

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ASİDİK VE BAZİK TUF KATKILARININ YÜKSEK  
PLASTİSİTELİ KİLLERİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ**

**Nevin KÜÇÜKASLAN**

Yüksek Lisans Tezi

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı

AĞUSTOS 2021

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ASİDİK VE BAZIK TÜF KATKILARININ YÜKSEK PLASTİSİTELİ  
KİLLERİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ**

Tez Yazarı  
**Nevin KÜÇÜKASLAN**

Danışman  
Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK

AĞUSTOS 2021  
ELAZIĞ

**T.C.**  
**FIRATÜNİVERSİTESİ**  
**FENBİLİMLERİENSTİTÜSÜ**

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

---

Başlığı: Asidik ve Bazik Tüf Katkılarının Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyonuna Etkisi

Yazarı: Nevin KÜÇÜKASLAN

İlk Teslim Tarihi: 28.06.2021

Savunma Tarihi: 02.08.2021

---

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

*İmza*

Danışman: Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK Onayladım  
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

---

Başkan: Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ Onayladım  
Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

---

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mesut GÖR Onayladım  
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

---

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Asidik ve Bazik Tüf Katkılarının Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyonuna Etkisi ” başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

02.08.2021

**Nevin KÜÇÜKASLAN**



# ÖNSÖZ

Stabilizasyon yöntemi, killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilerek kullanım amacına uygun hale getirilmesi işlemidir. Günümüzde en ekonomik yöntem olması nedeniyle en fazla tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Yapılan iyileştirme ile killi zeminlerin dayanım, geçirimsizlik, sıkışma ve şişme gibi birçok mühendislik özelliği olumlu yönde değiştirilerek, standard veya şartnamelerde önerilen özellikleri kazanmaları sağlanmaktadır. Bu amaçla, killi zemine belli oranlarda puzolan adı verilen doğal veya yapay katkı maddeleri ilave edilmekte, bazı durumlarda katkı ilave edilmiş zemin küre tabi tutulmakta ve böylece killi zeminin mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

Stabilizasyon konusunda yapılan bilimsel çalışmalar kullanılan katkının türü, oranı ve kür süresinin killi zeminin mühendislik özelliklerine olan etkileri konusunda yoğunlaşmıştır. Bu bilimsel çalışmalardan büyük bir kısmı killi zeminlerin stabilize edilmesinden sonra zeminin dayanımında ve geçirimsizliğinde meydana gelen değişimler üzerinde yoğunlaşmıştır. Stabilize edildikten sonra zeminin konsolidasyon ve şişme potansiyelinde meydana gelen değişimlerin incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca, stabilizasyonda kullanılacak katkı maddesinin kolay elde edilebilir, ekonomik ve çevreci olması da büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda bu konu araştırmacıların ilgisini çekmiş ve bu konudaki çalışmalar hız kazanmıştır.

“Asidik ve Bazik Tüf Katkılarının Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyonuna Etkisi ” başlıklı bu çalışmada, kolay elde edilebilen, doğal, çevreci ve ekonomik bir malzeme olan asidik ve bazik karakterli tüflerin katkı malzemesi olarak kullanılması durumunda, yüksek plastisiteli bir kil olan bentonitin konsolidasyon özellikleri ve şişme potansiyelindeki değişimler incelenmiştir. Gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları sonucunda, katkı türü, oranı ve kür uygulamasının kilin konsolidasyon özellikleri ve şişme potansiyeli üzerindeki olumlu etkileri ortaya konmuştur.

Çalışmamın tüm aşamasında beni yönlendiren, en iyisini yapmam için beni teşvik edip yetiştiren, bu çalışmamın gerçekleştirilmesi için gerekli ortamı hazırlayarak karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olan saygı değer tez danışmanım Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK' a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan çok değerli hocam Arş. Gör. Dr. Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU'na içtenlikle teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince değerli vaktini, yardımını ve anlayışını esirgemeyen Jeoloji Mühendisi Bahadır KORKMAZER'e teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde büyük katkıları olan ve bana her koşulda destek veren aileme ve heran yanımda olan nişanlıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.19.22 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

**Nevin KÜÇÜKASLAN**  
ELAZIĞ, 2021

# İÇİNDEKİLER

|   | Sayfa     |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ.....  | iv        |
| İÇİNDEKİLER .....   | v         |
| ÖZET .....  | vi        |
| ABSTRACT .....  | vii       |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....  | viii      |
| TABLolar LİSTESİ .....  | x         |
| SİMGELER .....  | xi        |
| KISALTMALAR .....   | xii       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3. KİL MİNERALLERİ .....</b>   | <b>16</b> |
| 3.1. Kil Minerallerinin Fiziksel Özellikleri .....                            | 22        |
| 3.2. Kil Minerallerinin Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi .....     | 24        |
| <b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>   | <b>28</b> |
| 4.1. Laboratuvar Çalışmalarında Kullanılan Malzemeler .....                   | 28        |
| 4.1.1. Bentonit Kili .....  | 28        |
| 4.1.2. Asidik ve Bazik Tüfler .....   | 30        |
| 4.2. Laboratuvar Çalışmaları .....  | 33        |
| 4.2.1. Kil ve Tüf örneklerinin Hazırlanması.....                              | 34        |
| 4.2.2. Standard Proktor Deneyi .....  | 35        |
| 4.2.3. Konsolidasyon Deneyi .....   | 40        |
| 4.2.4. Şişme Basıncı ve Şişme Yüzdesi Deneyleri .....                         | 56        |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>  | <b>62</b> |
| 5.1. Katkı Türü, Katkı Oranı ve Kürün $C_v$ Üzerindeki Etkileri .....         | 62        |
| 5.2. Katkı Türü, Katkı Oranı ve Kürün Şişme Basıncı Üzerindeki Etkileri.....  | 64        |
| 5.3. Katkı Türü, Katkı Oranı ve Kürün Şişme Yüzdesi Üzerindeki Etkileri ..... | 65        |
| <b>6. SONUÇLAR.....</b>   | <b>68</b> |
| KAYNAKLAR .....   | 71        |
| ÖZGEÇMİŞ  |           |

## ÖZET

### Asidik ve Bazik Tüf Katkılarının Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyonuna Etkisi

Nevin KÜÇÜKASLAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2021, Sayfa: xii +79

Killi zeminlerin sıkışma, geçirimsizlik ve dayanım gibi temel mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde en fazla tercih edilen yöntem stabilizasyondur. Farklı tür ve oranlarda katkı maddesi eklenen killi zeminlerde stabilizasyon sonrasında oluşan puzolanik reaksiyonlar sonucunda, zeminin dayanımında artış, oturma, şişme ve geçirimsizlikte ise azalmalar meydana gelmektedir. Stabilizasyonda kullanılan ve puzolan adı verilen doğal veya yapay malzemeler ile gerçekleştirilen bu işlemde en yaygın tercih edilen malzemeler kireç, silis dumanı, uçucu kül, pomza, mermer tozu, çimento ve tüftür. Kullanılacak olan puzolanın ekonomik, kolay elde edilebilir ve çevre dostu olması önem taşımaktadır. Bu nedenle, yapay puzolanik malzeme yerine pomza ve tüf gibi doğal malzemelerin kullanımının yaygınlaştırılması ve bu tür doğal puzolanların killi zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi gereklidir.

Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak Gümüşhane bölgesinde yüzeyleyen Kızılkaya Formasyonu'na ait asidik karakterli tüfler ve Elazığ bölgesinde yüzeyleyen Karabakır Formasyonu'na ait bazik karakterli tüfler seçilmiştir. Yüksek plastisiteli bentonite farklı oranlarda eklenen bu tüflerin, bentonitin konsolidasyon özellikleri ile şişme potansiyeline olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan katkısız bentonit ve tüf katkılı örneklerde kür öncesi ve sonrasında konsolidasyon deneyleri yapılarak, asidik ve bazik tüf katkısının killi zeminlerde konsolidasyonun süresi hakkında bilgi veren konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ ) üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, şişme potansiyeline olan etkileri belirlemek amacıyla katkısız bentonit ve tüf katkılı örneklerde kür öncesi ve sonrasında şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, katkı oranının %5 olması halinde asidik tüflerin bazik tüflere göre örneklerin  $C_v$  değerlerini daha fazla artırdığı ve şişme basıncını ise daha fazla azalttığı belirlenmiştir. Asidik ve bazik tüflerin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi benzerdir ve katkı oranına bağlı olarak örneklerde şişme yüzdeleri azalma göstermektedir. Elde edilen sonuçlar hem asidik hemde bazik karakterli tüflerin yüksek plastisiteli killi zeminlerin konsolidasyon ve şişme potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Asidik tüf, Bazik tüf, Konsolidasyon katsayısı, Stabilizasyon, Şişme basıncı, Şişme yüzdesi

## ABSTRACT

---

### The Effect of Acidic and Basic Tuff Additives on Consolidation of High Plasticity Clays

Nevin KÜÇÜKASLAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Geological Engineering

August 2021, Pages: xii + 79

---

Stabilization is the most preferred method for improving basic engineering properties such as compaction, permeability and strength of clayey soils. As a result of the pozzolanic reactions that occur after stabilization in clayey soils by adding different types and ratios of additives, an increase in the strength of the soil and a decrease in the settlement, swelling and permeability occur.

Lime, silica fume, fly ash, pumice, marble dust, cement and tuff are called as pozzolans and are the most commonly preferred natural or artificial materials used in stabilization. It is important that the pozzolans to be used should be economical, easily acquirable and environmentally friendly. Therefore, it is necessary to expand the use of natural materials such as pumice and tuff instead of artificial pozzolanic material and to examine the effects of such natural pozzolans on the engineering properties of clayey soils.

In this study, acidic characteristic tuffs of Kizilkaya Formation that cropped out in Gumushane region and basic characterized tuffs of Karabakir Formation cropped out in Elazig region were selected as additive material. These tuffs were added to the high plasticity bentonite in different ratios and the effects of these tuffs over the consolidation properties and swelling potential of bentonite were investigated.

Consolidation tests were carried out both before and after curing on the pure bentonite and tuff added samples those prepared for this purpose, and the effects of acidic and basic tuff additives on the consolidation coefficient ( $C_v$ ), which gives information about the consolidation time in clayey soils, were determined. In addition, in order to determine the effects on the swelling potential, swelling pressure and swelling percentage tests were carried out both before and after curing on the additive-free bentonite and tuff added samples.

As a result of the experimental studies, if the additive ratio was 5%, it was determined that acidic tuffs increased the  $C_v$  values of the samples more and decreased the swelling pressure when compared to basic tuffs. The effect of acidic and alkaline tuffs on the percentage of swelling is similar and the percentage of swelling in the samples decreases depending on the additive ratio. The results showed that both acidic and alkaline tuffs have a significant effect on the consolidation and swelling potential of high plasticity clayey soils.

**Keywords:** Acidic tuff, Basic tuff, Coefficient of consolidation, Stabilization, Swelling pressure, Swelling percentage

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.1.  | (a) Tetrahedral silis levhasının üç boyutlu modellemesi, (b) Silis levhasının sadeleştirilmiş çizimi .....                                  | 17 |
| Şekil 3.2.  | (a) Oktahedral levhanın üç boyutlu modellemesi, (b) Oktahedral levhanın sadeleştirilmiş çizimi .....  | 17 |
| Şekil 3.3.  | Kaolinit-Serpantin grubu minerallerin yapısı .....  | 18 |
| Şekil 3.4.  | Kaolinit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi .....   | 19 |
| Şekil 3.5.  | Smektit minerallerin yapısı .....   | 19 |
| Şekil 3.6.  | Montmorillonit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5 µm) .....  | 20 |
| Şekil 3.7.  | Bir mika mineralinin yapısı .....   | 20 |
| Şekil 3.8.  | İllit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5 µm).....  | 21 |
| Şekil 3.9.  | İllitin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5 µm).....  | 21 |
| Şekil 3.10. | Klorit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5 µm) .....  | 21 |
| Şekil 3.11. | Killerde muhtemel dane dizilim şekilleri.....   | 24 |
| Şekil 4.1.  | Bentonite ait XRD grafiği.....  | 30 |
| Şekil 4.2.  | Kızılkaya Formasyonu'na ait tüflerin XRD grafiği .....  | 31 |
| Şekil 4.3.  | Karabakır Formasyonu'na ait tüflerin XRD grafiği.....   | 33 |
| Şekil 4.4.  | Öğütülmüş asidik ve bazik tuf katkıları .....   | 34 |
| Şekil 4.5.  | Standart Proktor deney aletinin görünümü .....  | 36 |
| Şekil 4.6.  | Zemin örneğinin hazırlanması ve sıkıştırılması .....  | 37 |
| Şekil 4.7.  | Zemin örneğinin kalıptan çıkarılması .....  | 38 |
| Şekil 4.8.  | Zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerlerinin grafikten belirlenmesi ..... | 38 |
| Şekil 4.9.  | Bentonit kiline ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) – su içeriği (w) grafiği .....  | 39 |
| Şekil 4.10. | Asidik tuf katkılı örneklere ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) – su içeriği (w) grafikleri.....                                   | 39 |
| Şekil 4.11. | Bazik tuf katkılı örneklere ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ )-su içeriği (w) grafikleri.....                                      | 40 |
| Şekil 4.12. | Bir boyutlu konsolidasyon; reolojik modeli (Kahafaji ve Andersland, 1992) .....   | 41 |
| Şekil 4.13. | Bir konsolidasyon deneyine ait e-LogP grafiği.....  | 43 |
| Şekil 4.14. | Konsolidasyon katsayısının karekök yöntemiyle bulunması .....   | 44 |
| Şekil 4.15. | Ödometre deneyinin yapılması .....  | 45 |
| Şekil 4.16. | Katkısız bentonit örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrisi ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .....                           | 47 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Şekil 4.17.</b> | B+%5AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi ..... | 48 |
| <b>Şekil 4.18.</b> | B+%10AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .... | 49 |
| <b>Şekil 4.19.</b> | B+%15AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .... | 50 |
| <b>Şekil 4.20.</b> | B+%20AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .... | 51 |
| <b>Şekil 4.21.</b> | B+%5BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi ..... | 52 |
| <b>Şekil 4.22.</b> | B+%10BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .... | 53 |
| <b>Şekil 4.23.</b> | B+%15BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .... | 54 |
| <b>Şekil 4.24.</b> | B+%20BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi .... | 55 |
| <b>Şekil 4.25.</b> | Şişme basıncı deneyinden bir görünüm .....   | 58 |
| <b>Şekil 4.26.</b> | Şişme yüzdesi deneyinden bir görünüm .....   | 61 |
| <b>Şekil 5.1.</b>  | Örneklerin $C_v$ değerlerindeki değişimlere ait grafik .....   | 63 |
| <b>Şekil 5.2.</b>  | Örneklerin şişme basıncı değerlerindeki değişimlere ait grafik .....                                     | 65 |
| <b>Şekil 5.3.</b>  | Örneklerin şişme yüzdesi değerlerindeki değişimlere ait grafik .....                                     | 66 |

## TABLolar LİSTESİ

|   | Sayfa |
|---|-------|
| <b>Tablo 3.1.</b> Kil minerallerinin sınıflandırılması.....   | 18    |
| <b>Tablo 3.2.</b> Başlıca kil minerallerinin spesifik yüzey alanları .....  | 22    |
| <b>Tablo 3.3.</b> Başlıca kil minerallerinin dane çapı, kalınlığı ve spesifik yüzey alanları .....                                    | 23    |
| <b>Tablo 3.4.</b> Zemin türlerine göre gözlenebilecek oturma türleri.....   | 25    |
| <b>Tablo 3.5.</b> Zemin türlerine göre geçirimsizlik katsayıları ve drenaj durumu .....   | 26    |
| <b>Tablo 4.1.</b> Başlıca bentonit gruplarının ortalama ana oksit yüzdeleri .....   | 29    |
| <b>Tablo 4.2.</b> Bentonitin ana oksit yüzdeleri .....  | 30    |
| <b>Tablo 4.3.</b> Kızılıkaya Formasyonu'na ait tüflerin ana oksit yüzdeleri .....   | 32    |
| <b>Tablo 4.4.</b> ASTM C 618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012)'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları                           | 32    |
| <b>Tablo 4.5.</b> Karabakır Formasyonu'na ait tüflerin ana oksit yüzdeleri.....   | 33    |
| <b>Tablo 4.6.</b> Laboratuvar deneylerinde kullanılan katkılı örneklere ait karışım oranları .....                                    | 35    |
| <b>Tablo 4.7.</b> Standart ve modifiye proktor deneylerine ait bilgiler .....   | 36    |
| <b>Tablo 4.8.</b> Zemin örneklerinin $\gamma_{kmax}$ ve $w_{opt}$ değerleri .....   | 39    |
| <b>Tablo 4.9.</b> Karekök-zaman yöntemine göre belirlenen kür öncesi ve kür sonrası $t_{90}$ ve $C_v$ değerleri .....                 | 46    |
| <b>Tablo 4.10.</b> Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme basıncı değerleri....                    | 58    |
| <b>Tablo 4.11.</b> Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme yüzdesi değerleri...                     | 61    |
| <b>Tablo 5.1.</b> Katkısız ve kürsüz bentonite göre katkılı örneklerin $C_v$ değerlerinde meydana gelen %<br>değişimler .....         | 62    |
| <b>Tablo 5.2.</b> Katkısız ve kürsüz bentonite göre katkılı örneklerin şişme basıncı değerlerinde meydana gelen<br>% değişimler ..... | 64    |
| <b>Tablo 5.3.</b> Katkısız ve kürsüz bentonite göre katkılı örneklerin şişme yüzdesi değerlerinde meydana gelen<br>% değişimler ..... | 66    |

## SİMGELER

|                 |   |
|-----------------|---|
| $a_v$           | : Sıkışma katsayısı   |
| $c$             | : Kohezyon  |
| $C_c$           | : Sıkışma indisi  |
| CH              | : Yüksek plastisiteli kil   |
| CL              | : Düşük plastisiteli kil  |
| Cr              | : Tekrar sıkışma indisi   |
| $c_u$           | : Drenajsız kayma dayanımı  |
| $C_v$           | : Konsolidasyon katsayısı   |
| $D_1$           | : Örneğin şişme sonrasındaki çapı                                     |
| $D_o$           | : Örneğin başlangıç çapı  |
| $\Delta P$      | : Basınçta meydana gelen artış  |
| E               | : Boşluk oranı  |
| $\phi$          | : İçsel sürtünme açısı  |
| $\phi'$         | : Efektif içsel sürtünme açısı  |
| $\gamma_{kmax}$ | : Maksimum kuru birim hacim ağırlık                                   |
| $\gamma_w$      | : Suyun birim hacim ağırlığı  |
| Gs              | : Özgül ağırlık   |
| H               | : Örnek kalınlığı   |
| $H_1$           | : Örneğin şişme sonrasındaki yüksekliği                               |
| $H_o$           | : Örneğin başlangıç yüksekliği  |
| k               | : Gerçirimlilik katsayısı   |
| K               | : Katkısız kil  |
| LL              | : Likit limit   |
| MH              | : Yüksek plastisiteli silt  |
| ML              | : Düşük plastisiteli silt   |
| $m_v$           | : Hacimsel sıkışma katsayısı  |
| P               | : Basınç  |
| pH              | : Hidrojen gücü   |
| PI              | : Plastisite indisi   |
| PL              | : Plastik limit   |
| $q_u$           | : Serbest basınç dayanımı   |
| S               | : Şişme yüzdesi   |
| $\sigma$        | : Normal gerilme  |
| $\sigma_m$      | : Ortalama konsolidasyon basıncı                                      |
| $S_c$           | : Konsolidasyon oturması  |
| $S_i$           | : Ani oturma  |
| $S_r$           | : Doygunluk derecesi  |
| $S_s$           | : İkincil oturma  |
| $S_t$           | : Toplam oturma   |
| t               | : Zaman   |
| $\tau$          | : Kesme gerilmesi   |
| $t_{90}$        | : Konsolidasyonun %90'lık kısmının tamamlanmasına karşılık gelen süre |
| w               | : Su içeriği  |
| $w_{opt}$       | : Optimum su içeriği  |

## KISALTMALAR

|       |   |
|-------|---|
| AASTO | : Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Ofisleri Derneği |
| ASTM  | : American Society For Testing and Material           |
| AT    | : Asidik tuf  |
| BSI   | : İngiliz Standardları Enstitüsü                      |
| BT    | : Bazik tuf   |
| CBR   | : Kaliforniya taşıma oranı                            |
| DIN   | : Alman Standardları Enstitüsü                        |
| MTA   | : Maden Tetkik ve Arama                               |
| SEM   | : Taramalı elektron mikroskobu                        |
| XRD   | : X-ışını kırınım yöntemi                             |
| XRF   | : X-ışını Floresans Spektrometresi                    |
| TSE   | : Türk Standardları Enstitüsü                         |



# 1. GİRİŞ

İnsanlığın var oluşu ile birlikte ortaya çıkan gıda ve barınma gibi temel ihtiyaçlar, doğanın ve çevresel faktörlerin yarattığı olumsuz koşulların üstesinden gelme isteği, insanların akıl ve mantığını kullanma yeteneğini geliştirmiştir. Bu gelişime bağlı olarak ortaya çıkan bilimsel ve teknolojik yenilikler de büyük medeniyetlerin kurulmasını sağlamıştır. Bu medeniyetler tarafından gerçekleştirilen yol, köprü, baraj ve bina gibi projelerin mühendislik özellikleri de günümüze değin geliştirilmiştir. Elbette ki, bu yapıların sadece inşa edilmesi değil, aynı zamanda çok uzun yıllar amacına uygun olarak hizmet edebilmesi en önemli noktalardan birisidir. Bunu sağlayan faktörlerin başında ise yapının inşasında kullanılan malzeme ile birlikte yapı temellerinin oturduğu zeminin mühendislik özellikleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bina temellerinin üzerine oturduğu veya yapı malzemesi olarak kullanılan malzemenin belli mühendislik özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Ancak, dünya nüfus artış hızına bağlı olarak gelişen endüstriyelleşme, tarım arazilerinin azalması vb. olaylardan dolayı istenilen projeler için mühendislik özelliğine sahip zemin bulmak oldukça güçleşmiştir. Bu durum, araştırmacıların tasarlanan projeye uygun özelliklere sahip olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çalışmalar yapmasına neden olmuştur.

Dolgu malzemesinden, kimyasal atık depolarına, zeminlerin iyileştirilmesine kadar kullanım alanı geniş bir yelpazeye sahip killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin American Society For Testing and Material (ASTM), Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Ofisleri Derneği (AASTO), Türk Standardları Enstitüsü (TSE), İngiliz Standardları Enstitüsü (BDI) ve Alman Standardları Enstitüsü (DIN) gibi uluslararası standartlarda belirtilen değerlere sahip olması gerekmektedir. Fakat her zaman belirtilen standartlara sahip killi zemin bulmak mümkün olmamaktadır. Standartlarda belirtilen limit değerlere uygun özellikleri yakalayabilmek için enjeksiyon, ön yükleme, jet-grouting, dinamik kompaksiyon ve stabilizasyon gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında ekonomik ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle en yaygın olarak kullanılan stabilizasyon yöntemidir. Bu yöntemde, puzolanik reaksiyonların oluşmasını sağlamak için killi zemine puzolanik özelliğe sahip tuf, silis dumanı, sönmüş kireç, uçucu kül, mermer tozu, pomza ve çimento gibi katkı maddeleri katılmakta ve böylece kimyasal reaksiyon oluşması sağlanarak, killerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Attoh-Okine(1995), stabilizasyonu killi zeminlerde karşılaşılan mühendislik problemlerine çözüm üretebilmek için bu tür zeminlerin jeoteknik özelliklerinin değiştirilmesi işlemi olarak tanımlamaktadır. Killi zeminin taşıma gücü, dayanım, oturma ve sıkışma ve geçirimsizlik gibi mühendislik özelliklerini iyileştirmek için farklı özelliklere sahip çok sayıda malzeme katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu katkı malzemelerinin en yaygın olarak kullanılanları sönmüş kireç, çimento, uçucu kül, silis dumanı, tuf, volkanik cam, volkanik kül, şeyl ve diatomit

gibi doğal puzolanlardır. Bu katkı malzemeleri zemine ait elementlerle kimyasal reaksiyona girerek kilin jeoteknik özelliklerini iyileştirirler (Chu ve Kao, 1993; Bell, 1996; Kalkan ve Akbulut, 2004; Aksoy vd., 2008; Boardman vd., 2001; Cuisinier vd., 2011; Harichane vd., 2011; Hossain ve Mol, 2011; Azadegan vd., 2012; Abdelkerim ve Mohamed, 2013; Lin vd., 2013).

Locat vd. (1990), zeminlere eklenen katkı maddeleri ile zemindeki mevcut elementlerin reaksiyona girmesi sonucunda, zeminin su içeriğinin kısa sürede azaldığını ve çok hızlı işlenebilir hale geldiğini; uzun vadede ise zeminin dayanım ve sıkışabilirlik gibi jeoteknik özelliklerinde iyileşmeye neden olduğunu belirtmektedirler. Stabilizasyon amacıyla kullanılacak olan malzemenin seçiminde birkaç temel faktör ön plana çıkmaktadır. Bu faktörlerin başında, katkı malzemesinin puzolanik özelliğe sahip olması, ucuz ve kolay bulunabilir olması gelmektedir. Ancak, günümüzde artan çevre kirliliği nedeniyle yeni bir faktörün daha göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu faktör ise stabilizasyonda kullanılacak malzemenin çevreci olmasıdır. Çünkü çimento, kireç ve uçucu kil gibi katkıların kullanımı stabilizasyon maliyetini ciddi oranda artırmakla beraber katkı maddelerinin üretildiği tesislerde karbon salınımına ve çevresel sorunlara neden olmaktadır (Imbabi vd., 2012).

Stabilizasyon konusunda yapılan çalışmalarda (DempseyveThompson, 1968; Thompson, 1969; ThompsonveDempsey, 1969; Hilf, 1991; Chu ve Kao, 1993; Sherwood, 1994; Little vd., 1995; Bell, 1996; Locat vd., 1996; Wild vd., 1996; RajasekaranveRao, 1997; Boardman vd., 2001; Tremblay vd., 2001; Puppala vd., 2003; Kalkan ve Akbulut, 2004; Mallela vd., 2004; Al-Rawas vd., 2005; Geiman, 2005; RaoveShivananda, 2005; Tedesco, 2006; Bulut, 2007; Aksoy vd., 2008; Mfinanga ve Kamuhabwa, 2008; Cuisinier vd., 2011; Harichane vd., 2011; Hossain ve Mol, 2011; Ramadas vd., 2011; Azadegan vd., 2012; Lin vd., 2013; Mahamedi ve Khemissa, 2013; Wang vd., 2013; Voottipruex ve Jamsawang, 2014; Asgari vd., 2015; Goodarzi vd., 2015; Bahadori vd., 2019; Aslan Topçuoğlu, 2020) zeminde puzolanik reaksiyon oluşturularak yapılan stabilizasyon yönteminin ekonomik çözümler sunduğu, zemine eklenen katkı maddelerin zemindeki elementlerle reaksiyona girerek zeminin mikro yapısını değiştirdiğini ve kısa süre içerisinde su içeriğinin azalmasına ve daha kolay işlenebilir hale gelmesine; uzun sürede ise zeminin dayanım ve duraylılığının artmasına, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli ve hacimsel değişimin ise azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar özellikle volkanik kül ve tuf gibi doğal ve çevreci malzemelerin zeminlerin stabilizasyonunda oldukça etkili olduğunu ve kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, zeminleri stablize etmek amacıyla sıklıkla kullanılan tüflerin, yüksek plastisiteli killerin konsolidasyon katsayısı, şişme basıncı ve şişme yüzdesi özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kili, katkı malzemesi olarak da ekonomik ve ekolojik kriterlere sahip, sürdürülebilir bir malzeme olan asidik ve bazik karakterli tüfler kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan bentonit kili Reşadiye (Tokat) kil

ocağından, bazik karakterli tuf Ağın (Elazığ) bölgesinde yzeyeleme veren Karabakır Formasyonu'ndan, asidik karakterli tuf ise Gümüşhane bölgesinde yzeyeleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Çalışmada kullanılan bentonit ve tuflerin kimyasal ve minerolojik ozelliklerini belirlemek için X-Işını Difraktometresi (XRD) ve X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) analizleri yapılmıştır. Bu tufler, bentonit kiline %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilerek hazırlanan ozneklerin optimum su içerikleri belirlenmiş, daha sonra optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanan ozneklere kr oznesi ve 28 günlük kür sonrasında konsolidasyon, şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri yapılarak katkı tipi, oranı ve kr süresinin bentonitin konsolidasyon ozelliklerine olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan stabilizasyon yöntemi konusunda günümüze değin oldukça fazla bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, stabilizasyonun nasıl gerçekleştiği, stabilizasyon sonrasında killi zeminlerin mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimler, en uygun katkı malzemelerinin türü ve oranı hakkındadır. Litaretürde stabilizasyon konusunda yapılan araştırmalardan, bu çalışmanın konusuna yakın olanlar aşağıda kısaca özetlenmeye çalışılmıştır.

Dempsey ve Thompson (1968), yaptıkları çalışmada, zeminlerin donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi olayların etkileri karşısında duraylılığı artırmak için stabilizasyon yöntemini uygulamışlardır. Gerçekleştirdikleri puzolanik reaksiyon sayesinde zeminlerde sertleşme meydana getirerek mühendislik özelliklerinde iyileşme gözlemlemişlerdir.

Gray ve Lin (1972), Michigan uçucu küllerinin mühendislik özelliklerini incelemiş ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Konsolidasyon deney verilerine göre uçucu küllerin geçirgenliğin ve aynı zamanda kuru birim hacim ağırlığının bir fonksiyonu olduğunu, geçirgenliğinin artan kuru birim hacim ağırlığına karşılık azaldığını gözlemlemişlerdir.

Joshi ve Nagaraj (1987), uçucu küllerin kil dolguların mühendislik özelliklerine etkisini incelemek amacı ile yaptıkları deneysel çalışmalarda kompaksiyon ile sıkışma özelliklerinin azaldığını ve sıkışma indislerinin  $C_c=0.05-0.37$ , tekrar sıkışma indisi değerlerinin  $C_r=0.006-0.004$  arasında olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar, uçucu kül ve cüruf katkısıyla 12 farklı karışım üzerinde yaptıkları konsolidasyon deneylerinde uçucu kül katkısının artmasıyla sıkışabilirliğin azaldığını belirlemişlerdir.

Lee ve Dutto (1987), F tipi uçucu kül ve saf kil kullanarak elde ettikleri örneklerde konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, çalışma sonucunda şişme ve sıkışabilirlik özelliklerinde azalma, CBR değerlerinde ise artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Chu ve Kao (1993), uçucu kül ve cüruf katkısının zeminlerin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemek amacı ile 12 farklı karışımdan oluşan örneklerde yaptıkları konsolidasyon deneylerinde uçucu kül ve cüruf katkı içeriğinin artmasına bağlı olarak sıkışabilirliğin azaldığını belirlemiştir.

Ferguson (1993), C sınıfı uçucu külün yarış pisti zemininde katkı olarak kullanmasını araştırdığı çalışmasında, %14 ile %18 arası uçucu kül katkılı örneklerin 7 günlük kür sonundaki dayanımlarının 10 kat kadar artış gösterdiğini ifade etmiştir.

Asada vd. (1995), çalışmalarında örselenmemiş uçucu kül örnekleri üzerinde yaptıkları konsolidasyon deneyi ile konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ )-ortalama konsolidasyon basıncı ( $\sigma_m$ ) arasındaki değişimi incelemişlerdir. Araştırmacılar, konsolidasyon katsayısının 0.0347-0.1157

cm<sup>2</sup>/sn arasında olduğunu ve bu değerin standart deniz kilinin konsolidasyon katsayısının 10-100 katı olduğunu saptamışlardır.

Baykal ve Döven (1996), araştırmalarında Soma Termik Santrali'nden derledikleri uçucu küllerden ağırlıkça %100 kül ve %95 kül, %5 kireç katkısı ilave ederek hazırladıkları deney örnekleri üzerindeki çalışmaları neticesinde, serbest basınç dayanımının olması gereken seviyeye ulaştığını gözlemlemiştir.

Bell (1996), kireç katkısının farklı kil gruplarındaki mühendislik özellikleri üzerine etkisini belirlemek amacı ile yaptığı çalışmalarda kireç katkısının kaolinit ve kuvars grubu killerin plastisitesini artırdığını, montmorillonit grubu killerin ise plastisitesini azalttığını gözlemlemiştir. Araştırmacı, stabilizasyon sonucunda zeminin optimum su içeriğinin arttığını, maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise azaldığını belirtmektedir.

Ersan (1996), çalışmasında uçucu kül katkısının doğal zeminlerin kıvam limitleri üzerindeki davranışını değerlendirmiştir. Bu sebeple laboratuvar deneylerinde farklı oranlarda uçucu kül katkısı ekleyerek elde ettiği örneklerde likit limit ve plastik limit deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, katkı miktarı arttıkça likit limitte %32, plastik limit değerlerinde ise %55 oranında artış olduğunu; buna karşın uçucu kül katkı oranı arttıkça plastisite indisi değerinin ise azaldığını ifade etmiştir.

