilen katsayıların ve değişkenlerin hesaplanması için kullanılan ve tahmin modeliyle gerçek modeldeki katsayıların birbirlerine çok yakın olmalarını sağlayan regresyon modelindeki hata terimini minimum yapan bir yöntemdir. Bu yöntemde gerçek y değerleri ile tahmin edilen y doğruları arasındaki farkların kareleri toplamı minimum yapılmaya çalışılır.

$$EKKT = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.3)$$

y_i = Gerçek değer

\hat{y}_i = Tahmin edilen

Regresyon Katsayılarının Hesaplanması:

$$\hat{a} = \bar{Y} - \hat{b}\bar{X} \quad (3.4)$$

\hat{a} = sabit değer (X bağımsız değişkeni 0 olduğunda Y'nin alacağı değer)

\hat{b} = Regresyon doğrusunun eğimi

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad (3.5)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n} \quad (3.6)$$

$$\hat{b} = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (3.7)$$

Modelin Belirlilik (Determinasyon) Katsayısının Belirlenmesi:

Kurulan regresyon modelindeki gözlem değerlerinin modele uygunluğunun ölçülmesine yarayan katsayıdır. Bağımlı değişkendeki değişimin yüzde kaçının bağımsız değişkendeki değişime bağlı olduğunu gösterir.

Modelin belirlilik katsayısının yüksek olması bir bağımlı değişken ve bir bağımsız değişken tarafından oluşturulan bu modelin gerçeğe uygun olduğunu yani Y deki değişimin büyük ölçüde yalnızca X'e bağlı olduğunu başka bağımsız değişkenlere modelde ihtiyaç olmadığını gösterir.

R^2 yani determinasyon katsayısı 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1'e yaklaştıkça modelin uygunluğu artar. Ayrıca korelasyon katsayısının karesidir.

3.5.2. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi

Y bağımlı değişkeninin X_1, X_2, \dots, X_m gibi m bağımsız değişkenden etkilendiği kabul edilir. Ve aralarındaki ilişki için doğrusal bir denklem seçilirse Y'nin regresyon denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m \quad (3.8)$$

Bu denklemde y, bağımsız değişkenler $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_m = x_m$ değerlerini aldığı anda Y değişkeninin beklenen değerini göstermektedir.

a, b_1, b_2, \dots, b_m regresyon katsayıları basit regresyondakine benzer şekilde, gözlem noktalarının regresyon denkleminin gösterdiği düzlemde olan e_{yi} uzaklıklarının karelerinin toplamı olan

$$\sum_{i=1}^n e_{yi}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b_1x_{i1} - b_2x_{i2} - \dots - b_mx_{mi})^2 \quad (3.9)$$

İfadesi minimum yapacak şekilde hesaplanır.

3.5.3. Doğrusal Olmayan Regresyon Analizi

Doğrusal regresyon modeli basitliği nedeniyle en çok kullanılan modeldir. Uygulamalarda değişkenler arasındaki ilişkinin gerçekte doğrusal olmaması halinde bile doğrusal regresyon modelinin belli bir bölge içinde fazla hatalı olmayan sonuçlar vermesi beklenebilir. Ancak doğrusal bir ilişki kabulünün gerçek durumdan çok uzakta kalması halinde bu modeli kullanarak yapılacak tahminlerdeki hata büyük olacağından doğrusal olmayan regresyon modellerini kullanmak gerekir.

Doğrusal olmayan regresyon değişkenler seçildikten sonra regresyon bağıntısının biçimine karar verilir.

$$y = f(x_1, x_2, \dots) \quad (3.10)$$

$f(x_1, x_2, \dots)$ fonksiyonundaki parametreler yine:

$$\sum_{i=1}^n e_{y_i}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_{1i}, x_{2i}, \dots))^2 \quad (3.11)$$

Koşulunu sağlayacak şekilde belirlenir. Ancak $y = f(x_1, x_2, \dots)$ fonksiyonunun doğrusal olmaması halinde regresyon katsayıları için varılacak denklemler de doğrusal olmayacağından çözümleri genellikle güç olur.

3.6. Literatürdeki Sıvılaştırma Enerjisi Veren Denklemlerle Karşılaştırma

Bu çalışmada Datafit programı yardımıyla çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile çalışmadaki üç değişkene (efektif gerilme, ortalama tane çapı, rölatif sıklık) ait bir denklem elde edilerek tüm zeminler için kullanılabilecek bir kümülatif sıvılaştırma enerjisi denklemi elde edilmeye çalışılmıştır.

0,11-0,26 mm tane çaplarındaki numuneler için yapılan regresyon analizinden elde edilen denklem 3.12'de verilmiştir.

$$W = \exp(0.0109\sigma'_v + 0.0322D_r + 2.898D_{50} + 3.834) \quad (3.12)$$

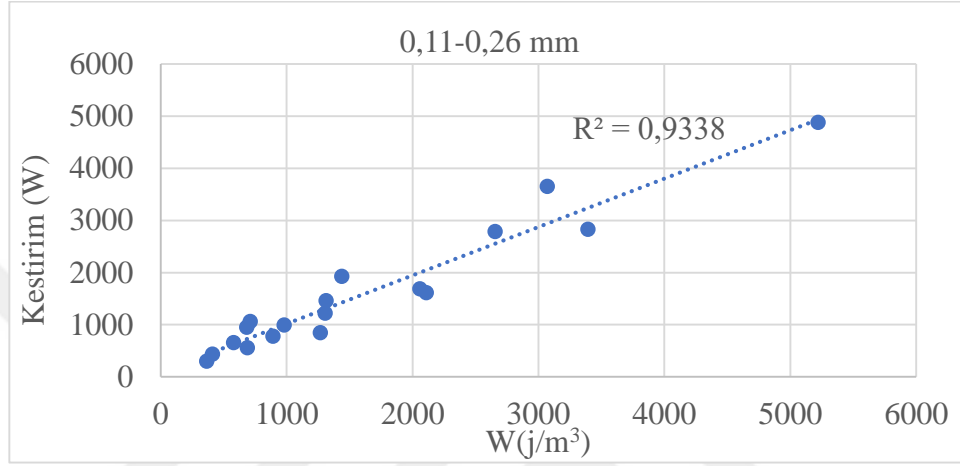
0,45-0,85 mm tane çaplarındaki numuneler için yapılan regresyon analizinden elde edilen denklem 3.13'de verilmiştir.

