



T.C.  
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UÇUCU KÜL KATKISININ KOHEZYONLU  
ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

İsmail TOSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Haziran-2024  
MUŞ  
Her Hakkı Saklıdır



**T.C.**  
**MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UÇUCU KÜL KATKISININ KOHEZYONLU  
ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**İsmail TOSUN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Abdülhakim ZEYBEK**

**Jüri Başkanı : Doç. Dr. Gamze BİLGİN**

**Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Erkan KARAKOYUN**

**Haziran-2024**  
**MUŞ**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL ve ONAYI

İsmail TOSUN tarafından hazırlanan “UÇUCU KÜL KATKISININ KOHEZYONLU ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması .../06/2024 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

## 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

İsmail TOSUN

Tarih:

## ÖZET

# UÇUCU KÜL KATKISININ KOHEZYONLU ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

İsmail TOSUN

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

Danışman: Doç. Dr. Abdülhakim ZEYBEK

Sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak enerjiye duyulan ihtiyaç sürekli artmakta ve artan enerji talebini karşılamada termik santraller önemli bir yer tutmaktadır. Termik santrallerde linyit ve taş kömürünün yakılması sonucu her yıl büyük miktarda uçucu kül atığı ortaya çıkmaktadır. Genellikle santral dışında depolanan ve ciddi çevresel ve ekonomik problemlere neden olan uçucu kül atığının değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Uçucu küllerin kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanılması artan çevresel problemlere karşı ekonomik ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Uçucu kül, kendi kendine sertleşme ve çimentolaşma özelliği olmayan, ancak sulu bir ortamda kalsiyum oksit gibi bileşiklerin ortamda bulunması ile puzolanik etkisi önemli ölçüde artan bir malzemedir. Literatürde, uçucu küllerin puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak ve çimentolaşma özelliğini artırmak için sıklıkla sönmüş kalsiyum kireci kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında, uçucu kül ile birlikte sönmüş kalsiyum kireci yerine mermer tozu atığı kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan F sınıfı uçucu kül Seyitömer termik santralinden elde edilmiştir. Uçucu kül ve mermer tozu atığı %3, %6, %9 ve %12 oranlarında zemine (kaolin kili) katılarak yalnız zemin, zemin + uçucu kül ve zemin + uçucu kül + mermer tozu karışımları oluşturulmuştur. Uçucu kül ve mermer tozu atıklarının kohezyonlu zeminlerin fiziksel özellikleri ve mekanik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için, hazırlanan karışımlar üzerinde kıvam limit, serbest şişme, lineer büzülme, kompaksiyon (proktor), serbest basınç, kesme kutusu, düşen koni ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) gibi kapsamlı laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Kür süresi etkisini incelemek için, belirli sayıdaki karışımlar 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiş ve sonrasında serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarının ayrıntılı değerlendirilmesi sonucu, uçucu kül içeriğinin artması ile kaolin kilinin likit limit, plastisite indeksi, şişme ve büzülme potansiyeli değerlerinin düştüğü görülmüştür. Uçucu kül ve atık mermer tozunun birlikte kullanılması sonucunda bu azalmanın çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Zemin-uçucu kül-mermer tozu atığı karışımının, zemin-uçucu kül karışımına kıyasla daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve daha düşük optimum su muhtevası değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, kaolin kiline uçucu kül ile birlikte mermer tozu atığının katılması ve elde edilen karışımın belirli bir süre kür edilmesi sonucunda zeminin serbest basınç dayanımında önemli artışlar görülmüştür. Benzer şekilde, kaolin kilinin drenajsız kayma mukavemetinin uçucu kül ve uçucu kül-mermer tozu atığı içeriğinin artması ile önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Direkt kesme kutusu deneyinden elde edilen sonuçlar, saf katkısız zeminle kıyaslandığında kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerin uçucu kül ve uçucu kül-mermer tozu atığı içeriğiyle arttığını göstermiştir. Kaolin kilinin CBR değeri %6 uçucu kül içeriği ile %16,86'dan %24,46'ya, %6 uçucu kül ve uçucu kül-mermer tozu atığı karışımı ile bu değer %31,20'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Bu tez çalışması ile, uçucu kül atığının özellikle mermer tozu gibi farklı endüstriyel atıklar ile birlikte kullanılmasının problemlili zeminlerin ıslahında oldukça iyi sonuçlar ortaya koyacağı vurgulanmıştır. Uçucu kül ve atık mermer tozunun ile birlikte kullanılması sonucunda kaolin kilinin fiziksel ve mekanik özelliklerinde görülen pozitif değişimlerin zemin ve uçucu kül karışımına göre çok daha fazla olacağı sonucuna varılmıştır.

2024, 61 Sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Problemlili zeminler, Zemin iyileştirme, Uçucu kül, Mermer tozu.

## ABSTRACT

# INFLUENCE OF FLY ASH ON ENGINEERING PROPERTIES OF COHESIVE SOILS

İsmail TOSUN

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

Advisor: Assoc. Prof. Abdülhakim ZEYBEK

The need for energy constantly increases due to industrialization, urbanization, and technological developments. Thermal power plants play an important role in fulfilling such energy demand. A significant amount of coal fly ash is generated every year as lignite and anthracite coal are burnt in thermal power plants, called the coal combustion process. The fly ash is usually stored outside the power plants, causing serious environmental and economic problems. Hence, the dismissal and reuse of fly ash are of great importance. The use of fly ash in the stabilization of cohesive soils offers economical and sustainable solutions to increasing environmental problems. Fly ash does not have self-hardening and cementation properties; however, its pozzolanic effect increases significantly in the presence of compounds such as calcium oxide in an aqueous environment. In the literature, hydrated lime is often used to accelerate the pozzolanic reaction of fly ash and increase its cementation ability. In this study, instead of hydrated lime, marble powder waste was used along with Class F fly ash, obtained from the Seyitömer thermal power plant. Fly ash and marble dust waste were added to the soil (kaolin clay) at the proportions of 3%, 6%, 9%, and 12% to form soil only, soil + fly ash and soil + fly ash + marble powder mixtures. Comprehensive laboratory experiments, including consistency limit, free swelling, linear shrinkage, compaction, unconfined compression, direct shear box, falling cone, and California Bearing Ratio (CBR), were conducted on the prepared mixtures to elucidate the effects of fly ash and marble dust wastes on the physical properties and mechanical behavior of cohesive soils. Some mixtures were cured for 7 and 28 days and then subjected to unconfined compression tests to examine the effect of curing time. The detailed analysis of the experimental results showed that the liquid limit, plasticity index, swelling, and shrinkage potential of kaolin clay decreased with the increase in fly ash content. The observed reduction in these values was much higher when fly ash was used along with waste marble dust. The soil-fly ash-marble dust waste mixtures had a higher maximum dry unit volume weight and lower optimum water content values compared to the soil-fly ash mixtures. In addition, the unconfined compressive strength of the soil specimens appeared to increase significantly as marble dust waste and fly ash were added together to kaolin clay and cured for a certain period. Similarly, the undrained shear strength of kaolin clay was found to increase significantly with the increase of fly ash and fly ash-marble powder waste content. The direct shear box test results indicated that the cohesion and internal friction angle values of the soil mixtures increased with increasing fly ash and fly ash-marble powder waste content, and the mixtures had higher cohesion and internal friction angle values compared to the pure soil specimens. The CBR value of kaolin clay increased from 16.86% to 24.46% with 6% fly ash content, and this value increased to 31.20% with 6% fly ash-marble powder waste mixture. The findings presented in this study emphasize that the use of fly ash together with different industrial wastes, especially marble dust, will produce very promising results in the stabilization of problematic soils. The positive changes in the physical and mechanical properties of kaolin clay are expected to be more apparent in the case of soil-fly ash-waste marble dust mixtures as compared to soil-fly ash mixtures.

2024, 61 Pages

**Keywords:** Problematic soils, Soil stabilization, Fly ash, Marble dust.

## TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum yüksek lisans tez çalışması boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana yol göstererek yapmış olduğu katkılardan dolayı danışman hocam Sayın Doç. Dr. Abdülhakim ZEYBEK'e ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi aşamalarında destekte bulunan Sayın Arő. Gör. Muhammed TANYILDIZI'na teşekkürlerimi sunarım. Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

İsmail TOSUN  
MUŞ-2024



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Gerekçesi .....	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	3
1.3 Konu ile İlgili Daha Önceki Yapılan Çalışmalar .....	4
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>7</b>
2.1 Zeminlerin İyileştirilmesi.....	7
2.1.1 Problemlili Zeminler .....	7
2.1.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	9
2.1.3 Katkı Malzemeleri Kullanarak Zeminin Stabilizasyonu.....	11
2.2 Uçucu Küller .....	14
2.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması .....	15
2.2.2 Uçucu Küllerin Özellikleri.....	16
2.2.2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri .....	16
2.2.2.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri ve Yapıları.....	17
2.2.2.3 Türkiye’deki Uçucu Küller .....	17
2.2.3 Uçucu Küllerin İnşaat Mühendisliği ve Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı .....	18
2.2.4 Uçucu Küllerin Zeminlerin Mühendislik Davranışı Üzerindeki Etkisi .....	19
2.3 Mermer Tozu.....	20
2.3.1 Mermer Tozunun Ortaya Çıkışı .....	20
2.3.2 Mermer Tozunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	21
2.3.3 Mermer Tozunun İnşaat Mühendisliği ve Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı .....	22
2.3.4 Mermer Tozunun Zeminlerin Mühendislik Davranışı Üzerindeki Etkisi .....	22
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>24</b>
3.1 Deneilerde Kullanılan Malzemeler ve Temel Fiziksel-Kimyasal Özellikleri.....	24
3.2 Geoteknik Laboratuvar Testleri .....	29
3.2.1 Kıvım Limitleri Deneyi ve Esasları.....	29
3.2.2 Serbest Şişme Deneyi ve Esasları .....	30
3.2.3 Lineer Büzülme Deneyi ve Esasları .....	31

3.2.4 Kompaksiyon (Proktor) Deneyi ve Esasları.....	31
3.2.5 Serbest Basınç (Tek Eksenli Basınç) Deneyi ve Esasları .....	32
3.2.6 Kesme Kutusu Deneyi ve Esasları .....	34
3.2.7 Düşen Koni Deneyi ve Esasları.....	34
3.2.8 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi ve Esasları.....	35
3.3 Test Programı ve Detayları .....	36
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>38</b>
4.1 Zemin Sınıfının Belirlenmesi.....	38
4.1.1 Plastik Limit, Likit Limit ve Plastisite Deney Sonuçları .....	38
4.1.2 Uçucu Kül ve Mermer Tozu Katkılı ve Katkısız Zeminin Sınıfı.....	40
4.2 Serbest Şişme Deney Sonuçları .....	40
4.3 Lineer Büzülme Deney Sonuçları .....	41
4.4 Kompaksiyon Deney Sonuçları.....	42
4.5 Serbest Basınç (Tek Eksenli) Deney Sonuçları .....	44
4.6 Drenajsız Kayma Mukavemeti Deney Sonuçları.....	49
4.7 Kesme Kutusu Deney Sonuçları .....	50
4.8 Kaliforniya Taşıma Oranı Deney Sonuçları.....	52
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>54</b>
5.1 Sonuçlar .....	54
5.2 Öneriler .....	55
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>56</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>61</b>

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

$d$	: Koniğin Numuneye Batma Derinliği
$\gamma_k$	: Kuru Birim Hacim Ağırlığı
$\gamma_n$	: Yaş Birim Hacim Ağırlığı
$G_s$	: Özgül Ağırlık
$\Delta H$	: Yükseklik Değişimi
$H_1$	: İlk Yükseklik
$k$	: Konik Katsayısı
$kN$	: Kilo Newton
$kPa$	: Kilo Pascal
$LL, W_L$	: Likit Limit
$L_0$	: Numune İlk Boyu
$L_f$	: Numune Son Boyu
$L_s$	: Büzülme
MW	: Megawatt
$PI, I_p$	: Plastisite İndisi
$PL, W_p$	: Plastik Limit
$P_{mak}$	: Kırılma Yüğü
$\sigma$	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
$S_u$	: Drenajsız Kayma Mukavemeti
$u$	: Boşluk Suyu Basıncı
$u_e$	: (Aşırı) Boşluk Suyu Basıncı
$w$	: Optimum Su Muhtevası
$W$	: Konik Ağırlığı
$W_{uçucu kül}$	: Uçucu Külün Kuru Ağırlığı
$W_n$	: Doğal Su Muhtevası

### Kısaltmalar

AASHTOO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
AMT	: Atık Mermer Tozu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BS	: British Standards
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
MDD	: Kuru Birim Hacim Ağırlığı
MTA	: Maden Tetkik Arama Enstitüsü
OMC	: Optimum Su Muhtevası
TS EN	: Türk Standardı-Avrupa Normları
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
UK	: Uçucu Kül
$UK_c$	: Kritik (Sınır) Uçucu Kül Yüzdesi
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Kohezyonsuz zeminlerde tanecik dağılımı.....	7
Şekil 2.2	Kohezyonlu zeminlerde tanecik dağılımı.....	8
Şekil 2.3	Şişen zeminlerin oluşturduğu hasarlar.....	9
Şekil 2.4	Kireç ilavesinin zemin türüne göre etkisi.....	12
Şekil 2.5	Çimento katkı yüzdesinin şişme miktarına etkisi.....	13
Şekil 2.6	Uçucu kül.....	14
Şekil 2.7	Uçucu külün elektron mikroskopundaki görüntüsü .....	15
Şekil 2.8	Ülkemizdeki termik santraller haritası .....	17
Şekil 2.9	Mermer tozunun oluşumu.....	21
Şekil 2.10	Ocakta açığa çıkan mermer tozu.....	21
Şekil 3.1	Kaolin kili.....	24
Şekil 3.2	Kaolin kili dane çapı dağılım eğrisi.....	25
Şekil 3.3	Uçucu kül.....	26
Şekil 3.4	Uçucu kül dane çapı dağılım eğrisi.....	27
Şekil 3.5	Atık mermer tozu.....	28
Şekil 3.6	Atık mermer tozunun dane çapı dağılım eğrisi .....	28
Şekil 3.7	Likit limit (a) ve Plastik limit deneyi (b).....	29
Şekil 3.8	Serbest şişme deneyi.....	30
Şekil 3.9	Lineer büzülme deneyi.....	31
Şekil 3.10	Kompaksiyon deneyi.....	32
Şekil 3.11	Tek eksenli basınç dayanımı deneyi.....	33
Şekil 3.12	Kesme kutusu deney cihazı.....	34
Şekil 3.13	Düşen koni deney cihazı.....	35
Şekil 3.14	CBR deneyi.....	36
Şekil 4.1	Zeminin likit limit değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi.....	39
Şekil 4.2	Zeminin plastik limit değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi.....	39
Şekil 4.3	Zeminin plastik indeksinin değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi.....	39
Şekil 4.4	USCS sınıflandırma yöntemine göre uçucu kül ve mermer tozu katkılı ve katkısız zeminin sınıflandırılması.....	40
Şekil 4.5	Zeminin serbest şişme (%) değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi.....	41
Şekil 4.6	Zeminin lineer büzülme (%) değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi.....	42

<b>Şekil 4.7</b> Zeminin farklı su içeriklerindeki birim hacim ağırlıklarının UK içeriği ile değişimi.....	43
<b>Şekil 4.8</b> Zeminin farklı su içeriklerindeki birim hacim ağırlıklarının UK-AMT içeriği ile değişimi.....	43
<b>Şekil 4.9</b> Zeminin MDD ve OMC değerlerinin farklı UK içeriklerindeki değişimi ....	44
<b>Şekil 4.10</b> Zeminin MDD ve OMC değerlerinin farklı UK-AMT içeriklerindeki değişimi.....	44
<b>Şekil 4.11</b> Zeminin MDD ve OMC değerlerinin farklı UK-AMT içeriklerindeki değişimi.....	45
<b>Şekil 4.12</b> 7 gün kürlenmiş zemin ve UK karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği.....	46
<b>Şekil 4.13</b> 28 gün kürlenmiş zemin ve UK karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği.....	46
<b>Şekil 4.14</b> 0 gün kürlenmiş zemin ve UK-AMT karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği.....	47
<b>Şekil 4.15</b> 7 gün kürlenmiş zemin ve UK-AMT karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği.....	47
<b>Şekil 4.16</b> 28 gün kürlenmiş zemin ve UK-AMT karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği.....	48
<b>Şekil 4.17</b> 0 gün kürlenmiş zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı.....	48
<b>Şekil 4.18</b> 7 gün kürlenmiş zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı.....	49
<b>Şekil 4.19</b> 28 gün kürlenmiş zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı.....	49
<b>Şekil 4.20</b> UK içeren zemin karışımlarının farklı su muhtevalarındaki $S_u$ değerlerinin değişimi.....	50
<b>Şekil 4.21</b> UK-AMT içeren zemin karışımlarının farklı su muhtevalarındaki $S_u$ değerlerinin değişimi.....	50
<b>Şekil 4.22</b> Zeminin kohezyon değerinin farklı UK-AMT içeriğiyle değişimi.....	51
<b>Şekil 4.23</b> Zeminin içsel sürtünme açısı değerinin farklı UK-AMT içeriğiyle değişimi.....	52
<b>Şekil 4.24</b> Zemin-UK karışımlarının CBR deneyinden elde edilen yük-penetrasyon grafiği.....	53
<b>Şekil 4.25</b> Zemin-UK-AMT karışımlarının CBR deneyinden elde edilen yük-penetrasyon grafiği.....	53

**Şekil 4.26** Zemin-UK -AMT karışımlarının CBR deneyi sonuçları .....53



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1</b>	Zemin sınıfına göre iyileştirme yöntemleri.....	10
<b>Çizelge 2.2</b>	ASTM C 618'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları.....	16
<b>Çizelge 2.3</b>	Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	16
<b>Çizelge 2.4</b>	ASTM C 618'e göre sınıflandırılan uçucu küllerin kimyasal yapıları.....	17
<b>Çizelge 2.5</b>	Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin mineralojik oranları.....	18
<b>Çizelge 2.6</b>	Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri.....	18
<b>Çizelge 2.7</b>	Mermer tozunun fiziksel özellikleri.....	22
<b>Çizelge 2.8</b>	Mermer tozunun kimyasal özellikleri.....	22
<b>Çizelge 3.1</b>	Kaolin kilinin mühendislik özellikleri.....	25
<b>Çizelge 3.2</b>	Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları.....	27
<b>Çizelge 3.3</b>	Atık mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları.....	29
<b>Çizelge 3.4</b>	Saf kil, kil-uçucu kül ve kil-uçucu kül-mermer tozu-karışımları üzerinde yürütülen deneylerin genel özellikleri.....	37

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Çalışmanın Gerekçesi

Dünyada hızlı nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler neticesinde enerjiye olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Ülkelerin gelişebilmesi ve kalkınabilmesi için gerekli olan enerji ihtiyacını en makul ve akılcı yoldan elde etmeleri gerekmektedir. Bu sebeple elde edilecek enerjiyi ucuza mal ederek tüketilecek enerjiyi en aza indirgeyebilmek oldukça önemlidir. Ülkelerin söz konusu enerji ihtiyacını karşılayabilmeleri için son yıllarda termik enerji santrallerin sayısı oldukça artmıştır (Alataş, 1996).

Termik enerji santrallerinde enerji üretimi için kömürün küçük-ince ebatlarda yakılması esnasında ortaya çıkan küller, filtrelerle bacalarda tutulmaktadır. 1-150 mikron boyutlarında ve hafif olduğu için uçabilen bu atıklara uçucu kül denilmektedir. Dünya genelinde açığa çıkan uçucu küllerin en fazla %25'i geri dönüştürülmektedir. Çin ve Amerika'dan başka gelişmiş ülkelerde uçucu külün geri dönüştürülmesi daha yaygındır. Almanya, Hollanda ve Belçika'da açığa çıkan uçucu küllerin %95'den fazlası ve İngiltere'de ise %50'si değerlendirilirken ülkemizde bu sayı çok düşük seviyelerdedir. Uçucu küllerin yol açtığı çevresel sorunların başında hava kirliliği, toz, erozyon, toprağın emmesi durumunda dolaylı toksit maddelerin taşınması ve radyasyon gelmektedir (Kaçmaz, 2019).

Termik santrallerde atık olarak oluşan uçucu kül miktarının çok büyük boyutlara ulaşması ile birlikte uçucu külün atık olarak depolanması yerine geri dönüşümünün sağlanarak değerlendirilebilmesinin yollarını aramak oldukça önemli bir hale gelmiştir. Uçucu külün geri dönüştürülerek farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında (nitelikleri yetersiz, problemlili zeminlerin iyileştirilmesi vb.) kullanımı ile depolama ve bununla ilişkili çevre sorunları azaltılabilmekte ve termik santralin etkinliği önemli ölçüde artırılabilmektedir (Dehghanian, 2021).

Zeminlerin emniyet gerilmesi, dere ıslahları, atık su hatları gibi altyapı çalışmaları ile üst yapı inşaatları ve her türlü yapı temellerinin oturduğu zeminler için çok önemlidir. Kohezyonlu zeminlerin mekanik özelliklerindeki yetersizlikler, uygulamalarda birçok probleme neden olmaktadır (Acar, 2019). Suya doygun olmayan bazı killi zeminlerin su ile temas ettiğinde suyu emerek hacmini arttırması sonucu oluşan basınç, killerin "şişme" özelliği olarak tanımlanmaktadır. Oluşan şişme basıncı, temel sistemlerinde ve döşeme elemanlarında mimari ve yapısal hasarlara sebep

olabilmektedir (Ünver, 2015). Ayrıca killi zeminlerde yapılan mühendislik uygulamalarında taşıma gücü zayıflığı ve zemin oturması gibi sıkıntılarla fazlasıyla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu durumda uygulama yerinin değiştirilmesi maliyetli olabileceği için bunun yerine killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kireç gibi farklı katkı veya atık malzemeleri ile iyileştirilmesi, maliyet ve uygulanabilirlik açısından daha kalıcı ve uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır (Bilgen, 2020; Totiç ve ark., 2019).

Yapılan çalışmalar, uçucu küllerin özellikle kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmede oldukça etkili bir yöntem olduğu ve zemin iyileştirici malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Uçucu kül katkısı ile kohezyonlu zeminlerin serbest basınç ile kayma dayanımında ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerlerinde artışlar görülmüştür. Bu sayede zeminlerin oturma ve şişme potansiyelinde azalmalar ve taşıma gücünde artmalar tespit edilmiştir.

Uçucu küller, kendi başına sertleşme, çimentolaşma veya dayanım kazanma özelliği olmayan, ancak sulu bir ortamda kalsiyum oksit (CaO) gibi bileşiklerin ortamda bulunması ile puzolanik etkisi önemli ölçüde artan bir malzemedir. Mevcut literatürde uçucu küllerin puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak ve çimentolaşma özelliğini artırmak için sıklıkla sönmüş kalsiyum kireci kullanılmıştır. Sönmüş kalsiyum kirecinin farklı türde ticari ve endüstriyel kullanım alanları bulunmakta ve üretimi ve işlenmesi sırasında belirli bir maliyet ortaya çıkmaktadır. Ülke kaynaklarının (enerji, ham madde vb.) verimli kullanılması ve maliyetlerin düşürülmesi adına sönmüş kalsiyum kireci yerine benzer özellikteki farklı endüstriyel atıkların kullanımı oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, uçucu kül ile birlikte sönmüş kalsiyum kireci yerine mermer tozu atığı kullanılması amaçlanmıştır.

Maden Tetkik Arama Enstitüsü'ne (MTA) göre ülkemizde 5 milyar metreküp mermer rezervi bulunmaktadır ve söz konusu mermer sahalarının sadece %8'i işletmeye alınmıştır. Bu sayı küresel ölçekte %40 oranına tekabül etmektedir. Açık ocak işletmelerinde mermerin işlenebilmesi için kesme, yıkama, silme ve cilalama aşamalarından geçmesi gerekmektedir. Bahsi geçen işletmelerdeki 1 metreküp büyüklüğünde mermer bloğu yaklaşık 3 ton ağırlığındadır ve kesme aşamasında yaklaşık %30 oranında fire olmaktadır. Atık tozlar değerlendirmeyip açık depolarda bekletildiğinde ekosistemde hava kirliliği, yer altı sularını kirletme, tarım arazilerinde verimliliği düşürme gibi birçok ciddi zarara sebep olmaktadır (Yıldız, 2012; Cömert,2012).

