



**FARKLI HAVZALARDAN ALINAN SULARIN  
KİLLERİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE  
OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Zeynep ERKMEN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Geoteknik Bilim Dalı**

**Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK**

**2019**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI HAVZALARDAN ALINAN SULARIN  
KİLLERİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE  
OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Zeynep ERKMEN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
TEZ ONAY FORMU



**FARKLI HAVZALARDAN ALINAN SULARIN KİLLERİN BAZI  
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK danışmanlığında, Zeynep ERKMEN tarafından hazırlanan bu çalışma 14/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3./3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Semet ÇELİK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şevki ÖZTÜRK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 30.05.2019 tarih ve 23 / 18 nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **FARKLI HAVZALARDAN ALINAN SULARIN KİLLERİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Zeynep ERKMEN

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Killerin mühendislik davranışı, içerdikleri su miktarına göre farklılık göstermektedir. Bu değişiklikler killeri meydana getiren minerallerin kristal yapısına ve boşluklardaki suyun kimyasal özelliklerine bağlıdır. Yapılan bu çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan farklı havzalardaki (Fırat Havzası, Çoruh Havzası, Aras Havzası) suların Erzurum'dan temin edilen yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killerin bazı geoteknik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla killer üzerinde çeşme suyu ile gerçekleştirilen kıvam limitleri, standart proktor ve serbest basınç deney sonuçları, Fırat Havzası'ndan, Çoruh Havzası'ndan ve Aras Havzası'ndan alınan sular ile gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İlaveten farklı havza sularının killerin şişme potansiyeli üzerindeki etkileri niteliksel yöntemle kıvam limitlerine bağlı olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler, suların kimyasal içeriğine bağlı olarak yüksek ve düşük plastisiteli killerin, kıvam, kompaksiyon ve şişme özelliklerinin belirgin bir şekilde değiştiğini, serbest basınç mukavemetlerinde ise belirgin bir değişim meydana gelmediğini göstermiştir.

**2019, 56 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Kil, farklı havza suları, kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri, serbest basınç mukavemeti

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WATER COLLECTED FROM DIFFERENT BASINS ON SOME GEOTECHNICAL PROPERTIES OF CLAYS**

Zeynep ERKMEN

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering  
Geotechnical Science

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Engineering behaviour of clays differs related to the amount of water they consist. Varieties related to the amount of water depend on the crystal structure of minerals composing clays and chemical properties of water in voids. In this study, the effects of water collected from different basins (Euphrates Valley, Coruh Basin, and Aras Basin) in the Eastern Anatolia on the geotechnical properties of the clay with high and low plasticity taken from Erzurum have been analysed. For this purpose, the consistency limits, standard proctor and unconfined compressive strength tests results of clays samples prepared with tap waters have been compared with the results of the clay samples with waters taken from Euphrates Valley, Coruh Basin, and Aras Basin. Additionally, the effects of different basin waters on the swelling potential of clays were determined by the qualitative method depending on the consistency limits. The test results showed that, the consistency properties, compaction parameters, and swelling properties of clays have been changed according to the chemical contents of water. However, not much of a change has been observed in the unconfined compressive strenght values.

**2019, 56 pages**

**Keywords:** Clay, different basin waters, consistency limits, compaction parameters, unconfined compressive strength

## **TEŞEKKÜR**

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamındaki tüm deneyler, Devlet Su İşleri 8. Bölge Müdürlüğü Zemin Mekaniği Laboratuvarlarında yapılmıştır. Bu kapsamda, laboratuvar çalışanlarına, Ziraat Fakültesi Toprak Bölümü Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Mustafa CANBOLAT'a, Sayın Jeoloji Mühendisi Mustafa Fatih GÜNEŞ'e, Bilgisayar Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdür Yardımcısı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ömer ARPACIK'a ve Dr. Öğr. Üyesi Pınar TOSUN TAŞAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

**Zeynep ERKMEN**

**Nisan, 2019**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖZET.....                                                      | i         |
| ABSTRACT .....                                                 | ii        |
| TEŞEKKÜR.....                                                  | iii       |
| SİMGELER ve KISATMALAR DİZİNİ .....                            | vi        |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                           | vii       |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                        | ix        |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                           | <b>1</b>  |
| 1.1. Amaç ve Kapsam.....                                       | 1         |
| 1.2. Kaynak Özetleri.....                                      | 1         |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>                               | <b>7</b>  |
| 2.1. Kil Minerallerinin Oluşumu ve Yapısı .....                | 7         |
| 2.2. Killerin Sınıflandırılması.....                           | 10        |
| 2.3. Şişme Mekanizması ve Şişmeyi Etkileyen Faktörler .....    | 15        |
| 2.3.1. Kil –su etkileşimi.....                                 | 15        |
| 2.3.2. Killi zeminlerde şişme özelliğinin tanımlanması .....   | 16        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                              | <b>18</b> |
| 3.1. Materyal.....                                             | 18        |
| 3.1.1. Kil zeminler .....                                      | 18        |
| 3.1.2. Deneylerde kullanılan sular .....                       | 20        |
| 3.2. Yöntem .....                                              | 24        |
| 3.2.1. Özgül Ağırlık Deneyi .....                              | 25        |
| 3.2.2. Elek analizi deneyi .....                               | 26        |
| 3.2.3. Hidrometre analizi .....                                | 26        |
| 3.2.4. Kıvam limitleri deneyleri .....                         | 27        |
| 3.2.5. Standart proktor deneyi .....                           | 30        |
| 3.2.6. Serbest basınç deneyi .....                             | 32        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>                 | <b>34</b> |
| 4.1. Elek Analizi ve Hidrometre Analizi Deneyi Sonuçları ..... | 34        |
| 4.2. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları .....                     | 36        |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| 4.3. Standart Proktor Deneyi Sonuçları..... | 41        |
| 4.4. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....  | 46        |
| 4.5. Şişme Dereceleri.....                  | 49        |
| <b>5. SONUÇLAR.....</b>                     | <b>52</b> |
| KAYNAKÇA.....                               | 55        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                              | 57        |



## SİMGELER ve KISATMALAR DİZİNİ

|                 |                                             |
|-----------------|---------------------------------------------|
| $A_f$           | Numunenin düzeltilmiş alan değeri           |
| CH              | Yüksek plastisiteli kil                     |
| CL              | Düşük plastisiteli kil                      |
| $c_u$           | Konsolidasyonsuz-drenajsız kohezyon         |
| $G_s$           | Zemin danelerinin özgül ağırlığı            |
| $I_p$           | Plastisite indisi                           |
| KOI             | Kimyasal oksijen ihtiyacı                   |
| M               | Kütle                                       |
| MH              | Yüksek plastisiteli silt                    |
| ML              | Düşük plastisiteli silt                     |
| pH              | Bir sıvının asitlik ya da bazlık derecesi   |
| $P_{max}$       | Numunenin kırıldığı en yüksek basınç değeri |
| $q_u$           | Serbest basınç mukavemeti                   |
| USCS            | Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi  |
| w               | Su muhtevası                                |
| $w_L$           | Likit limit                                 |
| $w_{opt}$       | Optimum su muhtevası                        |
| $w_p$           | Plastik limit                               |
| XRD             | X ışını difraksiyonu analizi                |
| $\gamma_{kmax}$ | Maksimum kuru birim hacim ağırlık           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Killeşme akış diyagramı .....                                                                               | 8  |
| Şekil 2.2. Değişik kil minerallerinin yapısı .....                                                                     | 9  |
| Şekil 2.3. Killerin şematik gösterimi .....                                                                            | 10 |
| Şekil 2.4. Montmorillonit mineral grubu .....                                                                          | 12 |
| Şekil 2.5. İllit mineral grubu .....                                                                                   | 13 |
| Şekil 2.6. Kaolinit mineral grubu .....                                                                                | 14 |
| Şekil 2.7. Kil mineralinin difüz (elektriksel) çift tabaka özelliği .....                                              | 16 |
| Şekil 3.1. Pehlivanlı Göleti'nin uydu görüntüsü .....                                                                  | 18 |
| Şekil 3.2. Köşk Göleti'nin uydu görüntüsü .....                                                                        | 19 |
| Şekil 3.3. Kil numuneleri .....                                                                                        | 19 |
| Şekil 3.4. Aras Havzası' nın uydu görüntüsü .....                                                                      | 21 |
| Şekil 3.5. Çoruh Havzası'nın uydu görüntüsü .....                                                                      | 21 |
| Şekil 3.6. Fırat Havzası'nın uydu görüntüsü .....                                                                      | 22 |
| Şekil 3.7. Laboratuvara getirilen sular .....                                                                          | 22 |
| Şekil 3.8. Etüvde kurutulan kil numuneler .....                                                                        | 25 |
| Şekil 3.9. Casagrande deney aleti .....                                                                                | 28 |
| Şekil 3.10. Plastik limit deney numuneleri .....                                                                       | 29 |
| Şekil 3.11. Plastisite kartı .....                                                                                     | 30 |
| Şekil 3.12. Kompaksiyon deney aleti .....                                                                              | 31 |
| Şekil 4.1. Pehlivanlı Göleti kilinin granülometri eğrisi .....                                                         | 34 |
| Şekil 4.2. Köşk Göleti kilinin granülometri eğrisi .....                                                               | 35 |
| Şekil 4.3. Yüksek ve düşük plastisiteli kilin likit limitine farklı suların etkisi .....                               | 37 |
| Şekil 4.4. Yüksek ve düşük plastisiteli kilin plastik limitine farklı suların etkisi .....                             | 38 |
| Şekil 4.5. Yüksek ve düşük plastisiteli kilin plastisite indisine farklı suların etkisi .....                          | 38 |
| Şekil 4.6. Farklı sular etkisi ile CH kilinin zemin sınıfında meydana gelen değişim .....                              | 39 |
| Şekil 4.7. Farklı sular etkisi ile CL kilinin zemin sınıfında meydana gelen değişim .....                              | 39 |
| Şekil 4.8. CH kiline farklı sularla yapılan standart proktor deneyi sonucunda çizilmiş olan kompaksiyon eğrileri ..... | 42 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.9.</b> CL kiline farklı sularla yapılan standart proktor deneyi sonucunda çizilmiş olan kompaksiyon eğrileri ..... | 43 |
| <b>Şekil 4.10.</b> CH kili optimum su muhtevasına farklı suların etkisi .....                                                 | 44 |
| <b>Şekil 4.11.</b> CH kili maksimum kuru birim hacim ağırlığına farklı suların etkisi .....                                   | 44 |
| <b>Şekil 4.12.</b> CL kili optimum su muhtevasına farklı suların etkisi .....                                                 | 45 |
| <b>Şekil 4.13.</b> CL kili maksimum kuru birim hacim ağırlığına farklı suların etkisi.....                                    | 45 |
| <b>Şekil 4.14.</b> CH kili için farklı sular ile elde edilmiş gerilme-birim deformasyon eğrileri .....                        | 47 |
| <b>Şekil 4.15.</b> CL kili için farklı sular ile elde edilmiş gerilme- birim deformasyon eğrileri .....                       | 47 |
| <b>Şekil 4.16.</b> CH kilinin serbest basınç mukavemetine farklı suların etkisi .....                                         | 48 |
| <b>Şekil 4.17.</b> CL kilinin serbest basınç mukavemetine farklı suların etkisi.....                                          | 49 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Kil minerallerinin özellikleri .....                                        | 11 |
| Çizelge 2.2. Zeminin fiziksel özellik verilerine dayalı şişen zemin sınıflaması.....     | 17 |
| Çizelge 2.3. Şişme potansiyelinin plastisite indisine bağlı olarak tahmini.....          | 17 |
| Çizelge 3.1. Killerin bazı özellikleri .....                                             | 20 |
| Çizelge 3.2. Kil minerallerinin içerikleri .....                                         | 20 |
| Çizelge 3.3. Suların anyon analiz sonuçları.....                                         | 23 |
| Çizelge 3.4. Suların katyon analiz sonuçları.....                                        | 23 |
| Çizelge 3.5. Suların iletkenlik, pH ve KOI analiz sonuçları.....                         | 24 |
| Çizelge 4.1. Pehlivanlı Göleti kilinin elek analizi ve hidrometre analizi sonuçları..... | 35 |
| Çizelge 4.2. Köşk Göleti kilinin elek analizi ve hidrometre analizi sonuçları .....      | 36 |
| Çizelge 4.3. CH kiline ait kıvam limitleri deney sonuçları .....                         | 36 |
| Çizelge 4.4. CL kiline ait kıvam limitleri deney sonuçları .....                         | 37 |
| Çizelge 4.5. CH kiline ait kompaksiyon parametreleri.....                                | 42 |
| Çizelge 4.6. CL kiline ait kompaksiyon parametreleri .....                               | 43 |
| Çizelge 4.7. CH kiline ait serbest basınç deney sonuçları .....                          | 48 |
| Çizelge 4.8. CL kiline ait serbest basınç deney sonuçları.....                           | 48 |
| Çizelge 4.9. CH kiline ait şişme dereceleri.....                                         | 50 |
| Çizelge 4.10. CL kiline ait şişme dereceleri .....                                       | 50 |
| Çizelge 4.11. CH kiline ait deney sonuçları .....                                        | 51 |
| Çizelge 4.12. CL kiline ait deney sonuçları.....                                         | 51 |

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Amaç ve Kapsam

Killerin mühendislik özelliklerinin içerdikleri suyun özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Suyun özelliklerine bağlı olarak meydana gelen bu değişiklikler daneleri oluşturan minerallerin kristal yapısına, boşluklardaki suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yapılan bu çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan farklı havzalardaki suların yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kilin geoteknik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla çeşme suyu ile yapılan kıvam limitleri, standart proktor ve serbest basınç deney sonuçları, Fırat Havzası'ndan, Çoruh Havzası'ndan ve Aras Havzası'ndan alınan sular ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 1.2. Kaynak Özetleri

Literatürde killerin mühendislik özelliklerini araştıran birçok çalışma mevcuttur. Yapılan literatür taramasında, farklı havzalardaki suların killere etkisi üzerinde sınırlı sayıda yayının yer aldığı ve geoteknik açıdan çok fazla değerlendirilmediği, ancak killerin mühendislik özelliklerinin suların kimyasal karakterlerine (elektrik iletkenliğine, anyon katyon değerlerine, toplam fosfor değerine, toplam azot değerine, kimyasal oksijen ihtiyacına) göre değiştiği görülmüştür. Literatür özeti aşağıda sunulmaktadır.

Sridharan *et al.* (1986), araştırmalarında tek değerlikli, iki değerlikli ve üç değerlikli katyonlarla doyurulmuş bentonitin sıkışabilirliğini ve Atterberg limitlerini etkileyen mekanizmaları araştırmışlardır. Katyonik değerlikteki bir artışın, kilin likit limiti ve sıkışabilirliğini azaltırken, katyonun hidrate yarıçapındaki bir artışın da (sabit bir değerlik için) kilin likit limit ve sıkışabilirliğini arttırdığını vurgulamışlardır. Adsorbe katyonların değerliğindeki bir artış, daha yüksek konsolidasyon katsayılarına ve daha

yüksek geçirimsizliklere neden olurken, sabit bir değerlik için, adsorbe edilen katyonun hidrate yarıçapında meydana gelen bir artışın ise, daha düşük bir konsolidasyon katsayısı ve daha düşük geçirimsizlik ile sonuçlanacağını belirtmişlerdir.

Dexter and Chant (1991) araştırmalarında değişebilir katyonların bir fonksiyonu olarak zeminlerin kayma mukavemeti gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, kayma mukavemeti değişebilir sodyum içeriği arttıkça artmış ve değişebilir kalsiyum içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Nemli topraklarda kayma mukavemeti, artan değişebilir kalsiyum, potasyum ve sodyum içeriğinin artması ile artmıştır.

Studds *et al.* (1996), araştırmalarında, sodyum bentonit kilini farklı konsantrasyonlarda (0,01, 0,10 ve 1,00 mol/l) hazırlanan K, Na, Ca ve Mg klorür tuz çözeltileri ile doyurarak, kilin kıvam limitlerinde meydana gelen değişimi araştırmışlardır. Tuz çözeltilerinin artan konsantrasyonlarının, kilin likit limit değerlerinde bir düşüşe neden olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, 0,01 mol/l ve 0,10 mol/l konsantrasyonlarına nazaran 1 mol/l konsantrasyonunda hazırlanan tuz çözeltileri ile muamele edilen kil örneklerinde plastik limitte meydana gelen azalmanın daha belirgin olduğunu ifade etmişlerdir.

Kinuthia *et al.* (1999) çalışmalarında kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum sülfatların, kaolinit kilinin kıvamı ve sıkışma özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçları, kireç ilavesinin genel olarak kaolinit kilinin likit limit, plastik limit ve plastisite indisini arttırdığını, ancak yüksek kireç ilavelerinin ise likit limit ve plastisite indisini düşürdüğünü göstermiştir. Sülfatlar, kireç ile dengelenmiş kaolinitin likit limit değerinin azaltılması yönünde bir etki meydana getirmişlerdir. Bu etkinin derecesi üzerinde sülfat katyonları önemli bir rol oynamıştır. Tek değerlikli katyonlar, likit limiti iki değerlikli olanlardan daha fazla düşürmüştür. Araştırmada, farklı sülfat bileşiklerinin kireç ile dengelenmiş kaolinitin plastik limiti üzerinde farklı etkilere neden olduğu belirtilmiştir. İki değerlikli katyonlar plastik limiti arttırırken, tek değerlikli katyonlar ise plastik limit üzerinde azaltıcı bir etkiye neden olmuştur. Her iki durumda da, plastisite indisinde bir azalma gerçekleşmiştir. Yüksek

sülfat konsantrasyonlarında, iki değerlikli katyonlar plastisite indisini tek değerlikli olanlardan daha fazla düşürmüşlerdir.