$$W = \exp(0.01203\sigma'_v + 0.0643D_r + 5.2749D_{50} + 0.00435) \quad (3.13)$$

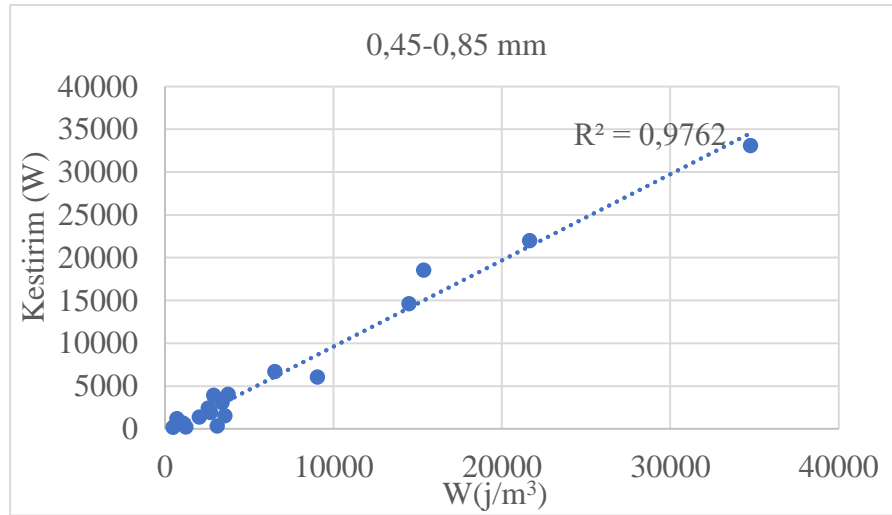
Denklem sonuçlarına göre ortalama tane çapı (D_{50}) ve rölatif sıklık (D_r) için kümülatif sıvılaştırma enerjisi değişim grafikleri Şekil 3.23.a, Şekil 3.23.b, Şekil 3.23.c, Şekil 3.24.a, Şekil 3.24.b ve Şekil 3.24.c'de verilmiştir.

Elde edilen denklemlere ait kümülatif sıvılaştırma enerjisi ile laboratuvar testleri sonuçları arasındaki ilişki Şekil 3.21 ve Şekil 3.21'de verilmiştir.

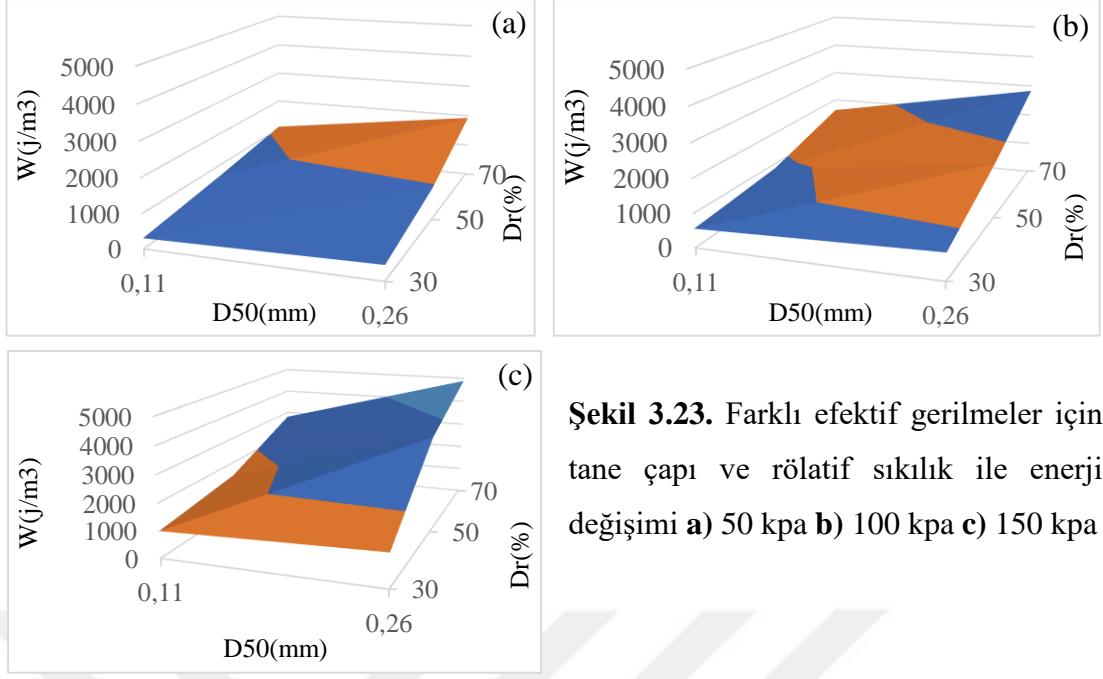
Analiz sonucunda elde edilen determinasyon katsayısının (R^2) bağımlı değişkenimiz olan kümülatif sıvılaşma enerjisinin (W), hangi oranda bağımsız değişkenlere bağlı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada R^2 oranlarının yüksek çıkması tavsiye edilen 3.12 ve 3.13'deki denklemlerde kümülatif sıvılaşma enerjisi ile rölatif sıklık, D50 ve efektif gerilme arasında ciddi bir ilişki olduğunu göstermektedir.



