



**ATIK MALZEME KULLANIMI İLE KİL ZEMİNLERİN  
STABİLİZASYONU**

**Mamadou Lamine DIALLO**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK MALZEME KULLANIMI İLE KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU**

**Mamadou Lamine DIALLO**

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

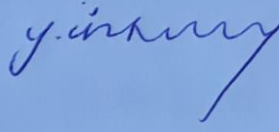
## TEZ ONAYI

MAMADOU LAMINE DIALLO tarafından hazırlanan "ATIK MALZEME KULLANIMI İLE KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

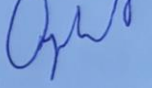
**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



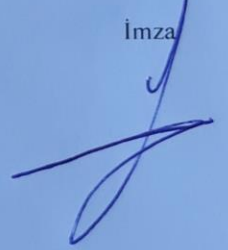
**Üye** : Doç. Dr. Eyübhan AVCI  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Üye** : Doç. Dr. Ali Mardani AGHABAGLOU,  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Akşel EREN  
Enstitü Müdürü  
22.04.2019

**U.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

22.07.2019

**Mamadou Lamine DIALLO**



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK MALZEME KULLANIMI İLE KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

**Mamadou Lamine DIALLO**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER

Günümüzde, çevre kirliliği dünyanın en büyük sorunlarından biridir. Büyüyen şehirlerin enerji ihtiyacını karşılamak için birçok ülkede termik santraller kullanılmaktadır. Bu enerji üretilirken, ortaya atık malzeme olarak uçucu kül çıkmaktadır. Öte yandan kentsel dönüşümden meydana gelen katı atıkların doğaya terkedilmeleri de çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu atıkların büyük hacimleri depolama probleminin ortaya çıkmasına neden olur, dolayısı ile bu gibi atık maddelerin kullanılması hem çevre korunmasına hem de maliyet açısından kazanç sağlamaktadır. Bu yüzden, son yıllarda bu atık malzemelerin kullanılabilmesi için yeni çözümler araştırılmaktadır.

Bu çalışmada, Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünden alınan kil zemin üzerinde ağırlıkça %2 kireç, farklı yüzdelerde uçucu kül ve/veya inşaat yıkıntı beton atıkları ile iyileştirme yapılmıştır. Araziden elde edilen kil zemin üzerinde, Granülometri analizi ve Atterberg deneyleri gerçekleştirilerek zemin sınıflandırılması yapılmış ve yüksek plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır. Normal kompaksiyon deneyi ile farklı su muhtevalarında hazırlanan numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Karışımların mukavemetini belirlemek amacıyla belirlenen optimum su muhtevası ile silindirik numuneler hazırlanmıştır. 3, 7 ve 28 gün kür süresinden sonra hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış ve mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca zemine eklenen katkı malzemelerinin zeminin şişme potansiyeli üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, hazırlanan farklı karışımların, yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca mukavemetin kür süresiyle arttığı saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çevre kirliliği, Zemin iyileştirilmesi, Serbest basınç mukavemeti, Uçucu kül, İnşaat Atığı.

**2019, viii + 87 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

STABILIZATION OF CLAY SOILS USING WASTE MATERIALS

**Mamadou Lamine DIALLO**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Dr. Yeşim Sema ÜNSEVER

Nowadays, environmental pollution is one of the major problems in the world. Thermal power plants are used in many countries to meet the energy needs of growing cities. Huge quantity of Fly Ash produced while this energy is generated. On the other hand solid waste from the urban transformation project causes a lot of environmental pollution, too. These material's large volumes is a problem due to their storage. The use of such waste materials provides both environmental protection and save the project costs. Therefore, in recent years, they have been exploring new solutions for the use of such waste materials.

In this study, the effect of 2% by weight lime and/or different percentages of Orhaneli fly ash added to a clay soil taken from Bursa Uludağ University campus has been investigated. By using the granulometry analysis and Atterberg Limits experiments, the soil classification has been made. The optimum water content and maximum dry density of the mixtures have been determined by normal compaction test. In order to determine the strength of the mixtures, cylindrical specimens have been prepared with optimum water content. Finally, after 3, 7 and 28 days curing time, the unconfined compression tests have been carried out.

As a result of the experiments, it was found that the different mixtures prepared increased the strength of the high plasticity clay in different percentages. In addition, curing time has possitive effect of the strenth of the soil samples.

**Key words:** Environmental Pollution, Soil Improvement, Unconfined Compression Strength, Fly Ash, Construction Waste.

**2019, viii + 87 pages.**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İlk olarak bana hayat, sağlık ve gücü veren ALLAH'ıma hamd ederim.

Çalışmam süresince bana yol gösteren, her türlü destek ve değerli bilgilerinden faydalandığımdan Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Bursları kurumuna bana destek verdiği için çok minnettarım ve çok teşekkür ediyorum.

Tüm tez deneylerimde laboratuvarlarından faydalandığımdan dolayı Bursatest ve Protest şirketlerine teşekkür ederim.

Ayrıca, laboratuvar çalışmalarımda yardımlarından dolayı Utkan ASLI, Önder SÖNMEZ ve Seher GÜLENC'e teşekkürlerimi sunarım.

Malzeme ile ilgili bilgilerinden faydalandığımdan dolayı Doç. Dr. Ali MARDANİ AGHABAGLOU'na teşekkür ederim.

Yüksek lisansım süresince bütüm Hocalarıma teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuza kadar teşekkür ederim.

Mamadou Lamine DIALLO  
22/07.2019



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Kil Mineralojisi.....	4
2.2. Zemin Stabilizasyonu.....	6
2.2.1. Mekanik stabilizasyon.....	6
2.2.2. Kimyasal stabilizasyon.....	11
2.2.3. Stabilizatör seçimi.....	12
2.3. Yüzeysel Zemin Stabilizasyonun Uygulanması.....	26
2.4. Stabilize Edilen Zeminin Dayanımını Etkileyen Faktörler.....	28
2.5. Kalite Kontrol.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	32
3.1.1. Zemin.....	32
3.1.2. Kireç.....	38
3.1.3. Uçucu kül.....	38
3.1.4. İnşaat Yıkıntı Beton Atıkları.....	39
3.2. Malzelerin Kimyasal Bileşenleri.....	40
3.3. Malzemelerin Özgül Ağırlığı.....	41
3.4. Deney Karışımları.....	42
3.5. Standart Proktor Deneyi.....	43
3.6. Serbest Basınç Deneyi.....	45
3.7. Odometre Şişme Deneyi.....	47
3.7.1. Şişme yüzdesi.....	47
3.7.2. Şişme basıncı.....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
4.1. Zemin, Kireç ve Moloz Karışımları.....	50
4.1.1. Kompaksiyon deney sonuçları.....	50
4.1.2. Serbest basınç deney sonuçları.....	53
4.1.3. Atterberg limit deney sonuçları.....	55
4.1.4. Şişme deney sonuçları.....	56
4.2. Zemin, Kireç ve Uçucu Kül Karışımları.....	59
4.2.1. Kompaksiyon deney sonuçları.....	59
4.2.2. Serbest basınç deney sonuçları.....	61
4.2.3. Atterberg limit deney sonuçları.....	63
4.2.4. Şişme deney sonuçları.....	64
4.3. Zemin, kireç, Moloz ve Uçucu Kül Karışımları.....	67
4.3.1. Kompaksiyon deney sonuçları.....	67



4.3.2. Serbest basınç deney sonuçları.....	68
4.3.3. Atterberg limit deney sonuçları.....	69
4.3.4. Şişme deney sonuçları.....	70
4.4. Karışımların 28 Günlük SBD Karşılaştırılması .....	71
4.5. Matrislerin Aynı Katı Malzeme Yüzdesi Dayanım Karşılaştırması .....	71
5. SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR .....	77
EKLER.....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	87



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
CaO	Kalsiyum oksit
Ip	Plastisite indisi
qu	Serbest basınç mukavemeti
w	Su muhtevası
LL	Likit limit
w <sub>opt</sub>	Optimum su muhtevası
PL	Plastik limit
γ <sub>kmak</sub>	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ <sub>w</sub>	Suyun birim hacim ağırlığı
Ö.A	Özgül ağırlığı
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	Düşük Plastisiteli Kil
H <sub>0</sub>	Numunenin başlangıçtaki hacmi
ΔH	Hacim artışı
Sw	Şişme yüzdesi
NP	Non Plastik
γ <sub>k</sub>	Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir (3) oksit
MgO	Magnezyum Oksit
SO <sub>3</sub>	Kükürt trioksit
Na <sub>2</sub> O	Sodyum oksit
K <sub>2</sub> O	Potasyum oksit
D	Dane çapı
R	Hidrometre okuması
Rw	Düzeltilmiş hidrometre okuması
N	İnce tane oranı
Zr	Hidrometrenin hacim merkezi derinliği
KK	Kızdırma kaybı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
A	Yüzey alanı
U	Uçucu Kül
K	Kireç
M	Moloz
İYA	İnşaat Yıkıntı Atıkları
SAF	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SBD	Serbest Basınç Dayanımı
M <sub>1</sub>	Kabın kütlesi (g),
M <sub>2</sub>	Kap + yağ numune kütlesi (g),
M <sub>3</sub>	Kap + kuru numune kütlesi (g) dir.
ASTM	American Society for Testing Materials

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Kil minerallerin Temel Birimleri.....	5
Şekil 2.2. Sırasıyla düz silindir, keçi ayaklı silindir, lastik tekerlekli silindir, titreşimli silindir .....	7
Şekil 2.3. Derin kompaksiyon makinesi .....	8
Şekil 2.4. Taş kolon uygulaması.....	9
Şekil 2.5. Jet-Grouting uygulaması .....	10
Şekil 2.6. Derin karıştırma makinesi.....	28
Şekil 3.1. Kullanılan zeminin Alındığı yerin konumu.....	33
Şekil 3.2. Kilin Hidrometre Analizi.....	35
Şekil 3.3. Kilin Granülometri Eğrisi .....	36
Şekil 3.4. Zeminin su muhtevası göre plastik durumu .....	37
Şekil 3.5. Uçucu külün alındığı yerin konumu .....	39
Şekil 3.6. Kullanılan beton moloz tozu hazır hali (#40 nolu elekten geçen kısmı ) .....	40
Şekil 3.7. Kilin özgül ağırlığının deneyi.....	41
Şekil 3.8. Katkı Malzemelerinin Granülometri Eğrisi.....	42
Şekil 3.9. Proktor deneyinde kullanılan alteler .....	44
Şekil 3.10. Zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası grafiği .....	45
Şekil 3.11. Tek eksenli basınç aleti (a) ve kırılmış bir numune (b).....	46
Şekil 3.12. Tek eksenli basınç için hazırlan silindirik numuneler .....	47
Şekil 3.13. Odometre şişme deneyi .....	49
Şekil 4.1. Zemin, Kireç ve Moloz (İYA) karışımlarının kompaksiyon grafikleri .....	52
Şekil 4.2. Kilin maksimum kuru birim hacim yoğunluğuna İYA katkısının etkisi .....	52
Şekil 4.3. Kilin optimum su muhtevasına İYA katkısının etkisi .....	53
Şekil 4.4. 28 Günlük Kür Süresinde 2K20M Karışıma Ait Olan Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	54
Şekil 4.5. Malzeme karışımlarının serbest basınç dayanımlarında kür süresinin etkisi .....	55
Şekil 4.6. Atterberg Limitlerin değişimleri.....	56
Şekil 4.7. Katkı malzemelerinin yüzdelerine göre şişme yüzdesi değişimi.....	58
Şekil 4.8. Katkı malzemelerinin yüzdelerine göre şişme basıncı değişimi .....	59
Şekil 4.9. Zemin, Kireç ve Uçucu Kül karışımlarının kompaksiyon grafikleri .....	60
Şekil 4.10. Kilin su muhtevasına UK katkısının etkisi .....	60
Şekil 4.11. Kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığına UK katkısının etkisi.....	61
Şekil 4.12. Malzeme karışımlarının serbest basınç mukavemetleri.....	63
Şekil 4.13. %2 kireç ile uçucu kül karışımlarının atterberg limitlerinin üzerinde etkisi .....	64
Şekil 4.14. %2 kireç ile farklı uçucu kül yüzdelerine göre şişme yüzdesi değişimi.....	66
Şekil 4.15. Kireçle uçucu külün yüzdelerine göre şişme basıncı değişimi.....	66
Şekil 4.16. Zemin, Kireç, Uçucu kül ve Moloz karışımlarının kompaksiyon grafikleri .....	67
Şekil 4.17. Serbest basınç deney sonuçları .....	69
Şekil 4.18. Katkı yüzdesine göre 28 günlük dayanım karşılaştırması .....	71
Şekil 4.19. Aynı oranda katkı malzemesi içeren matrislerin karşılaştırılması.....	72

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Elek Analizi .....	33
Çizelge 3.2. Hidrometre deney sonuçları.....	35
Çizelge 3.3. Zeminin Atterberg Limitleri .....	37
Çizelge 3.4. Killi zeminin sınıflandırması .....	37
Çizelge 3.5. Orhaneli U.Külün özellikleri .....	39
Çizelge 3.6. Kullanılan malzelerin kimyasal bileşenleri .....	40
Çizelge 3.7. Malzelerin özgül ağırlıkları .....	41
Çizelge 3.8. Deney numuneleri.....	43
Çizelge 3.9. Odmetre şişme potansiyeli .....	48
Çizelge 4.1. Kompaksiyon deney sonuçları.....	51
Çizelge 4.2. Zemin, Kireç ve Moloz karışımların mukavetleri .....	54
Çizelge 4.3. Karışımların kıvam limit değerleri. ....	55
Çizelge 4.4. Şişme deney sonuçları .....	57
Çizelge 4.5. Karışımların kompaksiyon deney sonuçları .....	61
Çizelge 4.6. Serbest basınç sonuçları.....	62
Çizelge 4.7. Karışımların kıvam limit değerleri .....	64
Çizelge 4.8. UK içeren karışımların şişme deney sonuçları .....	65
Çizelge 4.9. Kompaksiyon deney sonuçları.....	68
Çizelge 4.10. Zemin, Kireç, Moloz ve Uçucu Kül karışımların mukavetleri.....	68
Çizelge 4.11. Karışımların kıvam limit değerleri .....	70
Çizelge 4.12. Şişme deney sonuçları .....	70
Çizelge 4.13. 28 günlük aynı katı malzeme içeren matrislerin karşılaştırması. ....	72

## 1. GİRİŞ

Herhangi bir inşaatın dayanımı ve dayanıklılığı oturduğu zeminin dayanım özelliklerine bağlıdır. Killi zeminler üzerinde yapılması planlanan inşaatlarda, taşıma gücünün yetersiz kalması durumu ve şişme potansiyelinin yüksek olması çok karşılaşılan bir problemdir. Bu durum, sorunu çözmek için geoteknik mühendisliğini alternatif yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir. Bunlardan bir tanesi arazide bulunan zayıf mühendislik özelliklerine sahip olan zeminin belirli oranlarda bir veya bir kaç katkı maddesi ile karıştırılmasıdır. Bu yöntem yüzeysel zemin stabilizasyonu olarak adlandırılmaktadır, maliyet açısından ve yapım sürecinde büyük tasarruf sağlayan avantajlı bir yöntemdir. Konu olan kimyasal zemin stabilizasyonu, zayıf bir zeminin mühendislik özelliklerini arttırmak için farklı kimyasallar ve katkı maddeleri kullanarak zeminin iyileştirilmesi yöntemidir. Zemin stabilizasyonunun temel amacı, zayıf bir zeminin taşıma gücünü artırmak, şişme potansiyelini ve geçirgenliğini azaltmaktır. İnşaat yerinin değiştirilmesi veya istenilen özelliklere sahip olmayan zeminin kaldırarak yerine elverişli bir zemin yerleştirilmesi yöntemine göre zaman ve büyük miktar maliyet tasarrufu sağlayan bir tekniktir.

Antik çağlardan beri zemin iyileştirilmesi uygulanan bir yöntemdir. Örneğin, 5000 yıl önce eski Mezopotamya ve eski Mısır'da da zemin iyileştirme yöntemi kullanılmıştır (McDowell 1959), ancak ilk zemin iyileştirilmesi testleri ABD'de 1901 yılında yapılmıştır (Clare 1957). Zemin stabilizasyonunda farklı alternatif malzemeler üzerinde çalışılmış ve uygulamalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları doğal halinde, bazıları sanayi ürünü veya atık malzemelerdir. Bu güne kadar en çok kullanılan malzemeler kireç, çimento, yüksek fırın cürufu ve uçucu küldür (Gregory 2012).

Araştırmalar, atık malzemelerin katkı olarak eklenmesiyle, zeminin işlenebilirliğinin ve mekanik davranışlarının iyileştiğini göstermiştir. Son yıllarda, atık maddelerin sorunun çözebilmek için birçok araştırmacının ilgilendiği bir konudur. Bu atıkların kullanılabilmesi bir yer bulunduğu, onlardan kurtulmak için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Atık malzemelerin kullanımı ile inşaat maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlanabileceği birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir.

Kireç ve uçucu kül katkı madde olarak kullanıldığında, zeminlerin mekanik özelliklerini, şişmesini, plastisite indeksini ve sıkıştırılabilirliği artırabilmektedir. Birçok araştırmacı, kireç ve uçucu kül kombinasyonunun sadece kireç veya uçucu kül kullanımından daha etkili olabileceğini belirtmiştir (Saeid ve ark. 2012).

Zemin stabilizasyonunda uygun stabilizör seçimi birkaç parametreye bağlıdır. Bunlardan en önemli olanlar zemin cinsi, stabilizasyonun amacı, zeminin hangi özelliğinin iyileştirilmesi istendiği, çevre şartları, stabilizatörün elde edilebilirliği ve maliyetidir (Little ve Nair 2009).

Başarılı bir stabilizasyon için, mühendislik ve çevresel özelliklerin belirlenmesi amacıyla hem laboratuvar testlerinin hem de saha testlerinin yapılması gerekmektedir. Laboratuvar testleri, sahadakilerden daha yüksek mukavemet üretmesine rağmen, sahada stabilize edilmiş malzemelerin etkinliğinin değerlendirilmesine yardımcı olacaktır. Laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçlar, stabilizatörün seçimi ve optimum katkı miktarları konusunda yol gösterici olacaktır (EuroSoilStab. 2012).

Genel olarak zemin stabilizasyonu;

- Zeminin Taşıma gücünü artırmak,
- Zeminin geçirgenliğini ve sıkışabilirliğini azaltmak,
- Oturmaları ve deformasyonu azaltmak,
- Şişme ve don kabarmasının etkilerini azaltmak,
- Kayma mukavemetini arttırmak,
- Zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak,
- Zeminin Konsolidasyonu hızlandırmak, amaçlar için yapılmaktadır.

Zemin stabilizasyonu; demir ve karayolları yapımında, havalimanlarında, yüzeysel ve derin temellerde, barajlar, tünel ve kanalizasyon yapımında, endüstriyel yüzeylerde, liman ve iskele yapımında ve bunun gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kireç, uçucu kül ve inşaat yıkıntı atıkları kullanılarak söz konusu olan killi zeminin mühendislik özellikleri ve çevresel değerlendirmesi yapılmış, zemin

stabilizasyonunda alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik deneyler yürütülmüştür.

Bu çalışmanın amacı:

- Atık malzeme kullanımının killerin plastisitesine ve dayanıma etkisinin incelenmesi;
- Zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için gereken optimum yüzdelerin tespiti;
- Atık Malzemelerin killi zeminlerin kompaksiyon üzerindeki etkilerinin bulunması;
- Kr srelerin dayanım üzerindeki etkisi;
- Atık malzemelerin kullanımı ile kilin ŐiŐmesine karşı olan etkisinin incelenmesidir.

## 2. KURUMSAL TEMELLERİ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

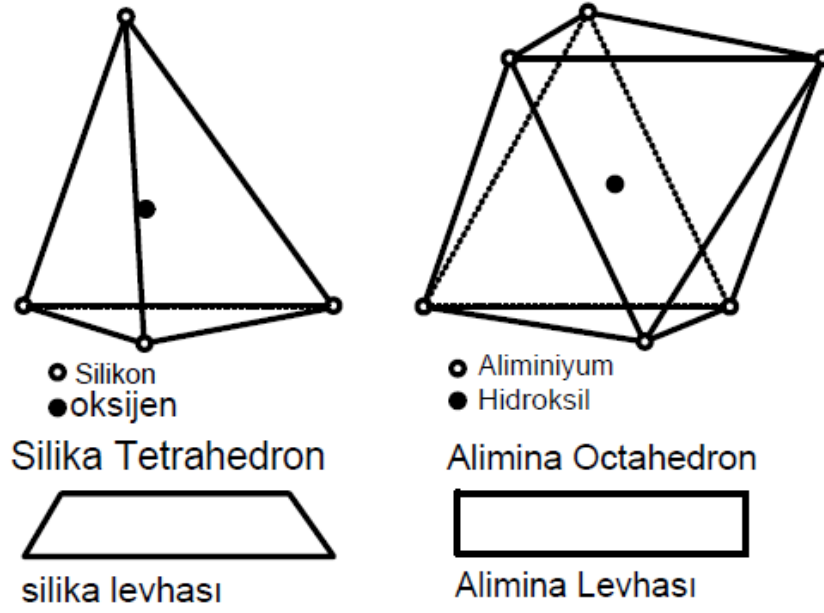
Günümüzde, zayıf mühendislik özelliklerine sahip olan zeminlerle inşaat projelerinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bazı durumlarda, inşaat yapabilmek için uygun olmayan zeminlerin özelliklerini iyileştirmek temel bir adımdır. Zemin stabilizasyonu, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Başka bir deyişle, zayıf bir zeminin bir veya birden fazla özelliğinin, mekanik veya kimyasal yollarla iyileştirilerek istenilen mühendislik özelliklerine sahip olan bir malzeme haline getirme işidir. Zemin stabilizasyonunda çok sayıda yöntem mevcuttur.

### 2.1. Kil Mineralojisi

Çeşitli nedenler sonucu ayrışan kayalardan meydana gelen zeminlerin, tane boyutu 0.002 mm'den küçük olan kısmına kil denilmektedir. Kil mineralleri çok küçük parçacıklardan oluşmaktadır. Bu partiküller çok aktiflerdir. Bir zeminin içinde olduğunda, bu zeminin mühendislik özelliklerini büyük bir ölçüde etkilemektedir.

Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre birçok kil türleri vardır. Kil mineralleri, çok küçük boyda olduğundan sadece elektron mikroskobu ile görülebilmektedirler. Killi bir zeminin davranışını anlamak için mikro yapılarını incelemek gerekmektedir. Kil minerallerinin çoğunun temel yapısının birimleri bir Silika Tetrahedron ve bir Alümina Oktahedron'dan oluşmaktadır. Silika tetrahedron yapının merkezinde bulunan silisyum iyonu ve köşelerinde bulunan oksijen veya hidroksil iyonları düzgün dörtyüzlü şeklindedirler (Şekil 2.1.) (Craig 1994).





**Şekil 2.1.** Kil minerallerin Temel Birimleri (Craig 1994)

Kil mineralleri, karmaşık işlemler ile çeşitli ana maddelerden oluşmaktadır. Ana maddeler feldispat, mika ve kireçtaşı içermektedir. Oluşacak kil tipi, ana maddelerin ayrışma sürecine ve bileşenlerine bağlıdır (Chen 1998).

En yaygın kil minerallerinden bazıları şunlardır:

- Kaolin

Kaolin yapısal birimi, alternatif silika tetrahedral tabakalarından oluşmaktadır. Kil minerallerinin en az aktif olanı kaolindir. Kaolin kili, genellikle magmatik kayalarda bulunan feldispatların ayrışması sonucunda meydana gelmektedir. Bazen, daha aktif kil minerallerinin bazılarının ayrıştırılarak da üretilebilmektedir. Kaolin, en çok yoğun yağış bölgelerinde bulunmaktadır. Çok az şişme özeliği gösteren bir kil türüdür. Oluşan formül yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir (Bowles 1984).



- İllit

İllit, temel bir yapıya sahiptir. Bu yapı, iki silika tetrahedron levhası arasında bulunan bir alümina oktahedron levhasından oluşmaktadır. Birleştirilen tabakalar, aralarında tutulan potasyum iyonları nedeniyle oldukça zayıf bir bağlantı ile birbirine bağlanmaktadır.

- Montmorillonit

Montmorillonit, illit ile aynı temel yapıya sahiptir. Oktahedral levhalarda bulunan magnezyumun bir kısmı alüminyum ile yer değiştirmektedir. Birleştirilen tabakaların arasında bulunan boşluklarda, su molekülleri ve potasyum dışında olan katyonlar yer alır ve bu iyonlardan dolayı zayıf bir bağ vardır. Montmorillonit kilin şişme potansiyeli yüksektir. Barajlarda sızdırmazlık malzemesi olarak veya esas mineralini oluşturan bentonit, sondaj çamuru olarak kullanılabilir. Tünel ve yol inşaat yapımında montmorillonit kil ile karşılaşılması önemli sorunlar yaratmaktadır (Craig 1994).

## **2.2. Zemin Stabilizasyonu**

Killi zeminler üzerinde yapılması planlanan inşaatlarda; şişme, yüksek sıkıştırılabilirlik, taşıma gücünün yetersiz kalması durumu çok karşılaşılan problemlerdir. Bu durumda, sorunu çözmek için zemin stabilizasyonuna başvurulabilir. Zemin stabilizasyonu, problemleri bir zeminin mühendislik özelliklerini arttırmak amacıyla farklı yöntemleri kullanarak zemini iyileştirme tekniğidir. Literatüre bakıldığında, genelde metot olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir:

[1] Mekanik stabilizasyon

[2] Kimyasal stabilizasyon

### **2.2.1. Mekanik stabilizasyon**

➤ Yüzeysel kompaksiyon

Kompaksiyon, mekanik yöntemlerle zeminin yoğunluğunu artırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için mekanik araçlar kullanılarak su ve havanın dışarı atılarak zeminin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve aralarındaki hava boşluklarının azaltılması için yapılan bir işittir. Kompaksiyonun verimli ve ekonomik olarak sağlanması amacı ile birçok tür kompaksiyon makinesi geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanlar; düz silindir, keçi ayaklı silindir, lastik tekerlekli silindir, titreşimli silindir (Şekil 2.2.) (Kumbasar 1999).



**Şekil 2.2.** Sırasıyla düz silindir, keçi ayaklı silindir, lastik tekerlekli silindir, titreşimli silindir

➤ Dinamik Kompaksiyon

Dinamik Kompaksiyon, bir derin zemin iyileştirme yöntemidir. Büyük bir kütlenin ( $W=10-40$  ton) zemin yüzeyine, bir vinç yardımıyla belirli bir yükseklikten ( $H=10-40$  m) Şekil 2.3' te gösterildiği gibi düşürülmesi ile sağlanan dinamik etkinin zemini sıkıştırması suretiyle taşıma gücünün artırılması, oturmasının azaltılması amacı ile uygulanmaktadır. Önceden belirlenmiş noktalarda bir veya daha fazla pasda uygulanmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde uygulanabildiği gibi kohezyonlu zeminlerde de iyi sonuç verdiği ileri sürülmüştür (Menard 1977).



