



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



SİİTLİ ZEMİNLERİN SIVILAŞMA DAVRANIŞININ ENERJİ TEMELLİ YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Furkan KUNDUZCU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2021

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

SİLT Lİ ZEMİNLERİN SIVILAŞMA DAVRANIŞININ ENERJİ TEMELLİ YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Furkan KUNDUZCU

Danışman: Prof. Dr. Selim ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Yüksek Lisans Programı

İzmir
2021



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Siltli Zeminlerin Sıvılaşma Davranışının Enerji Temelli Yöntemle İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

27 /10/ 2021

Furkan KUNDUZCU

ÖZET**SİLTİLİ ZEMİNLERİN SIVILAŞMA DAVRANIŞININ ENERJİ
TEMELLİ YÖNTEMLE İNCELENMESİ**

KUNDUZCU, Furkan

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selim ALTUN

Ekim 2021, 95 sayfa

Bu çalışmada, düşük plastisiteli siltlerin değişen plastisite indisiiyle sıvılaşmaya karşı direncinin nasıl değiştiği ve enerji temelli yöntemin düşük plastisiteli siltlerde ne kadar tutarlı sonuçlar verdiği, zeminin değişen parametrelerinden ne yönde etkilendiği ve uygulanan çevrimsel gerilme oranından etkilenip etkilendiği incelenmiştir. Bu kapsamda, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FGA-2021-22457 kodlu bilimsel araştırma projesinden alınan deneysel veriler kullanılmıştır. Kullanılan deneysel veriler, 200 numaralı elek yardımıyla elde edilmiş üç farklı plastisite indisine ($PI=6,9,17$) sahip düşük plastisiteli silt zeminler ile 50 mm çapında 100 mm yüksekliğe sahip numuneler, ıslak tokmaklama tekniği kullanılarak iki farklı rölatif sıkılıkta ($D_r=\%40$ ve $\%80$) hazırlanmış ve dinamik üç eksenli deneyleri yapılarak elde edilmiştir. Enerji temelli sıvılaşma yönteminin benimsendiği çalışmada sıvılaşma enerjisinin uygulanan çevrimsel gerilme oranından (CSR) ne yönde etkileneceğini gözlemleyebilmek için yukarıda tarif edilmiş altı farklı kombinasyonda hazırlanmış zemin numunelerine, sabit çevresel basıç altında ($\sigma_c=100$ kPa) dört farklı CSR oranında izotropik yükleme uygulanmış olan deneylerin kullanılmasına dikkat edilerek, bu doğrultuda toplamda 24 adet dinamik üç eksenli deney sonucu değerlendirilmiştir. Yapılmış deney sonuçlarından elde edilen verilere göre düşük plastisiteli siltlerde sıvılaşma direncinin değişen rölatif sıkılık ve plastisite indisinden nasıl etkilendiği incelenmiştir. Enerji temelli sıvılaşma yöntemin özelinde ise birim hacimde biriken enerjinin (ΔW), çevrim sayısı ile ilişkisi; çift genlikli eksenel deformasyon ile ilişkisi; gelişen residüel boşluk suyu basıncı ile ilişkisi ve numuneye uygulanan çevrimsel gerilme oranının değişmesinden nasıl etkilendiği incelenmiştir. Ayrıca sıvılaşma kriteri olarak kabul edilen $\%5$ çift genlikli eksenel deformasyona kadar elde edilen birim hacimde biriken enerji değerleri ile çoklu regresyon analizi yapılarak düşük plastisiteli siltler için model oluşturulmaya çalışılmıştır. Çoklu regresyon analizi yapılırken çevrimsel

gerilme oranı dahil edilerek ve edilmeyerek olmak üzere iki farklı yaklaşım benimsenmiştir. Böylelikle çevrimsel gerilme oranının, birim hacimde biriken enerji değerine ne kadar etkisi olduğu incelenmiştir. Oluşturulan modellere ek olarak, %10 çift genlikli eksenel deformasyona kadar elde edilen birim hacimde biriken enerji değerleri için aynı işlemler tekrarlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Düşük plastisiteli silt, sıvılaşma, enerji temelli yöntem.



ABSTRACT**INVESTIGATION OF LIQUEFACTION BEHAVIOR OF SILTY SOILS USING ENERGY BASED METHODS**

KUNDUZCU, Furkan

M.Sc.Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selim ALTUN

October 2021, 95 pages

In this study, the tendency of resistance to liquefaction of low plasticity silts with varying plasticity index, consistency of results from the application of energy-based method and effect of different soil parameters, in particular, the effect of CSR (cyclic stress ratio) on this consistency is investigated. In this context, experimental data obtained from scientific research project FGA-2021-22457, supported by Ege University Scientific Research Funds were used. The experimental data consists of cyclic triaxial tests on samples with dimensions of 50 mm diameter and 100 mm height. Three different types of silt samples of low plasticity ($PI=6,9,17$) were obtained by using wet tamping method prepared at two different relative densities (40 and 80%). In implementation of energy-based liquefaction method, in order to observe how the liquefaction energy is affected by the cyclic stress ratio (CSR), isotropic loading is applied to samples of four different CSR levels consolidated under constant cell pressures of 100 kPa, and finally, results of a total of 24 cyclic triaxial tests were evaluated. Using previously obtained test results, the effects of varying relative density and plasticity index on liquefaction resistance of silts of low plasticity was investigated. In the energy-based liquefaction method, the change of accumulated energy per unit volume (ΔW) by the number of cycles, double amplitude axial strain, developed residual pore water pressure and change in the cyclic stress ratio applied was investigated. In addition, determining the energy accumulated per unit volume (ΔW) up to 5% double amplitude axial strain as a liquefaction criterion, a multiple regression model for silts of low plasticity was proposed. In this regard, models of two different approached were proposed: one using plasticity index (PI), CSR and relative density (D_r) as independents, and the other is established based on PI and D_r . Thus, the effect of the cyclic stress ratio on the energy value accumulated per unit volume is investigated. In addition to the models created,

same processes are repeated for energy values accumulated per unit volume up to 10% of double amplitude axial strain.

Keywords: Low plasticity silt, liquefaction, energy based method.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans danışmanlığımı üstlenerek konu seçiminde, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Selim ALTUN'a teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Gerek bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım gerekse çalışma süresi boyunca hiçbir yardımını esirgemeyen ve yol gösteren Arş. Gör. İrem BOZYİĞİT'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca bilgilerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli hocalarıma teşekkürlerimi özellikle belirtmek isterim.

Karşılaştığım bütün zorlukları aşarken hep yanımda olan, bana destek ve güç veren, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili annem, babam ve değerli abime saygılarımı sunar ellerinden öperim. En büyük moral kaynağım ve her düştüğümde kalkmamda bana destek olan sevgili Ecemnur ÇAKIR'A en derin ve en içten duygularıyla teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

Kabul ve Onay Sayfası.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
TEŞEKKÜR.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	2
2. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA	3
2.1 Sıvılaşmanın Tanımı	3
2.2 Zemin Sıvılaşmasının Tarihsel Süreci ve Gelişimi	3
2.3 Sıvılaşmanın Oluşumu	5
2.4 Sıvılaşma Türleri.....	6
2.4.1 Akma sıvılaşması	6
2.4.2 Çevrimsel hareketlilik	7
2.5 Sıvılaşmanın Laboratuvar Deneyleri ile İncelenmesi	8
2.5.1 Dinamik Üç Eksenli Deney Aleti	8
2.6 Zeminlerin Sıvılaşma Davranışına Etki Eden Faktörler	10
2.6.1 Rölatif sıkılık	10
2.6.2 Zeminin dane boyutu, dane şekli ve gradasyonu	12
2.6.3 İnce dane oranının etkisi	12
2.6.4 Boşluk oranı.....	13

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.6.5 Sismik geçmiş.....	14
2.6.6 Yaşlanma ve çimentolanma etkisi	14
2.6.7 Aşırı konsolidasyon oranı	15
2.6.8 Tekrarlı yükün şekli	16
2.6.9 Tekrarlı yükün frekansı.....	16
2.6.10 Çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve çevrim sayısı	17
2.6.11 Deprem büyüklüğü ve süresi.....	18
2.6.12 Deprem odak uzaklığı	18
2.6.13 Yeraltı su seviyesi	18
2.6.14 Drenaj koşulları	19
2.6.15 Sıvılaşabilir zemin derinliği	19
2.6.16 Jeolojik oluşum ve katmanlaşma şekli	19
2.7 Zeminlerin Sıvılaşma Davranışına Etki Eden Deneysel Faktörler	20
2.7.1 Numune boyutu.....	20
2.7.2 Membran etkisi	21
2.7.3 Numune hazırlama tekniği.....	21
2.8 Siltli Zeminlerin Sıvılaşması.....	23
2.8.1 Granüler zeminlerde silt içeriğinin sıvılaşmaya etkisi.....	23
2.8.2 Plastik silt veya silt-kil karışımlarda sıvılaşma	25

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.9 Enerji Temelli Sıvılaşma Analizi	33
2.10 Sıvılaşma Sonucunda Oluşan Hasar Türleri	40
2.10.1 Taşıma gücü kaybı.....	40
2.10.2 Akma göçmesi	41
2.10.3 Yanal yayılma.....	41
2.10.4 Kum kaynaması	42
2.10.5 Gömülü yapıların yüzeye çıkması	43
2.10.6 İstinat yapısı yenilmesi	43
3. MALZEME VE METOD	45
3.1 Zeminler ve İndeks Özellikleri	45
3.1.1 Dane çapı dağılımı	45
3.1.2 Marjinal boşluk oranları ve dane özgül ağırlığı.....	46
3.1.4 Atterberg limitleri	46
3.2 Dinamik Üç Eksenli Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	47
3.3 Enerji Temelli Sıvılaşma Analiz Yöntemi	49
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
4.1 Rölatif Sıkılığın Sıvılaşma Enerjisine Etkisi.....	54
4.2 Plastisite İndisinin Sıvılaşma Enerjisine Etkisi.....	56
4.3 Çevrim Sayısı İle Çift Genlikli Eksenel Deformasyon İlişkisi ve Normalize Sıvılaşma Enerjisi İlişkisi	58

İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa**

4.4 Normalize Sıvılaşma Enerjisi İle Çift Genlikli Eksenel Deformasyon İlişkisi	64
4.5 Normalize Enerji ile Residüel Boşluk Suyu Basıncı Gelişimi	67
4.6 Deney Sonuçlarına Göre Elde Edilen Modeller	71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
5.1 Sonuçlar	77
5.2 Öneriler	79
KAYNAKLAR DİZİNİ	81
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Doygun kumda dane diziliminin çevrimsel yüklemekten etkilenmesi (PHR, 1997; Akkaş, 2006).	6
2.2 (a) Depremin zeminde oluşturduğu kayma gerilmesi, (b) Laboratuvarda uygulanan eşdeğer kayma gerilmesi (Ural, 2008).	8
2.3 (a) İzotropik konsolide koşullar, (b) Çevrimsel deviatör gerilme genliğinin konsolidasyon sırasındaki deviatör gerilmeden daha büyük olduğu anizotropik konsolide koşullar, (c) Çevrimsel deviatör gerilme genliğinin konsolidasyon sırasındaki deviatör gerilmeden daha küçük olduğu anizotropik koşullar (Kramer, 1996; Akkaş, 2006)	10
2.4 Rölatif sıklık ile sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişki (Wiegel, 1970; Akkaş, 2006).	11
2.5. Sıvılaşma gözlenmiş zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri (Ishihara, 1985; Aydın, 2008).	13
2.6 Boşluk Oranı – Birim Deformasyon grafiği (Akkaş, 2006)..	13
2.7 Kumun sıvılaşmasında sismik geçmişin etkisi (Seed, 1976; Akkaş, 2006).	14
2.8 El Cobre kumunun farklı yaşlar için dinamik üç eksenli deneydeki direnci (Troncoso et al., 1988; Ural, 2008)	15
2.9 Aşırı konsolidasyon oranının, çevrim sayısı ile Çevrimsel gerilme oranı arasındaki ilişkiye etkisi (Sancio, 2003; Ural, 2008)	16
2.10 Sıvılaşma direncinde dalga formunun etkisi (Silver, 1977; Ural, 2008) .	16
2.11 Farklı deviatör gerilme değerlerinde %3 tek genlikli eksenel birim deformasyon için gerekli çevrim sayısı (Sancio, 2003; Ural, 2008)	17
2.12 Adapazarı siltinde farklı frekanslarda çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı (DGO) ilişkisi (Ural, 2008)	17

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

2.13	Farklı sıkıştırma yöntemlerinin çevrim sayısı ile çevrimsel gerilme oranı arasındaki ilişki (Mulilis et al., 1977; Ural, 2008).....	22
2.14	Silt-kum karışımlarında intergranüler (e_g) ve interfine (e_f) boşluk oranı değişimi (Karakan ve Altun, 2016).....	25
2.15	Wang (1979) tarafından önerilen Çin kriterleri (Finn et al., 1994; Mert, 2018).....	26
2.16	Düşük plastisiteli siltin sıvılaşması için gerekli CSR-N ilişkisi (Sandoval, 1989; Prakash and Sandoval, 1992).....	28
2.17	Kil yüzdesi ile çevrimsel gerilme oranı arasında bağıntı (Liang et al., 2000).....	29
2.18	Seed et al. (2003) tarafından ince-daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen kriter	31
2.19	Bray et al. (2004) tarafından ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen kriter	32
2.20	Boulanger and Idriss (2006) tarafından ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen kriter	32
2.21	Tipik bir gerilme-birim deformasyon histerez döngüsü (Ni et al, 2020) .	33
2.22	Sıvılaşma için gerekli normalize enerji oranları a) $F_c=0$, b) $F_c>0$ (Kokusho, 2013)	34
2.23	Başlangıç deviatör gerilme ile sönümlenme arasında ki ilişki (Ni et al, 2020)	35
2.24	Enerji kapasitesinin rölatif sıkılık ve çevresel basınç ile değişimi (Amini and Noorzad, 2018).....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.25 %50 rölatif sıklıkta, %5 ve %30 silt içeriğinde gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü deneyler a) 20/30 kumu b) 30/50 kumu (Sönmezer, 2020)	39
2.26 Taşıma gücü kaybı oluşum şeması (Doğan, 2015).....	40
2.27 Taşıma gücü kaybı sonucu yan yatan bir bina Gölcük Türkiye-1999 (Doğan, 2015).....	40
2.28 Niigata Japonya-1964 depremi sonucu taşıma gücü kaybına uğramış zemin sonucu devrilen binalar (Doğan, 2015).	40
2.29 Taşıma gücü kaybı sonucu devrilen binalar Adapazarı Türkiye-1999 (Doğan, 2015).....	40
2.30 a) Akma göçmesinin oluşum biçimi, b) San- Fransisco'daki Merced Gölü kıyısında 1957'de meydana gelen bir akma göçmesi örneği (Doğan, 2015).....	41
2.31 Yanal yayılma olayı oluşum şeması (Doğan, 2015).....	42
2.32 Nisqually A.B.D. – 2001 depremi sonucu meydana gelen yanal yayılma örneği (Doğan, 2015).	42
2.33 Kum kaynaması oluşumunu gösteren kesit (Ulusay, 2000; Mert, 2018) .	42
2.34 Kum kaynaması New Madrid A.B.D. – 1811 (Doğan, 2015).	42
2.35 a) Gömülü yapı yüzeylemesi şeması, b) Tottori Japonya-2000 depreminde meydana gelen bir gömülü yapı yüzeylemesi (Doğan,2015)	43
2.36 Meydana gelmiş farklı lokasyonlarda; a) Anayol üzerinde, b) Tali yol üzerinde bulunan gömülü yapı yüzeylemeleri (Doğan, 2015)	43
2.37 Sıvılaşma nedeniyle oluşan istinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998; Mert, 2018).....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.38 Kobe Japonya- 1995 depremi sonrası gözlenen farklı noktalardan a) ve b) istinat yapısı göçme örnekleri (Doğan, 2015).....	44
3.1 Düşük plastisiteli silt zeminlerin dane boyu dağılım eğrisi.	45
3.2 Tekrarlı yükler altında deviatör gerilme ve eksenel şekil değiştirme ilişkisi.....	48
3.3 Tekrarlı yükler altında zeminin gerilme izi.....	48
3.4 Tekrarlı yükler altında çevrim sayısı ve eksenel şekil değiştirme ilişkisi.	48
3.5 Tekrarlı yükler altında çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı ilişkisi.	49
3.6 Gerilme-birim deformasyon histeris döngüsünde yamuk alan teorisi (Ni et al, 2020).	50
3.7 Birim hacimde biriken enerji değerlerinin çevrim sayısı ile değişimi.. ...	51
3.8 Boşluk suyu basıncı ile birim hacimde biriken enerji ilişkisi.	51
4.1 $PI=6$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.....	54
4.2 $PI=9$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.....	55
4.3 $PI=17$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.....	56
4.4 $D_r=\%40$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri	57
4.5 $D_r=\%80$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 PI=6 olan numunelerde çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon değişimi	59
4.7 PI=6, $D_r=\%40$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi... ..	60
4.8 PI=6, $D_r=\%80$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi... ..	60
4.9 PI=9 olan numunelerde çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon değişimi.	61
4.10 PI=9, $D_r=\%40$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi	61
4.11 PI=9, $D_r=\%80$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi	62
4.12 PI=17 olan numunelerde çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon değişimi	63
4.13 PI=17, $D_r=\%40$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi	63
4.14 PI=17, $D_r=\%80$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi	64
4.15 PI=6 olan numunelerde normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli eksenel deformasyon arasındaki ilişki.....	65
4.16 PI=9 olan numunelerde normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli eksenel deformasyon arasındaki ilişki	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

- 4.17** $PI=17$ olan numunelerde normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli eksenel deformasyon arasındaki ilişki 66
- 4.18** $PI=6$, $D_r=\%40$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.....67
- 4.19** $PI=6$, $D_r=\%80$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.....68
- 4.20** $PI=9$, $D_r=\%40$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.....69
- 4.21** $PI=9$, $D_r=\%80$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.....69
- 4.22** $PI=17$, $D_r=\%40$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.....70
- 4.23** $PI=17$, $D_r=\%80$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.....71

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Siltli ve killi kumların sıvılaşılabirliği (Andrews ve Martin, 2000; Mert, 2018).....	30
2.2 Denklem (2.3)'de kullanılan parametre tanımları (Baziar et al, 2011)....	36
3.1 Zeminlerin dane özgül ağırlıkları ve marjinal boşluk oranları.	46
3.2 Zeminlerin Atterberg limit değerleri ve zemin sınıfları	46
4.1 Deneye tabi tutulan numuneler ve elde edilen birim hacim enerjileri.....	53
4.2 %5 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ve oluşturulan modellerin öngördüğü değerler.	73
4.3 %10 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ve oluşturulan modellerin öngördüğü değerler.	74



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$a_{\max}$	Maksimum deprem yer ivmesi (m/sn^2)
C_u	Üniformluk katsayısı
CSR	Çevrimsel gerilme oranı
CRR	Çevrimsel mukavemet oranı
D_r	Rölatif sıkılık
D_{50}	Ortalama dane boyutu
e	Boşluk oranı
e_{kritik}	Kritik boşluk oranı
e_f	İnce daneler (interfine) arası boşluk oranı
e_g	Kaba daneler (intergranüler) arası boşluk oranı
$e_{\max}$	Maksimum boşluk oranı
$e_{\min}$	Minimum boşluk oranı
G_s	Zemin dane özgül ağırlığı
f	Çevrimsel gerilmenin frekansı (Hz)
F_C	Zeminde kütlece bulunan ince dane miktarı (%)
LL	Likit limit
M_w	Deprem moment büyüklüğü
M_s	Deprem yüzey dalgası büyüklüğü

N	Çevrim sayısı
u	Boşluk suyu basıncı (kPa)
$u_{\max}$	Maksimum aşırı boşluk suyu basıncı (kPa)
OCR	Aşırı konsolidasyon oranını
PL	Plastik Limit
PI	Plastisite indisi
R^2	Detarminasyon katsayısı
R_u	Boşluk suyu basıncı oranı
$_{res}R_u$	Residüel boşluk suyu basıncı oranı
w	Zeminin su içeriği (%)
w_c	Zeminin doğal koşullardaki su içeriği (%)
q	Deviatör gerilme (kPa)
δW	Çevrim başına birim hacimde biriken enerji (kJ/m ³)
ΔW	Birim hacimde biriken enerji (kJ/m ³)
σ_c	Çevresel gerilme (kPa)
σ'_c	Çevresel efektif gerilme (kPa)
σ'_{ort}	Ortalama etkin çevre gerilmesi (kPa)
$\mathcal{E}_{DA}$	Çift genlikli eksenel deformasyon (%)
$\mathcal{E}_a$	Eksenel birim deformasyon (%)
Γ	Uygulanan kesme deformasyon gelinliği (%)

1. GİRİŞ

Sismik etkiler sebebiyle zeminde aşırı boşluk suyu basıncının ani artışıyla birlikte zeminin rijitliğini kaybederek sıvı gibi davranması sonucu meydana gelen olaya sıvılaşma denilmektedir. Sıvılaşma olayının mekanizmasıyla ilgili çalışmalar 1964 yılında meydana gelen Niagata – Japonya ($M_w=9,2$) ve Büyük Alaska – A.B.D. ($M_s=7,5$) depremlerinde sıvılaşma nedenli yıkıcı hasarlar meydana gelmesi sonucunda hızlanmıştır; fakat, zeminlerde sıvılaşmanın suya doymuş kum zeminlerde meydana gelebileceği düşüncesiyle ilk yapılan çalışmalar kum zeminler üzerine yoğunlaşmıştır. 1975 Haicheng ile 1976 Tangshan depremlerinin yaşanmasından sonra siltli zeminlerinde sıvılaşabileceği gözlemlenmiştir. 1995 yılında meydana gelen Hyogoken-Nanbu depremi ve sonrasında 1999 yılında ülkemizde meydana gelen Marmara depreminde kumlu zeminlerin yanı sıra düşük plastisiteli siltlerin de sıvılaşabileceği bir kez daha gün yüzüne çıkmıştır (Erken, 2004; Ural, 2008). Yaşanılan bu doğa olayları sonrası kum zeminlerin sıvılaşmasıyla ilgili çalışmaların yanı sıra siltli kum, silt ve silt-kil karışımı zeminlerin sıvılaşma potansiyeli de araştırma konusu haline gelmiştir. Siltli zeminlerin sıvılaşmasıyla ilgili çalışmalarda ise başta rölatif sıkılık (D_r) olmak üzere kil içeriği dikkate alınmıştır. Fakat kil içeriğiyle ilgili tutarsız sonuçların olduğu ve bu yaklaşımın doğru olmadığı düşüncesiyle araştırmacılar kil içeriği yerine plastisite indisinin (PI) sıvılaşma potansiyelini belirlemede daha doğru bir parametre olduğunu savunmuşlardır ve yapılan çalışmalar bu yönde şekillenmeye başlamıştır (Sancio et al., 2002; Seed et al., 2003; Bray et al., 2004; Bray and Sancio, 2006; Boulanger and Idriss, 2006; Bilge ve Çetin, 2017).

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede tercih edilen üç genel yöntem bulunmaktadır. Bunlar; 1) Gerilme temelli yöntem (Seed and Idriss, 1971), 2) Birim deformasyon temelli yöntem (Dobry et al, 1982) ve 3) Enerji temelli yöntemdir (Nemat-Nasser and Shokooh, 1979). Yukarıda bahsedilen çalışmalar da dahil olmak üzere sıvılaşmayla ilgili çalışmaların genelinde başta birinci yöntem olmak üzere ilk iki yöntem daha çok tercih edilmektedir. Fakat enerji temelli yöntem, gerilme temelli ve birim deformasyon temelli yöntemler ile kıyaslandığında başlıca avantajları bulunmaktadır. Bunları kısaca özetleyecek olursak, zeminin sıvılaşma direncini bulabilmek amacıyla gerilme veya birim deformasyon ile çevrim sayısı ilişkisini kullanabilmek için birden fazla deney yapılmasına gerek olmaması; yöntemin hem gerilmeyi hem de birim deformasyonu kapsaması; enerjinin tek bir sayı ile ifade edilen skaler bir nicelik olması olarak gösterilebilmektedir (Law vd., 1990; Liang vd., 1995). Ayrıca sıvılaşma analizlerinde gerilme ve birim deformasyon temelli yöntemleri kullanabilmek için deprem tarafından oluşturulan talebi belirlemede ana girdi olarak zemin seviyesindeki a_{max} değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle anakaya seviyesindeki a_{max} değerini zemin seviyesindeki a_{max} değerine dönüştürmek için zemin tepki analizi gerçekleştirilmelidir. Fakat enerji temelli yöntemde bu durum geçerli değildir. Bir zeminin sıvılaşmaya karşı direnci, birim hacim başına düşen enerji olarak belirlenebilmekte; herhangi bir sismik olayın enerjisi ise kinetik enerji formülü yardımıyla belirlenebilmektedir. Elde edilen bu iki değer birbiriyle kıyaslanarak sıvılaşma analizi yapılabilmektedir (Kayabalı vd., 2018).

1.1 Amaç ve Kapsam

Enerji temelli yöntem özelinde literatür incelendiğinde yapılan çalışmaların sadece kum zeminlerle ilgili olduğu ve siltli zeminlerde enerji temelli yöntem kullanılarak yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanılmadığı görülmektedir. Enerji temelli yöntemin oldukça avantajlı bir yöntem olması sebebiyle siltli zeminlerin sıvılaşma analizinde ne kadar tutarlı davranacağı merak konusu haline gelmiştir. Ayrıca siltli zeminlerin sıvılaşma davranışı konusunda tam olarak fikir birliğine varılamaması sebebiyle konunun farklı bir bakış açısından değerlendirilmesinin faydalı olabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle yapılan tez çalışması kapsamında başlıca iki amaç bulunmaktadır. Bu amaçlardan ilki, düşük plastisiteli siltlerin değişen plastisite indisiiyle sıvılaşmaya karşı direncinin nasıl değiştiğini inceleyerek daha önceden yapılan çalışmalara katkıda bulunabilmektir. İkinci ise enerji temelli yöntemin düşük plastisiteli siltlerde ne kadar tutarlı sonuçlar verdiği, zeminin değişen parametrelerinden ne yönde etkilendiği ve uygulanan çevrimsel gerilme oranından etkilenip etkilenmediğini gözlemlemektir. Bu amaçlar doğrultusunda çalışma kapsamında Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FGA-2021-22457 kodlu bilimsel araştırma projesinden alınan deneysel veriler kullanılmıştır. FGA-2021-22457 kodlu proje kapsamında, 200 numaralı elek yardımıyla elde edilmiş üç farklı plastisite indisine ($PI=6,9,17$) sahip düşük plastisiteli silt zeminler ile 50 mm çapında 100 mm yüksekliğe sahip numuneler, ıslak tokmaklama tekniği kullanılarak iki farklı rölatif sıklıkta ($D_r=\%40$ ve $\%80$) hazırlanmış ve gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Enerji temelli sıvılaşma yönteminin benimsendiği çalışmada sıvılaşma enerjisinin uygulanan çevrimsel gerilme oranından (CSR) ne yönde etkileneceğini gözlemleyebilmek için yukarıda tarif edilmiş altı farklı kombinasyonda hazırlanmış zemin numunelerine, sabit çevresel basıç altında ($\sigma_c=100$ kPa) dört farklı CSR oranında izotropik yükleme uygulanmış olan deneylerin kullanılmasına dikkat edilerek, bu doğrultuda toplamda 24 adet dinamik üç eksenli deney sonucu değerlendirilmiştir.

2. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

2.1 Sıvılaşmanın Tanımı

Latince “liquefacere” kelimesinden türetilmiş yumuşamak, erimek veya zayıflamak anlamına gelen sıvılaşma, kumlarda ani sismik etkilerle oluşan direnç kaybı olarak tarif edilmiş genel bir terimdir (The English-Language Institute of America, 1971; Polito, 1999; Ural, 2008).

Geoteknik mühendisliğinde ilk defa 1953 yılında Japon araştırmacılar Mogami ve Kubo (1953) tarafından, kullanılan sıvılaşma terimi; suya doygun kohezyonsuz zeminlerin, suyun drene olamadığı yükleme koşullarında, tekdüze veya tekrarlı şekilde örselenmesinden kaynaklanan zemin deformasyonlarını kapsayan davranış biçimi olarak tanımlanmıştır (Kramer and Seed, 1998; Akkaş, 2006).

Youd (1984) tarafından sıvılaşma, derinlik boyunca veya belirli bir derinlikte dinamik etkilerden dolayı daneler arası efektif gerilmenin, boşluk suyu basıncının artmasından dolayı azalması durumu olarak tanımlanmıştır (Doğan, 2015).

Genel olarak sıvılaşma; depremin veya farklı bir dinamik etkilerin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kalan doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerin, drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte efektif gerilmenin azalması sonucu kayma mukavemetinin kısmen veya tamamen kaybedilmesinden dolayı, zeminin sıvı gibi davranması olayına denilmektedir. Daha yalın bir dille, zeminin taşıma gücünü kaybettiği noktada danelerin birbirine göre hareket etmesidir. Sıvılaşmada temel faktör boşluk suyu basıncının artmasıdır.

2.2 Zemin Sıvılaşmasının Tarihsel Süreci ve Gelişimi

Casagrande tarafından, 1936 yılında “kritik boşluk oranı” yaklaşımının, hangi koşullarda sıvılaşmanın olabileceğine yönelik kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması üzerine yapılan ilk çalışma olabileceği düşünülmektedir. Çalışmaya göre; kesme gerilmesine maruz kalan sıkı kumlar hacimsel olarak genişlerken, aynı şartlar altında gevşek kumlarda ise hacimsel olarak daralma söz konusudur. Bu sonuca göre; kum zeminlerin, drenajlı kesme gerilmesine maruz kaldığı durumda hacimsel değişme göstermediği; drenajsız kesme gerilmesine maruz kaldığı durumda ise boşluk suyu basıncında değişiklik olmadığı durumda sahip olduğu boşluk oranı, kritik boşluk oranı olarak tarif edilmektedir. Casagrande’ye göre kritik boşluk oranından daha fazla boşluk oranına sahip kum zeminin, drenajsız koşullarda kesme gerilmesine maruz kalmasıyla birlikte boşluk suyu basıncı artış gösterir. Artan boşluk suyu basıncı değerinin toplam gerilmeye eşit olması durumunda zemin sıvı gibi davranış göstermektedir. Kritik boşluk oranından daha az boşluk oranına sahip kum zeminlerin, kesme gerilmesine maruz kalmasıyla birlikte hacimsel genişleme göstererek boşluk suyu basıncı azalır; böylelikle efektif gerilme artarak; kumlu

zemin, başlangıçtaki duruma göre daha stabil davranış göstermektedir (Seed and Lee, 1966; Yılmaz, 2006).

Sıvılaşma olayının mekanizması ve sıvılaşma sonrası ortaya çıkan sonuçların araştırılması ile ilgili çalışmalar, 1964 yılında peş peşe meydana gelen sıvılaşma nedeniyle yıkıcı hasarlarla sonuçlanan Niigata-Japonya ($M_w=7.5$) ve Büyük Alaska-A.B.D. ($M_s=9.2$) depremleri sonrasında yoğunlaşmıştır. Her iki depremde de şev kaymaları, köprü ve yapı temellerinde ağır hasarlar ve gömülü yapıların yüzmesi gibi çok çarpıcı hasarlar görülmüştür. Bu tarihten sonra yapılan çalışmalarda önemli gelişmeler kaydedilmiş, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini arazide belirleyebilmek için standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi ve sismik arazi deneyleri yaygın olarak kullanılmaya başlanarak; yapılan bu deneylerle ilişkili sıvılaşma analiz yöntemleri geliştirilmiştir (Çetin ve Unutmaz, 2004; Akkaş, 2006).

1964 yılında gerçekleşen 27 Mart Alaska ve 16 Haziran Niigata depremlerinde, zemin sıvılaşmasıyla ortaya çıkan, göz ardı edilemeyecek kadar ciddi hasarlar ile karşılaşılması ve kritik boşluk oranı yaklaşımının dinamik yüklemeler sonucunda ortaya çıkabilecek sıvılaşma problemlerini çözüme kavuşturmakta uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple birçok araştırmacı, sıvılaşmaya neden olan şartları, ivme konsepti üzerinden incelemeye yönelmiştir. Yapılan çalışmalarda, sarsma tablası kullanılarak suya doymun kum zeminlerin sıvılaşmasına neden olan ivme değerleri incelenmiştir. Bu çerçevede yapılan çalışmaların başında Prakash and Mathur'un (1965) yaptığı çalışma öne çıkmaktadır. Sarsma tablasıyla yapılan sonuçlara göre; uygulanan dinamik yüklemenin süresi, frekansı, suya doymun kumun yerleştirildiği kabın geometrik şekli deney sonuçlarında ciddi değişikliklere yol açtığı görülmüştür. Bu ve benzeri yapılan çalışmaların sonuçlarına göre arazi şartlarının laboratuvar ortamında simüle edilmesinin zor olduğu anlaşılmıştır (Seed and Lee, 1966; Yılmaz, 2006).

Diğer taraftan sıvılaşma mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve deprem anında sıvılaşmanın gerçekleşme olasılığının araştırılması için tekrarlı yükler altında suya doymun kum davranışının, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak incelenmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Seed and Lee (1966) tarafından ortaya koyulan çalışma, bu bağlamda yapılan ilk çalışma olmaktadır. Bu çalışmada; kendileri tarafından geliştirilen dinamik üç eksenli deney aleti, ilk kez kullanılmıştır (Yılmaz, 2006).

Berkeley'deki California Üniversitesi'nde H.B. Seed tarafından 1960 ve 1970 yılları arasında sıvılaşma konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sıvılaşma konusundaki gelişmelerin öncüsü olmuştur. Sıvılaşma potansiyelini belirlemede araştırmacılar tarafından geliştirilmiş birçok yöntem olmasına rağmen Youd et al. (2001) tarafından modifiye edilen Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR) yaklaşımı baz alınarak; Standart Penetrasyon (SPT) ve Koni Penetrasyon (CPT) arazi deneyleri sonuçlarını kullanan yöntemler, daha çok tercih edilmektedir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini daha iyi değerlendirebilmek adına CSR yaklaşımı haricinde, çevrimsel birim

deformasyon yaklaşımı da geliştirilmiştir. Günümüzdeki birçok çalışmada çevrimsel birim deformasyon yaklaşımı da tercih edilmektedir (Akkaş, 2006).

Ülkemizde sıvılaşma gerçeği, 17 Ağustos 1999 tarihinde $M_w=7.5$ büyüklüğünde meydana gelen Marmara depremi ile birlikte daha da öne çıkarak, araştırmacıların bu alana yönelmesine neden olmuştur. Türkiye’de meydana gelen Marmara depremi sonucunda ciddi oranda ağır yapısal hasar ve can kaybı oluşmuştur. Depremın etkisiyle birçok kumlu zeminin sıvılaşması yanı sıra düşük plastisiteli siltli zeminlerde de sıvılaşma görülmüş, killeri de ise taşıma gücü kaybı yaşanmıştır. Marmara depreminden etkilenmiş olan Marmara Denizi kıyıları, Sapanca Gölü çevresi ve Adapazarı şehrinin ovaya kurulmuş kısmında zeminden kaynaklan yapısal hasarlar daha da ön plana çıkmıştır. Aydan vd. (2000)’e göre Marmara depreminden etkilenen Adapazarı’nda bulunan yapıların %30-40’ı zemin sıvılaşmasıyla birlikte oluşan zemin yayılması sonucunda zemine batmış veya dönmüştür. Meydana gelen bu gelişmeler sonucunda, depremlerle birlikte oluşan yapısal hasarların azaltılması için zeminlerin deprem yükleri altında ki davranışının daha iyi anlaşılması gerektiği ön plana çıkmıştır (Erken, 2004; Akkaş, 2006).

2.3 Sıvılaşmanın Oluşumu

Suya doymun gevşek kum veya kumlu zeminler tekrarlı yüklere maruz kaldığında, daha sıkı bir duruma geçmek isterler. Zeminlerin daha sıkı duruma geçme isteğinden kaynaklanan hacimsel azalma, drenajsız koşullarda mümkün değildir. Hacimsel azalmaya daneler arasındaki su engel olmaya çalışmakta ve suyun sıkışması mümkün olmadığından boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Bütün sıvılaşma olaylarının en karakteristik özelliği drenajsız yükleme koşullarında boşluk suyu basıncının artmasıdır.

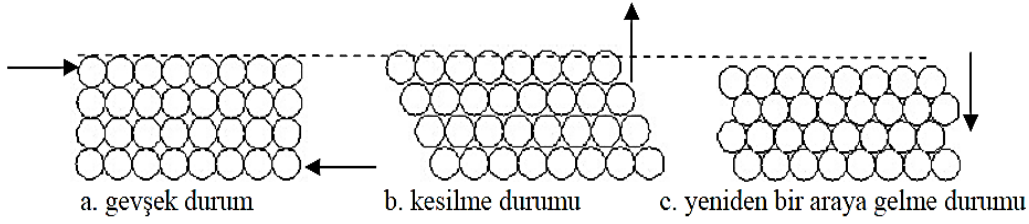
Efektif gerilme prensibine göre:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

Eğer $\sigma = u$ ise $\sigma' = 0$ olur.

Burada, σ : Toplam gerilme, σ' :Efektif gerilme, u : Boşluk suyu basıncıdır.

Denklem (2.1) göz önünde bulundurulduğunda, boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte zemin daneleri arasındaki efektif gerilme sıfır olur. Böylelikle daneler birbirinden ayrılma eğilimine girerler ve daneler su içinde askıda kalırlar. Kohezyonsuz zemin, kesme gerilmelerine karşı olan direncini kaybederek sıvı gibi davranmaya başlar ve büyük deformasyonlar meydana gelir (Das, 1997; Akkaş, 2006; Ural, 2008).



Şekil 2.1. Doygun kumda dane diziliminin çevrimsel yüklemeden etkilenmesi (PHR, 1997; Akkaş, 2006).

Danelerin dinamik etkiyle oluşan kesme gerilmelerini almadan önceki; kesme gerilmelerini aldığı ve kesme gerilmelerini aldıktan sonraki dizilimi, Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1(b) incelendiğinde, depremten kaynaklanan kesme gerilmeleriyle daneler arası temasın kaybolduğu görülmektedir. Danelerin birbirine temas ettiği noktalardan aktarılan normal gerilmeler, su tarafından karşılanacaktır. Fakat suyun, kesme gerilmelerine karşı direnci bulunmadığından dolayı oluşacak kesme gerilmelerine karşı direnç gösteremeyip; sıvılaşma diye tabir edilen olay gerçekleşmiştir. Şekil 2.1(c) incelendiğinde, dinamik yüklemenin durmasından sonra drene olan suyun etkisiyle oluşan boşluk suyu basıncı sönümlenerek normale dönmüş ve denge yeniden sağlanmıştır. Fakat yüzeyde önemli oturmalar ve yanıl deformasyonlar meydana gelmiştir (PHRI, 1997; Akkaş, 2006).