Tan ve İyisan (1996), yaptıkları çalışmalar sonucunda, killi zeminlere belirli oranlarda eklenen uçucu küllerin, kilin kayma direncinde ciddi artışlara sebebiyet verdiğini, uçucu killerin zemin ıslahında kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir.

Kayabalı (1997), bentonit-zeolit karışımlarının bentonit zeminler üzerinde geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla kompaksiyon, permeabilite ve dayanım deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, bentonit oranının %5'den büyük olduğu durumlarda uygun geçirimsizlik değerlerinin elde edildiğini belirtmiştir.

Keskin ve Çimen (1997), killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımını incelemişlerdir. Sonuç olarak, pomzanın CL sınıfı killerde serbest basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, CH sınıfı kil sınıfında ise şişme basıncını azalttığı, serbest basınç dayanımını attırdığı, plastisite indisini azalttığı ve ideal oranın %20-30 arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Koçu (1997), çalışmasında Konya çevresinde bulunan volkanik tufün yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için yaptığı çalışmada, dane boyutu olarak 211 µ'luk elekten geçen puzolan malzeme ile farklı oranlarda kireç ve su kullanarak hazırladığı örnekleri farklı sıcaklıklarda kürlemiştir. Araştırmacı sonuç olarak en yüksek basınç dayanımını, bağlayıcı/puzolan oranının %35, su/(puzolan+bağlayıcı) oranının %45; kür sıcaklığının ise 70°C olduğu deneylerden elde etmiştir.

Okucu (1998), Bigadiç ve Turnatepe Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri isimli araştırmasında, adı geçen bölgelerdeki volkanik zeolitik ve perlitik volkanik

tüflerin çimento katkı maddesi olarak kullanım olanaklarını araştırmıştır. Bölgedeki puzolanların fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık, dane boyutu, özgül yüzey (Blaine) ve öğütülebilirlik testi deneyleri; kimyasal özelliklerinin belirlemek için de çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı ve kimyasal analiz deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, zeolitik tüflerin kolay öğütülebilirliği ile birlikte puzolanik aktivitelerinin yüksek olduğunu, perlitik tüflerde ise puzolanik aktivitenin yüksek olmasının yanı sıra zor öğütülebilmesi ve 28. gün sonunda basınç dayanımının standartları aşmakla birlikte zeolitik tüflere oranla daha düşük olduğunu belirlemiştir. Bunun yanında perlitik tüflerin kullanılabilir bir puzolan olmakla beraber zeolitik tüflerle uygun oranlarda karıştırılarak kullanılmasını tavsiye etmiştir.

Kavas ve Çelik (2001), Afyon Ayazını tüflerinin tras olarak kullanılabilirliğini inceledikleri çalışmada, hazırlanan tüf katkılı çimento örneklerinin serbest basınç dayanımlarının 5.7-10.6 N/mm<sup>2</sup>, eğilmede çekme dayanımlarının ise 1.4-2.5 N/mm<sup>2</sup> olduğunu belirterek, Ayazını bölgesinde bulunan tüflerin katkılı çimento üretiminde tras olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Prashanth vd. (2001), düşük rötre özelliğine sahip uçucu küllerin geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yaptığı laboratuvar çalışmalarında konsolidasyon, dayanım, sıkışabilirlik ve geçirimsizlik özelliklerini belirlemiştir. Uçucu küllerin çatlaklara sebebiyet vermeyeceğini ve sıkıştırılmış uçucu küllerin dayanım derecelerinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Tao ve Lee (2001), Shi- Men bataklık alanından elde ettiği zemine portlant çimentosu katarak çimento malzemesinin yumuşak killi zeminlerin konsolidasyon davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda likit limiti %47, plastik limiti %22 olan zeminin çimento katkısı ile beraber kür süresinin ve çimento miktarının konsolidasyon davranışı üzerindeki etkisini inceleyebilmek için üç tür örnek hazırlamıştır. İlk örnek (sm-a, sm-b) doğal zemin, ikinci grup örnek (sm-d, sm-e, sm-f, sm-g) zemin içine su/çimento oranı 0.6 olan su-çimento karışımı, üçüncü grup örnek (sm-c, sm-h) ise çimento içeriği % 6 olacak şekilde hazırlamışlardır. Araştırmacılar hazırladıkları bu örnek gruplarında konsolidasyon deneyleri gerçekleştirmişler ve sonuçta düşük çimento ve kür süresinin ön konsolidasyon basıncı ve konsolidasyon katsayısını artırdığını; ön konsolidasyon basıncındaki yüklemelerde düşük çimento katkısının doğal zeminlere göre oturma miktarını azalttığını belirlemiştir.

Alkaya (2002), uçucu külüdoğru zeminlerde stabilizasyona etkilerini incelediği çalışmada uçucu kül oranının artmasıyla optimum su içeriği, boşluk oranı ve permeabilitede artış olduğunu, bu artışlara bağlı olarak konsolidasyon hızında artış ve toplam konsolidasyon oturmasında ise azalma meydana geldiğini belirlemiştir.

Aytekin (2002), klinker üretiminde kullanılan kalker, tras ve kireçtaşının işlenmesi ile ortaya çıkan atık maddelerin yüksek şişme içeriğine sahip killi zeminlerin permeabilitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacı %5, %15 %25 oranlarında atık malzemeyi killi zeminlere ilave

ederek elde ettiği örneklerde permeabilite deneyleri yapmış ve sonuç olarak katkı maddesi oranı arttıkça geçirimsizlik değerlerinde artış olduğunu, en fazla geçirimsizlik katsayısının %15 katkı ile hazırlanan örnekte belirlendiğini ifade etmiştir.

Çokça ve Toktaş (2002), dispersif özellikteki killi zemine %3, 5, 7, 10 ve 13 oranında C tipi uçucu kül ekleyerek hazırladıkları örneklerin indeks, dayanım ve konsolidasyon özelliklerini incelemiştir. Araştırmacılar, uçucu kül miktarının artmasıyla örneğin optimum su içeriğinin arttığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının ise azaldığını belirlemiştir. Artan uçucu kül oranı ile örneklerin serbest basınç dayanımlarının arttığını belirlemiştir.

Chew vd. (2004), deniz killerinin stabilizasyonu için kireç katkısı kullanarak elde ettiği örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Araştırmacılar, su içeriği %90 ve %120 olan örneklere su/kireç oranı 1 olan çimento şerbeti ilave ederek bu örneklere 7 ve 28 günlük kür uygulamışlardır. Araştırmacılar kür süresine paralel olarak örneklerin plastik limit değerinde artış olduğunu, likit limit değerlerinin, %10 ve daha düşük çimento içeriklerinde ciddi boyutta artarken, daha fazla çimento içeriklerinde ise azaldığını belirlemiştir.

Kalkan ve Akbulut (2004), yüksek plastisiteli killerin geçirimsizlik, şişme basıncı ve sıkışma dayanımı üzerinde silis dumanının etkisini araştırdığı çalışmalarında yüksek silis duman içeriğine sahip kompozit örneklerin, zemin tiplerinin yüksek plastik killerden düşük plastik killere dönüştüğünü; silis dumanı katkısının aynı sıkıştırma gücünde tüm kompozit örneklerde optimum su içeriğini az miktarda arttırdığını ve maksimum kuru birim ağırlıklarını azalttığını belirlemiştir. Araştırmacılar, ayrıca silis katkısının örneklerin permeabilitesi, şişme basıncı ve basınç dayanımı üzerinde önemli bir stabilizasyon sağladığını; geçirimsizlik ve şişme basıncı azaldıkça, kil örneklerinin basınç dayanımının, silis dumanı içerikleriyle orantılı olarak arttığı; %25 ya da daha fazla silis dumanı içeriğine sahip örneklerde düşük geçirimsizlik, şişme basıncı ve yüksek basınç dayanımının oluştuğunu belirtmiştir.

Phani Kumar ve Sharma (2004), bentonit-uçucu kül karışımında esneklik, hidrolik iletkenlik, şişme ve büzülme özelliklerini azalttığını ve uçucu kül içeriğinin artmasıyla kuru birim ağırlığının ve dayanımının arttığı sonucuna varmışlardır.

Fındık (2005), karayolu esnek üstyapıları alt temel tabakasının stabilizasyonunda kullanmak üzere Keçiborlu-Çapalı ariyet malzemesine Isparta-Karakaya pomzası ve volkanik cüruf ilave ederek yaptığı çalışmada, %30 pomza karışımı ile ariyet malzemesini en uygun biçimde stabilize etmiş ve maliyet bakımından da %53 oranında azalma olduğunu ifade etmiştir.

Akgül (2006), Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi adlı çalışmada, sönmüş kirecin bağlayıcı, Datça toprağının ise puzolan olarak kullanıldığı üç ayrı kategoride örnek grubu ile yaptığı çalışmada, Datça çevresindeki volkanik tüflerin puzolanik aktivitesinin zamanla arttığı, su içinde bekletilen örnek gruplarından daha yüksek dayanımlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Bir haftalık süreçte etüvde kürlenmiş örneklerde ise,

sıcaklığın artışına bağlı olarak dayanımda yükselme gözlemleyen araştırmacı, Datça toprağının tarihi binaların restorasyonunda ya da yöredeki yapıların üretiminde kullanılmak üzere yüksek dayanımlı harç, sıva ve hafif yapı tuğlası gibi yapı malzemeleri olarak değerlendirilebileceğini ifade etmiştir.

İnan vd. (2005), killi zeminlerin stabilizasyonunu sağlamak amacı ile kuru kil ağırlığının %5, %10, %15 ve %20'si için iki farklı uçucu kül ilave ederek yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda uçucu küllere eklenen kireç içeriğine bağlı olarak gelişen puzolanik aktivite ile uçucu küllerin yumuşak kili zeminlerin içerisindeki boşlukları doldurarak karışımların serbest basınç dayanımını artırdığını saptamışlardır.

Alkaya vd. (2006), uçucu kül eklenen killi zeminlerin iyileştirme şartları, kür sürelerinin iyileştirme üzerindeki etkisini ve çeşitli oranlarındaki uçucu kil katkısının zeminin jeoteknik özelliklerine etkisini inceleyerek, killi zemine %15-20 oranlarındaki uçucu kül katkısının zemin üzerinde iyileştirici özellik sağladığını belirlemişlerdir.

Lakshmikantha ve Sivapullaiah (2006), kaolinit, illit ve uçucu kül malzemelerine ağırlıkça %20 oranında bentonit ilave ederek, karışımın atık depolama sahalarında bariyer malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Araştırmacıların yaptığı deneyler sonucunda bentonit ilavesinin beklenen şekilde geçirimsizliği düşürdüğü ancak hacimsel stabilizeyi de azalttığını, karışımlara %1 oranında kireç ilave edilerek hacimsel olarak meydana gelen azalmayı engellenebileceğini belirtmişlerdir.

Yarbaşı vd. (2006), çalışmalarında zeminlerin devimsel özelliklerindeki stabilizasyonu sağlamak amacı ile Afşin Elbistan Termik Santralinden elde edilen uçucu kül, Antalya Ferro-Krom Fabrikasından temin edilen silis dumanı ile Kayseri Kireç fabrikasından elde edilen kireci, ayrı granülometrik özelliklere sahip iki zemine katarak elde edilen örnekleri 28 günlük kür sonunda donma çözünme testlerine tabi tutmuşlardır. Çalışmalar sonucunda katkı ilave edilen örneklerin basınç dayanımlarının arttığını gözlemlemişlerdir.

Bulut (2007), perlitin puzolanik aktiviteyi artırmak amacıyla kullanılabilirliğini incelemiştir. Araştırmacı, farklı puzolan/bağlayıcı oranı, perlit dane boyutu, su/bağlayıcı oranı ile sönmemiş kirecin bağlayıcı olarak kullanılması durumunda kireç/puzolan oranı 1:2; su/bağlayıcının % 50 olduğu ve bağlayıcı olarak sönmüş kireç kullanılması durumunda en uygun sonucun elde edildiğini belirtmiştir. Ayrıca, TS 25'te en uygun kür sıcaklığı olarak önerilen 55°C nin doğru bir sıcaklık olduğunu ve puzolanik aktiviteyi artırmak için kalsiyum klorür ve sodyum sülfat katkılarının da kullanılabilirliğini ifade etmiştir.

Aksoy vd. (2008), killi zemine %0, %3, %5 ve %10 oranlarında uçucu kül ekleyerek hazırladıkları örnekleri optimum su içeriğinde sıkıştırmışlar ve hazırlanmış 1, 7 ve 30 günlük kürlerden sonra serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, uçucu kül katkısının ilavesi

zeminin plastisitesinin fazla değişmediğini, optimum su içeriği ile serbest basınç dayanımını ise artırdığını belirlemişlerdir.

Mfinanga ve Kamuhabha (2008), hafif volkanik agregalardan oluşan doğal puzzolanların ekonomik ve etkili bir şekilde stabilize edilerek yol temel malzemesi olarak kullanımını konusunda yaptıkları çalışmada, doğal puzzolanın kireç ile karıştırarak elde ettiği örneklerde laboratuvar deneyleri yapmıştır. Araştırmacılar sonuç olarak, doğal puzzolan-kireç bağlayıcısı kullanarak hafif volkanik agregalar gibi malzemelerin stabilize edebileceğini belirtmişlerdir.

Aytekin (2009), Afşin-Elbistan Termik Santrali'ne ait uçucu küllerin killi zeminlerin stabilizasyonuna olan üzerine etkisini araştırdığı çalışmasında, illit ağırlıklı Almanpınarı kiline eklediği uçucu kül ile elde ettiği örneklerle 1, 8, 16 ve 32 günlük kür uyguladıktan sonra bu örneklerde konsolidasyon ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, katkılı örneklerin kesme dayanımlarının ve konsolidasyon hızının arttığını, permeabilitenin ise azaldığını belirlemiştir. Ayrıca kr sresindeki artışın örneklerin dayanımını artırdığını gözlemiştir.

Ene ve Okagbue (2009), volkanizma ürünü olan piroklastik kül ile şişen zemine yapılan stabilizasyon çalışmasında CBR, kompaksiyon, plastisite, lineer büzülme ve serbest basınç dayanımlarının değişimini incelemişlerdir. Araştırmacılar %4, %8 ve %12 oranlarında hazırlanan piroklastik kül katkılı örneklerin plastisitesinde ve lineer bzlmesinde dikkate değer düşüşler gözlemişlerdir. Çalışmada, %4 ve %8 piroklastik kl oranlarındaki karışımların maksimum kuru yoğunluklarında, optimum su içerikleri, CBR değerlerinde ve serbest basınç dayanımlarında artış meydana geldiğini ve optimum piroklastik kül oranının ise %8 olduğunu belirlemişlerdir.

Sevencan (2009), yüksek plastisiteye sahip Ankara kiline farklı oranlarda Çayırhan uçucu külü ve polipropilen fiber katkısı eklemiştir. alışmasında tek eksenli basınç dayanımının uçucu kül oranı ve kr süresi ile doğrudan etkilendiği, aynı zaman da fiber çeşidi ve boyutunun tek eksenli basınç dayanımını arttırdığını ifade etmiştir.

Cömert vd. (2010), çalışmalarında doğal zeminlere ilave edilen katkı maddelerinin alt yol temellerinde kullanılabilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Bu alışma kapsamında değişik oranlardaki atık kum, uçucu kül ve mermer tozu katkılı örneklerin granül metrik özellikleri, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı saptanmıştır. Örnekler kr sürelerine tabi tutularak dane çapı dağılımı ve serbest basınç dayanımı özellikleri belirlenmiştir. alışmalar sonucunda iki ayrı saf zemine %40 oranında katkı maddelerinin eklenmesi ile örneklerin serbest basınç dayanımı açısından maksimum yüzdeleri uçucu külün %20, mermer tozunun %5-10 ve atık kumun %5 olduğu gözlenmiştir.

Çoruh vd. (2010), astar malzemesi olarak uçucu kül, fosfojips ve kırmızı çamur gibi endüstriyel yan ürünler kullanılarak çinko kalıntısı içeren sızıntının güvenli ve verimli bir şekilde bertaraf edilmesini çalışmışlardır. Sonuçlar uçucu kül ve kırmızının çamur, sızıntı suyunun ağır metal içeriğini azaltmada fosfogypsumdan daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamıştır.

Kalay (2010), pomza, mermer tozu ve kirecin yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerine olan etkilerini araştırdığı çalışmada, kil-kireç, kil-mermer tozu ve kil-pomza ikili karışımlarının yanı sıra kil-pomza-mermer tozu, kil-pomza-kireç ve kil-mermer tozu-kireç üçlü karışımlarının da etkileşimlerini incelemiş ve içerisinde kireç bulunan üçlü karışımların genellikle daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Mishra vd. (2010), bentonitlerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin 15 farklı toprak-bentonit karışımının çeşitli konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, karışımların sıkışma indisinde ( $C_c$ ) artışın olduğunu göstermiştir. Theasoil-Bentonit karışımları tüm karışımlar için konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ ), konsolidasyon basıncındaki artışla birlikte artmıştır. Karışımın %50'lik bir konsolidasyon ( $t_{50}$ ) süresi bentonitin likit limit, şişme kapasitesindeki artışla artmıştır.

Harichane vd. (2011), doğal puzolan ile kireç katkısını kombine ederek oluşturduğu örneklere bir takım deneyler yaparak zemin stabilisasyonunda kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Araştırmacılar, kohezyonlu zeminlerin mühendislik özelliklerinin doğal puzolan ve kireç katkısının olumlu yönde etkilediğini ifade etmişlerdir.

Hossain ve Mol, (2011), doğal puzolanlar ve endüstriyel atıklar da dahil olmak üzere stabilize kil zeminin bazı mühendislik özelliklerini incelemiş ve bu tür toprakların mühendislik çalışmaları için yeterli dayanıma ve durabiliteye sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Öntürk (2011), yüksek lisans çalışmasında doğal zeminin stabilizasyonunu sağlamak için kaolen kiline farklı oranlarda eklediği uçucu kül, kireç ve polisaj katkı maddesinin doğal zeminin dayanımını artırdığını gözlemlemiştir.

Taşcı (2011), yaptığı çalışmada silis dumanı ve sönmüş kireç katkısının dispersif ve şişme özelliğine sahip killi zeminin mühendislik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Araştırmaya göre %3 kireç ve %10 silis dumanı katkılı zemin örneklerinin mühendislik özellikleri önemli ölçüde iyileşmiştir.

Bilgen vd. (2012), çalışmalarında çelikhane cürufunun killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı olarak kullanımını, kireç ile etkileşimini ve en uygun karışım miktarını araştırmışlardır. Sonuç olarak, killi zeminlerin geoteknik özelliklerinde iyileştirme sağlanırken, çevresel etkiye sahip endüstriyel bir atığında geri dönüşümünün sağlanması da amaçlanmıştır. Araştırmacılara göre, şimdiye kadar endüstriyel bir atık olarak nitelendirilen çelikhane cürufunun, killerin dayanım özelliklerinde olumlu yönde artışlar meydana getirdiğini ve kireç ile birlikte kullanılması durumunda etkisinin arttığını ve katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Çalık (2012), perlitin puzolanik katkı maddesi olarak kireç ile birlikte kullanılmasının, perlit oranı ve zamana bağlı olarak karışımların geoteknik özelliklerinin nasıl değişim gösterdiğini belirlemek için smektit grubu kil mineralleri içeren yüksek plastisiteli doğal malzemenin

stabilizasyonunda %0, %10, %20, %30, %40, %50 perlit ve %8 kireç kullanılarak hazırladığı örneklerle bir takım laboratuvar deneyleri yapmıştır. Sonuç olarak, perlit kullanımının artması, serbest şişme ve şişme basıncı değerlerinde düşüşe neden olurken en iyi sonuçlara perlitin kireç ile birlikte kullanıldığı örneklerde gözlenmiştir. Sadece perlitin katkı olarak kullanıldığı karışımlarının plastisite özelliğinin göstergeleri olan LL ve PI değerlerinde, kullanılan perlit oranı ile doğrusal bir oranda azalma meydana gelmiştir. Karışımlarda perlit ve kirecin birlikte kullanımı ile LL ve PL değerlerinde zamana bağlı olarak ciddi artış gözlemlenirken, artan perlit miktarı bu değerlerde düşüslere neden olmuştur.

Çobanoğlu vd. (2012), çalışmalarında seçilen plentmiks malzemesine uçucu kül ve kil ilavesi sonucunda zeminlerin sıkışma özelliklerine etkisini gözlemlemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar Denizli ili üst yapı projesi alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliği açısından uygunluğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada alt temel malzemesi olarak kullanılan plentmiks malzemesinemaddesi olarak %10, %20, %30 oranlarında kil ve uçucu kül eklenmiş, sonuç olarak plentmiks malzemenin sıkışma özelliklerinde artış sağladığını gözlemlenmiştir.

Mohammed Ali (2012), çalışmasında uçucu kül ve kireç katkısı kullanımının üstyapı performansını önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemiştir. Çalışma kapsamında Çayırhan Termik santralinden elde ettiği uçucu kül katkısına %3 ve %6 oranında kireç ilave ederek hazırladığı örneklerin kilin mühendislik özelliklerini iyileştirici yönde etkilediğini belirtmiştir.

Çimen vd. (2013), Manisa Kula bölgesine ait volkanik tüflerinin yüksek plastisitesi killer üzerinde etkisini araştırmak amacı ile bir takım çalışmalarda bulunmuştur. Bu amaçla yüksek plastisiteli kile ağırlıkça %2, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 oranlarında volkanik tüf karıştırılarak elde ettikleri örneklerle kompaksiyon, şişme basıncı ve serbest basınç deneyleri yaparak jeoteknik özelliklerindeki değişimleri gözlemlemiştir. Sonuç olarak plastisite indisinin ve şişme basıncının azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve serbest basınç dayanımının arttığını ifade etmişlerdir.

Lin vd. (2013), uçucu kül katkısının killi zeminin mühendislik özelliklerine etkisi konusunda yaptığı çalışmada C sınıfı uçucu kül katkısının oluşturduğu fiziko-kimyasal, mineralojik ve mikro değişiklikleri belirlemek için mikroskopik incelemeler yapmışlardır. Araştırmacılar, uçucu kül katkısıyla yapılan stabilizasyonda plastisite indeksinin, kil boyutu oranının, şişme yüzdesinin, şişme basıncının, hacimsel su içeriğinin azaldığını, serbest basınç dayanımının ise arttığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları x-ışını kırınım yöntemi (XRD) sonuçlarına göre mineralojik özelliklerde önemsiz değişiklikler olduğunu, ancak kil minerallerinin toplam miktarında azalmalar olduğunu ifade etmektedirler. Mikro yapıdaki önemli değişimleri belirlemek amacıyla yaptıkları taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmalarında, demir oksit tabakasının varlığını hem XRD hem de enerji dispersif X-ışını Spektroskopisi analizi ile doğrularak, bu

tabakanın varlığının topraklanma neden olarak, killi zeminlerin su tutma kapasitesini ve şişme potansiyelini azalttığını, zeminin dayanımını ise arttırdığını belirtmişlerdir.

Wang vd. (2013), kireç katkısının Fransa'daki Dunkirk killerin jeoteknik özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmada, katkısız ve katkılı örneklerde serbest basınç dayanımı, standart ödometre, direkt kesme ve üç eksenli testleri yapmışlardır. Örnekler kuru ağırlıkça %3 ve %6 oranında kireç eklenmesi sonucunda makaslama dayanımında ve sıkışma dayanımında önemli bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, kireç katkısıyla birlikte örneklerde yenilme gerilmesinin azaldığını, yenilme dayanımının ise arttığını ifade etmişlerdir. Katkısız zeminlerle karşılaştırıldığında katkılı örneklerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin kireç ve kil mineralleri arasındaki puzolonik reaksiyonlar nedeniyle arttığını ifade etmişlerdir. Çalışmacılar, kireç katkısıyla killerin ön konsolidasyon basıncının, konsolidasyon katsayısının ve sıkışma indeksinin artış gösterdiğini, şişme indeksinin ise azaldığını belirlemişlerdir.

Çimen ve Dereli (2014), Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Mikronize Kolemanitin Etkisi isimli çalışmada Na-Bentonit kiline ağırlıkça %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında kolemanit minerali ilave etmişler ve katkının eklenmesinden sonra en yüksek serbest basınç dayanımının %2 kolemanit eklenen örneklerde ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Doru (2014), çalışmasında Harran Yöresi killi zemininin stabilizasyonunu sağlamak amacı ile Portland Çimentosu ve ASTM değerlendirme normuna göre F tipi uçucu kül kullanarak, hazırladığı örneklerin 28 günlük kür süresi içinde zeminin jeoteknik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneyler %10 uçucu kül içeren karışımlarda kılcal su geçirgenliği, serbest basınç dayanımını ve çekme dayanımı pozitif yönde artırmıştır. Bu sonuçlara göre F tipi uçucu külün killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir.

Goodarzi vd. (2015), smektit kiline farklı oranlarda (%2-%30) kireç, silis dumanı ve silis dumanı-kireç katkıları ekleyerek kıvam limitleri, şişme, serbest basınç dayanımı, geçirgenlik, elektriksel iletkenlik ve pH değerlerindeki değişimleri incelemiştir. Araştırmacılar, killerin mühendislik özelliklerinin kireç katkısıyla önemli bir şekilde iyileştirilebileceğini ancak belirleyen kireç katkısıyla oluşan topraklanma ile zeminin permeabilitesinin arttığını ve dayanımında az oranda arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, silis dumanı katkısının kür süresinden bağımsız olarak şişme basıncında ve dayanımında önemli bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Kireç-silis dumanı katkılı örnekler ile kireç katkılı örnekler karşılaştırıldığında, kireç-silis dumanı katkısının daha kısa kür süresinde ve daha az kireç eklenmesinin smektitin mühendislik parametreleri iyileştirdiğini, zeminin permeabilitesinin önemli ölçüde azaldığını ve silis dumanı ve kireç karışımının ekonomik, teknik ve çevresel açıdan zemin stabilizasyonu verimliliğini artırmak için bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Kılıç vd. (2015), çalışmalarında jips, kireç ve jips-kireç karışımlarının killi zeminlerin mühendislik üzerine etkisini inceleyebilmek amacı ile zemine %3, %6, %9, %12 ve %15

oranlarında katkı ekleyerek hazırladıkları örneklerde şişme yüzdesi, şişme basıncı ve tek eksenli sıkışma dayanımını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, en iyi iyileşmeyi %6 kireç katkısının sağladığı belirten araştırmacılar, 90 günlük kür süresi sonucunda şişme basıncı ve şişme yüzdesinde azalma, tek eksenli sıkışma dayanımında ise artış gözlemlemişlerdir. Zemine kireç ve jips eklenmesinin sadece jips katkısı eklenmesinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Al-Swaidani vd. (2016), kireçle stabilize edilmiş killi zeminlerin jeoteknik özelliklerine doğal puzolanların etkisi konulu araştırmalarında zeminin LL değerini %58.8, PL değerini %30, PI değerini %28.8, Gs değerini ise 2.68 olarak belirlemişlerdir. Araştırmada, doğal puzolan oranının artmasıyla beraber zeminin plastisite indisinin azaldığını ve PL değerindeki bu azalmanın dayanımın artması, şişme ve sıkışabilirliğin ise azalması ile ilişkilendirilebileceğini ve bu sonuçların bir iyileşme işareti olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmacılar, tek başına doğal puzolan ve %4 kireç kullanımının, incelenen killi zemini CH sınıfından MH sınıfı zemine dönüştürdüğünü fakat, kireçle stabilize edilmiş killi zemine doğal puzolan eklenmesinin, incelenen zemini ML sınıfı zemine taşıdığını gözlemlemişlerdir. Çalışmada, kireçle stabilize edilmiş killi zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığının doğal puzolanın eklenmesiyle önemli ölçüde azaldığı, %8 oranında kireç içeriğinde elde edilen kuru birim hacim ağırlığındaki kayda değer düşüşün, %20 doğal puzolanın eklenmesiyle telafi edilebildiği belirtmişlerdir. Aynı zamanda, %8 kireçle stabilize edilmiş killi zeminin %8 doğal puzolanın eklenmesiyle de optimum su içeriği azalmıştır. Kireç katkılı zemine doğal puzolan eklenmesi taşıma kapasitesi üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. Araştırmacılar, doğal puzolan kullanılmasının diğer uygulamalarla kıyaslandığında CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltılması sebebiyle çok daha ekonomik ve çevreci bir uygulama olarak kabul edilebileceğini belirtilmiştir.

Cheshomi vd. (2017), kireç ve uçucu külün yüksek plastisiteli zeminlerdeki şişme miktarındaki rolünü belirlemek için çalışmalarda bulunmuşlardır. Mevcut çalışma sülfat taşıyan kile %3, %5 ve ağırlıkça %7 kireç eklenmiştir ve kireç ile sülfat taşıyan kil arasındaki kimyasal reaksiyonların kireç içeriği arttıkça bir takım değişimlere sebebiyet vermiştir. Bu kimyasal olay kilin şişme yüzdesini, basıncını ve kilin plastik özelliklerinde artırıcı sonuçlara neden olmuştur. Kirecin sülfat taşıyan killerin şişme özelliklerini geliştiremediği gözlemlenmiştir. Daha sonra, kile %3, %5 ve ağırlıkça %7 uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu külün şişmeyi azalttığı ve kilin esneklik indeksini azalttığı gözlenmiştir. Optimum %3 (ağırlıkça) uçucu kül içeriği, sülfat taşıyan kilin şişme özelliklerini geliştirmiştir. Daha sonra %5 kireç stabilize sülfat taşıyan kile uçucu kül ilave edilmiştir. Sonuçlar uçucu külün kirecin olumsuz etkilerini ortadan kaldırdığını, şişme yüzdesini ve basıncını ve kireç stabilize sülfat taşıyan kilin plastisite indeksini azalttığını göstermiştir.

Hastuty vd. (2017), Sinabung volkanik külünün ve şeker kamışı külünün kile eklenmesi ile elde edilen örneklere 14 günlük kürlenme yaptıkları çalışmalarında, en büyük serbest basınç dayanımı değerini %4 volkanik kül+%10 karışımından elde etmişlerdir.

Bahadori vd. (2019), doğal puzolanların çeşitli zemin iyileştirmesinde yeterli literatür araştırması olmadığını düşünerek marn toprağının stabilizasyonu için doğal puzolanların kullanılması üzerine deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmada Qizkorpi, Mamaloo ve Urmia kenti yakınlarındaki Chichest dahil olmak üzere üç tür doğal puzolan (volkanik kül) kullanmışlardır. Bu amaçla, X-ışını floresans spektromeresi (XRF) analizi ve sınıflandırması kullanılarak marn toprağının özellikleri belirlenmiştir. Araştırmacılar, %5, %10 ve %15'lik üç tip volkanik kül içeriğinin maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriği, Atterberg limitleri, serbest basınç dayanımı ve esneklik modülü özelliklerindeki etkisini incelemişlerdir. Üç tip volkanik külle stabilize edilen zemin karışımlarında, volkanik kül ve kür süresindeki artışa bağlı olarak örneklerde sünekliğinin azaldığı, volkanik külün stabilize malzeme olarak evlerin inşasında ve yol altyapılarında kullanılabileceği belirlenmiştir.

Çimen ve Coşan (2019), volkanik tuf ve amorf silikanın yüksek plastisiteli killer üzerinde etkilerini incelemek için bir takım çalışmalarda bulunmuştur. Kile %5 oranında kireç ilave ederek volkanik tuf ve amorf silika katkılı deneyleri tekrarlayarak örneklerin mühendislik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Sonuç olarak, kireç ve amorf silis katkılı örneklerin, kireç ve volkanik tuf katkılı örneklere göre serbest basınç dayanımlarının arttığı, şişme basıncının düşmesinde ise volkanik tufün daha etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Aslan Topçuoğlu ve Gürocak (2019), stabilizasyondan sonra bentonitin mühendislik ve dokusal özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelendiği çalışmalarında, bentonitin likit ve plastik limit değerlerinin önemli ölçüde azaldığını, likit limit değerinin en fazla azaldığı örneklerde gerçekleştirdikleri SEM analizlerinde bu örneklerde ciddi bir topaklanmanın geliştiğini, dane boyutu ve daneler arası boşluklarda artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Aslan Topçuoğlu (2020), sönmüş kireç, uçucu kül, silis dumanı ile asidik ve bazik karakterli tüflerin bentonit kilinin mühendislik özellikleri üzerine etkisini araştırdığı doktora çalışmasında,

kür uygulamasının dayanımı ve dayanım parametrelerini artırdığını, stabilizasyon sonrasında katkılı örneklerde Plastisite İndisi (PI)'deki azalmanın %60'tan fazla olması durumunda kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısının ( $\phi$ ) ve dolayısıyla serbest basınç dayanımının ( $q_u$ ) önemli oranda arttığı;  $q_u$  değerlerinin artması için hem c hem de  $\phi$  değerlerinde artış olması gerektiğini belirlemiştir.