Ören and Kaya (2003) çalışmalarında, montmorillonit, illit ve kaolinit kil mineralleri kullanılarak hazırlanan bir kil karışımının fizikokimyasal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, kil karışımı  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{Al}^{+3}$  iyonları ile doyurulmuş ve kıvam limitleri, sıkışma davranışları ve hidrolik iletkenlik gibi mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Araştırma sonuçları, katyon değerliğinin artmasına bağlı olarak kil karışımının likit limit, plastik limit ve rötre limiti değerlerinin arttığını ortaya koymuştur. Zeminin hidrolik iletkenliği de, katyonun değerliğindeki artışla artmıştır.

Palalı *et al.* (2006), çalışmalarında su muhtevası ve kompaksiyon enerjisinin Adana'nın kuzeyinde yer alan Handere kilinin mukavemetine etkisini belirlemek için laboratuvar deneyleri yapmışlardır. %20, %25, %30, %35 ve %40 olarak beş farklı su muhtevasında laboratuvarda hazırlanan kil zeminler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirerek su muhtevası değişiminin mukavemeti nasıl etkilediğini belirlemişlerdir. Numuneler hazırlanırken kalıp içerisine üç tabaka halinde yerleştirmişler ve her tabakayı 25, 40 ve 50 gibi farklı sayıda darbe uygulanarak sıkıştırmışlardır. Sonuç olarak kompaksiyon enerjisi arttıkça kilin mukavemetinin arttığı, su muhtevası arttıkça kilin mukavemetinin azaldığı görülmüştür.

Jayasekera and Hall (2007) tarafından yürütülen çalışmada, laboratuvarda elektro kinetik ilkeler kullanılarak tuzdan etkilenen zeminlerin fiziksel özelliklerinin başlangıç durumuna getirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada tuzlu sodik zeminler kullanılmıştır. Zemin örneği yüksek kütle yoğunluğunda sıkıştırılmış ve ortama yerleştirilen yumuşak çelik elektrodları kullanarak, 14 günlük bir süre boyunca 0,5 V / cm'lik sabit bir potansiyel gradyanı altında zemine doğru bir akım iletilmiştir. Aynı bir denemede de zemine damıtık su ve doymuş kireç çözeltisi uygulanmıştır. Denemede, elektrotlar arasında kalan zeminin genelinde Na içeriği azalarak, zeminin dispersiyonu %90 civarında azalmıştır. Zemin mukavemetinde, elektrokinetik uygulamayla %100'ün üzerinde artış ortaya meydana gelirken, kireçle zenginleştirilen elektrokinetik uygulama

zemin mukavemetinde yaklaşık %200'lük bir artış sağlamıştır. Zeminin likit limiti ve plastik limiti artmış bu durum plastisite indisinde azalmaya neden olmuştur. Araştırma sonuçları, deneme olarak kullanılan bu tekniğin, tuzdan etkilenen zeminlerin fiziksel özelliklerini hem etkili hem de verimli bir şekilde geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durumun özellikle tuzdan etkilenen arazilerin altyapı yönetiminin geliştirilmesinde önemli olduğu vurgulanmıştır.

Yılmaz and Marschalko (2007) çalışmalarında farklı kimyasal içerikli sıvıların killerin şişme davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı tuz oranlarındaki deniz suları, göl, nehir sularıyla yapılan deneylerde; sulardaki tuz miktarının artmasıyla kilin şişme yüzdesi ve şişme potansiyelinin azaldığını, sıvılardaki sodyum miktarı değeriyle şişme değerinin ters orantılı olduğunu belirlemişlerdir.

Akbulut vd (2009), çalışmalarında Erzurum Oltu yöresinden alınan bir kil numunesinin, organik katkılarla etkileşimi üzerine çalışılmışlardır. Bu amaçla katkısız ve katkılı kil numunelerinin kıvam limitleri deneylerini yapmışlardır. Deney sonuçları, kullanılan organik katkının kil zeminin likit limitini önemli ölçüde düşürdüğünü, plastik limiti ise artırdığını göstermiştir.

Yılmaz (2011) çalışmasında kille etkileşim içinde olan suyun kimyası ve türünün şişme davranışı üzerindeki etkilerine bakmıştır. Farklı tuz oranlarındaki deniz sularıyla yapılan şişme deneylerinde; sulardaki tuz konsantrasyonunun artmasıyla kilin şişme potansiyeli ve şişme yeteneğinin azaldığını deniz sularındaki yüksek kalsiyum ve sodyum içeriklerinin şişme değerini düşürdüğünü belirlemiştir.

Yalvaç (2011) çalışmasında yüksek ve düşük plastisiteli kil, saf su ve farklı kimyasal içerikli atık sularla yüksek ve düşük plastisiteli killerin kıvam limitleri ve standart kompaksiyon deney sonuçlarının nasıl değiştiğini incelemiştir. Çalışmada yüksek plastisiteli killerin likit limit ve plastik limit değerlerinde yaklaşık %76'lık azalma, düşük platisiteli killerin likit limit ve plastik limit değerlerinde yaklaşık %60'lık azalma olduğunu belirlemiştir. Çalışmada sulardaki kimyasal oksijen ihtiyaçları (KOİ) ile

kıvam limitleri ve kompaksiyon deney sonuçları karşılaştırmış ve KOI değerinin artmasıyla kilin özelliklerinin daha çok etkilendiği, kıvam limitlerinin ve optimum su muhtevasının azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise arttığı belirlenmiştir.

Elmashad and Ata (2014) killerin kıvam limitlerini farklı tuz konsantrasyonlarına sahip deniz suları ile yapılan kıvam limitleri ile karşılaştırmışlar ve karışım suyundaki tuz miktarının artmasıyla yüksek plastiteli montmorillonitte likit limit değerinin %497'den %112'ye düştüğünü plastik limitte ise az miktarda artış meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Naidu (2015) çalışmasında, katkı maddesi olarak zemine ilave edilen kalsiyum klorürün, zeminin mühendislik özellikleri üzerine etkilerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, zemine ilave edilen kalsiyum klorürün artışına bağlı olarak, zeminin likit limit değerinin azaldığı ve plastik limit değerinin ise arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, zeminin şişme basıncı değeri, kalsiyum klorür arttıkça azalmıştır.

Bakhshipour *et al.* (2016) çalışmalarında yapay asit yağmurunun primer ve sekonder kaolinit killerin mühendislik özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla 1, 5, 10 ve 20 yıllık yağışa eşdeğer olarak, 2, 3, 4, 5 ve 5.6 pH seviyelerinde yapay asit yağmuru uygulamışlardır. Araştırmalarında örnekler üzerinde kıvam limitleri, basınç dayanımı, sıkıştırılabilirlik, hidrolik iletkenlik ve sıkışma parametreleri deneyleri yürütülmüştür. Araştırma sonuçlarına göre, hem primer kaolinit hem de sekonder kaolinit için, yapay asit yağmurun düşük pH değerinin ve daha yüksek yapay asit yağmur süresinin, zemin mukavemetinde ve maksimum kuru yoğunlukta düşüslere neden olduğu ancak sıkıştırılabilirlik, hidrolik iletkenlik, likit limiti ve optimum su muhtevasında ise artışlara neden olduğu ortaya konulmuştur.

Abu Zeid and Abd El-Aal (2017) araştırmalarında kil, saf su ve farklı oranlarda tuz çözeltileriyle kilin mühendislik özelliklerinin nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Çalışmada likit limit, plastik limit ve plastisite indisi, tuz miktarı arttıkça aşamalı olarak

azalmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değerleri de tuz miktarının artışıyla azalmıştır. Bu parametrelerin değişiminin sebebi, kile saf su yerine tuzlu su eklendiğinde serbest iyonların yerini tuzlu suda bulunan  $Al^{+3}$ ,  $Na^{+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^{+}$  katyonlarının alması olarak düşünülmüştür.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

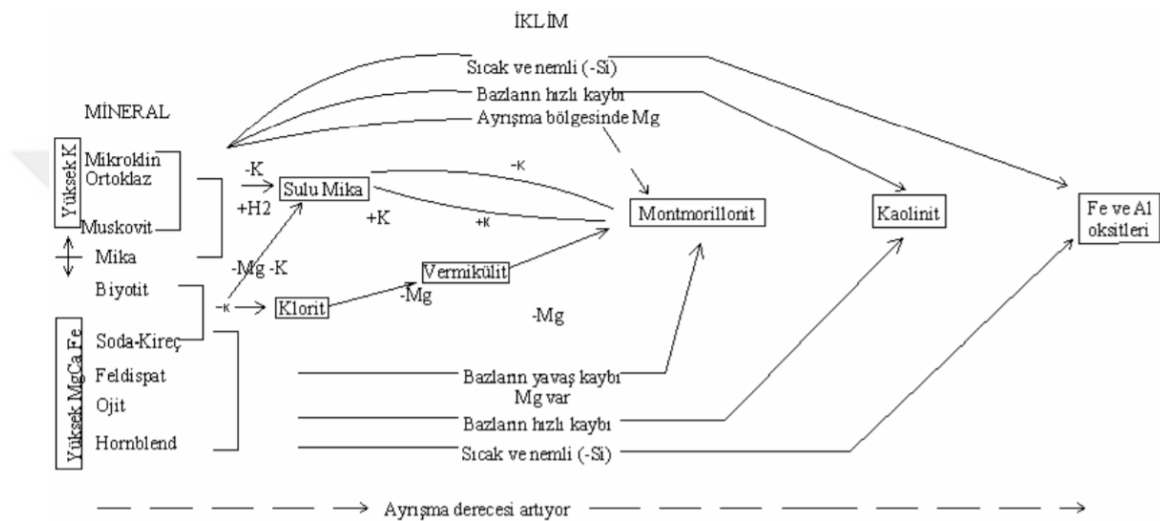
### 2.1. Kil Minerallerinin Oluşumu ve Yapısı

Killer genellikle ana kayacın iri danelerinin yıkanarak ayrışmaları sonucu hidratlanmış alumino-silikatlardan meydana gelen doğal ikincil minerallerdir. Partiküller veya kolloidal boyutta daneler olarak bulunurlar. Belirli miktarda su eklenince çoğunlukla plastikleşen ve kuruma sonucu katılabileşen minerallerdir. Plastik özellik göstermelerinin başlıca sebebi kil danelerinin genellikle yassı şekilli olmasıdır. Kil daneleri arasındaki boşlukların küçük olması permeabilitenin killi zeminlerde düşük olmasına sebep olur. Killerin dane boyutu iki mikron veya daha altıdır. Doğada doğal olmayan kilin içerisinde alüminyum silikatların yanısıra bulunan demir, magnezyum, potasyum, kalsiyum, sodyum, kuvars gibi mineraller kil olmayan malzemeyi veya safsızlığı oluşturmaktadırlar. Kil minerallerinin birçoğu yukarıda belirtilen minerallerin dışında organik madde ve suda çözünebilen tuzlar da içermektedir. Killerin meydana gelmesinde ana kayacın etkisi kadar, taşıma, yıkama, kimyasal reaksiyonlar da etkilidir (Kucur 1977).

Kil sadece mühendis ve jeologların ilgi alanı gibi gözüксе de birçok alanla ilgisi vardır. Killer, sağlık, ziraat, ormancılık ve seramik endüstrisinde de önemli bir endüstriyel gereçtir. Killer inşaat mühendisliği alanında daha çok geoteknik mühendisleri tarafından kullanılmaktadır. Geçirimsizliği sağlamak için göletlerde, barajlarda ve depolarda killer kullanılır. Fakat zeminlerdeki kil miktarı önemli mühendislik problemleri oluşturabildiğinden çok istenen bir malzeme değildir.

Killi zemin, kil minerallerinin yanı sıra değişik mineralleri de içeren, plastisitesi olan, kohezyonlu zemin türüdür. Kil mineralleri çok küçük partiküller olup, elektrokimyasal olarak çok aktiftirler. Zemin içerisindeki kil minerallerinin miktarı o zeminin mühendislik özelliklerini çok büyük derecede değiştirebilmektedir. Zemin içerisindeki kil oranının artması ile zemin kil gibi davranmaya başlar (Önalp ve Arel 2013).

Kili diğer zeminlerden farklı kılan özellik parçacık boyutlarının küçüklüğüdür. Çok küçük kristallerin birleşimiyle killer oluşmuştur. Kil mineralleri en az bir boyutta çok küçük olma koşuluyla makro yüzey alanlarına sahiptirler. Killer geniş yüzey alanları sayesinde fazla suyu absorbe ederler. Şekil 2.1’de kil mineralinin oluşum diyagramı verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Killeşme akış diyagramı (Önalp ve Arel 2013)

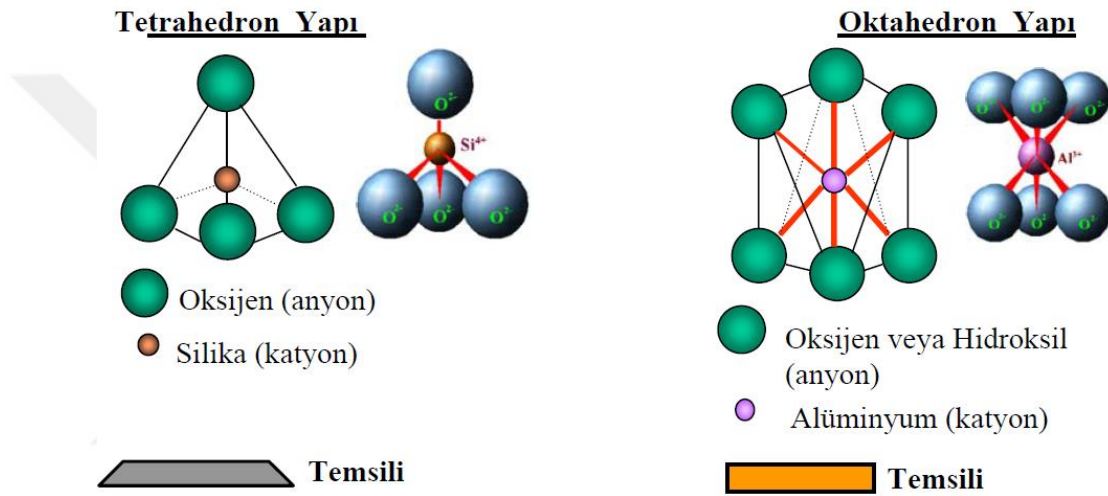
Killer genellikle volkanik veya tortul kayaçların ayrışmasıyla birlikte bir seri kompleks sürecin sonunda oluşmaktadırlar. Şişen killer, çok miktarda silikat mineralleri içeren, bazik-ultra bazik volkanik kayaçların, metamorfik kayaçların, kumtaşı ve şeyllerin atmosfer etkilerine maruz kalması, oksidasyon redüksiyon, hidrasyon-dehidrasyon, iyon değişimi, taşınma vb. jeolojik süreçlerin bitmesiyle oluşmaktadır.

Kilin türü zeminin aşağıda sıralanan özelliklerini doğrudan etkilenmektedir (Keskin 2007);

- Zeminin geçirgenliği
- Şişme-büzülme davranışı,
- Sıkışabilirlik

- Kayma direnci

Tüm kil mineralleri tetrahedral (dört yüzlü) veya silika ile oktahedral (sekiz yüzlü) veya alümin olmak üzere iki dane kristal levhadan oluşur. Levhalar birbirinden farklı bağlar ve değişik metalik iyonlarla bağlanıp değişik kil minerallerini meydana getirir. Şekil 2.2’de tetrahedronun ve oktahedronun şematik olarak gösterimi mevcuttur (Grim 1959).



**Şekil 2.2.** Değişik kil minerallerinin yapısı (Grim 1959)

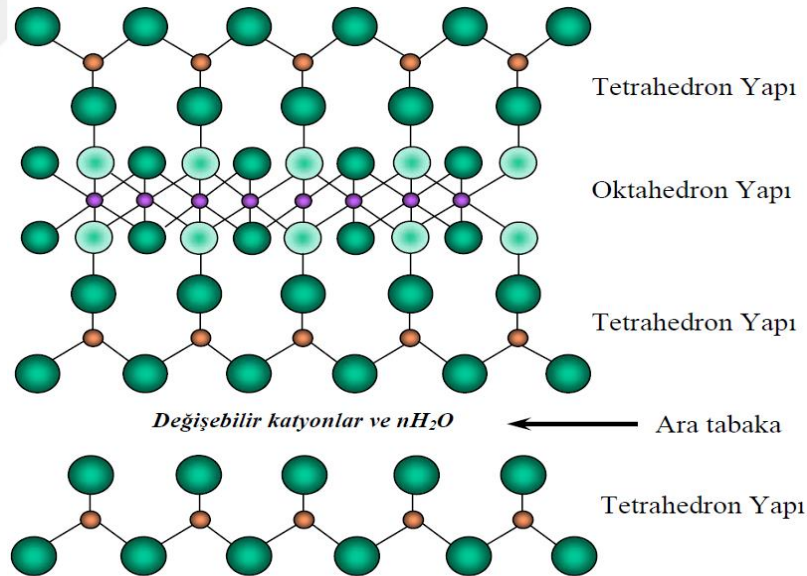
Oktahedral levhada farklı katyonların yer değiştirmesi ile değişik mineraller oluşmaktadır. Mühendislik uygulamaları için killerin içeriğinde yer alan ve bilinen mineralin belirtilmesi yeterli olacaktır. Oktahedron ve tetrahedron yapılar, oktahedron ve tetrahedron levha şekilleri ile beraber kompleks bir yapı meydana getirirler. Asıl yapıdaki farklılıklar sonucunda kil mineralleri meydana gelir. Neticede bütün kil mineralleri, iki temel levha yapısının farklı şekillerde (1:1, 2:1) birleşmesiyle meydana gelir.

