



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜLLERİN KUMLU ZEMİNLERİN
SIVILAŞMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ

Murat EYİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Mart-2023
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜLLERİN KUMLU ZEMİNLERİN
SIVILAŞMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ

Murat EYİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdülhakim ZEYBEK

Mart-2023
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Murat EYİN tarafından hazırlanan “UÇUCU KÜLLERİN KUMLU ZEMİNLERİN SIVILAŞMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ” adlı tez çalışması .../03/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Unvanı Adı SOYADI

Üniversitesi, Fakülte, Bölüm

Danışman

Unvanı Adı SOYADI

Üniversitesi, Fakülte, Bölüm

Üye

Unvanı Adı SOYADI

Üniversitesi, Fakülte, Bölüm

Üye

Unvanı Adı SOYADI

Üniversitesi, Fakülte, Bölüm

Üye

Unvanı Adı SOYADI

Üniversitesi, Fakülte, Bölüm

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu/...../..... Tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

.....
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Muş Alparslan Üniversitesi tarafından BAP-22-MMF-4902-05 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Murat EYİN

Tarih:

ÖZET

UÇUCU KÜLLERİN KUMLU ZEMİNLERİN SIVILAŞMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Murat EYİN

**Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdülhakim ZEYBEK

Sanayileşme ve kentleşme, enerji ve hammaddeler için artan tüketici talebini artırarak, dünya çapında her yıl büyük miktarda endüstriyel atığın ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Uçucu kül, en yaygın endüstriyel atık türleri arasındadır. Termik santrallerde kömürün yakılması ile oluşan ve genellikle santral dışında depolanan uçucu kül atığı tüm dünyada ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Uçucu küllerin farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında zemin güçlendirici malzeme olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir kalkınma için oldukça önemlidir ve büyüyen çevre sorunlarına uygulanabilir bir çözüm sağlayabilir. Uçucu küllerin kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonu ve temel mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri hakkında birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen bu tür atık malzemelerin temiz kumların sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışma sayısı oldukça az sayıdadır. Uçucu küllerin özellikle tektonik hareketlerin yoğun olduğu bölgelerde inşaat mühendisliği uygulamalarında daha etkin ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi için bu alanda daha fazla araştırma-geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Türkiye'de faaliyet gösteren Seyitömer termik santralinden F sınıfı uçucu kül temin edilmiştir. %0-40 oranında uçucu kül içeren kum-uçucu kül karışımları kullanılarak gevşek ve orta sıkılıkta üç eksenli numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin sıvılaşma özellikleri, 30 adet gerilme kontrollü konsolidasyonlu drenajsız dinamik üç eksenli deneyler ile belirlenmiştir. Testler, iki farklı efektif çevre basıncında (50 ve 100 kPa) ve 1 Hz yükleme frekansına sahip tekrarlı yükler altında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının ayrıntılı analizi, benzer relatif sıkılığa sahip kum-uçucu kül numunelerinin sıvılaşma direncinin, karışımdaki uçucu kül içeriğinin %20'ye kadar artması ile azaldığını, ardından %40'a ulaşana kadar hafifçe arttığını göstermiştir. Sadece kum içeren numuneler, uçucu küllü kum numunelerine göre daha yüksek sıvılaşma direncine sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile uçucu külün geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında kullanımının avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ve ilgili konunun gelişimine katkıda bulunulması beklenmektedir.

2023, 75 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Deprem, Kum, Sıvılaşma, Uçucu Kül, Dinamik Üç Eksenli Test.

ABSTRACT

INFLUENCE OF FLY ASH ON THE LIQUEFACTION BEHAVIOR OF SANDY SOILS

Murat EYİN

**Muş Alparslan University
Natural and Applied Science
Department of Nuclear Energy and Energy Systems**

Advisor: Assist. Prof. Abdülhakim ZEYBEK

Industrialization and urbanization promote increasing consumer demand for energy and raw materials, producing a huge amount of industrial waste around the world annually. Fly ash is among the most common types of industrial waste. It is the byproduct of coal-fired thermal power plants and is usually stored outside the power plants, causing serious environmental concerns all around the world. The reuse of fly ash as soil-reinforcing material in different civil engineering applications is promising for sustainable development and may provide a viable solution to growing environmental problems associated with their disposal. Although there are various studies conducted to examine the effects of fly ash on the stabilization and basic engineering properties of cohesive soils, only a few relevant experimental studies exist on the effects of fly ash on the liquefaction characteristics of saturated clean sands. Further studies are needed in this area, so that fly ash can be used more effectively and reliably in civil engineering applications, especially in seismically active regions. In this study, Class-F fly ash was collected from the Seyitömer thermal power plant in Turkey. Loose and medium-dense triaxial specimens were prepared using sand-fly ash mixtures containing 0-40% of fly ash. The liquefaction characteristics of the specimens were examined through a series of 30 stress-controlled undrained dynamic triaxial tests. The tests were conducted at 1 Hz loading frequency and under initial effective confining stresses of 50 and 100 kPa. The detained analysis of experimental results showed that at a similar relative density, the liquefaction resistance of the sand-fly ash specimens decreased as the fly ash content increased up to about 20%, then slightly increased until the fly ash content reached 40%. Sand-only specimens showed greater liquefaction resistance than sand-fly ash specimens. The findings presented in this study are expected to contribute to the development of this research topic subject, providing useful insights into the advantages and disadvantages of the use of fly ash in geotechnical earthquake engineering applications.

2023, 75 Pages

Keywords: Earthquake, Sand, Liquefaction, Fly Ash, Dynamic Triaxial Testing.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca desteği, ilgisi ve sabrı ile benden yardımlarını hiç esirgemeyen, her zaman yol gösteren ve moral veren, kıymetli zamanını ayıran, çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdülhakim ZEYBEK'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca, benden maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen sevgili aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Murat EYİN
MUŞ-2023



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Gerekçesi	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1 Zemin Sıvılaşması.....	6
2.1.1 Sıvılaşma Kavramı ve Boşluk Suyu Oluşum Mekanizması	6
2.1.2 Sıvılaşmanın Tanımı ve Mekanizması.....	7
2.1.3 Sıvılaşmanın Etkileri.....	10
2.1.4 Zeminlerin Sıvılaşabilirliği ve Etki Eden Faktörler.....	11
2.1.4.1 İnce Danelerin Zeminlerin Sıvılaşma Davranışı Üzerindeki Etkisi.....	13
2.1.5 Sıvılaşma İyileştirme Yöntemleri	17
2.2 Uçucu Küller.....	19
2.2.1 Genel Bilgiler.....	19
2.2.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	20
2.2.3 Uçucu Küllerin Özellikleri.....	20
2.2.3.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	21
2.2.3.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri ve Yapıları	21
2.2.3.3 Türkiye’deki Uçucu Küller	22
2.2.4 Uçucu Küllerin Kullanımı	22
2.2.4.1 Uçucu Küllerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	23
2.2.4.2 Uçucu Küllerin Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı.....	24
2.2.5 Uçucu Küllerin Zeminlerin Sıvılaşma Davranışı Üzerindeki Etkileri	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM	27
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Temel Fiziksel-Kimyasal Özellikleri.....	27
3.1.1 Kum	28
3.1.2 Uçucu Kül	29
3.1.3 Kum ve Uçucu Kül Karışımı	30
3.2 Dinamik Üç Eksenli Testler.....	32
3.2.1 Dinamik Üç Eksenli Testlerin Temel Prensibi ve İlkeleri	33
3.2.2 Dinamik Üç Eksenli Test Sistemi	35

3.2.3 Dinamik Üç Eksenli Deney Yöntemi Esasları.....	39
3.2.3.1 Numune Hazırlama	39
3.2.4 Test Programı ve Detayları	45
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	47
4.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Sıvılaşma Davranışı	47
4.2 Uçucu Kül İçeriği Etkisi	48
4.2.1 Uçucu Kül İçeriğinin Boşluk Suyu Basıncı Gelişimi Üzerindeki Etkisi	48
4.2.2 Uçucu Kül İçeriğinin Sıvılaşma Dayanımı Üzerindeki Etkisi	49
4.3 Relatif Sıkılık Etkisi.....	50
4.4 Efektif Çevre Basıncı Etkisi	51
4.5 Deneysel Sonuçların Mevcut Çalışmalar ile Karşılaştırılması	53
4.6 Deneysel Sonuçların Farklı Boşluk Suyu Basıncı Modelleri ile Karşılaştırılması	55
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	61
5.1 Sonuçlar	61
5.2 Öneriler.....	63
KAYNAKLAR	64

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

B	: Skempton'ın Boşluk Suyu Basıncı (Doygunluk) Parametresi
C_c	: Derecelenme Katsayısı
C_u	: Üniform (Düzgünlük) Katsayısı
D_r	: Relatif Sıkılık
D_{10}	: Kumun Etkin Dane Boyutu
D_{50}	: Kumun Ortalama Dane Boyutu
e	: Boşluk Oranı
e_f	: İnterfine Boşluk Oranı
e_{max}	: Maximum Boşluk Oranı
e_{min}	: Minimum Boşluk Oranı
e_s	: İntergranüler Boşluk Oranı
G_s	: Özgül Ağırlık
Hz	: Çalışma Frekansı
kN	: Kilo Newton
kPa	: Kilo Pascal
LL, W_L	: Likit Limit
μm	: Mikrometre
N	: Çevrim Sayısı
N_{liq}	: Sıvılaşma İçin Gerekli Çevrim Sayısı
PI, I_p	: Plastisite İndisi
PL, W_p	: Plastik Limit
r_u	: Boşluk Suyu Basıncı Oranı
σ'	: Efektif Gerilme
σ_c	: Toplam Çevre Basıncı
σ'_c	: (Başlangıç) Efektif Çevre Basıncı
σ_{dl}	: Tekrarlı Eksenel Gerilme
σ_3	: Hücre Basıncı
τ	: Tekrarlı Kayma Gerilmesi
u	: Boşluk Suyu Basıncı
u_e	: (Aşırı) Boşluk Suyu Basıncı
u_0	: Ters Basınç
$W_{uçucu\ küll}$	: Uçucu Külün Kuru Ağırlığı
W_{kum}	: Kumun Kuru Ağırlığı
W_n	: Doğal Su Muhtevası

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CBR	: California Taşıma Oranı
CO_2	: Karbondioksit Gazı
CPT	: Konik Penetrasyon Deneyi
CSR	: Tekrarlı (Dinamik) Gerilme Oranı
FC	: İnce Dane Yüzdesi (Oranı)
FC_{th}	: Kritik (Sınır) İnce Dane Yüzdesi
LRR	: Sıvılaşma Dayanım Oranı

<i>SP</i>	: Kötü Derecelenmiş Kum
<i>SPT</i>	: Standart Penetrasyon Deneyi
<i>SSL</i>	: Kararlı Durum Çizgisi
<i>UK</i>	: Uçucu Kül Yüzdesi (Oranı)
<i>UK_c</i>	: Kritik (Sınır) Uçucu Kül Yüzdesi
<i>USCS</i>	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Kocaeli-Türkiye (1999), Maule-Şili (2010), Tohoku-Japonya (2011), Christchurch-Yeni Zelanda (2011) ve Kahramanmaraş-Türkiye (2023) depremlerinde görülen tipik sıvılaşma kaynaklı bina hasarları.....	3
Şekil 2.1 Dinamik yükleme öncesinde, sırasında ve sonrasında doygun kumun dane dizilimleri (Ural, 2008)	7
Şekil 2.2 17 Ağustos depreminde Adapazarı'nda gözlemlenen sıvılaşma kaynaklı hasarlar (Selçuk, 2009).....	10
Şekil 2.3 Sıvılaşabilir kumlarda dane dağılımı (Tsuchida, 1970).....	12
Şekil 2.4 Kum ve ince danelerin mikro yapısı ve sınıflandırılması (Thevanayagam, 2007).....	16
Şekil 2.5 Termik santral dışında depolanan uçucu kül yığınları (Şahin, 2010).....	19
Şekil 2.6 İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları ve oranları (Kaçmaz, 2019).....	24
Şekil 2.7 Farklı oranlarda uçucu kül içeren kumlu zeminlerin farklı efektif çevre basıncı altındaki (ön/başlangıç) sıvılaşma dirençleri (Kolay ve ark., 2019).....	26
Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan temiz kum ve Seyitömer uçucu külüne ait dane çapı dağılım eğrileri ve Tsuchida (1970) tarafından önerilmiş olan sıvılaşma eğrileri ile karşılaştırılmaları.....	27
Şekil 3.2 Elek analizi ile kumun dane çapı dağılımının ve piknometre yöntemi ile özgül ağırlık belirlenmesi.....	28
Şekil 3.3 Uçucu külün mikro yapısını gösteren SEM görüntüleri.....	30
Şekil 3.4 Minimum boşluk oranının bulunması.....	31
Şekil 3.5 Minimum boşluk oranı ve maksimum boşluk oranının kum-uçucu kül karışımındaki uçucu kül yüzdesine bağlı olarak değişimi.....	32
Şekil 3.6 (a) Arazideki zeminlerde sismik gerilme durumu ve (b) izotropik olarak konsolide edilmiş zemin örneğinin tekrarlı üç eksenli deney sırasındaki gerilme durumu (Karakan, 2015).....	34
Şekil 3.7 Tekrarlı üç eksenli deney sırasındaki Mohr gerilme daireleri (Karakan, 2015).....	34
Şekil 3.8 Muş Alparslan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı. Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zemin Mekanik Laboratuvarında bulunan dinamik üç eksenli test sisteminin genel görünüşü.....	35
Şekil 3.9 Üç eksenli deney hücresinin görünümü.....	37
Şekil 3.10 Hava ve su kontrol birimlerinin genel görünümü.....	37
Şekil 3.11 Alt ve üst başlık ile numune hazırlama aparatlarının genel görünümü.....	38
Şekil 3.12 Farklı oranlarda uçucu kül karışımlarının elde edilmesi.....	40
Şekil 3.13 Üç eksenli test numunelerinin deneye hazırlanması ve hazırlanmış numune örneğinin son hali.....	41

Şekil 3.14 Karbondioksit ve havası alınmış su ile yıkanan numune örneğinin görünümü.....	42
Şekil 3.15 Belirli bir uçucu kül yüzdesine sahip kumlu zemin örneğinin dinamik test sırasındaki ve sonrasındaki görünümü.....	44
Şekil 4.1 Temiz kum örneğinin tekrarlı yükler altındaki tipik dinamik davranışı: boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi ve deviatör gerilme-ortalama efektif gerilme ilişkisi.....	48
Şekil 4.2 Uçucu kül içeriğinin boşluk suyu basıncı gelişimi üzerindeki etkisi: boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ve sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi.....	49
Şekil 4.3 Uçucu kül içeriğinin kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımı üzerindeki etkisi: dinamik mukavemet eğrileri ve sıvılaşma dayanımı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi.....	50
Şekil 4.4 Relatif sıklığın zeminlerin dinamik davranışı üzerindeki etkisi: boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ve dinamik mukavemet eğrileri.....	51
Şekil 4.5 Efektif çevre basıncının zeminlerin dinamik davranışı üzerindeki etkisi: boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ve dinamik mukavemet eğrileri.....	52
Şekil 4.6 Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması: sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi.....	54
Şekil 4.7 Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması: sıvılaşma dayanımı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi.....	55
Şekil 4.8 Temiz kum numuneleri için boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı oranı ilişkisi ve sonuçların farklı boşluk suyu basıncı modelleri ile karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.9 Uçucu kül içeren kum numuneleri için boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı oranı ilişkisi ve sonuçların farklı boşluk suyu basıncı modelleri ile karşılaştırılması.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 ASTM C 618'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları (Erşan, 1996).....	20
Çizelge 2.2 ASTM C 618'e göre sınıflandırılan uçucu küllerin kimyasal yapıları (Erşan, 1996).....	21
Çizelge 2.3 Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Aruntaş, 2006).....	22
Çizelge 3.1 Kumun fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 3.2 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (Türker ve ark., 2009).....	29
Çizelge 3.3 Farklı uçucu kül yüzdesinde hazırlanan kum-uçucu kül karışımları için hesaplanan özgül ağırlık, minimum boşluk oranı ve maksimum boşluk oranı değerleri.....	32
Çizelge 3.4 Saf kum ve kum-uçucu kül karışımları üzerinde yürütülen dinamik üç eksenli deneylerin relatif sıkılık, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme koşulları gibi genel özellikleri ve tipik deneysel sonuçlar.....	46
Çizelge 4.1 Gerilme tabanlı boşluk suyu basıncı modelleri.....	57

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Gerekçesi

Deprem veya yüksek frekansa sahip tekrarlı yükler altında meydana gelen zemin sıvılaşması, geoteknik deprem mühendisliğinde karşılaşılan en önemli ve karmaşık problemlerden bir tanesidir. Alaska-ABD (1964), Niigata-Japonya (1964), Kocaeli-Türkiye (1999), Maule-Şili (2010), Tohoku-Japonya (2011), Christchurch-Yeni Zelanda (2011), Palu-Endonezya (2018) ve Kahramanmaraş-Türkiye (2023) gibi geçmişte ve yakın zamanda meydana gelmiş orta veya yüksek şiddetli depremler zemin sıvılaşmanın zararlı etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Bu depremlerde, suya doymun kumlu zeminler üzerine kurulan yapılarda sıvılaşma kaynaklı taşıma gücü kaybı, kısmi veya toptan göçmeler, aşırı oturmalar, kalıcı yanal ötelenmeler ve/veya dönmeler, gömülü inşaat mühendisliği yapıların zemin yüzeyine çıkması, zemin yüzeyinde meydana gelen kum konileri gibi birçok orta ve ağır dereceli hasarların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu da ciddi insani ve ekonomik kayıpların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Şekil 1.1 deprem sonrası temel altındaki zeminin sıvılaştığını ve akabinde yapıların yapısal bütünlüğünün bozulmadan oturma veya rotasyonlara maruz kalıp devrildiğini göstermektedir. Söz konusu yapıların her ne kadar yapısal bütünlüğü bozulmasa da artık kullanılmaz hale gelip yıkılması gerekmektedir. Bu tür hasar yapıların doymun olan kumlu zemin üzerine herhangi bir iyileştirme yöntemi kullanılmadan ve potansiyel sıvılaşma riskine karşı gerekli önlemler alınmadan inşa edildiğini göstermektedir. Dünya çapında sismik olarak aktif olan birçok bölgede suya doymun kumlu zeminler üzerine inşa edilmiş veya inşa edilmeyi bekleyen birçok yapı stokları mevcuttur. Gelecekte meydana gelebilecek olan depremler sonrasında sıvılaşma olayının bu tür yapılara zarar vermesini önlemek amacıyla uygun maliyetli, uygulanabilir ve çevre dostu sıvılaşma iyileştirme yöntemlerinin kullanılması büyük önem arz etmektedir.

Geoteknik ve inşaat mühendisleri uzun yıllar boyunca sıvılaşma kaynaklı hasarları azaltmada kullanılabilecek zemin iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine farklı türlerde araştırmalar yapmışlardır. 1964 depremlerinden bu yana, sığ temelli konut binalarından nükleer enerji tesislerine kadar farklı inşaat mühendisliği yapılarında kullanılabilecek çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Mühendislik uygulamalarında, uygun zemin iyileştirme yönteminin seçiminde ve tasarımıyla genellikle uygulanabilirlik, etkinlik veya maliyet-fayda oranı dikkate

alınmakta ve tercih edilen yöntemin mevcut yapılar ve çevre üzerindeki zararlı etkileri genellikle göz ardı edilmektedir. Birçok geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulamasında, çevreye zarar verebilecek sentetik malzemeler (örnek; kimyasal harçlar) kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda artan çevresel kaygılar nedeniyle ekonomik ve sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesi ve kullanılması zorunlu hale gelmiştir.

Dünya nüfusunun hızla artması ve endüstriyel gelişmelere bağlı olarak enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu talebi karşılamada termik santrallerden önemli ölçüde yararlanılmaktadır. Termik santrallerde taş kömürü veya linyitin yakılması sonucu her yıl milyonlarca ton uçucu kül atığı ortaya çıkmaktadır. Santral dışında karalarda ve havuzlarda biriktirilen bu tür atıkların sadece bir kısmı değerlendirilmekte ve bu da ciddi çevre kirliliğine neden olmaktadır. En yaygın endüstriyel atık türleri arasında yer alan uçucu küllerin geri dönüştürülerek zemin iyileştirici malzeme olarak farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması, sürdürülebilir kalkınma için önem arz etmekte ve büyüyen çevre sorunlarına uygulanabilir bir çözüm sunabilmektedir.

Uçucu küller, yol, sedde, bent, baraj inşaatı, maden, destek, duvar arkası dolgusu, zemin stabilizasyonu gibi birçok geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanım alanına sahiptir. Çok sayıda araştırmacı, farklı yükleme koşulları altında uçucu kül ile takviye edilmiş kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini ve çevrimsel mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmalar, uçucu küllerin zemin özelliklerini iyileştirmede sürdürülebilir ve uygun maliyetli çözümler sunabileceği göstermiştir. Özellikle yüksek kil içeriğine sahip kohezyonlu zeminlerin California Taşıma Oranı (*CBR*), serbest basınç dayanımı, kayma dayanımı ve esneklik modülünün uçucu kül ilavesiyle arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında, bu tür zeminlerde taşıma gücü yetersizliği, oturma ve şişme problemlerinin uçucu kül katkısı ile önemli derecede azaltılabileceği tespit edilmiştir.

Uçucu küllerin kil gibi kohezyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri üzerine literatürde birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen uçucu küllerin kumlu zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışma sayısı oldukça az sayıdadır. Özellikle uçucu kül ilavesinin kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışını ne yönde etkilediği önemli bir araştırma konusudur ve literatürde bu konuda yapılmış olan az sayıdaki çalışmalar kendi aralarında tartışmalı farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Mevcut literatürdeki konu ile alakalı çelişkilerin giderilmesi ve gelecekte bu alanda yapılacak olan çalışmalara ışık tutması adına daha fazla araştırma çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca deprem riski taşıyan

bölgelerdeki inşaat mühendisliği uygulamalarında bu tür atık malzemelerin daha etkin ve yaygın şekilde kullanımını sağlamak için bu yöntemin avantajları ve dezavantajlarının açıkça ortaya konulması ve literatürde konuya ilişkin eksik veya tartışmalı olan hususlar dikkate alınarak kapsamlı çalışmaların yapılması gerekmektedir.



Şekil 1.1. Kocaeli-Türkiye (1999), Maule-Şili (2010), Tohoku-Japonya (2011), Christchurch-Yeni Zelanda (2011) ve Kahramanmaraş-Türkiye (2023) depremlerinde görülen tipik sıvılaşma kaynaklı bina hasarları

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

1964 Niigata-Japonya depremi sonrası elde edilen gözlemlere dayanarak sıvılaşma olayının sadece suya doymun kumlu (saf kum) zeminlerde meydana geldiği düşünülmüş olsada sonraki depremler silt veya kil gibi ince dane içeren kumlu zeminlerinde sıvılaşabildiğini göstermiştir. Özellikle 1990'lardan bu yana ince dane miktarının, türünün, aktivitesinin ve plastisitesinin doymuş kumların sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

F Sınıfı uçucu küller, hafif, plastik olmayan ince daneli, tipik olarak silt boyutundaki parçacıklardan oluşur. Literatürde plastik olmayan veya düşük plastisiteli silt içeren kumların dinamik davranışı üzerine çok çeşitli araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, kum-uçucu kül karışımları üzerinde yalnızca birkaç ilgili deneysel çalışma mevcuttur ve bu veriler birbiriyle çelişmektedir. Arazide, kumlu zeminlerin farklı türde ince dane içerdiği düşünüldüğünde, uçucu kül ilavesinin kumun sıvılaşma direncini nasıl etkilediği ve uçucu külün kumla karıştırıldığında plastik olmayan silt gibi davranıp davranmadığı sorusunu cevap bulmak için daha fazla laboratuvar çalışmasına ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışması kapsamında, Türkiye'de Kütahya ilinde faaliyet gösteren Seyitömer termik santralden temin edilen F sınıfı uçucu kül ile Çanakkale bölgesinden elde edilen Podima temiz kumu ağırlıkça farklı yüzdelerde karıştırılarak üniform ve homojen kum-uçucu kül karışımları elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlar kullanılarak, iki farklı farklı relatif sıklıkta (%40 ve %55) yeniden oluşturulmuş üç eksenli test numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler iki farklı efektif gerilme veya efektif çevre basıncı (50 ve 100 kPa) altında gerilme kontrollü tekrarlı yüklere maruz bırakılarak uçucu kül atığının kumlu zeminlerin izotropik ve drenajsız ortamda boşluk suyu basıncı oluşumu ve sıvılaşma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deney verilerinin ayrıntılı analizi ile endüstriyel bir atık olan uçucu külün geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında kullanımının avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ve bu konunun gelişimine katkıda bulunulması beklenmektedir.

Bu tezin ikinci bölümünde uçucu küllerin tanımı, sınıflandırılması, özellikleri, uygulama alanları, zemin sıvılaşmasının tanımı, oluşumu, etkileri ve son olarak uçucu kül katkılı kumlu zeminlerin statik ve dinamik yükleme altında davranışı hakkında literatür araştırmasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde deneylerde kullanılan malzemeler ve özellikleri, kullanılan dinamik üç eksenli deney aletinin genel özellikleri, dinamik üç eksenli testlerin genel prensipleri ve ilkeleri, uçucu kül karışımlarının hazırlanması ve temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, üç eksenli numunelerin hazırlanması ve deneye tabi tutulması, yükleme ve konsolidasyon koşullarını içeren deney programı ve detayları gibi hususlar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde değişik uçucu kül içeriğine sahip kumlu zeminlerin boşluk suyu basıncı davranış özellikleri ve uçucu kül katkısının kumlu zeminlerin sıvılaşma direnci üzerindeki etkileri farklı genliğe sahip tekrarlı yükler altında incelenmiştir. Relatif sıkılık ve efektif çevre basıncı gibi deney parametrelerinin zemin davranışı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar geçmişte yapılmış benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci ve son bölümde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin analiz edilmesi ile elde edilen sonuçlar verilmiş ve ileride yapılacak çalışmalara yönelik öneriler verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, ilk olarak zemin sıvılaşmasının tanımı, oluşumu, yapılar üzerindeki etkileri, zemin sıvılaşmasına etki eden faktörler ve özellikle ince dane miktarının kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkileri üzerine geçmişte yapılmış çalışmalardan bir kesit sunulmuştur. Daha sonra uçucu küller hakkında genel bilgiler verilmiş, uçucu küllerin genel özellikleri, geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı alanları hakkında kısa bir literatür özeti verilmiştir. Son kısımda, uçucu küllerin zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerine dair yapılmış önceki çalışmalar ve bu konudaki metodolojik sorunlara ve araştırmalardaki eksiklere vurgu yapılmıştır.

2.1 Zemin Sıvılaşması

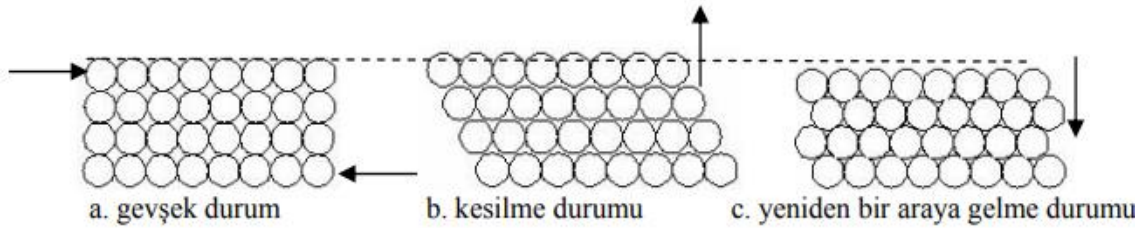
2.1.1 Sıvılaşma Kavramı ve Boşluk Suyu Oluşum Mekanizması

Latince kaynaklı olup yumuşamak, erimek veya zayıflamak manasına gelen “*Liquefacere*” kelimesinin granüler zeminlerde ani sismik yüklemeler esnasında meydana gelen direnç kaybı olarak tanımlanan genel bir terimdir. Sözlükte akıcı olma hali, sıvının davranış biçimi veya erime gösterim durumu olarak açıklanmaktadır (Polito, 1999).

Kum gibi kohezyonsuz zeminler deprem veya benzeri herhangi bir dinamik yük altında bulunduklarından daha sıkı duruma geçme ve hacimsel olarak sıkışma eğilimi göstermektedirler. Suyu doygun olmaları durumunda, zemin daneleri arasındaki boşluklarda bulunan boşluk suyu hacimdeki bu azalmaya engel olmaktadır. Gerek suyun sıkışma özelliğinin düşük olması gerekse de yükleme çevrimlerinin çok hızlı olmasından dolayı boşluk suyu dışarı çıkamamakta yani drene olamamakta ve bunun sonucunda boşluk suyu basıncı çok hızlı bir şekilde artma eğilimine girmektedir. Artan boşluk suyu basıncı ile efektif gerilme (σ') sıfıra düşmekte, daneler birbirinden ayrılmaya çalışmakta ve sonuçta zemin daneleri su içinde askıda kalacağından ortam sıvı malzemeler gibi davranmaya başlamaktadır. Sıvılaşma sonucunda zeminin kaymaya karşı gösterdiği direnç yok olmaktadır.