**Şekil 2.3.** Derin kompaksiyon makinesi

➤ Vibrokompaksiyon

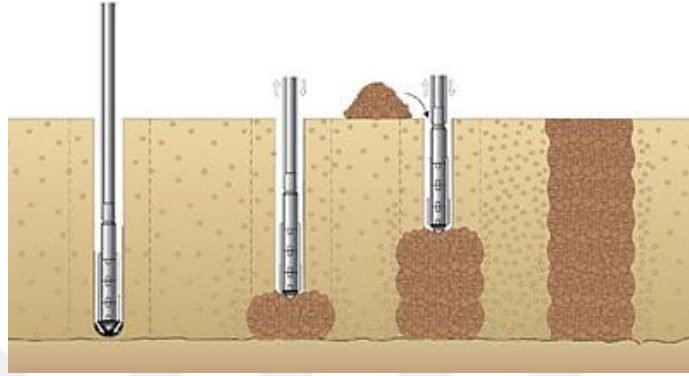
Vibrokompaksiyon yöntemi granüler zeminleri daha stabil hale getirmek amacıyla kullanılmaktadır. Zemine vibratör çekiçleri penetre edilerek yapılmaktadır. 20 metre derinliğe kadar uygulanabilmektedir. Vibrokompaksiyon yöntemi zeminin derin tabakalarına etkili olduğundan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Vibrokompaksiyon yönteminde zeminin maksimum dane boyutları önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca yoğunluğunun artışı, zeminin ince danelerinin az olmasına bağlıdır. Bu yüzden vibrokompaksiyon yöntemi granüler zeminlerde daha iyi sonuçlar vermektedir (Tunç 2001).

➤ Taş kolon uygulaması

Taş kolonlar, zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak amacıyla ve üzerine inşa edilecek yapıların oturmalarını azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Zemin iyileştirmede, taş kolonlar; bir zeminin taşıma gücünü artırmak, yumuşak ve gevşek ince deneli zeminlerin sıkıştırılabilirliğini azaltmak, konsolidasyon etkisini hızlandırmak ve zeminlerin sıvılaştırma potansiyelini azaltmak için kullanılmaktadır. Genel olarak, yumuşak killer, silt, siltli kumlar gibi yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda uygulanmaktadır. Bu yöntemin 1830'larda Fransa'da ilk kez kullanıldığını düşünülmektedir. Özellikle Avrupa'da 1950'lerden bu yana, taş kolon

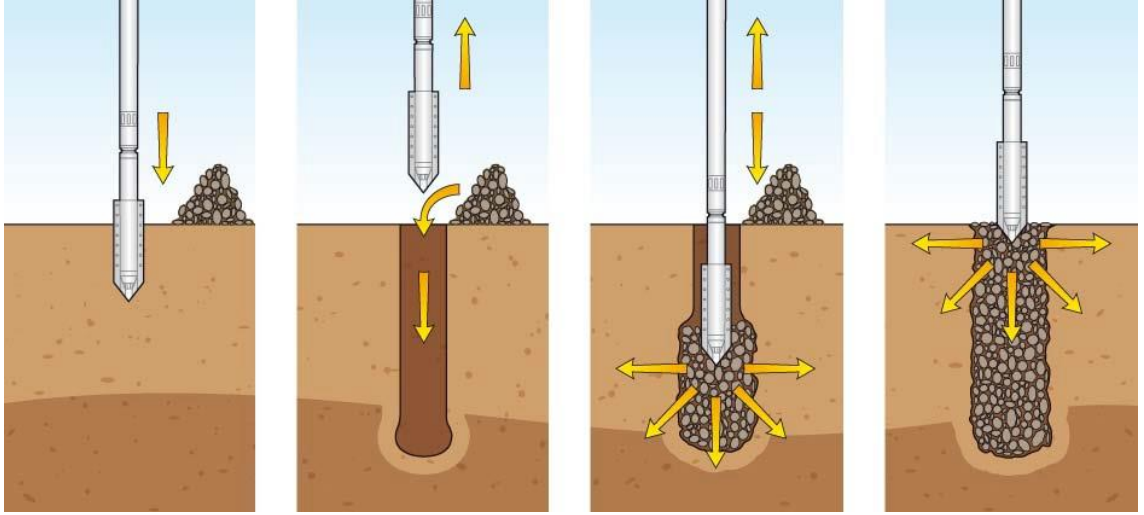
yöntemi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Taş kolonlar, vibratör tarafından düzenlenen sıkıştırılmış çakıl veya kırma taşlardan oluşmaktadır (Masoumeh ve Behzad 2017). Taş kolon uygulamasının aşamaları, Şekil 2.4' te gösterilmiştir.



**Şekil. 2.4.** Taş kolon uygulaması.

➤ Jet-Grouting Metodu

Jet-Grouting, bir zeminin taşıma kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda, üzerine planlanan inşaatların yapılmasına uygun hale getirmek için su ve çimento karıştırarak basınçlı hava ile zemine enjekte edilmektedir. Kullanılacak stabilizatörler zemine enjeksiyonla uygulanır. Şekil 2.5' te Jet-Grouting aşamaları gösterilmiştir. Bu yöntem her zaman basınç altında yapıldığından, viskoziteli stabilizatörler kullanıldığında sadece yüksek geçirgenlikli topraklar için uygundur. Jet Grouting, çok düşük geçirgenlikleri nedeniyle killi zeminlerin stabilizasyonunda uygulanamaz (Taube 2001).



Şekil 2.5. Jet-Grouting uygulaması (Taube 2001)

➤ Geosentetikler ile zemin güçlendirilmesi

Geosentetikler, polimerik malzemelerden üretilen düzlemsel ürünler olup inşaat projelerinde, yapı veya sistemin parçası olarak zemin, kaya ya da diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile beraber kullanılan ürünler olarak tanımlanmaktadır ( ASTM D4439 2009).

Polietilen, polyester, naylon gibi sentetik malzemelerden yapılmış jeotekstilller zemine sokularak zeminin stabilizasyonu yapılabilmektedir. Geosentetikler; genellikle zeminlerin ayırma, filtrasyon, güçlendirme, yalıtımı, drenaj ve koruma fonksiyonlarını sağlamak için kullanılmaktadır.

➤ Önyükleme metodu

Önyükleme metodunda, konsolidasyonu hızlandırmak amacıyla inşa edilecek yapıdan daha fazla bir yükü zemine uygulanmaktadır. Böylece zamana bağlı istenmeyen oturmalar engellenmiş olunur. Önyükleme metodu uygulandığında, birincil ve ikincil konsolidasyonlar inşaat işlerinden önce gerçekleştirilir ve zeminin kayma mukavemeti artar. Zemin iyileştirmede, önyükleme metodu, şıkışabilirliği yüksek zeminlerde çok etkili bir yöntemdir. Düşük geçirgenliği nedeniyle, yumuşak killerin konsolidasyonunun

tamamlanması uzun zaman alabilmektedir. Konsolidasyon süresini azaltmak için, dikey kum drenaj kolonları belirli yerlere yerleştirilerek yapılabilmektedir. Yerleştirilen drenaj kolonları yardımıyla zeminde bulunan su dışarıya çıkacak ve konsolidasyon hızı artacaktır (Erol 2008).

➤ Suyun uzaklaştırılması

Suyun uzaklaştırılması veya susuzlaştırılması çok düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde konsolidasyonu hızlandırmak için çok kullanılan bir yöntemdir. Bu metot iki farklı yöntemle yapılabilmektedir: Elektro-osmoz ve Drenaj.

Elektro-ozmotik susuzlaştırma, özellikle düşük geçirgenliği ve spesifik verimi nedeniyle geleneksel metotlarla susuzlaştırılmayan veya stabilize edilemeyen siltler ve killer gibi ince granüler topraklarda iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. 1930' larda Dr. Leo Casagrande tarafından elektro-ozmotik uygulanmaya başlanmıştır. Elektro-ozmotik konsolidasyon, zemin katmanları arasında elektrik potansiyelinin uygulanmasını içermektedir. Toplanan su, sistemin dışına bir pompa yardımıyla atılmaktadır.

Drenaj ise, dikey drenajlar uygulanarak su basıncını azaltmak ve kayma mukavemetini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bunun en büyük avantajı konsolidasyonun süresini azaltmasıdır. En çok kum drenler kullanılmaktadır. Zemine belirli noktalarda farklı yöntemler ile düşey çukurlar açıp, temiz ve dren kabiliyeti yüksek kum kolonların oluşturulmasıdır. Bu kum kolonlar yardımıyla suyun drenajı sağlanmaktadır (Anderson ve ark. 2012).

### **2.2.2. Kimyasal stabilizasyon**

Kimyasal stabilizasyon, zayıf bir zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı malzemeler kullanarak yapılmaktadır. Kimyasal stabilizasyon, kısa vadeli etkisi olan flokülasyon, zeminin işlenebilirliğini artırmakta; şişmesini, büzülmesini ve plastisitesini azaltmaktadır. Zeminin sıkıştırma özelliklerinin iyileştirilmesi ise kimyasal stabilizasyonun uzun vadeli etkisinin bir sonucudur (Lina ve ark. 2007, Kavak ve ark. 2007). Sönmemiş kireç, çimento, asfalt kullanılabildiği gibi bazı atık maddeler de zemin stabilizasyonunda kullanılabilmektedir. İnşaat yıkıntı atıkları, uçucu kül, yüksek fırın cürüfları, mermer tozu, kabuk pirinç külü gibi atık malzemeler çok ucuz bir maliyetle

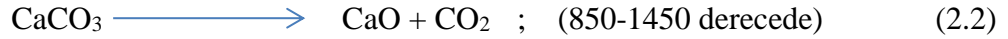
temin edilebilmekte ve günümüzde her ülkede büyük miktarlarda bulunmaktadır. Ayrıca bu atık malzemeler kullanıldığında çevre korumasında da büyük bir fayda sağlamaktadır.

### 2.2.3. Stabilizatör seçimi

Zemin stabilizasyonunda uygun stabilizör seçimi birkaç parametreye bağlıdır. Bunlardan en önemli olanlar; zemin cinsi, stabilizasyonun amacı, zeminin hangi özelliğinin iyileştirilmesinin istendiği, çevre şartları, stabilizatörün elde edilebilirliği ve maliyetidir (Little ve Nair 2009).

#### ➤ Kireç ile stabilizasyon

Kireç, doğada kireç taşının veya kalkerin ( $\text{CaCO}_3$ ) yüksek derecelerde ( $850-1450\text{ }^\circ\text{C}$ ) pişirilmesi ile elde edilmektedir. Suyla karıştırıldığında katılaşma özelliği gösterir, genelde beyaz renkli, inorganik bağlayıcı bir maddedir. Kireç en eski bilinen bağlayıcı maddelerden biridir. Kireç iki şekilde bulunabilir: sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) - veya kalsiyum oksit - ve sönmüş kireç  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - veya kalsiyum hidroksit.



Sönmemiş kireç, yakıcı bir madde olduğundan dolayı inşaatта çok az kullanılır, genelde endüstri ve tarım sektörlerinde kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe sönmüş kireç farklı alanlarda kullanılmaktadır. Killi zeminlerin stabilizasyonunda, sıcak asfaltta, gazbeton ve kalsiyum silikat tuğla üretiminde, harç ve sıva yapımında bağlayıcı ve sıvaya badana olarak kullanılabilir.

Kireç, ince taneli zeminlerin stabilizasyonunda en eski ve hala en popüler kullanılan katkı maddelerinden biridir. Denver Uluslararası Havaalanı'nın inşaatı kireç ile stabilizasyon yönteminin bir örneğidir. Geoteknik mühendisliğinde, aşağıdaki dört farklı kireç tipi kullanılmaktadır (Balasingam 2008):

- Hidratlanmış yüksek kalsiyumlu kireç, Kalsiyum Hidroksit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

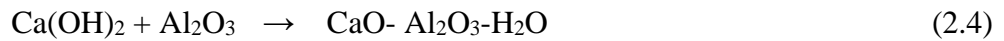
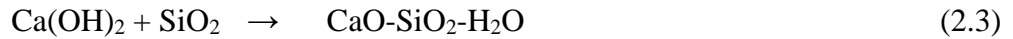


- Kalsiyum oksit ya da sönmemiş kireç, CaO
- Monohidratlı dolomitik sönmemiş kireç, Ca (OH)<sub>2</sub> MgO
- Dolomitik sönmemiş kireç, CaO MgO (Balasingam 2008).

Zeminin kireç ile stabilizasyonunda 3 farklı şekilde etki görülmüştür. İlk olarak, zeminin likit limitinde bir düşüş ve plastik limitinde artış olacağından dolayı, plastisite indeksinde önemli bir düşüşe neden olmaktadır. Zeminin plastisite indeksi düştüğünde işlenebilirliği artmaktadır. İkincisi, zemin ve kireç arasındaki kimyasal reaksiyonun sonucunda su içeriği azalmaktadır. Bu, doymuş zeminlerin sıkışmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, kireç ilavesiyle zeminin optimum su muhtevası artar, maksimum kuru ağırlığı azalır ve son olarak mukavemetinde bir artış oluşturup stabil bir platform sağlayacağından dolayı ekipmanların hareketliliğini kolaylaştırmaktadır (Mallela ve ark. 2004).

Zemin, kireç ile karıştırıldığında çeşitli kimyasal reaksiyonlar meydana gelir, bunlar: Katyon değişimi, flokülasyon, puzolanik reaksiyonlar ve karbonatlaşmadır (Mallela ve ark. 2004). Katyon değişimi ve flokülasyon, karıştırmadan hemen sonra gerçekleşen birincil reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar sırasında genel olarak kil mineralleriyle ilişkili olan tek değerli katyonlar, iki değerli kalsiyum iyonları ile yer değiştirmektedir. Bu reaksiyonlar, plastisite indeksin, işlenebilirliğin ve mukavemetin aniden değişimine neden olmaktadır.

Puzolanik reaksiyonlar, kireç ve kil mineralinin silika ve alümina arasında meydana gelmekte ve bağlayıcı özelliği olan çimento esaslı malzemesi üretmektedir. Bazik puzolanik reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Puzolanik reaksiyonlar, zamana ve sıcaklığa bağlıdır ve uzun süre devam edebilmektedir. Kireç ilavesiyle ayrıca zeminin pH değeri artmaktadır.

Zemin stabilizasyonunda kireç kullanımı ekonomik bir yöntemdir (Sherwood 1993). Bir projede, optimum kireci saptamak için en uygun yolun bir araştırma programı uygulayarak %3-8 arası kireç ve 7-14-28 gün bekletilme süreleri ile optimumun bulunması olduğu belirtilmiştir. Ancak acil durumlarda, her %10 kil içeriği için %1 kireç kullanılabilir (Önalp 1983).

Kireç ile zemin stabilizasyonunda, zeminin optimum suyu artmakta, kuru birim hacim ağırlığı ve şişme potansiyeli düşmekte, dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Kireçlerin zeminin üzerindeki etkisi iki gruba ayrılabilir, bunlar ani ve uzun vadeli stabilizasyondur. Zeminin işlenebilirliğinin artması ani değişikliklerin sonucudur. Zamanla artan dayanım ve dayanıklılık ise uzun vadeli stabilizasyon olarak kabul edilebilmektedir.

Tabataba (1997), yaptığı çalışmada, killi bir zemin üzerine kireç ilavesinin ardından şişme potansiyelinin %8' den %0,1' e düştüğünü göstermiştir. Ayrıca, su içeriğinin azaltılmasının küçük çatlakların oluşumuna neden olabileceği belirtilmiştir.

Başarılı bir stabilizasyon elde edebilmek için bir kaç koşulun sağlanması gerekmektedir. Zeminin uygun ekipmanla stabilizasyona hazır hale getirilmesi, optimum kirecin serilip zeminle homojen bir şekilde karıştırılması, optimum nem ile sulama işlemi uygulanması vazgeçilmez koşullardır. Zemin yüzeyinde yer alan bitkisel toprağın kaldırılması ile işler başlamaktadır. Belirlenen derinliğe kadar zemin kazılır, parçalanır ve içerisinde bulunan büyük çaplı taşlar temizlenir. Daha sonra, işlem göreceği zeminin doğal su içeriği belirlenmektedir. Eğer bulunan değer planlanan karışımın optimum değerinden yüksekse, uygun bir yöntem yardımıyla suyu buharlaştırılmaktadır. Stabilizasyonda kullanılacak kireç, hava basıncı ile boşaltılmasını sağlayan araçlar ile taşınmalıdır. Getirilen kireç toz olarak taşınıyorsa, sudan ve nem etkisinden korunmalıdır. Stabilizasyon göreceği zeminin laboratuvarında belirlenen yüzde cinsinden metrekaresine göre şantiyede dozajı belirlenmektedir. Kötü hava şartlarında ve şantiye personeline zarar verme ihtimali bulunan toz kireç dökülmemelidir. Serilen kireç, motorlu araçlar yardımıyla düzlenmelidir. Serme ve karışım işlerinin ardından, sönmemiş kireç kullanıldığı durumlarda vakit kaybetmeden sıkıştırma işlemi yapılmalıdır. İşlemler tamamlandıktan

sonra üst tabakalar 1 aydan daha fazla açıkta bekletilmemelidir. Bu işlem sıcak veya nem az olduğu zamanlarda yapılırsa tabaka yüzeyinde kuruma yapacaktır. Stabilizasyon sırasında yapılacak proje şartnameleri dikkate alarak düzenli bir kontrol programı yapılmalıdır (Kavak ve ark. 2008).

Dash ve Manowar (2012) kireç ile zemin stabilizasyonu yaptığı bir çalışmada kirecin, zeminin mühendislik özelliklerini artırdığını bulmuşlardır. İki farklı zemin üzerinde altı tane zemin numunesi kullanılmıştır. Kirecin bu zeminlerin üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, plastik limit, basınç dayanımı, şişme, mineraloji gibi geoteknik özelliklerini belirlemiştir. Mukavemet azalması ile optimum bir kireç oranı elde edilmiştir. Bu yöntemin yüksek oranlı silis içeren zeminler için uygun olduğu belirtilmiştir.

Yıldız ve ark.(2004), yüksek ve düşük plastisiteli 2 farklı kile % 6 kireç katarak zemin iyileştirmesi yapmışlardır. Yüksek plastisiteli kilin 28 gün kür sonucunda serbest basınç mukavemetinin 15 kat arttığını göstermişlerdir. Düşük plastisiteli kilin ise 28 gün kür sonucu mukavemeti 3 kata kadar artmıştır. Donma-çözülme çevrimleri sonucunda mukavemetlerde % 10-15 arası bir düşüş olduğunu belirlemiştir.

Tumluer (2004), kaya ve atık agregaların tozunun kireçle birlikte killi zeminlerin şişme potansiyelinin azalma etkisini incelemiştir. Zemine eklenen kireç ağırlıkça yüzde 0 ila 9 oranındadır. Kaya agrega tozları ise zemine ağırlıkça yüzde 0 ila 25 oranında eklenmiştir. Numuneler, 7 ve 28 gün sonra deneylere tabi tutulmuş ve eklenen kirecin şişme potansiyelinde bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Stabilizatörlerin yüzdesi arttırılırken şişme potansiyelinin azaldığı gösterilmiştir.

#### ➤ Çimento ile stabilizasyon

Çimento, bağlayıcı bir malzeme olup doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilmektedir. Çimento nadiren kendi başına kullanılır, çoğunlukla agregaları birbirine bağlamak için kullanılmaktadır. İnce agrega ile karıştırılan çimento harç, kum ve çakıl ile beton üretmektedir. Günümüzde,

çimento çok yaygın kullanılan bir malzemedir ve en çok tüketilen doğal kaynak olarak suyun hemen arkasındadır (Rodgers 2018).

Çimento ile zemin stabilizasyonu uzun zamandır uygulanan bir yöntemdir. Çimento ile zemin stabilizasyonu kireç gibi benzer kimyasal reaksiyonlara neden olur ve hem modifikasyon hem de stabilizasyon amacıyla kullanılabilir. Çimento, %2'den daha büyük organik madde içeren veya pH'ı 5,3'ten düşük olanlar hariç her türlü zeminde uygulanabilmektedir (ACI 230.1R-90 1990).

Birçok çalışma, granüler ve düşük plastisiteli killi zeminlerin çimento ile stabilizasyonunun daha uygun olduğunu göstermiştir (Currin ve ark. 1976).

Çimento ile zemin iyileştirildiğinde, zeminin plastisite indeksi ve şişme potansiyelinde önemli bir düşüş, taşıma gücünde büyük bir artış, donma çözülme etkilerine karşı ise direnç sağlamaktadır. Plastisite indeksinin düşüşü, plastik limitinin artmasından kaynaklanmaktadır (Bergado 1996). Ayrıca çimento miktarı artarken optimum su miktarının arttığı ve maksimum kuru hacim ağırlığın azaldığı bulunmuştur (Tabataba ve ark. 1997).

Mitchell (1976), zemin stabilizasyonunda çimento miktarı ve kür süresinin etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda eklenen çimentonun hem ince hem de kaba taneli zeminlerin serbest basınç dayanımını arttırdığını belirtmiştir. İnce daneli zeminlerin serbest basınç dayanımı 40 kata kadar artarken, kaba daneleri olanlarda ise 140 kata kadar dayanımın artabileceği görülmüştür. Ayrıca dayanımın kür sürelerine göre arttığı bulunmuştur. Çimento ile zemin stabilizasyonunda, çimento miktarı ve kür süresine bağlı olmadan sürtünme açısı nispeten sabit kalmaktadır (Clough ve ark. 1981).

Tumluer (2006) yaptığı çalışmada, kumlu zeminlerin geoteknik özelliklerinin farklı oranlarda çimento ve cüruf katkıları ile değişimini araştırmıştır. Çalışmada üniform kum, cüruf, kompoze portland çimentosu kullanılarak farklı matrisler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kompaksiyon ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerin sonucunda, kumlu zeminlerin çimento ile stabilizasyon edilebildiği

belirtilmiştir. Ayrıca, çimento ile aynı oranda cüruf kullanımının sadece çimento kullanılarak elde edilen mukavemet değerlerine yakın olduğu bulunmuştur.

Çimento ile stabilizasyonda, genelde zeminin kuru birim hacim ağırlığının %5-15'i arasında çimento kullanılmaktadır. Organik ve tam kohezyonlu zeminler haricinde çimento uygulanabilmektedir. Çimento, zemin danelerinin arasında bağlar oluşturmaktadır. Zemin stabilizasyonunda, genel olarak portland çimento kullanılmaktadır. Laboratuvar deneyleri ile uygulanacak çimento miktarı belirlenmektedir. Laboratuvarda bulunan çimento ve su miktarı arazide serilir, zeminle iyice karıştırılır ve sıkıştırılır. Bazen zeminde ince kısım fazla olduğunda, optimum su muhtevasından biraz fazla su uygulanmaktadır. Çimento ile yapılan stabilizasyonun bir süre ıslatılması gerekmektedir. Ekonomik ve çevresel nedenlerle çimento miktarı azaltılarak, uçucu kül gibi bazı atık maddeler ile de zemin stabilizasyonu yapılabileceği belirtilmiştir (Uzuner 2000).

Kılıç (2008), İngiltere'de üç ayrı bölgeden (West Ashling, Hamble ve Emsworth) alınan kil numuneler üzerinde farklı oranlarda çimento karıştırılarak veyn, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri yardımıyla, çimento stabilizasyonunun bu zeminlerde etkinliği üzerine deneysel bir araştırma yapmıştır. Çimento ile stabilizasyonda, çimentonun farklı killerin mukavemeti üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bunun amaçla veyn deneyi için %6, %10 ve %15 çimento katkılı numuneler ve üç eksenli basınç deneyi için %20 ve %25 çimento katkılı numuneler hazırlanmış. Hazırlanan numunelere 7. 14. ve 28. günlerde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, farklı çimento oranları ile hazırlanan numunelerin mukavemetlerinin arttığı gözlenmiştir.

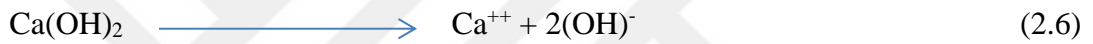
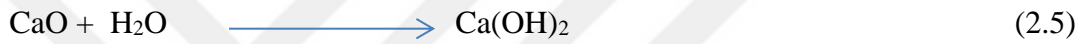
#### ➤ Uçucu Kül ile stabilizasyon

Uçucu kül termik santrallerde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan atık bir üründür. Ancak, birçok ülkede bu tür atıkların sürdürülebilir inşaatlarda kullanılması teşvik edilmektedir. Uçucu külün bağlayıcı bir katkı olarak kullanımıyla sadece zeminin mühendislik özelliklerini geliştiremezken, aynı zamanda enerji tüketimini ve hava kirliliğini azaltmaktadır (Tumluer 2006, Horpibulsuk ve ark. 2012). Puzolanik özelliği

nedeniyle, uçucu kül kullanarak organik zeminin kayma dayanımı ve taşıma kapasitesi arttırılabilmektedir. Uçucu kül, ince taneli zeminlerin plastisite indeksini ve büzülmei azaltmaktadır (Nicholson ve Kashyap 1993).

Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanımıyla; çimento ve kireç tüketiminin azaltılması, enerji tasarrufu, doğal kaynakların korunması ve çevre kirliliğini önlemesi gibi faydalar sağlamaktadır. Ayrıca atık malzeme olduğu için, maliyet olarak ekonomi sağlamaktadır.

Uçucu kül ile zemin karıştırıldığında, aşağıdaki puzolanik reaksiyonlar meydana gelmektedir (TRB 1987):



Uçucu kül, kimyasal bileşimlerine göre genelde C ve F sınıfı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. F tipi uçucu kül, bitümlü kömürün yanmasıyla ortaya çıkar ve çok düşük miktarda CaO içermektedir. Silis ve alumina içerdiğinden dolayı, çimentolaşma özelliği çok düşüktür. Ancak kireç ile reaksiyona girdiğinde, çimentolaşma olayı meydana gelmektedir. C tipi uçucu kül ise linyit veya kömürün yanması ile elde edilir ve %15 ten %35' e kadar CaO içermektedir . Kireç gibi ilave katkı gerektirmeksizin çimentolaşma özelliği sahiptir ve zemin stabilizasyonunda iyi sonuçlar verdiği birçok araştırmalar tarafından gösterilmiştir (Tumluer 2006).

Ünver (2015), Afyon'da düşük plastisiteli killi bir zeminde Soma ve Çatalağzı uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla katkısız ve %5, %10, %15, %20, %25, %30 uçucu külleri katılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre kil zeminin dayanımı, şişme ve dispersibilite özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Soma uçucu külünün, Çatalağzı uçucu külünden kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde daha etkili olduğu bulunmuştur.