Yukarıda kısaca özetlenen çalışmalar incelendiğinde, killerin stabilizasyonu konusuna yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmında stabilizasyon sonrasında killi zeminlerin plastisitesi ve dayanımında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Killi zeminlerin konsolidasyon ve şişme potansiyelindeki değişimlerin incelendiği çalışmalar ise oldukça sınırlıdır. Bu çalışma ile literatürdeki bu eksikliğin biraz olsun giderilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak asidik ve bazik karakterli tuf gibi doğal katkı malzemeleri seçilmiş ve bu katkı malzemelerinin ve kür

uygulamasının yüksek plastisiteli bentonit kilinin konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ ), şişme basıncı ve şişme yüzdesine olan etkileri incelenmiştir.



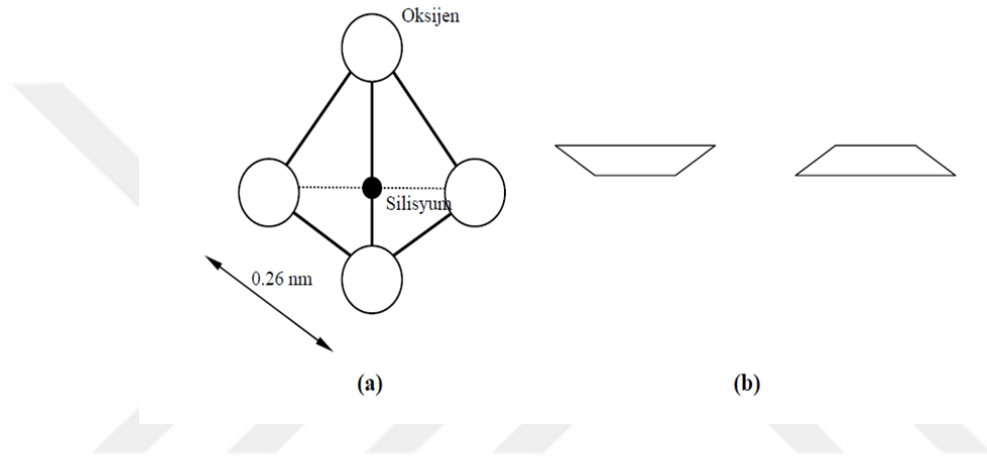
### 3. KİL MİNERALLERİ

Birçok sektörün başlıca hammaddesi olan kil mineralleri (tabakalı silikatlar), diğer silikat minerallerinin kimyasal ayrışmasının sonucunda doğal olarak ortaya çıkabilen bir fillosilikat sınıfıdır (Bignon, 1990; Bergaya ve Lagaly, 2006; Choy vd., 2007; Floody vd., 2009; Ismadji vd., 2015). Bu mineraller, alüminyum (Al), magnezyum (Mg), demir (Fe) içeren oktahedra levhalar ile bağlanmış polimerik silikatetrahedra ( $\text{SiO}_4$ ) tabakalarından oluşan katmanlı yapıları karakteristiktirler ve fillilosilikat veya tabakalı silikat ailesini oluştururlar. Doğal olarak bol miktarda ve oldukça reaktif jeomalzemeler olarak kil mineralleri, tarih öncesi çağlardan beri çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Endüstri, inşaat ve kozmetik sanayinde katkı maddesi olarak kullanıldığı gibi, sağlık sektöründe çeşitli hastalıkların tedavi edilmesinde de kullanılmaktadır (Gomes ve Silva, 2007; Slamova vd., 2011). Ayrıca, seramik, tuğla ve ilaç gibi birçok sektörün ana hammaddesi olarak da kullanılmaktadır (Choy vd., 2007; Gomes ve Silva, 2007; Newman ve Cragg, 2007; Floody vd., 2009). Günümüzde, kil mineralleri, emülsiyon stabilizatörleri, deterjanlar, seramikler, tıbbi malzeme, ağartma, gıda katkı maddeleri vb. çeşitli endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır ve son yıllarda nanoteknolojideki ilerlemeler ile büyük ölçüde motive olan insanoğlunun kil minerallerine ilgisi de artmıştır. Kimyasal olarak homojenlik ve doğal katmanlı silikatların coğrafi dağılımındaki farklılık nedeniyle, artan talebi karşılamak için çeşitli doğal olmayan alternatifler geliştirilmiştir. Buna ek olarak, kil mineralleri birçok yenilikçi uygulamada organik olarak modifiye edilmiş ve kil mineral ailesine daha fazla çeşit eklenmiştir (Zhu ve Njuguna, 2014).

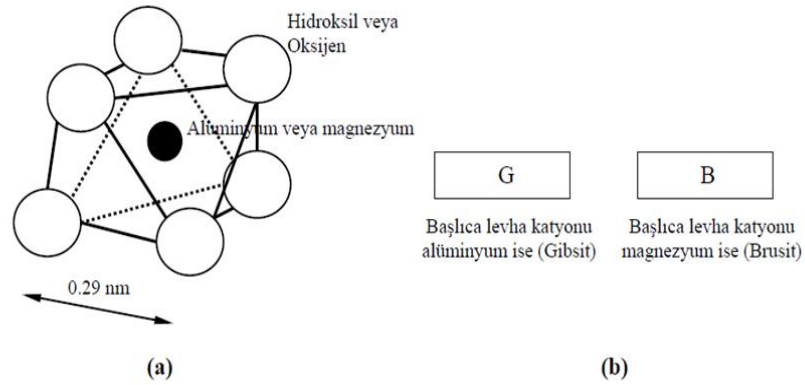
Kil mineralleri, fillosilikat mineral ailesinin daha büyük bir bölümünü oluşturan çeşitli sulu bir tabaka alümin silikat grubudur. Bunlar yerbilimciler tarafından dane büyüklüğü 2 mm olan sulu tabaka alümin silikatlar olarak tanımlanırken, mühendisler kili 4 mm'den küçük herhangi bir mineral parçacığı olarak tanımlarlar. Küçük boyutları ve yüzey alanının hacme oranı kil minerallerine bir dizi benzersiz özellik kazandırır. Bu özellikler yüksek katyon değişim kapasiteleri, katalitik özellikler ve nemliyen plastik davranışlarıdır. Kil mineralleri ince daneli çökeltilerin ve kayaların (şeyller, kil taşları, killi silt taşı, killi oozlar ve argillitler) ana bileşenidir. Toprak, göl, nehir ağzı, delta ve Dünya yüzeyinin çoğunu kaplayan okyanus sedimanlarının önemli bir bileşenidir. Ayrıca, Dünya'nın kara yüzeyinin yaklaşık %75'ini kaplayan neredeyse tüm tortul kayalarda bulunurlar. Toprakta veya ayrışma sonucu oluşan killer esas olarak iklimi, drenajı ve kaya tipini yansıtır (Huggett, 2015).

Kil minerallerinin davranışlarını ve dikkat çekici özelliklerini anlamanın yolu, tetrahedral ve oktahedral tabakaların nasıl birleştiğini ve birleşme yollarını nasıl yapılandırdıklarını anlamaktır. Kil mineralleri silikat tetrahedra tabakalarından ( $\text{SiO}_4$ ) ve oktahedra (Al, Mg ve Fe içeren) oluşan katmanlı maddelerdir. Doğal kil minerallerinde bir veya birkaç tabakadan oluşan katmanlı yapısal

birimlerin 30 nm ila birkaç mikron arasında değişen yanal boyutlarda uzunluk/kalınlık oranı 1000'den fazladır. Doğada bulunan her kil minareli iki, üç ya da dört tabakadan oluşmaktadır. İki tabakaya sahip kil mineralleri bir silis tabakası (tetrahedral-dört yüzlü) ve bir oktahedral (sekiz yüzlü) tabakadan oluşmuştur. Şekil 3.1'de tetrahedral bir silis tabakasının üç boyutlu modellemesi, Şekil 3.2'de ise oktahedral tabakanın 3 boyutlu modellemesi ve sadeleştirilmiş çizimi verilmiştir. Üç tabakalı mineraller ise, iki silis tabakası arasında sıkışmış dioktahedral ya da trioktahedral tabakadan oluşmuştur. Dört tabakalı kil mineralleri ise 2:1 tabaka+bir tabaka arası hidroksit tabakasından meydana gelir (Mitchell, 1993).



**Şekil 3.1.** (a) Tetrahedral silis levhasının üç boyutlu modellemesi, (b) Silis levhasının sadeleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001)



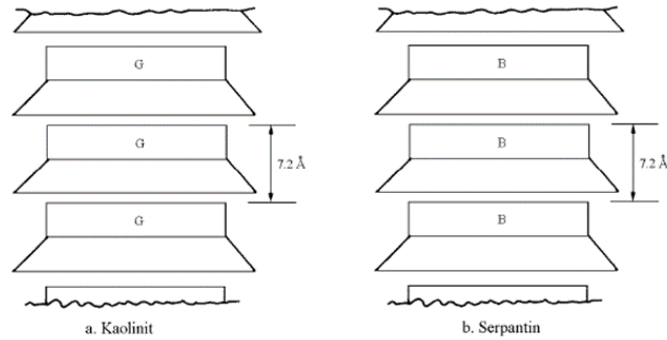
**Şekil 3.2.** (a) Oktahedral levhanın üç boyutlu modellemesi, (b) Oktahedral levhanın sadeleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001)

Konta (1995), kil minerallerini temel yapısal değişim ve birbirleri arasındaki yer değişimleri dikkate alarak yedi gruba ayırmıştır (Tablo 3.1).

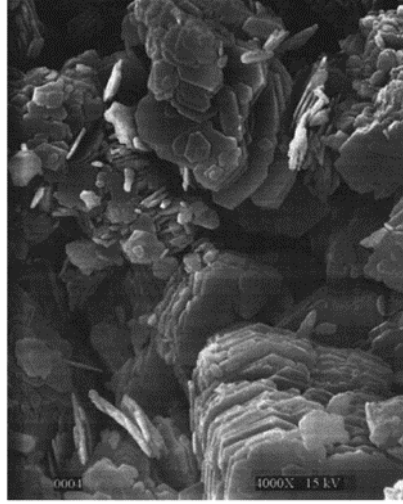
**Tablo 3.1.** Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta, 1995)

| Grup İsmi    | Mineraloji               | İdeal Formülü  |
|--------------|--------------------------|--|
| Kaolinit     | Kaololinit               | $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$                                     |
| Serpantinit  | Halloysit                | $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$                                     |
| Mika         | İllit                    | $K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_4nH_2O$              |
| Vermikülit   | Trioktahedral vermikülit | $(Mg,Fe^{2+})[Si_{>Al_8}O_{20}](OH)_4nH_2O$                  |
| Simektit     | Montmorillonit           | $M^{+x+y}(Al,Fe^{2+})_{4-y}[(Si_{8x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$ |
|              | Beidellit                | $M_xAl_4[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$                   |
|              | Notronit                 | $(M^{+x}Fe^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$     |
|              | Saponit                  | $(M^{+x}Mg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$              |
| Profillit    | Profillit                | $Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$                                     |
| Talk         | Talk                     | $Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$                                     |
| Klorit       | Donbassit                | $Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$                        |
| Paligorskit, | Paligorskit              | $Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_4H_2O$                         |
| Sepiyolit    | Sepiyolit                | $Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$                     |

Kaolinit mineralleri, 1:1 silika alümina minerali olarak tanımlanır. Temel olarak bir tetrahedral (silika) ve bir oktahedral (alümina ya da gibsit) tabakasının yinelenen katlarından meydana gelir. Bir katmanın iki tabakanın birer tanesinden meydana gelmiş olmasından dolayı kaolinit 1:1 kil minerali şeklinde ifade edilir. Bir katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 0.72 nm olup uzanımı diğer iki yönde devam etmektedir. Kaolinit için yapısal formül  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ 'dir ve teorik kimyasal bileşimi  $SiO_2$ , % 46.54;  $Al_2O_3$ , % 39.50 ve  $H_2O$ , % 13.96'dır. Oktahedral pozisyonların sadece üçte ikisi bir alüminyum atomu ile doldurulur. Alüminyum atomları dört oksijen ve sekiz hidroksil ile çevrilidir. Kaolinit yapısındaki yükler dengelidir. Kaolinit yapısının şematik diyagramı ve atomik yapısı Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir. Birbirini takip eden temel katmanlar oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral tabakanın oksijenleri arasındaki hidrojen bağı ile bir arada bağlanırlar. Hidrojen bağının dayanımı çok güçlü olduğundan hidrasyonu önler ve katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal oluşturmasını sağlar. Standart bir kaolin mineralinde 70 ile 100 arasında katman mevcuttur (Holtz ve Kovacs, 1981).

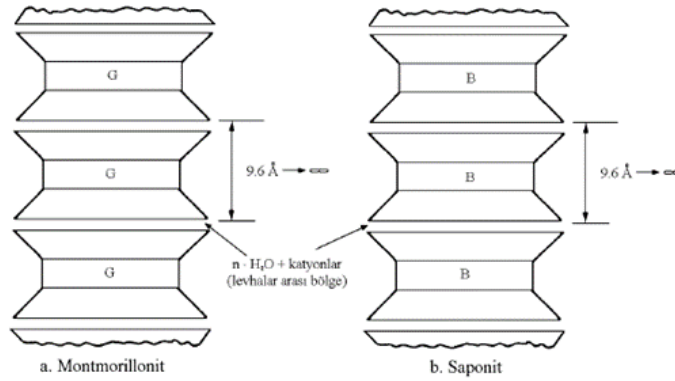


**Şekil 3.3.** Kaolinit-Serpantin grubu minerallerin yapısı (Mitchell, 1993)



**Şekil 3.4.** Kaolinit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (Murray, 2006)

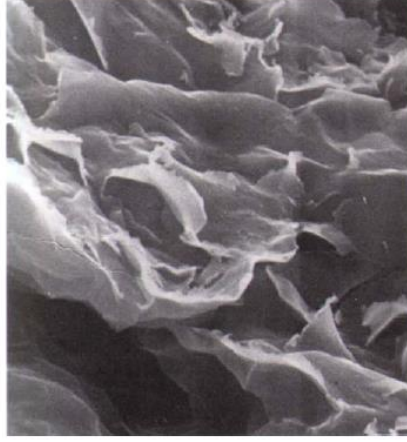
Smektit mineralleri, merkezi oktahedral tabakaya sahip iki silika tetrahedral tabakadan oluşur ve 2:1 tabakalı bir mineral olarak adlandırılır. Su molekülleri ve kationlar 2:1 tabakalar arasındaki boşluğu doldurur (Şekil 3.5). Teorik formül  $(OH)_4Si_8Al_4O_2ONH_2O$  (ara katman)'dır ve katmanlar arası malzeme olmadan teorik bileşimi %66.7  $SiO_2$ , % 28.3  $Al_2O_3$  ve %5  $H_2O$ 'dir. Bununla birlikte, simektitlerde, oktahedral tabakada ve bazıları tetrahedral tabakada önemli miktarda bir yer değiştirme söz konusudur. Tetrahedral tabakada % 15'e kadar silikon yerine alüminyumun ve oktahedral tabakada alüminyum yerine magnezyum ve demir yer değişimi vardır (Grim, 1968).



**Şekil 3.5.**Smektit minerallerin yapısı (Mitchell, 1993)

En yaygın simektit minerali kalsiyum montmorillonittir. Tabaka yükü eksikliği ara katman kationu kalsiyum ve su ile dengelenir. Levhalar arasındaki bağlar kuvvetli olmamakla beraber su ya da herhangi bir sıvı etkileşiminde kolaylıkla kopabilir. Bunun sonucunda bu gruptaki kil minerallerinde büyük miktarda hacim artışları oluşur (Murray, 2006). Smektit mineral parçacıkları

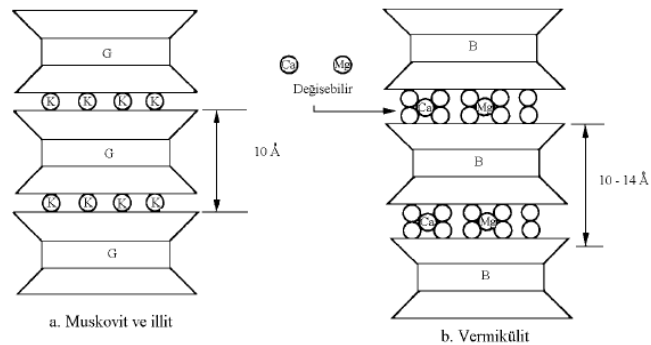
çok küçüktür ve bu nedenle X ışını kırınım verilerinin analizi bazen zordur. Sodyum montmorillonitin tipik bir elektron mikrofrafisi Şekil 3.6’da verilmiştir.



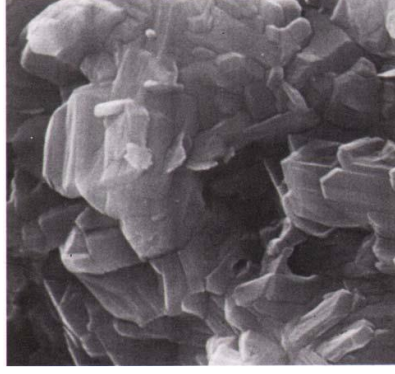
Şekil 3.6. Montmorillonit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5 µm) (Mitchell, 1993)

Montmorillonit killeri özgül spesifik yüzeyi diğer tüm kil minerallerinden fazla olması nedeni ile yüksek su çekim gücüne ve yüksek plastisiteye sahip bir kil çeşididir. Sahip olduğu bu karakteristik özelliğe bağlı olarak montmorillonit kili içeren zeminler şişmeye karşı son derece hassasiyet göstererek oluşan şişme basıncı ile mühendislik yapılarına ciddi anlamda zarar verebilmektedir (Mitchell, 1993; Angın ve Angın, 2005).

İllit grubu kil minerallerindeki tabakaların arasındaki bağları potasyum oluşturur ve bu bağlar polar sıvıların ortamda aktif olmasını, bazal aralığın durağan olmasını sağlayacak kadar yüksek bir dayanıma sahiptir. İllitler ve mikalar bu gruptaki tipik minerallerdir. Şeyllerin ana bileşeni olan illitler, ılıman iklimin ayrışma ürünüdür. Yüksek pH koşulu altında muskovit ve feldspatın ayrışmasıyla ortaya çıkarlar (Varma ve Panda, 2010). Şekil 3.7’de İllit grubuna ait bir mikanın temel yapısı, Şekil 3.8’de ise İllitlerin tipik bir elektron mikrofrafisi görülmektedir.

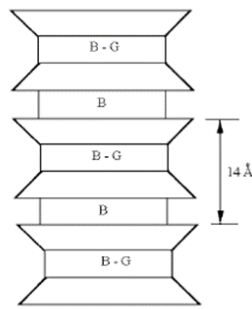


Şekil 3.7. Bir mika mineralinin yapısı (Mitchell, 1993)

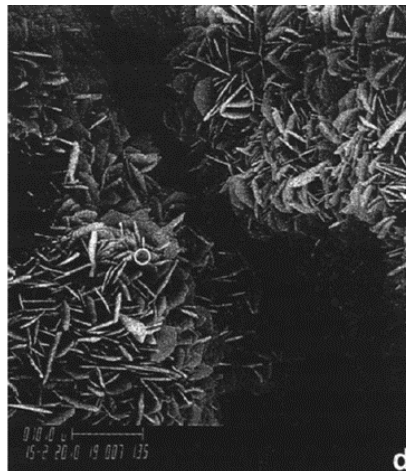


Şekil 3.8. İllit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5  $\mu\text{m}$ ) (Mitchell, 1993)

Klorit grubu kil minerallerinde ise yapısı farklılaşmış mika benzeri ya da brusit benzeri levhalarından meydana gelmektedir (Şekil 3.9). Mika levhaları arasındaki bağlar oktahedral tabakalarının çift su levhasının yerine geçmesi ile oluşur aynı zamanda vermikülitlerin yapısı ile benzer özellik gösterir (Mitchell, 1993). Şekil 3.10'da Klorit grubu killerin tipik bir elektron mikrofrafisi görülmektedir.



Şekil 3.9. İllitin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5  $\mu\text{m}$ ) (Mitchell, 1993)



Şekil 3.10. Klorit mineralinin taramalı elektron mikrofrafisi (7.5  $\mu\text{m}$ ) (Mitchell, 1993)

### 3.1. Kil Minerallerinin Fiziksel Özellikleri

Kil minerallerinin fiziksel özelliklerinden en önemlisi spesifik yüzey alanı özelliğidir. Spesifik yüzey alanı, birim ağırlıktaki zeminin yüzey alanı olup  $m^2/gr$  türünden ifade edilmektedir ve danelerde yüzeysel kuvvetlerin etkili olabilmesi için sınır spesifik yüzey alanının en az 1.00  $m^2/gr$  olması gerekmektedir. İnce daneli zeminlerin, spesifik yüzey alanı genişledikçe, elektriksel ve kapiler dayanım artarak zeminlerin jeoteknik davranışlarında hassasiyet oluşturmaktadır (Santamarina vd., 2002). Kil mineralinin fiziksel ve kimyasal yapısı, dane boyu ve dağılımı gibi özelliklerine bağlı olarak spesifik yüzey alanı değişmektedir. Dane boyutu ile spesifik yüzey alanı ters orantılıdır. Örnek olarak şişme kapasitesi en yüksek kil grubu olan montmorillonitlerin spesifik yüzey alanı 850  $m^2/gr$ 'a kadar yükselebilmektedir. Şişme özelliğine sahip olmayan kaolinit grubu killerin spesifik yüzey alanı ise 10-40  $m^2/gr$  aralığındadır. Tablo 3.2 de kil minerallerinin spesifik yüzey alanları verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Başlıca kil minerallerinin spesifik yüzey alanları (Mitchell, 1993)

| Kil Minerali              | Mineral Yapısı | Dış Spesifik Yüzey Alanı ( $m^2/gr$ ) | İç Spesifik Yüzey Alanı ( $m^2/gr$ ) |
|---------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Halloysit                 | 1:1            | 10-20                                 | -                                    |
| Kaolinit                  | 1:1            | 35-70                                 | -                                    |
| Simektit (Montmorillonit) | 2:1            | 50-120                                | 700-850                              |
| İllit                     | 2:1            | 65-100                                | -                                    |
| Vermikülit                | 2:1            | 40-80                                 | 800-900                              |
| Klorit                    | 2:1            | 10-40                                 | -                                    |

Kil minerallerinin dane boyutu veya dağılımı, mineral tanımlama (genellikle boyut ayrımı gerektiren durumlarda) ve zemin mekaniği çalışmalarında zemini sınıflandırmak için, birçok çevresel ve endüstriyel uygulama da, su kalitesi izleme, çevresel sorunları azaltma gibi çalışmalarda önemli olan fiziksel bir özelliktir (Moore ve Reynolds, 1997). Ayrıca, parçacık boyutu toprağın hidrolik iletkenliğini ve nem tutma kapasitesini etkilemektedir (Daoud ve Robert, 1992). Tablo 3.3'de dünya çapında en yaygın bulunan kil minerallerinin kalınlık, dane çapı ve spesifik yüzey alanı arasındaki ilişkiyi gösteren değerler bu açıdan önem taşımaktadır. Nitekim, tablodaki değerler incelendiğinde dane çapının artmasıyla spesifik yüzey alanı azalmaktadır.

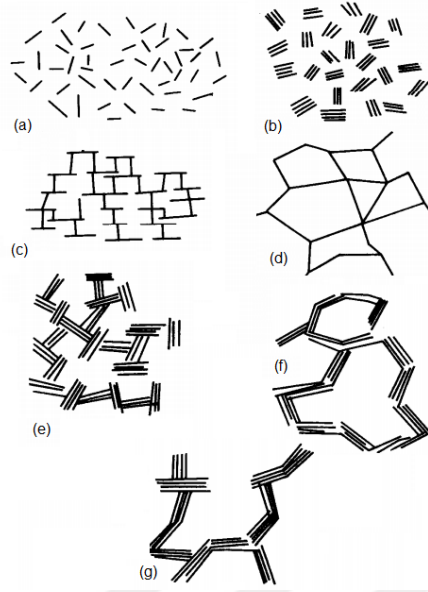
**Tablo 3.3.** Başlıca kil minerallerinin dane çapı, kalınlığı ve spesifik yüzey alanları (Yong ve Warkentin, 1975)

| Kil Minerali   | Dane Kalınlığı (nm) | Dane Çapı (nm) | Spesifik Yüzey Alanı (km <sup>2</sup> /kg) |
|----------------|---------------------|----------------|--|
| Montmorillonit | 3                   | 100-1000       | 0.8  |
| İllit          | 30                  | 10000          | 0.08                                       |
| Klorit         | 30                  | 10000          | 0.08                                       |
| Kaolinit       | 50-2000             | 300-4000       | 0.015                                      |

Kil minerallerinin dokusu diğer önemli bir fiziksel özelliktir ve danelerin düzeni, daneler arası boşluklar ve danelerin bir araya gelmesi ile oluşur. Genel anlamda yapı ile doku birbirinin yerine geçse de, yapı daha kapsamlı bir anlam taşımaktadır. Tam anlamı ile yapı denilince zeminlerin dokusu, kimyasal oluşumu ve danelerin birbiri ile olan etkileşimleri ifade edilmektedir. Yapıyı oluşturan dokular makro ve mikro olmak üzere iki başlık altında değerlendirilmektedir. Makro doku çıplak gözle görülebilen, oturma, şişme, gözeneklerdeki hidro iletkenlik gibi analizlerde kullanılan özellikleri ifade etmek için kullanılmaktadır. Mikro boyuttaki dokular ise optik mikroskoplar ile incelenebilen oluşumlardır. Eriyik içerisindeki mikro boyuttaki kil daneleri bir araya geldikleri zaman bir itme mukavemeti, aynı zamanda Van der Waals kuvvetlerinden ötürü bir çekme kuvveti meydana gelir. Meydana gelen bu kuvvetler, mikro boyuttaki kil daneleri arasındaki açıklık daraldıkça sabit olmayan oranlarda artmaktadır. Bu daneler arasında aralık çok düşük olduğu an çekme kuvveti itme kuvvetinden yüksektir. Mikro kil danelerinin yüzeyleri eksi, uçları ise artı yüke sahiptir. Heterojen karışım içerisindeki mevcut kil partiküllerinin yerçekimi kuvveti ihmal edilebilir oranda azdır. Bu nedenle kil partikülleri eriyik içerisinde rastgele ve oldukça yavaş olarak çöker ya da sabit kalır. Van Olphen (1963), killerde doku tiplerini Şekil 3.11'de görüldüğü gibi dispersif ve 7 tipe ayırmaktadır.

Flokülasyon - bir toprağın parçacıklarının, örneğin bir çözelti temasında dağıldığı ve birbirine yapıştığı, daha büyük boyutlu kümeler, sürüler, pullar veya kümeler oluşturduğu süreçtir. Flok yüzebilir veya sıvının tabanına yerleşebilir ve ayrıca sıvıdan kolayca filtrelenebilir. Flokülasyon, topaklaşma ve pıhtılaşma ile eş anlamlıdır (Chibowski, 2011).

Dispersiyon - katı veya sıvı parçacıkların farklı bileşime sahip sürekli bir fazda (sıvı, gaz veya hatta katı) dağıldığı bir sistemdir. Topraklarda dispersiyon, yapısındaki killerden kaynaklanmaktadır. Böyle bir toprak ıslandığında, kil parçacıkları birbirinden ayrılır ve dispersiyon oluşturur, yani toprağın tek parçacıklara ayrılması meydana gelir (Chibowski, 2011).



**Şekil 3.11.** Kilerde muhtemel dane dizilim şekilleri: (a) dispers ve deflokülleşmiş, (b) kümelenmiş ve deflokülleşmiş, (c) Köşe-yüz flokülleşmiş ve dispers, (d) Köşe-köşe flokülleşmiş fakat ayrık, (e) Köşe-yüz flokülleşmiş ve kümelenmiş, (f) Köşe-köşe flokülleşmiş ve kümelenmiş, (g) Köşe-yüz ve köşe-köşe flokülleşmiş ve kümelenmiş (Van Olphen, 1963)

### 3.2. Kil Minerallerinin Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Zeminlerin içeriğinde bulunan kil mineralleri zeminlerin oturma, sıkışma, dayanım, şişme ve geçirimsizlik gibi birçok özelliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zemin içerisindeki kil oranının artması zeminin sınıfı ile birlikte yukarıda sıralanan birçok özelliğinde de değişimlere neden olmaktadır.

Zeminlerde yükleme sonucunda deformasyonlar meydana gelmektedir ve oluşan toplam deformasyon oturma olarak ifade edilmektedir. Artan yük ile beraber hareket yönü aşağı ya da yükün ortadan kalkması halinde yukarı yönde hareket oluşabilmektedir. Mühendislik projelerinde mühendisin en çok önem verdiği nokta oturma miktarı ve ne kadar sürede tamamlanacağıdır. Oturma miktarı ani ve hızlı olduğu durumlarda gerçekleşen aşırı oturmalar mühendislik yapılarına maddi ve manevi büyük hasarlara yol açabilir. Zeminlerde yüklemeye bağlı olarak gerçekleşen toplam oturma ( $S_t$ ), ani oturma (distorsiyon oturma) ( $S_i$ ), konsolidasyon oturması (zamana bağlı) ( $S_c$ ) ve ikincil oturma (zamana bağlı) ( $S_s$ ) olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Elastik olsun ya da olmasın ani oturma diğer bir ifadeyle distorsiyon oturması elastik teoriden hesaplanmaktadır. Konsolidasyon oturması ise zamana bağlı gerçekleşmekte olup, geçirimsizlik katsayısı düşük, ince daneli suya doymuş zeminlerde gerçekleşen bir durumdur. Boşluk suyunun drenaj oranı ise konsolidasyon oturmasının süresini belirlemektedir. İkincil oturmada zamana bağlı olarak gelişen diğer bileşen olup, sabit efektif gerilmede oluşur ve oluşumunda boşluk suyu basıncında değişim oluşmamaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981; Kayabalı, 2002). Zeminlerde bu oturma bileşenlerinden biri, ikisi ya da üçü birlikte gözlenebilmektedir (Fang, 1990). Tablo 3.4’de oturma bileşeninin zemin

türlerine göre etkisi verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, zeminlerde meydana gelebilecek oturma tipleri zemin sınıfı ile doğrudan ilişkilidir. İri daneli zeminlerde meydana gelen oturmalar zamandan bağımsız olan birincil oturma iken, killi zeminlerde her üç tür oturma bileşenini de görmek mümkündür.

**Tablo 3.4.** Zemin türlerine göre gözlenebilecek oturma türleri (Fang, 1990)

| <b>Zemin Türü</b> | <b>Birincil Oturma</b> | <b>Konsolidasyon Oturması</b> | <b>İkincil Oturma</b> |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Kumlu zemin       | Evet                   | Hayır                         | Hayır                 |
| Killi zemin       | Mümkün                 | Evet                          | Mümkün                |
| Organik Zeminler  | Mümkün                 | Mümkün                        | Evet                  |

Zemin içerisindeki kil oranının artmasıyla birlikte, zeminde meydana gelen oturma tipi birincil oturmadan ziyade zeminin geçirimsizliği ile ilişkili olarak zamana bağlı şekilde gelişen ve devam eden konsolidasyon oturması gerçekleşmektedir. Konsolidasyon oturması ince daneli killi zeminlerde gözlenen karakteristik oturma tipidir.

Yeryüzünde herhangi bir zemin üzerine inşa edilen baraj, tünel, bina gibi mühendislik yapıları, zeminin mevcut gerilme durumunda önemli değişimlere neden olmakta, yükün zeminde meydana getirdiği gerilme artışı ile beraber killi zeminde oturmalar gerçekleşmektedir. Ancak, bu oturmaların gerçekleşebilmesi, danelerin sıkışması ihmal edilirse, zemin danelerinin birbirlerine yaklaşması ile mümkündür. Zemin danelerinin birbirine yaklaşması yani daneler arasındaki boşlukların azalabilmesi ise daneler arasındaki bu boşluklardaki hava, su veya her ikisinin zemini terk etmesi ile mümkündür ve bu olay zeminin geçirimsizliği ile doğrudan ilişkilidir. Çok düşük geçirimsizliğe sahip killi zeminlerde gözeneklerden suyun veya havanın dışarı atılması iri daneli zeminlere kıyasla uzun süre gerektiren bir olaydır. İri daneli zeminler yüksek geçirimsizlik değerlerine sahip olduklarından, zemine etkileyen gerilmenin artmasıyla birlikte gözeneklerdeki su ve hava hemen zeminden dışarı atılmakta ve zemini daneleri birbirine yaklaşmakta ve boşluk oranı ise azalmaktadır. Böylece, zeminde zamana bağlı olmayan birincil oturmalar gerçekleşmektedir. Ancak, killi zeminlerde geçirimsizlik çok düşük olduğundan, gerilme artışı ile birlikte gözeneklerdeki su zeminden dışarı atılmamakta, önce daneler arasında boşluk suyu basıncı oluşmakta, geçirimsizlik değerine bağlı olarak suyun dışarıya atılması zamana bağlı olarak gelişmekte ve böylece boşluk suyu basıncı sönmekte ve zeminde zamana bağlı olarak gerçekleşen konsolidasyon oturması gerçekleşmektedir. Zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak konsolidasyon günler, aylar hatta yıllar boyunca sürebilmektedir ve zemin bileşenlerinin yeni pozisyonları partiküllerin rijitliğine bağlı olarak gelişmektedir (Kayabalı, 2002).