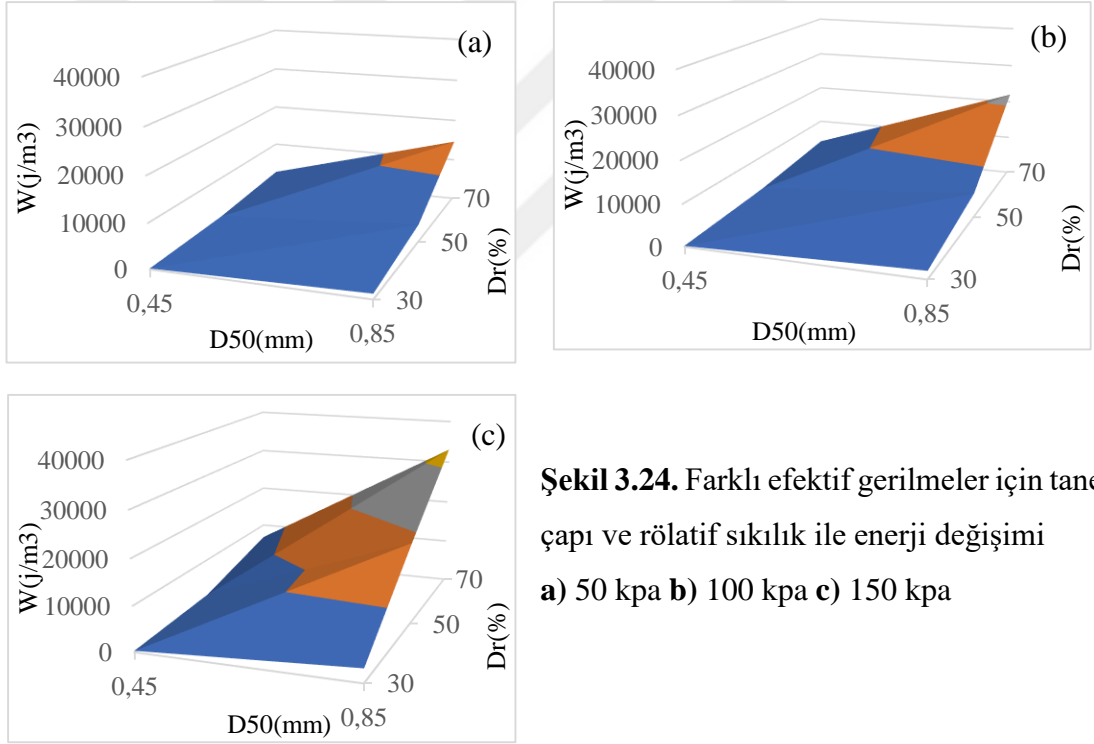
Şekil 3.21. Deney sonuçları ile denklem 3.12'den elde edilen sonuçların ilişkisi



Şekil 3.22. Deney sonuçları ile denklem 3.13'den elde edilen sonuçların ilişkisi



Şekil 3.23. Farklı efektif gerilmeler için tane çapı ve rölatif sıklık ile enerji değişimi a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa



Şekil 3.24. Farklı efektif gerilmeler için tane çapı ve rölatif sıklık ile enerji değişimi a) 50 kpa b) 100 kpa c) 150 kpa

Literatür çalışmalarına bakıldığında kümülatif sıvılaşma enerjisi için önerilen denklemler Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Literatürde enerjiye dayalı olarak yapılan bazı çalışmalardan elde edilen bağıntılar Çizelge 3.2'de verilmiştir. Figueroa vd.(1994) [19] 41.4 kpa, 52.7 kpa, 124.1 kpa efektif çevre gerilmesi değerlerinde %30, %50, %70 rölatif sıklıkta ve %1.02, %0.47,

%0.15 birim deformasyon değerlerinde 0.26 mm ortalama tane çapına sahip Reid Bedford kumunu kullanarak içi boş silindirli burulma kesme test aleti ile 27 adet birim deformasyon kontrollü test gerçekleştirmiştir. Liang (1995) [20] 41.4 kpa, 52.7 kpa, 124.1 kpa efektif çevre gerilmesi değerlerinde ve %50, %60, %70 rölatif sıklıkta 0.26 mm ortalama tane çapına sahip Reid Bedford kumunu kullanarak içi boş silindirli burulma kesme test aleti ile 9 adet birim deformasyon kontrollü test gerçekleştirmiştir. Dief ve Figuera (2001) [93] Nevada, Reid Bedford ve LSFD(Lower San Fernando Barajı) kumları üzerinde %50, %60, %65, %70 ve %75 rölatif sıklıkta 30 adet centrifuge sıvılaşma testi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ise karşılaştırma için 0.26 mm tane çapına sahip Reid Bedford kumuna ait önerilen bağıntı alınmıştır. Jafarian vd. (2012) [23] 0.20 mm tane çapına sahip Toyouro kumu üzerinde 37 adet içi boş silindirli burulma kesme aleti testi ve dinamik basit kesme testlerinin sonuçlarını kullanmıştır. Sönmezer(2019) [28] 25 kpa, 50 kpa, 100 kpa, 150 kpa efektif çevre gerilmesi değerlerinde %40, %55, %70 rölatif sıklıkta ve %2, %3.5, %5 birim deformasyon değerlerinde 0.26 mm ortalama tane çapına sahip İnce kum kullanarak dinamik basit kesme testi ile 36 adet birim deformasyon kontrollü test gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada önerilen bağıntının sonuçları, literatürde daha önce yapılmış çalışmalarda önerilen ve Çizelge 3.2'de verilen bağıntıların sonuçları denklem 3.12 ile karşılaştırılmış ve grafikleri Şekil 3.25.a, Şekil 3.25.b ve Şekil 3.25.c ve Şekil 3.25.d'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Literatürde Kümülatif Sıvılaşma Enerjisi İçin Geliştirilen Denklemler