2.4 Sıvılaşma Türleri

Yeterli drenaj koşullarının sağlanamadığı zemin koşullarında meydana gelen sıvılaşma sonucunda deformasyon türüne bağlı olarak; “akma türü sıvılaşma” ve “çevrimsel hareketlilik” olmak üzere iki farklı sıvılaşma türünden bahsedilmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006; Emiroğlu, 2018; Mert, 2018). Bu iki tür incelendiğinde; sıvılaşmış zeminin kesme dayanımının, zemin kütlelerinin statik dengesi için gerekli kesme gerilmesinden küçük olduğu durum akma sıvılaşması olarak adlandırılırken; sıvılaşmış zeminin kesme dayanımının, kesme gerilmesinden büyük olduğu durum çevrimsel hareketlilik olarak adlandırılmaktadır. Akma sıvılaşmasının oluşumunda statik kesme gerilmeleri rol oynarken, çevrimsel hareketlilikte hem statik hem de dinamik kesme gerilmeleri rol oynamaktadır (Kramer, 1996; Ural, 2008). Akma sıvılaşmasının daha az görüldüğü fakat daha büyük hasarlara yol açtığı düşünülmektedir (Emiroğlu, 2018).

2.4.1 Akma sıvılaşması

Zemin, statik koşullar altında bir kesme direncine sahiptir. Bu direnç, zeminin statik durumda kalabilmesi için statik yüklerden oluşan kesme gerilmesine eşit veya kesme gerilmesinden büyüktür. Patlama, deprem, kazık çakılması, tren raylarında oluşan tekrarlı yükler gibi bir dinamik yüklemenin etkisiyle birlikte artan boşluk suyu basıncı sonucu oluşan sıvılaşma anında; zemin, kesme dayanımını kaybeder. Drenajın sağlanmasıyla birlikte aşırı

boşluk suyu basıncı normale döner ve zemin yeniden bir kesme dayanımına sahip olur. Bu ikincil dayanım residüel dayanım olarak da adlandırılmaktadır. Residüel dayanım, ilk dayanımdan daha düşüktür. Residüel dayanımın, statik kesme gerilmesinden de daha düşük olduğu durumda akma sıvılaşması meydana gelmektedir. Bu tür sıvılaşma sonucunda zeminde büyük çaplı deformasyonlar oluşmaktadır. Zemin kütleğinde oluşan kesme gerilmesi, kesme dayanımına eşit olduğunda akma sıvılaşması sonlanır (Kramer, 2003; Emiroğlu, 2018). Akma sıvılaşması; kritik boşluk oranından daha büyük boşluk oranına sahip gevşek kum zeminlerin, dinamik etkiyle birlikte sıkışma isteği göstermesi sonucunda meydana gelmektedir (Castro and Poulos, 1977; Ural, 2008). Akma sıvılaşmasının öne çıkan karakteristik özellikleri; hızla gelişmesi, aniden oluşması, sıvılaşan zeminin çoğunlukla büyük mesafelerde hareketidir. Zeminde oluşan taşıma gücü sonucunda yapıların taşıyıcı sistemlerinde hasar olmaksızın yapının dönmesi veya devrilmesi, akma sıvılaşmasının aniden ve hızlı gelişmesine örnektir (Aydın, 2008).

2.4.2 Çevrimsel hareketlilik

Laboratuvar şartlarında temiz kum numuneleri ile drenajsız koşullar altında yapılan tekrarlı yükleme deneyleri sonucunda; suya doymun sıkı kumlarda, yükleme çevriminin bir aşamasında boşluk suyu basıncı toplam çevresel gerilmeyle eşit değere ulaştıktan sonra zemin hacimsel genişleme isteği göstermektedir. Zeminin hacimsel genişlemesiyle birlikte boşluk suyu basıncı azalarak; zemin, tekrarlı yüklere karşı yeniden direnç göstermektedir. Gözlemlenen bu olay “ön sıvılaşma” olarak tanımlanmaktadır (Seed and Idriss, 1967; Lee and Seed, 1967; Ural, 2008). Kısacası ön sıvılaşma, tekrarlı yüklere maruz kalan zeminde boşluk suyu basıncının, dinamik bir yükleme çevrimi sonunda toplam çevre gerilmesine eşit olmasıdır. Ancak ön sıvılaşma, zeminde meydana gelecek deformasyonların boyutları ile ilgili fikir vermemektedir. Sadece zemin davranışının incelenmesine olanak sağlamaktadır (Akkaş, 2006).

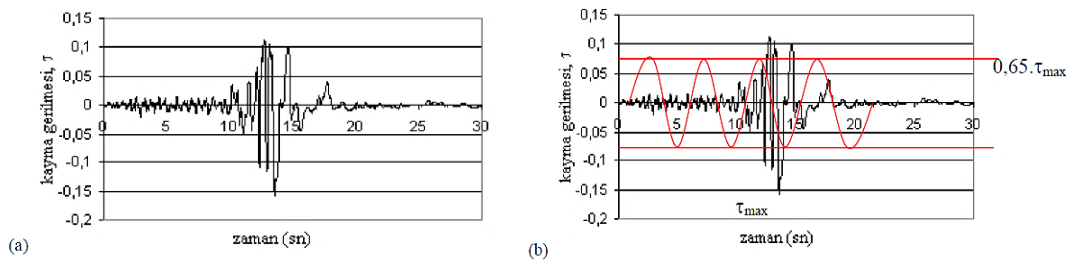
Suya doymun zeminlerde dinamik yüklemenin etkisiyle ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu takip eden yükleme tekrarları nedeniyle zeminde hacimsel genişleme eğilimi görülmektedir. Zeminin hacimsel genişlemesi sonucunda residüel dayanım olarak adlandırılan tekrar bir kesme direnci oluşmaktadır (Akkaş, 2006). Çevrimsel hareketlilik: Statik kesme gerilmesinin, sıvılaşma sonrasında zeminin residüel kesme dayanımından küçük olduğu durumda gözlenmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006; Emiroğlu, 2018). Çevrimsel hareketlilik, kritik boşluk oranından daha küçük boşluk oranına sahip sıkı kum zeminlerin, dinamik etkiyle birlikte hacimsel genişleme isteği göstermesi sonucunda meydana gelmektedir (Castro and Poulos, 1977; Ural, 2008). Ayrıca akma sıvılaşması sonucu oluşan büyük deformasyonların nedeni statik kesme gerilmeleri iken; çevrimsel hareketlilik sonucu oluşan deformasyonların nedeni, hem statik gerilmeler hem de dinamik kesme gerilmelerdir. (Kramer, 1996; Özaydın, 2007; Aydın, 2008; Mert, 2018). Siltli zeminlerle yapılan çalışmada; çevrimsel hareketliliğin, siltli zeminin göstermiş olduğu plastisite özelliğine göre farklı şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Plastik siltlerde çevrimsel hareketliliğin, boşluk suyu basıncı artışının toplam çevresel gerilmeye ulaşmadan önce geliştiği görülmüştür. Oysaki plastik

olmayan (NP) siltlerde çevrimsel hareketlilik, temiz kum zeminlerde olduğu gibi boşluk suyu basıncının toplam çevresel gerilmeye eşitlenmesiyle birlikte oluşmaktadır. Plastik olmayan (NP) siltli zeminlerde boşluk suyu basıncının toplam çevresel gerilmeye eşitlenmesine sıvılaşma denilirken; plastik siltlerde gözlemlenen boşluk suyu basıncının toplam çevre gerilmesine ulaşmadığı sıvılaşma türü, çevrimsel hareketlilik olarak tanımlanmıştır. Plastik siltlerde klasik sıvılaşma oluşmamasına rağmen dinamik etkiler altında önemli deformasyonların geliştiği görülmektedir (Andrews, 1997; Ural, 2008).

2.5 Sıvılaşmanın Laboratuvar Deneyleri ile İncelenmesi

2.5.1 Dinamik Üç Eksenli Deney Aleti

Zeminlerin dinamik davranışı, laboratuvar veya arazi deneyleri ile incelenebilmektedir. Laboratuvar koşullarında zeminlerin dinamik davranışını incelemek için yaygın olarak dinamik üç eksenli deney tercih edilmektedir. Bu deney, gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olarak iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Dinamik üç eksenli deneyi gerilme kontrollü yapılsa yeniden hazırlanmış numunelerin çevrimsel mukavemeti ya da sıvılaşma potansiyeli hakkında fikir edinebiliriz. Arazideki belirli bir zemin tabakasının sıvılaşma potansiyelin belirlenebilmesi için yeniden hazırlanacak olan numunenin, arazi koşullarını temsil edecek şekilde hazırlanması gerekmektedir. Laboratuvarda yapılacak olan deneyin çevrimsel gerilme oranı (CSR) yine o araziye göre belirlenmelidir. Bu konuyu bir örnekle açıklamak gerekirse Şekil 2.2(a)'da inceleme yapılacak arazinin deprem kaydından alınmış düzensiz kesme gerilmeleri (τ) görülmektedir. Şekil 2.2(b)'de en büyük kesme gerilmesinin (τ_{max}) %65'i büyüklüğünde sabit genlikli üniform kesme gerilmeleri görülmektedir. Arazide ki zemin tabakasının deprem etkisiyle maruz kalacağı Şekil 2.2(a)'da ki gerilmelerin eşdeğeri olarak laboratuvarda Şekil 2.2(b)'de bulunan gerilme, numuneye uygulanarak sıvılaşma potansiyeli belirlenebilmektedir (Ural, 2008).



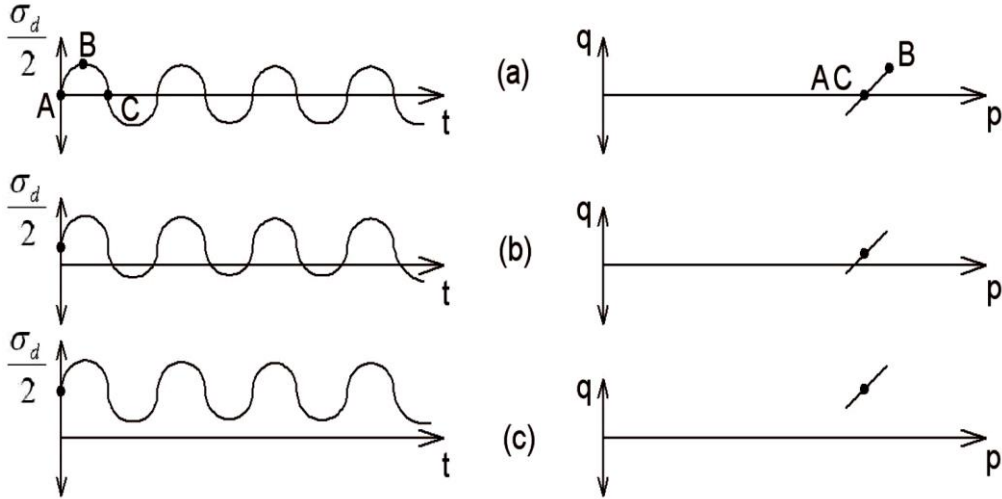
Şekil 2.2. (a) Depremin zeminde oluşturduğu kayma gerilmesi, (b) Laboratuvarda uygulanan eşdeğer kayma gerilmesi (Ural, 2008).

Dinamik üç eksenli deney aletinin kullanımı ve deneyin yapılışı genel hatları ile özetleyecek olursak; zemin numunesi, su geçirmez silindirik membran içerisine yerleştirilir. Üç eksenli hücre içerisine yerleştirilen zemin numunesine çevre basıncı (σ_c) uygulanır. Çevre basıncı uygulanmış numuneye drenaj sistemi kullanılarak doygun hale gelmesi sağlanır. Daha sonra izotropik veya anizotropik olarak konsolide edilir. Drenaj sistemi; konsolidasyon sürecini,

doyurma esnasında su akımını ve tekrarlı yükleme sırasında artan boşluk suyu basıncının ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Doyurma ve konsolidasyon sürecinden sonra numuneye eksenel tekrarlı yükleme yapılarak deprem veya başka bir dinamik etkinin oluşturacağı durum yansıtılmış olunur. Tekrarlı yüklemeler drenajsız koşullar altında yapılmasıyla boşluk suyu basıncının zamana bağlı değişimi ve eksenel deformasyon gözlemlenebilmektedir. Dinamik üç eksenli deney, yıkıcı bir deneydir. Yenilme, %100 boşluk suyu basıncı oranı (R_u) veya belirli bir birim deformasyon düzeyine ulaşılması için gerekli olan tekrar sayısına bağlı olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin dinamik davranışı; uygulanan tekrarlı gerilmenin oranı, eksenel birim deformasyonun oluşumu, uygulanan gerilmenin tekrar sayısı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak irdelenmektedir (Yılmaz, 2006; ASTM D 5311, 2013).

Zeminlerin dinamik davranışlarının belirlenmesinde oldukça sık kullanılan deneylerden biri olan dinamik üç eksenli deney sırasında numuneye, pnömatik olarak yanal gerilme ve eksenel gerilme uygulanmaktadır. Bu koşullarda numunede oluşan asal gerilmeler her zaman yatay ve düşey eksenlerde oluşmaktadır. Dinamik üç eksenli deney aleti ile yapılan gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü deneylerde deviatör gerilme tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Deviatör gerilme, yanal gerilme ile eksenel gerilme arasındaki fark olarak nitelendirilmektedir.

Dinamik üç eksenli deney, yukarıda da belirtildiği gibi izotropik konsolide veya anizotropik konsolide şartlar altında gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.3(a)'da izotropik konsolide koşullarında uygulanan deneyin tekrarlı deviatör gerilmesi ve toplam gerilme izi görülmektedir. İzotropik konsolide koşullar altında yapılan deneyler, yatay düzleminde başlangıç kesme gerilmesi bulunmayan düz arazi şartlarını temsil etmekte kullanılmaktadır. Şekil 2.3(a)'yı incelediğimizde; deney, "A" noktasında yani sıfır kesme gerilmesi ile başlar ve deviatör gerilme "B" noktasına yani maksimum değerine ulaşana kadar artmaya devam eder. Deviatör gerilme "B" noktasına ulaştıktan sonra azalarak "C" noktasına yani sıfır değerine yaklaşır. Deviatör gerilmenin "A" noktasından "C" noktasına ulaşana kadar geçen zamanda eksenel gerilme, yanal gerilmeden büyük olduğu için büyük asal gerilme düşey eksen; küçük asal gerilme yatay eksen üzerindedir. Ancak "C" noktası geçildiğinde deviatör gerilmenin negatif olmasından dolayı eksenel gerilme, yanal gerilmeden küçük olacağı için asal gerilme düzlemleri aniden değişecektir. Deviatör gerilmenin sıfır olduğu durumlarda numune üzerinde kesme gerilmesi oluşmaz. Deney boyunca deviatör gerilmenin sıfırdan pozitif veya negatif duruma geçtiği her an asal eksenlerin 90^0 dönmesine neden olmaktadır. Bu olay deney boyunca tekrar etmektedir (Akkaş, 2006).



Şekil 2.3. (a) İzotropik konsolide koşullar, (b) Çevrimsel deviatör gerilme genliğinin konsolidasyon sırasındaki deviatör gerilmeden daha büyük olduğu anizotropik konsolide koşullar, (c) Çevrimsel deviatör gerilme genliğinin konsolidasyon sırasındaki deviatör gerilmeden daha küçük olduğu anizotropik koşullar (Kramer, 1996; Akkaş, 2006).

Anizotropik konsolide koşullara altında yapılan deneyler, başlangıçta statik kesme gerilmeleri bulunan eğimli arazileri temsil etmekte kullanılmaktadır. Şekil 2.3(b) ve Şekil 2.3(c)'de anizotropik konsolide edilmiş zemin numunesinin gerilme izi görülmektedir. Şekil incelendiğinde, deviatör gerilmenin p eksenini boyunca simetrik olmadığı görülmektedir. Bu durum konsolidasyon sırasında yanıl gerilme ile düşey gerilmenin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Konsolidasyon sırasındaki gerilme farkı, deviatör gerilme ile sağlanmaktadır. Eğer tekrarlı yükleme sırasında uygulanan deviatör gerilme genliği, konsolidasyon sırasında uygulanan deviatör gerilmeden fazla ise Şekil 2.3(b)'de görülen gerilme izi oluşmaktadır. Bu durumda da izotropik koşullarda olduğu gibi asal gerilme eksenlerinin dönmesi gerçekleşmektedir. Fakat Şekil 2.3(c)'de görüldüğü üzere tekrarlı yükleme sırasında uygulanan deviatör gerilme genliği, konsolidasyon sırasında uygulanan deviatör gerilmeden küçük ise kesme gerilmesi, yükleme boyunca sıfır kesme gerilmesine ulaşamayacağı için asal gerilme eksenleri hiçbir zaman dönmez (Akkaş, 2006).

2.6 Zeminlerin Sıvılaşma Davranışına Etki Eden Faktörler

2.6.1 Rölatif sıkılık

Granüler zeminlerin tekrarlı yükler altında sıvılaşma potansiyelini etkileyen önemli faktörlerden biri rölatif sıkılık oranıdır (Seed, 1976; Altun, 2004; Akkaş, 2006).

Kumlu zeminlerin rölatif sıkılığı;

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.2)$$

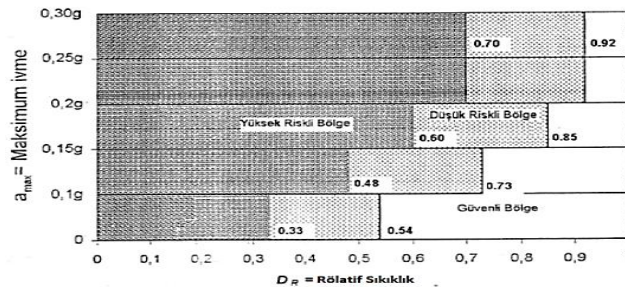
Bağıntısıyla belirtilmektedir.

Burada, $e_{\max}$: Zeminin en gevşek durumdaki boşluk oranı, $e_{\min}$: Zeminin en sıkı durumdaki boşluk oranı, e_0 : Zeminin mevcut boşluk oranıdır.

Rölatif sıkılık, zemin tabakalarının ne kadar sıkı durumda olduğunu gösteren bir parametredir. Rölatif sıkılığın düşük olması daneler arasındaki boşlukların fazla olduğunu belirtmektedir. Bu durum deprem gibi dinamik yüklemeler sırasında mevcut olan yeraltı suyunun daneler arasına girerek zeminin viskoz sıvı gibi davranmasına neden olmaktadır. Rölatif sıkılığı daha yüksek olan zeminlerde, dinamik etkiyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncı daha düşük olmakta ve sıvılaşmadan kaynaklanan deformasyonlar daha az olmaktadır. Rölatif sıkılığı daha düşük olan zeminlerde ise boşluk suyu basıncı daha fazla oluşmakta ve deformasyonlar daha büyük olmaktadır. Bu nedenle, başlangıç rölatif sıkılığı yüksek olan zeminlerin sıvılaşma ihtimalinin daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin, rölatif sıkılık ile yakından ilişkili olduğunu gösteren en iyi örneklerden biri Niigata (1964) depreminden elde edilmiş verilerdir. Rölatif sıkılığı %50 olan kumlu zeminlerde sıvılaşma görülürken, rölatif sıkılığı %70 olan kumlu zeminlerde sıvılaşmanın oluşmadığı görülmüştür (Ishihara, 1980; Akkaş, 2006).

Wang and Law (1994), sıvılaşma oluşabilecek rölatif sıkılık eşik değerinin % 75 olduğunu ve rölatif sıkılığı eşik değerinin altında bulunan zeminlerde sıvılaşma görüldüğünü belirtmişlerdir. Ferritto (1997), sıvılaşmanın oluşmayacağı rölatif sıkılık eşik değerinin belirlenmesinin mümkün olmadığını belirtmekte; fakat rölatif sıkılık değerinin % 80'in üzerinde bulunan zeminlerde sıvılaşma olasılığının kayda değer şekilde azaldığını da vurgulamaktadır (Aytaş, 2019).

Wiegel (1970), Seed and Idriss (1971) tarafından rölatif sıkılığın sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her iki çalışmanın sonuçları birbiriyle örtüşmektedir. Şekil 2.4'te Wiegel (1970) tarafından hazırlanmış olan rölatif sıkılık ile sıvılaşma potansiyeli ilişkisi gösterilmektedir (Akkaş, 2006).



Şekil 2.4. Rölatif sıkılık ile sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişki (Wiegel, 1970; Akkaş, 2006).

2.6.2 Zeminin dane boyutu, dane şekli ve gradasyonu

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı göstermiş olduğu direnç, zemini oluşturan danelerin şekline, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır. Danelerin boyutu ve dağılımı, zeminde boşluk suyu basıncını oluşumunu ve sönümlenmesini kontrol etmektedir (Ferritto,1997; Aytaş, 2010).

Dane boyutunun sıvılaşmaya olan etkisi incelendiğinde; ince kumların, iri kumlara göre sıvılaşmaya daha yatkın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak iri kumların geçirgenliğinin ince kumlardan daha fazla olduğu için su daha kolay drene olabilmekte ve aşırı boşluk suyu basıncının oluşmasını engellemektedir. (Ferritto, 1997; Akkaş, 2006).

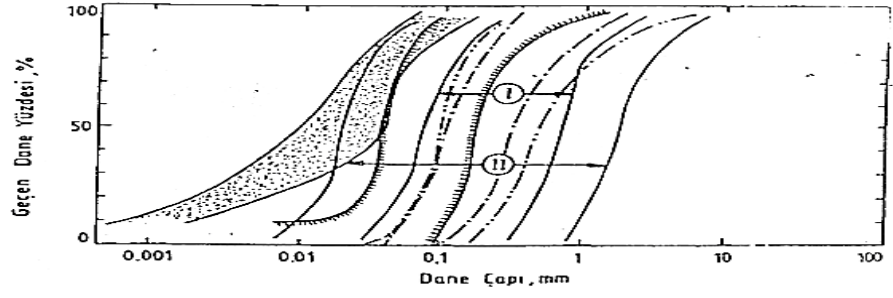
Zeminlerin dane şekli göz önünde bulundurulduğunda köşeli danelere sahip zeminlerin, daha düz ve yuvarlak danelere sahip zeminlere göre sıvılaşmaya daha dirençli olduğu düşünülmektedir. Yuvarlak danelerin sıvılaşmaya daha meyilli olmasının nedeni, dinamik etki altında danelerin daha kolay ve çabuk bir araya gelebilmesinden kaynaklanmaktadır. Fakat artan konsolidasyon basıncının etkisiyle, belirli bir noktadan sonra köşeli danelerin kırılıp ezilerek ince danelere dönüşmesi nedeniyle, zeminin sıvılaşmaya karşı direncinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir (Kramer, 1996; Akkaş, 2006; Aytaş, 2010).

Zeminin sahip olduğu dane dağılımının zeminin sıvılaşma potansiyeline etkisi incelendiğinde; dane boyutu geniş sınırlar içinde değişen iyi derecelenmiş zeminler, üniform dane dağılımına sahip kötü derecelenmiş zeminlere kıyasla daha az sıvılaşma riski taşımaktadırlar. İyi derecelenmiş zeminlerde küçük çaplı daneler, daha büyük çaplı daneler arasında yer alan boşlukları doldurmaktadır. Bu sayede dinamik etkiyle meydana gelecek olan zeminin daha sıkı hale gelme isteği azalacak ve oluşması muhtemel aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu azaltacaktır (Tsuchida 1970; Kramer, 1996; Akkaş, 2006; Aytaş, 2010; Doğan, 2015).

Dane çapı dağılımının sıvılaşma üzerinde etkisini incelemek amacıyla (Ishihara, 1985) tarafından önceki depremlerde gözlenen, sıvılaşmış zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Aydın, 2008).

2.6.3 İnce dane oranının etkisi

Kohezyonsuz zeminler, sıvılaşma potansiyeli yüksek zemin türleridir. Temiz kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar bu tür zeminlere örnek olarak verilebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçu, 2006). Fakat ince dane oranının, sıvılaşma potansiyelini nasıl etkilediği üzerine birçok araştırmacı tarafından siltli kum ve killi kum zeminlerde hem laboratuvar hem de arazide kapsamlı araştırmalar yapılmış olup bu konuda tartışmalar devam etmektedir. İnce dane oranının sıvılaşmaya etkisi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi, ileride “2.8 Siltlerde Sıvılaşma” başlığı altında incelenip sunulacaktır.



En çok sıvılaşabilecek zeminler için sınır (Tsuchida, 1970)

Sıvılaşma potansiyeli olan zeminler için sınır (Tsuchida, 1970)

İnce boyutlu madensel atıklar (Ishihara, 1985)

Sıvılaşmış kum (Shiba-Tōto-Oki Depremi 1987)

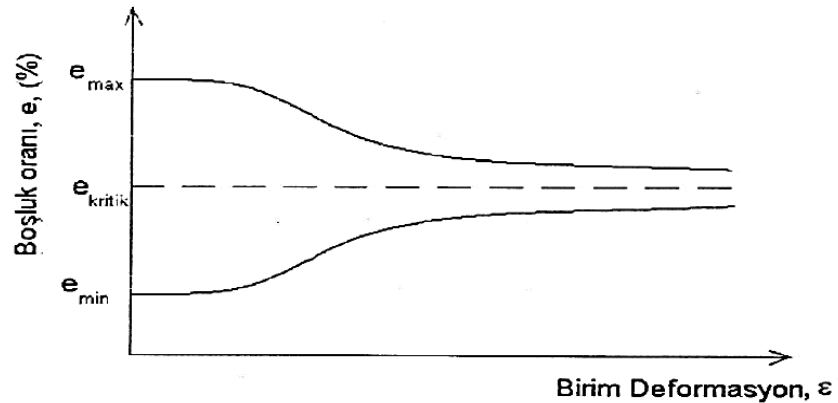
Sıvılaşmış kum (Niigata Depremi 1964)

Sıvılaşmış kum (Nihonkai-Chubu Depremi 1983)

Şekil 2.5. Sıvılaşma gözlenmiş zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri (Ishihara, 1985; Aydın, 2008).

2.6.4 Boşluk oranı

Kesme gerilmeleri, sıkı kumların hacimsel genişleme eğilimi göstererek boşluk oranlarında artışa neden olurken, gevşek kumların ise hacimsel azalma eğilimi göstererek boşluk oranlarının azalmasına neden olmaktadır. Bu davranışın altında kritik boşluk oranına (e_{kritik}) ulaşma isteği yatmaktadır. Şekil 2.6'da Boşluk oranı-Birim deformasyon grafiği gösterilmiştir. Her iki durumda da hem sıkı hem de gevşek kumlar hacimsel değişime uğramaktadır. Mevcut boşluk oranı e_0 olan zemin, drenajsız koşullar altında yüklemeye maruz kalması halinde $e_0 < e_{cr}$ durumunda negatif; $e_0 > e_{cr}$ durumunda ise pozitif boşluk suyu basıncı gelişmektedir. Bu durum göz önüne alındığında; sıkı kum zeminler, gevşek kum zeminlere göre sıvılaşmaya daha az eğilim göstermektedir (Akkaş, 2006).

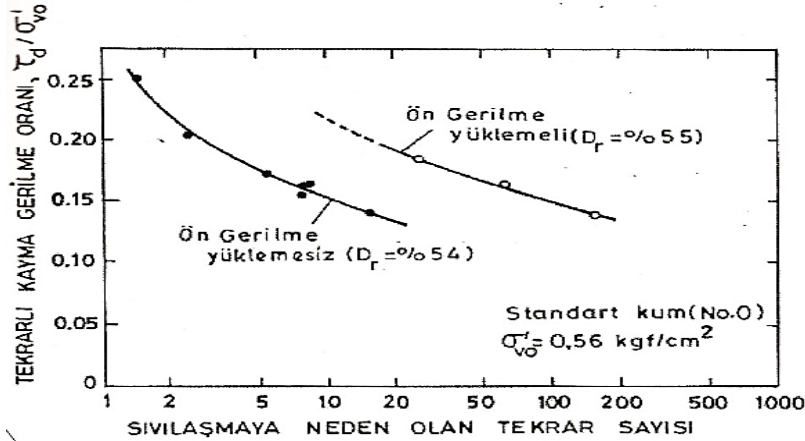


Şekil 2.6. Boşluk Oranı – Birim Deformasyon grafiği (Akkaş, 2006).

2.6.5 Sismik geçmiş

Kum zeminin sıvılaşma direncinin, o kum zeminin daha öncesinde dinamik etkilere maruz kalmış olmasından etkilendiği birçok araştırmacı tarafından gözlemlenmiştir. Finn et al. (1970) sıvılaşma potansiyelinde geçmişteki gerilmelerin etkili olduğunu ifade etmişlerdir ve zemine küçük dinamik kayma deformasyonu uygulandığında zeminin sıvılaşmaya karşı daha dirençli hale geldiğini belirtmişlerdir (Ural, 2008).

Seed (1976) yaptığı çalışmada; zeminin geçmişte maruz kaldığı dinamik etkinin, diğer bir deyişle sismik geçmişin, nasıl etkilendiğini anlayabilmek amacıyla aynı koşullarda numuneler hazırlamıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmına hafif titreşimler uygulanarak, hazırlanan tüm numuneler üzerinde sıvılaşma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre; daha önce titreşime maruz kalan numunelerin, titreşim görmemiş numunelere göre daha büyük çevrimsel dayanım gösterdiği belirtilmiştir. Küçük titreşimlerin, kum danelerinin birbiriyle olan temasını artırarak daha iyi dane kilitlenmesine neden olduğu; bu sayede sıvılaşma direncinde artış sağladığı düşünülmektedir. Şekil 2.7’de titreşim uygulanmış ve uygulanmamış olan zemin numunelerinin sıvılaşma dirençleri arasındaki fark gösterilmiştir (Akkaş, 2006).

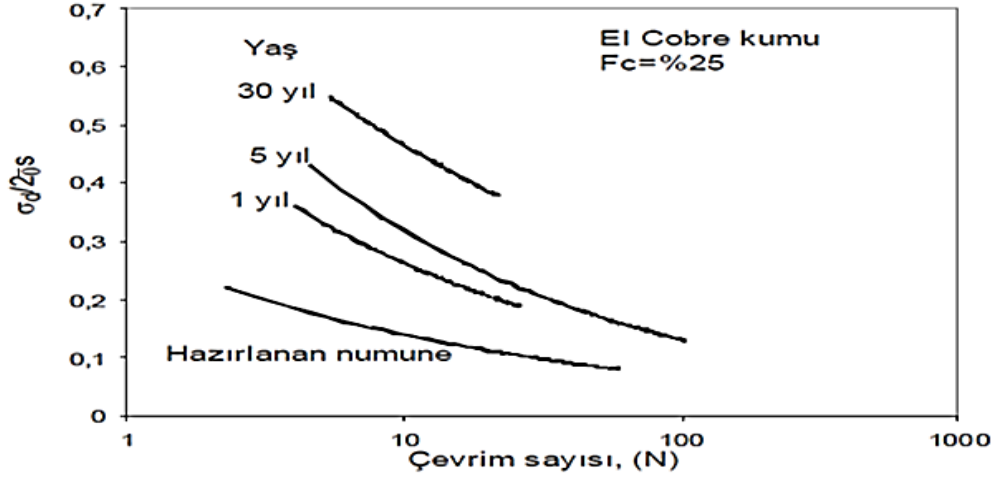


Şekil 2.7. Kumun sıvılaşmasında sismik geçmişin etkisi (Seed, 1976; Akkaş, 2006).

2.6.6 Yaşlanma ve çimentolanma etkisi

Youd and Hoose (1977), Youd and Perkins (1978) jeolojik yaşın fazla olmasının sıvılaşma direncinde artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Finn (1981), jeolojik yaşın %75'e kadar sıvılaşma direncinde artışa neden olduğunu gözlemlemiştir. Campanella and Lim (1981) tarafından, shelby tüpüyle alınmış killi siltli numuneler üzerinde; dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak; sıvılaşma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan iki farklı yaş grubu numunelerin arasında sadece 19 gün yaş farkı olmasına rağmen yaşlı numunelerin sıvılaşma direncinin, genç numunelerden %25 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Zeminin dinamik davranışı ile ilgili yapılan çalışmalarda zemin tabakası yaşının artmasıyla, ön sıvılaşma için gerekli gerilmenin arttığı

gözlemlenmiştir. Troncoso et al. (1988), %25 silt içeriğine sahip kum zeminler üzerinde yaşın sıvılaşmaya etkisini incelemişlerdir. Dinamik üç eksenli deney aleti ile yapılan deney sonuçlarına göre; zemin tabakası birikme süresinin uzaması, sıvılaşmaya karşı olan direncin artmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.8’de deney sonuçları gösterilmektedir (Ural, 2008).

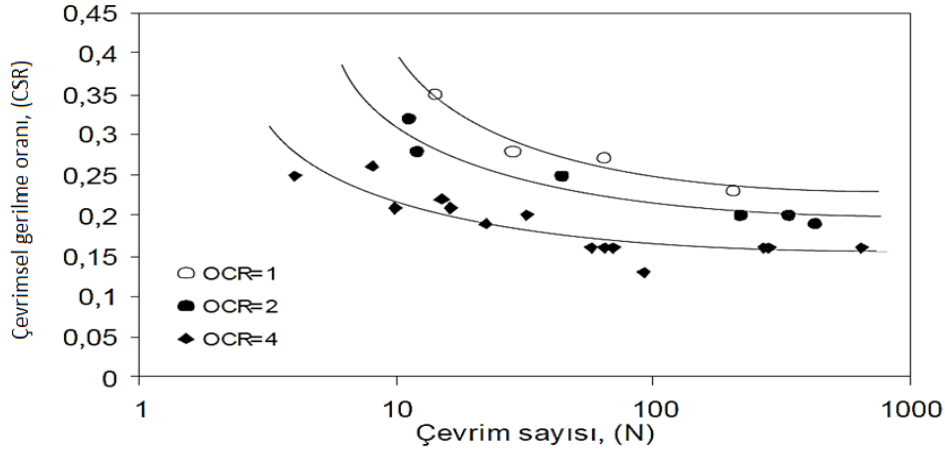


Şekil 2.8. El Cobre kumunun farklı yaşlar için dinamik üç eksenli deneydeki direnci (Troncoso et al., 1988; Ural, 2008).

Zeminlerin zamanla sıvılaşmaya karşı daha dirençli hale gelmesinin, zeminin sıkışarak danelerin birbirine daha iyi kenetlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Daneler arasındaki sıkışma sonucunda artan temasın, çimentolanmayla sonuçlanması olasıdır (Ural, 2008). Zemin daneleri arasında oluşan çimentolanma, gözenekliliği (porozite) azaltması nedeniyle zeminin sıvılaşmaya karşı direncinde artış meydana getirmektedir (Çavuş, 2015; Mert, 2018).

2.6.7 Aşırı konsolidasyon oranı

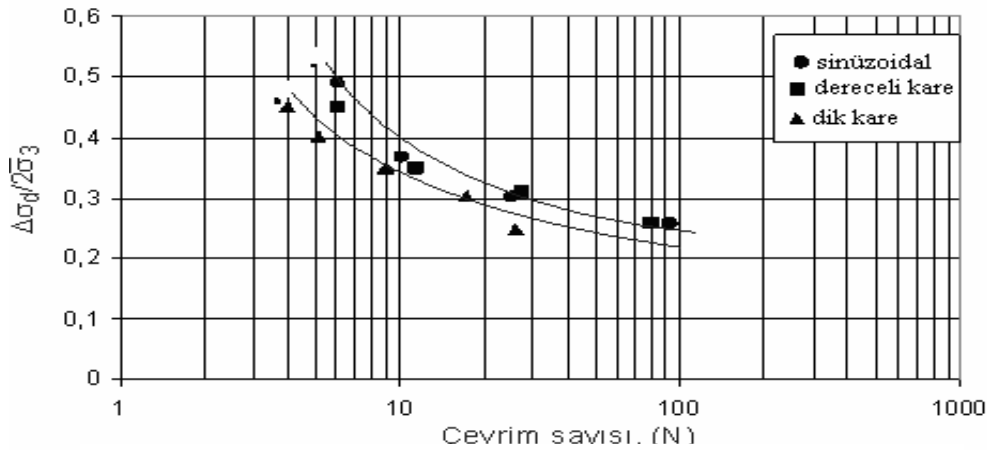
Kumların sıvılaşma potansiyelinin aşırı konsolidasyon oranından nasıl etkilendiği ile alakalı bir çok araştırmacı tarafından [Seed and Peacock (1971), Lee and Focht (1976), Ishihara et al. (1978), Ishihara and Takatsu (1979), Campanella and Lim (1981), Stamatopoulos et al. (1995), Nagase et al. (1996)] çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalara göre; aşırı konsolidasyon oranı artışının zeminin çevrimsel dayanım oranında (CRR) artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Ishihara et al. (1978) alüvyal silt-kum karışımı zeminlerde aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşma direncine etkisini incelemişler ve kumdaki ince içeriği artışının, aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşma direncine etkisini arttırdığını belirtmişlerdir. Sancio (2003), silt zeminlerde yapılan çalışma sonunda aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla sıvılaşma direncinin arttığını Şekil 2.9’da yaptığı çalışmayla göstermiştir (Ural, 2008).



Şekil 2.9. Aşırı konsolidasyon oranının, çevrim sayısı ile Çevrimsel gerilme oranı arasındaki ilişkiye etkisi (Sancio, 2003; Ural, 2008).

2.6.8 Tekrarlı yükün şekli

Silver (1977) ve Mulilis et al. (1978), dinamik yüklemenin şekline göre zeminin göstermiş olduğu direncin değiştiğini belirtmişlerdir. Dinamik üç eksenli deney aleti ile, sinüzoidal; üçgen ve dikdörtgen dalga formları kullanılarak yükleme yapılabilmektedir. Silver (1977) tarafından yapılan deneylere göre; zemin numunelerinin sinüzoidal dalga tipinde yapılan yüklemelere göstermiş olduğu direncin, dikdörtgen dalga tipinde yapılan yüklemelere göre %15 ile %30 arasında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Silver (1977), dalga formunun değişiminden kaynaklı zeminin sıvılaşma direnci değişimini Şekil 2.10'da göstermiştir ve zeminin dinamik davranışı ile alakalı deneylerde sinüzoidal dalga formunun kullanılmasını önermiştir (Ural, 2008).

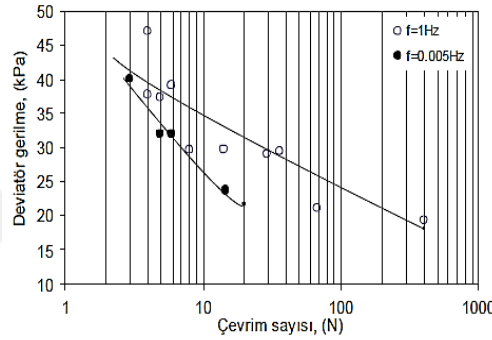


Şekil 2.10. Sıvılaşma direncinde dalga formunun etkisi (Silver, 1977; Ural, 2008).