Deprem gibi dinamik/sismik yükleme öncesinde, sırasında ve sonrasında doygun kumun dane dizilimleri şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1 (a)’da suya doygun gevşek kumun deprem öncesi dane dizilim şekli gösterilmiştir. Şekil 2.1 (b)’de deprem afeti esnasında depremden gelen kesme kuvvetinin etkisi ile daneler arasındaki gerilmeler sonucunda daneler arası yüzey temaslarının kaybolduğu görülmektedir. Bu aşamaya

kadar danelerin birbirine teması ile aktarılan gerilmeler bundan sonra su tarafından karşılanmaktadır. Sıvılaşma olarak adlandırılan bu aşamada kayma direnci sıfır olan su, zemin içindeki gerilmeleri karşılayamaz duruma geldiğinden ortamın birim hacim ağırlığının doygun zemininkine denk bir sıvıya dönüşmektedir. Şekil 2.1 (c)'de ise, depremden gelen kesme kuvvetinin durmasından sonra zemin tekrar dengeye gelmekte fakat yüzeyde önemli oturmalar oluşmaktadır. Bu boy değişiminin dışarıya sızan suyun hacmine eşdeğerdir (Ural, 2008).



Şekil 2.1. Dinamik yükleme öncesinde, sırasında ve sonrasında doygun kumun dane dizilimleri (Ural, 2008)

2.1.2 Sıvılaşmanın Tanımı ve Mekanizması

Zemin sıvılaşması ilk olarak 1906 yılında San Francisco depremi sonrası geoteknik mühendisliğinin kapsamına girmiştir. 1920'li yıllarda Kaliforniya'da bulunan Calavera barajının gövdesinde meydana gelen deprem kaynaklı deformasyonları tanımlamak adına sıvılaşma tabiri kullanılmıştır (Hazen, 1920). Yine benzer şekilde Mogami ve Kubo (1953) kohezyonsuz zeminlerin drenajsız ortamda dengesiz ve tekrarlı örselenmeden kaynaklı maruz kaldığı şekil değiştirmeleri açıklamak için sıvılaşma terimini kullanmışlardır. 1964 yılında Niigata ve Alaska depremlerinde görülen zemin sıvılaşmasına bağlı ciddi problemler sonrası bu konu geoteknik mühendisliğinin en önemli çalışma alanlarından biri haline gelmiş ve bilimsel olarak ele alınmaya başlanmıştır (Seed ve Idriss, 1967). Yıllar içinde sıvılaşma konusu üzerinde yapılan çalışmalar birçok farklı tanımlamanın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Zemin sıvılaşması için yapılan birçok tanımlama kumların drenajsız ortamda tekrarlı yükleme koşullarındaki davranışını esas almıştır. Bu kısımda, zemin sıvılaşması ile alakalı mevcut tanımların ve kriterlerin yalnızca bazıları verilmiştir.

Casagrande (1936) kumlar üzerinde yük kontrollü ve drenajlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş ve sıvılaşmayı açıklamak adına kritik boşluk oranı tabirini kullanmıştır. Drenajlı olarak kesilen kumlarda kesme sırasında kritik boşluk oranı çizgisi altındaki zeminlerin hacimsel genişleme ve üzerindeki zeminlerin hacimsel sıkışma gösterdiği ve oluşan hacim değişimlerinin çevre basıncı ve kumun sıklık derecesi ile

yakından alakalı olduğu belirtilmiştir. Kritik boşluk oranı konseptine göre, kritik boşluk oranından yüksek boşluk oranına sahip zeminlerin drenajsız kayma gerilmeleri altında sıvılaşacağı, kritik boşluk oranından daha sıkı olan kumların ise sıvılaşmayacağına göstermiştir. Ancak sonraki çalışmalar bu yaklaşımın doğru olmadığını ortaya koymuştur.

Seed and Lee (1966) belirli bir çevre basıncında konsolide edilmiş suya doymun temiz kum numuneleri üzerinde drenajsız koşullarda tekrarlı üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Gevşek ve sıkı halde bulunan kumlu zeminlerin davranışını açıklamak için başlangıç sıvılaşması veya ön sıvılaşma (initial liquefaction), gerçek sıvılaşma (full liquefaction) ve sınırlı ön sıvılaşma veya çevrimsel sıvılaşma (cyclic liquefaction) terimlerini kullanmıştır. Ön sıvılaşma tekrarlı yükleme sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının (u_e) artarak yükleme çevrimi sonunda başlangıç efektif çevre basıncı (σ'_c) değerine ulaşması durumu olarak tanımlanmıştır. Bir başka ifade ile boşluk suyu basıncının (u) çevre basıncına (σ_c) eşit olması durumudur. Ön sıvılaşma durumunda boşluk suyu basıncı oranı 1 ($r_u = \frac{u_e}{\sigma'_c} = 1$) olmaktadır. Gerçek sıvılaşma, artan boşluk suyu basıncı ile efektif gerilmelerin sıfır değerine yaklaşması ve bu değerde korunması, zeminin kayma mukavemetinin büyük oranda kaybolması ve büyük şekil değişimleri ve akmalara maruz kaldığı durum olarak tanımlanmıştır. Çevrimsel sıvılaşma belirli bir yükleme çevrimi sonunda ön sıvılaşmaya maruz kalan zeminlerin ileriki yükleme çevrimlerinde hala belli bir dirence sahip olması veya hacimsel genleşmeden dolayı boşluk suyu basıncının düşmesi ile deformasyonların sınırlı kalması durumudur. Literatürde (örnek; Seed and Lee, 1966; Seed ve Idriss, 1967) hacimsel sıkışmaya yatkın olan gevşek kumlarda ön sıvılaşmadan hemen sonra gerçek sıvılaşma görülebileceği ancak hacimsel genleşmeye yatkın olan orta ve çok sıkı durumdaki kumlarda ön sıvılaşmadan sonra çevrimsel sıvılaşma görülebileceği belirtilmiştir. Ishihara (1993) sıvılaşma başlangıcını değişen sıklığa sahip olan farklı türde zeminler (temiz kum-ince dane içeren kum) için boşluk suyu basıncının %100 değerine ulaştığı ve buna ek olarak eksenel birim şekil değiştirme seviyesinin 20 çevrimde çift yönlü (genlikte) %5 değerine ulaştığı durum olarak tanımlamıştır.

Castro (1975) kumlar üzerinde bir dizi drenajsız gerilme kontrollü statik ve çevrimli üç eksenli deneyler yapmış ve zeminin sıklık durumuna bağlı olarak üç farklı gerilme-birim şekil değiştirme davranışı gözlemlemiştir. Gevşek zemin numunelerinin yumuşama ile birlikte ciddi kayma mukavemeti kaybı ve şekil değiştirmelere maruz

kaldığını ve bunun sonucunda günümüzde akma göçmesi veya akma sıvılaşması (flow liquefaction) olarak bilinen davranışı gösterdiğini belirtmiştir. Diğer taraftan orta sıkı numunelerin geçici yumuşamaya ve sınırlı sıvılaşmaya maruz kaldığını, sıkı numunelerin ise genleşme davranışı gösterdiğini gözlemlemiştir. Sıvılaşmayı açıklamak adına Kararlı (Sabit) Durum Çizgisi (*SSL*) konsepti önerilmiş ve *SSL* üzerinde kalan kumlu zeminlerin ancak akma sıvılaşması davranışı göstereceği ve çevrimsel sıvılaşmanın (cyclic liquefaction) bu çizginin hem altında ve üstünde konumlanan zeminlerde meydana gelebileceğini göstermiştir.

Kramer (1996) sıvılaşma olayını akma sıvılaşması (flow liquefaction) ve çevrimsel hareketlilik (cyclic mobility) olmak üzere iki genel kategoriye ayırmıştır. Akma sıvılaşmasının gerek statik gerekse tekrarlı yükler altında ve zemin kütlesinin statik dengesini sağlamak için gerekli olan kayma gerilmesinin zeminin sıvılaşmış haldeki kayma dayanımından yani zeminin kalıntı direncinden daha büyük olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Doygun ve gevşek halde bulunan zeminler akma sıvılaşmasına karşı çok duyarlıdır. Akma sıvılaşması aniden ortaya çıkmakta, hızla gelişmekte ve çok büyük deformasyonlara yol açmaktadır (örnek; akma heyelanları). Çevrimsel hareketlilik, kütlesindeki statik kayma gerilmesinin zeminin kalıntı direncinden daha küçük olduğu durumlarda meydana gelmekte ve hem gevşek hem de sıkı halde bulunan kumlar çevrimsel hareketliliğe maruz kalabilmektedir. Doğada deprem sırasında görülen yanal yayılmalar bunun en belirgin örneğidir.

Robertson (1994) sıvılaşmayı akma sıvılaşması ve çevrimsel yumuşama olarak iki ana grupta incelemiştir. Çevrimsel yumuşama olayını da kendi içinde çevrimsel sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik olmak üzere iki gruba ayırmıştır. Drenajsız koşullarda ve statik veya dinamik yükler altında zeminlerde meydana gelen deformasyon yumuşaması akma sıvılaşması olarak adlandırılmıştır. Çevrimsel sıvılaşma, drenajsız koşullarda dinamik olarak yüklenen zeminde efektif gerilmenin sıfıra ulaştığı ve kayma gerilmesinin ters yöne döndüğü durum olarak tanımlanırken, çevrimsel hareketlilik drenajsız dinamik yükleme sırasında zeminde kayma gerilmesinin sıfırdan büyük olduğu veya kayma gerilmesinin geri dönmediği durum olan ifade edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, sıvılaşma için önerilmiş en genel tanım olan, zemin numunesindeki aşırı boşluk suyu basıncının başlangıçtaki efektif çevre basıncına eşit olduğu durumu ($r_u = 1$) ifade eden ön sıvılaşma kriteri dikkate alınmıştır.

2.1.3 Sıvılaşmanın Etkileri

Önceki bölümde, sıvılaşma olayı, deprem sarsıntısı veya benzer ani yüklemeler sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışı nedeniyle kohezyonsuz zeminlerin kayma dayanımını ve rijitliğini kaybedip, viskoz bir sıvı gibi davranması olarak açıklanmıştı. Sıvılaşmaya maruz kalan zeminlerde meydana gelen aşırı şekil ve yer değiştirmelerden dolayı, zemin üzerinde kurulu olan bina ve köprü benzeri yapılarda, zemin içine gömülü borularda, toprak dolgularda ve doğal çevre üzerinde birçok farklı olumsuz etki görülebilmektedir. Mühendislik yapılarında sıvılaşma kaynaklı görülen en olumsuz etkiler, aşırı oturmalar (Liu ve Dobry, 1997), kum kaynaması (Brennan ve Madabhushi, 2005), yanal akmlar (Youd ve ark., 2002), gömülü yapıların yüzeylemesi (Chian ve Madabhushi, 2012), şev göçmeleri (Seed, 1987; Hamada, 1993), istinat yapısı yenilmesi (Bureau of Ports ve Harbors, 1989), temel zemininde taşıma gücü kaybı (Cooke, 2000) ve taşıma gücü kaybına bağlı meydana gelen farklı oturmalar, batmalar, yan yatma veya devrilmeler (Sancio ve ark., 2002; Bertalot ve ark., 2013) olarak sıralanabilir. Şekil 2.2’de 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Marmara depremi sonrasında Adapazarı’nın farklı bölgelerinde zemin sıvılaşması sonucu oluşan hasarlar görülmektedir. Sıvılaşma olayı sonrasında taşıma gücü kaybına bağlı olarak birçok yapı yan yatmış ve ciddi manada zarar görmüştür. Bunun yanında, birçok yapı devrilmeden kalabilse de aşırı oturmalar ve yanal ötelenmelere bağlı olarak kullanılmaz hale gelmiştir.



Şekil 2.2. 17 Ağustos depreminde Adapazarı’nda gözlemlenen sıvılaşma kaynaklı hasarlar (Selçuk, 2009)

2.1.4 Zeminlerin Sıvılaşabilirliği ve Etki Eden Faktörler

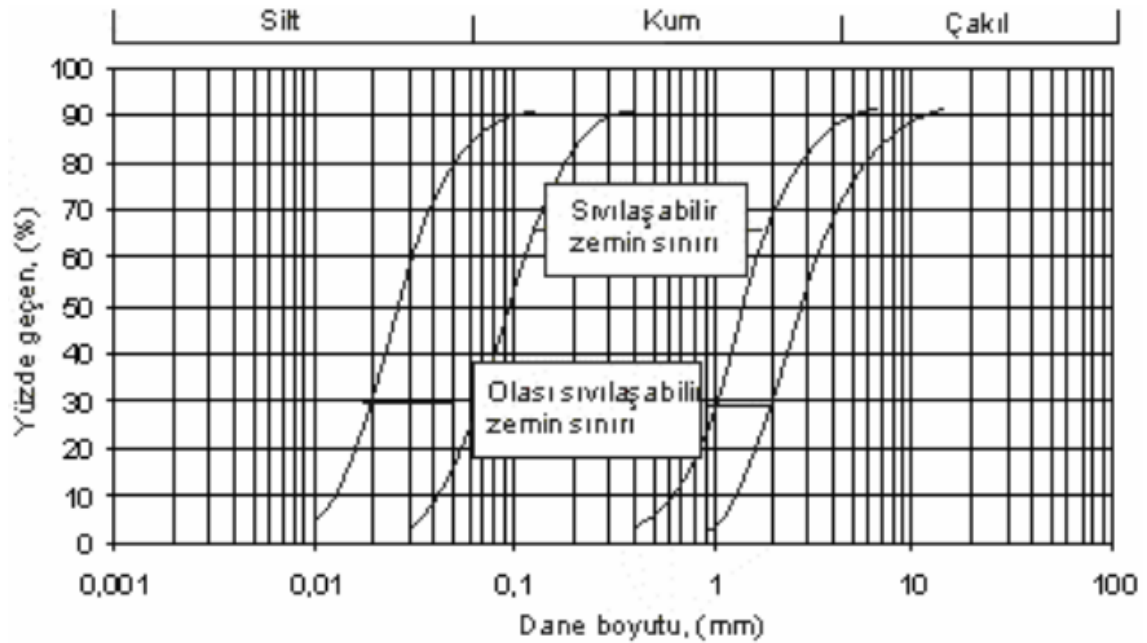
Sıvılaşma tehlike analizinde genellikle ilk olarak zeminlerin sıvılaşabilirliği, bir başka deyişle, zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı araştırılmaktadır. Arazide ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede üç farklı ölçütün kullanılabileceğini göstermiştir. Bunlar genel itibari ile zemin özelliklerine, jeolojik şartlara ve yer hareketlerine bağlı olan faktörlerdir (Kramer, 1996). Zemin özelliklerine bağlı olan faktörler, zeminin cinsi ve türü, relatif sıkılık derecesi, yer altı su seviyesi derinliği, sıvılaşabilir zeminin derinliği (efektif çevre basıncı değeri), drenaj koşulları ve dane boyutu ve dağılımı olarak sıralanabilir. Zeminlerin oluşumu esnasında gerçekleşen jeolojik süreçler ve bunların tipi sıvılaşma duyarlılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun yanında, zeminlerin sismik geçmişi, depremin büyüklüğü ve süresi sıvılaşma duyarlılığının belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır (Altındış, 2020). Bu tez çalışması için önem arz eden faktörler aşağıda kısaca incelenmiştir.

Relatif sıkılık (D_r), kum gibi kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışına ve dinamik parametrelerine etki eden en temel faktörlerden biridir. Zeminin başlangıçta sahip olduğu relatif sıkılık değeri arttıkça tekrarlı yükler altında oluşan kesme gerilmelerine karşı hacimce azalma eğilimi ve boşluk suyu basıncı azalmakta ve bunun sonucunda zeminin sıvılaşma potansiyeli azalmaktadır (Ferritto, 1997; Altun, 2003; Tezcan ve Özdemir, 2004).

Zemini oluşturan danelerin boyutu, dağılımı ve derecelenmesi zeminlerin hacim değişimi, su geçirgenliği ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve dolayısıyla zeminlerin sıvılaşma duyarlılığını önemli derecede etkilemektedir (Ferritto, 1997; Özaydın, 2007). Kaba kumların su geçirgenliği ince kumlara göre daha yüksek olduğu için sıvılaşma potansiyeli daha düşüktür. Gevşek ve doymun halde bulunan temiz yani muhtevasında herhangi bir silt veya kil gibi ince malzeme bulundurmuyan kohezyonsuz kumlar sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zemin sınıfındadır. Plastik olmayan ve üniform derecelenmiş olan granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyeli iyi derecelenmiş zeminlere göre daha fazladır (Kramer, 1996). İyi derecelenmiş zeminler farklı boyuttaki danelerden oluşmaktadır ve küçük daneler büyük daneler arasındaki boşlukları doldurmaktadır. Bu durum, deprem gibi herhangi bir sarsıntı esnasında zeminin potansiyel hacimsel sıkışma eğilimini azaltmakta ve dolayısıyla boşluk suyu basıncında daha az artışa neden olmaktadır. Tsuchida (1970) tarafından, geçmiş

depremlerde sıvılaşılan veya sıvılaşımayan zeminlerin granülometri eğrileri (dane boyutu dağılımı) derlenerek oluşturulmuş sıvılaşma sınır eğrileri Şekil 2.3’de gösterilmektedir.

Yuvarlak zemin danelerine sahip zeminler köşeli dane içeren zeminlere göre daha kolay sıkışır ve dolayısıyla daha fazla sıvılaşma potansiyeline sahiptirler (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2021). Kumlu zeminlerin yuvarlak şekilli tozlar ile karıştırılması sonucu temiz kumun sıvılaşma direncinin önemli derecede düştüğü tespit edilmiştir (Wei ve Yang, 2014).



Şekil 2.3. Sıvılaştırılabilir kumlarda dane dağılımı (Tsuchida, 1970)

Sıvılaştırılabilir zeminin derinliği ve yer altı su seviyesi zeminlerin sıvılaşma duyarlılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan arazi çalışmaları, geçmişten günümüze kadar zemin yüzeyinden 15 m aşağıda meydana gelmiş herhangi bir sıvılaşma olayının meydana gelmediğini göstermektedir (EN 1998-1 Eurocode 8, 2004; Derinöz, 2004). Benzer şekilde, dünyanın farklı coğrafyalarında meydana gelen sıvılaşma olaylarında yer altı su seviyesinin genelde 3 m’den daha az olduğu gözlemlenmiştir (Wang ve Law, 1994; Alparslan, 2006). Sıvılaştırılabilir zeminin derinliği ile efektif çevre basıncı veya gerilmesi değeri doğru orantılıdır. Zemin yüzeyinden daha derine inildikçe ve/veya yer altı su seviyesinin daha derine inmesi ile zemin tabakaları daha yüksek çevre basıncına sahip olmaktadır. Sabit bir zemin sıkılığında, çevre basıncının artması ile zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı duyarlılığı azalmakta, bir başka ifade ile, sıvılaşma mukavemeti artmaktadır (Kramer, 1996).

Yukarıda, yüksek çevre basıncına sahip ve/veya sıkı halde bulunan zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin düşük olduğu belirtilmiştir. Bu durum, sıkı ve yüksek çevre basıncı altındaki zeminlerde sıvılaşma olmayacağı anlamına gelmemektedir. Uygulanan dinamik yükün doğasına, büyüklüğüne ve tipine bağlı olarak bu tür zeminlerde sıvılaşabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, depremin büyüklüğünün artması ile zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, zemine etki eden tekrarlı yüklerin süresi ile deprem süresi doğru orantılı olduğu ve daha uzun süreli depremlerde zeminin sıvılaşma potansiyelini önemli derecede arttığı ifade edilmiştir (Seed, 1979; Dere, 2009). Taheri (1980) gevşek kumlar üzerinde dinamik üç eksenli testler gerçekleştirmiş ve relatif sıkılık, hücre basıncı, dinamik yük ve çevrim sayısının zeminlerin sıvılaşma davranışını önemli derecede etkilediğini gözlemlemiştir. Numunelerin, düşük relatif sıkılıkta ve düşük hücre basıncında sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğunu ve deviator gerilme büyüklüğünün artması ile sıvılaşma için gerekli çevrim sayısının azaldığını göstermiştir. Bunun yanında, çok yönlü gerilmelerin tek yönlü gerilmelere göre boşluk suyu basıncının daha hızlı yükselmesine neden olduğu ve sıvılaşma riskini daha fazla artırdığı rapor edilmiştir (Seed, 1976).

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini ve mukavemetini etkileyen bir diğer parametre, zeminin yapısı ve dokusudur. Kumlu veya siltli zeminlerde örselenmemiş numune almak oldukça meşakkatli ve pahalı olduğu için, laboratuvar ortamında yürütülen deneysel çalışmalarda genellikle yeniden oluşturulmuş zemin numuneleri kullanılmaktadır. Yeniden oluşturulmuş zemin numunelerini hazırlamak için kuru ve ıslak yağmurlama, kuru depolama, kuru ve ıslak sıkıştırma veya tokmaklama gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemle göre farklı zemin yapısı ve dokusu farklı olabilmekte ve bu da zeminin sıvılaşma davranışı ve mukavemetini önemli derecede etkileyebilmektedir (Silver ve Park, 1976; Tatsuoka ve ark., 1986). Mulilis ve ark. (1977) sekiz farklı yöntemle sabit relatif sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde dinamik üç eksenli testler gerçekleştirerek numune hazırlama yönteminin zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kuru yöntemle (yağmurlama, tokmaklama) hazırlanmış numunelerin ıslak yöntemle hazırlanmış numunelere göre daha düşük sıvılaşma direncine sahip olduklarını göstermişlerdir.

2.1.4.1 İnce Danelerin Zeminlerin Sıvılaşma Davranışı Üzerindeki Etkisi

1964 Niigata depreminde sıvılaşmanın ekseriyetle suya doymuş kumlu zeminlerde meydana geldiği gözlemlenmiş ve dolayısıyla bu alanda yapılan ilk çalışmalar temiz

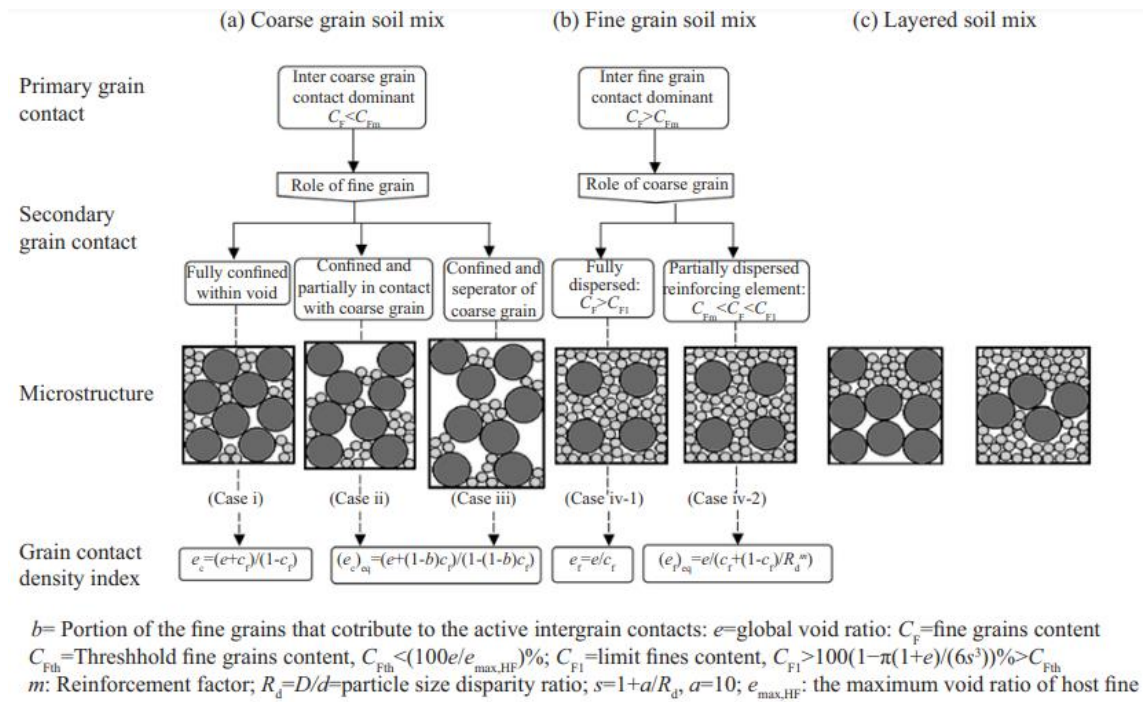
kumun sıvılaşma davranışı üzerine yoğunlaşmıştır (örnek; Seed ve Peacock, 1971). Belirli süre boyunca sıvılaşmanın sadece temiz kum içeren doygun kohezyonsuz zeminlerde meydana gelebileceği ve siltli/killi kumların tekrarlı yükler altında sıvılaşmayacakları düşünülmüştür. Ancak, Haicheng-Çin (1975), Tangshan-Çin (1976), Algarrobo-Şili (1985), Mexico City-Meksika (1985), Chibakentohooki-Japonya (1987), Loma Prieta-USA (1989), Northridge-USA (1994), Kobe-Japan (1995), Kocaeli-Türkiye (1999), Chi-Chi-Tayvan (1999), Christchurch-Yeni Zelanda (2011) gibi farklı ülkelerde meydana gelen birçok önemli depremlerden elde edilen bulgular ve gözlemler, sıvılaşmanın sadece temiz kumlu zeminlerde değil, belirli oranda silt veya kil gibi ince dane içeren suya doygun kumlu zeminlerde, plastik olmayan veya düşük plastisiteli (düşük kohezyonlu) siltlerde ve plastik olmayan çakıllı zeminlerde de olabileceğini göstermiştir (Ishihara, 1984; Youd ve ark., 1985; Evans ve Seed, 1987; Boulanger ve ark., 1998; Stewart ve ark., 2001; Day, 2002; Bray ve ark., 2004; Özaydın, 2007).

Literatürde, temiz kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin (sıvılaşabilirliğinin) yüksek olduğu ve killi zeminlerde sıvılaşma meydana gelmeyeceği noktasında genel mutabakat sağlanmış olsa da düşük plastisiteli ince dane (silt vb.) içeren zeminlerin sıvılaşma duyarlılığı ile ortak bir kanıya henüz varılamamıştır. Düşük plastisiteli ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için “*Çin Kriteri*” yöntemi geliştirilmiştir (Wang, 1979). Bu metot ile, ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli zeminin sahip olduğu dane dağılımı, plastik limit (PL veya W_p), likit limit (LL veya W_L) ve doğal su muhtevası (W_n) değerine göre değerlendirilebilmektedir. Likit limit değerinin %35’den küçük, doğal su muhtevasının likit limit değerinin %90’ından daha büyük ve kil ($5\mu m$ ’ den ince dane) yüzdesinin %15’den daha küçük olması durumunda zeminlerin sıvılaşabileceği belirtilmiştir. Wang (1981) yılında daha önce önermiş olduğu sıvılaşabilirlik koşullarını güncellemiştir. Takip eden yıllarda, birçok araştırmacı “*Çin Kriteri*” yöntemi için önerilmiş olan limit değerlerde güncelleme yapılmasını önermiştir (Seed ve Idriss, 1982; Koester, 1992; Youd ve Gilstrap, 1999; Andrew ve Martin, 2000; Bray ve ark., 2004; Moss ve Chen, 2008). Meydana gelen birçok deprem sonrası elde edilen veriler ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, Seed ve ark. (2003) ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede kullanılabilecek grafiksel bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemle göre, zeminin plastisite indisi (PI veya I_p) 12’den küçük, likit limiti değeri 37’den küçük ve doğal su muhtevası likit limit değerinin %80’ından daha fazla ise potansiyel olarak sıvılaşabilir. Bray ve ark. (2004) Kocaeli Depremi (1999)

sonrasında Adapazarı'nda yaptıkları çalışmada, Çin Kriteri baz alınarak yapılan analizlere göre sıvılaşmayacağı düşünülen zeminlerin de sıvılaştığını tespit etmişlerdir.

