

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YERALTI AÇIKLIKLARINDA ŞİŞEN KİLLERİN  
DURAYLILIĞA ETKİSİNİN AZALTILMASINA  
YÖNELİK YENİ YÖNTEMLERİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Can Berk KOCAMAN**

**Temmuz, 2018**

**İZMİR**

**YERALTI AÇIKLIKLARINDA ŞİŞEN KİLLERİN  
DURAYLILIĞA ETKİSİNİN AZALTILMASINA  
YÖNELİK YENİ YÖNTEMLERİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden İşletme Programı**

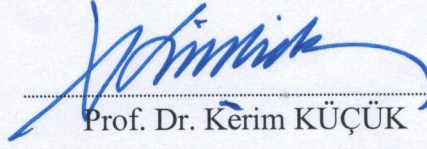
**Can Berk KOCAMAN**

**Temmuz, 2018**

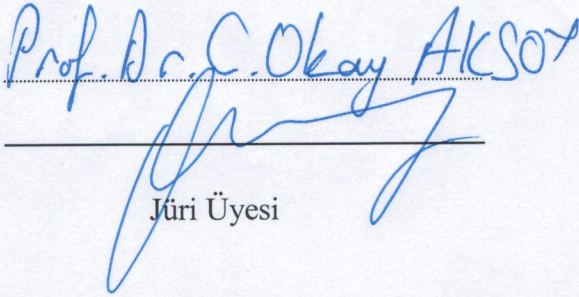
**İZMİR**

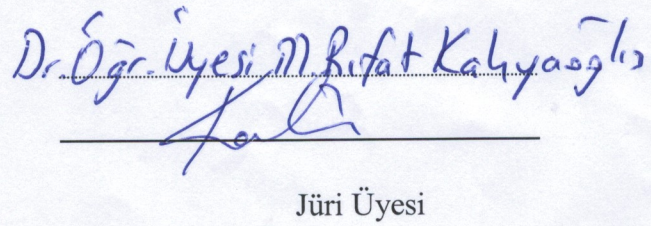
## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

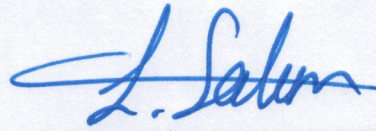
CAN BERK KOCAMAN tarafından PROF. DR. KERİM KÜÇÜK yönetiminde hazırlanan “YERALTI AÇIKLIKLARINDA ŞİŞEN KİLLERİN DURAYLILIĞA ETKİSİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK YENİ YÖNTEMLERİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Kerim KÜÇÜK

Yönetici

  
Jüri Üyesi

  
Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Başta tezime ve çalışmalarına yön veren, hiçbir konuda bana yardımcı olmak ve yol göstermekten kaçınmayan, bilgisi ve tecrübesiyle sadece meslek hayatında değil günlük hayatta da bana yeni bakış açıları kazandıran çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Kerim Küçük 'e

Maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, beni yetiştirip bugünlere kadar getiren, beni yalnız bırakmayan, derdime ortak olan her yaptığım yanı sıra bana hep doğru yolu gösteren sevgili aileme en içten saygı ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu Tez Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenen 2017.KB.FEN.025 nolu 'Yeraltı Açıklıklarında Şişen Killerin Duraylılığa Etkisinin Azaltılmasına Yönelik Yeni Yöntemlerin Araştırılması' başlıklı projede yer alan bazı çalışmaları içermektedir. Bu bağlamda sağladığı destek dolayısı ile Dokuz Eylül Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Can Berk KOCAMAN

# YERALTI AÇIKLIKLARINDA ŞİŞEN KİLLERİN DURAYLILIĞA ETKİSİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK YENİ YÖNTEMLERİN ARAŞTIRILMASI

## ÖZ

Bazı killer içeriğindeki mineraller nedeniyle şişme özelliğine sahiptirler. Özellikle simektit grubu kil mineralleri içeren killer şişme kabiliyeti olan killerdir. Bu killer, bünyelerine su aldıkları zaman bir miktar şişerler ve yeraltı açıklıklarında önemli miktarda deformasyona neden olurlar. Bu yüksek deformasyon miktarı ise yeraltı açıklıklarında uygulanan tahkimatı tahrip ettiği gibi, aynı zamanda bu açıklıklarda yapılan madencilik-tünelcilik operasyonlarını olumsuz etkilemektedir. Bu durumda işletme maliyetlerinde önemli artışlar ve aynı zamanda işgücü kaybı olmaktadır. Tez kapsamında, özellikle yeraltı kazılarında karşılaşılan, tahkimatın ve yeraltı boşluğunun duraylılığını etkileyen, şişme potansiyeline sahip killerin şişme özelliklerinin kısmen veya tamamen ortadan kaldırılmasına yönelik laboratuvar çalışmaları yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Şişen zeminler, şişme deneyi yöntemleri, montmorillonit, kaolinit, uçucu küller

# INVESTIGATION OF NEW METHODS FOR REDUCING THE EFFECT OF SWELLING CLAYS ON STABILITY OF UNDERGROUND OPENINGS

## ABSTRACT

Some of the clay minerals have swelling properties. In particular, clay minerals that have the smectite group minerals have swelling ability. When These clays receive water from their hulls, they are swell a little and cause a significant amount of deformation in the underground openings. This high amount of deformation damages the underground openings as well as negatively affects mining-tunneling operations in these openings. In this case, significant increases in operating costs and loss of manpower occur at the same time. Within the scope of the project, it is planned to carry out laboratory and on-site field studies for the partial or complete elimination of the swelling properties of the clay, which has an inflation potency, especially in underground excavations, which affects the stability of the fortification and underground space.

**Keywords:** Soil swelling, swelling clays, swelling test methods, montmorillonite, kaolinite, fly ash

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – KİLİN TANIMI ve KİLLERİN SINIFLANDIRILMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1 Kil Mineralinin Oluşumu ve Genel Yapısı.....	3
2.1.1 Kilin Oluşumu .....	3
2.1.2 Killerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri .....	5
2.1.2.1 Fiziksel Özellikleri.....	5
2.1.2.2 Kimyasal Özellikleri .....	5
2.1.3 Kilin Genel Yapısı .....	6
2.2 Killerin Sınıflandırılması.....	9
2.3 Killerde Şişme Davranışı.....	11
2.3.1 Killi Zeminlerde Şişme Özelliğinin Tanımlanması.....	13
2.4 Killerde Şişme Davranışının Neden Olduğu Problemler .....	14

**BÖLÜM ÜÇ – GEÇMİŞ YILLARDA YAPILAN ÇALIŞMALAR..... 16**

**BÖLÜM DÖRT – ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI..... 23**

4.1 Zemin Mekaniği .....	23
4.2 Tanımlama Deneyleri .....	25
4.2.1 Zemin Sınıflandırma Deneyleri .....	25
4.2.2 Mineralojik Deneyler.....	26
4.2.3 Katyon Değişim Kapasitesi .....	27
4.2.4 Serbest Şişme.....	28
4.2.5 Potansiyel Hacim Değiştirme (PVC) Deneyi .....	29
4.2.6 Kaliforniya Taşıma Oranı .....	30
4.2.7 Doğrusal Genişleyebilirlik Katsayısı .....	30
4.3 Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması.....	31

**BÖLÜM BEŞ – KİL STABİLİZASYON YÖNTEMLERİ..... 34**

5.1 Kimyasal Katkı Maddelerin Kullanımı .....	34
5.1.1 Kireç Stabilizasyonu.....	34
5.1.2 Çimento Stabilizasyonu .....	36
5.1.3 İnorganik Tuzlar ile Stabilizasyon.....	36
5.1.4 Uçucu Kül Kullanımı.....	37
5.1.5 Organik Maddelerin Kullanımı .....	40
5.2 Sıkışma Kontrolü ile Zeminlerin İyileştirilmesi.....	41
5.2.1 Kaldırıp Yeniden Yerleştirme.....	41
5.2.2 Örseleyip Yeniden Sıkıştırma.....	41
5.3 Sürşarj Yükleme ile Zeminlerin İyileştirilmesi .....	42



5.4 Su İçeriğinin Korunması ile Zeminlerin İyileştirilmesi .....	43
<b>BÖLÜM ALTI – LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>43</b>
6.1.Çalışma Kapsamında Gerçekleştirilen Zemin Sınıflandırma Deneyleri .....	43
6.1.1 XRD Analizleri.....	43
6.1.2 Atterberg Limitleri.....	48
6.1.2.1 Koni Düşürme (Penetrasyon) ile Likit Limit Tayini .....	49
6.1.2.2 Plastik Limit Tayini .....	51
6.1.3 Konsolidasyon .....	53
6.1.3.1 Konsolidasyon (Ödometre) Deneyi .....	54
6.1.3.2 Konsolidasyon Parametreleri .....	57
6.1.3.3 Ham Numunelerin Konsolidasyon Sonuçları .....	58
6.1.4 Birim Hacim Ağırlık Tayini .....	60
6.1.5 Kimyasal Analiz .....	61
6.1.5.1 Eritiş.....	62
6.1.5.2 Kızdırma Kaybı.....	62
6.2. Kimyasal Katkı Uygulamaları Ve sonuçları .....	63
6.2.1 Atterberg Limitleri.....	63
6.2.1.1 Potasyum Klorür ile Zemin İyileştirilmesi .....	63
6.2.1.2 Mg(OH) <sub>2</sub> ile Zemin İyileştirilmesi.....	66
<b>BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>70</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kil zemin mikro yapısının şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.2 Tetrahedron ve oktohedron yapı.....	7
Şekil 2.3 a) silis tetrahedron b) tetrahedran tabaka.....	8
Şekil 2.4 a) alüminyum oktohedron b) oktohedral tabaka.....	8
Şekil 2.5 Killeri oluşturan yapılar.....	9
Şekil 2.6 Tipik kil minerallerinin taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları.....	11
Şekil 2.7 Kil yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması.....	12
Şekil 2.8 Geometrisi bozulan tünel.....	15
Şekil 2.9 a) Çatı çökmesi b) Üst kemerde bozulma.....	15
Şekil 4.1 Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki.....	25
Şekil 4.2. Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme.....	29
Şekil 4.3 Şişme potansiyeli grafiği.....	33
Şekil 5.1 Şişen zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi.....	35
Şekil 5.2 Farklı MgCl <sub>2</sub> çözeltisi ile hazırlanan numuneler için şişme oranı –zaman grafikleri.....	37
Şekil 6.1 Mineral analizinde kullanılan XRD cihazı.....	44
Şekil 6.2 Numune 1 Ham XRD görüntüsü.....	45
Şekil 6.3 Numune 2 Ham XRD görüntüsü.....	46
Şekil 6.4 Numune 3 Ham XRD görüntüsü.....	47
Şekil 6.5 Atterberg Limitleri.....	48
Şekil 6.6 Casagrande Likit Limit Deney Cihazı.....	49
Şekil 6.7 Likit limit tayininde kullanılan koni düşürme cihazı.....	50
Şekil 6.8 Konsolidasyon deneyleri.....	54
Şekil 6.9 Yük-zaman ve Oturma-zaman grafikleri.....	54
Şekil 6.10 Bir boyutlu sıkışma.....	55
Şekil 6.11 Sıkışma katsayısı.....	56
Şekil 6.12 Hacimsel sıkışma modülü.....	56
Şekil 6.13 Konsolidasyon cihazı.....	58
Şekil 6.14 Numune 1 için Gerilme-Boşluk oranı değişim grafiği.....	58
Şekil 6.15 Numune 2 için Gerilme-Boşluk oranı değişim grafiği.....	59

Şekil 6.16 Numune 3 için Gerilme-Boşluk oranı değişim grafiği .....	59
Şekil 6.17 Helyum piknometresi.....	60
Şekil 6.18 Likit limit KCl katkı oranı grafiği .....	64
Şekil 6.19 Likit limit Mg(OH) <sub>2</sub> katkı oranı grafiği.....	66



## TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Kil minerallerinin karşılaştırmalı özellikleri.....	11
Tablo 3.1 Kil Stabilizatörleri.....	21
Tablo 4.1 Zemim fiziksel özellikleri ve SPT verilerine dayalı şişen zemin sınıflaması .....	23
Tablo 4.2 Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri.....	24
Tablo 4.3 Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri .....	27
Tablo 4.4 Şişme- büzülme potansiyelinin PVC deneyi sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılması.....	30
Tablo 4.5 Şişme-Büzülme potansiyelinin doğrusal genişleyebilirlik katsayısı ve doğrusal genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması.....	31
Tablo 4.6 Zeminin mühendislik özellikleri ile şişme dereceleri arasındaki korelasyon .....	32
Tablo 4.7 Plastiklik indeksi ile şişme potansiyeli arasındaki bağıntı.....	32
Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan numunelerin özellikleri .....	53
Tablo 6.2 Kilin tipi ve sıkışabilirlik sınıfı.....	58
Tablo 6.3 Birim Hacim Ağırlık deneyi sonuçları.....	61
Tablo 6.4 Kimyasal analiz sonuçları.....	62
Tablo 6.5 KCl Katkısı Eklenmiş Numune 1 için Atterberg Limitleri.....	63
Tablo 6.6 KCl Katkısı Eklenmiş Numune 2 için Atterberg Limitleri .....	63
Tablo 6.7 KCl Katkısı Eklenmiş Numune 3 için Atterberg Limitleri.....	63
Tablo 6.8 Mg(OH) <sub>2</sub> Katkısı Eklenmiş Numune 1 için Atterberg Limitleri .....	65
Tablo 6.9 Mg(OH) <sub>2</sub> Katkısı Eklenmiş Numune 1 için Atterberg Limitleri .....	65
Tablo 6.10 Mg(OH) <sub>2</sub> Katkısı Eklenmiş Numune 1 için Atterberg Limitleri .....	65

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Su içeriğinin artmasıyla birlikte hacminde artış, su içeriği azaldığında ise büzülme oluşan zeminlere “şişen zeminler” denilmektedir. Zeminlerdeki killerin şişme özelliklerine bağlı olarak; mühendislik çalışmaları sonucunda ortaya çıkan yapılarda birden fazla deformasyon problemi ile karşılaşmak mümkündür. Şişme potansiyeli yüksek ve zeminler üzerine inşa edilmiş mühendislik yapılarında (özellikle de hafif yapılarda) zemin kabarmaları sonucu birçok deformasyon meydana gelebilmektedir. Öyle ki bu yapıların bir kısmının kullanılamaz hale gelmesi mümkündür. Bu nedendir ki zemin davranışlarının açıklanabilmesi açısından; zeminlere ait şişme özellikleri ve mekanizmalarının çok iyi belirlenmesi oldukça büyük önem taşımaktadır.