Killer kimyasal birleşim veya kristal yapılarına göre sınıflandırılabilirler. Killerin kristal özelliklerine göre yapılan sınıflandırma aşağıdaki gibidir;

1. İki tabakalı killer, bir silis tetrahedral tabakası ve bir alüminyum oktahedral tabakasından meydana gelir.
2. Üç tabakalı killer, iki silis tetrahedral tabakası ve bir merkezi dioktahedral veya trioktahedral tabakasından meydana gelir.
3. Düzenli karışım tabakalı killer, değişik tipteki tabakaların istiflenmiş halidir.
4. Zincir yapılı killer, silis tetrahederi zincirleriyle birlikte Al ve Mg atomları içeren hidrotitroksiller ve oktahedral oksijen gruplarına bağlanarak oluşur (Keskin 2007).

## 2.2. Killerin Sınıflandırılması

Şekil 2.3'de oktahedral yapıda farklı katyonların yer değiştirmesiyle farklı killerin oluşumunun şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.3. Killerin şematik gösterimi (Grim 1959)

Kil mineralleri yapısal oluşumu yönünden değerlendirildiğinde, her grup benzer mühendislik özelliğine sahip olduğu için yapısal gruplamaların daha uygun olduğu anlaşılmaktadır. Mühendislik için yapılan sınıflamalarda, killer çoğunlukla dört gruba ayrılır. Çizelge 2.1'de en yaygın kil minerallerinin bazı özellikleri verilmiştir.

- Smektit grubu
- Mika grubu
- Klorit grubu
- Kaolinit grubu

**Çizelge 2.1.** Kil minerallerinin özellikleri (Angın ve Angın 2005)

| Özellik                                | Kaolinit | İllit    | Montmorillonit |
|----------------------------------------|----------|----------|----------------|
| Büyüklik (mm)                          | 100-5000 | 100-2000 | 10-1000        |
| Kalınlık (mm)                          | 50-2000  | 30       | 3              |
| Özgül yüzey (m <sup>2</sup> /g)        | 5-20     | 100-200  | 700-800        |
| Kohezyon                               | Düşük    | Orta     | Yüksek         |
| Hacim değiştirme özelliği              | Düşük    | Orta     | Yüksek         |
| Katyon değiştirme kapasitesi (cmol/kg) | 3-10     | 15-40    | 80-120         |

Smektitler; Magnezyum ve/veya demirle birlikte potasyum dışı alkalileri ve toprak alkalileri içerir. Bunlar; montmorillonit, nontronit, saponit, beidellit, hektorittir. Çoğunlukla smektit minerali, yüksek alan yoğunluğuna ve emme kapasitesine sahiptir. Şişme potansiyeli yüksektir. Çok problemlili kil mineral tipidir. İlaç yapımında da kullanılmaktadırlar (Dalgıç ve Kavak 2004). Çoğunlukla volkanoklastik malzemelerin suda çözülmesinin ardından ayrışma ürünü olarak ortaya çıkar ve diğer sedimentler içerisinde ise merccekler biçiminde oluşurlar. Smektit grubu kil mineralleri bir kaç kil minerali içermektedir. Smektitler, vermikülitler yanında şişmeye müsait 2:1 tipi mineral türüdür. Su tutma ve genişleme oranları fazladır (Uğur 2005).

Şişmenin boyutu;

- Tabaka yükü
- Tabakalar arasında bulunan katyonların türüne göre değişir.

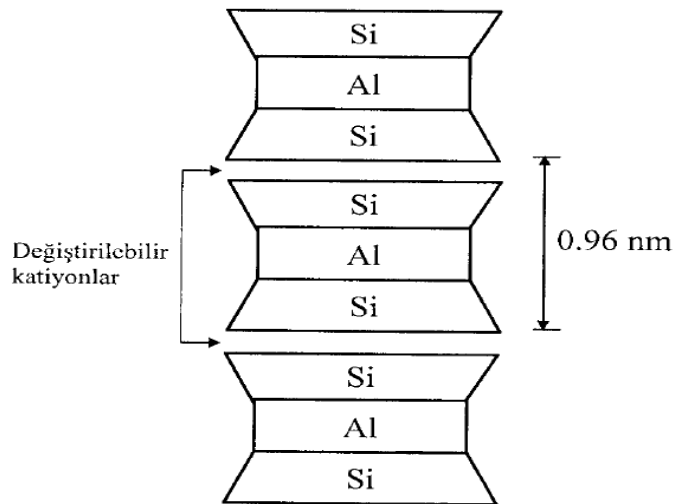
Ekonomide önemli yeri olan bentonitlerin ana minerali smektitlerdir. Tabakalar arasındaki bağlanma, Van der Waals kuvvetleri ve yük denkliliğine katkıda bulunan

katyonlarla sağlanır. Tabakalar arası su tutma kapasitesi oldukça büyük olup mühendislik uygulamaları için önemlidir (Uğur 2005).

Montmorillonit mineralojik olarak 1 oktahedral tabakanın 2 tetrahedral tabaka arasına sıkışmasıyla meydana gelir. Tabakaların arasındaki bağ oldukça zayıftır. Tabakalar arasındaki bu zayıf bağ suyun tabakalar arasına girip tabakaların birbirinden ayrılmasına sebep olur. Doğal ortamda yaprak plaka şeklinde bulunan montmorillonit minerallerinin plastisite ve hacim değiştirme özellikleri yüksektir. Diğer kil minerallerine göre suya olan ilgileri daha fazladır. İzomorf yer değiştirme; oktehdral veya tetral tabakalardaki katyonların yerinin başka katyonlar tarafından alınmasıdır. Bu durum kil minerallerinin özelliklerini fazlaca etkilemektedir. Şekil 2.4’de montmorillonit grubunun mineralojik yapısı gösterilmektedir (Angın ve Angın 2005).

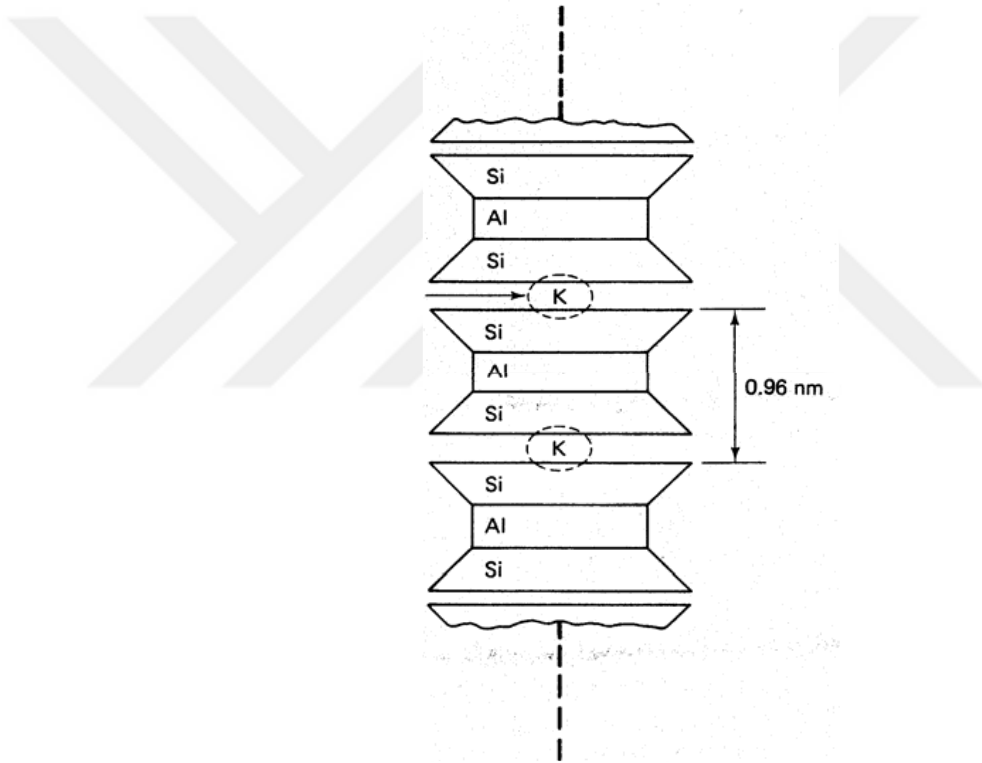
Şişen killerin hacim değişimi;

- Kil mineralinin yapısına,
- Kil minerallerinin miktarına
- Kil danelerinin dizilişine bağlı olarak değişmektedir.



**Şekil 2.4.** Montmorillonit mineral grubu (Angın ve Angın 2005)

Mika grubu; Mikalar, illit, muskovit, biyotit, flogopit, vermikülit tipi killeri içerir. Genleşmeleri problem oluşturmaz. Smektit grubundan farkları, potasyum içermeleridir (Dalgıç ve Kavak 2004). İllit minerali mineralojik olarak 1 oktahedral tabakanın 2 tetrahedral tabakasının arasına girmesiyle meydana gelmektedir. Tabakalar arasındaki potasyum iyonları bağı iyice sağlamlaştırdığı için suyun tabakalar arasına girmesini önlemektedir (Angın ve Angın 2005). İllit, çoğu kayanın temel bileşenidir. Şekil 2.5’de illit grubunun mineralojik yapısı gösterilmektedir.



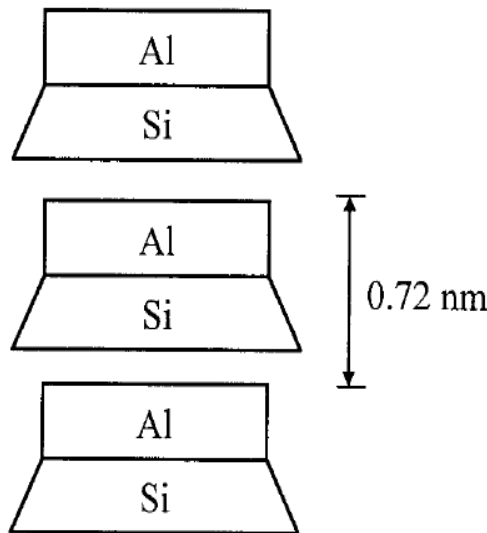
**Şekil 2.5.** İllit mineral grubu (Önalp ve Arel 2013)

Klorit minerali mineralojik olarak silikat tabakalarının arasına bir trioktahedrik hidrosit tabakasının yerleşmesiyle oluşur. Kloritin yapısı mikaya ve brusite benzeyen tabakalar içerir. Klorit minerali şişmeye müsait olup, montmorillonite göre daha az aktiftir (Holtz and Kovacs 1981). Kaolinit minerali 1 tetrahedral (silika) ve 1 oktahedralın (alümina veya gipsit) tekrarlı tabakalanmasıyla oluşur. 1:1 tabaka türüne sahip bir kil mineralidir. Tabakalar birbirlerine Van der Waals çekim kuvvetleri ve hidrojen bağlarıyla bağlıdır.

Kaolinitlerin su tutma kapasitesi düşük olduğundan şişme potansiyelleri ve plastik özellikleri oldukça düşüktür. Bu sebeple, ara tabakada su tutmaz (Guerra *et al.* 2008). Kaolinit elektrik yükü bakımından nötrdür, ancak su ile temas edince hidroksillerin bir kısmı ayrışır ve hidrojen atomları kristali zayıfça negatif yüklü olarak bırakarak, serbest kalırlar.

Kaolinitler; Sulu alüminyum silikatlar'dır. Yüksek su emme kapasitesine sahiptirler. İlaç yapımında da kullanılmaktadır (Dalgıç ve Kavak 2004). Diğer kil minerallerine oranla içsel sürtünmesi büyüktür. Bu gruptaki minerallerin özgül ağırlıkları 2,60 - 2,68 ve özgül yüzeyleri 10 m<sup>2</sup>/gr civarındadır (Önalp ve Arel 2013). Şekil 2.6'da kaolinit grubunun mineralojik yapısı gösterilmektedir.

İyon değişimi kaolinitte yüksek, montmorillonitte ise düşüktür. Kaolinit daneciklerinin kenarları üzerindeki iyon değişimi hemen gerçekleştiği halde, montmorillonit tabakaları arasındaki geçiş iyon değişimini geciktirmektedir. Montmorillonitte iyon değişimi kilin şişmesi ve tabakalar arası açıklığın artması ile meydana gelmektedir (Grim 1959).



**Şekil 2.6.** Kaolinit mineral grubu (Angın ve Angın 2005)

Killerin genel özelliklerini özetleyecek olursak;

- 1-Plastik danelerdir.
- 2-Israk halde Şekil değiştirmeye dirençleri azdır.
- 3-Sertleştikleri zaman kohezyonları artar.
- 4-Geçirimlilikleri düşüktür.
- 5-Isranınca sıkıştırmak güçtür.
- 6-Su muhtevasına göre genişleme ve büzölme gösterirler.
- 7-Sıkışabilme özellikleri likit limit değerlerine bağlıdır. Likit limiti yüksek olan kilin sıkışabilme özelliği fazladır.
- 8-Aynı likit limite sahip iki kilden plastik limit değeri yüksek olan kilin kohezyonu fazladır.
- 9-Küçük dane boyutu, yassı Şekli ve danelerin birleşim hali sıkışabilme özelliğini etkiler (Kucur 1977).

### **2.3. şişe Mekanizması ve şişmeyi Etkileyen Faktörler**

şişen zeminler, su miktarının değişimiyle hacminde artış veya azalma meydana gelen zeminlerdir. Zeminlerin su miktarındaki farklılığın en büyük sebebi mevsim değişiklikleridir. Killerdeki şişe hacimsel değişikliğe sebep olur. Bu değişimden daha çok etkilenen yapılar; tek katlı hafif yapılar, yollar, tretuvarlar, havaalanları, sulama kanalları, tünellerdir (Demir ve Kılıç 2010).

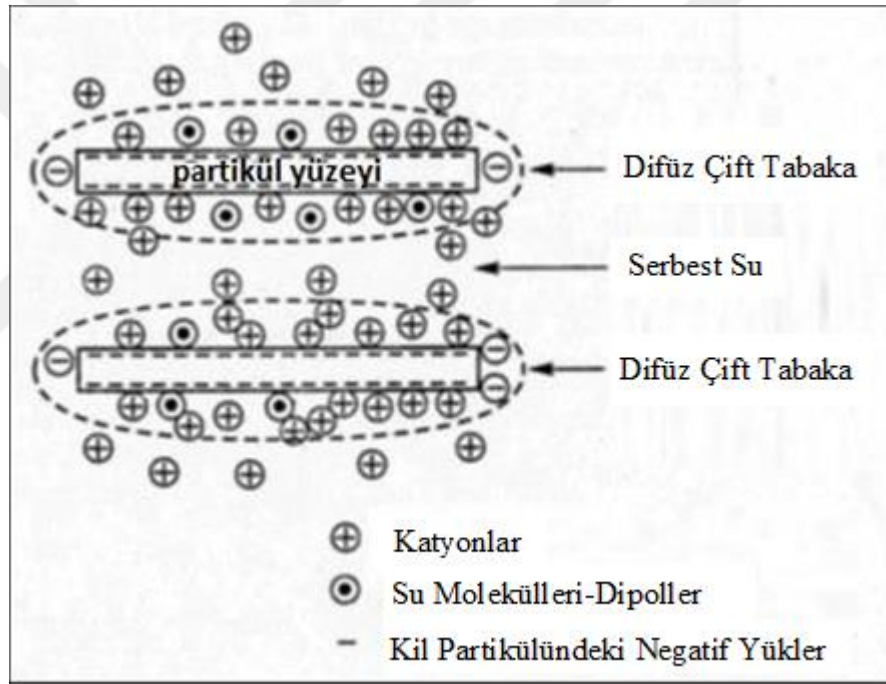
Kil mineralleri, çoğunlukla negatif yüklü yüzeylerden ve uç taraflarında da pozitif elektrik yüklerine sahip tabakalı partiküllerden oluşur. Su elektriksiz olarak nötrdür ancak biri negatif biride pozitif olmak üzere iki yük merkezi bulunmaktadır (Keskin 2007).

#### **2.3.1. Kil –su etkileşimi**

Kil kristalinin yüzeyi suyu elektrostatik Şekilde çeker. Ayrıca kil kristali suyu hidrojen bağı ile tutar. Bu, killerin yüzeyindeki oksijenlerin veya hidroksillerin sudaki hidrojeni

çektiği anlamına gelir. Negatif yüklü kil yüzeyi, su içerisindeki katyonları çekmektedir. Şekil 2.7’de kilin suyu nasıl emdiğinin mekanizması görülmektedir.

Suyla karşılaşan kil danesinin yüzeyinde yer alan katyonlar, sıvı içine genişerek çift tabaka olarak adlandırılan bir bölge meydana getirirler. Çift tabakanın kalınlığı, bir kil danesinin net yükünü karşılamak için yüzeyde tutulması gereken su-iyon kalınlığıdır (Önalp ve Arel 2013). Bu kalınlığın artması ya da azalması kilin şişme özelliklerini etkiler.