İnan ve ark. (2004) yaptığı çalışmada, İzmir Çiğli Jet Üssünden alınan bir yumuşak kilin üzerine Yatağan ve Soma Termik Santrallerinden temin edilen iki farklı uçucu külü kullanarak zemin stabilizasyonu üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Bu amaçla, kil zeminin ağırlığının %5, 10, 15 ve 20'si oranlarında farklı uçucu küller ile kili karıştırarak numuneler hazırlanmıştır. Katkısız zemin ve farklı oranlarda katkılı zeminden hazırlanan numunelerin, Standart Proktor deneyi ile optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Her karışım için bulunan optimum su muhtevası ile silindirik numuneler hazırlanıp 1, 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Deneylerin sonucunda, stabilizatör olarak kullanılan uçucu küllerin zeminin serbest basınç mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Dayanımların artışının uçucu külün tipine bağlı olduğunu tespit edilmiştir.

Termik santrallerden ortaya çıkan uçucu kül, silika, alümina, değişik oksitler ve alkalilerden oluşmaktadır. Uçucu kül ile hidrate kireç reaksiyona girdiğinde çimentolaşma özelliği göstermektedir. Bu nedenle katı madde olarak uçucu kül ile kireç karışımları temellerin stabilizasyonunda kullanılabilir. Genellikle karışımlarda, kireç oranı ağırlıkça %2-10 ve uçucu külü oranı ise %10- 35 arasında uygulanmaktadır (Yıldırım 2002).

Erol (2007) yaptığı çalışmada, Turgutlu yöresinden temin edilen bir silt zeminin mühendislik özelliklerinin uçucu kül ile iyileştirilmesini amaçlamıştır. Numune karışımları 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç deneyine, 1, 3 ve 7 çevrimle donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca deneysel çalışmalarda çimento da kullanılarak en iyi performans belirtilmeye çalışılmıştır. Deneylerin sonucunda, uçucu külün silt zeminin serbest basınç dayanımını ve donma-çözülme direncini arttırdığı görülmüştür. Böylece zemin stabilizasyonunda katkı olarak uçucu külün kullanılmasının hem mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından hem de ekonomik bakımdan çok faydalı olacağı belirlenmiştir.

Savran (1988) yaptığı çalışmada, C sınıfı Soma uçucu kül kullanarak Yüksek Plastisiteli bir zeminin serbest basınç dayanımında büyük bir artış olduğunu belirtmiştir. Gerçekleştirilen standart kompaksiyon deneyleri sonucu, uçucu kül oranı artarken kuru

birim hacim ağırlığın azaldığını ve optimum su muhtevasının arttığını göstermektedir. Modifiye kompaksiyon deneyleri sonuçlarından ise maksimum kuru birim hacim ağırlıkların daha büyük ve optimum su muhtevası değerlerinin ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kıvam limitler incelediğinde, kürsüz olarak uçucu kül katkısı ile likit limitin arttığı, plastik limitin ve plastisite indisin azaldığı görülmüştür. 7 gün kürde ise kürsüze göre likit limitin düştüğü, plastik limit ve plastisite indisin ise büyüdüğü bulunmuştur.

Fırat ve Cömert (2011), zemin stabilizasyonunda F sınıfı uçucu kül ve çimento kullanarak, iki farklı zemin için taşıma oranları ve dayanım değerleri üzerinde kür sürelerinin etkilerini incelemiştir. Bu amaçla, iki matris hazırlanmıştır: birincisi kaolin ve kireç; ikincisi kaolin, bentonit ve kireç. Hazırlanan numuneler optimum su ile sıkıştırılmıştır. 1, 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda karışımlar üzerinde deneyler yapılarak CBR yüzdeleri, dayanım parametreleri, dane çapı dağılımı ve bağıl yoğunlukları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, 28 gün kür sonunda, uçucu kül katkılı zeminlerin taşıma gücünde %4'ten %160'a kadar bir artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Çimento katkılı zeminlerin çoğunda ise %50'ye varan bir düşüş olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çimento ve uçucu kül ile iyileştirilen zeminlerin taşıma gücü kontrolünün 28 gün kür sonunda yapılması gerektiği belirtilmiştir.

#### ➤ Bitümlü malzemeler ile zemin stabilizasyonu

Bitüm ya da asfalt, çevrede doğal olarak bulunabilen veya rafinaj işlemi ham petrolden endüstriyel olarak imal edilebilen bir yarı katı hidrokarbon ürünüdür. Bitüm bağlayıcı olarak yol inşaatlarında, zemin stabilizasyonunda ve yalıtım madde olarak geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Asfalt ile zemin stabilizasyonu uygulandığında, zeminin geçirimsizliği sağlanmaktadır. Zemin stabilizasyonunda, ilk asfalt kullanımı ABD' de Missouri, Güney Carolina, Iowa ve Nebraska' da 1925-1932 yılları arasında uygulanmıştır. Likit asfaltlarla yapılan stabilizasyon uygulamalarının ardından, yol tabanlarında sağlam bir temel meydana geldiği görülmüştür (Cilason 1964).



Bitüm, çeşitli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir. Ancak su geçirmezliği sağlamak için gereken bitüm miktarı zeminin ince danelerine bağlıdır. Karışımda ne kadar çok ince malzeme varsa o kadar çok miktarda bitüme ihtiyaç olabilmektedir. Asfalt ile zemin stabilizasyonunda, zeminin sıkışmasını kolaylaştırmak ve bitümlü malzemenin üniform dağılmasını sağlamak için bir miktar su kullanılması gerekmektedir (Wright ve Paquette 1987).

Stabilizasyon yapılacak zeminin stabilitesine göre bitümlü malzemenin cinsi ve miktarı değişmektedir. Sıcak iklimlerde yavaş sertleşen katbek asfaltların kullanılması tercih edilmektedir. Böylece asfalt, sertleşmeden önce zemin daneleri arasına iyice girmektedir. Soğuk iklimlerde ve fazla miktarda ince daneli zeminlerde çabuk kuruyan katbek asfaltları tercih edilmektedir. Nemli iklimlerde ise genellikle asfalt emülsiyonları kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, ince daneli zeminlerde %4-8, kum zeminlerde %4-10, çakıl ve kumlu-çakıl zeminlerde %2-6 arasında bitüm oranının değiştiği bulunmuştur (Witczak ve Yoder 1975).

#### ➤ Yüksek Fırın Cürüfö ile stabilizasyon

Yüksek fırın cürüfö demir-çelik tesislerinde yüksek fırınlarda demir üretirken açığa çıkan tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan bir yan üründür. Ancak çimento ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Cürüfö kimyasal bileşimleri, hammaddelerin beslenmesine ve ergitme işlemlerine bağlıdır. Genelde her bir ton metalden 200-600 kg arasında cürüfö çıkmaktadır. Ağırlıkça %0.5-0.8 demir oksit, %35-42 kalsiyum oksit, %35-40 silisyum dioksit, %8-9 magnezyum oksit, %8-15 Alüminyum oksit, %0.3-1.0 permanganat ve %0.7-1.5 kükürt içermektedir (Reuter ve Ark. 2004).

Yüksek fırın cürüfö, su ve kireçle karıştırıldığında bağlayıcı olarak kullanılabilen 1862 yılında Emil Largens tarafından tespit edilmiştir (Tokyay 2003).

Yüksek fırın cürüflerinin bağlayıcı özelliklere sahip olduğu belirlendikten sonra, ticari olarak üretimine 19. Yüzyılın sonunda başlanmıştır. Yüksek fırın cürüflerinin portland

çimento hammaddesi olarak kullanılması 1883 yıllarına, mineral katkı olarak kullanılması ise 1892 yıllarına rastlamaktadır. Günümüzde, yüksek fırın cürufu içeren çimentolar birçok ülkede üretilmekte ve kullanılmaktadır (Tokyay 2003).

Bilgen ve ark. (2012), zemin iyileştirmede çelikhane cürufunun killi zeminlerin stabilizasyonunda katkı olarak kullanımını, kireç ile etkileşimini ve optimum karışım oranını tespit etmek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada, kullanılan kil Adapazarı-Kocaeli illeri arasında bulunan Uzunçiftlik Belediyesinden temin edilmiştir ve düşük plastisiteli olarak sınıflandırılmıştır. Bu kile, ASTM D4609 standardına uygun olarak farklı oranlarda Bazik Oksijen Fırın (BOF) ve kireç karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlarına göre, katkısız kilin serbest basınç değeri 279 kPa'dır. Zemine ağırlıkça %3.33 oranında cüruf eklenmesiyle, serbest basınç değeri 28 günlük kür süresi sonunda, 960 kPa' a yükselmiştir, %5 kireç eklendiğinde ise serbest basınç değeri 2700 kPa' a kadar çıkmıştır. %5 kireç ve %3.33 cüruf ile hazırlanan karışımda ise serbest basınç, 4000 kPa değerine yükseltmekte ve %15 olan birim şekil değiştirme oranı %2'ye düşmektedir. Katkısız kilde %6 olan yaş Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değeri aynı karışım için, %135'e yükselerek 23 kata kadar arttığı bulunmuştur. Sonuç olarak, çelikhane cürufunun, zemin iyileştirmede killerin mukavemet özelliklerini arttıracığı ve kireç ile birlikte kullanılması durumunda çok daha etkin bir katkı malzemesi olduğu gösterilmiştir.

#### ➤ Kabuk Pirinç Külü ile stabilizasyon

Pirinç kabuğu, tarımsal bir atıktır. Pirinç kabuğu yakılarak kül elde edilmektedir. Dünyada yılda yaklaşık 108 ton pirinç kabuğu üretilmektedir. Bu gibi tarımsal atıkların kullanımı, hem inşaat maliyetini hem de çevre kirliliğini önemli ölçüde azaltacaktır. Bu nedenle, zemin iyileştirilmesinde kabuk pirinç külü kullanımı teşvik edilmelidir (Aparna 2014). Pirinç kabuğu yaklaşık %15 ila %20 arasında kül içermektedir (Kuskonmaz 1993).

Tarım ülkelerinde, tarımsal atıkların bolluğu birçok sorun yaratmaktadır. Bitkiler, büyüme sürecinde, topraktan çeşitli mineraller ve silikatlar emmektedir. Silikatlar gibi inorganik maddeler, yıllık olarak yetişen bitkilerde, uzun ömürlü ağaçlardan daha yüksek oranlarda bulunmaktadır. Bu nedenle pirinç, buğday, ayçiçeği ve tütün bitkileri kütükül

kısımlarında yüksek miktarda silika içermektedir. İnorganik maddeler, serbest tuzlar; kationik gruplar halinde bitkilerde bulunmaktadır (Rydholm 1975). Organik maddelerin yanması termal ayrışma olarak adlandırılmaktadır. Bu şekilde üretilen kül, ince bir boyuta öğütülerek kireçle karıştırıldığında bağlama özelliğine sahip olan bir malzeme elde edilebilmektedir. Bu malzemenin kalitesi; yanma süresi, sıcaklık, soğutma süresi ve öğütme koşullarına bağlıdır (James ve Rao 1986).

Pirinç kabuğu külünün çeşitli uygulama alanları olup kullanım şekline göre kabuğun yakma şekli değişmektedir. Kabuk yakıt veya izolator olarak kullanılmak istendiğinde, yakma koşullarını sabit tutulmasına gerek yoktur. Ancak yapı malzemesi olarak kullanılıyorsa kabukların yakılması ve külün soğutulması belli koşullar içinde yapılmalıdır (Gemma 2005, Beagle 1978).

Pirinç kabuğu külünün içeriği yakma sıcaklığına ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Eğer küldeki silis hammadde olarak kullanılacaksa, o zaman silis içeriğinin çok olması önemli olabilmektedir (Varol 2006).

Nasiri ve ark. (2016), çevresel faktörlere dikkate alarak yol tabanı tabakasının kalitesini artırmak amacıyla stabilizatör olarak pirinç kabuğu külünün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Optimum miktarı bulmak için 10 tane karışım üzerinde zemin, kireç ve pirinç kabuğu külü etkisini çalışmışlardır. Laboratuvar deneylerin sonucunda, pirinç kabuğu külü miktarındaki artışın, maksimum kuru birim hacim ağırlığı düşürdüğü ve optimum su muhtevasını arttığı (% 21.9) görülmüştür. Pirinç kabuğu külü eklenmesi ile, zeminin likit limitinin ve plastisite indeksin (PI) azaldığı bulunmuştur. Ancak kirece kadar etkili olmadığı belirlenmiştir. 28 gün kür süresinden sonra %9 pirinç kabuğu kül ile tek eksenli basınç dayanımı 214 KN/m<sup>2</sup> olan doğal zeminin dayanımı 237 KN/m<sup>2</sup> çıkmıştır. Sonuçlara göre, orman yolu yapımında tabanın stabilizasyonu için en uygun karışım oranı %4 Kireç + 9% pirinç kabuğu külü olduğu tespit edilmiştir.

Genellikle kireç ve pirinç kabuğu külü (RHA) eklenmesiyle zeminin kuru birim hacim ağırlığı düşerken optimum su içeriği artmaktadır. Kireç ve RHA oranı artıkça , zeminin likit limiti ve plastisite limiti azalmaktadır. Kireç ve RHA eklenmesiyle zeminin

deformasyon özelliklerinde bir azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca, zeminin kayma mukavemetinde bir artışa neden olmaktadır (Choobbasti 2010).

➤ İnşaat yıkıntı atıklarla zemin stabilizasyonu

Kentsel dönüşümden ortaya çıkan inşaat yıkıntı atıkları çevre kirliliğine neden olmaktadır. Günümüzde bu atıklar dünyanın her şehrinde depolama problemi yaratmaktadır. Geoteknikte, inşaat yıkıntı atıklarının kullanılabilirliği üzerine birçok araştırma yapılmıştır ve olumlu sonuçlar bulunmuştur. Ayrıca, inşaat mühendisliğinde kullanıldığında, projelerin maliyetinde büyük bir ekonomi sağlayacağı birçok araştırmacılar tarafından belirlenmiştir.

Çimen ve ark. (2016) tarafından, inşaat yıkıntı atıklarının yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine olan etkisi üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Bu amaçla, kullanılan kilin ve inşaat yıkıntı atıklarının kimyasal özellikleri, X-Ray analizi yapılarak belirlenmiştir. İnşaat yıkıntı atıkların No. 40 elekten geçirilmiş, zemin ile ağırlıkça %2, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 oranlarında farklı karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde Atterberg limitleri yapılmıştır ve standart kompaksiyon deneyleri yardımıyla optimum su muhtevası bulunmuştur. Katkısız kil ve katkılı karışımların mukavemetini belirlemek amacıyla bulunan optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık şartlarında normalize silindirik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler sabit hacimli şişme ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, zemine inşaat yıkıntı atıklarının eklenmesiyle şişme potansiyelinin düştüğü ve serbest basınç mukavemetinin arttığını bulunmuştur. Ayrıca inşaat yıkıntı atıklarında ideal oranının %10-20 olduğu tespit edilmiştir.

Vural ve ark. (2017) yaptığı deneysel çalışmada, inşaat yıkıntı atıklarının, killi zeminlerde zemin stabilizasyonuna etkisini incelemek amacıyla %10, %20, %30, %40 inşaat yıkıntı atıkları zemine katılarak serbest basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. İnşaat yıkıntı atıkları ile koalin kilden hazırlanan numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutarak mukavemetlerinin ne kadar arttığı belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda, inşaat yıkıntı atığının kilin serbest basınç dayanımını arttırdığı bulunmuştur. İnşaat yıkıntı

atığının killi zeminlerin iyileştirmesinde katkı olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Kumar (2015), zemin stabilizasyonunda inşaat ve inşaat yıkıntı atıklarının kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Çalışma sonucunda, zayıf zeminlerin stabilizasyonunda tuğla, beton, fayans vb. inşaat atıklarının kullanılabileceğini göstermiştir.

#### ➤ Mermer tozu ile zemin stabilizasyonu

Mermer tozu, mermer taşının kesilmesi ve cilalanmasından oluşmaktadır. Endüstri sektöründe büyük miktarda üretilen atık malzemelerden biridir. Mermer tozunun içinde yüksek miktarda kalsiyum, silika ve alümina maddelerin bulunduğu için hem hazır beton üretiminde hem de zemin stabilizasyonunda kullanılabilir. Kesme tesislerinin havuzlarında çökelen mermer tozu atık sahalarına atılmaktadır.

Zorluer ve Usta (2003) yaptıkları çalışmada, atık malzeme olan mermer tozunu katı madde olarak kullanarak, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ana kampüsünden farklı noktalardan alınan iki kil zemin üzerinde iyileştirme yapmaya çalışmışlardır. Bu amaçla, zeminler ile belirli oranlarda atık mermer tozu karıştırılarak standart proktor ve odometre şişme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, atık mermer tozunun killerin şişme potansiyelini düşürdüğü ve atık mermer tozunun zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini bulunmuştur.

Öntürk ve ark. (2014), atık madde olan uçucu kül ve mermer tozunun yolların temel tabakalarında stabilizatör olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bir otoyolun alt temelinin yapısında bulunan zemin ile farklı oranlarda uçucu kül ve mermer tozunu karıştırarak serbest basınç dayanımı ve CBR üzerine etkisini incelenmiştir. Farklı oranlarda iyileştirilmiş zeminin karışımlarından hazırlanan numuneler 7 ve 14 gün kür sürelerinde, CBR deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerin sonucunda, uçucu kül ve mermer tozu ile yapılan iyileştirme ile zeminin CBR değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Chayan ve Sharma (2014), yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda mermer tozu ve uçucu kül gibi atık maddelerin etkisini kanıtlamışlardır. %15 mermer tozu kullandığında CBR değerinin %200'e kadar artacağını belirlemişlerdir.

➤ Yapay Malzemelerle stabilizasyon

Polimer, küçük moleküllerin birbirlerine tekrarlar halinde eklenmesiyle oluşan uzun zincirli moleküller olarak tanımlanmaktadır. Aynı monomerlerin oluşturduğu polimerlere homopolimer, iki veya daha fazla farklı tip monomerden oluşan polimere ise kopolimer denilmektedir.

Polimer zemin stabilizasyonu, zeminlerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla polimerlerin kullanılmasını ifade etmektedir. Kullanılan polimerin miktarı az olsa bile, çeşitli polimerlerin zeminin erozyonunu azalttığı, kayma dayanımını artırdığı ve yapısını desteklediği gösterilmiştir (Luckham ve ark. 1999). Şimdiye kadar zemin stabilizasyonunda en çok denetlenen ve kullanılan polimerler, sentetik polimerler ve biyopolimerlerdir (Latifi ve ark. 2016). Özellikle biyopolimerlerin kullanılması, çimento gibi üretim sırasında büyük miktarda karbondioksit üretebilecek veya çevresel zararlara neden olabilecek geleneksel katkılara iyi bir alternatiftir (Kögel ve ark. 2002).

Geleneksel kimyasal bağlayıcılarla karşılaştırıldığında, polimerler geleneksel katkı maddelerine göre daha düşük karışım oranı ile aynı taşıma gücünü sağlayabilmektedir. Örneğin, çeşitli biyopolimerlerin %0.5-1'i içeren karışımları, % 10 çimento içeren karışımlarla eşit ya da daha fazla dayanım seviyelerine sahiptir (Chang 2016).

### **2.3. Yüzeysel Zemin Stabilizasyonunun Uygulanması**

Yüzeysel zemin stabilizasyonu farklı yöntemler ile uygulanabilmektedir. Uygulanacak yöntemin seçimi birçok faktörler bağlıdır. Zemin cinsi, stabilizasyon derinliği, hava ve zeminin koşulları, mevcut ekipmanlar ve personelin tecrübesi gibi unsurlara dikkat edilmelidir.

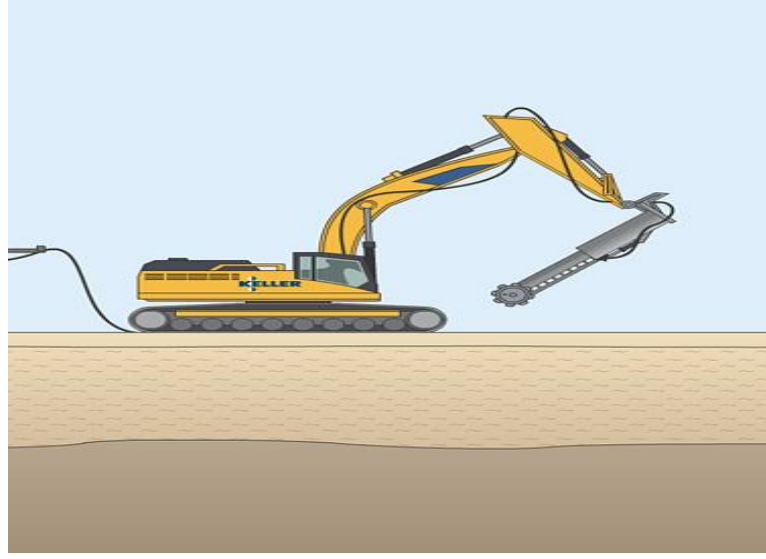
### **2.3.1. İn-situ stabilizasyonu**

Bu yöntemde, sahadaki zemini kaldırmadan katkı maddeleri kullanarak zeminin stabilizasyonu yapılmaktadır. Bu teknoloji, derin temellerin ve sığ temellerin stabilizasyonunda çok fayda sağlamaktadır. Karışımın dizaynının planlaması, stabilize edilen zeminin mühendislik özelliklerinin seçimini ve değerlendirilmesini içermektedir. Temel amacı, stabilize edilen zeminin desteklenecek yapının işlevsel gereksinimlerini karşılamak için uygun hale getirmektedir (Keller 2011). Bu teknoloji ile, çimento veya kireç gibi çimentolama özelliğine sahip olan malzemelerin kuru veya ıslak halde zeminlere enjeksiyonu gerçekleştirilebilmektedir. Kuru veya ıslak derin karıştırma yöntemlerini kullanma seçimi, sahadaki zemin koşullarına, nem içeriğine, kullanılacak bağlayıcıların etkinliğine ve inşa edilecek yapının türüne bağlıdır (Makusa 2012).

### **2.3.2. Ex-situ stabilizasyon**

Derin karıştırma yöntemi, zeminlerin büyük derinliklerde stabilizasyonu için yapılan bir işlemdir. İn-situ bir zemin stabilizasyonu olup kuru ve ıslak bir katkının zemine enjekte edilerek, mekanik veya döner aletler ile yumuşak zeminle karıştırılmasıdır (EuroSoilStab. 2002). Örnek olarak, Şekil 2.6'da bir derin karıştırma makinesi verilmiştir.

Bu metot, stabilizasyon amacıyla bir zeminin orijinal konumundan çıkarılmasına ve başka yerlere taşınmasına dayanmaktadır. Bunu yöntem genellikle nehir, kanal ve limanların taramasında kullanılmaktadır. Tarama işleminin amacı, ya kirlenmiş tortul tabakasını iyileştirmek ya da gemilerin ve botların güvenli geçişi için navigasyon kanallarını sürdürmek veya derinleştirmektir (US EPA 2004). Saha dışı stabilizasyonda, karışımlar uygun tesislerde yapıldıktan sonra belirtilen alanda kullanılmaktadır. Ex-situ stabilizasyon planlanırken, zeminin çıkarma yöntemi, taşıma araçları, kullanılacak iyileştirme yeri seçimi, imha sahası veya yeniden kullanım talebi dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerdir (Miller 2007, Pianc 2009). Ex-situ stabilizasyonu zeminin türüne ve su muhtevasına göre farklı yöntemler ile yapılabilmektedir.



**Şekil 2.6. Derin karıştırma makinesi**

❖ Islak karışım

Islak derin karıştırma uygulamalarında, çamur olarak dönüştürülen bir bağlayıcı nozüllerin yardımıyla zemine enjekte edilmektedir (Massarsch ve Topolnicki 2005). Karıştırma makinesi delme çubuğu, enine kirişler ve başlı bir matkap ucundan oluşmaktadır. Uygulamalara göre bazı değişiklikler gerekmektedir.

❖ Kuru karışım

Kuru karıştırma yöntemi, çok düşük titreşimle çalışır, temiz, sessizdir. Ayrıca, kazılan toprak üretmez (Hayward 2012). Uzun yıllardır Kuzey Avrupa ve Japonya'da yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle, kuru katı malzemeleri zemine enjekte edilir ve istenilen derinliğe ulaşana kadar iyice karıştırılır.

#### **2.4.Stabilize Edilen Zeminin Dayanımını Etkileyen Faktörler**

İyileştirilmiş zemin içinde, sülfatlar, sülfürler ve karbon dioksit gibi organik maddeler bulunduğu, dayanımda olumsuz etkilere neden olabilmektedir ( Sherwood 1993 ).

##### **2.4.1. Organik maddeler**



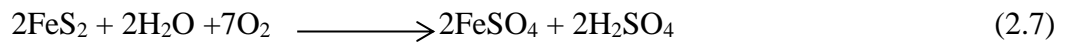
Genellikle, toprakların üst tabakaları büyük miktarda organik maddelerden oluşturmaktadır. Ancak iyi drene topraklarda organik maddelerin derinliği 1.5 m' ye kadar uzayabilmektedir (Sherwood 1993). Topraktaki organik maddeler hidrasyon ürünü ile reaksiyona girmektedir. Örneğin, Kalsiyum hidroksit (Ca (OH)<sub>2</sub>) düşük pH değerine neden olabilmektedir. Bu düşük pH, hidrasyon olayını geciktirebilir, stabilize edilmiş zeminin sertleşmesini etkileyebilir, sıkıştırılmasını zorlaştırabilir veya imkansız hale getirebilir.

#### 2.4.2. Sülfatlar

Büyük miktarda sülfat içeren zeminlerde, kalsiyumlu stabilizatör kullanıldığında nem ortasında stabilize edilen zemin reaksiyona girip kalsiyum sülfat ve/veya thamausite oluşturmaya neden olmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun başlatılması için, başlangıçta karıştırma sırasında sülfatın erimesi için fazla su verilmesi gerekebilmektedir (Sherwood 1993).

#### 2.4.3. Sülfürler

Atık maddeler ve endüstriyel yan ürünlerin çoğunda, demir piritler (FeS<sub>2</sub>) şeklinde sülfürler mevcut olabilmektedir. FeS<sub>2</sub>' nin oksidasyonu sülfürik asit üretmesine neden olacaktır. Bu sülfürik asit kalsiyum karbonat varlığında, aşağıdaki (2.7) ve (2.8) reaksiyonlarına göre alçıtaşı oluşturmak için reaksiyona girebilmektedir:



Hidratlanmış sülfat bu şekilde oluşur ve fazla su olduğu durumda stabilize edilmiş malzemeye sülfatla benzer şekilde saldırabilmektedir (Sherwood, 1993).