Şişme potansiyeli terimi, birçok araştırmacı tarafından genellikle zeminlerin hem şişme yüzdesi hem de şişme basıncı olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz ve Karacan, 1998). Killerin şişme basınçları birçok faktör tarafından denetlenmektedir. Yerinde (arazide) veya sonraki su içeriği, yerinde yoğunluk, yöntem ve kompaksiyon derecesi şişme basıncını denetleyen fiziksel faktörlerdir. Bununla birlikte, fizikokîmyasal davranış ve taneler arası» taneler içi kuvvetler ve reaksiyonlarla kontrol, edilen zemin türleri nedeni ile zeminin türü majör bir faktördür. Killerin şişmesi birincil olarak elektriksel çift tabakaya bağlıdır. Kil-su sistemindeki değişebilen katyonlar kil üzerinde yer almayıp, yüzeyden farklı uzaklıklarda bulunmaktadır. Pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü kil yüzeyi arasındaki elektriksel kuvvet, katyonları yüzeye çeker, fakat termal enerjileri onları yüzeyden uzağa dağıtır. Elektriksel çekme ve termal dağıtma, arasındaki denge yüzeydeki, yüksek konsantrasyonları ve- yüzeyden düşük uzaklıktaki katyonları taşımaya sağlamaktadır. Bitişik tanelerin dağılmış iyon tabakalarının birbirleri ile etkileşimi, şişme özeliğini açıklayıcı bilgi vermektedir. Negatif yüklü yüzeydeki iyonların teorik dağılımı Gouy ve Chapman tarafından hesaplanmıştır (Sridharan ve diğer., 1986).

Suyla temas ettiklerinde şişen zeminler çoğunlukla montmorillonit tipi kil minerali içeren zeminler olup, genellikle dünyanın birçok bölgesinde görülmekle birlikte kurak ve yarı kurak iklim özellikleri taşıyan bölgelerde daha yaygın görülür. Şişen zeminler Amerika, Kanada, İsrail, Güney Afrika, Avustralya, Hindistan, Sudan, Peru, İspanya (Akawwi ve diğer., 2001; Coduto, 2001; Popescu, 1979; Sridharan ve diğer., 2004; Xeidakis ve diğer., 2004), Ürdün, Yunanistan, Kuzey Kıbrıs, Çin ve Romanya gibi ülkelerin yanı sıra Türkiye’de de bulunmaktadır.

Bazı kil mineralleri içeriklerine bağlı olarak şişme özelliğine sahip olmaktadır. Özellikle simektit grubu kil mineralleri içeren killer şişme kabiliyeti olan killerdir. Bu killer, bünyelerine su aldıkları zaman bir miktar şişerler ve yeraltı açıklıklarında önemli miktarda deformasyona neden olurlar. Bu yüksek deformasyon miktarı ise yeraltı açıklıklarında uygulanan tahkimatı tahrip ettiği gibi, aynı zamanda bu açıklıklarda yapılan madencilik-tünelcilik operasyonları da olumsuz etkilenmektedir. Bu durumda işletme maliyetlerinde önemli artışlar ve aynı zamanda işgücü kaybı olmaktadır. Bu istenmeyen durumun ortadan kaldırılması için yurt içi ve yurt dışında birçok çalışma yürütülmüş ve yürütülmektedir. Konu ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar “Bölüm Üç” kapsamında daha detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Bu tez çalışmasında proje çalışması kapsamında yapılmış olan zemin tanımlama deneylerinin bir bölümü ve inorganik tuzlar olan Potasyum klorür ve Magnezyum dioksit ile killerde şişme davranışının azaltılması üzerine çalışılmıştır.



redüksiyon, hidrasyon- dehidrasyon, iyon değişimi, taşınma vb. jeolojik sũreçler sonucunda meydana gelmektedir (Keskin, 2010).

Kilin tũrũ aşağıdaki gibi ifade edilen zeminin önemli özelliklerini doğrudan etkilemektedir;

- Zeminin geçirimsizliğine,
- Şişme-bũzũlme davranışına,
- Sıkışabilirliğine,
- Kayma direnci.

Kil minerallerinin tũrũ, kũkenleri ve oluşma ortamları ile yakından ilgilidir. Bununla birlikte kayacın kile dũnũřmesi ve kilin karakterini kazanmasında aşağıda belirtilen faktũrler önemli rol oynamaktadır;

- Ortam sıcaklığı,
- Yağış,
- Yeraltı suyu seviyesi,
- Nemlilik,
- pH ve tuzluluk,
- Drenaj koşulları,
- Bitki ũrtũsũ,
- Eğim,
- Ana kayaç tũrũ.

Dolayısı ile killerin mineral yapılarının oluşum koşulları ve kũkenleri ile birlikte değerlendirmek; zemin yapısını daha gerçekçi tanımak, muhtemel mũhendislik problemlerini tahmin edilebilmesi yũnũnden önemlidir. Ayrıca, geniş ۆlçekli alan çalışmalarında çalışmaya yũn vermemekte ve alanın geo-jeoteknik karakterini daha iyi anlamada da imkân tanımaktadır (Keskin, 2010).



## 2.1.2 Killerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

### 2.1.2.1 Fiziksel Özellikleri

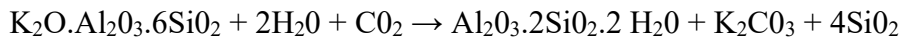
Kil mineral taneleri genellikle optik özelliklerinin kesin olarak ölçülmesi için çok ufaktır. Çoğu kil mineralinin özgül ağırlığı 2 ile 3,3 g/cm<sup>3</sup> arasındadır. Sertlikleri genellikle 2.5'in altına düşer. Kile ait kırılma indisleri genel olarak boyut ve şekildir, bu iki özellik elektron mikroyrafları ile belirlenir. Ayrıca Fiziksel özelliklerin, malzemenin davranış modelini kontrol eden çeşitli diğer faktörlere bağlı olduğunu belirtmek önem taşır. Kil çökelme özellikleri, gözeneklilik, su içeriği ve farklı özgül ağırlıktaki mineral içeriğine bağlıdır. Elektriksel iletkenlik gözeneklilik, doygunluk, gözenekli sıvı iletkenliği, su içeriği ve kil içeriğine bağlıdır (Mukherjee, 2013).

Killerin plastisite özelliği azaltılıp çoğaltılabilmektedir. Genel olarak plastisite suyu % 15' ten az, % 40' tan fazla olamaz. Killer plastik olmayan mineral türlerini de ihtiva etmektedirler. Genelde plastik olanlar kaolinit ve montmorillonit gruplarıdır. Plastik olmayan kil mineralleri ise kalsit, kuvarsit ve mika grubu içerikli minerallerdir (Gücek, 2011).

### 2.1.2.2 Kimyasal Özellikleri

Kil kimyasal bileşimi sulu alüminyum silis veya bazen de sulu magnezyum silis olan tane boyutu çok küçük ve plastik özelliklere sahip doğal bir malzeme olarak tanımlanabilmektedir. Kaolen yatakları granit ve diğer feldspat içerikli kayaların bozuşması ile meydana gelmektedir. Karbondioksit ve suyun etkisi ile jeolojik olarak uzun bir zaman aşımında feldspat içerikli kayalar, çözünür alkali karbonat ve çözünür minerallerine dönüşmektedir (Akıncı, 2001; Gücek, 2011).

bozuşum ile oluşan kil aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;



Killer su tutma ve iyon değiştirme gçleri yüksek alüminyum silis bileşikleridir. Mineral içerikleri ve minerallerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak, doğal killerin rengi, beyaz, gri, pembe, yeşil ve kahverenginin çeşitli tonlarında olabilmektedir (Gcek, 2011). Bu killerin ince taneli durumu kre veya kp olmaya eğilimli olan aynı tane boyutlu diğer minerallere göre çok daha yüzey alanına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Yaprak şekline sahip olan kil tanelerinde kalınlığının uzunluğuna oranı hemen hemen 20'dir. Bu değer, aynı hacime sahip kübün  katıdır. Bu nedenle ki yüzey özellikleri ne olursa olsun kil minerallerinin kristal yapılarında yüzey oldukça önemlidir.

Kil mineralleri tabaka yapılı su içerikli alumina silikatlardır. Plastik zellikleri tabakalarının plaka (pseudo hexagonal plakacıklar) biçiminde olması ve bu plkalarının birbiri boyunca su sayesinde kayma zelline dayandırılmaktadır (Gcek, 2011).

### **2.1.3 Kilin Genel Yapısı**

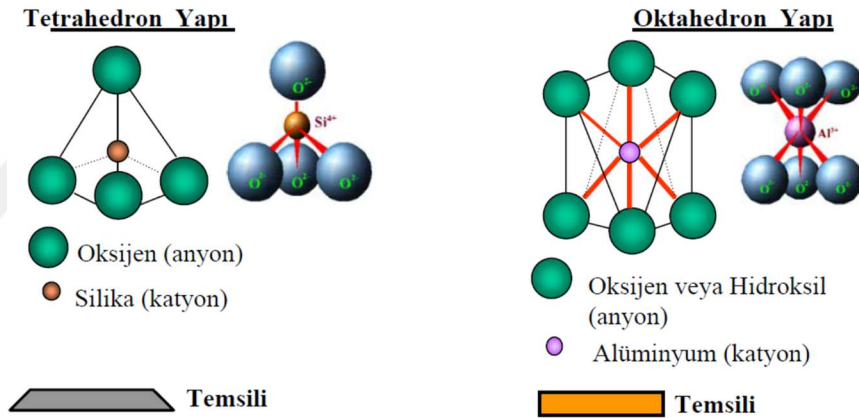
Kil mineralleri toprağa plastiklik ve kohezyon sağlayan kristalimsi minerallerin birleşimidir. Killi bir toprak, kuvars, feldspat, mika ve kalsit gibi kil olmayan minerallerin yanı sıra mikroskobik olarak ince tabakalardan yapılmış bir veya iki kil minerali içerebilir. Kimyasal olarak, kil mineralleri, alüminyum silikat veya demir ile magnezyum silikatın bir kombinasyonundan oluşurken, bazıları da alkalın toprak içermektedir (Gangopadhyay, 2013).

Killerin parçacık büyüklüğünün üst sınırı, jeologlar tarafından farklı şekilde tanımlanmıştır: Wentworth (1922) 1/256 mm, yani yaklaşık 3,9  $\mu\text{m}$ , Ruhin (1961) 5  $\mu\text{m}$ , Pettijohn (1957) 2  $\mu\text{m}$  olarak önerilir. Bu Toprak kil fraksiyonunun <2  $\mu\text{m}$  çapında plaka benzeri parçacıklar içerdiğini genel olarak kabul eder ve ağırlıklı olarak kil minerallerinden oluşmaktadır (Harrison, 1999).

Sıradan kimyasal analiz, kristal yapıdaki kil minerallerini tanımlama ve sınıflandırma konusunda yalnızca küçük bir rol oynamaktadır. Kristallerinin atomik yapısı, killerin özelliklerini belirleyen en önemli unsurdur (Henry, 2011).

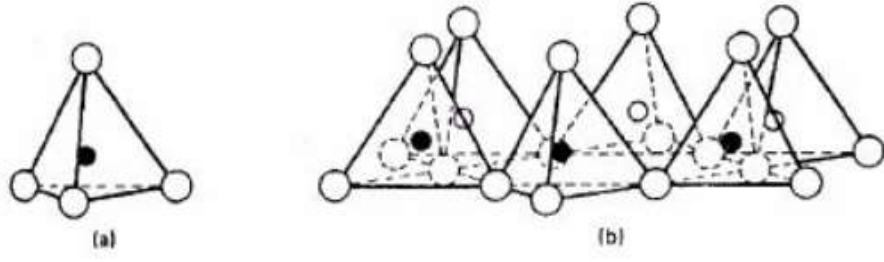
Grim (1942, 1953), Marshall (1949) ve Weaver ve ark. (1973) esasen X-ışını kırınımı modelleri, adsorpsiyon spektrumu ve diferansiyel termal analizin analizi ile tanımlama ve sınıflandırma gerçekleştirmiştir

Her kil minerali; tetrahedral (dört yüzlü) veya silika ile oktahedral (sekiz yüzlü) veya alümina olmak üzere iki adet kristal levhadan oluşmaktadır (Keskin, 2010). Bu levhalar değişik bağlar ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanarak farklı kil minerallerini oluşturmaktadırlar (Şekil 2.2).



