

**MERMER TOZU VE UÇUCU KÜLÜN KİL ZEMİNLERİN  
İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SÜLEYMAN GÜCEK**

**DANIŞMAN**

**Yrd. Doç. Dr. İSMAİL ZORLUER**

**YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**HAZİRAN 2011**

**T.C.  
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MERMER TOZU VE UÇUCU KÜLÜN KİL ZEMİNLERİN  
İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI**

**SÜLEYMAN GÜCEK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman  
Yrd. Doç. Dr. İSMAİL ZORLUER**

**HAZİRAN 2011**

## TEZ ONAY SAYFASI

Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER danışmanlığında, SÜLEYMAN GÜCEK tarafından hazırlanan “MERMER TOZU VE UÇUCU KÜLÜN KİL ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 09.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yapı Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER

**Başkan:** Doç. Dr. Yılmaz İÇAĞA  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi

İmza

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi

İmza

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ  
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
.../.../... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

## **BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**

**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- 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.**

**09.06.2011**

**SÜLEYMAN GÜCEK**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MERMER TOZU VE UÇUCU KÜLÜN KİL ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI

Süleyman GÜCEK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik olmasından dolayı çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Katkı maddeleri kireç, atık mermer tozu, çimento, uçucu kül, bitüm gibi malzemelerdir. Son zamanlarda endüstriyel atık maddelerin bu amaç için kullanımı ön plana çıkmıştır.

Bu çalışmada mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Numuneler, kil zemin kuru ağırlığına göre mermer tozu (%5, %10 ve %15) ve uçucu kül (%10, %20 ve %30) ile belli oranlarda karıştırılarak elde edilmiştir. Karışımlar, %15 ve %20 su muhtevalarında standart proctor sıkıştırma enerjisinde hazırlanmıştır. Numuneler; Eksenel basınç, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), şişme, donma-çözülme ve donma-çözülme sonrası eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

Deney sonuçlarına göre; mermer tozu ve uçucu kül katkısının dayanımı yükselttiği, şişmeyi azalttığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarının birçoğuna göre en uygun karışım oranının %10 MT + %20 UK olduğu görülmektedir. Mermer tozu ve uçucu külün zemin iyileştirmesinde kullanımı ile atıklar ekonomiye kazandırılırken çevre kirliliği de azaltılmış olacaktır.

**2011, xi + 86 sayfa.**

**Anahtar Kelimeler:** Mermer Tozu, Uçucu Kül, Zemin İyileştirme.

**ABSTRACT**  
M.Sc Thesis

**USAGE OF MARBLE DUST AND FLY ASH ON STABILIZATION OF CLAY SOILS**

Süleyman GÜCEK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

**Supervisor:** Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER

Soil stabilization with additive materials is used on large scale because of economical than other stabilization methods. Additive materials are lime, cement, waste marble dust, fly ash, bitümen. Recently usage of industrial waste materials come into prominence for this purpose.

In this study, usability of marble dust and fly ash was researched in soil stabilization. Samples were prepared with marble dust and fly ash in determined ratio according to dry weight of clay soil. The samples were compacted at 15%-20% water content with Standard proctor compaction energie. Then, they were subjected to unconfined compression test, California bearing ratio, swelling, freeze-thaw and unconfined compression after freze-thaw.

It was observed that additive of marble dust and fly ash increased strength and decreased swelling from test results. The optimum mixture ratio was 10% marble dust + 20% fly ash according many of test results. Wastes are gained to economy and environmental contaminant is decreased owing to usage of marble dust and fly ash on stabilization of clay soils.

**2011, xi + 86 pages.**

**Key Words:** Marble Dust, Fly Ash, Soil Stabilization.

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans çalışmam boyunca her türlü konuda bana destek ve yardımcı olan danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER'e,

Gelmiş olduğum bu noktaya kadar emeği geçen bölüm hocalarıma,

Üniversite yılları boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli AİLEME,

Çalışmam boyunca bana destek olan arkadaşım Özlem TAŞMAZ'a teşekkür ederim.

**Süleyman GÜCEK**  
**AFYONKARAHİSAR, 2011**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                     | Sayfa    |
|---------------------------------------------------------------------|----------|
| ÖZET.....                                                           | i        |
| ABSTRACT.....                                                       | ii       |
| TEŞEKKÜR.....                                                       | iii      |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                 | vii      |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                | ix       |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                              | xi       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                | <b>1</b> |
| <b>2. GENEL BİLGİLER.....</b>                                       | <b>4</b> |
| 2.1. Zemin İyileştirme (Stabilizasyon).....                         | 4        |
| 2.2. Zemin Stabilizasyon Yöntemleri.....                            | 5        |
| 2.2.1. Yüzeysel Stabilizasyon.....                                  | 5        |
| 2.2.1.1. Katkısız Stabilizasyon.....                                | 5        |
| 2.2.1.2. Katkılı Stabilizasyon.....                                 | 6        |
| 2.2.2. Derin Stabilizasyon.....                                     | 8        |
| 2.2.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Derin Stabilizasyon.....            | 8        |
| 2.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Derin Stabilizasyon .....            | 9        |
| 2.3. Kıl.....                                                       | 11       |
| 2.3.1. Killerin Fiziksel Özellikleri.....                           | 11       |
| 2.3.2. Killerin Kimyasal Özellikleri.....                           | 11       |
| 2.3.3. Killerin Bileşimi.....                                       | 12       |
| 2.4. Uçucu Kül.....                                                 | 14       |
| 2.4.1. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri.....                        | 14       |
| 2.4.2. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.....                        | 15       |
| 2.4.3. Uçucu Küllerin Mineralojik Yapıları.....                     | 16       |
| 2.4.4. Uçucu Küllerin Kullanıldığı Yerler.....                      | 17       |
| 2.4.4.1. Çimento ve Beton Üretiminde Kullanılması.....              | 17       |
| 2.4.4.2. Geoteknik Uygulamalarda ve Yol Yapımında Kullanılması..... | 17       |
| 2.4.4.3. Boşluklu Beton Üretiminde Kullanılması.....                | 18       |
| 2.4.4.4. Tuğla Üretiminde Kullanılması.....                         | 18       |



|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.4.5. Hafif Agrega Üretiminde Kullanılması.....               | 18        |
| 2.4.4.6. Gaz Beton Üretiminde Kullanılması.....                  | 19        |
| 2.4.4.7. Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı..... | 19        |
| 2.5. Mermer Tozu.....                                            | 20        |
| 2.5.1. Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri.....                  | 20        |
| 2.5.2. Mermer Tozunun Kimyasal Özellikleri.....                  | 21        |
| 2.5.3. Mermer Toz Atıklarının Bazı Kullanım Alanları.....        | 21        |
| 2.5.3.1. İnşaat Sanayi.....                                      | 21        |
| 2.5.3.2. Seramik Sektöründe .....                                | 22        |
| 2.5.3.3. Çimento İmalat Sanayi.....                              | 22        |
| 2.5.3.4. Plastik Sanayi.....                                     | 22        |
| 2.5.3.5. Kağıt Sanayi.....                                       | 23        |
| 2.5.3.6. Tarım ve Gübre Sanayi.....                              | 23        |
| 2.5.3.7. Yem Sanayi.....                                         | 23        |
| 2.5.3.8. Boya Sanayi.....                                        | 24        |
| 2.5.3.9. Yol Yapımında.....                                      | 24        |
| 2.5.3.10. Demiryolu Zemin Malzemesi.....                         | 24        |
| 2.5.3.11. Diğer Kullanım Alanları.....                           | 24        |
| 2.6. Önceki Çalışmalar.....                                      | 25        |
| <b>3. MATERYAL VE METOD.....</b>                                 | <b>37</b> |
| 3.1. MATERYAL.....                                               | 37        |
| 3.1.1. Zemin.....                                                | 37        |
| 3.1.2. Uçucu Kül.....                                            | 39        |
| 3.1.3. Mermer Tozu.....                                          | 40        |
| 3.2. METOD.....                                                  | 41        |
| 3.2.1. Numune Hazırlama.....                                     | 41        |
| 3.2.2. Tanımlama Deneyleri.....                                  | 44        |
| 3.2.2.1. Dane Boyutu ve Dane Çapı Dağılımı.....                  | 44        |
| 3.2.2.2. Hidrometre.....                                         | 44        |
| 3.2.2.3. İnce Taneli Zemin İçin Özgül Ağırlık Deneyi.....        | 45        |
| 3.2.2.4. Atterberg Limit Deneyleri.....                          | 45        |
| 3.2.2.5. Standart Proctor Deneyi.....                            | 47        |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2.6. Eksenel Basınç Deneyi.....                        | 48        |
| 3.2.2.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....               | 49        |
| 3.2.2.8. Şişme Deneyi.....                                 | 51        |
| 3.2.2.9. Donma-Çözülme Deneyi.....                         | 53        |
| 3.2.2.10. Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç.....        | 55        |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>                        | <b>56</b> |
| 4.1. Yapılan Deneysel Çalışmalar.....                      | 56        |
| 4.1.1. Yoğunluk-Su Muhtevası İlişkisinin Belirlenmesi..... | 56        |
| 4.1.2. Eksenel Basınç Deney Değerleri.....                 | 58        |
| 4.1.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Değerleri.....       | 63        |
| 4.1.4. Şişme Deneyi.....                                   | 64        |
| 4.1.5. Donma-Çözülme Deney Değerleri.....                  | 66        |
| 4.1.6. Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç.....           | 69        |
| 4.1.7. SEM Görüntüleri.....                                | 73        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                           | <b>76</b> |
| <b>6. KAYNAKLAR.....</b>                                   | <b>78</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                       | <b>86</b> |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u>                    |
|-----------------|------------------------------------|
| $\mu$           | Mikrometre                         |
| Si              | Silisyum                           |
| O               | Oksijen                            |
| $W_L$           | Likit limit                        |
| $W_P$           | Plastik limit                      |
| $I_P$           | Plastisite indisi                  |
| Fe              | Demir                              |
| kg              | Kilogram                           |
| $W_{opt}$       | Optimum su muhtevası               |
| $\varepsilon$   | Deformasyon                        |
| W               | Su muhtevası                       |
| P               | Basınç                             |
| $q_u$           | Serbest basınç mukavemeti          |
| $\gamma_{kmax}$ | Maksimum kuru birim hacim ağırlığı |
| $\gamma_s$      | Özgöl ağırlık                      |
| sn              | Saniye                             |
| kgf             | Kilogram kuvvet                    |
| m               | Metre                              |
| cm              | Santimetre                         |
| mm              | Milimetre                          |
| dk              | Dakika                             |
| kN              | Kilo newton                        |
| ml              | Mililitre                          |
| $^{\circ}C$     | Santigrat derece                   |

| <u>Kısaltmalar</u> | <u>Açıklama</u>                                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ASTM               | American Standarts of Testing Materials (A.B.D. Test Standartları) |
| CBR                | California Bearing Ratio                                           |
| TS                 | Türk Standartları                                                  |
| TSE                | Türk Standartları Enstitüsü                                        |
| UK                 | Uçucu Kül                                                          |
| MT                 | Mermer Tozu                                                        |
| RCC                | Roller Compacted Concrete                                          |
| BDPTM              | Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı                 |
| SEM                | Taramalı Elektron Mikroskobu                                       |
| AB                 | Avrupa Birliği                                                     |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Uygulanabilirliği.....                                                         | 4  |
| Şekil 2.2. Farklı Oranlarda Uçucu Kül Katkısının Zamana Bağlı Olarak Dayanıma...                                            | 26 |
| Şekil 2.3. Uçucu Kül ve Diğer Malzemelerin Mukavemette Meydana Getirdikleri<br>Zamana-Bağlı Artış.....                      | 27 |
| Şekil 2.4. Volkanik Kökenli Hawaii Zeminlerinin Şişme Potansiyellerinin Değişimi.                                           | 30 |
| Şekil 2.5. Kemberburgaz Kiline Ait Kompaksiyon Karakteristikleri.....                                                       | 32 |
| Şekil 2.6. Gecikmenin Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık Değerlerine Etkisi.....                                             | 33 |
| Şekil 2.7. Gecikmenin Optimum Su Muhtevasına Etkisi.....                                                                    | 33 |
| Şekil 2.8. Atık Mermer Tozlarının Donma-Çözölmeye Etkisi.....                                                               | 35 |
| Şekil 3.1. Elek Analizi ve Hidrometre Sonuç Grafiğı İle Tane Dağılımı.....                                                  | 39 |
| Şekil 3.2. Casagrande Likit Limit Deney Cihazı.....                                                                         | 46 |
| Şekil 3.3. Plastik Limit Deney Numuneleri.....                                                                              | 46 |
| Şekil 3.4. Kompaksiyon Deney Aleti.....                                                                                     | 47 |
| Şekil 3.5. Numunelerin Saklanma Koşulları.....                                                                              | 49 |
| Şekil 3.6. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....                                                                              | 50 |
| Şekil 3.7. Konsolidasyon Deney Cihazı.....                                                                                  | 52 |
| Şekil 3.8. İklimlendirme Cihazı ve Donma-Çözölmeye Numuneleri.....                                                          | 54 |
| Şekil 3.9. Donma-Çözölmeye Fırçalama.....                                                                                   | 54 |
| Şekil 3.10. Donma-Çözölmeye Sonrası Eksenel Basınç Uygulaması.....                                                          | 55 |
| Şekil 4.1. Katkısız Numunenin Standart Proctor İle Optimum Su Muhtevası Ve<br>Maksimum Kuru Yoğunluğunun Belirlenmesi.....  | 57 |
| Şekil 4.2. Katkılı Numunelerin Standart Proctor İle Optimum Su Muhtevası Ve<br>Maksimum Kuru Yoğunluğunun Belirlenmesi..... | 57 |
| Şekil 4.3. Kırılmış Katkılı Numuneler.....                                                                                  | 58 |
| Şekil 4.4. Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi.....                                                        | 59 |
| Şekil 4.5. Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi.....                                                        | 59 |
| Şekil 4.6. Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi.....                                                        | 60 |
| Şekil 4.7. Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi.....                                                        | 60 |
| Şekil 4.8. Eksenel Basınç Cihazında Numune Kırımı.....                                                                      | 61 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.9.</b> Kür Süresine Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi.....     | 62 |
| <b>Şekil 4.10.</b> Kür Süresine Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi.....    | 63 |
| <b>Şekil 4.11.</b> Katkı ve Su Muhtevasına Göre CBR Oranın Değişimi.....           | 64 |
| <b>Şekil 4.12.</b> Katkı Miktarına Göre Şişme Değişimi.....                        | 64 |
| <b>Şekil 4.13.</b> Katkı Miktarına Göre Şişme Değişimi.....                        | 65 |
| <b>Şekil 4.14.</b> Katkı Miktarına Göre Meydana Gelen Deformasyon Oranları.....    | 66 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Katkı Miktarına Göre Meydana Gelen Deformasyon Oranları.....    | 67 |
| <b>Şekil 4.16.</b> W: %20 – W: %15 (%15 MT - %30 UK).....                          | 67 |
| <b>Şekil 4.17.</b> Katkı Miktarına Göre Meydana Gelen Deformasyon Oranları.....    | 68 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Katkılı ve Katkısız Numuneler.....                              | 68 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Değerleri.....             | 70 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Değerleri.....             | 70 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Değerleri.....             | 71 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Çevrim Sayısına Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi..... | 72 |
| <b>Şekil 4.23.</b> Çevrim Sayısına Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi..... | 72 |
| <b>Şekil 4.24.</b> SEM görüntüsü.....                                              | 73 |
| <b>Şekil 4.25.</b> SEM görüntüsü.....                                              | 73 |
| <b>Şekil 4.26.</b> SEM görüntüsü.....                                              | 74 |
| <b>Şekil 4.27.</b> SEM görüntüsü.....                                              | 74 |
| <b>Şekil 4.28.</b> SEM görüntüsü.....                                              | 75 |
| <b>Şekil 4.29.</b> SEM görüntüsü.....                                              | 75 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 2.1.</b> Kil Minerallerinin Kimyasal Bileşimi .....                                                                       | 13 |
| <b>Çizelge 2.2.</b> Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....                                                                         | 15 |
| <b>Çizelge 2.3.</b> Çeşitli Uçucu Küllerden Elde Edilen Sonuçlara Göre Uçucu Küllerin Yaklaşık Kimyasal Bileşiklerinin Yüzdesi ..... | 16 |
| <b>Çizelge 2.4.</b> Türkiye’deki Bazı UK’lerin Mineralojik Kompozisyonları.....                                                      | 16 |
| <b>Çizelge 2.5.</b> Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri .....                                                                        | 20 |
| <b>Çizelge 2.6.</b> Mermer Tozunun Kimyasal Özellikleri .....                                                                        | 21 |
| <b>Çizelge 2.7.</b> Dispersif Bir Kilin C Tipi Uçucu Kül İle Stabilizasyon .....                                                     | 28 |
| <b>Çizelge 2.8.</b> Uçucu Kül Katkı Oranı Ve Kür Süresine Göre Serbest Basınç Mukavemet Değerleri .....                              | 29 |
| <b>Çizelge 3.1.</b> Zemin Numunesinin Fiziksel ve Kompaksiyon Özellikleri.....                                                       | 38 |
| <b>Çizelge 3.2.</b> Elek Analizi Deney Sonuçları.....                                                                                | 38 |
| <b>Çizelge 3.3.</b> Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.....                                                                            | 39 |
| <b>Çizelge 3.4.</b> Mermer Tozunun Kimyasal Özellikleri.....                                                                         | 40 |
| <b>Çizelge 3.5.</b> Eksenel Basınç Deneyi İçin Numune Dağılımı.....                                                                  | 42 |
| <b>Çizelge 3.6.</b> Donma-Çözülme Deneyi İçin Numune Dağılımı.....                                                                   | 42 |
| <b>Çizelge 3.7.</b> Şişme Deneyi İçin Numune Dağılımı.....                                                                           | 43 |
| <b>Çizelge 3.8.</b> CBR Deneyi İçin Numune Dağılımı.....                                                                             | 44 |
| <b>Çizelge 3.9.</b> CBR Standart Değerleri .....                                                                                     | 50 |
| <b>Çizelge 3.10.</b> CBR Sayısına Göre Zeminlerin Sınıflandırılması ve Kullanımı .....                                               | 50 |
| <b>Çizelge 4.1.</b> Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri.....                                                                    | 61 |
| <b>Çizelge 4.2.</b> Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri.....                                                                    | 62 |
| <b>Çizelge 4.3.</b> Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri.....                                                                    | 71 |
| <b>Çizelge 4.4.</b> Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri.....                                                                    | 72 |

## 1. GİRİŞ

Bir taşıyıcı olarak zemin, üzerine yapılacak yapı için uygun özelliklere sahip olmayabilir. Bu durumda çözüm yapı yerini değiştirmek veya zemin özelliklerini iyileştirmekle elde edilebilir. Birincisi çeşitli nedenlerden (teknik ve ekonomik) dolayı yapımı zor bir seçeneği oluşturur. İkincisi, yani yapı yapılacak yerdeki zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, daha uygun çözümdür.

Zemin iyileştirmesi (Stabilizasyon) için uygulanacak yöntemin seçimi, zemin özellikleri ve iyileştirme yapılmasındaki amaçla doğrudan ilgilidir. Zemine katkı maddeleri katarak yapılan iyileştirme yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Katkı maddeleri olarak ise; kireç, çimento, bitüm, uçucu kül, reçine gibi maddeler kullanılmaktadır.

Ülkemizde ve yurt dışında mermere olan talep hızla artmakta ve bunun sonucu olarak mermer sektörü ile uğraşan işletmelerin de sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu işletmelerin büyüklüğü ve yoğunluğuna bağlı olarak çamur ve parça mermer atıklar açığa çıkmaktadır. Mermer atıklarının kullanılabilir tarım arazilerine boşaltılması çevre, sağlık ve doğal görünüme bozucu etki yapmakta ve çevrecilik açısından olumsuz bir tepki oluşturmaktadır. Bununla birlikte, ocak ve işletmelerde yapılan üretime göre, oluşan atıkların miktarları %75'lere ulaşmaktadır.

Mermer işletmeciliğinde yüksek hacimde ortaya çıkan çamur atıkların depolanması için arazilere olan gereksinim, işletme sahipleri için büyük maliyet oluşturmakta ve tarım arazilerini kullanılamaz hale getirmektedir. Mermer çamurları içerisindeki mikron boyutunda bulunan partiküller toprağın havalanmasını ve su geçişini sağlayan küçük delikleri kapatmakta ve böylelikle arazileri verimsiz kılmaktadır.

Günümüzde mermere olan talebin artması sonucu hem ülkemizde hem de dünyada mermer işletmelerinin de sayısı artmıştır. Bu üretim artışının sonucunda, tesislerde işlenen mermer bloklarının toz ve kırıntı atıkları, tesislerin atık sahalarına veya tesislerin yakınından geçen akarsulara dökülmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak da, özellikle



mermer işletme tesislerinin yoğunlaştığı bölgelerde, kamuoyu gözü önünde çevrecilik ve tabii güzelliği bozması sebebiyle olumsuz bir tepki oluşturan mermer atık sahalarının yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Ülkemizde artan enerji ihtiyacı kömür ile çalışan termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu santraller genellikle diğer alanlarda kullanım imkanı bulunmayan düşük kalorili kömür yataklarının yakınına kurulmakta ve her biri önemli çevre sorunlarına yol açmaktadır. Elektrik enerjisi elde edebilmek amacıyla kullanılan iki önemli üretim kaynağından birisi hidroelektrik enerjisi sağlayan barajlar, diğeri genellikle yakıt olarak pulverize kömürün kullanıldığı termik santrallerdir. Türkiye’deki toplam elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık yarısı, hatta yarısından biraz daha fazlası, termik santrallerden sağlanmaktadır.

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacıyla, yakıt olarak büyük miktarda öğütülerek toz haline getirilmiş düşük kalorili kömürler kullanılmaktadır. Yakma sistemine bağlı olarak baca tarafından çekilen gazlarla birlikte çok ince kül parçacıkları yukarı doğru sürüklenmektedir. Bu ince kül parçacıklarına uçucu kül denir.

Uçucu küllerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan uçucu küllerin biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. Uçucu küllerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Uçucu külün özellikleri, bu malzemenin puzolanik bir malzeme olduğunu ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Her iki malzeme türünün de kullanılabilir olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada atık olan mermer tozu ve uçucu kül atıklarının zemin stabilizasyonunda değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Bu iki atık malzemenin birlikte kullanılması yönünde deneysel bir çalışma yok denecek kadar

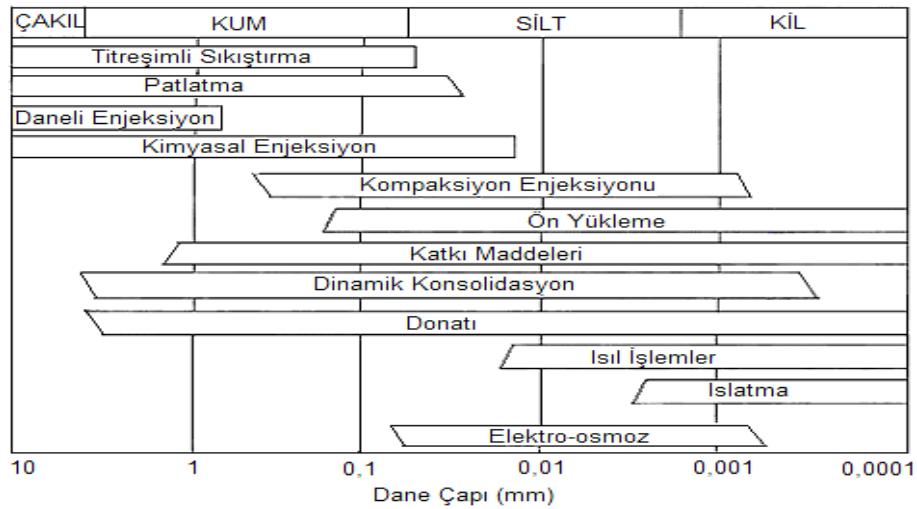
azdır. Çalışmamızda mermer tozu ve uçucu kül atıklarının zemin iyileştirmesinde birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Zemin İyileştirme (Stabilizasyon)

Zemin; insanoğlunun barınma, savunma, gizlenme, ulaşım, enerji gibi amaçlarla inşa edilen yapıların gerek temelleri altında taşıyıcı tabaka olarak gerekse inşaat malzemesi olarak tarih boyunca kullanılmıştır. Zeminler farklı özelliklere sahip ve geoteknik özellikleri yerel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Buna bağlı olarak farklı amaçlar için karşılaşılan zeminler her zaman kullanım amacına uygun özellikleri sağlamayabilmektedir. Zeminin özellikleri kullanım için yeterli olmadığında zeminde iyileştirme yapılır (Alkaya, 2002).

Bir alan altındaki zemin, düşünülen yapı vb. için elverişsiz ise (yumuşak kil, gevsek kum veya çakıl vb.) iyileştirilmesi için çeşitli seçenekler vardır (Şekil 2.1). Bunlar; elverişsiz zemini uzaklaştırıp, yerine uygun zemin koymak, derin temel yapmak veya mevcut zemini stabilizasyona tabi tutmaktır. **Stabilizasyon** (ıslah, iyileştirme, sağlamlaştırma vb.); zeminin özelliklerinin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesine verilen genel bir addır. Stabilizasyonda amaç, işin özelliğine göre; taşıma gücünü arttırmak, beklenen oturmaları ve deformasyonları azaltmak, geçirimsizliği azaltmak vb. olabilir (Uzuner, 2000).



Şekil 2.1. Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Uygulanabilirliği (Yıldırım, 2002).

## 2.2. Zemin Stabilizasyon Yöntemleri

Zeminlerin stabilizasyonunda iki yol vardır. Bunlardan birincisi; zemine herhangi bir katkı maddesi ( çimento, kireç, bitüm, reçine vb. ) karıştırmadan ve zemin kitlesinde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşturmada sıkıştırmak (kompaksiyon), başka zeminlerle karıştırarak uygun bir dane dağılımı elde etmek gibi yöntemlerle özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesidir. Bu yöntem kısaca **mekanik stabilizasyon** olarak adlandırılır. İkinci yöntem ise zemin içerisine bir katkı maddesi ( çimento, kireç, bitüm, reçine vb. ) karıştırmak suretiyle zemin kitlesi içerisinde kimyasal reaksiyon oluşturarak zeminin amaca uygun hale getirilmesidir. Bu yöntem de **kimyasal stabilizasyon** olarak adlandırılır (Aytekin, 2004).