Figueroa vd. (1994)	$\log(W) = 2.002 + 0.00477\sigma'_{\text{mean}} + 0.0116D_r$	$R^2 = 0.937$
Liang (1995)	$\log(W) = 2.062 + 0.0039\sigma'_{\text{mean}} + 0.0124D_r$	$R^2 = 0.925$
Dief and Figueroa (2001)	$\log(W) = 1.167 + 0.0179\sigma'_{\text{mean}} + 0.0123D_r$	$R^2 = 0.883$
Jafarian (2012)	$\log(W) = 0.1363P'_0 \left(\frac{D_r}{100}\right)^{4.925} + 5.375 \times 10^{-3} \times P'_0$	$R^2 = 0.80$
Sönmezer (2019)	$W = 2.248 \times (\sigma'_v)^{1.094} \times (1.042)^{D_r}$	$R^2 = 0.94$
Denklem 3.12	$W = \exp(0.0109\sigma'_v + 0.0322D_r + 2.898D_{50} + 3.834)$	$R^2 = 0.934$
Denklem 3.13	$W = \exp(0.01203\sigma'_v + 0.0643D_r + 5.2749D_{50} + 0.00435)$	$R^2 = 0.976$

W= Kümülatif sıvılaşma enerjisi(J/m³)

σ'_{mean} , P'_0 = Ortalama efektif çevre basıncı(kpa)

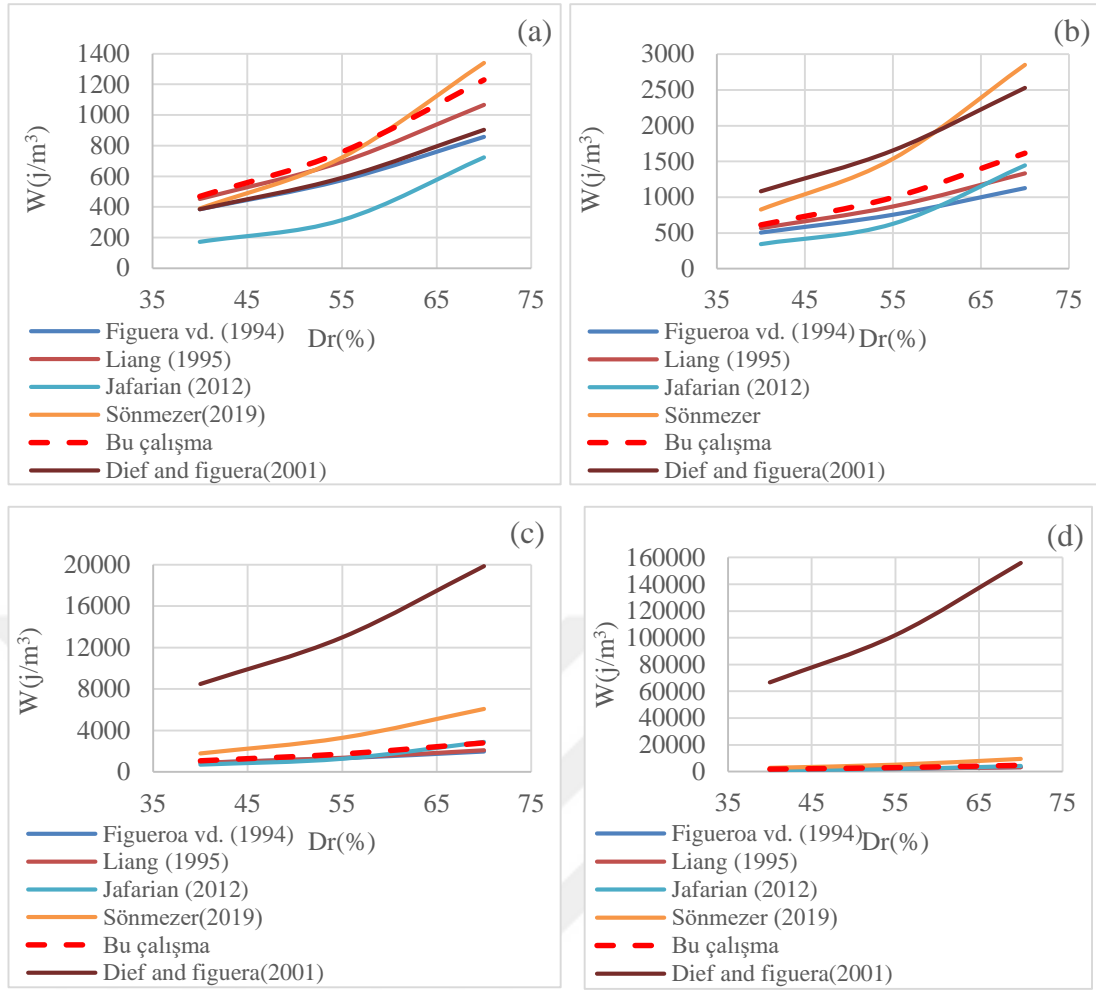
σ'_v = Düşey efektif gerilme(kpa)

D_r = Rölatif sıkılık (%)

D_{50} = Ortalama tane çapı (mm)

Yapılan çalışmalara bakıldığında ağırlıklı olarak içi boş silindirik burulma kesme aleti testi sonuçları kullanılarak bağıntılar türetilmiştir. Ancak sıvılaşma testlerinde, sahadaki zeminin dinamik yükleme şartlarını diğer test aletlerine göre daha iyi modelleyen sadece dinamik basit kesme testi kullanılarak türetilmiş bir hacim başına sıvılaşma enerjisini veren bir bağıntılar sınırlıdır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında türetilen bağıntı dinamik basit kesme testi sonuçlarını kullanarak türetilmiş ilk denklemler arasında olması sebebiyle önem arz etmektedir.