#### 2.4.4. Kompaksiyon

Uygulamada, bağlayıcı maddelerin ve zeminin yoğunluğunun etkisi çok önemlidir. Stabilize edilmiş zemin belirli bir sıkıştırma derecesinde asıl zeminden daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlığa sahiptir. Katı maddenin miktarı artarken, optimum su muhtevası da artmaktadır (Sherwood 1993). Çimentoyla stabilizasyon yapıldığında, çimento suyla temas ettikten hemen sonra hidrasyon olayı gerçekleşmektedir. Bu hidrasyon olayı, zemin karışımının sertleştirilmesine neden olduğundan, en kısa sürede zeminin sıkıştırılması gerekmektedir. Kompaksiyonun herhangi bir neden ile gecikmesi, stabilize edilmiş zeminin sertleşmesine neden olacağından, aynı etkiyi elde etmek için ekstra bir sıkıştırma gerekecektir. Bu da ciddi bağlantı kırılmasına yol açar dolayısıyla dayanım kaybına neden olabilmektedir. Çimentonun aksine, kireçle stabilize edilmiş zeminler için sıkıştırma gecikmesinin bazı avantajları olabilmektedir. Kireçle stabilizasyonda, kirecin zeminde dağılmasını sağlamak için yumuşama zamanı gerekir böylece kireç plastisite üzerinde tam etkisini gösterebilmektedir. Bu süreden sonra, kireç ile stabilize edilmiş zemin tekrar karıştırıldıktan sonra nihai sıkıştırması yapılmaktadır (Sherwood 1993).

#### **2.4.5. Su muhtevası**

Zemin stabilizasyonunda, yeterli nem içeriği sadece hidrasyon işlemini sağlamak için değil, aynı zamanda etkili bir sıkıştırma için de gereklidir. Tamamen hidrate çimento, yaklaşık kendi ağırlığının %20'sine kadar su alabilmektedir. Öte yandan, sönmüş kireç (CaO) kendi ağırlığının yaklaşık %32'sine kadar su almaktadır ( Sherwood 1993).

#### **2.4.6. Sıcaklık**

Puzolanik reaksiyonlar sıcaklık şartlarına göre değişmektedir. Arazideki sıcaklık gün boyunca sürekli değişmektedir. Bağlayıcılar ve zemin parçacıkları arasındaki puzolanik reaksiyonlar düşük sıcaklıkta yavaşlayıp stabilize kütlelerin daha düşük mukavemetine neden olabilmektedir. Soğuk bölgelerde, sıcak mevsimlerde zemin stabilizasyonu tavsiye edilebilmektedir (Sherwood 1993, Maher ve ark. 1994).

#### **2.4.7. Donma-Çözülme etkisi**

Stabilize edilen zeminler donma-çözülme çevirilerine dayanamaz. Bu nedenle, stabilize edilmiş zeminlerin donma hasarına karşı korunması gerekebilmektedir. Stabilize edilmiş zeminler büzülme kuvvetleri, bağlayıcı maddenin kimyasal reaksiyonlarına bağlıdır. Çimento ile stabilize edilmiş zeminler, hava sıcaklığının günlük değişimlerinden dolayı kuru-ıslak çevrimlere karşı hassastır, bu durum stabilize edilen zeminin gerilmesine neden olabileceğinden dolayı korunmalıdır (Maher ve ark. 2003, Sherwood 1993).

## **2.5. Kalite Kontrol**

Zemin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemi fark etmeksizin, sahadaki sonuçları kontrol edilmelidir. Genellikle, koni penetrasyon deneyi (CPT), plaka yükleme deneyi ve standart penetrasyon deneyi (SPT) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Zemin iyileştirmede, beklenen sonuçları alınmadığı durumlarda istenilen özellikler elde edilinceye kadar işlemler tekrarlanmalıdır (Kayabali 2004).

## **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Bu çalışmada, doğal zemin numunesine, ağırlıkça %2 kireç ve farklı oranlarda atık madde olan uçucu kül ve/veya inşaat yıkıntı beton atığı katılarak karışımlar hazırlanmıştır. Bu malzemeler zeminle karıştırıldığında, zeminin mühendislik özelliklerini artırıp artırmadığını belirlemek amacıyla birçok zemin laboratuvar deneyi yapılmıştır. İlk olarak, araziden alınan zemin üzerinde doğal su muhtevası belirlenmesi, elek analizi, hidrometre analizi ve Atterberg Limit deneyleri yapılarak zemin sınıflandırması

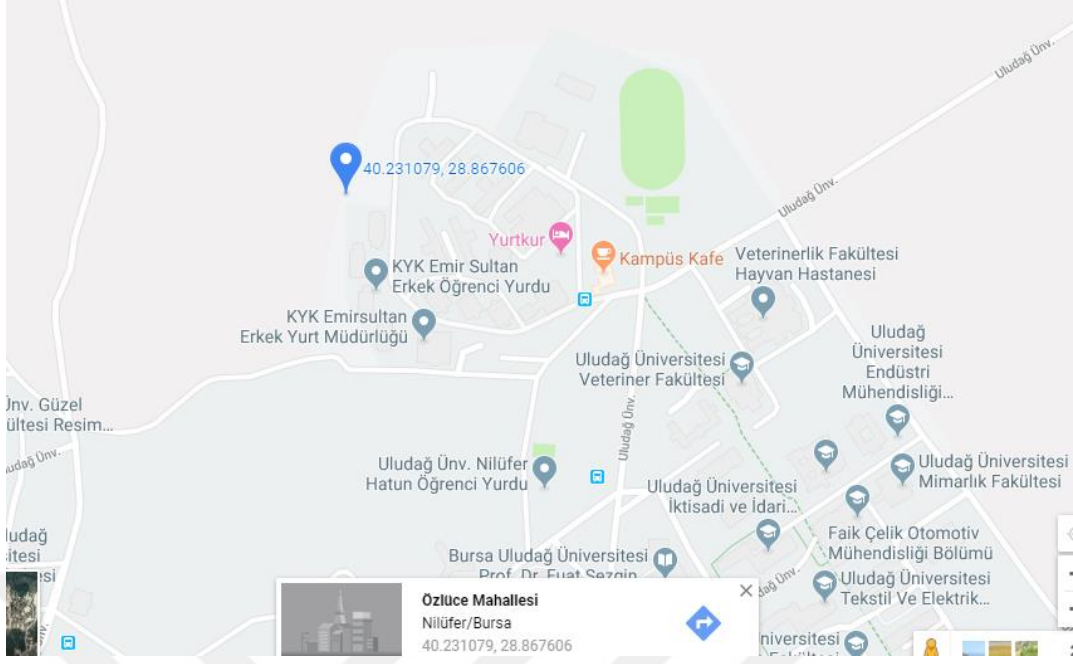
yapılmıştır. Kullanılacak atık malzemeler ve zemin hazır hale getirildikten sonra karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde kompaksiyon deneyi yapılmış ve zeminin optimum su içeriğindeki maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Karışımların mukavemetini belirlemek amacıyla bulunan optimum su ile zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığında üçer tane 38 mm çaplı ve 76 mm uzunluğunda silindirik numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, kür süresince nemini kaybetmemesi için desikatör içinde bekletilmiştir. 3; 7 ve 28 gün nem odasında bekletilen numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuş, mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca hazırlanan karışımlara odometre deneyi yapılarak, serbest şişme basınç değerleri elde edilmiştir. Son olarak, 28 gün kürde bekletildikten sonra kırılan numunelerin Atterberg Limitleri belirlenmiştir.

### **3.1. Kullanılan Malzemeler**

Çalışmada 4 farklı malzeme kullanılmıştır. Atık malzeme olarak Bursa' da kolaylıkla elde edilebilecek uçucu kül (U) ve inşaat beton atıkları (M) dikkate alınmıştır. Bu malzemeler, mühendislik özelliklerine, çoğu ülkelerde büyük miktarda bulunmasına ve zemin stabilizasyonunda kullanım potansiyellerine göre seçilmiştir. İlk olarak malzemelerin özellikleri deneyler yapılarak belirlenmiştir. Sonra istenilen karışımlar hazırlanıp kompaksiyon, atterberg limitleri, tek eksenli basınç ve şişme deneylerine tabi tutulmuş ve zemin stabilizasyonunda kullanım potansiyelleri değerlendirilmiştir.

#### **3.1.1. Zemin**

Çalışmada kullanılan zemin, Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünde (Şekil 3.1) yapılan bir bina inşaatı sahasında, 2 m derinlikten alınmıştır. İlk olarak, araziden alınan zemini sınıflamaya yönelik elek analizi, hidrometre analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Ayrıca zeminin özgül ağırlığı ve şişime yüzdesi belirlenmiştir.



**Şekil 3.1.** Kullanılan zeminin Alındığı yerin konumu

➤ Doğal su muhtevasının tayini

Kullanılan zeminin doğal su muhtevasını belirlemek için TS 1900-1'e göre deney gerçekleştirilmiştir. Zeminden alınan 300 gr bir numune etüvde kurutulmuştur. Sonra, kuru zemin kütlelerinin yüzdesi olarak aşağıdaki formül ile hesaplanıp su muhtevası ( $w_n$ ) bulunmuştur. Buna göre, kullanılan kilin doğal su muhtevası %18 olarak tespit edilmiştir.

$$w_n = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

➤ Granülometri dağılımı

Kilin granülometrisinin dağılımı ıslak elek analizi yardımıyla belirlenmiştir. Çizelge 3.1' de gösterilen elek analizi sonuçlarına göre toplam zeminin %77,49'si #200 nolu elekten geçmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan kilin elek analizi

Numune toplam kütlesi			191,0 gr	
Elek No	Çap(mm)	Elekte kalan(gr)	Elekten geçen	
			gr	%
3/8'	9,5	0	191,0	100
5/16'	8	1,0	190,0	99,47
4#	4,75	1,5	188,5	98,69
10#	2	5,0	183,5	96,07
16#	1,18	5,0	178,5	93,45
30#	0,60	6,5	172	90,05
40#	0,40	3,5	168,5	88,22
60#	0,25	5,0	163,5	85,60
100#	0,15	8,5	155,0	81,15
200#	0,075	7,0	148	77,49

Zeminin ince kısmının sınıflandırılması için, hidrometre deneyi yapılarak ince dane dağılımı ve Atterberg limitleri belirlenmiştir. Hidrometre deneyi için no#200 elekten geçen zeminden 50 gr kuru zemin alınarak, sodyumhegzametafosfat ( $(\text{NaPO}_3)_6$ ) eklenmiş çözelti içinde 1 gün bekletilmiştir. Bundan sonra bir mikser yardımıyla saf su eklenen karışım 10 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım, 1000 ml kapasiteli bir mezür içerisine aktarılmış (Şekil 3.2) ve 1000 ml ye tamamlandıktan sonra homojen bir süspansiyon oluşana kadar çalkalanmıştır. Bu işlem biter bitmez mezür, düz bir yüzey üzerine oturtulmuş ve kronometre çalıştırılmıştır.

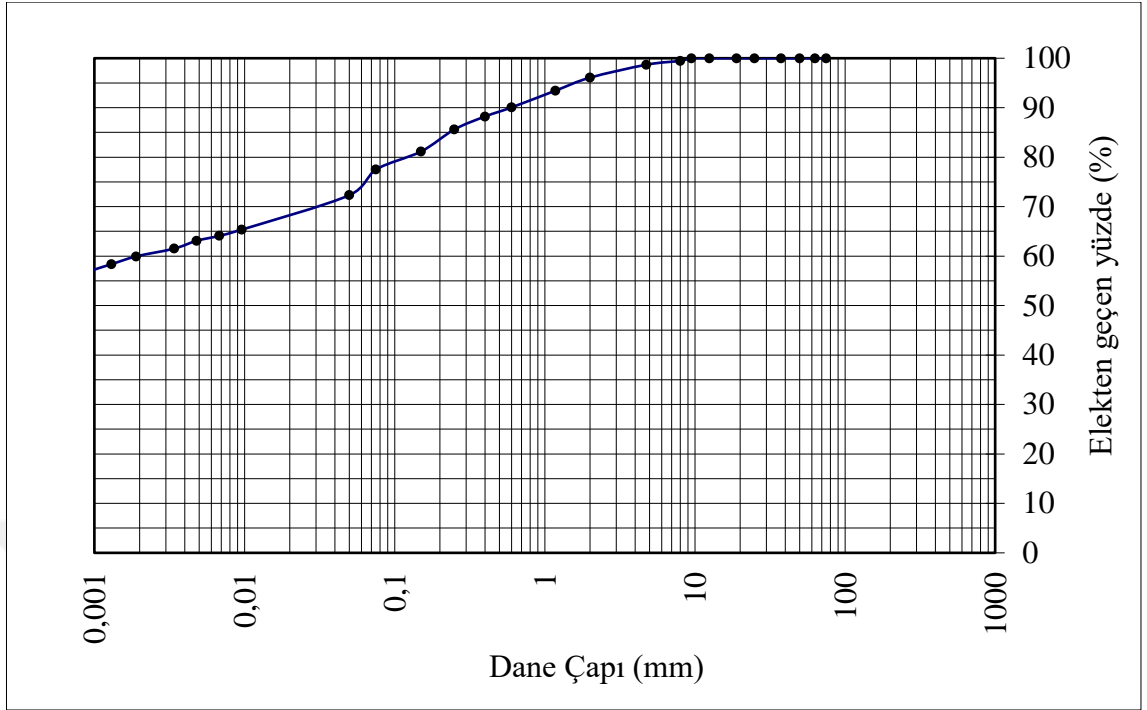


**Şekil 3.2.** Kilin Hidrometre Analizi

Hidrometre deneyine tabi tutulan numune belirli zamanlar aralıklarında 24 saat boyunca hidrometre okumaları alınmıştır. Hidrometre deneyi sonucunda zeminin ince danelerinin dane boyutlarının dağılımı belirlenmiş ve sonuç Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir. Hidrometre ve Elek analizi deney sonuçlarının birleştirilmiş hali Şekil 3.3’ te, Kilin granülometri eğrisi olarak verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Hidrometre Deney Sonuçları

Geçen Süre (dak.)	$R = 1000(r_w - 1)$	$R_w$	$R - R_w$	N%	Zr(cm)	D (mm)	N’%
0,15	1,0210	1,0015	0,0195	79,39	14,2	0,0096	61,51
0,30	1,0215	1,0015	0,0200	81,42	14,2	0,0068	63,09
1	1,0215	1,0015	0,0200	81,42	14,2	0,0048	63,09
2	1,0210	1,0015	0,0195	79,39	14,2	0,0034	61,51
4	1,0205	1,0015	0,0190	77,35	10,62	0,0019	59,94
8	1,0200	1,0015	0,0185	75,31	10,62	0,0013	58,36
15	1,0195	1,0015	0,0180	73,28	10,62	0,0009	56,78
30	1,0190	1,0015	0,0175	71,24	10,62	0,0007	55,2
60	1,0185	1,0015	0,0170	69,21	10,62	0,0005	53,63
120	1,0180	1,0015	0,0165	67,17	10,62	0,0004	52,05
240	1,0175	1,0015	0,0160	65,14	10,62	0,0003	50,47
485	1,0170	1,0015	0,0155	63,10	10,63	0,0002	48,90
1440	1,0170	1,0015	0,0155	63,10	10,63	0,0001	48,90



Şekil 3.3. Kilin Granülometri Eğrisi

➤ Atterberg Limitleri

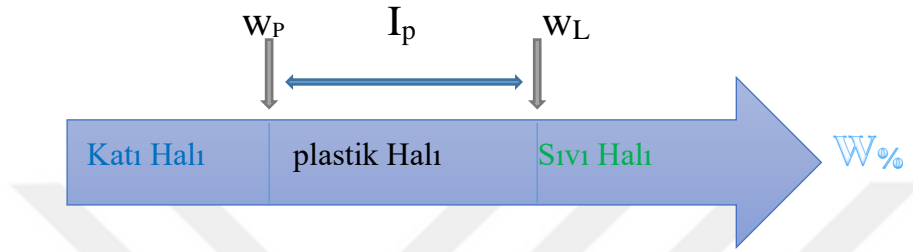
Kıvam Limitleri, ince zeminlerin parçacıkları ile su arasındaki ilişkiyi ve değişen su içeriklerine göre zeminin durumunun tanımlanması amacıyla yapılan deneylerdir. Kohezyonlu zeminlerde zeminin sertlik-yumuşaklık durumu belirlenmektedir. İnce daneli zeminler su içeriklerine göre, katı, likit veya plastik halde olabilmektedirler. Su zeminin içerisinde fazla olduğunda zemin akıcı olur ve kesmeye karşı direnci yoktur. Ama zemin kurutuldukça yavaş yavaş bir kesme direnci kazanmaya başlar. Bu geçiş durumundaki su içeriği likit limit ( $W_L$ ) olarak adlandırılmaktadır. Sıvı haldeki zemin kurutularak su içeriğinin azaltılmasıyla yavaş yavaş sıvı özelliğini kaybedip plastik duruma dönüşmektedir. Düz bir satıhta yuvarlandığı durumun su içeriğine plastik limit denilmektedir.

Likit Limiti ve plastik limit arasındaki su içeriği farkı, zeminin plastisite indeksini temsil etmektedir:

$$I_p = W_L - W_P \quad (3.2)$$



Plastisite indeksi yaygın olarak zemindeki kil miktarını belirtmek amacıyla kullanılmaktadır. Zeminin plastisite indeksi yüksekse toprağa kil denilmektedir. Zeminin su içeriğine bağlı olarak hacim değişimine farklılıkları önemli olabilmektedir. Zeminin doğal su muhtevası ile likidite ve plastisite limitleri arasındaki ilişki, zeminin davranışını yansıtmaktadır. Şekil 3.4’ te su muhtevasının zeminin davranışına etkisi, likit limit ve plastik limitin lokasyonları özetlenmiştir.



**Şekil 3.4.** Zeminin su muhtevası göre plastik durumu

Araziden elde edilen zemin için, Casagrande metodu kullanılarak Atterberg Limitleri belirlenmiştir. Deneyde kullanılan veri formu Ek 1’de gösterilmiştir. Bulunan Atterberg Limitleri Çizelge 3.3’ te özetlenmiştir.

**Çizelge 3.3.** Zeminin Atterberg Limitleri

Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndeksi
$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	$I_p(\%)$
51,80	29,10	23,70

Şekil 3.3’de Zeminin elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre granülometri eğrisi gösterilmiştir. Birleşik zemin sınıflandırmasına göre zeminin, %3’ ünün Çakıl, %20’ sinin kum, %14’ ünün silt ve %63’ ünün kil olduğu bulunmuştur (Çizelge 3.4).

**Çizelge 3.4.** Kullanılan kilde var olan malzeme oranları

Zemin Türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil
Yüzde	% 3	% 20	% 14	% 63

### 3.1.2. Kireç

Çalışmada kullanılan kireç, Bursa çarşısından temin edilmiştir. Kireç beyaz renkli olup, özgül ağırlığı 2,61 olarak belirlenmiştir. Kirecin ve diğer malzemelerin kimyasal özelliklerini belirlemek için XRF motodu kullanılmıştır ve sonuçlar Çizelge 3.6' da gösterilmiştir. Deneyinden alınan sonuçlara göre kullanılan kireçteki CaO' inin oranı %71,23 olarak bulunmuştur.

### 3.1.3. Uçucu kül

Kullanılan uçucu kül, Bursa Orhaneli Termik Santralinden temin edilmiştir. Termik santralinin yeri, Şekil 3.5' te gösterilmiştir. Uçucu kül, gri renklidir ve özgül ağırlığı 2,41 olarak bulunmuştur. Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemine göre plastik olmayan (NP) bir malzemedir. Uçucu külün, beton üretiminde veya zemin stabilizasyonunda kullanılabilmesi için puzolanik ve bağlayıcı özelliklerinin laboratuvarında belirlenmesi gerekmektedir. Puzolanlar yapay veya doğal olabilmektedir; silikat, silikat-alüminat, silikat-karbonat maddeleri veya bunların kombinasyonunu içermektedir. Çevre sıcaklığında ve suyun varlığında puzolanik maddeler ile kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) reaksiyona girmekte ve dayanım sağlayan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat oluşturmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Orhaneli Uçucu Külü, puzolanik özellikleri yani kimyasal bileşenleri XRF yöntemiyle belirlenmiştir. Uçucu küllerin tipi, içinde bulunan silika ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve CaO miktarlarına bağlıdır. Orhaneli uçucu külünde  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %62,95 olduğundan ASTM C 618 standardına göre C tipi olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca kalsiyum oksit (CaO) miktarı yüksek olduğu için (%25,23) hem puzolanik hem de bağlayıcı özelliklerine sahiptir. Orhaneli uçucu külünün bazı özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.



**Şekil 3.5.** Uçucu külün alındığı yerin konumu

**Çizelge 3.5.** Orhaneli Uçucu Külünün özellikleri

Ö.A	PI	CaO	SAF	Rutubet	< #200	≥ #200
2,41	NP	%25,23	%62,95	0,02	%78,84	%21,16

#### 3.1.4. İnşaat Yıkıntı Beton Atıkları

Kullanılan inşaat yıkıntı beton atıkları (İYA) ise Bursatest laboratuvarın yanında yıkılan bir binadan alınmıştır. Yıkılan binalardan kaynaklanan inşaat yıkıntı atıkları önemli miktarda moloz betondan oluşmaktadır. Alınan beton taşları bir konkasörle kırılmıştır ve çalışmada sadece No#40 elekten geçen kısmı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kullanılacak kısmı kurutularak hazır hale getirilmiştir. Kimyasal bileşenlerinde %25,1 CaO içermektedir. Bu CaO miktarı yüksek olduğundan dolayı yıkıntı atığının bağlayıcı özelliğine sahip olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 3.6.** Kullanılan beton moloz tozu hazır hali (#40 nolu elekten geçen kısmı )

### 3.2. Malzemelerin Kimyasal Bileşenleri

Kullanılan tüm malzemelerin kimyasal özelliklerini belirlemek için XFR metodu kullanılmıştır ve sonuçlar Çizelge 3.6.' da gösterilmiştir. Bu yöntem ile deneylerde kullanılan bütün malzemelerin (kil, kireç, inşaat yıkıntı atığı ve uçucu kül) kimyasal bileşenleri elde edilmiştir.

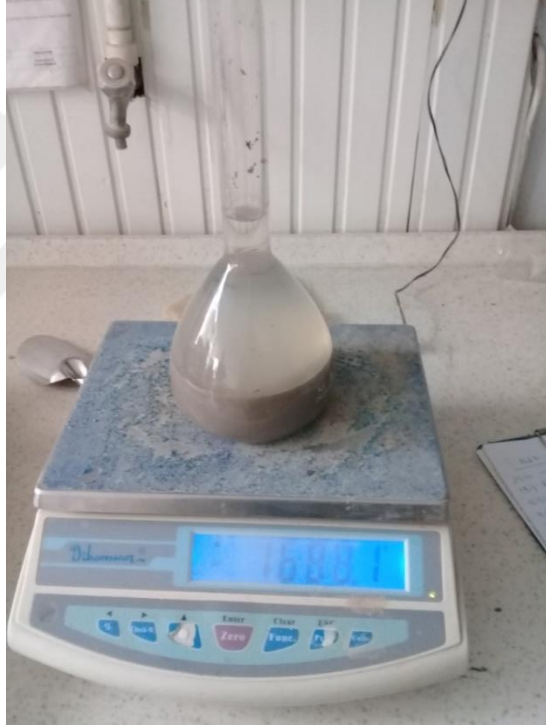
**Çizelge 3.6.** Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Bileşenleri

Bileşen	Kil (%)	Kireç (%)	İYA (%)	Uçucu Kül (%)
SiO <sub>2</sub>	61,21	0,79	47,67	38,42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,47	0,29	15,08	17,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,13	0,11	7,00	6,97
CaO	6,27	71,23	21,5	25,13
MgO	1,65	0,55	2,33	2,38
SO <sub>3</sub>	0,12	1,79	3,40	5,38
Na <sub>2</sub> O	0,49	0,01	0,26	0,24
K <sub>2</sub> O	1,20	0,05	1,84	1,87
KK	10,86	25,52	0,33	0,47
Rutubet	3,34	4,37	0,59	0,02

### 3.3. Malzemelerin Özgöl Ağırlığı

Bir malzemenin yoğunluğunun, aynı hacimdeki suyun 4°C'deki yoğunluğuna oranına özgöl ağırlığı denir. Laboratuvarda kaba ve ince daneli malzemelerin özgöl ağırlıkları tayini farklı yöntemler ile belirlenmektedir. Konu olarak ince malzemelerin özgöl ağırlığı tayin etmek için 4,75 mm' lik elekten geçen kısmı kullanılmaktadır. Deney veri formu Ek 2'de sunulmuştur.

Kullanılan malzemelerin Özgöl ağırlık değerleri, laboratuvar deneyleri TS1900-1' e uygun yapılarak belirlenmiştir, deney sonuçları Çizelge 3.7' de verilmiştir.

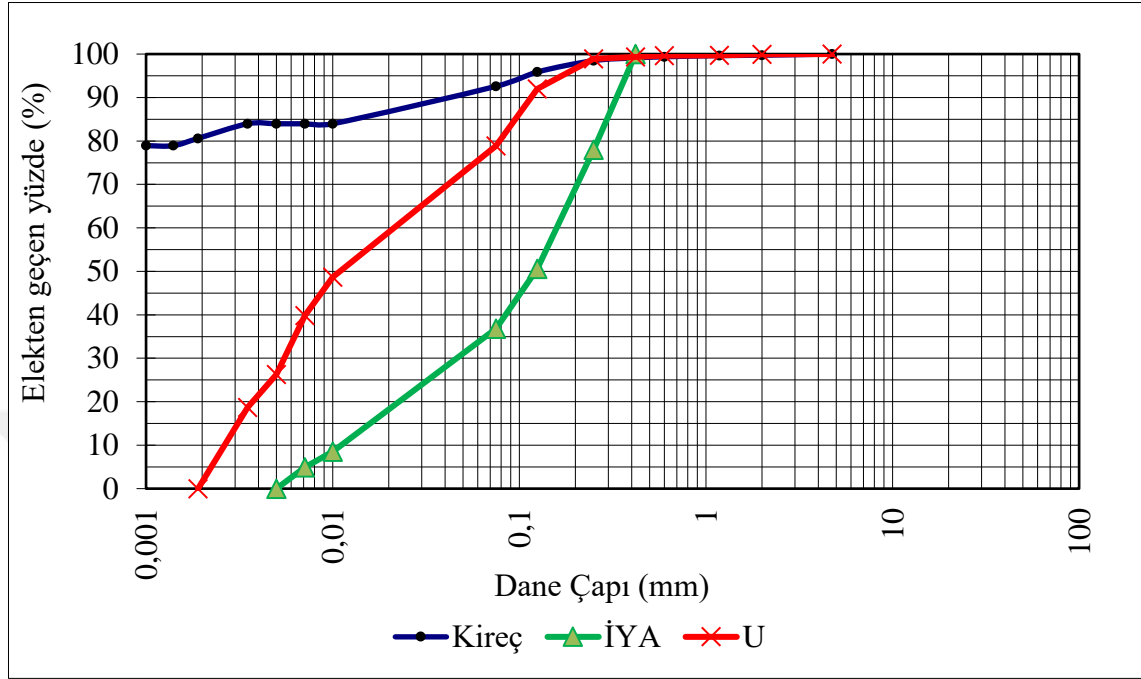


Şekil 3.7. Kilin özgöl ağırlığının deneyi

Çizelge 3.7. Malzemelerin özgöl ağırlıkları

Malzeme	Kil	Kireç	Uçucu Kül	İYA
Ö.A	2,67	2,61	2,41	2,52

Çalışmada kullanılan katkı malzemelerin granülometri eğrileri şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Katkı Malzemelerinin Granülometri Eğrisi

### 3.4. Deney Karışımları

Stabilizasyon yöntemi için içeriğinde sabit %2 kireç (K), değişken oranlarda Uçucu Kül (U) ve/veya inşaat yıkıntı atık (M) malzemelerinin ağırlıkça farklı oranları olan 20 karışım hazırlanmıştır. Bu karışımların içerikleri Çizelge 3.8’ de görülmektedir. Doğal zeminin ve %2 kireç içeren karışımın haricinde, karışımlar 3 farklı matristen oluşmaktadır: birincisi Kil-Kireç-Uçucu kül, ikincisi Kil-Kireç-İnşaat Yıkıntı Atığı ve üçüncüsü tüm malzemeleri kapsayan karışım Kil-Kireç-Uçucu Kül-İnşaat Yıkıntı Atığı’dır.