### 2.2.1. Yüzeysel Stabilizasyon

Zeminlerin, fazla derinlere inilmeye gerek duymadan yüzeysel olarak ıslah edilmesi işlemine **yüzeysel stabilizasyon** denir. Yüzeysel stabilizasyon yöntemleri katkılı ve katkısız stabilizasyon olmak üzere 2 grupta incelenir (Özaydın, 1989).

#### 2.2.1.1. Katkısız Stabilizasyon

Mevcut zemine herhangi bir madde katmaksızın yapılan iyileştirmeye katkısız stabilizasyon denir. Mevcut zeminin granülometrisi uygunsa bu yöntem uygulanabilir. Bu yöntem 3 gruba ayrılabilir (Özaydın, 1989).

**Kompaksiyon;** zemine enerji uygulanması, bu sırada zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve boşlukların azaltılması sonucu daha sıkı bir yapıya sahip olmalarını sağlayan mekanik işleme verilen isimdir (Özaydın, 1989).

**Mekanik stabilizasyon;** iki veya daha fazla farklı zeminin uygun oranlarda karıştırılarak istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesidir. Böylece yük altında kalıcı deformasyon yapmayan yani stabil bir zemin elde edilmiş olunur (Tunç, 2002).

**Drenaj;** yapıları, yüzey altı veya zemin ve yüzeysel suları kontrol altına aldığından dolayı drenaj tekniği, yüzey altı drenaj ve yüzeysel drenaj (veya sadece drenaj) olmak üzere ikiye ayrılır. Yüzey altı drenaj yapıları enine olarak yarmada ve dolguda kaba daneli dren şiltesi ve dren borusu ile yatay olarak ise perfore dren boruları kullanılarak yapılmaktayken boyuna yüzey altı drenaj yapıları ise, yol gövdesinden zemin suyunun dren hendekleri ile dren edilerek stabilitesinin artırılması yoluyla yapılmaktadır (Tunç, 2001).

#### **2.2.1.2. Katkılı Stabilizasyon**

Zeminlerin değişik katkı maddeleri karıştırarak bazı fiziksel özelliklerini değiştirmek ve buna bağlı olarak belirli mühendislik özelliklerini iyileştirmek mümkün olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri arasında kireç, çimento, uçucu küller, asfalt ve bazı kimyasal maddeler sayılabilir. Bu stabilize edici maddeler şişen zemine ilave edilerek zeminin özellikleri iyileştirilebilir (Özaydın, 1989).

**Çimento;** içinde mevcut silika, stabilizasyon için gerekli puzolanik maddeyi oluşturmaktadır. Dolayısıyla içinde puzolanik malzeme içermeyen kil mineralleri olmayan zeminler içinde etkili olmaktadır. Zemine, kuru ağırlığının %5-15'i kadar çimento karıştırılarak kompaksiyon uygulanır. Kohezyonlu ve organik zeminler dışındaki zeminler, bu yöntem için uygundur. Çimento, daneler arasında bağlar oluşturur. Genellikle portland çimentosu kullanılır (Uzuner, 2000).

Çimento stabilizasyonunda; beton hazırlamada olduğu gibi, çimento; zemin daneleri arasında bağlayıcı bir işlev görmektedir. Betondan en önemli farkı çok düşük çimento oranları kullanılmasıdır. Zemin mukavemetindeki artışlar, çimento oranına bağlı

olmakta ve zaman-mukavemet artış ilişkisi betondakine benzemektedir (Özaydın, 1989).

**Kireç;** ince daneli zeminlerde kireç karıştırılması, zeminin plastisitesinin azalmasına, ayrıca kil mineralleri ile kireç arasında ortaya çıkan puzolanik reaksiyon sonucu meydana gelen bir çeşit çimentolanma nedeni ile zeminin mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Söz konusu kimyasal reaksiyonlar çevre koşullarının etkisi (nemlilik ve ısı gibi) altında zamana bağlı olarak geliştiği için zeminin mukavemeti de zamanla artmaktadır. Genel olarak, kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve dayanıklılığın artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, plastisitenin azalmasına yol açtığı için arazi çalışma koşullarının iyileşmesi sonucunu doğurmaktadır (Özaydın, 1989).

**Bitüm;** kırma taş, çakıl, kum gibi taneli zeminler, sıcak sıvı bitümlü madde katılıp, karıştırılarak, serilerek, kompaksiyon uygulanır. Bitümlü maddelerin, daneler arasında bağlayıcılık ile geçirimsizlik sağlama işlevleri vardır. Bitüm, asfalt vb. petrolden elde edilen siyah, yapışkan, sıcakken sıvı olan üründür. Bitümlü madde, zemin ile birleştiğinde ya daneleri birbirine yapıştırır ya da zemini su geçirmez hale getirerek daneler arasındaki su filmlerinin birbirleriyle olan bağını muhafaza eder veya her iki tesiri aynı anda meydana getirir. Kullanılacak malzemenin, kil ve organik maddelerden arınmış olması gerekir. Bitümlü maddeler miktar olarak %5-10 oranında katılır. Bitümlü stabilizasyon, özellikle yollarda, yüzey kaplamasında kullanılırlar (Uzuner, 2000).

**Uçucu küller;** kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştiklerinde bağlayıcı özellik kazanan puzolanik malzemelerdir. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri nedeniyle uçucu kül katkılı zemin belirli bir süre sonunda dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esası olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri artar.

Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik göstermektedir (Alkaya, 2002).

### **2.2.2. Derin Stabilizasyon**

Derin stabilizasyonda, stabilizasyona tabi tutulacak zeminin kalınlığı, birkaç m'den, 10m'ye kadar değişebilir. Derin stabilizasyon kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde olmak üzere 2'ye ayrılır.

#### **2.2.2.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Derin Stabilizasyon**

Kohezyonsuz zeminlerde derin stabilizasyon yöntemleri şunlardır:

**Dinamik Konsolidasyon;** derin ve gevsek kum-çakıl kütlelerin zemin mühendisliğinde bilinen en önemli problemi titreşimler altında sıvılaşarak büyük hacim düşmeleri göstermesidir. Dinamik konsolidasyonda, ağırlığı 5-40ton olabilen bir ağırlık, 5-40m yükseklikten, bir vinç yardımıyla, birkaç m aralıklarla, zemin yüzüne düşürülür. Ağırlık genellikle, betonarme dikdörtgen bir blok seklindedir (Uzuner, 2000).

**Derin Vibrasyon;** bu yöntem verdiği iyi sonuçlar sayesinde en çok tanınan işlemlerden birisidir. Bu yöntemde; vibroflot denilen 1,5-2,5cm uzunlukta; 0,3-0,5m çapında, silindirik dev bir vibratör kullanılır.

Önce vibroflot, bir vincin ucunda asılı olarak istenilen nokta üzerine getirilir. Ucundaki su jeti açılarak, su jeti ve bir miktar titreşim yardımıyla, kendi ağırlığı altında zemine indirilir. İstenilen derinliğe indikten sonra; kuyu içi kum, çakıl ile doldurularak, sürekli dolu tutulur ve vibratör çalıştırılır. Sonra uçtaki su jeti kesilir ve üst kısımdan bir miktar su akıtılır. Bu etkiler altında, vibroflot çevresinde sıkıştırılmış bir bölge oluşur. Vibroflot adım adım yukarı çekilerek, uygulamaya devam edilir. Sonuçta 1-2m çapında sıkıştırılmış bir silindirik kütle elde edilir. Bu işlem, planda 1-2m aralıklarla tekrarlanır.

**Patlayıcılar;** sıkıştırılacak tabakada belli derinlikte patlayıcılar aralıklarla yerleştirilir. Patlatma ile oluşturulan etkiden dolayı gevşek daneli zemin sıkışır. Patlayıcıları yerleştirmek için, zemine bir boru, çakma, su jeti vb. ile indirilir. Patlayıcı, borunun içinden zemine yerleştirilerek boru yukarı çekilir. Zemin yüzeyinin altı gevsek kalabilir. Bu kısım da vibrasyonlu kompaksiyonla yüzeyden sıkıştırılır. Ancak bu uygulama günümüzde pek yaygınlaşmamıştır. Bu yöntemin bir faydalı tarafı da diğer yöntemlerde mümkün olmayan derinliklere etki edebilmesidir. Derinliği 40m'yi bulan noktalarda 30kg'lık yüklerle atım yapılmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Patlamalar dinamit ve TNT ile yapılır.

**Enjeksiyon;** enjeksiyon ile zemin iyileştirmesi genellikle zemin içerisinde teşkil edilecek inşaat mühendisliği yapıları ve maden projeleri için kullanılmaktadır. Daneli zemin içerisine, basınçlı enjeksiyon sıvısının gönderilmesi ve bu sıvının taneler arasındaki boşluklarda sertleşerek, (katılaşarak) zemini sağlamlaştırması işlemine enjeksiyon adı verilir. Karışımın cinsi, enjeksiyonun amacı ve ıslah edilecek zeminin dane çapı ile ilgilidir. Çimento, kireç, bentonit gibi daneli karışımlar çakıl dane boyutundan orta kum boyutuna kadar olan zeminlerde kullanılabilir. İnce kum ve siltlerin enjeksiyonunda kimyasal eriyikler kullanılmaktadır. En çok kullanılan kimyasal maddeler silikatlar, kromlignin, reçine akrilamid ve poliüretandır.

#### **2.2.2.2. Kohezyonlu Zeminlerde Derin Stabilizasyon**

**Ön Konsolidasyon;** Özellikle suya doygun kohezyonlu zeminlerde; taşıma gücünü arttırmak, muhtemel oturmaları azaltmak için, zemin üzerine yük yerleştirilerek bir süre (3-5 aydan 2 yıla kadar) beklenilir. Böylece zemin konsolidasyona uğratılır. Yük olarak genellikle kum, çakıl dolgu kullanılır. Tipik yükseklik 3-8m olabilir. Bazen de, içi su dolu tanklar veya taban ve yanları geçirimsiz örtü ile kaplı su dolu havuzlar ile yükleme yapılabilir. Belli bir süre sonra dolgu kaldırılarak yerine yapı inşa edilir. Ön yükleme sonucu zemin belirli bir miktar sıkışıp aşırı konsolide hale geleceği için daha az sıkışma gösterecektir (Uzuner, 2000).



**Kum Drenleri;** bazı çok ince daneli zeminlerde ön yükleme süresi çok uzun olabilir (3-5 yıl). Bu süreyi kısaltmak (konsolidasyonu hızlandırmak) için; zeminde aralıklarla kum drenleri oluşturulur. Bunun için ucu kapalı bir kaplama borusu zemine çakılarak veya ucu açık bir kaplama borusu içi boşaltılarak zemine indirilir. Kaplama borusu çekilirken içine kum, çakıl gibi filtre malzemesi doldurulur. Drenlerin çapı 30-60cm olabilir. Son yıllarda hazır drenler (plastik veya kağıt drenler) kullanılarak bu yöntem yaygınlaştırılmıştır (Uzuner, 2000).

**Elektro-Osmoz;** siltli zeminlerin drenajı ve ön konsolidasyonu için Almanya'da geliştirilmiş bir yöntemdir. Uygulamanın doygun silt ve siltli killerde normal konsolide olma ve boşluk suyunda eriyik oranının düşüklüğü koşullarıyla verimli olacağı bilinmektedir. Bu konunun teorik çözümü başarıyla yapıldığı için stabilizasyon maliyeti proje başlamadan gerçeğe yakın olarak kestirebilmektedir. ince taneli zeminlerden suyun uzaklaştırılması, diğer yöntemlerle zordur. Çünkü, böyle zeminlerde, daneler arası boşluklardaki su, serbestçe akıp uzaklaşamaz. Böyle zeminlerde su, elektriksel yöntemle uzaklaştırılır (Uzuner, 2000).

**Isıl İşlemler;** zeminde açılan kuyularda yakılan akaryakıt – hava karışımı, doğalgaz vb. ile yüksek sıcaklıklar (500-1000°C) elde edilir. Bu sıcaklıklarda özellikle kil zeminler, kuyu çevresinde 2-3m çapında silindirler olarak sertleşir. Bu işlem aralıklarla tekrarlanır. Böyle yüksek sıcaklıklarda pişen killeri geri dönmez özellik kazanırlar (Uzuner, 2000).

### **2.3. Kil**

Zemin mekaniğinde tane çapları 2 µm (0,002mm)' den daha küçük olan zemin sınıfı kil olarak tanımlanmıştır. Kilin içerisinde en çok kalker, silis, mika, demir oksit bulunur. Kil sarımtırak, kırmızımtırak, esmer gibi renklerde bulunur. Bu özelliğini bileşiminde bulunan yanıcı maddeler verir. Kilin yapısı itibarıyla su çekme özelliği vardır. Bu nedenle kil daima nemlidir. Kili meydana getiren maddeler sulu alüminyum silikatlardır (www.Odevarsivi.com).

#### **2.3.1. Killerin Fiziksel Özellikleri**

Killerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzeyleri tarafından belirlenmiş gereçlerdir. Yeryüzünde bilinen binlerce mineral içerisinde plastisite özelliği gösteren tek mineral kil mineralidir. Bu özelliğinden dolayı sanayide geniş ölçüde kullanılabilme olanağı doğmuştur. Ancak kil mineralini hammadde olarak kullanan üreticiler için kimyasal bileşim değerleri çok önemlidir. Bu yüzden alumina, silika, demir ve titanyum oksitleri, alkaliler ve kristal suyunun kaybı anlamına gelen kızdırma kaybını ve hatta bazı durumlarda kalsiyum ve magnezyum oksitlerin bileşim yüzdelerini kontrol ederler (www.Webhatti.com).

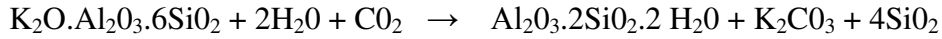
Killerin plastisite özelliği azaltılıp çoğaltılabilir. Genel olarak plastisite suyu % 15' ten az, % 40'tan fazla olamaz. Killer plastik olmayan mineral türlerini de ihtiva ederler. Genelde plastik olanlar kaolinit ve montmorillonit gruplarıdır. Plastik olmayan kil mineralleri ise kalsit, kuvarsit ve mika grubu içerikli minerallerdir (www.Webhatti.com).

#### **2.3.2. Killerin Kimyasal Özellikleri**

Kil kimyasal bileşimi sulu alüminyum silis veya bazen de sulu magnezyum silis olan tane boyutu çok küçük ve plastik özelliklere sahip doğal bir malzeme olarak

tanımlanabilir. Kaolen yatakları granit ve diğer feldspat içerikli kayaçların bozuşmasıyla oluşur. Karbondioksit ve suyun etkisi ile jeolojik olarak uzun bir zaman aşımında feldspat içerikli kayaçlar, çözünür alkali karbonat ve çözünür minerallerine dönüşür (Akıncı, 2001).

SiO<sub>2</sub> bozuşumuyla kil;



Killer su tutma ve iyon değiştirme güçleri yüksek alüminyum silis bileşikleridir. Mineral içerikleri ve minerallerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak, doğal killerin rengi, beyaz, gri, pembe, yeşil ve kahverenginin çeşitli tonlarında olabilir (www.Odevarsivi.com).

Bu killerin ince taneli durumu küre veya küp olmaya eğilimli olan aynı tane boyutlu diğer minerallere göre çok daha yüzey alanına sahip olduğu anlamındadır. Yaprak şekline sahip olan kil tanelerinde kalınlığının uzunluğuna oranı hemen hemen 20'dir. Bu değer aynı hacimdeki kübün üç katıdır. Bu nedenle yüzey özellikleri ne olursa olsun kil minerallerinin kristal yapılarında yüzey oldukça önemlidir (www.Webhatti.com).

Kil mineralleri tabaka yapılı su içerikli alumina silikatlarıdır. Plastik özellikleri tabakalarının plaka (pseudo hexagonal plakacıklar) şeklinde olması ve bu plâkalarının birbiri boyunca su sayesinde kayma özelliğine dayandırılır (www.Webhatti.com).

### **2.3.3. Killerin Bileşimi**

Doğada bulunan killer bulundukları bölgelere göre farklılıklar gösterirler. Bu farklılıkların başlıca sebebi killerin yapısını oluşturan minerallerin mevcudiyetleri ve yüzde oranlarıdır. Killerin içerdiği bileşenler; silika, alümina, alkaliler, demir bileşikleri, kalsiyum bileşikleri, karbonlu malzemelerdir (Yaman, 1996).

Kil minerallerinin kimyasal bileşimi oluştukları ana materyalin mineralojik bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterir (ekutup.Dpt.Gov.Tr).

**Çizelge 2.1.** Kil Minerallerinin Kimyasal Bileşimi (Ağırlığa Göre %) (Balıkesir.Edu.Tr).

| Kil mineralleri                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | CaO | MgO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|-------|------------------|-------------------|
| Kaolinit                       | 45-48            | 38-40                          | -                              | -                | -   | -     | -                | -                 |
| Montmorillonit<br>ve Nontronit | 42-55            | 0-28                           | 0-30                           | 0-0.5            | 0-3 | 0-2.5 | 0-0.5            | 0-3               |
| İllit                          | 50-56            | 18-31                          | 2-5                            | 0-0.8            | 0-2 | 1-4   | 4-7              | 0-1               |
| Vermikulit                     | 33-37            | 7-18                           | 3-12                           | 0-0.6            | 0-2 | 20-28 | 0-2              | 0-0.4             |
| Klorit                         | 22-35            | 12-24                          | 0-15                           | -                | 0-2 | 12-34 | 0-1              | 0-1               |

## 2.4. Uçucu Kül

Uçucu kül; toz halinde veya öğütölmüş taş kömürü ile yakıldığı zaman standartta belirtilen bileşimde kül bırakan yüksek özelliklerde linyit kömürlerinin, kazanlarda yanması sonucunda meydana gelen ve baca gazları ile sürüklenen, çok ince silis ve alümino silisli bir yanma kalıntısıdır (TS 639, 1975). Uçucu küller camsal, içi boşluklu tanecikler ile süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden meydana gelir. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları santralde kullanılan kömürün içerdğđ mineral safsızlıkların tipi ve miktarına bağılıdır. Genellikle uçucu küllerin %85'ini SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, ve MgO oluşturur (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Puzolan; tek başına bağlayıcılık özelliğı olmayan ancak ince öğütölüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğı gösteren malzeme olarak tanımlanır (ASTM, 1985). En yaygın puzolan uçucu küldür. Taneler genellikle küresel olup çapları 1 ile 150 µm arasında değışir (Berry, 1986). Uçucu külün kimyasal bileşimi ve özellikleri kullanılan kömürün yapısı ve bileşimine ve külün oluştğı yakılma işlemine bağılı olarak değışir (Helmuth, 1987). Dünyadaki uçucu kül üretimi yıllık yaklaşık 450 milyon tondur, Türkiye'deki uçucu kül üretimi ise yıllık yaklaşık 15 milyon tondur (Başyigit ve ark., 2007). Ülkemizde üretilen toplam elektrik enerjisinin yarısından fazlası termik santrallerden elde edilmektedir. Uçucu küllerin santrallerden dışarı atılmasının ciddi ekonomik ve çevre sorunları ortaya çıkardığı bilinen bir gerçektir (Tokyay, 1989). Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliğı açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların çözömlenmesi, Uçucu küllerin çeşitli kullanım alanlarında değılendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir (Aruntaş, 2006).

### 2.4.1. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu külün fiziksel özellikleri, genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağılı olarak değışiklik göstermektedir. Uçucu kül,

genellikle gri renktedir ve rengi, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. Uçucu kül, % 60-90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir (Lea ve Gani, 1997). Uçucu külün tane şekli, yuvarlaktır ve çapları, 1-200  $\mu\text{m}$  arasında değişir (Mehta, 1996: Tokyay, 1998). Taneciklerin yaklaşık % 75'inin çapı 45  $\mu\text{m}$ 'den, % 50'den çoğu ise 20  $\mu\text{m}$ 'den daha küçüktür (Erdoğan, 1993). Uçucu külün yoğunluğu, 2.2- 2.7  $\text{g/cm}^3$  dolayındadır (Erdoğan, 1993). Uçucu külün özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir (Tokyay, 1993).

**Çizelge 2.2.** Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

| <b>Çap<br/>(<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Şekil</b> | <b>Renk</b> | <b>Yoğunluk<br/>(<math>\text{g/cm}^3</math>)</b> | <b>İncelik</b>                   |
|-------------------------------------------|--------------|-------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 – 200                                   | Yuvarlak     | Gri         | 2.2 - 2.7                                        | $\approx$ çimento<br>inceliğinde |

#### **2.4.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri**

Uçucu küllerde S+A+F toplamının, genellikle % 70 değerinden fazla olduğu ve ASTM C 618'deki şartın sağlandığı görülmektedir. Kullanılan kömür cinsine bağlı olarak bazı Uçucu küllerde önemli oranda CaO (kalsiyum oksit) bulunmaktadır. CaO miktarı % 10'un altında olan Uçucu küller, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, % 10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu Uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

ASTM C 618'e göre Uçucu küller, S+A+F toplamı % 70'in üzerinde ise F sınıfı UK, S+A+F toplamı % 50'nin üzerinde ise C sınıfı UK olarak gruplandırılmaktadır (ASTM, 1991).

**Çizelge 2.3.** Çeşitli Uçucu Küllerden Elde Edilen Sonuçlara Göre Uçucu Küllerin Yaklaşık Kimyasal Bileşiklerinin Yüzdesi (Çakır, 1999)

| <b>Kimyasal Özellik</b>            | <b>F sınıfı</b> | <b>C sınıfı</b> |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 43,6 – 64,4     | 23,1 – 50,5     |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 19,6 – 30,1     | 13,3 – 21,8     |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 3,8 – 30,1      | 3,7 – 22,5      |
| <b>CaO</b>                         | 0,7 – 6,7       | 11,5 – 29,0     |
| <b>MgO</b>                         | 0,9 – 1,7       | 1,5 – 7,5       |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0 – 2,8         | 0,4 – 1,9       |
| <b>Kızdırma kaybı</b>              | 0,4 – 7,2       | 0,3 – 1,9       |

#### 2.4.3. Uçucu Küllerin Mineralojik Yapıları

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli Uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve aluminadan oluşan amorf ya da camı fazdır. Bu tip Uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH<sub>2</sub>) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli Uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler (Tokyay, 1998).

**Çizelge 2.4.** Türkiye’deki Bazı UK’lerin Mineralojik Kompozisyonları (Tokyay, 1992).

| <b>Mineral (%)</b>        | <b>Uçucu kül</b>      |                  |                  |               |                  |                |
|---------------------------|-----------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|----------------|
|                           | <b>Afşin-Elbistan</b> | <b>Çatalağzı</b> | <b>Seyitömer</b> | <b>Soma B</b> | <b>Tunçbilek</b> | <b>Yatağan</b> |
| <b>Mullit</b>             | 1,0                   | 18,1             | 1,2              | 4,3           | 8,8              | 6,0            |
| <b>Kuvartz</b>            | 4,5                   | 10,9             | 5,6              | 5,1           | 13,9             | 22,4           |
| <b>Manyetit</b>           | 0,8                   | 0,2              | 2,5              | 0,6           | 4,1              | 2,9            |
| <b>Hematit</b>            | 4,0                   | 0,1              | 6,0              | 2,0           | 3,0              | 7,0            |
| <b>Anhidrit</b>           | 12,2                  | -                | 9,3              | 7,4           | -                | -              |
| <b>Serbest CaO</b>        | 18,6                  | 0,7              | 5,5              | 9,8           | 0,9              | 1,0            |
| <b>Plajiyoklaz</b>        | ~28                   | -                | ~15              | ~20           | -                | ~25            |
| <b>Camsı ve amorf faz</b> | ~30                   | ~70              | ~50              | ~50           | ~70              | ~35            |

#### **2.4.4. Uçucu Küllerin Kullanıldığı Yerler**

##### **2.4.4.1. Çimento ve Beton Üretiminde Kullanılması**

Portland çimentosu üretilirken, klinkere uçucu kül katılarak birlikte öğütülmesiyle, çimento sınıflamasında “Puzzolanik Portland Çimentosu” olarak adlandırılan özel tipte çimentolar üretilir (Alataş, 1996: TS 640, 1975).

Bu tip çimento üretiminde, klinkere pulverize (öğütülmüş) uçucu kül katıldığından klinkerin öğütülmesi kolaylaşmakta, üretim kapasitesi ve rantabilite artmaktadır. Uçucu küller öğütülmüş kömürün yakılmasıyla elde edildiklerinden kendileri de öğütülmüş durumdadır. Bundan dolayı çimento üretiminde bir ön öğütme işlemine gerek kalmadan doğrudan fırına verilebilirler ve böylece öğütme işleminden tasarruf sağlanır. Uçucu külün doğrudan çimentoya katılmasıyla da uçucu küllü çimentolar elde edilebilir. Bu durumda uçucu külün klinkere katılmasıyla aynı sonuçlar elde edilmektedir. Beton üretiminde bağlayıcı madde olarak kullanılan Portland çimentosunun bir kısmı yerine mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılabilmekte, böylece uçucu kül katkılı beton elde edilebilmektedir. Ayrıca beton üretiminde kullanılan ince agreganın bir kısmı yerine de uçucu kül kullanılabilmektedir.

##### **2.4.4.2. Geoteknik Uygulamalarda ve Yol Yapımında Kullanılması**

Uçucu küller aşağıda listelenen alanlarda da değerlendirilmektedir:

- Dolguların stabilizasyonunda
- Altyapı ve taban malzemesi olarak
- Alt drenaj tabakası olarak
- İri stabilize malzemelerin boşluklarının doldurulmasında
- Zemin enjeksiyonlarında kireçle birlikte.



#### **2.4.4.3. Boşluklu Beton Üretiminde Kullanılması**

Boşluklu beton, çimento veya kireç ile uçucu kül karışımından hava ya da başka bir gaz geçirilmesi ile elde edilen hafif betondur. Boşluklu beton hafif olmasından dolayı taşımada kolaylık sağlar. Ayrıca ucuz olması, binanın hafifliği ve inşaat sırasında işçi giderlerinde avantaj sağlamasından dolayı tercih edilmektedir. Uçucu küllü boşluklu betonlarda ısı iletkenliği kum – kireç – çimento karışımından daha düşük olmakta, mukavemet ise daha yüksek olmaktadır (Sevim, 2003).

#### **2.4.4.4. Tuğla Üretiminde Kullanılması**

Uçucu kül Çok rutubetli killerin fazla suyunu emer, plastik killerin çatlamasını ve şişmesini önler, çiçeklenme olayını önler. Uçucu kül puzolanik özelliği ve inceliği sebebiyle pişmiş malzemede mukavemetin önemli miktarda artmasını sağlamaktadır (Sevim, 2003).