Kum-silt, kum-kil veya kum-silt-kil karışımlarının dinamik yükleme sırasında meydana gelen drenajsız kayma gerilmeleri altındaki davranışını belirlemek adına özellikle 1990 yılı ve sonrasında birçok deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, genel itibari ile ince daneli zemin (silt ve kil) içeren kumlu zeminlerde boşluk suyu basıncı oluşumunu ve gelişen kayma deformasyonlarını anlamaya yönelik yapılmış olup, ince dane oranı, ince dane türü, ince dane plastisitesi gibi parametrelerin sıvılaşma dayanımı üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Geçmişten günümüze kadar yapılmış olan bu çalışmalar incelendiğinde, elde edilen sonuçların kendi aralarında tartışmalı olduğu görülmektedir ve özellikle plastik olmayan ince dane oranının sıvılaşma dayanımı üzerindeki etkisi hakkında bilimsel tartışmalar hala devam etmektedir. Sonuçlar üzerinde yapılan değerlendirmelerde, global boşluk oranı (e), kaba daneler arası boşluk oranını ifade eden intergranüler boşluk oranı (e_s), ince daneler arası boşluk oranını ifade eden interfine boşluk oranı (e_f) ve relatif sıkılık (D_r) gibi farklı endeks parametrelerini kullanmışlardır. Literatürde, laboratuvar deney sonuçlarının birbiri ile çelişiyor olmasının en temel sebeplerinden bir tanesi karşılaştırmada ve değerlendirmede kullanılan endeks parametrelerinin farklı olmasıdır (Finn ve ark., 1994). Kum ve plastik olmayan silt içeren zemin karışımlarında, kaba daneler (kum) ve ince daneler (silt) bir etkileşim olduğu ve bu etkileşimin ince dane içeriğine, kaba daneler arası ve ince daneler arası boşluk oranlarına göre değiştiği belirtilmiştir. Literatürde, kaba ve ince dane etkisi mikro yapısal olarak beş farklı sınır durumu için tanımlamıştır (Şekil 2.4). İlk durumda, karışımdaki ince dane miktarı (FC veya C_f) kritik veya sınır ince dane miktarından (FC_{th} veya C_{Fth}) daha azdır ve ince daneler kaba daneler arasındaki boşluklarda hareket edemez haldedir. İnce dane çapı kaba daneler arasındaki boşlukların çapından çok daha küçüktür. İnce daneler hiçbir şekilde kaba daneleri etkilememekte ve zemin davranışı kaba danelerin birbiri ile teması tarafından kontrol edilmektedir. Bu durumda, ince dane etkisi ihmal edilebilmektedir ve daneler arasındaki temas etkisini incelemek için kaba dane boşluk oranı (e_f) terimi kullanılır (Şekil 2.4'a). İkinci ve üçüncü durumda, ince dane miktarı eşik dane miktarından daha düşük olmasına rağmen global boşluk oranında artma meydana gelmiştir. Bir önceki duruma benzer olarak, kaba daneler arasındaki temas zemin davranışı üzerinde daha önemli bir rol oynamaktadır. Ayrık daneler olarak adlandırılan bir kısım ince daneler iç kuvvet zincirine (force chain) aktif olarak katılırken, kuşatılmış

daneler (confined fines) olarak adlandırılan diğer kısım ince daneler ise kaba daneler arasındaki boşlukları doldurmaktadırlar (Şekil 2.4'a). İnce dane miktarının eşik dane miktarı değerini aştığı dördüncü durumda ise, ince daneler birbiri ile temas edebilmekte ve zemin davranışı üzerinde daha etkin bir rol oynarken kaba danelerin etkisi azalmaktadır. Bu durumda, ayırık olan kaba denelerin etkisi ihmal edilebilmektedir ve daneler arasındaki temas etkisini incelemek için ince dane boşluk oranı (e_f) terimi kullanılır (Şekil 2.4'b). Beşinci ve son durumda, kaba ve ince daneler tabakalı bir sistem oluşturur (Şekil 2.4'c).



Şekil 2.4. Kum ve ince danelerin mikro yapısı ve sınıflandırılması (Thevanayagam, 2007)

İki matristen oluşan ince daneli kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışında yukarıda açıklanan sınır durumlarına göre artış veya azalma meydana gelebilmektedir. Literatürde, bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Bazı araştırmacılar, aynı global boşluk oranı veya relatif sıkılık kullanarak yaptıkları değerlendirmede, plastik olmayan veya düşük plastisiteli silt içeren kumlu zeminlerde ince dane miktarının belirli bir yüzdeye (eşik değere) kadar artması ile sıvılaşma dayanımının azalmakta olduğunu ve bu eşik değerden sonra artış gösterdiğini belirtmişlerdir (örnek; Chang, 1990; Koester, 1994; Thevanayagam ve Mohan, 2000; Xenaki ve Athanasopoulos, 2003; Altun ve ark., 2005; Athanasopoulos ve Xenaki, 2008; Hernández ve ark., 2015). Yapılan kapsamlı literatür

incelemesinde, farklı zemin türleri için bu eşik değerin (FC_{th}) %10 ile %42 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Suyla doygun kumlu zeminler üzerinde yapılan bazı çalışmalarda, plastik olmayan ince dane (silt) miktarının artması ile kumlu zeminlerin sıvılaşmaya karşı olan direncinin azaldığı (örnek; Shen ve ark., 1977; Troncoso ve Verdugo, 1985; Erken ve ark., 1994; Cubrinovski ve Rees, 2008) veya arttığını (örnek; Ishihara ve ark., 1978; Seed ve ark., 1985; Dobry et al., 1985) belirtmişlerdir.

Kil veya yüksek plastisiteli silt içeren kumlu zeminlerde, ince danenin miktarının ve plastisitesinin zeminin sıvılaşma davranışını ve mukavemetini hangi yönde etkilediği hususunda da literatürde tam bir mutabakat sağlanamamıştır. Bazı araştırmacılar (örnek; Ishihara ve Koseki, 1989) ince danenin plastisitesinin daha önemli olduğunu belirtirken, diğerleri (örnek; Koester, 1994) ince dane oranının daha etkin bir rol oynadığını ifade etmişlerdir. Plastisite etkisi açısından bakıldığında, literatürde en yaygın anlayış kumlu zeminlerin sıvılaşma mukavemetinin ince danenin plastiklik indeksinin artması ile artacağı ve bu artışın özellikle yüksek plastik indekse sahip ince danelerde daha fazla olacağı yönündedir (örnek; Ishihara, 1993; Gratchev ve ark., 2006). Diğer taraftan, Park ve Kim (2013) bu yaygın kanının aksine aynı ince dane oranına sahip killi ve siltli kumlar için ince danelerin plastisitesi arttıkça zeminin sıvılaşma dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. İnce dane oranı açısından değerlendirildiğinde, yüksek plastisiteli ince dane içeren kumlu zeminlerin ince dane miktarının belirli bir eşik değere kadar artması ile sıvılaşma dayanımının azaldığı ve bu eşik değerden sonra arttığı tespit edilmiştir (örnek; Koester, 1994; Polito, 1999; Ghahremani ve Ghalandarzadeh, 2006; Sadek ve Saleh, 2007).

2.1.5 Sıvılaşma İyileştirme Yöntemleri

Sıvılaşma kaynaklı hasarlara karşı yapıların güvenliğinin sağlanması ve buna bağlı olarak ekonomik kayıpların önlenmesi veya azaltması adına sıvılaşma potansiyeli taşıyan zemin tabakalarının tespit edilip gerekli iyileştirmelerin yapılması büyük önem arz etmektedir. Sıvılaşma riski taşıyan bölgelerde alınabilecek önlemler genel itibarı ile dört ana başlık altında toplanmıştır: (1) sıvılaşma riski taşıyan alanlarda yapılaşmaya gidilmemesi, (2) sıvılaşabilir zemin tabakalarının sıyrılması veya sıvılaşma riski olmayan bir zemin tabakası ile yer değiştirilerek yapı temelini sıvılaşmayan tabaka üzerine inşa edilmesi, (3) yapının sıvılaşma hasarlarına karşı koyabilecek şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi, (4) zeminde iyileştirme çalışmalarının yapılması. 1964 yılından günümüze kadar, sıvılaşma riskini azaltmak için kullanılabilecek birçok zemin iyileştirme yöntemi

geliştirilmiştir (Mitchell ve ark., 1995). Vibroflotasyon, kum sıkıştırma kazıkları, dinamik kompaksiyon gibi sıkıştırma yöntemleri, derin karıştırma, jet enjeksiyonu gibi enjeksiyon ve karıştırma teknikleri ile taş kolon ve çakıl drenleri gibi drenaj teknikleri günümüzde birçok geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan geleneksel metotlardan bazılarıdır. Sıvılaşmaya karşı uygulanacak iyileştirme yönteminin seçiminde ve dizaynında genellikle uygulanabilirlik, etkinlik ve maliyet/fayda ilişkisi dikkate alınmakta ve seçilen yöntemin mevcut ve komşu yapılar üzerindeki etkileri ile çevre üzerindeki zararlı etkileri genellikle göz ardı edilmektedir (Gallagher ve ark., 2007). Üzerinde yapı bulunmayan bir zeminde iyileştirme yapılması nispeten daha kolaydır ve sıkıştırma gibi birçok geleneksel metot bu amaç için kullanılabilir. Ancak, mevcut yapının zeminine iyileştirme yapılması oldukça zor ve maliyetli bir süreçtir ve bu amaç doğrultusunda kullanılabilir olan yöntemlerin sayısı oldukça az sayıdadır. Jet enjeksiyonu gibi metotlar mevcut yapı zeminleri için kullanılabilir, ancak bu veya benzer tekniklerin uygulamasında çevreye zararlı olabilecek çimento gibi taneli şerbetler veya farklı sentetik enjeksiyon malzemeleri kullanılır (Karol, 2003).

Özellikle son yıllarda artan çevresel kaygılar, ekonomik ve sürdürülebilir zemin iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesini ve/veya kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca sanayileşme ve kentleşme, enerji ve hammaddelere yönelik tüketici talebinin önemli derecede artmasına ve dolayısıyla dünya çapında her yıl milyonlarca ton endüstriyel atığın üretilmesine neden olmaktadır (örnek; Bilgen ve Altuntaş, 2023). Uçucu kül, en yaygın endüstriyel atık türleri arasındadır ve bunların yalnızca küçük bir kısmı geri dönüştürülmekte ve/veya yeniden kullanılmaktadır. Bu tür atıkların problemli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmede kullanılması, sürdürülebilir kalkınma için önemlidir ve her geçen gün büyüyen çevre sorunlarına uygulanabilir bir çözüm sağlayabilir (örnek; Towhata, 2008). Uçucu küller, genel itibari ile hafif, plastik olmayan ince taneli, tipik olarak silt boyutundaki daneciklerden oluşur. Bir önceki bölümde (2.1.4.1) belirtildiği üzere, plastik olmayan veya düşük plastisiteli silt içeren kumların tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı üzerinde birçok bilimsel araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, uçucu kül içeren suya doymuş kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerinde yapılmış olan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Ayrıca, mevcut çalışmalar birbiriyle çelişen sonuçlar ortaya koymaktadır. Uçucu kül ilavesinin kumun sıvılaşma direncini nasıl etkilediği ve uçucu külün kumla karıştırıldığında plastik olmayan silt gibi davranıp davranmadığını tespit etmek için daha fazla çalışmaya gereksinim duyulmaktadır.

2.2 Uçucu Küller

2.2.1 Genel Bilgiler

Özellikle son yarım asırda nüfusun ve enerjiye olan ihtiyacın artması ile termik santrallerin kullanımı ülkemizde ve dünyada önemli ölçüde artmıştır. Ülkemizde faaliyette olan veya faaliyete geçmesi beklenen 50'nin üzerinde termik santral bulunmaktadır. Termik santrallerde düşük kalorili oldukları için endüstride kullanılmayan linyit ve taş kömürü öğütüldükten ve pulverize edildikten sonra yüksek sıcaklıklarda (1100-1600 °C) yakılmaktadır. Kömürün yanması ile taban külü ve uçucu kül olarak adlandırılan yanma atıkları ortaya çıkmaktadır. Baca gazları ile sürüklenen elektro-fitrelerde veya toz tutucularda (siklon) elektrostatik veya mekanik yöntemle tutularak atmosferik ortama salınımı engellenen hafif ve ince daneciklerden oluşan atık malzemelere uçucu kül denilmektedir (Nazaroglu, 2019). Uçucu kül daneleri genelde küresel bir yapıya sahiptir ve dane çapı 1–150 μm mertebesinde (Alkaya, 2002).

Türkiye’de elektrik enerjisinin önemli bir kısmı termik santrallerden elde edilmektedir ve bunun sonucunda yıllık 15 milyon tondan fazla uçucu kül atığı ortaya çıkmaktadır. Uçucu kül atıkları genellikle termik santral dışında depolanmakta ve devasa uçucu kül tepelerinin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 2.5). Dünya genelinde bakıldığında yıllık yılda 600 milyon ton civarında uçucu kül ortaya çıkmaktadır (Joshi ve Lothia, 1997; Ahmaruzzaman, 2010) ve bu miktarın ancak küçük bir kısmı farklı sektörlerde değerlendirilmektedir. Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen uçucu külün %95’den fazlası, İngiltere’de %50’si, ABD ve Çin’de ise sırayla %32 ve %40 oranında değerlendirilirken Türkiye’de bu oran çok daha düşüktür (Aruntaş, 2006).



Şekil 2.5. Termik santral dışında depolanan uçucu kül yığınları (Şahin, 2010)

2.2.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflara ayrılmasında genellikle ASTM sınıflandırılmasından istifade edilmektedir (Nataraja ve ark., 2007). ASTM C 618 standardına göre, uçucu küller F ve C olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmaktadır. F tipi uçucu küller taşkömürünün yakılması sonucunda oluşurlar ve Silikon Oksit (SiO_2) + Alüminyum Oksit (Al_2O_3) + Demir Oksit (Fe_2O_3) yüzdesi %70'den fazladır. Yapılarında %10'dan daha az serbest kireç (CaO) mevcut olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılmaktadırlar. Tek başına sertleşme özelliğine sahip olmayan bu sınıf uçucu küller kireç ile suyun olduğu ortamda tepkimeye girerek sertleşme özelliği gösterirler. Puzolanik reaksiyonları (çimentolaşma) normal şartlarda çok yavaştır (Arjunan ve ark., 2001). Öte yandan, C tipi uçucu küller linyit kömürünün yakılması ile elde edilmektedir ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'den fazladır. Yapısında %10'dan daha fazla miktarda CaO olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. C sınıfı uçucu küller, içeriğinde %1-3 aralığında değişiklik gösteren serbest kireç bulunduğu için kendi kendine puzolanik reaksiyonlara girme özelliğine sahiptir ve suyun bulunduğu ortamda kendiliğinden çimentolaşma özelliğine sahiptirler (Alkaya, 2009; Cristelo ve ark., 2011). Çizelge 2.1'de ASTM C 618'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. ASTM C 618'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları (Erşan, 1996)

Kimyasal Bileşik	ASTM C 168 (%)	
	F Tipi	C Tipi
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az 70	En az 50
MgO	En çok 5	En çok 5
SO_3	En çok 5	En çok 5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	En çok 1.5	En çok 1.5
Nem	En çok 3	En çok 3
Yanma Kaybı	En çok 12	En çok 6

2.2.3 Uçucu Küllerin Özellikleri

Uçucu küller, kömürün yapısında bulunan ve yakma işlemi sırasında yanmayan inorganik maddelerden ve az miktardaki yanmamış karbonlu maddelerden oluşur. Uçucu küller, yüksek oranda demir, alüminyum ve silisyum elementleri içerirken, magnezyum, potasyum, sodyum, titanyum ve kükürt gibi elementlerin oranı nispeten daha düşüktür (Barnes ve Sear, 2006). Bu elementlerin miktarı uçucu küllerin sınıfının belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Yakılan kömürün cinsi, kaynağı ve yapısı, yanma koşulları,

kullanılan yanma ve filtre sistemi, depolama ve taşıma yöntemleri gibi faktörler, uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kim ve ark., 2005; Pandey ve Singh, 2010).

2.2.3.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küller ekseriyetle gri renkte olmasına karşın, muhtevastaki yanmamış karbon miktarına, demirce zengin dane miktarına ve nem durumuna bağılı olarak daha koyu bir görünüme sahip olabilmektedirler (Joshi ve Nagaraj, 1987). Uçucu küller, küresel şekle sahip, genellikle silt boyutunda olan ince daneciklerden meydana gelmektedirler ve oldukça üniform olan malzemelerdir. Dane çapları 0.001 ile 0.15 mm arasında değışkenlik göstermekte olup ve daneciklerin %75'inden daha fazlası 0.045 mm'den, %50'den fazlası ise 0.002 mm'den daha küçük çapa sahiptir Uçucu kül daneciklerinin içi dolu veya boş olabilmektedir ve içi boş olan parçacıklar toplam külün ağırlıkça 5% ve hacimce %20'sini oluşturmaktadırlar. Uçucu küller, kil gibi doğal zeminlere nazaran çok daha düşük özgül ağırlığa sahiptirler ve yoğunlukları 19.5-27.0 kN/m³ arasında değışmektedir (Uysal, 1987; Erşan, 1996; Aruntaş, 2006; Alkaya, 2009).

2.2.3.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri ve Yapıları

Uçucu külün yapısında %85 veya daha fazla oranda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO bulunup, geriye kalan kısım MgO, SO₃ gibi alkali oksitlerden oluşmaktadır. Bu bileşiklerin oranları yakılan kömüre ve yanma sıcaklığına bağılı olarak değışiklik göstermektedir. Çizelge 2.2'de ASTM C 618'e göre sınıflandırılan uçucu küllerin kimyasal yapıları verilmiştir.

Çizelge 2.2. ASTM C 618'e göre sınıflandırılan uçucu küllerin kimyasal yapıları (Erşan, 1996)

ASTM Sınıflandırılması	F-tipi			C-tipi		Diğer	
Tanımlama	F _r	F _c	F _a	C _{1a}	C _{2a}	C _{1f}	C _{2f}
Kimyasal Yapı	Siliko-alüminaz			Siliko-kalsik		Sülfo-kalsik	
SiO ₂ (Silisyum Dioksit)	59.4	41.4	47.4	36.2	37.9	24.0	13.5
Al ₂ O ₃ (Alüminyum Oksit)	22.4	24.8	21.3	17.4	18.9	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃ (Demir Oksit)	8.9	18.6	6.2	6.4	6.5	17.0	3.5
CaO (Kalsiyum Oksit)	2.6	2.5	16.6	26.5	24.9	24.0	59.0
Na ₂ O (Sodyum Oksit)	2.2	1.5	0.4	2.2	0.8	0.8	-
MgO (Magnezyum Oksit)	1.3	0.7	4.7	6.6	6.6	1.0	1.8
SO ₃ (Kükürt Trioksit)	2.4	1.2	1.5	2.8	3.0	8.0	15.1
Yanma Kaybı	2.0	9.5	15.0	0.6	0.8	-	-
Serbest Kireç (CaO)	-	-	-	2.8	2.2	-	28.0

2.2.3.3 Türkiye’deki Uçucu Küller

Türkiye’de üretilen uçucu küllerin kimyasal özellikleri, kullanılan kömürün cinsine, kaynağına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Çizelge 2.3’te Türkiye’de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri/kompozisyonları ile TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri verilmiştir. Uçucu küller üzerinde atomik absorpsiyon spektrometresi kullanılarak temel oksit analizleri yapılmış ve yaş analiz metotları kullanılarak serbest kireç, reaktif silis, reaktif kireç, SO₃, kızdırma kaybı değerleri bulunmuştur. Görüldüğü üzere, ASTM C 618’e göre ise Afşin-Elbistan uçucu külü dışındaki tüm küllerin F sınıfına girmektedir (Aruntaş, 2006). Ayrıca, Afşin-Elbistan uçucu külü dışındaki tüm küller genel anlamda TS 639 standardında belirtilen sınır değerlerini sağladığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılmış olan Seyitömer uçucu külü ile ilgili ayrıntılı bilgiler materyal ve yöntem kısmında (3.1.2) verilmiştir.

Çizelge 2.3. Türkiye’de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Aruntaş, 2006)

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 Sınırları	ASTM C 618 Sınırları	
						F	C
SiO ₂	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>50
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	<5	<5	<5
Na ₂ O	0.3	3.0	0.24	23.2	-	<1.5	<1.5
K ₂ O	-	-	1.81	1.76	-	-	-
SO ₃	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K. K	2.4	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

2.2.4 Uçucu Küllerin Kullanımı

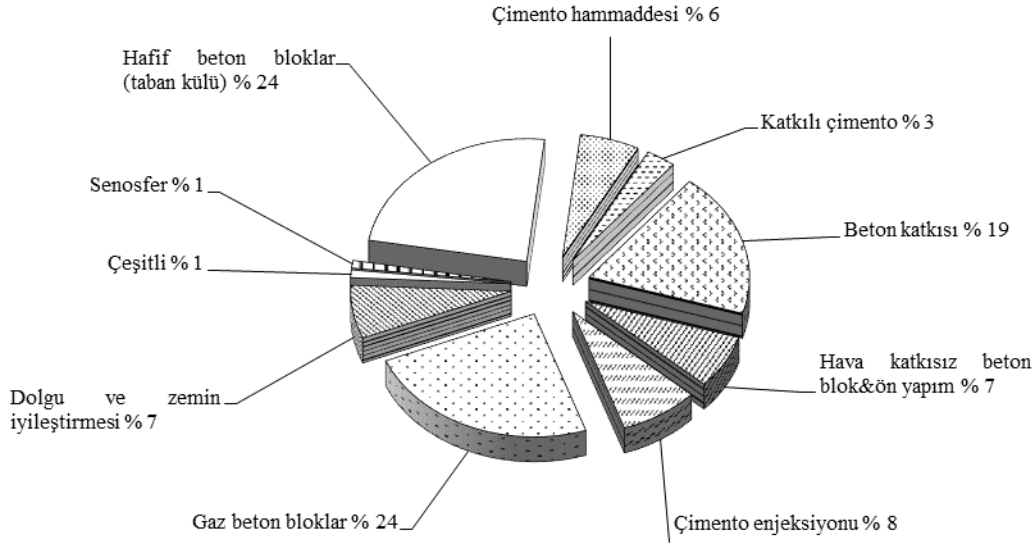
Son yıllarda giderek artan çevresel sorunlar ve doğal ham maddelerin hızla tükeniyor olması uçucu kül gibi alternatif malzemelerin yeniden kullanılması yönündeki bilimsel çalışmalara olan ilgiyi artırmıştır. Eftelioğlu ve Bowders (1992) yaptıkları çalışmada endüstriyel atık olan uçucu küllerin arazi şartlarında dolgu kütlesi halinde istiflenmesinin çevre açısından ciddi riskler oluşturduğunu ve kül yapısındaki ağır metallerin ayrılarak yeraltı kaynak suyuna karışması halinde tehlikeli olacağını gözlemlemişlerdir. Uçucu kül atıklarının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri detaylı bir şekilde incelendiğinde, bunların tarımsal alanlarda, inşaat sektöründe ve diğer

endüstri kollarında kullanılmasının malzeme ve enerji tasarrufu sağlamasının yanında çevre kirliliğine karşı da önlem olabileceği belirtilmiştir (Barman ve ark., 1999; Sato ve Nishimoto, 2005; Şahin, 2010; Feuerborn, 2011; Sayılğan ve Kürklü, 2018). Bu kısımda, uçucu küllerin inşaat mühendisliği ve özellikle de geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı kısaca tartışılacaktır.

2.2.4.1 Uçucu Küllerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Uçucu küllerin en sık kullanıldığı alan inşaat endüstrisidir. İnşaat sektöründe uçucu küllerin yaygın olarak kullanıldığı sektörlerin başında çimento endüstrisi gelmektedir. 1980'li yılların başından bugüne kadar geçen süreçte Türkiye'deki katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, %90'ların üstüne çıkmıştır. Portland çimentoda hammadde, katkı maddesi ve/veya ikame malzemesi olarak işlev gören uçucu küller, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere karıştırılarak klinker imalatında kullanılmaktadır (Caldas-Vieira ve Feuerborn, 2013). Uçucu külün inşaat sektöründe sıklıkla kullanıldığı başka bir alan ise beton üretimidir. Uçucu küller hem normal hem de giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton imalatında gerek mineral katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır (Berg ve Feuerborn, 2005). Bunun yanında, ön üretim ve ön germeli beton elemanların üretiminde de sıklıkla kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006). Uçucu küller, çimentodan daha ince olan dane boyutu, dane şekli, dane dağılımı ve puzolanik özelliği nedeniyle etkili bir enjeksiyon malzemesi olduğu ve son yıllarda çimento-bentonit enjeksiyonunda da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Demiröz, 2009).

Özet olarak, uçucu küller inşaat mühendisliğinde agrega malzemesi ve dolgu maddesi olarak, gaz beton tarzındaki tuğla yapım işlerinde yardımcı hammadde olarak, katkılı çimento ve beton santrallerinde yardımcı katkı maddesi olarak, karayollarında, yol yapım işlerinde ve hafif agrega üretiminde yan hammadde olarak, tuğla üretiminde yardımcı hammadde olarak, demir donatılı temellerde duvar arkası dolgu olarak, geri dönüşüm tesislerinde veya katı atık tesislerde yerin altındaki suları kirletmemek adına düşey geçirimsiz perde tarzında kazık ile ankrajların yapımında bentonit-çimento ve zemin-bentonit harcında katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Ünver, 2015). Şekil 2.6'da termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin inşaat mühendisliğinde kullanım alanları ve oranları İngiltere örneği üzerinden verilmiştir.



Şekil 2.6. İngiltere'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları ve oranları (Kaçmaz, 2019)

2.2.4.2 Uçucu Küllerin Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Geoteknik mühendisliğinde geniş kullanım alanına sahip olan uçucu küller, genel olarak üst yapı temellerinde alt katman dolgusu olarak (Büyüköner, 1989), toprak veya yapıların kaymasını önlemek amacıyla yapılan destek-dayanma-istinat yapılarında arka dolgusu olarak (Erşan, 1996; Martin ve ark., 1990), baraj set arkalarının doldurulmasında katkı malzemesi olarak (Akman, 1993; İlhan, 1995), zemin stabilizasyonunda yardımcı katkı maddesi olarak (Ghosh ve ark., 1973; Lo ve Wardani, 2002; Senol ve ark., 2006; Cristelo ve ark., 2012), kara yolları çalışmalarında ve otoyol inşaatında dolgu ve stabilizasyon malzemesi olarak (Toth ve ark., 1988; Singh, 1996; Alataş, 1996; Chand ve Subbarao, 2007; Yoon ve ark., 2009; Santos ve ark., 2011), doğal veya dolgu şevlerin stabilite kontrolünde ve farklı dolgu uygulamalarında enjeksiyon malzemesi olarak (Joshi ve Nagaraj, 1987) ve atık ve çöp depolama tesisleri gibi çevre geotekniği uygulamalarında sızdırmazlık malzemesi ve tabakası olarak (Kutay, 1994) kullanılmaktadır.

Uçucu küllerin geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılabilmesi için, uçucu kül içeren zeminlerin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri, geçirimsizlik (permeabilite) konsolidasyon, sıkışma (kompaksiyon), statik/monotonik yükler altındaki kayma mukavemeti gibi mühendislik özellikleri ile farklı drenaj koşulları ve tekrarlı yükler altındaki mukavemeti ve dinamik davranışının iyi bilinmesi gerekmektedir. Özellikle kil gibi kohezyonlu zeminlerin geoteknik özelliklerinin uçucu kül ile

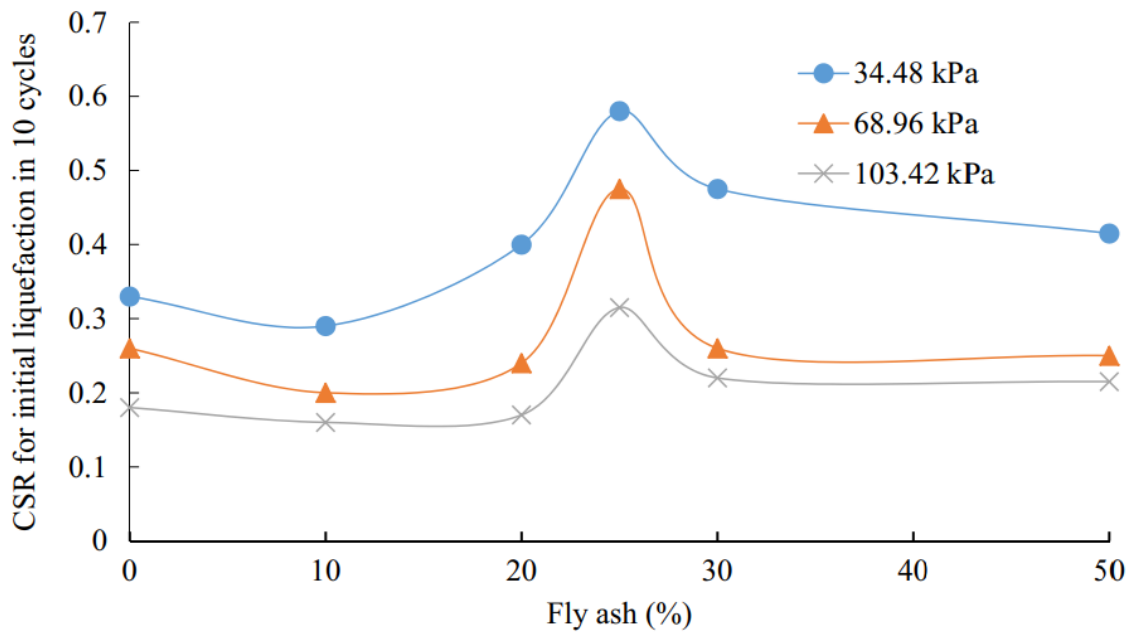
iyileştirilmesi konusunda hem ulusal (Tokyay ve Erdoğan 1998; Alkaya, 2009; Aytekin, 2009; Ünver, 2015; Yılmaz, 2016) hem de uluslararası alanda (Usmen ve ark., 1987; Chu ve Kao, 1993; Verma ve ark., 1998; Edil ve ark., 2006; Phanikumar, 2009; Scott ve Ferguson, 2005; Cetin ve ark., 2010; Sharma ve ark., 2012; Dissanayake ve ark., 2017) birçok bilimsel araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar göstermiştir ki, kohezyonlu zeminlerin Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), serbest basınç mukavemeti, kesme dayanımı-mukavemeti esneklik modülü gibi mühendislik parametrelerinde uçucu kül ilavesi sonrası önemli derecede iyileşmeler gözlemlenmiştir (Trzebiatowski ve ark., 2004; Edil ve ark., 2006; Prabakar ve ark., 2004; Mir ve Sridharan, 2013). Örneğin, Wasti (1990), killi zeminlerin plastisite ve oturma özelliklerinin puzolonik uçucu kül ile stabilize edilebileceğini göstermiştir. Indraratna ve ark. (1995) Bangkok bölgesi killilerine %18 uçucu kül ve %5 kireç ekleyerek ortaya çıkan karışımların on dört günlük kür süresi sonucunda serbest basınç dayanımının ortalama 2-3 katına çıktığını gözlemlemişlerdir. Acosta ve ark. (2003) taşıma gücü zayıf olan zeminlere %0-30 oranında uçucu kül ilave etmiş ve ortaya çıkan karışımların CBR ve serbest basınç dayanım performanslarını deneysel olarak araştırmıştır. İlgili çalışmada, %18 uçucu kül katkısının zeminin mekanik özelliklerini dört kat artırdığı fakat uçucu kül oranının belirli bir yüzdeyi aşması ile beklenen aksine zemin dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir.