Uçucu kül ve mermer tozu atığının zemin ıslah çalışmalarında birlikte kullanımı her geçen gün artan çevresel sorunların azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Ancak, her iki malzemenin bu tür uygulamalarda daha etkin ve yaygın olarak kullanımını sağlamak için konu ile ilgili kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Küresel ölçekte artan nüfus ve bunun sonucunda enerjiye olan ihtiyacın artması beraber kurulan termik santrallerden açığa çıkan atık malzemelerin de miktarı artmıştır. Söz konusu endüstriyel atıkların depolanması veya çevreye salınması birçok çevre problemini ortaya çıkarmaktadır. Mevcut termik santraller her yıl yüksek miktarda uçucu kül açığa çıkarmaktadır ve sadece çok küçük bir kısmı geri dönüştürülerek kullanılmaktadır. Uçucu küller sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde baraj ve yol yapımında, zemin ıslahında ve beton-çimento üretiminde kullanılabilir. Bu sayede endüstriyel atıkların ekonomiye kazandırılması ve en önemlisi çevresel etkilerinin azaltılması mümkün olabilmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte dünyanın birçok ülkesinde konut, ulaşım ağları, raylı sistemler, otoyol, köprü, barajlar gibi birçok alanda mühendislik çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu inşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle yüksek kil içeriğine sahip kohezyonlu zeminlerde taşıma gücü yetersizliği, oturma ve şişme problemleri ile sıklıkla karşılaşmaktadır. Düşük taşıma gücü veya yüksek oturma-şişme potansiyeline sahip kohezyonlu zeminler üzerinde yapılaşmaya gidilmeden önce zeminin mühendislik özelliklerinin kimyasal, fiziksel veya mekanik yöntemlerle iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu tür problemlili zeminlerin farklı katkı maddeleri ilave edilerek geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi ekonomik bir ıslah yöntemidir ve bu konuda yapılan bilimsel araştırmalar artarak devam etmektedir. Özellikle termik santral atığı olan uçucu külün katkı maddesi olarak kullanılması zeminin stabilizasyon maliyetini oldukça düşürebileceği gibi bu tür atık maddelerin depolanma giderlerini ve zararlı çevresel etkilerini de önemli derecede azaltabilecektir.

Bu tez çalışması ile termik santrallerden atık malzeme olarak ortaya çıkan uçucu külün, kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkileri incelenecek ve uçucu kül katkısının kohezyonlu zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılması, sahalarda depolanma masraflarının azaltılması ve çevre problemlerinin azalması konusunda literatüre katkıda bulunulacaktır. Aynı zamanda, uçucu kül atığının özellikle mermer

tozu gibi farklı endüstriyel atıklar ile birlikte kullanılmasının problemleri zeminlerin ıslahında kullanılabilirliği araştırılacaktır.

Bu tezin ilk bölümünde çalışmanın gerekçesi, amacı, kapsamı ve çalışma konusu ile ilgili kısa bir literatür özeti verilmiştir. İkinci bölümünde zemin ıslahı, uçucu küller ve atık mermer tozu hakkında detaylı literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde yapılacak olan deneyler ve kullanılacak malzemeler açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deney sonuçları tartışılmıştır. Beşinci bölümde deneylerde elde edilen verilerin analizi ile birlikte ortaya çıkan sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.

### 1.3 Konu ile İlgili Daha Önceki Yapılan Çalışmalar

Ülkemizde uçucu külün kullanımı ile ilgili öncelikli çalışmalar 1964 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır ve söz konusu çalışmalarda uçucu kül, çimento ile betonda katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Elde edilen veriler sayesinde Gökçekaya Barajı inşaatında kullanılan betona katkı malzemesi olarak uçucu kül eklenmiştir (Alataş, 1996).

Uçucu kül atıklarının zemin iyileştirilme uygulamalarında kullanımı ile ilgili çalışmalar gittikçe artmaktadır. Uçucu kül ilave edilen zeminin şişme potansiyelinin azalmasının, uçucu külün zemin tanecikleriyle yaptığı etkileşimden kaynaklandığı öne sürülmektedir. %14 şişme potansiyeline sahip kil zemine uçucu kül eklenmesiyle bu oranın %0,8'e düştüğü belirlenmiştir (Ferguson, 1993). Geçirgenliği azaltıcı etkisi olan uçucu küller, zararlı atık depolarında ve katı atık tesislerinde geçirimsiz bir katman oluşturmak için kullanılabilir (Wasti, 1993). Chu ve Kao (1993) yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli gri Tayvan kiline bağlayıcı özellik kazandırmak amacıyla içerisinde kireç olan yüksek fırın cürufu katmışlardır ve uçucu kül oranı sabit tutulup yüksek fırın cürufu oranı arttıkça permeabilite katsayısının düştüğünü dolayısıyla da geçirimsizliğin azaldığını gözlemlemişlerdir. Şişme potansiyeli yüksek olan Hawaii kiline, belirli oranlarda uçucu kül ve kireç eklendiğinde şişme potansiyelinde düşüş; sıkışma değerlerinde ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerinde artış olduğu görülmüştür (Nicholson ve ark., 1993).

Uçucu külün; zemin iyileştirme uygulamalarında, katı atık alanlarında ve örtü tabakalarında kullanıldığında kilin kayma direncinde önemli katkıları olacağı tespit edilmiştir (Tan ve İyisan, 1996). Ülkemizde bulunan Soma uçucu külü ile ilgili yapılan araştırmalarda, uçucu külün tek başına katı atık alanlarında geçirimsizlik perdeleri için

istenen permeabilite katsayısı değerini sağlamadığı ancak kireç, çimento ve bentonit katkısıyla istenilen permeabilite değerlerine ulaşabileceği belirlenmiştir (Çokca, 1997).

Dispersif ve şişme eğilimindeki düşük plastisiteli killi numuneler üzerinde değişik oranlarda F sınıfı Çatalağzı ve C sınıfı Soma uçucu külleri ilave edilerek yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, her iki uçucu külün de şişme potansiyelini düşürdüğü, Soma uçucu külünün Çatalağzı uçucu külüne göre şişme dayanımına daha fazla olumlu etki yaptığı, Soma uçucu külünün dispersif davranışa olumlu etkisi olurken Çatalağzı uçucu külünün dispersif davranışa etkisi olmadığı görülmüştür (Ünver, 2015). Eskişehir meşelik kumlu kiline %5-%35 aralığında değişen oranlarda ilave edilen uçucu külün numunenin kuru birim hacim ağırlığını düşürdüğü, optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımını ise arttırdığı tespit edilmiştir (Bilici ve ark., 2019).

Savaş ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada dispersif zeminler için %10 oranında uçucu kül (F ve C sınıfı) kullanılmasının en ideal oran olduğu; aynı ilavelerde C sınıfı uçucu külün söz konusu zeminlerde daha fazla dayanım sağladığı, F sınıfı uçucu külün ise farklı bir katkı maddesi ile beraber kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Uçucu kül ve cüruf ilavesinin kil bir zemindeki kıvam limitleri üzerine etkileri incelendiğinde, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun 30 günlük değişen süreçlerde killerin kıvam limitlerinde kayda değer bir farklılık oluşturmadıkları görülmüştür (Gör ve ark., 2012). Dispersif zeminlerin stabilizasyonunda kireç ve yüksek fırın cürufunun etkileşimine bakıldığında ise, yüksek fırın cürufunun kireç ile karıştırıldığında plastisiteyi düşürdüğü, sadece yüksek fırın cürufunun kullanılması durumunda serbest basınç dayanımını 2 kata kadar arttırdığı, %5 kireç ve %3,33 oranında yüksek fırın cürufu eklenmiş karışımın serbest basınç dayanımını 11 kat arttırdığı tespit edilmiştir (Bilgen ve ark., 2012).

Yarbaşı (2018) yaptığı çalışmada mermer tozu ve atık lastik katkılı kil numunelerinin dayanımlarını ölçmüştür. % 0,5, % 1, % 2 atık lastik ve %5, %10, %15, %20 mermer tozu ilave edilen kil numuneleri içinde dayanımın en fazla %5,1 arttığını ve bu değere ulaşılan oranların atık lastik için %0,5 ve mermer tozu içinde %5 olduğunu belirlemiştir.

Karavaşin ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada atık mermer tozunun zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmış olup, %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında mermer tozunu iki farklı CL sınıfı kil numunelerine ekleyerek numunelerin dayanımlarını ölçmüşlerdir. Düşük plastisiteli killi zemin numunelerinin atık mermer tozu katkısıyla dayanımlarının iyileştiği sonucuna varmışlardır.

Yılmaz ve Demir (2021) yaptıkları çalışmada %6 oranında kireç ve %5, %10, %15 ve %20 oranlarında mermer tozu katkılarını CH sınıfı kil zemin numunesine ilave ederek dayanımlarını ölçmüştür. Kireç ve mermer tozunun beraber kullanılmasının kil zemin numunelerinin dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir.

Cömert (2012) yaptığı çalışmada uçucu kül, mermer tozu ve endüstriyel atık kumu, yol dolgusuna belirli oranlarda ilave ederek hazırlanan numunelere fiziksel, mekanik ve dinamik deneyler uygulamıştır. Uygulanan deneyler sonucunda Kaliforniya Taşıma Değerinin (CBR) düşük olduğu zeminlerde CI ve CL sınıfı zeminlerde %15 oranında kullanılabileceğini tespit etmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

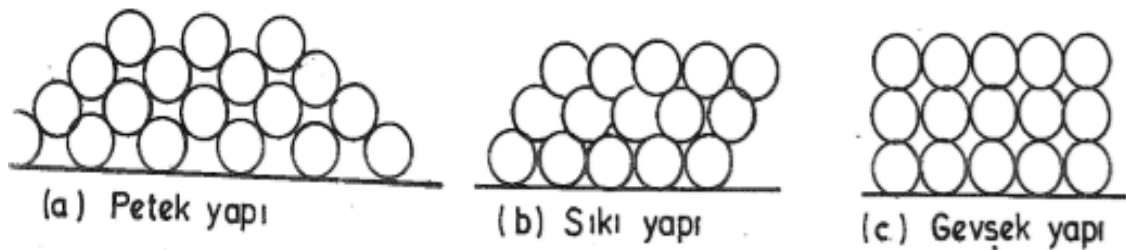
Bu bölümde öncelikle zemin iyileştirmesinin tanımı yapılarak problemlerli zeminler ve zemin iyileştirme yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sınıflandırılması, Türkiye’de uçucu küllerin durumu ve mühendislik uygulamalarında kullanımı hakkında literatür özeti verilmesinin ardından uçucu küllerin zeminlerin mühendislik özelliklerine etkileri anlatılmıştır. Son kısımda ise mermer tozunun ortaya çıkışı, mermer tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri, mühendislik uygulamalarındaki kullanımı ve zeminlerin mühendislik özelliklerine etkileri gösterilmiştir.

### 2.1 Zeminlerin İyileştirilmesi

#### 2.1.1 Problemlerli Zeminler

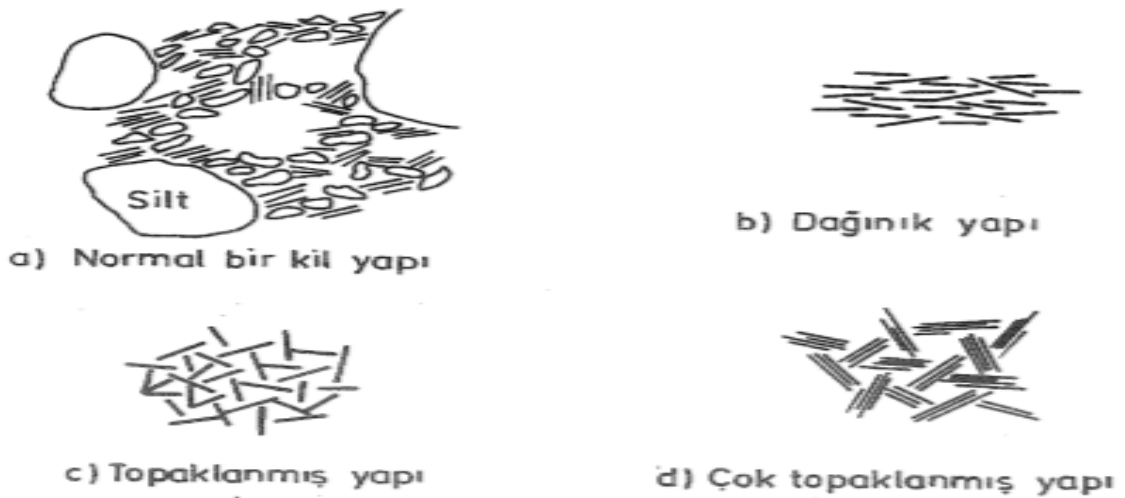
Zemin içindeki taneciklerin meydana getirdiği kuvvetler, bulunduğu zeminin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Zeminler, tanecik ağırlıklarının etkili olduğu kohezyonsuz zeminler ve tanecikler arasındaki yüzeysel kuvvetlerin etkili olduğu kohezyonlu zeminler olmak üzere iki grupta incelenebilmektedir. İki grubu birbirinden ayıran en önemli unsur ise tanecik boyutudur (Yağanoğlu, 2000).

Silt ve killerin tane yapısında bulunan elektriksel negatif yükün su moleküllerine tutunarak tanecikleri birbirine yapıştırmaları sebebiyle oluşan kayma direnci parametresine kohezyon denir (Çinicioğlu, 2005). Tanecik büyüklüğü 0,002 mm’den fazla olan kohezyonsuz veya ayırık tanecikli zeminlerde yüzeysel kuvvetlerin etkisi yok denecek kadar azdır. Kohezyonsuz zeminlerin kayma gerilmesi tanecikler arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Tanecik yapısı ayırık, sıkı ve petek şeklinde olabilmektedir. Bu zemin grubuna kaya, çakıl ve kum örnek olarak verilebilir (Yağanoğlu, 2000). Kohezyonsuz zeminlerin taneciklerinin dağılımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kohezyonsuz zeminlerde tanecik dağılımı (Yağanoğlu, 2000)

Kohezyonlu zemin, TS 1900-1'e göre, içeriğinde bulunan kil mineralleri sebebiyle suyla karıştırıldığında hamurumsu bir kıvama gelebilen zemin türü olarak tanımlanmıştır (Anonim, 2006). Tanecik büyüklüğü 0,002 mm'den az olan kohezyonlu zeminler kurutulduğu zaman sert bir yapı elde edilir. Kohezyonlu zeminlerin kayma gerilmesi tanecikler arasındaki sürtünme ve kohezyon kuvvetinin beraber yapmış olduğu etkiye bağlıdır. Tanecik yapısı dağınık veya topaklanmış halde olabilmektedir. Bu zemin grubuna silt ve killer örnek olarak verilebilir (Yağanoğlu, 2000). Kohezyonlu zeminlerde tanecik dağılımı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Kohezyonlu zeminlerde tanecik dağılımı (Yağanoğlu, 2000)

Şişen zeminler, içeriğinde bulunan su oranının artması durumunda hacmi büyüyen; azalması durumunda ise hacmi küçülen zeminler olarak tanımlanmaktadır. Su ile karşılaştığında hacmi artan dispersif zeminlerdeki bu şişme olayı, zemine giren suyun yeterince buharlaşmaması halinde olmaktadır. Dispersif zeminler üstünde inşa edilen yol, tretuar, havaalanı, çevre duvarları ve boru hatları gibi yapılarda önemli hasarlar görülebilmektedir (Doru, 2014; Bilgen, 2011). Şişen zeminlerin oluşturduğu hasarlara ait bazı örnekler Ankara 100. Mahallesi'nde gözlemlenmiştir (Şekil 2.3).



Şişmeden etkilenmiş hafif yapı



Yapı duvarlarında görülen hasarlar



Bahçe duvarlarında görülen hasarlar



Kapı ve pencerelerde görülen burulmalar



Yolda görülen kabarma kaynaklı bozulmalar

Şekil 2.3 Şişen zeminlerin oluşturduğu hasarlar (Demir ve Kılıç, 2010)

### 2.1.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin daneleri arasında boşluk bulunması durumunda bu boşluklara katkı malzemeleri katılarak söz konusu zeminin yük taşıma kapasitesinin artırılması ve oturma, büzülme gibi problemlerin engellenmesi işlemlerinin bütününe zemin iyileştirme yöntemleri denilmektedir (Davran, 2022). Zemin iyileştirme yöntemlerindeki esas gaye, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılıp zeminde bulunan boşlukların çeşitli karışımlarla doldurulmasıdır. Ayrıca bu yöntemler ile problemlili zeminlerin taşıma gücü kapasitesinin artırılması, zeminin geçirimsizliğinin azaltılması, sıvılaşmanın önüne geçilmesi, şev stabilitesinin sağlanması amaçlanmaktadır (Akyol, 2022). Zemin iyileştirme yöntemleri başlıca 4 farklı grup altında sınıflandırılabilir.

1. Yüzeyde Yapılan İşlemlerle Zemin İyileştirme
  - Darbeli Sıkıştırma
  - Hızlı Darbeli Dinamik Sıkıştırma
  - Kompaksiyon Enjeksiyonu
2. Vibrasyon İle Yapılan Zemin İyileştirme
  - Vibrasyonlu Sıkıştırma
  - Vibrasyonla Kompaksiyon Kazığı Yerleştirme
  - Dinamik Konsolidasyon
3. Drenaj ve Ön Yükleme İle Zemin İyileştirme

- Basit Yükleme
  - Aşırı Yükleme
  - Düşey Dren Uygulaması
  - Vakumlu Konsolidasyon
4. Karıştırma Yöntemleri İle Zemin İyileştirme
- Jet Grout
  - Derin Enjeksiyon
  - Sızdırma Enjeksiyonu
  - Kompaksiyon Enjeksiyonu

Uygulanan yöntemlerle zemin özelliklerinin beklenen seviyeye gelip gelmediği, uygulama esnasında ve sonrasında zeminden karot alınması, kolon çevresinin kazılarak kontrol edilmesi, jeofiziksel metodlar ve arazide yapılan presometre deneyleri ile anlaşılabilir (Temel, 2020). Farklı zemin sınıflarına uygulanan iyileştirme yöntemleri Çizelge 2.1’de görülmektedir.

**Çizelge 2.1** Zemin sınıfına göre iyileştirme yöntemleri (Baylan, 2020)

KULLANILAN YÖNTEM	UYGULANMA YÖNTEMİ
<b>KİL ZEMİNLER İÇİN</b>	
Zemini değiştirme	Mekanik yöntem
Önyükleme	Yükleme altındaki kilin konsolidasyonuna dayanan yöntemler, düşey drenaj
Kum dren	
Kağıt dren	
Vakum yöntemi	
Ozmotik basınç	
Sönmemiş Kireç kazık	Mekanik yöntem
Kum sıkıştırma kazık yöntemi	Kimyasal reaksiyon
Isı uygulaması	Kimyasal reaksiyon
Elektro-kimyasal enjeksiyon	Kimyasal reaksiyon
<b>KUM ZEMİNLER İÇİN</b>	
Kompaksiyon kazığı	Kazık veya vibrasyon ile yatay sıkıştırma, densifikasyon
Kum sıkıştırma kazığı	
Vibroflasyon	
Patlatarak sıkıştırma	Patlatma veya şok dalgalarıyla düşey sıkıştırma
Elektrik şoku ile sıkıştırma	
Taş kolon	Düşey drenaj
Enjeksiyon	Boşlukları doldurmak
<b>GEÇİCİ AMAÇLAR İÇİN</b>	
Well point	Su tablası seviyesine düşürmek
Dondurma	Geçici boşluk suyunu doldurmak
<b>ELKTRO-OSMOZ</b>	
Elektro-osmoz	Elektriksel susuzlaştırma
<b>DİĞER YÖNTEMLER</b>	
Kum serme	Kum örtü
Ağ serme	Donatılandırma
Dinamik konsolidasyon	
Diğer iyileştirme yöntemler	

### 2.1.3 Katkı Malzemeleri Kullanarak Zeminin Stabilizasyonu

Zemin iyileştirme işlemlerinde katkı malzemesi kullanılması, zemin stabilizasyonunda oldukça sık kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntem ile işlem yapılan zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirerek tasarıma daha uygun bir hale getirmek hedeflenmektedir. Söz konusu iyileştirme yönteminde zemine çimento, kireç, bitüm, doğal puzolan ve farklı ticari katkıları eklenerek zeminin kompaksiyonu yapılmaktadır. Bu bağlamda değişik türde katkı malzemeleri eklenerek zemin iyileştirme yapılması hakkında literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

Kirecin katkı malzemesi olarak kullanılması oldukça sık başvurulan bir zemin iyileştirme metodudur. Bu yöntemde özellikle karayolu ve demiryolu gibi ulaştırma yapılarının inşa edileceği zeminin projeye uygun olmayan mühendislik özellikleri iyileştirilmektedir. Kirecin esas işlevi, killi ve yumuşak zeminlerin plastisitesini azaltarak kil ve kireç arasında puzolanik reaksiyonun meydana gelmesi, şişme basıncını azaltması ve zemini daha kuru bir hale getirmesidir.

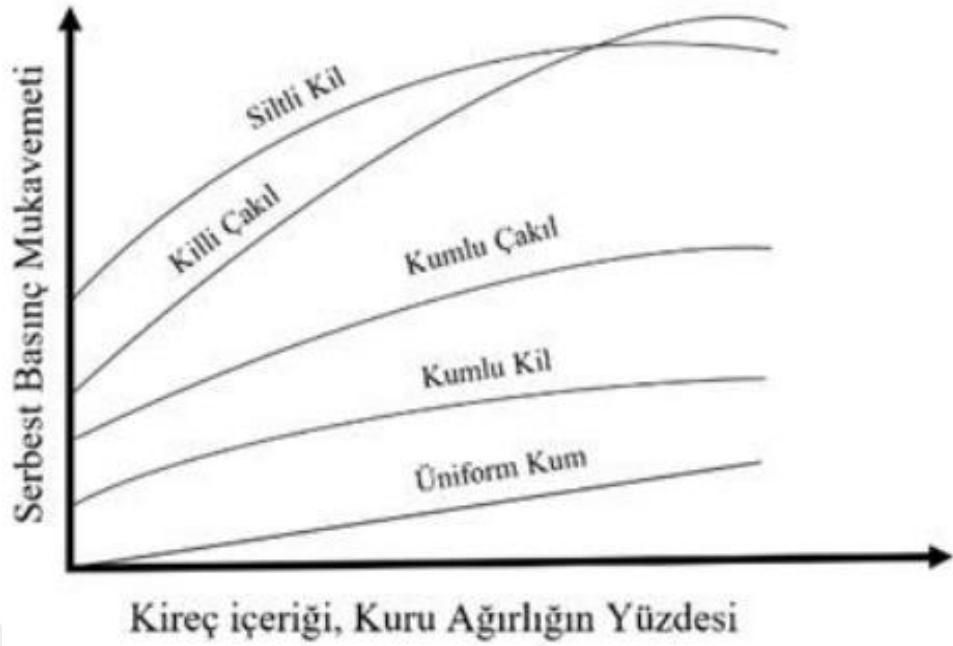
Keskin (2004), kahverengi ve yeşil killerden oluşan yol temel malzemesine kireç ilave ederek yaptığı çalışması neticesinde söz konusu zeminin Kaliforniya Taşıma Oranının (CBR) yeşil kilde 16 kat; kahverengi kilde ise 21 kat arttığını tespit etmiştir.

Türköz (2006) yaptığı çalışmada meşelik kiline %0, %1, %3 ve %5 oranlarında kireç ekleyerek konsolidasyon deneyi uygulamıştır. Uygulanan deney sonucunda %3 ve üzeri oranda katılan kirecin killi zeminin stabilizasyonunu arttırdığını gözlemlemiştir.

Yıldız ve Soğancı (2012) yaptıkları çalışmada %6 oranında kireç ekledikleri iki farklı kilin permeabilite ve dayanımı üzerinde donma-çözülme etkisini araştırmışlardır. Permeabilitenin yaklaşık 1.000 kat arttığı, 28 günlük kür sonucunda kilin dayanımının yaklaşık 15 kata kadar artabileceği ve donma çözülme sonucunda dayanımın yaklaşık %15'e kadar düştüğünü belirlemişlerdir.

Bıçakçı (2022), kireç ilavesinin zemin türüne göre farklı etki gösterdiğini tespit etmiştir. Ağırlıkça aynı kireç içeriğine sahip siltli kil veya siltli çakılın üniform kum veya killi kuma nazaran çok daha fazla serbest basınç mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.4)

Zeminlerin katkı malzemeleriyle iyileştirilmesinde kireçten sonra en çok tercih edilen malzeme çimentodur. Çimento ile zemin iyileştirme uygulaması ilk olarak İkinci Dünya Savaşında havaalanı ve yol inşaatlarında uygulanmıştır.



Şekil 2.4 Kireç ilavesinin zemin türüne göre etkisi (Bıçakçı, 2022)

Çimento, killi, siltli ve kohezyonsuz zeminler gibi birçok zemin türünde söz konusu zeminlerin işlenebilirliğini arttırmak ve dayanımını yükseltmek için kullanılmaktadır. Stabilizasyon için ideal karışım oranı, basınç dayanımı deneyleri ile hesaplanmaktadır. Çimento oranının genellikle %5, %10 ve %15 olarak alındığı sıkıştırılmış zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri hesaplandıktan sonra en uygun çimento oranı bulunmaktadır (Şahinoğlu, 2020; Bıçakçı, 2022).