#### **2.4.4.5. Hafif Agregâ Üretiminde Kullanılması**

Hafif betonun inşaat mühendisliğinde kullanılmasıyla birlikte, hafif agrega ile beton üretme çalışmaları da başlamıştır. Bu amaçla uçucu kül belirli oranlarda su ile karıştırılarak, istenilen irilikte ve doğal agregaya göre hafif bir malzeme elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen agregalarla üretilen betonlar, doğal agregalarla üretilen betonlar kadar dayanıklı olmakta, ayrıca hafif olması sebebiyle çok katlı binalarda işçilik ve temel masrafların azaltılmasında, ısı ve ses yalıtımı sağlanmasında, ateşe karşı dayanımda bazı üstünlükler sağlamaktadır (Sevim, 2003).

#### **2.4.4.6. Gaz beton Üretiminde Kullanılması**

Gaz beton, ince öğütülmüş silisli bir malzemenin kireç veya çimento ile birleştirilmesi, gözenekli bir madde ile hafifletilmesi ve sertleşmesi ile elde edilen, birbirinden bağımsız hava hücreleri içeren hafif bir betondur. Elde edilen uçucu küllü gaz beton, hafif ve ısı iletkenliği düşük olacağından yapılarda kullanılması duvar ağırlıklarını azaltacak, böylece binaların yükü azalacaktır. Uçucu kül kullanılarak elde edilen gaz beton kuvars kullanılarak elde edilen gaz betondan daha dayanıklıdır. Bunun nedeni uçucu kül ile kireç arasındaki reaksiyondur (Sevim, 2003).

#### **2.4.4.7. Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı**

Rolkrit, Roller Compacted Concrete (RCC), silindirle sıkıştırılmış beton deyiminin kısaltılmış seklidir. Rolkritler çok düşük çimento dozajı ile hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyacak kadar nemlenen betonlardır. Yol alt tabakalarında ve baraj yapımında kullanılmaktadır. Bu betonlarda bağlayıcı dozajı seçilen yapım sistemine göre 100-150 kg/m<sup>3</sup> ten başlamaktadır. Bağlayıcı içindeki puzzolan yüzdesi ise yine yapım sistemine göre %20-%80 arasında değişebilmektedir. Puzzolan olarak özellikle uçucu kül kullanılmaktadır (Sevim, 2003).

## 2.5. Mermer Tozu

Mermer tozu en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi sırasında oluşan ve büyük çoğunluğu da 300 mikronun altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminde su kullanılması nedeniyle suyla birlikte çökeltme havuzlarına taşınır. Havuzlarda çökelen mermer tozu daha sonra atık sahalarına alınmaktadır. Bu miktarın çok büyük bir kısmı atık olarak kalmakta ve çevresel problemlere neden olmaktadır (Zorluer ve Usta, 2003).

Mermer fabrikalarında işlenen mermerlerin ortalama % 30'unun üretim atığı olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Ülkemizde yılda yaklaşık olarak 2 200 000 ton mermer blok işlendiği düşünülürse, 660 000 ton mermer tozunun değerlendirilmeden atıldığı söylenebilir. Böyle bir potansiyeli sanayide değerlendirmek ulusal ekonomiye önemli kazanımlar sağlayacaktır (Köse ve Diker, 1999; Ceylan, Saraç, Özkahraman, 2001)

### 2.5.1. Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri

Mermer saf kalsiyum karbonat bileşiminde olduğu zaman beyaz ve yarı saydamdır. Renkleri genellikle beyaz ve grimsidir. Fakat yabancı maddeler nedeniyle sarı, pembe, kırmızı, mavimsi, esmerimsi ve siyah gibi renklerde de olabilirler (Şentürk, Gündüz, Tosun, Sarıışık, 1996).

**Çizelge 2.5.** Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri (Vijayalakshmi v.d 2001)

| ÖZELLİK                              | SONUÇ    |
|--------------------------------------|----------|
| Hacim Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,3      |
| Gerçek Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,6      |
| Partikül Boyut Dağılımı (µm)         | 300 – 45 |
| Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)      | 6,37     |
| Nemlilik (%)                         | 8        |

### 2.5.2. Mermer Tozunun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal bileşiminde büyük oranda kalsiyum karbonat, magnezyum karbonatın yanı sıra silisyum dioksit, değişik metal oksitleri ile silikat mineralleri bulunur. Bileşimlerinin %90-98'i  $\text{CaCO}_3$ 'ten (Kalsiyum karbonat) oluşmaktadır. Düşük oranda  $\text{MgCO}_3$  (Magnezyum karbonat) içermektedir.  $\text{CaCO}_3$  kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral “Kalsit”tir. Aynı zamanda az miktarda silis, silika, feldspat, demiroksit, mika, florin ve organik maddeler bulunabilir (Tr.Wikipedia.Org).

**Çizelge 2.6.** Mermer Tozunun Kimyasal Özellikleri (Ceylan 2000)

| YAPILAN TEST                   | TEST DEĞERİ (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| Kızdırma kaybı                 | 43,4            |
| MgO                            | 0,30            |
| CaO                            | 54,59           |
| SiO <sub>2</sub>               | 8,5             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,40            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,72            |
| SO <sub>3</sub>                | 0,09            |
| Cl <sup>-</sup>                | 0,03            |

### 2.5.3. Mermer Tozu Atıklarının Bazı Kullanım Alanları

#### 2.5.3.1. İnşaat Sanayinde Kullanılması

İnşaat alanında mozaik, yapıtaşı, çimento, harç ve sıva olarak kullanıldığı gibi kireç elde edilen en önemli hammaddelerden birisidir. Suni Mermer olarak da bilinen yer karolarının imalatında ana hammadde olarak doğal mermerler kullanılmaktadır. Uygun boyutlardaki mermer parçalarının bağlayıcılar ile beraber mermer, agregalı karo üretiminin temelini oluşturmaktadır. Mermer parçalarının yanı sıra % 10 - 12 oranında, boyutu 0,5 mm altında olan mermer tozu da kullanılmaktadır.

### **2.5.3.2. Seramik Sektöründe Kullanılması**

Seramik üretiminde % 5-6 oranında mermer kullanılmaktadır. Seramik bünye ve sırlarında CaO olarak bünyeye alınan hammadde kaynakları genel olarak; kalsit, dolomit ve mermerdir. Karışık ve kalsitli akçini çamurlarının mineralojik bileşiminde % 5-20 arasında  $\text{CaCO}_3$  kullanılır. Bu  $\text{CaCO}_3$  çok ince öğütülmüş mermer halinde bileşime katılır. İri taneli ve iyi dağılmamış kalsit, çamur içinde hatalara yol açar. Özsüz seramik hammaddesi olan kalsit türleri, seramik çamurlarında artan sıcaklık ile birlikte gözenekliliği azaltır. CaO sırdaki  $\text{SiO}_2$  ile reaksiyona girerek bir ara tabaka oluşturur. Bu ara tabaka seramik teknolojisinde çok önemlidir. CaO sır içindeki diğer oksitlerle birleşerek cam oluşumuna yardımcı olmaktadır.

### **2.5.3.3. Çimento İmalat Sanayinde Kullanılması**

Çimento; CaO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve eser halde MgO ihtiva eder, esas itibariyle kalker ve kil karışımı olan, klinkerleşme sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra, gerektiğinde alçı, vb. katkı maddeleri karıştırılıp öğütülerek toz halinde elde edilen bir malzemedir. En önemli özelliği %11-15 su ile karıştırıldığı zaman belli bir süre sonra sertleşerek karışımdaki diğer malzemelerin birbirine bağlanmasını sağlar. Çimento sanayinde her ne kadar çok miktarda  $\text{CaCO}_3$  bileşimli hammaddeler kullanılırsa da, mermer sadece Beyaz Portland çimentosu yapımında kullanılmaktadır. Normal portland çimentosu bileşimindeki kalker yerine hammadde olarak mermer, kil yerine de kaolen kullanılmasıyla beyaz portland çimentosu elde edilmiş olur.

### **2.5.3.4. Plastik Sanayinde Kullanılması**

Plastik malzemelere, kalınlık ve tokluk vermesi amacıyla mermer tozu katılmaktadır.

#### **2.5.3.5. Kâğıt Sanayinde Kullanılması**

$\text{CaCO}_3$ , özellikle sigara kâğıdı başta olma üzere gazete kâğıdı, kaliteli dergi kâğıtları üretiminde kullanılmaktadır. Yağ emme özelliğinden dolayı matbaa mürekkebinin hızlı kurumasını sağlamaktadır. Kâğıt sektöründe dolgu veya kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.  $\text{CaCO}_3$  veya  $\text{MgCO}_3$ , kullanılması kâğıdın daha düzenli yanmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte  $\text{CaCO}_3$  ile yapılan kâğıtlar daha dayanıklı olmaktadır. Kâğıt imalatında selülozun pişirilmesi sırasında sıvının hazırlanmasında mermer kullanılmaktadır.

#### **2.5.3.6. Tarım ve Gübre Sanayinde Kullanılması**

Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, üzerinde yetişen ürünler açısından büyük önem taşır. Toprağın katı kısmı %1,5–5 oranında organik madde ve %95–99 oranında mineral maddeleri ihtiva eder. Kalsiyum oranı toprağın yapısı bakımından etkili olduğu kadar, kimyasal nitelikleri üzerinde de etkili olduğundan toprağa yeterli bir kalsiyum düzeyi sağlaması gerekir. Doğal olarak sularla yıkanma yüzünden durmadan kireç kaybettiği için toprağa zaman zaman (3–6 yılda bir) kireçli madde vermek gerekir. Kireçle toprak ıslahı için, kalsiyumlu maddeler kullanılır. Bunlar; kalsiyum karbonat, kalsiyum oksit ve hidroksil veya dolomit gibi maddeler kullanılır.

#### **2.5.3.7. Yem Sanayinde Kullanılması**

Özellikle yumurta yemlerinde  $\text{CaO}$  veya  $\text{CaCO}_3$  olarak boyutu 2mm altında olan toz katılmaktadır. Bu oran % 10–12 arasındadır. Düşük kalsiyum oranlı yemler tavuklarda yumurta verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Türk Standartları Enstitüsünün TS 60 standartlarına göre mermer tozu hayvan yemi olarak kabul edilmektedir. Buna göre bileşiminde en az % 92  $\text{CaCO}_3$  bulunan mermerler bu amaç için kullanılırlar.

#### **2.5.3.8. Boya Sanayinde Kullanılması**

Boya imalatında katkı maddesi olarak kullanılan kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ), özellikle sulu boyalar için önemlidir. Bunun için 10 mikronun altında ve çok saf kalsit kullanılmaktadır. Kalsitin içindeki demir oksit oranı % 0,03'den az olması istenir.

#### **2.5.3.9. Yol Yapımında Kullanılması**

Stabilizasyon malzemesi olarak yollarda kullanılır. Yol zeminindeki kil mineralleri ile birleşerek plastisite, genleşme ve kabarma katsayılarına etki eder. Ayrıca mıcır olarak da yol yapımında kullanılır.

#### **2.5.3.10. Demiryolu Zemin Malzemesinde Kullanılması**

Demiryoluna sağlam bir zemin oluşturmak için öncelikle zemine balast denilen yeterli sağlamlıkta ve boyutlandırılmış granül taş döşenir. Böylece demiryolu üzerindeki yükler rahat bir şekilde karşılanırken, demiryolları yapım malzemeleri olan travers ve raylar suyun etkisinden korunmuş olur.

#### **2.5.3.11. Diğer Kullanım Alanları**

Bu alanlar dışında; soda imalinde, refrakter malzeme imalinde, oto lastiği imalinde, patlayıcı malzeme imalatında, temizlik malzemeleri, haşere öldürücü ilaçlarda kullanılır. Ayrıca madencilikte; Yeraltı işletmeleri, cüruf yapıcı, flotasyon, kalsine dolomit üretiminde kullanılır (Görhan, Kahraman, Demir, Başpınar, 2008).

## 2.6. Önceki Çalışmalar

Kaynaklara göre Türkiye’de uçucu külle ilgili ilk önemli çalışmalar 1964 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi kimya laboratuvarlarında yapılmıştır. Buradaki çalışmalarda, özellikle uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması üzerinde incelemeler yapılmıştır. Tunçbilek Termik Santralından alınan uçucu külün betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaya uygun olduğu görülmüştür. Değişik miktarlarda kül katılan çimento harcı ve beton karışımları üzerinde yapılan deneyler sonucu kül katkısının hidrasyon ısısını düşürdüğü, çimento içinde %20’ye kadar katılan külün 90 gün sonra, normal beton dayanımlarından daha yüksek sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak Gökçekaya barajı inşaatında uçucu kül, beton katkı malzemesi olarak başarıyla kullanılmıştır (Alataş, 1996).

Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nde 1968 yılında Soma Termik Santrali külünün beton briket yapımında kullanılması ve betonun donma dayanımına etkileri konusunda çalışmalar yapılmış ve belirli oranlarda katılacak kül ile olumlu sonuçlar alınabileceği belirtilmiştir. Aynı yıl, Türk Standartları Enstitüsü, uçucu külün çimento ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılmasına ilişkin standartları yayınlamıştır.

Kasım 1970’de Ankara’da Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu ve Devlet Su İşleri tarafından bir uluslararası kül sempozyumu düzenlenmiş, araştırmacılar çalışmalarının sonuçlarını bu sempozyumda belirtmişlerdir. Bu çalışmalar aşağıda verilmiştir;

McManis ve Arman (1989), kireç veya çimentonun bir kısmı veya tamamı yerine kullanılan ASTM sınıflandırmasına göre C sınıfı uçucu külünün, kumlar ve killerin modifikasyonu ve stabilizasyonuna etkileri incelenmiştir. Basınç ve durabilite testleri göstermiştir ki, C sınıfı uçucu külleri çimentonun bir kısmı yerine kullanılabilir.

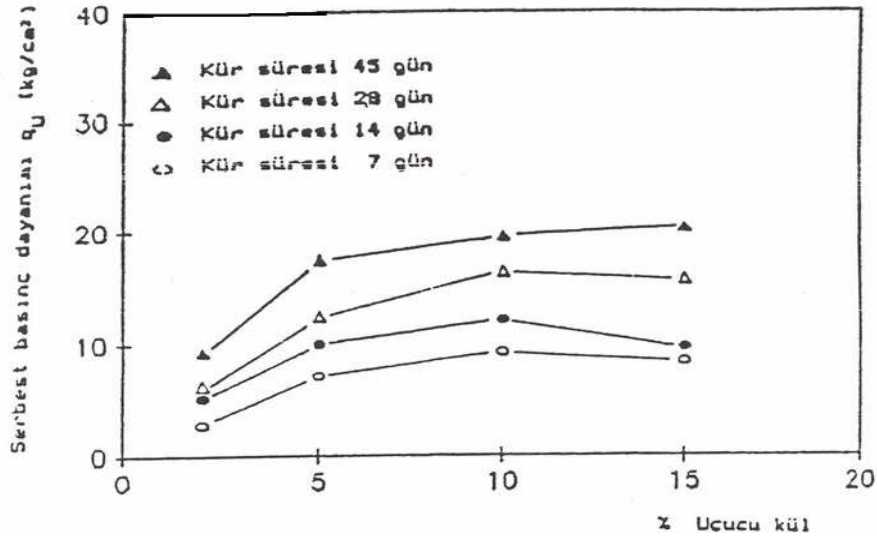
Tan ve İyisan (1996), %20 uçucu kül ilavesinin, Kemerburgaz kilinin mukavemet karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri üç eksenli basınç deneyleri, bir günlük kür neticesinde dahi, zeminin kayma direncinde önemli



derecede artış meydana geldiğini göstermektedir. Araştırmacılar, kil ve uçucu kül karışımının kayma direnci açısından gözlemledikleri dikkat çekici artışın, büyük bir ihtimalle uçucu külün küresel daneciklerinden kaynaklandığını düşünmektedirler.

Özbayoğlu (1993), kumlu zemin örneklerinin, belirli oranlarda bentonit katkısı yanında, %5, 10, 15 ve %20 oranında uygulanan uçucu kül ve %5 ve %10 çimento katkısı ile mukavemetlerinde meydana gelen değişimi incelemiştir. Şekil 2.2’de farklı uçucu kül oranlarının %5 bentonit katkısı yanında ayrıca %5 kireç ve %5 çimento katkısı ile kumlu zemin örneğinin, serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimler görülmektedir.

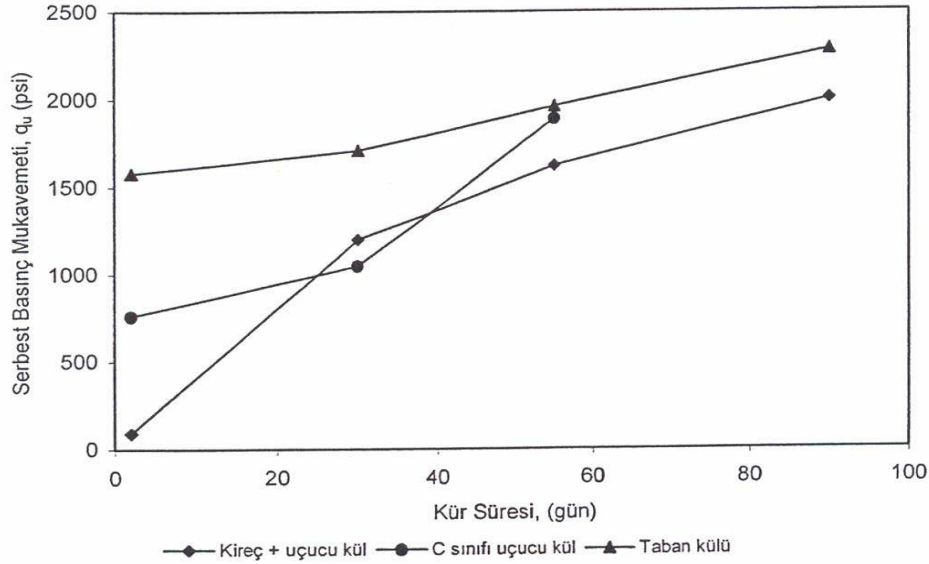
Deneyler neticesinde, zemine uçucu kül ilavesi ile mukavemet değerlerinde belirgin artışlar elde edilebildiğini fakat uçucu kül oranının artışının, belirli bir değerden sonra olumlu bir katkı sağlamadığı neticesine ulaşılmıştır. Araştırmacı, atık madde konumundaki uçucu küllerin yol dolgularında kullanılmasının ülke ekonomisi için yararlı olacağını belirtmektedir.



**Şekil 2.2.** Farklı Oranlarda Uçucu Kül Katkısının Zamana Bağlı Olarak Dayanıma (%5 çimento + %5 bentonit) (Özbayoğlu, 1993)

Smith (1993), diğer araştırmacılarından farklı olarak uçucu külün tek başına endüstriyel atıkların stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Netice olarak birçok uygulamada kullanılan, fiyatı yüksek olan ve üretimi kısıtlı olan taban külü, kireç tozu

ve çimento tozu karşısında uçucu külün, kolay elde edilebilirliği ve ucuzluğu sebebiyle endüstriyel atık stabilizasyonunda kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır. Şekil 2.3 'de uçucu kül ve diğer malzemelerin mukavemette meydana getirdikleri zamana bağlı artış gösterilmektedir.



**Şekil 2.3.** Uçucu Kül ve Diğer Malzemelerin Mukavemette Meydana Getirdikleri Zamana-Bağlı Artış (Smith, 1993)

Çokça ve Toktaş (2002), dispersif bir kilin C tipi uçucu kül ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Değişik oranlarda ( %0, 3, 5, 7, 10, ve 13 ) C tipi uçucu külü dispersif zemin numunesine katarak, uçucu kül ilavesinin indeks, mukavemet ve konsolidasyon özelliklerine etkisine bakmışlardır. Sonuç olarak, uçucu kül miktarının artmasıyla numunenin optimum su içeriklerinin arttığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığını bulmuşlardır. Numunenin içerisindeki uçucu kül miktarının artmasıyla numunenin sıkışabilirliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca numune içindeki uçucu kül miktarının %7'ye kadar numunenin serbest basınç dayanımının arttığını, fakat daha fazla uçucu kül katkısının serbest basınç dayanımında düşüşe yol açtığını belirtmişlerdir (Çizelge 2.7).

**Çizelge 2.7.** Dispersif Bir Kilin C Tipi Uçucu Kül İle Stabilizasyon (Çokça Ve Toktaş, 2002)

| Uçucu kül (%) | Serbest basınç dayanımı (kN/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|----------------------------------------------|
| 0             | 456,49                                       |
| 3             | 462,55                                       |
| 5             | 537,67                                       |
| 7             | 536,42                                       |
| 10            | 464,64                                       |
| 13            | 462,81                                       |

Cömert, Koyuncu, Fırat ve Sümer (2006), uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminlerde kür süresinin taşıma gücü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bunun içinde taze ve 28 günlük kür etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, 28 gün kür edilen karışımların CBR değerinin, geleneksel CBR deneyi sonuçlarına göre elde edilen CBR deneyinden %4 - %160 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak puzzolanik reaksiyon içeren zemin stabilizasyonlarında, CBR deneyinin 28 gün kür edilmiş örnekler üzerinde yapılmasının daha uygun olacağı sonucuna varmışlardır.

Aksoy, Yılmaz ve Akarsu (2006), killi bir zeminin C tipi uçucu kül kullanılarak stabilizasyonunu araştırmışlardır. Killi zemine %0, 3, 5 ve 10 gibi oranlarda C tipi uçucu kül katılarak optimum su muhtevalarında elde edilen 1 günlük ve 7 günlük kür süresine sahip numuneler üzerinde tabi serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Sonuçta serbest basınç mukavemetinin artan kül miktarı ile arttığını tespit etmişlerdir.

Alkaya, İmançlı, Alyanak, Erken ve Çobanoğlu (2006), Yatağan Termik Santrali uçucu küllerinin zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Uçucu külün zemin üzerindeki etkilerini belirlemek için zemine %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında uçucu kül ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numuneler üzerinde birtakım deneyler (kıvam limitleri, proctor ve serbest basınç deneyi) yapmışlardır. Uçucu kül ilavesi ile  $g_{kmax}$  değerinin azaldığını ve optimum su muhtevasının da azaldığını tespit etmişlerdir. Serbest basınç deneyleri sonucunda ise; zeminin kayma mukavemetinin artan kül oranı

ile birlikte arttığını belirlemişlerdir. İlk 3 aylık kür süresi boyunca doğrusal bir artış meydana geldiğini ancak; 3 aydan sonra artışın daha yavaş bir hızla devam ettiğini bulmuşlardır. Bu sonuçlar çizelge 2.8’de verilmiştir.

**Çizelge 2.8.** Uçucu Kül Katkı Oranı ve Kür Süresine Göre Serbest Basınç Mukavemet Değerleri (kN/m<sup>2</sup>) (Alkaya, İmançlı, Alyanak, Erken ve Çobanoğlu, 2006).

| Karışım/Kür süresi          | Hemen | 1 Hafta | 1 Ay  | 3 Ay  |
|-----------------------------|-------|---------|-------|-------|
| <b>Zemin</b>                | 103,2 |         |       |       |
| <b>%5 UK Katkılı Zemin</b>  | 128,2 | 135     | 150   | 206   |
| <b>%10 UK Katkılı Zemin</b> | 131,8 | 146     | 176,7 | 235,1 |
| <b>%15 UK Katkılı Zemin</b> | 142,5 | 156,7   | 176,7 | 327   |
| <b>%20 UK Katkılı Zemin</b> | 135,8 | 160,3   | 195,9 | 334,4 |
| <b>%25 UK Katkılı Zemin</b> | 146   | 160,3   | 215,1 | 377,7 |

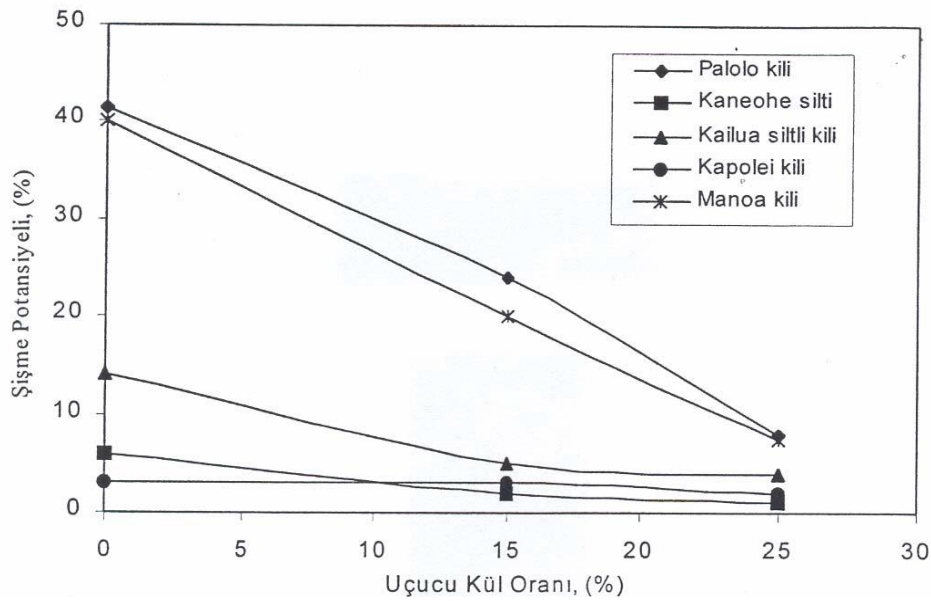
Atanur (1971), İzmir – Turgutlu Nif dere malzemesinin inşaat yerine yakın oluşu nedeniyle stabilizasyonda kullanılması uygun görülmüştür. Yapılan uçucu kül-çimento stabilizasyonunda Soma Termik Santralı uçucu külü kullanılmıştır. Karışımlarda çimento yüzdeleri %2, 3, 4 olarak, uçucu kül yüzdeleri ise %4, 6, 8 olarak alınmıştır. Standart Proctor Deneyi sonuçlarına göre, malzemeye çimento ve uçucu kül ilave edildiğinde karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığında düşüş, optimum su içeriklerinde ise artışlar meydana gelmiştir. Hazırlanan numuneler 7, 14, 28 ve 60 günlük kürlerden sonra serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde %8 uçucu kül oranında maksimum mukavemet değeri elde edilmiştir. %4 çimento, %8 uçucu kül için 28 günlük mukavemet 38,2 kg/cm<sup>2</sup> bulunmuştur. Islatma – kurutma ve donma – çözülme deneyleri ise, uçucu kül oranları %4, 6 ve 8 olarak arttıkça, ağırlık kayıplarında azalmalar görülmüştür.