Şekil 3.25 a'da 25 kpa efektif gerilme altında farklı rölatif sıkılıklar için sıvılaşma enerjileri karşılaştırılmış ve diğer çalışmalarda önerilen bağıntıların sonuçları, düşük rölatif sıkılık değerlerinde bu çalışmada önerilen bağıntının sonuçları ile gayet uyumlu değerler verirken, rölatif sıkılığın artışıyla beraber diğerlerinin sonuçları bu çalışmanın sonuçlarından ayrılmaktadır ve daha az enerji değerleri vermektedir. Şekil 3.25 a, Şekil 3.25 b, Şekil 3.25 c ve Şekil 3.25 d'de tüm efektif gerilme değerlerinde, rölatif sıkılığın artışıyla birlikte sıvılaşma enerjileri tüm bağıntı sonuçlarında artmaktadır.



Şekil 3.25. Farklı efektif gerilmeler için farklı çalışmaların rölatif sıklığa bağlı kümülatif sıvılaşma enerjilerinin değişimi **a)** 25 kpa **b)** 50 kpa **c)** 100 kpa **d)** 150 kpa

Ancak Dief ve Figueroa (2001) [93] tarafından önerilen bağıntının sonuçları özellikle efektif gerilme değeri arttıkça bu çalışmada ve diğer çalışmalarda önerilen bağıntıların sonuçlarından belirgin şekilde ayrılmaktadır ve yüksek sıvılaşma enerjisi değerleri vermektedir. 100 ve 150 kpa efektif gerilme değerleri için Figueroa vd. (1994), Liang (1995) ve Jafarian (2012) tarafından yapılan çalışmalarda önerilen bağıntıların sonuçları ise bu çalışmada önerilen bağıntı sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Yukarıda sözü edilen çalışmalarda içi boş silindirik burulma kesme aleti testi daha çok kullanılmıştır. Ancak içi boş silindirik burulma kesme aleti testinde uzun numune

yüksekliği sebebiyle deney esnasında numune içindeki yanal basıncın dağılımı numunenin altında ve üstünde eşit değildir. Fakat uygulanan hücre basıncı numunenin tüm yüksekliği boyunca sabittir. Sonuç olarak, hücre basıncı, numunenin üstünde iç yanal basınçtan daha yüksek, altında ise daha azdır. Bu durum ise numunenin üstte daha ince olmasına neden olmaktadır. Bu sebeple yanal deformasyonlar numunenin her yerinde ideal olarak muhafaza edilememektedir. Ayrıca azaltılmış yüzey alanı nedeniyle, numune üzerine uygulanan kayma gerilmeleri, üniform değildir ve numunenin üstünde daha yüksektir. Numunenin yüksekliği ile ilgili bir başka problem ise özellikle yavaş yükleme oranlarında numune içinde gözenek basıncının yeniden dağılım potansiyelidir. Gözenek basıncının yeniden dağılımı drenajsız şartlarda bile olsa numune içinde lokal hacim değişimi anlamına gelmektedir. Bu lokal hacim değişimi numunenin yüksekliği boyunca lokal rölatif sıkılık değişimine neden olmaktadır. Sözü edilen bu sorunlar nedeniyle (numunenin üstte ince olması ve gözenek basıncının yeniden dağılımı), silindir burulmalı kesme test aletinde test edilen zeminlerin, zaman zaman, dinamik basit kesme test aletinde test edilen aynı zeminlere göre sıvılaşmaya daha az direnç göstermesine neden olabilmektedir [94]. Numunenin sıvılaşmaya daha az direnç göstermesi daha az sıvılaşma enerjisi anlamına gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan dinamik basit kesme testi depremin zemindeki etkisini daha gerçekçi modellediğinden, burada ortaya konan ampirik ilişkinin de sonuçları daha doğru tahmin ettiği düşünölmektedir.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada dinamik basit kesme test aleti kullanılarak deformasyon kontrollü olarak 0.85 mm, 0.45 mm, 0.26 mm ve 0.11 mm tane çaplarında 50 kpa, 100 kpa ve 150 kpa efektif gerilmelerde ve %30, %50, %70 rölatif sıkılıklarda enerjiye dayalı metot kullanılarak 36 tane test gerçekleştirilmiştir. Bu test sonuçları doğrultusunda çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kümülatif sıvılaşma enerjisi, aynı rölatif sıkılık ve aynı tane çapına ait numuneler üzerinde efektif gerilme artışı ile birlikte artmaktadır. Bu durumun nedeninin artan efektif gerilme, tanelerin deformasyon esnasında yeniden dizilimine karşı direnç oluşturarak kümülatif sıvılaşma enerjisini artırdığı düşünülmektedir.
- Kümülatif sıvılaşma enerjisinin, aynı tane çapına ait numunelerde aynı efektif gerilme değerleri altında artan rölatif sıkılık değeri ile birlikte artmaktadır. Bunun nedeninin rölatif sıkılık artışı tanelerin daha sıkı bir şekilde paketlenmesini ve taneler arası teması artırarak sıvılaşmaya karşı bir direnç oluşturduğu düşünülmektedir.
- Kümülatif sıvılaşma enerjisi artan ortalama tane çapı ile birlikte artmaktadır. 0.85 mm ortalama tane çapına ait numunelere ait kümülatif sıvılaşma enerjisi değerleri diğer (0.45, 0.26, 0.11 mm) ortalama tane çaplarındaki kümülatif sıvılaşma enerjisi değerlerinden ayrılmaktadır. Bunun nedeninin artan ortalama tane çapı ile azalan boşluk oranı taneler arasındaki etkileşimi artırmakta ve sıvılaşma için daha yüksek enerji değerlerinin ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- Geliştirilen denklemler sayesinde rölatif sıkılığı, efektif gerilmesi ve ortalama tane çapı bilindiği takdirde istenilen sahanın sıvılaşabilmesi için gereken kümülatif sıvılaşma enerjisi bulunabilmektedir. Ayrıca bu enerji, sahada olması muhtemel deprem tarafından üretilecek dinamik hareket sebebiyle