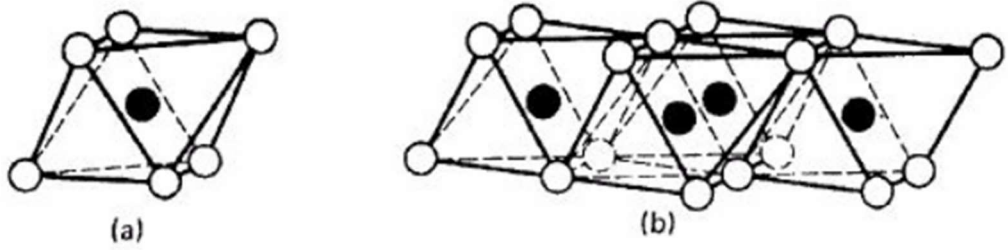
Şekil 2.2 Tetrahedron ve Oktahedron yapı (Keskin, 2010)

Silis tetrahedron 1 silis iyonu ile 4 oksijen atomunun birleşmesinden oluşan 4 köşeli 4 yüzlü kristal bloğudur. Silis tetrahedronların birleşmesi ile oluşan tabakaya tetrahedral tabaka adı verilmektedir. Şekil 2.3'de bu yapılar ait gösterim verilmektedir.



Şekil 2.3 a) silis tetrahedron b) tetrahedral tabaka (Holtz ve Kovacs, 1981)

Alüminyum veya magnezyum oktahedron 6 hidrosil iyonuna bağlı alüminyum veya magnezyum iyonundan oluşan 6 köşeli 8 yüzlü kristal yapı bloğudur. Oktahedronların birleşmesi ile oktahedral tabaka meydana gelmektedir. Şekil 2.4' de bu konu ile ilişkili görsel verilmektedir.



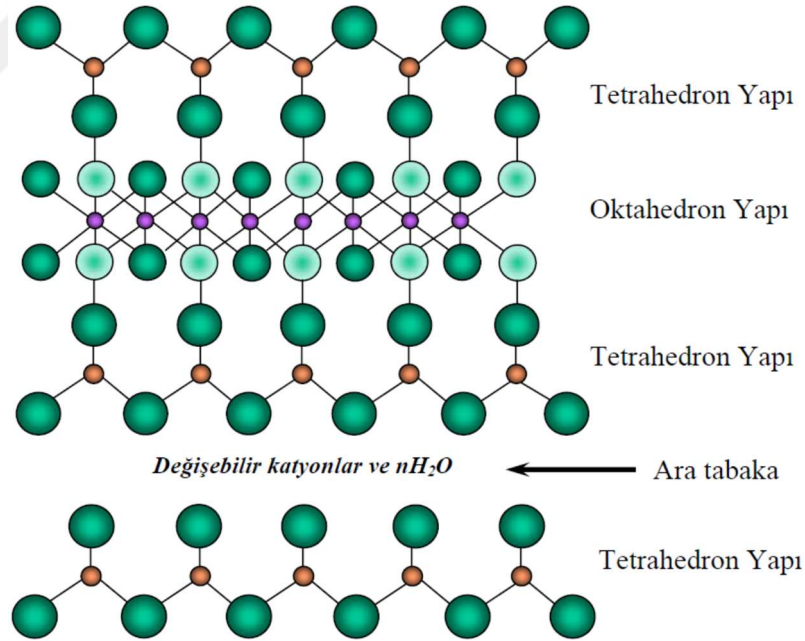
Şekil 2.4 a) alüminyum oktahedron b) Oktahedral tabaka (Holtz ve Kovacs, 1981)

Belirli bir kil mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri yapısı ve bileşimine bağlıdır. Endüstriyel killer, yani kaolin, simektitler ve paligorskit-sepiyolitler her biri kendi temel yapı taşları olarak oktahedral ve tetrahedral tabakalardan oluşuyor olmasına rağmen yapısı ve bileşimi çok farklıdır. Oktahedral ve tetrahedral tabakalar düzenlenmesi ve kompozisyonu kil minerallerinin birbirlerinden farklılaşmasını sağlayan temel bileşendir.

## 2.2 Killerin Sınıflandırılması

Killeri, kimyasal bileşimlerine veya kristal yapılarına göre sınıflandırmak mümkündür. Kil minerallerini kristal özelliklerine göre sınıflandırmıştır (Keskin 2010). Buna göre;

- İki tabakalı killer: Bu tür killer, bir adet silis tetrahedral tabakası ile bir adet alüminyum oktahedral tabakasından oluşmaktadır.
- Üç tabakalı killeri: Bunlar iki silis tetrahedral tabakası ile bir adet merkezi dioktahedral veya trioktahedral tabakasından oluşmaktadır.
- Düzenli karışım tabakalı killer: Farklı tiplerin tabakalarının istiflenmişleridir.
- Zincir yapıli killer: Bu tür killer, hornblend'e benzer silis tetrahedri zincirleri ile AL ve Mg atomlarının içeren hidrotitroksiller ve oktahedral oksijen grupları ile bağlanmaktadır.



Şekil 2.5 Killeri oluşturan yapılar (Keskin, 2010)

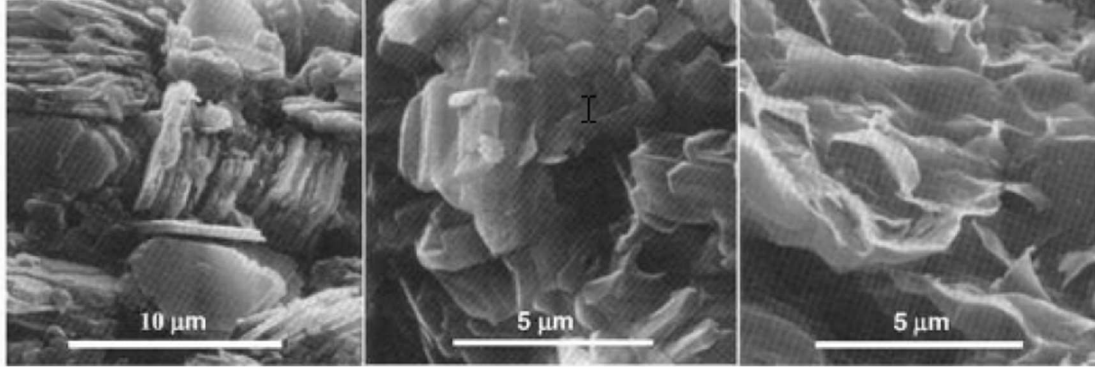
Kil mineralleri yapısal oluşum açısından değerlendirildiğinde, her grup benzer mühendislik özelliği gösterdiğinden dolayı yapısal gruplamalar daha uyumlu olmaktadır (Keskin, 2010). Mühendislik amaçlı sınıflamalarda, kil mineralleri

genellikle kaolinit, mika ve smektitler olmak üzere üç grup içinde değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Grim (1942, 1953) ve Hughes (1950) kil minerallerini dört ana grupta sınıflandırmışlardır. Bunlar;

- a. *Kaolinit grubu (Şişmeyen)*: Nispeten küçük bir yüzey alanına ve düşük bir su emme kapasitesine sahiptir. Genellikle genleşmez. Kaolinit, Dikit ve Nakit, Halloysit, Düzensiz kaolinitler, Serpantinler alt grubunda bulunmaktadır. Kaolinit orta derece bir plastisiteye sahiptir ve diğer kil minerallerinden daha büyük içsel sürtünmeye sahiptir. Kaolin grubunda yer alan minerallerin özgül ağırlıkları 2.6-2.68 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır.
- b. *Smektitler grubu (ıslatma üzerine şişen ve kuruma sırasında küçülen)*: Yüksek şişme potansiyeline sahiptir. En problemlili kil minerali tipi olarak bilinmektedirler. 2: 1 katmanlı minerallerdir, izomorf ikame ile birlikte tüm lamel yüzeylerine toprak çözeltisine erişimden dolayı geniş bir yüzey alanına sahiptirler, bu da izomorf ikame ile nispeten yüksek sarkma kapasitesine katkıda bulunmaktadır. Bu mineral grubunda montmorillonit ve bentonit yer almaktadır.
- c. *İllit*: 2:1 smektit benzeri 2:1 katmanlı smektitten daha az emme kapasitesine sahip şişme kapasitesi ve özellikleri smektitler ve kaolinitler arasında geçiş göstermektedir.
- d. *Kloritler*: karakteristik yapısı üç sayfalık bir pirofillit tipi tabaka ile dönüşümlü brusit tabakasından oluşan kil minerallerinden oluşan bir gruptur. Kloritler hem mikroskopik hem de makroskopik kristaller halinde bulunmaktadır. İkinci durumda, her zaman diğer mineraller ile karışım halinde bulunduğundan dolayı partikül boyut ve şekillerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadırlar.

Tüm bu bilgilere ek olarak, bu dört ana grubun birkaçından oluşan karışık katmanlı kil mineralleri bulunmaktadır (Weaver, 1973). İllit-Montmorillonit (İ-M), Montmorillonit-Vermikülit(M-V), İllit-Vermikülit(İ-V), Montmorillonit-Klorit(M-K), İllit-Klorit (İK9,Vermikülit-Klorit(V-K))şeklindedir (Keskin, 2010).

Tipik kil mineraline ait elektron mikroskobu fotoğrafları Şekil 2.6’ da gösterilirken; killerin karşılaştırmalı mineral özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Tipik kil minerallerinin taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları (soldan sağa kaolinit illit ve montmorillonit) (Tovey, 1971)

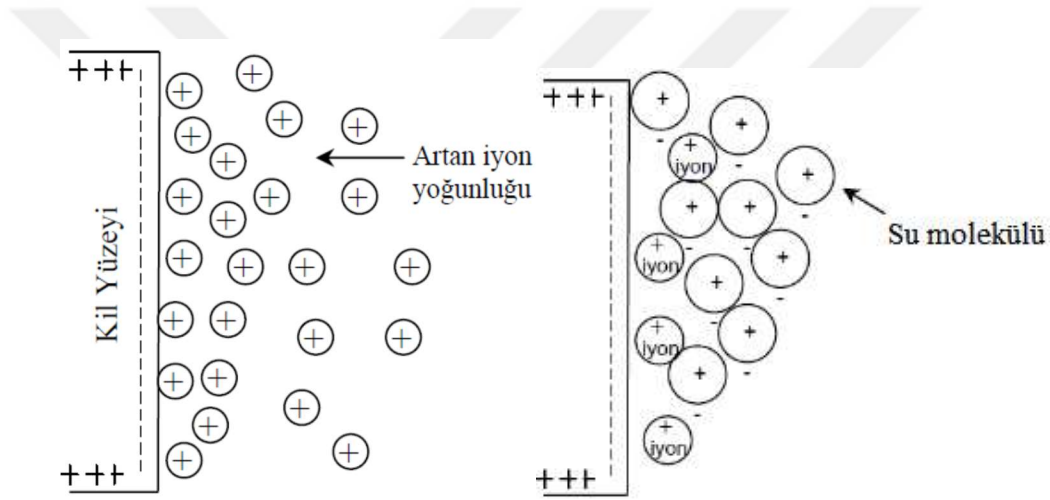
Tablo 2.1 Kil minerallerinin karşılaştırmalı özellikleri (Keskin, 2010)

Özellik	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Tane Boyutu (µm)	0,01-1,0	0,02-2,0	0,5-5,0
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 Köşeli pul
Dış Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	76-120	70-100	10-30
İç Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	550-650	-	-
Plastisite	Yüksek	Orta	Düşük
Likit Limit	110-710	60-120	29-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Kohezyon	Yüksek	Orta	Düşük
Şişme Kapasitesi	Yüksek	Orta	Düşük
Elektrik Yükü	0,5-0,9	1,0-1,5	0
KDK (meq/100g)	80-150	10-40	3-15
Özgül Gravite	2,35-2,7	2,6-3,0	2,6-2,8
Tabakalar arası mesafe (nm=)	1,0-2,0	1,0	0,7
Tabakalar arası bağ	Van der Wal’s bağları (Zayıf çekim kuvveti)	Potasyum İyonları	Hidrojen
Net Negatif Yük (cmol/kg)	80-120	15-40	2-5

### 2.3 Killerde Şişme Davranışı

Termodinamik açılarından zemin içinde yer alan suyun enerjisi serbest suyunkinden daha az olduğu sürece, su zemin içine doğru hareket etmektedir. Kum zemin içinde su önemli bir hacim değişikliği oluşturmaksızın boşlukları doldururken, kil zeminlerde genellikle hacim artışı oluşturarak şişme kavramını meydana getirmektedir.

Kil mineralleri, genellikle yüzeylerinde negatif ve uç kısımlarında ise pozitif elektrik yüklerine sahip tabakalı partiküllerdir. Su elektriksel olarak nötr olsa da biri negatif biri de pozitif olmak üzere iki yük merkezi bulunmaktadır. Kil partikülleri etrafında su üç farklı şekilde absorbe edilebilmektedir. Bunlardan ilk biraz önce bahsedilen sebeplerden ötürü su molekülü kil kristalin yüzeyi tarafından elektrostatik olarak çekilmektedir. Buna ek ikinci olarak su, kil kristali tarafından hidrojen bağı ile tutulmaktadır. Başka bir ifade ile sudaki hidrojen kil yüzeyindeki oksijenler veya hidroksiller tarafından çekilmektedir. Üçüncüsü ise negatif yüklü kil yüzeyi su içerisindeki katyonları çekmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Kil yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması (Keskin, 2010)

Killerde iki tür şişme meydana gelebilmektedir (Patel ve diğer., 2007).

- Birinci tür şişme-yüzey nemlendirme:* Su moleküllerinin kristal yüzeylere adsorbe edildiği şişmedir. Müteakip su moleküllerinin katmanları, birim tabakalar arasında yarı kristal yapı oluşturmak üzere hizalanmaktadır. Bu da artan bir c-aralığı ile sonuçlanmaktadır. Her çeşit kil, bu şekilde şişme gösterebilir.
- İkinci tür şişme- Osmotik şişme:* Bir kil mineralindeki birim tabakalar arasındaki katyon konsantrasyonu çevredeki katmanlardan daha yüksek olduğunda su, birim katmanlar arasında ozmotik olarak çekilmektedir. Buna bağlı olarak c-aralığı da artmaktadır. Osmotik şişme, yüzeysel hidrasyona göre



daha fazla hacim artışı ile sonuçlanmaktadır. Ancak sodyum montmorillonit gibi sadece birkaç kil bu şekilde şişmektedir (Patel ve diğer. 2007).