**Çizelge 3.8.** Hazırlanan Deney Karışımları

No	Kil (%)	Kireç (%)	Uçucu Kül (%)	Moloz (%)	Kod
1	100	0	0	0	%100Kil
2	98	2	0	0	2K
3	93	2	0	5	2K5M
4	88	2	0	10	2K10M
5	83	2	0	15	2K15M
6	78	2	0	20	2K20M
7	73	2	0	25	2K25M
8	68	2	0	30	2K30M
9	63	2	0	35	2K35M
10	93	2	5	0	2K5U
11	88	2	10	0	2K10U
12	83	2	15	0	2K15U
13	78	2	20	0	2K20U
14	73	2	25	0	2K25U
15	68	2	30	0	2K30U
16	88	2	5	5	2K5U5M
17	78	2	10	10	2K10U10M
18	68	2	15	15	2K15U15M
19	83	2	10	5	2K10U5M
20	83	2	5	10	2K5U10M

### 3.5. Standart Proktor Deneyi

Arazide uygulanacak sıkıştırma işleminden önce zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası ilişkisi Proctor (1933) tarafından geliştirilen metotla laboratuvarda belirlenmektedir. Gevşek bir zemin sıkıştırıldığında, zeminin birim hacim ağırlığında bir artış olup zeminde daha yüksek dayanıma neden olmaktadır. Sıkıştırma işlemi uygun yapılmadığı durumlarda, istenmeyen oturmalar olabilmekte gereksiz bakım maliyetleri veya üzerinde inşa edilecek yapıların bozulmasına yol açabilmektedir.

Kompaksiyon yapıldığında:

- Zeminin yük taşıma kapasitesini ve stabilitesi artmaktadır;
- Zeminin geçirgenliğini azaltmaktadır;
- Zeminlerin oturmaları azalmaktadır
- Zeminin don etkisinden zarar görmesini önlemektedir;

- Su sızıntısı, şişmesi ve büzülmesini azaltmaktadır.

Standart Proktor Deneyi, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Bu deneyde, iç çapı 105 mm ve iç yüksekliği 115,5 mm olan bir kabı 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık ve 50 mm çapında dairesel bir tabanı olan tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır. Öncelikle, kurutulmuş zemin numunesine bir miktar su ilave edilerek karıştırılmaktadır. Hazırlanan numune 3 tabaka halinde normalize kap içinde her seferinde kabın 1/3' ü kadar doldurularak sıkıştırılmaktadır (TS 1900-1). Proktor deneyinde kullanılan deney aletleri Şekil 3.9' de gösterilmiştir.

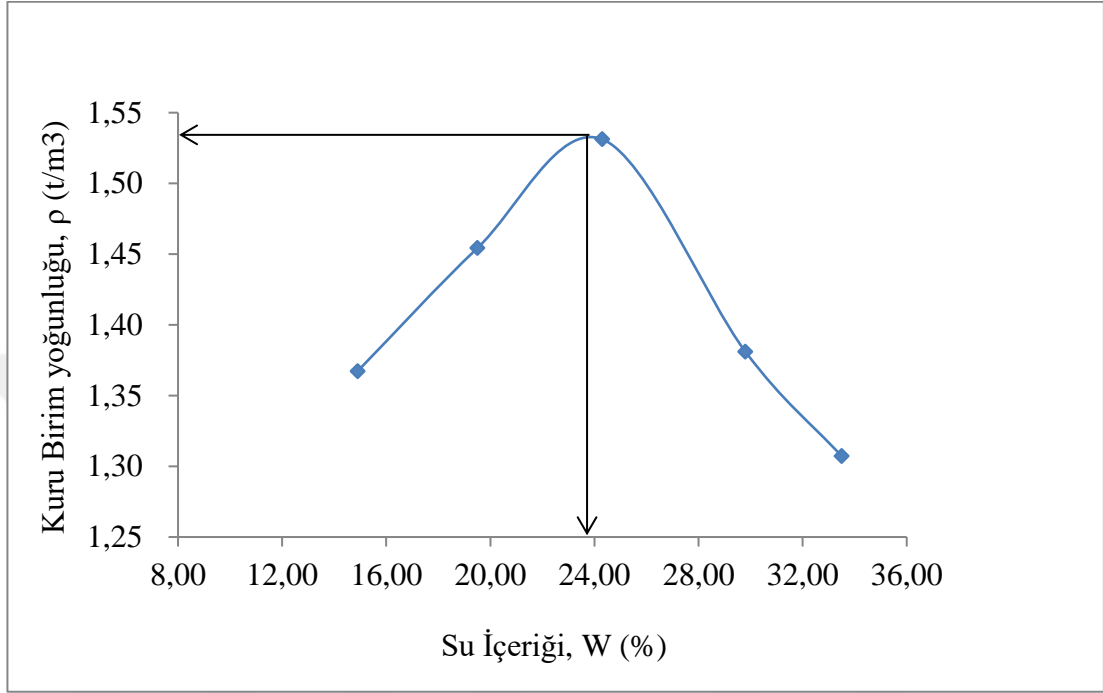


**Şekil 3.9.** Proktor deneyinde kullanılan alteler

Kalıp sıkıştırılmış zemin ile tamamen dolduktan sonra kap üzerindeki fazlalıklar çelik cetvelle tıraşlanmaktadır. Bundan sonra sıkıştırılmış zeminin yoğunluğu veya birim hacim ağırlığı hesaplanabilmektedir. Numunenin üst yüzeyi iyice düzeltildikten sonra tartılıp ağırlığı kaydedilmektedir. Aynı zeminden alınacak örneklerden su muhtevası belirlendikten sonra kuru birim hacim ağırlığı hesaplanmaktadır (EK 3). Deney bir kaç kere tekrarlanarak zeminin su muhtevası ile sıkıştırılmış kuru yoğunluğu arasındaki ilişki saptanarak sonuçlar grafik üzerinde gösterilmektedir.



Çalışmada kullanılan kilin kompaksiyon deneyi yapılarak proktor eğrisi çizilmiştir ve çizilen grafik Şekil 3.10' da gösterilmiştir. Bu eğri yardımıyla zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum nem içeriği belirlenmiştir.



Şekil 3.10. Zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası grafiği

### 3.6. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi üç eksenli basınç deneyinin özel bir hali olup, sadece eksenel yönde yükleme yapılmaktadır. Serbest basınç deneyi ya da tek eksenli basınç deneyi ince daneli zeminlerin drenajsız kayma dayanımını belirlemek için uygulanmaktadır. Bu deney sadece kohezyonlu zeminlere uygulanabilmekte olup kuru ya da kohezyonsuz zeminlerde uygulanamamaktadır (Das 1997). Serbest basınç deneyinde yanal basınç yoktur, fakat ekonomik olması ve çabuk sonuç vermesi sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Numunenin kırıldığı gerilme değeri, numunenin serbest basınç mukavemeti olarak tanımlanmaktadır.



a.

b.

**Şekil 3.11.** Tek eksenli basınç aleti (a) ve kırılmış bir numune (b)

Serbest basınç deneyinde kullanılacak numunenin boyunun, çapının 2 katı olması gerekmektedir ( $H/D \geq 2$ ). Öncelikle deney başlangıcında numunenin çapı ve boyu ölçülmekte ve ağırlığı belirlenmektedir. Numune serbest basınç aletinin içine iki plak arasına yerleştirilmekte ve üst tabaka tam olarak numunenin üst yüzeyine gelecek şekilde ayarlanmaktadır (Şekil 3.11 (a)). Bu deney için yükleme hızı 0.5-1 mm/dak aralığında olmaktadır. Aletin yük halkası saati ve düşey deformasyon saati sıfırlandıktan sonra yükleme başlatılmaktadır. Numune iki plaka arasında sıkıştırılır ve deformasyon saatindeki her 0.20 mm deformasyon aralığında okuma saatlerinden değerler okunarak kaydedilmektedir (EK 4). Okumalar en yüksek değere ulaşip düşmeye başlayıncaya kadar ya da numune kırılana kadar (Şekil 3.11 (b)) alınmaktadır. TS 1900'e göre deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Yükleme bittikten sonra numune 0.01 gr duyarlıklı tartıda tartıldıktan sonra su muhtevası tespit edilmek üzere etüve konulmaktadır (Das, 1997).

Çalışmada tek eksenli basınç dayanımını belirlemek için hazırlanan silindirik numunelerden örnek fotoğraflar Şekil 3.12' de verilmiştir. Kullanılan kilin serbest

dayanımı 1,14 kg/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Bu dayanım günümüzdeki inşaat projelerine göre çok düşüktür, bu sebeple iyileştirmesi gerekmektedir.



Şekil 3.12. Tek eksenli basınç için hazırlan silindirik numuneler

### 3.7. Odometre Şişme Deneyi

#### 3.7.1. Şişme yüzdesi

Literatürde zeminlerin şişme potansiyeli yaklaşık değerlerini elde etmek için kullanılabilir birçok yöntem bulunmaktadır. Fakat odometre yöntemi kolay olduğundan en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (El Fatih ve Muawia 1984). Bir zeminin şişme potansiyeli, o zemin belirli bir sürşarj yükü altında suya doymun hale gelinceye kadar oluşan hacim artışının, numunenin başlangıçtaki hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$S_w = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Zeminlerin şişme potansiyelini, birçok parametre etkilemektedir. Zeminin içinde bulunan kil yüzdesi, kil mineralinin cinsi, arazideki gerilme şartları, zeminin kuru birim hacim ağırlığı, danelerin yerleşim biçimi, zeminin başlangıçtaki su muhtevası, suya doymunluk derecesi, boşluk oranı, geçirgenlik, dış yükler, iklim şartları, çevresel şartlardaki değişiklikler gibi faktörler sayılabilmektedir (Keskin, 1993).

Çalışmada, şişme davranışını incelemek için odometre cihazı (D=75 mm, H=20mm) kullanılmıştır. Numuneler, odometre kalıbına optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı durumunda yerleştirilmiştir. Bu işlemden sonra numuneye bir ön yükleme (7 kPa) yapılmış ve suya boğulmuştur ve 24 saat sonra şişme miktarı ölçülmüştür (Şekil 3.13). Deney sonuçları şişme yüzdesi-malzeme katkısı miktarları değerlendirilerek irdelenmiştir. Her katkı seviyesi için 24 saat sonunda ölçülen şişme yüzdesi değerlerinin ortalaması alınmıştır. Seed ve ark. (1962) tarafından yapılan bir çalışmada sıkıştırılmış zeminlerin şişme potansiyelinin değerlendirilebilmesi için Çizelge 3.9' da gösterilen aralıkların kullanılması önerilmiştir.

**Çizelge 3.9.** Odmetre şişme potansiyeli (Seed ve ark. 1962)

Şişme yüzdesi	Şişme potansiyeli
0 – 1,5	Düşük
1,5 – 5,0	Orta
5,0 - 25	Yüksek
> 25	Çok Yüksek

### 3.7.2. Şişme basıncı

Şişme basıncı, bir zeminin su içeriğinin artması sonucunda oluşacak hacim değişikliğinin olmasına izin vermemek için uygulanması gereken basınç olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle zeminin başlangıçtaki hacmini sabit tutmak için uygulanması gereken basınçtır. Serbest şişme tamamlandıktan sonra, şişme saati sıfır olana kadar yükler eklenmektedir. Şişme basıncı, bu uygulanan yükün toplam basıncı olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.13. Odometre şişme deneyi

## **4. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Atık malzeme olarak Bursa’ da kolaylıkla elde edilebilecek olan Orhaneli Termik Santrali’n den Uçucu Kül ve kentsel dönüşüm dolayısı ile depolama sorununa yol açan inşaat yıkıntı atıkları seçilmiştir. Bu amaçla, Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsünden elde edilen yüksek plastisiteli killi bir zemin üzerinde sabit oranda kireçle birlikte farklı oranlarda Orhaneli Uçucu Külü ve inşaat yıkıntı atığı ile deneyler yapılmıştır. Orhaneli uçucu külünün kimyasal deney sonuçları incelendiğinde, içeriğindeki CaO oranının %25 olması nedeniyle C tipi uçucu kül olarak sınıflandırılmıştır (Tumluer 2006). Kireç ise, uzun yıllardır zemin iyileştirmesi için kullanılan malzemelerin başında gelmektedir (Önalp 1983; Tabataba 1997; Yıldız ve ark. 2004; Kavak ve ark. 2008). Atık malzemelerinin yanında belli oranda kireç kullanarak İYA ve UK etkisinin artırılması hedeflenmiştir.

Bu karışımlar üzerinde, optimum su muhtevsındaki değişiklikleri belirlemek için kompaksiyon deneyi, mukavemetindeki artışı gözlemlemek amacıyla 3, 7 ve 28 gün bekletilmiş numuneler üzerinde serbest basınç deneyi, konsolidasyon ile şişme potansiyeli deneyi ve 28 gün bekletilen ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan numuneler üzerinde Atterberg limitleri deneyi yapılmıştır. Bu deneyler ile ilgili sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

### **4.1. Zemin, Kireç ve Moloz Karışımları**

#### **4.1.1. Kompaksiyon deney sonuçları**

Standart Kompaksiyon Deneyi, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi standartlara göre sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru yoğunluğu veren optimum su muhtevasının bulunması ile ilgilidir.

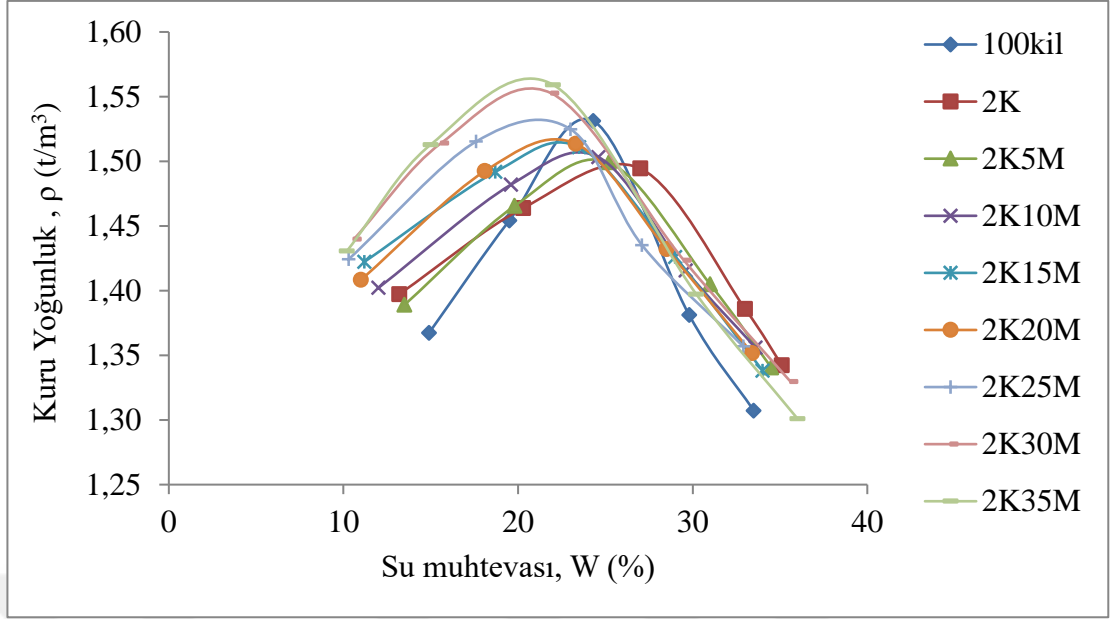
Karışımların kompaksiyon deney sonuçlarına göre elde edilen maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su muhtevaları Çizelge 4.1.’ de özetlenmiştir. Çizelgeden da anlaşılacağı gibi maksimum kuru yoğunluk artışına en fazla %2 Kil ve %35 İYA kullanıldığında ulaşılmıştır, bu karışımda optimum su muhtevası ise en küçük değer olan %20,3 olarak bulunmuştur.

Kullanılan Kireç, diğer malzemelere göre en yüksek inceliği sahip olduğundan numunede bulunması ile toplam yüzey alanı arttığından su ihtiyacı artar. İnşaat atığı ise diğer malzemelere kıyasla inceliği daha az olduğundan su ihtiyacı azalmıştır.

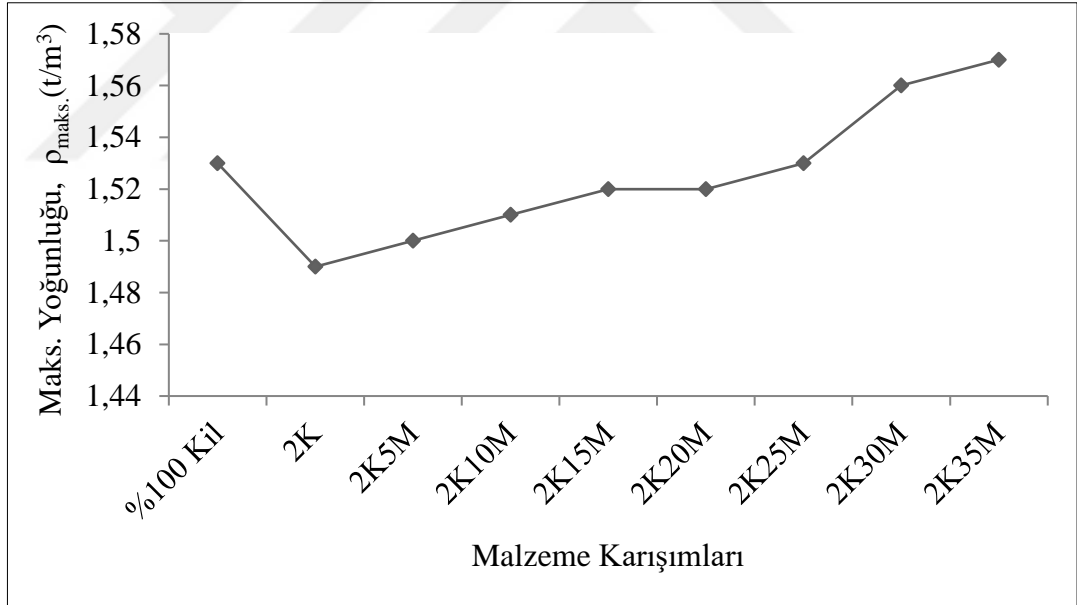
Farklı oranlarda inşaat yıkıntı atığı içeren karışımların kompaksiyon deney sonuçları Şekil 4.1.' de verilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi, %2 kireç eklendiğinde zeminin optimum su içeriği artarken (yaklaşık %10 oranında) maksimum kuru yoğunluğu (yaklaşık %2.5) düşmüştür. Zemine İYA eklendiğinde ise tam tersi bir davranış ortaya çıkmıştır ve İYA oranı arttıkça optimum su muhtevası değeri %15'e kadar düşmüş ve maksimum kuru yoğunluğu ise çok az artmıştır. Başka bir deyişle, kile moloz karışımı eklemek, zeminin kuru yoğunluğunu yani sıkışabilirliğini fazla değiştirmemiştir. Karışımların maksimum kuru yoğunluğunun ve optimum su muhtevasının değişimleri sırasıyla Şekil 4.2'de ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Kompaksiyon deney sonuçları

Karışım	Mak. Kuru Yoğunluğu (t/m <sup>3</sup> )	Optimum Su (%)
% 100 Kil	1,53	23,9
2K	1,49	26,0
2K5M	1,50	24,8
2K10M	1,51	23,9
2K15M	1,52	23,1
2K20M	1,52	22,5
2K25M	1,53	21,0
2K30M	1,56	20,5
2K35M	1,57	20,3

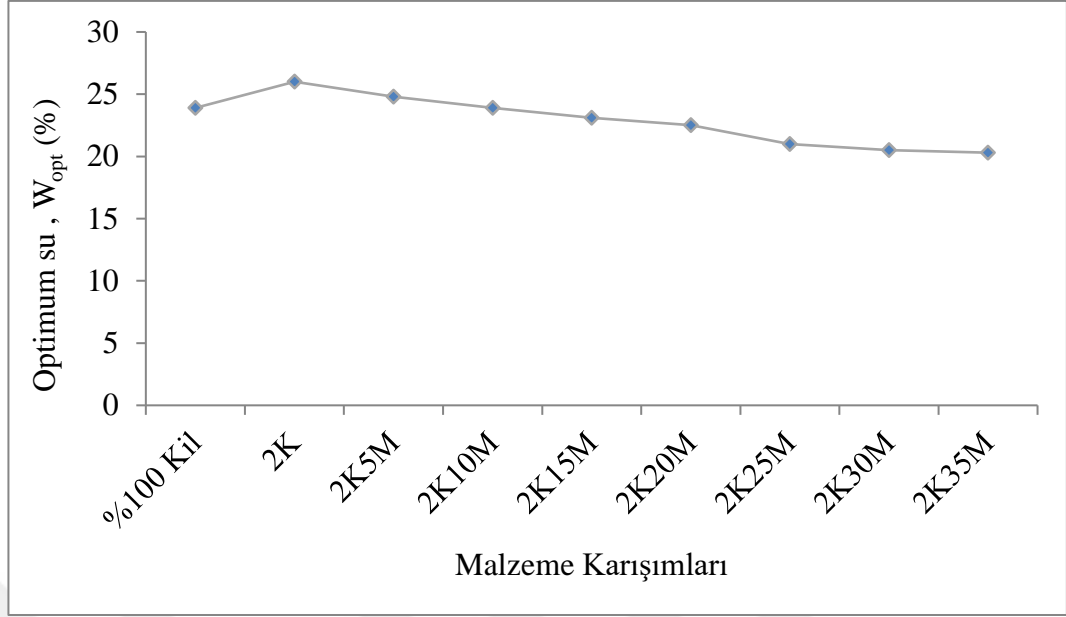


Şekil 4.1. Zemin, Kireç ve Moloz (İYA) karışımlarının kompaksiyon grafikleri



Şekil 4.2. Kilin maksimum kuru birim hacim yoğunluğuna İYA katkısının etkisi





**Şekil 4.3.** Kilin optimum su muhtevasına İYA katkısının etkisi

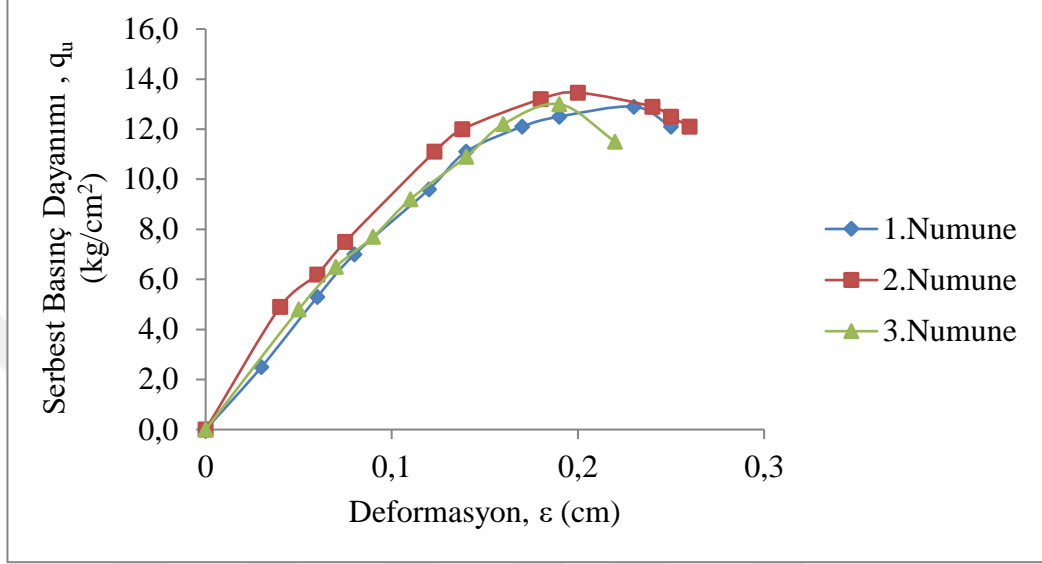
#### 4.1.2. Serbest basınç deney sonuçları

Çalışmada, serbest basınç dayanımını belirlemek amacıyla hem doğal zemin, hem de zemin ve katkı malzemelerle hazırlanan karışımlar serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Karışımların serbest basınç mukavemetinin belirlenmesinde, belirli zamanlarda (3, 7 ve 28 gün) 3' er tane silindirik numune deneye tabi tutulup alınan sonuçların ortalamasını hesaplayarak belirlenmiştir. Örnek olarak 2K20M karışımın ait olan sonuçları Şekil 4.4' de gösterilmiştir. Geri kalan karışımlar için de aynı yöntem kullanılmıştır, sonuçlarda hesaplanan ortalama değer gösterilmiştir.

Serbest basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.2' de ve Şekil 4.5' te özetlenmiştir. Serbest basınç deneyi sonucunda, İYA arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı saptanmıştır. Dayanımlardaki artış, kireç ve inşaat atığı eklenmesi ile karıştırılmış malzemenin tane dağılımı değiştiğinden ve ortaya çıkacak kimyasal reaksiyonlarından kaynaklanabilmektedir. Bunun yanı sıra, %20 İYA sonrası zeminin mukavemetinin pek değişmediği gözlenmiştir (Şekil 4.5).