2.2.5 Uçucu Küllerin Zeminlerin Sıvılaşma Davranışı Üzerindeki Etkileri

Uçucu küllerin kohezyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik olarak literatürde birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, kumlu zeminler üzerindeki etkilerine yönelik yapılmış olan çalışmalar nispeten çok daha azdır. Bu çalışmaların birçoğu statik/monotonik yükler altında gerçekleştirilmiş olup, uçucu küllerin kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik ve sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerine yönelik çalışmalar oldukça az sayıdadır.

Kil veya kum gibi zemin içermeyen saf uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar, efektif çevre basıncı, relatif sıkılık, anizotropik, yükleme frekansı, tekrarlı (dinamik) gerilme oranı (*CSR*) gibi parametrelerin uçucu küllerin tekrarlı yükler altındaki dinamik ve sıvılaşma davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir (Zand ve ark., 2009; Mohanty ve Patra, 2016; Baki ve ark., 2019; Nong ve ark., 2022). Yapılan bazı çalışmalarda, kumlu zeminler farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül ile karıştırılarak kum-uçucu kül karışımları oluşturulmuştur. Ortaya çıkan bu karışımlar tekrarlı yükler altında teste tabi tutularak uçucu kül ilavesinin kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki

etkileri incelenmiştir (Chattaraj ve Sengupta, 2017; Keramatikerman ve ark., 2017; Kolay ve ark., 2019; Barman ve Singh, 2020). Chattaraj ve Sengupta (2017), uçucu külün kumdan daha yüksek sıvılaşma potansiyeline, bir başka ifade ile, daha düşük sıvılaşma direncine sahip olduğunu belirtmiştir. Keramatikerman ve ark. (2017), %0-6 uçucu kül içeriğine sahip kum numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışmalarda, daha yüksek uçucu kül içeriğine sahip kum numunelerinin sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğu sonucuna varmıştır. Kolay ve ark. (2019), kum-uçucu kül karışımlarının sıvılaşma direncinin, uçucu kül içeriğinin (UK) %0'dan %20'ye çıkması ile bir miktar azaldığını, %20 ile %25 uçucu kül aralığında arttığını, >%25 uçucu kül içeriğinde tekrar azalma eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Farklı oranlarda uçucu kül içeren kumlu zeminlerin farklı efektif çevre basıncı altındaki (ön/başlangıç) sıvılaşma dirençleri (Kolay ve ark., 2019)

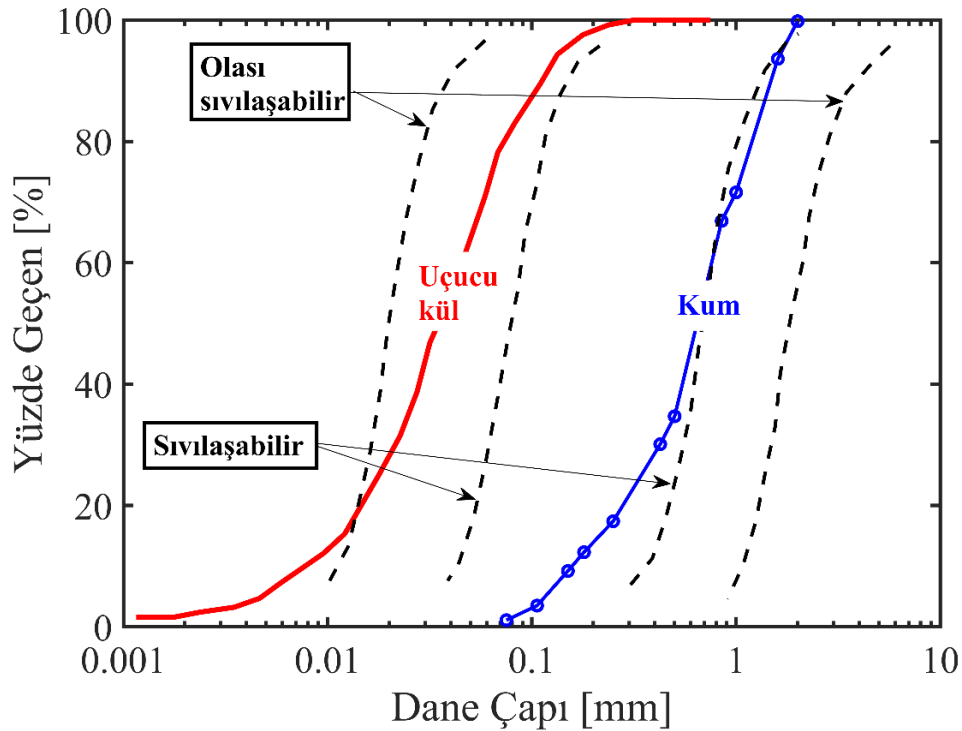
Yukarıda görüldüğü üzere, silt boyutundaki ince daneli malzeme olan uçucu küllerin kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerine yönelik yapılmış olan çalışmalar birbirinden farklı sonuçlar ortaya koymaktadır ve bu konuda yeni laboratuvar çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, deneysel çalışmaların tümü Muş Alparslan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı. Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, deneylerde kullanılan malzemeler ve özellikleri, kullanılan dinamik üç eksenli deney aletinin temel özellikleri ve temel prensipleri ile alakalı bilgiler verilmiştir. Deney numunelerinin hazırlanması ve teste tabi tutulması sırasında izlenen deney yöntemleri ve esasları detaylı şekilde açıklanmıştır.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Temel Fiziksel-Kimyasal Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, temiz kum ve uçucu kül olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler belirlenen oranlarda karıştırılarak kum-uçucu kül karışımları elde edilmiştir. Malzemelerin dane dağılımı, özgül ağırlık ve boşluk oranı gibi temel fiziksel özelliklerini belirlemek için elek analizi, özgül ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, genel itibari ile ASTM standartlarındaki prosedürler izlenmiştir. Şekil 3.1'de test malzemelerine ait dane **çapı** (boyutu) dağılım eğrileri ve bunların Tsuchida (1970) tarafından önerilen sıvılaşma sınırları ile karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan temiz kum ve Seyitömer uçucu külüne ait dane çapı dağılım eğrileri ve Tsuchida (1970) tarafından önerilmiş olan sıvılaşma eğrileri ile karşılaştırılmaları

3.1.1 Kum

Deneylerde kullanılan silis kumu, doğal olarak oluşmuş, ince ve yuvarlak daneleri olan malzemedir ve Türkiye'nin Çanakkale ilinden temin edilmiştir. Elek analizi ve özgül ağırlık deneylerinden bir kesit ile kuma ait temel fiziksel özellikler Şekil 3.2 ve Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Kumun elek analizi ASTM D6913 (2017) standardına uygun olarak yapılmıştır. Etkin dane boyutu (D_{10}) 0.16 ve ortalama dane boyutu (D_{50}) 0.6 olan bu kumun üniformalık katsayısı (C_u) ve derecelenme katsayısı (C_c) sırasıyla 4.75 ve 1.49'dur. Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmaktadır. ASTM D854 (2014) standardına göre özgül ağırlığı (G_s) 2,63'tür. Ayrıca, kumun ASTM D4253-Metot 1A (2019) ve ASTM D4254-Metot A (2016) standartlarına göre belirlenmiş minimum boşluk oranı (e_{min}) ve maksimum boşluk oranı (e_{max}) sırasıyla 0.398 ve 0.63'tür.



Şekil 3.2. Elek analizi ile kumun dane çapı dağılımının ve piknometre yöntemi ile özgül ağırlık belirlenmesi

Çizelge 3.1 Kumun fiziksel özellikleri

Zemin Parametresi	Podima Kum
Etkin Dane Boyutu, D_{10} [mm]	0.16
Ortalama Dane Boyutu, D_{50} [mm]	0.65
Üniformalık Katsayısı, C_u	4.75
Derecelenme Katsayısı, C_c	1.49
Özgül Ağırlık, G_s	2.63
Zemin Sınıfı	SP
Maksimum Boşluk Oranı, e_{max}	0.63
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0.398

3.1.2 Uçucu Kül

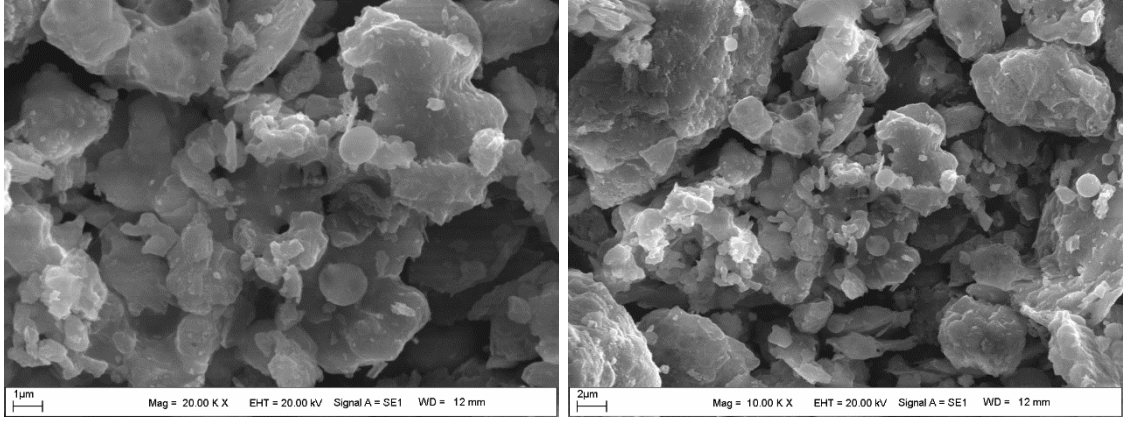
Uçucu kül, Türkiye'nin Kütahya ilindeki Seyitömer termik santralinden elde edilmiştir. Uçucu külün ASTM D854 (2014) standardına göre hesaplanan özgül ağırlığı 2,10'dur. Seyitömer uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine literatürde yapılmış farklı çalışmalar bulunmaktadır (Bayat, 1998; Cicek ve Tanrıverdi, 2007). Lazer parçacık boyutu analizörü ile yapılan dane boyutu dağılımı analizine göre, uçucu külün ortalama dane boyutunun 28 µm olduğu belirtilmiştir (Demir ve ark., 2009).

Türker ve ark. (2009) tarafından Seyitömer Termik Santrali uçucu külü üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları ve ASTM C 618 sınırları karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. ASTM C 618'e göre, Seyitömer uçucu külünde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %84.34 (%70.00'in üzerinde) olması ve CaO miktarının %4.26 (%10'dan daha az) olması hasebiyle F sınıfı yani düşük kireçli uçucu kül sınıfına girmektedir. Yine aynı çalışmada, Seyitömer uçucu külü üzerinde mineralojik analizler yapılmış X-ışınları difraktogramında bu külün camsı fazca zengin olduğu ve silissi karakter taşıdığı saptanmıştır.

Çizelge 3.2. Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (Türker ve ark., 2009)

Bileşim (%)	Seyitömer Uçucu Külü	ASTM C 618 Sınırları	
		F	C
SiO_2	54.49	-	-
Al_2O_3	20.58	-	-
Fe_2O_3	9.27	-	-
S+A+F	84.34	>70	>50
CaO	4.26	-	-
MgO	4.48	-	-
SO_3	0.52	<5	<5
K_2O	2.01	-	-
Na_2O	0.65	-	-
K. K	3.01	<6	<6
Cl	0.006	-	-
Serbest CaO	0.26	-	-

Seyitömer uçucu külü iyi yandığı için açık gri renge sahiptir. Uçucu külün morfolojik özellikleri ve mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 3.3'te gösterilen SEM görüntülerine göre, Seyitömer uçucu külü, düzensiz ve bir kısmı da küresel şekilli olan farklı morfolojide taneciklerden oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Uçucu külün mikro yapısını gösteren SEM görüntüleri

3.1.3 Kum ve Uçucu Kül Karışımı

Silt veya kil gibi ince dane içeren kumlu zeminlerin drenajsız monotonik ve drenajsız gerilme-şekil değiştirme davranışının değerlendirilmesinde ve ince dane etkisinin kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı ve karakteristikleri üzerindeki etkisini anlamada uygun endeks parametresi seçiminin önemi vurgulanmıştır (Monkul ve ark., 2016). Literatürde, global boşluk oranı (e), intergranüler boşluk oranı (e_s), interfine boşluk oranı (e_f) ve relatif sıkılık (D_r) gibi farklı endeks parametreleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, silt boyutundaki plastik olmayan uçucu kül ilavesinin kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmede geoteknik mühendisliğinde en yaygın kullanım alanına sahip olan relatif sıkılık (D_r) endeks parametresi kullanılmıştır. Bir zemin numunesinin relatif sıkılık değerini hesaplamak için minimum boşluk oranı (e_{min}) ve maksimum boşluk oranı (e_{max}) değerinin deneysel olarak bulunması gereklidir:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.1)$$

Bu amaçla, temiz kum zemine değişik oranlarda (ağırlıkça) uçucu kül katarak kum-uçucu kül karışımları elde edilmiştir. Karışımdaki uçucu kül oranı veya yüzdesi (UK) denklem (3.2)'e göre hesaplanmıştır:

$$UK = \frac{W_{uçucu-kül}}{W_{kum} + W_{uçucu-kül}} \quad (3.2)$$

Burada W_{kum} karışıma katılan kumun kuru ağırlığını ve $W_{uçucu-kül}$ karışıma katılan uçucu külün kuru ağırlığını ifade etmektedir.

Farklı oranlarda hazırlanan karışımlar kullanılarak ve ASTM D4253-Metot 1A (2019) ve ASTM D4254-Metot A (2016)'da belirtilen prosedürler izlenerek kum-uçucu kül karışımlarının minimum ve maksimum boşluk oranı deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, karışımların özgül ağırlığı ASTM D854'e (2014) göre ölçülmüştür. Şekil 3. 4'te minimum boşluk oranı deneylerinden bir kesit görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus minimum ve maksimum boşluk oranı değerlerini hesaplamak için literatürde farklı yöntemler mevcuttur. Her yöntemin kendine özgü avantajlarına karşılık bazı dezavantajları bulunmaktadır ve kullanılan yöntemle göre farklı sonuçlar elde edilebilmektedir (Lade ve ark., 1998). Bu çalışmada kullanılan ASTM standartları, özellikle %15'e kadar ince daneler (0,075 mm'den daha ince) içeren kumlar için geçerli olduğu belirtilmiştir. Geçmiş yıllarda yapılan bazı çalışmalar, bu yöntemlerin daha yüksek ince dane oranı içeren kumlu zeminlerde de başarıyla kullanılabileceğini ve tutarlı minimum ve maksimum boşluk oranı değerleri elde edilebileceğini göstermiştir (Thevanayagam, 1998; Amini ve Qi, 2000; Tao ve ark., 2004).



Şekil 3.4. Minimum boşluk oranının bulunması

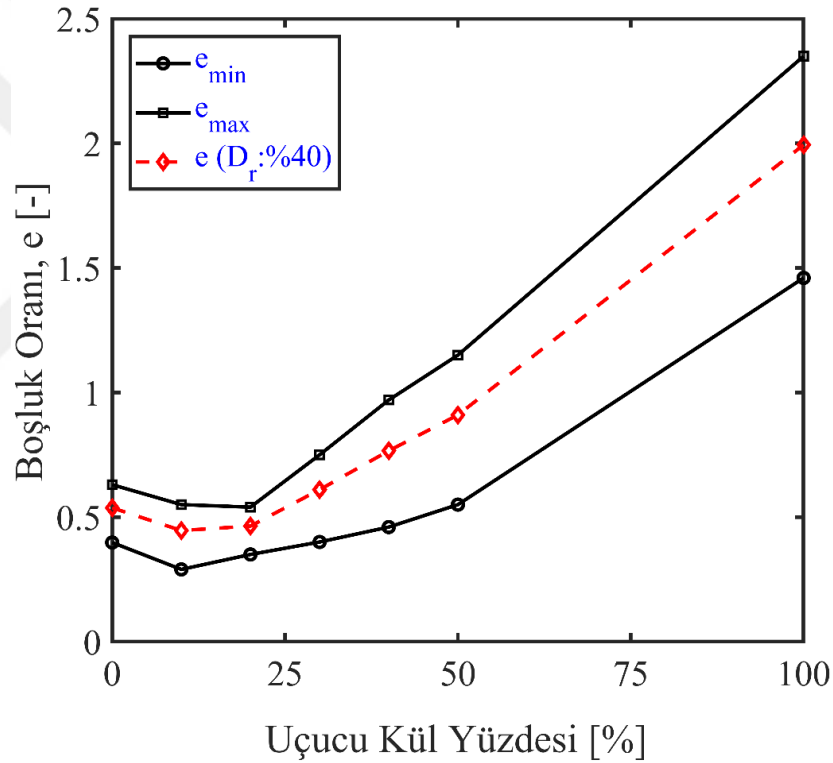
Farklı uçucu kül oranlarında hazırlanan kum-uçucu kül karışımları için hesaplanan özgül ağırlık (G_s), minimum boşluk oranı (e_{min}) ve maksimum boşluk oranı (e_{max}) değerleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, uçucu kül içeriği arttıkça karışımların özgül ağırlığının azalmaktadır.

Şekil 3.5'te hesaplanan minimum ve maksimum boşluk oranlarının uçucu kül yüzdesine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Şekilden anlaşılabileceği üzere, kum-uçucu kül karışımında minimum ve maksimum boşluk oranı değerleri başlangıçta bir miktar

düşmüş ancak uçucu kül içeriğinin %10'un üzerine çıkması ile bu hesaplanan değerlerde artış olmuştur. Gözlemlenen artış özellikle %20 uçucu kül oranından sonra daha belirgin hale gelmiştir.

Çizelge 3.3. Farklı uçucu kül yüzdesinde hazırlanan kum-uçucu kül karışımları için hesaplanan özgül ağırlık, minimum boşluk oranı ve maksimum boşluk oranı değerleri

Uçucu Kül Yüzdesi [%]	G_s	e_{min}	e_{max}
0 (saf kum)	2.63	0.398	0.63
10	2.58	0.29	0.55
20	2.52	0.35	0.54
30	2.42	0.40	0.75
40	2.38	0.46	0.97
50	2.36	0.55	1.15
100 (saf uçucu kül)	2.10	1.46	2.35



Şekil 3.5. Minimum boşluk oranı ve maksimum boşluk oranının kum-uçucu kül karışımındaki uçucu kül yüzdesine bağlı olarak değişimi

3.2 Dinamik Üç Eksenli Testler

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin statik veya dinamik yükler altındaki davranışını tespit etmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel itibari ile arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve nümerik modeller olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. Arazi deneyleri ile zemin doğal halinde ve farklı derinliklerde test

edilebilir. Fakat deprem gibi sismik etkiler arazi ortamında simüle edilemeyeceği için zeminin sıvılaşma potansiyeli ve karakteristikleri ile ilgili parametreler doğrudan arazi deneyleri ile belirlenememektedir. Zeminin deprem sırasındaki davranışını yerinde ve gerçeğe yakın olarak tespit edebilmek adına ilgili alana deprem öncesinde sensörler yerleştirilmiş olması ve bu sensörler vasıtasıyla gerçek zamanlı verilerin toplanarak analiz edilmesi gerekmektedir. Bu oldukça zor ve maliyetli bir süreçtir ve dolayısıyla araştırmacılar alternatifler yöntemlere başvurmaktadırlar. Geçmiş depremlerden elde edilmiş Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verileri yardımıyla oluşturulmuş ampirik metotlar sıklıkla bu amaç için kullanılmaktadır.

Laboratuvar çalışmaları için sarsma tablası ve santrifüj deneyleri gibi fiziksel model test sistemleri dışında dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme, dinamik basit kesme gibi nispeten daha küçük numunelerin test edildiği dinamik deney sistemleri geliştirilmiştir. Bu kısımda, dinamik üç eksenli test yönteminin temel prensipleri, hesap yöntemleri ile kullanılan test sisteminin genel özellikleri ve deney detayları verilmiştir.

3.2.1 Dinamik Üç Eksenli Testlerin Temel Prensibi ve İlkeleri

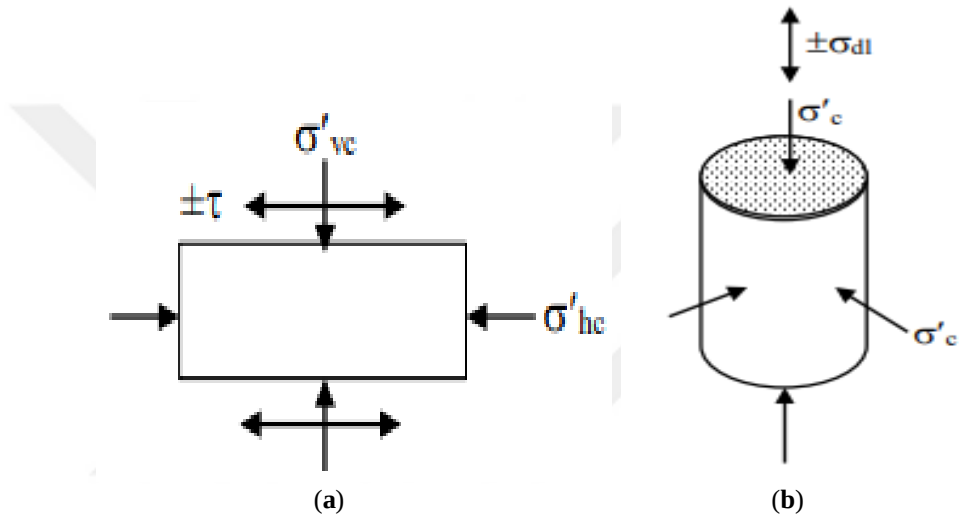
Towhata (2008) deprem sırasında herhangi bir zemindeki ideal gerilme durumu ve izotropik olarak konsolide edilmiş ve belirli bir efektif çevre basıncı (σ'_c) altındaki zemin örneğinin tekrarlı üç eksenli deney sırasındaki gerilme durumunu aşağıdaki gibi açıklamıştır:

Arazideki zeminler için, deprem öncesinde yatay düzlemde hiç kayma gerilmesi bulunmamaktadır. Deprem esnasında zeminde düşey olarak yayılan S dalgaları yatay düzlemde tekrarlı kayma gerilmelerine (τ) neden olmaktadır. Oluşan kayma gerilmeleri altında kumlu zeminlerin iç yapısında negatif ve pozitif yönlerde genleşme meydana gelmekte ve bu da aşırı boşluk suyu basıncının oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 3.6'a).

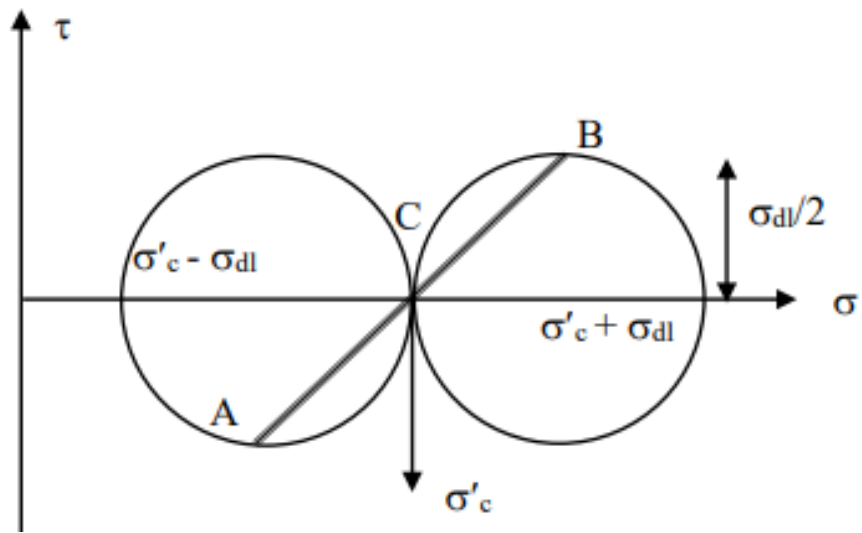
Dinamik üç eksenli denelerde, zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma dayanımını bulmak için izotropik olarak konsolide edilmiş zemin örneği büyük deformasyonlar gözlenene kadar drenajsız koşullarda tekrarlı eksenel gerilmelere ($\pm\sigma_{dl}$) maruz bırakılmaktadır. Arazideki tekrarlı kayma gerilmeler ($\pm\tau$) laboratuvar ortamında tekrarlı eksenel gerilmeler ($\pm\sigma_{dl}$) şeklini almaktadır (Şekil 3.6'b).

Zeminlerin tekrarlı üç eksenli deneye tabi tutulması sırasında elde edilen tipik Mohr gerilme daireleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir. C noktası zemin örneğinin başlangıç gerilmesi olmadan konsolide edildiğini göstermektedir. Tekrarlı yüklemelerin etkimesi

ile normal gerilmeler ($\sigma'_c + \frac{\pm\sigma_{dl}}{2}$) ve kayma gerilmeleri ($\frac{\pm\sigma_{dl}}{2}$) arasında yani A noktası ile B noktası arasında 45° düzlem üzerinde değişmektedir. Zemin numunesi su ile tam doygun olduğunda normal gerilmelerde meydana gelen değişimlerin tamamı boşluk suyuna iletildiği için normal gerilmede bir değişim olmadığı varsayılır. Dolayısıyla arazi koşullarındaki efektif gerilme (σ'_{vc}), tekrarlı kayma gerilmesi ($\pm\tau$) ve gerilme oranı ($\frac{\tau}{\sigma'_{vc}}$) laboratuvar ortamındaki efektif çevre gerilmesi/basıncı (σ'_c), eksenel/kayma gerilmesi ($\frac{\pm\sigma_{dl}}{2}$) ve gerilme oranına ($\frac{\sigma_{dl}}{2\sigma'_c}$) eşdeğer olmaktadır.



Şekil 3.6. (a) Arazideki zeminlerde sismik gerilme durumu ve (b) izotropik olarak konsolide edilmiş zemin örneğinin tekrarlı üç eksenli deney sırasındaki gerilme durumu (Karakan, 2015)

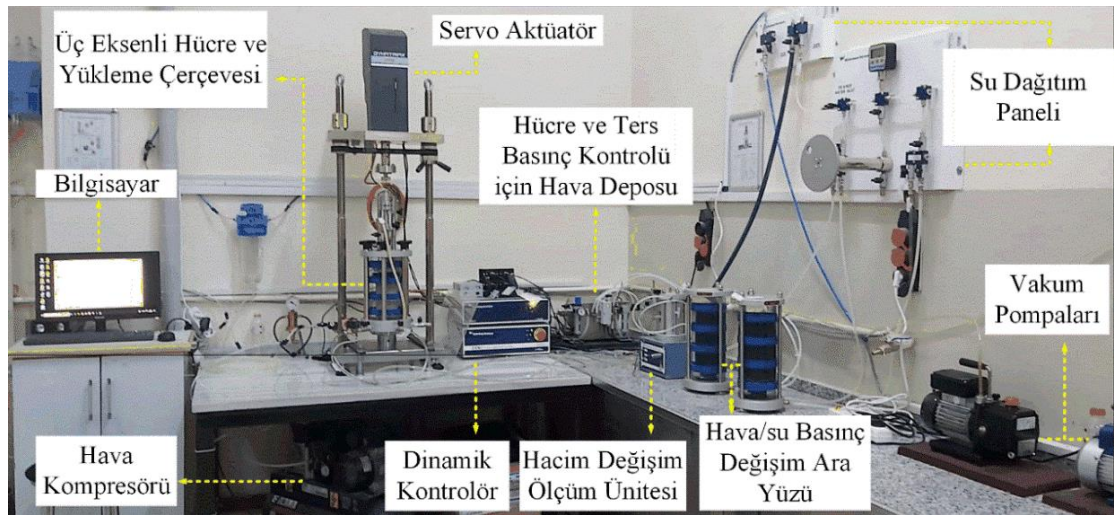


Şekil 3.7. Tekrarlı üç eksenli deney sırasındaki Mohr gerilme daireleri (Karakan, 2015)

Dinamik üç eksenli test cihazı özellikle suya doygun örselenmemiş kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışının ve sıvılaşma potansiyelinin kontrollü ve tekrarlanabilir test koşulları altında belirlenmesine olanak sağlamaktadır ve maliyeti birçok yöntemle göre çok daha düşüktür. İlk kez Seed ve ark. (1966) tarafından kullanılan dinamik üç eksenli test cihazı ileriki yıllarda geoteknik deprem mühendisliğinde kullanılan en sık kullanılan sistemlerden biri olmuştur. Li ve ark. (1988) otomatik dinamik üç eksenli test cihazı geliştirmişlerdir. Teknolojideki ilerlemelere bağlı olarak test ve yükleme koşulları üzerinde tam kontrol sağlayan, ileri düzey veri toplama ve servo sistemlerine sahip dinamik üç eksenli test sistemleri günümüzde sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Dinamik üç eksenli deneyde, belirli bir çevre basıncı altındaki zeminler drenajsız ortamda eksenel yönde tekrarlı deviator gerilmelere maruz bırakılmaktadır.