Kil kompozisyonu ve şişme arasındaki anlamlı ilişki, katyon ayrışması kavramı ile açıklanmaktadır. Bu anlayışa göre; montmorillonit grubuna dahil bir kil minerali suyun içinde dağıldığında çoğunlukla yapısal bağlar arasında bulunan ayrılmaya meyilli ilişkili katyonları birbirinden ayırarak yapısal birimlerin bir kısmını negatif yüklü bırakmaya meyilli olmaktadır. Ayrıca negatif yüklenmiş parçacıklar birbirlerini itmeye meyilli bir davranış sergilemektedir. Eğer yük miktarı fazla olur ise bu itme etkisi kile şişme görüntüsü kazandırabilmektedir. İlişkili katyon kalsiyum iken oluşan ayrışmanın derecesi büyük miktarda bir şişmeye yol açmaz iken baskın katyon sodyum iken ayrışma derecesi çok daha fazla olmaktadır.

Şişmenin ayrışma ile ilişkili olduğu varsayımına göre, Sodyum montmorillonitlerin şişme hacimlerinde azalma demir veya magnezyumun alüminyum ile oktahedral tabakada yer değiştirmesinde artış kil biriminin ayrışmasını etkilemektedir. Yer değiştirme olayını gerçekleştirmiş iyonlar alüminyum ile karşılaştırıldığı zaman farklı polarizasyon özelliklerine sahip olmaları nedeniyle yapı boyunca elektronların yeniden dağıtılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle de kil ünitesinin bağlanma enerjisini ve iyonizasyon sabitini etkilemektedir. Oktahedral substitüsyonun artmasına bağlı olarak şişme hacimlerindeki azalma, kil biriminin ayrışmasında yer değiştirmelerin etkisinin azalma yönünde olduğunu göstermektedir ( Foster, 1955).

### ***2.3.1 Killi Zeminlerde Şişme Özelliğinin Tanımlanması***

Bu bölümde konu ile ilgili yüzeysel olarak bilgi verilecektir. Konu ile ilgili detaylı bilgi “Bölüm Dört” kapsamında anlatılacaktır.

Şişme özelliği olan, kısmen doymuş zeminler, su ile karşılaştıkları zaman hacim değiştirmektedirler. Bu zeminlerin şişmelerine engel olduğu zamanda ise basınç uygulamaktadırlar. Bu basınç ‘şişme basıncı’ olarak adlandırılmaktadır. Şişen

zeminlerin bu özelliklerini ölçmek amacı ile uygulanan deneysel yöntemler; 'şişme potansiyeli' olarak adlandırılan 'şişme yüzdesi' ya da 'şişme basıncı', suya doymun hale gelinceye kadar ölçmeye dayanmaktadırlar.

Şişme yüzdesi laboratuvarlarda belli şartlarda sıkıştırılmış veya tabii(örselenmemiş) bir zemin numunesinin belirli yük altında, sıfır yanıl deformasyon durumunda suya doymun hale gelinceye kadar göstermiş olduğu düşey şişme miktarının, numunenin ilk yüksekliğinin yüzdesi olarak ifadesidir. Bu değeri, sıfır yanıl deformasyon şartlarında aynı zeminde hacimsel artış yüzdesidir (Keskin, 2010).

Şişme basıncı şişen zeminlerin, suyla temasa geçmeleri sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, bir basınç meydana gelmektedir. Daha önce de bahsettiğimiz gibi bu basınç şişme basıncı olarak adlandırılmaktadır. Buna, zeminin başlangıç hacmini koruyabileceği basınç olarak da adlandırmak mümkündür. Şişme basıncı, belli bir zemin için sabittir ve başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığına bağlıdır. Şişme basıncı deneylerinde ödometre koşullarında gerçekleştirilmektedir. Bu değeri, bazı zeminlerde 1100 kPa (110t/m<sup>2</sup>) ulaşabildiği de bilinmektedir.

## **2.4 Killerde Şişme Davranışının Neden Olduğu Problemler**

Şişme davranışı, temel mühendisinin karşılaştığı en ciddi zorluklardan biri olarak kabul edilir, çünkü bu tür topraklarda kurulan yapıların yukarı doğru hareketlerinden doğacak tehlikeler tahmin edilemez.

Şişen zeminlerden kaynaklanan tahmini yıllık hasar maliyeti ABD'de 1 milyar dolar, İngiltere'de 150 milyon sterlin ve dünya çapında milyarlarca liradır. (Gourley ve diğer., 1993). Malzemenin doğru tanımlanması ve sınıflandırılması, potansiyel şişme basınçlarının ölçülmesi ve uygun bir tasarım prosedürünün sağlanmasıyla şişen zeminlerin yol açtığı hasarlar engellenebilir veya aza indirilebilir (Das ve diğer., 2010).

Toprağın doğal yapısında killi zeminler üzerindeki sürekli yükün etkisi ile denge halinde durmaktadır. Madencilik ve tünellerin operasyonları yer altındaki bu denge sistemini bozmaktadır. Bozulan dengenin sonucunda üzerindeki yükten kurtulan zeminler suyun varlığının etkisi ile birlikte şişecek ve yer altı açıklığının düzgün geometrisini bozacaktır (Şekil 2.8) . Şişen killerin varlığı tünellerin çatısının çökmesi gibi daha vahim sonuçlara yol açabilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8 Geometrisi bozulan tüneller (Manh, 2014)



Şekil 2.9 a) Çatı çökmesi. b) Üst kemerde bozulma (Li ve diğer., 2016)

## BÖLÜM ÜÇ

### GEÇMİŞ YILLARDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Türköz M. Savaş H. Acaz A. Tosun H. yazarlar tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada  $MgCl_2$  çözeltilisinin kil örneğindeki genişleme ve dağılma özelliklerine etkisini incelenmiştir. Bu çalışmada ilk olarak Afyon bölgesinden alınan toprak örneğini karakterize etmek amacıyla elek analizi hidrometre analizi (ASTM D 422-63), kıvam limitleri (ASTM D4318-00) ve özgül ağırlık (ASTM D 854-00) testleri yapılmıştır. ASTM (1994) standart metotları ile örnekleme, örnek hazırlama ve testler yürütülmüştür. Bu test sonuçları baz alınarak Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre kullanılan örneğin yüksek plastiseli kil (CH) olduğu belirlenmiştir. Aynı çalışmada kullanılan toprak örneğine Kuru ağırlığının 0, 3, 5, 7, 9, 11 ve % 13 ü oranında olacak şekilde  $MgCl_2$  çözeltisi ilave edilmiştir. Bu örneklerin sıkışma özellikleri ASTM D-698 (1994) ile uyumlu standart proktor enerji seviyesinde ölçülmüştür. Bu şekilde şişme, dağılılırlik ve mukavemet testleri için optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk bulunmuştur.

İlk paragrafta bahsi geçen bu çalışma, killi topraklarda etkin bir şekilde katkı  $MgCl_2$  çözeltisi kullanılarak zemin özelliklerinin geliştirilebilir olduğunu göstermektedir. Yapılan deneyler sonucunda  $MgCl_2$  çözeltisinin optimum oranı % 7 olarak hesaplanmıştır. Doğal örnekte % 12.5 olan şişme potansiyeli çözelti seviyesi optimuma %7 ulaştığı zaman şişme potansiyeli % 5'e kadar düşmüştür.

Türköz tarafından 2006 yılında yaptığı bir çalışmada, yer yer aşırı konsolide kil özeliği taşıyan ve “Meşelik kili” olarak tanımlanan zeminin klasik bir yöntem olan kireç katkısı ile stabilizasyonu araştırılmıştır. Bu amaçla, üç ayrı bölgeden numuneler alınmış ve bu numunelerin öncelikle tanımlama ve sınıflama özellikleri TS 1900 esasında belirlenmiş, Sıkıştırılma karakteristikleri bulunmuş ve sonra şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak sönmüş kireç katkısının killerin şişme potansiyelinin kontrolünde başarıyla kullanılabileceği, bu katkının % 3 üzerinde sonra etkili olduğu ve etkinin yüksek enerji seviyelerinde daha yüksek görüldüğü belirlenmiştir. Sıkıştırılmış numunelerin serbest şişme yüzdesi, yüksek enerji

seviyesinde daha büyük elde edilmiştir. Bu serilerde kireç katkısının etkisi, yüksek katkı yüzdelerinde etkili iken, düşük enerji seviyelerinde ise kireç katkısının etkisi düşük katkı yüzdelerinde daha etkindir sonucuna varılmıştır.

Ureña ve diğer yazarlar tarafından yürütülen 2013 yılına ait çalışmada bentonit içeren topraklarda şişme potansiyeli ve plastisiteyi düşürmek amacıyla Magnezyum hidroksit, deniz suyu ve zeytinyağı fabrikası atık suları katkı maddesi olarak incelenmiştir. İşlenmemiş bentonit örneğine % 5 %10 %15 oranlarında ayrı ayrı magnezyum hidroksit, deniz suyu ve zeytinyağı fabrikası atık suyu eklenerek örnekler hazırlanmıştır. Tüm karışımlar, bir laboratuvarında, aynı şartlar altında ( $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ ) hazırlanmıştır. Kuru örnek ve kuru karışımlar En az 10 dakika boyunca kurutma tepsisinde ve iyice karıştırılmıştır. Daha sonra, optimum nem içeriğine ulaşmak için, (%66) karışıma su ilave edilmiştir. Su ilavesinden sonra endüstriyel karıştırıcı ile karıştırılmış böylece homojen bir karışım elde edilmiştir. Karışımlar istenen süre boyunca 21 derece %95 nem seviyesinde bekletilmiştir. Bu bekleme süreleri 15 gün ve 30 gün olacak şekilde tüm testler gerçekleştirilmiştir.

Aynı çalışmada standart proktor testleri yapmak amacıyla farklı nem miktarlarında örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler bir kalıp içinde 2,5 kg ağırlığındaki bir çekiç yardımıyla sıkıştırılmıştır. Bu deneylerin sonucunda nem oranındaki değişimin kalıp içindeki sıkıştırılabilirliğin varyasyonun gözlenebilmesi sağlanmıştır. Orijinal işlenmemiş toprağın ve hazırlanan tüm karışımların şişme basınçlarını belirlenmiş, deneylerde kullanılacak doğal örnek ve karışımların optimum nem seviyesi standart proktor testinde belirlendiği gibi %66 olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda Katkı maddelerinin eklenmesi ile ortaya çıkan katyon değişim kapasitesinin artması ile örnek içinde bulunan montmorillonit minerallerinde azalma gözlemlenmiştir Ayrıca katkı maddelerinin ilavesinin ardından Plastisite indeksi ve Şişme basıncında keskin bir düşüş gözlenmiş, bunun yanı sıra örneklerin maksimum kuru yoğunluk ve CBR değeri de yükselmiştir.

Kurt Z.N. isimli yazarın 2009 yılında yürüttüğü çalışma kapsamında, mineral özellikleri belirlenen kil, katyonik bir yüzey aktif madde kullanılarak modifiye edilmiş

ve kilin mukavemet özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçlarından, katkı killerin suya karşı ilgisinin azaldığı, numunelerin hidrofobik davranış sergilediği, konsolidasyonsuz-drenajsız kohezyonunda kısmi bir azalma olduğu ve kayma mukavemeti açısının ise önemli bir değişim göstermediği gözlenmiştir. Ayrıca katkı yüzdesinin artışı ile numunelerin serbest basınç ve kayma mukavemetinde de bir azalma olduğu görülmüştür.

Gueddouda ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen 2011 yılına ait çalışmada, tuz, kireç, çimento, kireç ve çimento kombinasyonları ile kireç ve tuz kombinasyonlarının Cezayir topraklarında şişme potansiyeli üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Killi toprağa kireç ilavesi likit limitini, plastisite indeksini ve şişmeyi azalttığı görülmektedir. Çimento stabilizasyonu kireç ile benzer sonuçlar üretir. NaCl tuzu ile yapılan kimyasal stabilizasyon diğerlerine oranla daha az etkin olmuştur. Kireç + çimento karışımı ile stabilizasyon yapıldığında Şişme parametrelerindeki azalmanın % 70'e ulaştığı görülmektedir. Çalışma sonucunda en iyi sonucu veren karışımın kireç ve NaCl tuzu olduğu görülmektedir. 6% kireç + 1.5 Mol NaCl için Şişme parametrelerinin azalması serbest şişme için %80, şişme için %95'den fazladır. Çalışma sonucunda, kullanılan tüm dengeleyicilerin şişme basıncında ve şişme yüzdesi bir azalmaya neden olduğu açıkça görülmektedir.

Celestine O. Okagbue isimli yazarın 2007 yılında yürüttüğü çalışma kapsamında killi topraklarının doğal halindeki özellikleri ve odun külünün çeşitli oranlarında karıştırılmasıyla jeoteknik etkenlerin belirlenmesini içermektedir. Çalışmada Test edilen parametreler partikül büyüklüğü dağılımı, özgül ağırlık, Atterberg limitleri, sıkıştırma karakteristikleri, California taşıyıcı oranı ve basma dayanımıdır. Sonuçlar, killi toprağının jeoteknik parametrelerinin, odun külü eklenmesiyle önemli ölçüde iyileştiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda optimum kül muhtevası %10 olarak belirlenmiştir. Optimum kül muhtevasında plastisite % 35 oranında azalmış ve CBR ve mukavemet kullanılan kompozit enerjiye bağlı olarak sırasıyla % 23-50 ve % 49-67 artış göstermiştir. Fakat 14 günlük sürecin sonunda mukavemet artışı sürdürülememektedir. Dolayısı ile odun külü içinde kireç bulundurmasına rağmen zemin stabilizasyonunda kullanılması için uygun görülmemiştir.