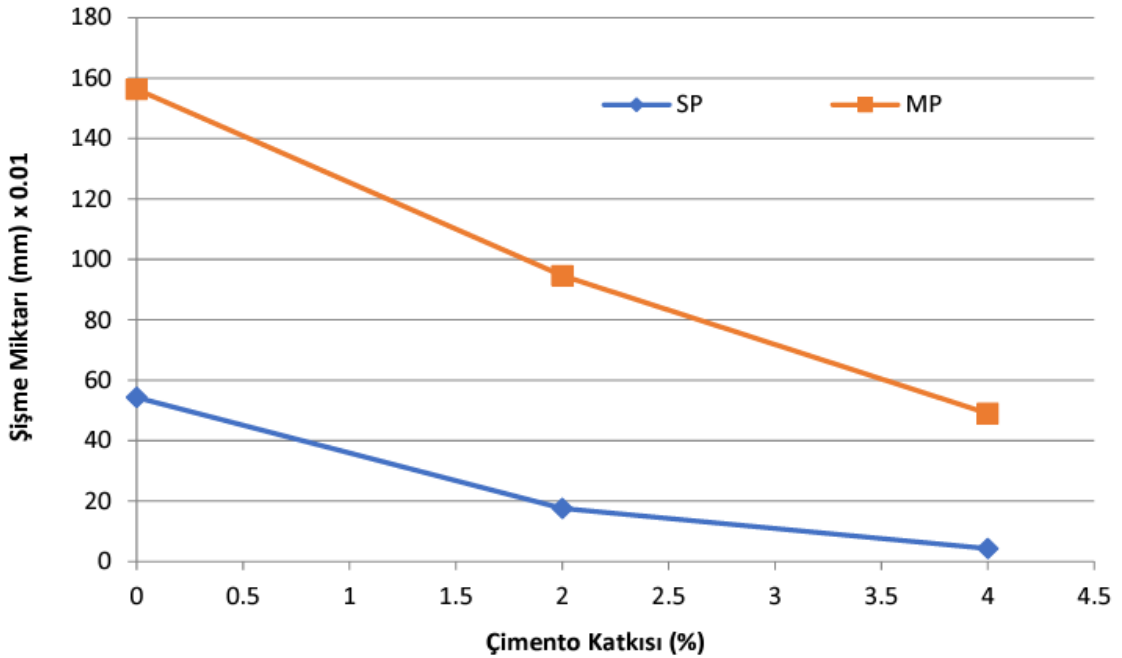
Bell (1995) yaptığı çalışmada killi zeminlerin çimento ile iyileştirilmesi konusunu araştırmak amacıyla kaolin, monmorilonit ve quartz killerine %2, %4, %6 ve %8 oranlarında çimento ilave ederek serbest basınç deneyleri uygulamıştır. Söz konusu deneyler sonucunda kil çeşidi ve miktarının zemin iyileştirme için lazım olan çimento oranı üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Haralombos (2009) yaptığı çalışmada SM, CL, ML, GC ve GP-GM tipindeki 5 ayrı zemine %3, %5 ve %7 oranlarında çimento ilave ederek serbest basınç dayanımlarını ölçmüştür. GP-GM ve GC tipindeki çakıl içeriği yüksek zeminlerde serbest basınç dayanımının killi ve siltli zeminlere oranla daha fazla arttığını belirlemiştir.

Abd Karim ve ark. (2014) kaolin kiline ağırlıkça %0,7 ve %13 oranlarında çimento ilave ederek killi zeminin CBR ve serbest basınç dayanımını ölçmüştür. Çimento artışı ile serbest basınç ve CBR dayanımlarının arttığını; %8 oranında ilave

edilen çimento miktarının ise optimum ölçüde olduğunu tespit etmişlerdir (Şahinoğlu, 2020; Bıçakçı, 2022).

Kilit ve ark. (2021) yüksek şişme potansiyeli yüksek sahip kil örneklerine Portland kompoze çimentosu katarak kilin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Farklı çimento katkı yüzdelerinde ve farklı enerji seviyelerinde (standart proktor-SP ve modifiye proktor-MP) hazırlanan zemin örneklerinin şişme miktarları ödometre cihazında belirlenmiştir. Çimento katkı yüzdesi ile şişme miktarı arasındaki ilişki incelendiğinde, çimento katkısı ile zeminlerin şişme miktarında önemli azalmalar görüldüğü ve bunun yüksek enerji seviyelerinde yani modifiye proktor deneylerinde daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.5).



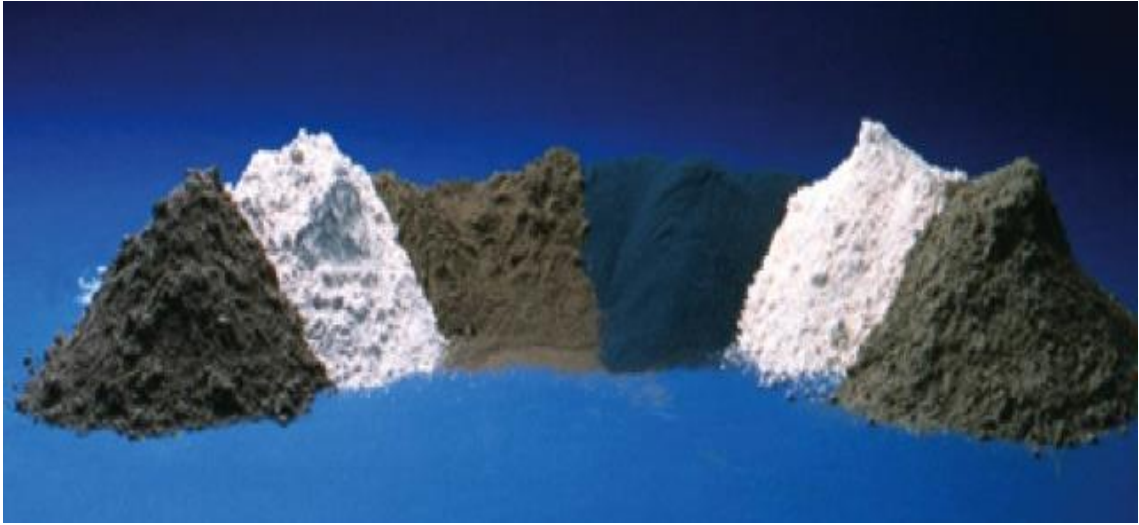
Şekil 2.5 Çimento katkı yüzdesinin şişme miktarına etkisi (Kilit ve ark., 2021)

Çimentonun katkı malzemesi olarak zemin stabilizasyonunda kullanılmasının her ne kadar olumlu katkıları olsa da çimento üretiminde yaşanan partikül emisyonu ve hammaddelerin taşınırken ve depolanırken oluşturduğu hava kirliliği gibi olumsuz etkileride mevcuttur. Ayrıca çimento sektörü, yaşanan ekonomik krizlerden büyük oranda etkilenen sektörlerdendir (Albez, 2013; Arıöz ve Yıldırım, 2015). Kireç üretilirken taş ocaklarındaki patlamalar yer altı sularının değişmesine neden olur ve üretim tesislerin bacalarından çıkan kükürt ve azot da havaya karışarak kirliliğe neden olur (Şimşek ve Kaya, 2021). Bahsi geçen sebeplerden ötürü atık olarak ortaya çıkan uçucu kül ve mermer tozunun zemin stabilizasyonunda kullanılmasının önemi artmaktadır.

## 2.2 Uçucu Küller

Termik santrallerde elektrik üretiminde kullanılan linyit ve taşkömürlerinin yanmasıyla ortaya çıkan, baca gazlarıyla sürüklenerek filtreler sayesinde atmosfere salınımı engellenen, mikro boyutta ve endüstriyel atık olan kül taneciklerine uçucu kül denilmektedir.

Filtrelere ulaşmadan kazan yüzeyine düşen iri kül tanecikleri de taban külü olarak isimlendirilmektedir (Aruntaş, 2006). Şekil 6'da farklı santrallerden elde edilmiş uçucu küllerin görüntüsü verilmiştir.



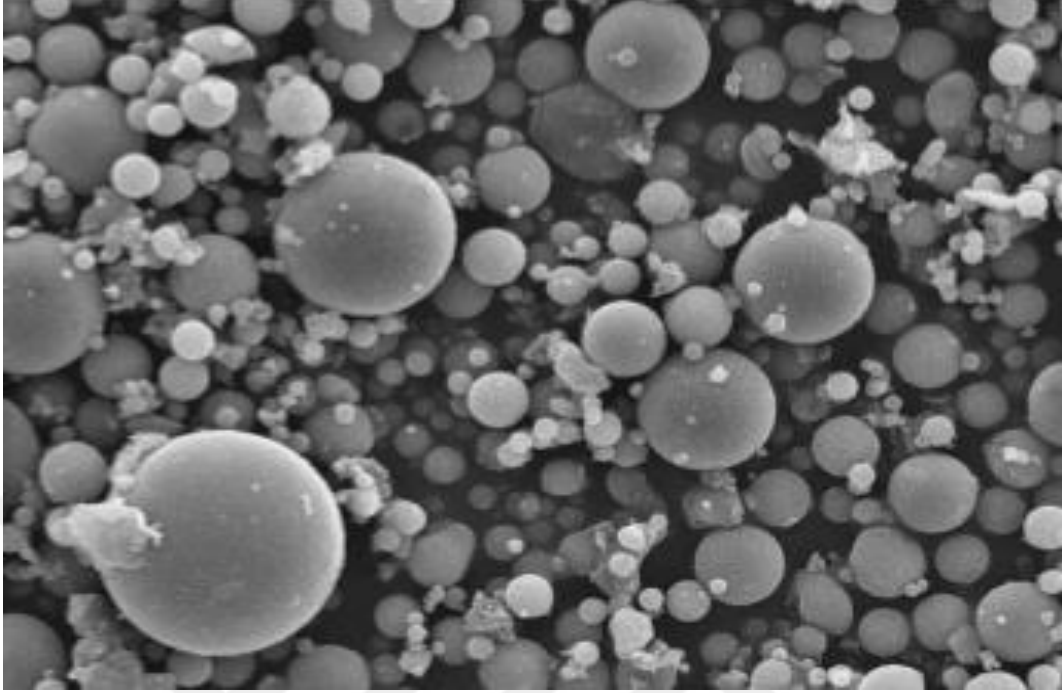
Şekil 2.6 Uçucu kül (Büke, 2021)

Kül tanecikleri oldukça ince yapıda olduğundan baca gazları ile sürüklenir ve bu sebeple söz konusu küller uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Uçucu külün kimyasal yapısı kompleks, tane şekli ise yüzeyindeki gerilimden dolayı küre şeklindedir. Tane boyutu soğuma hızına göre değişmektedir. Uçucu küllerin şekli genelde; kuvars, mullit ve hematit gibi kristal ya da silika camı gibi camsı şekildedir.

Uçucu küldeki başlıca bileşenler %25-%60 oranında  $\text{SiO}_2$ , %10-%30 oranında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %1-%15 oranında  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve %1-%40 oranında  $\text{CaO}$  bileşenleridir. Bu bileşenler dışında  $\text{SO}_3$  ve  $\text{MgO}$  alkali oksitleri de ikincil bileşen olarak bulunmaktadır. Temel bileşenleri silis ve alümina olan uçucu küllerin yapısını öncelikle içeriğindeki bileşenler ve kömürün bulunduğu bölge tayin eder (Görhan ve ark., 2008).

Uçucu kül tanecikleri genellikle gri renklidir. Kireçle birleştiklerinde bağlayıcılık özelliği taşımaktadır. Çapları 1-300 mikron arasında değişen uçucu külün özelliklerine etki eden diğer faktörler, kömür cinsi, kömürün yandığı fırın sınıfı ve

kömüre eklenen katkı malzemeleridir (Ünver, 2015). Şekil 2.7’de uçucu külün elektron mikroskobundaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.7 Uçucu külün elektron mikroskobundaki görüntüsü (Ünver, 2015)

### 2.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller, ASTM C-618 standardına göre F tipi ve C tipi olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. Taş kömürünün yakılmasıyla elde edilen F tipi uçucu küller, içeriğinde %70’ten fazla  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ve %10’dan az CaO bulundurduğu için düşük kireçli uçucu küller olarak da adlandırılırlar (Ünver, 2015). Linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen C tipi uçucu küllerin içeriğinde ise  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %50’den fazla olup CaO oranı da %10’dan fazla olduğundan yüksek kireçli uçucu küller olarak adlandırılırlar (Görhan ve ark., 2009).

TS EN 197-1’e göre uçucu küller, silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. V sınıfı uçucu küller, puzolan özellikli taneciklerden oluşan,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  başta olmak üzere  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeren, reaktif CaO oranı % 10’dan az; reaktif silis miktarının ise % 25’den fazla olduğu uçucu kül çeşididir. W sınıfı uçucu küller ise puzolan özellikli taneciklere ilave olarak hidrolik özellikli taneciklerden oluşmaktadır.  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  başta olmak üzere  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeren, reaktif CaO oranı % 10’dan fazla; reaktif silis miktarının ise % 25’den fazla olduğu uçucu kül çeşididir (Nazaroghlu, 2019).

Kimyasal yapılarına göre uçucu küller, çoğunlukla taş kömüründen elde edilen

ve %70'in üzerinde  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam oranına sahip silika alüminalı uçucu küller, çoğunlukla linyit kömüründen elde edilen ve %50 ile %70 arasında  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam oranına sahip ve kireç miktarı yüksek silika kalsik uçucu küller, yine çoğunlukla linyit kömüründen elde edilen ve %50'nin üzerinde  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam oranına sahip ve diğer guruplarla kıyaslandığında daha fazla  $\text{SO}_3$  ve CaO içeren sülfü kalsik uçucu küller olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır (Aitcin, 1986). Çizelge 2.2'de ASTM C 618'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** ASTM C 618'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları

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
$\text{SO}_3$	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

## 2.2.2 Uçucu Küllerin Özellikleri

### 2.2.2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

ASTM C618 standardına göre uçucu küllerin fiziksel özellikleri, yoğunluk, incelik, genleşme, su ihtiyacı, priz başlangıç süresi ve dayanım aktivite indeksidir. Uçucu küllerin yoğunluğu  $2.2 \text{ g/cm}^3$  ile  $2.7 \text{ g/cm}^3$  aralığındadır (Süzgeç, 2020). Ülkemizde bulunan bazı uçucu küllerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

**Çizelge 2.3** Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Alkaya, 2009)

Özellik:	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
<b>İncelik</b> 200 $\mu\text{m}$ elek	3.0	2.7	1.0	3.0	4.5	1.9
<b>(%)Kalan</b> 90 $\mu\text{m}$ elek	14.9	11.5	3.0	19.0	13.5	12.8
<b>Özgül Ağırlık</b> ( $\text{kN/m}^3$ )	26.3	19.7	24.6	24.2	19.9	-
<b>PAI</b> Kireçle ( $\text{Kgf/cm}^2$ )	49.7	45.1	43.8	52.5	34.0	36.0
P.C ile (% kontrol)	86.4	77.2	79.8	94.5	72.5	67.3
<b>Su İhtiyacı</b> (% kontrol)	111.8	102.7	112.4	110.0	104.2	106.5

### 2.2.2.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri ve Yapıları

Uçucu küllerin kimyasal özelliklerine bakıldığında içeriğinin silika ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demiroksitten ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) oluştuğu; bunların yanında  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , alkaliler ve karbon bileşenlerinin de bulunduğu görülmüştür (Süzgeç, 2020). Ülkemizde bulunan bazı uçucu küllerin kimyasal özellikleri Çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.4 ASTM C 618’e göre sınıflandırılan uçucu küllerin kimyasal yapıları

ASTM Sınıflandırılması	F-tipi			C-tipi		Diğer	
	$F_r$	$F_c$	$F_a$	$C_{1a}$	$C_{2a}$	$C_{1f}$	$C_{2f}$
<b>Tanımlama</b>							
<b>Kimyasal Yapı</b>	Siliko-alüminaz			Siliko-kalsik		Sülfo-kalsik	
$\text{SiO}_2$ (Silisyum Dioksit)	59.4	41.4	47.4	36.2	37.9	24.0	13.5
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (Alüminyum Oksit)	22.4	24.8	21.3	17.4	18.9	18.5	5.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Demir Oksit)	8.9	18.6	6.2	6.4	6.5	17.0	3.5
$\text{CaO}$ (Kalsiyum Oksit)	2.6	2.5	16.6	26.5	24.9	24.0	59.0
$\text{Na}_2\text{O}$ (Sodyum Oksit)	2.2	1.5	0.4	2.2	0.8	0.8	-
$\text{MgO}$ (Magnezyum Oksit)	1.3	0.7	4.7	6.6	6.6	1.0	1.8
$\text{SO}_3$ (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 ( $\text{CaO}$ )	-	-	-	2.8	2.2	-	28.0

### 2.2.2.3 Türkiye’deki Uçucu Küller

Türkiye’de kömürle çalışan kayıtlı 42 adet termik santral bulunmaktadır ve termik santraller haritası Şekil 2.8’ de gösterilmiştir. Söz konusu santrallerin toplam kurulu gücü 19,711 MW’dır. Enerji üretiminde termik santrallerin ve dolayısıyla kömür kullanımının artması çevreye bırakılan atıkların da artmasına sebep olmaktadır. Kömürün yanması sonucunda oluşan  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  ve  $\text{SO}_3$  gazlarının yanında atık olarak küller de çevreye salınmaktadır (Büke, 2021).



Şekil 2.8 Ülkemizdeki termik santraller haritası (Büke, 2021)

Uçucu küllerin mineralojik özelliklerine bakıldığında, yakılan kömürün jeolojik kökeni ile yakıldığı sistemin koşullarının uçucu külün mineralojik özelliklerini etkilediği ve uçucu külde bulunan mullit, kuvarz, manyetit, hematit, anhidrit, serbest kireç ve plajiyoklaz gibi minerallerin miktarını etkilediği belirlenmiştir (Süzgeç, 2020). Ülkemizde bulunan bazı uçucu küllerin mineralojik oranları Çizelge 2.5'te; kimyasal bileşenleri de Çizelge 2.6'da verilmiştir.

**Çizelge 2.5** Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin mineralojik oranları (Ünver, 2015)

Mineral (%)	Uçucu Kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuvarz	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Manyetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4.0	0.1	6.0	2.0	3.0	7.0
Anhidrit	12.2	-	9.3	7.4	-	-
Serbest CaO	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1.0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

**Çizelge 2.6.** Türkiye'de bulunan bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Aruntaş, 2006)

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 Sınırları	ASTM C 618 Sınırları	
						F	C
SiO <sub>2</sub>	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	0.3	3.0	0.24	23.2	-	<1.5	<1.5
K <sub>2</sub> O	-	-	1.81	1.76	-	-	-
SO <sub>3</sub>	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K. K	2.4	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

### 2.2.3 Uçucu Küllerin İnşaat Mühendisliği ve Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Küresel ölçekteki yüksek enerji ihtiyacı sebebiyle termik santrallerin sayılarının artması sonucunda çevreye salınan uçucu kül miktarı da artmaktadır. Dünyada her yıl yaklaşık olarak 600 milyon ton; ülkemizde ise 13 milyon ton uçucu külün ortaya çıktığı düşünülmektedir ve ortaya çıkan bu miktarın sadece %15'i değerlendirilmektedir (Süzgeç, 2020). Uçucu küllerin doğada istiflenmesi ve içeriğinde bulunan ağır

metallerin yer altı sularına karışması tehlike arz etmektedir (Ünver, 2015). Bu sebeple uçucu külün çevreye vermiş olduğu zararlar azaltılarak farklı alanlarda değerlendirilmesi çalışmaları da artmıştır.

Uçucu küller, özellikle su yapıları, köprü, maden ve diğer inşaat yapılarında dolgu enjeksiyonunda; agrega olarak yol yapımında ve drenaj çalışmalarında kullanılmaktadır. Betonda çimento ve ince agregayla uçucu külün belirli oranlarda yer değiştirmesi sonucunda üretilen betonun dayanım özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir (Kantürk, 2006). Bu sebeple çimentoya %20 oranında ilave edilen uçucu kül, Gökçekaya Barajı inşa edilirken betonda katkı malzemesi olarak kullanılmış ve çimentoya göre daha ucuz olan uçucu külün söz konusu inşaatın yapım maliyetini düşürdüğü görülmüştür (Alataş, 1996).

Uçucu küllerin kireç ve çimento yerine kullanılmasıyla endüstriyel bir atık değerlendirilerek enerji kaybının önüne geçilebilmektedir. Ayrıca uçucu küllerin dispersif zemin üzerine inşa edilen yol altı dolgularda kullanılmasıyla, düşük birim ağırlığı sayesinde oturmalar engellenmekte ve etkili adezyonu sayesinde yamaçlarda dikey dolgu yapılması mümkün olmaktadır (Kaçmaz, 2019).

Aksoy ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada, Tunçbilek Termik Santrali'nden elde edilen uçucu külü %3 ve %5 oranında killi bir zemine eklemiş; bunun sonucunda söz konusu zeminin kuru birim hacim ağırlığının düştüğünü ve optimum su muhtevasının da arttığını göstermişlerdir. Aynı şekilde Bergama Soma yolu yapılırken agrega malzemesi üzerine %2, %3 ve %4 oranlarında çimento; %10, %20 ve %30 oranlarında da Soma Termik Santrali uçucu külü eklenerek ilgili zeminin kuru birim hacim ağırlığının düştüğü ve optimum su muhtevasının da arttığı belirlenmiştir (Öksüz, 2006).

Bunların dışında uçucu küller, gaz beton, yalıtım malzemeleri, duvar, beton boru, harç ve cam gibi yapı malzemelerinin üretiminde de kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

#### **2.2.4 Uçucu Küllerin Zeminlerin Mühendislik Davranışı Üzerindeki Etkisi**

Öntürk (2011) yaptığı çalışmada kaolin kilinden oluşan numunelere %15 oranında uçucu kül ilave ederek kompaksiyon deneyleri ile söz konusu numunelerin dayanımlarını ölçmüş ve CBR değerinin arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Nicholson ve Kashyap (1993) çalışmalarında Hawaii kiline uçucu kil ve kireç ekleyerek CBR değerinde artış ve şişme özelliğinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Tan ve ark. (1996) %20 oranında uçucu külü killi zemin numunelerine ekleyerek kayma direncinin önemli derecede arttığını ve permeabilitenin de  $10^{-9}$  m/s olarak ölçüldüğü sonucunu elde etmişlerdir.

Aytekin (2009) yaptığı çalışmada uçucu kül katkısının zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Söz konusu araştırma neticesinde likit limit ve plastik limit değerlerinin arttığını, plastisite indisinin düştüğünü, kuru birim hacim ağırlığının düştüğünü, optimum su muhtevasının arttığını tespit etmiştir. Ayrıca permeabilite ve konsolidasyon katsayılarının azaldığını ve ön konsolidasyon basıncının arttığını belirlemiştir (Ünver, 2015).

## 2.3 Mermer Tozu

### 2.3.1 Mermer Tozunun Ortaya Çıkışı

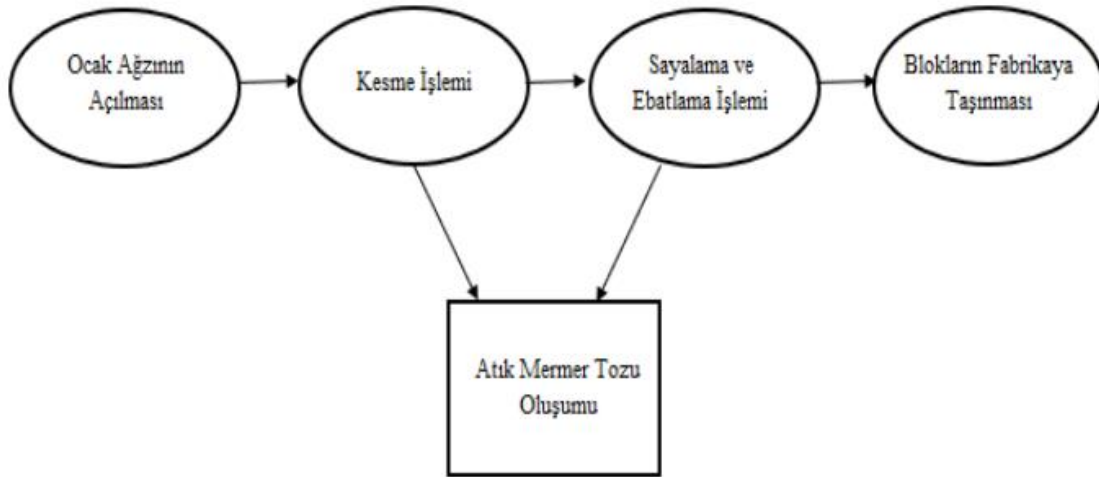
Mermer, kireçtaşı ve dolotaşların zamanla başkalaşım geçirmesi sonrasında oluşmaktadır ve dünyada birçok yerde bulunan sert kayaç türlerindedir. Metamorfik kayaç grubunda yer alan mermer sınıflandırması ise baskın renk tonlarına göre yapılmaktadır.

Mermer kaynakları açısından oldukça iyi bir potansiyele sahip olan ülkemizde Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü'ne (MTA) göre 5 milyar metreküp mermer rezervi bulunmaktadır. Bu sayı dünya potansiyelinin %40'ına denk gelse de mermer üretiminde 4.8 milyon tonluk üretim ve %33 payıyla İtalya 1. sırada; 2 milyon tonluk üretim ve %14 payıyla İspanya 2. sırada ve ülkemiz de 650.000 ton ve %5,6 payla 3. sırada yer almaktadır.