**Şekil 2.7.** Kil mineralinin difüz (elektriksel) çift tabaka özelliği (Başer 2009)

### 2.3.2. Killi zeminlerde şişme özelliğinin tanımlanması

Şişen zeminlerin şişme durumlarını belirlemek için, farklı deney ve değerlendirme yöntemleri vardır. Bahsi geçen bu yöntemler niteliksel ve niceliksel yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Niteliksel yöntem bazı zemin parametreleri (kıvam limitleri, birim hacim ağırlık) ile korelasyon yapılarak zeminlerdeki şişme durumunun ‘düşük’, ‘orta’, ‘yüksek’, ‘çok yüksek’ gibi ifadelerle, ve ampirik yöntemle değerlendirildiği bir yöntemdir.

Niceliksel yöntemde ise ödometre deney aleti kullanılır. Zeminin tek eksenli şişme değerleri elde edilerek yorum yapılır. Çizelge 2.2’de ve Çizelge 2.3’de kıvam limitleri deneylerinin sonuçlarıyla şişmenin ilişkisi gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Zeminin fiziksel özellik verilerine dayalı şişen zemin sınıflaması (Chen 1988)

| <b>Laboratuvar Verileri</b>   |                       | <b>Muhtemel şişme<br/>(toplam hacim<br/>değişikliğinin<br/>yüzdesi), %</b> | <b>Şişme derecesi</b> |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 200 no'lu<br>elekten geçen(%) | Likit<br>limit<br>(%) |                                                                            |                       |
| >95                           | >60                   | >10                                                                        | Çok yüksek            |
| 60-65                         | 40-60                 | 3-10                                                                       | Yüksek                |
| 30-60                         | 30-40                 | 1-5                                                                        | Orta                  |
| <30                           | <30                   | <1                                                                         | Düşük                 |

**Çizelge 2.3.** Şişme potansiyelinin plastisite indisine bağlı olarak tahmini (Chen1988)

| <b>Plastisite indisi</b> | <b>Şişme potansiyeli</b> |
|--------------------------|--------------------------|
| 0-15                     | Düşük                    |
| 10-15                    | Orta                     |
| 15-25                    | Yüksek                   |
| $\geq 35$                | Çok Yüksek               |

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Kil zeminler

Çalışma kapsamında iki farklı kil kullanılmıştır. Killer yüksek plastisiteli (CH) ve düşük plastisiteli (CL) olarak seçilmiştir. CH kili, Köşk Göleti civarından, CL kili ise Pehlivanlı Göleti civarından temin edilmiştir.

Pehlivanlı Gölet yeri, Erzurum İli Tortum İlçesi Pehlivanlı Beldesi'nin yaklaşık 5 km kuzeyinde Honuz Deresi üzerindedir. Gölet yeri, Erzurum İline 92 km, Tortum İlçesine 37 km mesafede bulunmaktadır. Pehlivanlı Göleti'nin uydu görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Pehlivanlı Göleti'nin uydu görüntüsü (Anonymous 2019)

Köşk Göleti yeri, Erzurum İli Merkez İlçesi Köşk Köyü'nün yaklaşık 4 km güneyindeki Deveyatağı Tepesi'nin 600 m kuzeybatısında bulunmaktadır. Köşk Göleti'nin uydu görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.3'de araziden alınarak laboratuvara getirilen kil numuneleri görülmektedir.



**Şekil 3.2.** Köşk Göleti'nin uydu görüntüsü (Anonymous 2019)



**Şekil 3.3.** Kil numuneleri

Killerin bazı geoteknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Zemin numuneleri üzerinde yapılan X-Ray analizi deneyleri ile kil minerallerinin içerikleri belirlenmiş olup analiz sonuçları ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Killerin bazı özellikleri

| Kilin yeri        | Zemin Sınıfı | Su Muhtevası (%) | Özgül Ağırlık |
|-------------------|--------------|------------------|---------------|
| Pehlivanlı Göleti | CL           | 14,1             | 2,67          |
| Köşk Göleti       | CH           | 27,8             | 2,64          |

**Çizelge 3.2.** Kil minerallerinin içerikleri

| Numune | Na <sub>2</sub> O | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  | TiO <sub>2</sub> | MnO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|--------|-------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------|------------------|------|--------------------------------|
| CL     | 0,6               | 3,2  | 11,5                           | 40,56            | 0,35                          | 2,5              | 15,3 | 0,4              | 0,26 | 5,3                            |
| CH     | 0,1               | 16,4 | 3,3                            | 44,1             | 0,5                           | 0,25             | 3,8  | 0,35             | 0,2  | 14,6                           |

X-Ray analizi deney sonuçlarına göre; yüksek plastisiteli kil numune içerisinde; Smektit, Serpantin, Kuvars, Kalsit, Amorf Silika minerallerinin bulunduğu, az miktarda da Amfibol, Feldispat ve Klorit grubu minerallerin var olduğu tespit edilmiştir.

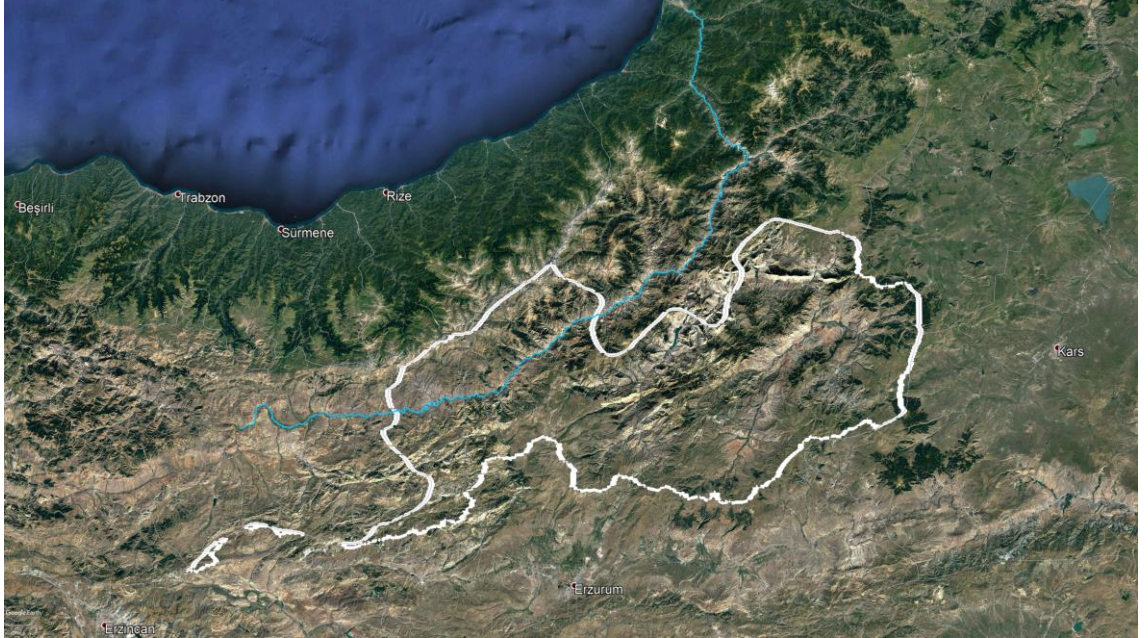
Düşük plastisiteli kil numune içerisinde çok miktarda, Kalsit, Klorit Grubu Kil Minerali, İllit, Feldispat, Kuvars, Dolomit minerali, az miktarda amorf malzeme bulunmaktadır.

### 3.1.2. Deneylerde kullanılan sular

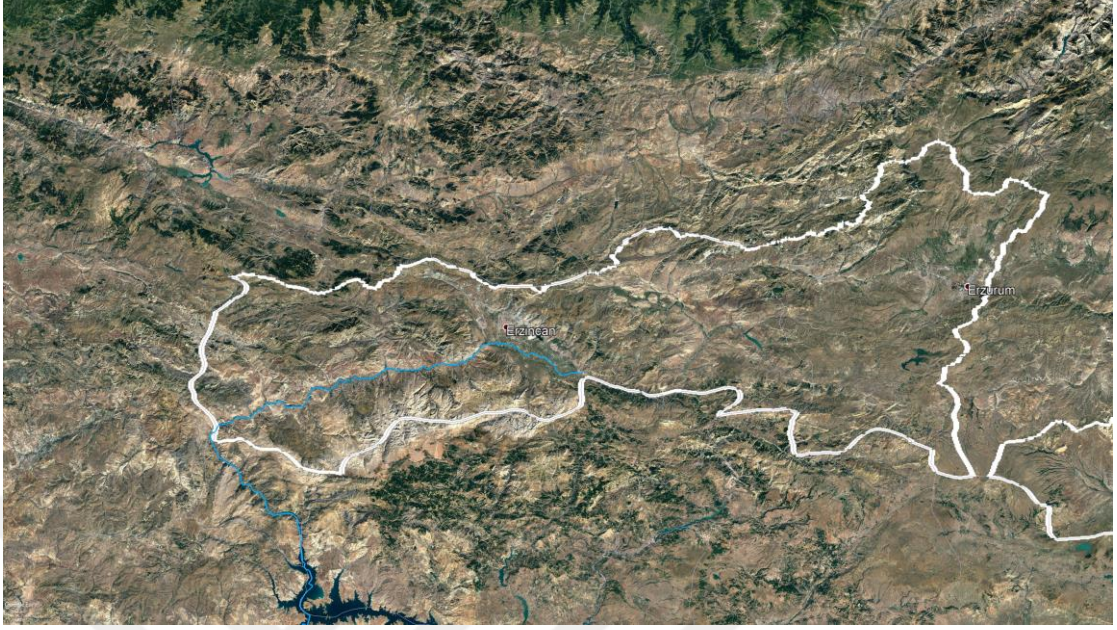
Temin edilmiş olan CH ve CL killerine çeşme suyu ile yapılan geoteknik deneyler farklı havza suları kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu amaçla, çeşme suyu, Aras, Çoruh ve Fırat Havzaları’ndan temin edilen sular kullanılmıştır. Suların alındığı yerler ve havza sınırları Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6’da görülmektedir. Şekil 3.7’de havzalardan alınarak laboratuvara getirilen su numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.4. Aras Havzası' nın uydu görüntüsü (Anonymous 2019)



Şekil 3.5. Çoruh Havzası'nın uydu görüntüsü (Anonymous 2019)



**Şekil 3.6.** Fırat Havzası'nın uydu görüntüsü (Anonymous 2019)



**Şekil 3.7.** Laboratuvara getirilen sular

Deney sırasında kullanılan suların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'de verilmiştir. Çizelge 3.3'de suların anyon analiz sonuçları, Çizelge 3.4'de

katyon analiz sonuçları ve Çizelge 3.5’de suların iletkenlik, pH ve KOI analiz sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Suların anyon analiz sonuçları

| Su Numuneleri         | Ca (mg/l) | Mg (mg/l) | Na (mg/l) | K (mg/l) | Fe (mg/l) | Al (mg/l) |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Çeşme Suyu            | 78,38     | 21,88     | 6,12      | 1,62     | <0,01     | <0,01     |
| Fırat Havzasındaki Su | 84,84     | 4,6       | 9,42      | 2,11     | 0,62      | 0,48      |
| Çoruh Havzasındaki Su | 87,36     | 6,31      | 9,29      | 11       | 0,16      | 0,22      |
| Aras Havzasındaki Su  | 84,79     | 23        | 7,32      | 10,29    | 0,037     | 0,097     |

**Çizelge 3.4.** Suların katyon analiz sonuçları

| Su Numuneleri         | HCO <sub>3</sub> (mg/l) | Cl (mg/l) | SO <sub>4</sub> (mg/l) |
|-----------------------|-------------------------|-----------|------------------------|
| Çeşme Suyu            | 420,90                  | 7,26      | 23,54                  |
| Fırat Havzasındaki Su | 388,23                  | 9,91      | 7,75                   |
| Çoruh Havzasındaki Su | 520,39                  | 7,33      | 10,87                  |
| Aras Havzasındaki Su  | 300,68                  | 7,75      | 16,08                  |

**Çizelge 3.5.** Suların iletkenlik, pH ve KOI analiz sonuçları

| Su Numuneleri         | KOI (mg/l) | Ph   | İletkenlik (µs/cm) |
|-----------------------|------------|------|--------------------|
| Çeşme Suyu            | 5          | 7,33 | 691                |
| Fırat Havzasındaki Su | >5         | 8,23 | 25,4               |
| Çoruh Havzasındaki Su | >5         | 8,64 | 390                |
| Aras Havzasındaki Su  | >5         | 8,44 | 254                |

### 3.2. Yöntem

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler aşağıda sıralanmıştır.

- Özgül Ağırlık
- Elek Analizi
- Hidrometre Analizi
- Kıvam limitleri (Likit limit ve Plastik limit)
- Standart Proktor
- Serbest Basınç

Deneylerde kullanılan killer laboratuvara getirildikten sonra etüvde 105°C’de kurutulmuş ve Los Angeles aşındırma cihazında öğütülmüştür. Şekil 3.8’de etüvde kurutulan numuneler görülmektedir.



**Şekil 3.8.** Etüvde kurutulan kil numuneler

### 3.2.1. Özgöl Ağırlık Deneyi

Özgöl ağırlık deneyinde piknometre denilen cam şişeler kullanılır. Öncelikle kullanılacak şişe temizlenerek kurutulur. Kurutulmuş şişe tartılır (M1). Minimum 10 gr numune şişeye konur. Şişe, içindeki numune ve kapağıyla birlikte tartılır (M2). Şişedeki numuneyi kapatacak kadar havası alınmış saf su eklenir. Havası tam çıktıktan sonra tartılır (M3). Şişenin içindekiler boşaltılarak işaret çizgisine kadar damıtık su ile doldurulur ve tartılır (M4). Aşağıdaki bağıntıyla zemin danelerinin özgül ağırlığı (Gs) hesaplanır (Aytekin 2004).

$$G_s = \frac{\rho_w \cdot (M_2 - M_1)}{\rho_w \cdot (M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)}$$

(3.1)

Burada;

M1: Şişenin kütlesi, (gr),

M2: Şişe + kuru zemin kütlesi, (gr),

M3: Şişe + numune + suyun kütlesi, (gr),

M4: Şişe + su kütlesi, (gr),

$\rho_w$ : Suyun deney sıcaklığında yoğunluğu, (gr/cm<sup>3</sup>) dur.

### 3.2.2. Elek analizi deneyi

Kil numunelerin dane çapı dağılımı elek analizi deneyi ile belirlenmiştir. Zemin heterojen bir yapıya sahiptir. İnce ve iri daneli zeminler birlikte bulunurlar. Dane çapları 76,2 mm ile 0,074 mm arasında olan kısımda ayırım yapabilmek için elek analizi yöntemi kullanılır. Çapları 0,074 mm den küçük olan zeminlerde ayırım yapabilmek için ıslak analiz (hidrometre analizi veya pipet analizi) adı verilen yöntemlere başvurulur.

Dane çapı dağılımı (Granülometri) eğrisini çizmek için, kurutulmuş zemin farklı çaplardan oluşan bir seri eleklerden elenir. Seçilen standartlara uygun olarak elekler en iri gözlüsü (delik çapı en büyük olanı) en yukarıda olmak kaydı ile üst üste konulurlar (Aytekin 2004). Deney numunesi; etüvde 110 ( $\pm 5$ )°C sıcaklıkta 24 saat süresince kurutulur. Kurutulan numune soğumaya bırakılır. Elemeye hazır hale gelen numune tartılarak kütlesi kaydedilir. Deney numunesi, elek takımının en üstündeki elekten dökülerek kapak kapatılır ve elek sarsma makinesi çalıştırılır. Deney numunesinin hepsi elendikten sonra, her bir eleğin üzerinde kalan numune miktarları tartılır. Dane çapı dağılımı eğrisi için yarı logaritmik grafik çizilir. Deney sonunda, malzemenin içerisindeki çakıl, kum ve ince malzeme (silt+ kil) miktarları bulunur.

### 3.2.3. Hidrometre analizi

Bazı zeminleri eleklerden elemek ve çaplarına göre ayırmak zemin danelerinin gözle görülmeyecek kadar küçük oldukları için mekanik olarak mümkün olmayıp (0,074 mm

den küçük çaplı, yani 200 no'lu elekten geçen) zeminler için ıslak analiz yapılmaktadır. Islak analizin temeli Stokes yasasına dayanmaktadır. Stokes yasasına göre; danelerin şekli küre olarak kabul edilmektedir (Aytekin 2004). Çalışma kapsamında kil numunelerin hidrometre analizi ASTM D422'ye göre yapılmıştır.

### **3.2.4. Kıvam limitleri deneyleri**

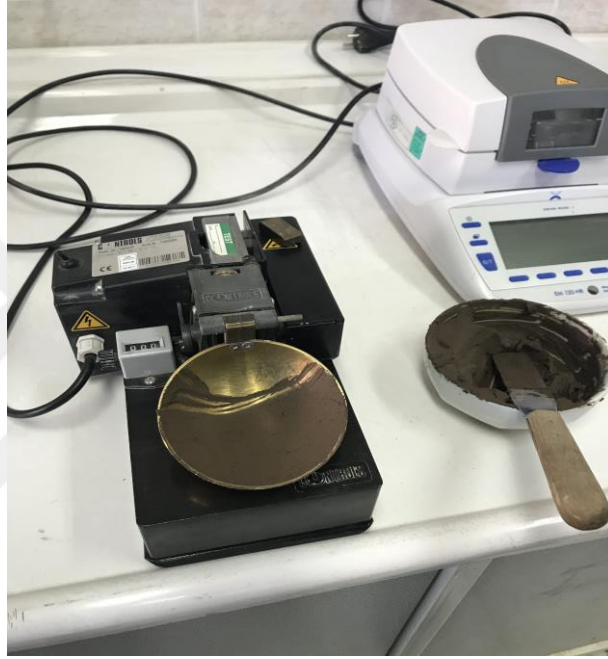
İnce daneli zeminlerde (kohezyonlu) zeminin sertlik ve yumuşaklık hali kıvam ile tespit edilir. Su miktarındaki azalma ile zemin sertleşerek plastik hale gelir. Zemindeki su miktarının biraz daha azalması ile zeminde deformasyonlar meydana gelir ve zemin yüzeyinde çatlaklar oluşur. Bu durum yarı katılığın başlangıcıdır. Zeminin su muhtevasına göre farklı özellikler sergilemesi 1911 yılında Atterberg tarafından deneysel olarak belirtilmiştir. Atterberg'in belirlediği sınır su içerikleri Atterberg limitleri veya kıvam limitleri şeklinde adlandırılır. Zeminin kıvam limitleri iyi bilinir ve iyi kullanılırsa, zeminin özelliklerinin çoğu hakkında bilgi sahibi olunur (Kucur 1977).