Atanur (1971), Soma – Bergama dere ocağı malzemesi üzerinde de Soma Termik Santralı uçucu külü ve çimento ile yol stabilizasyonu çalışması yapılmıştır. Malzemeye %10, 20, 30 uçucu kül ve %2, 3, 4 çimento ilavesiyle deneyler yapılmıştır. Standart Proctor deneyinde uçucu kül oranları arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıklar

azalmış, optimum su içerikleri ise artmıştır. Serbest basınç mukavemeti değerlerinde de, %10 uçucu kül oranında maksimum mukavemetler elde edilmiştir. % 4 çimento, %10 uçucu kül için 28 günlük mukavemet 29,3 kg/cm<sup>2</sup> bulunmuştur. Islatma – kurutma ve donma – çözülme deneylerinde ise yine %10 uçucu kül oranında ağırlık kayıpları en az olmuştur.

Alataş (1996), Afşin – Elbistan Termik Santralı uçucu külünün yol stabilizasyonunda çeşitli malzemelerle birlikte kullanımı üzerine bir araştırma yapmıştır. Sonuçta, Afşin – Elbistan Termik Santralı uçucu külünün, yol stabilizasyonunda, diğer esas bağlayıcılarla birlikte kullanılabileceği belirtmiştir. Böylece hem diğer bağlayıcıların daha az kullanılmasına imkan vererek, bu malzemelerden tasarruf sağlanacağı ve hem de uçucu külün kullanım alanının genişleyeceği sonucuna varmıştır.

Nicholson ve Kashyap (1993), yüksek şişme potansiyeline sahip, volkanik kökenli Hawaii zeminlerinin şişme potansiyellerinin, uçucu kül ilavesi ile değişimlerini incelemiştir. Kaneohe kili ve Kailua siltli kilinin CBR şişme testinde, şişme potansiyeli değerlerinin %10 mertebesinden, %1 seviyesine indiğini gözlemlemiştir. 5 tip zemin üzerinde ayrıca gerçekleştirilen serbest şişme testlerinde, her zemin tipi için uçucu kül ilavesinin şişme potansiyelini azalttığını belirlemiştir.



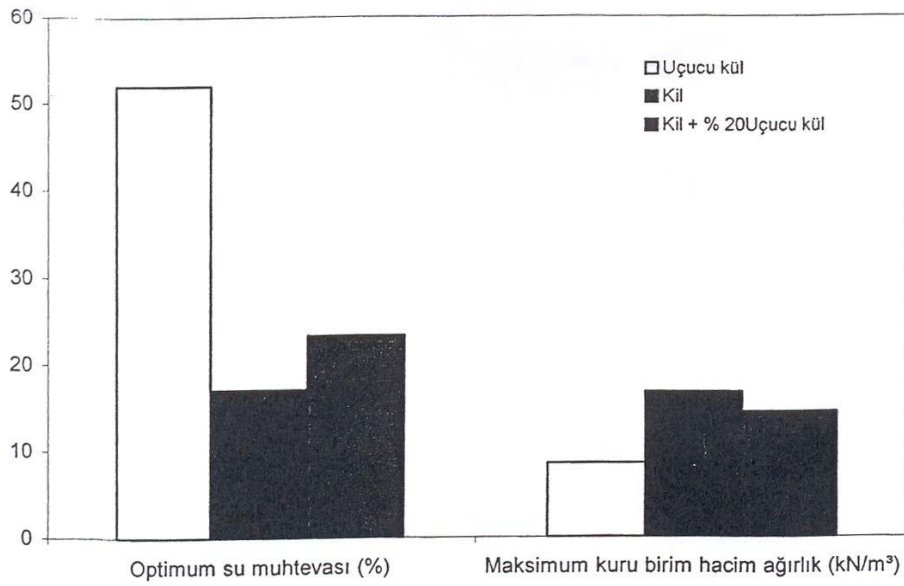
**Şekil 2.4.** Volkanik Kökenli Hawaii Zeminlerinin Şişme Potansiyellerinin Değişimi (Nicholson ve Kashyap, 1993).

Türker (2000), şişen zeminlerin uçucu kül ve kum ile stabilizasyonunu araştırmıştır. C ve F tipi uçucu külü kum ile beraber şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanmış ve şişme basıncı deneyleri yapmıştır. Uçucu kül içeren numunelerin şişme yüzdesi ve şişme basıncında azalma meydana geldiğini gözlemlemiştir. Kumun uçucu külün yerini aldıkça azalmanın devam ettiğini ve 28 günlük kürlü %15 C tipi uçucu kül ve %10 kum içeren numunenin en iyi performansı gösterdiğini tespit etmiştir.

Wasti (1990), uçucu küllerin geoteknik özelliklerini (indeks, kompaksiyon, kayma mukavemeti ve kompresibilite) incelemiş, uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kullanılarak değerlendirilebileceği sonucuna varmıştır.

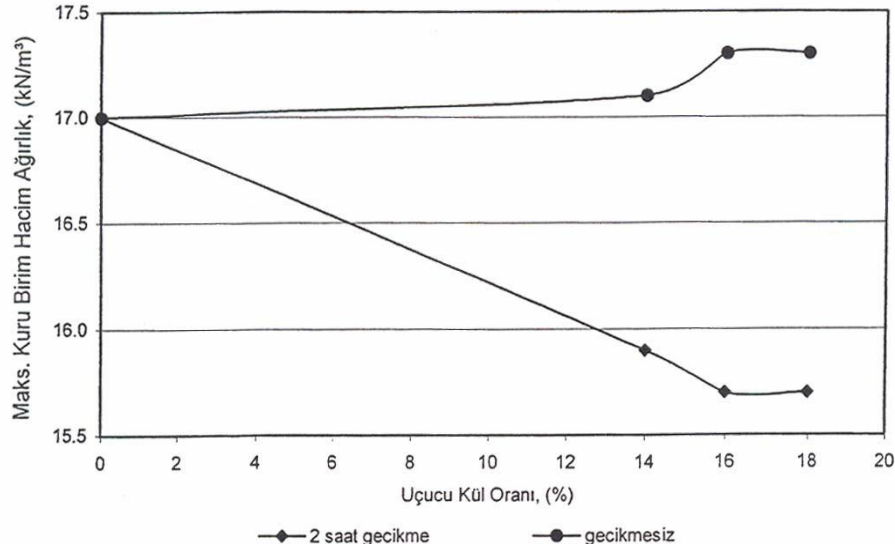
Wasti (1993), yaptığı deneyler neticesinde F tipi, C tipi ve Türkiye’den Çatalağzı ve Soma – B uçucu küllerinin, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerini araştırmıştır. Araştırmacı, uçucu küllerin bu özelliklerinden dolayı yapay dolguların teşkilinde kullanılabileceğini ifade etmektedir. Uçucu kül, hafif olması nedeniyle, özellikle zayıf taban zemini durumunda, kullanışlı bir çözüm olabilmektedir. Çalışmada uçucu kül dolgusuna ait bir tasarım çalışmasına da yer verilmiştir. Uçucu külün büyük miktarlarda kullanımına imkan veren bu tarz çalışmalar, termik santrallerde yaşanan depolama ve saklama sorunlarının çözümüne önemli bir katkı sağlayabilecektir.

Günel (1996), araştırmasında İstanbul Kemerburgaz kilinin, %20 Seyitömer uçucu külü ilavesi ile değişen kompaksiyon özelliklerini incelemiştir. Araştırma neticesinde, kil ve uçucu kül karışımının kompaksiyon eğrisinin, kil ve uçucu kül numunelerine ait kompaksiyon eğrilerinin arasında yer aldığı ve beklendiği üzere karışımın optimum su muhtevasının, kil numunesinin optimum su muhtevasından büyük olduğu ve karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığında kil numunesine göre bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

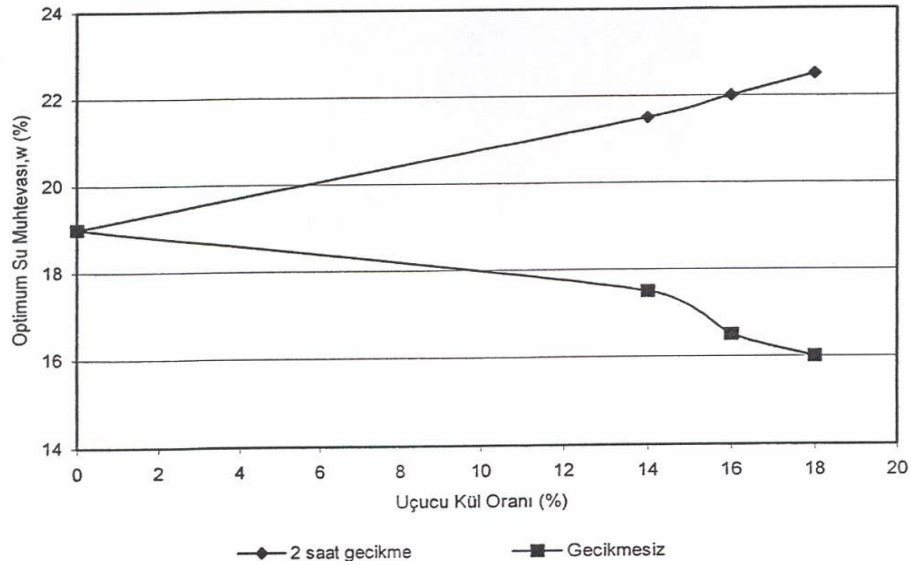


**Şekil 2.5.** Kemberburgaz Kiline Ait Kompaksiyon Karakteristikleri (Günel, 1996)

Ferguson (1993), Topeka Heartland park yarış pistinin iyileştirilmesi projesinde 6 farklı zemin cinsi üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda, değişik sonuçlar elde etmiştir. Örneğin killi şist zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de görüldüğü üzere 2 saat gecikme ile gerçekleştirilen Standart Proctor deneyi sonucunda, maksimum birim hacim ağırlıkta azalma ve optimum su muhtevasında artış gözlemlenirken, gecikme olmadan gerçekleştirilen deneylerde ise maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde az da olsa bir artışla beraber, optimum su muhtevası değerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 2.6.** Gecikmenin Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık Değerlerine Etkisi (Ferguson, 1993)



**Şekil 2.7.** Gecikmenin Optimum Su Muhtevasına Etkisi (Ferguson, 1993)

Khan ve Sarker (1993), uçucu kül ile zemin stabilizasyonu çalışmalarında enzim kullanımının etkilerini kaolin kili üzerinde incelemişlerdir. Araştırmada kullanılan enzim, organik kökenli, toksit olmayan ve çevreye zararsız olup, biyolojik yöntemlerle elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül kullanılması sebebiyle, puzzolanik aktivite yaratmak maksadıyla, zemine ayrıca bir miktar kireç ilavesi de yapılmıştır. Araştırmacılar



deneysel çalışmalar neticesinde, zemin - uçucu kül karışımına enzim ilavesinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde belirgin bir değişime sebep olmadığı sonucuna varmışlardır.

Chu ve Kao (1993), düşük plastisiteli Tayvan kili ile faklı oranlarda uçucu kül ve cüruf karıştırarak, kompaksiyon karakteristiklerinde meydana gelen değişimleri deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, kil numunesine uçucu kül ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri azalmakta iken, optimum su muhtevasında meydana gelen artış nişpeten daha az olmaktadır. Bu karışıma ayrıca cüruf ilave edildiğinde ise farklı oranlardaki karışımlarda dahi, maksimum kuru birim hacim ağırlığı yaklaşık aynı değeri alırken, optimum su muhtevası artışını sürdürmektedir.

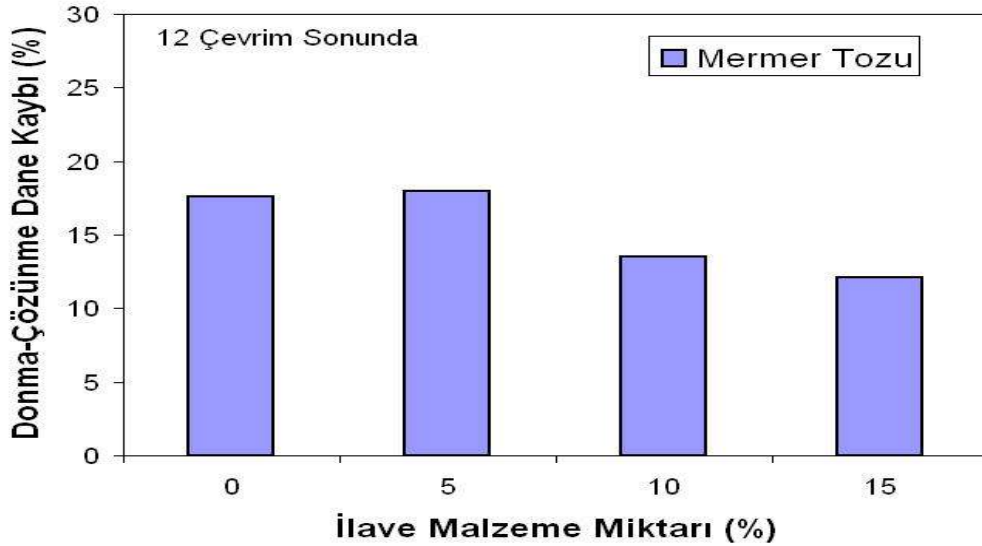
Okagbue ve Onyeaobi (1999), yol inşaatında değerlendirilebilirliği ile ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan biri; kırmızı l kumlarının stabilizasyonunda kullanılmış ve verimi artırdığı gözlemlemiştir. Genellikle kullanılabilirliğini test etmek için Atterberg limit, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), basınc, Proctor gibi testler uygulanmıştır.

Zorluer ve Usta (2003), iki farklı numuneleri için standart proctor enerji seviyesinde ( $600 \text{ kJ/m}^3$ ) ve 5 ayrı katkı seviyesinde (% 0, 1, 3, 5, 7) hazırlanan numunelerde şişme deneyleri yapılmıştır. Her katkı seviyesi için 24 saat sonunda ölçülen şişme yüzdesi değerlerinin ortalaması alınmıştır. Mermer tozu katkısının artması ile şişme yüzdesi değerlerinde azalma olmuştur. En az şişme yüzdesi, % 5 katkı seviyesinde gözlenmiştir.

Yıldız (2008), Mermer Toz Atıkları; kil ve kil-çakıl içerikli zemin toprakları ile karışım yapıldığı zaman plastisite ve permeabiliteyi düşürdüğü ve maksimum kuru yoğunluğu artırdığı için %20 oranında stabilizasyonda kullanılabilir. Kumlu zeminler için toz atık miktarı %30-40'a kadar yükseltilebilir. Oran arttıķa, kumlu zeminler daha stabil hale gelmektedir. İlave edilen toz atıklar homojene yakın olursa daha iyi sonuçlar vermektedir. Toprak numuneleri ile yapılan mermer toz atıklarının karışımları mukavemet değerini genel olarak %10 civarında artırmaktadır. Proctor deney

sonuçlarına benzer şekilde tane boyutu mukavemet üzerinde de etkilidir. İnce tane boyutu çok fazla olan atık çamurlar, ince tane boyutu yüksek olan toprak malzemelerde kullanılmamalıdır.

Zorluer v.d. (2006), Deney sonuçlarına göre, karışımlardaki atık mermer tozu miktarlarının artmasıyla numunelerin donma-çözünme mukavemetleri artmıştır. % 5 mermer tozu ilavesi donma-çözünme üzerinde etkisiz kalmaktadır. % 15 mermer tozu ilavesi ile donma çözünme deneyi sonunda %12,5 dane kaybı göstermiştir.%10 mermer tozu ilavesinde ise %13,5 dane kaybı göstermiştir. Şekil 2.8’de dayanımda oluşan değişimleri görülmektedir.



**Şekil 2.8.** Atık Mermer Tozlarının Donma-Çözölmeye Etkisi

Donma-çözölme deneyi ile oluşan deformasyonlar sonucunda %10 ve %15 mermer tozu katılan karışımlarda oluşan dane kaybı, literatürde belirtilen maksimum %15 dane kaybı miktarı ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. %5 mermer tozu karışımı ile elde edilen numunenin, kontrol numunesine çok yakın sonuç verdiği gözlenmiş ve bu karışım oranının fazla etkili olmadığı gözlenmiştir. En az deformasyonun %15’lik karışımında bulunmuştur. Dolayısıyla mermer tozunun artışıyla dayanım artışı arasında bir doğru orantı olduğu saptanmıştır.

Terzi ve arkadaşları (2003), mermer toz atıklarının asfalt betonunda agrega tozuna alternatif olarak dolgu malzemesi şeklinde kullanımını araştırmışlar; özellikle mermer tozunun yaygın olarak bulunduğu bölgelerde taşıma ve kurutma maliyetinin taş tozu filler maliyetini geçmediği kesimlerde, asfalt betonu karışımlarda agrega tozu yerine mermer tozlarının kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Usta (2004), Bu çalışmada atık mermer tozu, stabilizasyon katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Mermer tozu, zeminin kuru ağırlığına göre belirli yüzde oranlarında ilave edilmiştir. Karışım oranları % 3-5-8 ve 10 olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda kompaksiyon karakterlerine göre maksimum kuru yoğunluk katkı miktarının artışına paralel olarak arttığı görülmüştür. Mermer tozu katkı miktarındaki artışın eksenel gerilme değerlerinde artış sağladığı yapılan serbest basınç deneylerinden gözlenmiştir.

### **3. MATERYAL VE METOD**

Mermer tozu ve uçucu kül zemin stabilizasyonunda değerlendirilmesi için yapılan çalışmalar dört farklı başlık altında sürdürülmüştür; Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), Eksenel Basınç Deneyi, Şişme Deneyi, Donma-Çözülme ve Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Deneyi.

Deneyler için Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Yapı Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı kullanılmıştır.

#### **3.1. MATERYAL**

##### **3.1.1. Zemin**

Zemin numunesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Ahmet Necdet Sezer kampüsü içerisinde bulunan bir bölgeden örselenmiş bir şekilde alınmıştır. Zemin numunesi yapı bölümü laboratuvarında oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir.

Deney numunesinin endeks ve kayma mukavemeti özelliklerini belirlemek üzere Afyon Kocatepe Üniversitesi Yapı bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında bir seri deneyler yapılmıştır.

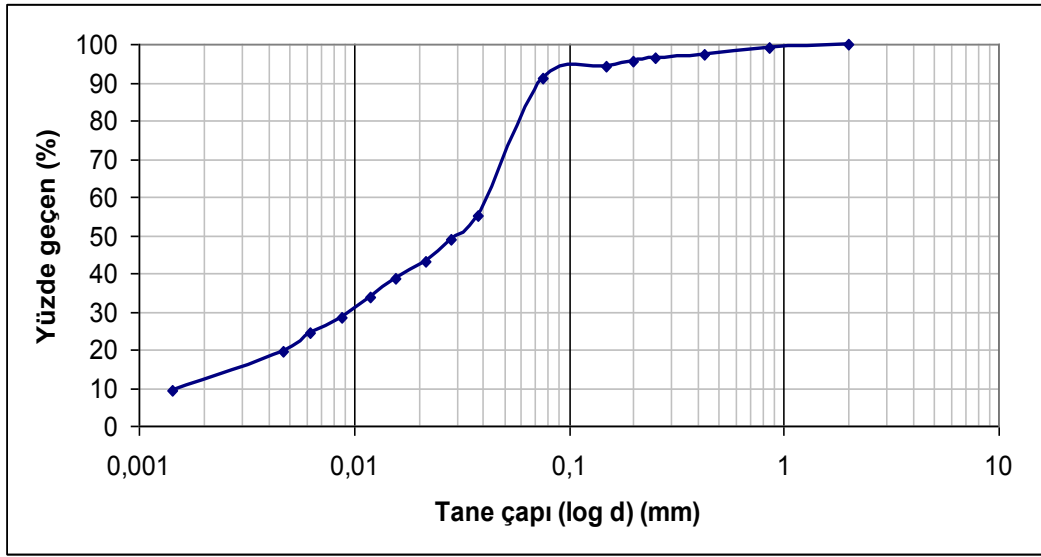
Deney üzerinde, ilk önce ASTM standartlarına göre elek analizi deneyi yapılarak dane çapı dağılımı bulunmuştur (Çizelge 3.2). Elek analizi deney sonuçları toplu olarak şekil 3.1'de verilmiştir. Zemin numunesinin fiziksel ve kompaksiyon özellikleri çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Zemin Numunesinin Fiziksel ve Kompaksiyon Özellikleri

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| <b>0,075 mm &gt; (%)</b>                   | 90,92 |
| <b>4,76 mm &gt; (%)</b>                    | 100   |
| <b>Likit limit (%)</b>                     | 60,36 |
| <b>Plastik limit (%)</b>                   | 28,20 |
| <b>Plastisite İndisi (PI)</b>              | 32,16 |
| <b>Özgöl ağırlık (kN/m<sup>3</sup>)</b>    | 2,49  |
| <b>Zemin Grup Sembolü</b>                  | CH    |
| <b>δ<sub>dmax</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b> | 1,47  |
| <b>W<sub>opt</sub> (%)</b>                 | 20    |

**Çizelge 3.2.** Elek Analizi Deney Sonuçları

| <b>Elekler</b> | <b>Elekte kalan (gr)</b> | <b>Elekten geçen (gr)</b> | <b>Elekten geçen (%)</b> |
|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>10</b>      | 8                        | 4992                      | 99,84                    |
| <b>20</b>      | 38                       | 4954                      | 99,08                    |
| <b>40</b>      | 77                       | 4877                      | 97,54                    |
| <b>60</b>      | 48                       | 4829                      | 96,58                    |
| <b>80</b>      | 53                       | 4776                      | 95,52                    |
| <b>100</b>     | 66                       | 4710                      | 94,2                     |
| <b>200</b>     | 164                      | 4546                      | 90,92                    |
| <b>TAVA</b>    | <b>43</b>                | <b>4503</b>               | <b>90,06</b>             |



**Şekil 3.1.** Elek Analizi ve Hidrometre Sonuç Grafiği İle Tane Dağılımı

### 3.1.2. Uçucu Kül

Deneysel çalışmalarda kullanmak için Manisa-Soma B Termik Santralinden getirilerek yapı bölümü laboratuvarında oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Termik santrali 1034 MW gücünde olup yakıt cinsi olarak linyit kullanılmaktadır.

Kullanılan bu külün kimyasal özellikleri (Çizelge 3.3)'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (Toplamda %83,19) miktarları bakımından standartlara uymaktadır. Bu yüzden kullanılan kül kimyasal kompozisyon bakımından F sınıfı bir küldür. Ayrıca kullanılan külün özgül ağırlığı  $2,70\text{gr/cm}^3$ 'dür.

**Çizelge 3.3.** Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

| $\text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{SO}_3$ | $\text{Ti}_2\text{O}_2$ | Mgv  | $\text{P}_2\text{O}_5$ | Alkali |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|---------------|-------------------------|------|------------------------|--------|
| 48.28          | 7.19                    | 27.72                   | 10.51        | 3.16          | 1.28                    | 2.52 | 0.27                   | 2.00   |

Fabrikadan alınan uçucu kül değerlerine göre; uçucu külün karakteristik özelliğinde erime sıcaklığı  $1178^\circ\text{C}$ 'dir.

### 3.1.3. Mermer Tozu (Traverten tozu)

Çalışmada kullanılan mermer tozu, Afyon/İscehisar ilçesi şahinler mermer tesisinden alınmıştır. Aslında traverten olan malzeme için genel ifade mermer kullanılmıştır. Atık mermer tozu, mermerin işlenmesi sırasında ortaya çıkmaktadır. Piknometre ile yapılan deneyde travertenin özgül ağırlığı 2,56 bulunmuştur. Mermer tozunun kimyasal analizi çizelge 3.4' de verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Mermer Tozunun Kimyasal Özellikleri

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 0,2   |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,07  |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,11  |
| <b>CaO</b>                         | 54,5  |
| <b>MgO</b>                         | 0,3   |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,01  |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,01  |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,02  |
| <b>MnO</b>                         | 0,02  |
| <b>SrO</b>                         | 0,05  |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | 0,08  |
| <b>F</b>                           | 0,13  |
| <b>A.Z.</b>                        | 44,52 |

## 3.2. METOD

### 3.2.1. Numune Hazırlama

Belirli bir ağırlıkta alınan zemin numunesi, geniş bir plastik kaptaki, o deney grubuna ait oranda uçucu kül ve mermer tozu ile daha önceden belirlenen optimum su muhtevasını sağlayacak miktardaki su, malzemelerin üzerine ilave edilerek karışım hazırlanmıştır.

Karışım homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra standart proctor sıkıştırma enerjisinde deney yapılmak üzere kalıba konulmuştur. Deneyler 3 tabaka ve 30,48 cm yükseklikten; Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi 56 vuruş, diğer yapılan bütün deneyler (eksenel basınç, donma-çözülme, şişme) ise 25 vuruş olarak uygulanmıştır.

Hazırlanan numunelerin saklanma koşulları, çeşitli dış faktörlerin deney sonuçlarını etkilememesi için büyük önem arz etmektedir. Numunelerin saklanması en önemli unsur numunelerin sürekli su ile kür edilmesidir. Kaliforniya taşıma oranı(CBR) deney numuneleri ve şişme deneyi numuneleri hariç, diğer deneylerdeki her bir numune streç film ile 3'er defa sarıldıktan sonra düz bir tahta üzerine dizilmiştir. Daha sonra tahta üzerinde bulunan numunelerin hepsi hiçbir şekilde hava almayacak şekilde streç film ile sıkıca sarılarak üzerleri ıslak bez ile örtülmüş ve oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. 2 günde bir bu bezler sürekli olarak ıslatılarak deney yapılana kadar bu ortamda muhafaza edilerek kür uygulanmıştır.

***Eksenel basınç deneyinde,*** çapı 3,80cm ve boyu 7,80cm olan silindir şeklindeki demir kalıplar kullanılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi standart proctor sıkıştırma enerjisi uygulanmış numune kalıbının düzgün olan yüzeyine ölçüleri belirtilmiş, bir ucu numunenin kolay alınabilmesi için sivrileştirilmiş olan 3 adet silindir kap konularak hidrolik preste içerisine zemin numunesinin girmesi sağlanmıştır. Daha sonra kalıbın içindeki silindirler hidrolik krikoy ile düzgün bir şekilde çıkartılıp çap, boy ve ağırlık tartımları yapıldıktan sonra numunelere yukarıda belirtildiği gibi kür uygulanarak 1, 7,



28 ve 56 gün bekletilmiştir. Eksenel basınç deneyi için, deney gruplarına göre numune sayısı dağılımı verilmiştir (Çizelge 3.5).