Ayrıca, Şekil 4.5' ten de anlaşılacağı gibi zeminin mukavemetinin kür ile bir miktar arttığı belirlenmiştir. Kür süresi ile ilgili artış, düşük İYA oranlarında (%5-15) 3 ile 7 gün

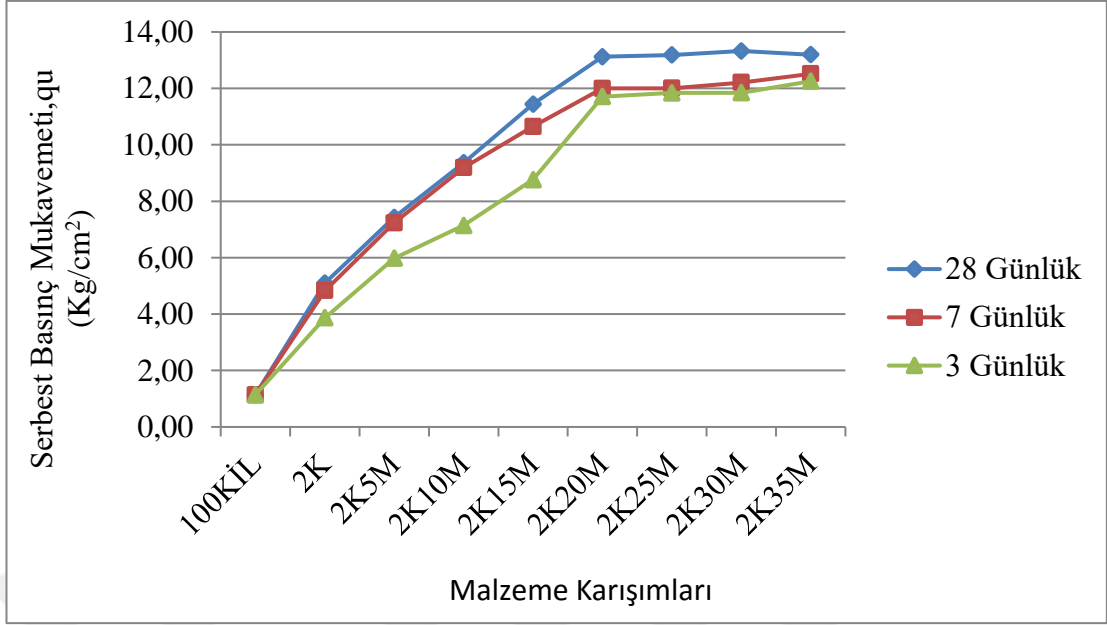
arasında belirginken, yüksek İYA oranlarında (%20-30) 7 ile 28 gün arasında belirgin hale gelmiştir. %35 İYA kullanımında ise kür süresinin pek bir etkisi gözlemlenmemiştir. Bu da, optimum İYA kullanımında kür sürelerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki önemine işaret etmektedir.



Şekil 4.4. 28 Günlük Kür Süresinde 2K20M Karışıma Ait Olan Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Çizelge 4.2. Zemin, Kireç ve Moloz karışımlarının mukavemetleri

Numune	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		
	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
% 100kil	1,14	1,16	1,16
2K	3,87	4,83	5,10
2K5M	7,98	7,23	7,42
2K10M	7,14	9,19	9,36
2K15M	8,76	10,65	11,44
2K20M	11,71	12	13,12
2K25M	11,84	12	13,18
2K30M	12,18	12,58	13,99
2K35M	12,59	12,84	13,19



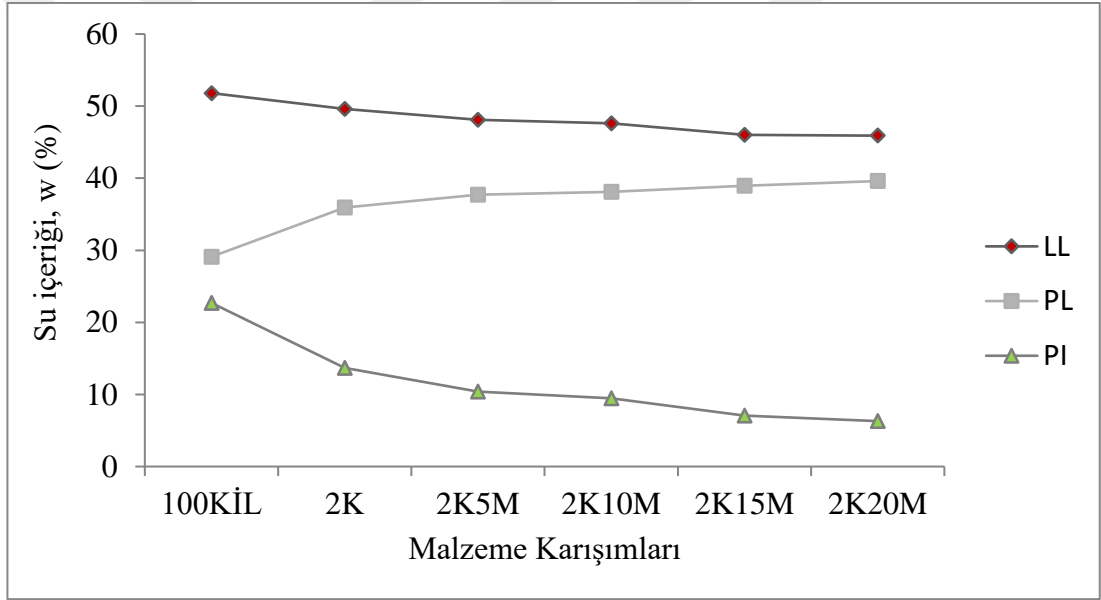
Şekil 4.5. Malzeme karışımlarının serbest basınç dayanımınlarında kür süresinin etkisi

#### 4.1.3. Atterberg limit deney sonuçları

Zeminlerin işlenebilirliğinin artmasının, zeminin plastisite indeksinin (PI) azalması ile ilişkili olduğundan daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir (Mallela ve ark. 2004). Zeminin plastisitesinin üzerinde katkı malzemelerinin etkisini belirlemek amacıyla karışımların Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, karışımlar hazırlandıktan sonra 28 gün bekletilen ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan numuneler kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.3' te ve Şekil 4.6' da özetlenmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı gibi yüksek plastisiteli (CH) olan kile, %2 kireç eklendiğinde plastisite indisi 22.70' den 13.68' e kadar düşmüştür ve karışımın zemin sınıfı yüksek plastisiteli kilden düşük plastisiteli silt (ML) olarak değişmiştir. Farklı yüzdelerde İYA eklendiğinde de bu değer düşmeye devam etmiştir. Eklenen İYA miktarı %20' yi geçtikten sonra, zemin tamamen plastisitesini kaybedip plastik olmayan (NP) bir malzeme olmuştur.

Çizelge 4.3. Karışımların kıvam limit değerleri.

	LL	PL	PI	SINIF
%100Kil	51,80	29,10	22,70	CH
2K	49,60	35,92	13,68	ML
2K5M	48,10	37,70	10,40	ML
2K10M	47,60	38,12	9,48	ML
2K15M	46,02	38,97	7,05	ML
2K20M	45,90	39,60	6,30	ML
2K25M	-	-	-	NP
2K30M	-	-	-	NP
2K35M	-	-	-	NP



Şekil 4.6. Atterberg Limitlerin değişimleri

#### 4.1.4. Şişme deney sonuçları

Killerdeki şişme potansiyeli büyük problemlere yol açmaktadır. Killi zeminlerin yüksek şişme potansiyelleri, üzerinde oturan yapılarda ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Şişen killer dünyanın birçok bölgesinde bulunmakta ve üzerlerindeki yapılar için sorun teşkil edebilmektedir. Killerin şişmeleri hidrasyon olayı ile ilişkilidir. Ancak tüm killer hidrate olduğunda şişmez. Örneğin, kaolin grubunda olanlar, hidrasyonda çok az veya hiç şişme göstermezler. Montmorillinit killerin ise şişme potansiyeli çok yüksektir. Killerin

şişme özelliklerinde görülen farklılıklar kimyasal bileşimlerine, yapılarındaki izomorf değişimlerin cinsine ve derecesine ve değiştirilebilen katyonların miktarına ve tipine bağlıdır (Margaret 1995).

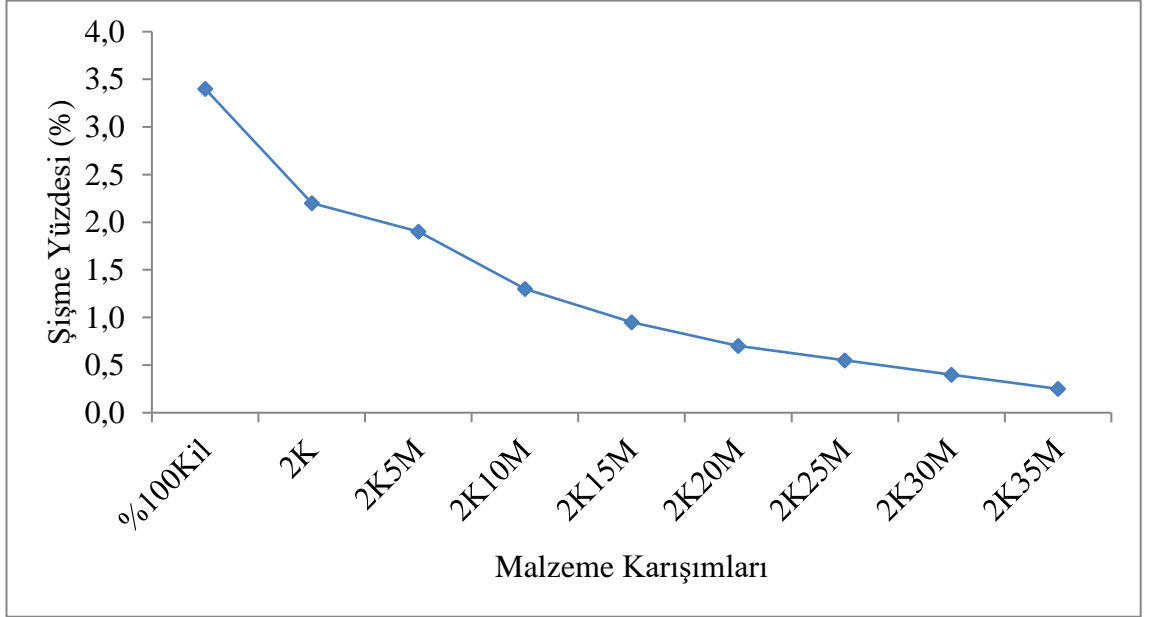
Çalışmada kullanılan killin şişmesi odometre deneyi ile %3,4 olarak belirlenmiş. Farklı malzemeler ile stabilizasyon yapıldıktan sonra şişme potansiyelinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Odometre şişme deneyi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Optimum nem ve maksimum yoğunluk durumunda şişme yüzdesi %3,4 olan killi zeminin, %2 kireç ve farklı yüzdelerde İYA eklenmesiyle, şişme potansiyeli önemli ölçüde düşmüştür. İYA' ların yüzdesi artarken, zeminin şişme potansiyelinin düşmeye devam ettiği görülmüştür. Zemine %2 kireç ile %5 İYA katıldığında, Seed ve ark. (1962) göre zeminin şişme potansiyelinin düşük seviyede olduğu görülmüştür. Kile %2 kireçle %35 İYA katıldığında ise kilin şişme potansiyelinin %0,35'e kadar düştüğü görülmüştür (Şekil 4.7).

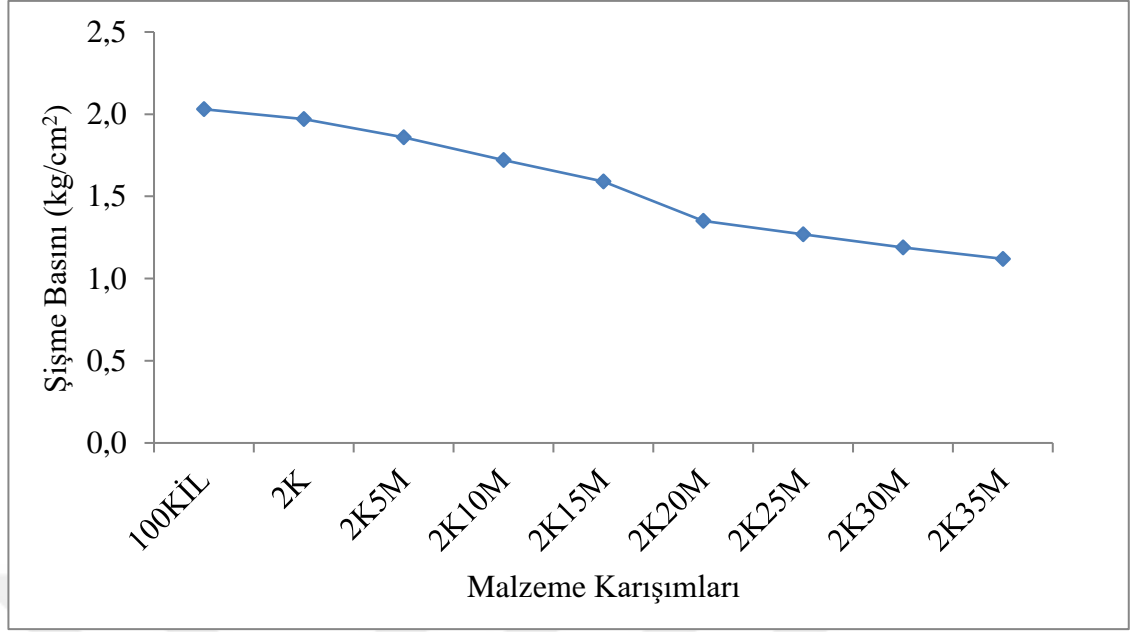
Şişme basınç değerlerinin, katkı malzemelerin yüzdeleri arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Zemine %2 kireçle %5 ten %35'e kadar İYA katıldığında, şişme basıncı 2,03 kg/cm<sup>2</sup> den 1,12 kg/cm<sup>2</sup> kadar azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.8).

#### Çizelge 4.4. Şişme deneyi sonuçları

Karışım	Şişme yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kg/cm <sup>2</sup> )	Şişme Potansiyeli
%100Kil	3,40	2,03	Orta
2K	2,20	1,97	Orta
2K5M	1,90	1,86	Düşük
2K10M	1,30	1,72	Düşük
2K15M	0,95	1,59	Düşük
2K20M	0,70	1,35	Düşük
2K25M	0,55	1,27	Düşük
2K30M	0,40	1,19	Düşük
2K35M	0,35	1,12	Düşük



Şekil 4.7. Katkı malzemelerinin yüzdelere göre şişme yüzdesi değişimi



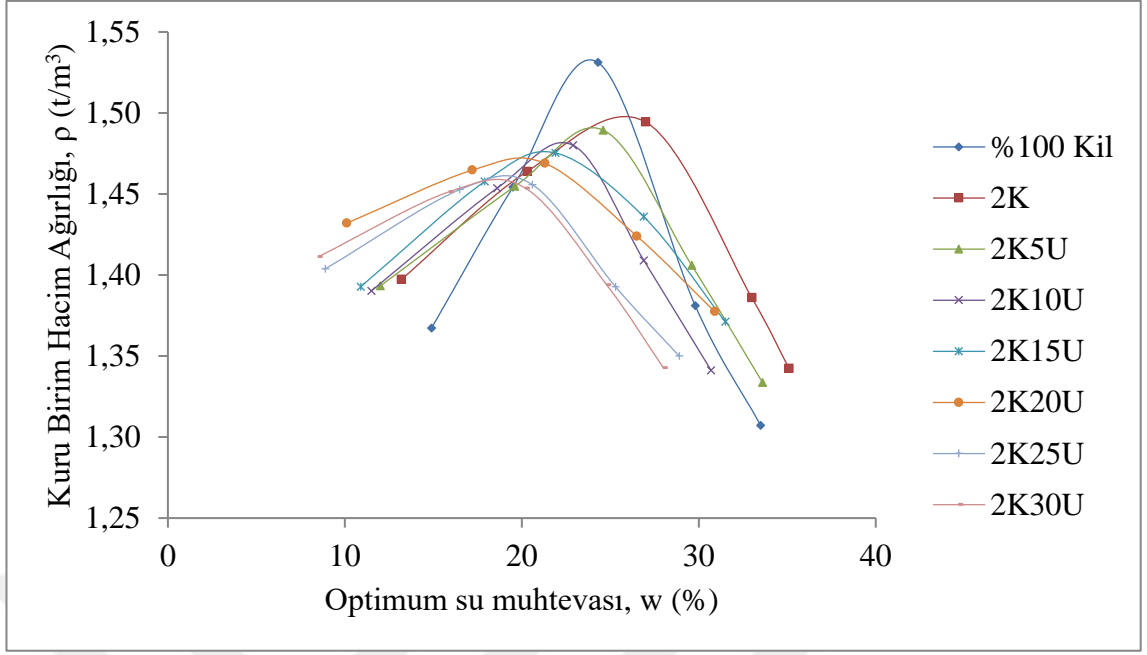
**Şekil 4.8.** Katkı malzemelerinin yüzdelere göre göre şişme basıncı değişimi

## 4.2. Zemin, Kireç ve Uçucu Kül Karışımları

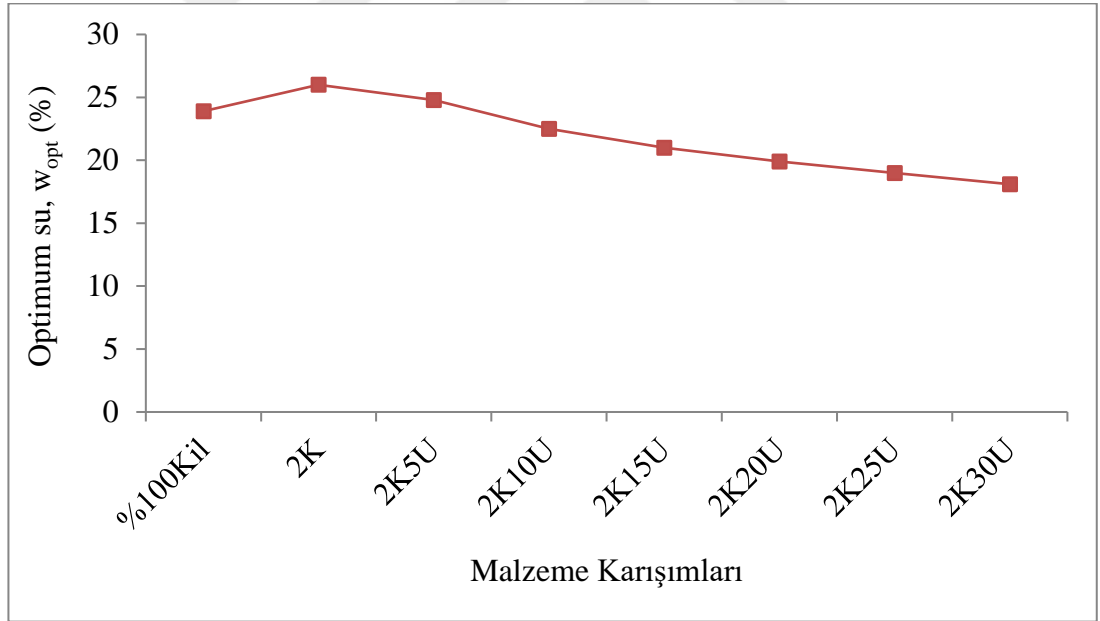
### 4.2.1. Kompaksiyon deney sonuçları

Karışımlarda su muhtevası artırılarak, kuru yoğunluğun maksimum noktaya ulaşması hedeflenmektedir. Daha fazla su eklenmesi ise, kuru yoğunluğun azalmasına neden olabilmektedir. Optimum su muhtevası, maksimum kuru yoğunluğa karşılık gelen su içeriğidir. Kuru yoğunluklar ve karşılık gelen su muhtevaları yardımıyla karışımların kompaksiyon grafikleri çizilmiştir. Uçucu kül içeren karışımların proktor deney sonuçları Şekil 4.9' da gösterilmektedir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11' den görüldüğü üzere kile %2 kireç ilave edildiğinde, optimum su miktarı artmış ve maksimum kuru yoğunluk azalmıştır. Uçucu kül ise, hem optimum su miktarını hem de maksimum kuru yoğunluğu azaltmıştır. %2 kireç ile uçucu kül içeriği %0' dan %30' a yükseldiğinde, maksimum kuru yoğunluğu 1,53 t/m<sup>3</sup> 'ten 1,42 t/m<sup>3</sup>'e kadar düşmüştür.

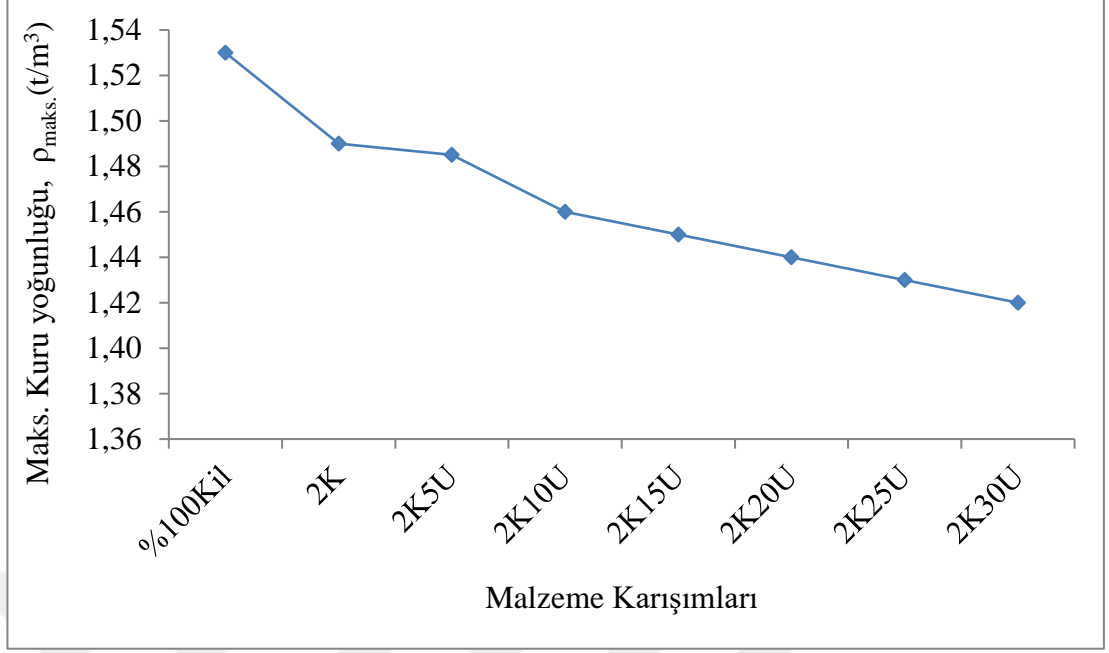


Şekil 4.9. Zemin, Kireç ve Uçucu Kül karışımlarının kompaksiyon grafikleri



Şekil 4.10. Kilin su muhtevasına UK katkısının etkisi





Şekil 4.11. Kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığına UK katkısının etkisi

Çizelge 4.5. Karışımların kompaksiyon deney sonuçları

Karışım	Maks. Kuru Yoğunluk ( $t/m^3$ )	Optimum Su (%)
% 100Kil	1,53	23,9
2K	1,49	26,0
2K5U	1,49	24,8
2K10U	1,46	22,5
2K15U	1,45	21,0
2K20U	1,44	19,9
2K25U	1,43	19,0
2K30U	1,42	18,1

#### 4.2.2. Serbest basınç deney sonuçları

%2 kireç ve %5, %10, %15, %20, %25, %30 uçucu kül oranları ile hazırlanan numuneler 3 gün, 7 gün ve 28 gün kür edildikten sonra, serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur,

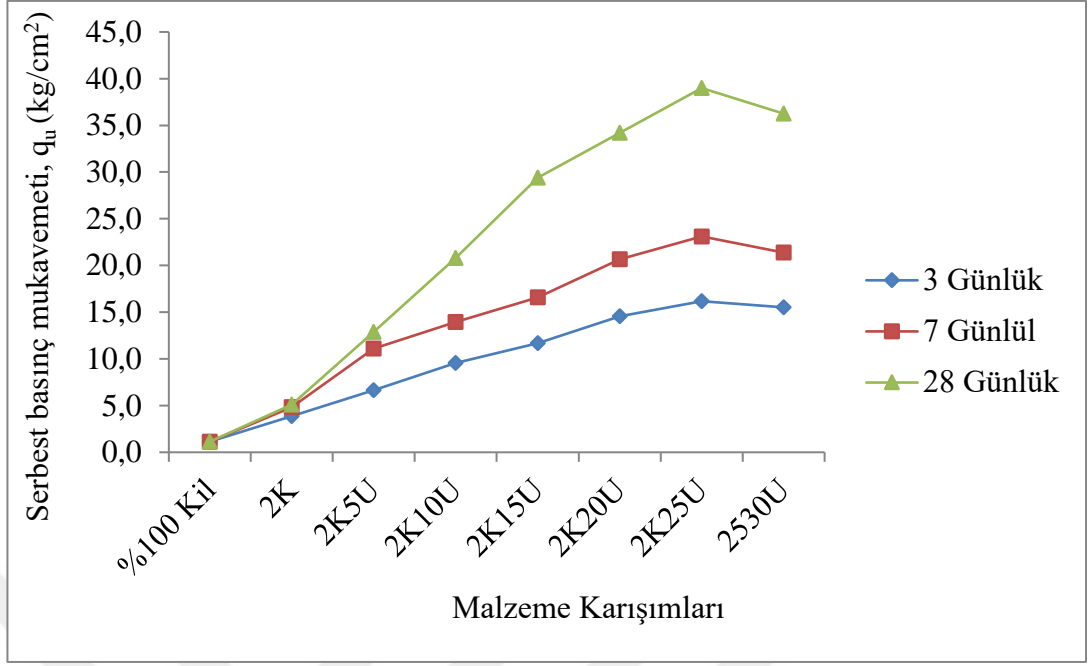
sonuçlar izelge 4.6' da özetlenmiştir. Grafiksel gösterimi ise Şekil 4.12' de verilmiştir. Şekilde, %2 kireç ile farklı uçucu kül yüzdelerinin killi zemin üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Bu sonuçlar, ağırlıkça %25'e kadar uçucu kül ilavesiyle zeminin serbest basıncı dayanımında net bir artış olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, numuneler 28 gün kür edildikten sonra ve uçucu kül oranı %25'e ulaştığında serbest basıncı dayanımının maksimum değerine ulaştığını göstermiştir. Uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin serbest basıncı dayanımını etkileyen ana değişkenlerden biri kr sresidir, bunun sebebi puzolanik reaksiyondur. Puzolanik reaksiyon, zamana ve nem içeriğine ve uçucu külün kimyasal bileşenlerine bağlıdır.

Serbest basıncı deneylerinden elde edilen sonuçlar, kireç ve Orhaneli Uçucu Külü ile killi zeminlerin stabilizasyonunda zeminin taşıma gücünü artırmak için etkili bir alternatif olduğunu göstermiştir. Deney sonuçlarına göre, zayıf killi zemini güçlendirmek için en iyi zemin-kireç-uçucu kül oranı sırasıyla %73-%2-%25'tir.