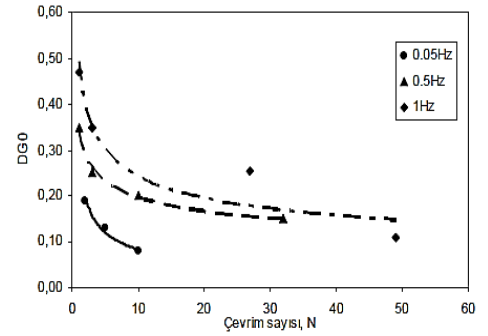
2.6.9 Tekrarlı yükün frekansı

Lee and Fitton (1969) ve Mulilis et al. (1975), dinamik yükleme frekansının zeminlerin dinamik davranışını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Lee and Fitton (1969) düşük frekansta ki dinamik yükün etkisinin daha az

olduğunu, Mulilis et al. (1975) ise bunun tam tersini savunmuşlardır. Ancak yapılan deneylere göre sonuçlar arasındaki farkın çok az olması nedeniyle 0.5 Hz ve 1 Hz arasındaki yükleme frekanslarının, zeminlerin dinamik davranışlarını etkilemediğini belirtmişlerdir. Sancio (2003), Adapazarı bölgesinden aldığı siltli zeminleri kullanarak 1 Hz ve 0.005 Hz frekans değerlerinde dinamik yükleme yaparak; yükleme frekansının etkisini incelemiştir. Sonuçlara göre; frekans değerinin düşmesiyle %3 tek genlikli eksenel deformasyona ulaşmak için gerekli tekrar sayısının azaldığını belirtmiştir. Sancio (2003) tarafından yapılan deney sonuçları Şekil 2.11’de görülmektedir (Ural, 2008).



Şekil 2.11. Farklı deviatör gerilme değerlerinde %3 tek genlikli eksenel birim deformasyon için gerekli çevrim sayısı (Sancio, 2003; Ural, 2008).



Şekil 2.12. Adapazarı siltinde farklı frekanslarda çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı (DGO) ilişkisi (Ural, 2008).

Ural (2008) yaptığı tez çalışmasında Adapazarı bölgesine ait silt zeminlerde dinamik üç eksenli deney aletiyle 1 Hz, 0.5 Hz ve 0.05 Hz frekanslarında deneyler yaparak; frekansın, zeminin dinamik davranışına etkisini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre; %5 çift genlikli eksenel deformasyona ulaşmak için gerekli en az tekrar sayısının, 0.05 Hz ile yapılan deneyde elde edildiğini ve frekansın artmasıyla belirlenen deformasyona ulaşılması için gerekli tekrar sayısının arttığını belirtmiştir. Deney sonuçları Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

2.6.10 Çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve çevrim sayısı

Sıvılaşmanın tetiklenmesine neden olan tekrarlı yükler genelde deprem etkisiyle oluşan yüklerdir. Bu nedenle meydana gelen depremin özellikleri, zeminlerin sıvılaşma riskini doğrudan etkilemektedir. Depremin arazide oluşturabileceği maksimum deprem yer ivmesi (a_{max}) göz önünde bulundurularak; laboratuvar koşullarında sabit genlikli üniform tekrarlı yüklemelerle, zeminlerin sıvılaşma dirençleri belirlenebilmektedir. Zemin numunesine aktarılan çevrimsel gerilme oranı ne kadar büyükse sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı da o kadar az olmaktadır (Seed and Lee, 1966; Yılmaz, 2006).

2.6.11 Depremiñ büyüklüğü ve süresi

Deprem esnasında açığa çıkan sismik enerjinin etkisiyle tekrarlı gerilmeler meydana gelmekte ve boşluk suyu basıncının artmasına neden olmaktadır. Böylelikle zemin sıvılaşması dediğimiz olay meydana gelmektedir. Depremiñ süresi ve büyüklüğünün artması, açığa çıkan enerjinin artması anlamına gelmektedir. Artan sismik enerjiye bağlı olarak; daha büyük kesme gerilmeleriyle, daha büyük deformasyonlar meydana gelecek ve boşluk suyu basıncında ki artış daha fazla olacaktır. Boşluk suyu basıncında ki artış efektif gerilmeyi azaltacak ve sıvılaşmaya neden olacaktır. Kısacası deprem süresi ve büyüklüğü, zeminin sıvılaşma riskini arttırmaktadır (Ural, 2008; Mert,2018).

2.6.12 Depremiñ odak uzaklığı

Değerlendirme yapılacak olan arazinin depremiñ odak noktasına olan mesafesi önemlidir. Depremiñ odak uzaklığı azaldıkça arazide gözlenecek olan maksimum deprem yer ivmesi (a_{max}) artmakta, bununla birlikte sıvılaşma riski de artmaktadır. Fakat deprem odak noktasına aynı mesafede bulunan iki farklı bölgede farklı a_{max} değerlerinin ölçülmesi mümkündür. Yumuşak ve tabakalı zeminler, taban kayasından daha büyük yatay yer ivmelerine neden olabilmektedirler. Zemin büyütmesi olarak adlandırılan bu durum, sıvılaşma analizlerinde dikkate alınmalıdır (Emiroğlu, 2018).

2.6.13 Yeraltı su seviyesi

Sıvılaşma mekanizmasının oluşması için zeminin doygun olması gerekmektedir. Bu nedenle yer altı su seviyesi üzerinde bulunan suya doygun olmayan zeminlerin sıvılaşma riskinden bahsetmek mümkün değildir. Zemin sıvılaşmasının gelişebileceği en muhtemel koşul, yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu durumlardır (Doğan, 2015). Zemin sıvılaşmasının meydana geldiği bölgelerin çoğunda, yeraltı su seviyesinin 3 m'nin altına inmediği; sadece birkaç sıvılaşma vakasında yeraltı su seviyesinin 3 ile 4 m arasında bulunduğu gözlemlenmiştir. Yeraltı su seviyesinin 5 m'nin altına indiği durumlarda sıvılaşma olayı ile karşılaşılmamıştır (Wang and Law, 1994; Aydın, 2008).

Bir bölgede sıvılaşma analizi yapılırken hidrolik rejim dikkate alındığında; yeraltı su seviyesinin, gelecekte yükselmesi beklenmiyorsa yeraltı su seviyesinin üzerinde bulunan zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri değerlendirmeye alınmaz. Fakat mevsim değişiklikleriyle veya farklı çevresel koşullar nedeniyle yeraltı su seviyesinde zamana göre değişkenlik mümkünse yeraltı su seviyesinin mevcut durumu değil, yükselmesi beklenen seviyeye göre sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi yapılması gerekmektedir (Doğan, 2015).

2.6.14 Drenaj koşulları

Suya doymun granüler zeminlerde sıvılaşmaya neden olan etken, tekrarlı yüklemelerin ani olarak gelişmesiyle suyun drene olmaya fırsat bulamaması sonucunda artan boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi azaltmasıdır (Mert, 2018).

Umehara et al. (1985), tekrarlı kesme gerilmesine maruz kalan zeminde oluşan aşırı boşluk suyu basıncının bir miktar sönümlenebileceğini ifade etmişlerdir. Bu durum zemin tabakasının sıvılaşma direncini önemli derecede etkilemektedir. Fakat derin zemin tabakalarında yüklemenin etkisiyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi, drene olan suyun yukarı yönde bir akış oluşturmaya neden olabilmektedir. Bu da yüzeyde bulunan zemin tabakalarının sıvılaşmasına yol açabilmektedir. Öte yandan, dinamik yüklemenin etkisiyle zemin tabakasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı sönümlenebilirse sıvılaşma riski ortadan kalkmaktadır. Arazide yüklemenin etkisiyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi birçok faktöre bağlı olmaktadır. Bunlar; zemin tabakalarının geçirimsizliği, oluşan boşluk suyunun hidrolik eğimi, zemin tabakasının sıkışabilirliği ve dinamik yüklemenin frekansdır. Dinamik yüklemeler sırasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı mümkün olduğu kadar hızlı sönümlenebilirse zeminin sıvılaşma riski o kadar az olmaktadır (Sandoval, 1989; Ural, 2008).

Sıvılaşma riski taşıyan zemin tabakasının üzerinde geçirimsizliği daha az olan bir tabaka olması durumunda, dinamik yüklemelerle oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenebilmesi için gerekli olan drenaj süresinin uzaması nedeniyle zemin tabakasının sıvılaşma riski artacaktır (Çavuş, 2015). Eğer oluşan aşırı boşluk suyu basıncı hızlı bir şekilde sönümlenebilirse zeminde sıvılaşma görülmeyebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006; Mert, 2018).

2.6.15 Sıvılaşabilir zemin derinliği

Sıvılaşma olayını efektif düşey gerilme basıncı kontrol ettiği için yüksek çevresel basınç altında kesme gerilmesinin düşey efektif gerilmeye oranı düşük olacağından için belirli bir derinlikten sonra sıvılaşma riski ortadan kalkmaktadır. EUROCODE-8 (1998)'e göre sıvılaşmanın gözlemlendiği birçok bölgede, 15 m'nin altındaki derinliklerde sıvılaşma olmadığı belirtilmektedir (Aydın, 2008).

2.6.16 Jeolojik oluşum ve katmanlaşma şekli

Kramer (1996)'ya göre zeminlerin oluşumunda etkili olan jeolojik süreçler, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini önemli ölçüde etkilemektedir. Göl ve nehir yataklarında sedimantasyon ile oluşan flüvyal ile alüvyal dolgular, aşınmayla oluşan kolüvyal dolgular ve rüzgarın etkisiyle taşınarak oluşan eoliyen dolgular suya doymun oldukları durumlarda yüksek sıvılaşma riski taşımaktadırlar. Bu tür zemin tabakalarının oluşumunda etkili olan jeolojik

süreçlerden kaynaklı olarak üniform dane boyutunda oluşan zemin tabakası, gevşek durumda oluşmaktadır. Oluşan gevşek zemin tabakası dinamik etkiler altında sıkışma eğilimi göstererek sıvılaşmanın oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, yapay hidrolik dolgular da sıvılaşma potansiyeline sahiptirler. Baraj ve yol çalışmalarında inşa edilen kohezyonsuz ince dane oranı fazla ve iyi sıkıştırılmamış dolguların sıvılaşma potansiyeli oldukça fazladır (Siyahi vd., 2003). Genç ve gevşek çökeller, sıvılaşmaya oldukça uygun ortamlardır. 10 000 yıldan daha genç olan holosen yaşlı akarsu, delta, taşkın ovası ve su kenarlarında çökme yoluyla oluşan birikmiş çökeller oldukça yüksek sıvılaşma riski taşımaktadırlar (Strahler, 1974; Coates, 1990; Erinç 2000; Aytaş, 2019).

2.7 Zeminlerin Sıvılaşma Davranışına Etki Eden Deneysel Faktörler

2.7.1 Numune boyutu

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre numune boyutunun, deney sonuçlarında etkisi olduğu birçok araştırmacı tarafında gözlemlenmiştir.

Lee and Fitton (1969), kumlu zemin kullanarak sabit rölatif sıklıkta, 1.4 ve 2.8 inch çapında hazırlanmış numuneleri sabit çevre basıncı altında yapılan deneylerle, iki farklı numune boyutunun zeminin dinamik davranışına etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre çapı küçük olan numunelerin büyük olanlara göre sıvılaşmaya karşı daha dirençli davranış gösterdikleri; fakat bu farkın %5'i geçmediğini belirterek; numune çapı farkının, deney sonuçlarını önemli etkilemediğini belirtmişlerdir (Ural, 2008).

Finn et al. (1970), aynı zeminden elde edilmiş farklı boyutlarda ki numunelerin çapının azalmasıyla ölçülen çevrimsel mukavemetin artacağını belirtmişlerdir (Ishihara et al., 1975; Miura et al., 1994). Tatsuoka et al. (1986), numune çapının azalmasıyla çevrimsel mukavemetin arttığını, 50; 75; 100 ve 300 mm çapında hazırladıkları numuneler ile yapılan deneyler sonucunda gözlemlenmişlerdir. Bu durumun membran penetrasyon etkisinden kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir. Toki et al. (1986), havada harmanlanma metoduyla hazırlanmış farklı boyuttaki kum numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre; 50 mm çapındaki numunelerin, 70~100 mm çapında olan numunelere göre sıvılaşma dirençlerinin biraz daha iyi olduğunu belirtmişlerdir (Yılmaz, 2006).

Ural (2008), tez çalışması kapsamında yaptığı deneylerde 5 cm ve 10 cm çapında iki farklı boyuttaki numuneler kullanmıştır. 10 cm çapına sahip numunelerin 20 çevrimin sonunda %100 boşluk suyu basıncı oranına ulaştığını, 5 cm çapında hazırlanan numunelerin ise %100 boşluk suyu basıncına hiç ulaşmadığını ve %80 boşluk suyu basıncı oranına 50 çevrimin sonunda ulaşabildiğini gözlemlenmiştir.

2.7.2 Membran etkisi

Membran penetrasyonun, çakıl ve iri kum ile yapılan dinamik üç eksenli deneylerin sonuçlarına önemli etkisi bulunmaktadır. Konsolidasyon aşamasından sonra deneyde kullanılan membran, numunenin dış yüzeyinde bulunan çakıl ve kaba kum daneleri arasındaki boşluklara penetre olmaktadır. Tekrarlı yükleme aşamasında gelişen aşırı boşluk suyu basıncı ile birlikte membran üzerindeki net basınç azalır ve penetrasyon etkisi azalarak hacimsel genişlemeler meydana gelir. Membran penetrasyon etkisi nedeniyle sabit hacim koşulu tam sağlanamadığı için yükleme sırasında ölçülen boşluk suyu basıncı gerçek değerinden daha az olmaktadır. Bununla birlikte ölçülen efektif gerilmeler, sabit hacim koşullarında olan gerçek değerinden daha yüksek bir değerde olmaktadır. Bu nedenle membran penetrasyon etkisi, sıvılaşma direnci ve sönümleme ölçümleri hakkında yanlış sonuçlara varılmasına neden olmaktadır (Akkaş, 2006).

İri dane içeren zeminler ile, drenajsız koşullar altında yapılan deneylerde membran penetrasyon etkisi kaçınılmazdır. Penetrasyon etkisi, deneyde kullanılan numunenin geometrisi ve çevre basıncında meydana gelen değişime göre önceden tahmin edilerek; konsolidasyon aşamasından sonra numuneye su enjekte edilerek veya su geri çekilerek membran penetrasyonu engellenebilmektedir (Nicholson and Seed, 1994; Yılmaz, 2006).

Nicholson and Kashyap (1993), $D_{20}=0.2$ mm olan temiz kumdan hazırlanmış numunelerde membran penetrasyon etkisinin ihmal edilebileceğini ifade etmiştir. O halde siltli zeminlerde D_{20} değerinin daha da küçük olmasından dolayı membran penetrasyon etkisi kumlara göre daha da küçük olacaktır (Ural, 2006). Bu sonuca göre; Ural (2006), yaptığı çalışmada siltin membran penetrasyonundan etkilenmeyeceğini ifade etmiştir.

2.7.3 Numune hazırlama tekniği

Kohezyonsuz granüler zeminlerden alınan doğal numunelerin, özellikleri değişmeden araziden laboratuvara taşınması oldukça zor ve pahalı olmasından dolayı, numunelerin laboratuvarında yeniden oluşturulması tercih edilmektedir. Zeminin doğadaki yapısını, en iyi şekilde temsil edebilmek için numune hazırlama yönteminin doğru belirlenmesi, laboratuvarında yapılacak deneylerin doğruluğu açısından oldukça önem taşımaktadır. Laboratuvarında hazırlanan numunelerin, arazide ölçülen rölatif sıkılıkta ve doğal birim hacim ağırlıkta olması esas alınmaktadır. Ancak Ladd (1977), Mullilis et al. (1977), Tatsuoka et al. (1984), Ishihara (1993); zeminin arazide sahip olduğu rölatif sıkılık ve doğal birim hacim ağırlığına göre laboratuvar ortamında yeniden hazırlanan kum numunelerin, hazırlanma yöntemlerinin farklı olmasıyla sıvılaşma potansiyellerinin farklı olduğunu gözlemlemişlerdir (Ural, 2008).

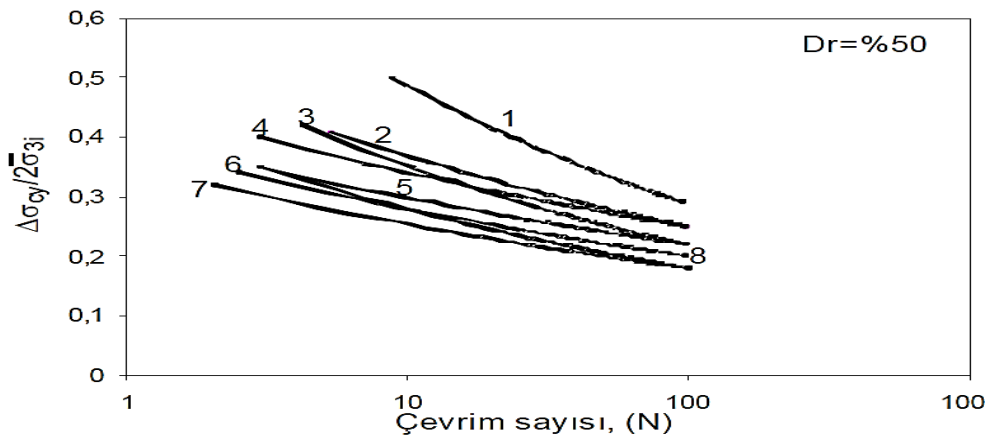
Zeminlerin dinamik davranışını araştırmak amacıyla literatürde çeşitli numune hazırlama yöntemleri tercih edilmektedir. Bunlara örnek vermek gerekirse; tabakalı ıslak yağmurlama, ıslak yağmurlama, suda çökeltme, ıslak

tokmaklama, bulamaç çökeltmesi, kuru huni ve havadan yağmurlama yöntemleri oldukça sık tercih edilen numune hazırlama yöntemleridir (Yenigün, 2018).

Dondurma tekniği kullanılarak araziden alınan örselenmemiş numunelerin sıvılaşmaya karşı dirençleri, havada yağmurlama ve ıslak tokmaklama yöntemleriyle yeniden hazırlanan numunelerin sıvılaşmaya karşı dirençleri kıyaslanmıştır. Numune hazırlama yöntemleri birbiriyle karşılaştırıldığında; ıslak tokmaklama yöntemiyle hazırlanan numunelerin, havada yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelere göre sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yirminci çevrimin sonunda ıslak tokmaklama ile hazırlanan numuneler, örselenmemiş numunelere göre %60 daha fazla çevrimsel dayanım göstermiş; havada yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış numuneler ise örselenmemiş numunelere göre %30 daha fazla çevrimsel dayanım göstermiştir (Yoshimi et al., 1984; Yılmaz, 2006).

Islak tokmaklama yöntemi ile hazırlan numuneler, herhangi bir çevrim sayısında, havada yağmurlama yöntemi ile hazırlanan numunelerden daha fazla çevrimsel dayanıma sahip olmaktadır (Ishihara, 1996; Yılmaz, 2006).

Mulilis et al. (1977), farklı yöntemler ile hazırlanmış numunelerin çevrimsel dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında; suda yağmurlama, havada yağmurlama, kuru ve ıslak şişleme, ıslak tokmaklama, yüksek ve düşük frekansta vibrasyon olmak üzere 8 farklı yöntemin çevrimsel dayanıma etkisi incelenmiştir. Genel anlamda ıslak hazırlama yöntemleri ile hazırlanan numunelerin, kuru hazırlama yöntemleri ile hazırlanan numunelere göre daha fazla çevrimsel dayanım gösterdiği sonucuna varılmıştır. Mulilis et al. (1977) tarafında yapılmış olan deney sonuçlarına göre; numune hazırlama yöntemlerinin çevrimsel dayanıma etkisi, Şekil 2.13’de gösterilmiştir (Ural, 2008).



Şekil 2.13. Farklı sıkıştırma yöntemlerinin çevrim sayısı ile çevrimsel gerilme oranı arasındaki ilişki. (1) yüksek frekansta titreşimli-ıslak, (2) ıslak tokmaklama, (3) ıslak şişleme, (4) düşük frekansta titreşimli-kuru, (5) yüksek frekansta titreşimli-kuru, (6) suda yağmurlama, (7) havada yağmurlama, (8) kuru şişleme (Mulilis et al., 1977; Ural, 2008).

2.8 Siltli Zeminlerin Sıvılaşması

1964 yılında gerçekleşen Niigata ve Alaska depremleriyle kum zeminlerin sıvılaşması gündeme geldiği gibi, 1975 Haicheng ile 1976 Tangshan depremlerinin yaşanmasından sonrada siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli araştırılmaya başlanmıştır. 1987 yılında yaşanan Chibaken-Tohooiki ve 1989 yılında yaşanan Loma Prieta depremlerinde sıvılaşma kaynaklı olarak meydana gelen kum kaynamalarının büyük oranda silt içerdiği, 1995 yılında meydana gelen Hyogoken-Nanbu depreminde ise siltlerin de sıvılaşabileceği görülmüştür (Ural, 2008). Ayrıca 1999 yılında ülkemizde meydana gelen Marmara depreminde kumlu zeminlerin yanı sıra düşük plastisiteli siltlerin de sıvılaşabileceği bir kez daha görülmüştür (Erken, 2004). Günümüzde ise siltli zeminlerin sıvılaşmasıyla ilgili çalışmalar hala devam etmektedir; ancak bu konuyla ilgili belirsizlik tam olarak çözüme kavuşmamıştır. Bu bölümde, siltli zeminlerin sıvılaşmasıyla ilgili daha önceden yapılan çalışmalar; i) granüler zeminlerde silt içeriğinin sıvılaşmaya etkisi ve ii) plastik silt veya silt-kil karışımlarda sıvılaşma olarak iki başlık altında sunulacaktır.

2.8.1 Granüler zeminlerde silt içeriğinin sıvılaşmaya etkisi

Siltli kum zeminlerde, silt içeriğinin sıvılaşma üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Chang et al. (1982), sabit boşluk oranında yaptıkları çalışmada; kum zeminlerin silt içeriğinin %20'ye kadar artmasıyla çevrimsel mukavemet oranının (CRR) önce bir miktar azaldığı; %20'den sonra ise çevrimsel mukavemet oranının (CRR) artışa geçtiğini bildirmişlerdir (Aytaş, 2019).

Cao and Law (1991), kumun sıvılaşma direncine plastik olmayan silt içeriğinin etkisini araştırmak amacıyla sabit boşluk oranında, ıslak tokmaktama yöntemini kullanarak zemin örnekleri hazırlamışlardır. Hazırlanan siltli kum zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak sıvılaşma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; silt içeriğinin %60 seviyelerine kadar artışının çevrimsel mukavemeti azalttığı; %60 silt içeriğinden sonra ise çevrimsel mukavemeti arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Law and Ling (1992), 0.64 ve 0.78 sabit boşluk oranına sahip numuneler üzerinde yaptıkları çalışma sonuçlarına göre; çevrimsel mukavemet oranının (CRR), silt içeriğinin %30'a ulaşıncaya kadar artışıyla bir miktar azaldığını daha sonra ise arttığını belirtmişlerdir (Ural, 2008).

Koester (1994), tekrarlı üç eksenli deney aleti kullanılarak yapmış olduğu 500 drenajsız deney sonucuna göre; %50 rölatif sıklıkta bulunan zeminlerin en küçük çevrimsel mukavemet oranının (CRR), %20 ile %26 ince dane oranı aralığında olduğunu belirtmiştir (Yılmaz, 2006).

Kum ve silt karışımı zeminlerin sıvılaşma potansiyelini anlamak amacıyla yapılan çalışmada; plastik olmayan siltin, kumun içine ilave edilmesiyle çevrimsel mukavemetin azaldığı; belli bir değerden sonra ise silt

içeriğinin artmasıyla, çevrimsel mukavemetin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca plastik siltlerde aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u), %100'e ulaşmadan önce çevrimsel hareketliliğin geliştiği; plastik olmayan siltler de ise aşırı boşluk suyu basıncı artışının, temiz kum zeminler ile benzer olduğu gözlemlenmiştir (Andrews, 1997).

Kum zeminlerin dinamik davranışını incelemek amacıyla yapılan çalışmada; plastik olmayan siltlerin de etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; sabit boşluk oranında çevrimsel mukavemet oranının (CRR), silt içeriğinin belirli bir değerine kadar azaldığı; bu değerden sonra ise çevrimsel mukavemetin (CRR) arttığı gözlemlenmiştir (Polito, 1999).

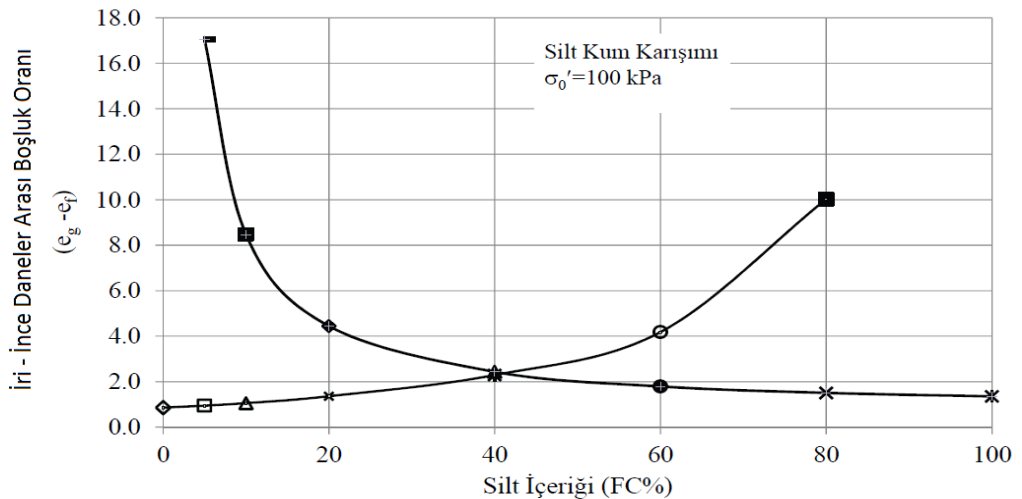
Plastik olmayan siltlerin, kum zeminlerin sıvılaşma direncine etkisini gözlemllemek amacıyla yapılan laboratuvar çalışmasında, 16 farklı kum ve silt içerikli karışım oluşturularak; dinamik üç eksenli deney aletiyle 300 civarında sıvılaşma deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre; kum ve plastik olmayan siltlerden oluşan zemin numunelerinde belirgin iki farklı davranış gözlemlenmiştir. Bu durumun; silt içeriğinin, kum iskeletinin içerisinde bulunan boşlukları doldurarak kumun sürekli iskelet yapısını bozmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Kumun boşluklarında konumlanabilecek en büyük silt miktarı, "eşik silt içeriği" olarak adlandırılmış ve %25-45 arasında değiştiği ifade edilmiştir. Silt içeriği, eşik değerin altında kalan durumlarda; rölatif sıkılığın (D_r) artışıyla, zeminin sıvılaşmaya karşı direncinin de artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Silt içeriğinin eşik değerden daha yüksek olan durumlarda ise sıvılaşmaya karşı direncin, yine rölatif sıkılığın artışıyla artış göstereceği; fakat bu artışın, silt içeriği eşik değerin altında kalan duruma göre daha düşük oranda olacağı belirtilmiştir (Polito and Martin, 2001).

Sunulan örnekler birbirini destekler nitelikte olsa da aksini belirten çalışmalar da mevcuttur. Plastik olmayan silt içeriğinin, sıvılaşma potansiyelini nasıl etkilediği konusunda tam bir uzlaşma sağlanamamıştır (Polito, 1999; Aytaş, 2019). Dinamik üç eksenli deney aleti ile yapılan çalışmalarda; granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin, plastik olmayan ince dane oranının artışıyla azaldığı, arttığı veya belli ölçüde arttığı sonra azaldığını ortaya koyan çelişkili birçok çalışma bulunmaktadır (Polito and Martin, 2001; Akkaş, 2006).

Yapılan birçok çalışmada eşik silt içeriği değerine kadar silt içeriğinin artmasıyla sıvılaşma direncinin azaldığı daha sonra arttığı ile ilgili düşünceler daha ön plana çıkmaktadır (Troncoso, 1990; Polito and Martin, 2001; Papadopoulou and Tika, 2008; Xenaki and Athanasopoulos, 2003; Karakan ve Altun, 2016). Fakat eşik silt içeriği değeri ile alakalı bir belirsizlik bulunmaktadır. Troncoso (1990), eşik silt içeriğinin %30 olduğunu; Xenaki and Athanasopoulos (2003), eşik silt içeriğinin %44 olduğunu belirtirken; Polito (1999) ise eşik silt içeriği değerinin, %25 ile %44 arasında değiştiğini ifade etmektedir (Karakan ve Altun, 2016). Bu sebeple siltli kum zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için "intergranüler" ve "interfine" boşluk oranlarının kullanılması, daha tutarlı sonuçlar elde edilmesine fayda sağlayacağı düşünülmektedir (Thevanayagam, 1998; Altun vd., 2005; Karakan

ve Altun, 2016). Bu yaklaşım temel alınarak yapılan bir çalışma aşağıda özetlenmiştir.

Karakan ve Altun (2016) tarafından yapılan çalışmada; silt oranları değiştirilerek oluşturulan kum-silt karışımının, sıvılaşma davranışları ve sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon özellikleri araştırılmıştır. Karışımlar hazırlanırken rölatif sıkılık yerine, artan silt içeriği ile birlikte kaba daneler (intergranüler, e_g) ve ince daneler (interfine, e_f) arası boşluk oranı kavramlarına göre sıvılaşma kriterleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan zemin, İzmir Bayraklı bölgesinde temel kazısı sırasında elde edilen silt-kum karışımı No4 ve No200 elekler ile elenerek; ($F_C = 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100$) ince dane oranlarında yeniden oluşturulmuştur. Yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre; eşik silt içeriği değeri, %40 olarak bulunmuştur. Global boşluk oranının sabit değeri için silt-kum karışımlarında, silt içeriğinin %40'a kadar artmasıyla sıvılaşma direncinin azaldığı görülmüştür. Eğer silt içeriği %40'ın üzerinde ise eğilimin tersine dönerek; sıvılaşma direncinin artmaya başladığı görülmüştür. Sabit boşluk oranında, silt içeriği değişimi ile birlikte intergranüler ve interfine boşluk oranı değişimi, Şekil 2.14'de verilmiştir. Grafik göz önüne alındığında; eşik silt içeriği değerine kadar iri danelerin, zemin davranışına hakim olduğu düşünülürse intergranüler boşluk oranının artmasıyla sıvılaşma direncinin azalması daha iyi anlaşılmaktadır. Eşik silt içeriğinin üzerinde ki durumlarda ise ince danelerin zemin davranışına hakim olmasıyla birlikte interfine boşluk oranının düşmesi, sıvılaşma direncinde artışa neden olmaktadır. Çalışmaya ek olarak; sıvılaşma sonrası drenaj vanaları açılarak zeminin hacimsel değişimi incelenmiştir. İnce dane oranının artmasıyla hacimsel deformasyonun arttığı görülmüştür. Ayrıca, rölatif sıkılığın artmasıyla hacimsel deformasyonun azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.14. Silt-kum karışımlarında intergranüler (e_g) ve interfine (e_f) boşluk oranı değişimi (Karakan ve Altun, 2016).

2.8.2 Plastik silt veya silt-kil karışımlarda sıvılaşma

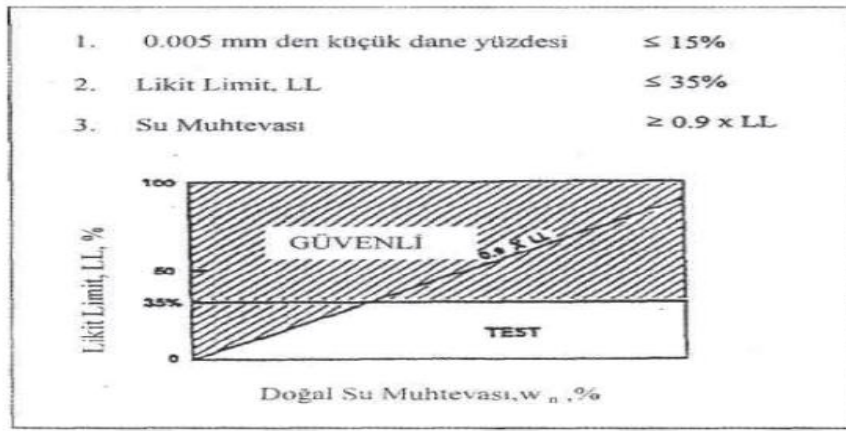
Literatürde plastik silt ya da kil içerikli zeminlerin belirli kriterlere göre sıvılaşma potansiyeli yaklaşımları mevcuttur. Wang (1979) tarafından 1975

Haicheng ve 1979 Tangshan depremlerinde ince-daneli zeminlerde meydana gelen vakalar incelenerek “Çin Kriteri” hazırlanmıştır. Çin kriteri üzerinde ufak değişiklikler yapılarak önerilen benzer kriterler [Finn et al. (1994), Perlea (1999)] silti ve killi zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Bilge ve Çetin, 2017).

Wang (1979) tarafından önerilen Çin kriterlerine göre;

- zemin kil yüzdesi (0.005mm'den küçük dane yüzdesi) $< \%15$
- likit limit (LL) $< \%35$
- su içeriği (w) $\geq$ likit limitin (LL) $\%90$ 'ı

koşullarını sağlaması durumunda sıvılaşabileceği ifade edilmektedir



Şekil 2.15. Wang (1979) tarafından önerilen Çin kriterleri (Finn et al., 1994; Mert, 2018). (Şekil 2.15) (Finn et al., 1994; Andrews and Martin, 2000; Mert, 2018).

Yaşanmış 10 farklı deprem nedeniyle meydana gelen, Japonya’ da 70; Japonya dışından 20 farklı sıvılaşma vakası belgelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre $\%20$ kil içeriğinin sıvılaşmaya karşı direnci arttırdığı belirtilmiştir. Ancak, çalışmada en büyük kil dane boyutu 0.005 mm olarak benimsenmiştir (Tokimatsu and Yoshimi, 1983).

Löslerin dinamik davranışını incelemek için örselenmemiş ve ıslak tokmaklama yöntemiyle yeniden hazırlanan zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; dinamik gerilme altında löslerin davranışının, temiz kumdan farklı olarak eksenel deformasyonun ve aşırı boşluk suyu basıncının aniden artış göstermediği; aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) $\%100$ 'e eşit olmadan önce çift genlikli eksenel deformasyon değerinin, yenilme kriteri olarak kabul edilen $\%5$ 'i geçtiği gözlemlenmiştir. Plastisite indisinin (PI) 10'dan 20'ye yükseldikçe sıvılaşmaya karşı direncin artış gösterdiği, plastisite indisi (PI) değerinin 15 ve üstü değerlerde dinamik yüklemenin 200 çevrime ulaşması halinde dahi aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) $\%100$ 'e eşit olmadığı; fakat $\%5$ ve $\%10$ çift genlikli eksenel deformasyona ulaşıldığı belirtilmiştir. Temiz kumlarla aynı gerilme oranında

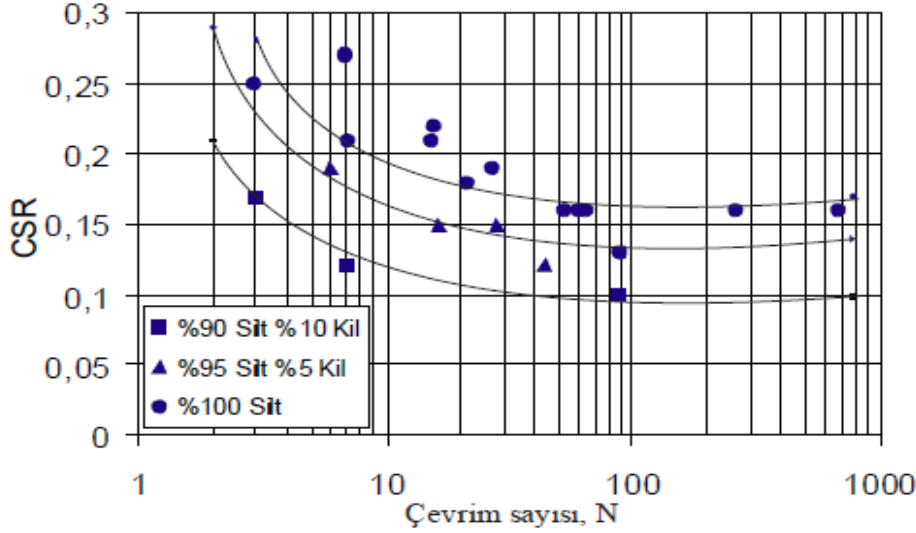
yapılan deneylerde; aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u), yaklaşık 10. çevrimde %100'e eşit olurken; siltler için daha fazla çevrim gerektiği gözlemlenmiştir. Temiz kum zemin numunelerinde ön sıvılaşma ve %5 çift genlikli eksenel deformasyonun, aynı çevrim sayısında gözlemlendiği çalışma sonuçlarına ilave edilmiştir (Puri, 1984).

Gevşek siltli zeminlerde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre; aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) %100'e ulaştığı ve büyük deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında yüksek boşluk suyu basıncı kaydedilmeden önce ciddi büyüklükte deformasyonların meydana geldiği, bazı deneylerde ise aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) hiçbir zaman %100 değerine ulaşmadığı gözlemlenmiştir (Singh, 1988).

Düşük plastisiteli lős ve siltlerin sıvılaşmaya karşı olan dirençlerinin araştırıldığı çalışmada, ıslak tokmaktama yöntemiyle laboratuvarda hazırlanan zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Düşük plastisiteli siltlerde, plastisite indisinin artmasının sıvılaşmaya karşı direnci azalttığı belirtilmiştir. Düşük plastisiteli siltlerde aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) %100'e kadar aşamalı olarak arttığı ve ön sıvılaşmanın 27. çevrimde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Kumlu zemin örnekleri ile yapılan deneylerde ise ilk dört çevrimde aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) aniden arttığı ve ön sıvılaşmanın 33. çevrimde meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca üniform ince kum ve düşük plastisiteli siltin ön sıvılaşmasının, %5 çift genlikli eksenel deformasyondan önce belirlediği belirtilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; düşük plastisiteli siltin sıvılaşmaya karşı direncinin ince kuma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Sandoval, 1989).

Plastisite indisinin, düşük plastisiteli siltli zeminlerin sıvılaşma dirençlerine etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmada; düşük plastisiteli silt ile %5 ve %10 olmak üzere iki farklı oranda kaolin karıştırılmasıyla farklı plastisiteye sahip siltli zemin numuneleri elde edilmiştir. Doygun silt zemin numunelerinde tekrarlı yükleme, aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u) %100' ulaşınca kadar ya da %5, %10 veya %20 çift genlikli eksenel deformasyon oluşana kadar devam edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; plastisitenin artmasıyla, sıvılaşmaya olan direncin azaldığı gözlemlenmiştir; düşük plastisiteli doymuş siltlerin tekrarlı yüklere maruz bırakılmasıyla aşırı boşluk suyu basıncı oranının (R_u) %100'e ulaşarak ön sıvılaşmanın gözlemlendiği; %5 çift genlikli eksenel deformasyon için gerekli yükleme çevrim sayısı, ön sıvılaşma için gerekli yükleme çevrim sayısının aynı olduğu; kil içeriğinin artmasıyla yenilme durumu için gerekli çevrimsel gerilme oranı (CSR) değerinin azaldığı; kil içeriğinin %10'un üzerine çıkmasıyla CSR değerinin daha da azaldığı ve kil içeriğinin artmasıyla düşük plastisiteli siltli zeminlerin eksenel deformasyonunda artış gözlemlenmiştir. %5 kil içerikli zemin numunelerinde, %5 çift genlikli eksenel deformasyondan sonra ve %10 çift genlikli eksenel deformasyondan önce ön sıvılaşma gözlemlenmiştir. %10 kil içerikli zemin numunelerinde ise %10 çift genlikli eksenel deformasyondan sonra ve %20 çift genlikli eksenel deformasyondan önce ön sıvılaşma gözlemlenmiştir (Prakash and Sandoval, 1992).