**Çizelge 3.5.** Eksenel Basınç Deneyi İçin Numune Dağılımı

| KATKI ORANLARI      | W (%) | 1 GÜN | 7 GÜN | 28 GÜN | 56 GÜN | TOPLAM |
|---------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| MT: %5 UK: %10      | 15    | 3     | 3     | 3      | 3      | 12     |
| MT: %10 UK: %20     | 15    | 3     | 3     | 3      | 3      | 12     |
| MT: %15 UK: %30     | 15    | 3     | 3     | 3      | 3      | 12     |
| MT: %5 UK: %10      | 20    | 3     | 3     | 3      | 3      | 12     |
| MT: %10 UK: %20     | 20    | 3     | 3     | 3      | 3      | 12     |
| MT: %15 UK: %30     | 20    | 3     | 3     | 3      | 3      | 12     |
| TOPLAM NUMUNE ADEDİ |       |       |       |        |        | 72     |

*Donma-çözülme deneyi için*, çapı 10,50 cm, boyu 11,55 cm olan silindir şeklindeki çelik kalıp kullanılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi standart proctor sıkıştırma enerjisi uygulanmış numune kalıbının üst başlığı çıkarılarak kalıp hizasında düzgün bir şekilde traşlanır. Hidrolik kriko yardımıyla kalıpta bulunan numune dikkatli bir şekilde çıkartılıp hassas tartımı yapılarak yukarıda belirtildiği gibi kür uygulanarak 4, 8 ve 12 çevrime tabi tutulmuştur. Donma-çözülme deneyi için, deney gruplarına göre numune sayısı dağılımı verilmiştir (Çizelge 3.6).

**Çizelge 3.6.** Donma-Çözülme Deneyi İçin Numune Dağılımı

| KATKI ORANLARI      | W (%) | 4 ÇEVİRİM | 8 ÇEVİRİM | 12 ÇEVİRİM | TOPLAM |
|---------------------|-------|-----------|-----------|------------|--------|
| MT: %5 UK: %10      | 15    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| MT: %10 UK: %20     | 15    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| MT: %15 UK: %30     | 15    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| KATKISIZ ZEMİN      | 15    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| MT: %5 UK: %10      | 20    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| MT: %10 UK: %20     | 20    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| MT: %15 UK: %30     | 20    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| KATKISIZ ZEMİN      | 20    | 2         | 2         | 2          | 6      |
| TOPLAM NUMUNE ADEDİ |       |           |           |            | 48     |

**Şişme deneyinde**, pirinç malzemeden yapılmış çapı 5 cm, yüksekliği 2,1 cm olan odometre çelik halkası kullanılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi standart proctor sıkıştırma enerjisi uygulanmış numune kalıbının üstündeki yaka çıkartılarak yüzey düzgün bir şekilde kalıp hizasında traşlanır. Yüzey düzeltildikten sonra odometre çelik halkası, kompaksiyon kalıbının altına yerleştirilerek hidrolik krikoyla pirinç halkaya numune alınması sağlanır. Daha sonra kalıptan çıkartılarak yüzeyi ve kenarları düzgün bir şekilde kesilip hazır hale getirilir. Şişme deneyi için, deney gruplarına göre numune sayısı dağılımı verilmiştir (Çizelge 3.7).

**Çizelge 3.7.** Şişme Deneyi İçin Numune Dağılımı

| KATKI ORANLARI      | W: %15 | W: %20 | TOPLAM |
|---------------------|--------|--------|--------|
| KATKISIZ ZEMİN      | 1      | 1      | 2      |
| MT: %5 UK: %10      | 1      | 1      | 2      |
| MT: %10 UK: %20     | 1      | 1      | 2      |
| MT: %15 UK: %30     | 1      | 1      | 2      |
| TOPLAM NUMUNE ADEDİ |        |        | 8      |

**Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyinde**, çapı 15,2 cm, yüksekliği 12,7 cm, taban ve üst plakası 5 cm olan silindirik metal kalıp kullanılmıştır. Standart sıkıştırma enerjisi uygulanmadan önce numunenin statik sıkıştırılması için 15 cm çapında ve 5 cm kalınlığında disk yerleştirilir ve bu diskin üzerine 15 cm çapında süzgeç kağıdı yerleştirilir. Daha sonra yukarıda belirtildiği gibi standart proctor sıkıştırma enerjisi uygulanır. Deney tamamlandıktan sonra kalıbın üstündeki yaka çıkartılarak yüzey kalıp hizasında düzgün bir şekilde traşlanıp, taban plakası çıkartıldıktan sonra tartımı yapılarak föye kaydedilir. CBR deneyi için, deney gruplarına göre numune sayısı dağılımı verilmiştir (Çizelge 3.8).

**Çizelge 3.8.** CBR Deneyi İçin Numune Dağılımı

| KATKI ORANLARI      | W:<br>%15 | W:<br>%20 | TOPLAM |
|---------------------|-----------|-----------|--------|
| KATKISIZ ZEMİN      | 1         | 1         | 2      |
| MT: %5 UK: %10      | 1         | 1         | 2      |
| MT: %10 UK: %20     | 1         | 1         | 2      |
| MT: %15 UK: %30     | 1         | 1         | 2      |
| TOPLAM NUMUNE ADEDİ |           |           | 8      |

### 3.2.2. Tanımlama Deneyleri

#### 3.2.2.1. Dane Boyutu ve Dane Çapı Dağılımı

Zeminde ince ve iri daneli zeminler karışık olarak bulunabileceği için dane çapları 76.2 mm ile 0.074 mm arasında olan kısım elek analizine tabii tutulurken, çapları 0.074 mm den küçük olan zeminlerde ıslak analiz (hidrometre analizi ve pipet analizi) adı verilen yöntemler kullanılmaktadır (Aytekin, 2004).

Bu deney TS 1900-1 (2006)'e göre uygun bir şekilde yapılmış ve laboratuarda ASTM elekleri kullanılmıştır (ASTM D422, 2000).

#### 3.2.2.2. Hidrometre

200 no.'lu elekten geçen zeminden bir miktar alınarak, silindirik cam bir kap içinde 1000 ml'lik bir süspansiyon hazırlanır. Deney başlangıcından itibaren, belli süreler sonunda, süspansiyonun yoğunluğu, hidrometre ile ölçülür. Belli aralıklarla süspansiyon içerisine bırakılan hidrometreden okumalar yapılır. Okumaların yapıldığı anda süspansiyon sıcaklığında kaydedilir. Okumalar sıcaklık ve menisküs düzeltmeleri ile hesapları yapılarak tane dağılım grafiği çizilir (Uzuner, 2005). Bu deney TS 1900-1 (2006)'e göre uygun bir şekilde yapılarak iri kum boyutundaki ve daha ince tanelerin tane çapı dağılımı belirlenmiştir.

### 3.2.2.3. İnce Taneli Zeminler için Özgöl Ağırlık Deneyi

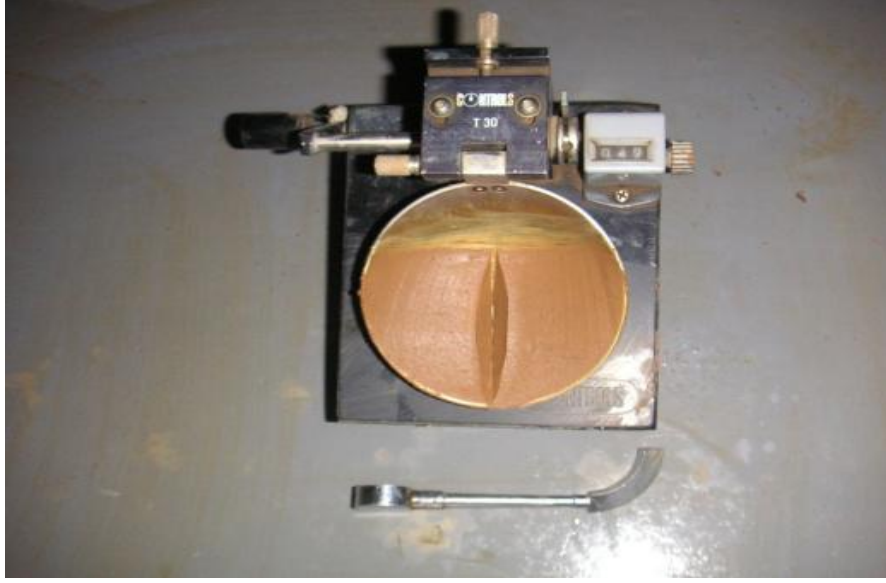
Bir katının birim hacim ağırlığını ölçmek için en basit yol numuneyi tartmak, hacmini de taşıdığı suyun miktarından ya da suda batık ağırlığından bularak oranı hesaplamaktır. Bir zemin örneğindeki danelerin sayısı çok fazla olduğundan hacim ölçümü piknometre denen damla biçimli hacim şişesinde ölçülmektedir. Bu deney zemin mekaniği laboratuvarında yapılan en zor deneylerinden biridir. Nedeni suyun ve su-kuru numune karışımının içinden havanın tam olarak alınamamasıdır (Önalp, 2002). Bu deney TS 1900-1 (2006)' e göre uygun bir şekilde yapılmıştır.

### 3.2.2.4. Atterberg Limit Deneyleri

Kıvam ile kohezyonlu zeminlerde, zeminin sertlik-yumuşaklık durumu belirtilir. Bu durumlar, böyle zeminlerin taşıma gücü vb. özelliklerini etkiler. İsveçli Atterberg (1911), bu durumları ve bunları ayıran sınır su muhtevalarına, Atterberg limitleri veya kıvam limitleri denilir (Uzuner, 2005). Atterberg limitleri, TS 1900-1 (2006)' e göre uygun bir şekilde yapılmıştır.

**Likit Limit:** Plastik ve likit durumları birbirinden ayıran sınır su içeriğidir. Başka bir deyişle, zeminin kendi ağırlığı altında akabildiği en düşük su içeriğidir. Likit durumda, zemin bir sıvı gibi yavaşça akabilir (Uzuner, 2005).

Likit limit, alete sıvanmış zeminde, standart boyutta bir oluk ile ikiye ayrılan zeminin 25 darbede oluk boyunca 1 cm kapandığı andaki su içeriğidir. Bu deney için, havada kurutulmuş ve 40 nolu elekten elenmiş zemin numunesi üzerinde likit limit deneyi yapılır ve likit limit grafiği çizilir (Alataş, 1996).



Şekil 3.2. Casagrande Likit Limit Deney Cihazı

**Plastik Limit:** Plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran sınır su içeriğidir. Diğer bir deyişle, zeminin, el altında, cam bir yüzey üzerine, çubuk haline getirilirken, çubukların çapları yaklaşık 3mm. olduğunda, kopmaların meydana geldiği durumdaki su içeriğidir. Plastik durumda zemin; kırılma, çatlama olmaksızın zemine istenilen şekil kolayca verilebilir (Uzuner, 2005).



Şekil 3.3. Plastik Limit Deney Numuneleri

Havada kurutulmuş ve 40 no'lu elekten elenmiş zemin numunesi üzerinde plastik limit deneyi yapılır. Tayin edilen su içeriği zeminin plastik limitini vermektedir (Alataş, 1996).

**Plastisite İndisinin Bulunması:** Plastisite indisi, likit limit değerinden plastik limit değerinin çıkarılması ile bulunmuş ve sonuçlar kayıt edilmiştir.

### 3.2.2.5. Standart Proctor Deneyi

Bu deney, standart proctor kalıbında, serbest basınç mukavemeti deneyi ve ıslatma-kurutma, donma-çözülme deneylerinde kullanılan numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriklerini tespit etmek için yapılır.



**Şekil 3.4.** Kompaksiyon Deney Aleti

Deney, her bir değişik malzeme oranlarındaki karışımlar için tekrarlanır. TS 1900-1 (2006)' e göre iç çapı 105,0 mm, iç yüksekliği 115,5 mm olan kalıp içinde 3 tabaka halinde ve 2,5 kg ağırlıklı standart tokmağın 30.5 cm yükseklikten her tabakaya 25 defa düşürülmesi suretiyle sıkıştırılır. Sıkıştırılan numunelerin hacmi, ağırlığı ve kalıptaki numuneden alınan küçük bir parçanın etüvde kurutulması ile bulunan su içeriği yardımı ile kuru birim hacim ağırlıkları tayin edilir. Bu işlem farklı su içeriklerinde hazırlanmış

numuneler üzerinde tekrarlanmak suretiyle proctor eğrisi, dolayısıyla optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlıklar elde edilir (Alataş, 1996).

### 3.2.2.6. Eksenel Basınç Deneyi

Bu deney ince daneli zeminlerin örselenmemiş veya sıkıştırılmış haldeki serbest basma dayanımının bulunması ile ilgilidir. Bir numunenin tek ekseninde basınç uygulanarak kırılması dayanımın en basit yoldan ölçümüdür. Bu deneyin koşulu zeminin kendini desteksiz tutacak kadar dayanıma sahip olmasıdır. Yükseklik / Çap oranı 2 olan silindirik numune uzun ekseninde boyuna hızla yüklenirken boy kısaltmaları ölçülür. Deney drenajsız olduğundan hacim sabit kalacak, böylece numunenin kesit alanı deney boyunca artacaktır. Kırılma sağlandığında zeminin serbest basınç dayanımı olarak tariflenmektedir (Önalp, 2002). Eksenel basınç deneyi TS 1900-2 (2006) ' e göre uygun bir şekilde yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, zemin numunesine değişen yüzdelerde uçucu kül ve mermer tozu eklenmesinin, zemin özelliklerine etkisini inceleyebilmek için 6 ayrı deney grubu oluşturulmuştur.

1. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %15 Su
2. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %15 Su
3. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %15 Su
4. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %20 Su
5. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %20 Su
6. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %20 Su

Her değişik karışım oranı için üçer adet hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyi yapılır (Alataş, 1996).



**Şekil 3.5.** Numunelerin Saklanma Koşulları

Yüklemeye 1,0 mm/dak hızla yapılmıştır. Deneyde kullanılan yük halkasının kalibrasyon katsayısı 0,30 kgf/div'dir. Deneyde kullanılan yük halkasının kapasitesi 10 kN'dur. Eksenel basınç mukavemeti deneyi yapılarak yük ve boy değiştirme okumaları deney föyüne kaydedilmiştir.

#### **3.2.2.7. Kaliforniya Taşıma Oranı ( CBR )**

Zemin numunesinin numune içerisine 1.27 mm/dk hızla batırılan penetrasyon pistonuna karşı gösterdiği direnç, diğer bir deyişle pistonun zemin numunesine batması için uygulanan kuvvet, aynı penetrasyon derinliği için standart bir kırma taş numunesinin gösterdiği dirence, diğer bir deyişle kırma taş için bu batma derinliğine kadar gelmek için uygulanan kuvvete oranı, California Taşıma Oranı, CBR (California Bearing Ratio), sayısı ya da kısaca CBR olarak adlandırılır (Aytekin, 2004). CBR deneyi, TS 1900-2 (2006)' e göre yapılmıştır.

Toprak malzemelerin maksimum kuru yoğunluk optimum su muhtevasında, penetrasyonla taneler arası kayma direnci ölçülmüştür. CBR standart değerleri aşağıda verilmiştir.



**Çizelge 3.9.** CBR Standart Değerleri (Aytekin, 2004).

| Penetrasyon derinliği<br>(mm) | Standart gerilme<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Standart yük<br>(kgf) |
|-------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| 2,54                          | 70,4                                       | 1362,6                |
| 5,08                          | 105,6                                      | 2043,9                |
| 7,62                          | 133,7                                      | 2587,7                |
| 10,16                         | 161,9                                      | 3133,5                |
| 12,7                          | 183                                        | 3541,9                |

**Çizelge 3.10.** CBR Sayısına Göre Zeminlerin Sınıflandırılması ve Kullanımı (Aytekin, 2000).

| CBR sayısı   | Zeminin tanımı | Kullanımı       | Sınıflandırılması      |                     |
|--------------|----------------|-----------------|------------------------|---------------------|
|              |                |                 | USCS                   | ASSHO               |
| 0-3          | Çok kötü       | Altyapı         | OH, CH, MH, OL         | A5, A6, A7          |
| 3-7          | Kötü-orta      | Altyapı         | OH, CH, MH, OL         | A4, A5, A6, A8      |
| 7-20         | Orta           | Alt temel       | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7      |
| 20-50        | İyi            | Temel-alt temel | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A1b, A2-5, A3, A2-6 |
| 50 den büyük | Çok iyi        | Temel           | GW, GM                 | A1a, A2-4, A3       |



**Şekil 3.6.** Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, zemin numunesine değişen yüzdelerde uçucu kül ve mermer tozu eklenmesinin, zemin özelliklerine etkisini inceleyebilmek için 8 ayrı deney grubu oluşturulmuştur.

1. % 100 Zemin Numunesi + %15 Su
2. % 100 Zemin Numunesi + %20 Su
3. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %15 Su
4. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %15 Su
5. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %15 Su
6. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %20 Su
7. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %20 Su
8. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %20 Su

Deney cihazındaki piston dakikada 1,27 mm'lik hızla zemine itilir. Yük okumaları 0,625-1,25-1,875-2,50-5,00-7,50-10-12,5 mm'lik penetrasyonlarda alınır. Ters Yönde Penetrasyon Değeri Ölçmek için Numunenin her iki ucu da denenecekse, taban plakası kalıbın altından üst ucuna takılır ve kalıp, içindeki numuneyle birlikte ters çevrilir ve 0,625-1,25-1,875-2,50-5,00-7,50-10-12,5 mm'lik penetrasyon değerleri föye kaydedilerek deney sonlandırılır. Penetrasyon değerleri ve bunlara karşılık olan piston yükleri bir grafik kâğıt üzerine işaretlenir ve elde edilen noktalar arasından düzgün bir eğri çizilir ve CBR değeri 2,5 mm'lik ve 5,0 mm'lik penetrasyonlarda hesaplanır ve elde edilen bu iki değerden büyük olanı zeminin CBR değeri olarak kabul edilir.

### **3.2.2.8. Şişme Deneyi**

Şişen zeminler yarı kurak ve kurak iklimlerde oluşmuş, suyla karşılaştıklarında gösterdikleri hacim değişimleri nedeniyle üstteki hafif yapılara ve kazı desteklerine hasar veren killerdir (Önalp, 2002). Yatay yüzölçümü (yarı sonsuz) bir zemin ortamında şişme (kabarma) ancak yukarı yönde olabilir. Kabarma genellikle üniform olmaz, farklı olur (Uzuner, 2005). Şişen zeminler sadece ABD de çok katlı olmayan binalar, karayolları, hava alanları, boru hatları ve diğer yapılarda yıllık 9 milyar dolarlık hasara

sebepe olmuştur (Jones, 1987). Bu zararın deprem, su baskını, kasırga ve fırtınaların yol açtığı toplam zararın iki katına ulaştığı belirtilmektedir (Aytekin, 1997).

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, zemin numunesine değişen yüzdelerde uçucu kül ve mermer tozu eklenmesinin, zeminin şişme etkisini inceleyebilmek için 8 ayrı deney grubu oluşturulmuştur.

1. % 100 Zemin Numunesi + %15 Su
2. % 100 Zemin Numunesi + %20 Su
3. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %15 Su
4. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %15 Su
5. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %15 Su
6. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %20 Su
7. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %20 Su
8. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %20 Su



**Şekil 3.7.** Konsolidasyon Deney Cihazı

Numune alma halkası yerleştirilmeden önce konsolidasyon kalıbına su kayıplarını önlemek için poroz taşı ve filtre yerleştirilir. Serbest şişme deneyinde, konsolidasyon halkasındaki örnek üzerine küçük bir basınç ( $7\text{kN/m}^2$  gibi) uygulanır. Numune kalıba

yerleştirildikten sonra kalıba saf su katılarak deney başlatılır ve 15. ve 30. sn'de, 1-2-4-8-15 ve 30. dk'da, 1-2-4-8 ve 24. saatlerde okuma yapılarak zamana bağlı şişme grafiği elde edilir.

### 3.2.2.9. Donma – Çözülme Deneyi

Yeteri derecede sertleşmiş numunelerin don olayına karşı dayanıklı olup olmadığını tespit etmek için bu deney yapılır. Donma ve çözülmeden, siltli ve killi zeminler, kumlu ve çakıllı zeminlere göre daha fazla etkilenirler. Zemin  $\frac{3}{4}$ '' eleğinden elenerek, çeşitli oranlarda hazırlanan ve optimum su içeriğinde maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırılmış olan numuneler, 7 gün kürde bekletildikten sonra istenilen sayıda 4, 8, 12 çevrime tabi tutulur (Kumbasar ve Önalp, 1970). Donma-çözülme olayının birçok sefer tekrarlanması sonucu oluşan boşluklar biraz daha genişlemekte ve bunun sonucu olarak da cismin yüzeyinde önemli derecelerde çatlaklar ve hatta döküntüler meydana gelmektedir (Postacioğlu, 1987). Literatüre baktığımızda; Hassini (1992)'de yapmış olduğu çalışmada derinliği fazla olmayan alanlarda 12 çevrim sonunda %10-15 arasında bir malzeme kaybının dayanımı fazla etkilemediğini tespit etmiştir.

Bu deneysel çalışmada, zemin numunesine değişen yüzdelerde uçucu kül ve mermer tozu eklenmesinin, çevre etkilerine karşı etkisini inceleyebilmek için 8 ayrı numune grubu oluşturulmuştur.

1. % 100 Zemin Numunesi + %15 Su
2. % 100 Zemin Numunesi + %20 Su
3. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %15 Su
4. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %15 Su
5. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %15 Su
6. % 5 Mermer Tozu + %10 Uçucu Kül + %20 Su
7. % 10 Mermer Tozu + %20 Uçucu Kül + %20 Su
8. % 15 Mermer Tozu + %30 Uçucu Kül + %20 Su



**Şekil 3.8.** İklimlendirme Cihazı ve Donma-Çözülme Numuneleri

Dijital iklimlendirme cihazı kullanılarak numunelere  $+21^{\circ}$  ve  $-23^{\circ}$  koşullarının etkileri ölçülür. Cihazda, numuneler öncelikle  $-23^{\circ}$  'de 24 saat bekletildikten sonra otomatik olarak  $+21^{\circ}$  ' de 24 saat daha bekletilmek suretiyle geçiş yapılmaktadır. Bu şekilde geçen 48 saatin sonu 1 çevrim olarak adlandırılmaktadır. Her bir çevrim sonunda, numuneler iklimlendirme cihazından çıkartılıp kenarları ve altı tel fırça ile düzgün bir şekilde fırçalanır.



**Şekil 3.9.** Donma-Çözülme Fırçalama

Hassas terazi kullanılarak tartım sonucu föy tablosuna yazılır. Numunelerin 4, 8, 12 çevrim sonlarındaki toplam kayıplarının hesaplanmasıyla yüzde olarak çevresel etkilere ne kadar maruz kaldıkları bulunur.

### 3.2.2.10. Donma – Çözülme Sonrası Eksenel Basınç

Eksenel basınç uygulanmasındaki amaç 4, 8 ve 12 çevrimin dayanımı nasıl etkilediğini araştırılmasıdır. Her bir numune eksenel basınç cihazına yerleştirilir ve numune presin alt platformuna merkezlenerek oturtulur. Alt ve üst başlıklar numuneye tam değecek şekilde ayarlanır. Alt başlığa yerleştirilen boy değişimini ölçen saat sıfırlanarak yüklemeye başlanır. Yüklemin eksenel bir şekilde olmasına dikkat edilmelidir. Yükleme 1,0 mm/dak hızla yapılır. Yük ve boy değiştirme okumaları deney föyüne kaydedilerek deney sonlandırılır.