Zeminin diğer bir önemli özelliği ise zeminin içindeki boşluklar boyunca suyun zemin içinden geçebilmesi özelliği olarak tanımlanan (Scheidegger, 1974) geçirimsizliktir. Zemin

içerisindeki bu akışı boşluğun büyüklüğü, şekli ve geometrisi etkiler ve bu danelerarası boşluğun özellikleri, dane çapı, şekli ve dizilimi gibi özellikleri ile ilişkilidir. Genel olarak iri daneli (kum ve çakıl) zeminler, kil gibi ince daneli zeminlere göre daha yüksek geçirimsizlik değerlerine sahiptir (Cernica, 1995). Bu özellik bağıl birim hacim ağırlığın zeminlerin geçirimsizliğinin tahmininde kullanılmasını olanak sağlamaktadır (Juang ve Holtz, 1986). Belkhatır vd. (2014), kum-silt karışımından oluşan zeminlerde boşluk oranının geçirimsizlik üzerindeki etkisini incelemişler ve zeminin geçirimsizliğinin zemin türü, ince dane yüzdesi, dane dağılımı, boşluk oranı ve sıklığa bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ince dane oranı arttıkça minimum ve maksimum boşluk oranlarının azaldığını, ince dane oranının ve bağıl birim hacim ağırlığın artmasıyla zeminin geçirimsizliğinin de azaldığını ifade etmektedirler. Bandini ve Sathiskumar (2009), yine kum-silt karışımlarında yaptıkları çalışma sonucunda, karışımdaki ince dane oranının artmasıyla boşluk oranının azaldığını ve boşluk oranı azaldıkça da geçirimsizliğin azaldığını belirtmektedirler. Bu veriler, zemin içerisindeki kil oranının artışıyla birlikte zeminin geçirimsizliğinin de önemli ölçüde azaldığını ve kilin zeminin geçirimsizliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Murthy (2002) zemin türleri ile geçirimsizlik katsayısı (k) ve drenaj durumu arasındaki ilişkileri Tablo 3.5'deki gibi vermektedir. Tabloya göre killi zeminlerin geçirimsizlik katsayısı (k)  $10^{-9}$ 'dan daha küçük değerlerdedir ve bu tür zeminler geçirimsiz özelliktedir.

**Tablo 3.5.** Zemin türlerine göre geçirimsizlik katsayıları ve drenaj durumu (Murthy, 2002)

| Zemin Türü                        | k (m/s)                | Drenaj Durumu       |
|-----------------------------------|------------------------|---------------------|
| Temiz Çakıl                       | 1-0.1                  | İyi                 |
| Temzi Kum                         | 0.1                    | İyi                 |
| Temiz Kum ve Temiz Çakıl Karışımı | $10^{-3}$ - $10^{-6}$  | İyi                 |
| Çok İnce Kum                      | $10^{-7}$              | Zayıf               |
| Silt                              | $10^{-8}$              | Zayıf               |
| Kil                               | $10^{-9}$ - $10^{-11}$ | Pratikte geçirimsiz |

Zemin içeriğinde kilin varlığı sonucunda gerçekleşebilen diğer önemli bir özellik, zeminin bulunduğu ortamdaki su içeriği ve gerilme koşullarının değişmesi sonucunda ortaya çıkan hacim artışı olarak tanımlanan şişmedir. Şişme potansiyeli ise zeminlerin şişme yeteneğini ifade eden bir kavramdır ve zeminlerin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını kapsayan bir terim olarak kabul edilmektedir (Sridharan vd., 1986; Shuai, 1996). Şişme yüzdesi, su ile teması sonucunda hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesidir. Şişme basıncı ise kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil-su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlanmaktadır (Sridharan ve Choudhury, 2002). Su içeriğindeki artış ile şişen killi zeminler kurdukları zaman büzülme gösterirler ve hacimlerinde azalmalar meydana

gelir. Şişme ve büzülme ile meydana gelen hacimsel değişiklikler yapıların hasar görmesine neden olabilmektedir. Bir zeminde şişmenin meydana gelebilmesi zeminin içerdiği kil minerallerinin türüne, miktarına, kilin spesifik yüzeyine, zeminin yapısına, boşlukları dolduran suyun kimyasal özelliklerine ve killerin değişebilir katyon kapasitesi gibi birden fazla faktöre bağlıdır (Genç, 2008). Şişen özellikteki killi zeminler jeoteknik uygulamalarda oldukça problemlidir ve bu tip zeminlerin varlığı yapılarda ciddi hasarlara neden olabilmektedir.

Zeminlerde yenilmeye karşı koyan kuvvetleri oluşturan parametrelere zeminin kayma (kesme) dayanımı parametreleri olarak tanımlanır. Bir zeminin kayma dayanımı, zemine uygulanabilen en yüksek kayma gerilmesidir. Yenilme düzlemi boyunca yenilmeye neden olan kayma gerilmeleri o zeminin taşıyabileceği en yüksek kayma gerilmesidir, dolayısıyla da zeminin dayanımıdır. Zeminlerde dayanımı sağlayan iki parametre vardır. Bunlar daneler arası sürtünmeden kaynaklanan ve gerilmeye bağımlı olan içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), diğeri ise gerilmeden bağımsız olan kohezyon ( $c$ )'dur. Killi zeminlere özgü bir parametre olan kohezyon, killi zeminlerde daneleri çevreleyen elektriksel negatif yüke su moleküllerinin tutunması ve daneler arasında bir ara yüzey oluşturarak daneleri birbirine yapıştırması sebebiyle ortaya çıkar. Killerin kayma dayanımını ( $c_u$ ) içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve kohezyon ( $c$ ) tarafından sağlanır ve Coulomb (1776) denklemi olarak bilinen;

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Suya doymun normal konsolide killerde; drenajsız durumda  $c$  drenajsız kayma dayanımına ( $c_u$ ),  $\phi$  ise sifıra eşittir. Drenajlı durumda (efektif gerilmesi cinsinden) ise  $c=0$ 'dır. Ancak  $\phi$  değeri sifır değildir ve killi zemin içerisinde var olan kil minerallerinin türüne bağılı olarak değişiklik gösterir. Mitchell (1993), efektif içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ ) değerinin kaolinit türü killerde en büyük olduğunu, illit türü killerde orta, montmorillonit türü killerde ise en düşük değerleri aldığını ifade etmektedir. Yani, zemin içerisinde var olan kilin miktarı ve türü zemini kayma dayanımı üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir.

## 4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma, bentonit kili, asidik ve bazik tüflerin derlenmesi, derlenen örneklerin deneylere hazır hale getirilmesi, kür öncesi ve kür sonrası olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Bu aşamaların detayları alt bölümlerde sırasıyla verilmiştir.

### 4.1. Laboratuvar Çalışmalarında Kullanılan Malzemeler

#### 4.1.1. Bentonit Kili

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde Tokat-Reşadiye Bentonit ocağından derlenen katkısız bentonit kil kullanılmıştır. Bentonitin ilk kez literatüre girişi 1876 yılında sabun kili adıyla olmuştur. Bentonit ismi bulunduğu Rock Creek sahasındaki Ford Benton'dan gelmektedir.

Bentonit kili, alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda meydana gelen montmorillonit ailesine mensup bir kil mineralidir (Akbulut, 1996; Önem, 2000) ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Dane boyutu 2 µm (0.002 mm) veya daha küçüktür ve en ayırt edici özelliği su ile etkileşime geçmeleri halinde şişerek hacimlerinde büyük değişimler meydana getirmeleridir. Kurumaları halinde ise bünyesine hapsettikleri suyu geri vererek büzölmeye uğrarlar, hacimleri küçölür ve yüzeyinde çatlaklar oluşur (Akbulut, 1996). Ham bentonit yumuşaktır, ele süröldüğünde yağimsıdır ve yüzeye yapışır. Çok farklı renklerde olabilen bentonitlerin beyaz, açık sarı, yeşilimtrak sarı, pembemsi bej veya açık pembe renkli türleri vardır. Yoğunluğu 2.6 gr/cm<sup>3</sup> civarında olup, iyonlaşma kapasitesi oldukça yüksek olan bentonitin plastisitesi yüksektir ve kolloidal özelliğe sahip bir kil çeşididir (Genç, 2009). Kimyasal özelliklerine göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar;

i. Sodyum bentonit: Su ile teması halinde 5-10 kata kadar şişebilir. Sondaj, döküm ve inşaat sektöründe kullanılmaktadır.

ii. Kalsiyum bentonit: Su ile teması halinde 2-3 katı kadar şişebilir. Kedi kumu ve gıda sektöründe kullanılmaktadır.

iii. Sodyum-kalsiyum (ara tip) bentonit: Kimyasal özellikleri değiştirilerek sodyum bentonit olarak kullanılmaktadır.

Bu bentonit gruplarının ortalama ana oksit yüzdeleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

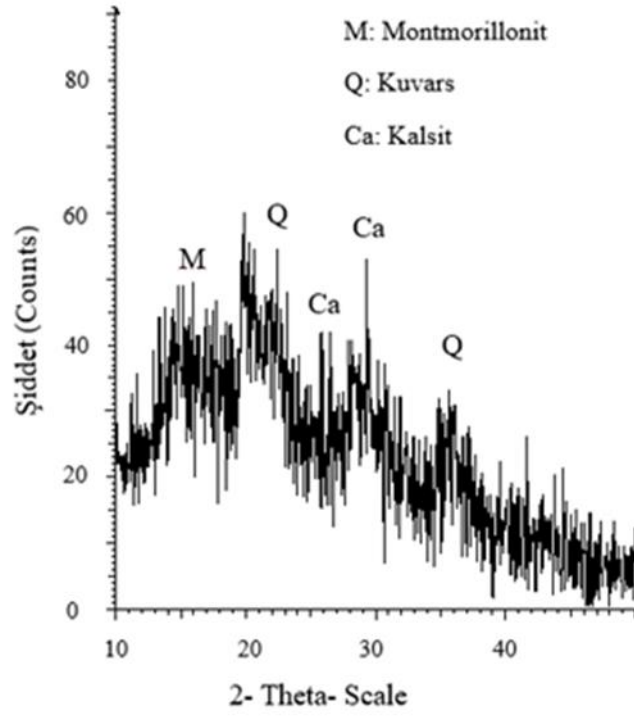
**Tablo 4.1.** Başlıca bentonit gruplarının ortalama ana oksit yüzdeleri (Avcı, 2009)

| <b>Ana Oksit (%)</b>               | <b>Na-Bentonit</b> | <b>Ca-Bentonit</b> | <b>Na-Ca Bentonit</b> |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 64.0               | 59.0               | 62.0                  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 21.0               | 19.7               | 15.9                  |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 3.5                | 5.9                | 3.0                   |
| <b>MgO</b>                         | 2.3                | 5.5                | 2.6                   |
| <b>CaO</b>                         | 0.5                | 1.7                | 4.5                   |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 2.6                | 0.2                | 2.0                   |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0.4                | 0.2                | 1.0                   |

Dünyanın önemli rezerve sahip bentonit yatakları başta A.B.D, Japonya, Yunanistan, Kıbrıs, İtalya, Almanya, İngiltere, İspanya, Bulgaristan'da olup, coğrafi konumları açısından Milos Adası (Yunanistan), Kıbrıs ve Sardunya Adası (İtalya) önemli üstünlüğe sahiptir. Dünya çapında bentonit rezervlerinin yaklaşık 1870 milyon ton olduğu düşünülmektedir (İpekoğlu ve Kurşun, 1997).

Türkiye’de mevcut bentonit yatakları, sedimanter birimler ve volkanik kökenli birimler içerisinde kütle, mercek, cep, ara seviyeler ve kırıklar boyunca düzensiz olarak bulunurlar. Türkiye’de açık işletme yöntemiyle bentonitler, aktiflendirme veya katkı malzemesinin cinsine göre Na aktif bentonit, aktif ağartma toprağı veya polimer katkılı bentonit olarak adlandırılmaktadır. Bentonit kalitesinin istenilen düzeyde olmadığı durumlarda belirli orandaki neme sahip bentonite uygun miktarda soda karıştırma işlemi olan sodyum karbonatla aktiflendirme yöntemine başvurulmaktadır. Türkiye'nin en önemli bentonit yatakları Edirne, Ankara, Eskişehir, Kütahya, Balıkesir, Çankırı, Konya, Tokat ve Ordu bölgelerinde bulunmaktadır (URL 1).

Bu çalışmada kullanılan yüksek plastisiteli kil, Tokat-Reşadiye (Türkiye) bentonit ocağından temin edilen katkısız bentonittir. Bu kil Aslan Topçuoğlu (2020) tarafından yapılan çalışmada kullanılmış ve bentonitin kimyasal ve mineralojik özellikleri belirlenmiştir. Bu nedenle, kilin kimyasal ve mineralojik özelliklerini belirlemek için yeniden analiz yapılmamış, Aslan Topçuoğlu (2020) tarafından verilen sonuçlar kullanılmıştır. Bentonit kiline ait XRD ve XRF sonuçları Şekil 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Bentonite ait XRD grafiği (Aslan Topçuoğlu, 2020)

Tablo 4.2. Bentonitin ana oksit yüzdeleri (Aslan Topçuoğlu, 2020)

| Ana Oksitler (%) |                                |                                |                 |       |                                |                  |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|--------------------------------|------------------|
| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO             | CaO   | Na <sub>2</sub> O              | K <sub>2</sub> O |
| 62.50            | 17.60                          | 3.63                           | 2.00            | 2.86  | 2.58                           | 0.92             |
| MnO              | TiO <sub>2</sub>               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | SO <sub>3</sub> | Sr    | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ateş Kaybı       |
| 0.10             | 0.32                           | 0.14                           | 0.076           | 0.073 | <0.01                          | 6.60             |

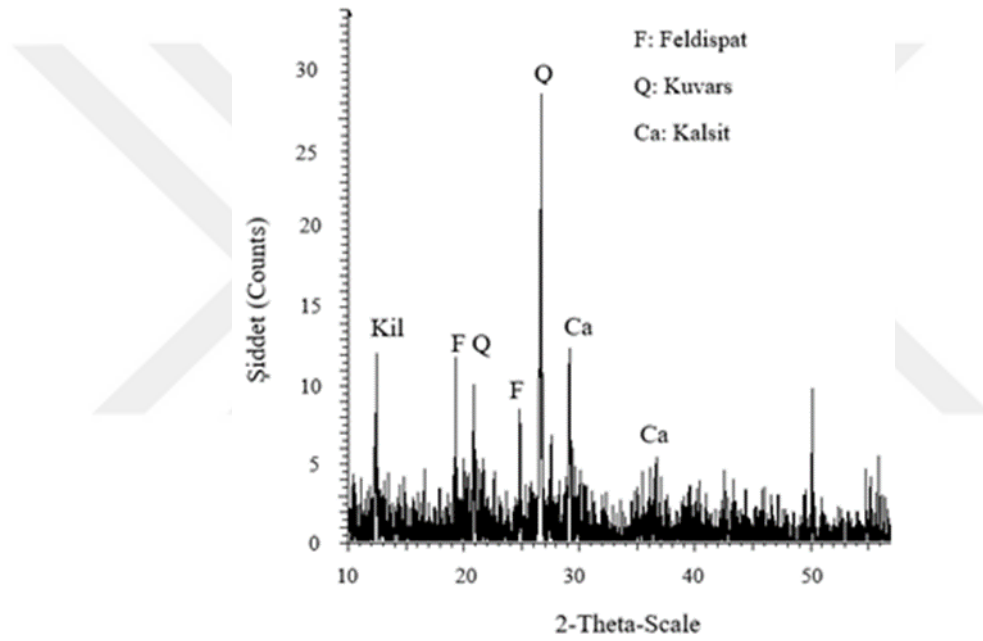
XRD analizine göre bu çalışmada kullanılan bentonit kili montmorillonit, kuvars ve kalsit minerallerinden oluşmaktadır. Bentonit XRF analizi sonuçlarına göre sınıflandırıldığında, Na-Bentonit sınıfında olduğu görülmektedir.

#### 4.1.2. Asidik ve Bazik Tüfler

Bu çalışmada kullanılan tüflerden asidik karakterli olanı, Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan, bazik karakterli tüfler ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'ndan derlenmiştir. Arazi çalışması ile derlenen tüf blokları laboratuvara getirilerek öğütülmüş ve 200 nolu elekten elenerek deneylerde kullanılmaya uygun hale getirilmiştir.

Kızılkaya Formasyonu ilk kez Güven (1993) tarafından tanımlanmıştır. Formasyon, riyodasit/ dasit lav ve piroklastiklerden oluşan formasyonun lavları otobreşik ve akıntı yapılı olmak üzere iki farklı formdadır ve üst seviyelerinde piroklastlar yüzelemektedir. Ağan vd. (2017), formasyonun görünen kalınlığının 100-500 m arasında değiştiğini belirtmektedir. Farklı araştırmacılar (Gedikoğlu, 1978; Gülibrahimoğlu, 1985; Yalçınalp, 1992; Korkmaz, 1993) tarafından yapılan çalışmalarda formasyonun yaşı Geç Kretase olarak verilmektedir.

Kızılkaya Formasyonu'na ait tüflere ait XRD sonuçlarına göre (Şekil 4.2), tüflerin kuvars, kalsit, feldspat ve ikincil kil minerallerinden oluştuğu görülmektedir. XRF analizi sonuçlarına göre tüflerin SiO<sub>2</sub> miktarı %63'den fazladır ve tuf asidik karakterlidir (Aslan Topçuoğlu, 2020).



Şekil 4.2. Kızılkaya Formasyonu'na ait tüflerin XRD grafiği (Aslan Topçuoğlu, 2020)

Tablo 4.3'de verilen analiz sonuçları ASTM C-618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012) standartlarında verilen sınır değerler (Tablo 4.4) ile karşılaştırıldığında, bu tüflerin puzolan özelliğinde olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.3.** Kızılkaya Formasyonu'na ait tüflerin ana oksit yüzdeleri (Aslan Topçuoğlu, 2020)

| Ana Oksitler (%) |                                |                                |                 |       |                                |                  |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|--------------------------------|------------------|
| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO             | CaO   | Na <sub>2</sub> O              | K <sub>2</sub> O |
| 69.10            | 20.70                          | 0.47                           | 0.19            | 0.76  | 0.39                           | 0.43             |
| MnO              | TiO <sub>2</sub>               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | SO <sub>3</sub> | Sr    | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ateş Kaybı       |
| 0.29             | <0.01                          | 0.06                           | 0.898           | <0.01 | 0.024                          | 5.50             |

**Tablo 4.4.** ASTM C 618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012)'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları

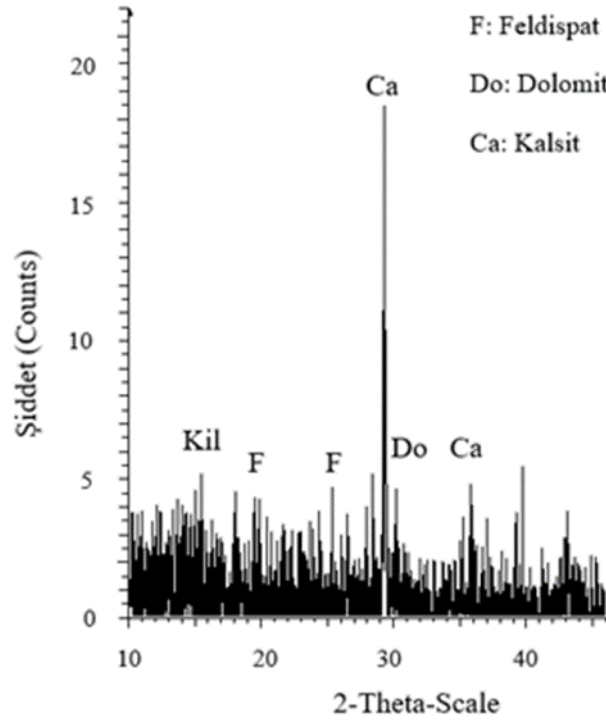
|  | ASTM C 618 (2012) |         | TS EN 197-1 (2012) | Asidik Tüf | Bazik Tüf |
|--|-------------------|---------|--------------------|------------|-----------|
|  | F                 | C       |                    |            |           |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | ≥ 70.00           | ≥ 50.00 | ≥ 70.00            | 90.27      | 42.04     |
| MgO (%)  | ≤ 5.00            | ≤ 5.00  | ≤ 5.00             | 0.19       | 2.11      |
| SO <sub>3</sub> (%)  | ≤ 5.00            | ≤ 5.00  | ≤ 5.00             | 0.898      | 0.036     |
| Nem (%)  | ≤ 3.00            | ≤ 3.00  | ≤ 3.00             | -          | -         |
| Ateşte Kayıp (%)   | ≤ 12.00           | ≤ 6.00  | ≤ 10.00            | 5.50       | 24.80     |

Bu çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan bazik karakterli tüf, Elazığ İli Ağın ilçesi civarında yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'ndan derlenmiştir. Pliyo-Pleistosen yaşlı Karabakır Formasyonu, genel olarak bazaltik bileşimli lav akıntıları, volkanik breş ve tüflerden oluşan bir litolojiye sahiptir (Kürüm ve Tanyıldızı, 2017). Formasyonun en geniş yüzeyleme verdiği Elazığ batısı ve kuzeye doğru olan bölgelerde, bazaltik bileşimli bu kayalar alkanin özellik gösterirler (Di Giuseppe vd., 2018).

Bu çalışmada kullanılan bazik tüfler Ağın civarında gerçekleştirilen arazi çalışması ile derlenmiş, laboratuvara getirilen tüf blokları öğütülerek 200 nolu elekten elenmiş ve deneylere hazır hale getirilmiştir. Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde Aslan Topçuoğlu (2020) tarafından yapılan XRD ve XRF analizlerine ait sonuçlar Şekil 4.3 ve Tablo 4.5'te verilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre tüfler esas olarak feldspat, dolomit, kalsit ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır. XRF analizi sonuçlarına göre kimyasal olarak tüflerin SiO<sub>2</sub> miktarı %45'den azdır ve bazik karakterlidir. Ayrıca, tüflere ait ana analiz sonuçları ASTM C-618 (2012) ve TS EN 197-1 (2012) standartlarında verilen sınır değerler (Tablo 4.4) ile karşılaştırıldığında, bu tüflerin puzolan özelliğine sahip olmadığı ve TS EN 25'e (2008) göre tras olarak kullanılabilme koşullarını sağlamadığı görülmektedir.

**Tablo 4.5.** Karabakır Formasyonu'na ait tüflerin ana oksit yüzdeleri (Aslan Topçuoğlu, 2020)

| Ana Oksitler (%) |                                |                                |                 |       |                                |                  |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|--------------------------------|------------------|
| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO             | CaO   | Na <sub>2</sub> O              | K <sub>2</sub> O |
| 31.40            | 7.15                           | 3.49                           | 2.11            | 28.70 | 0.60                           | 0.87             |
| MnO              | TiO <sub>2</sub>               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | SO <sub>3</sub> | Sr    | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ateş Kaybı       |
| 0.41             | 0.03                           | 0.09                           | 0.036           | 0.02  | 0.033                          | 24.80            |



**Şekil 4.3.** Karabakır Formasyonu'na ait tüflerin XRD grafiği (Aslan Topçuoğlu, 2020)

## 4.2. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar çalışmaları; deneylerde kullanılacak olan bentonit kili, asidik tuf ve bazik tuf örneklerinin deneylere hazır hale getirilmesi ve karışımların hazırlanması, hazırlanan karışımların optimum su içeriklerinin belirlenmesi amacıyla Standard Proktor deneylerinin yapılması, optimum su içerikleri dikkate alınarak sıkıştırılan örneklerde kürden önce konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ ), şişme basıncı ve şişme yüzdesini belirlemek amacıyla konsolidasyon, şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneylerinin yapılması, 28 günlük küre tabi tutulan örneklerde bu deneylerin tekrarlanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.1. Kil ve Tüf örneklerinin Hazırlanması

Bu aşama, deneysel çalışmalarda kullanılacak olan bentonit kili ve katkı malzemelerinin deneylere hazır hale getirilmesini kapsamaktadır. Öncelikle, Ağın (Elazığ) bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'ndan derlenen bazik tüf ile Gümüşhane bölgesinde yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenen asidik tüf örnekleri öğütülmüş, daha sonra her bir tüf örneğinden yaklaşık 20 kg örnek 200 nolu elek ile elenmiştir (Şekil 4.4). Samaş Sanayi Madenleri A.Ş ait Tokat-Reşadiye Bentonit ocağından temin edilen 100 kg bentonit kili 200 nolu elekten elenmiş ve tüf örnekleri ile birlikte 105°C'de kurutulmuştur.



Şekil 4.4. Öğütülmüş asidik ve bazik tüf katkıları

Örneklerin hazırlanmasından sonra laboratuvar deneylerinde kullanılacak olan örneklerdeki katkı oranları belirlenmiş ve bu katkı oranları dikkate alınarak katkısız ve tuf katkılı kil örnekleri hazırlanmıştır. Bu çalışmada tercih edilen katkı oranlarına ait bilgiler Tablo 4.6'da verilmiştir. Asidik ve bazik tüfler bentonit kiline ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranlarında katılmış ve hazırlanan katkılı örnekler nem almaması için dikkatlice paketlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan bentonit kili için K, bazik tuf için BT ve asidik tuf içinde AT sembolleri kullanılmıştır.

**Tablo 4.6.** Laboratuvar deneylerinde kullanılan katkılı örneklere ait karışım oranları

| Örnek Grubu | Örnek No | Karışım oranı (%) |
|-------------|----------|-------------------|
| <b>A</b>    | 1        | %100 K            |
|             | 2        | %95 K + % 5AT     |
| <b>B</b>    | 3        | %90 K + % 10 AT   |
|             | 4        | %85 K + % 15 AT   |
|             | 5        | %80 K + %20 AT    |
| <b>C</b>    | 6        | %95 K + % 5 BT    |
|             | 7        | %90 K + % 10 BT   |
|             | 8        | %85 K + % 15 BT   |
|             | 9        | %80 K + %20 BT    |

K: Bentonit kili, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

#### 4.2.2. Standard Proktor Deneyi

Kompaksiyon, mekanik enerji uygulayarak zemin danelerinin birbirlerine yakınlaştırılması ve böylece daneler arası boşlukların azaltılarak zeminin daha sıkı bir forma sahip olmasını sağlayan mekanik işlem olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem sonrasında zemin, daha kararlı bir hale gelir, geçirimsizliği azalır, uygulanan dış yüklere karşı dayanımı artar ve bu özelliklerini uzun süre koruyabilirler. Danelerin birbirine göre hareket etmesi ve hareket yeteneği zeminin optimum su içeriğine ( $w_{opt}$ ) ve uygulanan kompaksiyon enerjisine bağlıdır. (Özaydın, 2000). Bu nedenle, zeminde mümkün olan en iyi sıkıştırmanın yapılabilmesi ancak zeminin  $w_{opt}$  değerinde sıkıştırılması ile mümkündür ve zeminin  $w_{opt}$  değeri ise proktor deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu deneyin amacı, belirli bir zeminin, farklı su içeriklerinde sıkışabilme özelliklerinin ve maksimum sıkışmaya karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığının ( $\gamma_{kmax}$ ) ve bu andaki su içeriğinin laboratuvarında belirlenmesidir. Deneyin temeli, çapı ve yüksekliği belli molta (silindir) konan zemin örneğine kütlesi belli bir tokmağın, belli bir mesafeden, belli sayıda düşürülmesi yoluyla belli bir enerji vermeye dayanır.

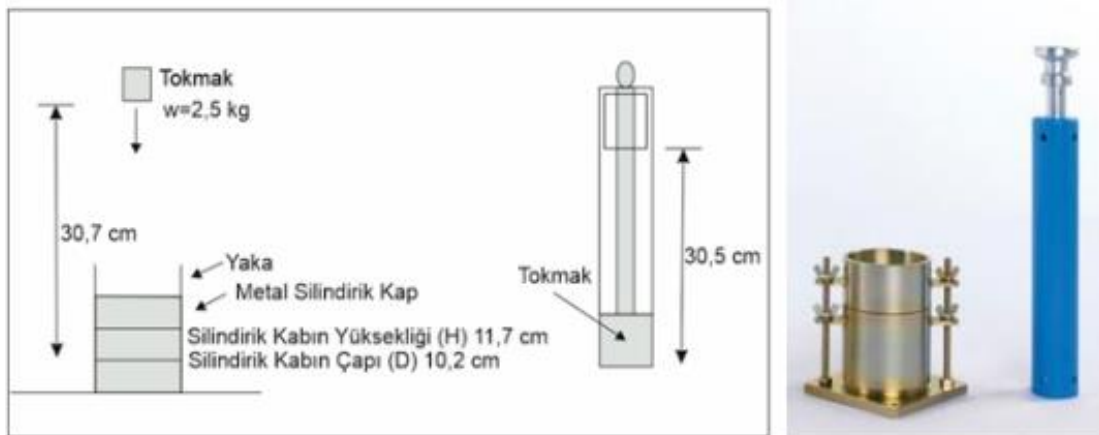
Proktor deneyi 1933 yılında R.R. Proctor tarafından yapılan çalışmalar ile geliştirilmiş ve literatüre girmiştir (Bowles, 1986). Sonraki yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar ile geliştirilmiştir

ve ASTM tarafından standartlaştırılmıştır. Günümüzde, yaygın olarak tercih edilen iki proktor deneyi vardır ve bunlar Standard Proktor deneyi ile Modifiye Proktor deneyleridir. Standart Proktor deneyi, kalıp içerisine üç tabaka halinde konulan zemin örneğinin her tabakasına 2.5 kg'lık ağırlığın 30.5 cm yükseklikten 25 kez düşürülerek sıkıştırılan zeminin maksimum kuru yoğunluk ( $\gamma_{kmax}$ ) ile optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) parametrelerinin belirlenmesi işlemidir. Modifiye Proktor deneyinde ise zemin kalıp içerisine beş tabaka halinde yerleştirilmekte ve 4.5 kg'lık yük 45.7 cm yükseklikten her bir tabaka üzerine 25 kez düşürülerek kalıp içerisindeki zemin örneği sıkıştırılmaktadır. Standart ve Modifiye Proktor deneylerine ait bilgiler Tablo 4.7'de verilmiştir.

**Tablo 4.7.** Standart ve modifiye proktor deneylerine ait bilgiler (Aytekin, 2000)

| Deney Adı                                     | Standart Proktor Deneyi | Modifiye Proktor Deneyi |
|---|-------------------------|-------------------------|
| Sıkıştırma Kabının Hacmi (cm <sup>3</sup> )   | 956                     | 956                     |
| Tokmak Kütlesi (kg)                           | 2.5                     | 4.5                     |
| Tokmağın Düşüş Yüksekliği (cm)                | 30.5                    | 45.7                    |
| Her Bir Tabakaya Düşüş Sayısı                 | 25                      | 25                      |
| Sıkıştırılan Tabaka Sayısı                    | 3                       | 5                       |
| Konfaksiyon Enerjisi (cm-kg/cm <sup>3</sup> ) | 5.98                    | 26.89                   |

Bu çalışmada, zemin örneklerinin  $w_{opt}$  değerlerini belirlemek için ASTM D698 (2012) standardına göre Standard proktor deneyleri yapılmıştır. Bu deney, 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp içerisinde sıkıştırılması ve sıkıştırılmış örneğin maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerlerini belirlenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.5'te Standart Proktor deney aletinin çalışma prensibi verilmiştir.



**Şekil 4.5.** Standart Proktor deney aletinin görünümü (Aslan Topçuoğlu, 2020)

Deneyin yapılış aşamaları şu şekildedir;

- 1) Boş kalıbın hacmi ve kütlesi ölçülerek kayıt altına alınır.
- 2) Kalıba ilave olarak yaka kısım takılır, deney için hazırlanan karışım zemine serilerek üzerine su serpilir. Su dağılımı homojen olana kadar örnek karıştırılır (Şekil 4.6).
- 3) Deneye hazır hale getirilmiş örnek kalıp içine 5-7.5 cm kalınlığında zemin örneksi yerleştirilir.
- 4) Örneğin üstü bastırılmadan düzeltildikten sonra aynı yükseklikten (30.5 cm) düşen çekiçle 25 darbe üniform biçimde sıkıştırılır (Şekil 4.6).
- 5) Sıkışmış tabakanın üzeri birleşmenin tam sağlanabilmesi için hafifçe çentilerek ikinci tabaka örnek konur, aynı sıkıştırma işlemi tekrarlanır.
- 6) Son kez üçüncü tabaka da aynı işlemden geçerek sıkıştırılma işlemi tamamlanır. Burada sıkışmış örneğin fazla olmamasına özen gösterilir.