Mermer tozunun oluşum şeması Şekil 2.9'da ve ocakta açığa çıkan mermer tozu atığının yığın görünütüsü Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Açık ocaklarda işlenen mermer, mermer işleme makineleri ile kesme, ebatlama, cilalama ve taşınma işlemlerinden geçmektedir. Söz konusu üretim aşamalarından geçilirken moloz kesme ve ebatlama esnasında 1 mm'den küçük daneli yapıda mermer tozu ortaya çıkmaktadır (Güzel, 2022; Cömert, 2012; Kaçmaz, 2019).

Mermer tozu, inşaat, seramik üretimi, çimento imalatı, asfalt yol yapımı, kağıt üretimi, kimya sanayi gibi oldukça farklı sektörlerde kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe zemin iyileştirme katkı malzemesi olarak; çimento imalatında ve harçlarda bağlayıcı malzeme olarak; seramik sektöründe homojen dağılımda olmayan kalsitin yerine bağlayıcı malzeme olarak, asfalt yollarda maliyetinin uygunluğu açısından dolgu

malzemesi olarak; kağıt üretimi sektöründe beyaz rengi sebebiyle selüloz ile karıştırılarak dolgu ve kaplama malzemesi olarak; kimya sanayisinde karpit üretiminde kullanılmaktadır (Güzel, 2022; Cömert, 2012; Kaçmaz,2019).



Şekil 2.9 Mermer tozunun oluşumu (Güzel, 2022)



Şekil 2.10 Ocakta açığa çıkan mermer tozu (Tok, 2018)

### 2.3.2 Mermer Tozunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Mermer ve mermer tozu, içeriğinde en az %95 oranında kalsiyum karbonat bulunduğunda yarı saydam özelliktedir. Renkleri ise beyaz ve griye yakındır ancak bazen içeriğinde az miktarda kuvars, grafit, hematit, limonit gibi değişik mineraller bulunması durumunda mermer ve mermer tozunun rengi sarı, kırmızı, pembe ve siyah olabilmektedir (Enbaya, 2019; Çatal, 2019; Gücek, 2011). Mermer tozunun fiziksel özellikleri Çizelge 2.7'de görülmektedir.

**Çizelge 2.7** Mermer tozunun fiziksel özellikleri (Gücek, 2011)

FİZİKSEL ÖZELLİK	SONUÇ
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3,60
Partikül Boyut Dağılımı (µm)	300-45
Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	6,37
Nemlilik (%)	8,00

Kimyasal bileşiminde %90-%98 oranında kalsiyum karbonat bulunan mermer tozunun içeriğinde magnezyum karbonat, silisyum dioksit, değişik metal oksitler ile silikat mineralleri bulunmaktadır (Enbaya, 2019; Çatal, 2019; Gücek, 2011). Mermer tozunun kimyasal özellikleri Çizelge 2.8’de görülmektedir.

**Çizelge 2.8** Mermer tozunun kimyasal özellikleri (Gücek, 2011)

KİMYASAL ÖZELLİK	TEST DEĞERİ (%)
Kızdırma Kaybı (LOI)	43,4
MgO	0,30
CaO	54,59
SiO <sub>2</sub>	8,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,72
SO <sub>3</sub>	0,09
Cl <sup>-</sup>	0,03

### 2.3.3 Mermer Tozunun İnşaat Mühendisliği ve Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Mermer tozunun farklı sektörlerde kullanılabilme imkanını sağlayan en önemli özellikleri, kimyasal bileşim, tane boyutu ve renktir. İnşaat sektöründe harç, sıva ve kireç malzemesi olarak, yer döşemelerinde karo uygulaması yapılırken boşlukları doldurucu derz malzemesi olarak, betonda ince agrega olarak kullanılmaktadır. Ayrıca portland çimentosu üretiminde kalker yerine hammadde olarak değerlendirilmektedir.

Geoteknik alanında ise karayolu ve demiryolu yapımında stabilizasyon malzemesi olarak, mıcır malzemesi olarak, yol alt temel malzemesi olarak, asfalt yollarda filler malzeme olarak kullanılmaktadır (Yıldız, 2012; Doğan, 2019; Cömert, 2012; Güzel, 2022; Gücek, 2011; Çatal, 2019).

### 2.3.4 Mermer Tozunun Zeminlerin Mühendislik Davranışı Üzerindeki Etkisi

Stabilizasyon için yol inşaatlarında kullanılan mermer tozunun killi bir zemin numunesine %5, %10 ve %15 oranlarında ilave edilmesi sonucu dayanımı yükselttiği ve

şişmeyi azalttığı tespit edilmiştir (Doğan, 2019). Mermer tozunun kırmızı tropik zemine belli oranlarda eklenmesiyle söz konusu zeminde plastisitenin %20 ve %30 aralığında azaldığı, serbest basınç dayanımının %30 ve %46 aralığında arttığı, CBR değerinin ise %27 ve %55 aralığında arttığı görülmüştür. Killi bir zemine belirli oranlarda uygulandığında da kuru birim hacim ağırlığının ve şişme basıncının düştüğü sonucu elde edilmiştir (Cömert, 2012). Ayrıca asfalt yollarda kullanıldığında Marshall stabilitesini arttırdığı ve basınç ile çekme dayanımını arttırdığı, killi zeminlerde uygulandığında zemindeki kille birleşip plastisite, genleşme ve kabarma sayılarını etkilediği belirlenmiştir (Gölan, 2015).



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların tümü Muş Alparslan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı. Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tezin bu bölümünde deneylerde kullanılan malzemeler ve özellikleri, gerçekleştirilen deneylerin yöntemleri ve deneylerde kullanılan aletlerinin temel özellikleri/prensipileri ile alakalı bilgiler verilmiştir.

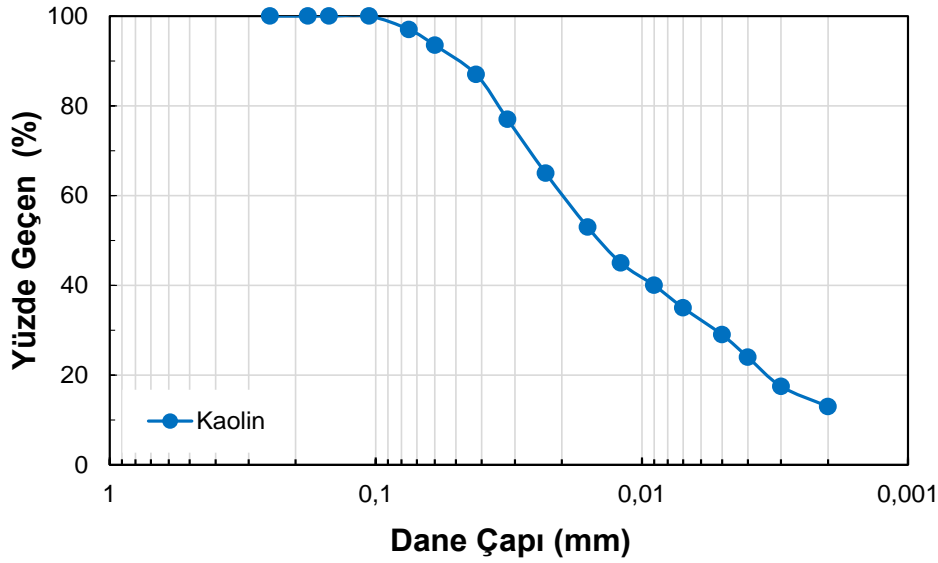
#### 3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Temel Fiziksel-Kimyasal Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda, kaolin kili, uçucu kül ve atık mermer tozu olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında karayolu taban zemini olarak Eskişehir ilinde faaliyet gösteren bir firmadan Şekil 3.1’de gösterilen kaolin kili temin edilmiştir. Kaolin kilinin dane boyutunu belirlemede ASTM D422 standardı izlenilmiş olup dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Kaolin kili



Şekil 3.2 Kaolin kili dane çapı dağılım eğrisi

Kaolin kilinin geoteknik ve mühendislik özellikleri belirlenirken ASTM, AASHTOO ve BS standartlarından faydalanılmış olup elde edilen özellikler Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Çizelge 3.1 incelendiğinde kaolin kili ASTM D2487 standardına göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılırken, AASHTOO M-145 sınıflandırma sistemine göre ise A-7-6(12) olarak sınıflandırılmıştır. Kaolin kilinin kimyasal analizi X-ışını floresans spektrometresi (XRF) yöntemiyle kullanılarak tespit edilmiş ve sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Kaolin kilinin mühendislik özellikleri

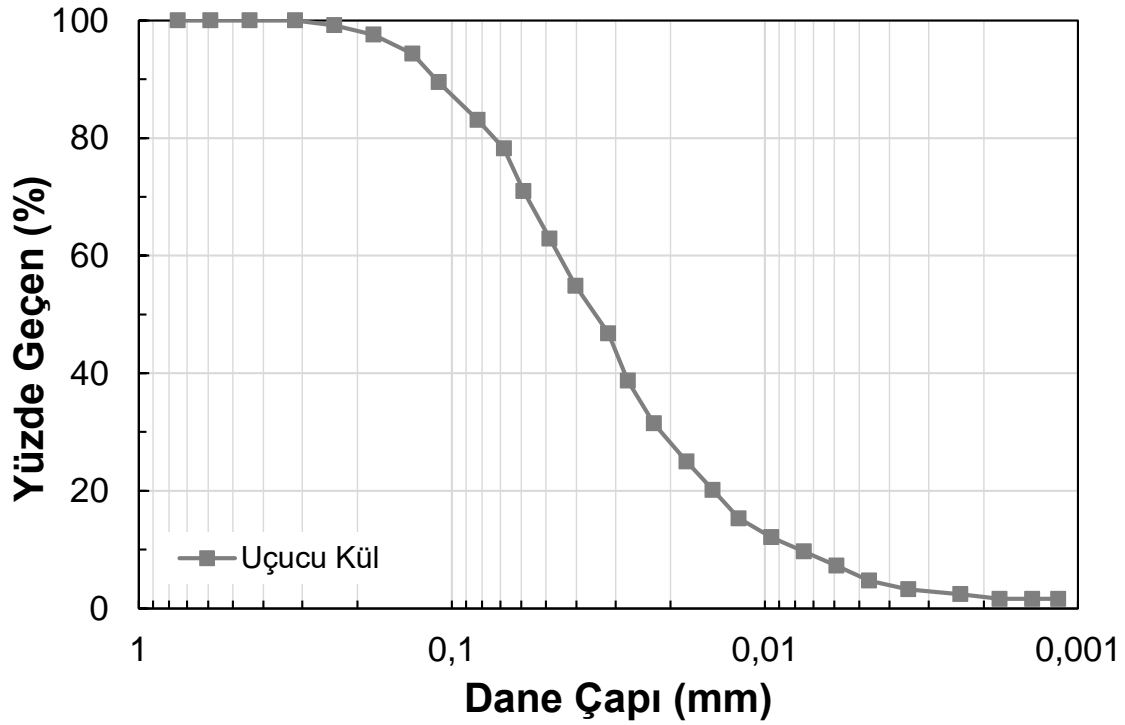
Zemin Özellikleri	Kaolin	Standart
Kum (0.075-4.75mm), %	3.00	ASTM D422
Silt+Kil (<0.075mm), %	97.00	ASTM D422
Özgül Ağırlık, %	2.55	ASTM D854
Likit Limit, %	41.34	ASTM D4318
Plastik Limit, %	21.86	ASTM D4318
Platisite İndeksi, %	19.48	ASTM D4318
Lineer Büzülme, %	7.51	BS 1377
Zemin Sınıfı	CL	ASTM D2487
	A-7-6(12)	AASHTOO M-145
Serbest Şişme, %	3.99	ASTM D4546
MDD, kN/m <sup>3</sup>	15.69	ASTM D1557
OMC, %	19.60	ASTM D1557
c, Kohezyon (kPa)	13.75	ASTM D3080
İçsel Sürtünme Açısı, (φ°)	33.12	ASTM D3080
UCS, kPa	125.99	ASTM D2166
CBR, %	16.86	ASTM D1883

Deneylerde kullanılan uçucu kül (UK), Türkiye'nin Kütahya ilinde faaliyet gösteren Seyitömer termik santralinden temin edilmiştir (Şekil 3.3).

UK'nin özgül ağırlığı ASTM D854 standardı izlenerek 2,10 olarak belirlenmiştir. UK'nin ortalama dane boyutunun lazer parçacık boyutu analizörü ile 28 µm olduğu belirtilmiştir (Demir ve ark., 2009) ve dane dağılım eğrisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Çizelge 3.2'de Türker ve ark. (2009) tarafından Seyitömer Termik Santrali uçucu külü üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları ve ASTM C618 sınırları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Seyitömer UK'si ASTM C618'e göre  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarının %84,34 (%70.00'in üzerinde) olması ve CaO miktarının %4.26 (%10'dan daha az) olması hasebiyle F sınıfı yani düşük kireçli UK sınıfına girmektedir. Yine aynı çalışmada, Seyitömer UK'si üzerinde gerçekleştirilen XRD analizi sonucu bu külün silissi karakter taşıdığı ve camsı fazca zengin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.3 Uçucu kül



Şekil 3.4 Uçucu kül dane çapı dağılım eğrisi

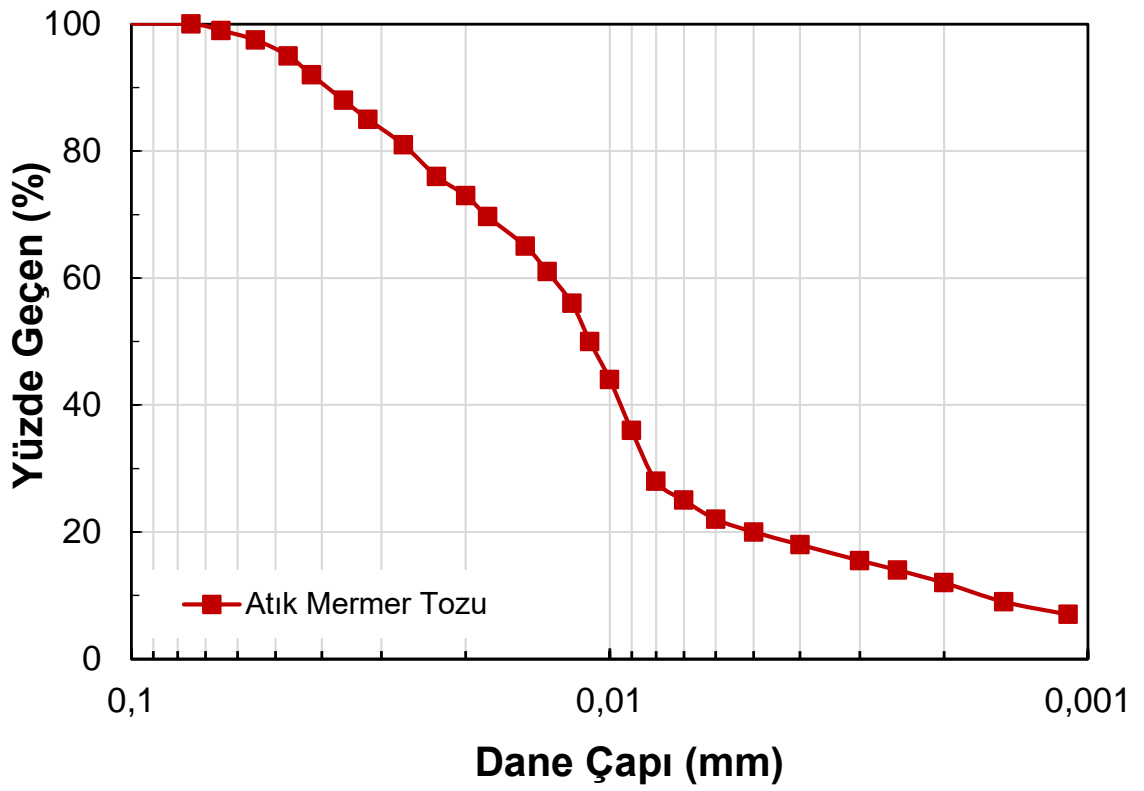
Çizelge 3.2 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (Türker ve ark., 2009)

Bileşim (%)	Seyitömer Uçucu Külü	ASTM C 618 Sınırları	
		F	C
SiO <sub>2</sub>	54.49	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.58	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.27	-	-
S+A+F	84.34	>70	>50
CaO	4.26	-	-
MgO	4.48	-	-
SO <sub>3</sub>	0.52	<5	<5
K <sub>2</sub> O	2.01	-	-
Na <sub>2</sub> O	0.65	-	-
K. K	3.01	<6	<6
Cl	0.006	-	-
Serbest CaO	0.26	-	-

Deneylerde kullanılan atık mermer tozu (AMT) Türkiye'nin Muş ilinde mermer işçiliği üzerine faaliyet gösteren firmalardan elde edilmiştir (Şekil 3.5). AMT'nin özgül ağırlığı ASTM D854 standardı izlenerek belirlenmiş ve 2,72 olarak hesaplanmıştır. AMT'nin kimyasal özelliği X-Işını Flüoresans yöntemi (XRF) kullanılarak tespit edilmiş ve Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Kimyasal analiz sonuçlarına göre AMT'nin CaO oranınca zengin olduğu görülmektedir. AMT'nin lazer parçacık boyutu analizörü ile belirlenen dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5 Atık mermer tozu



Şekil 3.6 Atık mermer tozunun dane çapı dağılım eğrisi

**Çizelge 3.3** Atık mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları

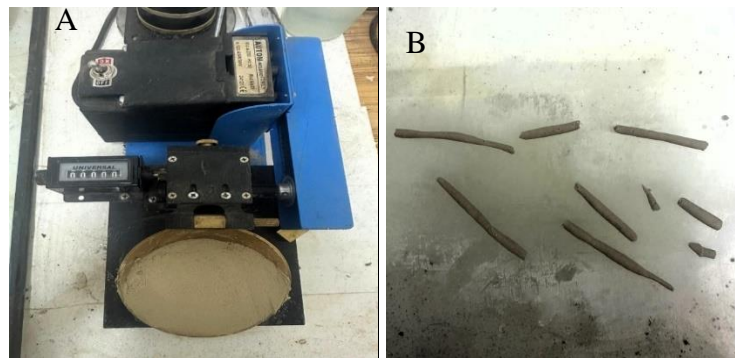
Kimyasal Özellik	Değer (%)
Silisyum dioksit (SiO <sub>2</sub> )	0.42
Alüminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.08
Demir oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.18
Kalsiyum oksit (CaO)	55.65
Magnezyum oksit (MgO)	0.52
Sülfür (SO <sub>3</sub> )	0.03
Sodyum oksit (Na <sub>2</sub> O)	0.07
Kızdırma Kaybı	43.05

### 3.2 Geoteknik Laboratuvar Testleri

Bu tez kapsamında, uçucu kül ve mermer tozu atıklarının kohezyonlu zeminlerin fiziksel özellikleri ve mekanik davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, kıvam limitleri, serbest şişme, lineer büzülme, kompaksiyon (proktor), serbest basınç, kesme kutusu, düşen koni ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) gibi temel geoteknik laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, bu testlerinin genel özellikleri ve esasları ile deneylerde kullanılan yöntem ve metotlar ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

#### 3.2.1 Kıvam Limitleri Deneyi ve Esasları

Kıvam limitleri ya da diğer adıyla Atterberg limitleri, zemin daneleri ve su arasındaki temasları ve farklı su muhtevalarına göre zeminlerin davranışlarını tanımlar. Zemin ve farklı miktarda UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının plastik limit ve likit limit değerleri ASTM D4318 standardı izlenerek belirlenmiştir. Zemin karışımlarının likit limit değerleri belirlenirken Casagrande metodu izlenmiştir. Plastik limit değerlerinin belirlenmesinde ise yuvarlama metodu kullanılmıştır. Likit limit ve plastik limit deney fotoğrafları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.7** Likit limit (A) ve Plastik limit deneyi (B)

### 3.2.2 Serbest Şişme Deneyi ve Esasları

Serbest şişme deneyi killi zeminlerin şişme potansiyellerini belirlemede yaygın olarak kullanılan pratik test yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada zemin ve farklı oranlarda UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının serbest şişme deneyi ASTM D4546 metodu izlenerek gerçekleştirilmiştir. Serbest şişme deneyi, optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında 50 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahip çelik ringlere yerleştirilen zemin karışımlarının üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zemin karışımlarının serbest şişme değerleri 1 kPa yük altında 24 saat boyunca numune yüksekliğinde meydana gelen değişimler komparatörler yardımıyla kaydedilerek Denklem 3.1 yardımıyla yüzde (%) cinsinden hesaplanmıştır. Serbest şişme deneyinde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

$$\text{Serbest Şişme} = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

Burada  $\Delta H$  yükseklik değişimini ( $mm$ ) ve  $H_i$  ( $mm$ ) numunenin ilk yüksekliğini ifade etmektedir.



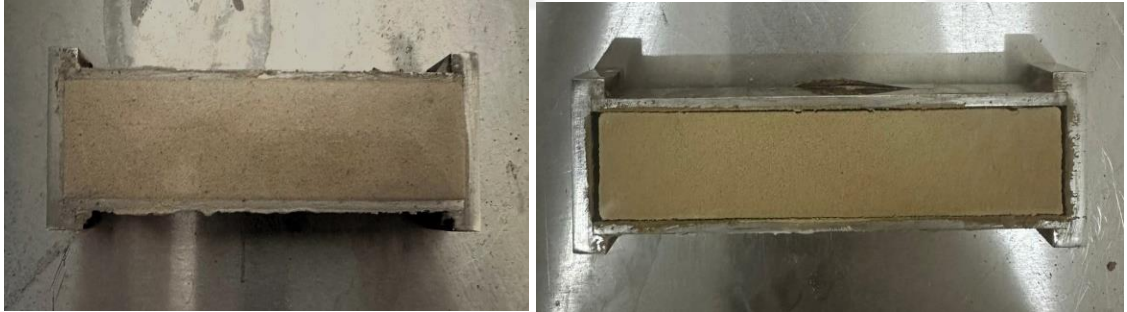
Şekil 3.8 Serbest şişme deneyi

### 3.2.3 Lineer Büzülme Deneyi ve Esasları

Lineer büzülme deneyi, killi zeminlerin nem kaybı sonucu maruz kaldığı tek boyutlu büzülme oranını belirlemek için kullanılan deney yöntemidir. Lineer büzülme deneyi gerçekleştirilirken 425 µ elek altı malzeme likit limit civarında saf su ile homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılıp büzülme kabına hava kabarcıkları kalmayacak şekilde sıkıştırılır. Numune, büzülme oranı büyük ölçüde tamamlanincaya kadar yaklaşık 60°C'lik bir etüvde ve son olarak da tam kurumayı sağlamak amacıyla yaklaşık 105°C sıcaklıklı bir etüvde 24 saat boyunca bekletilir. Numune boyutları soğumaya bırakıldıktan sonra boyu ölçülür. Denklem 3.2'ye göre zeminlerin lineer büzülme oranları hesaplanır. BS-1377 standardı takip edilerek gerçekleştirilen büzülme deneyi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

$$LS = \left(1 - \frac{L_f}{L_0}\right) \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

Burada  $LS$  büzülme oranı (%),  $L_0$  numunenin ilk boyunu ( $cm$ ) ve  $L_f$  ( $cm$ ) ise numunenin son boyunu ifade etmektedir.



Şekil 3.9 Lineer büzülme deneyi

### 3.2.4 Kompaksiyon (Proktor) Deneyi ve Esasları

Bu çalışmada ASTM D1557 standardı izlenerek modifiye proktor yöntemi ile zemin karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlığı (MDD) değerini veren optimum su muhtevası (OMC) değerleri elde edilmiştir. Kompaksiyon deneyi her bir zemin karışımı için 5 farklı su muhtevasında gerçekleştirilmiştir. Zemin karışımları her tabakada 56 vuruş olmak üzere 5 eşit tabakada kompaksiyon kalıbına yerleştirilmiştir. Kompaksiyon deneyi işlemi sonunda numunelerin yaş birim hacim ağırlıkları hesaplanmış ve MDD değerlerinin hesaplanması için numunelerden alt ve üst

kısından olmak üzere bir miktar numune alınıp ağırlığı belirlendikten sonra 105°C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa ulaşana dek kurumaya bırakılıp su muhtevası tespit edilmiştir. Denklem 3.3 kullanılarak hazırlanan maksimum kuru birim hacim ağırlık-optimum su muhtevası grafiğinden her bir zemin karışımının OMC değerleri belirlenmiştir. Modifiye proktor kompaksiyon deneyi Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (3.3)$$

Burada  $\gamma_k$  kuru birim hacim ağırlığını ( $kN/m^3$ ),  $\gamma_n$  yaş birim hacim ağırlığını  $kN/m^3$  ve  $w$  (%) optimum su muhtevasını ifade etmektedir.