3.2.2 Dinamik Üç Eksenli Test Sistemi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm dinamik deneylerde Wykeham Farrance-Controls Groups (Milan, İtalya) tarafından üretilen Dynatriax EmS adlı dinamik üç eksenli test sistemi kullanılmıştır. Sistemin ana bileşenleri, dinamik servo aktüatör, dinamik kontrolör, iki kolonlu yükleme çerçevesi, otomatik hacim değişim ölçüm ünitesi, üç eksenli deney hücresi, hava/su basınç değişim ara yüzü, hava kompresörü, hava deposu, vakum pompaları ve su dağıtım paneli olarak sıralanabilir. Bununla birlikte sistem farklı kontrol, ölçümleme ve kayıt sistemlerine sahiptir. Şekil 3.8’de dinamik üç eksenli deney aletinin genel görünüşü görülmektedir.



Şekil 3.8. Muş Alparslan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı. Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zemin Mekanikliği Laboratuvarında bulunan dinamik üç eksenli test sisteminin genel görünüşü

Elektromekanik servo aktüatöre sahip bu sistem basınçlı hava ve hidrolik güç besleme ünitesine gereksinim duymaksızın arzu edilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda eksenel yük uygulayabilmektedir. Aynı zamanda ± 15 kN dinamik ve ± 10 kN statik yükleme kapasitesine sahip olan bu sistem deney şartlarına göre 10 Hz'den daha fazla çalışma/test frekansına izin verebilmektedir. Hücre ve ters (geri) basınç ile düşey eksenel yük ve/veya deplasman için üç eksenli kapalı çevrim kontrol sistemine sahiptir ve deneylerin dinamik aşamasında hücre basıncı ve ters (geri) basınç dengelemesini ve kontrolünü otomatik olarak sağlayabilmektedir.

Dynatriax EmS sistemi yük, yer değiştirme, su basıncı ve numunenin hacim değişiminin belirlenmesi ve kaydedilmesine olanak sağlayan sensörlere/transducers sahiptir. Ekseriyeti dinamik kontrol ünitesine bağlı olan ve elektrikle çalışan sensörler şunlardır: otomatik hacim değişim ölçüm ünitesi (100 cc kapasite ve ± 0.1 cc hassasiyet), düşey eksenel kuvvet ölçen ve su altında kullanılabilen bir yük hücresi (0-25 kN kapasite ve $\pm \%0.05$ FS doğruluk), düşey yöndeki eksenel yer değiştirmeyi/deplasmanı ölçmede kullanılan ve doğrusal değişken türevsel transformatör (LVDT) olarak adlandırılan deplasman ölçerler (± 25 mm kapasite ve $\%0.2$ FS doğruluk), boşluk suyu basıncı, hücre basıncı ve ters (geri) basıncı ölçmede kullanılan basınç transdüserleri (0-1000 kPa kapasite ve $\pm \%0.25$ FS doğruluk). Bu sensörler düzenli olarak kalibre edilmektedir.

Yüksek basınca dayanıklı deney hücresi, üzerinde drenaj hatları bulunduran alt başlığa O-ring olarak adlandırılan lastik contalar ve vidalar kullanılarak sabitlenmekte ve hava veya suya karşı sızdırmazlık sağlanmaktadır. Deneylerde tekrarlı yükleme safhasına kadar olan tüm basınçlar hava deposu, hava/su basınç değişim ara yüzü, su dağıtım paneli ve vakum pompalarından oluşan ünite tarafından kontrol edilmektedir. Hava deposu birisi hücre basıncı ve diğeri ters basıncı kontrol etmeye yarayan iki adet servo valfe sahiptir. Numunelerin dış yüzeyine etkiyecek olan çevre basıncı (σ_3), hava/su basınç değişim ara yüzü tarafından hücreye verilen hava basıncı hücrenin içindeki havası alınmış suya aktarılarak kontrol edilmektedir. Numunenin iç kısmına uygulanacak olan ters basınç (u_0), hava/su basınç değişim ara yüzü tarafından sağlanan hava basıncının numune içindeki suya iletilmesi ile sağlanmaktadır. Numuneye birisi üstten ve diğeri alttan olmak üzere üç farklı drenaj hattı bağlanmaktadır. Bu hatlar numuneleri doygunluğa erişirmede kullanılan su ve karbondioksit (CO_2) gazı geçişinde, numuneye ters basınç uygulamada ve boşluk suyu basıncı ölçümünde kullanılmaktadır. Alt kısımdaki drenaj hatlarının bir tanesine bağlı olan sensör ile boşluk suyu (u) veya aşırı boşluk suyu basıncı

(u_e) anlık olarak ölçülebilmektedir. Konsolidasyon veya eksenel yük altında numunede meydana gelen hacim değişimleri ise, drenaj hatları yoluyla numunenin üst kısmına bağlanmış olan ± 0.1 cc hassasiyete sahip otomatik hacim değişim ölçüm ünitesi ile ölçülmektedir. Su dağıtım paneli ve vakum pompaları ise numuneleri hazırlama ve doygunluğa erişirme sürecinde kullanılmaktadır. Vakum pompaları ve vakum saati kullanılarak membran ile sarılı numunelerin içine vakum uygulanabilmektedir. Panel üzerinde yer alan valfler yardımıyla havası alınmış su numunelerin içinden kontrollü olarak geçirilebilmektedir. Şekil 3.9’da deneylerde kullanılan üç eksenli deney hücresinin ve Şekil 3.10’da ise hava ve su kontrol birimlerinin genel görünümü görülmektedir.



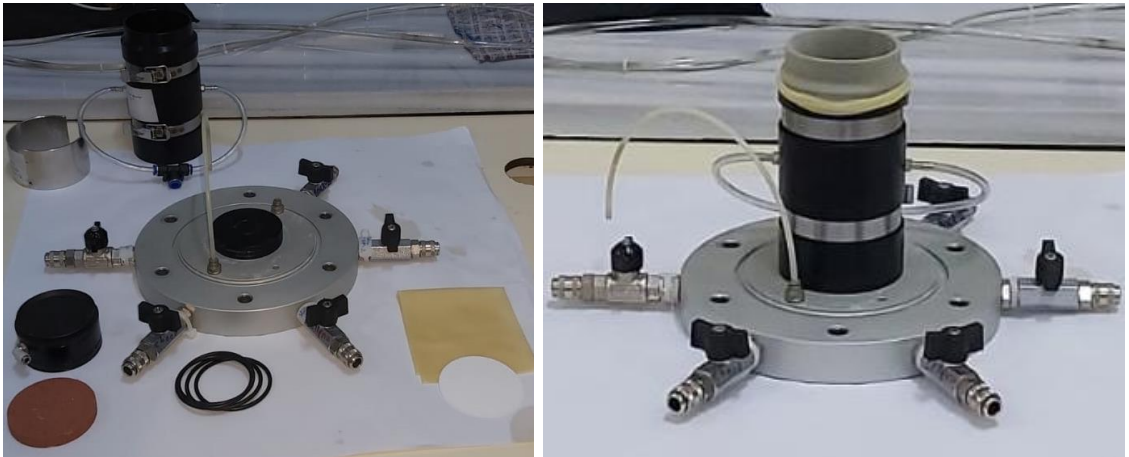
Şekil 3.9. Üç eksenli deney hücresinin görünümü



Şekil 3.10. Hava ve su kontrol birimlerinin genel görünümü

Tam otomatik ve bilgisayar kontrollü olan dinamik üç eksenli test cihazı izotropik veya anizotropik olarak konsolide edilmiş zeminlerin drenajlı veya drenajsız koşullarda ve statik veya tekrarlı yükler altındaki mukavemet, gerilme-şekil değiştirme, gerilme izleri gibi geoteknik özelliklerinin laboratuvar koşullarında belirlenmesinde kullanılabilir. Deneyler yük (gerilme/stress) veya deformasyon (gerinim/strain) kontrollü yapılabilen ve numunelere uygulanan statik veya dinamik yüklerin genlikleri ve frekansı otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Cihaz yazılımı ve veri toplama sistemi, doyurma, izotropik konsolidasyon ve statik veya dinamik yük altında kesme gibi farklı test aşamalarını kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamak ve bu aşamalar sırasında elde edilen verileri bilgisayara aktarabilmektedir.

Deneylerde, dinamik üç eksenli test sistemi dışında alt ve üst başlıklar-adaptörler, kauçuk-lastik membranlar, poroz taşlar, filtre kağıtlar, O-ringler ve iki parçalı kalıplar (split mold) gibi farklı türde numune hazırlama aparatları ve yardımcı aletler kullanılmaktadır. Şekil 3.11’de alt ve üst başlık ile numune hazırlama aparatlarının genel görünümü görülmektedir. Alt başlık ve vakum üst başlıklara drenaj hatları bağlıdır ve 70 mm çapa sahiptir. Pürüzlü yapıda olan poroz taşlar konsolidasyon sırasında suyun hem alt hem de üst başlığa doğru drene olmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Numunelerin hazırlanması sırasında, numunelerin yan yüzeylerinin düzgün ve dik bir yapıda olmasını sağlamak için split mold olarak adlandırılan ve kolayca sökülüp takılabilen iki parçalı kalıp kullanılmaktadır. Bunun yanında deneyler sırasında numuneleri dıştan çevreleyen kauçuk-lastik membranlar kullanılmaktadır.



Şekil 3.11. Alt ve üst başlık ile numune hazırlama aparatlarının genel görünümü

3.2.3 Dinamik Üç Eksenli Deney Yöntemi Esasları

3.2.3.1 Numune Hazırlama

Doğadaki zemin tabakalarının durumunu yansıtan örselenmemiş zemin numunelerinin alınması ve laboratuvar ortamında teste tabi tutulması ciddi zaman kaybına neden olan ve yüksek maliyet gerektiren bir süreçtir. Bu işlem özellikle doymun halde bulunan kum gibi kohezyonsuz zeminler için çok daha zahmetlidir. Doğadaki mevcut zemin koşullarının laboratuvar ortamında simüle edilerek arazi durumunu en ideal şekilde temsil eden numunelerin hazırlanması ve teste tabi tutulması zaman kaybının önlenmesi ve maliyetin düşürülmesi açısından oldukça önemlidir. Geoteknik deprem mühendisliğinde, kuru yağmurlama (dry pluviation), ıslak veya suda yağmurlama (wet pluviation), kuru sıkıştırma veya tokmıklama (dry tamping), ıslak, nemli veya yarı doymun sıkıştırma (moist tamping), bulamaç çökeli (slurry deposition), kuru ve ıslak şişleme (dry or wet rodding), düşük veya yüksek frekanslı titreştirme (vibration with low or high frequency) ve huniden kuru yağmurlama veya dökme (dry funnel deposition) gibi birçok farklı yöntem farklı sıklıkta örselenmiş veya yeniden oluşturulmuş numunelerin hazırlanmasında kullanılabilmektedir. Hazırlanan zemin numunelerinin dane yapısı ve yerleşimi kullanılan yöntemle göre oldukça değişiklik gösterebilmektedir. Dolayısıyla farklı numune hazırlama yöntemleri ile hazırlanan suya doymun kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik ve sıvılaşma davranışı oldukça farklı olabilmektedir (Mulilis ve ark., 1977).

Numune hazırlama yönteminin seçiminde deneyin yapılış amacı, deney cihazının sınır koşulları, kullanılan zeminin türü ve özellikleri, yöntemin tekrarlanabilirliği, uygulama kolaylığı ve zamanı gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada, huniden kuru yağmurlama veya dökme (dry funnel deposition) yöntemi kullanılarak üç eksenli test numunelerinin hazırlanmıştır. Birçok yöntemle göre daha az zahmetli olan ve zaman tasarrufu sağlayan bu yöntem aynı zamanda gevşek ve orta sıklıkta ve farklı oranlarda uçucu kül içeren ve üniform-homojen yapıya sahip örnekler hazırlanmasına olanak sağlamıştır. Uygulanan deney hazırlama yöntemi ve aşamaları aşağıda belirtilmiştir.

Ön hazırlık olarak kum zemine ağırlıkça farklı oranlarda uçucu kül katılmış sonrasında el ve kaşık yardımıyla karıştırılmıştır. Homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiş ve karışımların homojenliği görsel olarak kontrol edilmiştir (Şekil 3.12). Bunun yanında deneylerde kullanılmak üzere yeteri miktarda havası alınmış su vakum yöntemiyle hazırlanmıştır. Havası alınmış su drenaj

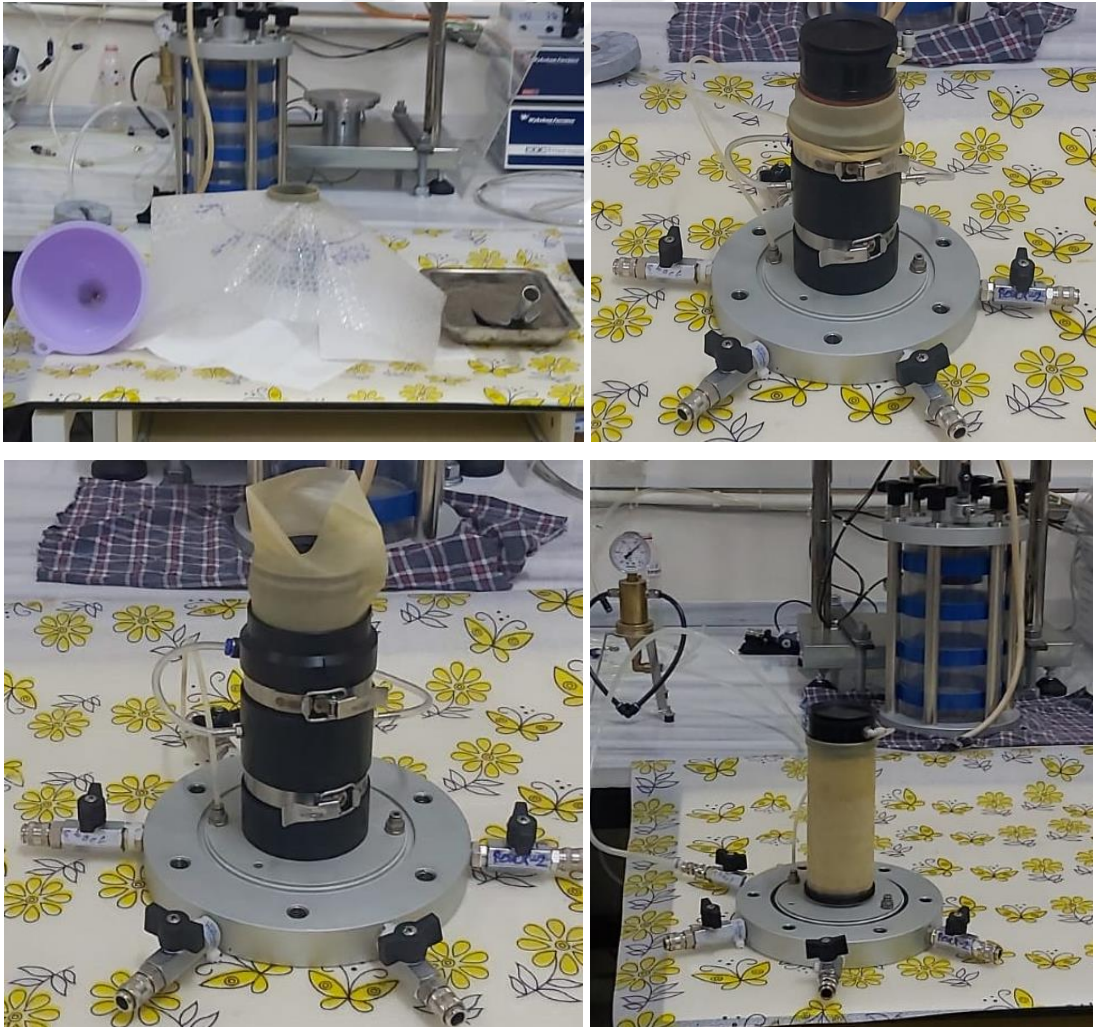
kanallarından geçirilmiş ve bu işlemlerden sonra üç eksenli deney numunelerinin hazırlanmasına başlanmıştır.



Şekil 3.12. Farklı oranlarda uçucu kül karışımlarının elde edilmesi

70 mm çaplı poroz taş ve filtre kâğıdı alt drenaj borularının takılı olduğu alt başlık üzerine yerleştirilmiştir. 0.25 mm kalınlığa ve 70 mm çapa sahip kauçuk-lastik membran uygun çaptaki iki adet O-ring yardımıyla alt başlığa monte edilmiştir. Daha sonra, 70 mm çapında ve 140 mm boyunda numuneler hazırlamaya olanak sağlayan ve iki parçadan oluşan kalıp yerleştirilmiştir. Membran üst taraftan kalıba gergin bir şekilde bağlanmıştır. Vakum uygulayarak membran ile kalıp arasındaki hava alınmış ve membran gergin hale getirilmiştir. Önceden belirli uçucu kül yüzdelерinde hazırlanmış ağırlığı belirlenmiş ve kuru halde bulunan kum-uçucu kül karışımları 3 mm çaplı bir boruya sahip huni yardımı ile belirli bir yükseklikten altı tabaka halinde silindirik kalıbın içine dökülmüştür. Doldurma işlemi sırasında sabit döküm yüksekliğinin ve numune içinde düzgün ve homojen dağılımın sağlanması adına huni yavaşça yukarı kaldırılmış ve numunelerin simetri eksenini boyunca saat yönü ve/veya saat yönü tersinde dolandırılmıştır. Kalıba lastik tokmak ile belirli sayıda ve şiddette vurularak farklı relatif sıkılıkta numuneler hazırlanabilmektedir. Karışımın etrafa saçılıp ağırlık kaybının yaşanmaması için gerekli

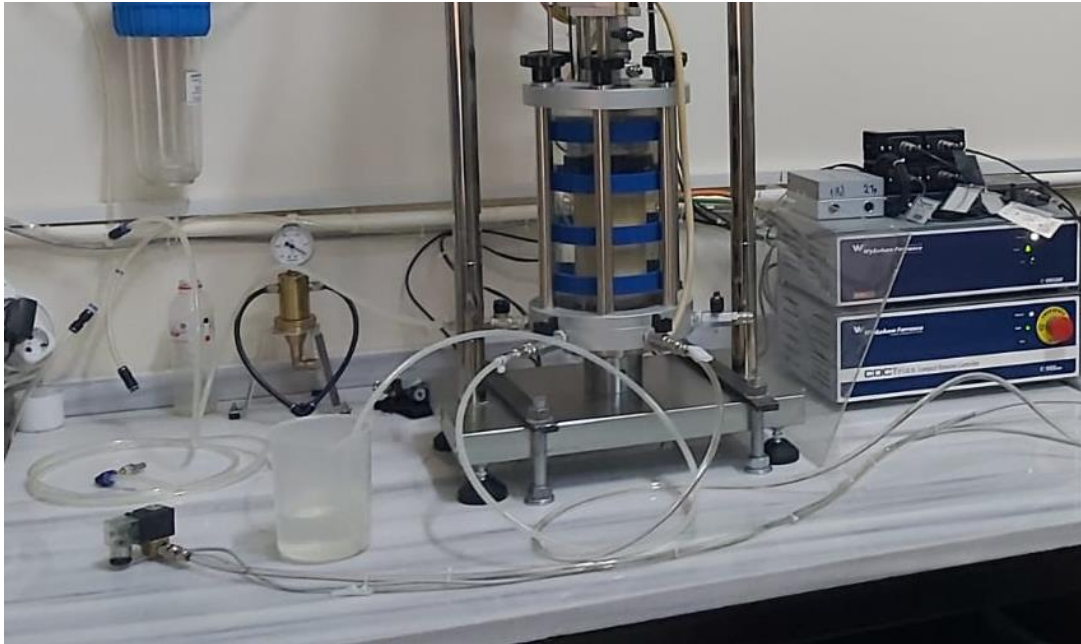
önlemler alınmıştır. Doldurma işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin üst yüzeyi bir cetvel yardımı ile düzlenmiştir. Sırasıyla filtre kâğıdı, poroz taş ve üst (vakum) başlık hazırlanan numuneler üzerine dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Membran üst başlığa iki adet O-ring kullanılarak monte edildikten sonra üst drenaj hattı bir boru yardımı ile üst başlığa takılmıştır. Membran ile çevrili numunelere ters basınç hattı kullanılarak 20 kPa değerinde vakum uygulanmış ve bu sayede kumlu numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra dahi deformasyona uğramadan kendini tutabilmiş ve silindirik şeklini koruyabilmiştir. Kalıp çıkarılan numunelerin boyutları üst, orta ve alt kısımlardan dikkatli bir şekilde ölçülmüş ve ortalama numune çapı ve yüksekliği belirlenmiştir. Deneylerde elde edilen silindirik numunelerin çapları 70 mm ve boy/çap oranları yaklaşık 2 olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.13’de üç eksenli test numunelerinin hazırlanması sürecinde kullanılan aparatların görüntüsü ve hazırlanmış numune örneğinin son hali görülmektedir.



Şekil 3.13. Üç eksenli test numunelerinin deneye hazırlanması ve hazırlanmış numune örneğinin son hali

Üç eksenli hücre üzerinde drenaj hatları bulunan alt başlığa vidalar ile dikkatlice yerleştirilmiş ve hücre içine verilen suyun dışarı sızmasını önlemek adına vidalar iyice sıkılmıştır. Hücrenin içi tamamen havası alınmış su ile doldurulmuş ve numuneler çepeçevre su ile sarılmıştır. Numunelere etkiyen vakum kademeli olarak azaltılıp sıfırlanırken çevre (hücre) basıncı kademeli olarak artırılıp 20 kPa değerine getirilmiştir. Karbondioksit (CO_2) gazının suda içerisindeki çözünürlüğünün havaya göre çok daha fazla olması hasebiyle numune içindeki havanın karbondioksit gazı ile değiştirilmesi numunelerin doygunluğa erişme süresini önemli derecede azaltmaktadır. Bu gerçekten hareketle numunelerin içerisinden belirli bir süre (en az 30 dakika) boyunca karbondioksit gazı geçirilmiştir. Numuneler arasında bulunan boşlukların su ile doldurulması için numunelerden kendi hidrolik yükü altında havası alınmış su geçirilmiştir. Numune içinden geçirilen suyun miktarı belirli bir değere ulaştıktan sonra bu işlem sonlandırılmıştır.

Aktüatöre bağlı olan ve üzerinde yük ölçer bulunan düşey yükleme kolu/şaftı dikkatli ve yavaş bir şekilde indirilerek üst (vakum) başlığa ve dolayısıyla da numuneye bağlanmıştır. Bu işlem sırasında numuneye ilave düşey yük ve deformasyon uygulanmasından özellikle kaçınılmıştır. Düşey deplasman sensörleri, boşluk suyu basınç sensörü ve drenaj boruları yerlerine yerleştirildikten sonra düşey yük ve deplasman değerleri sıfırlanmıştır. Şekil 3.14’de hücre içerisinde yer alan ve içinden karbondioksit ve havası alınmış su geçirilen numune örneği görülmektedir.



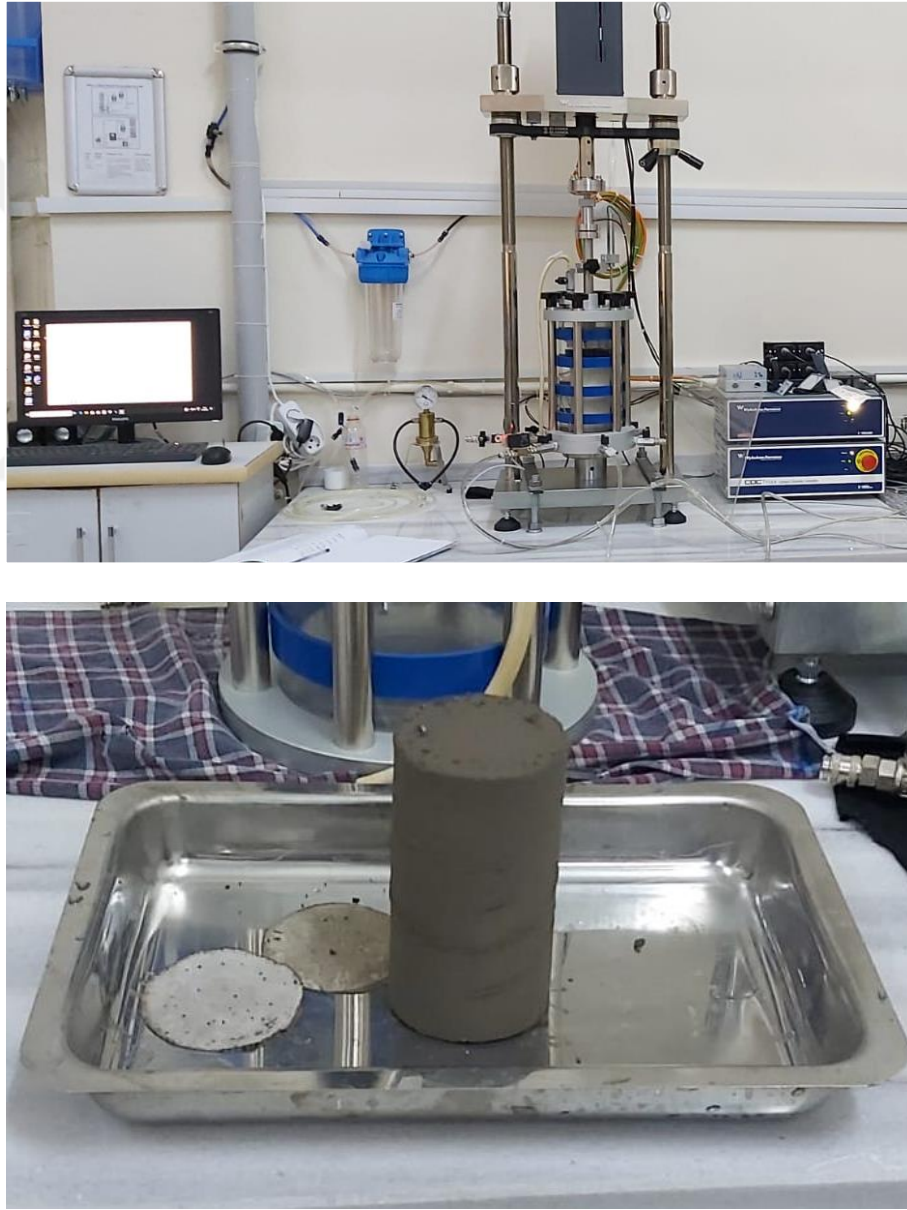
Şekil 3.14. Karbondioksit ve havası alınmış su ile yıkanan numune örneğinin görünümü

Su geçirilen numenlere izotropik gerilme koşullarında ters (geri) basınç uygulanarak tam doygun hale getirilmiştir. Bunun için çevre yani hücre basıncı (σ_3) ve ters basınç (u_0) 50 kPa 'lık aralıklarla kademeli olarak artırılmış ve çevre basıncı ve ters basınç arasındaki fark sabit tutulmuştur ($\sigma'_c = \sigma_3 - u_0 = 10$ kPa). Bu işleme hedeflenen ters basınç değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Numunelerin doygunluk derecesini tespit etmek için Skempton (1954) tarafından önerilen B parametresi kontrolü yapılmıştır. Bunun için drenaj hatları kapatılmış ve ters basınç sabit kalacak şekilde çevre basıncı 10 s gibi kısa bir zaman süresi içerisinde 10 kPa daha artırılmıştır. İzotropik gerilme artışı ilave boşluk suyu basıncına neden olmuş ve boşluk suyu basıncının anlık çevre basıncı artışı karşısındaki değişimi ölçülmüştür. Boşluk suyu basıncındaki artış miktarının (Δu) çevre basıncındaki artış miktarına ($\Delta \sigma_3$) oranı olarak ifade edilen Skempton B parametresi değerinin 0.96 ve üzerinde olduğu durumlarda numunelerin tam doygunluğa eriştiği kabul edilmiştir ($B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} > 0.95$). Tüm deneylerde, kullanılan üç eksenli test sisteminin yazılımı sayesinde düşey basınç değerleri numunelerde ilave düşey yük oluşturmayacak şekilde doyurma işlemi gerçekleştirilmiş ve B değerinin konsolidasyon aşaması öncesinde 0.99 ile 1 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Doygunluğa ulaşan zemin numuneleri izotropik olarak konsolide edilmiştir. Bunun için ters basınç sabit kalacak şekilde çevre basıncı kademeli olarak istenilen efektif çevre gerilmesi değerine ulaşıncaya kadar artırılmıştır. Bu aşamada düşey yöndeki eksenel gerilmeler ile çevre gerilmelerinin aynı oranda artmasına ve numunelere uygulanan gerilmelerin her yönde aynı olmasına dikkat edilmiştir. Hacim değişim ölçüm ünitesine bağlı olan drenaj hattı açılmış ve numunelerde meydana gelen hacim değişimi sabitleninceye kadar konsolidasyon işlemine devam edilmiştir. Doyurma ve izotropik konsolidasyon aşamalarının her aşamasında numunelerde meydana gelen boy ve hacim değişimleri deplasman sensörleri ve hacim değişim ünitesi aracılığı ile ölçülerek kaydedilmiştir. Bu aşamadan sonra numuneler tekrarlı yükler altında kesme testlerine hazır hale gelmiştir.