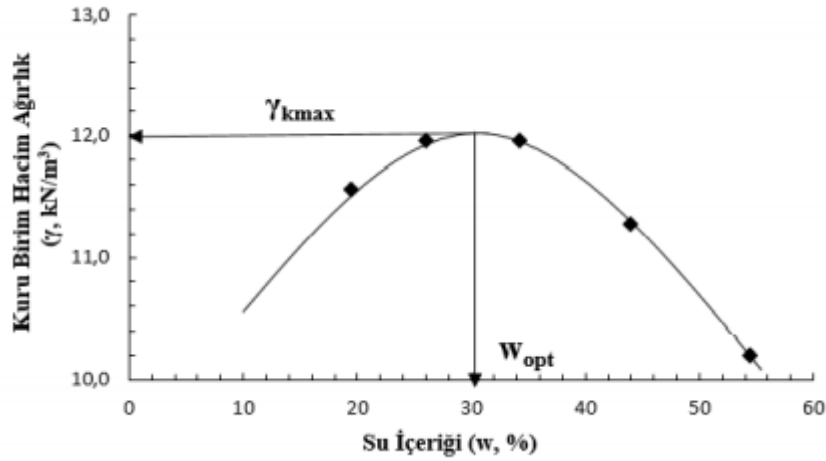
Şekil 4.6. Zemin örneğinin hazırlanması ve sıkıştırılması

- 7) Kalıp ile ilavenin birleşim kısmında kırılma olmayacak biçimde, üst kısım dikkatlice çıkarılır (Şekil 4.7).
- 8) Kalıp boyunu aşan örnek, bıçak yardımı ile merkezden kenara doğru kesilerek traşlanır (Şekil 2.26). Kalıp dışındaki karışım parçaları uzaklaştırıldıktan sonra örnek ile kalıp tartılarak kayıt altına alınır.
- 9) Kalıptaki zemin örnek tavaasına boşaltılır ve 4 no'lu elekten geçecek şekilde tanelenir. Su püskürtücü bir alet yardımıyla rutubeti %1.5-3 arasında artacak şekilde, homojen hale getirilir. Eğer örnek fazla ise, kalıptan boşaltılan malzemeyi kullanmamak gerekir. Çünkü sıkışmış örneği dağıtıp, rutubet vermek zordur. Fazla olan örnekten bir miktar alarak nem miktarını artırıp işlemi tekrarlamak daha kolaydır.



Şekil 4.7. Zemin örneğinin kalıptan çıkarılması

- 10) Su içeriği %2-3 oranında artırılarak bu deney 5-6 defa tekrarlanır. Sağlıklı sonuç elde edilmek için deneyi 5 kademede tamamlamak en idealidir. Noktalardan iki tanesi parabolün sol, diğer iki tanesi de sağ tarafında, üçüncü nokta ise maksimum noktaya yakın bir yere denk gelecek şekilde konumlanmalıdır (Şekil 4.8).
- 11) Deneye ait veriler kullanılarak çizilen  $\gamma_{kmax}-w_{opt}$  grafiğinde, eğrinin en tepe noktasının yatay eksendeki değeri zeminin  $w_{opt}$ 'dir.



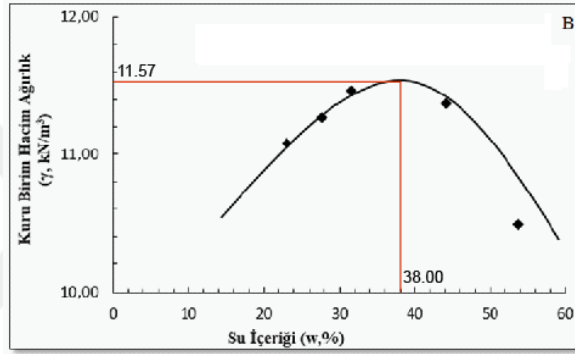
Şekil 4.8. Zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerlerinin grafikten belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında katkısız bentonit kili ile asidik ve bazik tüf katkılı örneklerin  $w_{opt}$  değerlerini belirlemek amacıyla farklı su içeriğine sahip her bir örnekte 5 adet olmak üzere toplam 45 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait sonuçların grafiksel olarak değerlendirilmesi Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de,  $\gamma_{kmax}$  ve  $w_{opt}$  değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

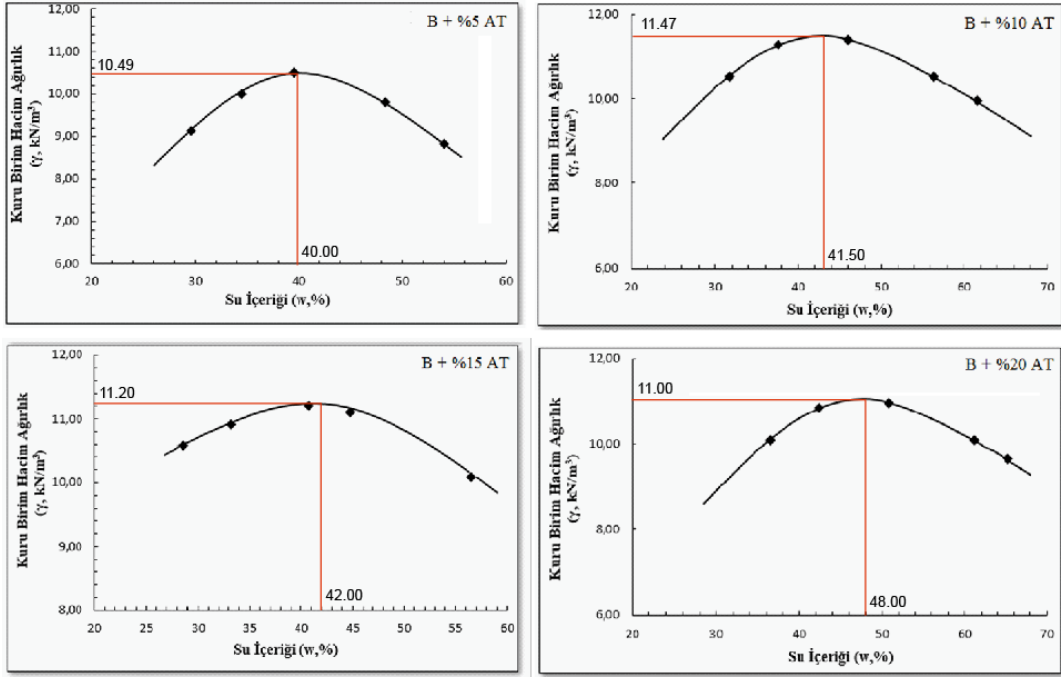
**Tablo 4.8.** Zemin örneklerinin  $\gamma_{kmax}$  ve  $w_{opt}$  değerleri

| Örnek    | Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_{dmax}$ , kN/m <sup>3</sup> ) | Optimum Su İçeriği ( $w_{opt}$ ) |
|----------|---|----------------------------------|
| B        | 11.57   | 38                               |
| B+%5AT   | 10.49   | 40                               |
| B+%10AT  | 11.47   | 41                               |
| B+%15AT  | 11.24   | 42                               |
| B+%20AT  | 11.07   | 48                               |
| B+%5BT   | 10.98   | 40                               |
| B+%10 BT | 10.79   | 43                               |
| B+%15 BT | 10.55   | 46                               |
| B+%20 BT | 10.49   | 47                               |

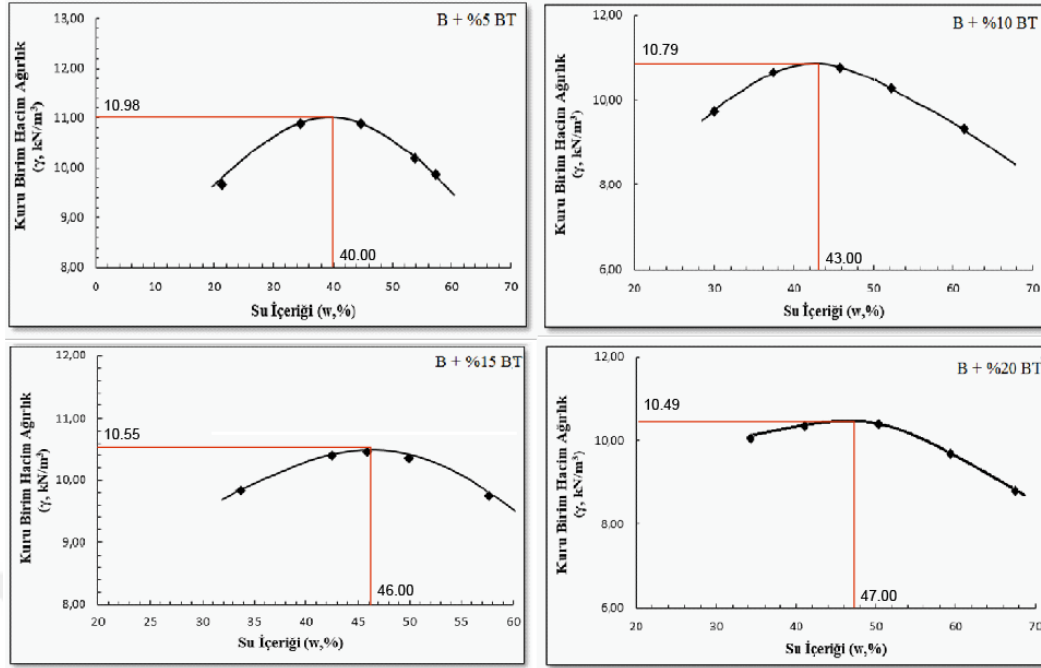
B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf



**Şekil 4.9.** Bentonit kiline ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) – su içeriği (w) grafiği



**Şekil 4.10.** Asidik tuf katkılı örneklere ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) – su içeriği (w) grafikleri



Şekil 4.11. Bazık tuf katkılı örneklere ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ )-su içeriği (w) grafikleri

#### 4.2.3. Konsolidasyon Deneyi

Herhangi bir malzemenin gerilmeye maruz kalması sonucunda deformasyonlar meydana gelir ve birçok malzemenin belirli bir gerilme değerine kadar Hooke Yasası'na uyduğu kabul edilir. Çelikte akma sınırına kadar uygulanan bir gerilme değerinde gerilme - birim deformasyon davranışı doğrusaldır ve elastik sınır aşılmadan yük boşaltıldığında deformasyon ortadan kalkar. Betonda ise gerilme-deformasyon ilişkisi doğrusal değildir. Zeminlerde ise gerilme - birim deformasyon ilişkisi diğer malzemelere göre çok karmaşıktır ve zeminin cinsine göre büyük farklılıklar gözlenmektedir. İri daneli zeminlerde zamandan bağımsız ve ani olarak gerçekleşen oturmalar, ince daneli zeminlerde büyük ölçüde zamana bağlı olarak gerçekleşmektedir. Oturmaya neden olan faktörler sadece yükleme ile sınırlı değildir. Ayrıca, yeraltı su seviyesindeki düşüş, doğal veya yapay titreşimlerde oturmaya neden olabilmektedirler (Cernica, 1995).

Zemine etkiyen yükler, zeminde gerilme artışına yol açmakta ve zemin danelerinin yer değiştirmesi ya da daneler arasında yer alan hava ve suyun uzaklaşması ile zeminin daneleri birbirine yaklaşmakta, böylece zeminin boşluk oranı da azalmaktadır. Yükleme sonucu zeminde oluşan bu değişimler de oturmaya neden olmaktadır. Oturma, zemine etkiyen yükler sonucunda artan boşluk suyu basıncının zamana bağlı olarak sönümlenmesi sonucu zeminde oluşan deplasmanlar olarak tanımlanmaktadır ve üç sınıfa ayrılmaktadır (Das, 2000). Bunlar;

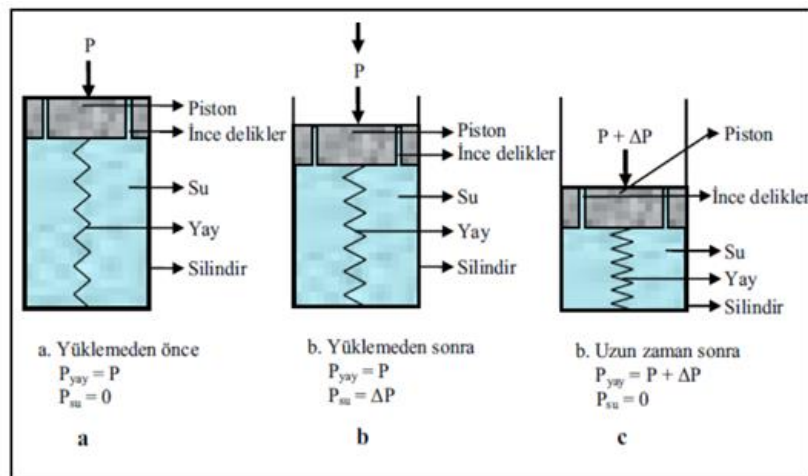
- 1) Ani oturma ( $S_i$ )
- 2) Konsolidasyon oturması (birincil konsolidasyon oturması) ( $S_c$ )
- 3) Plastik oturma (ikincil konsolidasyon oturması) ( $S_s$ )'dır.

Yüklemeye bağlı olarak zeminde oluşacak toplam oturma ( $S_t$ ) ise bu üç oturma miktarının toplamına eşittir.

$$S_t = S_i + S_c + S_e \quad (4.1)$$

Ani oturma, zeminlere yükün etki etmesiyle birlikte, su içeriğinde herhangi birdeğişiklik olmaksızın meydana gelen elastik deformasyonlardır (Das, 2000). Konsolidasyon oturması, gerilme artışı sonucunda artan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve zemin danelerinin yer değiştirmesi ile meydana gelen oturmalar. İnce daneli zeminlerde permeabilitenin düşük olması nedeniyle daneler arasındaki suyun zeminden dışarı atılması uzun zaman alır. Bu nedenle konsolidasyon oturması zamana bağlıdır ve permeabilite katsayıları küçük olan ince daneli zeminlerde meydana gelir. Yüksek permeabiliteye sahip olan iri daneli zeminlerde, suyun dışarı atılması kısa sürede gerçekleştiği için ani oturma ve konsolidasyon oturmasını ayırt etmek imkansızdır. Plastik oturmalar ise, killi zeminlerde sabit efektif basınç altında, ek boşluk suyu basıncının tamamen sönümlenmesine rağmen devam eden oturmalar ve aşırı yüklemenin olmadığı durumlarda ihmal edilebilmektedirler (Das, 1998).

Killerin konsolidasyonu yay mantığı ile kolayca açıklanmaktadır (Şekil 4.12). Sabit bir P yükü altında belirli bir süre kalmış bir sistemde (Şekil 4.12.a) P yükü yay tarafından taşınmakta olup, kaptaki su herhangi bir yük taşımamaktadır. Bu konumda piston üzerindeki yük  $\Delta P$  kadar artırıldıktan hemen sonra (Şekil 4.12.b) suyun sıkışmaz özelliğinden dolayı,  $\Delta P$  su tarafından taşınır, yaya ekstra yük gelemez. Zaman içerisinde basınç altındaki suyun bir kısmı ince deliklerden yavaşça dışarıya süzülür ve bir süre sonra (Şekil 4.12.c) konumunda, su hiç bir yükü taşımaz;  $P + \Delta P$  yükü, tamamen yay tarafından taşınır. Tamamen suya doymun bir zeminin konsolidasyonunda da örnekte verilen benzer olaylar gerçekleşir.



Şekil 4.12. Bir boyutlu konsolidasyon; reolojik modeli (Kahafaji ve Andersland, 1992)

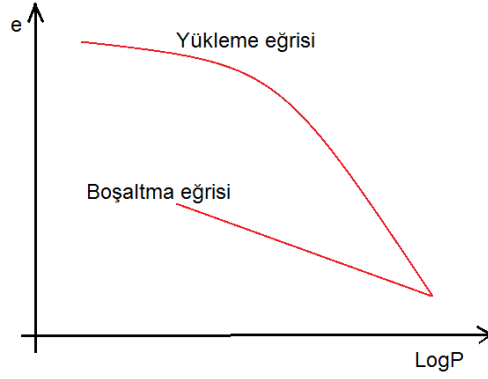
Konsolidasyon konusunda ilk çalışmalar Karl Terzaghi tarafından yapılmıştır. Terzaghi yaptığı çalışmalarda killerinsıkışmasında en önemli etkenin oluşan fazla boşluk suyu basıncının zaman içindeönümlenmesi sonucunda zeminin boşluk hacminde azalma olduğunu fark etmiş ve bu verilere dayanarak “Terzaghi bir boyutlu konsolidasyon teorisi”ni geliştirmiştir. Zeminlerin genellikle doğrusal olmayan bir karaktere sahip olmaları ve gerilme-birim deformasyon eğrilerinin düz olmaması nedeniyle birim deformasyon ve zamanarasında basit bir ilişki yoktur (Holtz ve Kovacs, 1981). Bu nedenle, bu ilişkiyi matematiksel olarak ele almak zordur. Terzaghi (1925), sorunu basitleştirmek için bazı varsayımlar yapmıştır. Bunlar;

1. Zemin homojendir,
2. Tüm boşluklar sıkışmaz suyla doludur ( $S_r = \%100$ ), ancak su eriyikgaz içerebilir,
3. Danelerin sıkışabilirliği suya oranla ihmal edilebilir,
4. Suyun sıkışabilirliği de zemin danelerinin sıkışabilirliğine göre ihmal edilebilir,
5. Darcy yasası geçerlidir,
6. Sıkışmalar ve suyun zeminde hareketi tek yönde oluşur,
7. Sıkışabilirlik ve geçirimsizlik zeminin aldığı gerilme kademesindenbağımsızdır,
8. Boşluk oranı efektif gerilmenin fonksiyonu olup zamanla değişmez,
9. Oluşan sıkışmalar kilin ilk kalınlığına oranla küçük olduğundanortalama özellikler ve ortalama boyutlar kullanılabilir,
10. Gerilme artışları ani olarak uygulanmaktadır,
11. Zemin iskeleti hacim değişimine viskoz direnç göstermez.

Önemli eksiklikleri bulunsa da bu teori günümüzde hala geçerliliğini korumaktadır.

Konsolidasyon deneyinin uygulanması ana hatları şu şekildedir. Örselenmemiş zemin örneği, ağırlığı ve boyutları bilinen ringe yerleştirilir ve toplam ağırlık belirlenir. Örneğin alındığı sondaj tüpünden, başka bir örnek alınarak başlangıçtaki su içeriği belirlenir. Ödometre (konsolidasyon) aletinin en alt kısmında bulunan alt poroz taş suya doygun hale getirilerek ring içindeki örnek alt poroz taşın üzerine yerleştirilir. Ring üzerine üst poroz taş konarak vidalar sıkıştırılır. Su haznesi uygun bir yüksekliğe konur ve su borusu ödometre aletine bağlanır. Hazneye yeteri kadar su doldurulur ve deney boyunca gerektiği zaman su eklenerek örneğin deney süresince suya doygun olması sağlanır. Yükleme birimi ödometre aletine bağlanır ve deformasyon saati örneğin üst kısmına yerleştirilerek  $t=0$  okuması yapılır. Örnek üzerine  $0.25 \text{ kgf/cm}^2$  değerinde gerilme gelecek şekilde ilk yükleme yapılır ve 15 sn., 30 sn., 1 dk., 2dk., 4 dk. 8 dk., 15 dk., 30 dk., 1 sa., 2 sa., 4sa., 8 sa. ve 24 saat olmak üzere okumalar kayıt edilir. 24 saat okuması alındıktan sonra örnek üzerine sırayla  $0.50, 1.00, 2.00, 4.00, 6.00, 10.00 \text{ kgf/cm}^2$  değerinde yüklemeler yapılır ve bir önceki kademedede yapılan okumalar tekrarlanır. Yükleme tamamlandığında örnek üzerindeki yük kademeli olarak azaltılarak bu kez örneğin kabarma miktarları okuma saatinden alınır. Deney sonu su içeriği belirlemek amacıyla örnek tartılır ve ardından etüvde kurumaya bırakılır.

Deney sonucunda, her bir yük kademesinde 24 saatlik süre sonucunda örnekte oluşan oturmalar belirlenmiş olur. Konsolidasyon davranışını belirlemek için boşluk oranı (e) – LogP grafiği çizilir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Bir konsolidasyon deneyine ait e-LogP grafiği

Laboratuvarda yapılan konsolidasyon (ödometre) deneyine ait veriler kullanılarak zeminin arazide uygulanan yükleme altında zeminde meydana gelecek konsolidasyon oturmasının hesaplanabilmektedir. Ancak, bu hesaplama için bazı parametreler gerekmektedir. Bu parametreler;

1- Sıkışma Katsayısı ( $a_v$ ): Boşluk oranının gerilme ile değişim hızını gösterir ve konsolidasyon deneyi sonucunda, her yük kademesine ait gerilme ve boşluk oranı değişimleri kullanılarak, her sıkışma kademesi için aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta P} \quad (4.2)$$

2- Hacimsel Sıkışma Katsayısı ( $m_v$ ): Gerilmenin birim artışına karşı birim hacimde meydana gelen azalmayı gösterir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e} \quad (4.3)$$

3- Konsolidasyon Katsayısı ( $C_v$ ): Zemin özelliklerini konsolidasyon sürecine yansıtan tek parametredir ve zeminin permeabilitesi ile sıkışma davranışına bağlı bir değerdir. Sıkışma-oturma hesaplamalarında önemli bir parametre olan  $c_v$  matematiksel olarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (4.4)$$



$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \quad (4.5)$$

$$C_v = \frac{0.848H^2}{4t_{90}} \quad (4.6)$$

Bu eşitliklerde;

H = Örneğin kalınlığı (cm),

$t_{90}$  = Konsolidasyonun %90 lık kısmının tamamlanmasına karşılık gelen süre (dk) dir.

Bu çalışmada, konsolidasyon özellikleri incelenen katkısız bentonit ile %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik ve bazik tuf katkılı örneklerin kür öncesi ve 28 günlük kür sonrası konsolidasyon katsayılarını belirlemek amacıyla ödometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, ödometre deneyinde uygulanacak olan gerilme değeri belirlenmiştir. Bu değer in örneğin şişme basıncından daha büyük olması gerektiği dikkate alınmış ve örneklerin şişme basıncı değeri belirlenerek ödometre deneyinde uygulanacak olan gerilme değerine karar verilmiştir. Katkısız bentonit kili örneğinde yapılan şişme basıncı değeri 1030.72 kPa olarak belirlenmiş ve bu değere göre ödometre deneylerinde örneklere 1500 kPa'lık gerilme uygulanarak ASTM D2435/D2435M (2011) standardına göre toplam 18 ödometre deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.15). Bu deneylerden 9 adedi kür uygulanmamış örneklerde, geri kalan 9 örnekte ise kür uygulandıktan sonra yapılmıştır.



Şekil 4.15. Ödometre deneyinin yapılması

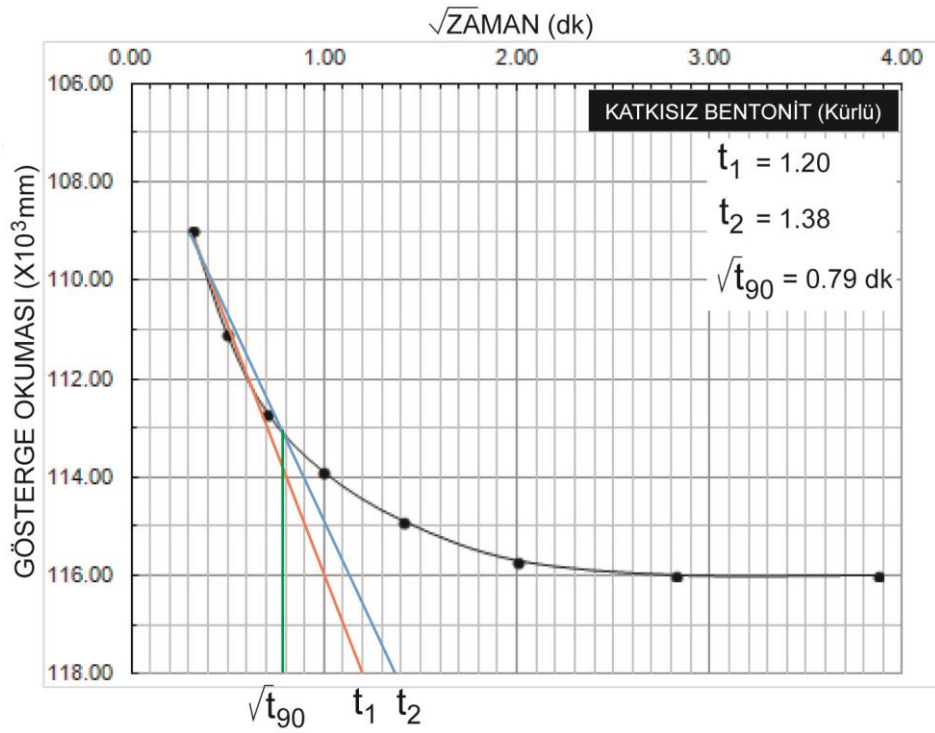
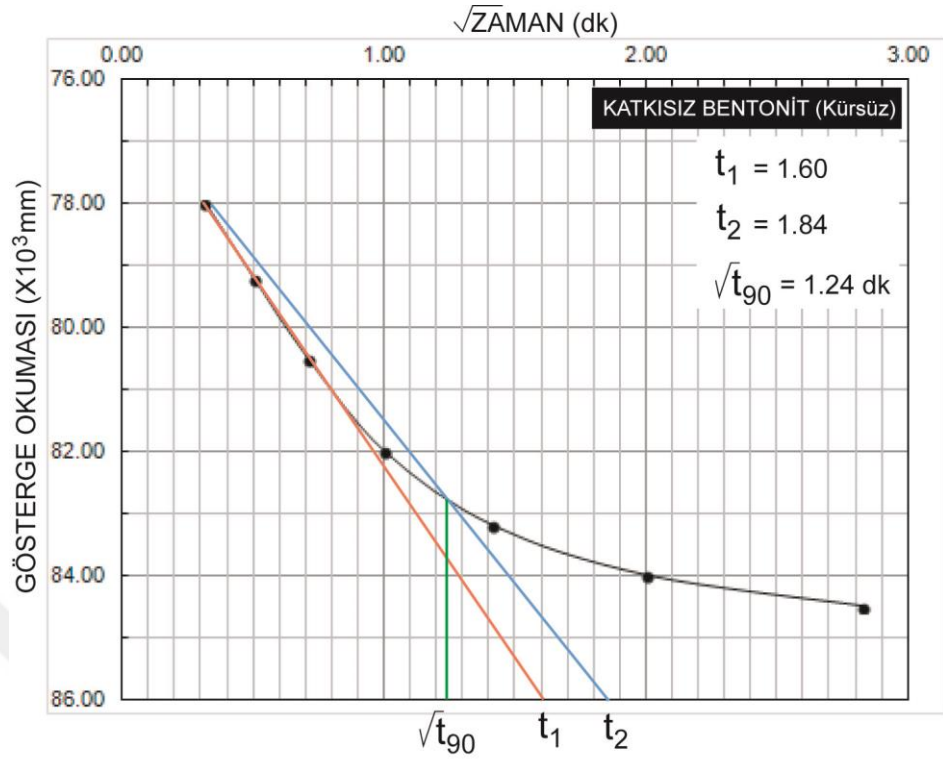
Ödometre deneylerinin tamamlanmasından sonra her bir örneğin kür öncesi ve kür sonrası  $C_v$  değerleri karekök-zaman yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Deneye ait yükleme değerleri

kullanılarak çizilen grafikten  $t_{90}$  değeri belirlenmiş, deney sırasında çift yönlü drenaja izin verildiği için Eşitlik 4.6 kullanılarak  $C_v$  değerleri hesaplanmıştır. Yükleme deneylerine ait karekök zaman-sıkışma grafikleri Şekil 4.16-4.24’de, kür öncesi ve sonrası için hesaplanan  $t_{90}$  ve  $C_v$  değerleri ise Tablo 4.9’da verilmiştir.

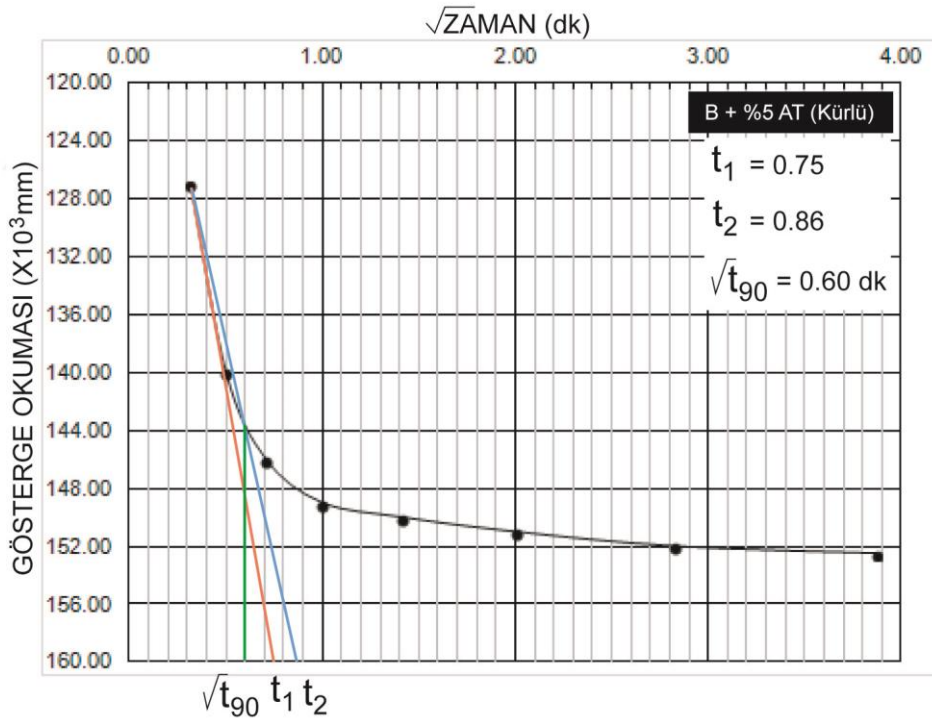
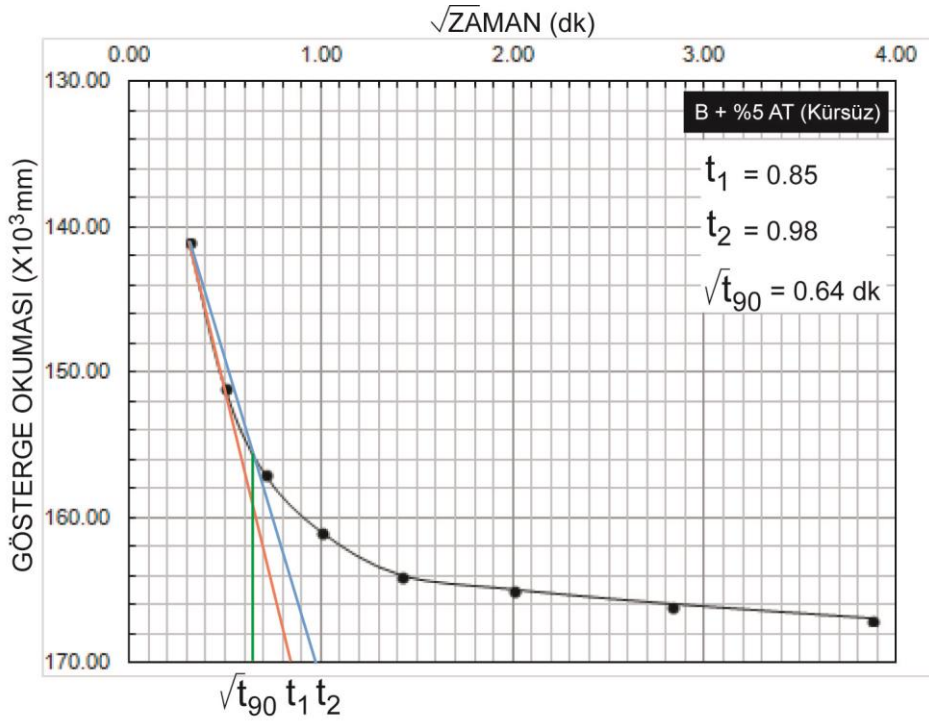
**Tablo 4.9.** Karekök-zaman yöntemine göre belirlenen kür öncesi ve kür sonrası  $t_{90}$  ve  $C_v$  değerleri

| Örnek    | Kür Öncesi    |                             | Kür Sonrası   |                             |
|----------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
|          | $t_{90}$ (dk) | $C_v$ (cm <sup>2</sup> /dk) | $t_{90}$ (dk) | $C_v$ (cm <sup>2</sup> /dk) |
| B        | 1.538         | 0.551                       | 0.624         | 1.359                       |
| B+%5AT   | 0.410         | 2.069                       | 0.360         | 2.356                       |
| B+%10AT  | 0.384         | 2.209                       | 0.348         | 2.437                       |
| B+%15AT  | 0.360         | 2.356                       | 0.348         | 2.437                       |
| B+%20AT  | 0.348         | 2.437                       | 0.360         | 2.356                       |
| B+%5BT   | 0.518         | 1.637                       | 0.372         | 2.280                       |
| B+%10 BT | 0.449         | 1.889                       | 0.360         | 2.356                       |
| B+%15 BT | 0.360         | 2.356                       | 0.360         | 2.356                       |
| B+%20 BT | 0.360         | 2.356                       | 0.348         | 2.437                       |