### **Likit limit deneyi**

Çalışma kapsamında killerin likit limitleri Casagrande yöntemi ile belirlenmiştir (ASTM D 4318). Casagrande yönteminde kurutularak hazır hale gelen zemin 40 nolu elekten elenir. Zemin numunesi suyla karıştırılarak likit limit tasına yerleştirilir. Tasa yerleştirilen zemin içinde bir yarık oluşturulur. Likit limit tası 10 mm yukarıdan sert plastik yüzey üzerine üst üste bırakılır. Yarığın 25 düşüşte 13 mm (0,5 inç) kapanmasını sağlayan su miktarı zemin numunesinin likit limit değeridir (Holtz and Kovacs 1981).

Zemin numunesinin Casagrande yöntemiyle belirlenen likit limit değeri bazı dış etkenlere de bağlıdır. Bu etkenler, deney düzeneğindeki düşürme levhasının türü, deneyi yapan kişinin tecrübesi, oluk açma bıçağı ve zemin cinsi olarak sayılabilir (Kucur 1977).

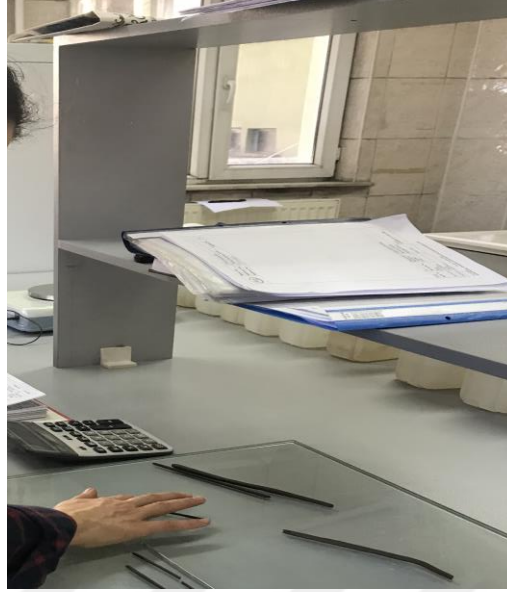
Çalışma kapsamında Casagrande deneyi farklı su içeriklerinde beş kez tekrarlanmış, beş tane düşüş sayısı (N) ve düşüş sayılarında zeminin sahip olduğu su muhtevası (w) değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar grafiğe dökülmüş ve 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası likit limit değeri olarak alınmıştır. Şekil 3.9'da Casagrande deney aleti ve deney numuneleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.9.** Casagrande deney aleti

### **Plastik limit deneyi**

Plastik limit yaşı zeminin yoğrulma esnasında yüzeyinde çatlakların, kırılmaların olduğu su muhtevasıdır. Bu deneyde, 40 nolu elekten elenmiş zemin kullanılır. Elenmiş zemin su ile karıştırılır. Hazırlanan numune cam bir plaka üzerinde el yordamıyla yuvarlanıp bir çubuk oluşturulur. Çubuğun çapı yaklaşık 3 mm olduğu bir kumpas yardımı ile ölçülür ve bu durumdaki su muhtevası belirlenir. Bu değer doğrudan zeminin plastik limitini verir (Uzuner 2007). Bu deney sübjektif olup, deneyi yapan kişiye oldukça bağlıdır. Şekil 3.9'da plastik limit tayini ve deney numuneleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.10.** Plastik limit deney numuneleri

### **Plastsite indisi**

Zeminin plastik özellik gösterdiği su muhtevası aralığıdır. Eşitlik 3.2 bağıntısı ile bulunur.

$$I_p = w_L - w_p \quad (3.2)$$

Burada;

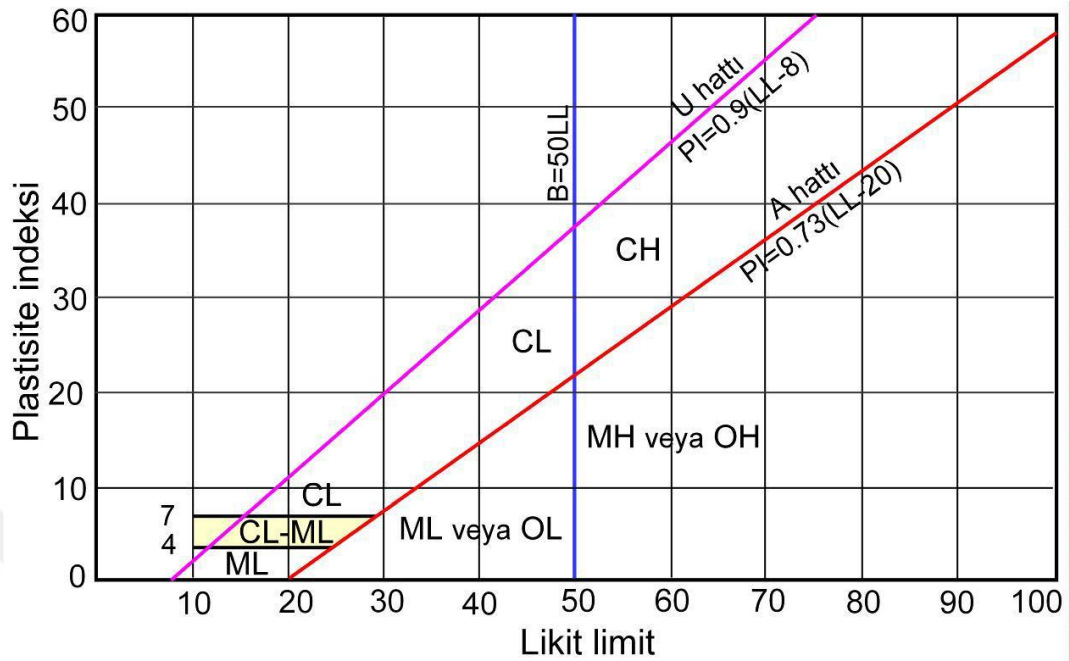
$I_p$ : Plastsite indisi,

$w_L$ : Likit limit,

$w_p$ : Plastik limittir.

### **Plastsite kartı**

İnce daneli zeminleri sınıflandırırken plastsite kartı kullanılır (Şekil 3.11). Plastsite kartında yatayda likit limit, düşeyde ise plastsite indisi değerleri yer alır.



Şekil 3.11. Plastisite kartı

### 3.2.5. Standart proktor deneyi

Kompaksiyon; zeminlerin dayanım, permeabilite (geçirimsizlik) ve oturmaya karşı iyileştirilmesi veya erozyon olayına karşı sağlamlaştırılması için tabakalar halinde serilerek sıkıştırılması olarak tanımlanır. Kompaksiyonun amacı; zeminin sıkıştırılması ile maksimum kuru yoğunluğu veren su muhtevasının elde edilmesidir. Zeminlerin yoğunluklarının artırılması ile genellikle kayma dirençleri artırılırken geçirimsizlikleri ve oturmaları azaltılmış olur. Sıkıştırma işlemleri değişik yöntemler kullanılarak yapılabilir.

Kuru halde bulunan zemine bir miktar su ilave edildiği zaman zemin daneleri bu suyu emerler. Daha fazla su ilave edilmesi durumunda zemin daneleri çevresinde bulunan su filminin kalınlığı artar ve zemin daneleri birbirlerine göre kolaylıkla rölatif hareketler (birbirleri üzerinden kayma hareketleri) yapabilirler. Bir miktar daha su ilave edilmesi halinde zemin içerisinde bulunan boşluklar su ile dolmaya başlar ve zeminin yoğunluğunu artırırlar. Ancak zemin içerisindeki boşlukların tamamen suyla

doldurulması ve suyun sıkışmaması nedeniyle bir noktadan sonra yapılan su ilaveleri zeminin yoğunluğunu arttırmayacağı gibi azalmasına sebep olur (Aytekin 2004). Bu çalışmada standart proktor deneyi ASTM D 698'e göre gerçekleştirilmiştir.

Standart proktor deneyinde öncelikle deney için kurutulmuş zemin hazırlanır. Zemine biraz su eklenerek karıştırılır. Karıştırılan zemin 3 tabaka halinde kompaksiyon kalıbı içine konur. Her defasında kabın 1/3'ü kadar numune doldurulur ve her doldurulan kısım 2,5 kg kütledeki tokmağın 30,5 cm yükseklikten düşürülmesi ile 25 vuruş ile sıkıştırılır. Zeminde sıkıştırma işlemi yapılırken metal tokmak zemin numunesinin farklı kısımlarına bırakılır. Üç kerede sıkıştırılarak doldurulan metal kap üzerindeki fazlalıklar alınır sonra tartılır. Tartılan bu zeminden su muhtevasının belirlenmesi için numune alınır. Kurutulan bu numunenin kuru ağırlığı ölçülür. Yukarıda bahsi geçen işlem 5 kere tekrarlanarak farklı su muhtevaları için kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilir. Tespit edilen noktalar grafiğe dökülerek optimum su muhtevası elde edilir. Şekil 3.12'de kompaksiyon deney aleti görülmektedir.



**Şekil 3.12.** Kompaksiyon deney aleti

### 3.2.6. Serbest basınç deneyi

Kayma dayanımının en kolay biçimde ölçümü numunenin düşey ekseninde basınç uygulanarak kırılmasıdır. Serbest basınç deneyinde silindirik zemin numunesi sadece eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulur. Bu deneyde yükün artışı ile numunedeki boyun kısılması ölçülür ve gerilme şekil değiştirme eğrileri elde edilir (Tumluer 2006). Deney sırasında numunenin taşıdığı yük azalmaya başladığı zaman, ya da boy kısılmasının %30 olmasından sonra deneye son verilir. Serbest basınç deneyi ile bir numunenin kırılmasından sonra Mohr dairesi çizilebilir.

Eksenel gerilmenin maksimum değeri zemindeki serbest basınç mukavemeti değerini verir. Serbest basınç deneyi kendini tutabilen killi zeminlerde uygulanabilir (Coduto 2006).

Bu deneyde zeminin boşluk suyu basınçlarını ölçülmez. Serbest basınç deneyi konsolidasyonsuz drenajsız kohezyonu belirlemek için en çok kullanılan deneydir. Konsolidasyonsuz drenajsız kohezyon ( $c_u$ ) Serbest basınç mukavemetinin yarısına eşittir.

Serbest basınç deneyi ASTM D 2166'ya göre yapılmıştır. Deney standart proktor enerjisinde sıkıştırılan kompaksiyon numunesinden alınan  $3,5 \times 7$  cm lik silindirik örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunenin alt ve üst yüzeyleri deney aygıtının alt ve üst başlıklarının merkezlerine gelecek şekilde yerleştirilir. Kuvvet halkası ve deformasyon saatleri ayarlanır. Yükleme hızı numunenin boy kısılmasının numune boyunun %(0,5-2) si olacak şekilde ayarlanır. Numunenin yüklenmesine başlanır belirli aralıklarla kuvvet halkası saatinden ve deformasyon saatinden okumalar alınır.

Deney sonunda serbest basınç mukavemeti;

$$q_u = \frac{P_{\max}}{A_f} \quad (3.3)$$

bağıntısı ile elde edilir. Burada;

$A_f$ : Numunenin düzeltilmiş alan değeri,

$q_u$ : Serbest basınç mukavemeti

$P_{\max}$ : Numunenin kırıldığı en yüksek basınç değeridir.

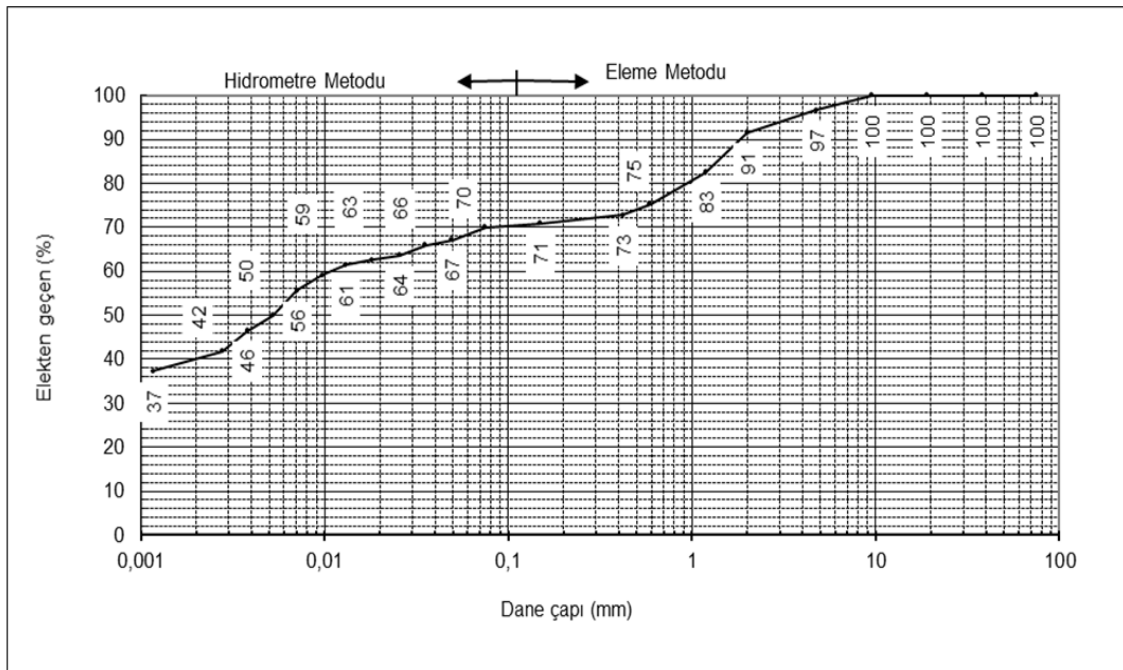


#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneyler Devlet Su İşleri 8. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü'nün laboratuvarlarında yapılmıştır.

##### 4.1. Elek Analizi ve Hidrometre Analizi Deneyi Sonuçları

Şekil 4.1.'de Pehlivanlı Göleti'nden alınan kil numunesinin elek analizi ve hidrometre analizi ile belirlenen dane çapı dağılımı görülmektedir. Çizelge 4.1'de ise elek analizi ve hidrometre analizi sonucunda belirlenen zeminlerin dane çapı yüzdeleri sunulmuştur.

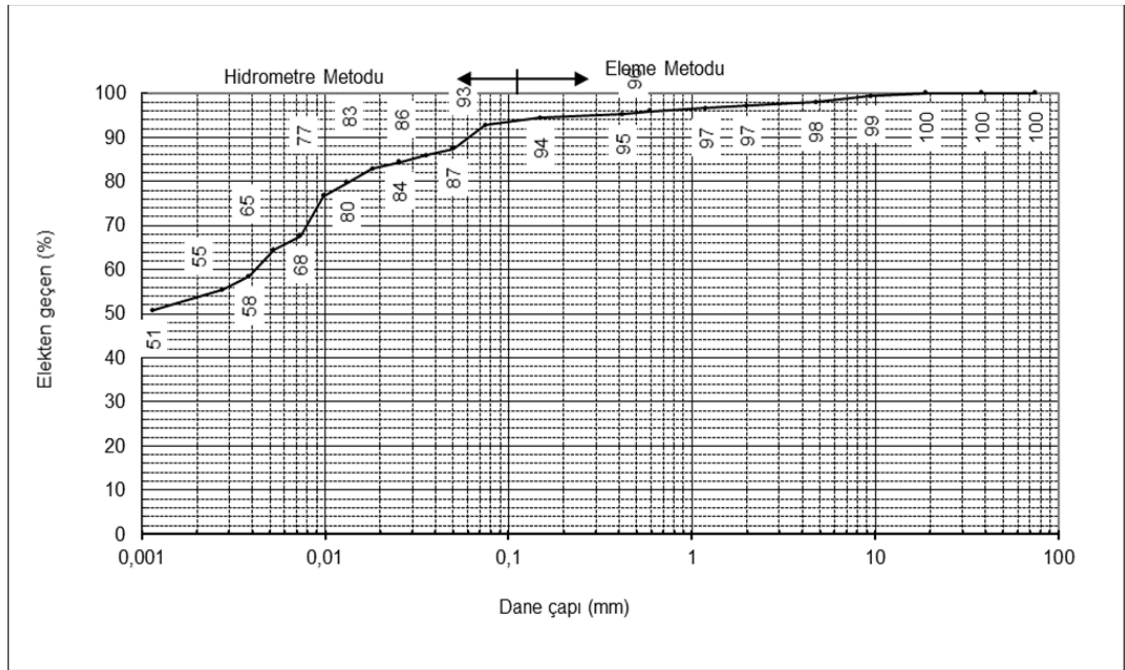


Şekil 4.1. Pehlivanlı Göleti kilinin granülometri eğrisi

**Çizelge 4.1.** Pehlivanlı Göleti kilinin elek analizi ve hidrometre analizi sonuçları

| Zemin | Ağırlıkça Yüzde (%) |
|-------|---------------------|
| Çakıl | 3,4                 |
| Kum   | 26,6                |
| Silt  | 28                  |
| Kil   | 42                  |

Şekil 4.2’de Köşk Göleti’nden alınan kil numunesinin elek analizi ve hidrometre analizi ile belirlenen dane çapı dağılımı görülmektedir. Çizelge 4.2’de ise elek analizi ve hidrometre analizi sonucunda belirlenen zeminlerin dane çapı yüzdeleri sunulmuştur.