Cheshomi ve diğ er yazarların 2016 yılında yürüttüğü ve yakın zamanda yapılmış bu çalışmada sülfat içeren kil minerallerinde kireç ve uçucu kül bileşimini kullanılarak stabilizasyonu konusundadır. Deneyler sonucunda Uçucu külün kirecin olumsuz etkilerini telafi ettiğini, stabilize edilmiş örneğin şişme yüzdesi, şişme basıncının ve plastisite indeksinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Acosta ve diğ er yazarların 2003 yılında yaptıkları bu çalışmada amaç çeşitli sınıflandırmalara tabi uçucu küllerin zayıf alt katmanlı zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmasıdır. Test numuneleri, her toprakta bir dizi uçucu kül içeriği ((0, 10,% 18 ve% 30) kullanılarak Ve optimum su içeriğinde sıkıştırılmış, optimum% 7 ıslak Su içeriği ve çok ıslak koşullarda (optimum suyun% 9 ila 12 ıslaklığı) hazırlanmıştır. Uçucu kül içeriği arttıkça CBR değeri ve mukavemeti artış gösterirken ve toprakta artan su içeriğiyle birlikte CBR' değerinin ve mukavemetinin azalmaya başlaması gözlenmiştir. Yumuşak bir alt katmanın uçucu kül ile dengelenmesi durumunda Taban tabaka kalınlığının % 40'a kadar azaltılabileceğini göstermiştir.

Aksoy ve diğ er çalışma arkadaşları tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada Tunçbilek Termik Santralinden sağlanan C tipi uçucu kül kullanılarak killi bir zeminin stabilize edilmesi üzerine çalışılmıştır. Farklı yüzdelerde uçucu kül katılarak hazırlanmış numunelerin plastisite indisi, optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımı özelliklerinin değişimi belirlenmiştir. Killi zemine %0, %3, %5 ve % 10 oranlarında uçucu kül katılarak dört farklı numune elde edilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanmış her bir numune üzerinde 1 günlük, 7 günlük ve 30 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül ilavesi ile, zeminin plastisitesi kayda değer miktarda değişmezken, optimum su muhtevası ve serbest basınç mukavemeti uçucu kül oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, %3 civarında uçucu kül ilavesi ile mukavemet değerinin, örselenmemiş numuneye göre yaklaşık %35 civarında arttığı belirlenmiştir. Bu artış yeniden hazırlanmış numunelerde daha da yüksek (~%60) elde edilmiştir.

Chen ve ark., yazarları tarafından yine yakın bir tarih olan 2016 yılında yapılan çalışmada, Tartarik asit ve aminler ile hazırlanmış, amin-tartarik tuz (ATS) katkısının bentonit kil minerali üzerindeki doğrusal genleşme miktarına etkileri gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında Dietilentriamin, ve tetraetilententaminin tartarik asit ile karışımından elde edilen tuzlar kullanılmıştır. Deneyleer kapsamında 3 farklı oranlarda (1:1 1:2 1:3 ) tartarik asit –amin tuzu olmak kaydıyla 3 farklı amin için toplamda 9 farklı örnek hazırlanmıştır. Sonuçlara göre trietilentetraminin bentonitin şişme ve hidratasyon davranışına daha güçlü inhibisyon etkisi gösterdiği görülmektedir.

Şensoy ve ark. (2009), Cai ve ark. (2012) ve Ji ve ark (2012) Yazarlar tarafından yapılan çalışmalarda katyonları değiş tokuş etmek yerine yüzey modifiye edilmiş silis nano parçacıkları şeyl stabilizasyonu için kullanmışlardır. Nano parçacıklar şeyllerdeki gözenekleri ve mikro çatlakları tıkmakta ve bu sayede içine su girmesini önleyerek etmektedir.

Tüm bu araştırmalara ek olarak; Zeminlerin şişme özellikleri hakkında Yılmaz ve Karacan (1998), Sridhan ve diğerleri (1986) çalışmalarını yürütmüşlerdir. Gücek (2011) ise mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımını araştırmıştır.

Literatür incelendiğinde görüldüğü üzere araştırmacılar tarafından zeminlerin bazı özelliklerine bağlı olarak Şişen zeminlerin sınıflandırılması ile ilgili bir takım yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Holtz (1959), koloid içeriği, plastisite indeksi ve büzülme sınırına; Seed ve diğerleri (1962), kil içeriği ve aktiviteye; Altmayer (1955), lineer büzülme, büzülme sınırı ve muhtemel şişme yüzdesine; Dakshanamanty ve Raman (1973), oluşturdukları plastisite kartına; Raman (1967), plastisite indeksi ve büzülme indeksine; Sowers ve Sowers (1970), büzülme sınırı ve plastisite indeksine; Wander Merwe (1964), kil içeriği, plastisite indeksi ve aktiviteye bağlı olarak gerçekleştirdiğı şime potansiyeli abağı; Snethen (1984), likit limit, plastisite indeksi, şişme potansiyeli ve doğal zemin su emmesine; McKeen (1992), su emme, kuruma anında hacim değişikliği ve yumuşak su ölçümlerine;



Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), Nayak ve Christensen (1974) ve Westen (1980) ise ortaya koydukları ampirik eşitliklere bağlı olarak sınıflamalar önermişlerdir. Şişen killer genellikle %40 dan büyük likit limite, %15 den büyük plastisite indeksine sahiptirler (Das, 1995).

Ayrıca Sondaj sırasında şeyllerin şişmesini önlemek için sondaj çalışmalarında kullanılmak üzere çeşitli şişme önleyiciler geliştirilmiştir. Tablo 3.1’de şişme inhibitörlerinin ve daha ayrıntılı olarak tartışıldıkları referans çalışmalarının listesi göstermektedir.

Tablo 3.1 Kil stabilizatörleri

Polimer lateksleri	Stowe et al. (2002)
Kısmen hidrolize polivinil asetat a	Kubena Jr., et al. (1993)
poliakrilamid	Zaitoun ve Berton (1990)
Anyonik ve katyonik monomerlerin kopolimerleri	Aviles-Alcantara et al. (2000)
Kısmen hidrolize edilmiş akrilamid-akrilat, Kopolimer, potasyum klorür ve Poli-anyonik selüloz (PAC)	Halliday ve Thielen (1987)
Polioller ve alkalin tuzu	Hale ve van Oort (1997)
Nitrojen	Sloat (1989, 1991)
Alüminyum / guanidin kompleksleri ile Katyonik nişastalar ve Poli-alkilen glikoller	Branch (1988)
Hidroksi-aldehitler veya hidroksi-ke-tonlar	Westerkamp et al. (1991)
Polioller ve alkalin tuzu	Hale ve van Oort (1997)
Tetra-metil amonyum klorür ve polietilen aminin metil klorür kuaterner tuzu	Aften ve Gabel (1992, 1994)
Piruv aldehit ve bir tri-amin	Crenshaw et al. (2002)
Stiren ve ikame edilmiş maleik anhidrit (MA) kopolimeri	Smith ve Balson (2000)
Kuaterner tri-hidroksi alkil amin	Patel ve McLaurine (1993)
Kuaterner amonyum karboksilatlar	Himes (1992)
Polivinil alkol, potasyum silikat ve potasyum karbonat)	Alford (1991)
Stiren ve yer değiştirmiş maleik anhidrit (MA) kopolimeri	Smith ve Balson (2000)
Karboksimetil selülozun potasyum tuzu)	Palumbo ve ark. (1989)

## BÖLÜM DÖRT

### ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI

#### 4.1 Zemin Mekaniği

Zemin mekaniği zeminin davranışını belirtir. Zemin akışkan ve bir miktar katı parçacığın heterojen bir şekilde karışımı olarak ifade edilebilir. Burada akışkan genellikle hava ve sudur, katı ise genellikle kil silt kum ve çakıl olarak ifade edilir. Bunların yanı sıra bazı organik katı maddeler de, sıvı ve gazlar da mevcut olabilir, yani toprak heterojen bir karışımdır. Zemin mekanizması toprağın oluşumuna ve bileşimine bağlıdır.

Küçük hacimli boşluklardan suyun tahliyesi nedeniyle toprağın hacminin değişmesi, aynı zamanda konsolidasyon, kesme dayanımı ve toprağın sertliği olarak da bilinir. Toprağın kayma mukavemeti esas olarak parçacıklar ile birbirine kenetlenme arasındaki sürtünmeden kaynaklanır.

Bir yenilme düzleminde normal stres ve kayma gerilmesi arasındaki fonksiyonel ilişki aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$T_f = f(\sigma) \quad (4.1)$$

Normal stresin doğrusal fonksiyonu,

$$T_f = c + \sigma_{(f)} \quad (4.2)$$

Burada  $T_f$  kayma mukavemeti,  $c$  – kohezyonu,  $s$  – normal stresi  $f$  ise içsel sürtünme açısını ifade eder. Bu eşitlik Mohr-Coulomb yenilme kriterini ifade eder.

Şişen zeminlerin madencilik veya tünelcilik projesine başlamadan önce doğru tanımlanması ve sınıflandırılması son aşamalarda yapılacak olan tasarımın düzgün

olmasını sağlayacaktır. Şişme özelliği olan zeminlerin şişme karakteristiklerini ölçmek amacıyla çok sayıda deney ve değerlendirme yöntemi bulunmasına rağmen uluslararası geçerliliğe sahip kesin bir metot bulunmaması hatalara ve sonuçta farklı değerlendirmelere yol açmaktadır.

Zemin tanımlama yöntemleri temelde aşağıdaki gibi ifade edilen iki grupta incelenmektedir;

- Niteliksel
- Niceliksel

Bunlardan ilki niteliksel yöntemler olup; Atterberg limitleri, birim hacim ağırlıkları vb. yaygın zemin parametreleri ile korelasyonlara gidilerek zeminin şişme potansiyelini düşük, orta, yüksek, çok yüksek gibi ifadelerle ve deneysel yöntemle değerlendirmeye dayanmaktadırlar (Tablo 4.1). İkinci grup ise niceliksel yöntemleri içermektedir. Bu yöntemde ise, ödometre kullanılarak zeminin tek eksenli şişme değerleri elde edilmektedir. Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri hakkında bilgi Tablo 4.2’de ifade edilmektedir.

Tablo 4.1 Zeminin fiziksel özellikleri ve SPT verilerine dayalı şişen zemin sınıflaması (Chen, 1988)

Laboratuvar ve Arazi Verileri			Muhtemel Şişme (Toplam hacim değişikliğinin yüzdesi)%	Şişme Derecesi
200 No’lu elekten geçen (%)	Likit limit (%)	N-Darbe Direnci		
>95	>60	>30	>10	Çok yüksek
60-65	40-60	20-30	3-10	Yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	Orta
<30	<30	<10	<1	Düşük

Tablo 4.2 Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri (Nelson ve diğer., 1992)

Deney	Referans	İncelenen Özellikler	Belirlenen Parametreler
Atterberg Limitleri	ASTM Standartları 1991	Plastisite, Kıvam	
Likit Limit (LL)	ASTM D-4308	Plastisitenin üst limiti (w)	PL-LL-PI –plastisite endeksi
Plastik Limit (PL)	ASTM D-4318	Plastisitenin alt limiti (w)	Likitlik indeksi
Rötre Limit (SL)	ASTM D- 427	Zemin rötresinin alt limiti (w)	Büzülme oranı Lineer rötre
Kil Yüzdesi	ASTM D-422	İnce tanelerin Dağılımı	2µm den küçük tanelerin yüzdesi
Mineralojik Deneyler	WHitting (1964)	Kil Partiküllerinin mineralojisi	
X ışını Difraksiyonu	ASTM STP 479	Kristal boyutlarının karakteristikleri	Atom aralıkları
Diferansiyel Termal Analiz	Barshad (1965)	Isınma karakteristikleri	Termogramlar üzerindeki alan ve genliklerin pik reaksiyonlarının gösterilmesi
Elektron Mikroskobu	McCrone ve Delly (1973)	Kil partiküllerinin boyutu ve şekli	Partiküllerin görsel olarak değerlendirilmesi
Kasyon Değişim Kapasitesi	Chapman (1965)	Kil partiküllerinin yük ve partiküllerin yüzey aktiviteleri	KDK (meq/100gr)
Serbest Şişme Deneyi	Holtz ve Gibbs (1959)	Havada kurutulmuş konsolide olmamış numunenin ıslanmaya karşı şişmesi	Serbest şişme
Potansiyel Hacim değişimi	Lambe (1960)	Arazi gerilmelerinin uygulandığı sıkıştırılmış numunenin tek eksenli şişme özellikleri	Şişme endeksi (SI) Potansiyel hacim değişimi (PVC)
Şişme Endeksi Tayini	Uniform Yapı Kodu	%50 doyumluk derecesindeki numunenin 144 psi sürsaj yükü altında tek eksenli şişmesi	Şişme indeksi (EI)
Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi	Yolder ve Witczac (1975) Kassif ve diğer. (1969)	Sıkıştırılmış numunenin sürsaj basıncı altında kısmen ıslatılması durumundaki tek boyutlu şişmesi	CBR (%) şişme yüzdesi
Linner Genişleme Katsayısı (COLE) Deneyi	Brasber ve diğer. (1966)	Doğal zemin parçasının 5 psi'den etüv kurusu konumundaki emme basıncı değerinin lineer değişimi	COLE ve LE (%)

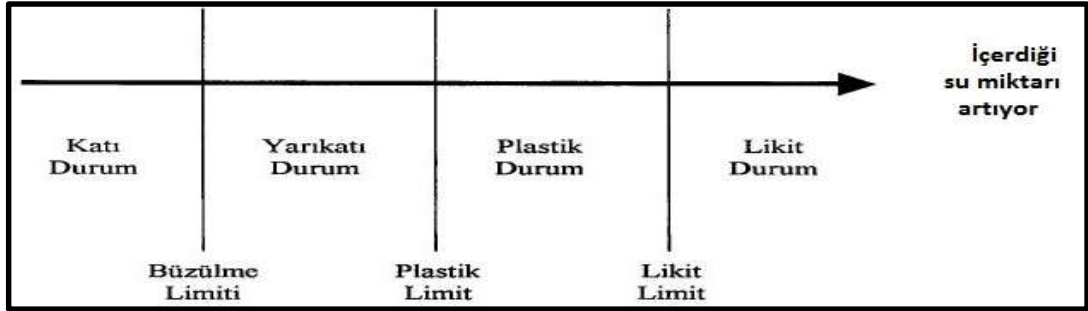
## 4.2 Tanımlama Deneyleri

Tanımlama deneyleri kapsamında zemin sınıflandırma deneyleri, mineraloji yöntemler, kation değişim kapasitesi, serbest şişme, potansiyel hacim değiştirme deneyi, Kaliforniya taşıma oranı ve doğrusal genişleyebilirlik katsayısı anlatılacaktır.