**Çizelge 4.6.** Serbest basıncı deneyi sonuçları

Numune	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )		
	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
%100kil	1,40	1,16	1,16
2K	3,87	4,83	5,10
2K5U	6,65	11,11	12,87
2K10U	9,56	13,94	20,80
2K15U	11,68	16,59	29,40
2K20U	14,56	20,67	34,21
2K25U	16,17	23,11	38,99
2K30U	15,53	21,37	36,27



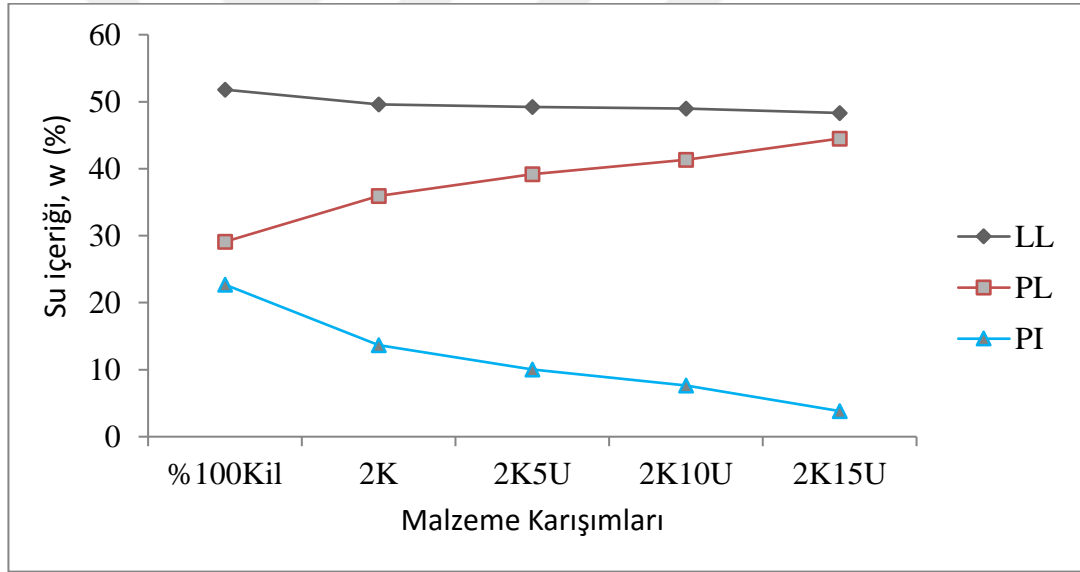
Şekil 4.12. Malzeme karışımlarının serbest basınç mukavemetleri

#### 4.2.3. Atterberg limit deney sonuçları

Zemin, kireç ve uçucu kül karışımlarının kıvam limitlerinin değişimlerini bulmak amacıyla, 28 gün kür edilen numuneler üzerinde, TS-1900'a göre Atterberg Limit deneyleri yapılmıştır. Yüksek plastisiteli kile %2 kireç ve farklı oranlarda uçucu kül ilavesiyle, likit limiti (LL) Çizelge 4.7'e ve Şekil 4.13' te görülebileceği gibi, zemine kireç ve uçucu kül ilavesiyle likit limitinde (LL) hafif, plastisite endeksinde (PI) net bir düşüş gözlenmiştir. Zemine %2 kireç ve % 15 uçucu kül eklendiğinde PI değerinin 22,70' den 3,83' e düştüğü görülmüştür. %2 kireç ve % 15' ten fazla uçucu kül eklendikten sonra kil plastisiteni tamamen kaybederek plastik olmayan (NP) bir zemin olmuştur.

**Çizelge 4.7.** Karışımların kıvam limit değerleri

	LL	PL	PI	SINIF
% 100Kil	51,80	29,10	22,70	CH
2K	49,60	35,92	13,68	ML
2K5U	49,22	39,2	10,02	ML
2K10U	48,96	41,32	7,64	ML
2K15U	48,32	44,50	3,82	ML
2K20U	-	-	-	NP
2K25U	-	-	-	NP
2K30U	-	-	-	NP



**Şekil 4.13.** %2 kireç ile uçucu kül karışımlarının atterberg limitlerinin üzerinde etkisi

#### 4.2.4. Şişme deneyi sonuçları

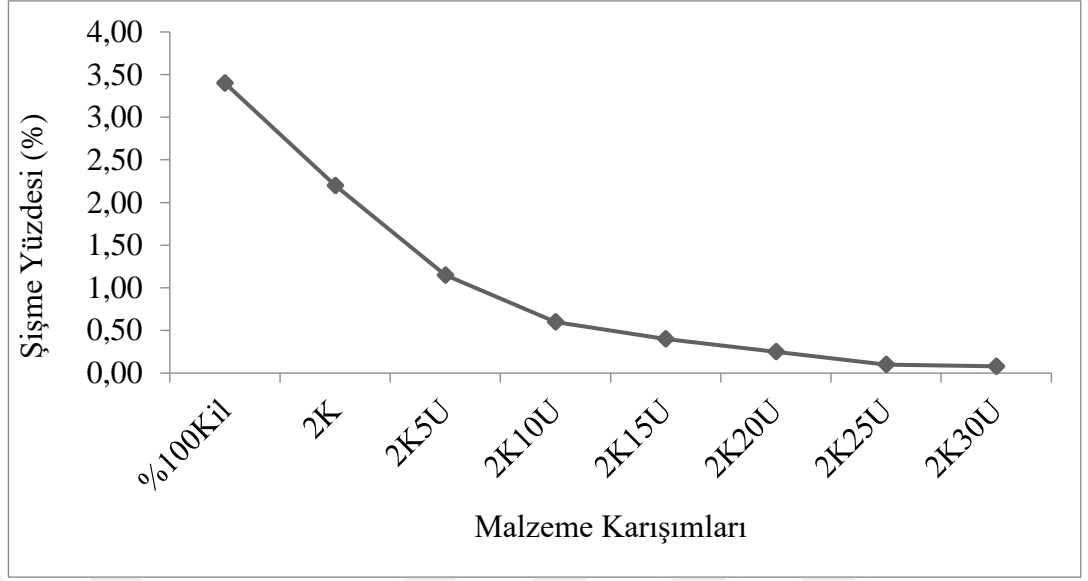
Atık malzeme olarak zemine katılan Orhaneli Uçucu Kül'ünün şişme üzerinde olan etkisi odometre deneyi yardımıyla belirlenmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlara göre, %2 kireçle değişik oranlarda uçucu kül ile hazırlanan karışımların şişme potansiyelinde azalma görülmüştür (Çizelge 4.8). Uçucu kül miktarı artkça zeminin şişme potansiyeli

azalmaktadır. Zemine %2 kireç ile %5 oranında uçucu kül katıldığında, Seed ve ark. (1962) göre şişme potansiyeli düşük seviyesinde olduğu görülmüştür. Uçucu kül yüzdesi 30' a çıktığında, şişme potansiyelinin %0,08'e kadar düştüğü belirlenmiştir (Şekil 4.14). Kile İYA' ları gibi, Orhaneli Uçucu Külü katıldığında da, şişme basıncının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.15).

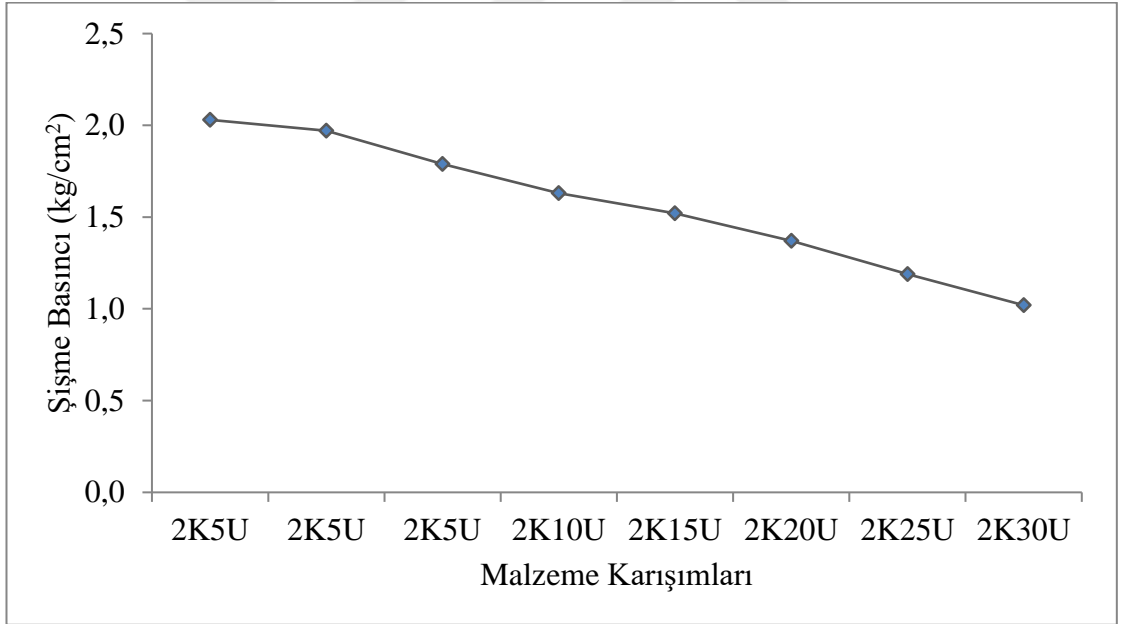
Killi zeminlerin stabilizasyonunda, kireç ve Orhaneli Uçucu Külü kullanılması, zeminin geoteknik özelliklerinde önemli bir iyileştirme sağlamaktadır. Uçucu kül kullanımı, çimento gibi genel katkıların kullanılmasına alternatiftir ve olumlu bir çevresel etkiye sahiptir.

**Çizelge 4.8.** UK içeren karışımların şişme deneyi sonuçları

Karışım	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kg/cm <sup>3</sup> )	Şişme Potansiyeli
%100Kil	3,40	2,03	Orta
2K	2,20	1,97	Orta
2K5U	1,15	1,79	Düşük
2K10U	0,60	1,63	Düşük
2K15U	0,40	1,52	Düşük
2K20U	0,25	1,37	Düşük
2K25U	0,10	1,19	Düşük
2K30U	0,08	1,02	Düşük



Şekil 4.14. %2 kireç ile farklı uçucu kül yüzdelerine göre şişme yüzdesi değişimi

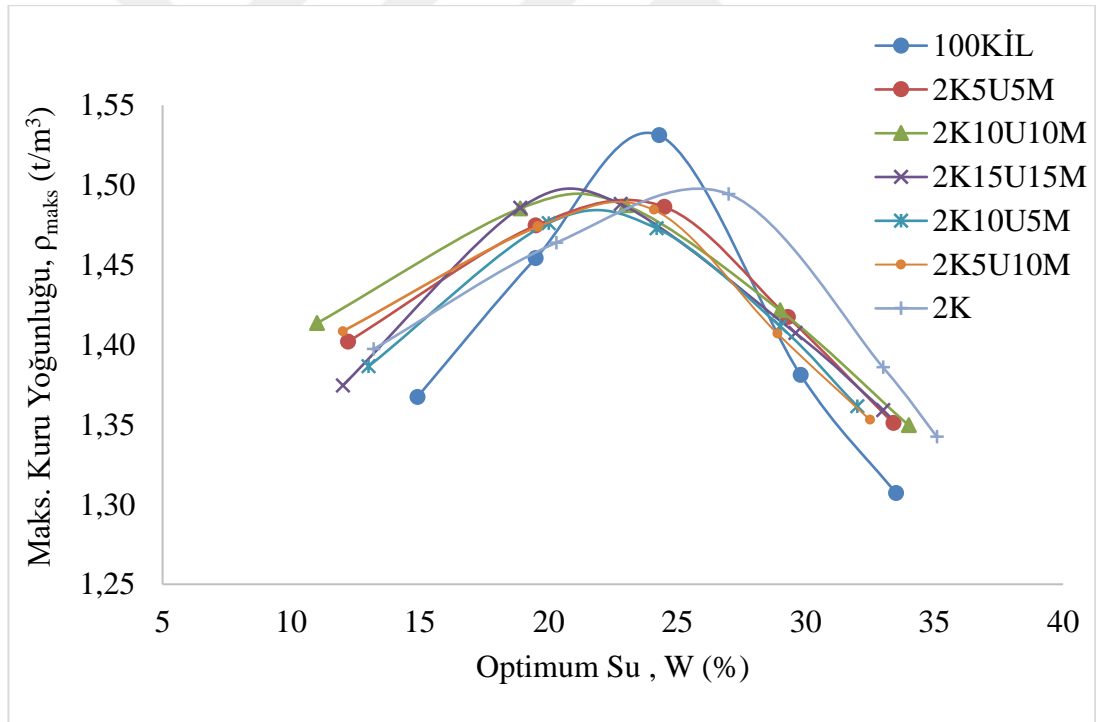


Şekil 4.15. Kireçle uçucu külün yüzdelerine göre şişme basıncı değişimi

### 4.3. Zemin, Kireç, Moloz ve Uçucu Kül Karışımları

#### 4.3.1. Kompaksiyon deney sonuçları

Bu bölümde, farklı oranlarda uçucu kül ve inşaat yıkıntı atıklarının birlikte kullanılması ile hazırlanan karışımların zemin iyileştirmeye olan etkisi incelenmiştir. Hazırlanan karışımlar sabit %2 kireç ve değişen oranlarda (%5 UK ve %5 İYA; %10 UK ve %10 İYA; %15 UK ve %15 İYA; %10 UK ve %5 İYA; %5 UK ve %10 İYA) uçucu kül ve moloz karışımları içermektedir. Zemin, kireç, uçucu kül ve inşaat yıkıntı atığı karışımlarının kompaksiyon deney sonuçlarına göre elde edilen maksimum kuru yoğunluklar ve optimum su muhtevaları Çizelge 4.9' da özetlenmiştir ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre optimum su miktarında düzenli bir azalma olmadığı gibi maksimum kuru yoğunluğunda da anlamlı bir değişimin olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.16. Zemin, Kireç, Uçucu kül ve Moloz karışımlarının kompaksiyon grafikleri

**Çizelge 4.9.** Kompaksiyon deney sonuçları

Karışım	Mak. Kuru Yoğunluk (t/m <sup>3</sup> )	Optimum Su (%)
% 100 Kil	1,53	23,9
2K	1,49	26,0
2K5U5M	1,49	23,1
2K10U10M	1,49	21,5
2K15U15M	1,50	20,5
2K10U5M	1,48	21,8
2K5U10M	1,49	23,0

#### 4.3.2. Serbest basınç deney sonuçları

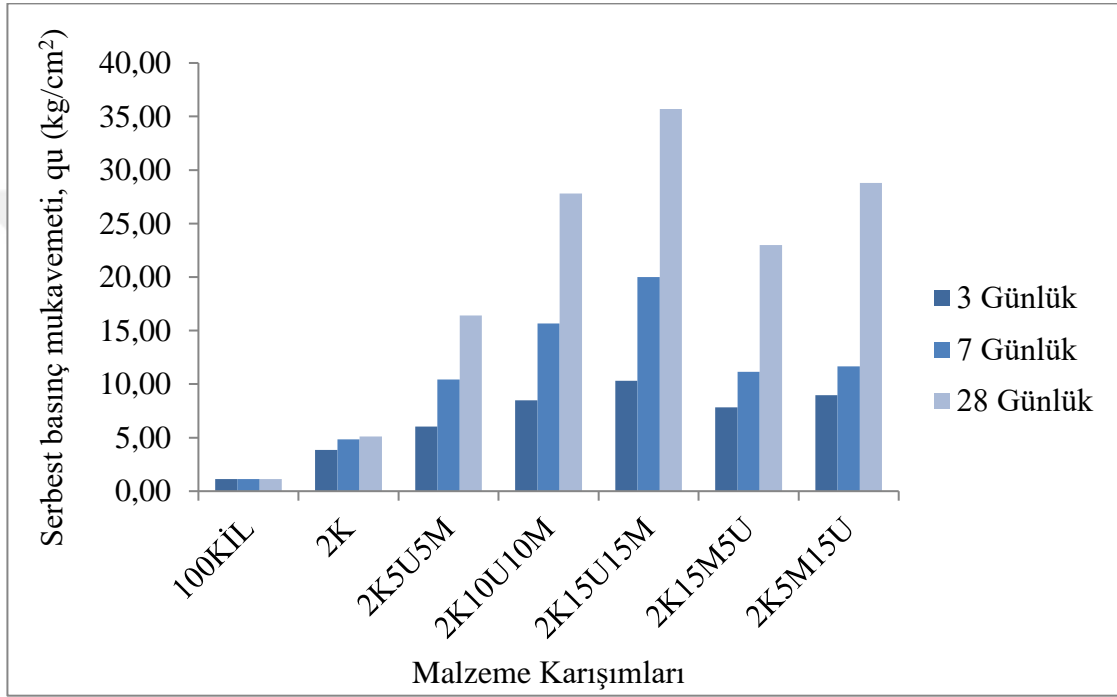
Zemin, kireç, uçucu kül ve İYA ile hazırlanan karışımların üzerinde deneyler yapılmış ve bu malzemelerin ağırlıkça farklı yüzdelerinin zemine olan etkileri belirlenmiştir. 7 farklı zemin-kireç-uçucu kül-İYA karışımlarının üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda serbest basınç mukavemet değerleri Çizelge 4.10'da ve Şekil 4.17'de özetlenmiştir.

**Çizelge 4.10.** Zemin, Kireç, Moloz ve Uçucu Kül karışımların mukavemetleri

Numune	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		
	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
100kil	1,40	1,16	1,16
2K	3,87	4,83	5,10
2K5U5M	6,03	10,44	16,40
2K10U10M	8,50	15,67	27,80
2K15U15M	10,32	20,00	35,71
2K5U15M	7,83	11,15	22,99
2K15U5M	8,95	11,66	28,78



Deneyden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında % 2 kireç, %15 UK ve %15 İYA (2K15U15M) kullanılarak hazırlanan karışımda, karışımların arasında en yüksek serbest basınç dayanımının olduğu görülmüştür. Bu da katkı malzemesi arttıkça serbest basıncın arttığını göstermektedir. Ayrıca kür süresinin en fazla 2K15U15M karışımında etkili olduğu görülmüştür, bu zaman bağlı artışın sebebinin yine puzolanik reaksiyonların etkisiyle olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.17. Serbest basınç deney sonuçları

#### 4.3.3. Atterberg limit deney sonuçları

Zemin, kireç, uçucu kül ve İYA karışımlarının kıvam limitlerin değişimlerini bulmak için diğer karışımlar gibi 28 gün kür edildikten sonra, Atterberg Limit deneyleri yapılmıştır. Kıvam deney sonuçları Çizelge 4.11’de özetlenmiştir. Alınan sonuçlara göre katkı malzemelerinin yüzdeleri artarken zeminin LL’inin düştüğü ve PL’inin arttığı dolayısı ile PI’sinin önemli miktarda azaldığı görülmüştür.

**Çizelge 4.11.** Karışımların kıvam limit değerleri

	LL	PL	PI	SINIF
%100 Kil	51,80	29,10	22,70	CH
2K	49,60	35,92	13,68	ML
2K5U5M	48,45	37,25	11,20	ML
2K10U10M	-	-	-	NP
2K15U15M	-	-	-	NP
2K5U15M	-	-	-	NP
2K15U5M	-	-	-	NP

#### 4.3.4. Şişme deney sonuçları

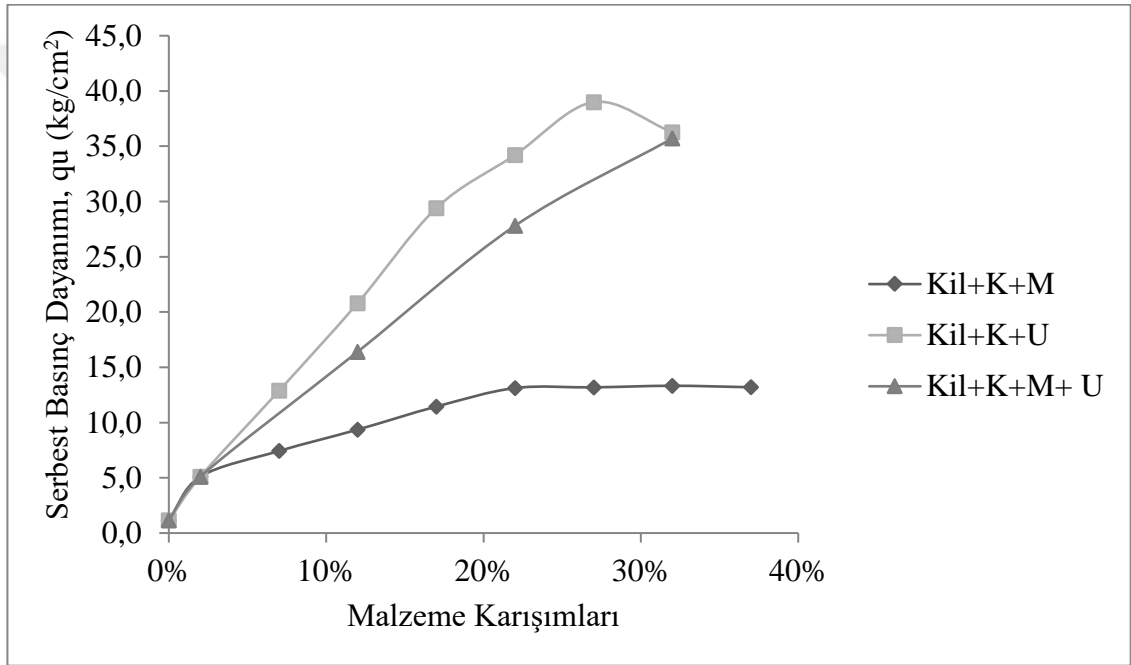
Killi zemin stabilizasyonunda, %2 kireç ile farklı oranlarda uçucu kül ve inşaat yıkıntı atıklarının kullanılmasının zeminin şişme potansiyelini azalttığı görülmüştür. Elde edilen deney sonuçlarına göre, katkı malzemelerinin yüzdesi artarken şişme yüzdesi düşmüştür. Şişme deney sonuçları Çizelge 4.12’de özetlenmiştir.

**Çizelge 4.12.** Şişme deney sonuçları

Karışım	Şişme (%)	Şişme Basıncı (kg/cm <sup>2</sup> )	Şişme Potansiyeli
%100 Kil	3,40	2,03	Orta
2K	2,20	1,97	Orta
2K5U5M	0,95	1,65	Düşük
2K10U10M	0,45	1,36	Düşük
2K15U15M	0,20	1,11	Düşük
2K5U15M	0,65	1,38	Düşük
2K15U5M	0,30	1,33	Düşük

#### 4.4. Karışımların 28 Günlük Serbest Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

Kullanılan atık malzemeler olan İYA ve uçucu kül ile hazırlanan farklı karışımların 28 günlük kür süresinden sonra, serbest basınç dayanımları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.18). Çizilen grafik incelendiğinde en düşük serbest basınç dayanımlarının kireç ve moloz karışımında elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, uçucu kül ile yapılan stabilizasyonun, İYA ve İYA+UK ile yapılan stabilizasyonlardan daha fazla dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin, uçucu külün puzolanik etkisinin neden olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 4.18. Katkı yüzdesine göre 28 günlük dayanım karşılaştırması

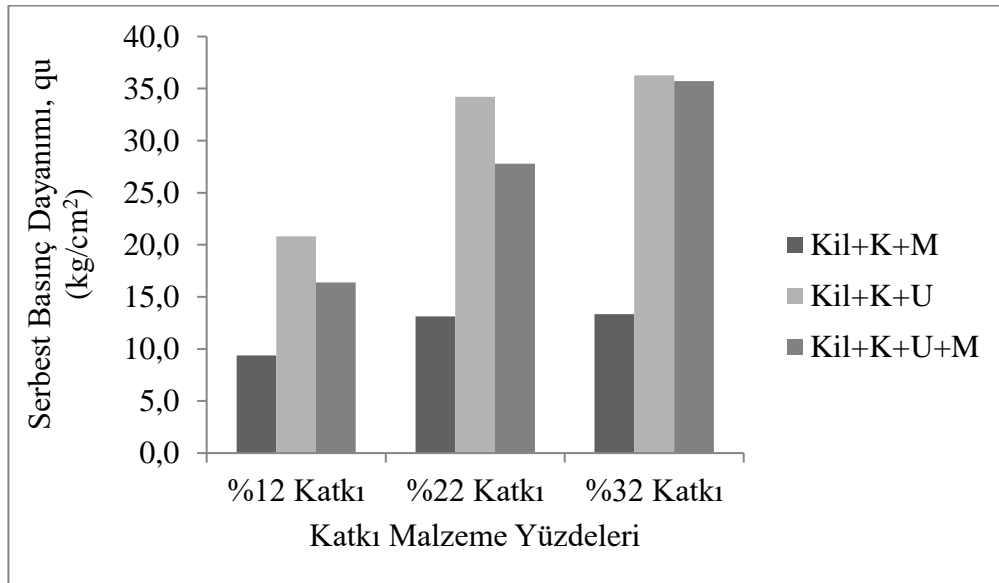
#### 4.5. Matrislerin Aynı Katkı Malzeme Yüzdelerinin Dayanım Karşılaştırması

Çalışmada hazırlanan 3 farklı matrisin dayanımlarının, 28 gün kür edildikten sonra karşılaştırabilmek amacıyla, aynı katkı malzemelerini içeren birkaç karışım kıyaslanmıştır. Bu amaçla, %12, %22 ve %32 katkı malzeme ile stabilize edilen karışımlar seçilmiştir. Serbest basınç deneyinden elde edilen sonuç değerleri göz önüne alındığında, zemine katılan malzemelerin arasında en etkili olanının Uçucu Kül olduğunu görülmüştür. Sonuçlar Çizelge 4.13'te ve Şekil 4.19'da özetlenmiştir. Şekilden de

görülebileceği gibi, katkı malzemesi oranı %32'ye ulaştığında kireç, uçucu kül ve inşaat yıkıntı atığı karışımı sadece uçucu kül ve kireç karışımına yakın serbest basınç dayanımı vermiştir. Yani, İYA'nın tek başına kullanımının yeterli olmadığı durumlarda, uçucu kül ile desteklenerek kullanımı zeminin serbest basınç dayanımı üzerine olumlu sonuçlar verebilmektedir.