Şekil 3.10. Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Uygulaması

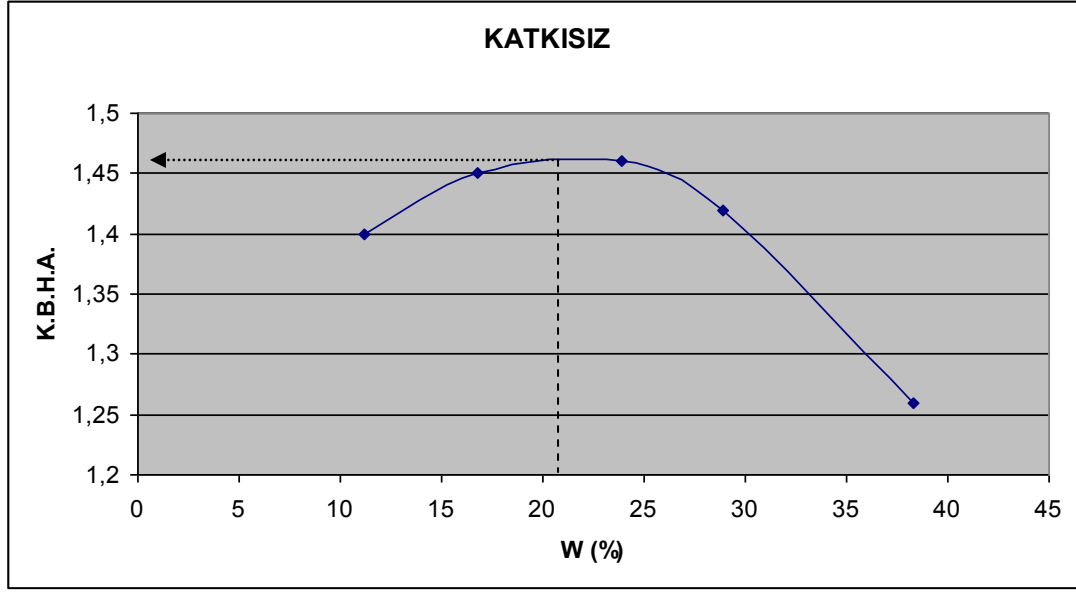
#### **4. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Deneysel çalışma, zemin (kil), uçucu kül, mermer tozu ve su karışımından oluşan silindir şeklinde hazırlanan numuneler 1, 7, 28 ve 56 günlük küre tabi tutularak eksenel basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Çevresel etkilere karşı deformasyonu araştırmak için 4, 8 ve 12 çevrim olarak donma-çözülme deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca bu çalışmada katkı oranları miktarına bağlı olarak zeminin taşıma gücünü belirlemek için CBR deneyleri uygulanarak sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra zemin numunesine belirlenen oranlarda katkı malzemesi konulup şişme değerleri ölçülmüştür. Deneylerde zemine, uçucu kül ve mermer tozu belirlenen oranlarda, farklı su muhtevalarında numuneler hazırlanıp bir takım deneylere tabi tutularak etkisi araştırılmıştır. Mermer tozu miktarı bütün numunelerde kuru ağırlığın %5, %10, %15, uçucu kül miktarı ise kuru ağırlığın %10, %20 ve %30'u olarak alınmıştır. Deney gruplarına göre hazırlanan numuneler, deney farklılıklarına göre kürlere tabi tutulmuştur. Bu bölümde yapılan her çalışmanın sonuçları verilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

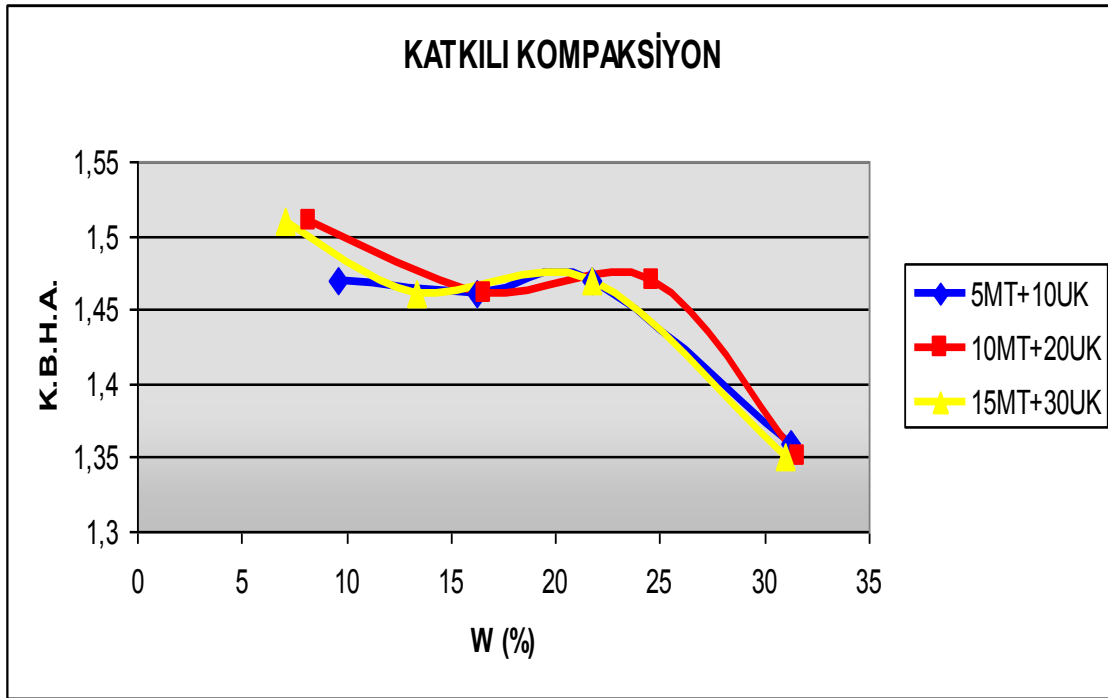
##### **4.1. Yapılan Deneysel Çalışmalar**

###### **4.1.1. Yoğunluk-Su Muhtevası İlişkisinin Belirlenmesi**

Bu deney zemin numunelerinin su muhtevasının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapacağımız deneysel çalışmalarda kullanacağımız su muhtevası için kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Kompaksiyon deneyi sonucunda da görüldüğü gibi %20 optimum su muhtevası elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler, seçilmiş olan bu su muhtevalarına göre üretilmiştir.  $1.47 \text{ g/cm}^3$  kuru yoğunluk değeri elde edilmiştir. Ayrıca su miktarının etkisini görmek için %15 su muhtevasında numuneler hazırlanmıştır.



**Şekil 4.1.** Katkısız Numunenin Standart Proctor İle Optimum Su Muhtevası Ve Maksimum Kuru Yoğunluğunun Belirlenmesi



**Şekil 4.2.** Katkılı Numunelerin Standart Proctor İle Optimum Su Muhtevası Ve Maksimum Kuru Yoğunluğunun Belirlenmesi



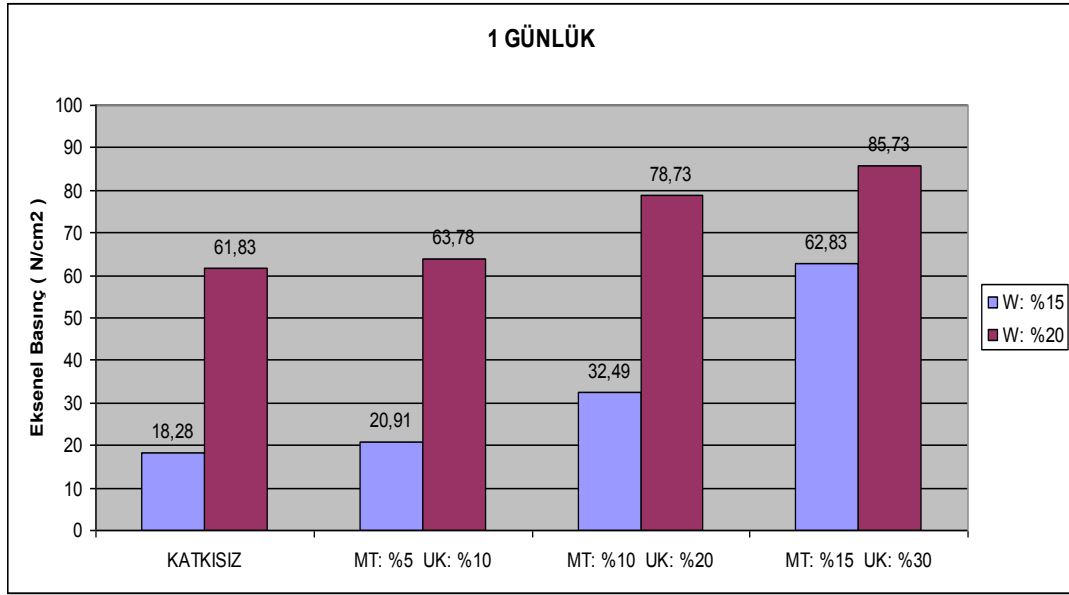
#### 4.1.2. Eksenel Basınç Deneyi Değerleri

Mermer tozu ve uçucu külün zeminin mukavemetine etkisini ve özellikle bu etkinin kür süresine bağlı olarak değişimini belirlemek amacıyla zemine %5, 10, 15 oranında mermer tozu ve %10, 20, 30 oranında uçucu kül, %15 ve %20 su ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. 1, 7, 28 ve 56 günlük kürlere tabi tutulan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır.



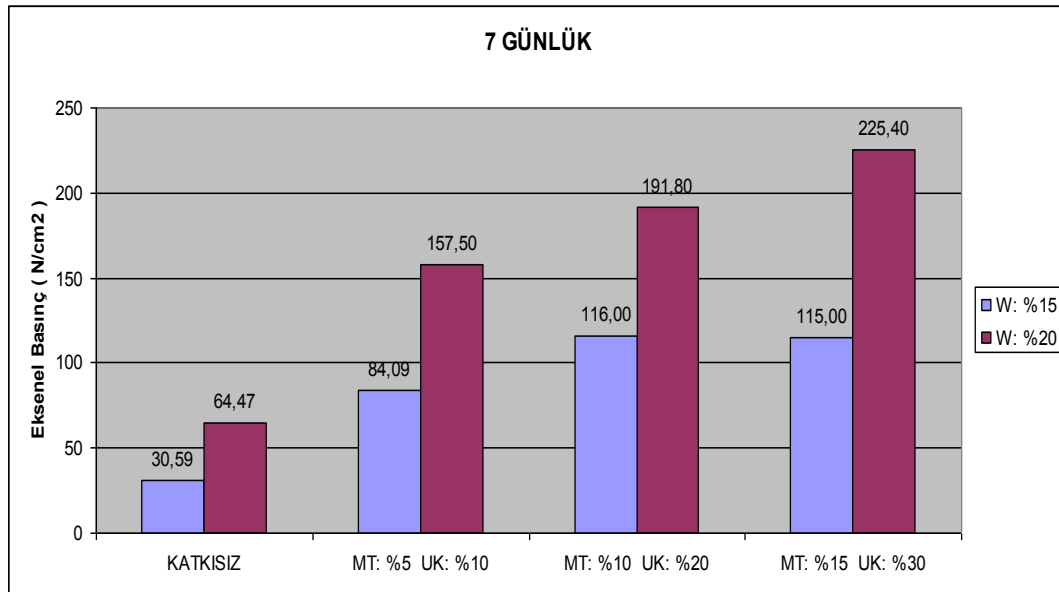
**Şekil 4.3.** Kırılmış Katkılı Numuneler

Elde edilen sonuçlar şekil 4.4 - 4.5 - 4.6 - 4.7’de gösterilmiştir.

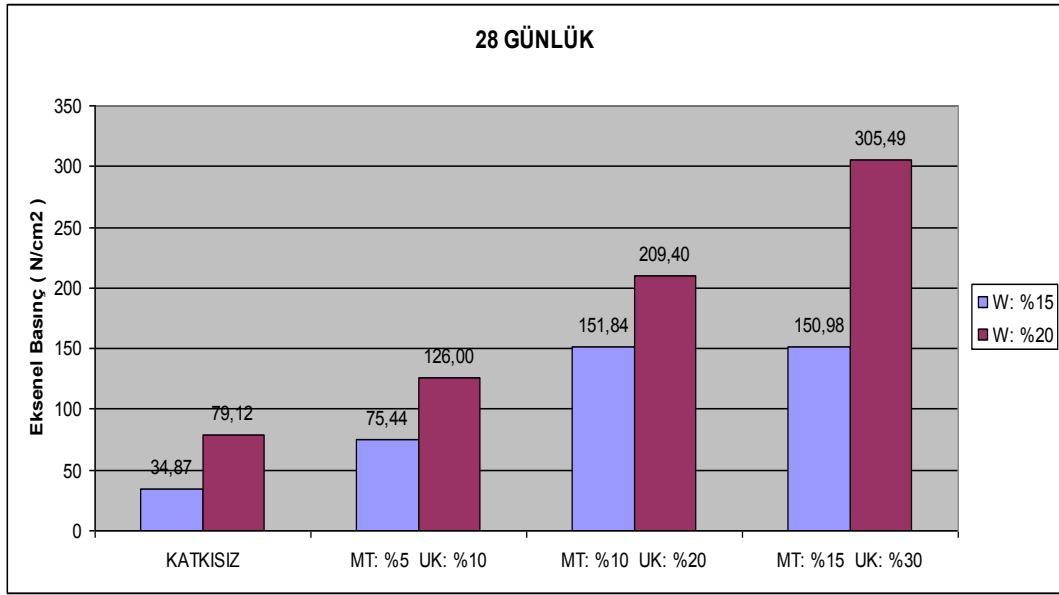


**Şekil 4.4.** Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi (1 günlük)

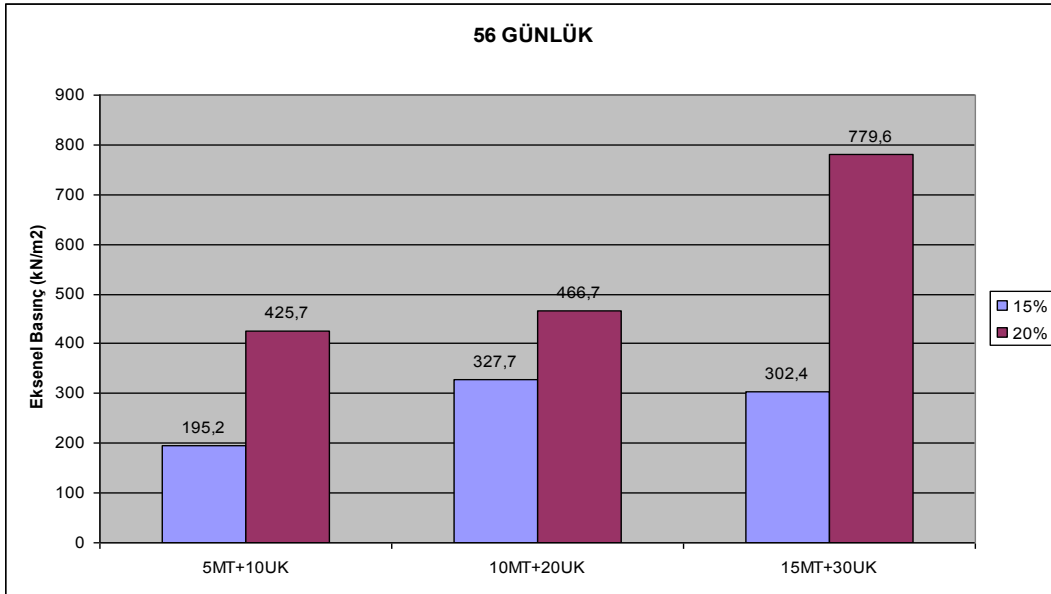
Numunelerin 1 günlük kür sonunda elde edilen eksenel basınç dayanım değerlerinde, katkı miktarı artışına göre bir artış gözlemlenmiştir. %20 su muhtevastaki artış, %15 su muhtevasına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Optimum su muhtevastının altındaki değerlerde dayanımı artırıcı etki yapan su miktarının yetersiz kaldığı görülmektedir.



**Şekil 4.5.** Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi (7 günlük)



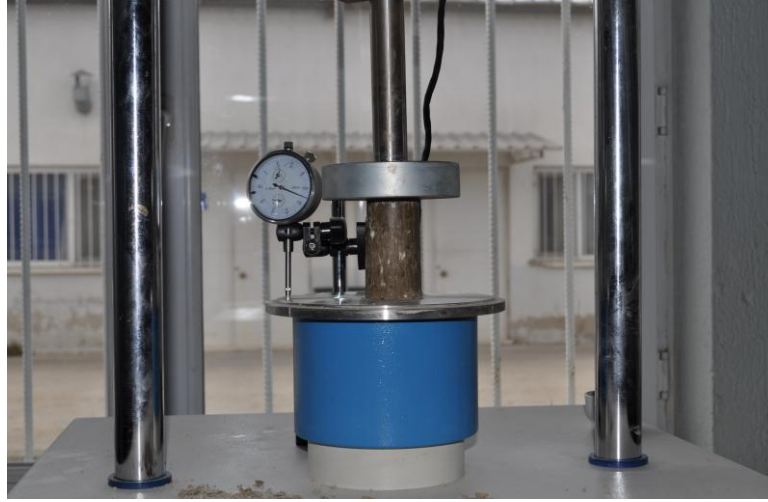
**Şekil 4.6.** Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi (28 günlük)



**Şekil 4.7.** Katkı ve Su Muhtevasına Göre Eksenel Basınç Değişimi (56 günlük)

Numunelerin 1, 7, 28 ve 56 günlük kür sonunda elde edilen eksenel basınç dayanım değerlerinde, katkı miktarı oranlarındaki artışa paralel olarak artış gözlemlenmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi %20 su muhtevasında, katkı oranlarına bağlı sürekli bir dayanım artışı gözlemlenirken, %15 su muhtevasında %10 mermer tozu ve %20 uçucu

kül oranından sonra dayanımlarında çok küçük bir azalma meydana gelmiştir. %15 su muhtevastaki numunelerde %10MT - %20UK katkı miktarından sonraki artışlar dayanımı arttırmamaktadır.



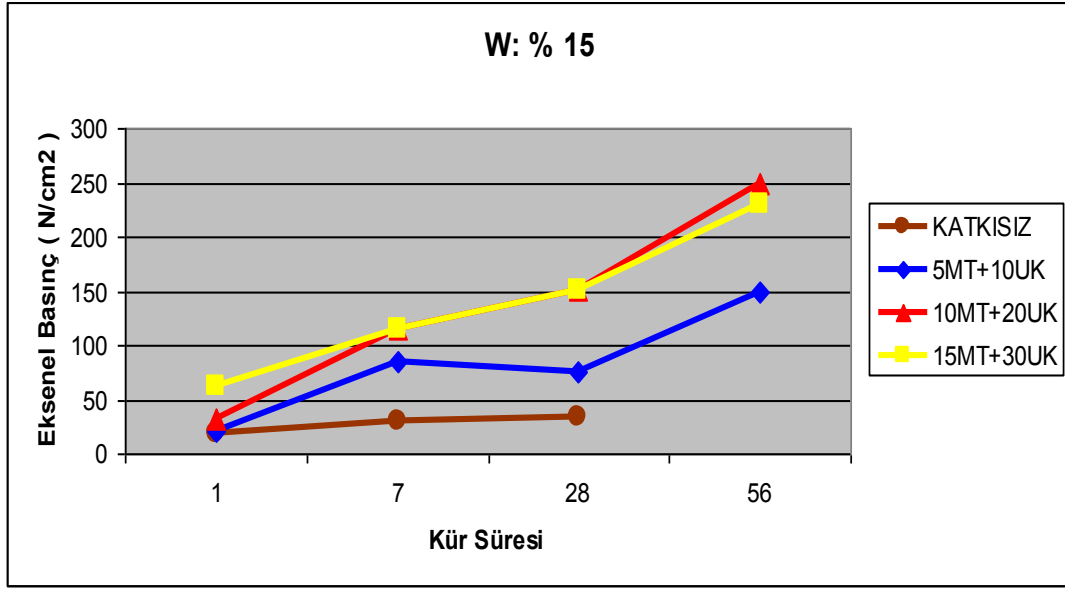
**Şekil 4.8.** Eksenel Basınç Cihazında Numune Kırımı

Kür sürelerine göre gerilme değişimi grafikleri karşılaştırıldığında, %15 su muhtevastında %5 MT - %10 UK katkılı numunede 7 günlük kür süresine kadar gerilme artarken 28. güne kadar artış durmuş ve sonra, 56 günlük kür süresine kadar tekrar bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. %5 MT - %10 UK katkılı numunenin dışındaki katkılı numunelerde sürekli olarak bir artış meydana gelmiştir (Şekil 4.9).

Kür süreleri arttıkça gerilmelerde olan artış, katkı miktarı ile gerilme arasında da doğru orantılı bir ilişki olarak karşımıza çıkmaktadır.

**Çizelge 4.1.** Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri

| W: %15           | $q_u$ ( N/cm <sup>2</sup> ) |          |           |           |
|------------------|-----------------------------|----------|-----------|-----------|
|                  | 1 GÜNLÜK                    | 7 GÜNLÜK | 28 GÜNLÜK | 56 GÜNLÜK |
| <b>KATKISIZ</b>  | 18,28                       | 30,59    | 34,87     | -         |
| <b>5MT+10UK</b>  | 20,91                       | 84,09    | 75,44     | 148,90    |
| <b>10MT+20UK</b> | 32,49                       | 116,00   | 151,84    | 249,93    |
| <b>15MT+30UK</b> | 62,83                       | 115,00   | 150,98    | 230,65    |

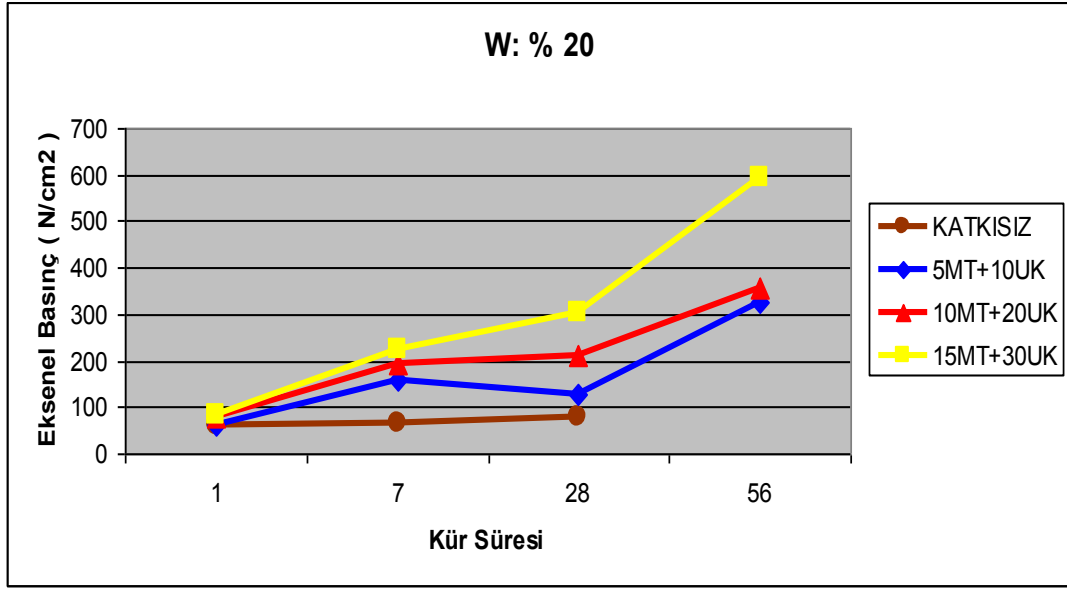


**Şekil 4.9.** Kür Süresine Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi

% 20 su muhtevasındaki numunelere de baktığımızda yine aynı şekilde %5 MT - %10 UK katkılı numunede 7 günlük kür süresine kadar gerilme artarken, 28 güne kadar çok küçük bir azalma gözlemlenmiştir. 56 günlük kür süresine kadar tekrar bir artış meydana gelmiştir. Diğer katkılı numuneler de kür süresine göre sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Kür sürelerini kendi içlerinde de değerlendirdiğimizde, katkı miktarı arttıkça dayanımında arttığı gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.2.** Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri

| W: %20           | $q_u$ ( N/cm <sup>2</sup> ) |          |           |           |
|------------------|-----------------------------|----------|-----------|-----------|
|                  | 1 GÜNLÜK                    | 7 GÜNLÜK | 28 GÜNLÜK | 56 GÜNLÜK |
| <b>KATKISIZ</b>  | 61,83                       | 64,47    | 79,12     | -         |
| <b>5MT+10UK</b>  | 63,78                       | 157,50   | 126,00    | 324,68    |
| <b>10MT+20UK</b> | 78,73                       | 191,80   | 209,40    | 355,96    |
| <b>15MT+30UK</b> | 85,73                       | 225,40   | 305,49    | 594,65    |

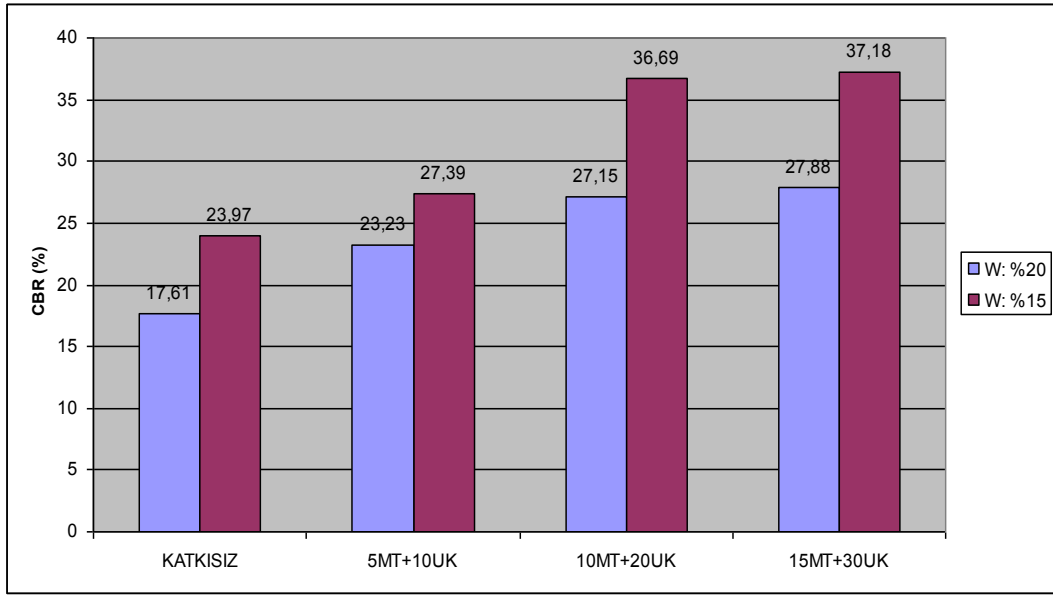


**Şekil 4.10.** Kür Süresine Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi

Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi, katkı miktarı artışı ve kür süresi dayanıma direkt etkilemektedir.

#### 4.1.3. Kaliforniya Taşıma Oranı ( CBR ) Değerleri

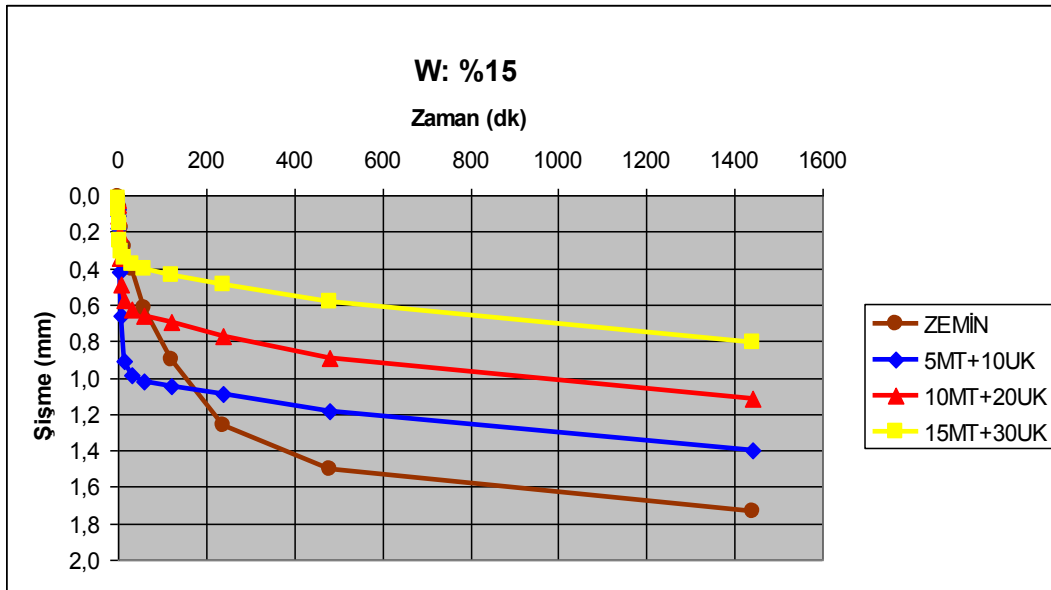
Katkılı ve katkısız numuneler için %15 su muhtevasına sahip numuneler, %20 su muhtevasına göre daha düşük CBR değerlerini vermiştir. Bununla birlikte mermer tozu ve uçucu külün miktarı arttıkça CBR’ de sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 4.11’ de görüldüğü gibi %10 MT - %20 UK karışımlı numune ile %15 MT - %30 UK karışımlı numuneler arasında her iki su muhtevasında CBR değerleri %1 oranında dahi artmamıştır. %10 MT - %20 UK katkı miktarından daha fazla artışlar CBR dayanımı için gerekli değildir.