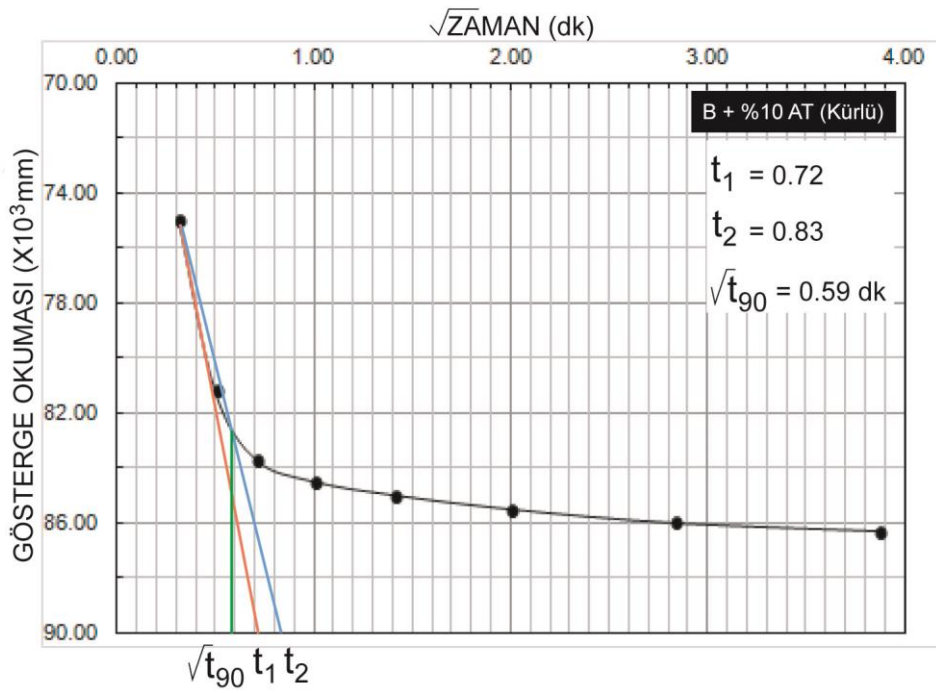
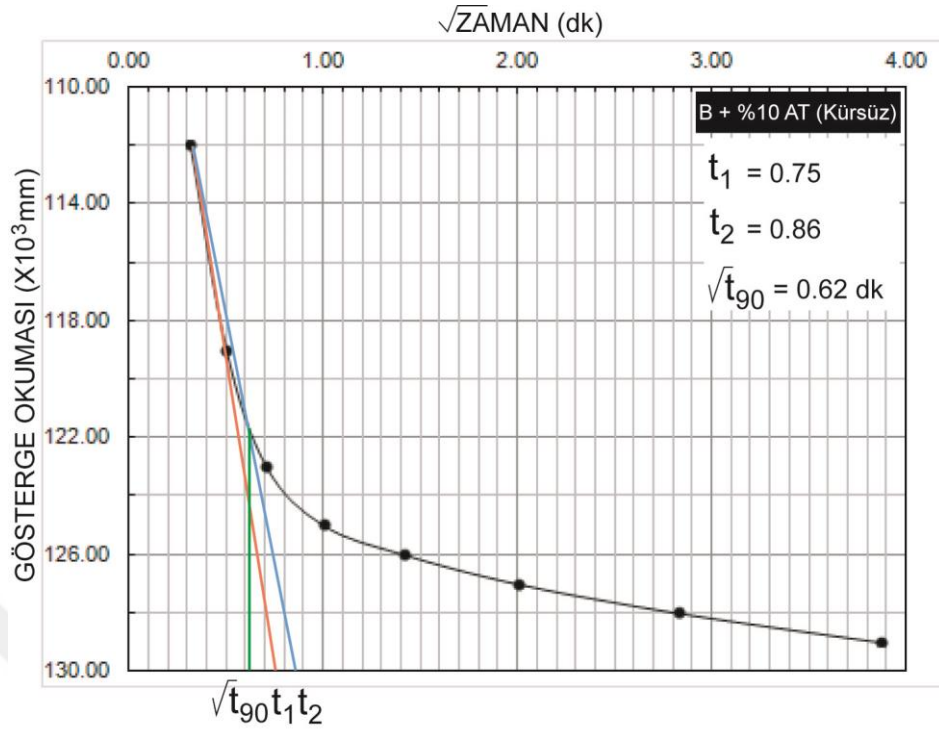
B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf



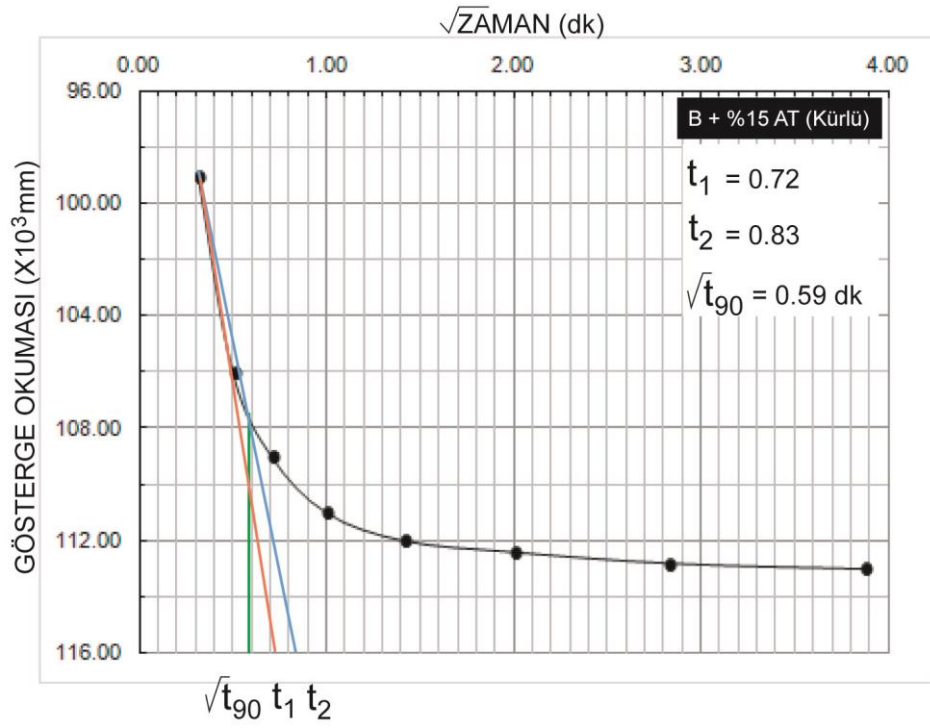
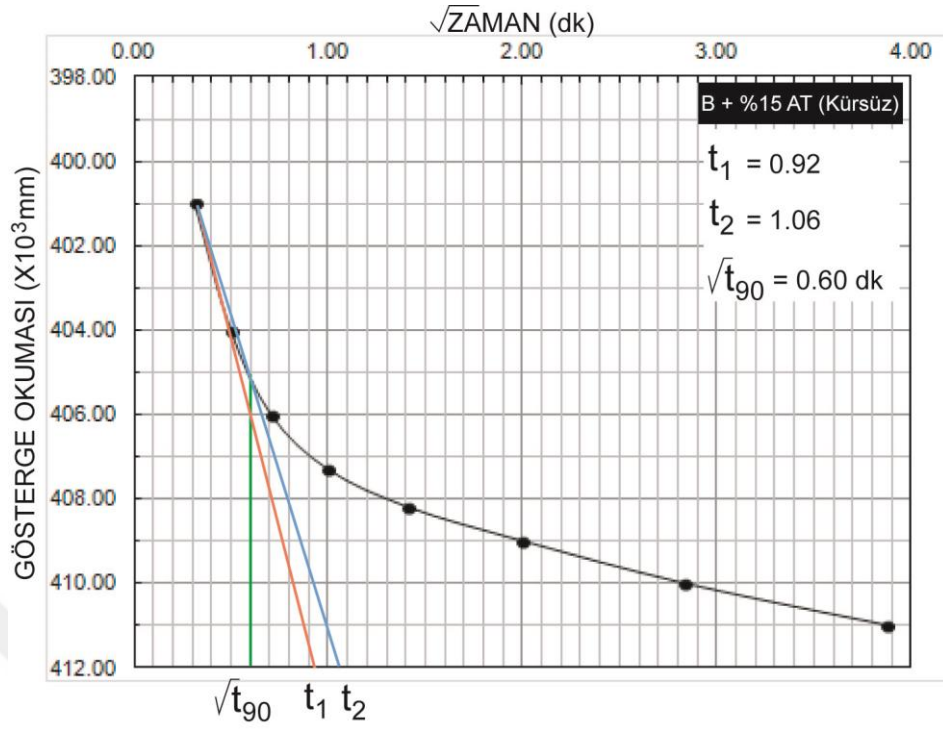
**Şekil 4.16.** Katkısız bentonit örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrisi ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



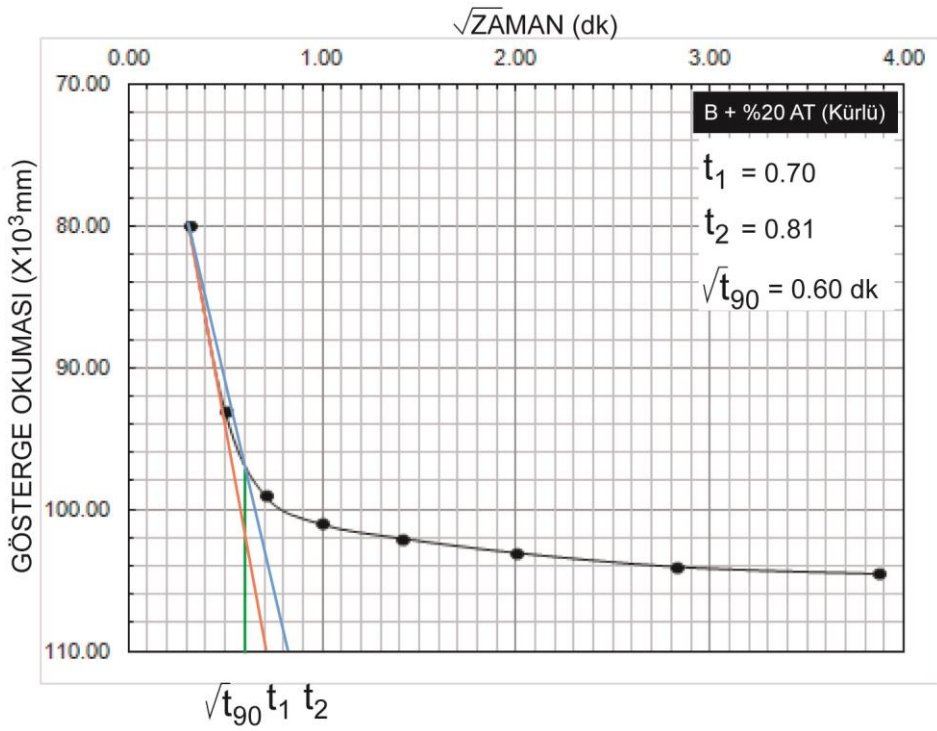
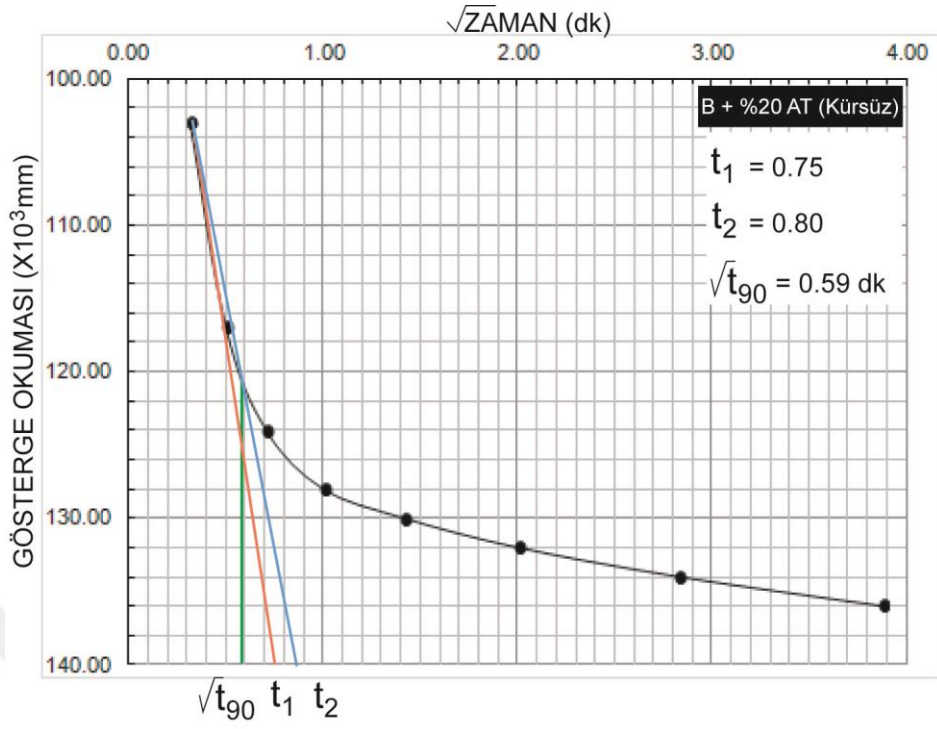
Şekil 4.17. B+%5AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



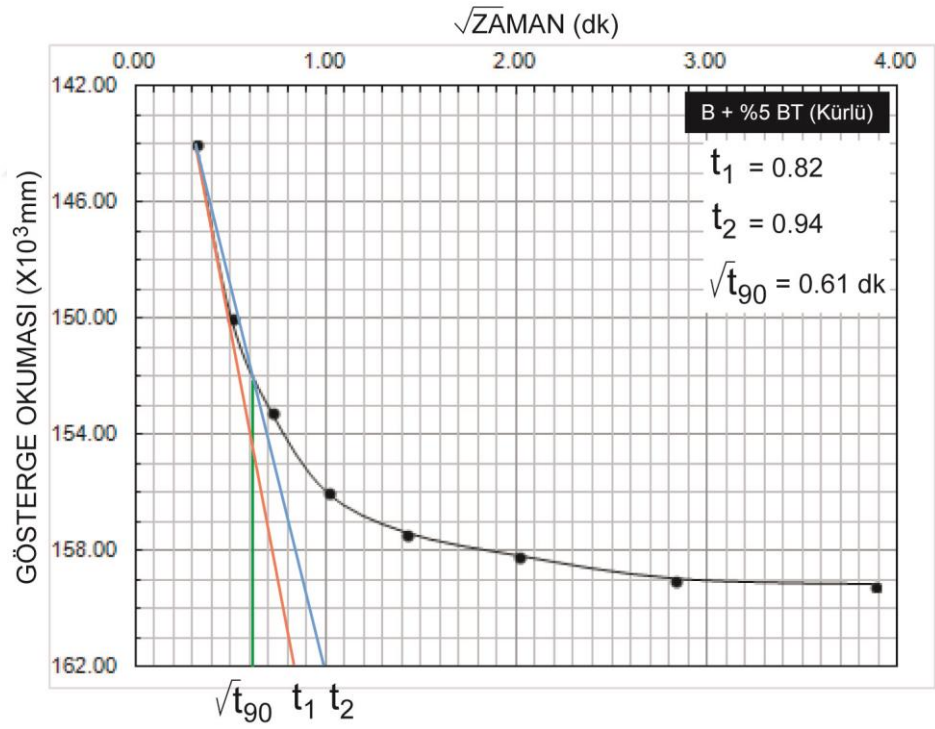
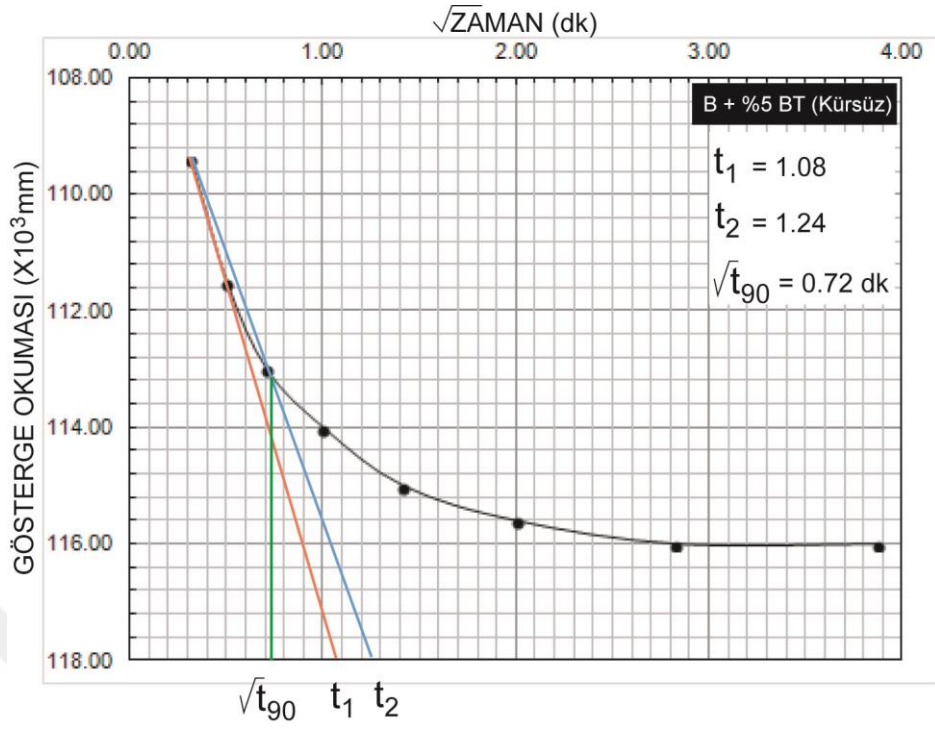
Şekil 4.18. B+%10AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



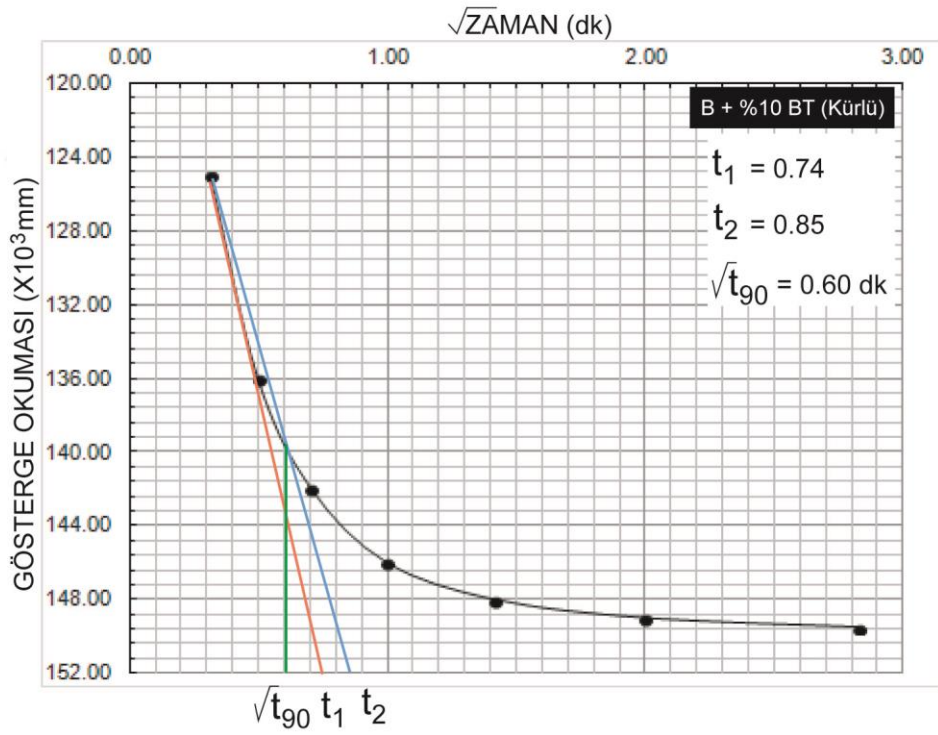
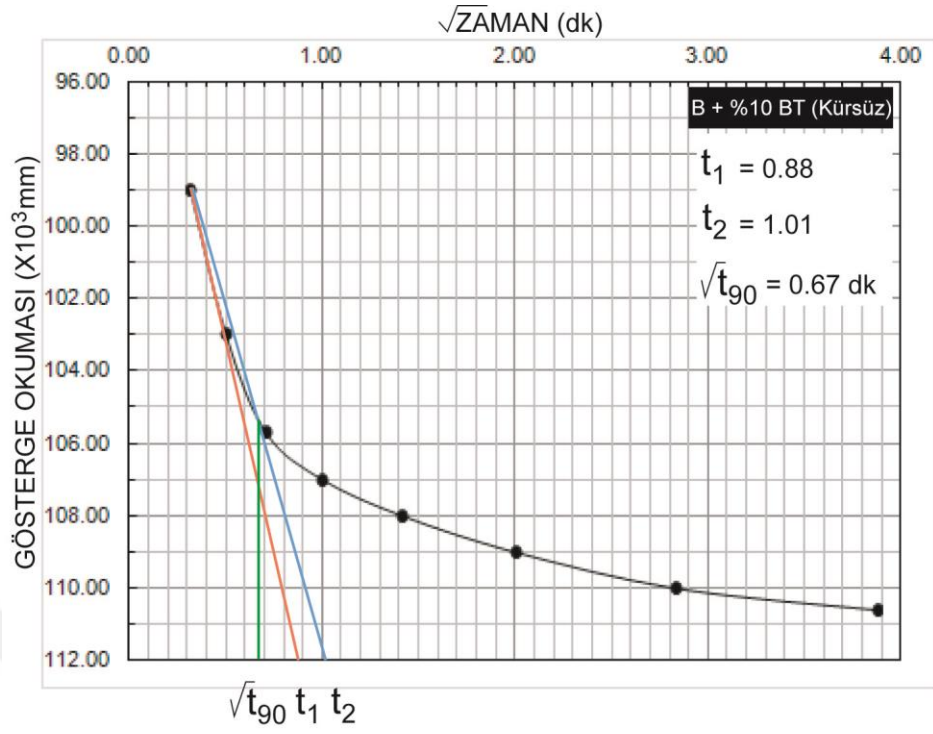
Şekil 4.19. B+%15AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



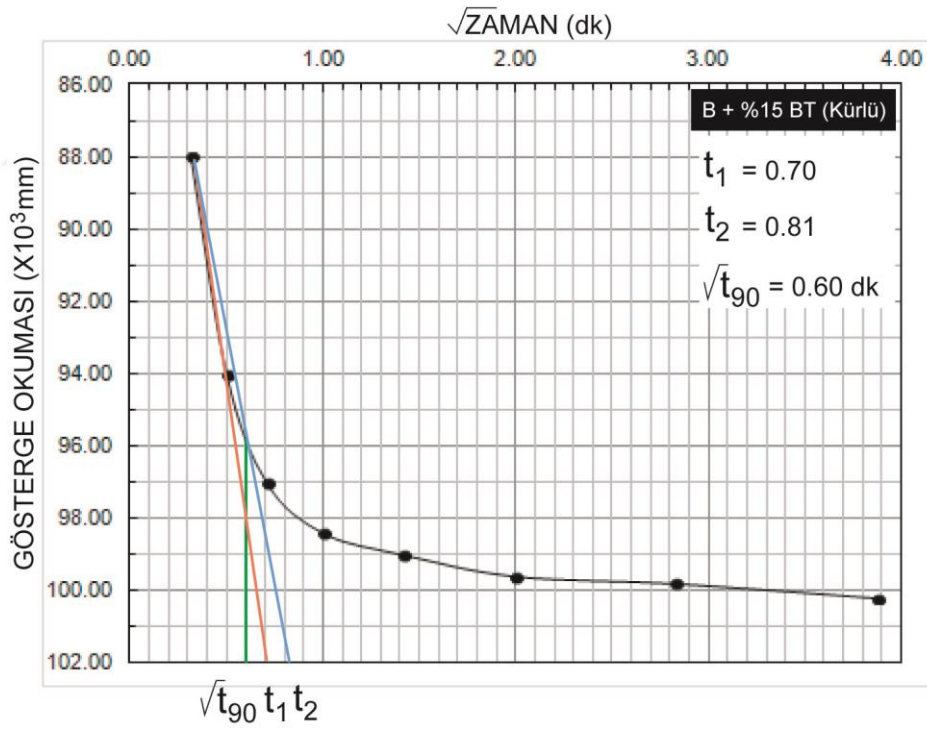
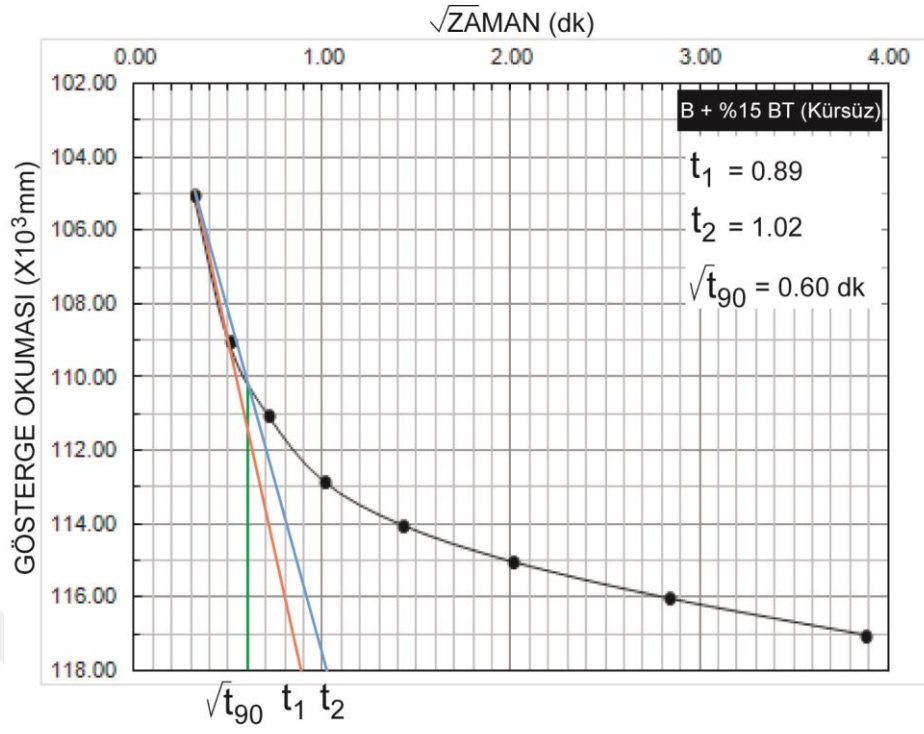
Şekil 4.20. B+%20AT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkıştırma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



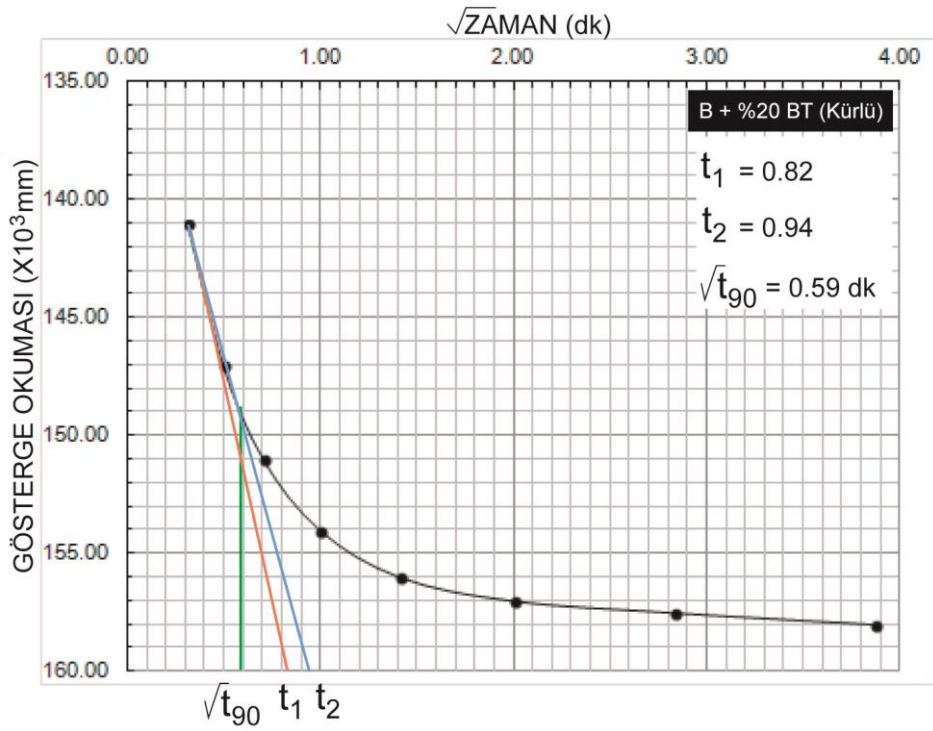
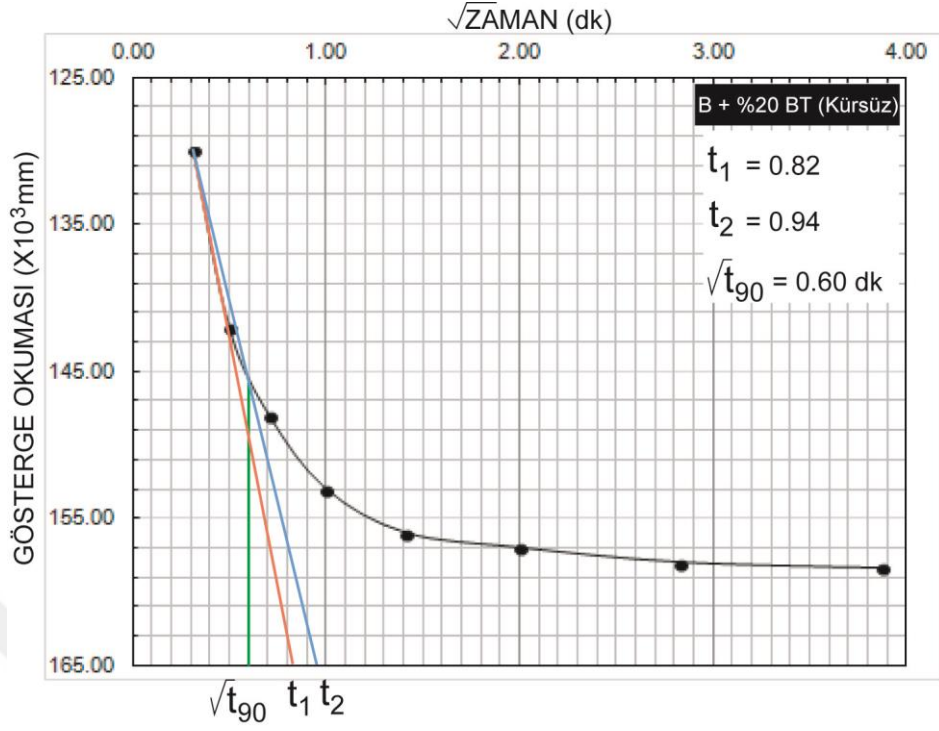
Şekil 4.21. B+%5BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



**Şekil 4.22.** B+%10BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



Şekil 4.23. B+%15BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkışma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi



Şekil 4.24. B+%20BT örneğine ait kür öncesi ve kür sonrası sıkıştırma eğrileri ve  $\sqrt{t_{90}}$ 'ın belirlenmesi

#### 4.2.4. Şişme Basıncı ve Şişme Yüzdesi Deneyleri

Zeminlerde, su içeriği ve gerilme şartlarındaki değişimlerin sonucunda meydana gelen hacim artışı şişme olarak tanımlanır ve bu özellik şişme potansiyeli olarak adlandırılır. Şişme potansiyeli; bir zeminin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade eden bir terimdir (Sridharan vd., 1986; Shuai, 1996; Thomas, 1998). Kilin şişmesini Mc Bride (1989) kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olarak tanımlar. Kil daneleri, yüzeyleri negatif elektrik, köşeleri ise pozitif elektrik yüklü mineral parçacıklarıdır. Yüzeydeki negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve kil daneciklerinin yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengededir. Zeminin su içeriğinin veya kimyasal bileşiminin değişmesi zeminin su kimyasını değiştirmekte ve böylece kil - su sistemindeki itme ve çekim kuvvetlerinden oluşan iç kuvvetler etkilenmektedir. Çekim kuvvetleri; London-van der Waals kuvvetleri, negatif ve pozitif yüklü yüzeyler arasındaki Coulomb kuvvetleri, dane-katyon-dane bağları, hidrojen bağları ve çimentolanma bağlarından ileri gelir. İtme kuvvetleri ise adsorbe su iyonları ve su molekülleri arasındaki çift tabaka etkileşimleri ile dane yüzeyleri ve tabakalar arasındaki katyonların hidrasyonu sırasında meydana gelen hidrasyon enerjilerinden kaynaklanmaktadır. (Van Olphen, 1963; Mesri ve Olson, 1971; Sridharan vd., 1986). İç kuvvetler sistemindeki denge durumu, zemin suyundaki kapiler gerilme ve dışarıdan uygulanan gerilmeler sonucu bozulmakta, denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde şişme ve büzülme gibi hacim değişiklikleri oluşmaktadır (Nelson ve Miller, 1992).