### 4.2.1 Zemin Sınıflandırma Deneyleri

Atterberg limitleri, kil yüzdesi, kolloid oranı, başlangıç su içeriği, birim hacim ağırlıkları vb. gibi zeminin indeks özellikleri şişen zeminlerin tanımlanmasında ve sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan yöntemdir (Demir ve Kılıç, 2010).

Atterberg limitleri ince taneli zeminlerin kıvam limitlerindeki su içeriğini belirlemektedir. İnce taneli bir zemin dört farklı kıvama sahip olabilir. Şekil 4.1’de bu kıvam ölçüleri ve bunları belirlemede kullanılan su içeriği değerleri görülmektedir. Bu kıvam değerleri zeminin likit, plastik ve büzülme limitleri ile belirlenmektedir (Vural, 2012).



Şekil 4.1 Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki (Vural, 2012)

Atterberg limitleri ve zeminin doğal su içeriği belirlenerek iki kullanışlı değere ulaşılabilir. Bunlar plastiklik indisi (PI) ve likitlik indisidir. (LI). Özellikle plastiklik indeksi(PI) Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılır ve ön araştırmalar sırasında mutlaka belirlenmelidir (Demir ve Kılıç, 2010; Vural, 2012).

#### 4.2.2 Mineralojik Yöntemler

Şişen zeminin davranışını kontrol eden en temel etmenlerden bir tanesi kilin mineralojisidir. Tablo 4.2' de ifade edildiği gibi kil minerallerini birçok farklı yöntem kullanılarak belirlenebilir. Fakat bu yöntemler arasında birkaç yöntem daha yaygın kullanılmaktadır. Bu yöntemleri Tovey'in 1986 yılında yaptığı çalışmaya göre aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- Diferansiyel termal analiz (DTA),
- X-ray difraksiyon ("),
- Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM),
- Boya adsorpsiyonu,
- Kızılötesi spektroskopisi.

Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı X-Ray difraksiyon (XRD) yöntemidir. X ışını analizinde; X ışını dalga boyunun kil mineralinin atom düzlem aralığı ile uyumu, bu yöntemin kil minerallerini belirlemede en uygun yöntem olmasının temel nedenidir (Vural, 2012).

Diğer sık kullanılan mineralojik yöntemler; Diferansiyel termal analiz (DTA) ve elektron mikroskobu yöntemleridir. Diferansiyel termal analizinde bir kil örneği eş zamanlı olarak ısıtılmaktadır ve hareketsiz bir nesnenen yararlanılmaktadır. Sonuç olarak da uygulanan ısıya karşı değişen sıcaklığı ifade eden tomografiler elde edilmektedir. Böylelikle saf minerallerin tomografileriyle karşılaştırılması mümkündür. Her mineral tomografiler üzerinde farklı farklı ekzotermik ve endotermik reaksiyonlar göstermektedir.

Kil minerallerinin doğrudan gözlemlenmesi açısından elektron mikroskopları büyük bir olanak sağlamaktadır. Kil minerallerinin şekli ve boyutu hakkında elektron mikroskobunun kullanılması yalnızca nitel tanımlamalara olanak sağladığı unutulmamalıdır.

#### 4.2.3 Katyon Değişim kapasitesi (KDK)

Kil taneleri üzerindeki negatif yüklerin dengelenebilmesi için gereken değişebilir katyonların miktarı, katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak bilinmektedir ve meq/100g ile ifade edilmektedir. Katyon değişimi, zeminlerin temel elektro-kimyasal özelliklerinden biridir ve özellikle killerin davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir (Demir ve Kılıç, 2010).

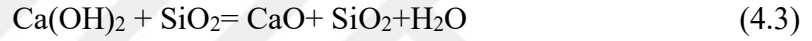
Deney için; öncelikle zemindeki tuzlar uzaklaştırılarak, zemin bilinen türdeki katyonlarla doyurulur. Değişim meydana gelen bölgeyi doygun hale getirmek için gereken bilinen türdeki katyonların miktarı analitik olarak belirlenir. Kimyasal analizle orijinal katyon kompleksi belirlenebilir. Diğer yöntemler ise; kilin amonyum (NH<sub>4</sub>) iyonlarıyla doyurulması, setilpiridinyum iyonları, kobalt heksamin, bakır dietilendiamin ve bakır trietilentetramin gibi metal organik karışımlarla belirlenmesi hızlı ve kesin sonuç vermektedir. Bununla birlikte, amonyum asetat yöntemi önemini korumakta ve uzun zaman almasına karşın diğer yöntemlerin doğrulanmasında kullanılmaktadır (Ammann, 2003; Vural, 2012). KDK kil mineralojisi ile ilgilidir. Tablo 4.3'de çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri verilmiştir.

Tablo 4.3 Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri (Grim, 1962)

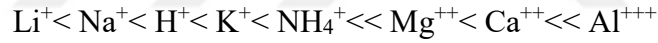
<b>Kil minerali</b>	<b>KDK (meq/100gr)</b>
Montmorillonit	80-150
Vermikülit	100-150
Halosit 4H <sub>2</sub> O	10-40
İlit	10-40
Klorit	10-40
Sepiyolit-Atapulgit	20-30
Halosit 2H <sub>2</sub> O	5-10
Kaolinit	3-15

Kasyon değişim kapasitesi değerlerinin yüksek olması, yüksek yüzey aktivitesini ifade etmektedir. Kasyon değişimi kapasitesi değerleri ile birlikte genelde şişme potansiyelinde de bir artış meydana gelmektedir. Genellikle bu değerin ölçülmesi zemin mekaniği laboratuvarlarında var olmayan hassas ve detaylı deney teknikleri gerektirmektedir. Bununla birlikte; bu deney birçok toprak laboratuvarında kolaylıkla yapılmasıyla birlikte pahalı bir deney değildir.

Kasyon değişimi ve flokülasyon: Kireç, su ve killi bir zemin ile bir araya geldiğinde, pozitif iki yüklü  $Ca^{++}$  kasyonları kil yüzeyine adsorplanmış kasyonlarla yer değiştirmektedir. Kireç eklenen kil mineralinden silisi sökerek reaksiyona girmektedir ve oluşan jel kil toprakları çevreleyerek boşlukları tıkamaktadır. Kil zeminler topraklanma ve çimentolanma ile yeni bir doku kazanmaktadır (Keskin, 2010).



Aşağıdaki her kasyon, soldakinin yerini alabilir;



#### 4.2.4 Serbest Şişme

Serbest şişme indisi deneyi, zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde çok yaygın kullanılan, basit bir yöntemdir. Deney, belirli miktardaki zeminin hacim ölçekli dereceli silindir içerisinde suda çökelen hacminin belirlenmesi şeklinde yürütülmekle birlikte, literatürde farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş birkaç deney yöntemi bulunmaktadır (Demir ve Kılıç, 2010).

Zeminin serbest şişmesi; hacimdeki ilk değişmenin ilk hacme olan oranıdır. Yüksek kaliteli ticari bentonitin (sodyum montmorillonit) serbest şişmesi, %1200-2000'dir. Holtz ve Gibs 1956 yılında yaptıkları çalışmada, %100 gibi düşük şişme yüzdesine sahip bir zeminin arazide, hafif yükleme altında ıslatıldığında önemli miktarda şişme meydana geldiğini göstermişlerdir. %50'nin altında serbest şişme gösteren zeminlerin

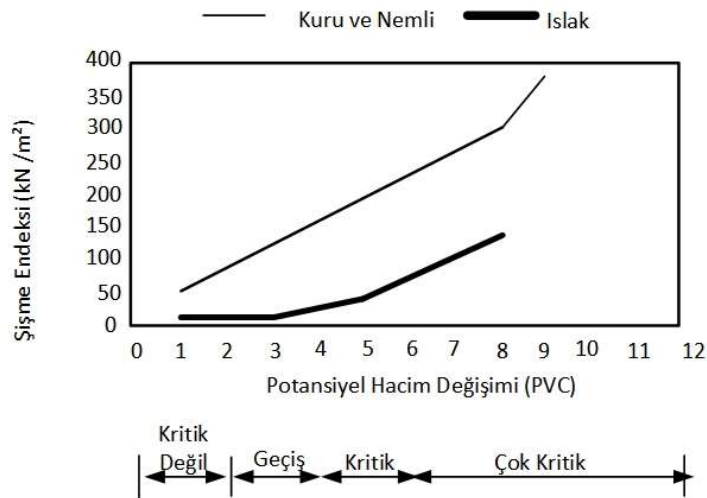


önemli şişme değişimi göstermediği kabul edilmektedir. Ancak, Dawson' nın 1953 yılında yapış olduğu çalışma, %50 civarında serbest şişme gösteren bazı Texas killerin, şişme nedeni ile önemli zararlara yol açtığını göstermiştir. Bunun nedeninin, zeminin şişme karakteristikleri ile aşırı iklim koşullarının birleşmesi olduğu düşünülmektedir (Nelson ve Miller, 1992; Vural, 2012).

#### 4.2.5 Potansiyel Hacim Değişirme (PVC) Deneyi

PVC metre sıkıştırılmış bir zeminin şişme basıncını belirlemek amacıyla standart hale getirilmiş bir alettir. PVC metre tercihe bağlı olarak laboratuvarında veya arazide kullanılabilir. Bu deneyde örselenmiş numune doğal su muhtevasında Proktor sıkışma enerjisi ile ( $55000 \text{ ft-lb/ft}^3$  ( $2600 \text{ kJ/m}^3$ )) sıkıştırılarak konsolidometre hücresine yerleştirilmektedir. Numunenin konsolidasyon aletinde bir yük halkasına karşı ıslatılarak şişmesine izin verilmektedir. Şişme endeksi yük halkasına bağlı olarak kaydedilmektedir (Vural, 2012).

Değerlendirme için Şekil 4.2'de ifade edilen abak kullanılmaktadır. Deneyin en önemli avantajları standart sonuçlar vermesi ve basit bir yöntem olmasıdır. Fakat örselenmiş numunelerin kullanılması nedeni ile arazideki zemin hakkında tasarımda kullanılacak kesin parametreler elde edilememektedir. Bu nedendir ki, tanımlama amacı ile kullanılması daha faydalı olacaktır.



Şekil 4.2 Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme (USDA, 1993)

Şişme-büzülme potansiyelinin, potansiyel hacim değiştirme deneyinin sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılmasında Tablo 4.4 kullanılmaktadır (USDA, 1993).

Tablo 4.4 Şişme- büzülme potansiyelinin PVC deneyi sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılması (USDA, 1993)

Şişme Basıncı (kPa)	Şişme –Büzülme Potansiyeli
<81	Düşük
81-153	Orta
153-225	Yüksek
> 225	Çok Yüksek

#### 4.2.6 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

CBR deneyi, karayolu ve havaalanı kaplamalarının projelendirilmesinde yoğun olarak kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Zemin, 6 inç (152 cm) çapındaki CBR deney silindirinine farklı su içeriklerinde ve yoğunluklarda sıkıştırıldıktan sonra bir sürşarj yükü altında 4 gün suda bırakılmaktadır. Sürşarj yükü zeminin arazide maruz kalacağı statik gerilmeye uygun olarak seçilmektedir. Şişme okumaları 4 günlük ıslatma periyodundan önce ve sonra bir ölçüm saatiyle alınmaktadır (Demir ve Kılıç, 2010).

#### 4.2.7 Doğrusal Genişleyebilirlik Katsayısı (COLE)

Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı(COLE) deneyi, Şişen zeminlerin karakterize edilmesi için kullanılan bir büzülme deneyidir. Deney örselenmemiş örneğin 33 kPa emme durumu ile fırında kurutulmuş emme (1000kPa) durumu arasındaki doğrusal deformasyonunun belirlenmesinden oluşmaktadır. Örselenmemiş zemin örneği, su için geçirimsiz ancak su buharı için geçirimli olan esnek plastik reçine ile kaplanmaktadır. Daha sonra bu doğal zemin toprakları, basınçlı bir kap içinde 33 kPa zemin emmesine getirilmektedir. Zeminlerin hacimleri Arşimet prensibi yardımıyla belirlenmektedir. Daha sonra örnekler fırında kurularak, benzer şekilde diğer hacim ölçümleri de yapılmaktadır. COLE, nemli durumdan kuru duruma geçirildiğinde,

örnek boyutundaki değişimin ölçümüdür ve 33 kPa emme ile fırında kurutulmuş toprağın hacim ağırlıklarından belirlenmektedir (Vural, 2012).

COLE yüzde olarak da hesaplanabilmekte ve bu durumda doğrusal genişleyebilirlik Yüzdesi (LEP) olarak isimlendirilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Departmanı Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından verilen şişme– büzülme potansiyeli sınıflandırması Tablo 4.5’te görülmektedir.