zemine aktarılabacak birim hacim başına enerji ile karşılaştırılarak bir sahanın sıvılaşp sıvılaşmayacağı belirlenebilmektedir.

- Artan rölâtif sıklık ile birlikte kayma modülü oranındaki azalma daha yavaş olmaktadır. Bu durum tüm gerilme değerlerinde gözlenmektedir. Ayrıca tane çapındaki artışa bağlı olarak da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yani artan tane çapı ile beraber kayma modülü oranındaki azalma çok daha yavaş olmaktadır.
- Gelecekteki araştırmacılar için D_{50} ile ilgili zemin tanelerinin mineralojik yapısı ve şekli de ele alınarak daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir. Özellikle rölâtif sıklığı ayarlama noktasında gelişen teknoloji ile birlikte daha tutarlı sonuçların alınabileceği standartlar geliştirilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/offical19640328033616_30/.
(Erişim tarihi: 22.04.2019).
- [2] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/iscgem866844/>.
(Erişim tarihi: 22.04.2019).
- [3] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci3347678/>.
(Erişim tarihi: 22.04.2019).
- [4] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0006rew/>.
(Erişim tarihi: 22.04.2019).
- [5] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009d4z/>.
(Erişim tarihi: 22.04.2019).
- [6] <https://depts.washington.edu/liquefy/html/why/why1.html>
(Erişim tarihi: 22.04.2019).
- [7] Casagrande, A. Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, reprinted in Contributions to soil Mechanics 1925-1940, BSCE, pp.257-276, 1936a.
- [8] Law, K.T., Cao, Y.L., He, G.N., An energy approach for assessing seismic liquefaction potential. Canadian Geotechnical Journal, 27, 320–329, 1990.
- [9] Altun, S. E. Ü. M. F. İ. M. B. İ. T., & Ansal, A. M. . B. Ü. K. R. ve D. A. E. Ç. İ. T. Anizotropik konsolide zeminlerin dinamik davranışı. Teknik Dergi, 16(2), 3523-3545, 2005.

- [10] Eyyüb Karakan, Tuğba Eskişar, & Selim Altun., The Liquefaction Behavior of Poorly Graded Sands Reinforced with Fibers. *Advances in Civil Engineering*. Vol 2018 2018.
- [11] Eskisar, T., Karakan, E., & Altun, S. Effects of Fibre Reinforcement on Liquefaction Behaviour of Poorly Graded Sands. *Procedia Engineering*, 161, 538–542, 2016.
- [12] ORHAN, M, ATEŞ, A. Rölatif Sıklılığın Saruhanlı (Manisa) İlçesi Zeminlerinin Sıvılaşmasına Etkisinin Dinamik Üç Eksenli Deneyi İle Araştırılması. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 2 (1), 26-41, 2012.
- [13] Abdul Hakam, Laboratory Liquefaction Test of Sand Based on Grain Size and Relative Density. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol 48, Iss 3, Pp 334-344 (3), 334. 2016.
- [14] Wang Y, Wang Y-L., Liquefaction characteristics of gravelly soil under cyclic loading with constant strain amplitude by experimental and numerical investigations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 92:388-396, 2017.
- [15] Simcock K., Davis R., Berrill J., Mullenger G., Cyclic Triaxial Tests with Continuous Measurement of Dissipated Energy. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 6, No. 1, pp. 35-39, March 1983.
- [16] Nemat-Nasser, S., and Shokooh, A., A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4): 659–678, 1979.
- [17] Berrill, J.B., Davis, R.O. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands: revised model *Soils and Foundations*. Vol.25 2, pp. 106-118, 1985.
- [18] Towhata I, Ishihara K. Shear work and pore water pressure in untrained shear. *Soils Found*;25(3):73–84, 1985.

- [19] Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L., Dahisaria, N.M. Evaluation of soil liquefaction by energy principles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (9), pp. 1554-1569, 1994.
- [20] Liang L., Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit. Ph. D. dissertation. Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1995.
- [21] Chen, Y. R. , Hsieh, S. C., Chen, J. W., Shih, C. C., Energy-based probabilistic evaluation of soil liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25(1):55-68, 2005.
- [22] Baziar, M.H., Jafarian, Y., Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model, capacity energy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 1056–1072, 2007.
- [23] Jafarian Y., Towhata I., Baziar MH., Noorzad A., Bahmanpour A., Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments. *Soil Dyn Earthq Eng.* 35:13–28, 2012.
- [24] Polito, C., Green, R.A., Dillon, E., Sohn, C., Effect of load shape on relationship between dissipated energy and residual excess pore pressure generation in cyclic triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 50 (11), pp. 1118-1128, 2013.
- [25] Liang, L., Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liquefaction under random loading: a unit energy approach. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE 121(11). 776-781, 1995.
- [26] Dief, Hesham M., Figueroa, J. Ludwig, Saada, Adel S., Validation of the Energy-Based Method for Evaluating Soil Liquefaction in Centrifuge. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 2001.