Sandoval (1989) ile Prakash and Sandoval (1992)' in siltli zemin numuneleriyle yaptıkları dinamik üç eksenli deney sonuçları, Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kil içeriği ve plastisite indisinin artışı ile sıvılaşma için gerekli yükleme çevrim sayısının azaldığı görülmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak; düşük plastisite aralığında bulunan zeminlerde, plastisitenin artış göstermesinin sıvılaşma için gerekli çevrimsel gerilme (CSR) oranını azaltacağı öne sürülmüştür.



Şekil 2.16. Düşük plastisiteli siltin sıvılaşması için gerekli CSR-N ilişkisi (Sandoval, 1989; Prakash and Sandoval, 1992).

1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminde, kumlu siltli zemin tabakalarında meydana gelen sıvılaşma sonucunda zemin yüzeyinde oturmaların meydana geldiği ve kum konilerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bölgeden alınan zemin numuneleriyle laboratuvar ortamında yapılan sıvılaşma deneylerinin sonuçlarına göre; plastisitenin artmasıyla sıvılaşma direncinin arttığı; aynı plastisitede olan zeminlerin, organik zemin içeriğinin artmasıyla bitki liflerinden kaynaklı olarak sıvılaşma direncinde artış olduğu gözlemlenmiştir. İnce dane içeren plastik olmayan (NP) kumların sıvılaşma dirençleri, NP siltlere göre daha yüksek; plastik siltlere göre ise daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, plastisite (PI) ve rölatif sıkılığın (D_r) artmasıyla siltlerin sıvılaşmaya karşı olan direncinin artış gösterdiği tespit edilmiştir (Erken vd, 1995).

Puri and et al. (1996), düşük plastisiteli siltli zemin numuneleriyle yaptıkları sıvılaşma deneylerinde, boşluk suyu basıncı oranının (R_u) %100 ulaşmadığı halde büyük eksenel deformasyonların meydana geldiğini gözlemlenmişlerdir.

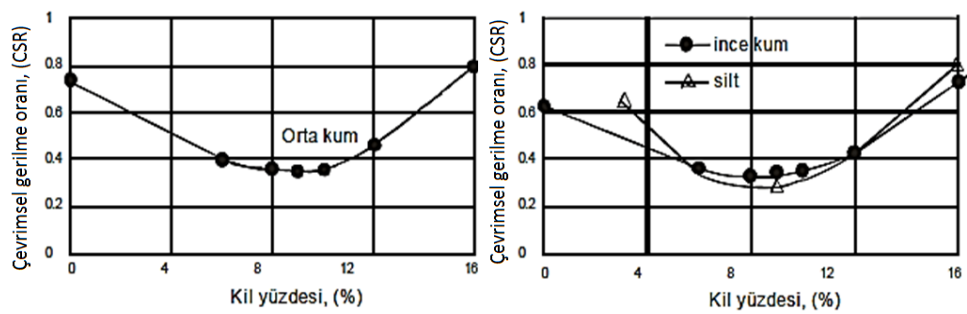
Düşük plastisiteli siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirleyebilmek amacıyla yapılan çalışmada, laboratuvarda hazırlanmış ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak sıvılaşma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; boşluk suyu basıncı oranının

(R_u) %100'e ulaşması olarak tanımlanan sıvılaşma koşulu görülmemesine rağmen sıvılaşma, büyük eksenel deformasyonlar ile tanımlanmıştır. %5 ve %10 çift genlikli eksenel deformasyonların, boşluk suyu basıncı oranı (R_u) %100'e ulaşmadan önce belirlediği; %20 çift genlikli eksenel deformasyonun ise boşluk suyu basıncı oranının (R_u) %100'e ulaşmasından sonra oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca siltlerin aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla birlikte sıvılaşmaya karşı olan direncin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple gerilme geçmişi etkisinin, siltlerin sıvılaşmasında çok önemli olduğu belirtilmiştir (Das vd, 1999).

Perlea et al. (1999) tarafından yapılan çalışmada; deprem sırasında çoğu silt-kil karışımı zeminlerin sıvılaşmaya eğilimi olmamasına rağmen Çin Kriteri ile kıyaslama yapılarak; silt-kil karışımı zeminlerin sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; kohezyonlu zeminlerde, önemli deformasyonların görülmesine rağmen ön sıvılaşmanın nadiren görüldüğü; zemin plastikliğinin sıvılaşma direncini etkilediği; plastisite indisinin (PI), 4-5 arasında en düşük sıvılaşma direncinin gözlemlendiği; plastisite indisi (PI) değerinin 14'den fazla olduğu zeminlerde sıvılaşma görülmediği belirtilmiştir.

Kil içeriğinin, siltlerin sıvılaşma eğilimine etkisinin araştırıldığı çalışmada dinamik üç eksenli deney sonuçlarında göre; siltli zeminlerde kil içeriği artışının, %9 seviyesine kadar sıvılaşma için gerekli çevrimsel gerilme oranını (CSR) azalttığı daha sonra ise arttırdığı gözlemlenmiştir (Niu, 2000).

Kil içeriğinin, kum ve siltlerin sıvılaşma direncine etkisinin araştırıldığı başka bir çalışmada; siltin sıvılaşma direncini etkileyen ana faktörün, içerdiği kil oranı olduğu ve kritik kil içeriği değerinin %9 olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada kil içeriğinin değişimi ile sıvılaşma için gerekli çevrimsel gerilme oranı (CSR) arasındaki ilişki, Şekil 2.17'de gösterilmiştir (Liang et al., 2000).



Şekil 2.17. Kil yüzdesi ile çevrimsel gerilme oranı arasında bağıntı (Liang et al., 2000).

Siltli ve kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyelini incelemek amacıyla yapılan çalışmada; yedi farklı bölgeden alınan zemin numuneleriyle dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; siltli zeminlerin sıvılaşma davranışı, kumlu zeminlere göre daha farklı olarak geliştiği gözlemlenmiştir. Tekrarlı yüklemeler sırasında siltli zeminlerde boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyon, çevrim sayısı ile aşamalı olarak

artış gösterdiği gözlemlenmiş olup; kumlarda ise bu artışın aniden gerçekleşmiş olduğu bildirilmiştir (Atukorala et al., 2000).

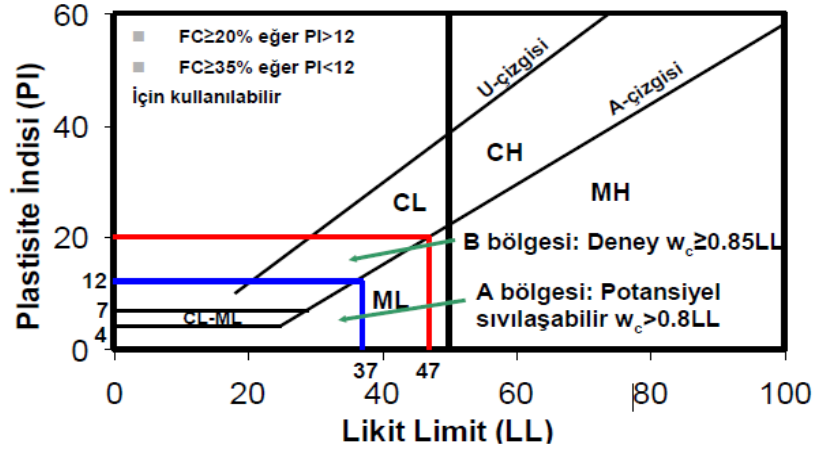
Silt ve siltli kum zeminlerin tekrarlı yükleme koşulları altında gerilme-deformasyon davranışını belirlemek amacıyla, laboratuvarda yeniden hazırlanmış ve örselenmemiş örnekler üzerinde aynı boşluk oranı ve çevre basıncında deneyler yapılmıştır. Örselenmemiş zemin numunlerinde yumuşama ve genleşme (dilation) görülürken; aynı boşluk oranına sahip yeniden hazırlanmış numunelerin bazılarında, gevrek (brittle) ve hacim azalması (contractive) davranışı gözlemlenmiştir. Numune hazırlanmasında ıslak tokmaktama yöntemi benimsenmiş olup, ayrıca kıyaslama yapılabilmesi için bulamaç ve suda yağmurlama yöntemleri kullanılarak da numune hazırlanmıştır. Tüm siltli numunelerin, %73 gibi yüksek rölatif sıklıkta (D_r) hazırlanmasına rağmen dinamik yüklere karşı düşük direnç ve gevrek davranış göstermiş olup; rölatif sıklığı (D_r) %66 olan örselenmemiş numunelerin ise genleşme davranışı gösterdiği belirtilmiştir (Hoeg et al., 2000).

Çizelge 2.1. Siltli ve killi kumların sıvılaşabilirliği (Andrews ve Martin, 2000; Mert, 2018).

	Likit Limit ¹ < 32	Likit Limit $\geq$ 32
Kil İçeriği ² < 10%	Sıvılaşabilir	İleri çalışma gerekir. (Plastik kil harici boyutlu dane olduğu düşünülerek-Mika gibi)
Kil İçeriği ² $\geq$ 10%	İleri çalışma gerekir. (Plastik olmayan kil boyutlu dane olduğu düşünülerek-maden veya ocak atığı gibi)	Sıvılaşmaz

Notlar: 1. Casagrande tipi darbe aleti ile belirlenen likit limit / 2. Kil 0.002 mm'den küçük dane olarak tarif edilir

Andrews and Martin (2000) tarafından yapılan silt, kil, kum karışımı zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik çalışmada; Seed et al. (1984,1985) ve Wang (1979) çalışmalarındaki veriler, yeniden değerlendirilerek elde edilen bulgular Çizelge 2.1'de özetlenmiştir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Ancak ülkemizde yaşanan 1999 Marmara depreminden sonra, Bray et al. (2004) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, Çin kriterleri ile Andrews and Martin (2000)'e göre sıvılaşma potansiyeli olmayan zeminlerin sıvılaşmış olduğu; bu iki yöntemin killi zeminlerin sıvılaşabilirliğini öngörmede yarıldığı gözlemlenmiştir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Düşük plastisiteli silt ve kil karışımı zeminlerde meydana gelen yenilme vakalarının neticesinde, ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin belirlenebilmesi için yeni çalışmalar ortaya çıkmış ve bu çalışmalar kil içeriğinden ziyade plastisite indisi (PI) esas alınarak yapılmıştır. Bunların arasında öne çıkan çalışmalar; Seed et al. (2003), Bray et al. (2004), Bray and Sancio (2006), Boulanger and Idriss (2006) tarafından ortaya atılan çalışmalardır (Bilge ve Çetin, 2017). Bu çalışmalar aşağıda ayrıca sunulmakta ve sonuçları sırasıyla Şekil 2.18; Şekil 2.19; Şekil 2.20'de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Seed et al. (2003) tarafından ince-daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen kriter.

Önalp ve Arel (2002) tarafından, yapılan arazi gözlem ve deneyleri ile laboratuvar deneyleri sonucunda “Adapazarı Kriteri” önerilmiştir. Önerilen kritere göre; ML (düşük plastisiteli silt) zeminlerin sıvılaşabilir olduğunu ve aşağıdaki koşulları sağlayan zeminlerin sıvılaşabileceği belirtilmiştir.

Önerilen Adapazarı kriteri;

- $LI \geq 1$
- $LL \leq 30$
- Kıl yüzdesi $\leq \%15$

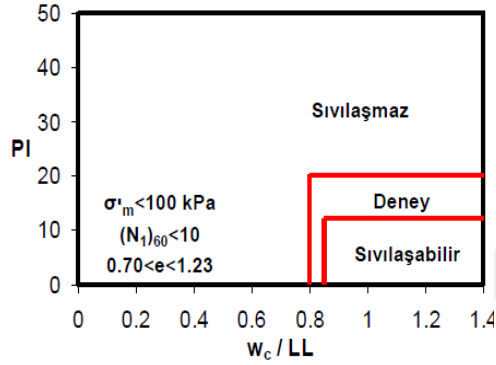
Burada, LL: likit limit, LI: likitite indisi, Kıl yüzdesi: $2 \mu m$ ’ den geçen yüzde olarak verilmiştir.

1999 yılı Marmara depreminde, Adapazarı’nda meydana gelen zemin yenilmelerinin gözlenmesi ile, Çin Kriteri kıyaslaması yapılmıştır. Deprem sırasında sıvılaşma görülen zeminlerin, Çin Kriteri’nde belirtilen kıl içeriği koşuluna uymadığı belirtilmiştir. Bu durum, kıl boyutundaki danelerin miktarından değil; danelerin mineralojik özelliklerinin etkisinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Zemin içinde kıl boyutunda bulunan danelerin birçoğunu, kuvars ve feldispat’dan oluşması nedeniyle; kıl içeriği kriterinin, yanlış ve güvenilmez sonuçlara neden olacağı ifade edilmiştir. Ayrıca, zemin içeriğinde kıl oranının yüksek olmasıyla, sıvılaşmanın görülmediği de rapor edilmiştir (Sancio et al., 2002).

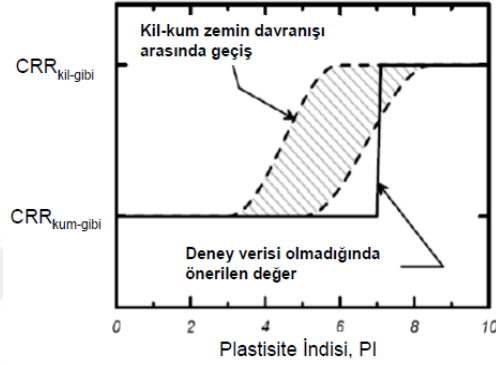
1994 Northridge, 1999 Marmara ve 1999 Chi Chi depremlerinde meydana gelen zemin sıvılaşma olaylarının, Çin Kriteri ile uyuşmadığı ifade edilmiştir. Sıvılaşma oluşumunda kıl içeriğinden ziyade kıl minerallerinin etkisi olduğu için; kıl içeriği yerine plastisite indisinin (PI), sıvılaşmayı belirlemede daha uygun bir yaklaşım olacağı öne sürülmüştür. Bu nedenle, siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, plastisite indisi (PI) ve w_c/LL yaklaşımıyla değerlendirilerek, aşağıda verilen kriterler teklif edilmiştir;

- $PI \leq 12$ ve $w_c \geq 0.85$ LL (sıvılaşmaya hassas),
- $12 < PI < 18$ ve $w_c \geq 0.8$ LL (sıvılaşmaya dirençli, çevrimsel hareketliliğe hassas),
- $PI > 18$ ve $w_c < 0.80$ LL (sıvılaşma hassaslığı bulunmayan)

Burada LL: Likit limit, PI: Plastisite indisi, w_c : Doğal su içeriği olarak verilmiştir. Ayrıca kriterlerin grafiksel gösterimi, Şekil 2.19.'da sunulmuştur (Bray et al., 2004; Bray and Sancio, 2006).



Şekil 2.19. Bray et al. (2004) tarafından ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen kriter.



Şekil 2.20. Boulanger and Idriss (2006) tarafından ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için önerilen kriter.

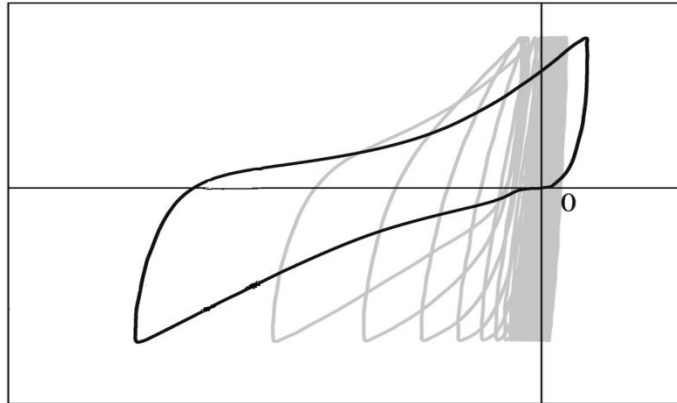
Siltli ve killi zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan Çin Kriteri'nin, sadece arazi gözlemlerine dayandırılmasından dolayı eksik bir kriter olduğu öne sürülmüş; zeminlerin, mekanik davranışının da göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır. Siltli zeminlerin, sıvılaşma ve çevrimsel hareketliliğinin ayrımı yapılabilmesi için siltler, kendi içinde kumsu (Plastisite indisi < 7 olan zeminler) ve kilsi (Plastisite indisi ≥ 7 olan zeminler) olarak ifade edilmiştir. Kumsu zeminlerde sıvılaşma, kilsi zeminlerde ise çevrimsel hareketliliğin meydana geldiği öne sürülmüştür. Ayrıca kil içeriğinin, sıvılaşma kriteri olarak tercih edilmemesi önerilmiştir (Boulanger and Idriss, 2006).

2000 yılı sonrası sunulan çalışmaların, sıvılaşmayı ele alış biçimi, laboratuvar deney sonuçları ve saha gözlemlerini bir arada göz önünde bulundurmuş olması nedeniyle; 2000 yılı öncesinde sunulan çalışmalara göre sıvılaşma konusunda daha büyük ilerlemeler sağladığı yorumu yapılabilir. Fakat bu çalışmalar birlikte göz önüne alındığında fikir birliği sağlanmadığı da açıktır. Ayrıca literatürde, sıvılaşma oluşumunu tanımlamak için eksenel deformasyon ya da aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u) türünden tarif edilmiş farklı kriterlerin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Lee and Albeisa (1974) %100 aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u), Chang et al. (1982) düşük plastisiteli siltlerde %10 çift genlikli eksenel deformasyon, Andersen et al. (1988) %15 çift genlikli eksenel deformasyon, Boulanger et al. (1991) %3 tek genlikli eksenel deformasyon, Ishihara (1993) %7.5 çift genlikli eksenel deformasyon,

Koester (1994) düşük plastisiteli siltlerde aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u) %100; yüksek plastisiteli siltlerde %2.5 çift genlikli eksenel deformasyon, Prakash and Sandoval (2003) silt kil karışımlarda %20 çift genlikli eksenel deformasyon, Wu et al. (2004) %80 aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u) sıvılaşma kriteri olarak benimsenmiştir. Bu bilgiler göz önüne alındığında; siltli zeminlerde yenilmelerin, %2.5 - %20 çift genlikli eksenel deformasyon aralığında olduğu görülmektedir. Bu geniş aralığın, sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik ayırımının, net olarak yapılamadığından kaynaklandığı açıktır. Bu çalışmada yapılan deneyler, JGS 0541 (2000) standardına göre yapılmış olup; standardın önerdiği gibi %5 çift genlikli eksenel deformasyon ve %95 aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u), sıvılaşma kriteri olarak benimsenmiştir.

2.9 Enerji Temelli Sıvılaşma Analizi

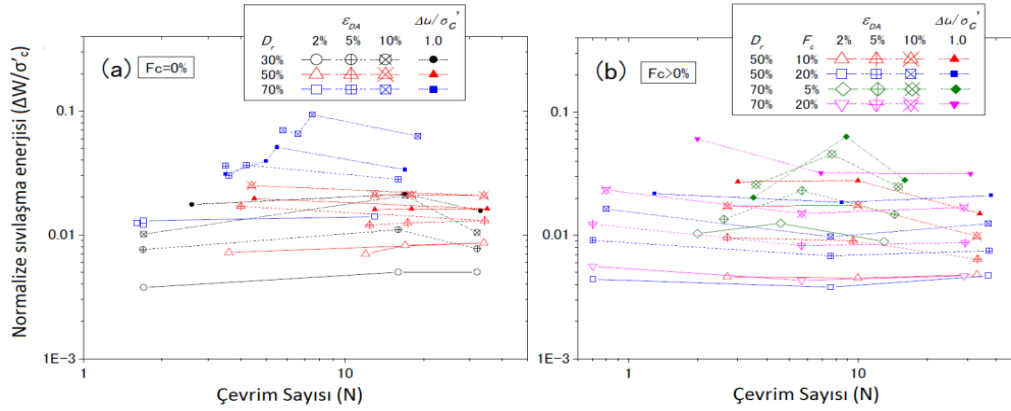
Zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençlerini belirlemek için tercih edilen üç genel yöntem vardır. Bunlar; 1) Gerilme temelli yöntem (Seed and Idriss, 1971), 2) Birim deformasyon temelli yöntem (Dobry et al, 1982) ve 3) Enerji temelli yöntemdir (Nemat-Nasser and Shokooh, 1979). Enerji temelli yöntem, sıvılaşma analizinde ilk defa Nemat-Nasser and Shokooh (1979) tarafından ortaya atılmış ve kullanılmıştır. Zemin danelerinin kalıcı olarak yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilen ve sıvılaşmaya neden olan enerji, belirli koşullar altında sabit bir değerdir. Tekrarlı yükleme esnasında danelerin kalıcı olarak yeniden düzenlenmesi sırasında birim hacimde biriken enerji (J/m^3), bir çevrim sırasında geliştirilen histerez döngüsü içindeki alana eşit olmaktadır (Şekil 2.21). Zemin tarafından sıvılaşma başlangıcına kadar sönmülenen ve birim hacimde biriken toplam enerji (ΔW), sıvılaşma enerjisi veya kapasite enerjisi olarak tanımlanmaktadır (Figuroa et al., 1994; Liang et al., 1995; Kayabalı vd., 2018, Azeiterio et al, 2017).



Şekil 2.21. Tipik bir gerilme-birim deformasyon histerez döngüsü (Ni et al, 2020).

Farklı araştırmacılar tarafında enerji temelli sıvılaşma yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir;

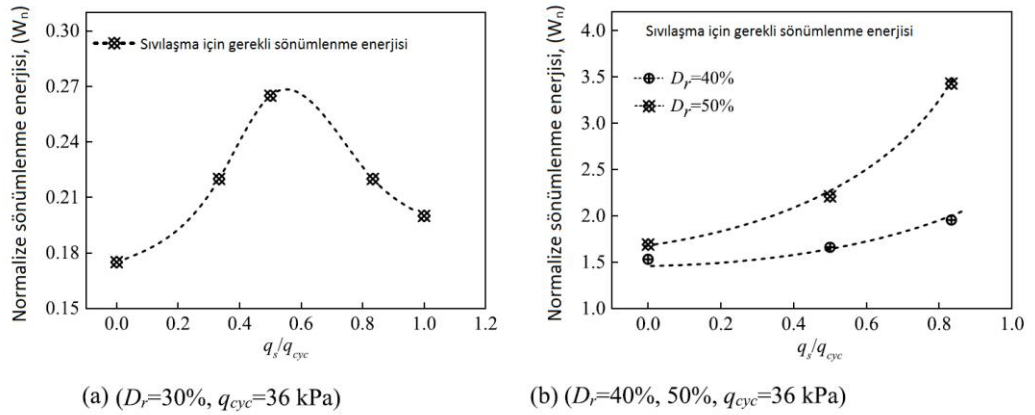
Kokusho (2013) tarafından yapılan çalışmada; zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için kullanılan enerji temelli ve gerilme temelli iki farklı yöntem kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında; Futtsu sahilinden alınmış kumlu zemin ve düşük plastisiteli ($PI=6$) ince dane kullanılarak; $D_r = \%30, 50$ ve 70 olmak üzere üç farklı rölatif sıkılıkta; $F_c = \%10, 20$ ve saf kum olmak üzere üç farklı ince dane içeriğinde örselenmiş numuneler oluşturularak; enerji temelli yöntem ile sıvılaşma potansiyelleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; rölatif sıkılığın artmasıyla sıvılaşma için gerekli enerjinin arttığı, ince dane içeriğinin artmasıyla ise sıvılaşma için gerekli enerjinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında aynı parametrelere sahip numuneler üzerinde farklı tekrarlı gerilme oranı uygulanarak sıvılaşma için gerekli enerjinin değişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tekrarlı gerilme oranını artmasıyla sıvılaşma için gerekli çevrim sayısının azaldığı görülmüş; fakat birim hacme düşen enerji miktarları $\%70$ rölatif sıkılıkta ki numuneler hariç birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 2.22'de farklı gerilme oranı uygulanan numunelerin sıvılaşması için gerekli çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisinin çevresel basınçla normalize edilmiş hali görülmektedir. Çalışmanın devamında enerji temelli ve gerilme temelli yöntemler kullanılarak gerçek vaka analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre her iki yöntemde tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1.22. Sıvılaşma için gerekli normalize enerji oranları a) $F_c=0\%$, b) $F_c>0\%$ (Kokusho, 2013).

Enerji temelli sıvılaşma yöntemi benimsenerek yapılan çalışmada; farklı rölatif sıkılıkta hazırlanmış kum numuneler, dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak farklı çevrimsel gerilme oranlarında ve farklı başlangıç deviatör gerilmelerde deneye tabi tutularak; sıvılaşma için gerekli sönümlenme enerjileri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında; $\%30$ rölatif sıkılıkta gevşek kum, $\%40$ ve $\%50$ rölatif sıkılıkta orta sıkılıkta hazırlanmış kum numuneler üzerinde; $q_s = 0, 12, 18, 30, 36$ (kPa) olmak üzere beş farklı başlangıç deviatör gerilme; $q_{cyc} = 25, 30, 36, 43, 50$ (kPa) olmak üzere beş farklı çevrimsel gerilme benimsenerek deneyler yapılmıştır. Deneyler sırasında sıvılaşma koşulu gevşek kumlar için akma sıvılaşması olarak; orta sıkılıkta ki kumlar için $\%10$ çift

genlikli aksenal deformasyon olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; sıvılaşma için gerekli sönümlenme enerjisinin, orta sıklıkta ki kumlarda çevrimsel gerilme oranından etkilenmediği ve benzer enerji değerler elde edildiği gözlemlenmiştir. Gevşek kumlarda ise bunun aksine çevrimsel gerilme oranının artmasıyla, sıvılaşma için gerekli sönümlenme enerjisinin azalım gösterdiği gözlemlenmiştir. Başlangıç deviatör gerilmenin artmasıyla, gevşek kumlarda sıvılaşma için gerekli enerji değerinin önce artış gösterdiği daha sonra azalma eğilimine girdiği gözlemlenirken, orta sıklıkta ki kumlarda ise sıvılaşma için gerekli enerjinin sürekli artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 2.23’de bu durum açıkça görülmektedir. Ayrıca, önceki çalışmalardan bildiğimiz üzere rölatif sıklığın artmasıyla zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncinin artış göstermesi, sıvılaşma için gerekli sönümlenme enerjisinin artışı şeklinde bu çalışmada da gözlemlenmiştir (Ni et al, 2020).



Şekil 2.23. Başlangıç deviatör gerilme ile sönümlenme arasında ki ilişki (Ni et al, 2020).

Baziar et al. (2011) tarafından yapılan çalışmada, kum-silt karşımı zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini tahmin etmek amacıyla; zeminlerin sönümlenme enerjisinin baz alındığı bir model geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu model geliştirilirken daha önceden yapılmış çalışmaların verilerinden faydalanılmıştır. Çalışma kapsamında; dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme, dinamik burulma ve santrifüj deney aletleri kullanılarak elde edilen deney sonuçlarını barındıran oldukça geniş veri tabanı kullanılmıştır. Veri tabanında bulunan deney sonuçlarının 280 tanesi modelin geliştirilmesinde, 119 tanesi ise oluşturulan modelin denenmesi amacıyla kullanılmıştır. Oluşturulan modelde; fiziksel durum parametresi olarak rölatif sıklık ve çevresel efektif basınç (D_r , σ'_c); fiziksel doğal parametre olarak ince dane oranı, üniformalık katsayısı ve ortalama dane boyutu (F_C , C_u , D_{50}) olmak üzere toplamda beş parametre dikkate alınmıştır. Elde edilen model, Denklem (2.3)’de logaritmik tabanda gösterilmiştir. Oluşturulan modelin determinasyon katsayısı (R^2), 0.88 olarak bulunmuştur.

Baziar et al. (2011) tarafından önerilen sıvılaşma enerjisi modeli;

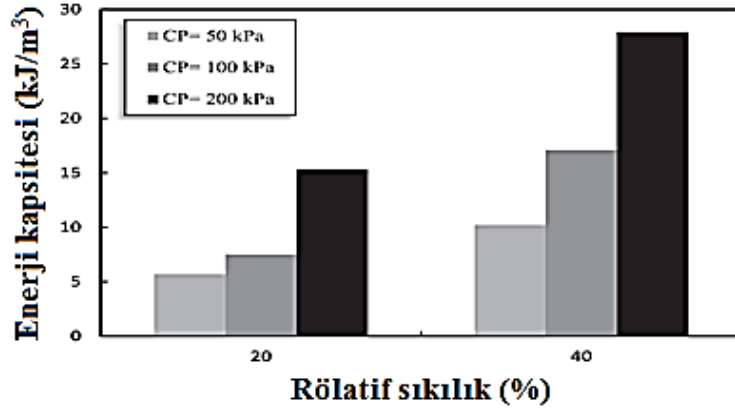
$$\begin{aligned}
 \log \Delta W = & 3.69 - \left(\frac{0.154x_3 + 1.25x_4x_5 - 11.8 \times 10^{-4}x_2x_3}{x_3x_5} \right) - \left(\frac{0.154x_4}{x_3 - 2.798x_4} \right) + \\
 & \left(\frac{1.4 + 10^{-3}(x_1 + 5.382)}{x_3(x_3x_5 - x_4)} \right) - \left(\frac{0.08(1.52 - x_4)}{5.218x_5 - x_4} \right) - \left(\frac{0.003x_3}{x_4 - 6.214} \right) - \left(\frac{5.9 \times 10^{-5}(x_1 + x_4 + x_5)}{2.5837 - x_4} \right) - \\
 & \left(\frac{0.056x_2(x_4 - 6.214)}{x_3x_5 - 6.214(x_4 - 6.214)} \right) + \left(\frac{1}{x_3} \right) \left(\frac{0.202x_4(2.5837 - x_4)}{(x_1 + x_3)(2.5837 - x_4) - x_2} \right) + 3.7 \times 10^{-5}(x_1 + \\
 & x_2)(x_1 - x_3) - 1.2 \times 10^{-3}(x_2 - x_4)(x_5 - 4.973) + 9.5 \times 10^{-7}(x_2)^2(x_1x_5 + \\
 & x_4) + 0.01x_3(x_5)^2(x_4 - 5.214) - 0.019x_2 - 4.5 \times 10^{-5}(x_1)^2 + 0.003x_1^1
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Denklemden geçen parametreler, Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Denklem (2.3)’de kullanılan parametre tanımları (Baziar et al, 2011).

Sembol	Tanımlama
x_1	σ'_c (kPa)
x_2	$D_r + 50$ (%)
x_3	FC + 5 (%)
x_4	C_u
x_5	D_{50} (mm)

Babolsar kumunun sıvılaşma potansiyelini belirlemek ve fiber malzeme kullanılmasının sıvılaşma direncine etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmada, enerji temelli sıvılaşma yöntemi benimsenmiştir. Çalışma kapsamında; iki farklı rölatif sıkılık ($D_r = \%20-40$), üç farklı çevresel basınç (50, 100 ve 200 kPa), üç farklı fiber boyu (6, 12, 18 mm), üç farklı fiber miktarı (kütlece %0, 0.5, 1) belirlenmiş ve dinamik burulma deney aleti kullanılarak sabit çevrimsel gerilme oranında deneyler yapılmıştır. Fiber malzeme numune içine geliş güzel olacak şekilde, zeminle karıştırılarak kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre kıyaslamalar yapılırken %5 çift genlikli eksenel deformasyon, sıvılaşma sınırı olarak kabul edilmiş; bu sınıra kadar numunelerin sönümlediği enerji miktarı, “Enerji kapasitesi” olarak tanımlanmış ve zeminlerin sıvılaşmaya karşı direnci kıyaslanırken enerji kapasitesi kavramı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; fiber miktarı ve fiber boyunun artışıyla zeminlerin enerji kapasitesi, kayda değer artış göstermiştir. Çevresel basınç ve rölatif sıkılıkta ki artış da zeminlerin enerji kapasitelerini arttırmıştır yani sıvılaşmaya karşı dirençlerini arttırmıştır. Şekil 2.24’de bu durum görülebilmektedir (Amini and Noorzad, 2018).



Şekil 2.24. Enerji kapasitesinin rölatif sıklık ve çevresel basınç ile değişimi (Amini and Noorzad, 2018).

Yapılan Çalışmada Coimbra kumunun sıvılaşma potansiyeli, üniform olmayan yükleme altında ve enerji temelli sıvılaşma yöntemi ile incelenmiştir. Deneylerde gerçekçi yükleme uygulanabilmesi için öncelikle gerçek depremlerin özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, maksimum ivmenin yeri için üç özel durum benimsenmiştir; yükleme başlangıcında, başlangıç efektif gerilme değerinin %50'sine ulaştığı anda ve başlangıç efektif gerilme değerinin %80'ine ulaştığı anda maksimum ivme uygulanmıştır. Ek olarak, basitleştirilmiş bir yükleme modeli kullanmanın etkisini değerlendirmek için sabit genlikli tekrarlı gerilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre; sıvılaşma başlangıcı için gereken çevrim sayısının, sadece uygulanan yüklemenin büyüklüğüne değil; aynı zamanda deney sırasında uygulanan yükleme modeline de bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sahada ki sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi sırasında deneyin, yükleme düzensizliğini içermesinin gerekip gerekmediğini anlamak amacıyla elde edilen deney sonuçları, enerji temelli yöntemle de değerlendirilmiştir. Maksimum ivme bulunduran yükleme döngüsünün hem genliğinden hem de maksimum ivmenin konumundan bağımsız olarak çevresel gerilme ile normalize edilmiş kapasite enerjisi ($\Delta W / \sigma'_c$) ve aşırı boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasında doğrudan bir ilişkinin var olduğu görülmüştür. Ayrıca, üniform yükleme kullanıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; sahadaki sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde üniform yüklemelerin, enerji yöntemiyle değerlendirilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir (Azeiterio et al, 2017).

Figuerroa et al. (1994) tarafından, enerji temelli sıvılaşma yöntemini değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmada; Reid Bedford kumu üzerinde farklı çevresel gerilme koşullarında ($\sigma'_c=41.4, 82.7$ ve 124.1 kPa), farklı rölatif sıklıklarda ($D_r=\%50, 60$ ve 70) hazırlanan numuneler üzerinde üç farklı sabit deformasyon genlikli ($\%1.02, 0.47$ ve 0.15) burulma deneyleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında toplamda 27 adet burulma deneyi yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre; sıvılaşma için gerekli sönümlenme enerjisinin, hem rölatif sıklığın artmasıyla hem de çevresel basıncın artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı sabit deformasyon genliklerinde uygulanan deney sonuçları birbiriyle kıyaslandığında; sıvılaşma için gerekli enerjinin, çok az değiştiğini ve belirgin bir yönelim olmadığı araştırmacılar tarafından

belirtilmiştir. Bu konuyu daha detaylı öne çıkarmak amacıyla; sıvılaşma için gerekli enerjisinin, diğer parametrelerle (rölatif sıkılık, çevresel basınç ve yükleme sırasında uygulanan sabit deformasyon genliği) olan ilişkisini matematiksel olarak modellemek için regresyon analizi yapılmıştır. Denklem (2.4)'de üç parametrede kullanılırken, Denklem (2.5)'ya uygulanan sabit deformasyon genliği dahil edilmemiştir.

Elde edilen denklemler (Figueroa et al., 1994);

$$\log(\Delta W) = 1.982 + 0.00477\sigma'_{ort} + 0.0116D_r + 0.0376\Gamma \quad ; R^2=0.942 \quad (2.4)$$

$$\log(\Delta W) = 2.002 + 0.00477\sigma'_{ort} + 0.0116D_r \quad ; R^2=0.937 \quad (2.5)$$

Burada, ΔW : Sıvılaşmayı tetiklemek için gerekli olan enerji (J/m³), σ'_{ort} : Başlangıçtaki ortalama etkin çevre basıncı (kPa), D_r : Başlangıçtaki rölatif sıkılık (%), Γ : Uygulanan kesme deformasyon genliği (%), R^2 : Detarminasyon katsayısıdır.

Her iki denklemin de detarminasyon katsayısı (R^2), oldukça yüksek olduğu ve detarminasyon katsayıları arasındaki farkın, küçük olduğu göz önüne alındığında; bir zeminin sıvılaşma potansiyelini enerji temelli yöntemle belirlenmesi sırasında, yükleme düzensizliğini içermesine gerek olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca enerji temelli sıvılaşma analizi yönteminin, sıvılaşma potansiyeli belirlenmesi gereken bir arazide oldukça kullanışlı olduğu düşünülmüştür (Figueroa et al, 1994).

Kayabalı vd. (2018) tarafından, zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesi için enerjiye dayalı yöntemin kullanılabilirliğini göstermek amacıyla yapılan çalışmada; daha önceki çalışmacıların farklı zemin parametreleri kullanarak regrasyon analizi sonucu elde ettiği enerji temelli modeller, vaka analizlerinde kullanılmıştır. Vaka analizleri yapılırken; 18 Ekim 1989 Loma Prieta deprem kayıtları ve deprem sırasında ikisinin sıvılaştığı, diğer ikisinin de sıvılaşmadığı bilinen dört farklı alan için yukarıda önerilen modeller değerlendirilmiştir. Modelleri kullanabilmek için gerekli zemin parametreleri, Idriss and Boulanger (2010)'dan alınmıştır. Modellerden elde edilen enerji değerleri deprem tarafından sahaya iletilen enerjiyle oranlanarak modellerin geçerliliği değerlendirilmiştir. Denklem (2.5) ve Denklem (2.6) için dört ayrı saha için de sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Fakat Denklem (2.7) ve Denklem (2.8) için sadece iki saha için sonuçların örtüştüğü görülürken, diğer iki sahada ise hatalı sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacıların yorumlarına göre; Enerji temelli sıvılaşma yönteminin, saha analizlerinde güvenli kullanılabilmesi için bu konuda daha fazla vaka analizleri yapılmasının gerektiğini vurgulamışlardır.

Vaka analizlerinde kullanılan modeller;

$$\log(\Delta W) = 2.002 + 0.00477\sigma'_{ort} + 0.0116D_r \quad (\text{Figueroa et al., 1994}) \quad (2.5)$$

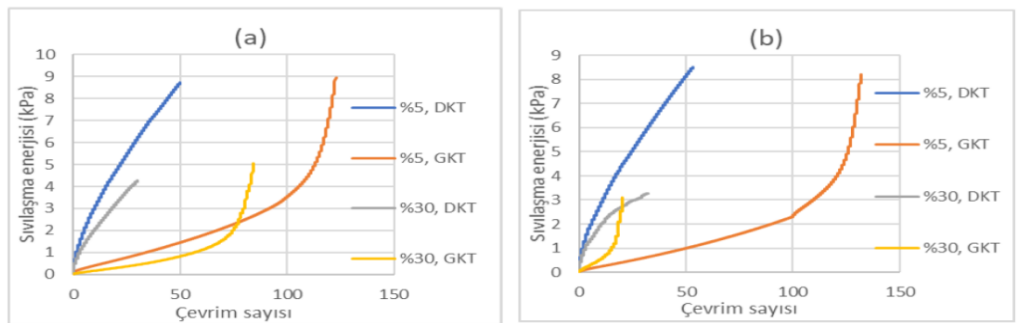
$$\log(\Delta W) = 2.062 + 0.0039\sigma'_{ort} + 0.0124D_r \quad (\text{Liang, 1995}) \quad (2.6)$$

$$\log(\Delta W) = 1.164 + 0.0124\sigma'_{\text{ort}} + 0.0209D_r \quad (\text{Dief and Figueroa, 2001}) \quad (2.7)$$

$$\Delta W = 0.1363P'_o (D_r^{4.925}) + 5.375 (10^{-3} P'_o) \quad (\text{Jafarian et al., 2012}) \quad (2.8)$$

Burada, ΔW : Sıvılaşmayı tetiklemek için gerekli olan enerji (J/m^3), σ'_{ort} : Başlangıçtaki ortalama etkin çevre basıncı (kPa), D_r : Başlangıçtaki rölatif sıkılık (%), P'_o : Ortalama başlangıç gerilmesidir (kPa). Sadece Denklem (2.8) için ΔW : (kJ/m^3) cinsinden verilmiştir (Kayabalı vd., 2018).