Tablo 4.5 Şişme-Büzülme potansiyelinin doğrusal genişleyebilirlik katsayısı ve doğrusal genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması (Brasher ve diğer., 1966)

COLE	LEP	Şişme- Büzülme Potansiyeli
< 0,03	<3	Düşük
0,03-0,06	3-6	Orta
0,06-0,09	6-9	Yüksek
>0,09	>9	Çok Yüksek

### 4.3 Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda Şişen zeminlerin tanımlama deneyleri ile belirlenmesinden sonra elde edilen parametrelere dayalı bazı sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir. Ancak ortak bir sınıflandırma sistemi standardı belirlenememiştir.

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasını güçleştiren en önemli neden şişme potansiyelinin standart tanımının olmamasıdır. Şişme deneylerinin yapıldığı örneğin özellikleri (örselenmiş, örselenmemiş), sürşarj yükü ve deneye etki eden diğer faktörler değişiklikler göstermektedir (Demir ve Kılıç, 2010). Örneğin; Holtz (1959), şişme potansiyelini; havada kurutulmuş örselenmemiş numunenin; 1 psi (6.9kPa) basınç altında, doygun hale getirilmesi sonucu meydana gelen hacim değişikliği olarak tarif etmiştir. Seed ve diğer., (1926) ise; şişme potansiyelini; örselenmiş, optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluktaki (AASHTO standardı) numunenin 1 psi (6.9kPa) basınç altında yaptığı hacim değişimi olarak tarif etmiştir. Snethen (1979) şişme potansiyelini; ”şişme potansiyeli doğal su muhtevası ve yoğunluğundaki örselenmemiş numunenin arazideki gerilme şartları altında, ödometre deneyinde

denge konumuna geldiği düşey hacim değişimidir’’ şeklinde tanımlanmıştır (Vural, 2012). Düşey hacim değişimi bu durumda orijinal yüksekliğe oranı olarak ifade edilmelidir (Nelson ve Miller, 1992).

Mollamahmutoğlu ve Taşkiran’ın 2000 yılında yaptıkları çalışmada, temel mühendislik özellikleri ile şişme potansiyeli arasındaki korelasyonlara ilişkin önerileri ile şişme potansiyelinin yaygın zemin deneyleri arasındaki korelasyonları Tablo 4.6’ da ifade edildiği gibidir. Şişen killerin tanımlanmasında; genellikle tane boyu dağılımı, kil içeriği ve plastiklik gibi zemin özellikleri kullanılmaktadır. Plastiklik indisi( $PI = LL - PL$ ) ile kıvam limitleri ve doğal su içeriğine bağlı olarak belirtilen likitlik indisi ( $LI = \frac{w_n - LL}{LL - PL}$ ); iki önemli ölçüt olarak göz önüne alınmaktadır. Özellikle plastiklik indisi, Şişen killerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılmaktadır (Demir ve Kılıç, 2010). Plastiklik indisine göre belirlenen şişme potansiyelinin gruplandırılması Tablo 4.7’de olduğu gibidir.

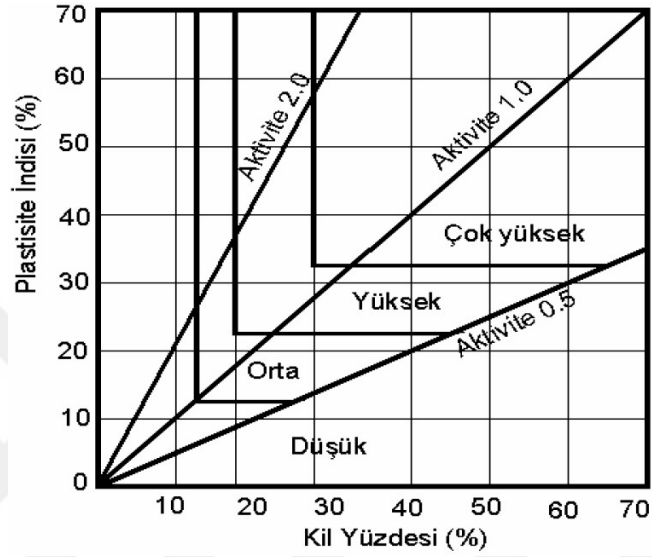
Tablo 4.6 Zeminin mühendislik özellikleri ile şişme dereceleri arasındaki korelasyon (Mollamahmutoğlu ve Taşkiran, 2000)

Laboratuvar ve Arazi verileri			Şişme Dereceleri		
200 no’lu Elekten Geçen	Likit Limit	Standart Penetrasyon deneyi (N) değerleri	Muhtemel Şişme %	Şişme Basıncı %	Şişme potansiyeli
<30	<30	<10	<1	50	Düşük
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	Orta
60-90	20-30	20-30	3-10	250-1000	Yüksek
>95	>60	>30	>10	>1000	Çok yüksek

Tablo 4.7 Plastiklik indisi ile şişme potansiyeli arasındaki bağıntı (Yıldırım ve Acar 1994)

Plastiklik indisi	Şişme Potansiyeli
0-15	Düşük
10-35	Orta
20-35	Yüksek
>35	Çok Yüksek

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında yaygın olarak Van Der Merwe tarafından geliştirilen 1964 yılına ait grafik kullanılmaktadır (Şekil 4.3). Modifiye Van Der Merve grafiği kil içeriği ve plastiklik indisi değerlerinden hareketle şişme yüzdeleri derecelendirmiştir (Van Der Merve, 1964).



Şekil 4.3 Şişme potansiyeli grafiği (Van Der Merve,1964)

## **BÖLÜM BEŞ**

### **KİL STABİLİZASYON YÖNTEMLERİ**

Madencilik alanında karşılaşılan en büyük sorunlardan olan biri olan Şişen Killerin stabilizasyonu için geçmişten günümüze birçok yöntem geliştirilmiş ve hali hazırda uygulanmaya devam etmektedir. Günümüzde Kil stabilizasyonunda aşağıda ki yöntemlerin uygulandığı görülmektedir.

- a) Kimyasal katkı maddeleri
- b) Sıkıştırma kontrolü ile zeminin iyileştirilmesi
- c) Sürşarj yükleme
- d) Su içeriğinin korunması

#### **5.1 Kimyasal Katkı Maddeleri Kullanımı**

Tez kapsamında anlatılan kimyasal katkı maddeleri kullanımının anlatıldığı bu kısımda aşağıdaki yöntemlere yer verilecektir;

- Kireç Stabilizasyonu
- Çimento Stabilizasyonu
- Organik Stabilizasyonu
- Uçucu Kül Kullanımı
- İnorganik Tuzlar İle Stabilizasyon

##### **5.1.1 Kireç Stabilizasyonu**

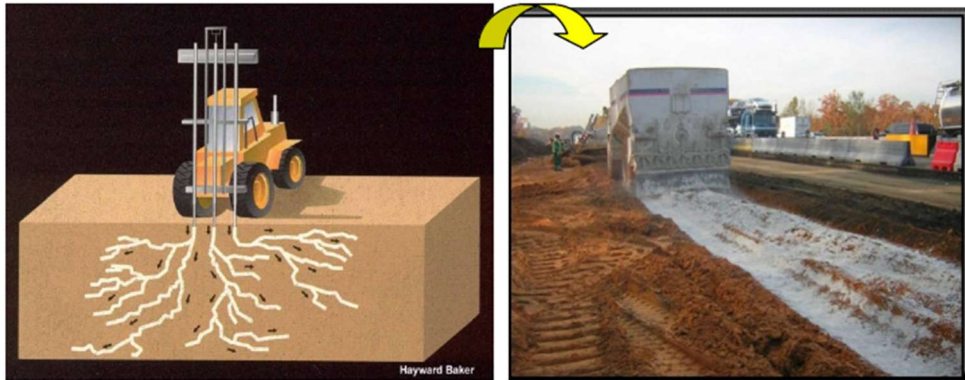
Kireç insanoğlunun kullandığı ilk kimyasal yapı malzemelerinden biridir ve birçok zemin içinde stabilizasyon amacıyla kullanılabilir. Kil zeminlere kireç katılması kilin plastisitesinin ve şişme potansiyelinin azalmasını sağlar. Kireç stabilizasyonu, zeminde oluşacak olan şişmeyi azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için çoğu projede kullanılmıştır. Özellikle karayolu projelerinde başarıyla uygulanmaktadır. Kireç katkısı aynı zamanda malzemenin kompaksiyon karakteristiklerini de etkiler.

Maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken, optimum su muhtevası artar. Şişen killerin stabilizasyonu için kullanılan farklı kireç tipleri bulunmaktadır (Taşçı, 2011; Ünver, 2015).

Bununla birlikte kireç stabilizasyonu şişen zeminlerin İyileştirilmesinde ilk akla gelen ve en sık kullanılan yöntemdir. Genellikle ağırlıkça %3-8 oranında sönmüş kireç zeminin üst 10-50 cm'lik kısmını stabilize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Oluşan temel reaksiyonlar; katyon değişim kapasitesi, flokülasyon-aglomerasyon, kireç karbonatlaşması ve puzolonik reaksiyonlardır. Kireç stabilizasyonu zeminin plastikliğini azaltarak çalışabilirliği artırır. Aşağıda yer alan zemin özellikleri, zeminin kireç ile reaktivitesini etkilemektedir (Al-Rawas, 1998) .

1. pH değeri 7 civarında olan zeminlerin kireç reaktivitesi yüksektir.
2. Organik karbon varlığı zemin- kireç reaksiyonunu yavaşlatır.
3. Zayıf drenaj özelliklerine sahip zeminler iyi drenaj özelliklerine sahip zeminlere oranla daha yüksek reaktiviteye sahiptir.
4. Kalkerli zeminler iyi reaktivite özelliğine sahiptirler.
5. Sülfatlar ve bazı demir bileşikleri kireç reaksiyonunu engellemektedir.
6. Alçı taşı (Gypsum) içeren zeminlerde kireç gereksinimi daha fazladır.

Şekil 5.1’de şişen zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi ile görsel verilmektedir.



Şekil 5.1 Şişen zeminlerin kireçle iyileştirilmesi. (Demir ve Kılıç, 2010)

Puzolanik reaksiyonlar; kil yüzdesi, kilin mineralojisi, zeminin pH'ı, organik madde içeriği ve drenaj koşulları gibi zemin özelliklerine bağlıdır. Zemin stabilizasyonunu sağlayan diğer reaksiyonlar; kireç, su ve alüminyum veya silikatlı maddelerin oluşturduğu güçlü çimentolaşmış yapılardır. Kireç stabilizasyonu kum ve silt ağırlıklı zeminlerde etkin sonuçlar vermeyebilir. Zemine kireç ile birlikte uçucu kül veya benzeri puzolanik özellikler gösteren malzemelerin ilavesi, zemin özelliklerini olumlu etkileyecektir (Çetin, 2003).

### **5.1.2 Çimento Stabilizasyonu**

Zemini, çimento ile stabilize edilmesi kireç stabilizasyonuna benzer reaksiyonlar oluşturmaktadır. Çimento stabilizasyonu; likit limit, plastiklik indisi ve hacim değiştirme potansiyelini azaltırken Büzülme, kılcal çatlak limitini artırır. Ancak çimento stabilizasyonu yüksek plastiseli killerin stabilizasyonunda kireç stabilizasyonu kadar etkili değildir.

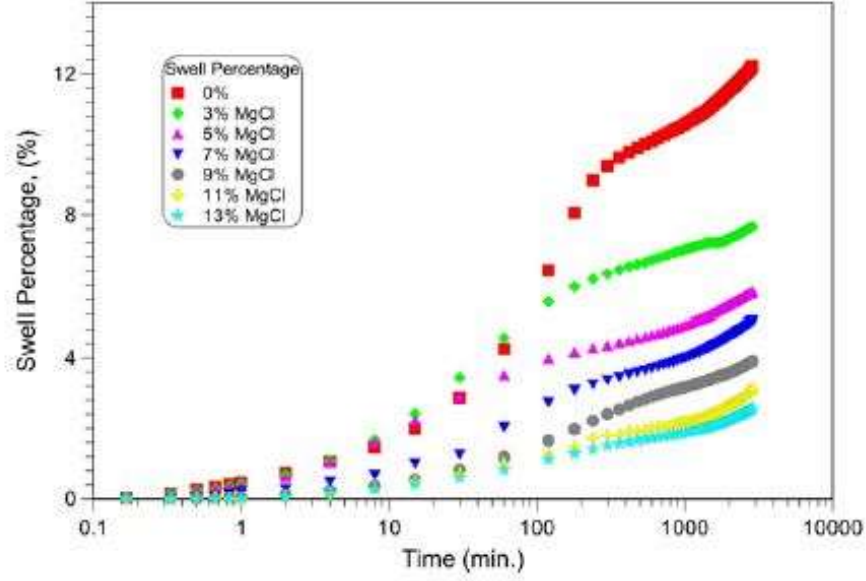
Zeminlerin kirece karşı reaktif olmadığı durumlarda çimento stabilizasyonu avantajlı olmaktadır. Bu sebeple karıştırma işlemi kireç stabilizasyonuna göre daha kısa sürede tamamlanmalıdır (Çetin, 2003).

### **5.1.3 İnorganik Tuzlar İle Stabilizasyon**

Quigley (1993) kil minerallerinin belirli kimyasallarla temas halinde geniş bir ara tabaka büzülmesine maruz kalabileceğini göstermiştir.

Zeminlerin su içeriklerini korunmasını, büzülme limitinin ve kayma dayanımının artmasını sağlarlar. Suyun donma derecesini düşürdüklerinden donmadan kaynaklanan şişme probleminin çözümünde başarılı olarak kullanılmışlardır. Ancak zaman içerisinde zeminden ayrılmaları problem olmaktadır. Bu nedene stabilizasyonun belirli sürelerde tekrarlanması gerekmektedir. Bu da yöntemin ekonomik olmamasına neden olmaktadır (Çetin,2003). Başlıca KCl ve NaCl tuzları zemin stabilizasyonu için kullanılmaktadır.