- [27] Figueroa, J. L., Dahisaria, M.N., An Energy Approach in Defining Soil Liquefaction. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 407-410, 1991.
- [28] DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.2.000>.
- [29] Mollamahmutoğlu, M. ve Babuğu, F., Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitabevi, Ankara, 2006.
- [30] Ishihara, K., Stability of Natural Deposits During Eartquakes. Proceedings of the Eleventh International Confeence on Soil Mechanics and Foundation Engineering. vol. 1. San Francisco, pp.321-376, 1985.
- [31] KRAMER, S.L, Geotechnical Eartquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653, 1996.
- [32] Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I., Evaluation of liquefaction potential Using Field Performance Data. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol.109, no 3, pp.458-482, 1983.
- [33] Seed, H. B., and Idriss, I. M., Ground Motions and Soil Liquefaction During Eartquakes. Eartquake Engineering Research Institue, University of California, Berkeley. 1982.
- [34] Youd, T. L., and Gilstrap, S. D., Liquefaction and Deformation of Silty and Fine-Grained Soils. Eartquake Geotechnical Engineering, 2d 3d., Balkema, Rotterdam, pp 1013-1020, 1999.
- [35] Poulos, S. J., Castro, G., and France, J. W., Liquefaction Evaluation Procedure. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 111, no. 6, pp. 772-792. 1985.
- [36] ULUSAY, R., TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Mavi Gezegen Popüler Yer Bilimleri Dergisi, Ankara. Sayı 2, s.47-56, 2000.

- [37] Kayabalı, Kamil.,Mollamuratoğlu, Murat., Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı . Gazi Kitabevi, Ankara, 2004.
- [38] Ohsaki, Y., The Effect of Local Soil Conditions upon Eartquake Damage. Paper presented at Session no. 2, Soil Dynamics, Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 3, Mexico, pp.421-422, 1969.
- [39] Seed, H. B., Soil Liquefaction and Cylic Mobility Evaluation for Level Ground During Eartquakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.105, no. GT2, pp.201-255, 1979a.
- [40] Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., and Hasaka, Y., Evaluation of Liquefaction Resistance of Clean Sands Based on High-Quality Undisturbed Samples. Soil and Foundations, vol.29, no. I, pp.93-104. 1989.
- [41] Finn, W. D. L., Bransby, P. L., and Pickering, D. J., Effect of Strain History on Liquefaction of Sands. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol.96, no. SM6, pp. 1917-1934, 1970.
- [42] Seed, H. B., Mori, K., and Chan, C. K., Influence of Seismic History on the History on the Liquefaction Characteristics of Sands. Report EERC 75-25. Eartquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. 1975.
- [43] WANG, J.G.Z.Q. and Law, K.T., Siting in Earthquake Zones balkema Rotterdam/Brookfield. 1994.
- [44] Coduto, D. P., Foundation Design, Principles and Practices. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1994.

- [45] Duman. E., S., Erzincan İl Merkezi Ve Çevresindeki Zeminlerin Standart Penetrasyon Deneyi Verileri Kullanılarak Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi. Yüksek lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2013.
- [46] Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R."Influence of spt Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 111, no.12,pp.1425-1445.1985.
- [47] AIREY, D. W., and WOOD, D. M., An Evaluation direct simple shear tests on clay, Geotechnique, 37(1), pp. 25-35, 1987.
- [48] Seed, H.B., Idriss, I.M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J Soil Mech Found Div., ASCE, 97 (SM8): 1249–1274,1971.
- [49] Valera, J.E and Donovan, N.C., Soil Liquefaction Procedures- A review. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103,No.GT6,June,607-625, 1977.
- [50] Dobry, R, Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M and Powell, D., Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Eartquakes by the Cyclic Strain Method. Building Science Series 138, National Bureau of Standarts, U.S. De. 1982.
- [51] Koester, J.P. and Franklin, A.G., Current Methodologies for Assessing the Potential for Eartquake-Induced Liquafaction in Soils, NUREG/CR-4430, U.S Nuclear Regulatory Commission. 1985.
- [52] Ishihara, K., Liquefaction and Flow Failure during Eartquake. Geotechnique, Vol. 43, No. 3, pp.351-415, 1993.
- [53] Hill, R., The Mathematical Theory of Plasticity. Parendon Press, Oxford. 1950.

- [54] Desai, C.S. and Siriwardane, H.J., Constitutive Laws for Engineering Materials: with Emphasis on Geologic Materials. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ07632. 1984.
- [55] Saada, A.S., Elasticity: Theory and Application. Robert E. Krieger Publishing Company, Inc., Malabar, Florida, 1974.
- [56] Timoshenko, S.P. and Goodier, HN. Theory of Elasticity. 3rd. ed, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [57] Love, A.E.H., A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. 4th rd., Dover Publication, New York, 1944.
- [58] Gutenberg, B. and Richter, C.F. " Earquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration," Buleetin of the Seismological Society of America, Vol.32, No. 3, pp. 163-191, 1942.
- [59] Gutenberg, B. and Richter, C.F., Earquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. Buleetin of the Seismological Society of America, Vol. 46, pp. 105-145, 1956.
- [60] Housner, G.w., Strong Ground Motion in Earthquake Engineering. Ed. Robert L. Wiegel, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 75-911970.
- [61] Housner, G.W. and Jennings, P.C., "The Capacity of Extreme Earthquake Motions to Damge Structures," in "Structural and Geotechnical Mechanics- A Volume Honoring Nathan M. Newmark," Ed. W.J. Hall Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 102-116, 1977.
- [62] Zahrah, T. F. and Hall, W.J., Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 8 August, 1757-72, 1984.