Zeminlerin sıvılaşma direnci; zeminin rölatif sıkılığı, derecelenmesi, ince dane içeriği ve partikül boyutundan önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında; silt içeriği %5'ten %30'a kadar değişen iki farklı kumun (20/30 ve 30/50), iki farklı rölatif sıkılıkta (D_r =%30 ve 50) olmak üzere dinamik basit kesme deneyleri yapılmış ve enerji temelli yöntem kullanılarak sıvılaşma potansiyelleri irdelenmiştir. Ayrıca deneyler hem gerilme kontrollü hem de deformasyon kontrollü yapılarak deney yönteminin sıvılaşma enerjisi üzerinde ki etkisi incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre; ince dane içeriğinin artışıyla her iki kum zemininde sıvılaşma enerjisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu konuyla ilgili benzer çalışmalarda göz önünde bulundurulduğunda eşik silt içeriği değerinin %30'dan daha büyük olduğu düşünülmüştür. Silt içeriğinin artmasıyla sıvılaşma enerjisinin düşmesi yani sıvılaşma direncinin düşmesi buna bağlanmıştır. Rölatif sıkılığın değişimi göz önüne alındığında; artan rölatif sıkılıkla beraber iki kum zemininde sıvılaşma enerji artış göstermiş; fakat ortalama dane çapı farklı olan bu zeminlerin sıvılaşma direnci aynı derecede etkilenmemiştir. Elde edilen sonuçlar hem deformasyon kontrollü hem de gerilme kontrollü deneylerde aynı şekilde gözlemlenmiştir. Sıvılaşma enerjisinin, kullanılan deney yönteminden etkilenip etkilenmediği üzerine sonuçlar ayrıca irdelenmiştir. Buna göre deformasyon kontrollü deneyde çevrim sayısı arttıkça sönümlenen enerjinin artış miktarının azaldığı görülürken; gerilme kontrollü deneyde ise bunun tersi olarak çevrim sayısının artışıyla sönümlenen enerjinin artış miktarının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.25). Fakat sıvılaşma başlangıcına kadar olan kümülatif sönümlenme enerjileri yani nihai sıvılaşma enerjileri arasında anlamlı fark olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle deney yönteminin sıvılaşma enerjisi üzerinde oldukça sınırlı etkisi olduğu düşünülmüştür (Sönmezer, 2020).



Şekil 2.25. %50 rölatif sıkılıkta, %5 ve %30 silt içeriğinde gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü deneyler a) 20/30 kumu b) 30/50 kumu (Sönmezer, 2020).

2.10 Sıvılaşma Sonucunda Oluşan Hasar Türleri

Sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde büyük depremler sonrası sıvılaşma kaynaklı ciddi büyüklükte yapısal hasarlar meydana gelmektedir. Geçmişte yaşanmış; 1964 Niigata depremi ($M_w=7.5$), 1964 Alaska depremi ($M_s=9.2$), 1995 Kobe depremi ($M_w=7.2$) sıvılaşma kaynaklı yapısal hasar oluşumuna verilebilecek en önemli örneklerdir. Bunların yanında ülkemizde yaşanan 1999 Marmara depreminde ($M_w=7.5$) görülen ciddi sıvılaşma vakaları bulunmaktadır. Bu başlık altında sıvılaşmadan kaynaklanan hasar türlerini inceleyeceğiz.

2.10.1 Taşıma gücü kaybı

Taşıma gücü kaybı, aşırı boşluk suyu basıncının oluşumu ile zeminin mukavemetini kaybetmesi ve sıvılaşmanın etkisiyle zemin yumuşamasından kaynaklanmaktadır (Cooke, 2000). Sıvılaşma sonucunda zemin, taşıma gücünü kaybeder ve ciddi boyutta deformasyonların meydana gelmesiyle sonuçlanır. Zemin deformasyonları nedeniyle üzerinde bulunan yapılarda oturma, yan yatma, batma, devrilme gibi hasarlar meydana gelmektedir (Mert, 2018). Şekil 2.26'da taşıma gücü kaybının oluşum şeması; Şekil 2.27, Şekil 2.28, Şekil 2.29'da ise taşıma gücü kaybı sonucu oluşan hasarlara gerçek örnekler gösterilmektedir (Doğan, 2015).



Şekil 2.26. Taşıma gücü kaybı oluşum şeması (Doğan, 2015).



Şekil 2.27. Taşıma gücü kaybı sonucu yan yatan bir bina Gölçük Türkiye-1999 (Doğan, 2015).



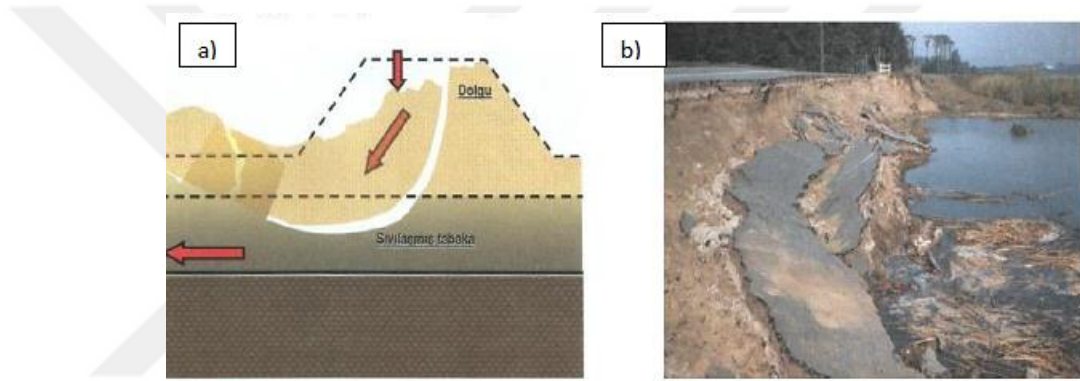
Şekil 2.28. Niigata Japonya-1964 depremi sonucu taşıma gücü kaybına uğramış zemin sonucu devrilen binalar (Doğan, 2015).



Şekil 2.29. Taşıma gücü kaybı sonucu devrilen binalar Adapazarı Türkiye-1999 (Doğan, 2015).

2.10.2 Akma göçmesi

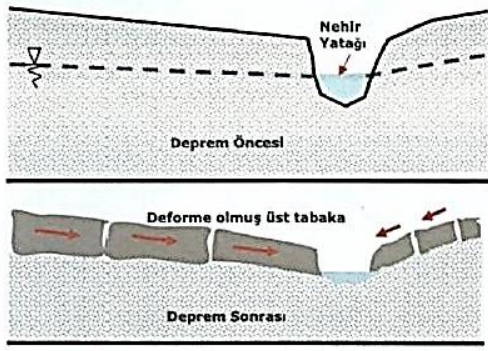
Akma göçmeleri genellikle eğimi 3 dereceden daha fazla olan şevlerde, suya doygun gevşek kum veya siltli kumlarda meydana gelmektedir (Youd, 1984; Ulusay, 2000). Sıvılaşmadan kaynaklanan en büyük deformasyon oluşumları bu hasar türlerinde meydana gelmektedir (Doğan, 2015). Akma göçmesi sırasında çok büyük zemin kütleleri, saatteki hızı onlarca kilometreyi bulan bir hızla kilometrelerce hareket edebilmektedirler. Ayrıca akma göçmesi tamamen sıvılaşmış bir tabakada gerçekleşeceği gibi; daha mukavemetli sıvılaşmamış zemin tabakasının altında bulunan zeminin sıvılaşması sonucunda, zemin kütlelerinin blok halinde hareket etmesiyle de gerçekleşebilmektedir (Ulusay, 2000; Aytaş, 2019). Şekil 2.30'da akma göçmesinin oluşum şeması ve meydana gelmiş akma göçmesi görülmektedir (Doğan, 2015).



Şekil 2.30. a) Akma göçmesinin oluşum biçimi, b) San- Francisco'daki Merced Gölü kıyısında 1957'de meydana gelen bir akma göçmesi örneği (Doğan, 2015).

2.10.3 Yanal yayılma

Yanal yayılmalar, genellikle zemin yüzeyinin 3 derecenin altında eğime sahip olduğu yataya yakın şevlerde meydana gelmektedir. Bu tür hasarlar, altta bulunan zemin tabakasının sıvılaşması sonucu yüzeysel zemin bloklarının yanal deformasyonu şeklinde görülmektedir (Youd, 1984; Tosun, 2002; Doğan, 2015; Mert, 2018). Zemin tabakasının yatay yöndeki hareketi çoğunlukla birkaç metre olmaktadır. Yanal yayılma sırasında yerde ötelenme hareketi olur ve zemin bloklara ayrılır. Bu ötelenme hareketi sonucunda zeminde kırıklar, küçük çöküntü ve yükselmelerin görülmesi muhtemeldir (Ulusay, 2000; Aytaş, 2019). Yanal yayılmalar sonucunda zeminde oluşan deformasyonlara bağlı olarak köprüler, yüzeysel yapı temelleri, boru hatları, atık su şebekeleri ve diğer alt yapı elemanları hasar görebilir ya da eklem yerlerinden kopmalar meydana gelebilmektedir (Ulusay, 2000; Tosun, 2002; Doğan, 2015; Mert, 2018; Aytaş, 2019). Şekil 2.31'de yanal yayılmanın oluşum şeması ve Şekil



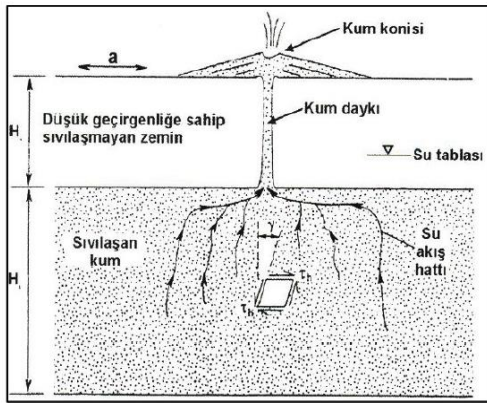
Şekil 2.31. Yanal yayılma olayı oluşum şeması (Doğan, 2015).



Şekil 2.32. Nisqually A.B.D. – 2001 depremi sonucu meydana gelen yanal yayılma örneği (Doğan, 2015).

2.10.4 Kum kaynaması

Deprem esnasında oluşan kesme gerilmelerinin etkisiyle artan aşırı boşluk suyu basıncı, suyun zemin içerisinde kaçma isteği göstermesiyle sönümlenme eğilimine girmektedir. Zemin boşluklarında bulunan su, tahliye olması sırasında sıvılaşan zemin daneleri ile birlikte zemin yüzeyine doğru hareket ederek; yüzeyde oluşan çatlaklardan dışarı çıkmaktadır. Bunun sonucunda yüzeyde kum konileri oluşmakta ve zeminde oluşan boşalmalar sebebiyle zamanla oturmalar meydana gelmektedir (Mert, 2018). Şekil 2.33’de kum kaynaması oluşum şeması ve Şekil 2.34’de bu duruma örnek bir olay görülmektedir (Doğan, 2015; Mert, 2018).



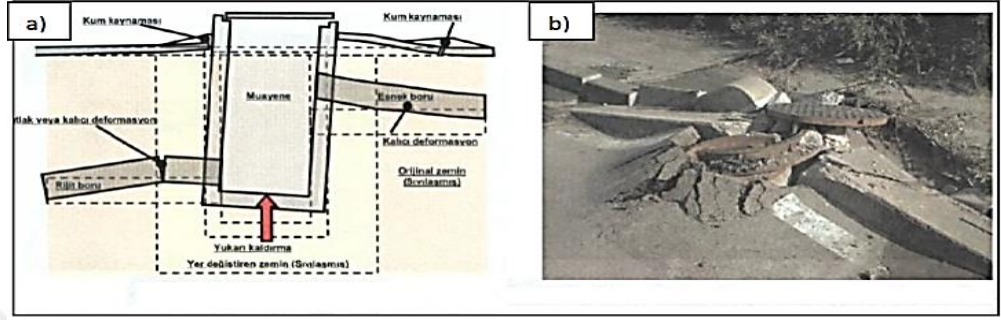
Şekil 2.33. Kum kaynaması oluşumunu gösteren kesit (Ulusay, 2000; Mert, 2018).



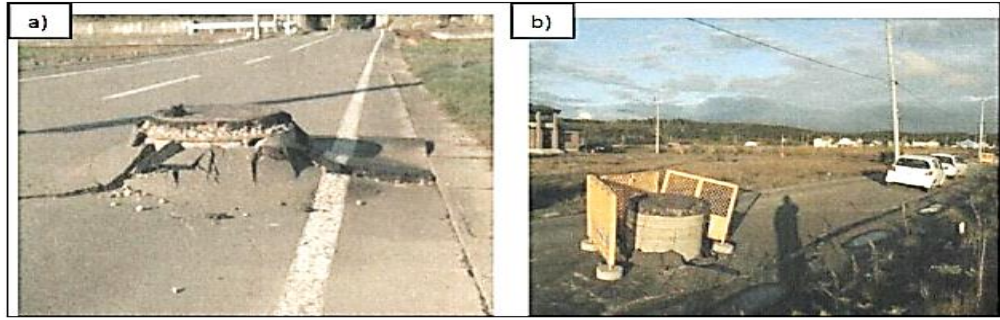
Şekil 2.34. Kum kaynaması New Madrid A.B.D. – 1811 (Doğan, 2015).

2.10.5 Gömülü yapıların yüzeye çıkması

Sıvılaşma esnasında oluşan kaldırma kuvvetinin etkisiyle; gömülü durumda bulunan tank, boru hatları, muayene bacası ve benzeri hafif alt yapı elemanları, yüzeye çıkarak ciddi hasarlara sebebiyet vermektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006; Mert, 2018). Şekil 2.35' ve Şekil 2.36'da gömülü yapıların yüzeye çıkmasının oluşum şeması ve bununla ilgili örnekler gösterilmektedir (Doğan, 2015).



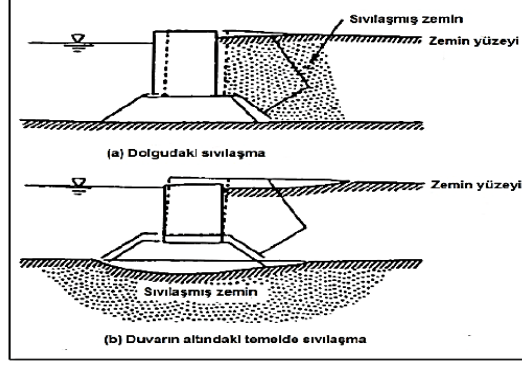
Şekil 2.35. a) Gömülü yapı yüzeylenmesi şeması, b) Tottori Japonya-2000 depreminde meydana gelen bir gömülü yapı yüzeylenmesi (Doğan,2015).



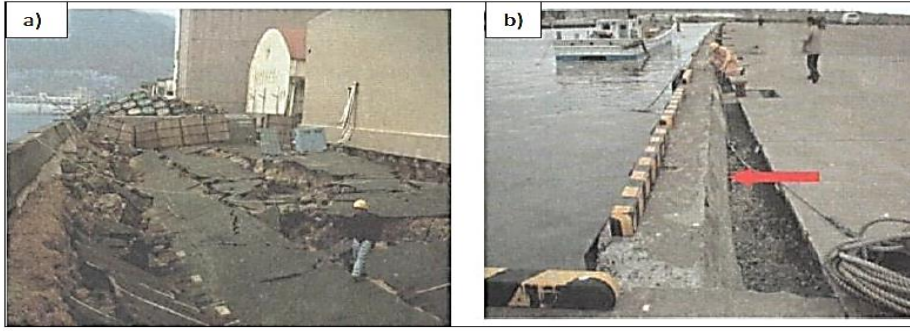
Şekil 2.36. Meydana gelmiş farklı lokasyonlarda; a) Anayol üzerinde, b) Tali yol üzerinde bulunan gömülü yapı yüzeylenmeleri (Doğan, 2015).

2.10.6 İstinat yapısı yenilmesi

Sıvılaşmadan kaynaklı olarak, istinat yapısı altında bulunan zeminin taşıma gücünü kaybetmesi veya istinat yapısının arkasındaki sıvılaşmış zeminin oluşturduğu itki kuvvetlerinin artması nedeniyle; istinat yapısının duraylılığını kaybetmesi sonucu meydana gelmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006; Mert, 2018). Şekil 2.37'de istinat yapısının göçme şeması ve Şekil 2.38'de meydana gelmiş örnekler gösterilmektedir (Doğan, 2015; Mert, 2018).



Şekil 2.37. Sıvılaşma nedeniyle oluşan istinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998; Mert, 2018).



Şekil 2.38. Kobe Japonya- 1995 depremi sonrası gözlenen farklı noktalardan a) ve b) istinat yapısı göçme örnekleri (Doğan, 2015).

3. MALZEME VE METOD

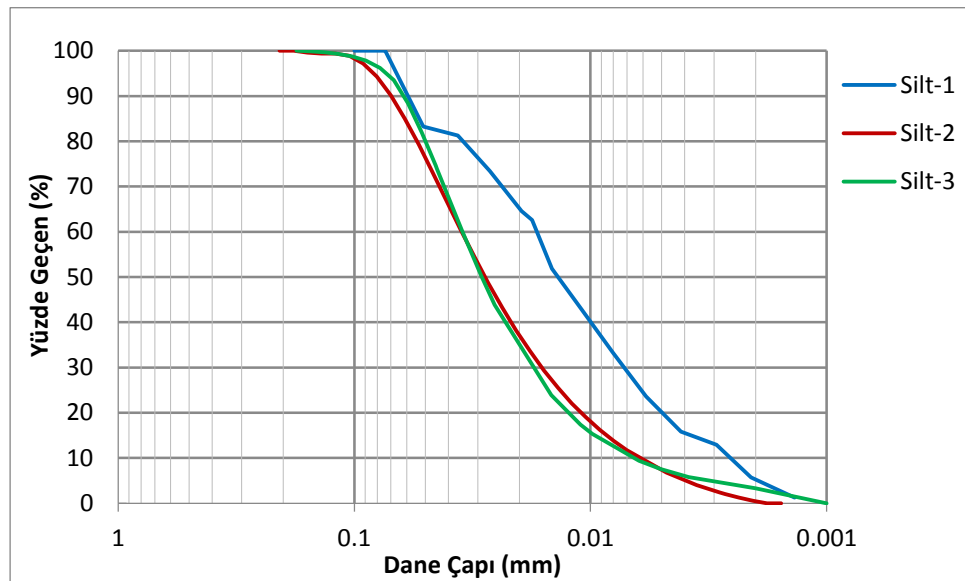
Tez kapsamında Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FGA-2021-22457 kodlu bilimsel araştırma projesinde düşük plastisiteli siltler ile yapılan dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen veriler kullanılarak enerji temelli sıvılaşma metodu ile sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında sıvılaşma dirençleri değerlendirilen zeminlerin fiziksel özellikleri ve enerji temelli sıvılaşma yönteminde kullanılan hesaplamalar bu kısımda ele alınacaktır. Bu bölüm; dinamik üç eksenli deneyleri yapılmış olan zeminlerin indeks özellikleri, dinamik üç eksenli deney verilerinde kullanılan hesaplamalar ve enerji temelli sıvılaşma metodu hesap yöntemi olmak üzere üç ana başlık altında ele alınmıştır.

3.1 Zeminler ve İndeks Özellikleri

Çalışma kapsamında sıvılaşma dirençleri değerlendirilen zeminler, İzmir bölgesinin farklı yerlerinden alınmış silt içeriği yüksek zeminlerden 200 numaralı elek vasıtasıyla elenerek oluşturulmuştur. Toplamda üç farklı plastisite indisine sahip silt kullanılmıştır. Kullanılan siltlerin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmış olan deneyler ve elde edilmiş sonuçlar bu kısımda ele alınmaktadır. Siltler üzerinde yapılmış olan indeks deneyleri, dane çapı dağılımı; marjinal boşluk oranları; dane özgül ağırlığı ve Atterberg limit deneyleridir.

3.1.1 Dane çapı dağılımı

Çalışma kapsamında sıvılaşma dirençleri değerlendirilen zeminlerin ASTM D7928 - 16e1 standardına göre belirlenmiş dane çapı dağılımları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Düşük plastisiteli silt zeminlerin dane boyu dağılım eğrisi.

3.1.2 Marjinal boşluk oranları ve dane özgül ağırlığı

Çalışma kapsamında sıvılaşma dirençleri değerlendirilen zeminlerin ASTM D4253-16e1 standardına göre belirlenmiş minimum boşluk oranı ve ASTM D4254-16 standardına göre belirlenmiş maksimum boşluk oranı Çizelge 3.1’de verilmiştir. Zeminlerin ASTM D854-14 standardına göre dane özgül ağırlığı belirlenmiş ve Çizelge 3.1’ de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Zeminlerin dane özgül ağırlıkları ve marjinal boşluk oranları.

	G_s	e_{max}	e_{min}
Silt-1	2.77	2.15	0.72
Silt-2	2.74	1.91	1.28
Silt-3	2.67	1.93	0.88

3.1.4 Atterberg limitleri

Çalışma kapsamında sıvılaşma dirençleri değerlendirilen zeminlerin ASTM D4318-17e1 standardına göre belirlenmiş Atterberg limitleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ayrıca zeminlerin ASTM D2487-17e1 standardına göre sınıflandırmaları yine aynı çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.2. Zeminlerin Atterberg limit değerleri ve zemin sınıfları.

	Likit Limit (LL)	Plastik Limit (PL)	Plastisite İndeksi (PI)	Zemin sınıfı
Silt-1	30	24	6	ML
Silt-2	33	24	9	ML
Silt-3	49	32	17	ML

3.2 Dinamik Üç Eksenli Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FGA-2021-22457 kodlu bilimsel araştırma projesinde düşük plastisiteli siltler ile yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarından elde edilen verilere göre çevrimsel kesme gerilmesi oranı (CSR), deformasyon ve boşluk suyu basıncı aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$CSR = \frac{q_a}{2\sigma_{3c}} \quad (3.1)$$

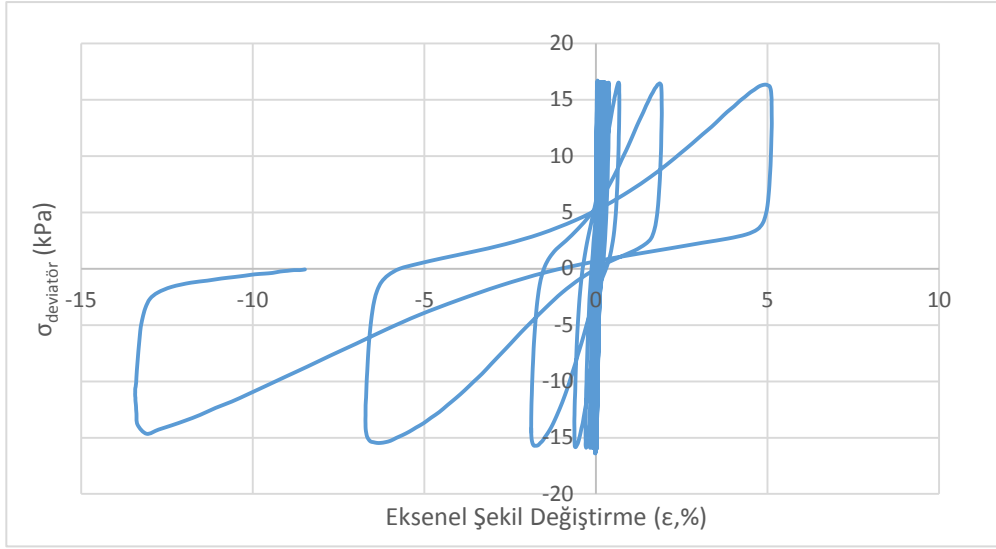
$$q_c = P_c / A_c \quad q_e = P_e / A_c \quad q_a = (q_c + q_e)/2 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_c = \delta_c / H_c \quad \varepsilon_e = \delta_e / H_c \quad \varepsilon_{DA} = \varepsilon_c + \varepsilon_e \quad (3.3)$$

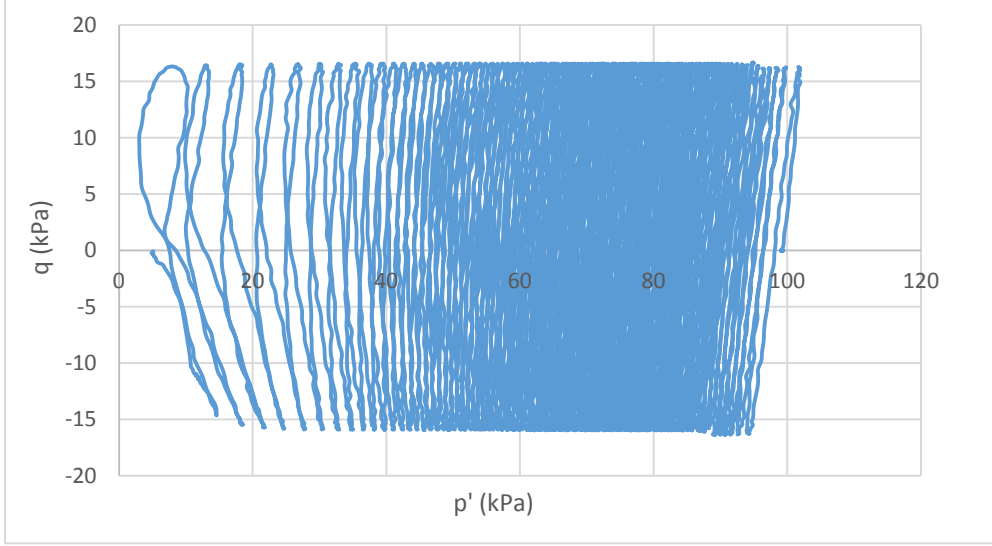
$$R_u = u_{max} / \sigma_{3c} \quad (3.4)$$

Burada, CSR : Çevrimsel gerilme oranı, P_c : Basmada uygulanan en büyük yük, P_e : Çekmede uygulanan en büyük yük, A_c : Numunenin konsolidasyon sonrası kesit alanı, δ_c : Sıkışmada dinamik eksenel deformasyon, δ_e : Çekmede dinamik eksenel deformasyon, ε_c : Sıkışmada eksenel birim deformasyon, ε_e : Çekmede eksenel birim deformasyon, q_a : Basma ve çekmede uygulanan gerilmenin ortalaması, q_c : Basmada en büyük gerilme, q_e : Çekmede en büyük gerilme, H_c : Konsolidasyon aşamasından sonraki numunenin yüksekliği, ε_{DA} : Çift yönlü eksenel birim deformasyon (%), σ_{3c} : İzotropik konsolidasyon (hücre) basıncı, u_{max} : Çevrimsel yükleme sırasında oluşan maksimum aşırı boşluk suyu basıncı, R_u : Boşluk suyu basıncı oranı olarak verilmiştir.

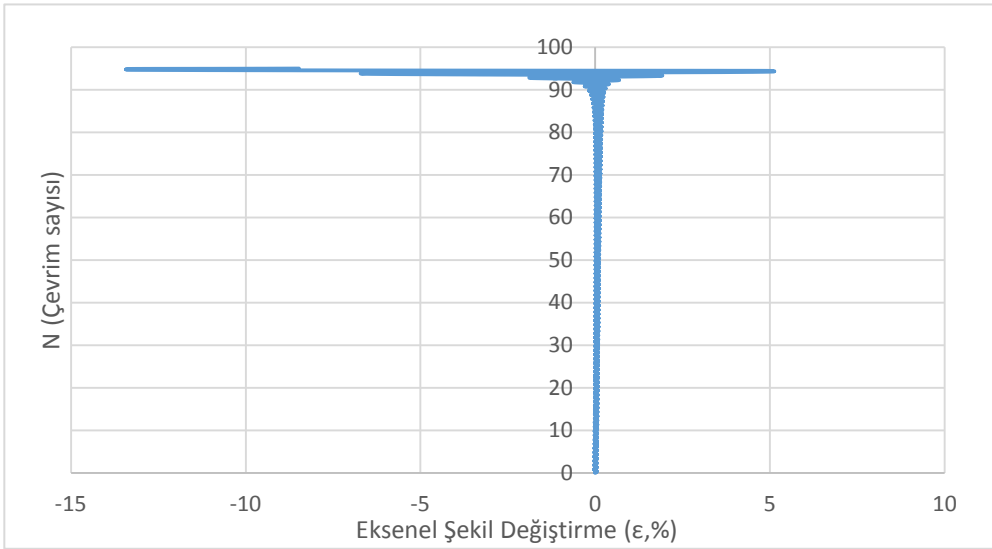
Tez kapsamında kullanılan, farklı çevrimsel gerilme oranlarında yük uygulanmış iki farklı rölatif sıkılığa sahip üç farklı plastisitede bulunan zeminler ile yapılmış olan deneylerden birisine ait histerisis ilmlikleri, gerilme izi değişimi, eksenel şekil değiştirme ve ilave boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ile değişimine ait tipik deney sonuçları sırasıyla Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de verilmiştir. Tipik deney sonuçları verilen zemin numunesinin $PI=6$ ve $D_r=\%80$ olup, izotropik 100 kPa çevre basıncı altında $CSR=0.084$ değerinde yüklenmiştir.



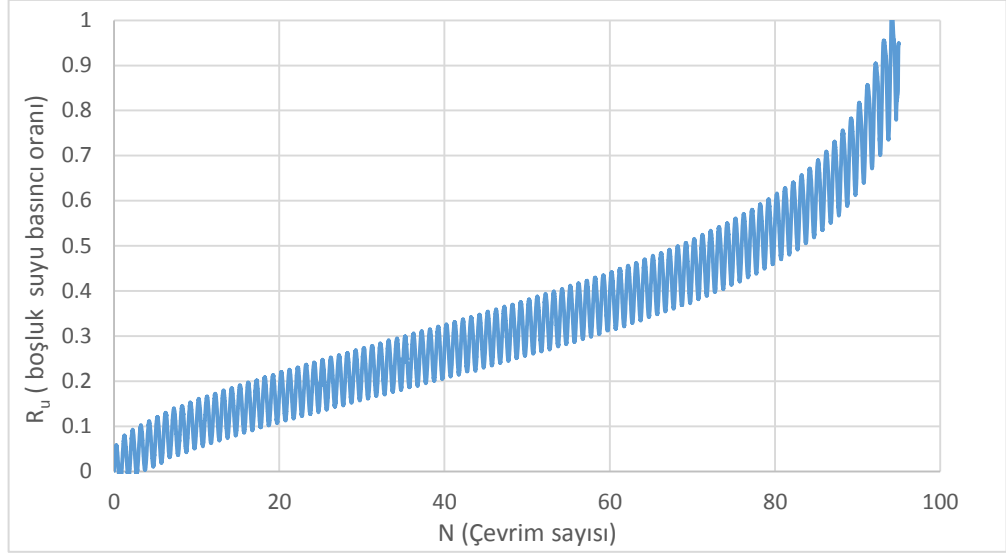
Şekil 3.2. Tekrarlı yükler altında deviator gerilme ve eksenel şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 3.3. Tekrarlı yükler altında zeminin gerilme izi.



Şekil 3.4. Tekrarlı yükler altında çevrim sayısı ve eksenel şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 3.5. Tekrarlı yükler altında çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı ilişkisi.

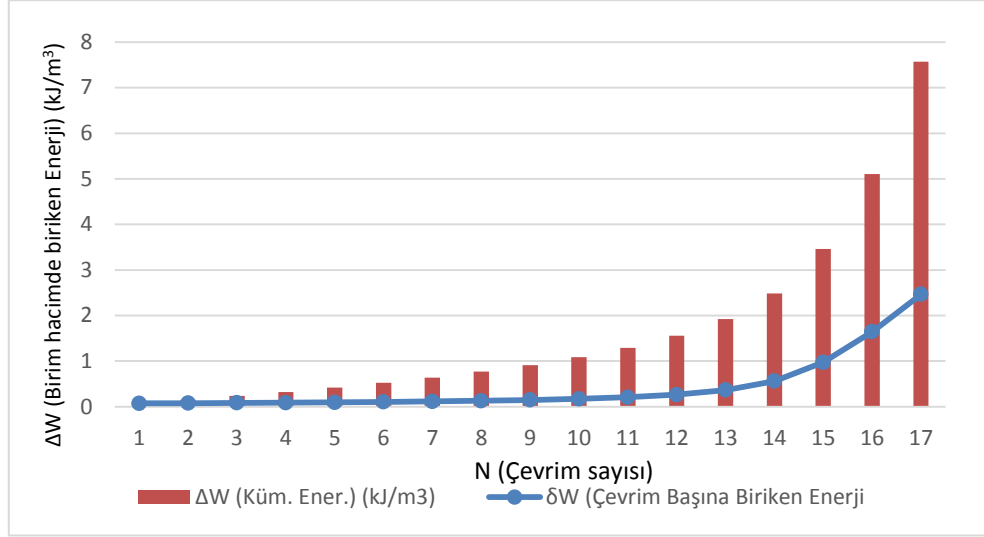
İzotropik konsolide koşulları altında gerçekleştirilmiş zemin numunelerinin sıvılaşmaya karşı direncinin belirlenmesinde genellikle, aynı zeminin aynı sıklıkta hazırlanan farklı numunelerine uygulanmış farklı çevrimsel gerilme oranları (CSR) ile sıvılaşma koşulunun sağlanması için gerekli çevrim sayısı (N) verileri bir araya getirilerek; CSR ile N arasında ki grafiksel ilişkisi çizdirilmektedir. Elde edilen bu eğriler, zeminin dinamik mukavemet eğrileri olarak adlandırılmaktadır. Böylelikle zeminin sıvılaşmaya karşı direnci belirlenmiş olmaktadır. Fakat yapılan bu çalışmada alışagelmış bu yöntem kullanılmamış olup enerji temelli sıvılaşma analiz yöntemi kullanılmıştır. Çalışma boyunca kullanılan enerji temelli sıvılaşma analizi yöntemi ve hesaplama şekli aşağıda ki kısımda tarif edilecektir.

3.3 Enerji Temelli Sıvılaşma Analiz Yöntemi

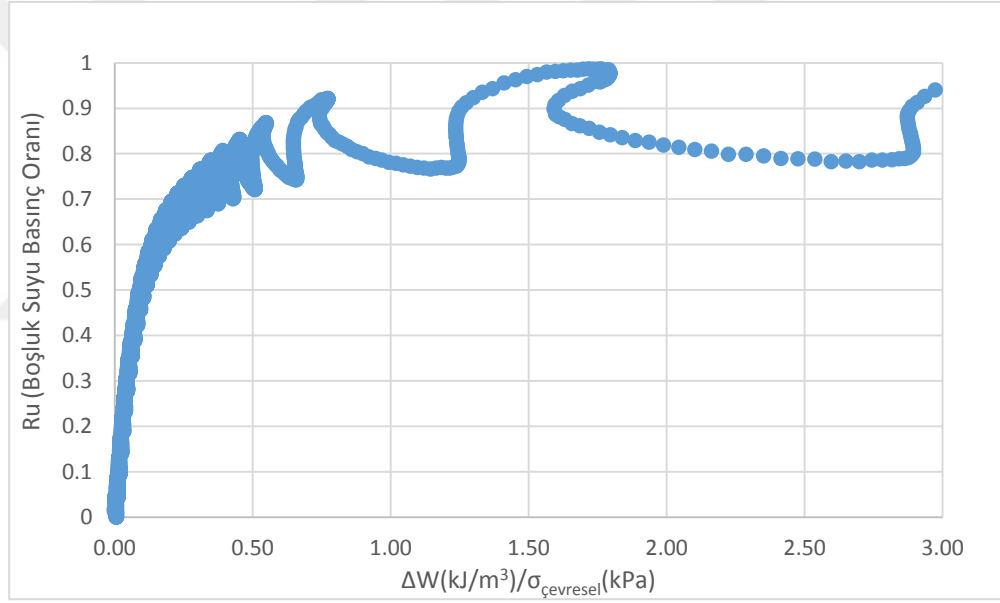
Dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen verilere göre sıvılaşma enerjisi Denklem (3.5) kullanılarak her yarım çevrimde biriken enerji (δW), Şekil 3.6'da gösterildiği gibi yamuk alan teorisine göre hesaplanmıştır. Daha sonra Denklem (3.6) kullanılarak zemin tarafından sıvılaşma başlangıcına kadar sönümlenen ve birim hacimde biriken toplam enerji (ΔW) elde edilmiştir.

$$\delta W = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} (q^{(i)} + q^{(i+1)}) (\varepsilon_a^{(i+1)} - \varepsilon_a^{(i)}) \quad (\text{Azeiterio et al, 2017}) \quad (3.5)$$

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \delta W \quad (\text{Azeiterio et al, 2017}) \quad (3.6)$$



Şekil 3.7. Birim hacimde biriken enerji değerlerinin çevrim sayısı ile değişimi.



Şekil 3.8. Boşluk suyu basıncı ile birim hacimde biriken enerji ilişkisi.



4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FGA-2021-22457 kodlu bilimsel araştırma projesinden alınan deneysel verilerilere göre enerji temelli sıvılaşma yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar, çizelge ve grafikler halinde bu başlık altında değerlendirilmiştir. Proje kapsamında, 200 numaralı elek yardımıyla elde edilmiş üç farklı plastisite indisine ($PI=6,9,17$) sahip düşük plastisiteli silt zeminler ile 50 mm çapında 100 mm yüksekliğe sahip numuneler ıslak tokmaktama tekniği kullanılarak iki farklı rölatif sıkılıkta ($D_r=\%40$ ve $\%80$) hazırlanmıştır. Enerji temelli sıvılaşma yönteminin benimsendiği çalışmada sıvılaşma enerjisinin uygulanan çevrimsel gerilme oranından (CSR) ne yönde etkileneceğini gözlemleyebilmek için yukarıda tarif edilmiş altı farklı kombinasyonda hazırlanmış zemin numunelerine, sabit çevresel basınç altında ($\sigma_c=100$ kPa) dört farklı CSR oranında izotropik yükleme uygulanmış olan deneylerin kullanılması tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.1’de verilmiştir.