Şekil 4.11. Katkı ve Su Muhtevasına Göre CBR Oranın Değişimi

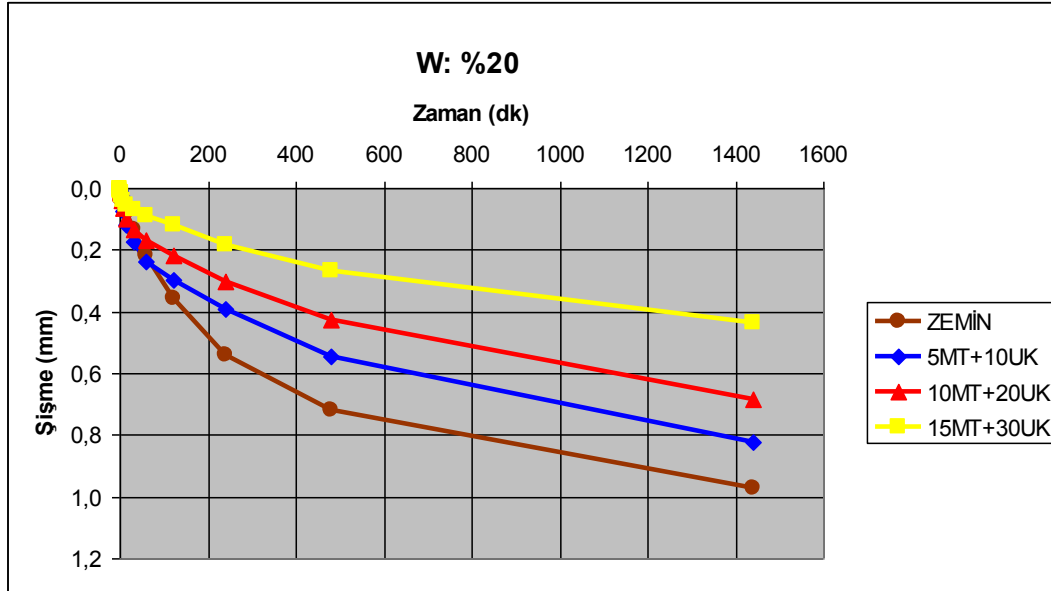
#### 4.1.4. Şişme Deneyi

Mermer tozu ve uçucu kül katkısının artması ile şişme yüzdesi değerlerinde azalma olmuştur. %15 su muhtevasında hazırlanan numunelerdeki şişme yüzdesi-zaman ilişkisi şekil 4.12’de, %20 su muhtevası için ise şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Katkı Miktarına Göre Şişme Değişimi

Su muhtevastaki değişimin, şişme miktarını etkilemesinin yanı sıra şişme hızını da etkilediği görölmektedir. %15 su muhtevası ile hazırlanan numunelerde deneyin ilk dakikalarında hızla gelişen şişme etkisi görülürken, %20 su muhtevasında hazırlanan numuneler için deney ilk dakikalarında daha yavaş gelişen şişme etkisi görölmektedir.



Şekil 4.13. Katkı Miktarına Göre Şişme Değişimi

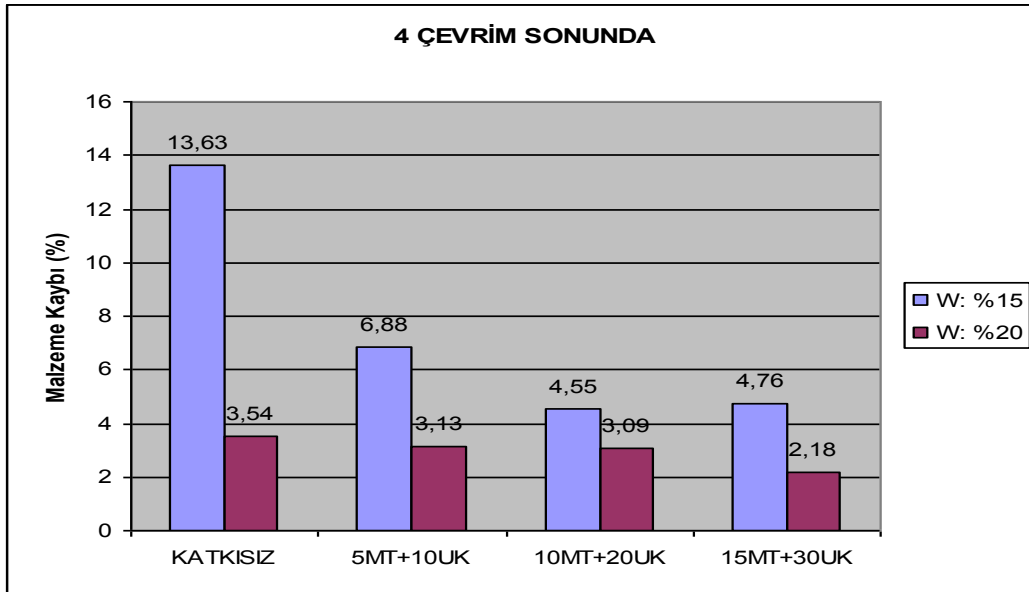
Bununla birlikte %15 su muhtevası ile hazırlanan numunelerde şişme yüzdesi değerleri, %20 su muhtevası ile hazırlanan numunelere göre daha fazladır. Çünkü kil tanelerinin yüzeylerinde tutulan su miktarı az olduğundan çevreden daha fazla su çekecek ve şişme daha yüksek olacaktır. Diğer taraftan, MT ve UK katkı miktarlarının artmasıyla şişmenin azaldığı görölmektedir. Bu durumun, katkı maddelerinin kil yüzeyinin kaplayarak su ile temasını kesmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Katkısızda şişme miktarı %15 su muhtevası için 1,75 mm iken %20 su muhtevasında 0,95 mm'dir. 15MT – 30 UK olan en yüksek katkı miktarında bu değerler 0,8 mm ve 0,42 mm'ye düşmüştür. Azalma %50 civarındadır.



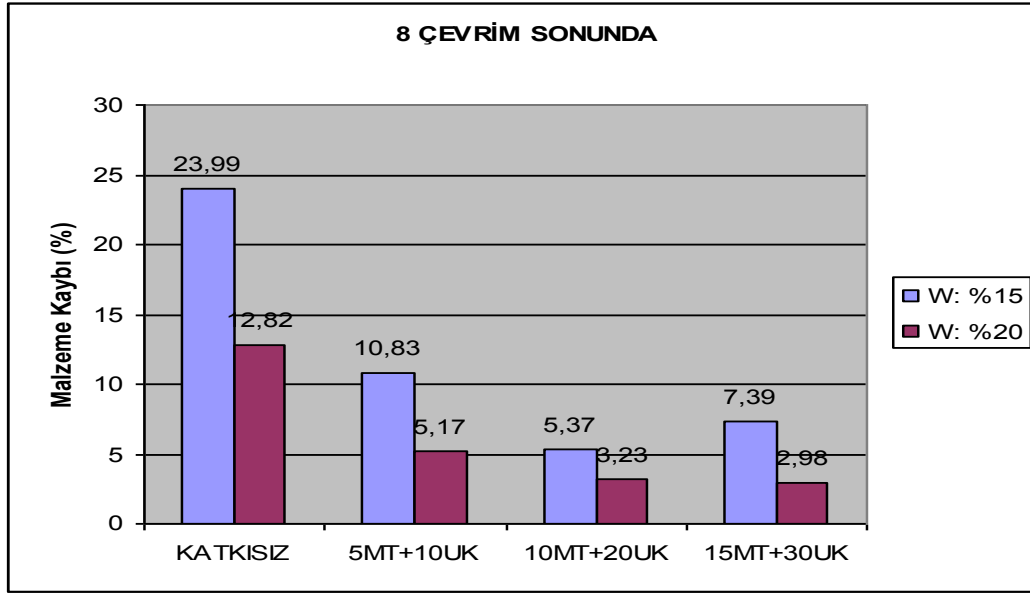
#### 4.1.5. Donma – Çözülme Deney Değerleri

Deney sonuçlarına göre, karışımlardaki mermer tozu ve uçucu kül miktarlarının artmasıyla numunelerin donma-çözünme mukavemetleri artmıştır.



Şekil 4.14. Katkı Miktarına Göre Meydana Gelen Deformasyon Oranları

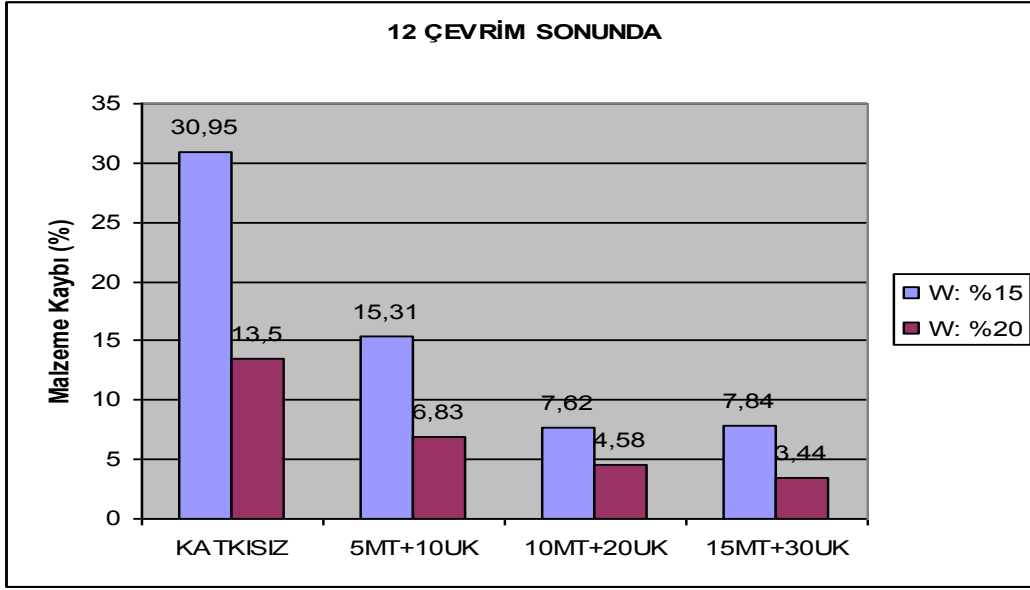
İki farklı su muhtevasında hazırlanan numunelerde, farklı malzeme kaybı yüzdeleri oluşmuştur. %20 su muhtevası ile hazırlanan numunelerdeki malzeme kaybı, %15 su muhtevası ile hazırlanan numunelere göre daha azdır. Bir başka ifadeyle donma-çözülme etkilerine dayanımı daha yüksektir (Şekil 4.14). Bu durum 4, 8 ve 12 çevrim sonunda da aynen geçerlidir (Şekil 4.15-4.17). Ayrıca şekil 8.16 bu olayı net bir şekilde ortaya koymaktadır. Fotoğrafa bakıldığında, katkı oranları ve çevrim sayısı aynı olan ancak numune hazırlamadan farklı su muhtevası ile çalışılan iki numunede şekil değişimi görülmektedir.



**Şekil 4.15.** Katkı Miktarına Göre Meydana Gelen Deformasyon Oranları



**Şekil 4.16.** W: %20 – W: %15 (%15 MT - %30 UK)



**Şekil 8.17.** Katkı Miktarına Göre Meydana Gelen Deformasyon Oranları



**Şekil 4.18.** Katkılı ve Katkısız Numuneler

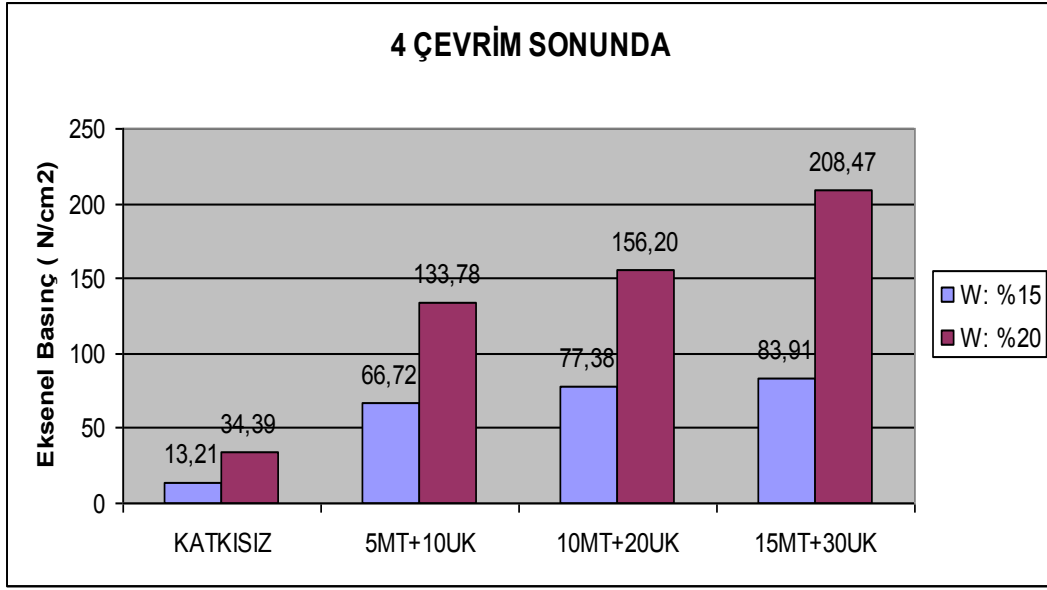
Şekil 4.18 aynı çevrim sonucunda katkısız ve katkılı zeminlerdeki malzeme kaybını göstermektedir. Katkı miktarı arttıkça malzeme kaybı daha az olmaktadır.

Şekil 4.14, 4.15, 4.17 katkı miktarlarının çevrim sonundaki etkilerine göre incelendiğinde, özellikle %15 su muhtevasında en ideal etkinin %10 MT - %20 UK katkı miktarı olduğu görülmektedir. Katkının daha fazla arttırılmasının çok etkili olmadığı görülmektedir. Bu durum %20 su muhtevası içinde geçerli olduğu söylenebilir. Çünkü katkı miktarı artışı ile malzeme kaybı azalma oranı çok az değerde kalmaktadır.

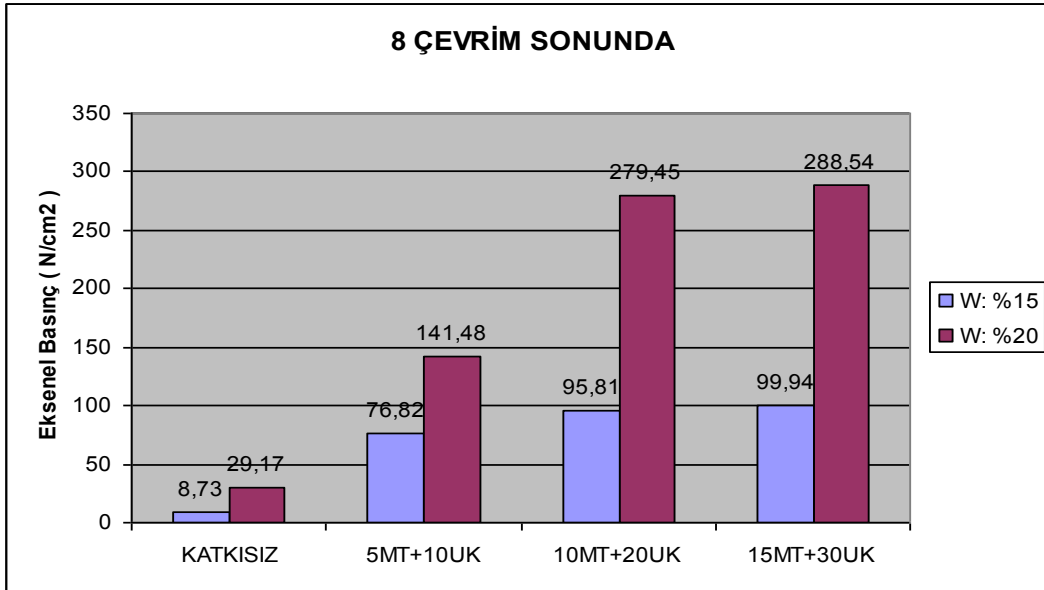
#### **4.1.6. Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç**

Donma-çözülme deneyi tamamlandıktan hemen sonra, çevrim sayısının dayanımı ne düzeyde etkilediğini görebilmek için eksenel basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de görüldüğü gibi katkısız olarak hazırlanan numunelerde çevrim sayısı arttıkça dayanım azalmıştır. Katkısız numunelerde çevrim sayısı ile dayanım arasında ters orantılı bir ilişki gözlemlenmiştir.

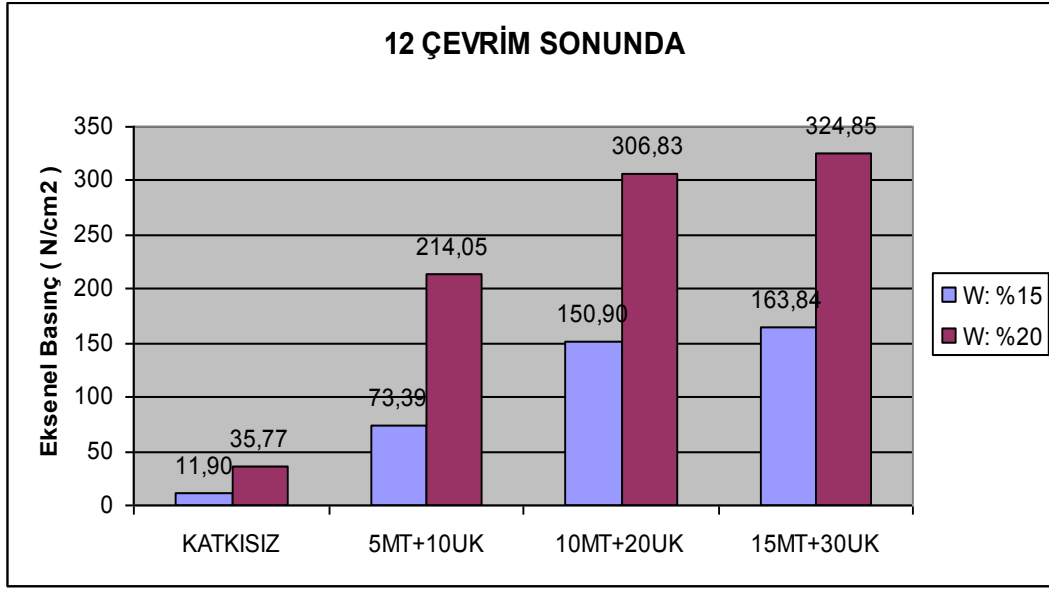
Katkılı numunelerde, katkısız numunelere göre tam tersi bir durum meydana gelmiştir. Çevrim sayısının artması ile birlikte numunelerin dayanımında da doğru orantılı bir artış gözlemlenmiştir. Deney esnasında katkılı numunelerdeki malzeme kaybı, son çevrimlere doğru azaldığı gözlenmiş ve numunelerde dayanım gittikçe artmıştır.



**Şekil 4.19.** Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Değerleri



**Şekil 4.20.** Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Değerleri



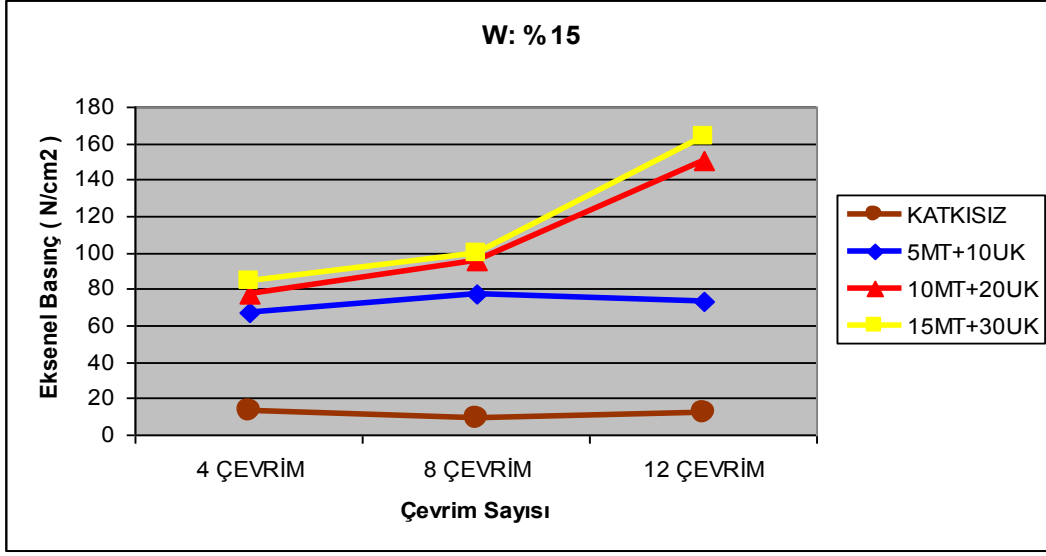
**Şekil 4.21.** Donma-Çözülme Sonrası Eksenel Basınç Değerleri

Çevrim sayısına göre gerilme grafikleri karşılaştırıldığında, katkısız zemin numunelerinde çevrim sayısı arttıkça malzeme kaybı artarken, donma- çözülme sonrası numunelere uygulanan eksenel basınç deneyinde ise; çevrim sayısı arttıkça dayanım azalmaktadır.

Katkılı numunelerde ise, katkısız göre tam tersi bir durum gözlenmiştir. Katkılı numunelerde; katkı miktarı ve çevrim sayısı arttıkça numunelerdeki dayanımında doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Malzeme kaybına bakıldığında (Şekil 4.14, 4.15 ve 4.17) katkı artışı ile birlikte azalma olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.3.** Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri

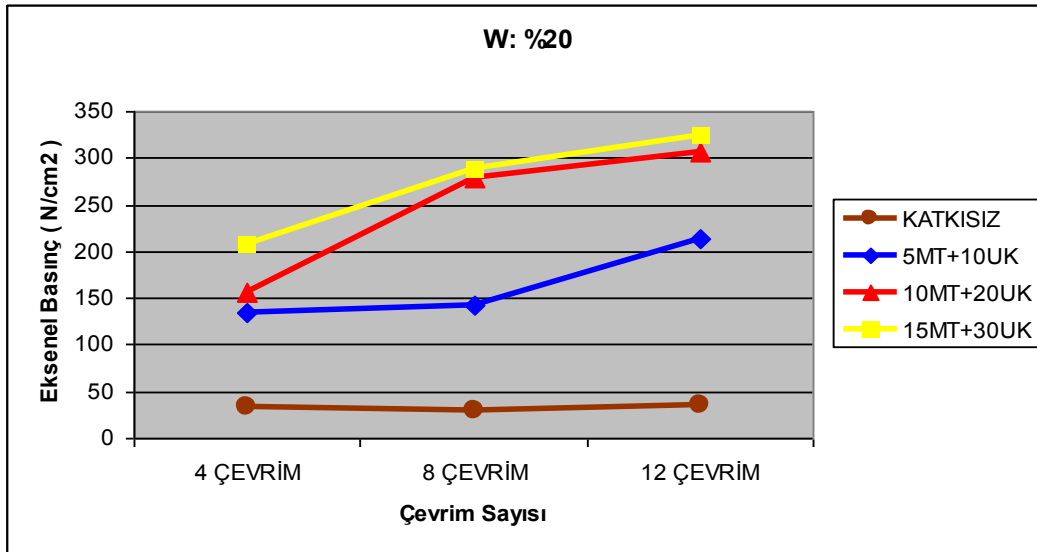
| W: %15         | qu ( N/cm2 ) |           |            |
|----------------|--------------|-----------|------------|
| KATKI ORANLARI | 4 ÇEVİRİM    | 8 ÇEVİRİM | 12 ÇEVİRİM |
| KATKISIZ ZEMİN | 13,21        | 8,73      | 11,90      |
| 5MT+10UK       | 66,72        | 76,82     | 73,39      |
| 10MT+20UK      | 77,38        | 95,81     | 150,90     |
| 15MT+30UK      | 83,91        | 99,94     | 163,84     |



**Şekil 4.22.** Çevrim Sayısına Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi

**Çizelge 4.4.** Katkı Miktarına Göre Gerilme Değişimleri

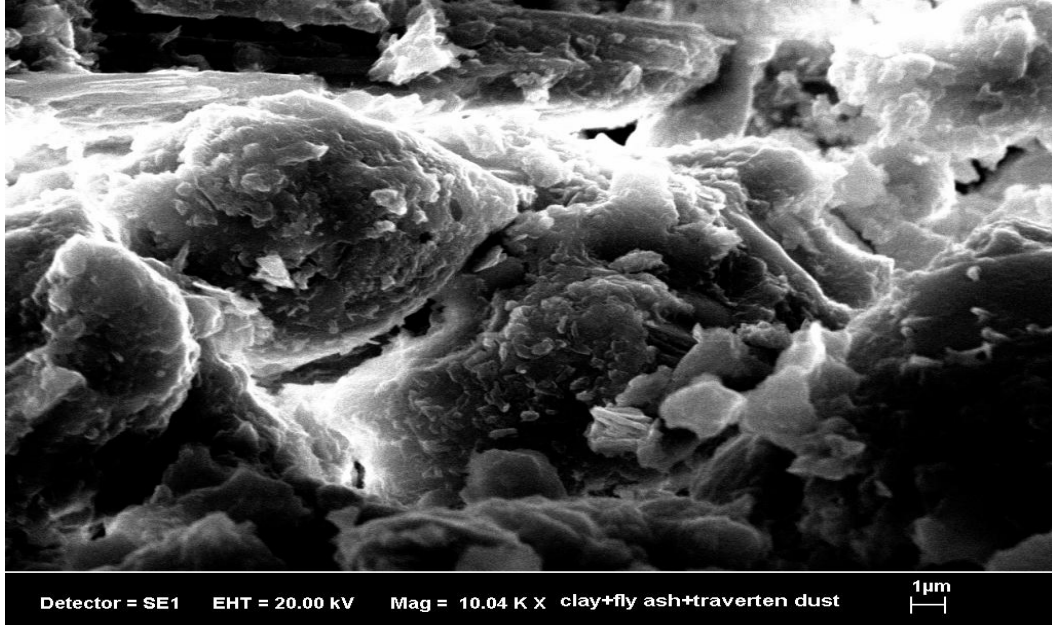
| W: %20         | qu ( N/cm2 ) |           |            |
|----------------|--------------|-----------|------------|
| KATKI ORANLARI | 4 ÇEVİRİM    | 8 ÇEVİRİM | 12 ÇEVİRİM |
| KATKISIZ ZEMİN | 34,39        | 29,17     | 35,77      |
| 5MT+10UK       | 133,78       | 141,48    | 214,05     |
| 10MT+20UK      | 156,20       | 279,45    | 306,83     |
| 15MT+30UK      | 208,47       | 288,54    | 324,85     |



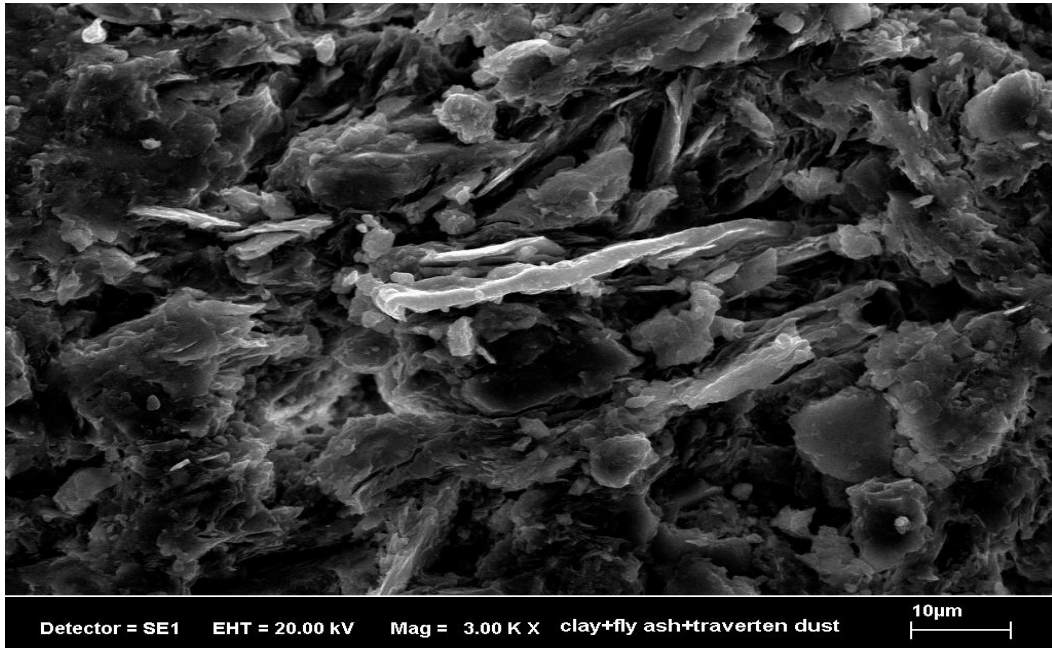
**Şekil 4.23.** Çevrim Sayısına Göre Katkılı Numunlerdeki Gerilme Değişimi

Donma-çözülme sonrası dayanım, su muhtevasına göre farklılık göstermiştir. %20 su muhtevası ile hazırlanan numunelerin dayanımı %15'e göre daha yüksektir.