Şekil 3.10 Kompaksiyon deneyi

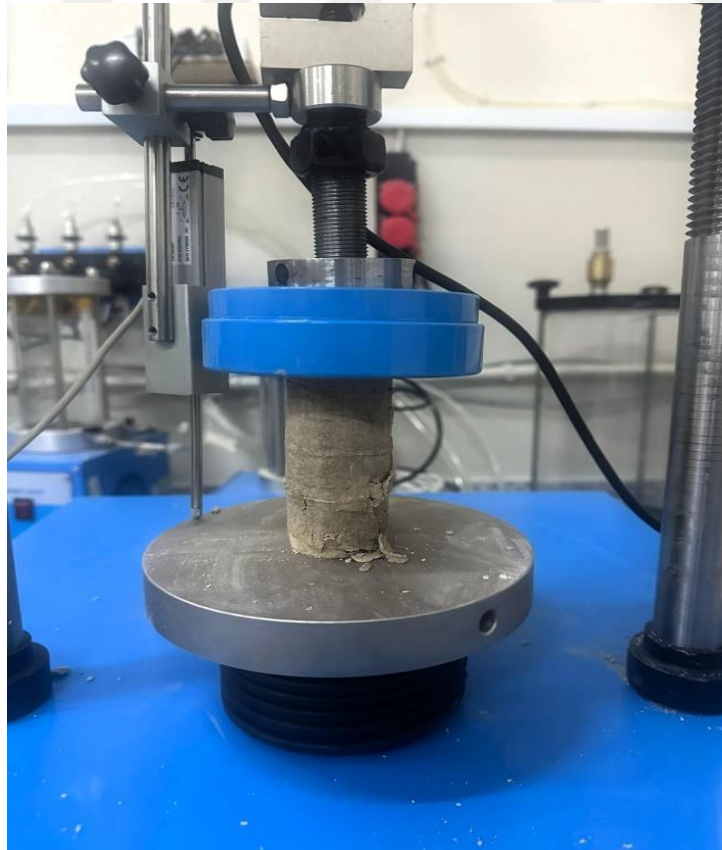
### 3.2.5 Serbest Basınç (Tek Eksenli Basınç) Deneyi ve Esasları

Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyi, zemin veya kaya numunelerinin sadece eksenel yük altındaki maksimum gerilme değerinin belirlenmesi prensibine dayanmaktadır.

Deney sonucunda numunelerin kırılma anındaki gerilme değeri ile UCS belirlenirken, numunede deney süresince meydana gelen boy kısalmasının hesaplanmasıyla gerilme-deformasyon eğrisi çizilebilmektedir. Bu tez çalışmasında, proktor deneyinden elde edilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan 38 mm çapa 76 mm uzunluğuna sahip silindirik zemin karışımlarının UCS değerleri ASTM D2166 standardı izlenerek Denklem 3.4'e göre belirlenmiştir. Zemin karışımlarının stres-deformasyon davranışını belirlemek amacıyla UCS deneyi yükleme hızı dakikada 1 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kür sürelerinin zemin karışımlarının UCS değerleri üzerine olan etkisini gözlemlemek amacıyla plastik poşetlere sarılıp hava ile teması kesilen numuneler 7 ve 28 gün boyunca kür odasında bekletilip deney kür sonunda UCS deneyi gerçekleştirilmiştir. UCS deneyi cihazı ve aşaması Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{P_{mak}}{A} \quad (3.4)$$

Burada,  $\sigma$  ( $kPa$ ) tek eksenli basınç dayanımını,  $P_{mak}$  kırılma yükünü ( $kN$ ),  $A$  ise kırılma anındaki kesit alanını ( $mm^2$ ) belirtmektedir.



Şekil 3.11 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

### 3.2.6 Kesme Kutusu Deneyi ve Esasları

Kesme kutusu deneyi laboratuvar ortamında zeminlerin kohezyon ve içsel sürtünme açılarını belirlemede en yaygın kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Bu tez çalışmasında 60×60×20 mm boyutlarına sahip kesme kutularında optimum su muhtevalarında sıkıştırılan zemin karışımlarının kohezyon ve içsel sürtünme açıları ASTM D6528 standardı izlenerek drenajsız ve konsolidasyonsuz şartlar altında belirlenmiştir. Zemin numuneleri dakikada 1 mm hızda kesmeye tabi tutulmuştur. Kesme kutusu deneyi 110 kPa, 220 kPa ve 330 kPa olmak üzere 3 farklı normal gerilme altında gerçekleştirilmiştir ve bu üç farklı gerilme altında elde edilen kesme dayanımında zemin karışımlarının kohezyon ve içsel sürtünme açıları belirlenmiştir. Kesme kutusu deney cihazı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Kesme kutusu deney cihazı

### 3.2.7 Düşen Koni Deneyi ve Esasları

Bu tez çalışmasında zemin karışımlarının drenajsız kayma mukavemeti ( $S_u$ ) değerleri düşen koni deneyi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Düşen koni deneyi ile belirli bir su muhtevsındaki zeminlerin konik penetrasyonuna karşı gösterdiği dirençten yola çıkarak zeminlerin  $S_u$  değerleri hesaplanabilir. Bu tez kapsamında kaolin taban zeminin  $S_u$  değerine UK ve AMT katkısının etkisini gözlemlemek amacıyla 5 farklı su içeriğinde 55 mm çap ve 40 mm yüksekliğe sahip numune kaplarına içinde

hava kabarcıkları kalmayacak şekilde yerleştirilen numunelerin  $S_u$  değerleri Denklem 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. Düşen koni deneyi cihazı Şekil 3.13.'de gösterilmiştir.

$$S_u = \frac{k \times W}{d^2} \quad (3.5)$$

Burada,  $S_u$  drenajsız kayma mukavemetini ( $kPa$ ),  $k$  konik katsayısı ( $30^\circ$  konik için 0.85),  $W$  konik ağırlığını ( $N$ ),  $d$  koniğin numuneye batma derinliğini ( $mm$ ) belirtmektedir.



Şekil 3.13 Düşen koni deney cihazı

### 3.2.8 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi ve Esasları

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi yol inşasında dolgu, taban zemini ve temel malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin taşıma gücünü değerlendirmede dünya genelinde en çok kullanılan deney yöntemlerinden biridir. CBR, belirli bir zemini numunesi geçmeye götüren yükün, kırma taştta aynı deformasyonu elde edecek olan yüke oranının yüzde cinsinden değeridir. CBR deneyinde elde edilen bu oran kesit alanı

19,35 cm<sup>2</sup> olan bir pistonun 1,27 mm/dk hızda numune içerisine penetre edilmesine karşı gösterdiği direncin ölçülmesi ile belirlenir. Bu tez çalışmasında optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında sıkıştırılan zemin karışımlarının CBR deneyi ASTM D1883 standardı izlenerek gerçekleştirilmiştir. Zemin karışımları CBR kalıbı içerisinde 4 gün su havuzunda bekletildikten sonra deneye tabii tutulmuştur. CBR deneyi aşamaları Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 CBR deneyi

### 3.3 Test Programı ve Detayları

Bu çalışmada, karayolu taban zemini olarak kullanılan kaolin kilinin uçucu kül (UK) ve atık mermer tozu (AMT) ile stabilizasyonu amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Çizelge 3.4’te karışım oranları hakkında bilgi verilen zemin karışımlarının kıvam limitleri deneyi, şişme-büzülme deneyleri, kompaksiyon deneyi, tek eksenli basınç deneyi (UCS), kesme kutusu deneyi, düşen koni deneyi ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi olmak üzere kapsamlı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.4** Saf kil, kil-uçucu kül ve kil-uçucu kül-mermer tozu-karışımları üzerinde yürütülen deneylerin genel özellikleri

<b>Karışım</b>	<b>Karışım ID</b>	<b>Zemin İçeriği (%)</b>	<b>UK İçeriği (%)</b>	<b>AMT İçeriği (%)</b>
Zemin	CL	100	0	0
Zemin + %3 UK	CL3UK	100	3	0
Zemin + %6 UK	CL6UK	100	6	0
Zemin + %9 UK	CL9UK	100	9	0
Zemin + %12 UK	CL12UK	100	12	0
Zemin + %3 UK + %3 AMT	CL3UK3AMT	100	3	3
Zemin + %6 UK + %6 AMT	CL6UK6AMT	100	6	6
Zemin + %9 UK + %9 AMT	CL9UK9AMT	100	9	9
Zemin + %12 UK + %12 AMT	CL12UK12AMT	100	12	12

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde uçucu kül (UK) ve atık mermer tozu (AMT)'nin karayolları taban zemini olarak kaolin kilinin geoteknik ve mühendislik özelliklerine olan etkisi araştırmak amacıyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kapsamlı deneysel analizlerin sonuçları paylaşılmıştır.

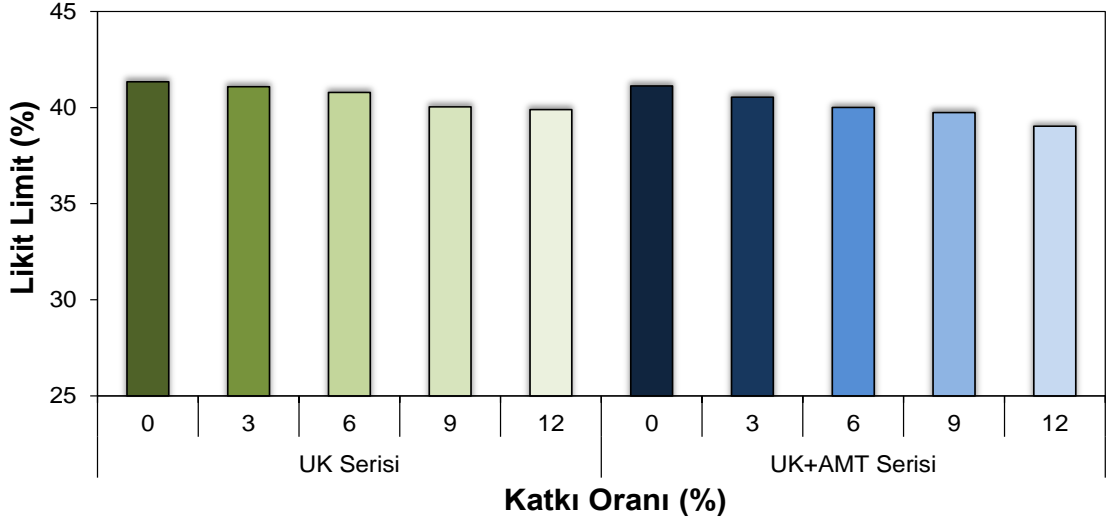
### 4.1 Zemin Sınıfının Belirlenmesi

Bu bölümde, uçucu kül ile mermer ilavesinin kohezyonlu zeminin sınıfı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

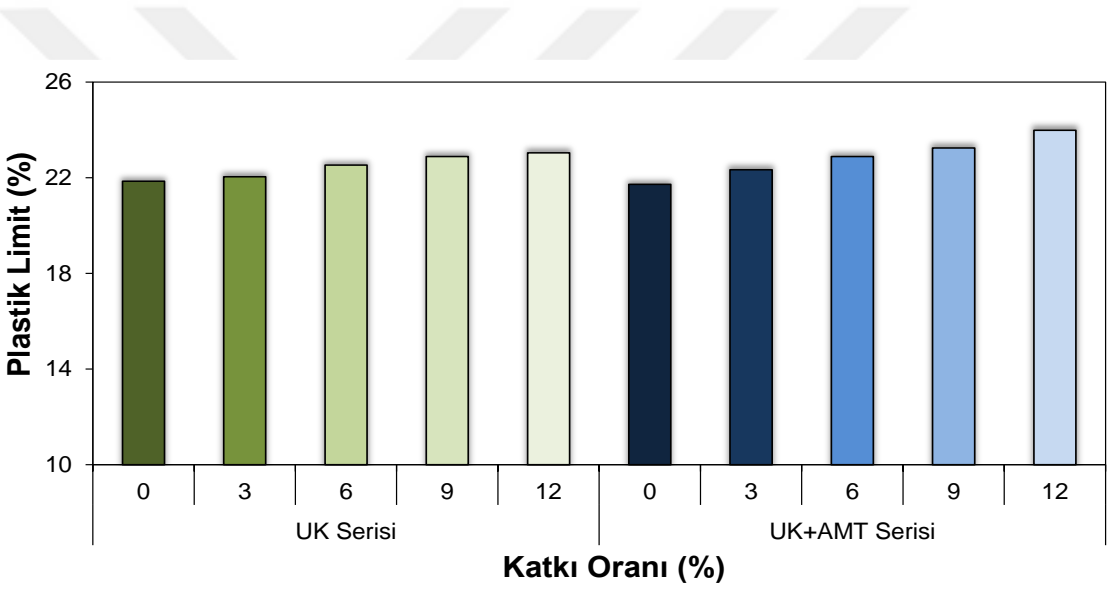
#### 4.1.1 Plastik Limit, Likit Limit ve Plastisite Deney Sonuçları

Şekil 4.1-4.3'te kaolin zemininin likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerlerinde çeşitli oranlarda uçucu kül (UK) ve uçucu kül-atık mermer tozu (AMT)'nin birlikte kullanımı sonucu meydana gelen değişimler verilmiştir.

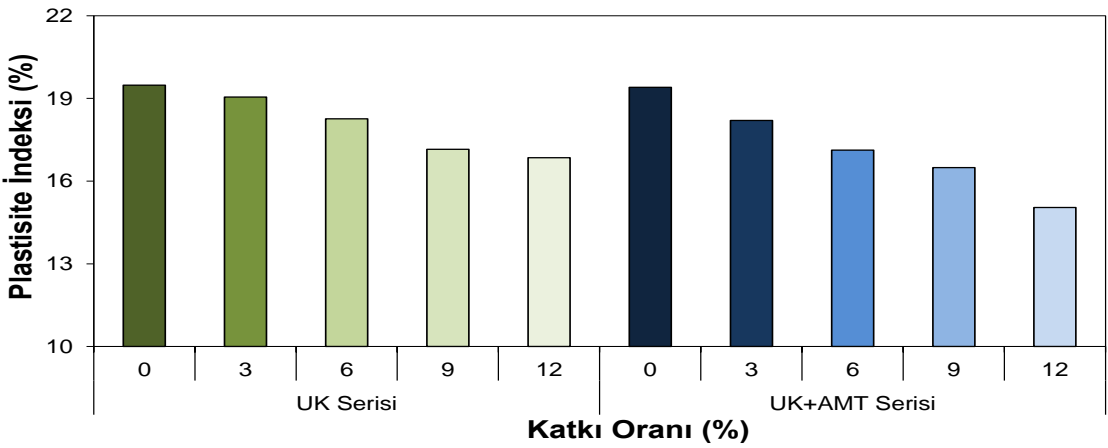
Kaolin kilinin likit limit (LL) değerinin artan UK ve UK-AMT içeriği ile sürekli olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Kaolin kilinin LL değeri %12 UK eklenmesiyle %41,34'ten %39,89'a düşmüştür. Ayrıca kaolin kiline %12 UK ile birlikte %12 AMT eklenmesiyle LL değeri %39.03'a düşmüştür. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere artan UK ve UK-AMT içeriği ile kaolin kilin plastik limit (PL) değeri artmıştır. Kaolin kilinin PL değeri %12 UK eklenmesiyle %21,86'dan %23.04'e yükselirken %12 UK ile birlikte %12 AMT eklenmesiyle bu değer %23.04'e yükselmiştir. UK ve AMT katkısı ile birlikte kaolin kilin plastisite indeksi (PI) değeri Şekil 4.3'te de görülebileceği üzere giderek düşmüştür. Kaolin kilinin %19,48 olan PI indeksi değeri %12 UK eklenmesiyle birlikte %16,85'e düşerken %12 UK ile birlikte %12 AMT'nin eklenmesi sonucu bu değer daha da azalarak %15.04'e düşmüştür. Kaolin kilin UK ve AMT eklenmesiyle birlikte LL değerinin düşüp PI değerinin artması eklenen katkıların plastik ve kohesif olmayan karakteristiklerine bağlanabilir. Ayrıca UK ve AMT'nin birlikte kullanımı sonucu zemin karışımında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar kaolin kilinin plastisitesinin azalmasına neden olmuş ve kaolin kilinin PI değeri giderek düşmüştür.



Şekil 4.1 Zeminin likit limit değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi



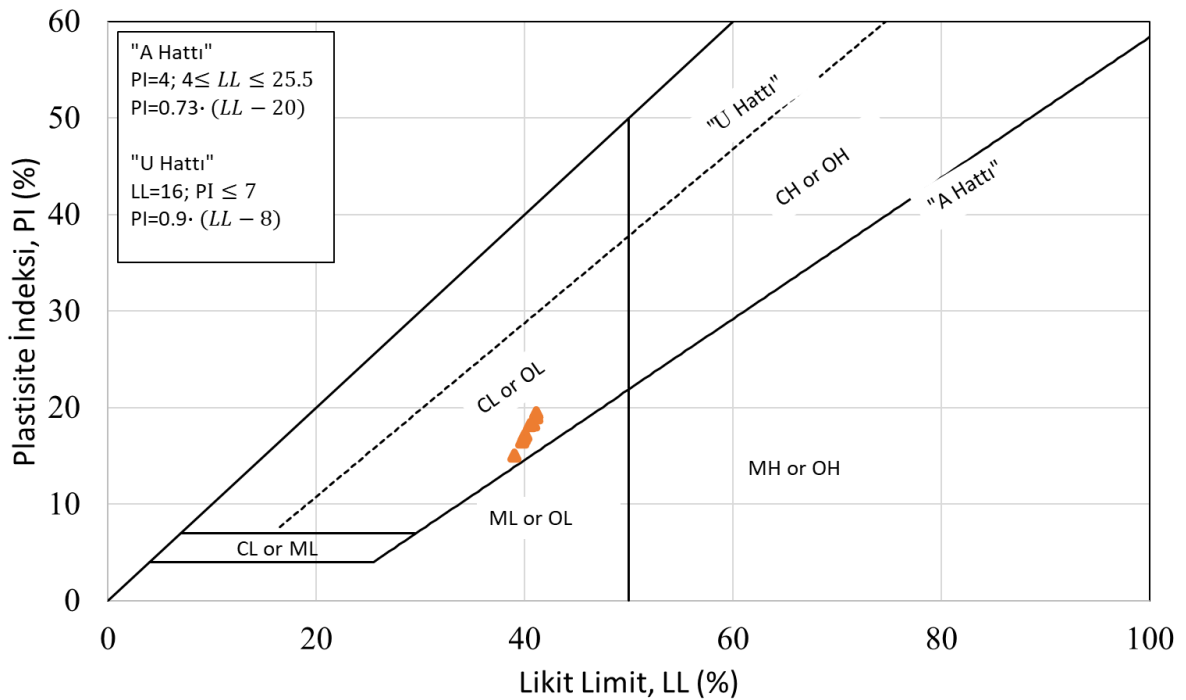
Şekil 4.2 Zeminin plastik limit değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi



Şekil 4.3 Zeminin plastik indeksinin değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi

#### 4.1.2 Uçucu Kül ve Mermer Tozu Katkılı ve Katkısız Zeminin Sınıfı

Şekil 4.4'te kaolin kilinin USCS sınıflandırmasına göre Casagrande plastisite kartındaki konumlarının UK ve UK-AMT içeriğiyle meydana gelen değişimleri gösterilmiştir. Kaolin kilinin UK ve AMT ile stabilizasyonu sonucu zemin karışımındaki kil oranının düştüğü karışımın topaklanma ve aglomerasyon sonucu daha iri hale geldiği bunun sonucunda da artan UK ve AMT içeriği ile zemin karışımlarının plastisite kartındaki konumunun düşük plastisiteli silt (ML) bölgesine doğru kaydığı görülmektedir.

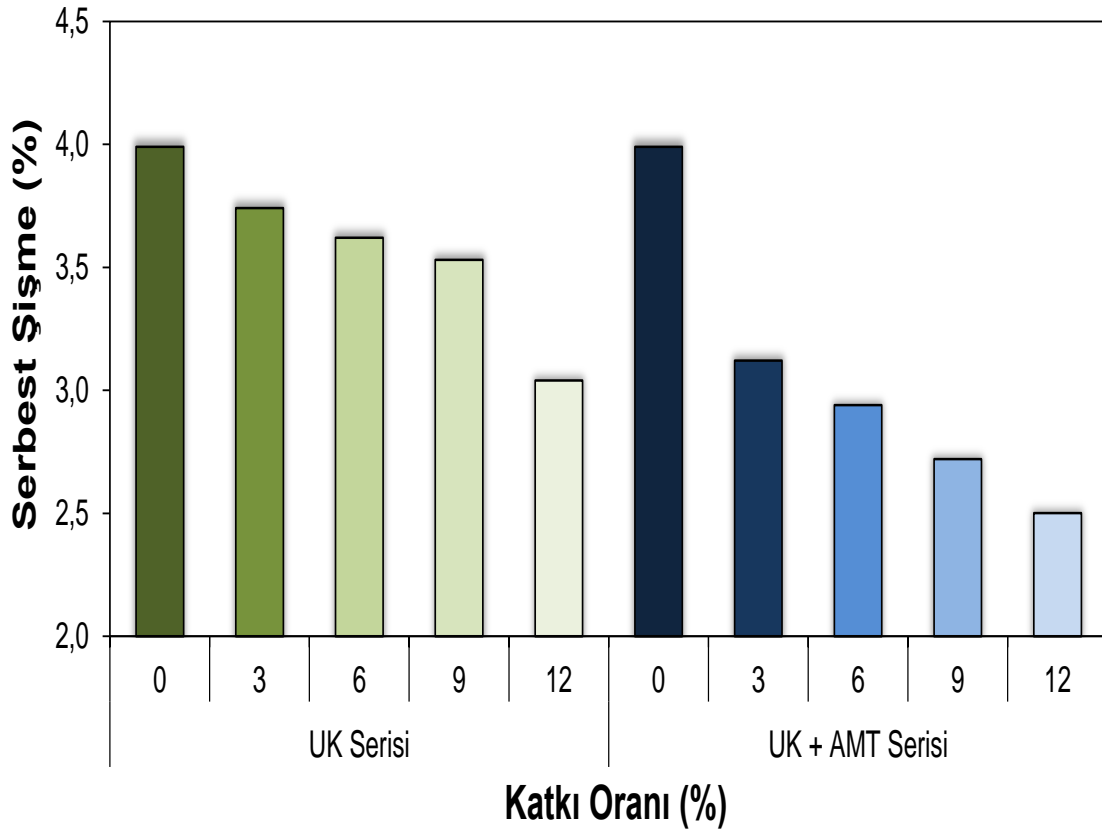


Şekil 4.4 USCS sınıflandırma yöntemine göre uçucu kül ve mermer tozu katkılı ve katkısız zeminin sınıflandırılması

#### 4.2 Serbest Şişme Deney Sonuçları

Şekil 4.5'te kaolin zemininin serbest şişme (%) değerleri üzerinde çeşitli oranlarda UK ve UK-AMT'nin birlikte kullanımı sonucu meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Kaolin zeminin serbest şişme değeri %3.99 olarak belirlenmiştir. UK ve UK-AMT'nin birlikte eklenmesiyle zeminin şişme potansiyeli giderek düşmüştür. Zemine % 12 UK eklenmesiyle zeminin şişme potansiyeli %3.04'e düşmüştür. % 12 UK ile birlikte %12 AMT'nin eklenmesiyle zeminin şişme potansiyeli %2.50'ye düşmüştür. Kaolin zemininin şişme potansiyelinde UK ve AMT içeriğiyle elde edilen düşüş zemine eklenen katkılar ile birlikte karışımda kil oranının azalmasına ayrıca katkıların genişleme hassasiyeti olmayan yapılarına bağlanabilir. Ayrıca, zemin ve UK-AMT daneleri

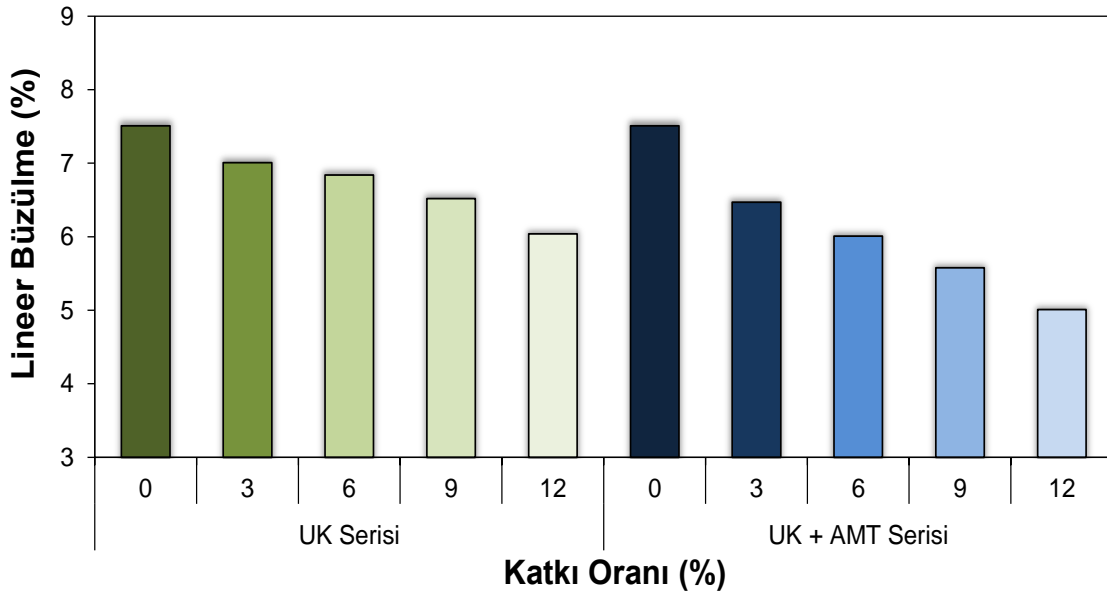
arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar ile meydana gelen çimentolaşma zeminin şişme potansiyelinde düşüş elde edilmesine sebep olmuştur.