Konsolide edilmiş zemin numuneleri üzerinde gerilme kontrollü drenajsız dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiş ve bu testlerde ASTM D5311 (2013) standardı tarafından önerilen yöntem ve esaslara uyulmuştur. Tüm testler 1 Hz sabit yükleme frekansında gerçekleştirilmiş ve deney sürecince çevre basıncı ve ters basınç sabit tutulmuştur. Numunelere farklı gerilme genliği oranlarına ($CSR = 0.1 - 0.2$) sahip eksenel yönde sinüzoidal tekrarlı yükler, bir başka ifade ile, sinüzoidal deviatör

gerilmeler uygulanmıştır. Numunelerde aşırı boşluk suyu basıncı oranının 1 değerine ulaşması ($r_u = 1$) ile deney sonlandırılmış ve $r_u = 1$ değerindeki deney çevrim sayıları kaydedilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncının drene olabilmesi için drenaj hattı açılmıştır. Düşey yüklemeler, hücre basıncı ve ters basınç sıfırlandıktan sonra deney hücresi sökülmüş ve numuneler hücre içinden çıkarılmıştır. Numunelerin tekrarlı kesme yükleri altında maruz kaldığı deformasyonlar gözlemlenmiştir (Şekil 3.15). Gerekli incelemeler tamamlandıktan sonra numuneler dikkatli bir şekilde alınarak etüvde 105 C° sıcaklık altında kurutulmaya bırakılmış ve 1 gün sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir.



Şekil 3.15. Belirli bir uçucu kül yüzdesine sahip kumlu zemin örneğinin dinamik test sırasındaki ve sonrasındaki görünümü

Dinamik kesme sırasında drenaj kanalları tamamen kapalı olduğu ve gerilmeler sabit bir değerde tutulduğu için drenajsız ortamda üniform yükleme koşulları sağlanmıştır. Kullanılan üç eksenli test sisteminin yazılımı test numunelerinin boyutları ve fiziksel özellikleri ile numunelere uygulanmak istenen düşey kuvvetleri gibi deneysel parametrelerin kolaylıkla değiştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu yazılım aynı zamanda yük hücresi, deplasman ölçerler ve basınç sensörleri yardımıyla belirlenen gerilme, şekil değiştirme, boşluk suyu basıncı gibi parametrelerin değişimi anlık olarak izlenebilmesine ve bu değerlerin kaydedilmesine imkân sağlamıştır.

3.2.4 Test Programı ve Detayları

Bu çalışmada, farklı uçucu kül içeriğine sahip kumlu zeminler kullanılarak gerilme kontrollü ve drenajsız şartlarda 30 adet dinamik üç eksenli deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerin tümü 1 Hz sabit frekansa sahip sinüzoidal tekrarlı yükler altında yapılmıştır. Zemin numunelerinde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncı değişimleri kaydedilmiştir. Çizelge 3.4'te dinamik üç eksenli deneylerin genel özellikleri görülmektedir. Bu çizelgede her bir gerilme genliği oranında elde edilmiş olan sonuçlar sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı (N_{liq}) cinsinden verilmiştir. Farklı relatif sıkılık (D_r), efektif çevre basıncı (σ'_c), uçucu kül yüzdesi (UK) ve değişen gerilme genliği oranlarında (CSR) gerçekleştirilmiş olan bu çalışmaların yürütüldüğü koşullar ve bunlara ait deney programı aşağıda açıklanmıştır.

Saf kum veya kum-uçucu kül karışımından oluşan test numuneleri huniden kuru yağmurlama (dry funnel deposition) yöntemi kullanılarak laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Tüm numuneler suya doymun hale getirildikten ve arzu edilen gerilme değerinde izotropik olarak konsolide edildikten sonra düşey yönde tekrarlı eksenel yük uygulayarak kesilmiştir.

İlk deney serisinde gevşek ($D_r \approx 40\%$) veya orta sıkılıkta ($D_r \approx 55\%$) hazırlanmış temiz kum numuneleri üzerinde 12 adet dinamik üç eksenli testler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar referans/denektaşı olarak kullanılmıştır. İkinci deney serisinde gevşek ve orta sıkılıkta hazırlanmış ve uçucu kül yüzdesi 0-40% arasında olan kum-uçucu kül numuneleri üzerinde 18 adet dinamik üç eksenli testler gerçekleştirilmiştir.

Numuneler farklı efektif çevre basıncı ($\sigma'_c = 50 - 200$ kPa) altında deneye tabi tutularak konsolidasyon basıncının uçucu kül içeren veya içermeyen kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm

deneyler sabit hücre basıncı ($\sigma_3 = 400$ kPa) altında gerçekleştirilmiş ve arzu edilen efektif çevre gerilmesi değerine bağlı olarak farklı ters basınç değerleri ($u_0 = 200 - 300$ kPa) kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Saf kum ve kum-uçucu kül karışımları üzerinde yürütülen dinamik üç eksenli deneylerin relatif sıklık, konsolidasyon ve tekrarlı yükleme koşulları gibi genel özellikleri ve tipik deneysel sonuçlar

Deney Malzemesi	Deney No	Deney ID	D_r (%)	UK (%)	σ'_c (kPa)	CSR	N_{liq}
Temiz kum	1	CS1	40	0	100	0.10	160
	2	CS2	41	0	100	0.15	50
	3	CS3	39	0	100	0.20	9
	4	CS4	39	0	50	0.10	280
	5	CS5	40	0	50	0.15	80
	6	CS6	41	0	50	0.20	15
	7	CS7	56	0	100	0.15	151
	8	CS8	55	0	100	0.175	64
	9	CS9	57	0	100	0.20	35
	10	CS10	57	0	50	0.15	281
	11	CS11	55	0	50	0.175	119
	12	CS12	54	0	50	0.20	46
Temiz kum-uçucu kül karışımı	1	SFA1	39	10	100	0.10	84
	2	SFA2	40	10	100	0.15	16
	3	SFA3	39	10	100	0.20	4
	4	SFA4	38	20	100	0.10	31
	5	SFA5	41	20	100	0.15	6
	6	SFA6	40	20	100	0.20	2
	7	SFA7	41	30	100	0.10	70
	8	SFA8	40	30	100	0.15	24
	9	SFA9	39	30	100	0.20	5
	10	SFA10	38	40	100	0.10	88
	11	SFA11	40	40	100	0.15	32
	12	SFA12	39	40	100	0.20	5
	13	SFA13	39	30	50	0.10	142
	14	SFA14	40	30	50	0.15	38
	15	SFA15	38	30	50	0.20	12
	16	SFA16	56	30	100	0.15	113
	17	SFA17	55	30	100	0.175	36
	18	SFA18	54	30	100	0.20	14

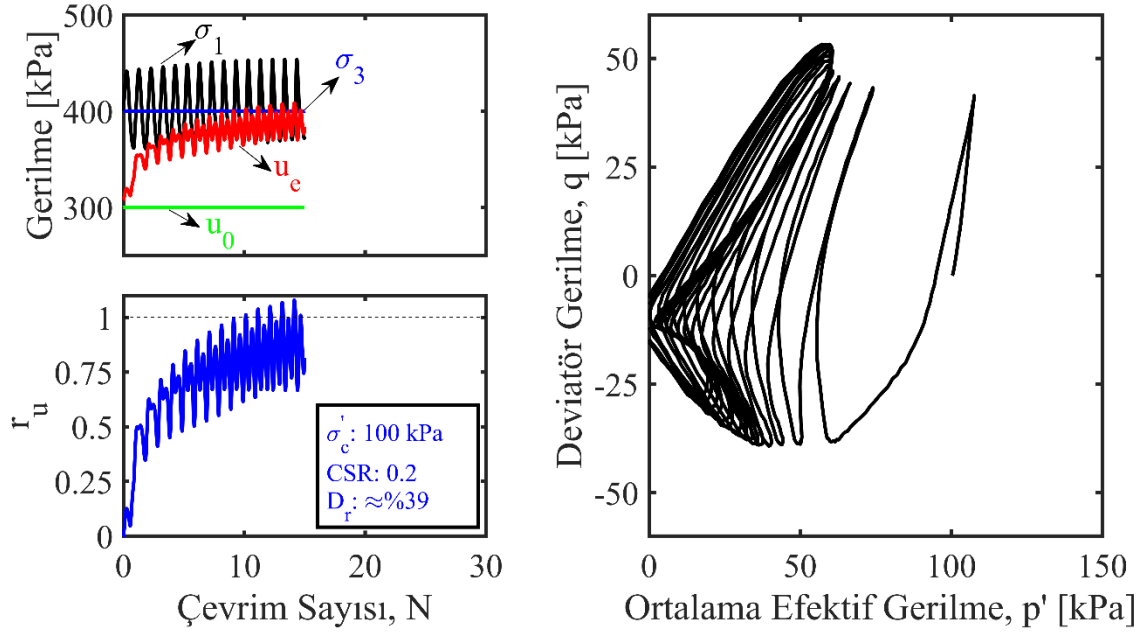
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde laboratuvarda sonradan oluşturulan ve suya doygun olan kum ve kum-uçucu kül numunelerinin farklı gerilme genliğine sahip tekrarlı yükler altındaki mukavemet ve sıvılaşma davranışı incelenmiştir. Bu amaçla dinamik yüklemeler sırasında zemin numunelerinde oluşan boşluk suyu basıncının çevrim sayısına bağlı olarak değişimi belirlenmiştir. Bunun yanında uçucu kül içeriği, relatif sıkılık ve efektif çevre basıncı gibi başlangıç koşullarının kumlu zeminlerin boşluk suyu basıncı gelişimi ve sıvılaşma davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

4.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Sıvılaşma Davranışı

Şekil 4.1’de suya doygun temiz kum numunesi üzerinde yapılan deneyde boşluk suyu basıncının çevrim sayısına bağlı olarak değişimi ve oluşan tipik gerilme izleri gösterilmektedir. Bu örnekte izotropik olarak 100 kPa basınç altında konsolide edilen ($\sigma'_c = 100$ kPa) ve gevşek halde ($D_r = \%39$) bulunan temiz kum numunesi üniform gerilme genliği altında ($CSR = 0.2$) drenajsız olarak sinüzoidal tekrarlı yüke maruz bırakılmıştır. Uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi ile birlikte zeminde aşırı-ilave boşluk suyu basıncı oluşmuş ve bu da toplam boşluk suyu basıncını arttırarak çevre basıncı değerine yaklaşmasına neden olmuştur. Numune yaklaşık dokuz çevrim ($N = 9$) sonra ön-başlangıç sıvılaşma ($r_u = 1$) olarak belirlenen seviyeye ulaşmıştır. Deviatör gerilme veya ortalama kayma gerilmesi ile ortalama efektif gerilme ilişkisini gösteren gerilme izleri incelendiğinde artan boşluk suyu basıncına bağlı olarak ortalama efektif gerilme değerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir. Efektif gerilmenin azalıp sıfır değerine yaklaşması ve/veya ulaşması sonucunda zemin numunesinde önemli kayma deformasyonları meydana gelmiştir. Kalıcı deformasyonlar sonucu numunede yumuşama ve önemli mukavemet kayıpları oluşmuştur.

Farklı relatif sıkılık ve uçucu kül içeriğine sahip olan ve farklı gerilme oranlarında teste tabi tutulan zemin numuneleri de Şekil 4.1’de gösterilen boşluk suyu basıncı ve gerilme izi davranışını göstermektedir. Sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı (N_{liq}) ve boşluk suyu basıncı artış oranı gibi parametreler zeminlerin davranış özelliklerindeki en belirgin fark olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 4.1. Temiz kum örneğinin tekrarlı yükler altındaki tipik dinamik davranışı: boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi ve deviator gerilme-ortalama efektif gerilme ilişkisi

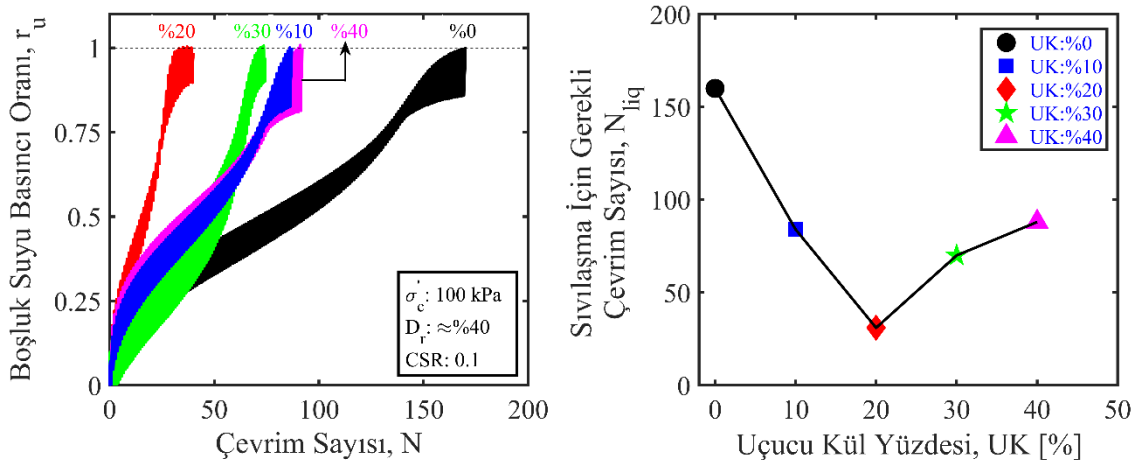
4.2 Uçucu Kül İçeriği Etkisi

Önceki çalışmalar kil ve silt gibi ince daneli zeminlerin kumlu zeminlerin dinamik davranışını önemli ölçüde etkilediği ve bu etkinin ince malzemelerin içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında kum zeminlere plastik olmayan ve silt boyutundaki daneciklerden oluşan uçucu kül malzemesi katılarak uçucu kül içeriğinin kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Laboratuvar ortamında %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül içeren kum numuneleri gevşek halde ($D_r \approx \%40$) hazırlanmış ve 100 kPa efektif çevre gerilmesi altında konsolide edilmiştir. Konsolide edilmiş bu numuneler drenajsız koşullarda farklı tekrarlı (dinamik) gerilme oranı ($CSR = 0.1 - 0.2$) altında deneye tabi tutulmuştur. Zemin örnekleri ön sıvılaşma ($r_u = 1$) seviyesine ulaşmaya kadar dinamik yükleme devam ettirilmiş ve ön sıvılaşmaya ulaşıldığı andaki çevrim sayısı (N_{liq}) kaydedilmiştir. 20 çevrim sayısında 100% boşluk suyu basıncı ($r_u = 1$) oluşumu için gereken gerilme oranı ($CSR_{N=20}$) zemin numunelerinin tekrarlı dayanımı veya sıvılaşma dayanımı/direnci olarak tanımlanmıştır.

4.2.1 Uçucu Kül İçeriğinin Boşluk Suyu Basıncı Gelişimi Üzerindeki Etkisi

Uçucu kül içeriğinin kumlu zeminlerin boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi incelemek amacıyla %0-40 aralığında uçucu kül içeren kum-uçucu kül numuneleri

aynı tekrarlı gerilme oranında ($CSR = 0.1$) test edilmiştir. Şekil 4.2’de boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ($r_u - N$) ilişkisi ile sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı-uçucu kül yüzdesi ($N_{liq} - UK$) ilişkisi gösterilmektedir. Hem temiz kum hem de uçucu kül içeren kum örneklerinde dinamik yükleme sonrası boşluk suyu basıncı artmış ve buna bağlı olarak efektif gerilmeler ile kayma mukavemeti sürekli olarak azalmıştır. Efektif gerilmelerdeki azalma özellikle %75 boşluk suyu basıncından ($r_u = 0.75$) sonra daha belirgin hale gelmiştir. Boşluk suyu basıncında meydana gelen değişimin miktarı çevrim sayısına ve uçucu kül yüzdesine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Deney sonuçları, belirli bir relatif sıkılığa sahip zeminde uçucu kül miktarı belli bir yüzdeye kadar arttıkça, sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı değerinin (N_{liq}) önemli derecede azaldığı, bu seviyeden sonra ise bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ile kritik (sınır veya eşik) uçucu kül oranının (UK_c) yaklaşık %20 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar uçucu kül içeren kum numunelerinde boşluk suyu basıncının göreceli olarak daha hızlı arttığını ve uçucu kül miktarının kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir.

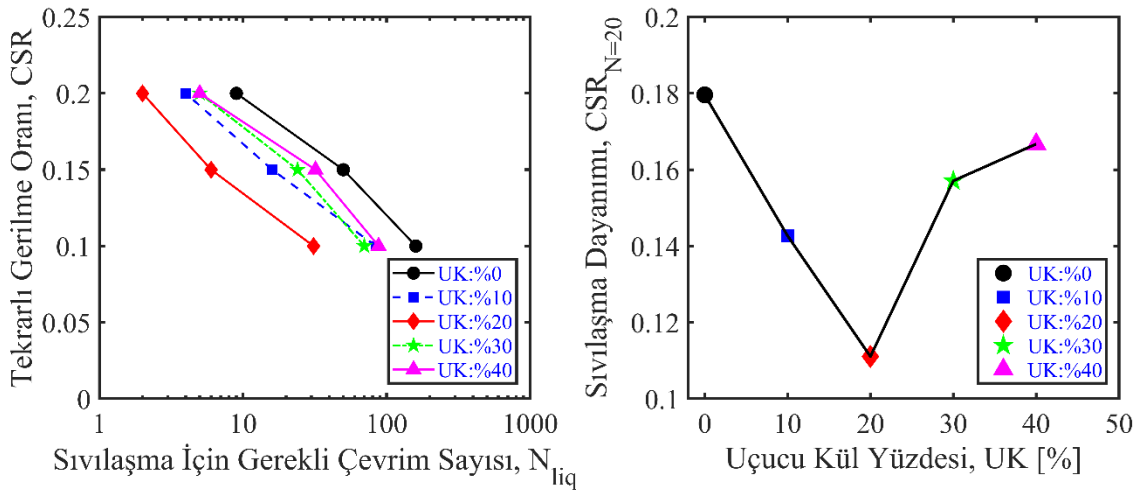


Şekil 4.2. Uçucu kül içeriğinin boşluk suyu basıncı gelişimi üzerindeki etkisi: boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ve sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi

4.2.2 Uçucu Kül İçeriğinin Sıvılaşma Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Uçucu kül içeriğinin kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla $\approx 40\%$ relatif sıkılığa sahip ve 100 kPa efektif çevre basıncı altında konsolide edilmiş numunelere farklı dinamik gerilme oranlarında ($CSR = 0.1 - 0.2$) tekrarlı yükleme yapılmıştır. Şekil 4.3’de sıvılaşma için gerekli çevrim sayısının

uygulanan tekrarlı gerilme oranı ile değişimini gösteren dinamik mukavemet eğrileri ($CSR - N_{liq}$) ve sıvılaşma dayanımı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi ($CSR_{N=20} - UK$) gösterilmektedir. Görüleceği üzere dinamik gerilme oranının artması ile zemin numuneleri daha düşük çevrim sayılarında ön sıvılaşma seviyesine ($r_u = 1$) ulaşmaktadır. Dinamik gerilme oranından bağımsız olarak sıvılaşmaya karşı en yüksek direnci temiz kum numuneleri gösterirken, %20 uçucu kül içeriğine sahip kum örneğinin ise en düşük sıvılaşma direncine sahip olduğu görülmüştür. Temiz kum örneğinin sıvılaşma dayanımı, bir başka ifade ile, 20 çevrime karşılık gelen dinamik gerilme oranı değeri yaklaşık 0,18 olarak bulunmuştur ($CSR_{N=20} = 0.18$). Bu sonuçlar temiz kum örneğinin %20 ve %40 uçucu kül içeriğine sahip kum örneklerinden sırasıyla 1,62 ve 1,07 kat daha fazla sıvılaşma dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. %10 uçucu kül içeriğine sahip kum örneği %40 uçucu kül içeriğine sahip kum örneği ile benzer sıvılaşma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

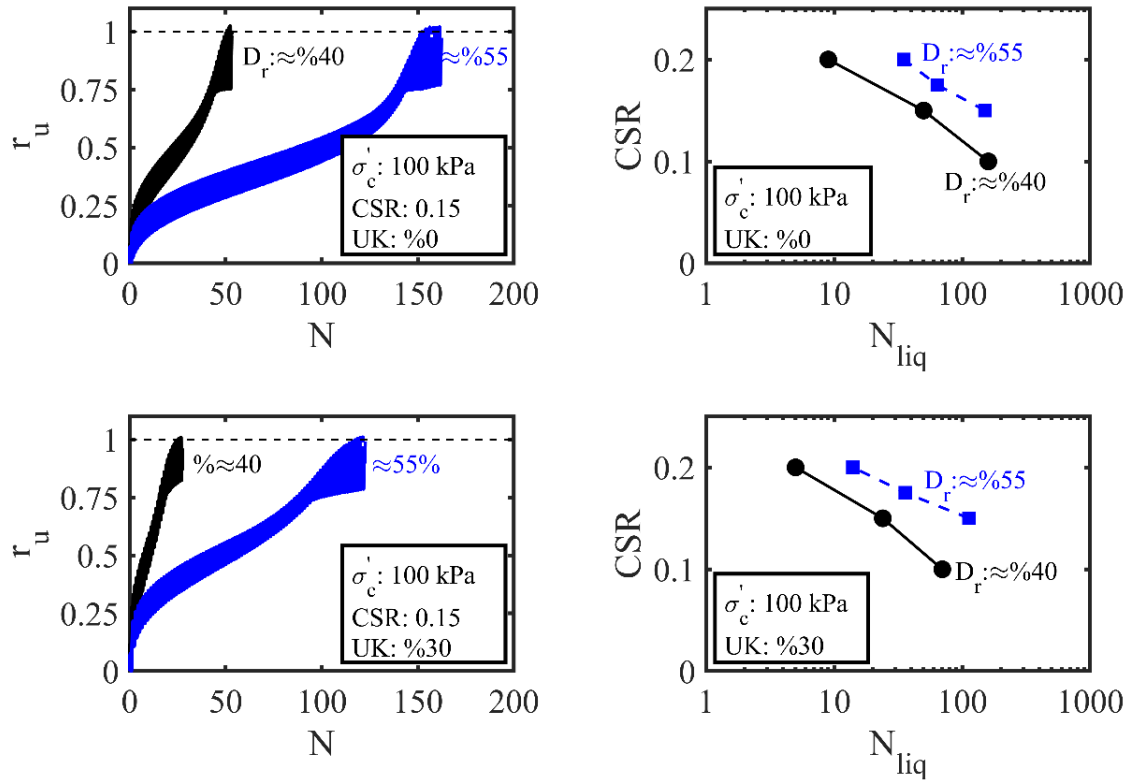


Şekil 4.3. Uçucu kül içeriğinin kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımı üzerindeki etkisi: dinamik mukavemet eğrileri ve sıvılaşma dayanımı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi

4.3 Relatif Sıklık Etkisi

Kumlu zeminlerin tekrarlı yükleme sırasındaki sıvılaşma olasılığını ve dinamik davranışını etkileyen en temel parametrelerden bir tanesi başlangıç boşluk oranı veya relatif sıklık (D_r) değeridir. Relatif sıklığın temiz kum ($UK = \%0$) ve belirli oranda uçucu kül içeren kumlu zeminlerin ($UK = \%30$) dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için iki farklı relatif sıklıkta hazırlanmış gevşek ($D_r \approx \%40$) ve orta sıkı ($D_r \approx \%55$) numuneler izotropik koşullarda 100 kPa basınç altında konsolide edilmiş ve

drenajsız koşullarda 0.15 tekrarlı gerilme oranında kesilmiştir. Şekil 4.4’de bu deneylerden elde edilmiş boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ve dinamik mukavemet eğrileri görülmektedir. Deney sonuçlarına göre gevşek halde hazırlanmış temiz kum numunesinde boşluk suyu basıncı hızlı bir şekilde artmış ve 50 çevrim sayısı sonrası ön sıvılaşma seviyesine ulaşmıştır. Orta sıkılıkta hazırlanmış olan temiz kum numunesinde boşluk suyu basıncı artışı nispeten daha yavaş şekilde gerçekleşmiş ve 151 çevrim sayısı sonrası ön sıvılaşma gerçekleşmiştir. Beklenildiği gibi kumlu zeminlerin relatif sıkılık değerinin artması ve dolayısıyla daha sıkı hale gelmesi ile sıvılaşma direncinin önemli derecede arttığı tespit edilmiştir. Uçucu kül içeren kumlu zeminler temiz kum örnekleri ile benzer davranış göstermiştir. Relatif sıkılık değerinin artması ile uçucu kül içeren kumlu zeminlerin aynı dinamik gerilme altında sıvılaşmaya ulaşması için gereken çevri sayısı (N_{liq}) ve dolayısıyla sıvılaşma dayanımı artmıştır.

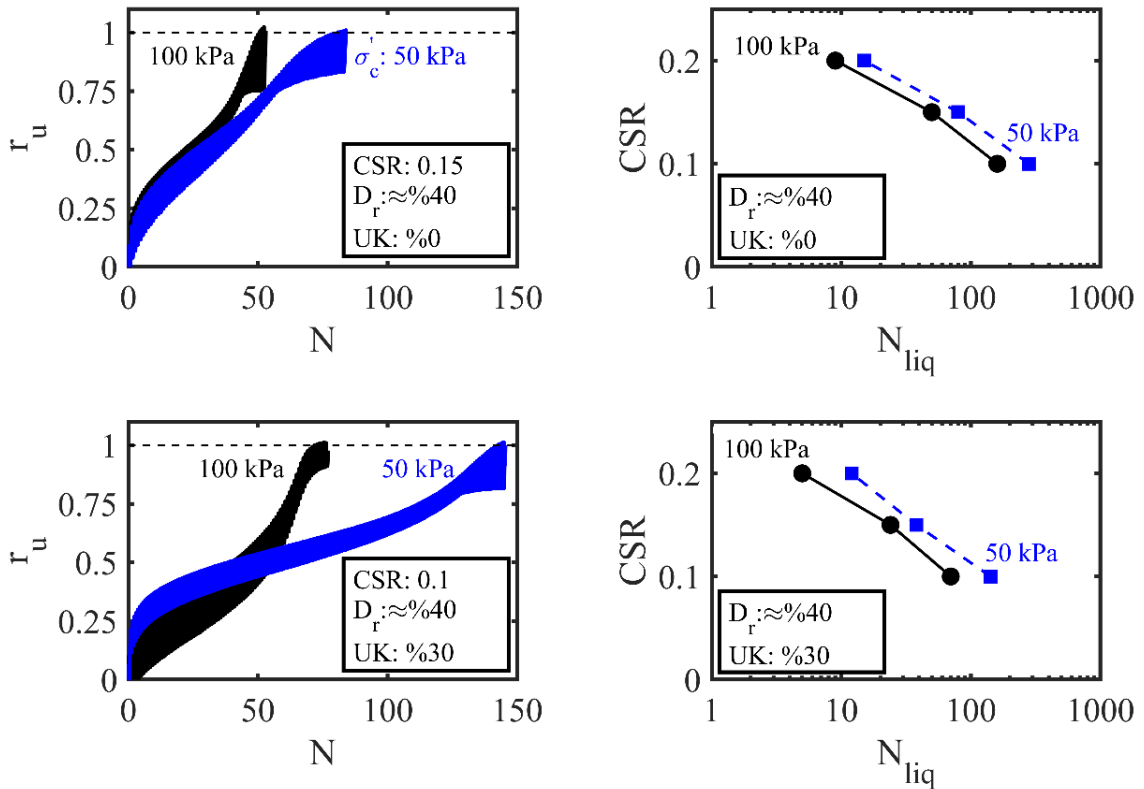


Şekil 4.4. Relatif sıkılığın zeminlerin dinamik davranışı üzerindeki etkisi: boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ve dinamik mukavemet eğrileri

4.4 Efektif Çevre Basıncı Etkisi

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar zeminlerin sıvılaşma davranışının efektif çevre basıncı veya başlangıç çevre gerilmesi değerine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında efektif çevre basıncının uçucu kül içermeyen ($UK = \%0$) veya içeren ($UK = \%30$) kumlu zeminlerin sıvılaşma ve dinamik davranışı üzerindeki etkisini anlamak amacıyla benzer sıklıkta ($D_r \approx \%40$) hazırlanmış zemin numuneleri $\sigma'_c = 50$ kPa ve $\sigma'_c = 100$ kPa olmak üzere iki farklı çevre basıncında izotropik olarak konsolide edilmiş ve drenajsız ortamda aynı gerilme genliğine sahip üniform tekrarlı gerilmelere maruz bırakılmıştır. Bu deneylerden elde edilmiş tipik boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ve dinamik mukavemet eğrileri Şekil 4.5'de görülmektedir. Bu grafikten anlaşılabacağı üzere aynı relatif sıklığa sahip ve aynı tekrarlı gerilme genliğinde test edilmiş hem kum hem de kum-uçucu kül numunelerinde efektif çevre basıncının artması ile ($\sigma'_c = 50 \rightarrow 100$ kPa) sıvılaşma için gerekli çevrim sayıları azalmıştır. Bir başka ifade ile uçucu kül içeren veya içermeyen kumlu zemin örneklerinin sıvılaşma dayanımı efektif çevre basıncının artması ile azalmıştır. Efektif çevre basıncı etkisinin kum-uçucu kül karışımından oluşan zemin örneklerinde daha belirgin olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, efektif çevre basıncının uçucu kül içeren kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu ve bu tür zeminlerin sıvılaşma direncinin efektif çevre basıncının azalması ile artacağını göstermektedir.