**Çizelge 4.13.** 28 günlük aynı katkı malzeme içeren matrislerin karşılaştırılması

Karışım yüzdesi	Karışım Kodu	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
%12 Katkılı karışımlar	2K10M	9,36
	2K10U	20,80
	2K5U5M	16,40
%22 Katkılı karışımlar	2K20M	13,12
	2K20U	34,21
	2K10U10M	27,80
%32 Katkılı karışımlar	2K30M	13,33
	2K30U	36,27
	2K15U15M	35,71



**Şekil 4.19.** Aynı oranda katkı malzemesi içeren matrislerin karşılaştırılması

Elde edilen tüm sonuçlar, kireçle birlikte kullanılan uçucu kül ve inşaat yıkıntı atığının zemin stabilizasyonunda katkı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Geçmişte Uçucu kül üzerine yapılan birçok çalışma da bu kanıyı destekler niteliktedir (Nicholson ve Kashyap 1993; Yıldırım 2002; İnan ve ark. 2004; Tumluer 2008; Ünver 2015, vs.). Aynı şekilde inşaat yıkıntı atığı ile zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirmesine yönelik çalışmalarda (Kumar 2015; Akgül ve ark. 2017; Çimen ve ark. 2017) da olumlu sonuçlar alınmıştır.



## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, atık malzemelerin zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisini incelemek amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, eklenen katkı malzemelerinin, zeminin optimum su muhtevasını azalttığı ve mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca, kil içerisine katılan %2 kireç ile birlikte farklı oranlarda uçucu kül ve inşaat yıkıntı atığının kilin serbest basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığı, zeminin plastisite indisini azalttığı ve şişme potansiyelini düşürdüğü gözlenmiştir. %2 kireç ile inşaat yıkıntı atığının plastisiteli kile karıştırılabileceği ideal katkı oranı %20 olarak bulunmuştur. Uçucu külde ise maksimum serbest basınç dayanımı, %2 kireç ve %25 uçucu kül katıldığında elde edilmiştir. Katkı malzeme olarak kullanılan Kireç-İYA-UK karışımının da olumlu sonuçlar verdiği bulunmuştur. Ayrıca, kür süresinin de optimum karışımlarda dayanımı arttırmakta etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ama kür süresinin etkisi uçucu kül karışımlarda daha çok etkili olduğu belirlenmiştir. Bu artışta, kür süresiyle ortaya çıkan puzolanik reaksiyonların etkili olduğu düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Çalışmada kullanılan zemin, yüksek plastisiteli olarak sınıflandırılmıştır (CH), ve Atterberg limitleri şu şekilde bulunmuştur: LL= % 51,8 ve PI= %23,7. Zeminin şişme potansiyelinin %3,4 ve zayıf serbest serbest basınç dayanımının 1.14 kg/cm<sup>2</sup> olduğu tespit edilmiştir. Deneyde kullanılan kil üzerinde yapılan normal kompaksiyon deneyinde, optimum su muhtevası %23,9 bulunmuş ve karşılık gelen maksimum kuru yoğunluğun 1,53 t/m<sup>3</sup> olduğu belirlenmiştir.
- Kullanılan katkı malzemelerinin öncelikle optimum su muhtevaları belirlenmiştir, bunun için de Proktor kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Bu katkı malzemeleri, optimum su muhtevaları üzerinde farklı etkiler göstermiştir. Kile %2 kireç ilave edildiğinde, optimum su miktarının %23,9'ten %26,0'a arttığı ve maksimum kuru yoğunluğunun 1,53 t/m<sup>3</sup>'ten 1,49 t/m<sup>3</sup>'e azaldığı görülmüştür. Uçucu kül eklendiğinde ise, hem optimum su muhtevası hem de maksimum kuru yoğunluğu azaltılmıştır. %2 kireç ile uçucu kül içeriği %0' dan %30' a yükseldiğinde, maksimum kuru yoğunluğu 1,53 t/m<sup>3</sup>'ten 1,42 t/m<sup>3</sup>'e kadar düşmüştür, optimum su muhtevası ise %18,1' e kadar azalmıştır. İnşaat Yıkıntı Atıklarında ise,

optimum su içeriği %26,0' dan %18,9' a kadar azaldığı, maksimum kuru yoğunluğun ise 1,53 t/m<sup>3</sup>'ten 1,57 t/m<sup>3</sup>' e yükseldiği görülmüştür. Uçucu külün özgül ağırlığı kilden daha düşüktür, İYA'nın ise daha yüksektir. Uçucu kül eklendiğindeki yoğunluk azalmasının ve İYA eklendiğindeki yoğunluk artışının katkı malzemelerinin kendi özgül ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Maksimum kuru yoğunluktaki farklara rağmen, her iki katkı malzemelerinin optimum su muhtevası değerlerini karşılaştırıldığında ise aradaki farkın fazla olmadığı görülmektedir.

- Yüksek plastisiteli kile %2 kireç ile hem İYA hem de Orhaneli uçucu külü eklenmesiyle zeminin serbest basınç dayanımında net bir artış olduğu bulunmuştur. Katkı malzemelerinin zeminin serbest basınç dayanımları üzerindeki etkisine bakıldığında, %2 kireç ile %20'e kadar İYA ilavesinde serbest basınç dayanımının yükselmekte olduğu, daha sonra ise İYA ilave edilmesi ile anlamlı bir artış elde edilemediği görülmüştür. Bu nedenle, %20 İYA ilavesi, killi zeminin stabilize edilmesi için en uygun yüzde olarak kabul edilmiştir. Uçucu külde ise bu oranın %25 olduğu bulunmuştur. Orhaneli Uçucu külünde ise farklı yüzdelere ile hazırlanan numunelerde en büyük serbest basınç değerinin ağırlıkça %25 uçucu kül içeren karışımda çıkmıştır. Bu karışımın serbest basınç dayanımı değeri 38,99 kg/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. İYA'ların ise maksimum serbest basınç değeri yaklaşık 13 kg/cm<sup>2</sup> olduğu bulunmuştur.
- Zeminin serbest basınç dayanımında kür süreleri de dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biridir. Kür süresinin, İYA ile iyileştirilen zeminin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisinin minimal olduğu görülmüştür; %2 kireç ve %20 İYA için 3 gün sonundaki serbest basınç dayanımı 11,71 kg/cm<sup>2</sup> iken, bu değer 28 günün sonunda 13,12 kg/cm<sup>2</sup> değerine ulaşmıştır. Uçucu külde ise 3 günlük kür süresinden sonra serbest basınç dayanımı 16,17 kg/cm<sup>2</sup> olan zeminin 28 günlük kür süresinden sonra dayanımı 38,99 kg/cm<sup>2</sup>' ye kadar artmıştır. Bu artışın nedeninin zamana bağlı olarak külün içeriğindeki kimyasal bileşenlerin puzolanik reaksiyona girmesidir. İnceliğinden ve amorf yapıya sahip minerolojisinden dolayı uçucu kül puzolanik bir mazleme olup kalsiyum hidroksitle belirli ısıdaki sulu ortamlarda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılığa sebep olmaktadır. Bu nedenle belirli bir orana kadar uçucu kül miktarının

artması numunenin bağlayıcılık özelliğini arttırdığından serbest basınç dayanımı da artar.

- Zeminin işlenebilirliği ve plastikliği diğer önemli hususlardan biridir. İYA ve uçucu külün yüzdeleri artarken zeminin likit limitinin ve Plastisite indisinin düştüğü görülmüştür. LL ve PI'nin düşüşü, zeminin işlenebilirliğinin artmasına neden olacaktır. %2 kireç ile ağırlıkça %15 oranında hem İYA hem de Uçucu kül kullanımından sonra yüksek plastesiteli olan kil, tamamen plastisitesini kaybederek plastik olmayan (NP) bir malzemeye dönüşmüştür.
- Konu olan zemin şişme potansiyeli orta derece olarak belirlenmiştir. Şişme yüzünden, killi zeminlerin üzerinde yapılacak inşaatlarda olabilecek zararlardan kaçınılabilmektedir. Zeminde kullanılan katkı maddeler, zeminin hem şişme potansiyelini hem de şişme basıncını düşürdüğü belirlenmiştir. İYA ile iyileştirilmiş zeminin sıkıştırılmış halinde şişme yüzdesi %3,4 den %0,35'e, UK'da ise %0,08'e kadar düştüğü görülmüştür. Dolayısıyla, killi zeminlerin şişme özelliğine karşı hem İYA hem de Orhaneli uçucu külünün kullanılabilceğini belirlenmiştir.
- İYA ve UK'nin kireçle tek başlarına kullanımlarında olduğu gibi İYA ve UK'nin birlikte kireçle kullanılmasının da zeminin plastikliğini azaltmakta ve şişme potansiyelini düşürmekte olumlu etkileri olmuştur. Bunun yanı sıra, katkı malzemelerinin İYA+UK+K şeklinde kullanımının zeminin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi daha belirgindir. %22 oranında katkı malzeme kullanılarak yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında; %2 Kireç ve %20 oranında İYA kullanıldığında  $13,12 \text{ kg/cm}^2$  olan dayanım; %2 Kireç, %10 İYA ve %10 UK kullanıldığında  $27,80 \text{ kg/cm}^2$  ye çıkmıştır, bu değer %2 Kireç ve %20 UK için ise  $34,21 \text{ kg/cm}^2$ 'dir.

Tez çalışması kapsamında, kireç, uçucu kül ve inşaat yıkıntı atığının ile zeminlerin yüzeysel zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılabilceği gözlenmiştir. Uçucu külün ve inşaat yıkıntı atığının zemin stabilizasyonunda kullanılmasının hem çevresel hem de ekonomik olarak büyük getirileri olması sebebiyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılması uygun olacaktır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, bu malzemelerin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde arttırmıştır.



Zeminin hangi özelliğinin iyileştirilmesinin istendiğine bağlı olarak kullanılacak atık malzemenin seçimi ve kullanılacak ideal katkı malzemesinin oranı değişecektir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde, donma çözülmenin zeminin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenebilir. Ayrıca bu çalışma, farklı atık malzemelerin zemin özelliklerine etkisinin inceleneceği şekilde genişletilebilir.



## **KAYNAKLAR**

- ASTM C 618 2000.** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standard, No 04-02 USA.
- ASTM D 4439 2009.** Terminology for Geosynthetics. Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ACI 230.1R-90. 1990.** State-of-the-Art report on soil Cement. *ACI Material Journal*, 87(4): 395-417.
- Anderson, R.D. and Kleiman D.B. 2012.** Special Dewatering Method for Soil Stabilizasyon. International Mine water Association, <http://www.imwa.info>.
- Aparna Roy. 2014.** Soil Stabilization using Rice Husk Ash and Cement, *International Journal of Civil Engineering Research*. 5(1): 49-54.
- Balasingam, M., and Farid S. 2008.** Interpretation Of Geotechnical Properties Of Cement Treated Soils. Washington State University Department of Civil & Environmental Engineering Pullman, USA, WA-RD 715.1.
- Beagle, E. C. 1978.** Rice Husk Conversion to Energy. FAO Agricultural Services, Rome, Italy, (31): 139-154.
- Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., and Balasubramaniam, A. S. 1996.** Soft ground improvement in Lowland and Other Environments , *New York, USA*, 427 pp.
- Bilgen, G., Kavak, A., Çapar, Ö.F. 2012.** Düşük Plastisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Curufunun Kullanılması ve Kireç ile Etkileşiminin Araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 2(2): 30-38.
- Bowles, J. E. 1984.** Physical and Geotechnical Properties of Soils. New York, USA, 202 pp.
- Chang, I., Jooyoung I., and Cho, G. 2016.** Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering Sustainability. *Sustainability* 2016, 8(3), 251.
- Chayan, G., Sharma, R.K. 2014.** Influence of Marble Dust, Fly Ash and Beas Sand on Sub Grade Characteristics of Expansive Soil. *Int. J. Engg. Res. Sci. and Tech* 3(3): 158-163.
- Chen, F.H. 1988.** Foundations on Expansive Soils. Elsevier Science Publishers. New York, USA 461 pp.
- Choobbasti, A.J., Hadi G.M., Sarah, J.V., Firouziandbandpey, S. 2010** .Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime. *Frontiers of Earth Science in China* 4(4): 471-480.
- Cilason N. 1964.** Toprak Stabilizasyonu. K.G.M., Ankara, Türkiye, 9 s.
- Clare, K. E. and Cruchley, A. E. 1957.** Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime. *Geotechnique*, 7(2): 97-111.
- Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., and Shafii-Rad, N. 1981.** Cemented sands under static loading. *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107(GT6). 799-817.
- Craig, R.F., 1994.** Soil Mechanics. Chapman & Hall, London, UK.,105 pp.
- Curran, D.D., Allen, J.J., and Little, D.N. 1976.** Validation of soil stabilization index system with manual development. Technical Department SRL-TR-76-0006, Frank J. Seiler Research Laboratory.
- Çimen, Ö., Günaydın H.İ., Keskin, S.N. 2016.** Yüksek plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerine inşaat atıklarının etkisi. *Pamukkale Univ. Muh. Bilim Derg.*, 23(3), 250-253.

- Das, B. 1997.** Soil Mechanics Laboratory Manual. Oxford University Press, New York, USA 299 pp.
- Dash, S.K., Hussain M. 2012.** Lime stabilization of soils. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 24(6): 707-714.
- El-Fatih, M.A. and Muawia, A.D.E., 1984.** Comparison of Two Methods for the Measurement of Swelling Pressure. Fifth International Conference on Expansive Soils, 25-28 May 1984, Adelaide, South Australia.
- Erol, A. 2007.** C Sınıfı Uçucu Kül Katkılı Siltlerin Dayanım Ve Donma-Çözülme Direncin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Yüksek lisans tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İZMİR.
- Erol, B. 2008.** Atık Maddelerin Yol İnşaatlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- EuroSoilStab. 2002.** Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization. European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Brussel.
- Fırat, S. Ve Cömert, A.T. 2011.** Uçucu Kül, Kireç Ve Çimento İle İyileştirilmiş Kaolinde Kür Süresinin CBR Üzerine Etkileri. *Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(4): 719-730.
- Foster M.F. 1954.** The Relation Between Composition And Swelling In Clays. *Springer International Publishing*, 3(1): 205–220.
- Gemma, R. S. 2005.** Strength development of concrete with rice-husk ash. *Journal of Cement & Concrete Composites* 28: 158-160.
- Gregory, P. M. 2012.** Soil Stabilization Methods And Materials. *Lulea University of technology*, Lulea, Sweden 33 pp.
- Hayward, B.I. 2012.** Mass Stabilization Ground Improvement. [www.haywardbaker.com](http://www.haywardbaker.com).
- Hendriks, C.F., Pietersen, H.S. 2000.** Sustainable Raw Materials: Construction and Demolition Waste. *RILEM Publication*, Cachan Cedex, France.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R. And Raksachon, Y. 2009.** Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. *Soils and Foundations*, 49(1): 85–98.
- Horpibulsuk, S., Phetchuay, C and Chinkulkijniwat, A. 2012.** Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2): 184–193 .
- İnan G., Alper, S., Ramyar K., Yılmaz, H.R. 2004.** Değişik Uçucu Küllerin Yüksek Plastisiteli Kilin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, 20(1): 20- 26.
- James, J., Rao, S.M. 1986.** Silica from rice husk through thermal decomposition. *Thermochim Acta*, 97: 329–336.
- Kavak, A., & Akyarlı, A. 2007.** A field application for lime stabilization. *Environmental geology*. 51: 987-997.
- Kavak, A., Güngör, A.G., Avşar, C., Atbaş, B. 2008.** Kireç ile Zemin Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, On ikinci Ulusal Kongresi 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Keller Inc. 2011.** Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method: <http://keller-foundations.co.uk/technique/deep-dry-soil-mixing>.

- Keskin S.N. 1993.** İstanbul neojen kilinin şişme davranışına ön konsolidasyonun, mineralojik özelliklerin ve çevresel faktörlerin etkisi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılıç, G. 2008.** Çimento İle Zemin Stabilizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kögel, K., Ingrid 2016.** The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter: Fourteen years on. *Soil Biology and Biochemistry*. 105: A3-A8.
- Kumar , V.S., Vipul K. and Umar J. 2015.** Review on stabilization of clayey soil using fines obtained from demolished concrete structures. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4 (5): 3204-3209.
- Kumbasar, V. 1999.** Zemin Mekaniği Problemleri. Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 671s.
- Kuskonmaz, N. 1993.** Pirinç kabuğundan silisyum nitrür tozunun sentezi. *Doktora Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Latifi, N., Rashid, A.S.A., Siddiqua, S., Majid, M.Z.A. 2016.** Strength measurement and textural characteristics of tropical residual soil stabilised with liquid polymer. *Journal of the International Measurement Confederation*, 91: 46-54.
- Lina, D.F., Linb, K.L., Hungc, M.J., & Luo, H.L. 2007.** Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of hazardous materials*, 145(2): 58-64.
- Little D.N. ve Nair, S. 2009.** NCHRP Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. Texas Transportation Institute Texas A&M University , Texas, USA, 78 pp.
- Luckham, P.F., Rossi, S. 1999.** The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 82(1-3): 43-92.
- Maher, A., Bennert, T., Jafari, F., Douglas, W.S and Gucunski, N. 2004.** Geotechnical Properties of Stabilized Dredged Material from New York-New Jersey Harbor. *Journal of the Transportation Research Board*, 1874(1): 86-96.
- Mallela, J., Quintus, H. V., and Smith, K. 2004.** Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. *The National Lime Association 200 North Glebe Road. Applied Research Associates*.
- Massarsch, K.R. and Topolnicki, M. 2005.** Regional Report: European Practice of Soil Mixing Technology. 23-25 september 2005 International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm, Sweden.
- Masoumeh, M. and Behzad K. 2017.** Soft Soil Stabilization using Stone Columns. *EJGE Researchgate.net/publication*, 12: 1452-1466.
- McDowell, C. 1959.** Stabilization of soils with lime, lime-fly ash and other lime reactive materials. Highway Research Board Bulletin, pp 60 - 66 .
- Menard, L., 1977.** The Dynamic Consolidation of Foundation Soils. Techniques Louis Menard, Paris, France.
- Misra, A., Biswas, D. ve Upadhyaya, S. 2005.** Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash-Clay Mixtures. *Fuel*, 84(11): 1410-1422.
- Mitchell, J.K. 1976.** The properties of Cement-stabilized soils. Proceeding of Residential Workshop on Materials and Methods For Low Cost Road, Rail and Reclamation Works. Unisearch Ltd, Leura, Australia.
- Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., Wu, W. 2016.** Optimum Utilization of Rice Husk Ash for Stabilization of Sub-base Materials in Construction and Repair Projects of Forest Roads. *Croat. j. for. eng.*, 37: 201- 209.

- Nicholson, P.G. ve Kashyap V. 1993.** Fly ash stabilization of tropical Hawaiian soils. : American Society of Civil Engineers, (36): 15-29.
- Ontürk, K., Fıratb, S., Vural, I. ve Khatib, J.M. 2014.** Uçucu Kül ve Mermer Tozu Kullanarak Yol Altyapısının İyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 17(1) (Özel Sayı): 35-42.
- Önalp, A. 1983.** İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi. Karadeniz Üniversitesi, Trabzon, Türkiye 1225 s.
- Paul, F.K. 1984.** Soil stabilization for pavements mobilization construction. Department of the Army, Washington, USA, 32 pp.
- Reuter M., Xiao Y., Bom U. 2004.** Recycling and environmental issues of metalurgical slags and salt fluxes. VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Slag, June 2004, The South African Institute of Mining and Metallurgy. Johannesburg, South Africa.
- Rydholm S.A. 1965.** Pulping processes. Interscience Publishers, New York, USA.
- Saeid. A., Amin, C., and Hamid. N.A 2012.** Review on The Lime and Fly ash Application in Soil Stabilization. *IJBEEES*, 1(3): 124–126.
- Savran, K.Z. 1988.** Stabilization of Cohesive Soils with Fly Ash. *Y. Lisans Tezi*, ODTÜ, Ankara.
- Seed, H. B., Woodward, R. J. and Lundgren R. 1962.** Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 88(6), 107–131.
- Sherwood, P. 1993.** Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London, UK, 153 pp.
- Tabatabai, A. M. 1997.** Pavement. *University's publication center*, Tehran, Iran.
- Taube, G.M., Herridge, J.R. 2002.** Stone Columns for Industrial Fills. 33rd Ohio River Valley Soil Seminar (ORVSS), 18 October 2018, Ohio. USA.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. 2009 .** Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, Türkiye, AR-GE/Y 97.2, 34.
- TRB, 1987.** Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design, and Construction, State of the Art. Transportation Research Board, National Research Council, USA 59 pp.
- TS 1900 - (1 ve 2) 2006.** İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri, Ankara, Turkey 186 s.
- Tumluer, G. 2006.** Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- Tunç, A., 2001.** Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, Türkiye, 840 s.
- Türker, P., Erdoğan, D., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. 2004.** Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, Ankara, 325 s.
- Uzuner, B.A. 2000.** Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitabevi, Trabzon, Türkiye 205 s.
- Varol, D., 2006.** Piriñ kabuğu külünden magnezyum silikat üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vural, İ., Akgül T., Aydın, A. 2017.** İnşaat Yıkıntı Atıkları Kullanılarak Zeminlerin Serbest Basıñ Dayanımının İyileştirilmesi. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 Baku, Azerbaijan.
- Ünver, E. 2015.** Problemlı Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. *Yüksek lisans tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

- Witczak, M, W., Yoder, E., J., 1975.** Principles of Pavement Design. A wiley interscience publication. USA 736 pp.
- Yeşilbaş, G. 2004.** Stabilization Of Expansive Soils Using Aggregate Waste, Rock Powder And Lime. *Msc*, Middle East Technical University, Turkey.
- Yıldız, M., Sogancı, A.S., Demiröz, A., Albayral, V., 2004** Tekrarlı donma ve çözülmenin kireç ile stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi. Zemin Mekanigi ve Temel Mühendisligi Onuncu Ulusal Kongresi, 16-17 Eylül 2004, İstanbul, Türkiye.
- Yıldırım, S., 2002.** Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- Yoon, Y.W., Cheon, S.H. and Kang, D.S., 2003.** Bearing Capacity and Settlement of Tire-Reinforced Sands. *Geotextiles and Geomembranes journal* 22(5): 439-453.
- Zorluer, I.,Usta, M. 2003.** Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi. Türkiye IV Mermer Sempozyumu, 18-19 Aralık 2003, Mersem, Türkiye.



## **EKLER**

- EK 1** Atterberg Limiti Deney Formu
- EK 2** İncece Daneli Zeminlerde Özgöl ağırlığı Tayini Formu
- EK 3** Proktor Deney Formu
- EK 4** Serbest basınç deney formu



**EK 1 Atterberg Limiti Deney Formu**

Numune Adı :				
Tarihi :				
		1	2	3
Likit Limit	Kap Num.			
	Darbe Adedi			
	Yaş numune + kap, gr.			
	Kuru numune + kap, gr.			
	Su miktarı, gr.			
	Kap, gr			
	Kuru numune, gr			
	Su muhtevası, %			
	Likit limit, %			
		1	2	3
Plastik Limit	Kap No			
	Yaş numune + kap, gr.			
	Kuru numune + kap, gr			
	Su miktarı, gr			
	Kap, gr			
	Kuru numune, gr			
	Su muhtevası, %			

**EK 2 İncece Daneli Zeminlerde Özgül ağırlığı Tayini Formu**

Numune Adı					
Piknometre No.					
Piknometre Ağırlığı (W1) gr					
Piknometre+Numune Ağırlığı(W2) gr					
Piknometre + Numune Ağ + Su Ağ.(W3) gr					
Piknometre Tamamen Su İle Dolu İken Ağ.(W4) gr					
Numune Ağ.(W2-W1) gr					
Su Ağ.(W4-W1) gr					
Zemine Eklenen Su Ağ.(W3-W2) gr					
Numune Hacmi (W4-W1)-(W3-W2)gr					
Zeminin Özgül Ağ. $GS = (W2-W1)/(W4-W1)-(W3-W2)$					



**EK 3** Proktor Deney Formu

Numune Adı	:					
Tarih	:					
Sıkıştırma Enerjisi	:					
Kalıp Hacmi	:					
Zemin Cinsi						
Kalıp + Yaş Numune Ağırlığı gr.	A					
Kalıp Ağırlığı gr.	B					
Yaş Numune Ağırlığı (A - B) gr	C					
Kalıp Hacmi (v)/cm <sup>3</sup>						
Yaş Kesafet ( C/ Kalıp Hacmi ) gr/cm <sup>3</sup>	D					
Kuru Kesafet (Dx100/(100+K)) gr/cm <sup>3</sup>	E					
<b>RUTUBET TAYİNİ</b>						
Kap No.		1	2	3	4	5
Kap Ağırlığı gr.	I					
Kap + Yaş Numune gr .	F					
Kap + Kuru Numune gr.	G					
Rutubet ( F - G ) gr.	H					
Kuru Numune ( G - I ) gr	J					
% Rutubet ( H / J x 100 ) gr	K					

**EK 4** Serbest basınç deney formu

<b>Tarihi:</b>		<b>Deney Hızı:</b>		<b>Ring Katsayısı:</b>	
<b>1.NUMUNE</b>		<b>2.NUMUNE</b>		<b>3.NUMUNE</b>	
<b>Nun. No :</b>		<b>Nun. No :</b>		<b>Nun. No :</b>	
<b>Num. Boy :</b>		<b>Num. Boy :</b>		<b>Num. Boy :</b>	
<b>Num Çap :</b>		<b>Num Çap :</b>		<b>Num Çap :</b>	
<b>Yaş Ağırlığı :</b>		<b>Yaş Ağırlığı :</b>		<b>Yaş Ağırlığı :</b>	
<b>Kuru Ağırlığı :</b>		<b>Kuru Ağırlığı :</b>		<b>Kuru Ağırlığı :</b>	
Düşey Kısalma	Yük Göstergesi	Düşey Kısalma	Yük Göstergesi	Düşey Kısalma	Yük Göstergesi
20		20		20	
40		40		40	
60		60		60	
80		80		80	
100		100		100	
120		120		120	
140		140		140	
160		160		160	
180		180		180	
200		200		200	
220		220		220	
240		240		240	
260		260		260	
280		280		280	
300		300		300	
320		320		320	
340		340		340	
360		360		360	
380		380		380	
400		400		400	
420		420		420	
460		460		460	
480		480		480	
500		500		500	
520		520		520	
540		540		540	
560		560		560	
580		580		580	
600		600		600	

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mamadou Lamine DIALLO  
Doğum Yeri ve Tarihi : LABE( Gine) – 23/07/1990  
Yabancı Dil : Fransızca, Türkçe, İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Yacine Diallo Lisesi (2008-2011), Gine.  
Lisans : Gamal Abdel Nasser De Conakry Üniversitesi/  
Politeknik Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Bölümü  
( 2011-2016)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi/ Fen Bilimler Enstitüsü/  
İnşaat Mühendisliği Bölümü ( 2017-2019)

İletişim (e-posta) : [mllafou56@gmail.com](mailto:mllafou56@gmail.com)

Yayınları :

**DIALLO, M.L. and UNSEVER, Y.S. 2019.** Stabilization Of Clay Soils Using Fly Ash.  
*Black Sea Journal of Engineering and Science, 2(3): 81-87 (2019).*