**Şekil 4.2.** Köşk Göleti kilinin granülometri eğrisi

**Çizelge 4.2.** Köşk Göleti kilinin elek analizi ve hidrometre analizi sonuçları

| <b>Zemin</b> | <b>Ağırlıkça Yüzde (%)</b> |
|--------------|----------------------------|
| Çakıl        | 2                          |
| Kum          | 5,3                        |
| Silt         | 37,7                       |
| Kil          | 55                         |

#### 4.2. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

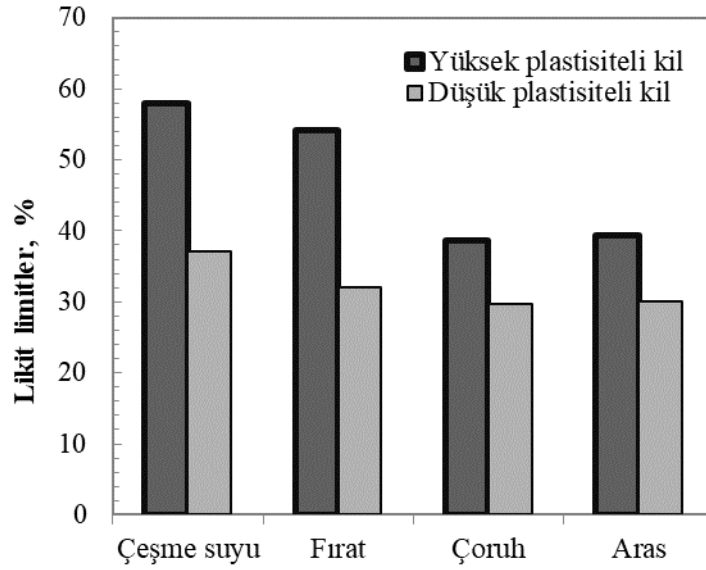
İki kil zemine farklı havzalardan alınan sular katılarak likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Çeşme suyu ile gerçekleştirilmiş kıvam limiti deneyleri, Pehlivanlı Göletinden alınan kilin düşük plastisiteli kil (CL), Köşk Göletinden alınan kilin yüksek plastisiteli kil (CH) olduğunu göstermiştir. CH ve CL killeri üzerinde, farklı havza suları ile gerçekleştirilen likit limit ve plastik limit deney sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir. Farklı suların CH ve CL kilinin likit limitinde, plastik limitinde ve plastisite indisinde meydana getirdiği değişim sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de görülmektedir. CH ve CL killerinin zemin sınıflarında meydana gelen değişim Casagrande plastisite abakları üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).

**Çizelge 4.3.** CH kiline ait kıvam limitleri deney sonuçları

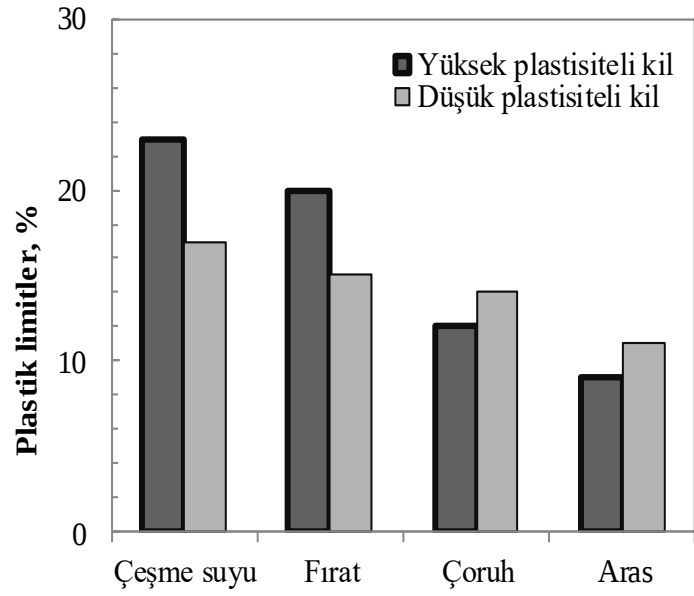
| <b>Su Çeşidi</b>      | <b>W<sub>L</sub> (%)</b> | <b>W<sub>P</sub> (%)</b> | <b>Ip (%)</b> | <b>Zemin Sınıfı</b> |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|---------------------|
| Çeşme Suyu            | 58                       | 23                       | 35            | CH                  |
| Fırat Havzasındaki Su | 54,2                     | 20                       | 34,2          | CH                  |
| Çoruh Havzasındaki Su | 38,7                     | 12                       | 26,7          | ML                  |
| Aras Havzasındaki Su  | 39,4                     | 9                        | 30,4          | ML                  |

**Çizelge 4.4.** CL kiline ait kıvam limitleri deney sonuçları

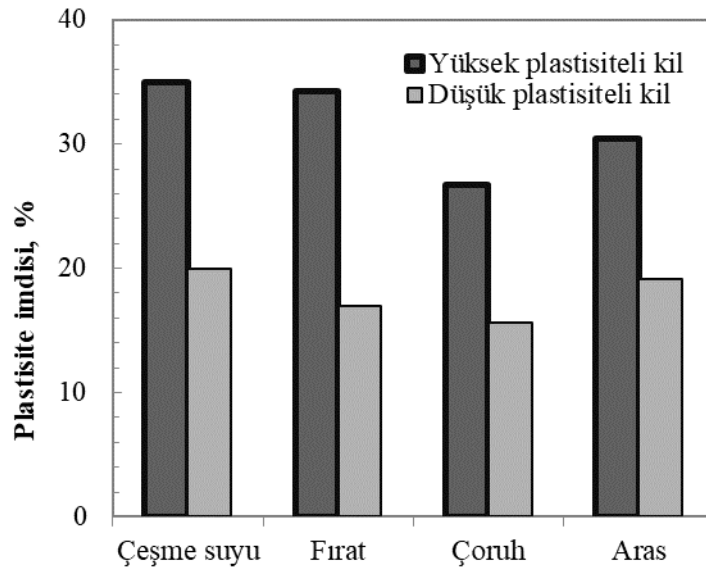
| Su Çeşidi             | W <sub>L</sub> (%) | W <sub>P</sub> (%) | I <sub>p</sub> (%) | Zemin Sınıfı |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Çeşme Suyu            | 37                 | 17                 | 20                 | CL           |
| Fırat Havzasındaki Su | 32                 | 15                 | 17                 | CL           |
| Çoruh Havzasındaki Su | 29,6               | 14                 | 15,6               | CL           |
| Aras Havzasındaki Su  | 30,1               | 11                 | 19,1               | CL           |



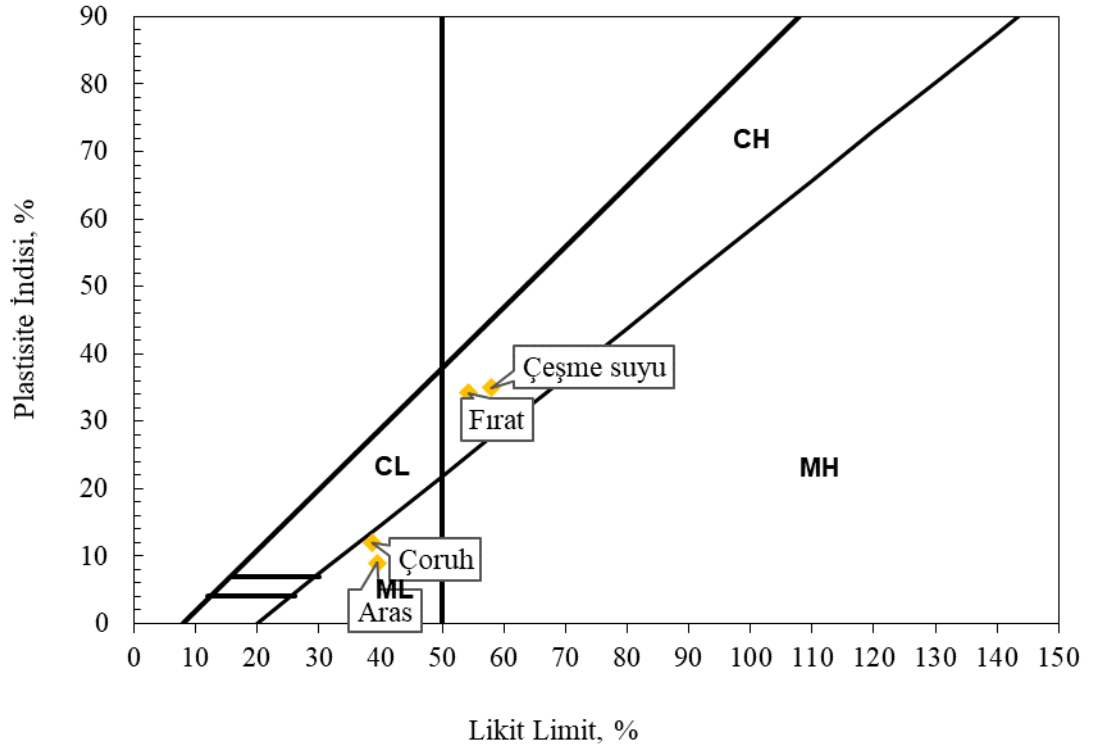
**Şekil 4.3.** Yüksek ve düşük plastisiteli kilin likit limitine farklı suların etkisi



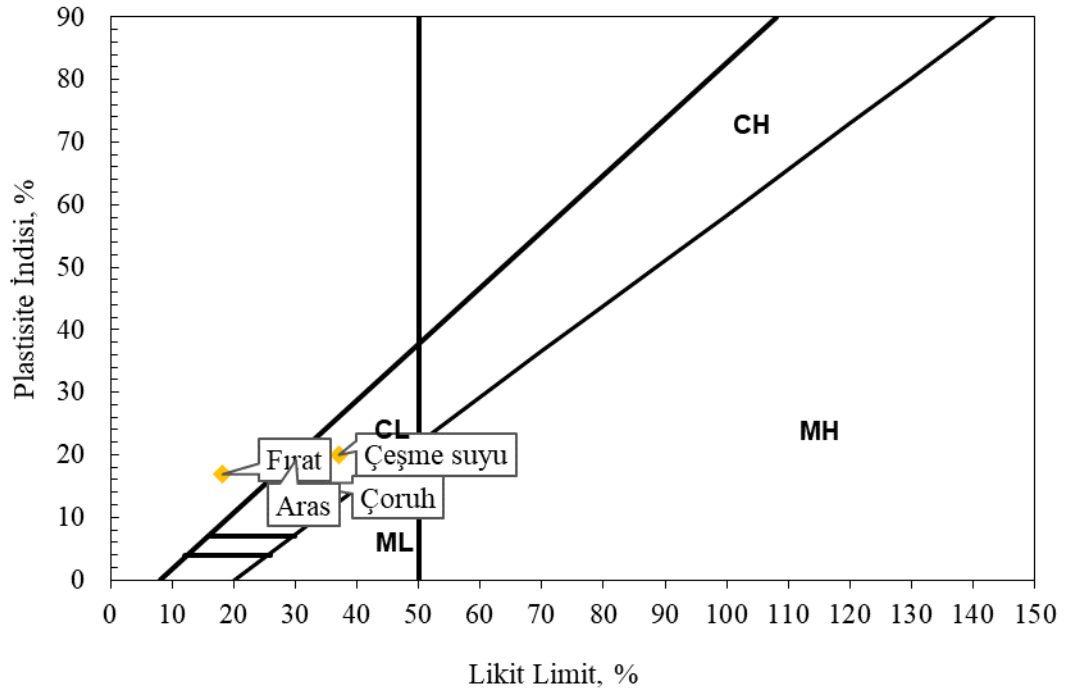
Şekil 4.4. Yüksek ve düşük plastisiteli kilin plastik limitine farklı suların etkisi



Şekil 4.5. Yüksek ve düşük plastisiteli kilin plastisite indisine farklı suların etkisi



Şekil 4.6. Farklı sular etkisi ile CH kilinin zemin sınıfında meydana gelen değişim



Şekil 4.7. Farklı sular etkisi ile CL kilinin zemin sınıfında meydana gelen değişim

CH kiline farklı havzalardan alınan sularla yapılan kıvam limitleri deney sonuçları, çeşme suyu ile yapılan kıvam limitleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.3). Likit limit deneyleri incelendiğinde en fazla azalmanın Çoruh Havzasından alınan suyla yapılan deneyde gerçekleştiği belirlenmiştir. Çoruh Havzasından alınan suyla yapılan likit limit deneyi sonucunda belirlenen likit limit değeri çeşme suyu ile yapılan deney sonucunda belirlenen likit limit deneyinden %33,5 daha düşüktür (Şekil 4.3). CH kiline ait plastik limitlerde ise en fazla azalma %60,8 oranı ile Aras Havzasından alınan suyla gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilmiştir (Şekil 4.4).

CL kiline farklı havzalardan alınan sularla yapılan kıvam limitleri deney sonuçları, çeşme suyu ile yapılan kıvam limitleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.4). Likit limit deneyleri incelendiğinde en fazla azalmanın Çoruh Havzasından alınan suyla yapılan deneyde gerçekleştiği belirlenmiştir. Çoruh Havzasından alınan suyla yapılan likit limit deneyi sonucunda belirlenen likit limit değeri çeşme suyu ile yapılan deney sonucunda belirlenen likit limit deneyinden %37 daha düşüktür (Şekil 4.3). CL kiline ait plastik limitlerde ise en fazla azalma %35,3 oranı ile Aras Havzasından alınan suyla gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilmiştir (Şekil 4.4).

CH kilinde farklı sular etkisiyle, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre belirlenen zemin sınıflarında değişiklikler meydana gelmiştir. Fırat Havzasından alınan su zemin sınıfını değiştirmezken Çoruh ve Aras Havzalarından alınan sular CH kilinin zemin sınıfını ML'ye dönüştürmüştür (Şekil 4.6). Şekil 4.7'ye göre CL kilinde farklı suların zemin sınıfı üzerinde bir değişiklik yapmadığı kilin CL sınıfında kaldığı görülmektedir.

Sulardaki Ca iyon miktarı arttıkça CH ve CL killlerinde likit limit ve plastik limit değerinin düştüğü bilinmektedir (Ören and Kaya 2003). Havza sularına ait anyon analiz sonuçları incelendiğinde havza sularında Ca iyonlarının çeşme suyuna göre daha fazla olduğu görülmektedir. En yüksek Ca değeri Çoruh Havzasından alınan suda bulunmakta

olup, CH ve CL killerine Çoruh Havzasından alınan suyla yapılan likit limit deney sonuçlarının diğer havzalardan alınan sularla yapılan likit limit deney sonuçlarından daha düşük olmasının buna bağlı olduğu düşünülmektedir.

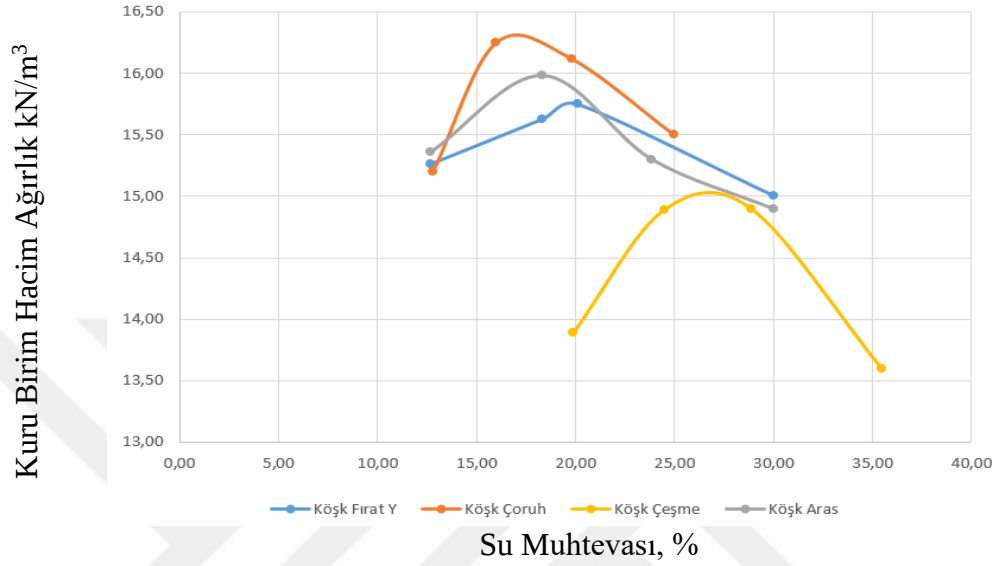
Studds *et al.* (1996) çalışmalarında sodyum bentonit kilini farklı konsantrasyonlarda hazırlanan K, Na, Ca, ve Mg klörür tuz çözeltileri ile doyurarak kilin kıvam limitlerini incelemişlerdir. Tuz çözeltisi arttıkça likit limit değerleri azalmıştır. Abu Zeid and Abd El-Aal (2017) bu durumun serbest iyonların yerini tuzlu sudaki  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  iyonlarının almasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Jayasekera and Hall (2007) çalışmalarında Na miktarının azalmasıyla zeminin likit limit ve plastik limitinin yükseldiğini belirtmiştir. Buna bağlı olarak havza sularının Na miktarlarının çeşme suyuna göre daha yüksek olmasından dolayı, Çoruh Havzası suyunun CH ve CL killerinin likit limit ve plastik limitini düşürmüş olabileceği söylenebilir.