Şekil 4.5 Zeminin serbest şişme (%) değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi

### 4.3 Lineer Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 4.6'da kaolin zemininin lineer büzülme (%) değerleri üzerinde çeşitli oranlarda UK ve UK-AMT'nin birlikte kullanımı sonucu meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Kaolin zeminin lineer büzülme oranı %7.51 olarak hesaplanmıştır. UK ve UK-AMT'nin birlikte eklenmesiyle zeminin büzülme oranı giderek azalmıştır. Zemine % 12 UK eklenmesiyle zeminin lineer büzülme oranı %6.04'e düşmüştür. %12 UK ile birlikte %12 AMT'nin eklenmesiyle zeminin lineer büzülme oranı %5.01'e düşmüştür. Kaolin zemininin lineer büzülme oranında UK ve AMT içeriğiyle elde edilen düşüş zemine eklenen katkıları ile birlikte karışımda kil oranının azalmasına ayrıca katkıların büzülme hassasiyeti olmayan yapılarına bağlanabilir. Buna ek olarak, zemin ve UK-AMT daneleri arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar sonucu zemin karışımında çimentomsu malzemelerin oluşmasıyla beraber zeminin lineer büzülme değerlerinde düşüş elde edilmiştir.

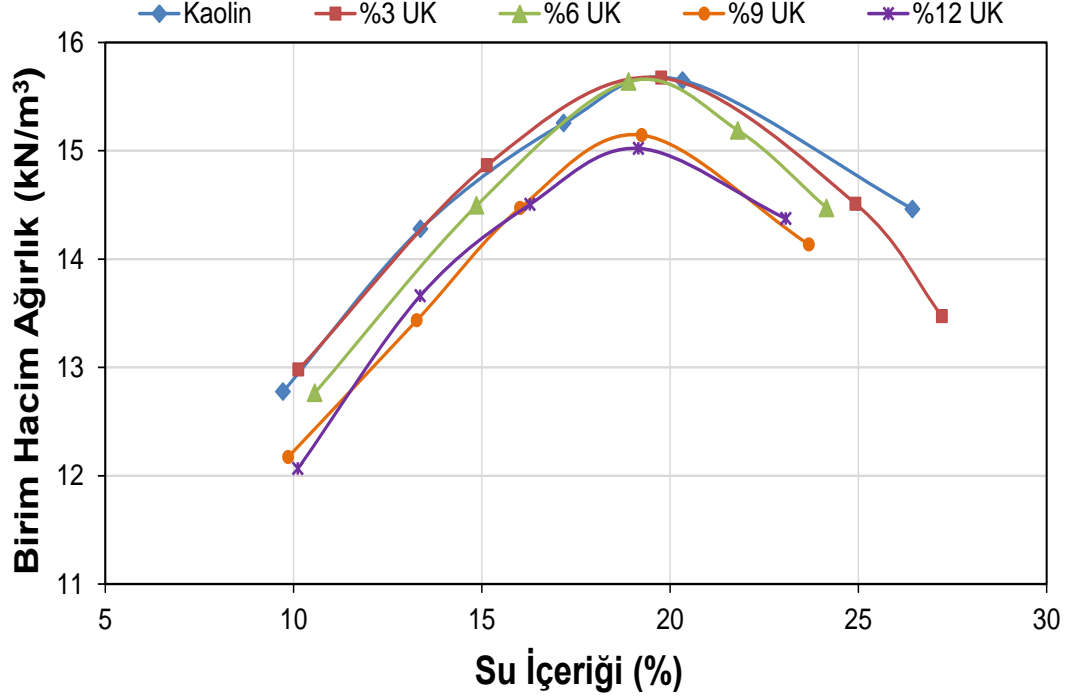


Şekil 4.6 Zeminin lineer büzülme (%) değerinin UK ve AMT içeriği ile değişimi

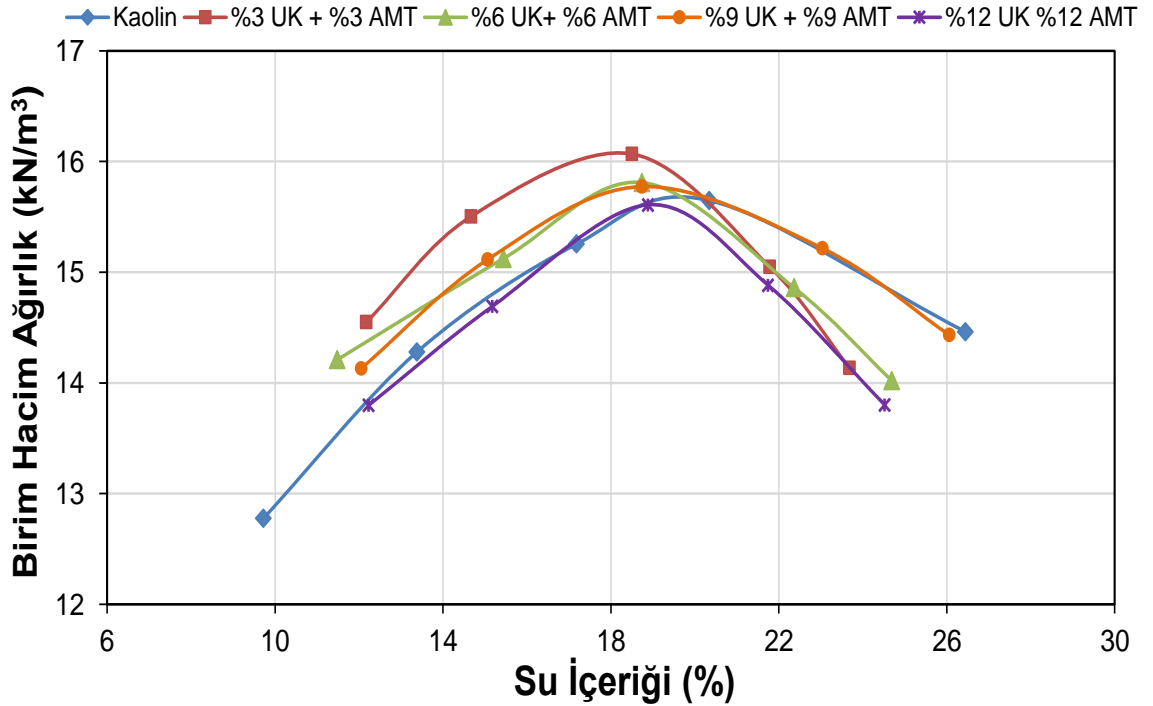
#### 4.4 Kompaksiyon Deney Sonuçları

Kaolin zemininin ve UK-AMT içeren her bir zemin karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (MDD) ve optimum su muhtevaları (OMC) modifiye Proktor yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.7-4.8’de zemin ve UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının farklı su içeriklerinde birim hacim ağırlıkları değerlerinde meydana gelen değişimler verilmiştir. Her bir UK ve UK-AMT içeriği ile kaolin zemininin MDD ve OMC değerlerindeki meydana gelen değişim Şekil 4.9-4.10’da sunulmuştur. Şekil 4.9’dan görülebileceği üzere kaolin zemininin MDD ve OMC içeriği artan UK içeriği ile giderek düşmüştür. Kaolin zemininin MDD değeri %12 UK içeriği ile  $15.69 \text{ kN/m}^3$ ’ten  $15.04 \text{ kN/m}^3$ ’e, OMC değeri ise %19.6’dan %19.10’a düşmüştür. Zeminin MDD değerinin UK içeriği ile düşmesinin sebebi UK’nin zemine kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasına bağlanabilir. UK içeriğiyle zeminin OMC değerinin düşmesinin sebebi ise zemine kıyasla UK içeren zemin karışımının MDD değerine ulaşması için daha düşük su eğilimine sahip olması gösterilebilir. Zemin-UK karışımına AMT eklenmesiyle sadece UK içeren zemine kıyasla zemin karışımının daha yüksek MDD ve daha düşük OMC değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Zeminin MDD değerinin AMT eklenmesiyle yükselmesinin sebebi saf zemin ve UK’ye kıyasla AMT’nin daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasına bağlanabilir. Ayrıca, zeminin OMC değerinin AMT oranıyla düşmesi zemin ve UK’ye kıyasla mermer tanelerinin daha az su emme eğiliminin olması gösterilebilir. Zeminin MDD değeri %3 UK-AMT karışımıyla en yüksek değeri olan  $16.11 \text{ kN/m}^3$ ’e ulaşmış

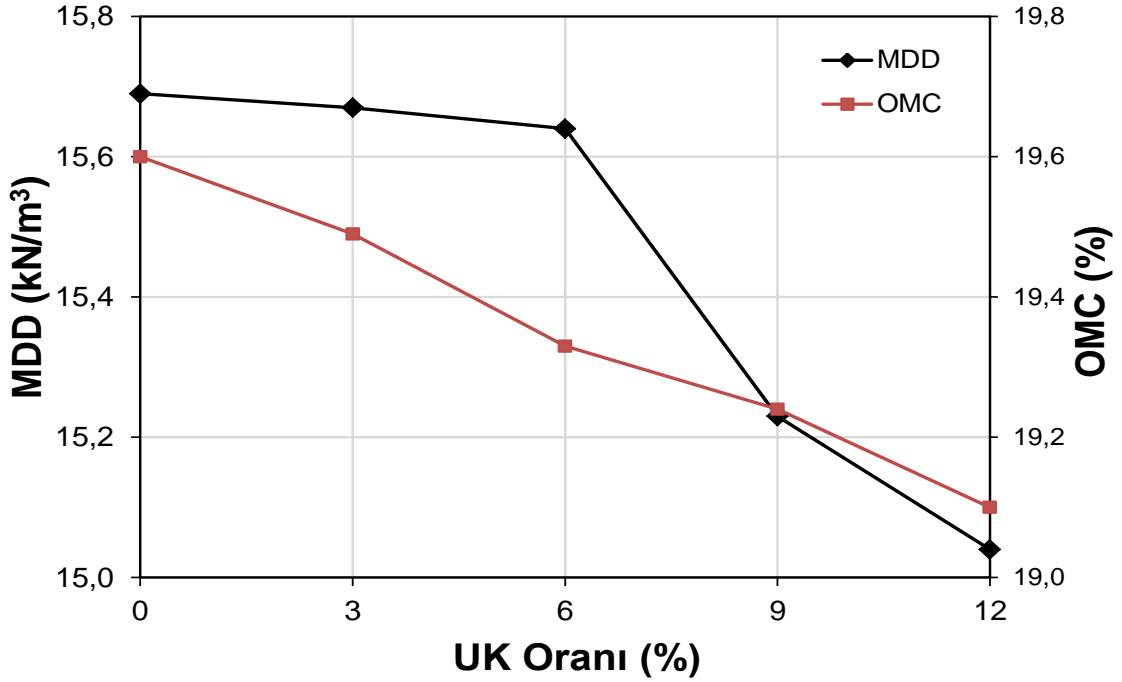
daha fazla katkı eklenmesiyle giderek düşmüştür. %12 UK-AMT karışımıyla zeminin MDD değeri  $15.61 \text{ kN/m}^3$ 'e düşmüştür. Zeminin OMC değeri %3 UK-AMT karışımı ile en düşük OMC değeri olan %18.24'e düşmüş, daha fazla UK-AMT eklenmesiyle giderek yükselmiştir. %12 UK-AMT karışımıyla zeminin OMC değeri %19.01'e yükselmiştir.



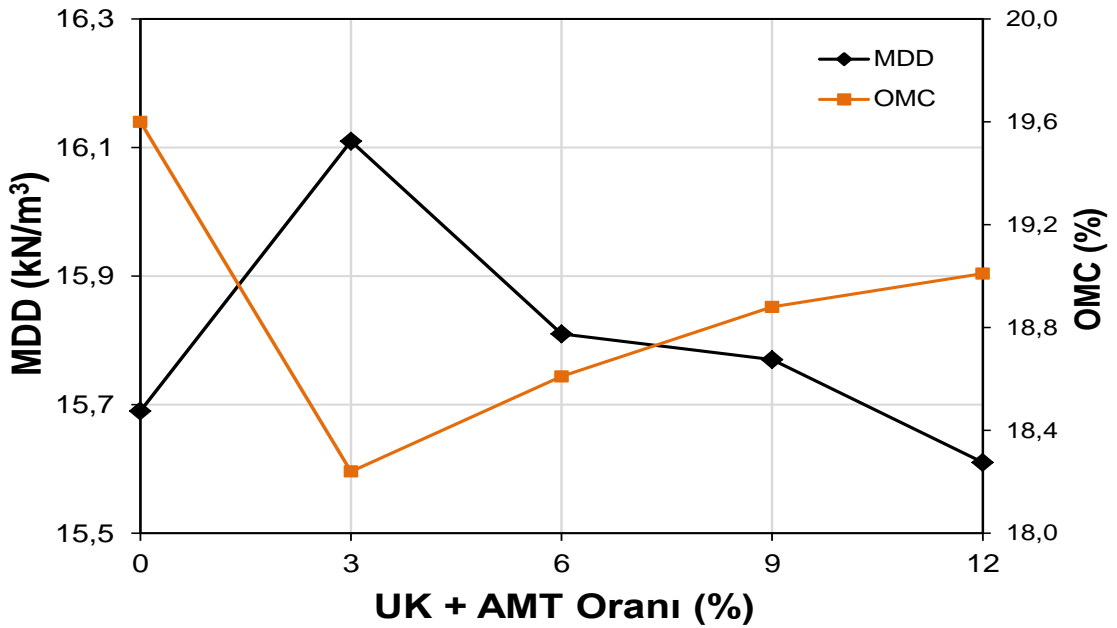
Şekil 4.7 Zeminin farklı su içeriklerindeki birim hacim ağırlıklarının UK içeriği ile değişimi



Şekil 4.8 Zeminin farklı su içeriklerindeki birim hacim ağırlıklarının UK-AMT içeriği ile değişimi



Şekil 4.9 Zeminin MDD ve OMC değerlerinin farklı UK içeriklerindeki değişimi

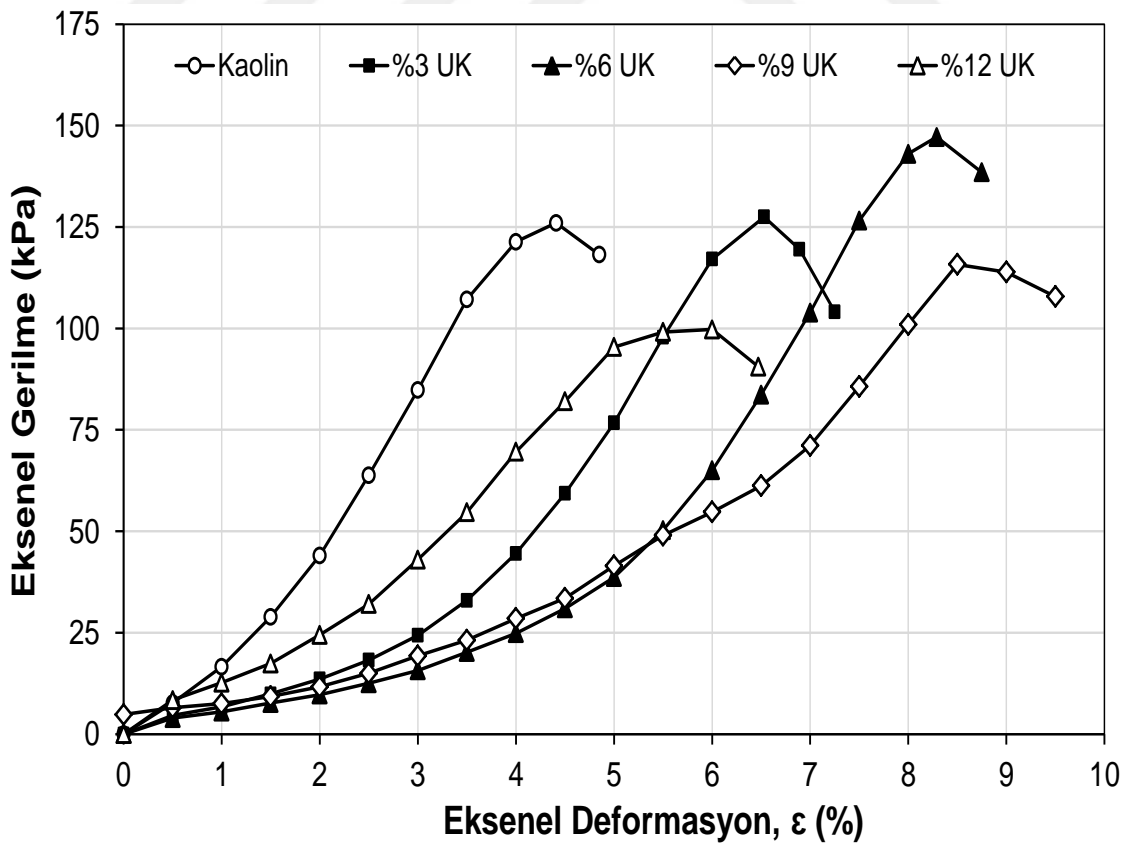


Şekil 4.10 Zeminin MDD ve OMC değerlerinin farklı UK-AMT içeriklerindeki değişimi

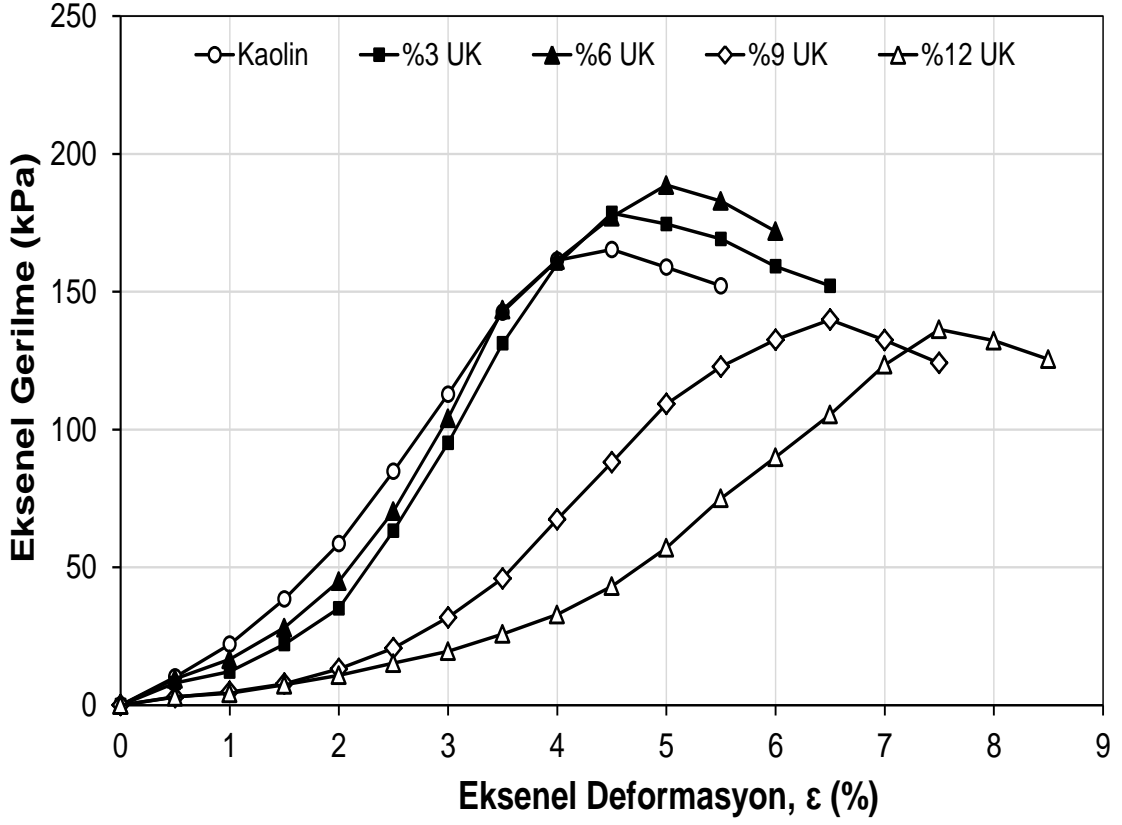
#### 4.5 Serbest Basınç (Tek Eksenli) Deney Sonuçları

Şekil 4.11-4.16'da zemin ve UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı (UCS) deneyinden elde edilen farklı kür sürelerindeki eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafikleri verilmiştir. Şekil 4.17-4.19'da zeminin UCS dayanımında farklı kür sürelerinde ve farklı UK ve UK-AMT içeriklerinde meydana gelen değişim verilmiştir. UCS deneyi sonuçları incelendiğinde kaolin zemininin UCS dayanımının UK ve AMT içeriğinden ve kür sürelerinden etkilendiği

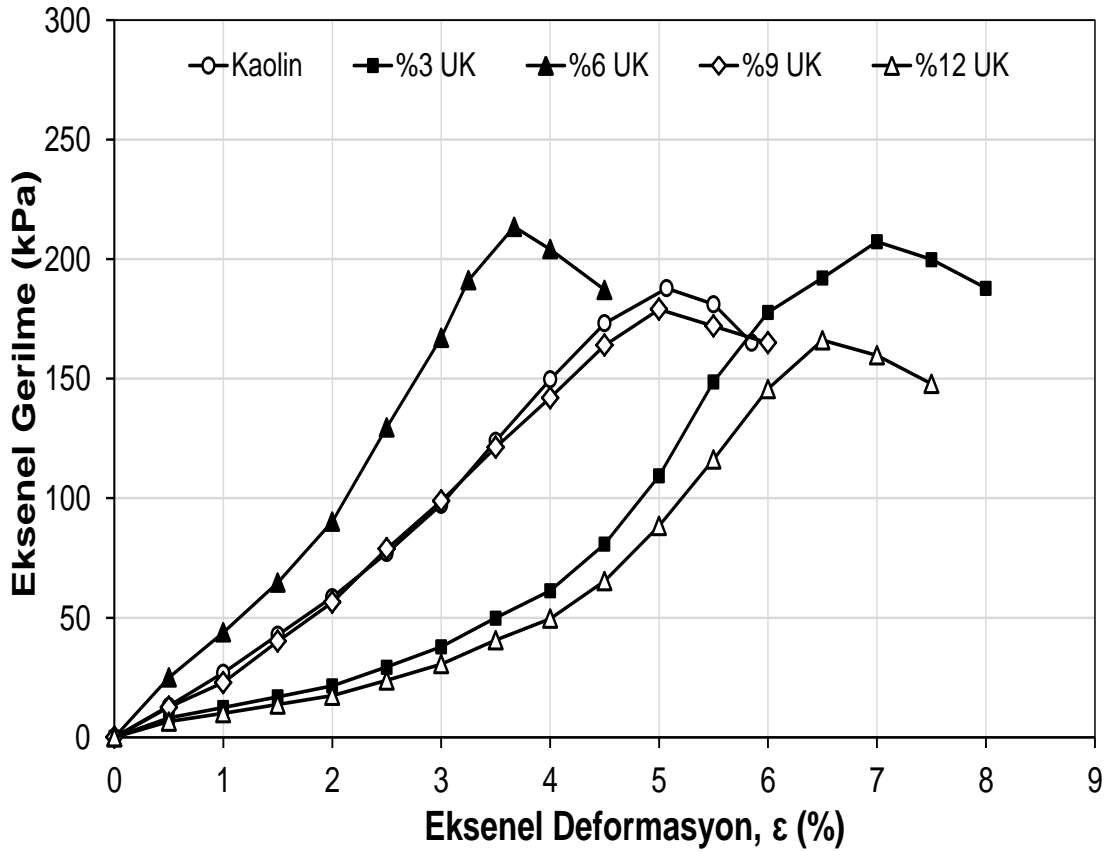
sonucuna varılmaktadır. Kaolin zeminin UCS dayanımı 125.99 kPa olarak elde edilmiştir. Bu değer %6 UK içeriği ile 147.02 kPa'ya yükselerek UK içeren karışımlarda maximum değer elde edilmiştir. Daha fazla UK eklenmesiyle zeminin UCS dayanımı düşmüş %12 UK içeriğiyle 100.76 kPa'ya düşmüştür. Zemin karışımına UK ile birlikte AMT eklenmesiyle zeminin UCS dayanımını daha fazla arttırmıştır. UCS dayanımı %6 UK-AMT içeriğiyle 217.51 kPa olarak en yüksek değerine ulaşmıştır. 7 ve 28 gün kür süreleri sonucu elde edilen sonuçlar incelendiğinde AMT içeren zemin karışımlarının kür sonucu UCS dayanımının önemli derecede arttığı görülmüştür. 7 gün kür sonunda en yüksek UCS dayanımı %9 UK-AMT karışımı ile yaklaşık %40 artarak 285.14 kPa ulaşılmıştır. 28 gün kür sonunda en yüksek dayanım %9 UK-AMT karışımı ile elde edilmiş kürsüz numuneye göre yaklaşık %77 artarak 359.12 kPa ulaşmıştır. UCS değerinin UK-AMT karışımı ile artması eklenen atık daneleri ile kaolin zemini arasındaki kohezyonun artmasına bağlanabilir. Ayrıca, artan kür süresi ile beraber karışımların UCS değerinin artması UK-AMT ile zemin daneleri arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar sonucu zemin karışımında meydana gelen çimentolaşma ile karışımların UCS dayanımının artmasına neden olmuştur.