Şekil 4.5. Efektif çevre basıncının zeminlerin dinamik davranışı üzerindeki etkisi: boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı ilişkisi ve dinamik mukavemet eğrileri

4.5 Deneyisel Sonuçların Mevcut Çalışmalar ile Karşılaştırılması

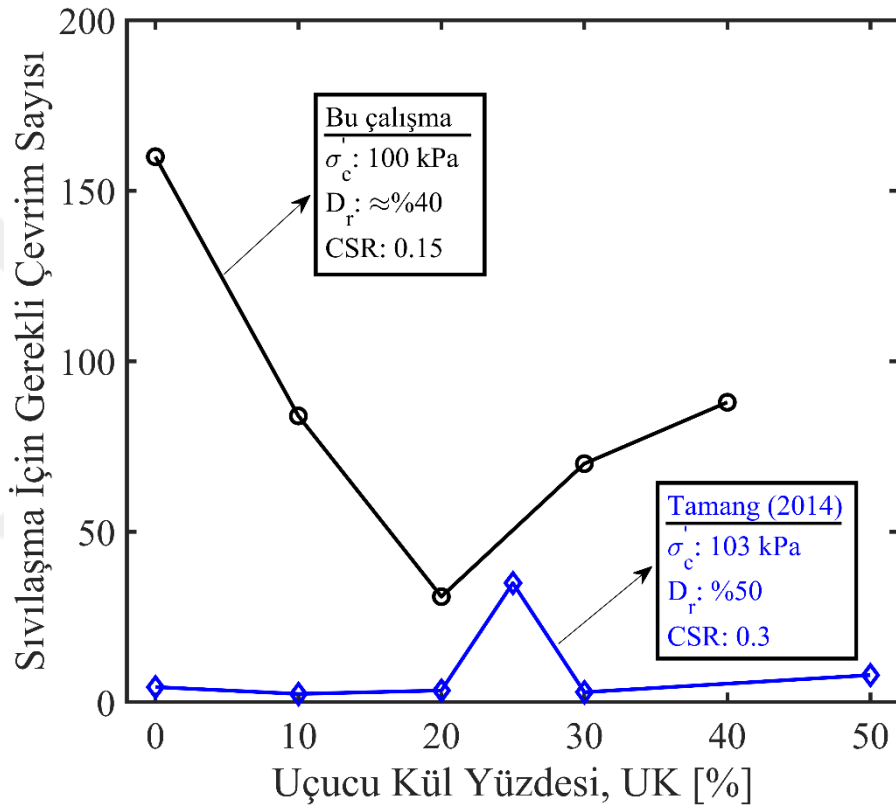
Bu kısımda, dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen bulguların tutarlılığını ve doğruluğunu araştırmak için elde edilen deneyisel veriler literatürde yer alan farklı araştırma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanında doygun halde bulunan ve kum uçucu kül karışımından oluşan zemin numunelerinin drenajsız koşullarda ve tekrarlı yükler altındaki dinamik davranış özelliklerini belirleyen mekanizmalar açıklanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, deneyisel olarak elde edilen veya literatürden derlenen dinamik mukavemet eğrileri ($CSR - N_{liq}$) kullanılarak farklı oranlarda uçucu kül içeren kum örneklerinin sıvılaşma dayanımları ($CSR_{N=20}$) ve sıvılaşma dayanımı oranları (LRR) bulunmuştur. Burada, sıvılaşma dayanımı oranı benzer relatif sıkılık, efektif çevre basıncı ve yükleme koşulları altında kum-uçucu kül karışımından oluşan zemin numuneleri için hesaplanan sıvılaşma dayanım değerlerinin, $(CSR_{N=20})_{uçucu\ kül}$, temiz kum numuneleri için hesaplanan sıvılaşma dayanım değerlerine, $(CSR_{N=20})_{kum}$, oranlanması ile elde edilmiştir:

$$LRR = \frac{(CSR_{N=20})_{uçucu\ kül}}{(CSR_{N=20})_{kum}} \quad (4.1)$$

Literatürde kum-uçucu kül karışımından oluşan zemin numunelerinin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışını anlamaya yönelik yapılmış olan deneyisel çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışma kapsamında elde edilen deneyisel veriler Tamang (2014) tarafından gerçekleştirilmiş dinamik üç eksenli deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamada Şekil 4.6'da görülen sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı ile uçucu kül yüzdesi arasındaki ilişki ve Şekil 4.7'de görülen sıvılaşma dayanımı ile uçucu kül yüzdesi arasındaki ilişki kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde uçucu kül içeriğinin kritik seviyeye kadar artması ($UK = \%0 - 20$) ile kumlu zeminin sıvılaşma direncinde önemli ölçüde azalmalar meydana geldiği, ancak kritik uçucu kül miktarı aşıldığında ($UK = \%20 - 40$) zeminin sıvılaşma direncinde bir miktar artış olduğu görülmüştür. Tamang (2014) tarafından uçucu kül içeriği $\%0-50$ arasında değişen ve $\%50$ relatif sıkılıkta hazırlanmış uçucu küllü kum numuneleri 103 kPa efektif çevre basıncı altında konsolide edilmiş ve sıvılaşmaya kadar tekrarlı yüklere maruz bırakılmıştır. Araştırmacıların verileri derlenip analiz edildiğinde, uçucu kül içeren kum numunelerinin sıvılaşma dayanımında $UK = \%0 - 20$ aralığında az miktarda

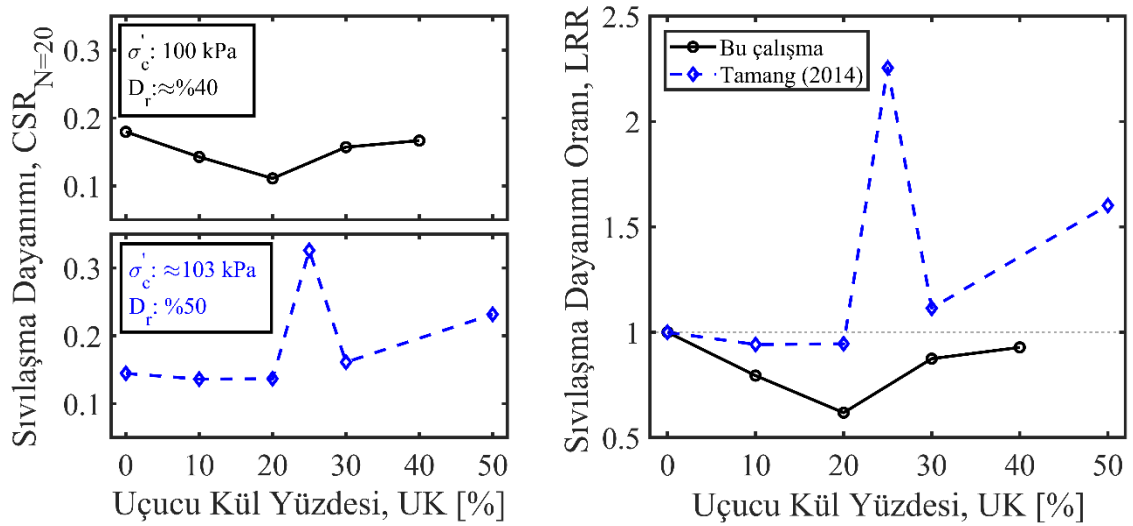
azalma, $UK = \%20 - 25$ aralığında ciddi miktarda artış, $UK = \%25 - 30$ aralığında ciddi miktarda düşüş ve $UK = \%30 - 50$ aralığında tekrar bir artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu iki çalışmadan elde edilen sonuçların farklılık göstermesi deneylerde kullanılan uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin farklı olması ile açıklanabilir. Aynı relatif sıkılık, konsolidasyon basıncı ve yükleme koşulları altında test edilen uçucu küllü kum numunelerinin sıvılaşma davranışı kullanılan uçucu külün özelliğine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 4.6. DeneySEL çalışma kapsamında elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması: sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül plastik olmayan ve silt boyutunda olan ($\frac{(D_{50})_{uçucu\ küll}}{(D_{50})_{kum}} > 0.23$) bir malzemedir. Bu tür ince malzeme içeren kumlu zemin örneklerinde zeminlerin daneler ve boşluklu yapısı, kaba ve ince daneler arasındaki etkileşim ve dane temas noktalarındaki gerilmeler uçucu kül yüzdesine bağlı olarak farklılık gösterebilmekte ve bu da zeminlerin sıvılaşma dayanımını önemli derecede etkilemektedir. Thevanayagam ve ark. (2020) plastik olmayan ince danelerin kumlu zeminler üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, ince dane miktarının kritik

ince dane oranından daha az olduğu durumlarda boşlukları dolduran ince danelerin kaba daneler arasında kolayca hareket edemeyeceğini ve iç kuvvetler zincirine aktif olarak katılamayacağını veya sınırlı olarak katılabileceğini belirtmişlerdir. Uçucu küllü kum numunelerinin sıvılaşma dayanımının kritik uçucu kül oranına ulaşmaya kadar ($UK = \%0 - 20$) azalıyor olmasının en temel nedeninin de bu olabileceği düşünülmektedir. Burada özellikle vurgulamak gerekiyor ki, karışımdaki uçucu kül miktarının $\%40$ üzerine çıkması ile üniform özellikte üç eksenli deney numunelerinin hazırlanması oldukça zor hale gelmiştir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler $\%40$ uçucu kül içeriği ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.7. DeneySEL çalışma kapsamında elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması: sıvılaşma dayanımı-uçucu kül yüzdesi ilişkisi

4.6 DeneySEL Sonuçların Farklı Boşluk Suyu Basıncı Modelleri ile Karşılaştırılması

İnce dane içeren veya içermeyen ve suya doymuş olan granüler zeminlerin drenajsız tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı (aşırı) boşluk suyu basıncının gelişim/oluşum şekli ve miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Geoteknik deprem mühendisliğinde bu tür zeminlerin dinamik davranışı ve sıvılaşma karakteristiği belirlenirken laboratuvar ve arazi deneyleri dışında farklı teorik modellerden sıklıkla yararlanılmaktadır. Konu ile ilgili olarak geçmişten günümüze kadar birçok çalışma yapılmış ve bunun sonucunda boşluk suyu basıncının tahmininde kullanılabilecek farklı model ve yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler literatürde gerilme tabanlı, deformasyon tabanlı ve enerji tabanlı modeller olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Bu yöntemler arasında gerilme tabanlı modeller daha popüler hale gelmiştir. Çizelge

4.1’de literatürde yaygın olarak kullanılan gerilme tabanlı modellerden bazıları gösterilmektedir.

Gerilme tabanlı modeller boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile çevrim sayısı oranı ($\frac{N}{N_{liq}}$) arasındaki ilişkiyi yansıtmaktadır. Gerilme tabanlı modellerin temeli Lee ve Albaisa (1974) tarafından atılmıştır. Araştırmacılar, iki farklı kum üzerinde deneysel çalışmalar yapmış ve r_u ile $\frac{N}{N_{liq}}$ arasında bir ilişki kurmuşlardır. Seed ve ark. (1975) iyi derecelenmiş kumlar üzerinde drenajsız şartlarda gerilme kontrollü deneyler yapmış ve elde ettikleri deney sonuçlarını o dönemin mevcut verileri ile harmanlayarak denklem (4.2)’de gösterilen ilişkiyi geliştirmişlerdir.

$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[2 \cdot \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad (4.2)$$

Burada α deney koşulları ve zemin özelliklerine bağlı olarak değişen ampirik bir katsayıdır ve zemin örnekleri üzerinde dinamik deneyler gerçekleştirmek suretiyle belirlenmektedir. Temiz kumlar için ortalama $\alpha = 0.7$ değeri kabul görmektedir.

Seed ve ark. (1975) tarafından önerilen denklem Booker ve ark. (1976) tarafından sadeleştirilmiş ve denklem (4.3)’de gösterilen ilişki önerilmiştir.

$$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/2 \cdot \alpha} \right] \right\} \quad (4.3)$$

Polito ve ark. (2008) denklem (4.3)’de gösterilen ilişkiyi kullanmışlar ancak α katsayısını ince dane oranı (FC), relatif sıkılık (D_r) ve tekrarlı gerilme oranına (CSR) bağlı olarak denklem (4.4)’e göre hesaplamışlardır.

$$\alpha = 0.01166 \cdot FC + 0.007397 \cdot D_r + 0.01034 \cdot CSR + 0.5058 \quad (4.4)$$

Son yıllarda, gerilme kontrollü deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak boşluk suyu basıncı gelişiminin sayısal olarak modellenmesinde kullanılabilecek alternatif yöntemler ortaya çıkmıştır. Baziar ve ark. (2011) belirli oranda plastik olmayan silt içeren kumlu zemin örnekleri üzerinde drenajsız koşullarda dinamik burulmalı kesme

deneyleri gerçekleştirerek denklem (4.5)'de gösterilen boşluk suyu basıncı modelini geliştirmişlerdir.

$$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/2 \cdot \alpha} \right] \right\} + \beta \sqrt{1 - \left\{ \frac{2 \cdot N}{N_{liq}} - 1 \right\}^2} \quad (4.5)$$

Bu denklemde α ve β kullanılan zemin özellikleri ile ilişkili olan ve zemindeki silt içeriğine bağlı olarak değişkenlik gösteren parametrelerdir.

Enquan ve Qiong (2019) boşluk suyu basıncı gelişimini tahmin etmek için denklem (4.6)'de gösterilen hiperbolik modeli geliştirmişlerdir.

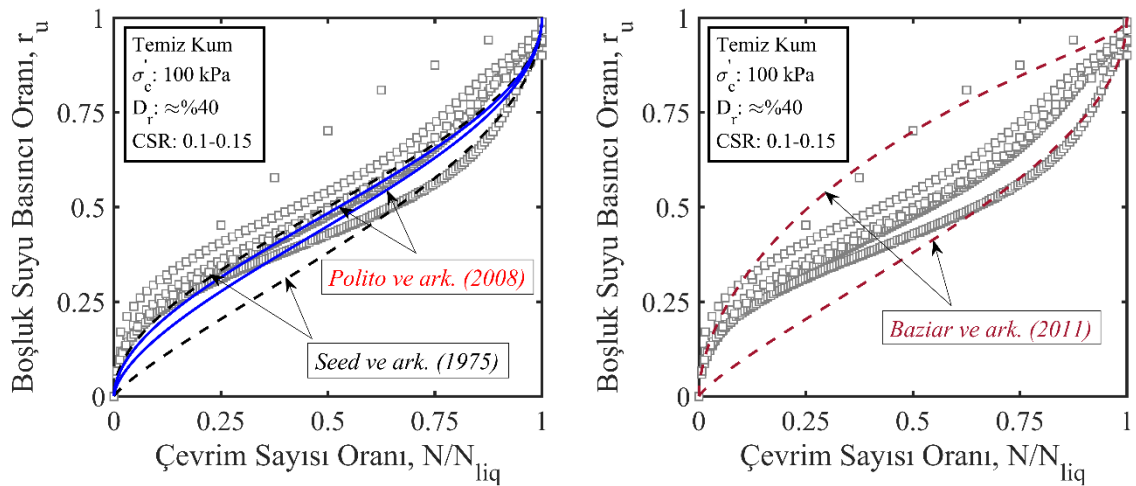
$$r_u = \frac{\frac{N}{N_{liq}}}{\alpha + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)} \quad (4.6)$$

Çizelge 4.1'de belirtilen boşluk suyu basıncı modellerinin tahminleri suya doymun temiz kum veya belli miktarda uçucu kül içeren kumlu zeminler üzerinde gerçekleştirilen gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmış ve bu modellerin deneysel verileri nasıl ve ne oranda doğruladığı araştırılmıştır.

Çizelge 4.1. Gerilme tabanlı boşluk suyu basıncı modelleri

Model	Fonksiyon	Model Parametreleri Üst/Alt Limit
Seed ve ark. (1975)	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[2 \cdot \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\}$	$\alpha_U = 1$ $\alpha_L = 0.6$
Polito ve ark. (2008)	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[2 \cdot \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\}$	$\alpha_U = 0.93$ $\alpha_L = 0.80$ (FC, D_r, CSR 'ye bağlı olarak hesaplanmıştır.)
Baziar ve ark. (2011)	$r_u = \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{1/2 \cdot \alpha} \right] \right\} + \beta \sqrt{1 - \left\{ \frac{2 \cdot N}{N_{liq}} - 1 \right\}^2}$	$\alpha_U = 0.8$ $\alpha_U = 0.6$ $\beta_U = 0.25$ $\beta_L = 0$
Enquan ve Qiong (2019)	$r_u = \frac{\frac{N}{N_{liq}}}{\alpha + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)}$	—

İlk olarak farklı gerilme oranlarında temiz kumlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Şekil 4.8’de gevşek sıkılıkta hazırlanan ($D_r \approx \%40$), 100 kPa basınç altında izotropik olarak konsolide edilen ($\sigma'_c = 100$ kPa) temiz kum numunelerinin ($UK = \%0$) farklı tekrarlı gerilme oranlarında ($CSR = 0.1 - 0.15$) teste tabi tutulması ile elde edilen deneysel sonuçların üç farklı boşluk suyu basıncı modelinden elde edilen tahminler ile karşılaştırılması görülmektedir. Görüldüğü gibi temiz kum ile yürütülen deneylerin neredeyse tamamında düşük çevrim sayılarında boşluk suyu basıncında hızlı bir artış olmuştur. İlerleyen çevrim sayılarında bu artışın hızı yavaşlamaktadır. Sıvılaşmaya yaklaştıkça boşluk suyu basıncındaki artış tekrar hızlanmakta ve bu hızlanma genel itibari ile $\%75$ boşluk suyu basıncından sonra ($r_u \geq 0.75$) gerçekleşmektedir. Temiz kum numunelerinde boşluk suyu basıncı genellikle dar bir bant içerisinde artış göstermiştir. Deneysel sonuçlar literatürde yaygın olarak kullanılan gerilme tabanlı modeller kullanılarak oluşturulan sınır eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Alt ve üst sınır eğrileri hesaplanırken araştırmacılar tarafından önerilen ve Çizelge 4.1’de gösterilen ampirik katsayılar kullanılmıştır.

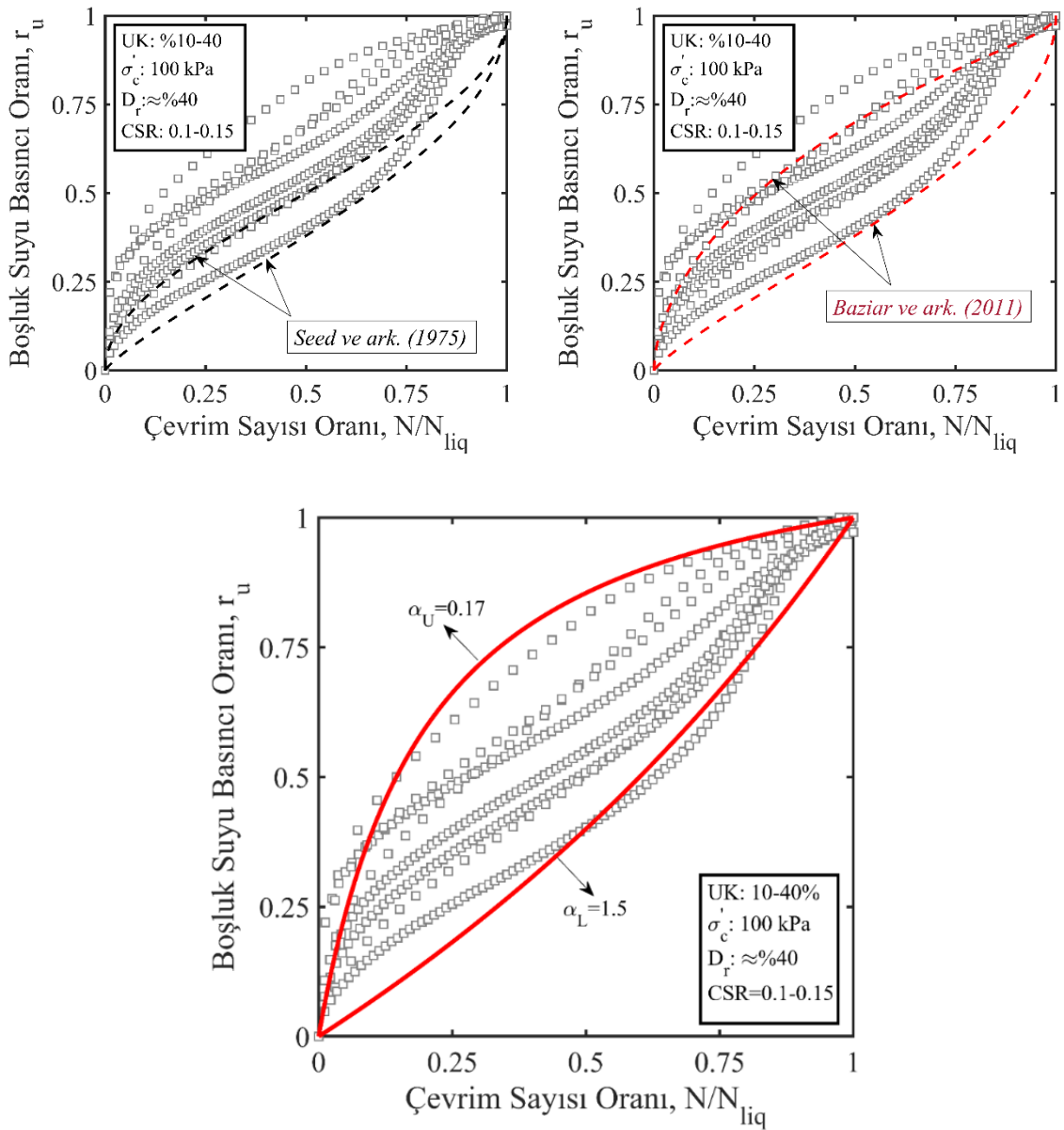


Şekil 4.8. Temiz kum numuneleri için boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı oranı ilişkisi ve sonuçların farklı boşluk suyu basıncı modelleri ile karşılaştırılması

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi deneysel çalışma kapsamında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı oranı eğrileri önce azalan sonra artan eğimde ilerlemektedir. Yapılan analizlerde boşluk suyu basıncının oluşum veya gelişim şekline en yakın sonucu Seed ve ark. (1975) ve Polito ve ark. (2008) modellerinin verdiği görülmüştür. Seed ve ark. (1975) ve Polito ve ark. (2008) modelleri kullanılarak elde edilen alt ve üst limitlerin

deneysel sonuçların genellikle üstünde kalmaktadır. Deneysel sonuçlar Baziar ve ark. (2011) modelinden elde edilen üst ve alt sınır eğrileri içerisinde kalmakta; ancak, özellikle üst sınır eğrisi deneysel veriye göre daha yüksek eğimde artış göstermektedir.

Şekil 4.9’da benzer relatif sıkılıkta hazırlanmış ($D_r \approx \%40$), aynı basınç altında konsolide edilmiş ($\sigma'_c = 100$ kPa) değişik miktarda uçucu kül içeren kum numunelerinin ($UK = \%0 - 40$) farklı büyüklükte kayma gerilmelerine ($CSR = 0.1 - 0.15$) maruz bırakılması ile elde edilmiş deneysel sonuçlar ve bu sonuçların farklı boşluk suyu basıncı modelleri ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 4.9. Uçucu kül içeren kum numuneleri için boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı oranı ilişkisi ve sonuçların farklı boşluk suyu basıncı modelleri ile karşılaştırılması

Uçucu küllü zeminlerde boşluk suyu basıncının oluşum ve gelişim şekli temiz kumlu zeminlere göre farklılık göstermiş ve boşluk suyu basıncındaki artış daha geniş bir bant içerisinde meydana gelmiştir. Seed ve ark. (1975) tarafından önerilen α değerleri ($\alpha = 0.6 - 1$) dikkate alınarak hesaplanan alt ve üst sınır eğrileri deneysel sonuçların genellikle üstünde kalmaktadır. Enquan ve Qiong (2019) tarafından önerilmiş olan hiperbolik model ile Baziar ve ark. (2011) tarafından önerilmiş olan model kullanılarak elde edilmiş sonuçlar birbirine benzemektedir. Deneysel veriler bu iki boşluk suyu basıncı yöntemine göre hesaplanmış alt ve üst sınır eğrileri içinde yer alsa da boşluk suyu basıncının gelişim şekli tam olarak modellenememiştir. Gerilme tabanlı yöntemlerin tahmin hassasiyeti ve performansı modelde kullanılan ampirik parametrelere bağlı olduğu için zemine özel parametrelerin kullanılması ile daha doğru tahminler elde edilebilecektir.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı termik santrallerden karşılanmaktadır. Termik santrallerde yakılan kömür her yıl milyonlarca ton uçucu kül atığının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu tür endüstriyel atıkların geri dönüştürülerek farklı geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılması ekonomik, çevreci ve sürdürülebilir bir kalkınma için oldukça önemlidir. Literatürde uçucu küllerin kohezyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri hakkında yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Fakat bu tür atık malzemesinin kum gibi granüler zeminlerin deprem gibi tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışını anlamaya yönelik yapılmış çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Uçucu küllerin suya doymuş kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi önemli bir araştırma konusudur.

Bu çalışma kapsamında kumlu zemine belirli oranlarda plastik olmayan F sınıfı uçucu kül eklenerek kum-uçucu kül karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar huniden kuru yağmurlama yöntemi ile kalıba dökülmüş ve çapı 70 mm ve yüksekliği yaklaşık 140 mm olan laboratuvar da yeniden oluşturulmuş zemin numuneleri hazırlanmıştır. Gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler ile suya doymuş, izotropik olarak konsolide edilmiş uçucu küllü kum numunelerinin drenajsız koşullarda ve üniform tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışı belirlenmiştir. Zemin numuneleri %100 boşluk suyu basıncı oluşuncaya kadar kayma gerilmelerine maruz bırakılmış ve deney sürecince boşluk suyu basıncında ve sıvılaşma dayanımında meydana gelen değişimler kayıt altına alınmıştır.

İki farklı deney serisi gerçekleştirilmiştir. İlk grup deneylerde gevşek ve orta sıkılıkta hazırlanmış ve suya doymuş olan kumlu zeminlerde tekrarlı basınç altında gelişen boşluk suyu basıncının çevrim (yükleme) sayısına bağlı olarak değişimi ve buna bağlı olarak meydana gelen mukavemet kayıpları belirlenmeye çalışılmıştır. İkinci grup deneylerde ise kum uçucu kül ile karıştırılarak, uçucu kül ilavesinin ve miktarının kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Her iki deney serisinde de zemin numunelerinin dinamik yükleme öncesinde sahip olduğu relatif sıkılık, uygulanan efektif çevre basıncı, tekrarlı (kayma) gerilme oranı ve çevrim (yükleme) sayısı gibi parametreler değiştirilerek uçucu kül içeren veya içermeyen kumlu zeminlerin farklı deney ve yükleme koşullarındaki sıvılaşma davranışı saptanmaya çalışılmıştır. DeneySEL çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir:

1. Farklı uçucu kül içeriğine sahip suya doygun kumlu zeminler üzerinde yapılan deneyler, uçucu kül yüzdesinin granüler zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışına etki eden en önemli parametrelerden birisi olduğunu göstermiştir. Benzer relatif sıkılıkta hazırlanan ve aynı basınç altında konsolide edilen uçucu küllü kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımının, bir başka ifade ile drenajsız kayma mukavemetinin, kritik uçucu kül oranına ($UK_c = \%20$) kadar azaldığı, bu kritik değer aşıldıktan sonra ($UK = \%20 \rightarrow \%40$) bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.
2. Suya doygun temiz kum numunelerinin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma dayanımı uçucu kül içeren kumlu zemin örneklerinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç deneylerde dikkate alınan uçucu kül yüzdesi aralığı ($UK = \%0 - 40$) için geçerlidir.
3. Drenajsız ortamda ve iki farklı efektif çevre basıncı altında gerçekleştirilen deneyler yardımı ile zeminlerin boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimi ve/veya sıvılaşma dayanımı gibi dinamik davranış özelliklerinin efektif çevre basıncına bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği saptanmıştır. Hem temiz kum hem de uçucu kül içeren kumlu zeminler düşük efektif çevre basıncı altında daha yüksek sıvılaşma direncine sahip olduğu belirlenmiştir.
4. Uçucu kül içeren zeminlerde boşluk suyu basıncının oluşum ve gelişim şekli temiz kumlu zeminlere göre farklılık göstermiştir. Tekrarlı yükler altındaki uçucu küllü kumlu zeminlerde boşluk suyu basıncı artış temiz kum örneklerine göre daha hızlı artmakta ve bu artış daha geniş bir bant içerisinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Nispeten daha büyük danelere sahip kuma silt boyutunda danelere sahip olan uçucu kül ($\frac{(D_{50})_{uçucu\ küll}}{(D_{50})_{kum}} > 0.23$) eklenmesi ile zeminin geçirimsizliği azalmaktadır. Uçucu kül içeren zeminlerde boşluk suyu basıncının daha hızlı artıyor olması azalan zemin geçirgenliği ile açıklanabilir.
5. Temiz kum ve uçucu kül içeren kumlu zeminler üzerinde gerçekleştirilen gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen sonuçlar ile literatürde yaygın kullanıma sahip olan boşluk suyu basıncı modellerinden elde edilen tahminler karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde gerilme tabanlı modellerin zemine özel parametrelerin kullanılması ile daha doğru tahminler verebileceği sonucuna varılmıştır.