Keskin (1993) zeminin şişme potansiyelini etkileyen faktörleri şu şekilde sıralamaktadır;

- 1- Zeminin içerdiği kil yüzdesi,
- 2- Kil mineralinin cinsi ve çökme koşulları,
- 3- Arazideki gerilme şartları,
- 4- Kilin gerilme geçmişi,
- 5- Zeminin kuru birim hacim ağırlığı,
- 6- Zemin danelerinin yerleşim biçimi,
- 7- Zeminin başlangıç su içeriği ve doygunluk derecesi,
- 8- Zeminin boşluk oranı,
- 9- Geçirgenlik,
- 10- Şişen zemin tabakasının kalınlığı ve derinliği,
- 11- Dış yükler,
- 12- İklim şartları,
- 13- Bitki örtüsü,
- 14- Sıkıştırılmış zeminlerde sıkıştırma için kullanılan kompaksiyon yöntemi,
- 15- Çevresel şartlardaki değişiklikler gibi etkenler zeminin şişme basıncını etkileyen başlıca faktörlerdir

Zeminlerin şişme potansiyelinin en önemli bileşeni olan şişme basıncı, killi zeminlerin suyla teması sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında oluşan basınçtır. Bu basınç, Sridharanve Choudhury (2002) tarafından kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil-su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlamaktadırlar. Şişme basıncının ölçülmesi için, farklı araştırmacılar tarafından ödometre deney ekipmanının kullanıldığı, sabit yük ve sabit hacim ödometre deneyleri önerilmiştir. Sabit yük ödometre deneyinin, Serbest şişme ödometre deneyi (Sridharan vd., 1986; Shuai ve Fredlund, 1998), çift ödometre deneyi (Jennings vd., 1973; Shuai, 1996), yüklü şişme ödometre deneyi (Skempton, 1961; Matyas, 1969) ve Chinese Yöntemi (Feng, 1995; Shuai, 1996) olmak üzere dört tipi bulunmaktadır. Sabit hacim ödometre deneyleri ise sabit hacim ödometre deneyi (Sridharan vd., 1986; Fredlund vd.,1980) ve deformasyon kontrollü deney yöntemi (Porter ve Nelson, 1980) olmak üzere iki çeşittir.

Bu çalışmada, zemin örneklerinin şişme basınçlarının belirlenmesi amacıyla bir boyutlu ödometre deney aletinde şişme basıncı deneyi yapılmıştır. Deneyler, ASTM D 4546 (2008) tarafından önerilen sabit hacim ödometre deney yöntemine (Metot-C) göre aşağıdaki gibi yapılmıştır.

- 1- Karışımlar laboratuvarında homojen bir ıslatma ve karıştırma işlemi ile optimum su içeriğine getirilir. Bu işlemin ardından standart proktor kalıbında sıkışma işlemine tabi tutulur. Proktor kalıbının yakası çıkarılarak deney halkası hidrolik kriko yardımı ile kalıbın içerisine yerleştirilir ve kalıbın içinden hidrolik kriko yardımı ile çıkarılan 20 mm yüksekliğindeki halkanın her iki yüzeyi mümkün mertebe örnekte yeni bir sıkışma meydana getirmeyecek şekilde ringin altı ve üstü sıkıştırılmadan düzeltilir.
- 2- Hücreye önce taban parçası, içine poroz taşı ve poroz taşı koruyucu süzgeç kâğıdı konur. Örnek üstüne süzgeç kâğıdı, poroz taşı ve yükleme tabakası dikkatlice yerleştirilir. Örnek kutusu alettaki tablasına yerleştirilir. Böylece ödometre deneye hazırlanmış olur.
- 3- Aletin kaldıraç kısmının denge kontrolü yapılır. Ödometre kısmında örneğe yükü ileten vidalı çubuk dikkatlice aşağı çekilerek örnek kapağında bilyeye temas ettirilir. Gösterge yerine takılır ve sıfıra ayarlanır.
- 4- Ring, ödometre hücreğine yerleştirilir, sadece üst poroz blok ve yükleme başlığının ağırlığı altında 5 dk bekletildikten sonra ödometre hücresi tamamen su ile doldurulur ve örneğin hacmi sabit tutulacak şekilde yüklemeler uygulanır. Örneğin serbest bir durumda şişmesine izin verilir ( Şekil 2. 35 ).
- 5- Uygulanan yüklemelerin, deformasyonların 0.005 mm de tutulmasına ve 0.01 mm den daha büyük deformasyonların oluşmamasına özen gösterilmelidir. Örnek hacminde herhangi bir artışın gözlenmediği durumda deney sonlandırılır. Ring içerisindeki örneğe uygulanan nihai gerilme değeri, örneğin şişme basıncıdır.

Katkısız bentonit ve %5, %10, %15 ve %20 bentonit katkıli asidik ve bazik tuf karışımlardan toplam 18 örnek hazırlanmıştır. Bu örneklerden 9 tanesi hava almayacak şekilde sarılmış ve desikatöre yerleştirilerek 28 günlük kür uygulanmıştır. Diğer 9 örnekte ise kür uygulanmadan yukarıda kısaca özetlenen deney yöntemine göre şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Kür süresinin tamamlanmasından sonra desikatörden çıkarılan kürlenmiş örneklerde de şişme basıncı deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.25). Katkısız ve katkıli bentonit örneklerinde kür öncesi ve 28 günlük kür sonrasına ait şişme basıncı deney sonuçları Tablo 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.25. Şişme basıncı deneyinden bir görünüm

Tablo 4.10. Katkısız ve katkıli bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme basıncı değerleri

| Örnek   | Kür Öncesi<br>Şişme basıncı (kPa) | Kür Sonrası<br>Şişme basıncı (kPa) |
|---------|-----------------------------------|------------------------------------|
| B       | 1030.72                           | 861.05                             |
| B+%5AT  | 761.02                            | 638.44                             |
| B+%10AT | 760.04                            | 563.90                             |
| B+%15AT | 662.95                            | 490.35                             |
| B+%20AT | 588.42                            | 393.26                             |
| B+%5BT  | 761.02                            | 686.49                             |
| B+%10BT | 741.41                            | 662.95                             |
| B+%15BT | 686.49                            | 574.69                             |
| B+%20BT | 564.88                            | 490.35                             |

B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf

Zeminlerin şişme potansiyelinin önemli bir göstergesi olan şişme yüzdesi, örselenmemiş veya sıkıştırılarak hazırlanmış zemin örneğinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir (Keskin vd., 1992).

Tek boyutlu ödometre koşullarında örneğin kesit alanı sabit tutulduğu için, şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıda verilen eşitlik kullanılmaktadır.

$$S = \frac{(H_1 - H_0)}{H_0} \times 100 \quad (4.7)$$

Bu eşitlikte;

S = Şişme yüzdesi,

H<sub>0</sub> = Örneğin başlangıç yüksekliği,

H<sub>1</sub> = Örneğin şişme sonrasındaki yüksekliğidir.

Üç eksenli koşullarında ise örneğin yüksekliği sabit tutularak yanal çap değişimlerine göre şişme yüzdesi belirlenmektedir. Bu yöntemle göre zemini şişme yüzdesi;

$$S = \frac{(D_1^2 - D_0^2)}{D_0^2} \times 100 \quad (4.8)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Bu eşitlikte;

S = Şişme yüzdesi,

D<sub>0</sub> = Örneğin başlangıç çapı,

D<sub>1</sub> = Örneğin şişme sonrasındaki çapıdır.

Zeminlerin şişme yüzdesi konusunda yapılan çalışmalarda farklı araştırmacılar tarafından farklı deney yöntemlerinin önerildiği görülmektedir. Bu deney yöntemlerinin prensipleri arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bazı yöntemlerde örselenmemiş örnekler ya da belirlenen su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık koşullarında sıkıştırılarak hazırlanan örneklerin, sıkıştırma için dinamik ya da statik sıkıştırma yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, yükleme koşulları bakımından ise; 1 kPa, 7 kPa, 10 kPa gibi sürşarj yükleri altında ya da zeminin arazide karşılaşacağı yüke karşılık sürşarj altında deneyler gerçekleştirilmekte ya da deneyler sırasında örnekler, su altında bırakılmakta ya da kapiler yolla suyu emerek şişmelerine izin verilmektedir.

Holtz ve Gibbs (1956) yaptıkları çalışmada, zeminin şişme yüzdesini zeminin kuru halden, 7kPa sürşarj yükü altında doymuş hale gelmesi sırasında meydana gelen toplam hacim değişikliği olarak tanımlarken, Seed vd. (1962) standart AASHTO su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zemin örneğinin, ödometre koşullarında 7 kPa sürşarj basıncı altında, su altında bırakılması sonucu meydana gelen düşey boy değişimlerinin başlangıç örnek yüksekliğine oranı olarak tanımlamaktadırlar. Snethen (1984) ise örselenmemiş zemin örneğinin ödometre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj yükü altında ıslatılması ve nihai denge

doygunluk durumuna kadar örneğin hacminde meydana gelen değişiminin, başlangıç örnek yüksekliğine oranı olarak tanımlamaktadır.

Günümüzde en fazla tercih edilen yöntem, ASTM D 4546 (2008) tarafından önerilen ve doğrudan bir ölçüm tekniği olan tek boyutlu ödometre yöntemidir. Bu yöntemde Metot-A, B ve C olmak üzere üç farklı deney yöntemi önerilmektedir. Bu çalışmada Metod-A olarak önerilen serbest şişme yöntemi kullanılmıştır.

Serbest şişme deneyini yapılışı şu şekildedir;

- 1- Laboratuvarında homojen bir ıslatma ve karıştırma işlemi ile optimum su içeriğine getirilen örnek standart proktor kalıbında sıkışma işlemine tabi tutulur. Proktor kalıbının yakası çıkarılarak deney halkası hidrolik kriko yardımı ile kalıbın içerisine yerleştirilir ve kalıbın içinden hidrolik kriko yardımı ile çıkarılan 20 mm yüksekliğindeki halkanın her iki yüzeyi mümkün mertebe örnekte yeni bir sıkışma meydana getirmeyecek şekilde ringin altı ve üstü sıkıştırılmadan düzeltilir.
- 2- Ödometre hücresine önce taban parçası, sonra poroz taşı ve poroz taşı koruyucu süzgeç kâğıdı konur. Bunların üstüne halka içerisindeki örnek konur ve üstüne süzgeç kâğıdı, poroz taşı ve yükleme tabakası dikkatlice yerleştirilir.
- 3- Hücre deney aletine yerleştirilir ve aletin kaldıraç kısmının denge kontrolü yapılır. Ödometre kısmında numuneye yükü ileten vidalı çubuk dikkatlice aşağı çekilerek numune kapağında bilyeye temas ettirilir. Gösterge yerine takılır ve sıfıra ayarlanır.
- 4- Örnek sadece üst poroz blok, yükleme başlığının ağırlığı altında ve 7kPa'lık sürşarj yükü altında 5 dk bekletildikten sonra ödometre hücresi tamamen su ile doldurularak örneğin serbestçe şişmesine izin verilir.
- 5- Örneklerin su altında bırakılmasından hemen sonra, farklı zaman aralıklarında şişme deformasyonları tamamlanana kadar kayıt altına alınır.

Bu çalışmada katkısız bentonit ve %5, %10, %15 ve %20 oranlarında asidik ve bazik tuf katkılı karışımlar optimum su içeriklerinde sıkıştırılmış ve toplam 18 adet örnek alınmıştır. Alınan örneklerden 9 adedi hava almayacak şekilde sarılmış ve desikatöre konularak 28 günlük küre tabi tutulmuştur. Geriye kalan 9 örnekte ise kür uygulanmadan serbest şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Kür uygulanan örneklerde ise 28 gün tamamlandıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.26). Kür öncesi ve sonrasında örneklerde gerçekleştirilen serbest şişme deneyleri sonucunda elde edilen veriler Eşitlik 4.7 kullanılarak örneklerin şişme yüzdeleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.11'de verilmiştir.



**Şekil 4.26.** Şişme yüzdesi deneyinden bir görünüm

**Tablo 4.11.** Katkısız ve katkılı bentonit örneklerinin kür öncesi ve kür sonrası şişme yüzdesi değerleri

| Örnek    | Kür Öncesi<br>Şişme yüzdesi (%) | Kür Sonrası<br>Şişme yüzdesi (%) |
|----------|---------------------------------|----------------------------------|
| B        | 21.50                           | 13.75                            |
| B+%5AT   | 18.35                           | 10.25                            |
| B+%10AT  | 16.75                           | 9.40                             |
| B+%15AT  | 12.50                           | 8.45                             |
| B+%20AT  | 9.45                            | 6.75                             |
| B+%5BT   | 21.10                           | 18.20                            |
| B+%10 BT | 18.80                           | 17.15                            |
| B+%15 BT | 17.25                           | 14.50                            |
| B+%20 BT | 12.60                           | 11.75                            |

B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, katkısız bentonit ile farklı oranlarda asidik ve bazik tuf katkılı örneklerde kür öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine ait sonuçlar irdelenerek, katkı türü, oranı ve kür uygulamasının  $C_v$ , şişme basıncı ve şişme yüzdesi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

### 5.1. Katkı Türü, Katkı Oranı ve Kürün $C_v$ Üzerindeki Etkileri

Killi zeminlerde  $C_v$  değeri konsolidasyonun tamamlanma hızını göstermesi açısından önem taşımaktadır. Özellikle dolgu amaçlı olarak kullanılacak yüksek plastisiteli zeminlerde zamana bağlı olarak meydana gelen bu oturma hızının kısa sürede tamamlanması ancak yapılacak olan stabilizasyon işlemleri ile mümkün olmaktadır. Stabilizasyon sonrasında killi zeminde konsolidasyonun ne kadar sürede sonlanacağını ise  $C_v$  değerindeki değişimler ile açıklamak mümkündür.

Bu çalışma kapsamında katkısız bentonit ile asidik ve bazik tuf katkılı örneklerde gerçekleştirilen konsolidasyon deneyine ait sonuçlar kullanılarak hesaplanan  $C_v$  değerlerinin değişimi dikkate alınarak, katkı türü, katkı oranı ve kürün etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Örneklere ait kür öncesi ve kür sonrası  $C_v$  değerlerindeki % değişimler Tablo 5.1’de meydana gelen değişimleri gösteren grafik ise Şekil 5.1’de verilmiştir.

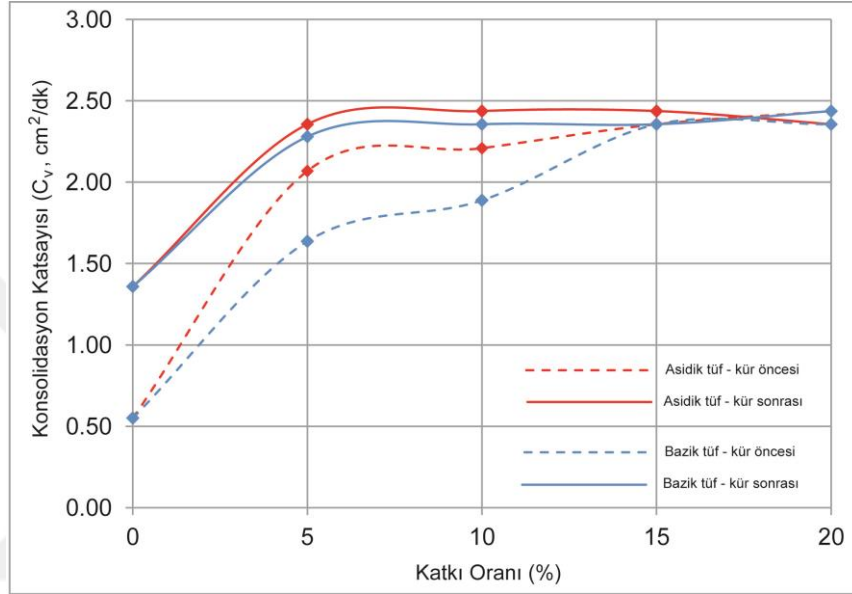
**Tablo 5.1.** Katkısız ve kürsüz bentonite göre katkılı örneklerin  $C_v$  değerlerinde meydana gelen % değişimler

| Örnek   | Kür Öncesi                  |             | Kür Sonrası                 |             |
|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|
|         | $C_v$ (cm <sup>2</sup> /dk) | Değişim (%) | $C_v$ (cm <sup>2</sup> /dk) | Değişim (%) |
| B       | 0.551                       | -           | 1.359                       | 146.64      |
| B+%5AT  | 2.069                       | 275.50      | 2.356                       | 327.59      |
| B+%10AT | 2.209                       | 300.91      | 2.437                       | 342.29      |
| B+%15AT | 2.356                       | 327.59      | 2.437                       | 342.29      |
| B+%20AT | 2.437                       | 342.29      | 2.356                       | 327.59      |
| B+%5BT  | 1.637                       | 197.10      | 2.280                       | 313.79      |
| B+%10BT | 1.889                       | 242.83      | 2.356                       | 327.59      |
| B+%15BT | 2.356                       | 327.59      | 2.356                       | 327.59      |
| B+%20BT | 2.356                       | 327.59      | 2.437                       | 342.29      |

B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf

Laboratuvar deney sonuçlarına göre katkısız bentonitin kür öncesi  $C_v$  değeri 0.551 cm<sup>2</sup>/dk olup, bu değer katkılı örneklerde 1.637 ile 2.437 cm<sup>2</sup>/dk arasında değişmektedir.  $C_v$  değerleri kür sonrasında artmaktadır ve katkısız bentonitte 1.359 cm<sup>2</sup>/dk olmaktadır. Kür sonrası katkılı örneklerin kür sonrası  $C_v$  değerleri ise genel olarak artış göstermekte ve maksimum 42.29 cm<sup>2</sup>/dk değerine kadar ulaşmaktadır. Katkısız bentonitte bu artış daha belirgin iken, katkılı örneklerdeki

artışın daha sınırlıdır. Katkı oranına bağlı olarak kür sonrası  $C_v$  değerlerinde kür öncesi  $C_v$  değerlerine göre sınırlı bir artışın söz konusu olduğu, bu artışın bazik tuf katkılı örneklerde göre asidik tuf katkılı örneklerde daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak, asidik ve bazik tuf katkılı örneklerde görülen bu farklılık katkı oranının %15'e ulaşması durumunda ortadan kalkmakta ve kür öncesine göre kür sonrası  $C_v$  değerlerindeki artışın aynı oranda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 5.1)



Şekil 5.1. Örneklerin  $C_v$  değerlerindeki değişimlere ait grafik

Katkılı örneklerin kür sonrası  $C_v$  değerleri katkısız bentonitin kür öncesi  $C_v$  değeri ile karşılaştırıldığında durum farklıdır. Nitekim katkısız bentonitin kür sonrasındaki  $C_v$  değeri %146.64 oranında artarken, katkılı örneklerde kür sonrasında  $C_v$  değerleri maksimum %342.29 oranında artış göstermektedir (Tablo 5.1). Kür öncesi  $C_v$  değerlerindeki artış katkı türü açısından değerlendirildiğinde; asidik tuf katkısının  $C_v$  değeri üzerindeki etkisinin bazik tuf katkısına oranla daha fazla olduğu, ancak bu farklılığın, katkı oranının %15'e ulaşması durumunda ortadan kalktığı görülmektedir (Şekil 5.1).

Kür sonrası  $C_v$  değerlerinde meydana gelen bu artışlar hem asidik hem de bazik tuf katkılı örneklerde katkı oranının %5 olması durumunda maksimum seviyeye ulaşmaktadır (Şekil 5.1). Katkı oranının %5'den fazla olduğu durumlarda  $C_v$  değerlerinde artışlar olmakla birlikte, belirlenen bu artışlar oldukça düşük oranlarda meydana gelmektedir. Katkılı örneklerin  $C_v$  değerlerinde kür sonrasında meydana gelen artışlar katkı türü açısından değerlendirildiğinde; asidik tuf katkılı örneklerde belirlenen artış oranının bazik tuf katkılı örneklerde göre yaklaşık %10 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak bu farklılık katkı oranının %15'i aşması durumunda ortadan kalkmaktadır.

## 5.2. Katkı Türü, Katkı Oranı ve Kürün Şişme Basıncı Üzerindeki Etkileri

Zeminlerin şişme potansiyelinin önemli bir göstergesi olan şişme basıncının üzerindeki yapıdan kaynaklanan ek gerilmeden daha büyük olması durumunda, mühendislik yapısında önemli hasarlar meydana gelebilmektedir. Şişme nedeniyle meydana gelebilecek bu hasarların önlenmesi ve doğru zemin iyileştirme yöntemine karar verilebilmesi ancak zeminin şişme potansiyelinin özellikle de şişme basıncının doğru şekilde belirlenmesi ve tasarım sırasında dikkate alınması ile mümkündür. Killerin şişme basıncının limit değerlerden daha yüksek olduğu durumlarda zeminde iyileştirme yöntemlerine başvurulur ve bu yöntemlerden en yaygın olarak tercih edileni ise farklı tür ve oranlarda katkı kullanarak yapılan stabilizasyondur.

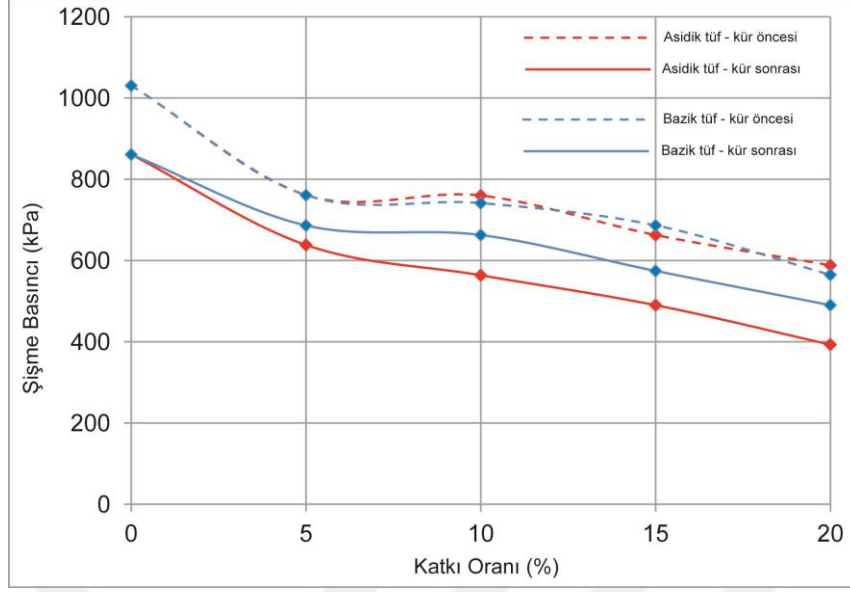
Bu çalışmada, asidik ve bazik tuf katkısının yüksek plastisiteli bentonit kilinin şişme basıncı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuçlar değerlendirilerek, katkı türü, oranı ve kür etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Örneklere ait kür öncesi ve kür sonrası şişme basıncı değerlerindeki % değişimler Tablo 5.2’de meydana gelen değişimleri gösteren grafik ise Şekil 5.2’de verilmiştir.

Laboratuvar deney sonuçlarına göre; katkısız bentonitin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa dır. Katkılı örneklerde bu değer katkı oranına bağlı olarak azalmakta ve bu değerler 761.02 kPa ile 564.88 kPa arasında değişmektedir (Tablo 5.2). Örneklerin kür öncesi şişme basınçlarına ait değerlerdeki azalma incelendiğinde; azalma oranı katkı türüne bağlı olmaksızın katkı oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 5.2).

**Tablo 5.2.** Katkısız ve kürsüz bentonite göre katkılı örneklerin şişme basıncı değerlerinde meydana gelen % değişimler

| Örnek    | Kür Öncesi          |             | Kür Sonrası         |             |
|----------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
|          | Şişme Basıncı (kPa) | Değişim (%) | Şişme Basıncı (kPa) | Değişim (%) |
| B        | 1030.72             | -           | 861.05              | -16.46      |
| B+%5AT   | 761.02              | -26.17      | 638.44              | -38.06      |
| B+%10AT  | 760.04              | -26.26      | 563.9               | -45.29      |
| B+%15AT  | 662.95              | -35.68      | 490.35              | -52.43      |
| B+%20AT  | 588.42              | -42.91      | 393.26              | -61.85      |
| B+%5BT   | 761.02              | -26.17      | 686.49              | -33.40      |
| B+%10 BT | 741.41              | -28.07      | 662.95              | -35.68      |
| B+%15 BT | 686.49              | -33.40      | 574.69              | -44.24      |
| B+%20 BT | 564.88              | -45.20      | 490.35              | -52.43      |

B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf



**Şekil 5.2.** Örneklerin şişme basıncı değerlerindeki değişimlere ait grafik

Örneklere 28 günlük kür uygulandıktan sonra şişme basıncı değerlerinde meydana gelen azalmalar değerlendirildiğinde; katkısız bentonit örneğinde bu azalma oranı %16.46 iken, bu oran asidik tuf katkılı örneklerde katkı oranına bağlı olarak %38.06-%61.85 oranına kadar ulaşmaktadır. Bazik tuf katkılı örneklerin kür sonrasında şişme basınçlarında meydana gelen azalma oranı ise yine katkı oranına bağlı olarak %33.40-%52.43 arasındadır (Tablo 5.2). Bu değerlere göre kür sonrasında şişme basıncında meydana gelen azalma oranı, asidik tuf katkılı örneklerde bazik tuf katkılı örneklerde göre daha fazla gerçekleşmiştir. Katkı türüne bağlı olarak meydana gelen bu fark dikkate alındığında; katkı olarak asidik tuf kullanılması durumunda şişme basıncında meydana gelen azalma oranının, katkı olarak bazik tuf kullanılması durumuna göre şişme basıncında %8-11 oranında daha fazla azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

### 5.3. Katkı Türü, Katkı Oranı ve Kürün Şişme Yüzdesi Üzerindeki Etkileri

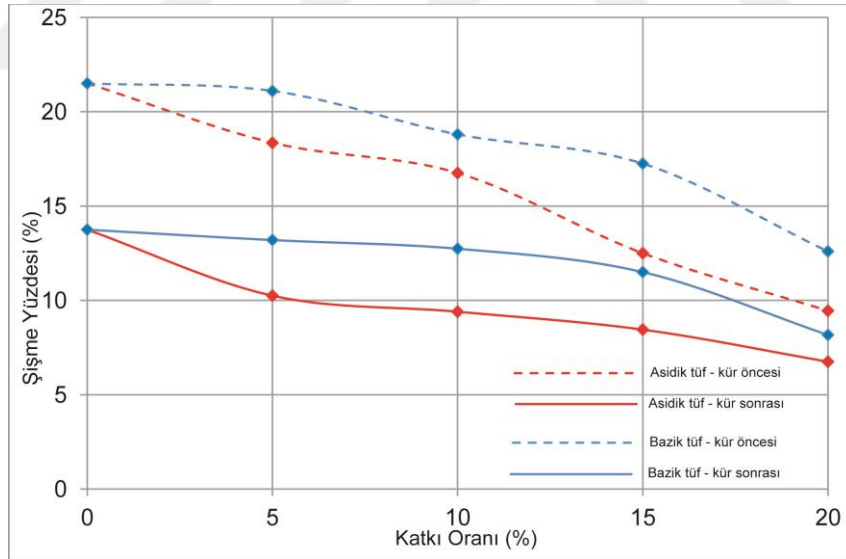
Zeminlerde şişme potansiyelini ifade eden diğer bir parametre de şişme yüzdesidir. Bu çalışmada, farklı oranlarda asidik ve bazik tuf katkısı eklenen örneklerin kür öncesi ve kür sonrası şişme yüzdeleri belirlenmiş, katkı türü, katkı oranı ve kürün şişme yüzdesi üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Örneklere ait kür öncesi ve kür sonrası şişme yüzdesi değerlerindeki % değişimler Tablo 5.3’de, meydana gelen değişimleri gösteren grafik ise Şekil 5.3’de verilmiştir.

**Tablo 5.3.** Katkısız ve kürsüz bentonite göre katkılı örneklerin şişme yüzdesi değerlerinde meydana gelen % değişimler

| Örnek    | Kür Öncesi        |             | Kür Sonrası       |             |
|----------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
|          | Şişme Yüzdesi (%) | Değişim (%) | Şişme Yüzdesi (%) | Değişim (%) |
| B        | 21.50             | -           | 13.75             | -36.05      |
| B+%5AT   | 18.35             | -14.65      | 10.25             | -52.33      |
| B+%10AT  | 16.75             | -22.09      | 9.40              | -56.28      |
| B+%15AT  | 12.50             | -41.86      | 8.45              | -60.70      |
| B+%20AT  | 9.45              | -56.05      | 6.75              | -68.60      |
| B+%5BT   | 21.10             | -1.86       | 13.20             | -38.60      |
| B+%10 BT | 18.80             | -12.56      | 12.74             | -40.74      |
| B+%15 BT | 17.25             | -19.77      | 11.50             | -46.51      |
| B+%20 BT | 12.60             | -41.40      | 8.17              | -62.00      |

B: Bentonit AT: Asidik tuf BT: Bazik tuf

Katkısız bentonitin kür öncesi şişme yüzdesi %21.50 iken bu değer asidik tuf katkılı örneklerde %9.45-%18.35, bazik tuf katkılı örneklerde ise %12.60-%21.10 arasında değişmektedir (Tablo 5.3). Örneklerin kür öncesi şişme yüzdesindeki azalmalar katkı oranına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 5.3). Asidik tuf katkılı örneklerde meydana gelen azalma oranları bazik tuf katkılı örneklere göre daha fazladır.



**Şekil 5.3.** Örneklerin şişme yüzdesi değerlerindeki değişimlere ait grafik

28 günlük kür sonrasında belirlenen şişme yüzdelere ait değerlere göre; katkısız bentonitin şişme yüzdesinin %36.05 lik bir azalma ile %21.50'den %13.75'e düşmüştür. Katkılı örneklerdeki azalma oranları katkısız bentonite göre çok daha fazladır. Asidik tuf katkılı örneklerde azalma oranı katkı oranına bağlı olarak %52.33-%68.60 iken, bu oran bazik tuf katkılı örneklerde %38.60-%62.00 aralığındadır (Tablo 5.3).

Katkısız bentonitin şişme yüzdesine göre en yüksek azalma oranı %5 katkı oranında asidik tuf katkılı örnekte ortaya çıkmıştır. Bu örnekteki azalma oranı %52.33 tür. Katkı oranının %5'den fazla olduğu örneklerdeki azalma oranları sınırlı kalmıştır. Katkı oranının %5'den fazla olduğu asidik tuf katkılı örneklerdeki azalmalar %4-%8 artışlarla olurken, bu değer bazik katkılı tuf örneklerinde %2-%6'dır.



## 6. SONUÇLAR

Farklı oranlarda asidik ve bazik tuf katkılarının ve kürün yüksek plastisiteli bentonitin  $C_v$ , şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmadan ortaya çıkan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Katkısız bentonitin kür öncesi  $C_v$  değeri  $0.551 \text{ cm}^2/\text{dk}$  olarak belirlenmiştir. Bu değer asidik tuf katkılı örneklerde  $2.069-2.437 \text{ cm}^2/\text{dk}$  arasında, bazik tuf katkılı örneklerde ise  $1.637-2.356 \text{ cm}^2/\text{dk}$  arasında değişmektedir.
2. Katkılı örneklerin kür öncesi  $C_v$  değerleri katkı oranına bağlı olarak artış göstermektedir. Katkı oranının %5 olduğu durumda  $C_v$  değerlerindeki artış maksimum düzeydedir. Bu katkı oranının aşılması durumunda kür öncesi  $C_v$  değerlerindeki artış azalmaktadır.
3. Katkı türü açısından değerlendirildiğinde, asidik tuf katkılı örneklerin kür öncesi  $C_v$  değerlerinde ortaya çıkan artış, bazik tuf katkılı örneklerden daha fazladır. Katkı oranının %15 olması durumunda ise hem asidik, hem de bazik tuf katkılı örneklerin kür öncesi  $C_v$  değerlerindeki artışın aynı olduğu belirlenmiştir.
4. Katkısız bentonit ile katkılı örneklere uygulanan 28 günlük kür sonrasında, tüm örneklerin  $C_v$  değerlerinde dikkate değer bir artış meydana gelmiştir. Katkısız bentonitin  $C_v$  değeri %146.64 oranında bir artışla  $0.551 \text{ cm}^2/\text{dk}$ 'dan  $1.359 \text{ cm}^2/\text{dk}$ 'ya yükselmiştir.
5. Asidik tuf katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası  $C_v$  değerleri arasında meydana gelen fark çok büyük değildir ve en yüksek artış oranı yaklaşık %13 ile %5 asidik tuf katkılı örnekte meydana gelmiştir. Katkı oranı arttıkça kür öncesi ve sonrası  $C_v$  değerleri arasındaki fark azalmakta ve artış oranı %3 civarına düşmektedir.
6. Bazik tuf katkılı örneklerin öncesi  $C_v$  değerleri ile kür sonrası değerleri arasında meydana gelen fark asidik tuf katkılı örneklere göre çok daha fazladır. Maksimum artışın meydana geldiği örnek %5 bazik tuf katkılı örnektir ve artış oranı ise yaklaşık %39'dur. Bazik tuf katkılı örneklerin kür sonrası  $C_v$  değerlerindeki artış, asidik tuf katkılı örneklerde olduğu gibi katkı oranının artmasıyla azalma göstermektedir.
7. Katkılı örneklerin kür sonrası  $C_v$  değerleri katkısız bentonitin kür öncesi  $C_v$  değerleri ile karşılaştırıldığında çok ciddi artışların olduğu görülmektedir. Nitekim %5 asidik tuf katkılı örnekteki artış %327.59'dur. Bu katkı oranından sonra  $C_v$  değerlerindeki artış azalmakta ve %10 katkı oranına sahip örnekte %342.29'a ulaşmaktadır. Bu katkı oranından sonra  $C_v$  değerlerindeki artış oranı hemen hemen sabit kalmaktadır.
8. Bazik tuf katkılı örneklerin kür sonrası  $C_v$  değerleri katkısız bentonitin kür öncesi  $C_v$  değerleri ile karşılaştırıldığında, meydana gelen artış oranının katkı oranına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. %5 bazik tuf katkılı örnekteki artış oranı %313.79 iken bu oran katkı oranının %20 olması durumunda %342.29'a ulaşmaktadır.