#### 4.1.7. SEM Görüntüleri

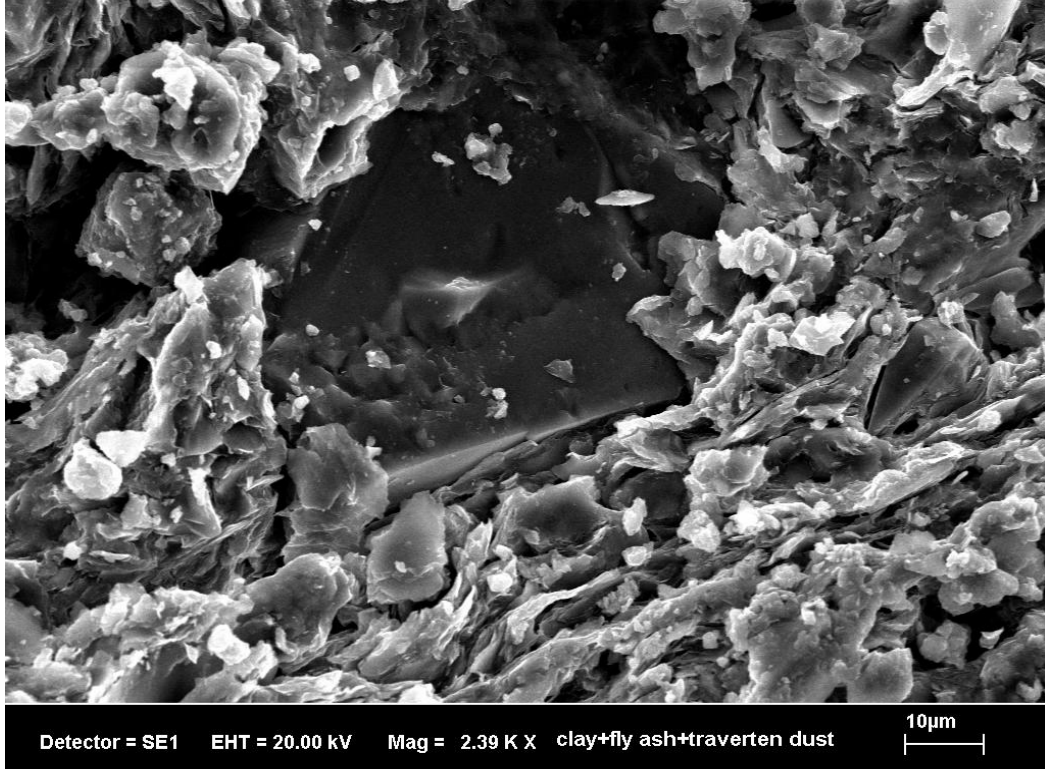


Şekil 4.24. SEM görüntüsü

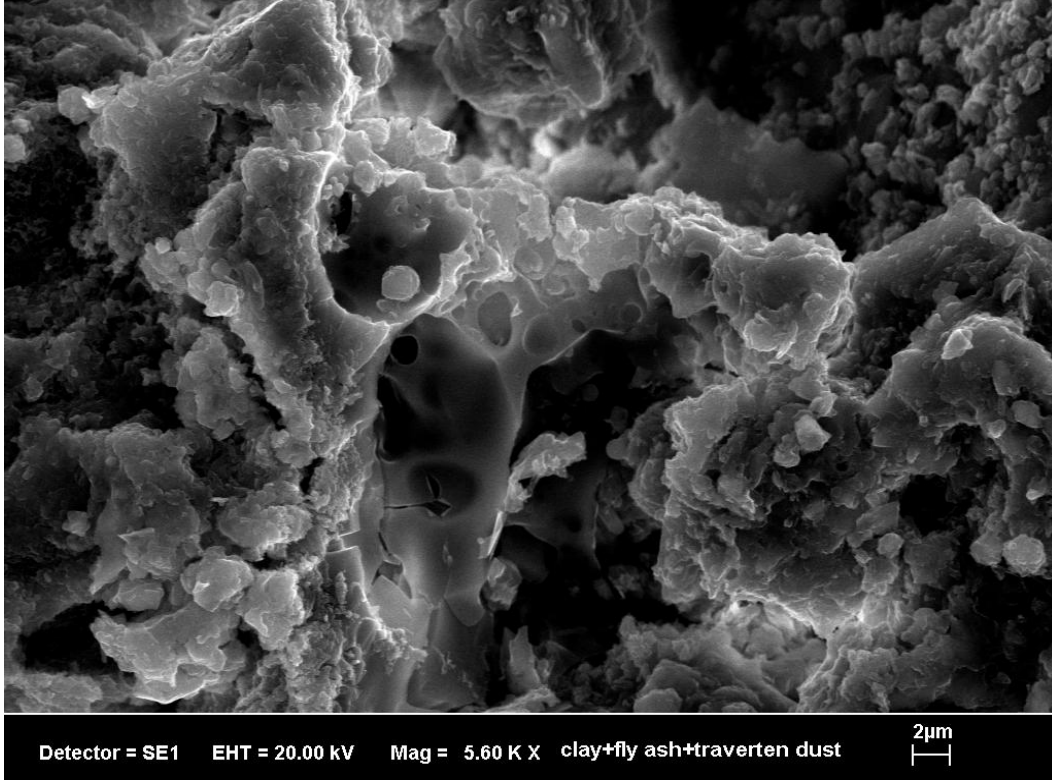


Şekil 4.25. SEM görüntüsü

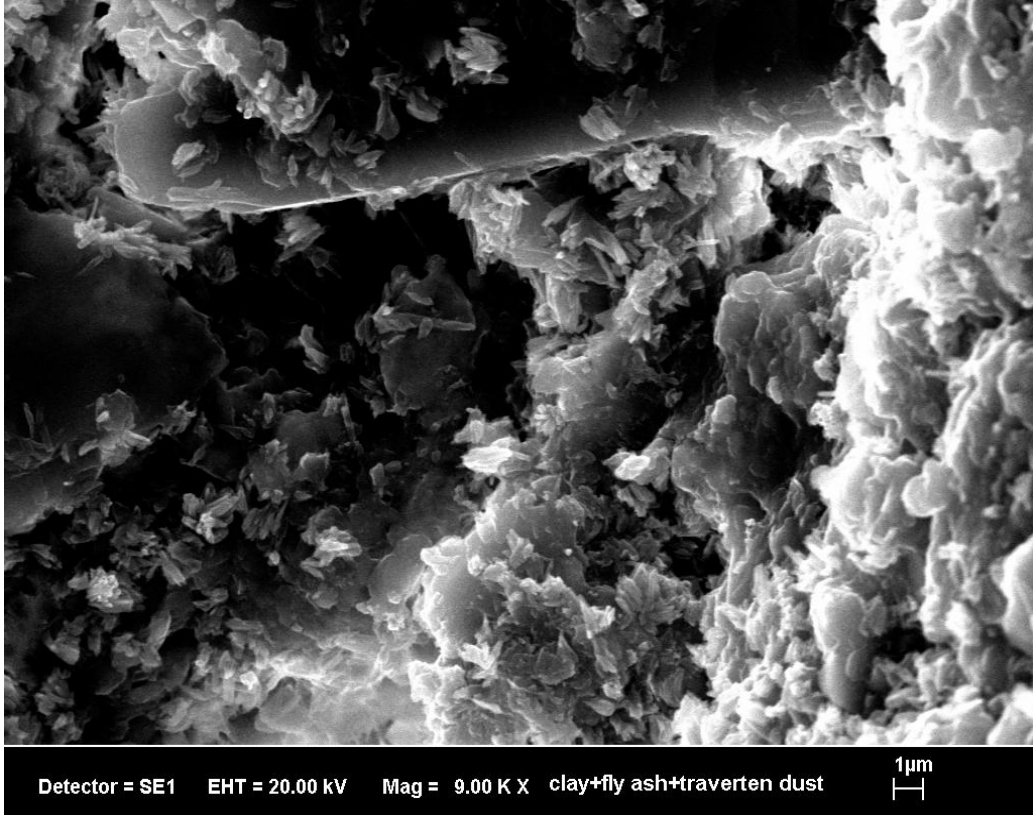




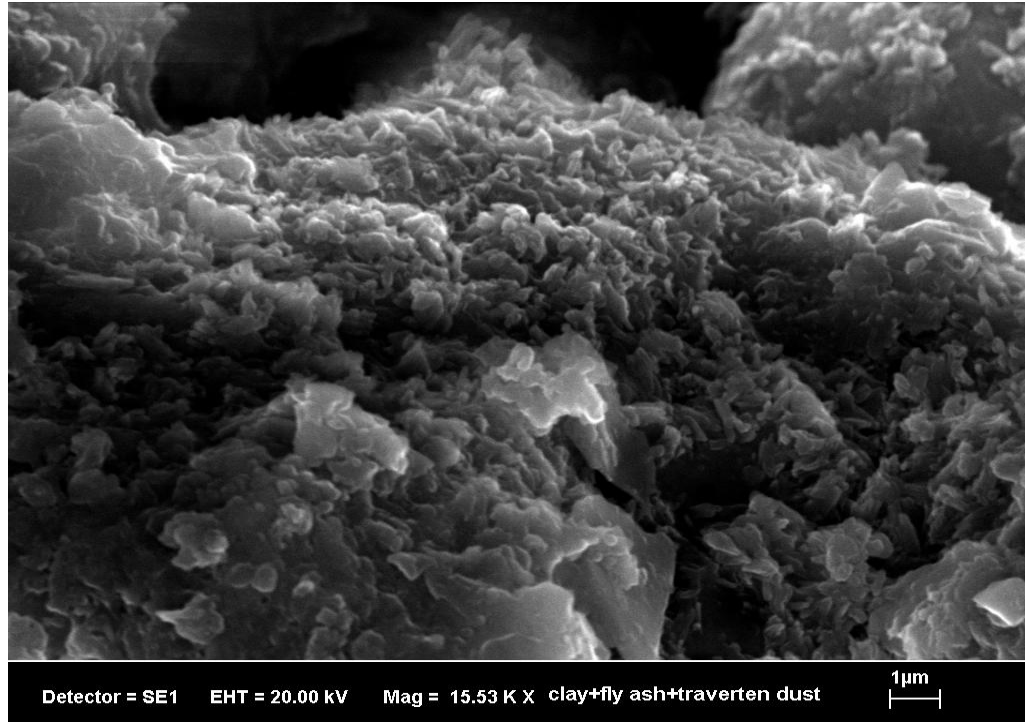
Şekil 4.26. SEM görüntüsü



Şekil 4.27. SEM görüntüsü



Şekil 4.28. SEM görüntüsü



Şekil 4.29. SEM görüntüsü

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kil zeminin atık mermer tozu ve uçucu kül ilavesi ile iyileştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Zemin numunesinin kuru ağırlığına oranı olarak mermer tozu ve uçucu kül karışımları, %15 ve %20 oranındaki iki farklı su muhtevasında hazırlanmıştır. Eksenel basınç deney sonuçları, dayanımın %20 optimum su muhtevasında, %15 su muhtevasına göre daha yüksek değerler elde edilmiştir ve tüm kür sürelerinde aynı sonuç görülmektedir.

2. %15 su muhtevasında hazırlanan numunelerde en yüksek dayanım %10MT - %20UK karışım oranlarında elde edilmiştir. Bu sonuç 1 günlük kürden sonraki tüm kür sürelerinde aynıdır. Bu katkı oranından daha yüksek katkı oranlarında dayanım artışı olmamış, hatta küçük miktarlarda düşüşler görülmüştür. %20 su muhtevasında ise katkı miktarlarındaki artışa ve kür sürelerindeki artışa paralel olarak dayanım artmaktadır.

3. CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) deney sonuçlarına göre katkı miktarı artışına paralel olarak CBR dayanımının arttığı görülmektedir. Bu deneyde de %20 su muhtevasında hazırlanan numunelerdeki dayanım %15'e göre daha yüksektir. Diğer taraftan her iki su muhtevasındaki numuneler için %10 MT - %20 UK karışım oranı en uygun karışım oranı olduğu göze çarpmaktadır. Çünkü bu orandan daha fazla olan karışımlardaki artış çok küçük değerlerde kalmaktadır.

4. Katkı maddelerinin şişme potansiyelini azaltıcı yönde etkisi olduğu görülmektedir. Şişme deneyi sonuçları incelendiğinde katkı miktarı arttıkça şişme miktarları azalmıştır.

5. Donma-çözülme deney sonuçları katkı maddesi artışının donma-çözülme çevrimi sonucu oluşan dane kaybına karşı dayanım arttırdığı gözlenmiştir. Diğer deneylerde olduğu gibi %20 su muhtevasında hazırlanan numunelerin dayanımı %15'e göre çok yüksektir. 12 çevrim sonunda ortaya çıkan malzeme kaybı %15 su muhtevalı

numuneler için %7-8, %20 su muhtevalı numuneler için ise %3,5-5 arasındadır. Buradan yine en ideal karışımın %10 MT - %20 UK olduğu söylenebilir. Çünkü %15 MT - %30 UK ile arasında çok büyük farklar görülmemektedir.

**6.** Donma-çözülme sonrası yapılan eksenel basınç deneyinden elde edilen dayanım değerleri önceki deney sonuçları ile benzerdir. %20 su muhtevalarında elde edilen değerler %15'e göre çok daha yüksektir. Ayrıca katkı maddesi miktarı ve çevrim sayısı arttıkça yine dayanım artmaktadır.

**7.** Katkı oranları literatüre uygun olarak seçilmiştir ve uçucu kül miktarı mermer tozu miktarının iki katı alınmıştır. İkisi arasındaki oranlar değiştirilerek etkileşimin yönü gözlemlenebilir.

**8.** Farklı sıkıştırma enerjilerinin etkilerini gözlemleyebilmek için modifiye proctor enerjisi ile numuneler hazırlanabilir.

## 6. KAYNAKLAR

Akıncı, Ö., Seramik Killeri Ve Jeolojisi, IV.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19 Ekim 2001, İzmir, Türkiye.

Aksoy, H.S., Yılmaz, M. Ve Akarsu, E.E., 2006, Killi Bir Zeminin C Tipi Uçucu Kül Kullanılarak Stabilizasyonu: Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, S. 173 – 177, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Alataş, T., 1996, Afşin – Elbistan Termik Santralı Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Alkaya, D., 2002, Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilizesine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Alkaya, D., İmançlı, G., Alyanak, İ., Erken, A. Ve Çobanoğlu, İ., 2006, Yatağan Termik Santralı Uçucu Küllerinin Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği: Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, S.:165 – 172, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Aruntaş, H. Y., 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol 21, No 1, 193-203.

ASTM C 618, 1991, Specification For Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use As A Mineral Admixture In Portland Cement Concrete.

ASTM C 618-85, 1985, Standard Specifications For Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use As Mineral Admixture In Portland Cement Concrete, Philadelphia, USA.

ASTM D422, 2000, Standard Test Method For Particle-Size Analysis Of Soils. ASTM International, 8p. USA.

Atanur, A., 1971, Uçucu Küllerin Kimyasal Ve Fiziksel Vasıfları Ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması, KGM, Yayın No:193, Ankara.

Aytekin, M., 1997, Numerical Modeling Of Eps Geofoam Used With Swelling Soil, Geotextiles And Geomembranes, Special Geofoam Issue. Vol. 15, Issue 1-3, S. 133-146.

Aytekin, M., 2004, Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.

Aytekin, M., 2000, Deneysel Zemin Mekaniği, Akademi Yayınevi, Trabzon.

Başıyigit, C., Kılınçarslan, Ş., Beycioğlu A., 2007, Betonlarda Yapay Puzolanik Katkı Olarak Kullanılan Endüstriyel Atıklar, Dünya İnşaat Dergisi, Yıl 24, Sayı 2007/5, S. 110-111.

Berry, E.E., And Malhotra, V.M., 1986, Fly Ash İn Concrete, Sp85-3, Canmet 178 Pp.

Ceylan, H., 2000, Mermer Fabrikalarındaki Toz Mermer Atıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, S. 43, Isparta.

Ceylan, H., Saraç, S., Özkahraman, H. T., Mermer Toz Atıklarının Derz Dolgu Malzemesi (Fuga) Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem '2001) Bildiriler Kitabı 3-5 Mayıs 2001 /Afyon.

Chu, S.C., ve Kao, H.S., 1993, A Study Of Engineering Properties Of A Clay Modified By Fly Ash And Slag: Fly Ash For Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No:36, S. 89 – 100, New York.

Cömert, A.T., Koyuncu, H., Fırat, S. Ve Sümer, M., 2006, Uçucu Kül İle Stabilize Edilmiş Zeminlerde Kür Süresinin Taşıma Gücü Üzerine Etkileri: Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, S. 153 – 164, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Çakır, M., 1999, Uçucu Kül İle Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ,

Çokça, E., Toktaş, F., Dispersif Bir Kilin C- Tipi Uçucu Kül ile Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, (2002), S. 659-668.

Erdoğan, T.Y., Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Curufu, End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, 1-8, 18-19 Kasım 1993.

Ferguson, G., 1993, Use Of Self – Cementing Fly Ashes As A Soil Stabilization Agent: Fly Ash For Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No:36, S. 1 – 15, New York.

Gani, M.S.J., 1997, Cement And Concrete, Chapman & Hall, London.

Görhan, G., Kahraman, E., Demir, İ., Başpınar, M.S., 2008, Mermer Tozu Ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması, Türkiye VI. Mermer Ve Doğaltaş Sempozyumu, Afyon.

Günel, R.G., 1996, Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Helmuth, R., 1987, Fly Ash İn Cement And Concrete, Portland Cement Association, Illinois, S. 135.

Hassini, S., 1992, Some Aspects Of Landfill Desing Environmental Science And Engineering, Environmental Geotechnology, S. 137-143.

Jones, D. E. And Jones, K. A., 1987, Treating Expansive Soils, Civil Engineering, Asce, Vol.57, No.8, S. 62-65.

Khan, L.I., ve Sarker, M., 1993, Enzyme Enhanced Stabilization Soil And Fly Ash: Fly Ash For Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No:36, S. 43 – 58, New York.

Köse, H.M., Diker, M., 1999, Maden Ve Madencilğe Dayalı Sanayilerin Türkiye Ekonomisine Katkısı, 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 1-5.

Kumbasar, V., Kumbasar, F., ve Önalp, A., 1970, Yol Mühendisleri İçin Zemin Mekaniği, İTÜ İnşaat Fakültesi Yayını, No.783.

Mcmanis, K., Arman, A., 1989, Class C Fly Ash As A Full Or Partial Replacement For Portland Cement Or Lime: Univ. Of New Orleans, New Orleans, Usa, Transportation Research Record, S. 68 – 81, Journal Article.

Mehta, P.K., 1996, Concrete- Structure, Properties, And Materials, Prentice-Hall, New Jersey.

Nicholson, P.O., Kashyap, V., 1993, Fly Ash Stabilization Of Tropical Hawaiian Soils: Fly Ash For Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No:36, S. 15 – 30, New York.

Okagbue, C.O., Onyeaobi, T.U.S., 1999, Potential Of Marble Dust To Stabilize Red Tropical Soils For Road Construction. Engineering Geology, 53, S. 371-380.

Önalp, A., 2002, Geoteknik Bilgisi I, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Özaydın, K., 1989, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.



Özbayoğlu, F., 1993, Uçucu Küllerin, Bentonit, Kireç Ve Çimento Katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Kullanımı: Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı, S. 103 – 118.

Postacıoğlu, B., 1987, Beton, Cilt 2. Matbaa Teknisyenleri Basımevi İstanbul, S. 333-337.

Sevim, U.K., 2003, Afşin – Elbistan Uçucu Külünün Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Çimento Hamuru Ve Harçlarının Üzerinde Yapılacak Deneylerle Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Smith, R.L., 1993, Stabilization Of Industrial Wastes: Fly Ash For Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, No:36, S. 58 – 73, New York.

Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y.İ., Sarıışık, A., 1996, Mermer Teknolojisi, S.D.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, S. 242, Isparta.

Tan, O., ve İyisan, R., 1996, Uçucu Kül İle Zemin Stabilizasyonu: Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Taşpolat, L. T., Zorluer, İ., Koyuncu, H., 2006, Atık Mermer Tozunun Geçirimsiz Kil Tabakalarda Donma-Çözölmeye Etkisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, S. 11-16.

Terzi, S., Karaşahin, M., 2003, Mermer Toz Atıklarının Asfalt Betonu Karışımında Filler Malzemesi Olarak Kullanımı. Teknik Dergi, Cilt:14, Sayı:2, S. 2903-2922.

Tokyay, M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi), End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, 29-36, 18-19 Kasım 1993.

Tokyay, M., 1989, Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonlarının Hidratasyon Ve Puzolanik Reaksiyonlara Etkileri, Türkiye İnşaat Mühendisliği X Teknik Kongresi, Ankara.

Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998, Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.

Tokyay, M., Hubbard, F.H., 1992, Mineralogical Investigations Of High-Lime Fly Ashes, Proc. Of Fourth Int. Conf. On Fly Ash, Silica Fume, Slag, And Natural Pozzolans In Concrete, İstanbul, V.1, 65-77.

TS 1900-1, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 1900-2, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 639, 1975, Portland Çimento Klinkerine Ve Portland Çimento Betonuna Karıştırılacak Uçucu Küller, Ankara.

TS 640, 1975, Uçucu Küllü Çimentolar, Ankara.

Tunç, A., 2001, Yol Malzemeleri Ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, S. 840.

Tunç, A., 2002, Yol Mühendisliğinde Geoteknik Ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, S. 912.

Türker, D., 2000, Şişen Zeminlerin C/F Tipi Kül Ve Kum İle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Usta, M., 2004, Atık Mermer Tozunun Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Uzuner, B.A., 2000, Temel Mühendisliğine Giriş, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Uzuner, B.A., 2005, Temel Zemin Mekaniği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Vijayalakshmi, V., Singh, S., Bhatnagar, D., 2001, Marble Slurry: A New Resource Material For Entrepreneurs, Science Tech Entrepreneur Project, 9, India.

Wasti, 1993, Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı: Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı, S. 37 – 44.

Wasti, Y., 1990, Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri Ve Kullanım Olanakları, İMO, Teknik Dergi, Cilt:1, Sayı:4, Ankara, S. 177 – 188.

Yaman, C., 1996, Ders Notları, Ytü, Kimya Metallurji Fakültesi, İstanbul, Türkiye.

Yıldırım, S., 2002, Zemin İncelemesi Ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Yıldız, A.H., 2008, Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Zorluer İ. , Usta, M., 2003, Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Afyon, S. 305-312.

### **İnternet Kaynakları**

İnternet:Http://Ekutup.Dpt.Gov.Tr/. 04.02.2004

İnternet:Http://Tr.Wikipedia.Org/Wiki/Kil, 11.10.2001

İnternet:Http://Tr.Wikipedia.Org/Wiki/Mermer, 29.09. 2006.

İnternet:Http://www.Balikesir.Edu.Tr/~Ozkan/Ads/Adsorpsiyon13.Pps, 16.09.2006

İnternet:Http://www.Odevarsivi.Com/Dosya.Asp?İslem=Gor&Dosya\_No=107823,  
15.08.2007

İnternet:Http://www.Webhatti.Com/Ansiklopedi/62880-Killerin-Genel-Tanimi.Html,  
27.03.2005

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Süleyman GÜCEK

**Doğum Yeri ve Yılı** : ADANA / 29.09.1986

**Medeni Hali** : BEKAR

**Yabancı Dili** : İNGİLİZCE

### **Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)**

**Lise** : Adana Abdülkadir Paksoy Lisesi / 2000 - 2003

**Lisans** : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı  
Öğretmenliği / 2005 - 2009

**Yüksek Lisans** : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi  
Anabilim Dalı / 2009 - 2011