İlaveten, Bakhshipor *et al.* (2016) çalışmalarında düşük pH değerinin likit limitte artışa sebep olduğunu belirtmiştir. Havza sularına ait pH değerlerinin çeşme suyunun pH değerine göre daha yüksek olduğu göz önüne alındığında likit limit değerlerinin düşük olmasında pH'ında etkili olduğu söylenebilir.

#### 4.3. Standart Proktor Deneyi Sonuçları

CH ve CL killerine farklı havzalardan alınan sular ilave edilerek gerçekleştirilen kompaksiyon deneyleri standart proktor enerjisinde gerçekleştirilmiştir. CH kili için Standart proktor deneyleri sonucunda çizilen kompaksiyon eğrileri Şekil 4.8'de görülmektedir. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.5'de sunulmuştur. CH kili ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, farklı sular etkisi ile optimum su muhtevelarında ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda meydana gelen değişim sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir. CL kili için standart proktor deneyleri sonucunda çizilen kompaksiyon eğrileri Şekil 4.9'da görülmektedir. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur. CL kili ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, farklı sular

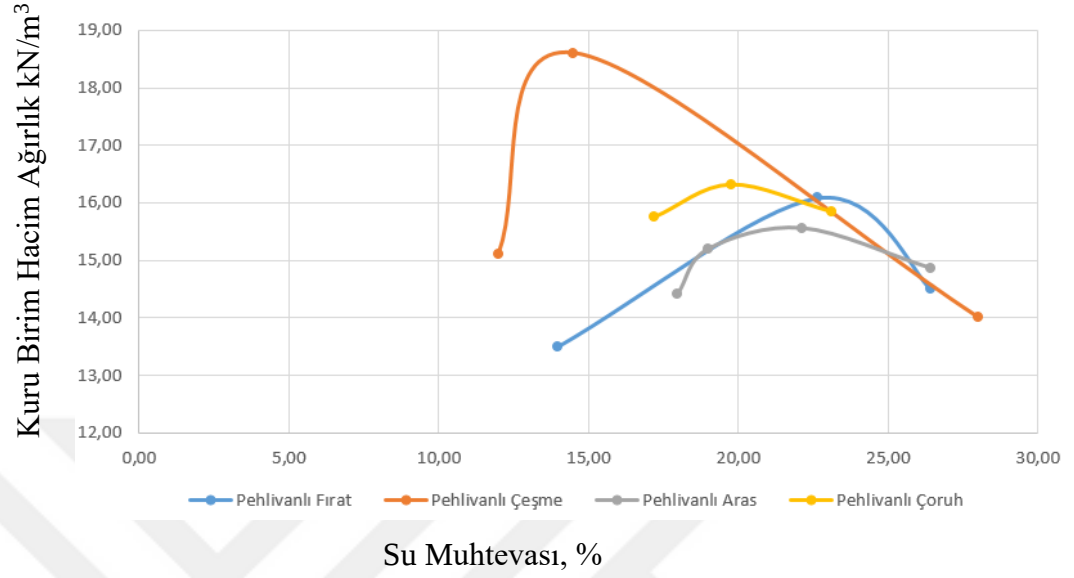
etkisiyle optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda meydana gelen değişim sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir.



**Şekil 4.8.** CH kiline farklı sularla yapılan standart proktor deneyi sonucunda çizilmiş olan kompaksiyon eğrileri

**Çizelge 4.5.** CH kiline ait kompaksiyon parametreleri

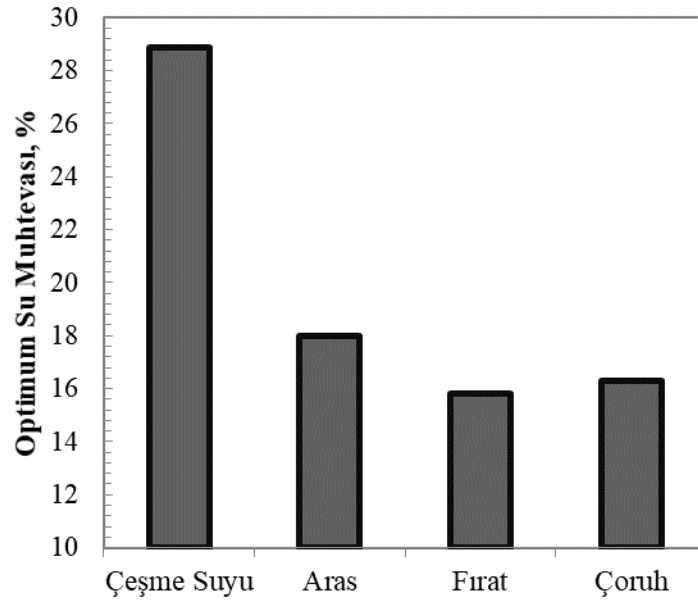
| Su Çeşidi             | $\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $w_{opt}$ (%) |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------|
| Çeşme Suyu            | 15                                   | 28,9          |
| Fırat Havzasındaki Su | 15,80                                | 20            |
| Çoruh Havzasındaki Su | 16,30                                | 17            |
| Aras Havzasındaki Su  | 15,98                                | 18            |



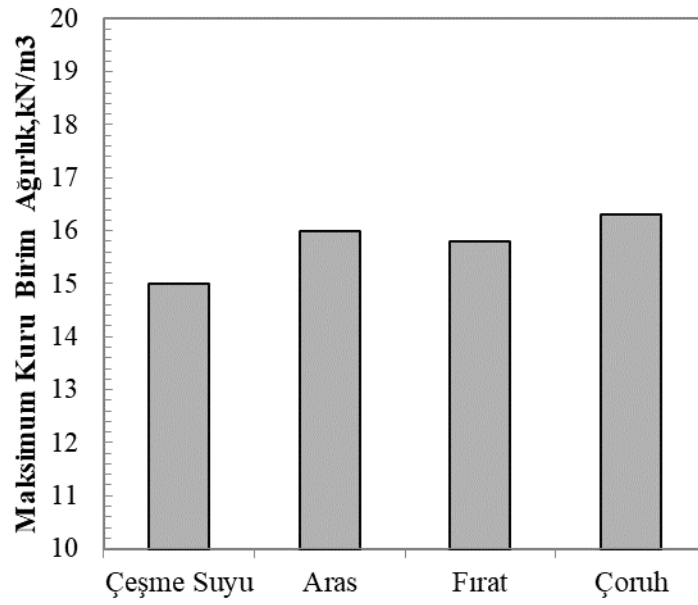
**Şekil 4.9.** CL kiline farklı sularla yapılan standart proktor deneyi sonucunda çizilmiş olan kompaksiyon eğrileri

**Çizelge 4.6.** CL kiline ait kompaksiyon parametreleri

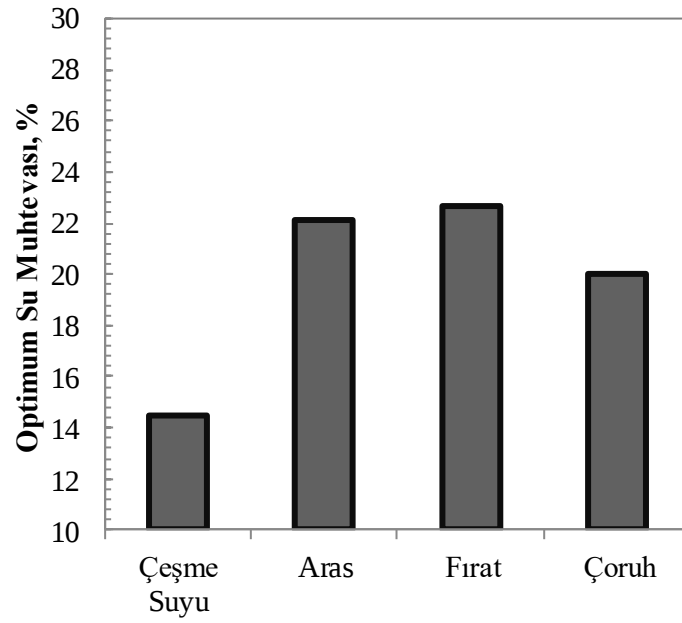
| Su Çeşidi             | $\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $w_{opt}$ (%) |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------|
| Çeşme Suyu            | 18,6                                 | 14,5          |
| Fırat Havzasındaki Su | 16,08                                | 22,67         |
| Çoruh Havzasındaki Su | 16,32                                | 20            |
| Aras Havzasındaki Su  | 15.56                                | 22,14         |



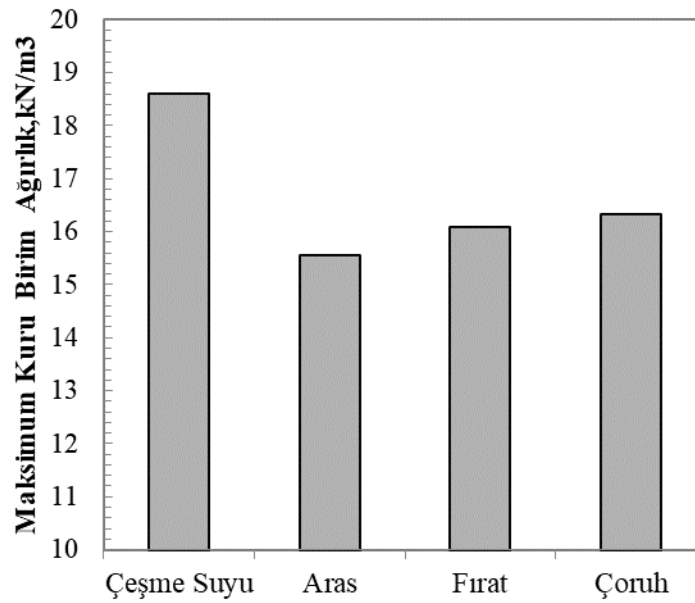
**Şekil 4.10.** CH kili optimum su muhtevasına farklı suların etkisi



**Şekil 4.11.** CH kili maksimum kuru birim hacim ağırlığına farklı suların etkisi



**Şekil 4.12.** CL kili optimum su muhtevasına farklı suların etkisi



**Şekil 4.13.** CL kili maksimum kuru birim hacim ağırlığına farklı suların etkisi

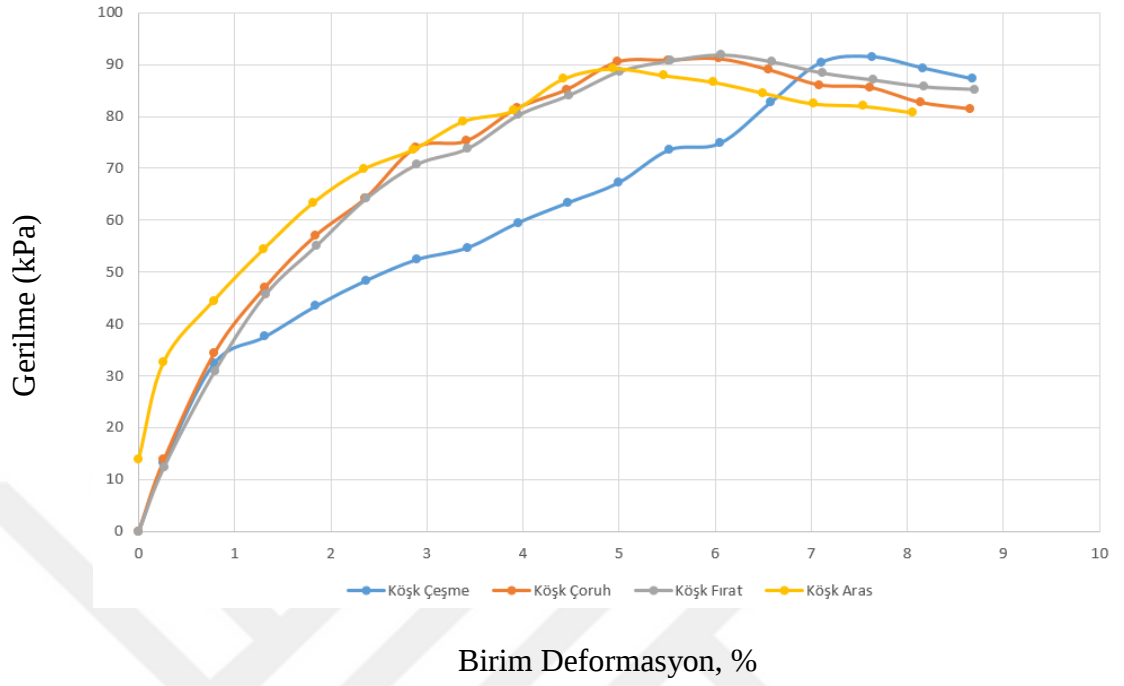
Çizelge 4.5, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 incelendiğinde, CH kili üzerinde farklı havza suları ile gerçekleştirilen standart proktor deney sonuçları, çeşme suyu ile yapılan deney

sonuçları ile karşılaştığında, optimum su muhtevalarının azaldığı, maksimum birim hacim ağırlık değerlerinin ise arttığı görülmüştür. En düşük optimum su muhtevası ve en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık Çoruh Havzasından alınan su ile yapılan deneylerle elde edilmiştir. Çoruh Havzasından alınan su yüksek plastisiteli kilin optimum su muhtevasını %41,2 oranında azaltmış, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini ise %8 oranında artırmıştır. Yalvaç (2011) çalışmasında KOI miktarı arttıkça likit limit ve optimum su muhtevasının düştüğünü, maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığını belirlemiştir.

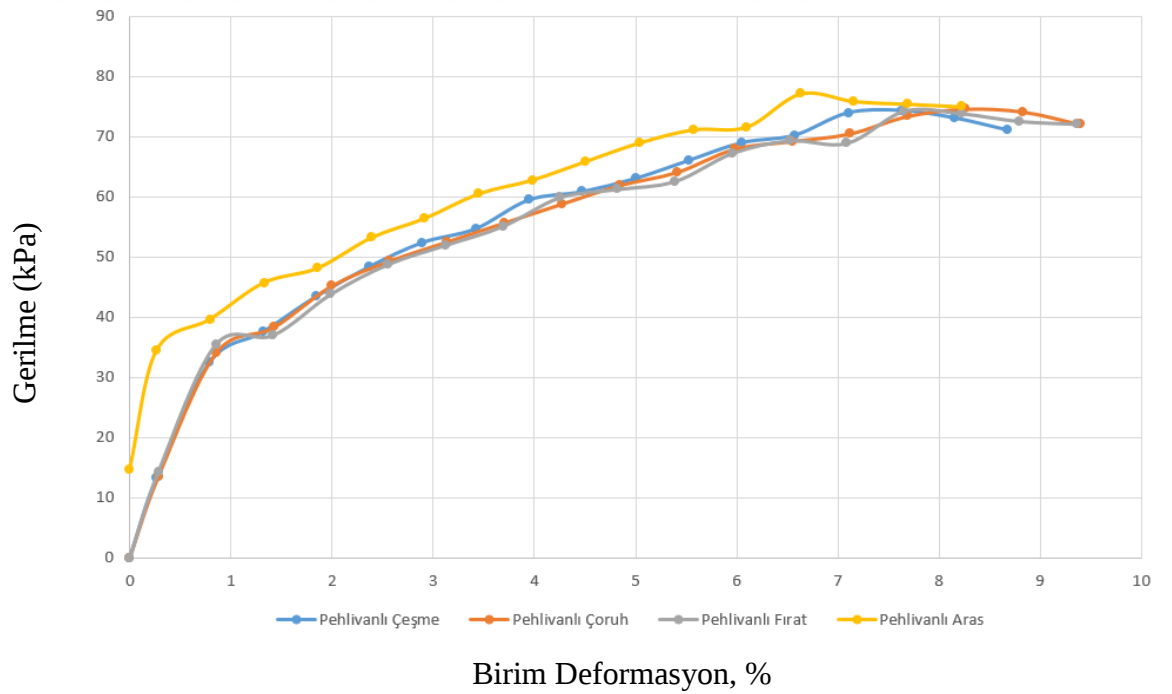
Çizelge 4.6, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde, CL kili üzerinde farklı havza suları ile gerçekleştirilen standart proktor deney sonuçları, çeşme suyu ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştığında, optimum su muhtevalarının arttığı, maksimum birim hacim ağırlık değerlerinin ise azaldığı görülmüştür. CL kilinde en yüksek optimum su muhtevası Fırat Havzasından alınan su ile yapılan deneyde elde edilmiştir. Fırat Havzasından alınan su düşük plastisiteli kilin optimum su muhtevasını %56,3 oranında artırmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı en fazla azaltan su ise Aras Havzasından alınan su olarak belirlenmiştir. Aras Havzasından alınan su, düşük plastisiteli kilin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini %16,3 oranında azaltmıştır.