9. Katkısız bentonitin kür öncesi  $C_v$  değerine göre katkılı örneklerin kür sonrası  $C_v$  değerlerinde meydana gelen artışlar katkı türü ve oranı bakımından irdelendiğinde; asidik tuf katkılı örneklerde %10 katkı oranında maksimum artış meydana gelirken, bazik tuf katkılı örneklerde maksimum orana ancak %20 katkı oranında ulaşabilmektedir.
10. Katkı oranının %15 olduğu durumda katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası  $C_v$  değerleri arasındaki fark çok azdır ve  $C_v$  değerleri hemen hemen aynı değerlerdedir.
11. Örneklerin  $C_v$  değerlerindeki değişimler genel olarak değerlendirildiğinde, asidik tuf katkısının kullanılması durumunda optimum katkı oranının %10, bazik tuf katkısı kullanılması durumunda ise %20'dir.
12. Asidik tuf katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası  $C_v$  değerlerinin bazik tuf katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası  $C_v$  değerlerine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek plastisiteli killerin konsolidasyon özelliklerinin iyileştirilmesinde asidik tüflerin bazik tüflere göre daha iyi sonuçlar veren bir katkı maddesi olduğunu göstermektedir.
13. Katkısız bentonitin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa olarak belirlenmiştir. Asidik tuf katkılı örneklerin kür öncesi şişme basıncı 588.42 kPa ile 761.02 kPa arasında değişirken, bazik tuf katkılı örneklerde ise 564.88 kPa ile 761.02 kPa arasındadır.
14. Katkılı örneklerde şişme basıncı değerleri katkı oranına bağlı olarak azalma göstermektedir. Hem asidik, hem de bazik tuf katkılı örneklerde katkı oranının %5 olması durumunda örneklerin kür öncesi şişme basınçlarında meydana gelen azalma aynıdır ve bu azalmada katkı türünün çok etkin olmadığı belirlenmiştir. Bu katkı oranından sonraki oranlarda şişme basınçları azalmakla birlikte meydana gelen azalmalar çok sınırlıdır ve her iki tip katkı içinde bu durum geçerlidir.
15. 28 günlük kürden sonra katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası şişme basınçları irdelendiğinde; hem asidik hem de bazik tuf katkılı örneklerin şişme basınçlarının katkı oranına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Katkılı örneklerin kür öncesine göre kür sonrası şişme basınçlarında meydana gelen bu azalmalar katkı oranına bağlı olarak asidik tuf katkılı örneklerde maksimum %33'e, bazik tuf katkılı örneklerde ise maksimum %16'ya kadar ulaşmaktadır. Asidik tuf katkılı örneklerde meydana gelen azalma oranları bazik tuf katkılı örneklere göre çok daha fazladır.
16. Katkılı örneklerin kür öncesi şişme basıncı değerleri katkısız bentonitin kür öncesi şişme basıncı değerlerine göre önemli ölçüde azalmıştır. Katkı oranına bağlı olarak meydana gelen bu azalmalar asidik ve bazik tuf katkılı örnekler için benzerdir. Nitekim asidik tuf katkılı örneklerin kür öncesi şişme basıncı değerindeki maksimum azalma oranı %42.91 iken, bu değer bazik tuf katkılı örnekte %45.20 olarak belirlenmiştir. Kür öncesinde şişme basıncı değerlerinde meydana gelen bu azalmalar doğrudan katkı oranı ile ilişkilidir.

17. Katkılı örneklerin kür sonrası şişme basınçları katkısız bentonitin kür öncesi şişme basıncı değeri ile karşılaştırıldığında her iki tip katkılı örnekte de önemli azalmalar olduğu belirlenmiştir. Asidik tüf katkılı örneklerde kür sonrası şişme basıncındaki azalma oranı maksimum %61.85 iken bu değer bazik tüf katkılı örneklerde %52.43 olarak belirlenmiştir. Bu azalma oranları katkı oranına bağlı olarak artmaktadır. Ancak, katkı malzemesi olarak asidik tüf kullanılmasının, bazik tüf kullanılmasına göre şişme basıncında %8-11 oranında daha fazla azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.
18. Örneklerin kür öncesi ve sonrası şişme yüzdeleri karşılaştırıldığında, katkı oranına bağlı olarak şişme yüzdelerinin azaldığı, asidik tüf katkılı örneklerde meydana gelen azalmanın bazik tüf katkılı örneklere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Asidik tüf katkılı örnekler kür sonrasında meydana gelen azalma oranı maksimum %44 civarında iken bu değer bazik tüf katkılı örneklerde %35 civarındadır.
19. Katkılı örneklerin kür sonrası şişme yüzdeleri katkısız bentonitin kür öncesi şişme yüzdesi değeri ile karşılaştırıldığında; katkı oranına bağlı olarak şişme yüzdelerinde meydana gelen azalmalar asidik tüf katkılı örneklerde %68.60, bazik tüf katkılı örneklerde ise %62 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, şişme yüzdesinde katkı oranı ile birlikte katkı türünün de önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Katkı malzemesi olarak asidik tüf kullanılmasının bazik tüf kullanılması durumuna göre şişme yüzdesinde %6-16 oranında daha fazla azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.
20. Genel olarak değerlendirildiğinde, kür uygulamasının  $C_v$ , şişme basıncı ve şişme yüzdesi üzerinde çok önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Kür sonrasında örneklerin  $C_v$  değerlerinde dikkate değer artışlar, şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde ise azalmalar belirlenmiştir. Katkı tipi ve oranı açısından değerlendirildiğinde, asidik tüf katkısının bazik tüflere oranla çok daha olumlu sonuçlar vermektedir.  $C_v$  ve şişme basıncında maksimum etkinin ortaya çıktığı katkı oranı hem asidik hem de bazik tüfler için %5'dir. Şişme yüzdesinde ise her iki tip tüfün kullanılması durumunda katkı oranına bağlı olarak şişme yüzdesinin azaldığı belirlenmiştir.
21. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, Elazığ Bölgesi'nde ve yakın çevresinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'na ait bazik karakterli tüfler ile Gümüşhane ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'na ait asidik karakterli tüflerin, killerin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Kolay elde edilebilir, ekonomik ve çevreci malzemeler olması nedeniyle bu tüflerin katkı malzemesi olarak kullanımı, ülke ekonomisi ve çevresel duyarlılığı açısından önem taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abdelkerim, M. ve Mohamed, K. (2013). Cement Stabilization of Compacted Expansive Clay Brief Description of the Studied Clay, *The Online Journal of Science and Technology*, cilt 3(1), ss. 33–38
- Ağan, A., Altınbaş, A.F., Eroğlu, C.İ., Hamzaçebi, S., Aydın, Ü., Leman, Ç. (2017). Trabzon-Rize (Doğu Karadeniz Bölgesi) Metalik Maden Aramaları, *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, ss. 53–65
- Akbulut, A. (1996). Bentonit, MTA Eğitim Serisi-32, Ankara
- Akgül, E. (2006). *Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aksoy, H.S., Yılmaz, M. ve Akarsu, E.E. (2008). Stabilization of a Clayey Soil with Tunçbilek Fly Ash, *Fırat Üniversitesi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, cilt 6(3), ss. 88–92
- Alkaya, D. (2002). *Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi*, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Alkaya, D., İnanlı, G., Alyanak, İ., Erken, A., Çobanoğlu, İ. (2006). Yatağan Termik Santral Uçucu Küllerinin Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi KTÜ*, Trabzon
- Al-Rawas, A.A., Hago, A.W. ve Al-Sarmi, H. (2005). Effect of Lime, Cement and Artificial Pozzolan on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman, *Building & Environment*, cilt 40(5), ss. 681–687
- Al-Swaidani, A.M, Hammoud, I. ve Meziab, A. (2016). Effect of Adding Natural Pozzolana on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Clayey Soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, cilt 8(5), ss. 714–725
- Angın, Z. ve Angın, A. (2005). Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, *Geoteknik Sempozyumu*, Adana
- Asada, H., Suzuki K., Tsuji, K., Tezuka, M., Kishida, T., (1995). Evaluation of Shear Strength and Liquefaction Potential of a Fly Ash Sedimented Under Water, *Earthquake Geotechnical Engineering*, Balkema, Rotterdam
- Asgari, M.R., Dezfouli, A.B. ve Bayat, M. (2015). Experimental Study on Stabilization of a Low Plasticity Clayey Soil With Cement/Lime, *Arabian Journal of Geosciences*, cilt 8(3), ss. 1439–1452
- Aslan Topçuoğlu, Y. (2020). *Farklı Katkı Maddelerinin Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerindeki Etkisi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aslan Topçuoğlu, Y. ve Gürocak, Z. (2019). Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu ve Dokusal Değişimler: Bir Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışması, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 9, ss. 588–599
- ASTM C-618. (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA
- ASTM D 2435/D2435M. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using, ASTM International, West Conshohocken, PA
- ASTM D 4546. (2008). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA
- ASTM D 698. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA
- Attoh-Okine, N.O. (1995). Lime Treatment of Laterite Soils and Gravels – Revisited, *Construction and Building Materials*, cilt 9(5), ss. 283–287

- Avcı, B.S. (2009). *Soda ve MgO İle Aktiflendirilmiş Ara tip Bentonitlerin Sondaj ve Döküm Bentoniti Karakteristiklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aytekin, M. (2000). *DeneySEL Zemin Mekaniği*, Akademi Yayınevi, Trabzon
- Aytekin, M. (2002). *Zeminlerin Değirmen Artığı Malzemelerle Stabilizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aytekin, S. (2009). *Uçucu Küllerin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Azadegan, O.A., Jafari, S.H. ve Li, J. (2012). Compaction Characteristics and Mechanical Properties of Lime/Cement Treated Granular Soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, cilt 17, ss. 2275–2284
- Bahadori, H., Hasheminezhad, A. ve Taghizadeh, F. (2019). Experimental Study on Marl Soil Stabilization using Natural Pozzolans, *Journal of Materials in Civil Engineering*, cilt 31(2), ss. 1–10
- Bandini, P. ve Sathiskumar, S. (2009). Effects of Silt Content and Void Ratio on the Saturated Hydraulic Conductivity and Compressibility of Sand-Silt Mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, cilt 12(135), ss. 1976–1980
- Baykal, G., ve Döven, A. (1996). Uçucu Külün Akıcı Dolgu Olarak Geoteknik Uygulamaları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., Schanz, T. (2014). Laboratory Study on the Hydraulic Conductivity and Pore Pressure of Sand-Silt Mixtures, *Marine Georesources and Geotechnology*, cilt 32(2), ss. 106-122
- Bell, F.G. (1996). Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, *Elsevier Science*, cilt 42(4), ss. 223–237
- Bergaya, F. ve Lagaly, G. (2006). General Introduction: Clays, Clay Minerals and Clay Science, *Developments in Clay Science*, cilt(1), ss.1–18
- Bignon, J. (1990). Health Related Effects of Phyllosilicates, *Springer*, Berlin
- Bilgen, G., Kavak, A. ve Çapar, Ö.F. (2012). Düşük Plastisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Cürufunun Kullanılması ve Kireç ile Etkileşiminin Araştırılması, *Karaelmas Science and Engineering Journal*, cilt 2(2), ss. 30–38
- Boardman, D.I., Glendinning, S. ve Rogers, C.F.D. (2001). Development of Stabilization and Solidification in Lime-clay Mixes, *Geotechnique*, cilt 51(6), ss. 533–543
- Bowles, J.E., 1986. *Engineer Properties of Soils and Their Measurement*, McGraw-Hill, Newyork, ss. 624
- Bulut, Ü. (2007). *Perlitin Puzolanik Aktivitesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Cernica, J. (1995). *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*, Wiley, New York
- Cheshomi, A., Eshaghi, A. ve Haanpour, J. (2017). Effect of Lime and Fly Ash on Swelling Percentage and Atterberg Limits of Sulfate-Bearing Clay, *Applied Clay Science*, cilt 135, ss. 190–198
- Chew, S.H., Kamruzzaman, A.H.M. ve Lee, F.H. (2004). Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, cilt 130(7), ss. 696–706
- Chibowski, E. (2011). Flocculation and Dispersion Phenomena in Soils. *Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series*
- Choy, J.H., Choi, S.J., Oh, J.M., Park, T. (2007). Clay Minerals and Layered Double Hydroxides for Novel Biological Applications, *Applied Clay Science*, cilt 36(1/3), ss.122–132

- Chu, S.C. ve Kao, H.S. (1993). Study of Engineering Properties of a Clay Modified by Fly Ash and Slag, *Fly Ash for Soil Improvement*, cilt 36, ss. 89–99
- Coulomb, C. A. (1776). An Attempt to Apply the Rules of Maxima and Minima to Several Problems of Stability Related to Architecture, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, cilt 7, ss. 343-382
- Cömert, A.T., Fırat, S., Yılmaz, G., Summer, M. (2010). Ucucu Kül, Mermer Tozu ve Atık Kumun Yol Alt Temel Dolgusunda Kullanımı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi İstanbul Kültür Üniversitesi*, İstanbul
- Cuisinier, O., Auriol, J-C., Le Borgne, T. and Deneele, D. (2011). Microstructure and Hydraulic Conductivity of A Compacted Lime-Treated Soil, *Engineering Geology*, cilt 123(3), ss. 187-193
- Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Çimen, Ö. ve Coşan, F.Ş. (2019). Volkanik Tüf ve Amorf Silikanın Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, cilt 7(3), ss. 459–466
- Çimen, Ö. ve Dereli, B. (2014). Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Mikronize Kolemanitin Etkisi, *Journal of Technical Sciences*, ss. 12–17
- Çimen, Ö., Dereli, B., Yıldırım, F., Şevkatlioğlu, Ö.F., Eralp, A. (2013). Manisa Kula Yöresi Volkanik Tüfünün Yüksek Plastisiteli Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi, *5. Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana
- Çobanoğlu, İ., Haldenbilen, S., ve Çelik, S. B. (2012). Dolguda Sıkışma Performansının Kil ve Uçucu Kül Katkısı ile Artırılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi*, Isparta
- Çokça, E. ve Toktaş, F. (2002). Dispersif Bir Kilin C Tipi Uçucu Kül ile Stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- Çoruh, S., Eleveli, S., Şenel, G., Ergun, O. (2010). Adsorption of Silver from Aqueous Solution on to Fly Ash and Phosphogypsum using Full Factorial Design, *Environmental Progre & Sustainable Energy*, cilt 30(4), ss. 609–619
- Daoud, Y. ve Robert, M. (1992). Influence of Particle Size and Clay Organization on Hydraulic Conductivity and Moisture Retention of Clays from Saline Soils, *Appl. Clay Sciences*, cilt 6, ss. 293–299
- Das, B.M., (1998). *Principles of Geotechnical Engineering*, California State University, Sacramento
- Das, B.M., (2000). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, Thomson, Canada
- Dempsey, B.J. and Thompson, M.R. (1968). *Durability Properties of Lime-soil Mixtures*, Highway Research Record No. 235, National Research Council, Washington D.C.
- Di Giuseppe, P., Agostini, S., Lustrino, M., Karaoğlu, Ö., Savaşçın, M.Y., Manetti, P., Ersoy, Y. (2018). Transition from Compréion to Strike-Slip Tectonics Revealed by Miocene Pleistocene Volcanism West of the Karlıova Triple Junction (East Anatolia), *Journal of Petrology*, cilt 58(10), ss. 2055–2087
- Doru, M.H. (2014). *Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ene, E. ve Okagbue, C. (2009). Some Basic Geotechnical Properties of Expansive Soil Modified using Pyroclastic Dust, *Engineering Geology*, cilt 107(1/2), ss. 61–65
- Ersan, H. (1996). *Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerindeki Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Fang, Y.H. (1990). *Foundation Engineering Handbook*, Kluwer Academic Publishers Group Disturbition Centre The Netherlands

- Feng, M. (1995). *A Study of Swelling Preure using Various Laboratory Testing Methods*, Research Report, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
- Ferguson, G. (1993). Use of Self-Cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent: Fly Ash for Soil Improvement, *Geotechnical Special Publication*, cilt 36, New York
- Fındık, S. (2005). *Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Floody, M.C., Theng, B.K.G., Reyes, P., Mora, M.L. (2009). Natural Nanoclays: Applications and Future Trends – A Chilean Perspective, *Clay Minerals*, cilt 44(2), ss. 161–176
- Fredlund, D.G., Hasan, J.U. ve Filson, H., 1980. The Prediction of Total Heave, *4th International Conference on Expansive Soils*, Denver
- Gedikoğlu, A. (1978). *Harşit Granit Karmaşığı ve Çevre Kayaçları*, Doçentlik Tezi, K.T.Ü. Yer Bilimleri Fakültesi, Trabzon
- Geiman, C.M. (2005). *Stabilization Of Soft Clay Subgrades In Virginia Phase I Laboratory Study*. Virginia Polytechnic Institute and State University
- Genç, D., (2008). *Zemin mekaniği ve temeller*, Jeoloji Mühendisleri Odası yayımı, No: 100
- Genç, S. (2009). *Şişen Zeminler ve Bentonit – Kaolin Karışımlarının Şişme Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Gomes, C.D.S.F. ve Silva, J.B.P. (2007). Minerals and Clay Minerals in Medical Geology, *Applied Clay Science*, cilt 36(1-3), ss. 4–21
- Goodarzi, A.R., Goodarzi, S. ve Akbari, H.R. (2015). Aeing Geo-Mechanical and Micro-Structural Performance of Modified Expansive Clayey Soil by Silica Fume as Industrial Waste, *Iranian Journal of Science And Technology-Transactions of Civil Engineering*, cilt 39, ss. 333–350
- Gray, H. ve Yen-Kuang Lin. (1972). Engineering Properties of Compacted Fly Ash, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, cilt 98(4), ss. 361–380
- Grim, R.E. (1968). *Clay mineralogy*, McGraw-Hill publishing, New York
- Gülibrahimoğlu, G. (1985). *Trabzon Maçka Güneyi Maden Jeolojisi Raporu* No: 1850, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara
- Güven, İ.H. (1993). *Doğu Pontidler'in Jeolojisi ve 1/250 000 Ölçekli Kompiasyonu*, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K. (2011). Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, cilt 29(5), ss. 759–769
- Hastuty, I.P., Roesyanto ve Ramadhany, G. (2017). The Stability of Clay Using Volcanic Ash of Mount Sinabung North Sumatera and Sugarcane Bagae Ash with CBR and UCT Value, *MATEC Web of Conferences*, Taizchung, Taiwan
- Head, K.H. (1982). Manual of Soil Laboratory Testing, Permeability, Shear Strength and Compreibility Tests, *ELE Pentec Press*, London
- Hilf, J. (1991). *Compacted fill*, in: H. Fang (Ed.), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, NewYork
- Holtz, R.D. ve Kovacs, W.D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, NJ: Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs
- Holtz, W.G. ve Gibbs, H.J. (1956). *Engineering Properties of Expansive Clays: Transactions*, ASCE 121, ss. 641-677

- Hossain, K.M.A. ve Mol, L. (2011). Some Engineering Properties of Stabilized Clayey Soils Incorporating Natural Pozzolans and Industrial Wastes, *Construction and Building Materials*, cilt. 25(8), ss. 3495–3501
- Huggett, J.M. (2015). Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, *Clay Minerals*, Elsevier press
- Imbabi, M.S., Carrigan, C. ve McKenna, S. (2012). Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology, *International Journal of Sustainable Built Environment*, cilt 1(2), ss. 194–216
- Ismadji, S., Soetaredjo, F.E. ve Ayucitra, A. (2015). *Clay Materials for Environmental Remediation*, Springer Briefs in Green Chemistry for Sustainability, Springer International Publishing
- İnan, G., Sezer, A., Ramyar, K. ve Yılmaz, R. (2005). *Değişik Uçucu Küllerin Yüksek Plastisiteli Kilin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi*, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 20(1), ss. 19-25
- İpekoğlu, B. ve Kurşun, İ. (1997). Türkiye Bentonit Potansiyeline Genel Bir Bakış, 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir
- Joshi, R.C., ve Nagaraj, T.S. (1987). Fly Ash Utilization for Soil Stabilization, *Balkema Rotterdam: Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks*, ss.77–93
- Juang, C.H., ve Holtz, R.D. (1986). Fabric, Pore Size Distribution, and Permeability of Sandy Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, cilt 112(9), ss. 855-868
- Kahafaji, A.W.N. ve Andersland, O.B. (1992). *Geotechnical Engineering and Soil Testing*, Oxford University Press, New York
- Kalay, E. (2010). *Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu ve Kirecin Kullanılması*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Kalkan, E. ve Akbulut, S. (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, swelling preure and compreive strength of natural clay liners, *Engineering Geology*, cilt 73(1/2), ss. 145–156
- Kavas, T. ve Çelik, M.Y. (2001). Tüflerinin Çimento Sanayinde Tras Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Dergisi*, cilt 40(2), ss. 39–46
- Kayabalı, K. (1997). Engineering Aspects af a Novel Landfill Liner Material: Bentonite-Amended Natural Zeolite. *Engineering Geology*, cilt 46 (2), 105-114
- Kayabalı, K. (2002). *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*, Gazi Kitap Evi, Ankara
- Keskin, S. ve Çimen, Ö. (1997). Killi Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesinde Pomza Kullanımının Araştırılması, *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, Isparta
- Keskin, S.N. (1993). *İstanbul Neojen Kilinin Şişme Davranışına, Ön Konsolidasyonun, Mineralojik Özelliklerin ve Çevresel Faktörlerin Etkisi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü
- Keskin, S.N., Yıldırım, H. ve Ansal, M.A., (1992). Killi Zeminlerde Yanal Şişme Davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul
- Kılıç, R., Küçükali, Ö. ve Ulaş, K. (2015). Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, cilt 75(2), ss. 735–744
- Koçu, N. (1997). *Konya Çevresindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi ve Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Konta, J. (1995). Clay and Man: Clay Raw Materials in the Service of Man, *Applied Clay Science*, cilt 10(4), ss. 275–335

- Korkmaz, A. (1993). Tonya-Düzköy (GB Trabzon) Yöresinin Stratigrafisi, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, Cilt 36, 151-158
- Kürüm, S. ve Tanyıldızı, Ö. (2017). Geochemical and Sr-Nd Isotopic Characteristics of Upper Cretaceous (Calc-alkaline) and Miocene (Alkaline) Volcanic Rocks: Elazığ, Eastern Taurides, Turkey, *Journal of African Earth Sciences*, cilt 134, ss. 332–344
- Lakshmikantha, H. ve Sivapullaiah, P.V. (2006). Relative Performance of Lime Stabilized Amended Clay Liners in Different Pore Fluids, *Geotechnical and Geological Engineering*, cilt 24(5), ss. 1425–1448
- Lee, S.W. ve Dutto, U. (1987). Improved Resilient Modulus Realized with Waste Products, *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE Publishing
- Lin, B., Cerato, A.B., Andrew, S.M., Madden, M.E.E. (2013). Effect of Fly Ash on the Behavior of Expansive Soils: Microscopic Analysis, *Environmental and Engineering Geoscience*, cilt 19(1), ss. 85–94
- Little, D.N., Scullion, T., Kota, P.B.V.S., Bhuiyan, J. (1995). Guidelines for Mixture Design and Thickness Design for Stabilized Bases and Subgrades, Texas Transportation Institute Research Report 1287-3F, Austin, Texas
- Locat, J., Berube, M.A. ve Choquette, M. (1990). Laboratory Investigations on the Lime Stabilization of Sensitive Clays: Shear Strength Development, *Canadian Geotechnical Journal*, cilt 27(3), ss. 294–304
- Locat, J., Trembaly, H. ve Leroueil, S. (1996). Mechanical and Hydraulic Behaviour of a Soft Inorganic Clay Treated with Lime, *Canadian Geotechnical Journal*, cilt 33(4), ss. 654–669
- Mahamedi, A., ve Khemissa, M. (2013). Etude de L'évolutivité D'une Argile Expansive Traitée Aux Liants Hydrauliques, *In Communication à la 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique (3ème CMIG 13)*, Algeria
- Mallela, J., Harold Von Quintus, P., Smith, K.L., Consultants, E. (2004). *Consideration of Limestabilized Layers in Mechanistic-empirical Pavement Design*, Arlington, Virginia
- Matyas, E.L., (1969). Some Properties of Two Expansive Clays from Western Canada, *2nd International Conference on Expansive Clay Soils*, Texas A&M University, College Station, ss. 263-278
- Mc Bride, M.B. (1989). Surface Chemistry of Soil Minerals, *Minerals in Soil Environments*, Soil Science Society of America, Wisconsin
- Mesri, G. ve Olson, R.E. (1971). Consolidation Characteristics of Montmorillonite, *Geotechnique*, cilt 21(4), ss. 341–352
- Mfinanga, D.A. ve Kamuhabwa, M.L. (2008). Use of natural Pozzolan in Stabilising Lightweight Volcanic Aggregates for Roadbase Construction, *International Journal of Pavement Engineering*, cilt 9(3), ss. 189–201
- Mishra, A.K., Ohtsubo, M., Li, L.Y., Higashi, T. (2010). Influence of the Bentonite on the Consolidation Behaviour of Soil-Bentonite Mixtures, *Carbonates and Evaporites*, cilt 25(1), ss. 43–49
- Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behaviour*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- Mohammed Ali, M. (2012). *Kireç ve Uçucu Kul İle Stabilize Edilen Şişen Killerde Esneklik Modülü Tayini*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Moore, D.M. ve Reynolds, R. C. (1997). X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, *Oxford University Pre*, New York, ss. 378
- Murray, H.H. (2006). Structure and Composition of the Clay Minerals and Their Physical and Chemical Properties, *Developments in clay science*, cilt 2, ss. 7-31

- Murthy, V.N.S. (2002). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, CRC Press, New York
- Nelson, J. ve Miller, D.J. (1992). *Expansive Soils Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, John Wiley & Sons, New York
- Newman, D.J. ve Cragg, G.M. (2007). Natural Products as Sources of New Drugs over the Last 25 Years, *Journal of Natural Products*, cilt 70(3), ss. 461–477
- Okucu, A. (1998). *Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Önem, Y. (2000). *Sanayi Madenleri*, Kozan Ofset, Ankara
- Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Özaydın, K. (2000). *Zemin Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Phani Kumar, B.R. ve Sharma, R.S. (2004). Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, cilt 130(7), ss. 764–767
- Porter, A.A. ve Nelson, J.D. (1980). Strain Controlled Testing of Expansive Soils, *In Expansive Soils*, ss. 34–44
- Prashanth, J.P., Sivapullaiah, P.V. ve Sridharan, A. (2001). Pozzolanic Fly Ash as A Hydraulic Barrier in Land Fills, *Engineering Geology*, cilt 60(1/4), ss. 245-252
- Puppala, A.J., Ramakrishna, A.M. ve Hoyos, L.R. (2003). Resilient Moduli of Treated Clays from Repeated Load Triaxial Test, *Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board*, cilt 1821(1), ss. 68–74
- Rajasekaran, G. ve Rao, S.N. (1997). The Microstructure of Lime-Stabilized Marine Clay, *Ocean Engineering*, cilt 29(5), 545–559
- Ramadas, T., Kumar, N.D. ve Yesuratnam, G. (2011). Geotechnical Characteristics of Three Expansive Soils Treated with Lime and Fly ash, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, cilt 4(6), ss. 46–49
- Rao, S.M. ve Shivananda, P. (2005). Compreibility Behaviour of Lime-Stabilized Clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, cilt 23(3), ss. 309–319
- Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H., Prencke, E. (2002). Specific Surface: Determination and Relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, cilt 39(1), ss. 233–241
- Scheidegger, A.E. (1974). *The Physics of Flow through Porous Media*. University of Toronto Press, Toronto
- Seed, H.B., Chan, C.K. ve Lee, C.E. (1962). Resilience Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements, *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Supplement University of Michigan
- Sevencan, U. (2009). *Polipropilen Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Ankara Kilinin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Sherwood, P. (1994). *Soil Stabilization with Cement and Lime*, Her Majesty Stationary Office, London
- Shuai, F. (1996). *Simulation of Swelling Preure Measurements on Expansive Soils*, Doctoral Thesis, University of Saskatchewan
- Shuai, F. ve Fredlund, D.G. (1998). Model for the Simulation of Swelling-Preure Measurements on Expansive Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, cilt 35(1), ss. 96–114
- Sivakugan, N. (2001). Clay Minaralogy. <http://www.geoengineer.org/files/Clay>

- Skempton, A.W. (1961). Horizontal Strees in an Over-Consolidated Eocene Clay, *The 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris
- Slamova, R., Trckova, M., Vondruskova, H., Zraly, Z., Pavlik, I. (2011). Clay Minerals on Animal Nutrition. *Applied Clay Science*, cilt 51(4), ss. 395–398
- Snethen, D.R. (1984). Evaluation of Expedient Methods for Identification and Claification of Potentially Expansive Soils, *In XV International Conference on Expansive Soils*, Australia
- Sridharan, A. ve Choudhury, D. (2002). Swelling Pressure of Sodium Montmorillonites, *Geotechnique*, Cilt 52(6), ss. 459-462
- Sridharan, A., Rao, A.S. ve Sivapullaiah, P.V. (1986). Swelling Pressure of Clays, *Geotechnical Testing Journal*, cilt 9(1), ss. 24–33
- Tan, O. ve İyisan, R. (1996). Uçucu Kul ile Zemin Stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Tao, T.W. ve Lee, Y. (2001). Consolidation Behaviour of a Soft Mud Treated with Small Cement Content, *Engineering Geology*, cilt 59, ss. 327–335
- Taşcı, G. (2011). *Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir OsmanGazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Taylor, D.W. (1942). Research on Consolidation of Clays, *MIT publication*, Serial 82
- Tedesco, D.V. (2006). *Hydro-mechanical Behaviour of Lime-Stabilised Soils*, University of Caino
- Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, F. Deuticke
- Thomas, P.J. (1998). *Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University
- Thompson, A. G. (1969). *Optimum Damping in a Randomly Excited Non-Linear Suspension*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, cilt 184(1), ss. 169–184
- Thompson, M. ve Dempsey, B. (1969). *Autogenous Healing of Lime-Soil Mixtures*. Highway Research Board, 1-7
- Tremblay, H. ve Leroueil, S. ve Locat, J. (2001). Mechanical İmprovement and Vertical Yield Stress Prediction of Clayey Soils from Eastern Canada Treated With Lime Or Cement, *Canadian Geotechnical Journal*, cilt 38(3), ss. 567–579
- TS EN 197–1. (2012). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara
- TS EN 25 (2008). Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara
- URL 1 <http://1.https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/bentonit>
- Van Olphen, H. (1963). *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, John Wiley & Sons, New York
- Varma, A. ve Panda, S. (2010). Role of Clay Minerals in Shale Gas Exploration-An Evaluation, *Geological and Technological Facets of CBM, Shale Gas, Energy Resources and CO<sub>2</sub> Sequestration*, Allied Publishers Private Limited, New Delhi
- Voottipruex, P. ve Jamsawang, P. (2014). Characteristics of Expansive Soils İmproved with Cement and Fly Ash in Northern Thailand. *Geomechanics and Engineering*, cilt 6(5), ss. 437–453
- Wang, D., Abriak, N.E., Zentar, R., Chen, W. (2013). Effect of Lime Treatment on Geotechnical Properties of Dunkirk Sediments in France, *Road Materials and Pavement Design*, cilt 14(3), ss. 485–503

- Wild, S., Kinuthia, J., Robinson, R., Humphreys, I. (1996). Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength and Swelling Properties of Lime-Stabilized Kaolinite in the Presence of Sulphates, *Clay Minerals*, cilt 31(3), ss. 423–433
- Yalçınalp, B. (1992). *Güzelyayla (Maçka-Trabzon) Porfiri Cu-Mo Cevherleşmesinin Jeolojik Yerleşimi ve Jeokimyası*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yarbaşı, N., Kalkan, E. ve Akbulut, S. (2006). Katı Atıklarla Stabilize Edilmiş Zeminlerin Donma-Çözülme Ve Dinamik Davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
- Yong, R.N. ve Warkentin, B.P. (1975). Soil Properties and Behaviour, *Elsevier Scientific Publishing Co.*, New York
- Zhu, H. ve Njuguna, J. (2014). Nano-layered Silicates/Clay Minerals: Uses and Effects on Health, *Health and Environmental Safety of Nanomaterials: Polymer Nanocomposites and Other Materials Containing Nanoparticles*, ss. 133–146



# ÖZGEÇMİŞ

Nevin KÜÇÜKASLAN

[Redacted]

---

[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]

[Redacted]

---

[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]

[Redacted]

---

[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]

[Redacted]

---

[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]

[Redacted]

---

[Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]  
[Redacted] [Redacted]