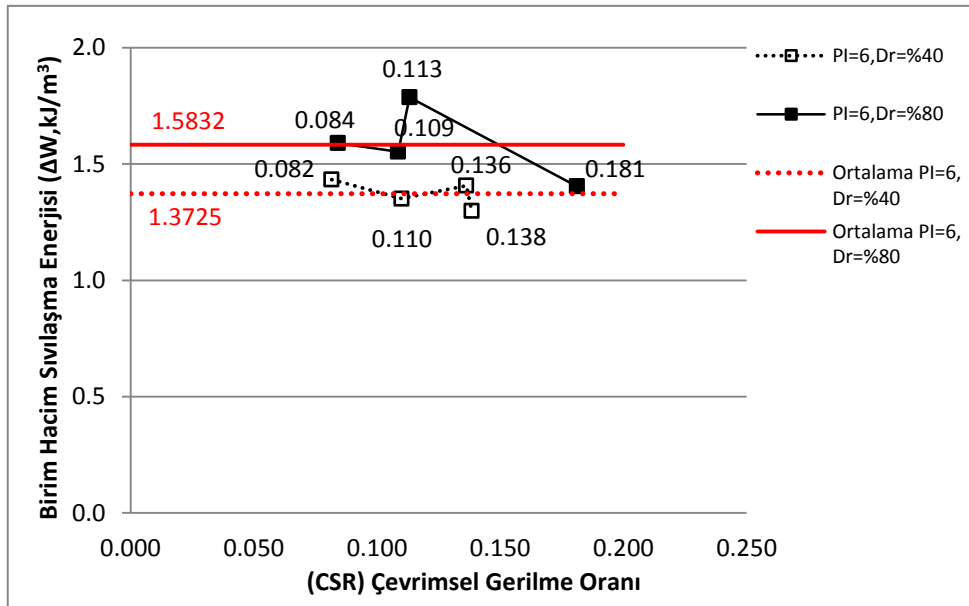
Çizelge 4.1. Deneye tabi tutulan numuneler ve elde edilen birim hacim enerjileri.

Test Sayısı	Plastisite İndisi (PI)	Rölatif Sıkılık ($D_r, \%$)	Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR)	Boşluk Suyu Basıncı Oranı (R_u)		Çevrim Sayısı (N)		Birim Hacim Sıvılaşma Enerjisi ($\Delta W, kJ/m^3$)	
				Çift Gen. Eks. Def. ($\epsilon_{DA}, \%$)		Çift Gen. Eks. Def. ($\epsilon_{DA}, \%$)		Çift Gen. Eks. Def. ($\epsilon_{DA}, \%$)	
				5	10	5	10	5	10
1	6	40	0.082	0.925	1.000	53.17	54.05	1.4327	2.1825
2	6	40	0.110	0.744	0.857	11.76	12.59	1.3512	2.3065
3	6	40	0.136	0.710	0.730	4.19	4.58	1.4071	2.2214
4	6	40	0.138	0.620	0.720	1.17	1.56	1.2989	1.7930
5	6	80	0.084	0.956	1.000	93.58	94.15	1.5898	2.4574
6	6	80	0.109	0.952	1.000	35.67	36.21	1.5524	2.6632
7	6	80	0.113	0.948	0.987	29.27	29.66	1.7865	2.1632
8	6	80	0.181	0.583	0.583	1.67	1.7	1.4043	2.7903
9	9	40	0.068	0.563	0.563	37.02	37.04	0.6959	1.0435
10	9	40	0.072	0.620	0.620	31.79	32.5	0.7421	0.9286
11	9	40	0.084	0.394	0.613	11	11.5	0.7607	0.9766
12	9	40	0.085	0.924	0.924	9	9.49	0.6117	1.0279
13	9	80	0.067	0.951	0.993	190.1	190.17	1.4757	1.8417
14	9	80	0.079	0.959	1.000	99.19	99.24	1.4341	2.0378
15	9	80	0.105	0.686	0.686	11.96	12	1.1301	1.4173
16	9	80	0.119	0.775	0.797	4.25	4.3	1.3675	2.3539
17	17	40	0.078	0.749	0.816	57.79	62.67	2.3464	3.3640
18	17	40	0.105	0.563	0.686	8.73	10.61	1.2901	2.4117
19	17	40	0.138	0.238	0.642	0.8	1.58	1.2400	2.9857
20	17	40	0.153	0.115	0.115	0.69	0.72	1.1966	2.5168
21	17	80	0.087	0.594	0.676	140.75	160.69	2.9606	4.1573
22	17	80	0.102	0.741	0.806	83.76	88.67	4.0212	5.5262
23	17	80	0.135	0.891	0.957	15.23	16.59	4.1706	6.5589
24	17	80	0.144	0.917	0.985	16.62	17.6	3.9354	6.2457

Çizelge 4.1’de deneylerin hangi koşullarda altında yapıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmada sıvılaşma kriteri olarak, %95 boşluk suyu basıncı ve %5 çift genlikli eksenel deformasyon ($\epsilon_{DA},\%$) benimsenmiştir. Fakat deneylerin tamamında %95 boşluk suyu basıncı gelişiminden önce %5 çift genlikli eksenel deformasyon ($\epsilon_{DA},\%$) gözlemlenmiştir. Bu sebeple sıvılaşma kriteri olarak %5 çift genlikli eksenel deformasyon ($\epsilon_{DA},\%$) baz alınmış ve sonuçlar buna göre değerlendirilmiştir. Çizelgede %5 çift genlikli eksenel deformasyona ($\epsilon_{DA},\%$) kadar ölçülmüş olan birim hacim enerjileri ($\Delta W, \text{kJ/m}^3$) ve hangi çevrimde meydana geldiği gösterilmiştir. Bunun haricinde literatürde siltler için farklı sıvılaşma kriterleriyle karşılaşıldığı için %10 çift genlikli eksenel deformasyona ($\epsilon_{DA},\%$) kadar elde edilen birim hacim enerjisi ($\Delta W, \text{kJ/m}^3$) ve hangi çevrimde meydana geldiği, kıyaslama amacıyla ilave olarak gösterilmiştir.

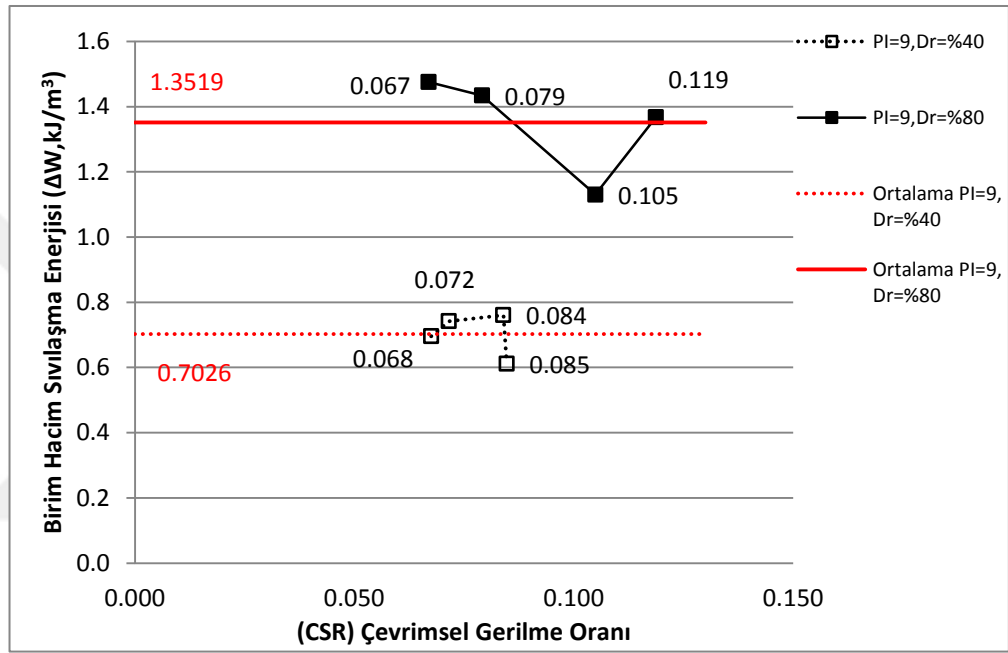
4.1 Rölatif Sıkılığın Sıvılaşma Enerjisine Etkisi

Çalışma kapsamında sıvılaşma dirençleri değerlendirilen $PI=6$, 9 ve 17 olan zemin numunelerinin %5 çift genlikli eksenel deformasyon kriterine göre sıvılaşma enerjileri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Şekillerde her plastisite indisi için $D_r=\%40$ ve $D_r=\%80$ hazırlanan numunelerin sıvılaşma enerjileri görülebilmektedir. Uygulanmış olan CSR değerinin sıvılaşma enerjisini nasıl etkilediği görülebilmesi amacıyla her deneyin sonucu şekilde ayrı ayrı verilmiş olup uygulanan CSR değerleri, deneyleri simgeleyen noktaların yanında ayrıca belirtilmiştir. Dört farklı CSR değerinden elde edilmiş sıvılaşma enerjilerinin ortalama değerleri, kırmızı çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1. $PI=6$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.

Şekil 4.1 incelendiğinde $D_r=\%40$ olan numunelerin farklı CSR değerlerinde farklı sıvılaşma enerjileri elde edilmiş olmasına rağmen $D_r=\%80$ olan sonuçlara göre daha yakın enerji değerleri elde edilmiş olduğu görülmektedir. İki farklı rölatif sıkılığın deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, rölatif sıkılığın artışıyla sıvılaşma enerjisindeki artış açıkça görülmektedir. CSR=0.181 değerinde yükleme yapılmış numunenin $D_r=\%80$ değerine sahip olmasına rağmen $D_r=\%40$ değerine sahip numunelere yakın sıvılaşma enerjisi elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeninin Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi sıvılaşmanın meydana geldiği çevrim sayısının ($N=1.67$) olması göz önünde bulundurulduğunda CSR değerinin yüksek olmasından dolayı ani geçmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

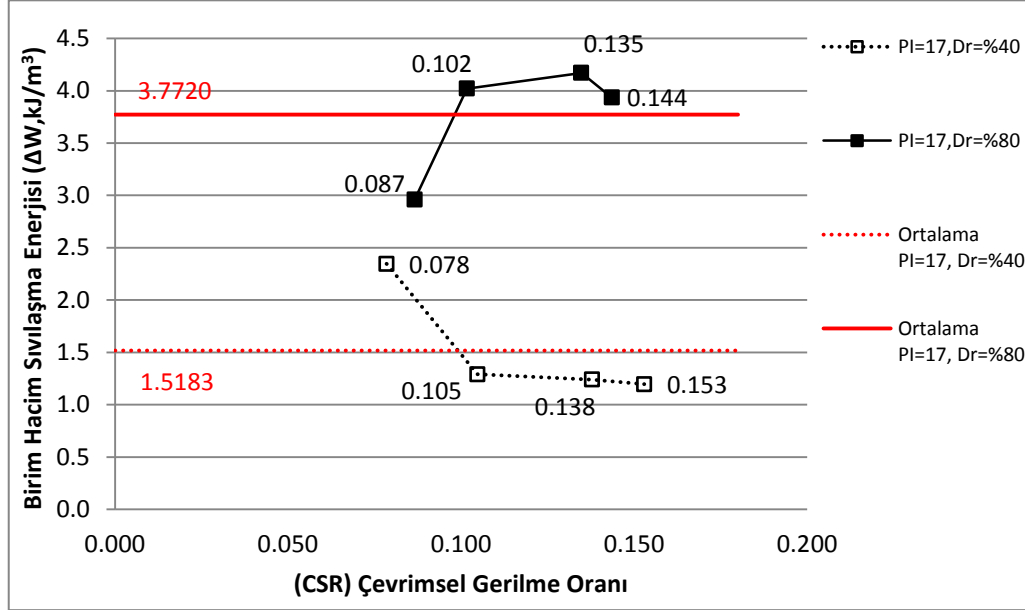


Şekil 4.2. PI=9 olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.

PI=9 olan zemin numunelerinin sıvılaşma enerjileri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde $D_r=\%40$ olan zemin numunelerinden elde edilen sıvılaşma enerjileri, $D_r=\%80$ olan zemin numunelerinden elde edilen sıvılaşma enerjilerine göre birbirine daha yakın değerler verdiği görülmektedir. Rölatif sıkılığın etkisi incelendiğinde rölatif sıkılığın artmasıyla sıvılaşma enerjisindeki artış açıkça görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 4.1 ile Şekil 4.2 birlikte göz önünde bulundurulduğunda plastisite indisinin artmasıyla rölatif sıkılığın, sıvılaşma enerjisine olan etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir.

PI=17 olan zemin numunelerinin sıvılaşma enerjileri Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki rölatif sıkılık içinde elde edilen sıvılaşma enerji değerlerinin birbirine göre daha geniş aralıkta değiştiği görülmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de olduğu gibi rölatif sıkılığın artmasıyla sıvılaşma enerjisinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat plastisite indisinin daha da yükselmesi, rölatif sıkılığın sıvılaşma enerjisine olan etkisinin daha fazla

olmasına neden olmuştur. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 birlikte göz önünde bulundurulduğunda bu durum açıkça görülebilmektedir.



Şekil 4.3. PI=17 olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.

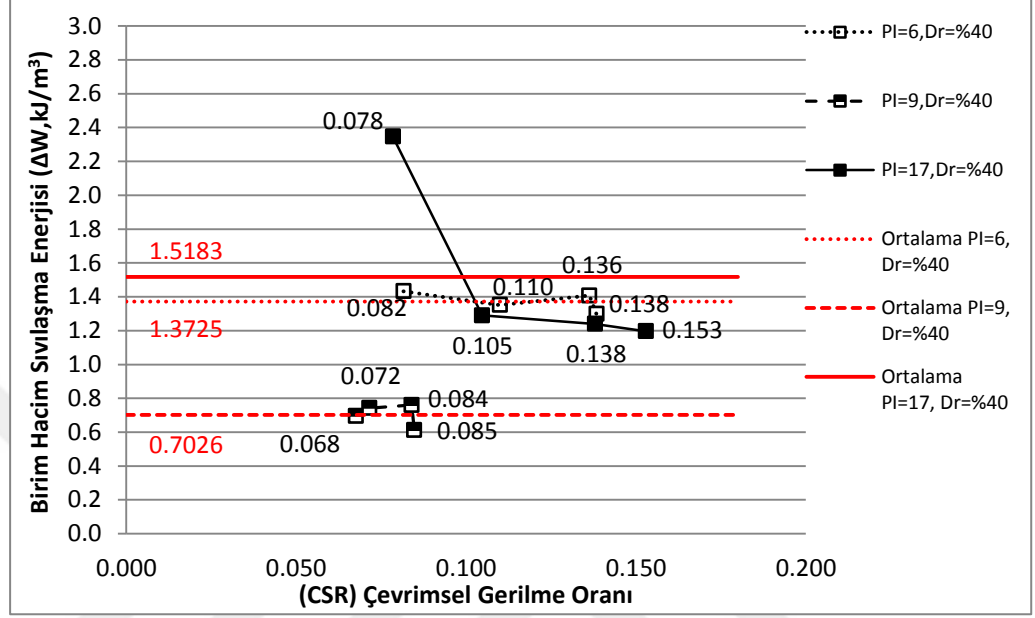
Daha önce yapılan çalışmalara göre diğer parametrelerden bağımsız olarak rölatif sıkılığın artmasıyla sıvılaşma direncinin artış göstereceği bilinmektedir (Wiegel 1970, Seed and Idriss 1971, Seed 1976, Wang and Law 1994, Ferritto 1997). Üç farklı plastisite indisine sahip (PI=6,9,17) zeminler ile yapılan deneylere göre rölatif sıkılığın %40'dan %80 çıkmasıyla sıvılaşma için gerekli enerji değeri artış göstermiş yani sıvılaşma direnci artmıştır. Enerji temelli yöntemle elde edilen sonuçlar, daha önceden yapılan çalışmalar ile tutarlılık göstermektedir.

4.2 Plastisite İndisinin Sıvılaşma Enerjisine Etkisi

Çalışma kapsamında aynı rölatif sıkılığa sahip olan zemin numunelerinde plastisite indisinin sıvılaşma enerjisini nasıl etkilediğini görebilmek amacıyla deneye tabi tutulan PI=6, 9 ve 17 olan zemin numunelerinin %5 çift genlikli eksenel deformasyon kriterine göre sıvılaşma enerjileri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

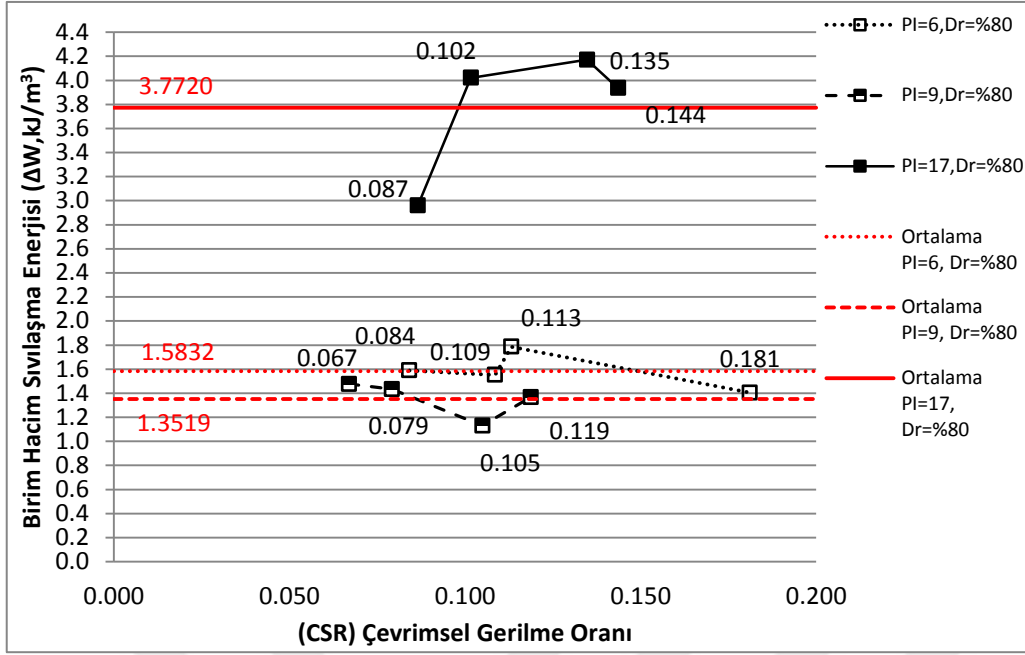
$D_r=\%40$ değere sahip zemin numunelerinin plastisite indisinin etkisiyle sıvılaşma enerjilerinin nasıl değiştiği, Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde PI=6 olan numunelerin sıvılaşma enerji değerleri, PI=9 olan zemin numunelerinin enerji değerlerinden daha yüksek olduğu görülebilmektedir. PI=17 olan numunelerin sıvılaşma enerjilerinin ise PI=9 olan numunelerin sıvılaşma enerjilerinden yüksek olduğu görülmektedir. Kıcasası plastisite indisinin artışıyla sıvılaşma enerjisi önce düşmüş daha sonra yeniden yükselişe geçmiştir. PI=17 olan numunelerin ortalama sıvılaşma

enerjisi, $PI=6$ olan numunelerin ortalama sıvılaşma enerjisinden daha fazla olduğu görülmektedir. Fakat her deney sonucu ayrı ayrı değerlendirildiğinde $PI=6$ olan numunelerin $PI=17$ olan numunelerden daha büyük enerji değerlerinde olduğu, ortalama enerji değerlerinde bunun aksi çıkmasının $CSR=0.078$ değerinde yüklenen numunenin sonucundan kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 4.4. $D_r=\%40$ olan zemin numunelerinin $\epsilon_{DA}=\%5$ değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.

$D_r=\%80$ değere sahip zemin numunelerinin plastisite indisinin etkisiyle sıvılaşma enerjilerinin nasıl değiştiği Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde Şekil 4.4’de olduğu gibi plastisite indisinin artışıyla sıvılaşma enerjisinin önce azaldığı daha sonra yükseldiği görülmektedir. Fakat Şekil 4.4’ün aksine Şekil 4.5’de $PI=6$ ve $PI=9$ olan numunelerin sıvılaşma enerjileri birbirine daha yakın olduğu; $PI=17$ olan numunelerin sıvılaşma enerjilerinin ise diğer plastisite indisine göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu farklılığın rölatif sıkılığın sıvılaşma enerjisine olan etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Rölatif sıkılığın artışıyla dolaylı olarak sıvılaşma enerjisi artışı, $PI=6$ olan numunelerde diğer plastisite indisine sahip numunelere göre daha az olduğu Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de anlaşılmıştı. Bu nedenle rölatif sıkılığın artmasıyla $PI=17$ olan numunelerin sıvılaşma enerjileri, $PI=6$ olan numunelere göre daha fazla artış göstermiş ve iki serinin enerji değerleri $\%40$ rölatif sıkılıkta birbirine yakın iken, $\%80$ rölatif sıkılıkta büyük oranda fark oluşmuştur. $PI=6$ ve $PI=9$ olan numunelerde ise $\%40$ rölatif sıkılık durumunda sıvılaşma enerjileri arasında gözlemlenen fark, $\%80$ rölatif sıkılıkta çok daha küçük değerlere düşmüştür.

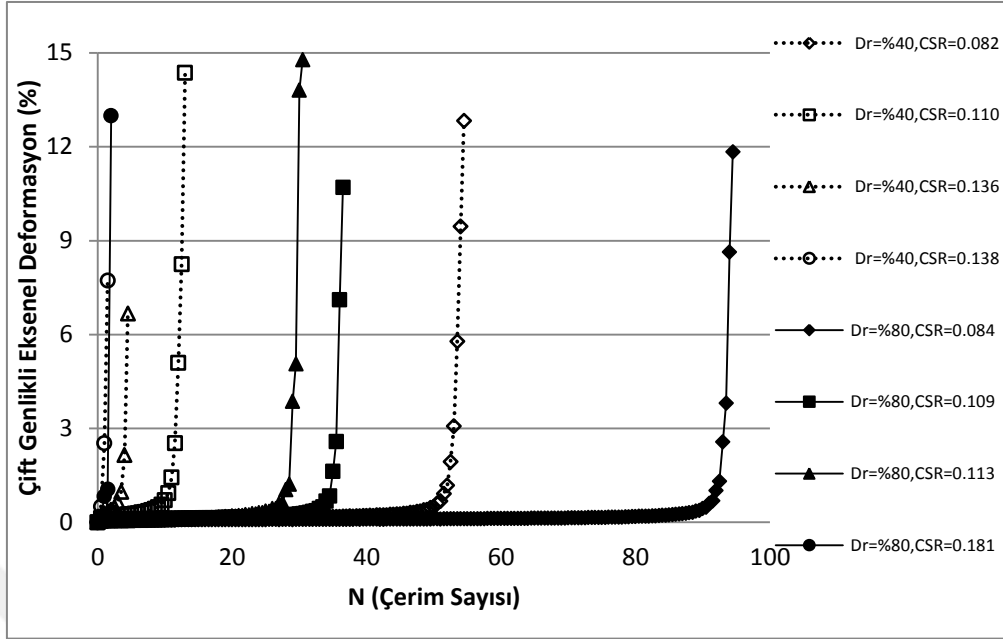


Şekil 4.5. D_r =%80 olan zemin numunelerinin ϵ_{DA} =%5 değerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri.

Her iki şekilde incelendiğinde düşük plastisiteli siltlerde plastisitenin artmasıyla sıvılaşma direncinin önce azaldığı; daha sonra arttığı görülebilmektedir. Düşük plastisiteli siltler ile daha önce yapılmış olan çalışmalarda plastisite indisinin artmasıyla sıvılaşma direncinin azaldığı görülmüştür (Sandoval,1989; Prakash and Sandoval, 1992; Perlea et al., 1999). Fakat Perlea et al. (1999) tarafından yapılan çalışmada ise en düşük sıvılaşma direncinin $PI=4-5$ seviyelerinde olduğu; plastisite indisinin artmaya devam etmesiyle sıvılaşma direncinin artmaya başladığı öne sürülmüştür. Enerji temelli yöntem kullanılarak yapılan bu çalışmada ise en düşük sıvılaşma direnci, her iki rölatif sıklık değeri içinde $PI=9$ seviyesinde elde edilmiştir. Bu sonucun $PI=6$ olan zeminin, plastisite indisini hedeflenen seviyeye çıkarabilmek amacıyla içerisine kütlece %5 oranında ilave edilen montmorillonit'in etkisiyle oluşan mineraloji farkından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

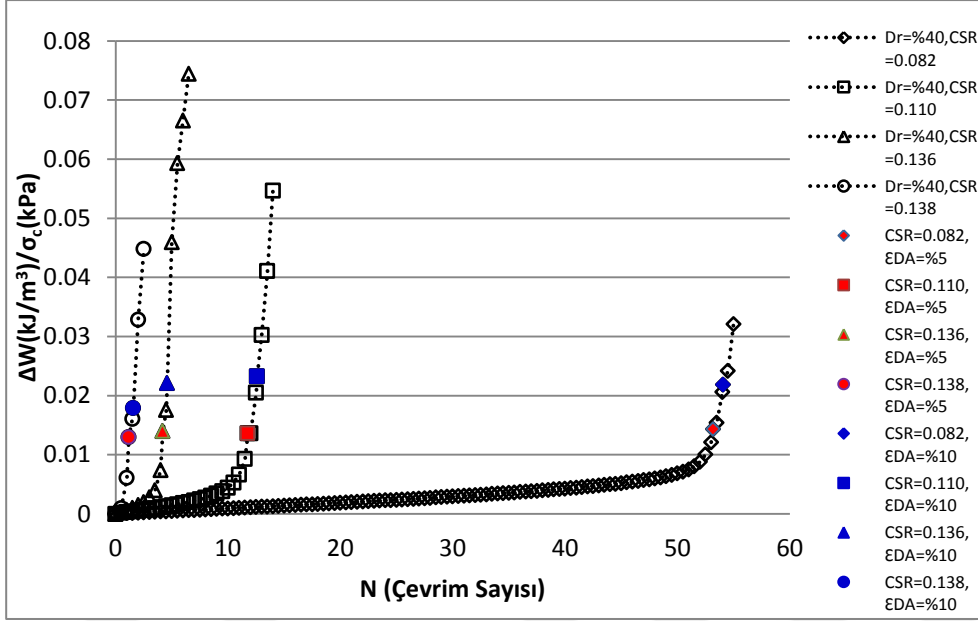
4.3 Çevrim Sayısı İle Çift Genlikli Eksenel Deformasyon İlişkisi ve Normalize Sıvılaşma Enerjisi İlişkisi

Bu bölümde çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon ve sıvılaşma enerjisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon arasında ki ilişki, Şekil 4.6; Şekil 4.9; Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Çevrim sayısı ile normalize sıvılaşma enerjisi arasında ki ilişki, Şekil 4.7; Şekil 4.8; Şekil 4.10; Şekil 4.11; Şekil 4.13; Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Şekillerde gösterilen her bir nokta, her bir yarım çevrimi temsil etmektedir. Çevrim sayısı ile normalize sıvılaşma enerjisi arasında ki ilişkiyi gösteren şekillerde bulunan kırmızı ve mavi noktalar ise çift genlikli eksenel deformasyonun %5 ve %10'a ulaştığı çevrimleri temsil etmektedir.

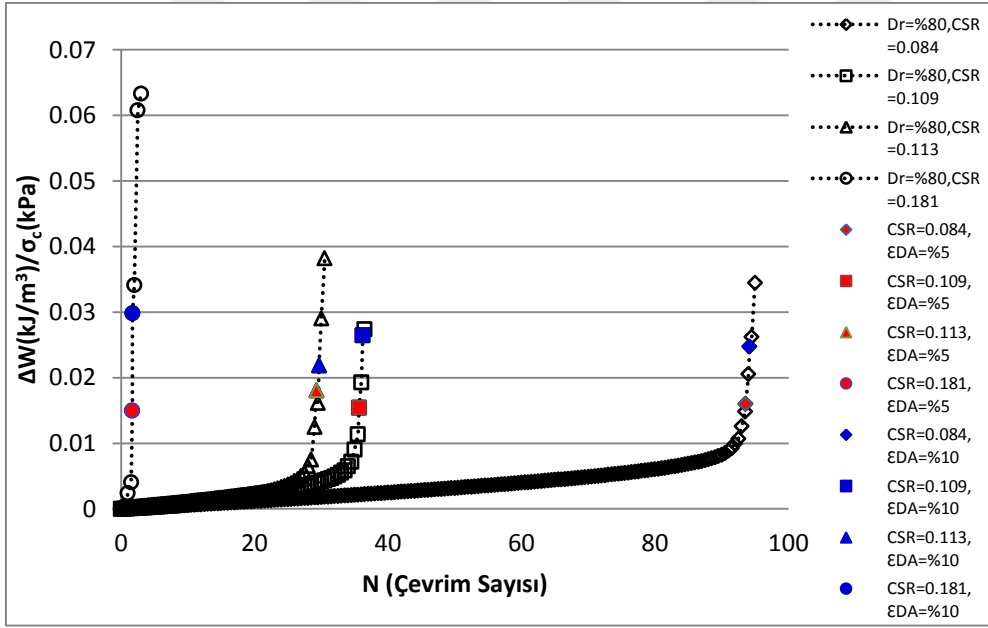


Şekil 4.6. PI=6 olan numunelerde çevrim sayısı ile çift genlikli aksel deformasyon değişimi.

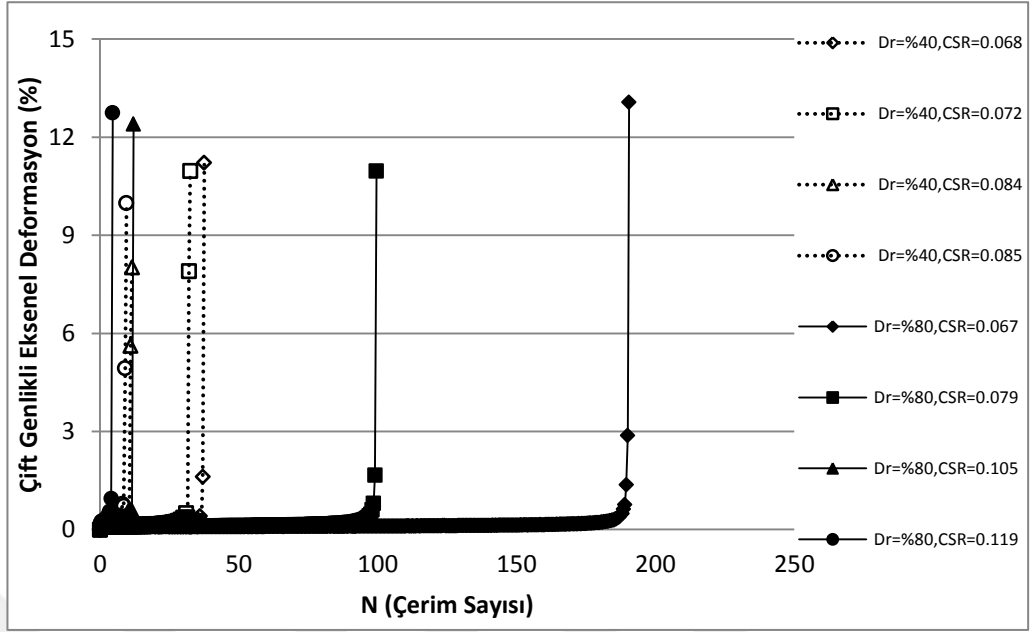
PI=6 olan zemin numunelerinin çevrim sayısı ile çift genlikli aksel deformasyon ilişkisi Şekil 4.6'da; çevrim sayısı ile normalize sıvılaşma enerjisi ilişkisi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde CSR değeri yüksek olan deneylerin çift genlikli aksel deformasyonu aniden yükselme eğilimi göstermiştir. CSR değeri azaldıkça çift genlikli aksel deformasyon seviyesi çok küçük değerlerde yatay eğilim gösterirken belirli çevrimden sonra aniden yükselerek dik bir eğilim göstermiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 incelendiğinde Şekil 4.6'ya çok benzer eğilim görülmektedir. Bu durum sıvılaşma enerjisinin, deformasyona bağlı nicel bir ifade olması nedeniyle meydana gelmektedir. Ayrıca Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de %5 ve %10 çift genlikli aksel deformasyona denk gelen normalize enerji değerleri gösterilmiştir. Bu iki şekil göz önünde bulundurulduğunda CSR değerinin değişmesiyle herhangi bir deformasyona kadar gerekli çevrim sayısı çok geniş aralıkta değiştiği, buna rağmen normalize sıvılaşma enerjileri arasında küçük sapmalar olsa da belirli bir yatay doğrultuda olduğu görülmektedir. %10 çift genlikli aksel deformasyonda elde edilen normalize sıvılaşma enerjilerinde, %5'e göre daha fazla sapmaların meydana geldiği görülmektedir.



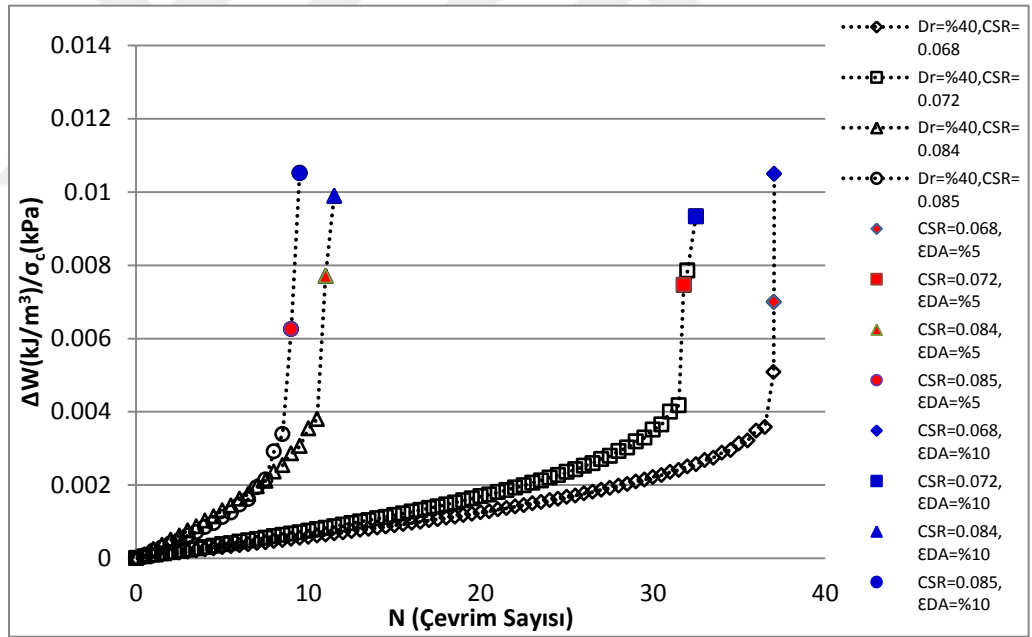
Şekil 4.7. $PI=6$, $D_r=\%40$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi.



Şekil 4.8. $PI=6$, $D_r=\%80$ olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi.



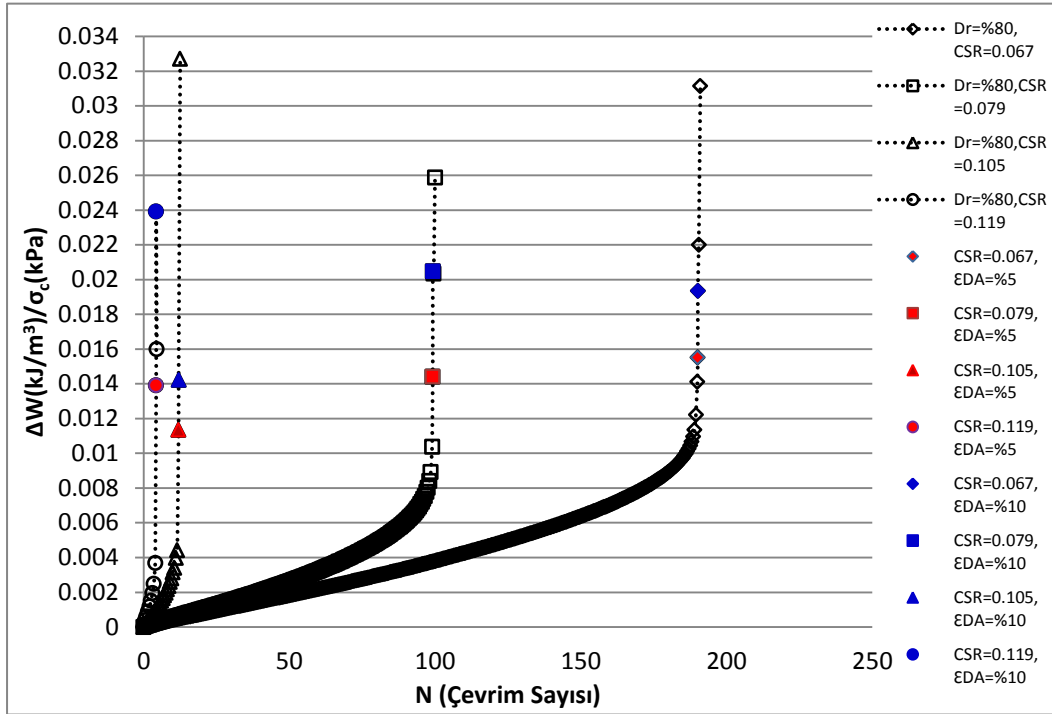
Şekil 4.9. PI=9 olan numunelerde çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon değişimi.



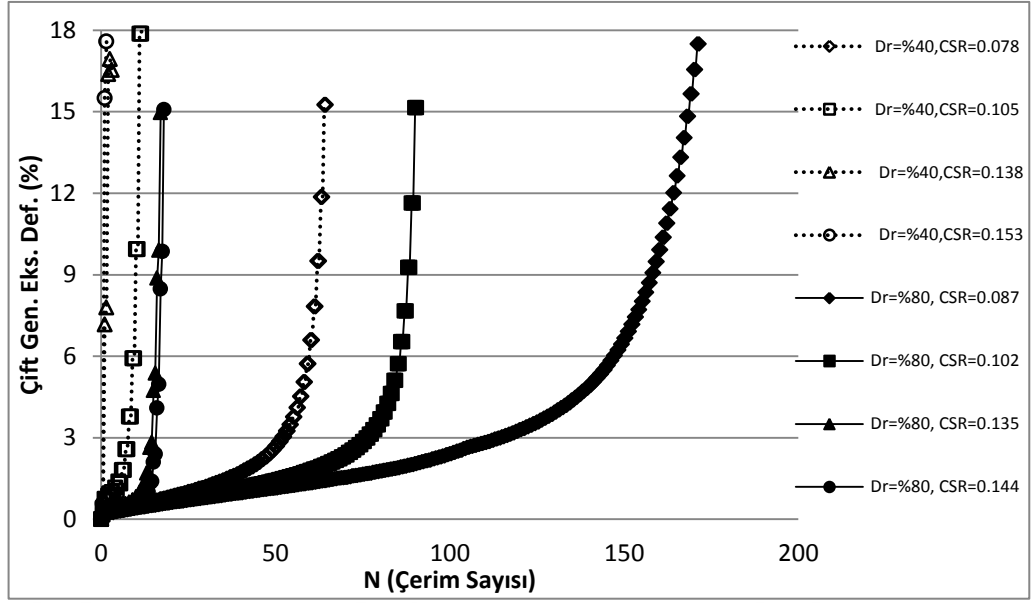
Şekil 4.10. PI=9, D_r =%40 olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi.