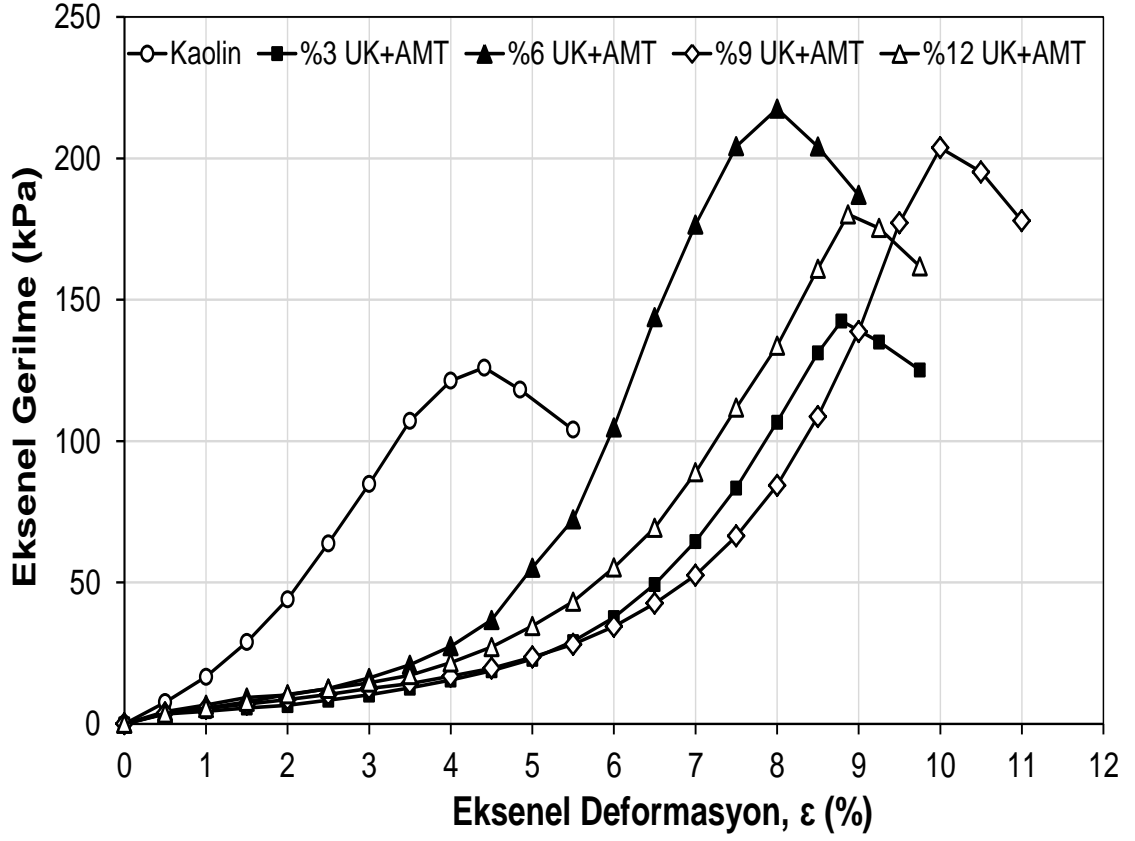
Şekil 4.11 0 gün kürlenmiş zemin ve UK karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği



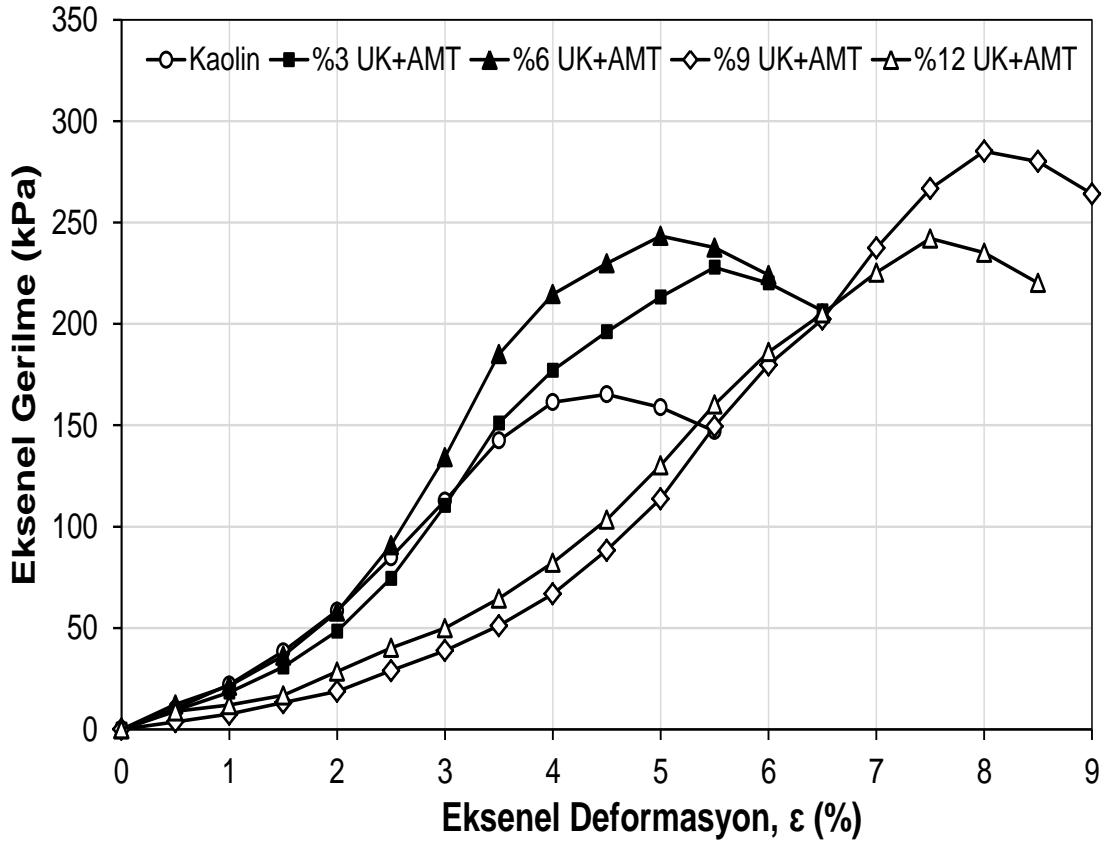
Şekil 4.12 7 gün kürlenmiş zemin ve UK karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği



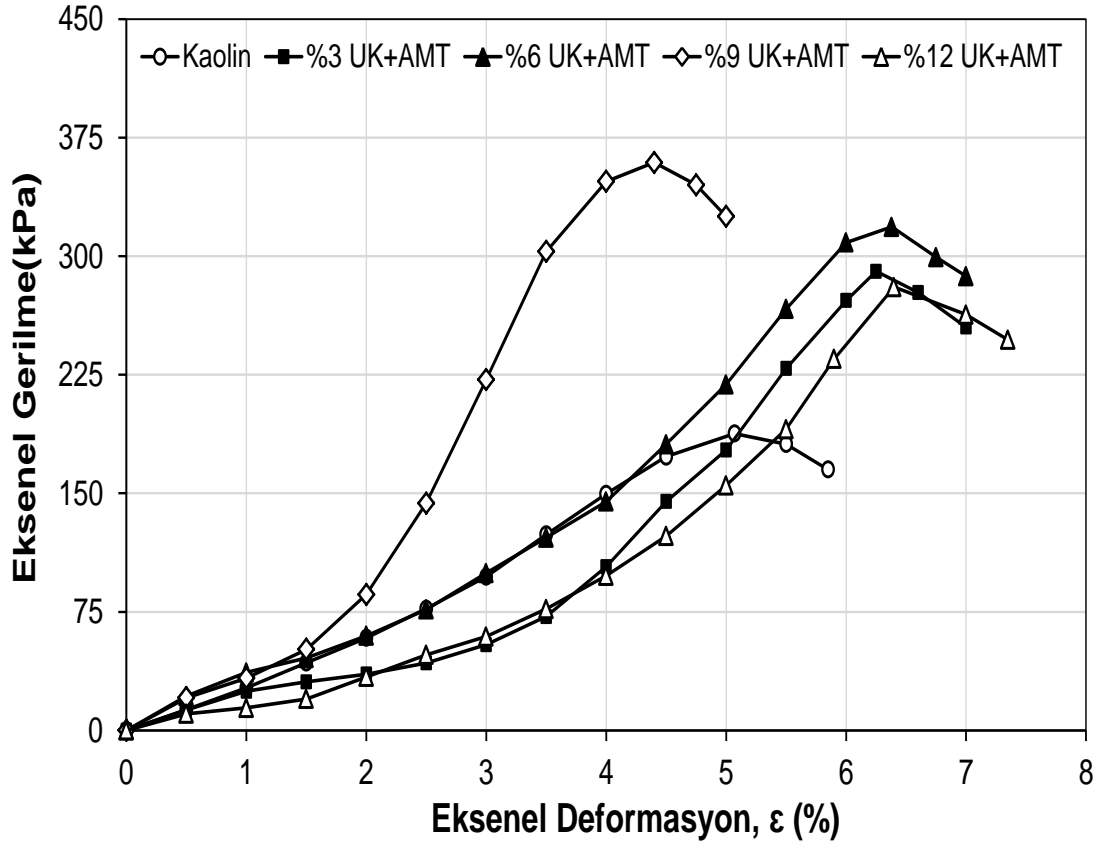
Şekil 4.13 28 gün kürlenmiş zemin ve UK karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği



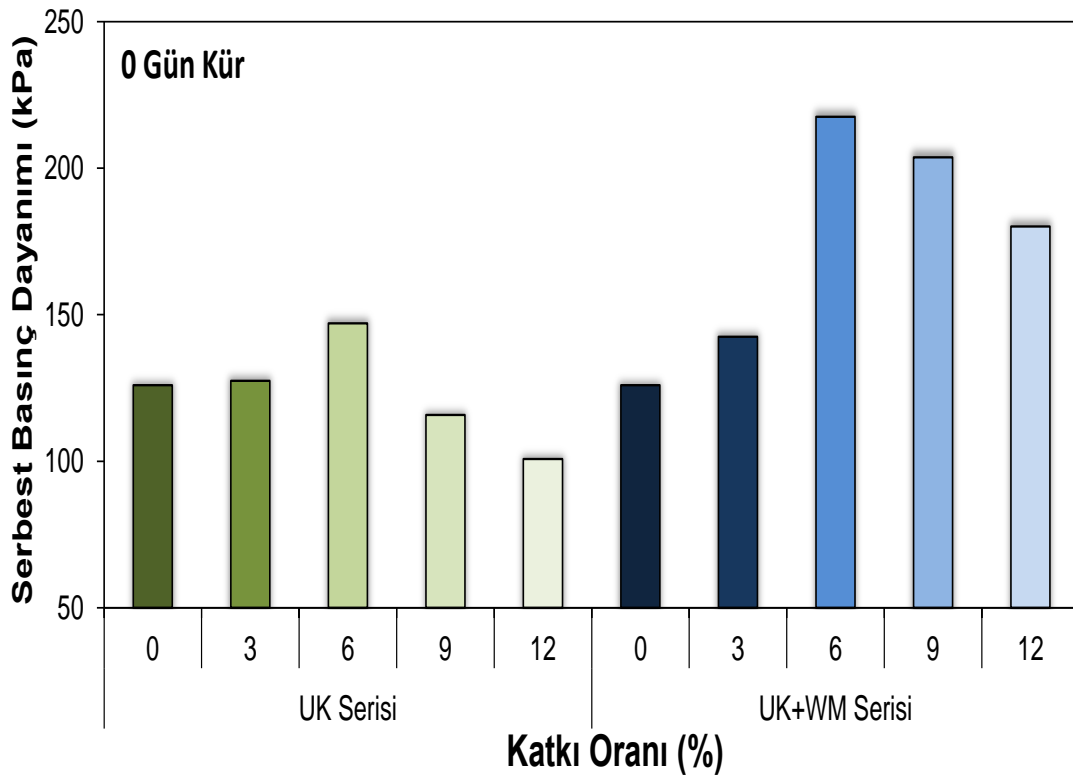
Şekil 4.14 0 gün kürlenmiş zemin ve UK-AMT karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği



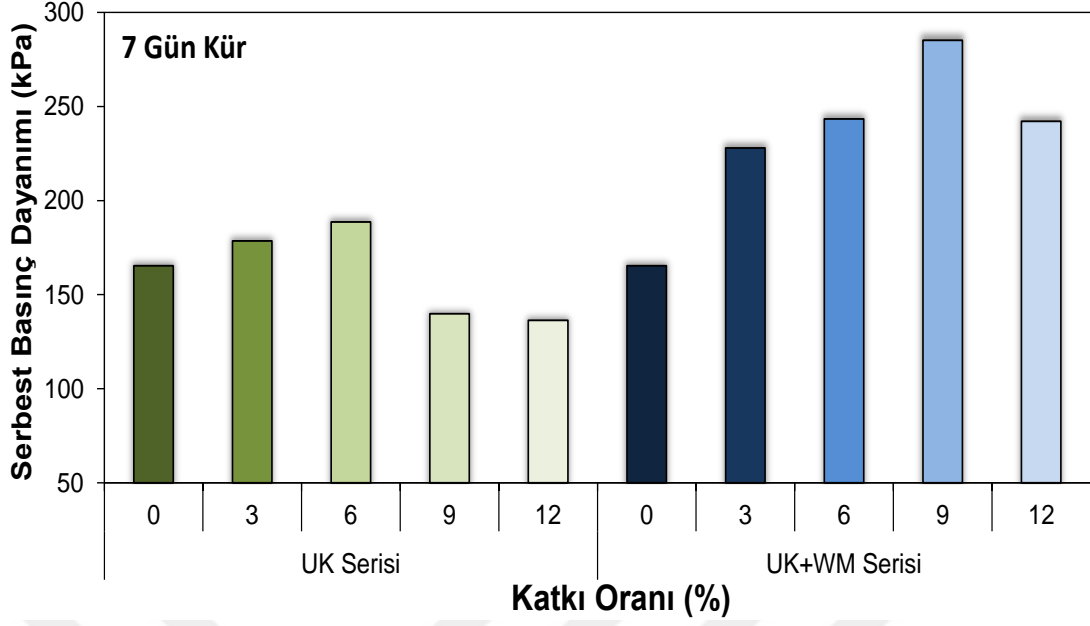
Şekil 4.15 7 gün kürlenmiş zemin ve UK-AMT karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği



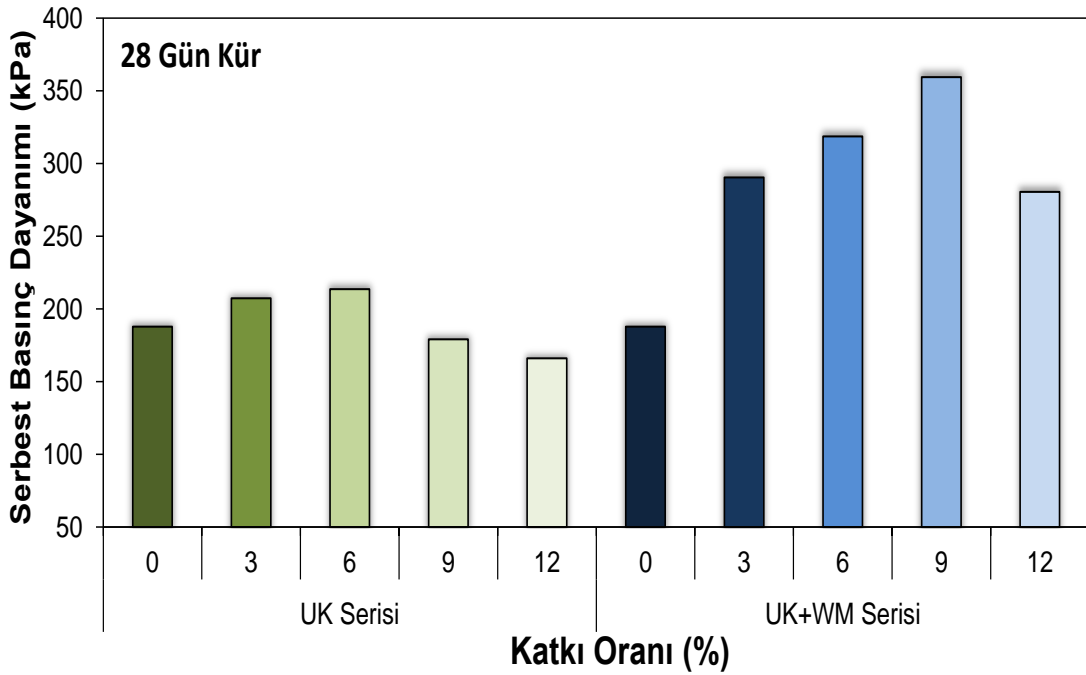
Şekil 4.16 28 gün kürlenmiş zemin ve UK-AMT karışımlarının eksenel gerilme-deformasyon grafiği



Şekil 4.17 0 gün kürlenmiş zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı



Şekil 4.18 7 gün kürlenmiş zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı

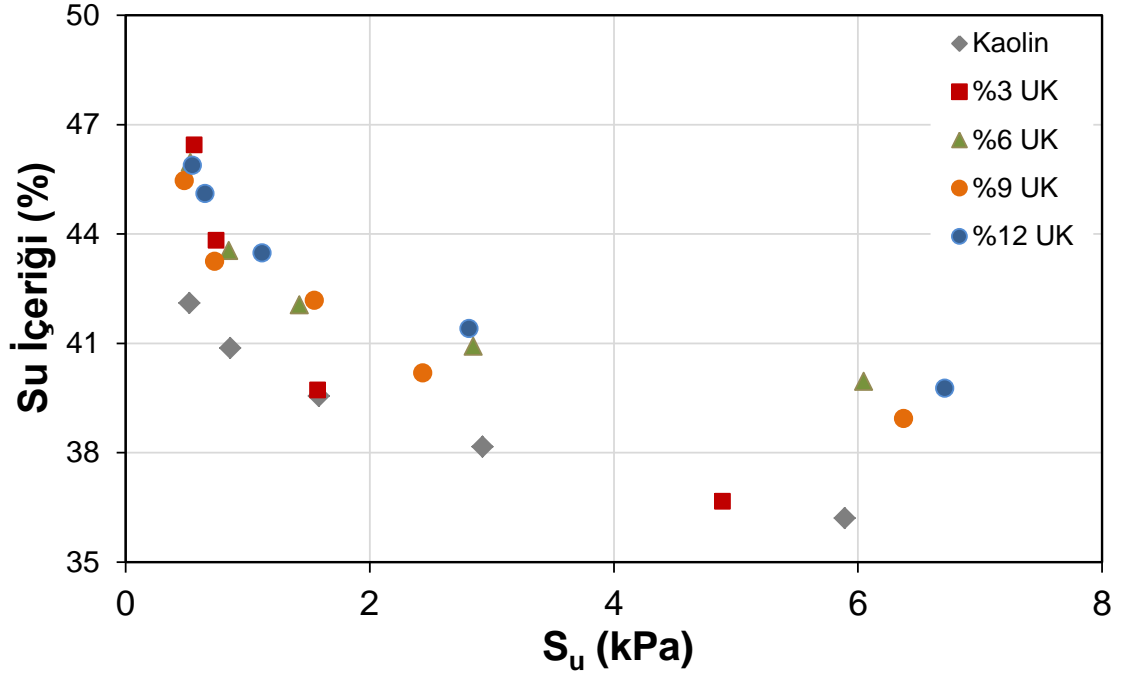


Şekil 4.19 28 gün kürlenmiş zemin karışımlarının serbest basınç dayanımı

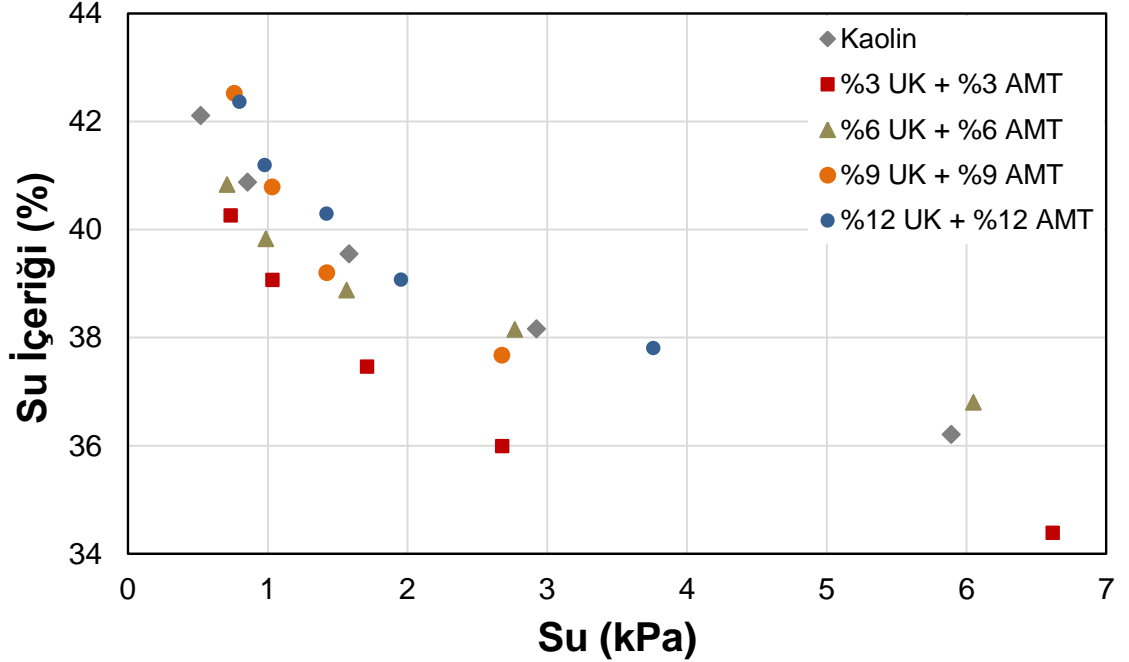
#### 4.6 Drenajsız Kayma Mukavemeti Deney Sonuçları

Şekil 4.20'de UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının düşen koni deneyinden elde edilen farklı su muhtevalarındaki drenajsız kayma mukavemeti ( $S_u$ ) değerlerinde meydana gelen değişimler verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde artan su muhtevası ile zemin karışımlarının  $S_u$  değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Kaolin zemininin aynı su muhtevalarında artan UK ve UK-AMT içeriği ile  $S_u$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Kaolin zeminin UK ve UK-AMT içeriğiyle aynı su

muhtevalarında penetrasyona olan direncinin arttığı bunun sonucunda  $S_u$  arttığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.20 UK içeren zemin karışımlarının farklı su muhtevalarındaki  $S_u$  değerlerinin değişimi

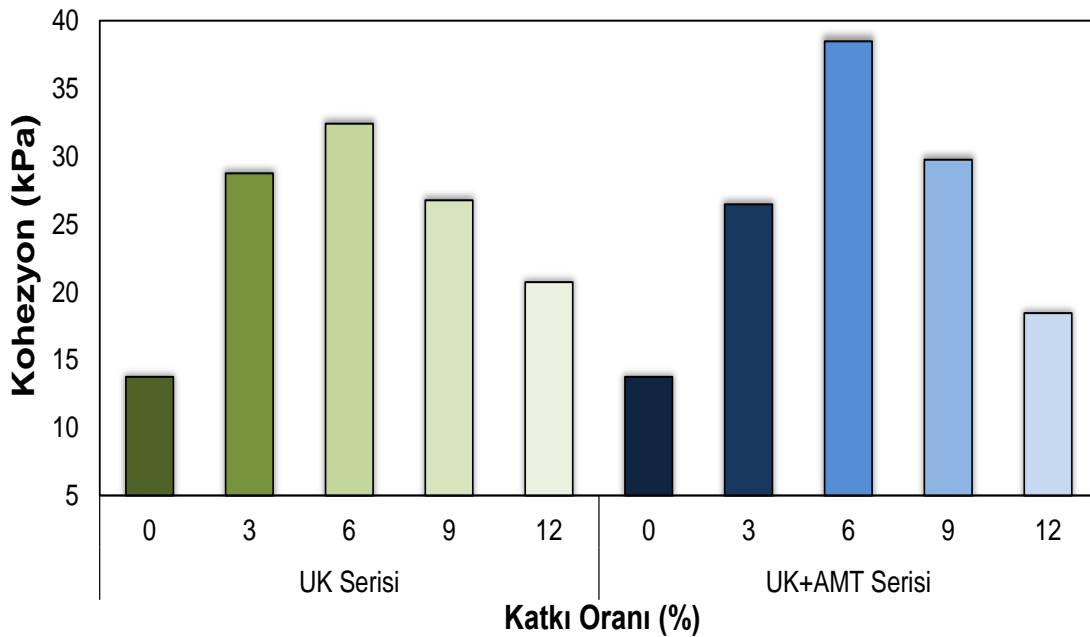


Şekil 4.21 UK-AMT içeren zemin karışımlarının farklı su muhtevalarındaki  $S_u$  değerlerinin değişimi