#### **4.4. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları**

CH ve CL killerine farklı havzalardan alınan sular katılarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Farklı sular etkisi ile serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme birim deformasyon eğrileri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir. CH ve CL killeri ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, farklı sular etkisi ile serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimler ise sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de görülmektedir. Serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.14. CH kili için farklı sular ile elde edilmiş gerilme-birim deformasyon eğrileri



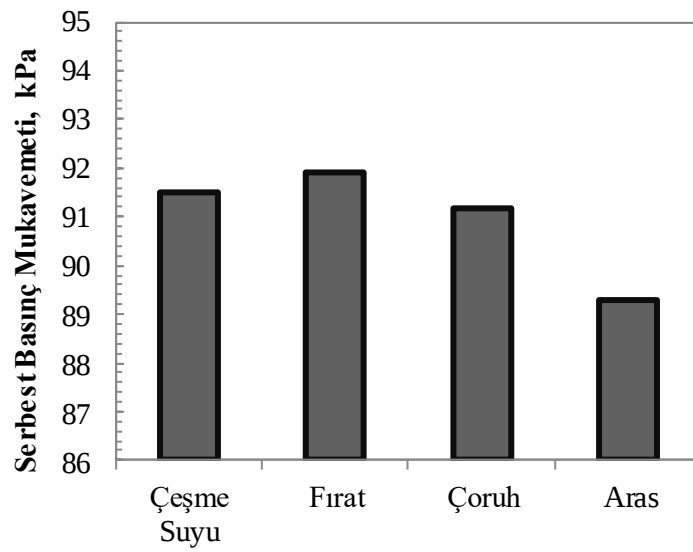
Şekil 4.15. CL kili için farklı sular ile elde edilmiş gerilme- birim deformasyon eğrileri

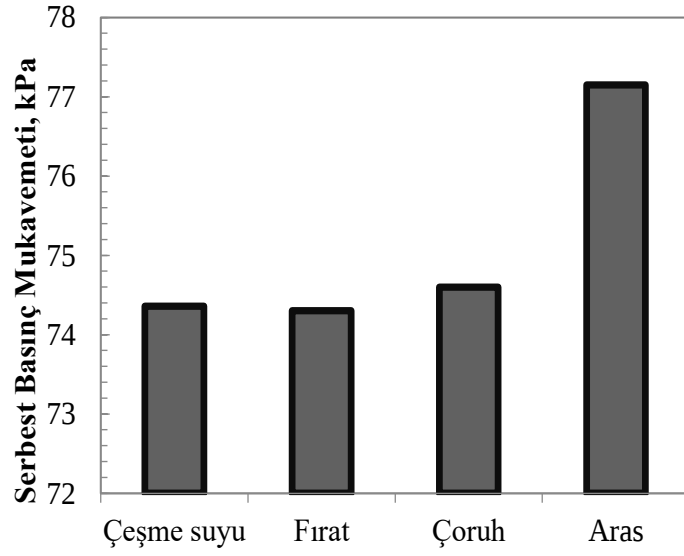
**Çizelge 4.7.** CH kiline ait serbest basınç deney sonuçları

| Su Çeşidi             | Serbest Basınç Mukavemeti (kPa) | Konsolidasyonsuz-Drenajsız Kohezyon (kPa) |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| Çeşme Suyu            | 91,52                           | 45,76                                     |
| Fırat Havzasındaki Su | 91,89                           | 45,94                                     |
| Çoruh Havzasındaki Su | 91,17                           | 45,58                                     |
| Aras Havzasındaki Su  | 89,27                           | 44,63                                     |

**Çizelge 4.8.** CL kiline ait serbest basınç deney sonuçları

| Su Çeşidi             | Serbest Basınç Mukavemeti (kPa) | Konsolidasyonsuz-Drenajsız Kohezyon (kPa) |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| Çeşme Suyu            | 74,36                           | 37,18                                     |
| Fırat Havzasındaki Su | 74,30                           | 37,15                                     |
| Çoruh Havzasındaki Su | 74,60                           | 37,30                                     |
| Aras Havzasındaki Su  | 77,15                           | 38,58                                     |

**Şekil 4.16.** CH kilinin serbest basınç mukavemetine farklı suların etkisi



**Şekil 4.17.** CL kilinin serbest basınç mukavemetine farklı suların etkisi

CH ve CL kiline farklı havza suları ile yapılan serbest basınç deneyleri, serbest basınç mukavemetinin farklı sular etkisiyle çok fazla değişmediğini göstermiştir.

CH kilinde, Aras Havzasından alınan su serbest basınç mukavemetini %2 oranında düşürmüştü, CL kilinde, Aras Havzasından alınan su serbest basınç mukavemetini %3,7 oranında artırmıştır.

#### 4.5. Şişme Dereceleri

CH ve CL killerinin farklı havza suları etkisi ile kazandıkları şişme dereceleri “niteliksel” yöntemle belirlenmiştir. Farklı havzalardan alınan suların kıvam limit deney sonuçları ile birlikte Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’deki verilerden de yararlanarak killerin şişme dereceleri bulunmuştur.

Çizelge 4.9’da Köşk Göleti’nden alınan kil numunesinin (CH) şişme dereceleri Çizelge 4.10’da Pehlivanlı Göleti’nden alınan kil numunesinin (CL) şişme dereceleri verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** CH kiline ait şişme dereceleri

| Su Çeşidi             | Şişme derecesi |
|-----------------------|----------------|
| Çeşme Suyu            | Yüksek         |
| Fırat Havzasındaki Su | Yüksek         |
| Çoruh Havzasındaki Su | Orta           |
| Aras Havzasındaki Su  | Orta           |

**Çizelge 4.10.** CL kiline ait şişme dereceleri

| Su Çeşidi             | Şişme derecesi |
|-----------------------|----------------|
| Çeşme Suyu            | Orta           |
| Fırat Havzasındaki Su | Düşük          |
| Çoruh Havzasındaki Su | Düşük          |
| Aras Havzasındaki Su  | Orta           |

Çizelge 4.9'a göre CH kili çeşme suyu ile etkileştirildiğinde kilin şişme derecesi yüksek olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.10 incelendiğinde ise CL kilinin çeşme suyu ile etkileştirilmesi ile kilin şişme derecesinin orta olarak belirlendiği görülmektedir. Farklı havza sularının CH ve CL kilinin şişme potansiyelini düşürdüğü söylenebilir.

Yılmaz and Marschalko (2007) çalışmalarında sulardaki tuz miktarının artmasıyla kilin şişme yüzdesi ve şişme potansiyelinin azaldığını belirlemişlerdir. Yılmaz (2011) çalışmasında sulardaki tuz konsantrasyonunun artmasıyla kilin şişme potansiyeli ve şişme yeteneğinin azaldığını ifade etmiştir. Havza sularındaki Na, Ca, Cl iyonlarının miktarındaki artışla şişme dereceleri azalmıştır (Çizelge 4.9, Çizelge 4.10).

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de CH ve CL kiline farklı havza suları ile yapılan deney sonuçları görülmektedir.

**Çizelge 4.11.** CH kiline ait deney sonuçları

| Su Çeşidi             | w <sub>L</sub> (%) | w <sub>P</sub> (%) | I <sub>P</sub> (%) | $\gamma_{kmax}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | w <sub>opt</sub><br>(%) | q <sub>u</sub><br>(kPa) | Zemin<br>sınıfı |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Çeşme Suyu            | 58                 | 23                 | 35                 | 15                                      | 28,9                    | 91,52                   | CH              |
| Fırat Havzasındaki Su | 54,2               | 20                 | 34,2               | 15,80                                   | 20                      | 91,89                   | CH              |
| Çoruh Havzasındaki Su | 38,7               | 12                 | 26,7               | 16,30                                   | 17                      | 91,17                   | ML              |
| Aras Havzasındaki Su  | 39,4               | 9                  | 30,4               | 15,98                                   | 18                      | 89,27                   | ML              |

**Çizelge 4.12.** CL kiline ait deney sonuçları

| Su Çeşidi             | w <sub>L</sub> (%) | w <sub>P</sub> (%) | I <sub>P</sub> (%) | $\gamma_{kmax}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | w <sub>opt</sub><br>(%) | q <sub>u</sub><br>(kPa) | Zemin<br>sınıfı |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Çeşme Suyu            | 37                 | 17                 | 20                 | 18,6                                    | 14,5                    | 74,36                   | CL              |
| Fırat Havzasındaki Su | 32                 | 15                 | 17                 | 16,08                                   | 22,67                   | 74,3                    | CL              |
| Çoruh Havzasındaki Su | 29,6               | 14                 | 15,6               | 16,32                                   | 20                      | 74,6                    | CL              |
| Aras Havzasındaki Su  | 30,1               | 11                 | 19,1               | 15,56                                   | 22,14                   | 77,15                   | CL              |

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Fırat, Aras ve Çoruh Havzalarından alınan suların yüksek ve düşük plastisiteli killerin kıvam limitlerine, kompaksiyon ve serbest basınç mukavemeti özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca numunelerin niteliksel olarak şişme dereceleri belirlenmiştir. Bu kapsamda killere, havzalardan alınan sularla kıvam limitleri, standart proktor ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, çeşme suyu ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çeşme suyunun ve havza sularının anyon analizleri, katyon analizleri, iletkenlik, pH ve kimyasal oksijen ihtiyacı analizleri yaptırılmış olup, çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

-Yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri farklı sular etkisiyle azalmıştır. Çoruh Havzasından alınan suyun diğerlerine göre kıvam limitleri üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Çoruh Havzasından alınan su, çeşme suyu ile yapılan deneylere göre, CH kilinin likit limitini, plastik limitini ve plastisite indisini sırasıyla, %33,2, %47,8 ve %23,7 oranlarında düşürmüştür.

-Yüksek plastisiteli kilde, kullanılan suyun cinsine göre killerin sınıflarında değişim gözlemlenmiştir. Çeşme suyu ile yapılan deneylerde kilin sınıfı CH olarak belirlenirken, Çoruh ve Aras havzalarındaki su ile yapılan deneylerde kilin sınıfı ML olarak değişmiştir. Fırat havzasındaki su ile yapılan deneyde kilin sınıfında herhangi bir değişim gözlemlenmemiş ancak kilin plastisitesi azalmıştır.

-Düşük plastisiteli kilin kıvam limitleri farklı sular etkisiyle azalmıştır. Düşük plastisiteli kilin kıvam limitlerinin azalmasında Çoruh havzasından alınan suyun diğerlerine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Çoruh Havzasından alınan su, çeşme suyu ile yapılan deneylere göre, CL kilinin likit limitini, plastik limitini ve plastisite indisini sırasıyla, %37, %17,6 ve %22 oranlarında düşürmüştür.

-Düşük plastiteli kilde kullanılan suyun cinsine göre killerin sınıflarında ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Çeşme suyu ile yapılan deneylerde kilin sınıfı CL olarak belirlenmiştir. Çoruh, Aras ve Fırat Havzalarındaki su ile yapılan deneylerde kilin sınıfında bir değişim gözlemlenmemiştir.

-Yüksek plastisiteli kil üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneylerine göre havzalardan alınan sularla yapılan deneyler çeşme suyu ile yapılan deneylerde karşılaştırıldığında maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin daha yüksek, optimum su muhtevası değerlerinin ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. En yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ve en düşük optimum su muhtevası Çoruh Havzasından alınan suyla yapılan deneylerden elde edilmiştir.

-Düşük plastisiteli kil üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneylerine göre havzalardan alınan sularla yapılan deneyler çeşme suyu ile yapılan deneylerle karşılaştırıldığında maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin daha düşük, optimum su muhtevası değerlerinin ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

-Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killeri üzerinde çeşme suyu ve farklı havza suları ile elde edilen serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki kilde de serbest basınç mukavemetlerinin farklı havza sularından fazla etkilenmediği görülmüştür.

-Yüksek plastisiteli kilde farklı havza suları ile elde edilen kıvam limitleri deney sonuçlarına göre killerin şişme dereceleri belirlenmiştir. Buna göre, çeşme suyu ve Fırat havzasındaki sularda şişme derecesi yüksek iken Çoruh ve Aras havzasındaki sularda şişme derecelerinin daha düşük olduğu görülmüştür.

-Düşük plastisiteli kilde farklı havza suları ile elde edilen kıvam limitleri deney sonuçlarına göre killerin şişme dereceleri belirlenmiştir. Buna göre, çeşme suyu ve Aras havzasındaki sularda şişme dereceleri orta iken Çoruh ve Fırat havzasındaki suların düşük şişme derecesine sahip olduğu söylenebilir.

Yapılan bu çalışma, farklı havzalardan alınan suların, CH ve CL killерinin kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri ve şişme potansiyellerinde farklılıklara neden olduğunu göstermiştir. Bu farklılıkların havza sularının sahip olduğu farklı kimyasal içerikler sebebiyle meydana geldiği söylenebilir. Killerin serbest basınç mukavemetlerinin ise farklı havza sularından çok fazla etkilenmediği görülmüştür. İlerleyen çalışmalarda farklı havza sularının killерin geçirimliliği ve konsolidasyon özellikleri üzerindeki etkileri araştırılabilir. İlâveten, farklı suların killерin mineralojik yapılarında ne gibi değişikliklere sebep olduğunun özel analiz yöntemleri ile belirlenmesinin, geoteknik özelliklerde meydana gelen değişimlerin nedenlerini daha net ortaya koyacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Abu Zeid, M. M., Abd El-Aal, A. K., 2017. Effect of salinity of groundwater on the geotechnical properties of some Egyptian clay. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26 (3): 643-648.
- Angın, Z., Angın, A., 2005. Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. 1. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Anonymous, 2019. Google Earth, (25.04.2019)
- ASTM D 2166-00, 2000. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 422-63, 1998. Standard Test Method for Particle Analysis of Soils. ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4318-00, 2000. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 698-00, 2000. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM West Conshohocken, PA.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Akbulut, R.K., Akbulut, S., Yetimoğlu, T. 2009. Kimyasal Katkılarla Muamele Edilen Kil Zeminlerin Kıvam Limitleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi. Konya.
- Bakhshipour, Z., Asadi, A., Huat, B.B.K., A. Sridharan, A., 2016. Long-Term intruding effects of acid rain on engineering properties of primary and secondary kaolinite. *Clays.Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2:21
- Başer, O., 2009. Stabilization of Expansive Soils Using Waste Marble Dust. Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering, Ankara.
- Chen, F. H., 1988. Foundations on Expansive Soils. Elsevier, Amsterdam.
- Coduto, P., 2006. (Çev. Mollamahmutoğlu, M.) Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, s: 39-80, s: 600-680.
- Dalgıç, A., Kavak O., 2004. Kil Mineralleri ve Sağlık. *Dicle Tıp Dergisi* Cilt:31, Sayı:2, (73-78).
- Demir, S., Kılıç, M., 2010. Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 95-104.
- Dexter, A. R., Chant, K. Y., 1991. Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations. *European Journal of Soil Science*, 42 (2): 219–226.
- Elmashad, M., Ata, A., 2014. Effect of seawater on consistency, infiltration rate and swelling characteristics of montmorillonite clay. *HBRC Journal*, 12(2): 175-180.
- Grim, R. E., 1959. Physico-Chemical properties of soils: Clay Minerals, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.85, No.SM2, pp 1-17.
- Guerra D.L., Airolti, C., Sousa, S.K., 2008. Adsorption and thermodynamic studies of Cu(II) and Zn(II) on organofunctionalized-kaolinite. *Applied Surface Science*. 254, 5157–5163.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

- Jayasekera, S., Hall, S., 2007. Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments. *Geotech Geol Eng.*, 25:1–10.
- Keskin, İ., 2007. Kil Mineralleri ve Zemin Yapısı, Karabük Üniversitesi
- Kinuthia, J.M., Wild, S., Jones, G.I., 1999. Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite. *Applied Clay Science*, 14: 27–45.
- Kucur, T., 1977. Bent ve Göletlerde Kullanılan Doğal Yapı Gereçleri. Jeoloji ve Malzeme Fen Heyeti Müdürlüğü, Bursa-Uludağ.
- Naidu, P.V., 2015. Effect of Calcium Exchange Capacity on the Properties of Black Cotton Soil. Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela Odisha, India.
- Önalp, A., Arel, E., 2013. Geoteknik Bilgisi I. Birsen Yayınevi Ltd.Şti., İstanbul.
- Ören, A.H., Kaya, A., 2003. Some engineering aspects of homoionized mixed clay minerals. *Environmental Monitoring and Assessment*, 84: 85–98
- Palalı, A., Yaşar, E., Demir, A., 2006. Handere Kilinde Su İçeriği Ve Kompaksiyon Enerjisinin Mukavemete Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, Cilt 21, Sayı 1-2, Adana.
- Sridharan, A., Rao, S. M., Murthy, N.S., 1986. Compressibility behaviour of homoionized bentonites. *Géotechnique*, 36 (4): 551-564.
- Studds, P.G., Douglas I Stewart, D.I., Cousens, T.W., 1996. The effect of ion valence on the swelling behaviour of sodium montmorillonite. Conference: Polluted and Marginal Land: Proceedings of the 4th International Conference on Re-Use of Contaminated Land and Landfills Brunel University, London.
- Tumluer, G., 2006. Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Uğur, F. A., 2005. Kil Minerallerinin Radyoaktif Maddeleri Tutma Özelliklerinin, Kilin Yapısına Ve İşlem Koşullarına Bağlılığının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Uzuner, B.A., 2007. Temel Zemin Mekanik, Derya Kitabevi, 560 s., Trabzon.
- Yalvaç, E., 2011. Kilin Mühendislik Özelliklerine Atıksuların Etkisi. Yüksek lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yılmaz I., 2011. Farklı Türlerde Suların Killerin Şişme Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması Proje No: 110Y009
- Yılmaz I., Marschalko M., 2014. The effect of different types of water on the swelling behaviour of expansive clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73 (4):1049–1062

## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum’da doğdu. İlkokulu ve ortaokulu Sabacı İlköğretim okulu’nda, liseyi Erzurum Anadolu Lisesi’nde okudu. Lisans eğitimine 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı. Üniversiteden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Devlet Su İşleri 8.Bölge Müdürlüğüne atandı. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