PI=9 olan zemin numunelerinin çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon ilişkisi Şekil 4.9'da; çevrim sayısı ile normalize sıvılaşma enerji ilişkisi Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde PI=9 olan zeminlerin çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon ilişkisi PI=6 olan zeminlere benzer şekilde yüksek CSR değerlerinde dik bir eğilim göstermiş olup; CSR değerleri daha düşük olan yüklemelerde ise öncesinde yatay bir eğilim şeklinde devam edip belirli bir çevrimden sonra aniden yüksek

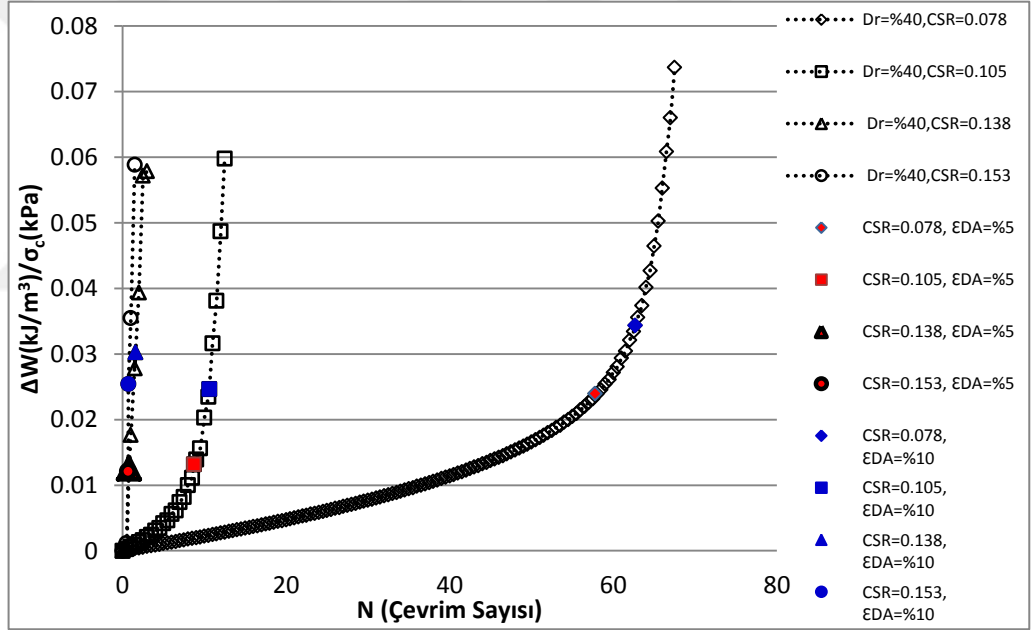
çift genlikli aksel deformasyon değerlerine ulaşmıştır. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 incelendiğinde %80 rölatif sıkılığa sahip zeminlerin normalize sıvılaşma enerjileri %40 rölatif sıkılığa sahip olanlara göre daha kademeli yükselerek daha büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca %40 rölatif sıkılığa sahip numunelerin %5 ve %10 çift genlikli aksel deformasyonda ulaştıkları enerji değerleri birbirine daha yakın olmasına rağmen %80 rölatif sıkılığa sahip zeminlerde %5 ve %10 çift genlikli aksel deformasyonda ulaştıkları enerji değerleri arasındaki fark artmıştır. Bunun rölatif sıkılığın artmasıyla deformasyona karşı direncin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle D_r =%80 olan numunelerde %10 çift genlikli aksel deformasyona ulaşılması için gerekli enerji değeri, D_r =%40 olan numunelere göre daha fazla artış göstermiştir. Rölatif sıkılığın artış göstermesi deformasyonun aniden yükselmesini engellemese de bir miktar geciktirdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.11. PI=9, D_r =%80 olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi.



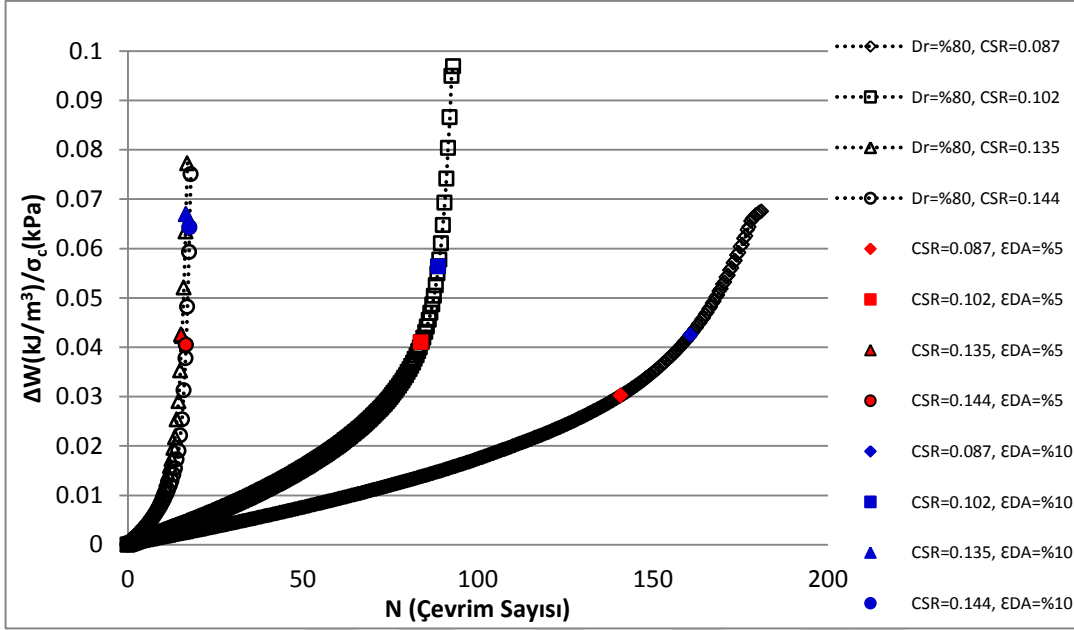
Şekil 4.12. PI=17 olan numunelerde çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon değişimi.



Şekil 4.13. PI=17, D_r =%40 olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi.

PI=17 olan zemin numunelerinin çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon ilişkisi Şekil 4.12’de; çevrim sayısı ile normalize sıvılaşma enerji ilişkisi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde PI=17 olan zemin numunelerinin çevrim sayısı ile çift genlikli eksenel deformasyon ilişkisinin, PI=6 ve PI=9 olan numunelerde olduğu gibi ani ve dik bir eğilim şeklinde yükselmesinin aksine daha kademeli bir artış eğilimi göstermektedir. Bu durum plastisitenin artışıyla zeminin gevrek davranıştan uzaklaşarak daha plastik davranış göstermeye başladığını göstermektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde her iki rölatif sıkılıkta da %5 ve %10 çift genlikli eksenel deformasyona ulaşmak için gerekli enerji değerlerinin, değişen CSR değerleriyle birlikte farklılıkların meydana geldiği görülmektedir. Bunun plastisite indisinin artışıyla, zeminin daha elastik deformasyon davranışı

göstermesi sonucu deformasyona bağlı değişen enerji değerlerinde farklılıkları arttırdığı düşünülmektedir.



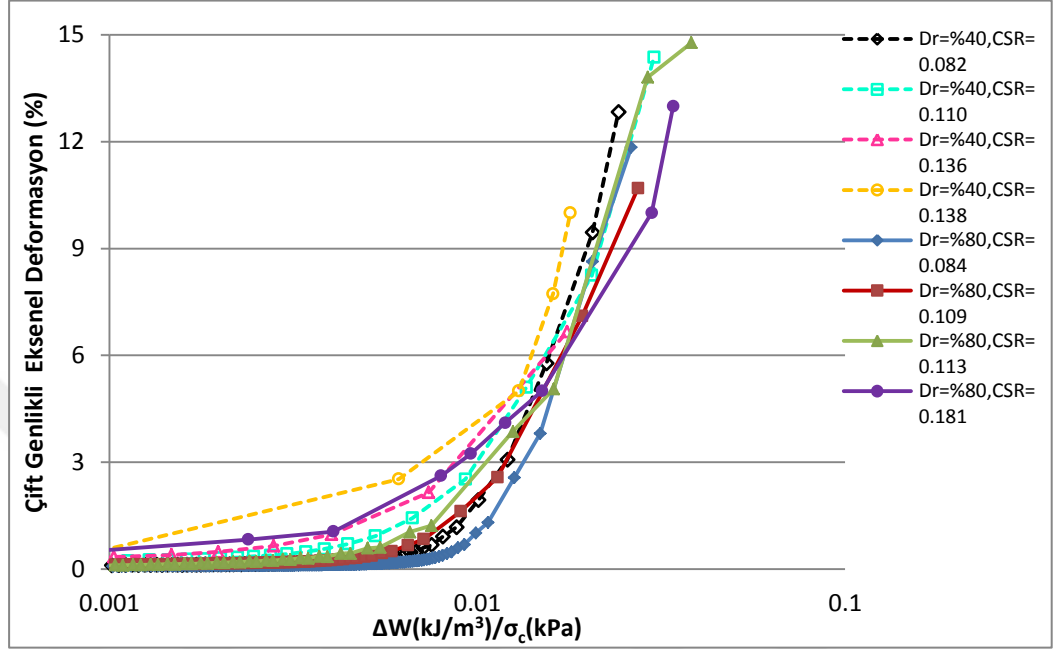
Şekil 4.14. PI=17, D_r =%80 olan numunelerde çevrim sayısı ile sıvılaşma enerjisi değişimi.

4.4 Normalize Sıvılaşma Enerjisi İle Çift Genlikli Eksenel Deformasyon İlişkisi

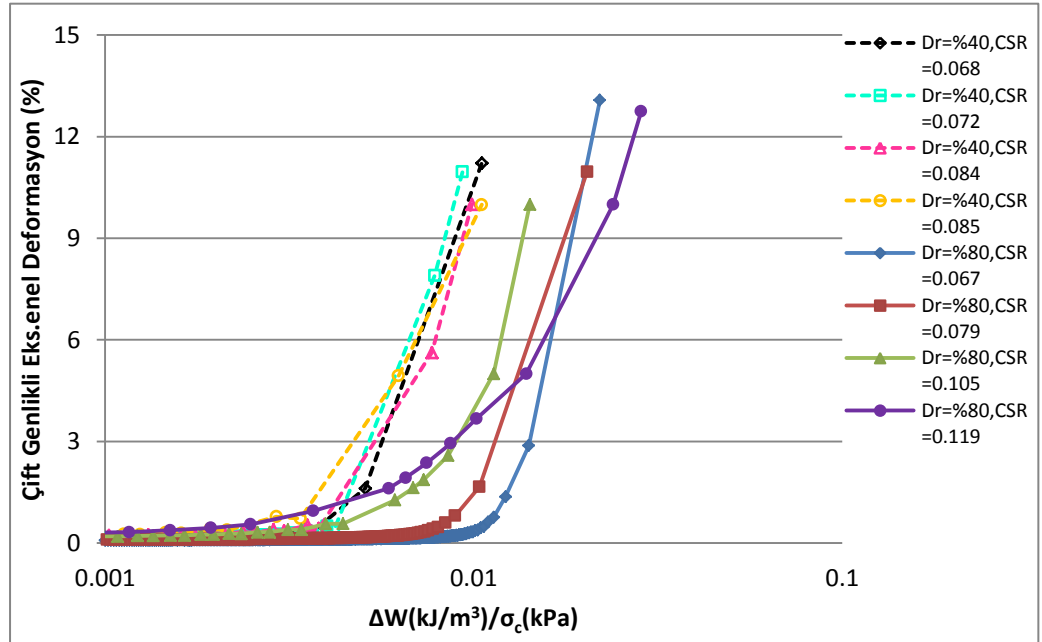
Çalışma kapsamında %5 çift genlikli eksenel deformasyona kadar ölçülen enerji, sıvılaşma enerjisi olarak kabul edilmiş ayrıca %10 çift genlikli deformasyona kadar ölçülen enerjide göz önünde bulundurulmuştur. Fakat literatürde daha farklı deformasyon seviyelerinin, sıvılaşma kriteri olarak kabul edilmesine rastlanılmıştır. Bu nedenle enerji yönteminin, farklı çift genlikli deformasyon seviyelerinde ki tutarlılığı bu bölümde incelenmiştir. Normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli eksenel deformasyon arasındaki ilişki, Şekil 4.15; Şekil 4.16; Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

PI=6 olan zemin numunelerinin normalize enerji ile çift genlikli eksenel deformasyon ilişkisi, Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde D_r =%40 ve D_r =%80 olan numunelerin artan deformasyon değerleriyle, normalize sıvılaşma enerjilerinin birbirine çok yakın değerlerde değiştiği görülmektedir. Daha önceki bölümlerde sıvılaşma enerjileri kıyaslanırken de bu durum görülmekteydi.%5 çift genlikli eksenel deformasyona kadar olan kısım göz önünde bulundurulduğunda, hem D_r =%40 olan numunelerde hem de D_r =%80 olan numunelerde CSR değerleri yükseldikçe deformasyonda ki artış daha küçük enerji değerlerinde başlamıştır. %5 ve %10 arasında ki deformasyon seviyelerinde aynı rölatif sıklığa sahip numunelerin enerji değerleri birbirine yakın davranış göstermiştir. Bu durum özellikle D_r =%40 olan numunelerde geçerli olup; %10 çift genlikli eksenel deformasyondan sonra aradaki farklar

açılmaya başlamıştır. $D_r=80$ olan numunelerde ise yaklaşık olarak %7-8 çift genlikli eksenel deformasyondan sonra enerji değerleri arasındaki fark açılmaya başlamıştır. Kısacası $PI=6$ olan zeminlerin sıvılaşma dirençleri kıyaslanırken %5 ile %7 arasındaki çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen enerji değerlerinin kullanılması, iki rölatif sıkılık içinde daha uygun olduğu düşünülmektedir.

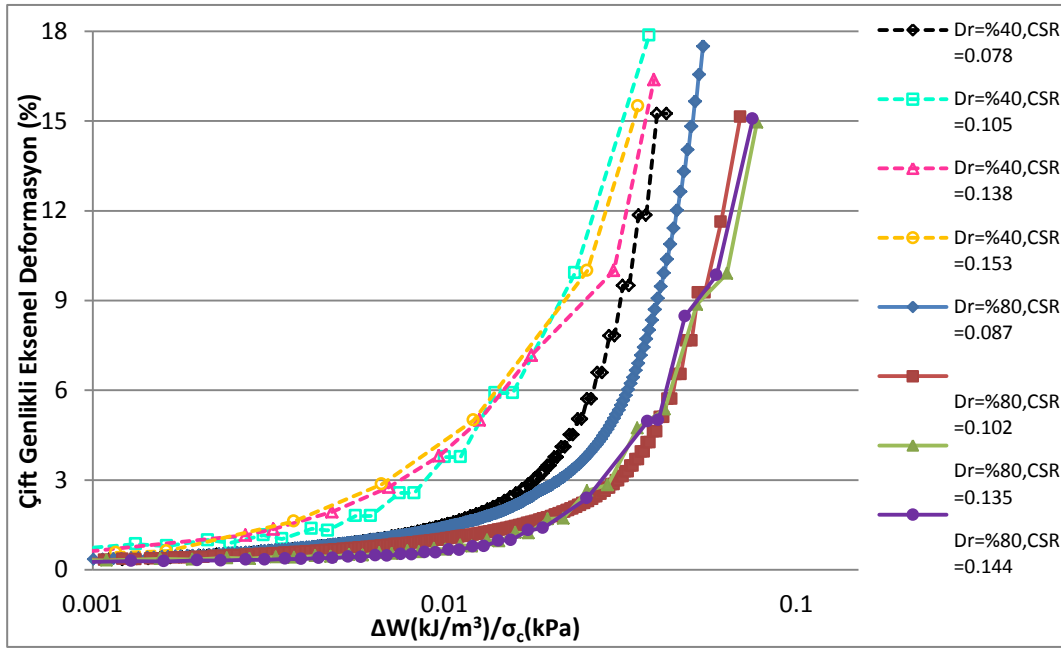


Şekil 4.15. $PI=6$ olan numunelerde normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli eksenel deformasyon arasındaki ilişki.



Şekil 4.16. $PI=9$ olan numunelerde normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli eksenel deformasyon arasındaki ilişki.

PI=9 olan zemin numunelerinin normalize enerji ile çift genlikli aksenal deformasyon ilişkisi, Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde D_r =%40 ve D_r =%80 olan numunelerin değişen çift genlikli aksenal deformasyon ile normalize enerji değerleri belirgin olarak birbirinden ayrılmıştır. %5 çift genlikli aksenal deformasyona kadar olan kısım göz önünde bulundurulduğunda, CSR değeri arttıkça çift genlikli aksenal deformasyonun yükselme eğilimi, daha küçük enerji değerlerinde başlamıştır. Fakat bu farklılığın, %5 çift genlikli aksenal deformasyon seviyelerinde oldukça azaldığı görülmektedir. D_r =%40 olan zeminlerin enerji değerleri, %5 çift genlikli deformasyondan sonrada birbirine benzer eğilim göstermiştir. Fakat D_r =%80 olan zeminlerde %5 çift genlikli aksenal deformasyondan sonra enerji değerlerinde ki farklılık artmıştır.

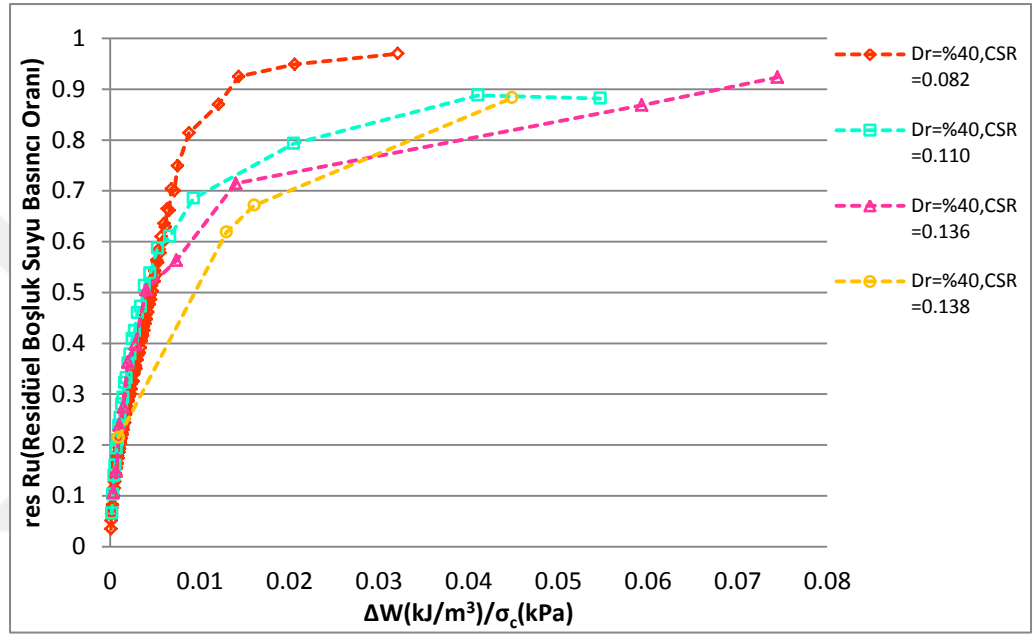


Şekil 4.17. PI=17 olan numunelerde normalize sıvılaşma enerjisi ile çift genlikli aksenal deformasyon arasındaki ilişki.

PI=17 olan zemin numunelerinin normalize enerji ile çift genlikli aksenal deformasyon ilişkisi, Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde CSR=0.078 ve 0.087 olan numuneler haricinde D_r =%40 ve D_r =%80 olan numunelerin değişen çift genlikli aksenal deformasyon ile normalize enerji değerlerinin benzer eğilim göstermiş olduğu ve rölatif sıklık farkının belirgin olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca diğer iki plastisite oranlarında olduğu gibi artan CSR değeriyle çift genlikli aksenal deformasyonun daha küçük enerji değerlerinde artma isteği çok daha az hissedilmektedir. Bu durum artan plastisite indisinin etkisiyle deformasyon direncinin artış göstermesi sayesinde, daha büyük CSR değeri uygulandığında meydana gelen hızlı deformasyon gelişiminin engellenmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

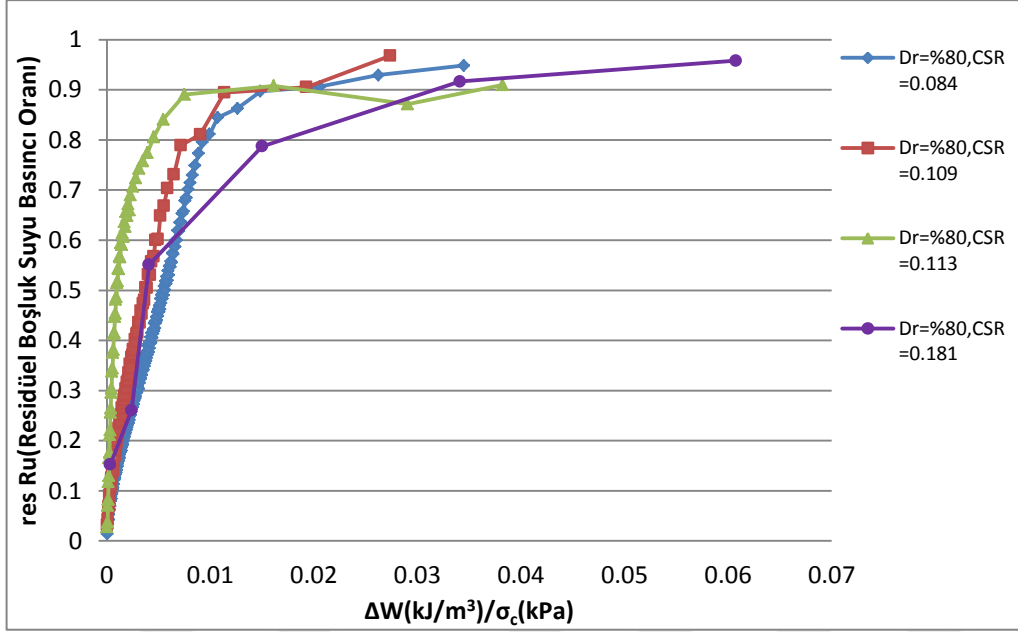
4.5 Normalize Enerji ile Residüel Boşluk Suyu Basıncı Gelişimi

Önceki yapılan çalışmalarla boşluk suyu basıncı gelişiminin sıvılaşma ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle çalışmada benimsenmiş enerji yönteminden elde edilen enerji değerleri ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi bu bölümde incelenmiştir. Normalize sıvılaşma enerjisi ile residüel boşluk suyu basınç oranı arasındaki ilişki, Şekil 4.18; Şekil 4.19; Şekil 4.20; Şekil 4.21; Şekil 4.22; Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Şekillerde gösterilen veriler her basınç yüklemesi sonunda, deviator gerilmenin sıfır değerinde olduğu anda alınan verileri temsil etmektedir.



Şekil 4.18. PI=6, $D_r=\%40$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.

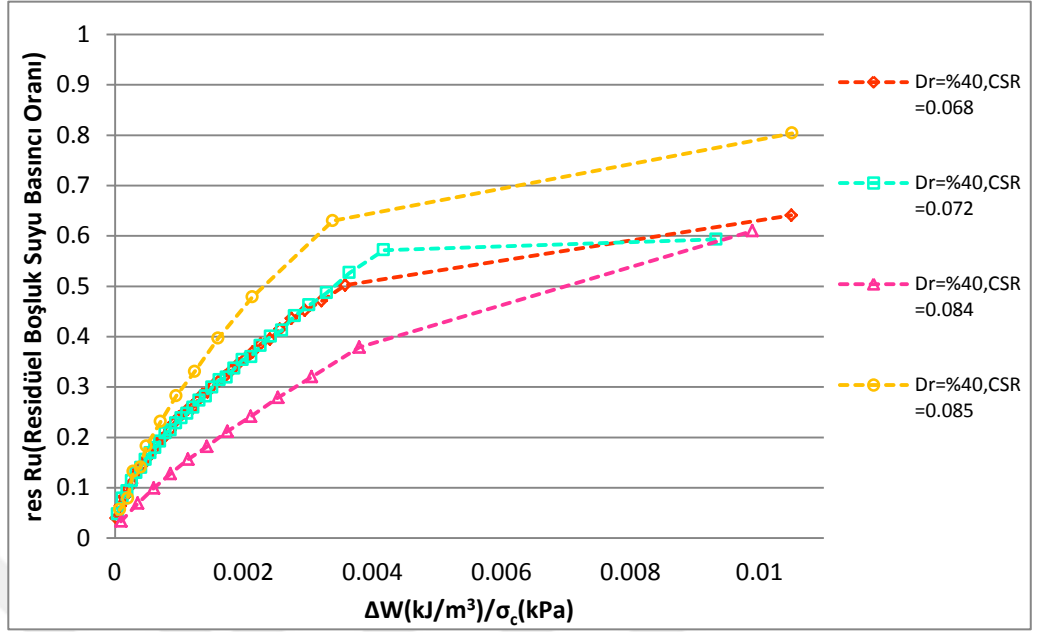
PI=6 ve $D_r=\%40$ olan zemin numunelerinin normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı ilişkisi, Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde CSR değeri yüksek olan numunelerin boşluk suyu basıncı daha düşük değerlerde olmasına rağmen daha büyük enerji değerlerine çıkmış olduğu görülmektedir. Normalize enerji değerlerinin 0.01 geçmesinde sonra eğrilerin yatay doğrultuya gelmeye başladığı ve CSR değeri etkisinin kaybolduğu görülmektedir.



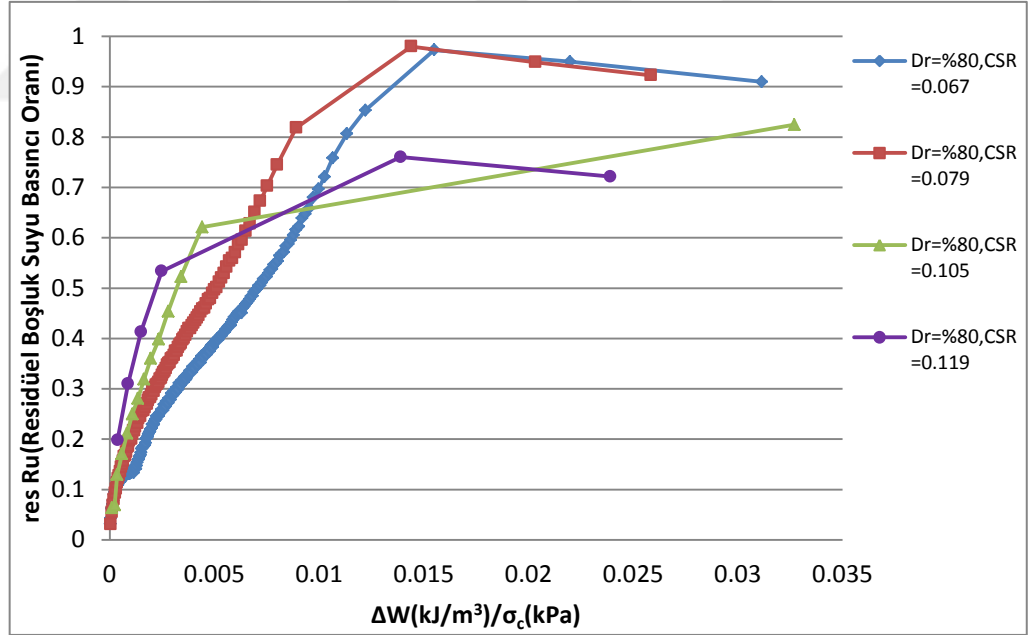
Şekil 4.19. PI=6, D_r =%80 olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.

PI=6 ve D_r =%80 olan zemin numunelerinin normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı ilişkisi, Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek CSR değerinde yüklenmiş numunenin, diğer numunelere göre enerji değerinin daha erken yükseldiği görülmektedir. D_r =%40 sahip bütün numunelerde ise bu durum CSR değeri yükseldikçe kademeli olarak hissedilmekteydi. Fakat D_r =%80 olan numunelerde sadece en yüksek CSR değerinde yükleme yapılan numunede bu durum gözlemlenmiştir. Bu durumu, rölatif sıkılığın artışıyla deformasyona karşı direncin artış göstermesi nedeniyle, numuneler birbirine daha benzer eğilim göstermiş olduklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Numunelerin boşluk suyu basınç oranları 0.9 değerine ulaştıktan sonra aynı yatay doğrultuda eğilim göstermiş olduğu ve CSR=0.181 olan numunenin de belirli bir değerden sonra diğer üç numuneye benzer değerlere ulaştığı görülmektedir. Burada da D_r =%40 olan numunelerde olduğu gibi CSR değeri etkisinin zamanla kaybolduğu görülmektedir.

PI=9 ve D_r =%40 olan zemin numunelerinin normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı ilişkisi, Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde CSR=0.068 ve 0.072 değerinde yüklenen numunelerin benzer eğilim gösterdiği fakat diğer iki numunenin farklı eğilim davranışı gösterdiği görülmektedir. Numunelerin artan boşluk suyu basınç oranıyla birlikte benzer değerlere yaklaşmaya başlamış olduğu fakat PI=6 olan numunelere göre daha düşük boşluk suyu basınç oranlarında kalması nedeniyle bu yaklaşmanın sınırlı seviyede kalmış olduğu görülmektedir.



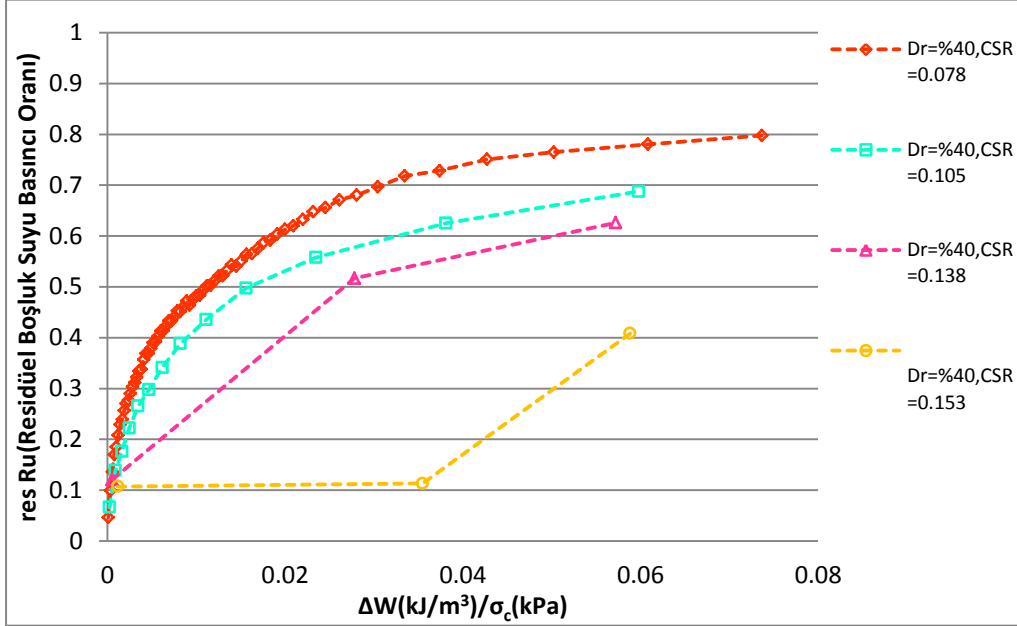
Şekil 4.20. PI=9, D_r =%40 olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.



Şekil 4.21. PI=9, D_r =%80 olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.

PI=9 ve D_r =%80 olan zemin numunelerinin normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi, Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek iki CSR değerine sahip (CSR=0.105 ve 0.119) numunelerin birbirine benzer eğilimde olduğu, en düşük iki CSR değerine sahip (CSR=0.067 ve 0.079) numunelerin de birbirine benzer eğilimde olduğu görülmektedir. Ayrıca artan boşluk suyu basıncı oranıyla CSR=0.119 haricinde

bulunan numunelerin eğrileri birbirine yaklaştırmaya başlamış olduğu görülmektedir. Yükleme oranı diğer numunelere göre oldukça fazla olan $CSR=0.119$ değerinde yüklenen numune, diğer üç numuneye göre nihai değerlerde de oldukça farklılık göstermiş olduğu görülmektedir. Bu nedenle CSR değerinin daha da yükselmesi, normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı arasındaki ilişkiyi tamamen etkilemiştir.

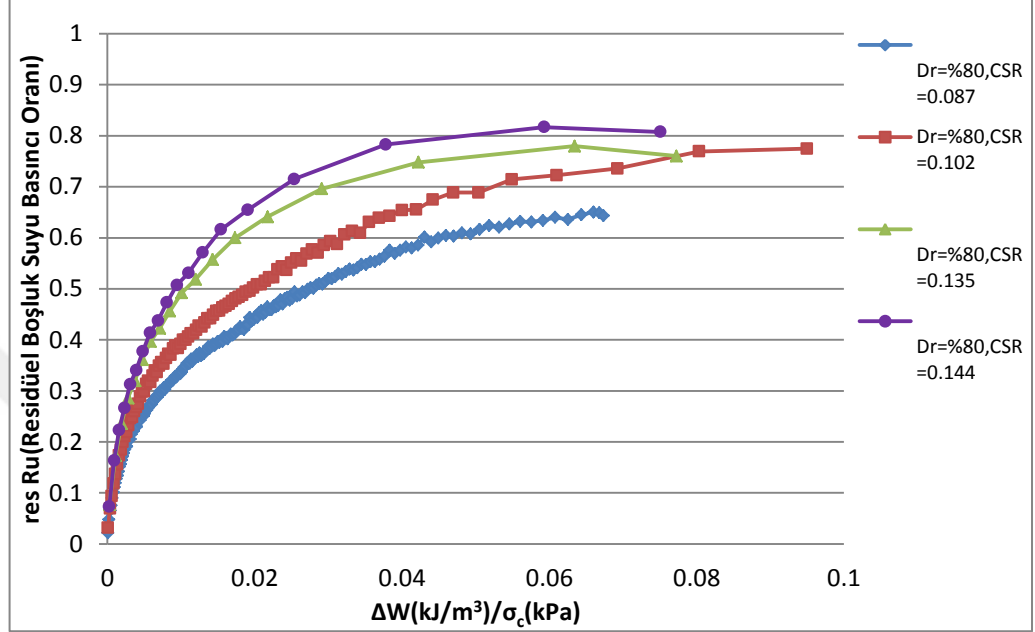


Şekil 4.22. $PI=17$, $D_r=\%40$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı ilişkisi.

$PI=17$ ve $D_r=\%40$ olan zemin numunelerinin normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı ilişkisi, Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde CSR değerinin artmasıyla enerji değerlerinin, daha düşük boşluk suyu basınç oranlarında yüksek değerler çıkma eğiliminde olduğu görülmektedir. Özellikle $CSR=0.153$ yükleme oranına sahip numune, çok kısa sürede büyük deformasyonlara uğramış ve yüksek enerji değerlerine ulaşmıştır. Bu nedenle diğer numunelere göre boşluk suyu basınç oranı gelişimi düşük seviyelerde kalmıştır.

$PI=17$ ve $D_r=\%80$ olan zemin numunelerinin normalize enerji ile residüel boşluk suyu basınç oranı ilişkisi, Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde CSR değerinin artmasıyla boşluk suyu basınç oranı gelişiminin artış gösterdiği görülmektedir. Bu bölümde incelenen bütün şekillerde bu durum çok fazla ön plana çıkmazken, Şekil 4.23'de belirgin olarak CSR değerinin artmasıyla boşluk suyu basınç oranının daha düşük enerji değerlerinde yükselmeye başladığı görülmektedir. Aslında Şekil 4.19'da ($PI=6$, $D_r=\%80$) incelendiğinde bu durumun tam olarak belirgin olmadığını, Şekil 4.21'de ($PI=9$, $D_r=\%80$) ise kısmen meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak, düşük CSR değerlerinde yüklenen numunelerin elastik deformasyon seviyesinde daha fazla çevrim yaparak, boşluk suyu basınç oranında hızlı artışa neden olmadan daha fazla enerji birikimi yapmasından

kaynaklandığı düşünülmektedir. $PI=9$ ve $D_r=\%80$ olan numunelerin ise $PI=17$ ve $D_r=\%80$ olan numunelere göre plastisitelerin düşük olmasından dolayı daha gevrek çökme davranışı gösterdikleri için, yüksek CSR değerlerinde yüklendiğinde belirli çevrimden sonra ani deformasyon artışı ve buna bağlı olarak enerji artışının meydana geldiği düşünülmektedir. Şekil 4.21’de $CSR=0.119$ ve 0.105 oranlarında yüklenen numunelerde meydana gelen ani enerji artışının nedeni buna bağlanmaktadır.



Şekil 4.23. $PI=17$, $D_r=\%80$ olan numunelerde normalize enerji ile residüel boşluk suyu basıncı gelişimi.

4.6 Deney Sonuçlarına Göre Elde Edilen Modeller

Çalışma kapsamında yapılan dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen sonuçlara göre çoklu regresyon analizi yapılarak düşük plastisiteli siltler için modeller oluşturulmaya çalışılmıştır. Daha önce yapılmış olan benzeri modeller [Denklem (2.3),(2.4),(2.5),(2.6),(2.7),(2.8)] göz önünde bulundurulduğunda; rölatif sıkılık (D_r), çevresel efektif gerilme (σ'_c), uygulanan çevrimsel gerilme oranı (CSR) veya çevrimsel deformasyon oranı, ince dane içeriği (F_c), çarpıklık katsayısı (C_u) ve ortalama dane çapı (D_{50}) parametrelerinin kullanılmış olduğu görülmüştür. Fakat daha önce oluşturulan modellerin kumlar üzerinde yapılmış olduğu; oluşturulacak yeni modellerin, siltleri temsil edeceği için siltlere uygun parametrelerin kullanılması gerektiği düşünülmüştür. Bu sebeple oluşturulacak yeni modellerde, daha önceki modellerde kullanılmamış olan ve siltlerin sıvılaşma direncini etkilediği düşünülen plastisite indisi (PI) dahil edilmiştir. Kullanılan diğer parametreler ise daha önceki modellerde kullanılan rölatif sıkılık (D_r) ve CSR değeridir. Önceki modellerde kullanılan ve sıvılaşma direncinde doğrudan etkisi olduğu düşünülen çevresel efektif gerilme (σ'_c), sıvılaşma enerjileri hesaplanan bütün deneylerde sabit tutulmuş olduğu için regresyon analizlerine dahil edilmemiştir. İnce dane oranı (F_c) ise yapılacak olan modellerin, siltlerden elde

edilmiş enerji değerleri ile oluşturulacağı için regresyon analizlerine dahil edilmemiştir.