5.2 Öneriler

Bu tez kapsamında deney sonuçları dinamik üç eksenli deney sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu test sistemi ile laboratuvarda oluşturulmuş granüler zemin numuneleri istenilen sınır şartlarında ve üniform gerilmeler altında test edilebilmekte ve zeminlerin şekil değiştirme-deformasyon, boşluk suyu basıncı gelişimi ve mukavemet özellikleri belirlenebilmektedir. Farklı dinamik test metodlarına göre birçok avantajı olan bu deney yönteminde küçük çaplı numuneler test edilebilmektedir. İleriki çalışmalarda sarsma tablası veya santrifüj gibi fiziksel test yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu yöntemler ile daha büyük ebatlarda kum-uçucu kül örnekleri test edilebilecek ve yapı-zemin ilişkisi hakkında bilgi sahibi olunabilecektir.

Deneylerde zemin numuneleri 1 Hz frekansa sahip sinüzoidal tekrarlı yükler altında kesilmiştir. Benzer çalışmaların gerçek depremin karakteristiklerini yansıtan dalga formları kullanılarak yapılması önerilmektedir.

Çalışma kapsamında uçucu kül oranı sınırlı bir aralıkta değişmiş (%0 – 40) ve elde edilen sonuçlar bu aralık için geçerlidir. Gelecek çalışmalarda daha geniş bir uçucu kül aralığı (%0 – 100) için bu testlerin yapılması önerilmektedir.

Deneylerde podima kumu ve Seyitömer termal santralinden temin edilmiş puzolonik aktivitesi düşük olan F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları bu iki malzeme için geçerlidir. İleriki çalışmalarda puzolonik aktivitesi yüksek olan C sınıfı uçucu küllerin kullanılması ve puzolonik aktivite sonrası oluşması beklenen çimentolaşmanın suya doymun uçucu küllü kumlu zeminlerin dinamik davranış özellikleri ve sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkilerinin farklı başlangıç ve deney sınırları altında araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Acosta, H. A., Edil, T. B. and Benson, C. H., 2003, Soil stabilization and drying using fly ash, *Geo Engineering Rep. No. 03-03, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, WI.*
- Ahmaruzzaman, M. 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (3), 327-363.
- Akman, M. S., 1993, Ağırlık barajlarında uçucu küllü rolkrit kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Mühendisliğinde Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi*, Ankara, 9-22.
- Alataş, T. (1996), “Afşin Elbistan Termik santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 146.
- Alkaya, D. (2002), “Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin stabilitesine Etkisi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 203.
- Alkaya, D. 2009. Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (1), 61-72.
- Alparslan, H. (2006), “Sıvılaşma Potansiyeline Sahip Zeminlerde İyileştirme Yöntemlerine Ait Kriterlerin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 142.
- Altındış, M. (2020), “Sıvılaşma Analizi ve Sıvılaşma Sonucu Oluşan Yanal Yayılma Hesap Yöntemlerinin Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 125.
- Altun, S. (2003). Burulmalı Kesme Deney Aleti ile Zeminlerin Dinamik Davranış Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 222.
- Altun, S., Goktepe, A. and Akguner, C., 2005, Cyclic shear strength of silts and sands under cyclic loading, *Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Geo-Frontiers Congress*, 24–26 January, Austin, TX, USA, 1-11.
- Amini, F. and Qi, G.Z. 2000. Liquefaction testing of stratified silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, 208-217.
- Andrews, D.C. and Martin, G.R., 2000, Criteria for liquefaction of silty soils, *Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, New Zealand Society for Earthquake Engineering*, January, Upper Hutt, New Zealand, 1-8.
- Arjunan, P., Silsbee, M. R. And Roy, D.M., 2001, Chemical activation of low calcium fly ash Part 1: Identification of suitable activators and their dosage, *International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA, Paper #105.*
- Aruntaş, H.Y. 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1), 193-203.
- ASTM C618-19, 2019, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM D4253-16e1, 2019, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- 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, USA.
- ASTM D5311/D5311M-13, 2013, Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D6913/D6913M-17, 2017, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D854-14, 2014, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- Athanasopoulos, G.A. and Xenaki, V.C. 2008. Liquefaction resistance of sands containing varying amounts of fines, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, May 18-22, Sacramento, California, USA, 1-10.
- Aytekin, S. (2009), “Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin Islahında Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çukurova Üniversitesi, Adana, 116.
- Baki, M.A.L., Rahman, M.M. and Lo, S.R. 2019. Liquefaction of a coal ash investigated by monotonic and cyclic triaxial tests, *Soils and Foundations*, 59 (5), 1522-1536.
- Barman, P. and Singh, B. 2020. Strength characteristics of sand amended with two waste materials-Fly ash and scrap tyre, *Environmental Processes*, 7, 653–672.
- Barman, S.C., Kisku, G.C. and Bhargava, S.K. 1999. Accumulation of heavy metals in vegetables, pulse and wheat grown in fly-ash amended soil, *Journal of Environmental Biology*, 20 (1), 15-18.
- Barnes D. I. and Sear L. K. A. 2006., Ash Utilization from coal-based power plants, *Hatterrall Associates and the United Kingdom Quality Ash Association (UKQAA)*, UK, COAL-R-274, 1-131.
- Bayat, O. 1998. Characterisation of Turkish fly ashes, *Fuel*, 77 (9-10), 1059-1066.
- Baziar, M.H., Shahnazari, H. and Sharafi, H. 2011. A laboratory study on the pore pressure generation model for Firouzkooch silty sands using hollow torsional test. *International Journal of Civil Engineering*, 9 (2), 126-134.
- Berg, W.V. and Feuerborn, H.J., 2005, Present situation and perspective of CCP management in Europe, *Proceeding of World of Coal Ash (WOCA)*, Lexington, Kentucky, USA, April 11-15, 1–10.
- Bertalot, D., Brennan, A.J. and Villalobos, F.A. 2013. Influence of bearing pressure on liquefaction-induced settlement of shallow foundations, *Géotechnique*, 63 (5), 391-399.
- Bilgen, G. and Altuntas, F. 2023. Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material, *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01815.
- Booker J. R., Rahman M. S. and Seed H. B., 1976, GADFLEA-A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake

- loading, *Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, California, USA, EERC 76-24.*
- Boulanger, R., Meyers, M., Mejia, L. and Idriss, I.M. 1998. Behavior of a fine-grained soil during Loma Prieta earthquake, *Canadian Geotechnical Journal* 35 (1), 146-158.
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T. L., Stewart, J. P., Seed, R.B., Cetin, O.K., Bol, E., Baturay, M.B., Christensen, C. And Karadayilar, T. 2004. Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (7), 673-685.
- Brennan, A.J. and Madabhushi, G.S.P. 2005. Liquefaction and drainage in stratified soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (7), 876-885.
- British Standards Institution, 2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, BSI, Brussels, Belgium.
- Bureau of Ports and Harbors, 1989, Earthquake resistant design for quay walls and piers in Japan, *Ministry of Transport, Japan.*
- Büyüköner, B. (1989), "Properties of Compacted and Steam Cured Fly Ash Lime Masonryunits", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, ODTÜ, Ankara, 93.
- Caldas-Vieira, F. and Feuerborn, H.J., 2013, Impact of political decisions on production and use of coal combustion products in Europe, *World of Coal Ash, WOCA*, Lexington, Kentucky, USA, 22-25 April, 17.
- Casagrande, A. 1936. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 23 (1), 13-32.
- Castro, G. 1975. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101 (6), 551-569.
- Cetin, B., Aydilek, A.H. and Guney Y. 2010. Stabilization of recycled base materials with high carbon fly ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, (11), 878-892.
- Chand, S.K. and Subbarao, C. 2007. Strength and slake durability of lime stabilized pond ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (7), 601-608.
- Chang, N. Y., 1990, Influence of fines contents and plasticity on earthquake-induced soil liquefaction, *Contract Report to US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA, Contract No. DACW3988-C-0078.*
- Chattaraj, R. and Sengupta, A. 2017. Dynamic properties of fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (1), 04016190.
- Chian, S.C. and Madabhushi, S.P.G. 2012. Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 181-190.
- Chu, S.C. and Kao, H.S. 1993. A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag, *American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication: Fly Ash for Soil Improvement*, 36, 89-99.

- Cicek, T. and Tanriverdi, M. 2007. Lime based steam autoclaved fly ash bricks, *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1295-1300.
- Cooke, H. G. (2000), "Ground Improvement for Liquefaction Mitigation at Existing Highway Bridges", *PhD Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Cristelo, N., Glendinning, S. and Teixeira Pinto, A. 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164 (2), 73-82.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D. and Silva, R. 2012. Soil stabilization using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727-735.
- Cubrinovski, M. and Rees, S., 2008, Effects of fines on undrained behaviour of sands, *Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress IV*, 18-22 May, Sacramento, CA, USA, 18-22.
- Çetin, K. Ö. ve Unutmaz, B., 2004, Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430, 32-37.
- Day, R. W., 2002, Geotechnical earthquake engineering handbook, *The McGraw-Hill Companies, Inc.*, New York.
- Demir, I., Başpınar, M.S., Görhan, G. and Kahraman, E. 2009. Preliminary investigation of Seyitomer fly ash for use in building brick manufacturing, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (3), 131-137.
- Demiröz, A. 2009. Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı, *Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergi*, 3 (1), 66-72.
- Dere, A. (2009), "Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi ve Adapazarı için Örnek Uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 121.
- Derinöz, N., 2004, Hakkari Barajı ve HES projesi zemin sıvılaşma riskinin belirlenmesi, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 431 (3), 33-38.
- Dissanayake, T.B.C.H., Senanayake, S.M.C.U. and Nasvi, M.C.M. 2017. Comparison of the stabilization behavior of fly ash and bottom ash treated expansive soil, *Engineer: Journal of the Institution of Engineers*, 50 (1), 11-19.
- Dobry, R., Vasquez-Herrera, A., Mohamad, R. and Vucetic, M. 1985. Liquefaction flow failure of silty sand by torsional cyclic tests, *Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, 29-50.
- Edil, T.B., Acosta, H.A. and Benson, C.H. 2006. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2), 283-294.
- Eftelioğlu, M. and Bowders, J.J., 1992, Permeability testing of fly ash/grout specimens, Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, Balkame, Rotterdam, 495-501.
- Elibol, B. (2006), "Kismi Doygun Kumların Tekrarlı Yükler Etkisi Altındaki Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 148.

- Enquan, Z. and Qiong, W. 2019. Experimental investigation on shear strength and liquefaction potential of rubber-sand mixtures, *Advances in Civil Engineering*, 2019, 5934961.
- Erken, A., Alhas, E. ve Ansal, A.M., 1994, Suya doygün siltli kumların depremler sırasındaki davranışı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 184-193,
- Erşan, H. (1996), “Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerinde Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 75.
- Evans, M. D. and Seed, H. B., 1987, Undrained cyclic triaxial testing of gravels: the effect of membrane compliance, *College of Engineering, University of California, CA, USA*, 408.
- Ferritto, J. M., 1997, Seismic design criteria for soil liquefaction, *Naval Facilities Engineering Service Center*, Port Hueneme, CA, USA, 93043-4370.
- Feuerborn, H. J., 2011, Coal combustion products in Europe-An update on production and utilisation, standardisation and regulation, *World Coal Ash 2011 Conference*, May, Denver, CO, USA, paper 007, 9-12.
- Finn, W.D.L., Ledbetter, R. H. and Wu, G. 1994. Liquefaction in silty soils. In: *Ground Failures under Seismic Conditions*, (Eds.) S. Prakash, P. Dakoulou, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication, 44, pp. 51-76. Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, pp. 1-17.
- Gallagher, P.M., Pamuk, A. and Abdoun, T. 2007. Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (1), 33-40.
- Ghahremani, M. and Ghalandarzadeh, A., 2006, Effect of plastic fines on cyclic resistance of sands, *Proceedings of the Soil and Rock Behavior and Modeling, GeoShanghai International Conference*, Shanghai, China, 6–8 June, 406-412.
- Ghosh, R.K., Chadda, L.R., Pant, C.S. and Sharma, R.K. 1973. Stabilization of alluvial soil with lime and fly ash, *Journal of The Indian Roads Congress*, 35 (2), 489-511.
- Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I. and Sokolov, V.N. 2006. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading, *Engineering Geology*, 86 (1), 70-84.
- Hamada, M., 1993, Liquefaction-induced large ground displacement, performance of ground and soil structures during earthquakes, *13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE*, New Delhi, India, 5-10 January, 93-108.
- Hazen, A. 1920. Hydraulic-fill dams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 83 (1), 1713-1745
- Hernández, Y.A., Towhata, I., Gunji, K. and Yamada, S. 2015. Laboratory tests on cyclic undrained behavior of loose sand with cohesionless silt and its application to assessment of seismic performance of subsoil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79 (III-43), 365-378.
- Indraratna, A.S., Balasubramanian, A.K. and Khan, M.J. 1995. Effect of fly ash with lime and cement on the behavior of a soft clay, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28 (2), 131-142.

- Ishihara, K. 1993. The 33rd Rankine lecture: Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique*, 43 (3), 351-451.
- Ishihara, K. and Koseki, J., 1989, Discussion on the cyclic shear strength of fines containing sands, Earthquake Geotechnical Engineering, *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 13–18 August, 101-106.
- Ishihara, K., 1984, Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of pond deposit, *Proceedings of the 1st International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri, USA.
- Ishihara, K., Sodekawa, M. and Tanaka, Y. 1978. Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing fines, *Geotechnical Testing Journal*, 246-264.
- İlhan, T. (1995), “Sülfo Kalsik ve Siliko Kalsik Uçucu Küller İyileştirme ve Rolkritlerde Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- İmançlı, G. (2002), “Uçucu Küllerin Zemin Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 199.
- Joshi, R.C. and Lothia R.P., 1997, Fly ash in concrete: production, properties and uses, *Advances in Concrete Technology*, Gordon and Breach Science Publishers, 2.
- Joshi, R.C. and Nagaraj, T.S. 1987. Fly ash utilization for soil stabilization, environmental geotechnics and problematic soils and rocks. in: (eds.) Balusubramaniam et al., Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 77-93.
- Kaçmaz, U.D. (2019), “Mermer Tozu ve Uçucu Külün Zemin İyileştirilmesinde Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 78.
- Karakan, E. (2015), “Silt İçeriğinin Kumların Dinamik Zemin Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ege Üniversitesi, İzmir, 227.
- Karol, R.H., 2003, Chemical grouting and soil stabilization, 3rd ed., Revised and Expanded, Marcel Dekker, New York, NY, USA.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A. and Nikraz, H. 2017. Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 93, 1-6.
- Kim, B., Prezzi, M. and Salgado, R. 2005. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (7), 914-924.
- Koester, J. P. 1992. The influence of test procedure on correlation of Atterberg limits with liquefaction in fine-grained soils, *Geotechnical Testing Journal*, 15 (4), 352-361.
- Koester, J.P. 1994. The influence of fines type and content on cyclic strength, *Ground Failures under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication, ASCE*, 44, 17-33.
- Kolay, P.K., Puri, V.K., Tamang, R.L., Regmi, G. and Kumar, S. 2019. Effects of fly ash on liquefaction characteristics of Ottawa sand, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5 (6), 1-14.

- Kramer, S.L, 1996, Geotechnical earthquake engineering, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ, USA, 07458.
- Kutay, A. (1994). “Katı Atıkların Depolanmasında Karşılaşılan Geoteknik Problemler”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İTÜ, İstanbul.
- Lade, P.V., Liggio, C.D. and Yamamuro, J.A. 1998. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotechnical Testing Journal*, 21, 336-347.
- Li, X.S., Chan, C.K. and Shen, C.K. 1988. An automated triaxial testing system. in: *Advanced Triaxial Testing of Soils and Rocks*, (Eds.) R.T. Donaghe, R.C. Chaney, M.L. Silver, ASTM, pp. 95-106.
- Liu, L. and Dobry, R. 1997. Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (6), 557-567.
- Lo, S.R. and Wardani, S.P.R. 2002. Strength and dilatancy of a silt stabilized by a cement and fly ash mixture, *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (1), 77-89.
- Mackiewicz, S.M. and Ferguson, E.G. 2005. Stabilization of soil with self-cementing coal ashes, *2005 World of Coal Ash (WOCA)*, Lexington, Kentucky, USA, 1-7.
- Martin, J., Collins R., Browning J. and Biehl F.J. 1990. Properties and use of fly ashes for embankments, *Journal of Energy Engineering*, 116 (2), 71-86.
- Mir, B.A. and Sridharan, A. 2013. Physical and compaction behaviour of clay soil–fly ash mixtures, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31 (4), 1059-1072.
- Mitchell, J.K., Baxter, C.D.P. and Munson, T.C. 1995. Performance of improved ground during earthquakes, *Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation, Geotechnical Special Publication*, ASCE, 49, 1-36.
- Mogami, T. and K. Kubo., 1953, The behavior of soil during vibration, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 152-155.
- Mohanty, S. and Patra, N.R. 2014. Cyclic behavior and liquefaction potential of Indian pond ash located in seismic zones III and IV, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (7), 06014012.
- Mollamahmutoğlu, M. and Babuçcu, F., 2021, Zeminlerde sınıvlaşma analiz ve iyileştirme yöntemleri, *Akademisyen Kitabevi*.
- Monkul, M.M., Etminan, E. and Şenol, A. 2016. Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 185–197.
- Moss, R.E.S., Chen, G. and Tong, L.Y., 2008, Comparing liquefaction procedures in the US and China, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K. and Arulanandan, K. 1977. Effects of sample preparation on sand liquefaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103 (2), 91-108.
- Nataraja, M.C., Jayaram, M.A. and Raikumar, C.N. 2007. Inductive classifying artificial network for fly ash type categorization, *Engineering Letters*, 14 (1), 185-194.

- Nazaroghlu, M.B. (2019), “Zeminlerin Özelliklerini Uçucu Kül İle İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, 115.
- Nong, Z.Z., Park, S.S., Lee, S.B. and Jiang, P.M. 2022. Cyclic resistance of fly ash influenced by anisotropic stress condition, sand contents, and gravel content, *Soils and Foundations*, 62 (3), 101157.
- Özaydın, K., 2007, Zeminlerde sıvılaşma, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 231-255.
- Özdemir, K. (1999), “Kirlenmiş Zeminlerin Islahı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İTÜ, İstanbul, 166.
- Özturan, M. (2017), “Enjeksiyon Yöntemi İle Zemin İyileştirme”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 105.
- Pandey, V.C. and Singh, N. 2010. Impact of fly ash incorporation in soil systems, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136 (1-2), 16-27.
- Park, S.S. and Kim, Y.S. 2013. Liquefaction resistance of sands containing plastic fines with different plasticity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (5), 825-830.
- Phanikumar, B.R. 2009. Effect of lime and fly ash on swell, consolidation and shear strength characteristics of expansive clays: a comparative study, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4 (2), 175-181.
- Polito, C.P. (1999), “*The Effects of Non-Plastic and Plastic Fines on the Liquefaction of Sandy Soils*”, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Polito, C.P., Green, R.A. and Lee, J. 2008. Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (10), 1490-1500.
- Prabakar, J., Dendorkar, N. and Morchhale R.K. 2004. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils, *Construction and Building Materials*, 18 (4), 263-267.
- Robertson, P.K., 1994, Suggested terminology for liquefaction, *Proceedings of the 47th Canadian Geotechnical Conference*, Halifax, N.S. CGS, 277–286.
- Sadek, S. and Saleh, M. 2007. The effect of carbonaceous fines on the cyclic resistance of poorly graded sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, 25, 257-264.
- 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 Adapazari, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (9-12), 1093-1102.
- Santos, F., Li, L., Li, Y. and Amini, F., 2011, Geotechnical properties of fly ash and soil mixes for use in highway embankments, *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Denver, CO, USA, May 9-12.
- Sato, A. and Nishimoto, S., 2005, Effective reuse of coal ash as civil engineering material, *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, Kentucky, USA, April, 11-15.
- Sayılğan, E. and Kürklü, K., 2018, Uçucu kül örneğinden demir ve alüminyum gideriminde taguchi yaklaşımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23 (3), 133-142.

- Scott, M.M. and Ferguson F., 2005, Stabilization of soil with self-cementing coal ashes, *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, Kentucky, USA, 1-7.
- Seed, H. B. (1987). Design problems in soil liquefaction, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 827-845.
- Seed, H.B. 1976. Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes, *Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, ASCE Annual Convention and Exposition*, Philadelphia, PA, October, 1-109.
- Seed, H.B. 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105 (2), 201-255.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. 1967. Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93 (3), 83-108.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1982, Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute, Monograph*, Oakland.
- Seed, H.B. and Lee, K.L. 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92 (6), 105-134.
- Seed, H.B. and Peacock, W.H. 1971. Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (8), 1099-1119.
- Seed, H.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., Faris, A., 2003, Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework, *26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar*, Long Beach, California, 1-4
- Seed, H.B., Idriss, I.M., Makdisi, F. and Banerjee, N., 1975, EERC 75-29 Report: Representation of Irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California: Berkeley, CA, USA.
- 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*, 111 (12), 1425–1445.
- Selçuk, L. (2009), “Zemin Sıvılaşmasına Karşı Optimum Taş Kolon Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara Üniversitesi, Ankara, 175.
- Sharma, N.K., Swain, S.K. and Sahoo, U.C. 2012. Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (5), 1197-1205.
- Shen, C., Vrymoed, J. and Uyeno, C., 1977, The effect of fines on liquefaction of sands, *Proceeding of 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineers*, 2, 381–385.
- Silver, M.L., Park, T.K. 1976. Liquefaction potential evaluated from cyclic strain-controlled properties tests on sands, *Soils and Foundations*, 16 (3), 51-65.
- Singh, D.V. 1996. Bulk utilisation of fly ash in roads and embankments. in: *Ash Ponds and Ash Disposal Systems*, (Eds.) M. Datta, Narosa Publishing House, New Delhi, pp. 374-386.

- Skempton A.W. 1954. The pore-pressure coefficients A and B, *Géotechnique*, 4 (4), 143–147.
- Stewart, J.P., Chu, D.B., Seed, R.B., Ju, J.W., Perkins, W.J., Boulanger, R.W. and Yu, M.S. 2001. Chi-Chi earthquake reconnaissance report: soil liquefaction, *Earthquake Spectra*, 17 (S1), 37-60.
- Şahin, A. (2010), “Uçucu Kül Katkılı Camsı Köpük Malzemelerin Üretim İmkânlarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 106.
- Şenol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A. and Benson, C.H. 2006. Soft subgrades stabilization by using various fly ashes, *Resources Conservation and Recycling*, 46 (4), 365-376.
- Taheri, S.D.M. (1980), “Liquefaction of soil”, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Texas Üniversitesi, El Paso, Teksas.
- Tamang, L.R. 2014, “Effects of Addition of Small Percentages of Fly Ash on Liquefaction Characteristics of Sand”, Master’s Thesis, Southern Illinois University, Carbondale, IL, USA.
- Tao, M., Figueroa, J.L. and Saada, A.S., 2004, Influence of non-plastic fines content on the liquefaction resistance of soil in terms of the unit energy, *Proceedings of the Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, A.A. Balkema Publishers, Bochum, Germany, 223-231.
- Tatsuoka, F., Maeda, S., Ochi, K. and Fujii, S. 1986. Prediction of cyclic undrained strength of sand subjected to irregular loadings, *Soils and Foundations*, 26 (2), 73-90.
- Tezcan, S.S. and Özdemir, Z., 2004, *Liquefaction risk analyses and mapping techniques*, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları, Bebek, İstanbul, 245.
- Thevanayagam, S. 1998. Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (6), 479-491.
- Thevanayagam, S. 2007. Intergrain contact density indices for granular mixes—I: Framework, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6, 123-134.
- Thevanayagam, S. and Mohan, S. 2000. Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands, *Geotechnique*, 50 (1), 1-23.
- Thevanayagam, S., Fiorillo, M. and Liang, J., 2020, Effects of non-plastic fines on undrained cyclic strength of silty sands, *Proceedings of the Soil Dynamics and Liquefaction, Geo-Denver 2000*, Denver, CA, USA, 5–8 August, 77–91.
- Tokay, M. and Erdoğan, K., 1998, Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMA)*, Ankara.
- Toth, P.S., Chan, H.T. and Cragg, C.B. 1988. Coal ash as a structural fill with special reference to Ontario experience, *Canadian Geotechnical Journal*, 25 (4), 694-704.
- Towhata, I., 2008, *Geotechnical earthquake engineering*, Springer, Berlin, Germany.
- Troncoso, J.H. and Verdugo, R. 1985. Silt content and dynamic behavior of tailing sands, *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, USA, 1311-1314.

- Trzebiatowski, B., Edil, T.B. and Benson, C.H., 2004. Case study of subgrade stabilization using fly ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin. in: *Beneficial Reuse of Waste Materials in Geotechnical and Transportation Applications*, (Eds.) A. Aydilek, J. Wartman, GSP No. 127, ASCE, Reston, VA, pp. 123–136.
- TS 639, 1975, Uçucu küller – çimentoda kullanılan, türk standartları enstitüsü, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Tsuchida, H., 1970, Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits, *Abstract of the Seminar at the Port and Harbour Research Institute, Japanese Ministry of Transport: Yokosuka, Japan*, 3.1–3.33.
- Tutar, H.H. (2018), “Uçucu Kül Epoksi Kompozitlerin Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 79.
- Türker, P., Erdoğan B., Katnaş F. and Yeğınobalı, A. 2009. Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *TÇMB Yayınları*, 4. Baskı.
- Ural, N. (2008), “İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 199.
- Usmen, M., Bowders, J. and Gidley J. 1987. Stabilized fly ash use as low-permeability barriers, *Geotechnical Special Publication*, ASCE, 13.
- Uysal, F. (1987), “Geotechnical Properties of the Fly Ashes Produced into Thermal Plants in Turkey”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, ODTÜ, Ankara.
- Ünver, E. (2015), “Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, ESOÜ, Eskişehir, 155
- Verma, C.L., Handa, S.K., Jain, S.K. and Yadav, R.K. 1998. Techno-commercial perspective study for sintered fly ash light-weight aggregates in India, *Construction and Building Materials*, 12 (6-7), 341-346.
- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K.T., 1994, Siting in earthquake zones, Balkema, Rotterdam, 115, 433-446.
- Wang, W.S. 1981. Mechanism of soil liquefaction, *Journal of Hydraulic Engineering*, 5, 22-34.
- Wang, W.S., 1979, Some findings in soil liquefaction, *Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*, Beijing, China, 1-17.
- Wasti, Y. 1990. Uçucu küllerin geoteknik özellikleri ve kullanım olanakları, *Teknik Dergi*, 1 (4).
- Wei, L.M. and Yang, J. 2014. On the role of grain shape in static liquefaction of sand–fines mixtures, *Géotechnique*, 64 (9), 740-745.
- Xenaki, V.C. and Athanasopoulos, G.A. 2003. Liquefaction resistance of sand–silt mixtures: An experimental investigation of the effect of fines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23 (3), 1-12.
- Yılmaz, F., 2016, Zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı, *3rd International Symposium on Environment and Morality (ISEM2016)*, 4-6 November, Alanya/Antalya-Turkey.

- Yoon, S., Balunaini, U., Yildirim, I.Z., Prezzi, M. and Siddiki, N.Z. 2009. Construction of an embankment with a fly and bottom ash mixture: Field performance study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (6), 271-278.
- Youd, T.L. and Gilstrap, S.D., 1999, Liquefaction and deformation of silty and fine-grained soils, *Proceedings of the International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisboa, Portugal, 21-25 June 3*, 1013-1020.
- Youd, T.L., Hansen, C.M. and Bartlett, S.F. 2002. Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (12), 1007-1017.
- Youd, T.L., Harp, E.L., Keefer, D.K. and Wilson, R.C. 1985. The Borah Peak, Idaho Earthquake of October 28, 1983-Liquefaction, *Earthquake Spectra*, 2 (1):71-89.
- Zand, B., Tu, W., Amaya, P.J., Wolfe, W.E. and Butalia, T.S. 2009. An experimental investigation on liquefaction potential and postliquefaction shear strength of impounded fly ash, *Fuel*, 88 (7), 1160–1166.