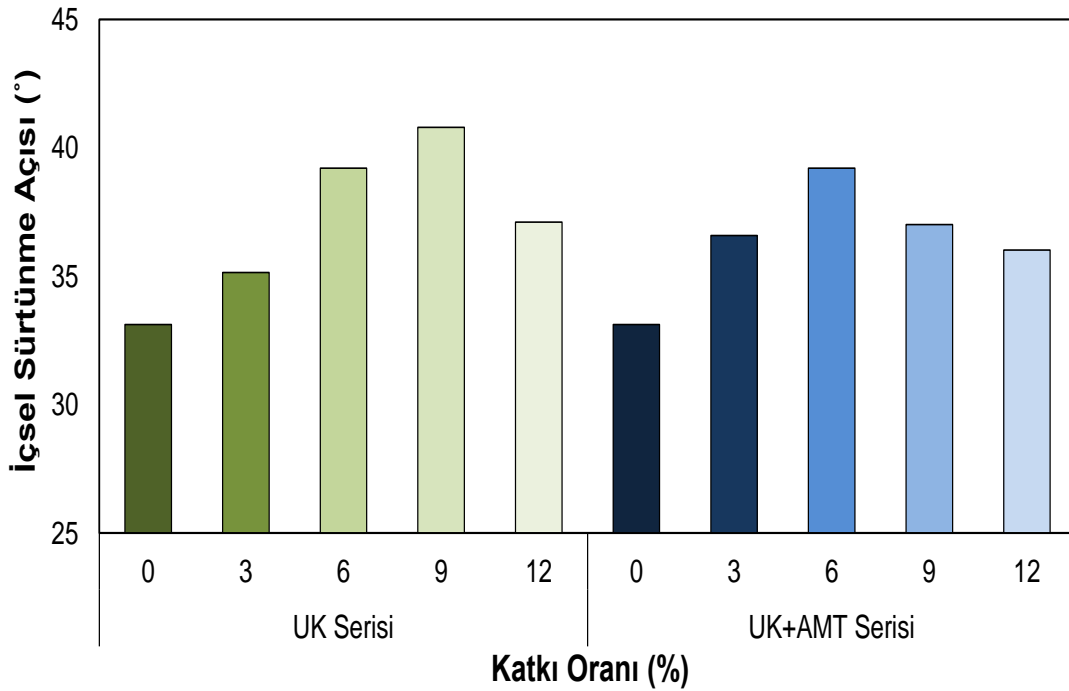
#### 4.7 Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Şekil 4.22'de UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının kesme kutusu deneyinden elde edilen kohezyon değerlerindeki değişim gösterilmiştir. Kaolin kilinin

kohezyonu 13.75 kPa olarak belirlenmiştir. Kaolin kilinin kohezyon değeri %6 UK eklenmesiyle ek yüksek değerine çıkararak 32.41 kPa'ya ulaşmıştır. Daha fazla UK eklenmesiyle kohezyon değeri düşmüş ve %12 UK içeriği ile kohezyon 20.73 kPa'ya düşmüştür. Zemin karışımına AMT eklenmesiyle daha yüksek kohezyon değeri elde edilmiştir ve % 6 UK-AMT karışımı ile kohezyon değeri 38.48 kPa'ya çıkmıştır. Daha fazla UK-AMT içeriğiyle kohezyon değeri giderek düşmüş ve %12 UK-AMT içeriğiyle kohezyon değeri 18.44 kPa'ya düşmüştür. %6 UK ve %6 UK-AMT içeriğinde kaolinin kilinin kohezyon değerinin yükselmesi bu oranlarda eklenen atığın zeminle daha iyi kenetlenmesine ve daha kompakt bir iç yapı oluşması sonucu kohezyonun artmasına sebep olmuştur. Şekil 4.23'de UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının kesme kutusu deneyinden elde edilen içsel sürtünme açısı değerlerindeki değişim gösterilmiştir. Kaolin kilin içsel sürtünme açısı 33.12° olarak belirlenmiştir. Kaolin kilinin içsel sürtünme açısı %9 UK eklenmesiyle ek yüksek değerine çıkararak 40.79°'ye ulaşmıştır. Daha fazla UK eklenmesiyle içsel sürtünme açısı değeri azalmış ve %12 UK içeriği ile içsel sürtünme açısı 37.11°'ye düşmüştür. AMT içeren zemin karışımları için en yüksek içsel sürtünme açısı %6 UK-AMT içeriğiyle 39.21° olarak elde edilmiştir. Daha fazla UK-AMT içeriğiyle içsel sürtünme açısı giderek azalmıştır ve %12 UK-AMT içeriğiyle içsel sürtünme açısı 36.02°'ye düşmüştür. UK dane boyutunun kaolin ve AMT'ye göre daha iri olmasından ötürü karışımın içsel sürtünme açısını arttırdığı sonucuna varılabilir.



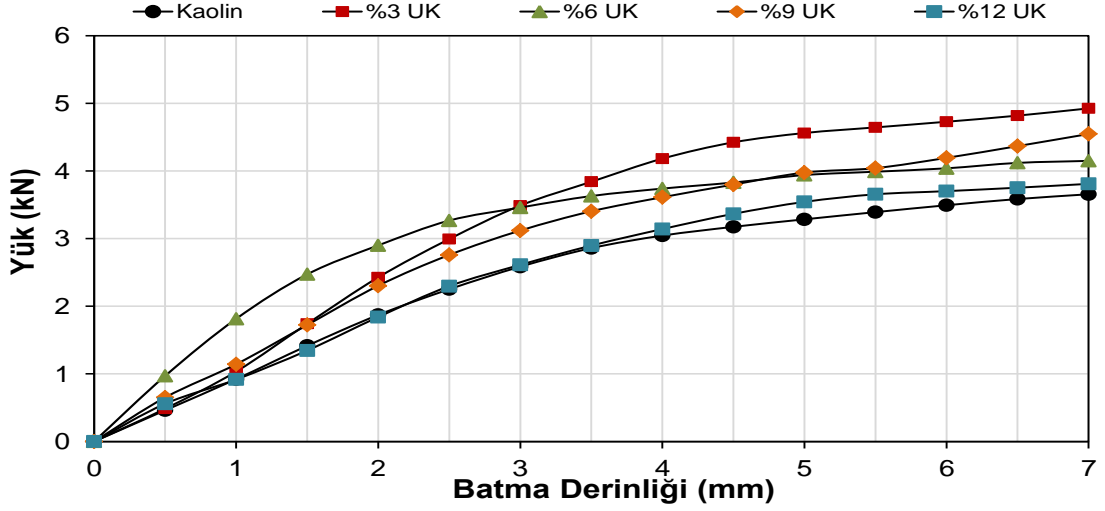
Şekil 4.22 Zeminin kohezyon değerinin farklı UK-AMT içeriğiyle değişimi



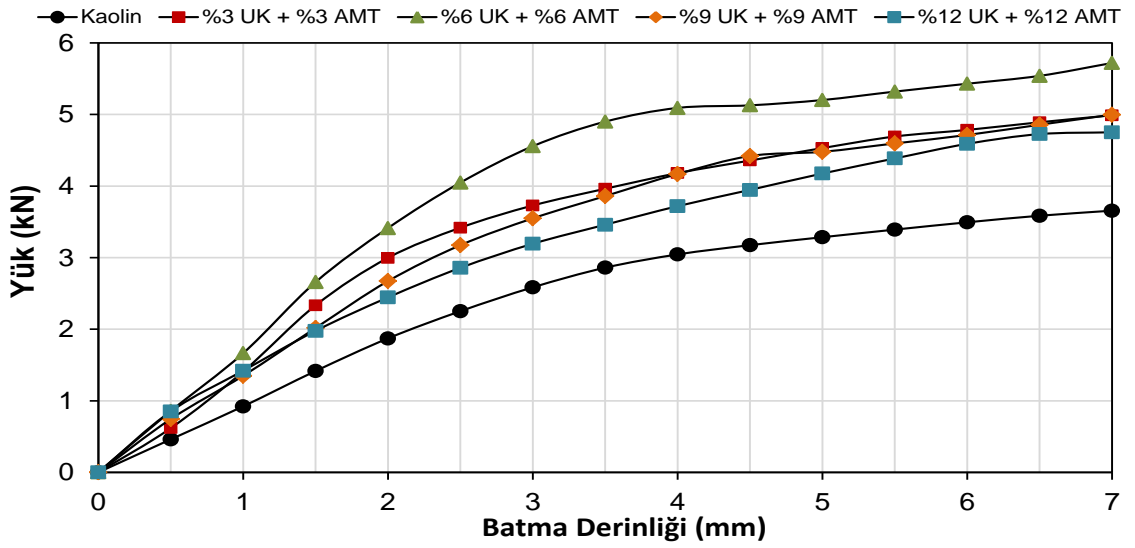
Şekil 4.23 Zeminin içsel sürtünme açısı değerinin farklı UK-AMT içeriğiyle değişimi

#### 4.8 Kaliforniya Taşıma Oranı Deney Sonuçları

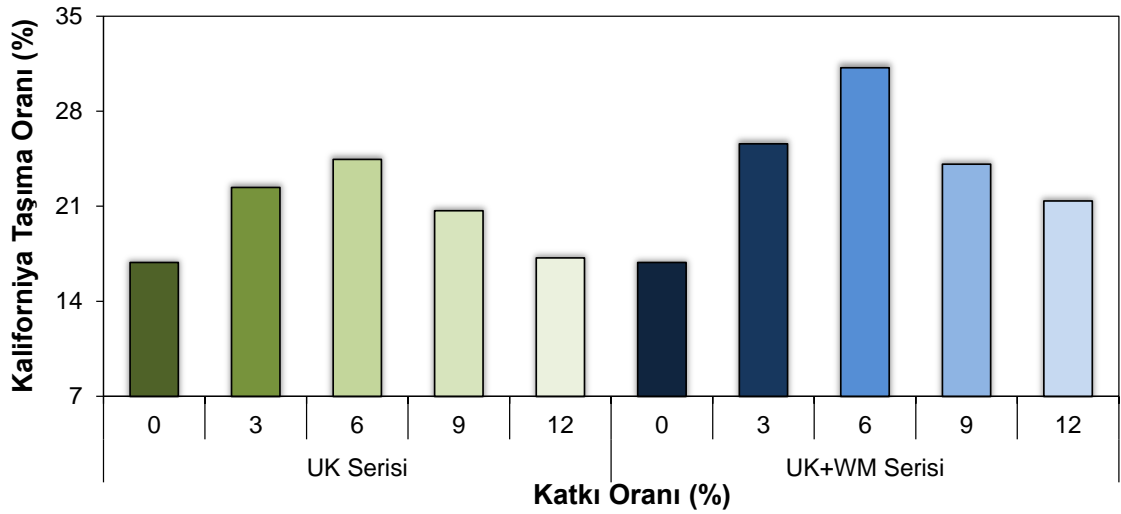
Şekil 4.24-4.25’de UK ve UK-AMT içeren zemin karışımlarının CBR deneyinden elde edilen yük-penetrasyon grafikleri verilmiştir. Kaolin kilinin farklı UK ve UK-AMT içeriklerinde CBR değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Kaolin kilinin CBR değeri %16.86 olarak belirlenmiştir. Zemine %6 oranına kadar UK eklenmesiyle CBR değeri artmış daha fazla UK eklenmesiyle CBR değeri düşmüştür. %6 oranında UK eklenmesiyle CBR değeri saf zemine kıyasla yaklaşık %45 artarak %24.46’ya ulaşmıştır. %12 UK eklenmesiyle zeminin CBR değeri %17.20’ye düşmüştür. Zemin-UK karışımına AMT eklenmesiyle CBR dayanımında daha fazla artış elde edildiği görülmüştür. Zeminin CBR değeri %6 UK-AMT karışımı ile saf zemine kıyasla yaklaşık %85 artarak %31.20 değeri ile en yüksek CBR değerine ulaşılmıştır. Daha fazla UK-AMT içeriği ile zemin karışımlarının CBR değeri düşmüş %12 UK-AMT içeriği ile %21.40 CBR değeri elde edilmiştir. Kaolin zemininin belirli bir oranda UK ve AMT içeriği ile CBR dayanımının artması zemin daneleri UK ve AMT daneleri arasındaki kenetlenme artması sonucu karışımın daha da stabil ve kompakt hale gelmesi sonucu taşıma gücünün arttığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, zemin karışımlarının taşıma gücünün artması zemin ve UK-AMT daneleri arasında meydana gelen puzzolanik reaksiyonlar sonucu çimentomsu malzemelerin oluşmasına bağlanabilir.



Şekil 4.24 Zemin-UK karışımlarının CBR deneyinden elde edilen yük-penetrasyon grafiği



Şekil 4.25 Zemin-UK-AMT karışımlarının CBR deneyinden elde edilen yük-penetrasyon grafiği



Şekil 4.26 Zemin-UK-AMT karışımlarının CBR deneyi sonuçları

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında kaolin kili karayolu taban zemininin geoteknik özelliklerinin uçucu kül (UK) ve atık mermer tozu (AMT) ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. UK'nin yalnız ve AMT ile %3, %6, %9, ve %12 oranlarında kaolin kiline kuru ağırlığınca ilave edilmiş ve kaolin kilinin geoteknik özellikleri üzerine olan etkisini araştırmak amacıyla kapsamlı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından yola çıkarak aşağıdaki bulgulara ulaşılabılır:

- UK içeriği arttıkça kaolin kilinin LL ve PI değeri düşerken PL değerleri artmıştır. UK ile birlikte AMT'nin kullanılması LL ve PI değerlerinin düşmesinde daha etkili olmuştur.

- UK içeriği arttıkça kaolin kilinin şişme ve büzülme potansiyeli düşmüştür. UK ile birlikte AMT'nin kullanılması şişme ve büzülme potansiyelinin azalmasında daha etkili olmuştur.

- Kaolin zemininin MDD ve OMC değeri UK içeriğiyle giderek düşmüştür. Zemin-UK karışımına AMT eklenmesiyle sadece UK içeren zemine kıyasla zemin karışımının daha yüksek MDD ve daha düşük OMC değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

- Kaolin kilinin UCS dayanımı UK ve UK-AMT içeriği ile kür süresinden etkilenmiştir. Kaolin kiline UK eklenmesiyle zeminin UCS dayanımının arttığı görülmüştür. UK ile birlikte AMT eklenmesi kür süreleri ile birlikte kaolin kilinin UCS dayanımında önemli artışlar elde edilmiştir.

- Kaolin kilinin düşen koni testinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde drenajsız kayma mukavemetinin UK ve UK-AMT içeriği arttıkça arttığı görülmüştür.

- Kaolin kilinin direkt kesme kutusu deneyinden elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin UK ve UK-AMT içeriğinden etkilendiği görülmüştür. Genellikle saf katkısız zeminle kıyaslandığında kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerin UK ve UK-AMT içeriğiyle arttığı görülmüştür.

- Kaolin kilin CBR değeri UK ve UK-AMT içeriğiyle arttığı görülmüştür. Kaolin kilinin CBR değeri %6 UK içeriği ile %16,86'dan %24,46'ya, %6 UK-AMT karışımı ile bu değer %31,20'ye yükselmiştir.

## 5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasının sonuçlarından yola çıkarak aşağıda belirtilenler gelecekteki çalışmalar için önerilebilir:

- Kaolin kilinin bulunduğu karayolları taban zemini dizaynında önemli bir parametre olan tekrarlı yükler altındaki esneklik modülü parametresi üzerine UK ve UK-AMT katkılarının etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

- Kaolin kilinin ıslanma-kuruma ve donma-çözülme gibi durabilite parametreleri üzerine UK ve UK-AMT katkılarının etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

- UK ve UK-AMT katkılarının kaolin kilinin iç yapısı üzerine olan etkisini incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınım analizleri gerçekleştirilmesi önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Abd Karim, N.A., Rashid, A.S.A., Md Noor, N and Yaacob, H. 2014. Effect of cement stabilized kaolin subgrade on strength properties, *Journal of Applied Science*, 14 (8), 842-845.
- Acar, F. (2019), "Kutlubey-Yazıcılar Bölgesi Killerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Çatalağzı Uçucu Külü İle Stabilizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın Üniversitesi, Bartın, 87.
- Aitcin, P.C., 1986, Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes, *Proc. of 2nd Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Madrid, 91-114.
- Aksoy, H.S., Yılmaz, M., Akarsu, E.E. 2008. Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külünün kullanılarak stabilizasyonu, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6 (3), 470.
- Akyol, M. (2022), "Atık Kemik Tozu İle Zemin İyileştirme", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çukurova Üniversitesi, Adana, 3-5.
- Alataş, T. (1996), "Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma", Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 146.
- Albez, A. 2014. Çevre maliyet raporu: Aşkale çimento. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6 (1), 189-208.
- Alkaya, D. 2009. Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (1), 61-72.
- Anonim, 2006,. TS 1900-1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Ankara, 2.
- Arıöz, Ö., Yıldırım, K. 2015. Türkiye'de çimento sektöründeki belirsizlikler ve Türk çimento sektörünün swot analizi, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 32, 173-190.
- 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 D422-63, 2007, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D421-66, 2010, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1883-21, 2010, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2487-63, 2020, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 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.

- ASTM D4318-17, 2018, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D4546-21, 2021, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- AASHTOO M145, 2012, Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, Washington, DC.
- ASTM D1557-12, 2021, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D3080-04, 2012, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Aytekin, S. (2009), "Uçucu Küllerin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çukurova Üniversitesi, Adana, 81.
- Baylan, Ü. B., (2020), "Denizli İli Acıpayam İlçesi Oğuz Mahallesi TOKİ İnşaatı Zemin İyileştirmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, 17.
- Bell, F.G., 1995. Cement stabilization and clay soils, with examples, *Enviromental Engineering Geoscience*, 1 (2), 139-151.
- Bıçakçı, M. B., (2022), "Kireç İle Orta Plastisiteli Kil Zemin İyileştirmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 5-9.
- Bilgen, G., Kavak, A., Çapar, Ö.F. 2012. Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşimi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2 (2), 30-38.
- Bilici, H., Okur, D.V., Türköz, M., Savaş, H. 2018, Uçucu kül katkısının meşelik zemininin kompaksiyon ve dayanım karakteristiklerine etkisi. *International Euroasian Conference on Science, Engineering and Technology (euroasianSciEnTech 2018)*, Ankara.
- BS 1377-2, 2022, Methods of test for soils for civil engineering purposes - Classification tests and determination of geotechnical properties, British Standard Institution, London.
- Büke, A. (2021), "Kömür Termik Santrali Uçucu Küllerinden Değerli Metal ve Nadir Toprak Elementlerinin İkincil Bir Kaynak Olarak Kazanılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2-5.
- Chu, S.C., Kao, H.S. 1993. A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag: fly ash for soil improvement. *Geotechnical Special Publication*, 36: 89-100.
- Cömert, A.T. (2012), "Uçucu Kül, Mermer Tozu Ve Endüstriyel Atık Kumu Yol Alt Yapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, 21-32.
- Çatal, D. (2019), "Mermer Tozu ve Kestane Meyve Kabuğu Takviyeli Polilaktik Asit (Pla) Biyokompozitlere Ait Özelliklerin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 24-32.
- Çinicioğlu, F.S., 2005, Zeminlerde statik ve dinamik yükler altında taşıma gücü anlayışı ve hesabı, *İMO İstanbul Semineri*, İstanbul, 8.

- Çokca, E. 1997. Frost susceptibility properties of soma-b fly ash, *Journal of Energy Engineering*, 123 (1), 1-10.
- Davran, S. (2022), "Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sayısal Analiz Yardımıyla Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 4-6.
- Dehghanian, K., 2021. Killi zeminlerin özelliklerinin uçucu kül kullanarak iyileştirilmesi, *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (1), 66-72.
- Demir, S., Kılıç, M. 2010. Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri, *GOÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27 (1), 95-104.
- 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.
- Doğan, C. (2019), "Mermer Tozu Ve Endüstriyel Atık İçeren Harçların Mekanik Özelliklerinin Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 20-26.
- Doru, M.H. (2014), "Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 3-9.
- Enbaya, M.M. (2019), "Atık Mermer Tozu Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların (Kyb) Bazı Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, 16-18.
- Ferguson, G. 1993. Use of self-cementing fly ash as a soil stabilization agent: fly ash for soil improvement, *Geotechnical Special Publication*, 36, 1-15.
- Gör, M., Aksoy, H.S., Bilgen, G. 2012. Farklı katkı malzemelerinin kil bir zeminin kıvam limitleri üzerinde zamana bağlı etkisi, *Ulusal Kil Sempozyumu*, Niğde.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., Demir, İ. 2008. Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 (1), 85-94.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., Demir, İ. 2009. Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (2), 33-42.
- Gücek, S. (2011), "Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 20-25.
- Gülan, L. (2015), "Atık Mermer Tozu Ve Cam Elyaf Katkısının Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 13-14.
- Güzel, M.D. (2022), "Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, 8-20.
- Haralambos, S.I, 2009, Compressive Strength of Soil Improved with Cement, *International Foundation Congress and Equipment Expo 2009*, Orlando, Florida, United States, 289-296.
- Kaçmaz, U.D. (2019), "Mermer Tozu ve Uçucu Külün Zemin İyileştirmede Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 9-78.

- Kantürk, E. (2006), "Ege Bölgesi Uçucu Küllerinden Sentetik Zeolit Üretimi Parametrelerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ege Üniversitesi, İzmir, 4-10.
- Karaşahin, M., Yıldız, A.H., Taciroğlu, M.V. 20224. Atık mermer tozu ile zemin stabilizasyonunun mekanistik-ampirik tasarım yöntemine göre incelenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (3), 1621-1636.
- Keskin, E. (2004), "Kireç Stabilizasyonu ve Yol Kesitine Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 78.
- Kilit, M., Çavuş, U.Ş., Zorluer İ. 2021. Portland Kompoze Çimentosu İle Şişen Killerin Stabilizasyonu, *Journal Of Civiltech*, 3 (2), 185-195.
- Nazaroghlu, M.B. (2019), " Zeminlerin Özelliklerini Uçucu Kül İle İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, 4-5.
- Nicholson, P.O., Kashyap, V. 1993. Fly ash stabilization of tropic hawaiian soils. fly ash for soil improvement, *Geotechnical Special Publication*, 36, 15-30.
- Öksüz, K. (2006), "Afşin–Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çukurova Üniversitesi, Adana, 36-37.
- Öntürk, K. (2011), "Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 160.
- Savaş, H., Türköz M., Seyrek E., Ünver E. 2018. Comparison of the effect of using class c and f fly ash on the stabilization of dispersive soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (20), 612.
- Süzgeç, E. (2020), "Termik Santral Uçucu Küllerinden Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi ve Radyasyon Sönümlemesinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, 7-11.
- Şahinoğlu, İ. (2020), "Demiryollarında Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sürdürülebilirliği", Doktora Tezi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 21-30.
- Şimşek, H., Kaya, O. 2021. Kireç üretim tesislerinde ISO 14001 uygulaması. *İSG Akademik Dergisi*, 3 (1), 113-126.
- Tan, O., İyisan R. 1996. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, *ZMTM 6. Ulusal Kongresi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, 417-426.
- Temel, S. (2020), "Yüksek Modüllü Kolonlarla Zemin İyileştirmesinin Midas GTS Yazılımı İle Üç Boyutlu İrdelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 9-10.
- Tok, H. (2018), "Farklı Oranlarda Polyester Reçine/Mermer Tozu Karışımıyla Elde Edilen Kompozit Malzemenin Jeomekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin Üniversitesi, Mersin, 3.
- Totiç, E., Göktepe, F., Yaşar, M. 2019. Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10 (2), 769-778.
- Türker, P., Erdoğan B., Katnaş F. and Yeğinoğlu, A. 2009. Türkiyedeki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *TÇMB Yayınları*, 4. Baskı.
- Türköz, M., 2006. Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir meşelik killerine uygulanması, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mim. Müh. Fak. Dergisi*, 13 (2), 769-778.

- Ünver, E. (2015), "Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 155.
- Wasti, Y. 1993. Uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.
- Yağanoğlu, A.V, 2000, Zemin Mekaniği, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Yayınları*, Erzurum, 18-21.
- Yarbaşı N. 2018. Mermer Tozu ve Atık Lastik ile İyileştirilen Düşük Plastisiteli Killi Zeminlerin Dayanım Özellikleri, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4 (2), 162-170.
- Yıldız, M. and Soğancı, A.S., 2012. Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays. *Scientia Iranica*, 19 (4), 1013-1017.
- Yıldız, T. (2012), "Atık Mermer Tozu Ve Cam Elyaf Katkısının Birlikte Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 26-32.
- Yılmaz, F., Demir, E, 2021. Strength and Durability Performance of Clayey Soil Stabilized with Lime and Marble Powder. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 9 (2), 511-520.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : İsmail TOSUN

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Muş Anadolu Lisesi, Merkez, Muş	2003
Üniversite	: Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul	2011
Üniversite	: Anadolu Üniversitesi, Eskişehir	2016

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2013	Muş Valiliği	İnşaat Mühendisi
2013-	Muş İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi

### UZMANLIK ALANI

İnşaat Mühendisliği, Betonarme Yerüstü ve Yer Altı Yapılar, Yığma Yapılar, İçme Suyu ve Kanalizasyon Sistemleri, İnşaat Yönetimi, İş Güvenliği

### YABANCI DİLLER

İngilizce, Arapça