Plastisite indisinin sıvılaşma direncini ne yönde etkilediği incelendiğinde, elde edilen deneysel sonuçlara ve literatürdeki sonuçlara göre plastisite indisinin (PI) artışıyla sıvılaşma direncinin önce azaldığı daha sonra ise artmaya başladığı görülmüştür. Oluşturulacak olan modellerde bu değişimin birinci dereceden bir denklem ile ifade edilmesinin mümkün olmayacağı düşünülmüştür. Bunun için regresyon analizinde birinci ve ikinci dereceden ifade birlikte kullanılarak model oluşturulmaya çalışılmıştır. Rölatif sıkılığın (D_r) sıvılaşma direncine etkisi incelendiğinde, rölatif sıkılığın (D_r) artış göstermesiyle sıvılaşma direncinde artışa neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle rölatif sıkılık (D_r) için birinci dereceden ifade kullanılmasının yeterli olacağı düşünülmüştür. Daha önceki modeller de incelendiğinde; rölatif sıkılığın (D_r), sadece birinci dereceden bir ifadeyle modele katıldığı görülmektedir. Tez çalışması boyunca CSR değerinin artmasıyla veya azalmasıyla, sıvılaşma enerjisini ne yönde etkilediği belirgin olarak gözlemlenememiştir. Önceki yapılan modeller örnek alındığında; CSR değerinin birinci dereceden ifadeyle modele dahil edildiği görülmüştür. Bu nedenle CSR değeri de oluşturulacak modellere birinci dereceden ifadeyle ilave edilmiştir. Analizler yapılırken tez boyunca kabul edilen %5 çift genlikli aksenal deformasyona karşılık gelen enerji değerleri ve kıyaslama amacıyla %10 çift genlikli aksenal deformasyona karşılık gelen enerji değerleri kullanılmıştır. Ayrıca her iki farklı deformasyon seviyesindeki ($\mathcal{E}_{DA}=\%5$ ve %10) enerji değerleri için CSR değeri dahil edilerek ve edilmeyerek, iki farklı analiz yapılmıştır. Böylelikle CSR değerinin, birim hacim enerjisi üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

Regresyon analizinde kullanılması planlanan parametrelere göre parabolü ifade eden Denklem 4.1’de gösterilen genel regresyon denklemi tercih edilmiştir. Denklem 4.1’e regresyon analizi için gerekli görülen parametreler dahil edilerek Denklem 4.2 elde edilmiştir.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^2 + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i + \beta_4 x_i \quad (4.1)$$

$$\Delta W = \beta_0 + \beta_0 PI^2 + \beta_0 PI + \beta_0 D_r + \beta_0 CSR \quad (4.2)$$

Burada: β_i ; Parametre katsayısı, x_i ; Genel parametre ifadesi, Y_i ; Analizde kullanılacak gözlem, $\Delta W(kJ/m^3)$; Birim hacim sıvılaşma enerjisi, PI; Plastisite indisi, D_r ; Rölatif sıkılık(%), CSR; Çevrimsel gerilme oranıdır.

Denklem 4.2 ile birlikte deneylerde elde edilmiş enerji değerleri ve deney koşullarına göre Microsfot excell programı kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde farklı tabanlar denenmiş ve en başarılı sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek başarı, logaritmik tabanda elde edilmiş olup; aşağıda sadece logaritmik tabanda elde edilen modeller sunulmuştur. Analizde kullanılan deney verileri ve elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’ gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. %5 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ve oluşturulan modellerin öngördüğü değerler.

$\epsilon_{DA}=\%5$						
Test Sayısı	PI	Dr,%	CSR	$\Delta W, \text{kJ/m}^3$	Ön Görülen Değerler ($\Delta W, \text{kJ/m}^3$)	
					Denklem 4.3	Denklem 4.4
1	6	40	0.082	1.4327	1.1999	1.1014
2	6	40	0.110	1.3512	1.1181	1.1014
3	6	40	0.136	1.4071	1.0472	1.1014
4	6	40	0.138	1.2989	1.0417	1.1014
5	6	80	0.084	1.5898	2.1602	1.9643
6	6	80	0.109	1.5524	2.0326	1.9643
8	6	80	0.113	1.7865	2.0093	1.9643
9	6	80	0.181	1.4043	1.6967	1.9643
10	9	40	0.068	0.6959	0.7524	0.7266
11	9	40	0.072	0.7421	0.7449	0.7266
12	9	40	0.084	0.7607	0.7222	0.7266
13	9	40	0.085	0.6117	0.7208	0.7266
14	9	80	0.067	1.4757	1.3650	1.2959
15	9	80	0.079	1.4341	1.3243	1.2959
16	9	80	0.105	1.1301	1.2419	1.2959
17	9	80	0.119	1.3675	1.2000	1.2959
18	17	40	0.078	2.3464	1.9106	1.7469
19	17	40	0.105	1.2901	1.7897	1.7469
20	17	40	0.138	1.2400	1.6478	1.7469
21	17	40	0.153	1.1966	1.5873	1.7469
22	17	80	0.087	2.9606	3.3919	3.1157
23	17	80	0.102	4.0212	3.2670	3.1157
24	17	80	0.135	4.1706	3.0089	3.1157
25	17	80	0.144	3.9354	2.9431	3.1157

Çizelge 4.2’de %5 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ile Denklem 4.3 ve Denklem 4.4’e göre hesaplanmış tahmini değerler görülmektedir. Denklem 4.1’de CSR değeri de analize dahil edilirken, Denklem 4.4’de dâhil edilmemiştir. %5 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerlerine göre elde edilen denklemler:

$$\log(\Delta W) = 0.957 + 0.0113PI^2 - 0.243PI + 0.0064D_r - 1.081CSR; R^2=0.831 \quad (4.3)$$

$$\log(\Delta W) = 0.681 + 0.0098PI^2 - 0.207PI + 0.0063D_r; R^2=0.816 \quad (4.4)$$

Burada: $\Delta W(\text{kJ/m}^3)$; Birim hacim sıvılaşma enerjisi, PI; Plastisite indisi, D_r ; Rölatif sıkılık(%), CSR; Çevrimsel gerilme oranıdır.

Çizelge 4.3. %10 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ve oluşturulan modellerin öngördüğü değerler.

$\epsilon_{DA}=\%10$						
Test Sayısı	PI	$D_r, \%$	CSR	$\Delta W, \text{kJ/m}^3$	Ön Görülen Değerler ($\Delta W, \text{kJ/m}^3$)	
					Denklem 4.5	Denklem 4.6
1	6	40	0.082	2.1825	1.7448	1.7960
2	6	40	0.110	2.3065	1.7869	1.7960
3	6	40	0.136	2.2214	1.8268	1.7960
4	6	40	0.138	1.7930	1.8301	1.7960
5	6	80	0.084	2.4574	2.8606	2.9538
6	6	80	0.109	2.6632	2.9199	2.9538
7	6	80	0.113	2.1632	2.9313	2.9538
8	6	80	0.181	2.7903	3.1034	2.9538
9	9	40	0.068	1.0435	1.0533	1.0658
10	9	40	0.072	0.9286	1.0569	1.0658
11	9	40	0.084	0.9766	1.0679	1.0658
12	9	40	0.085	1.0279	1.0686	1.0658
13	9	80	0.067	1.8417	1.7224	1.7528
14	9	80	0.079	2.0378	1.7400	1.7528
15	9	80	0.105	1.4173	1.7782	1.7528
16	9	80	0.119	2.3539	1.7988	1.7528
17	17	40	0.078	3.3640	2.9764	3.0677
18	17	40	0.105	2.4117	3.0427	3.0677
19	17	40	0.138	2.9857	3.1287	3.0677
20	17	40	0.153	2.5168	3.1684	3.0677
21	17	80	0.087	4.1573	4.9027	5.0452
22	17	80	0.102	5.5262	4.9651	5.0452
23	17	80	0.135	6.5589	5.1049	5.0452
24	17	80	0.144	6.2457	5.1431	5.0452

Çizelge 4.3’de %10 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ile Denklem 4.5 ve Denklem 4.6’ya göre hesaplanmış tahmini değerler görülmektedir. Denklem 4.5’de CSR değeri de analize dâhil edilirken, Denklem 4.6’da dahil edilmemiştir. %10 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerlerine göre elde edilen denklemler:

$$\log(\Delta W) = 1.051 + 0.0116PI^2 - 0.245PI + 0.0053D_r + 0.365CSR; R^2=0.891 \quad (4.5)$$

$$\log(\Delta W) = 1.144 + 0.0121PI^2 - 0.257PI + 0.0054D_r; R^2=0.889 \quad (4.6)$$

Burada: $\Delta W(kJ/m^3)$; Birim hacim sıvılaşma enerjisi, PI; Plastisite indisi, D_r ; Rölatif sıkılık(%), CSR; Çevrimsel gerilme oranıdır.

Regresyon analizi sonucunda elde edilen regresyon katsayıları göz önünde bulundurulduğunda, sonuçların yüksek doğruluk oranında olmasa da belirli ölçüde doğruluk payı olduğu görülmektedir. Bunun iki farklı rölatif sıkılık değerinin regresyon analiz için az olmasından ve deney sayısının azlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca daha yüksek doğruluk oranında bir analiz yapabilmek için mutlaka farklı parametrelerin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun dışında yöntemin de düşük plastisiteli siltlerde tutarlı sonuç verdiği tartışma konusudur. Çünkü bazı deney sonuçlarının aynı parametrelere sahip diğer deney sonuçlarına göre daha farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. %10 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen enerji değerlerine göre oluşturulmuş modellerin, %5'e göre daha yüksek doğruluk oranında olduğu da gözlemlenmektedir. Bunun plastisitenin artmasıyla zeminin artan deformasyon yeteneğinden dolayı daha yüksek deformasyon seviyelerinde nihai enerji değerlerine yaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum Bölüm 4.4'de daha iyi şekilde görülebilmektedir. CSR değerinin dahil edildiği ve edilmediği denklemlerin regresyon katsayıları göz önünde bulundurulduğunda, CSR değerinin enerji değerleri üzerinde büyük etkisinin olmadığı ve bu durumun, Figueroa et al. (1994) tarafından yapılmış olan çalışmayla örtüştüğü görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasının başlıca iki amacı bulunmaktadır. Bu amaçlardan ilki, düşük plastisiteli siltlerin; değişen plastisite indisiiyle sıvılaşmaya karşı direncinin nasıl etkilendiğini inceleyerek daha önceden yapılan çalışmalara katkıda bulunabilmektir. İkincisi ise enerji temelli yöntemin düşük plastisiteli siltlerde ne kadar tutarlı sonuçlar verdiği, zeminin değişen parametrelerinden ne yönde etkilendiği ve uygulanan çevrimsel gerilme oranından etkilenip etkilenmediğini gözlemlemektir. Çalışma kapsamında FGA-2021-22457 kodlu bilimsel araştırma projesinden alınan deneysel veriler kullanılarak, enerji temelli sıvılaşma analizi yapılmıştır. Analizleri yapılmış üç farklı plastisite indisine sahip ($PI=6,9,17$) üç farklı silt zemin, iki farklı rölatif sıkılıkta ($Dr=\%40$ ve $\%80$) olmak üzere ıslak tokmaktama yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Enerji yönteminin, uygulanan çevrimsel gerilme oranından (CSR) nasıl etkileneceğini gözlemleyebilmek için yukarıda tarif edilmiş altı farklı kombinasyonda hazırlanmış zemin numunelerine, sabit çevresel basıç altında ($\sigma_c=100$ kPa) dört farklı CSR oranında izotropik yükleme uygulanmış olan deneylerin kullanılmasına dikkat edilerek, bu doğrultuda toplamda 24 adet dinamik üç eksenli deney sonucu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Plastisite indisine bağlı olmaksızın rölatif sıkılığın $\%40$ 'dan $\%80$ ' çıkması sonucunda birim hacimde biriken enerji miktarları artmıştır, dolayısıyla sıvılaşma direnci de artmıştır. Fakat değişen plastisite indisine göre bu artış miktarı değişkenlik göstermiştir. Plastisite indisinin artışıyla rölatif sıkılığın sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi artış göstermiştir.
- Rölatif sıkılığa bağlı olmaksızın plastisite indisinin artışıyla sıvılaşma direnci önce düşmüş, sonra yükselmiştir. Daha açık şekilde; Plastisite indisinin 6'dan 9'a yükselmesiyle sıvılaşma direnci düşerken, plastisite indisinin 9'dan 17' ye yükselmesiyle sıvılaşma direnci artış göstermiştir. Fakat duruma, $PI=6$ olan zeminde kullanılan montmorillonit etkisinden kaynaklanan mineraloji farklılığının sebep olabileceği düşünülmektedir.
- Rölatif sıkılık ve plastisite indisine bağlı olmaksızın numuneye uygulanan CSR değerinin düşmesiyle hedeflenen sıvılaşma kriterine kadar gerekli çevrim sayısı artış göstermiştir. Buna rağmen birim hacimde biriken toplam enerji değerlerinde genel olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat bazı deney sonuçlarına göre birim hacim başına düşen toplam enerji değerlerinde büyük farklar da görülmüştür. Bu durum düşük plastisiteli siltlerde enerji temelli sıvılaşma yöntemi ile 1 veya 2 farklı CSR değeri kullanılarak yapılacak sıvılaşma analizi sonuçlarının güvenilirliği konusunda soru işaretleri oluşturmuştur.

- Rölatif sıkılığa bağlı olmaksızın plastisite indisi düşük olan numunelerde belirli çevrimden sonra ani deformasyonlar gözlenerek, gevrek göçme davranışı meydana gelmiştir. Plastisite indisinin artmasıyla ani deformasyon artışı yerine daha kademeli deformasyon artışıyla birlikte plastik göçme davranışı meydana gelmiştir.
- Rölatif sıkılığa bağlı olmaksızın $PI=6$ ve 9 olan numunelerde çift genlikli deformasyon ile normalize enerji ilişkisinin, %5 çift genlikli eksenel deformasyona kadar numuneye uygulanan CSR değerinden etkilendiği; %5 ile %10 çift genlikli deformasyon seviyeleri arasında bu etkinin azaldığı görülmüştür. $PI=17$ olan numunelerde ise %5 çift genlikli eksenel deformasyon seviyesine kadar çift genlikli eksenel deformasyon ile normalize enerji ilişkisinin, değişen CSR değerlerinden az etkilendiği görülmüştür.
- Rölatif sıkılığa ve Plastisite indisine bağlı olmaksızın normalize enerji ile boşluk suyu basınç oranı gelişiminin, başlangıçta birbirine yakın olarak seyretse de aralarında belirgin farkların olduğu görülmüştür. Fakat bu farklar, artan boşluk suyu basınç oranıyla birlikte kapanmaya başlayarak; tamamen kaybolmuş ya da azalmıştır. Normalize enerji ile boşluk suyu basınç oranı gelişiminde eğilimleri farklı görülen numunelerin, boşluk suyu basınç oranının yüksek gelişim göstermediği; 0.7 değerinin altında kaldığı görülmüş ve farkların tam olarak kapanmayışı bu nedenle ilişkilendirilmiştir. Bu yüzden önceki yapılan çalışmalarda görülen kumların boşluk suyu gelişimi ile birim hacimde biriken enerji arasındaki yakın ilişki (Azeiterio et al, 2017), düşük plastisiteli siltlerde aynı şekilde görülememiştir.
- %5 ve %10 çift genlikli deformasyon seviyelerine kadar birim hacimde biriken enerji değerleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonuçlarına göre %10 çift genlikli eksenel deformasyona karşılık gelen enerji değerleri kullanılarak yapılan analizin daha doğru sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Fakat bununda enerji değerlerini öngörmede yeterli olduğu görülmemiştir. Daha iyi bir sonuç elde edilebilmek için analize farklı parametrelerin ilave edilmesi gerektiği düşünülmüştür. Ayrıca numuneye uygulanan CSR değerinin sonuçlar üzerinde çok etkisi olmadığı ve bu durumun, Figueroa et al. (1994) tarafından yapılmış olan çalışmayla örtüştüğü görülmüştür.

5.2 Öneriler

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre ileride konu ile ilgili olarak yapılacak çalışmalara ışık tutabilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır.

Benzeri çalışmada;

- Farklı Rölatif sıkılıklar dahil edilerek; daha fazla sayıda rölatif sıkılık oranlarında,
- Farklı numune hazırlama yöntemleri kullanılarak,
- Birden fazla çevresel basınç altında,
- Yüksek plastisite oranına sahip siltlerde veya kil zeminlerde,
- Farklı zemin parametreleri de dahil edilmek suretiyle yapılan çalışmaların oldukça katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akkaş, Ü.**, 2006, Sıvılaşma Potansiyeli ve Etkilerinin Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altun, S.**, 2004, Suya Doygun Kumların Drenajsız Koşullardaki Davranışın Tekrarlı Yükler Altında Burulmalı Kesme Deney Aleti ile İncelenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt:6, Sayı:1,139-152.
- Altun, S., Göktepe, A.B. and Akgüner, C.**, 2005, “Cyclic Shear Strength of Silts and Sands Under Cyclic Loading”, ASCE Geotechnical Special Publication No:133: Earthquake Engineering and Soil Dynamics: Recent Findings in Soil Liquefaction, Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Conference held in Austin, Texas, (CD Press), 1365-1375.
- Amini,P.F.,Noorzad,R.**,2018, Energy-Based Evaluation of Liquefaction of Fiber-Reinforced Sand Using Cyclic Triaxial Testing, Soil Dynamics and Earthquake Engineerig,104;45-53.
- Andersen, K.H., Kleven, A., ve Heien, D.**, 1988, Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures. J. Geotech. Eng. ASCE **114:5**, 517-539.
- Andrews, D.C.A.**, 1997, Liquefaction of Silty Soils: Susceptibility, Deformation, and Remediation, Doktora Tezi, Southern California Üniversitesi, Los Angeles.
- Andrews, D.C.A., Martin, G.R.**, 2000, Criteria for Liquefaction of Silty Soils, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand, 1-8.
- ASTM D2487-17e1**, 2017, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5311 / D5311M-13**, 2013, Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7928-16e1**, 2016, Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM D4318-17e1**, 2017, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854-14**, 2014, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4253-16e1**, 2016, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4254-16**, 2016, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Atukorala, U., Wijewickreme D., Mccammon, N.**, 2000, Some Observations Related to Liquefaction Susceptibility of Silty Soils, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering Auckland, New Zealand; Bildiri No. 1324;1-8.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., Sönmez, H., Tuncay, E.**, 2000, "Liquefaction Phenomenon in The Earthquakes of Turkey" .Proceedings of The 12 Th World Conferance on Earthquake Eng., Auckland, New Zealand.
- Aytaş, Z.**, 2019, Zemin sıvılaşmasına Zemin ve Deprem Parametrelerinin Etkisinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydın, C.**, 2008, Sıvılaşma Analizi ile İlgili Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azeiteiro, R.J.N., Coelho, P.A.L.F., Taborda, D.M.G., Grazina, J.C.D.**, 2017, Energy-Based Evaluation of Liquefaction Potential Under Non-Uniform Cyclic Loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92;650-665.
- Baziar, M.H., Jafarian, Y., Shahnazari, H., Movahed, V.**, 2011, Prediction of strain energy-based liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An evolutionary approach, Computers&Geosciences, 37;1883-1893.
- Bilge, H.T., Çetin, K.Ö.**, 2017, Silt - Kil Karışımı Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyellerinin Belirlenmesi, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Boulanger, R.W., Seed, R.B., Chan, C.K., Seed, H.B., ve Sousa, J.**, 1991, Liquefaction Behavior of Saturated Sands Under Uni-Directional and Bi-Directional Monotonic and Cyclic Simple Shear Loading. Report No. UCB/GT/91-08, University of California, Berkeley, California.
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M.**, 2006, Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(11), 1413-1426.
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoğlu, T., Önalp, A., Youd, T.L., Stewart, J.P., Seed, R.B., Çetin, K.Ö., Bol, E., Baturay, M.B., Christensen C. and Karadayılar, T.**, 2004, Subsurface Characterization at Ground Failure Sites in Adapazari Turkey, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, Issue 7, 673-685.
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Riemer, M.F. ve Durgunoğlu, T.**, 2004, Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils, 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, s. 655-662.
- Bray, J.D. and Sancio, R.B.**, 2006, An Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 9, 1165-1177.
- Campanella, R.G. and Lim, B.S.**, 1981, Liquefaction Characteristics of Undisturbed Soils, Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.1, 227-230.
- Cao, Y.L. and Law, A.K.**, 1991, Energy Asyfroch for Liquefaction of Sandy and Clayey Silts. Proceeding:2. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, 491-497, 11-15 Mart, St.Louis, Missouri.
- Castro, G., and Poulos, S.J.**, 1977, Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT6), 501-506.
- Chang, N.Y., Yeh, S.T., and Kaufman, L.P.**, 1982. Liquefaction Potential of Clean and Silty Sands, Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, USA, 2: 1017-1032.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Coates, D.R.**, 1990, Geomorphic Controls of Groundwater Hydrology in: Groundwater Geomorphology, The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Process and Landforms, Edited by Charles G. Higgins, Geological Society of America, New York, Special Paper 252, 341-349.
- Cooke, H.G.**, 2000, Ground Improvement for Liquefaction Mitigation at Existing Highway Bridges, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 372 p.
- Çavuş, U.Ş.**, 2015, Zeminlerin Sıvılaşması ve Barajların Alüvyon Temellerinin Sıvılaşma Riskinin Pratik Değerlendirilmesi, DSİ Teknik Bülteni, 119, 32-33.
- Çetin, K. Ö., Unutmaz, B.**, 2004, Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 430, 2004/2, 32- 37.
- Das, B. M.**, 1997, Principles of Soil Dynamics, PWS Pub. Co., 551 p.
- Das, B.M., Puri, V.K. and Prakash, S.**, 1999, Liquefaction of Silty Soils, Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam.
- Dief, H.M., Figueroa, J.L.**, 2001, 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.
- Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M., Powell, D.**, 1982, Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method, NBS Building Science Series 138, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 152 p.
- Doğan, H.M.**, 2015, Sismik Sıvılaşma Mekanizması ve Buna Bağlı Oluşan Deformasyonların İncelenmesi : Adapazarı Bölgesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü .
- Emiroğlu, T.**, 2018, Serbest Arazi Koşullarında ve Düşey Gerilme Artışı Etkisinde Sıvılaşma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erinç, S.**, 2000, Jeomorfoloji I. DER Yayınları, İstanbul.
- Erken, A., Ansal, A., Yıldırım, H., Ülker, R., Sancar, T. ve Kılıç, C.**, 1995, Liquefaction of Silt and Sand Layers in Erzincan-Ekşisu, First Int.Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Vol.1, 13- 18.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Erken, A., Özay, R., Kaya, Z., Ülker, M.B.C., Elibol, B.,** 2004, Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Tasıma Gücü Kayıpları, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 431, 2004/3, 20-26.
- Eurocode-8,** 1998, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, European Standard, European Committee for Standardisation, Brussels.
- Ferritto, J.M.,** 1997, Seismic Design Criteria for Soil Liquefaction, Technical Report TR-2077-SHR. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, 58p.
- Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L., Dahisaria, M.N.,** 1994, Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(9):1554–1569.
- Finn, W.D.L., Bransby P.L. and Pickering D.J.,** 1970, Effect of Strain History on Liquefaction of Sand, Soil Mechanics and Foundations Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 96, No. 6, 1917-1934.
- Finn, W.D.L.,** 1981, Liquefaction Potential: Developments since 1976, In Proceedings of the 1st International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Mo. Vol. 2. Edited by S. Prakash. University of Missouri-Rolla., 655– 681.
- Finn, W.D.L., Ledbetter, R.H., Wu, G.,** 1994, Liquefaction in Silty Soils, In S.Prakash and P.Dakoulos (editors), Ground Failures Under Seismic Conditions, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 44, 51-76.
- Hoeg, K., Dyvik, R. and Sandbaekken, G.,** 2000, Strength of Undisturbed Versus Reconstituted Silt and Silty Sand Specimens, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(7), 606-617.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W.,** 2010, SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures, Report No. UCD/CGM- 10-02, Center for Geotechnical Modeling Department, University of California Davis, California, USA, 136 pp.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S.,** 1975, Undrained Deformation and Liquefaction of Sand Under Cyclic Stresses, Soils and Foundations, 15 (1): 29-44.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ishihara, K., Sodekawa, M. and Tanaka, Y.,** 1978, Effects of Overconsolidation on Liquefaction Characteristics of Sands Containing Fines, Dynamics Geotechnical Testing, American Society for Testing and Materials STP 654, ASTM, 246-264.
- Ishihara, K. and Takatsu, H.,** 1979, Effects of Overconsolidation and K_0 Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sands, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.19, No.4, 59-68.
- Ishihara, K.,** 1980, Subsurface soil liquefaction during earthquakes in Japan, Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo.
- Ishihara, K.,** 1985. Stability of Natural Deposits During Earthquakes, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1, p. 321-376.
- Ishihara, K.,** 1993, Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes, Geotechnique, Vol. 43 (3), 351-415.
- Ishihara, K.,** 1996, Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Oxford University Press Inc., New York, 208-246
- Jafarian, Y., Towhata, I., Baziar, M.H., Noorzad, A., Bahmanpour, A.,** 2012, Strain Energy Based Evaluation Of Liquefaction And Residual Pore Water Pressure In Sands Using Cyclic Torsional Shear Experiments. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 35, 13-28.
- JGS 0541, 2000,** “Method for Cyclic Undrained Triaxial Test on Soils”, Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Tests (English Version), The Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan, 54-61.
- Karakan, E., Altun., S.,** 2016, Silt Kum Karışımlarının Sıvılaşma Davranışı ve Sıvılaşma Sonrası Hacimsel Deformasyon Özellikleri., İMO Teknik Dergi, sayı.462, 7593-7617.
- Kayabalı, K., Yılmaz, P., Fener, M., Aktürk, Ö., Habıbzadeh, F.,** 2018, Zemin Sıvılaşmasının Enerji Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 156;195-206.
- Koester, J.P.,** 1994, The Influence of Fine Type and Content on Cyclic Strength, Ground Failures Under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication No.44, Editors; Prakash, S. and Dakoulas, P., ASCE, 17-33.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kokusho, T.**, 2013, Liquefaction Potential Evaluation: Energy-Based Method Compared to Stress-Based Method. In Proceedings of The Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Chicago, Ill., 29 April – 4 May 2013.
- Kramer, S.L.**, 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 653, 379-380
- Kramer, S.L. and Seed, H.B.**, 1998, Initiation Of Soil Liquefaction Understatic Loading Condition, J.of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 114(4) :412-430.
- Kramer S.L.**, Sivilaşma, Editörler: Stenquist B., Zucker I., Conte J., Meehan J., Weist M., Geoteknik Deprem Mühendisliği, 1. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, 401-431, 2003.
- Ladd, R.S.**, 1977, Speciment Preparation and Cyclic Stability of Sands, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 103(6), 535-547.
- Lai, S.**, 1998, Rigid and Flexible Retaining Walls During Kobe Earthquake, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, SOA-4, p.108-127.
- Law, K.T., Cao, Y.L., He, G.N.**, 1990, An Energy Approach For Assessing Seismic Liquefaction Potential. Canadian Geotechnical Journal, 27, 320–329.
- Law, K.T. and Ling, Y.H.**, 1992. Liquefaction Of Granular Soils With Non-Cohesive And Cohesive Fines. Proceedings Of The Tenth World Conference On Earthquake Engineering, Rotterdam, 1491-1496.
- Lee, K.L., and Fitton, J.A.**, 1969, Factors Affecting The Cyclic Loading Strength Of Soil, Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM STP 450, American Society for Testing and Materials, 71-95.
- Lee, K.L. and Seed, H.B.**, 1967, Cyclic Stres Conditions Causing Liquefactions on Sand, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 93(1), 47-70.
- Lee, K.L. and Albeisa, A.**, 1974, Earthquake Induced Settlements İn Saturated Sands. J. Geotech. Eng. ASCE 100:4, 387-406.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lee, K.L. and Focht, J.A.**, 1976, Strength Of Clay Subjected To Cyclic Loading, Marine Geotechnology, V.1, No.3, s. 165-185.
- Liang, L., Figueroa, J.L., Saada, A.S.**, 1995, Liquefaction Under Random Loading: A Unit Energy Approach. Journal Of Geotechnical Engineering, ASCE 121(11). 776-781.
- Liang, L.**, 1995, Development of An Energy Method for Evaluating The Liquefaction Potential of A Soil Deposit. Phd Dissertation, Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, OH.
- Liang, R.W., Bai, X.H. and Wang, J.C.**, 2000, Effect of Clay Particle Content on Liquefaction of Soil, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand; Bildiri No. 1560.
- Mert, M.**, 2018, Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Miura, S., Toki, S. and Tatsuoka, F.**, 1994, Cyclic Undrained Triaxial Behaviour of Sand by a Cooperative Test Program in Japan, Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM STP 1213, Editors; Ebelhar, R.J., Drenvich, V.P. and Kutter, B.L., American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, 246-260.
- Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F.**, 2006, Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitabevi, 3-98.
- Mulilis, J. P., Cha , C.K. and Seed, B.**, 1975, The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stres Strain Behavior of Sands, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 75-18, 1-138.
- Mulilis, J.P., Arulanandan, K., Mitchell, J.K., Chan, C.K. and Seed, H.B.**, 1977, Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103(2), s. 91-108.
- Mulilis, J. P., Townsend, F. C., and Horz, R. C.**, 1978, Triaxial Testing Techniques And Sand Liquefaction, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, 265-279.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nagase, H., Yasuda, S., Tsujino, S., Shinji, R. and Yanagihata, T.**, 1996, Liquefaction Strength Characteristics of Overconsolidated Sand Samples, Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Oxford.
- Nemat-Nasser S., Shokooh, A.A.**, 1979, Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand in Cyclic Shearing. Can Geotech J; 16(4), 659-678.
- Nicholson, P.G., and Kashyap, V.**, 1993, Fly Ash Stabilization of Tropical Hawaiian Soils, Fly Ash for Soil Improvement, Geot. Sp. Publ. No. 36., ASCE., 15-29.
- Nicholson, P.G. and Seed R.B.**, 1994, Injection-Correction for Compliance in Liquefaction Testing of Gravelly Soils, Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM STP 1213, Editors; Ebelhar, R.J., Drenvich, V.P. and Kutter, B.L., American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, 261-275.
- Ni, X., Ye, B., Cheng, Z., Ye, G.**, 2020, Evaluation Of The Effects Of Initial Deviatoric Stress And Cyclic Stress Amplitude On Liquefaction Potential Of Loose And Medium-Dense Sands: An Energy-Based Method, Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 136.
- Niu, Q.**, 2000, Time Effect on Liquefaction Potential of Silt Containing Various Amounts of Clay Particles, 12. th. World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Önalp, A. ve Arel, E.**, 2002, Siltlerin Sıvılaşma Yeteneği: Adapazarı Kriteri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özaydın, K.**, 2007, Zeminlerde Sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, s.232-239.
- Papadopolou, A. and Tika, T.**, 2008, The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands. Soils and Foundations, 48, 713–725, 2008.
- Perlea, V.G., Koester, J.P. and Prakash, S.**, 1999, How Liquefiable are Cohesive Soils?, Proc. Second Int Conf on Earthquake Geotechnical Engg., Vol. 2, Lisbon, Portugal. 611-618.
- PHRI**, 1977, Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A.A.Balkema, Rotterdam.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Polito, C.P.**, 1999, The Effects Of Non-Plastic And Plastic Fines On The Liquefaction Of Sandy Soils. Ph.D. Dissertation, Faculty Of The Virginia Polytechnic Institute And State University, Blacksburg, VA, 274 p.
- Polito, C. P. and Martin II, J.R.**, 2001, “Effects of Nonplastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127 (5): 408-415.
- Prakash, S., and Mathur, J. N.**, 1965, Liquefaction of Fine Sand Under Dynamic Loading, Proceedings of 5th Symposium of the Civil and Hydraulic Engineering Departments, Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Prakash, S., and Sandoval, J.A.**, 1992, Liquefaction of Low plasticity Silts, J. Soil Dyn, and Earthquake Engg., 71(7), 373-397.
- Prakash, S., and Sandoval, J.A.**, 2003, Liquefaction of Silts And Silt-Clay Mixtures, U.S.-Taiwan Workshop on Soil Liquefaction, Hsin-Chu, Taiwan on November 3 - 5.
- Puri, V. K.**, 1984, Liquefaction Behavior and Dynamic Properties of Loessial (Silty) Soils, Doktora Tezi, Missouri-Rolla Üniversitesi, 1984.
- Puri, V.K., Das, B.M., and Prakash, S.**, 1996, Liquefaction of Silty Soils, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 6, No.4., (ISSN 1053-5381), The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Sancio, R.B., Bray, J.D., Stewart, J.P., Youd, T.L., Durgunoğlu, H.T., Önalp, A., Seed, R.B., Christensen C., Baturay, M.B. and Karadayılar, T.**, 2002, Correlation Between Ground Failure and Soil Conditions in Adapazarı, Turkey, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 1093-1102.
- Sancio, B. R.**, 2003, Ground Failure And Building Performance Adapazarı, Turkey, Doktora Tezi, California Üniversitesi, Berkeley.
- Sandoval, S.J.**, 1989, Liquefaction and Settlement Characteristics of Silts Soils, Doktora Tezi, Missouri Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği.
- Seed, H. B. and Lee, K. L.**, 1966, Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 92 (SM6): 105-134.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Seed, H.B. and Idriss, I. M.**, 1967, Soil Liquefaction in the Niigata Earthquake, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.93, No.SM3, Proc. May, 83-108.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M.**, 1971, Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, J. Of GEOTECH. Engrg. Div., ASCE, 97(9) :1249-1273.
- Seed, H.B. and Peacock W.H.**, 1971, Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.97, No.8, 1099–1119.
- Seed, H.B.**, 1976, Evaluation Of Soil Liquefaction Effects On Level Ground During Earthquakes, State of the Art paper, symposium on soil Liquefaction , ASCE, Philadelphia, 1 –104.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R. M.**, 1984, The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/ EERC-84/15, University of California at Berkeley, October.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M.**, 1985, Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(12), 1425-1445.
- Seed R.B., Çetin K.Ö., Moss R.E.S., Kammerer A.M., Wu J., Pestana J.M., Riemer M.F., Sancio R.B, Bray J.D., Kayen R.E., and Faris A.**, 2003, Recent Advances İn Soil Liquefaction Engineering: A Unified And Consistent Framework. 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, California.
- Silver, M.L.**, 1977, Laboratory Triaxial Testing Procedures To Determine The Cyclic Strength Of Soils, NUREG-0031, National Technical Information Service, Springfield, VA.
- Singh, S.**, 1988, Liquefaction Criteria for Silts, Proceedings Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, August, Vol. III, 231-236.
- Siyahi, B., Erdik, M., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M.B. ve Akman, H.**, 2003, Sivilaşma ve Şev Stabilitesi Hassaslığı Ve Potansiyeli Haritaları: İstanbul Örneği Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul, 10 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sönmezer, Y.B.**, 2020, Comparison of Stress Control and Deformation Controlled Liquefaction Test in Silty Sand, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 7(1);322-337.
- Stamatopoulos, C., Stamatopoulos, A. and Kotzias, P.**, 1995, Effect of Prestress on the Liquefaction Potential of Silty Sands, Soil Dynamics and Earthquake Engineering VIII, Computational Mechanics Publications, 181-188.
- Strahler, A.N.**, 1974, Physical Geography. 4th Edition. John Willey and Sons Inc., New York, London, Sydney, Toronto.
- Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fuji, S.**, 1984, Effect of Sample Preparation Method on Cyclic Undrained Strength of Sand in Triaxial and Torsional Shear Tests, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, University of Tokyo, No.17, 29-62.
- Tatsuoka, F., Toki, S., Miura, S., Kato, H., Okamoto, M., Yamada, S., Yasuda, S. and Tanizawa, F.**, 1986, Some Factors Affecting Cyclic Undrained Triaxial Strength of Sand, Soils and Foundations, 26 (3): 99-116.
- THE ENGLISH-LANGUAGE INSTITUTE OF AMERICA, INC.**, 1971, The New Grolier Webster International Dictionary of the English Language.
- Thevanayagam**,1998, S. Effect of Fines and Confining Stress On Undrained Shear Strength Of Silty Sands. Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124, 479– 491.
- Toki, S., Tatsuoka, F., Miura, S., Yoshimi, Y., Yasuda, S. and Makihara, Y.**, 1986, Cyclic Undrained Strength of Sand by a Cooperative Test Program”, Soils and Foundations, 26 (3): 117–128.
- Tokimatsu, K. And Yoshimi, Y.**, 1983, Empirical correlation of soil Liquefaction Based in SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Japanaese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 23(4), 56-74.
- Tosun, H.**, 2002, Dolgu Baraj Depremselliği ve Tasarım Esasları, DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 45-74.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Troncoso, J., Ishihara, K. and Verdugo, R.**, 1988, Aging Effects on Cyclic Shear Strength of Tailings Materials, Proceedings Nith World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, August 2-9, Vol.III, 121-126.
- Troncoso, J.H.**, 1990, Failure Risks of Abandoned Tailings Dams” Proc. Int. Sym. On Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, International Commission on Large Dams, Paris, 82-89.
- Tsuchida, H.**, 1970, Prediction And Countermeasure Against Liquefaction İn Sand Deposits, Seminar Of The Port And Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Yokosuka, Japan, 3,33,1-3.
- Ulusay, R.**, 2000, Zemin Sıvılaşması, Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi, Sayı: 02, 47-54.
- Umehara, Y., Zen, K., and Hamada, K.**, 1985, Evaluation of soil liquefaction potentials in partially drained conditions, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 2, pp. 57-72.
- Ural, N.**, 2008, İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wang W.**, 1979, Some findings in soil liquefaction engineering. Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China.
- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K.T.**, 1994, Siting in Earthquake Zones, Balkema, Rotterdam, 115, 433-446.
- Wiegel, R.L.**, 1970, Earthquake Engineering, Prentice Hall Inc., Englewood New Jersey.
- Wu, J. ve Seed, R.B.**, 2004, Estimating of Liquefaction-İnduced Ground Settlement (case studies). Proceedings, Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Paper 3,09, New York.
- Xenaki, V. C., and Athanasopoulos, G. A.**, 2003, Liquefaction Resistance Of Sand-Silt Mixtures: An Experimental İvestigation Of The Effect Of Fines, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 183-194.
- Yenigün, Ş.**, 2018, Sismik Sıvılaşma Deney Numuneleri İçin Otomatik Huni Tasarımı Ve Deney Sonuçlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yılmaz, Y.**, 2006, Değişik Gradasyonlu Kumların Dinamik Üç Eksenli Deneyi ile Tespit Edilen Sıvılaşma Dirençleri ile Geleneksel Direkt Kesme ve Hidrolik İletkenlik Deney Bulgularının İlişkilendirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y.**, 1984, Undrained Cycl Shear Strength of a Dense Niigata Sand, Soils and Foundations, 24 (4): 131–145.
- Youd, T. L., and Hoose, S. N.**, 1977, Liquefaction Susceptibility And Geologic Setting, Proc., 6th World Conf. on Earthquake Eng. Vol.3, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 2189–2194.
- Youd, T.L., and Perkins, D.M.**, 1978, Mapping Of Liquefaction Induced Ground Failure Potential, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 104(4), 433–446.
- Youd, T.L.**, 1984, Recurrence of Liquefaction at the Same Site, Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco USA, 3, 231–238, July 21- 28.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn. W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcusson, W. F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H.**, 2001, Liquefaction Resistance Of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops On Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, J. Of Geotech. and Geoenvr. Engrg., ASCE, 817-833.

ÖZGEÇMİŞ

Furkan KUNDUZCU, İlköğretimi ve ortaöğretimi Bursa’da tamamladı. Liseyi Bilecik’te yatılı olarak tamamladıktan sonra 2013 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne başladı ve 2018 yılında tamamladı. Aynı yıl Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalında Yüksek lisansa başladı ve 2021 yılında mezun olma durumu vardır. İyi-orta derecede İngilizce bilmektedir. Eğitim hayatı boyunca tiyatro ve Türk halk danslarıyla ilgilenmiştir.