- [63] Akiyama, H., Earthquake Resistant Design Based on the Energy Concept. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, August 2-9, 1988, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. V, 905-910, 1988.
- [64] Katada, T., Higashiyama, A. and Naruyama, M., Analysis of the Energy Response of Soil to Earthquake. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, August 2-9, 1988, Tokyo- Kyoto, Japan, Vol. VIII, 849-854, 1988.
- [65] Huang, Z., Wang, S. and Lai, M., Energy Analysis for the Non-linear Earthquake Responses of Structures. Proceedings of Tenth World Conference on Earthquake Engineering, 1992, Balkema. Rotterdam, 697-700, 1992.
- [66] Davis, R. O. and Berill, J. B., Energy Dissipation and Seismic Liquefaction in Sands. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19. pp. 59-68, 1982.
- [67] Dahisaria, M. N., Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, 1991.
- [68] Figueroa, J.L., A Method for Evaluating Soil Liquefaction by Energy Principles. proceedings, Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, CA, May, 1990.
- [69] Okada, N, and Nemat-Nasser, S., Energy Dissipation in Inelastic Flow of Saturated Cohesionless Granular Media. Geotechnique, Vol. 44, No. 1, 1-19, 1994.
- [70] Green, R.A. Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 397 p. 2001.

- [71] Zhang, W., Goh, A.T.C., Zhang, Y., Chen, Y., Xiao, Y., Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines. *Engineering Geology*, 188, 29-37, 2015.
- [72] Ostadan, F., Deng, N., Arango, I., Energy-based method for liquefaction potential evaluation - Phase I, feasibility study. U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research. 1996.
- [73] Alavi, A.H., Gandomi, A.H. Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction. *Geoscience Frontiers* 3(4), 541-555, 2012.
- [74] ASTM D854. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. 2005.
- [75] ASTM D 4253-00 "Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table" Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-14, 2002.
- [76] ASTM D 4254-00 "Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-9, 2002.
- [77] Ye, Yin-can., *Marine Geo-Hazards in China*, 1st edition, Elsevier. 2017.
- [78] Wijewichreme, D., Sriskandakumar, S., and Byrne, P.M., "Cyclic Loading Response of Loose Air Pluviated Fraser River Sand for Validation of Numerical Models Simulating Centrifuge Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 42, No. 3, pp. 41-66, Canada, 2005.

- [79] Silver, L.M., and Park, T.K., "Liquefaction Potential Evaluated from Cyclic Strain-Controlled Properties Tests on Sands", *Soils and Foundations*, Volume 16, No. 3, pp. 51-65, USA, 1976.
- [80] Talagnov, K.V., "Stress-Strain Transformation and Liquefaction of Sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 15, pp. 411-418, UK, 1996.
- [81] Zaheer Ahmed Almanı , Kamran Ansarı, And Naeem Azız Memon, Liquefaction Potential of Silty Sand in Simple Shear Mehran University Research Journal of Engineering & Technology, Volume 32, No. 1, January, 2013.
- [82] GDS, "Equipment User Manual", GDS Corporation, UK, 2006.
- [83] Movahed, V., Sharafi, H., Baziar, M.H., Shahnazari, H. Comparison of strain controlled and stress controlled tests in evaluation of fines content effect on liquefaction of sands-An energy approach. *Geotechnical Special Publication*, (211GSp) pp.1084-1814, 2011.
- [84] Kusky, P.J., Influence of loading rate on the unit energy required for liquefaction. M.S. thesis, Dept. of civil enrg., Case Western Reserve Univ., Cleveland, OH.,1996.
- [85] Polito, C.P. The effects of nonplastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, Va., 1999.
- [86] Astaneh, S.M.F. "Effects o f Earthquake on Saturated Soil Embankments". Ph.D.Dissertation, Department o f Civil, Environmental and Architectural Engineering,University o f Colorado, Boulder, Colorado. 1993.
- [87] Kuerbis, R. , and Vaid, Y.P. , Sand Sample Preparation: The Slurry Deposition Method. *Soils and Foundations*, Volume 28, No. 4, pp. Japan,107-118, 1998.

- [88] Walker, B.P., Whitaker, T., An apparatus for forming beds of sands for model foundation tests. *Geotechnique* 17(2), 161–167, 1967.
- [89] Kokusho T. Liquefaction potential evaluations: energy-based method versus stress-based method. *Can Geotech J*; 50:1–12, 2013.
- [90] Hazirbaba K, Rathje EM. Pore pressure generation of silty sands due to induced cyclic shear strains. *J Geotech. Geoenviron Eng ASCE*; 135(12):1892–905, 2009.
- [91] Carraro JAH, Prezzi M, Salgado R., Shear strength and stiffness of sands containing plastic or nonplastic fines. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*;135(9):1167–78, 2009.
- [92] Hardin, B.O. and Drnevich, V.P., Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *ASCE Journal of The Soil Mech. And Found. Eng. Div.* 98, 667-692, 1972a.
- [93] Dief, H.M., Figueroa, J.L., Liquefaction assessment by the energy method through centrifuge modeling. In: Zeng, X.W. (Ed.), *Proceedings of the NSF International Workshop on Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering*. CWRU, Cleveland, OH. 2001.
- [94] Kammerer, A. and Pestana, J.M., Undrained response of Monterey 0/30 sand under multidirectional cyclic simple shear loading conditions. Technical report University of California, Berkeley, California, U.S.A. 2002.