Şekil 5.2 Farklı MgCl<sub>2</sub> çözeltileri ile hazırlanan numuneler için şişme oranı - zaman grafikleri. ( Türköz ve diğer. 2014)

Günümüzde yapılan araştırmalar ışığında birçok inorganik bileşik killerin stabilizasyonu için kullanılabilir. Örnek olarak Şekil 5.2 de görüldüğü yüksek plastisite Kil (CH) (USCS) (ASTM D 2487-00 standardına göre ) ve değişik oranda MgCl<sub>2</sub> çözelti miktarları karıştırılmış ve şişme yüzdesinin düşmeye başladığı görülmüştür.

#### 5.1.4 Uçucu Kül Kullanımı

Uçucu kül; alüminyum, silisyum, çeşitli oksitler ve alkaliler içeren puzolanik bir malzemedir. Kendi kendine bağlayıcı özelliği ya hiç olmayan ya da çok az olan, ancak su ve kireçle birlikte kimyasal reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık kazanan malzemelere puzolan malzeme denir. Uçucu kül bu özelliği ile kireç ve kil arasındaki puzolanik reaksiyonu artırmak ve böylece zeminin tane çapını büyütmek için zemine ilave edilmektedir. Bunun yanında yapısında kireç içeren uçucu küller de vardır ve bunlar normal uçucu küllerle karıştırılarak daha etkili sonuçlar elde edilebilir (Taşçı, 2011).

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik kompozisyonları arasında doğrudan bir ilişki bulunmamasına rağmen, yalnızca kimyasal oksit analizi kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliği belirlenmektedir. Mineral malzemenin çoğu kil, pirit ve kalsitten oluşmaktadır. Minerallerin %85'den fazlası minerallerin termal işlemlerle şekillendirilmiş camsı, içi boşluklu ve dolu kristalimsi taneciklerden oluşmaktadır. Linyitten elde edilen külde CaO ve MgO oranı  $Fe_2O_3$ 'den fazladır. Taşkömüründen elde edilen külde ise  $Fe_2O_3$  oranı CaO ve MgO oranından daha fazladır (Demiröz, 2009)

Uçucu küllerin endeks ve mühendislik özellikleri genelde oldukça dar bir aralıkta değişmektedir. Düşük geçirgenliğe sahip olan uçucu küller kireç ile reaksiyona girdiği zaman sertleşmektedir. Oturmalar kil zemine nazaran çok daha hızlı oluşmakta ve suya doygun olmadığı zaman suyun yüzeysel gerilimlerinden dolayı görünen kohezyon oluşmaktadır (Ünver, 2015).

Sektörde Kimyasal kullanımı yaygın olmakla beraber uçucu küllerin kullanıldığı uygulamalara da rastlanılmaktadır. Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yakılmasıyla oluşan gazların atmosfere bırakılmadan önce bacalardaki filtreler tarafından tutulan silt ebadında parçacıklardır (Malhotra ve Ramezianpur, 1994).

Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektrostatik filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül adı verilmektedir.

Türkiye Elektrik ihtiyacının büyük çoğunluğu termik santrallerden karşılamaktadır. Bu yüzden yılda 13 milyon ton civarı atık kül açığa çıkmakta ve bu büyük değerlerin depolanması da problem teşkil etmektedir. Bu atıkların değerlendirilmesine yönelik ilk çalışmalar 1960 yılların sonlarında başlamıştır. 1966-1980 yılları arasında temel olarak çimento ve tuğla sanayisinde kullanılan uçucu külün değerlendirme oranı

%7'lere ulaşmışken, günümüzde bu oran %0.4'e kadar gerilemiştir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

TS 639 "Uçucu Kül" standardında  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı en az %70 verilmiştir. Aynı zamanda içerisinde %10'dan fazla miktarda CaO bulunan küller yüksek-kireçli küller, %10'dan az miktarda CaO bulunan küller ise düşük-kireçli küller olarak tanımlanmaktadır. Düşük kireçli uçucu küllerin sadece puzolanik özelliğe sahip oldukları, yüksek-kireçli uçucu küllerin ise hem puzolanik özelliğe hem de içerdikleri kireç nedeniyle bir miktar hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip oldukları bilinmektedir.

Uçucu kül ile zemin stabilize edilirken, üç farklı yönden zemin iyileştirilmektedir (Kurama ve diğer., 1999). Bunların birincisi, uçucu külde bulunan tri-kalsiyum silikatlar ile hidrasyon sonucunda çimentolaşma olayıdır. İkincisi serbest halde bulunan kirecin (CaO) kil mineralleri ile etkileşimi sonucunda plastisitede meydana gelen azalmadır. Üçüncüsü ise silika ve alümina bileşiklerinin puzolanik tepkimeleri sonucunda meydana gelen iyileşmedir.

Biri düşük plastisiteli diğeri ise yüksek plastisiteli iki ayrı kilin c sınıfı uçucu kül ile stabilize edildiği çalışmada (Nalbantoğlu, 2004) artan uçucu kül oranı ile zeminlerin her ikisinin de plastik limitleri artış göstermiştir. Yüksek plastisiteli numunelerin likit limitleri düşüş gösterirken, düşük plastisiteli numunelerin likit limitleri artmıştır. Her iki zemin numunesinin de plastisite indisleri, artan uçucu kül ilavesi ile azalmıştır. Yüksek plastisiteli numunelerde plastisite indisi uçucu kül ilavesi ile büyük oran-da düşüş gösterirken, düşük plastisiteli numunelerde plastisite indisi çok az düşüş göstermiştir. Yazar yüksek plastisiteli killerde uçucu kül ilavesinin daha büyük etkiler meydana getirdiğini belirtmiş ve bu olayı küçük dane boyutları nedeniyle yüksek özgül yüzey alanına sahip olan killerin uçucu kül içerisindeki kirecin etkilerine karşı daha hassas olması ile açıklamıştır.

Yapılan bir başka çalışmada araştırmacılar (Acosta ve diğer., 2003) yedi farklı zemini dört farklı uçucu kül kullanarak iyileştirmeye çalışmıştır. %0, 10, 18, 30

oranında uçucu kül kattıkları zeminler üzerinde CBR ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bütün numuneler optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Kullanılan uçucu kül yüksek kireçli uçucu kül sınıfına girmektedir. %18 oranında uçucu kül katılan numuneler, optimum su muhtevasında uçucu kül kullanılmadan hazırlanmış numunelere göre 4 kat yüksek dayanım değerlerine ulaşmıştır. Artan oranlarda kullanılan uçucu külün dayanımı düşürdüğü gözlenmiştir. Organik içerikli zeminleri iyileştirme-de en başarılı olan uçucu küllerin yüksek oranda karbon bileşikleri içeren uçucu küller olduğu belirlenmiştir.

Dispersif killer üzerine yaptıkları çalışmada (Çokça, 2001) yazarlar yüksek plastisiteli dispersif bir kil üzerinde Soma termik santralinden elde edilen uçucu külün etkilerini incelemiştir. Yazarlara göre uçucu kül miktarı %7'ye arttıkça numunenin serbest basınç dayanımı artmakta, daha fazla uçucu kül katkısı ise serbest basınç dayanımında düşüşe yol açmaktadır. Numunelerdeki uçucu kül miktarı sıfırdan %13'e arttıkça numunelerin optimum su içerikleri artmış, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Stabilize edilmiş dispersif zeminleri toprak dolgu barajlarda ve seddelerde kullanabildiğimizde hem muhtemel kil kaynaklarının miktarını arttırabileceğiz hem de termik santrallerin depolamak zorunda oldukları, bir atık malzeme olarak görülen uçucu kül değerlendirilmiş olacaktır.

### ***5.1.5 Organik Maddelerin Kullanımı***

Stabilizasyon için geleneksel olmayan katkı maddelerinin kullanımı genişleyici killerin zararlı etkilerini azaltmak için ilginç bir alternatif sunabilir. Son yıllarda birçok araştırmacı tarafından biokütle ve geri dönüşüm atıkları da dahil olmak üzere alternatif stabilizasyon elemanlarının etkisine yönelik testler yapılmıştır (Demir ve Kılıç, 2010).

Organik polimerli kil stabilizasyon bileşikleri (OCS) taneciğin yüzey yapısını değiştirerek parçacığın akışkan sıvıdan etkilenmesinin önüne geçer. OCS kullanımında rehabilite süresi olmayıp etkileri anlık olarak gözlenebilmektedir.

## 5.2 Sıkıştırma Kontrolü ile Zemin İyileştirmesi

### 5.2.1 Kaldırıp Yeniden Yerleştirme

Şişme özelliği gösteren bir zemini kaldırarak yerine şişmeyen zemin konulması sağlam temel zemini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem Şişen tabaka düşük bir kalınlığa sahip ise bu tabakanın tamamının kaldırılması, Şişen tabakanın çok kalın olması durumunda ise yeterli kalınlığın belirlenip bu noktaya kadar olan kısmın değiştirilmesi ilkesine dayanır. Kaldırılması gereken kısmın kalınlığı, alttaki zeminin şişme potansiyeline bağlı olarak belirlenir. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin, alt tabakaya su iletmemesini sağlamak amacıyla dolgu malzemesi olarak granüler zeminlerin kullanılması önerilmez. Dolgu tabakası yüksek yoğunluklarda sıkıştırılarak, yüksek taşıma gücü elde edilebilir. Bu yöntem özel aletler gerektirmediği ve kısa sürede tamamlanabildiği için ekonomik olabilir. Ancak dolgu malzemesinin yapıya yakın bölgede bulunması gereklidir. Aksi halde malzemenin taşınması fazladan maliyet getirebilir. Bazı durumlarda kaldırılması gereken tabaka pratik olarak uygulanmayacak kadar yüksek olabilir (Çetin, 2003; Ünver, 2015).

### 5.2.2 Örseleyip Yeniden Sıkıştırma

Şişen zeminlerde şişme potansiyeli kuru yoğunluğu azaltarak düşürülebilir. Optimum su içeriğinin üzerinde en az kuru yoğunluk sağlayacak şekilde hazırlanan zeminler daha düşük şişme potansiyeline sahiptirler. Arazide bulunan zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılması, uygulamaların ekonomik olmasını sağlar. Eğer doğru sıkıştırma uygulanırsa, zemin yeterince geçirimsiz olur, bu da alt tabakalara suyun geçmesini engeller. Ancak yoğunluğun düşük olması taşıma gücü problemlerine neden olmaktadır (Ünver, 2015).

### **5.3 Sürşarj Yüklemesi ile Zeminlerin İyileştirilmesi**

Şişen killerde şişme basıncı değerine yakın değerlerde bir sürşarj yüklemesi yapılarak şişme engellenebilir. Bu yöntem ancak düşük-orta derecede şişme potansiyeline sahip zeminlerde pratik olarak kullanılabilir. Şişme değerleri ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin doğrusal olmaması, şişme basıncının artması yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir (Çetin, 2003; Demir ve Kılıç, 2010).

### **5.4 Su İçeriğinin Korunması ile Zemin İyileştirilmesi**

Zemindeki şişme problemleri su içeriğindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Eğer zemin içerisindeki su içeriğinin değişimi uygun yöntemle engellenebilirse şişme problemleri büyük ölçüde çözümlenebilmektedir. Su tutucu bariyerleri zeminlerde su içeriğinin değişimini engellemek için kullanılabilir. Burada amaç yapıya yakın bölgelere geçirimsiz tabaka oluşturarak yapının altında kalan zeminlerde oluşabilecek su içeriği değişimlerini en aza indirmektedir. Yapımdan önce olduğu gibi koruma amaçlı olarak da uygulanabilmektedir. Düşey ve yatay su tutma bariyerleri olarak iki farklı şekilde üretilebilmektedirler (Çetin, 2003; Ünver, 2015).

## BÖLÜM ALTI

### LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

#### 6.1 Çalışma Kapsamında Gerçekleştirilen Zemin Sınıflandırma Deneyleri

Tez kapsamında gerçekleştirilen zemin sınıflandırma deneylerini aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür;

- XRD Analizleri
- Atterberg Limitleri
- Konsolidasyon Deneyleri
- Birim Hacim Ağırlık Tayini
- Kimyasal Analiz

##### 6.1.1 XRD Analizleri

XRD yöntemi kristalli yapıya sahip malzemelerin kristal yapıları yardımıyla mineralojik bileşimlerinin belirlenmesinde kullanılır. Öyle ki aynı kimyasal bileşime fakat farklı kristal yapısına sahip iki malzeme ancak x-ışını kırınım yöntemi yardımıyla ayırt edilebilir. Ayrıca örnek içerisinde düşük oranda bulunan veya ince taneli olduğu için mikroskobik inceleme ile belirlenemeyen minerallerin belirlenmesi ve mikroskobik inceleme sonucunda belirlenen minerallerin doğruluğunu teyit etmek amacıyla da yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Şekil 6.1’de bir XRD cihazı görülmektedir.

XRD ile analiz edilecek malzeme -100µm boyutuna öğütülerek toz haline getirilir ve rastgele yönlendirilmiş örnek hazırlanır. Örnekten alınan kırınım deseni standart ASTM mineral kartları (minerallerin parmak izi olarak tanımlanan) ile karşılaştırılarak mineral içeriği belirlenir. Ancak burada da tıpkı mikroskobik inceleme sonuçlarında olduğu gibi minerallerin karışma olasılığı vardır. Böyle bir durumda sonuçlar ya mikroskobik inceleme ile mineralojik olarak kontrol edilir ya da örneğin kimyasal analizi yapılarak mineral- element ilişkisi ile kontrol edilir.



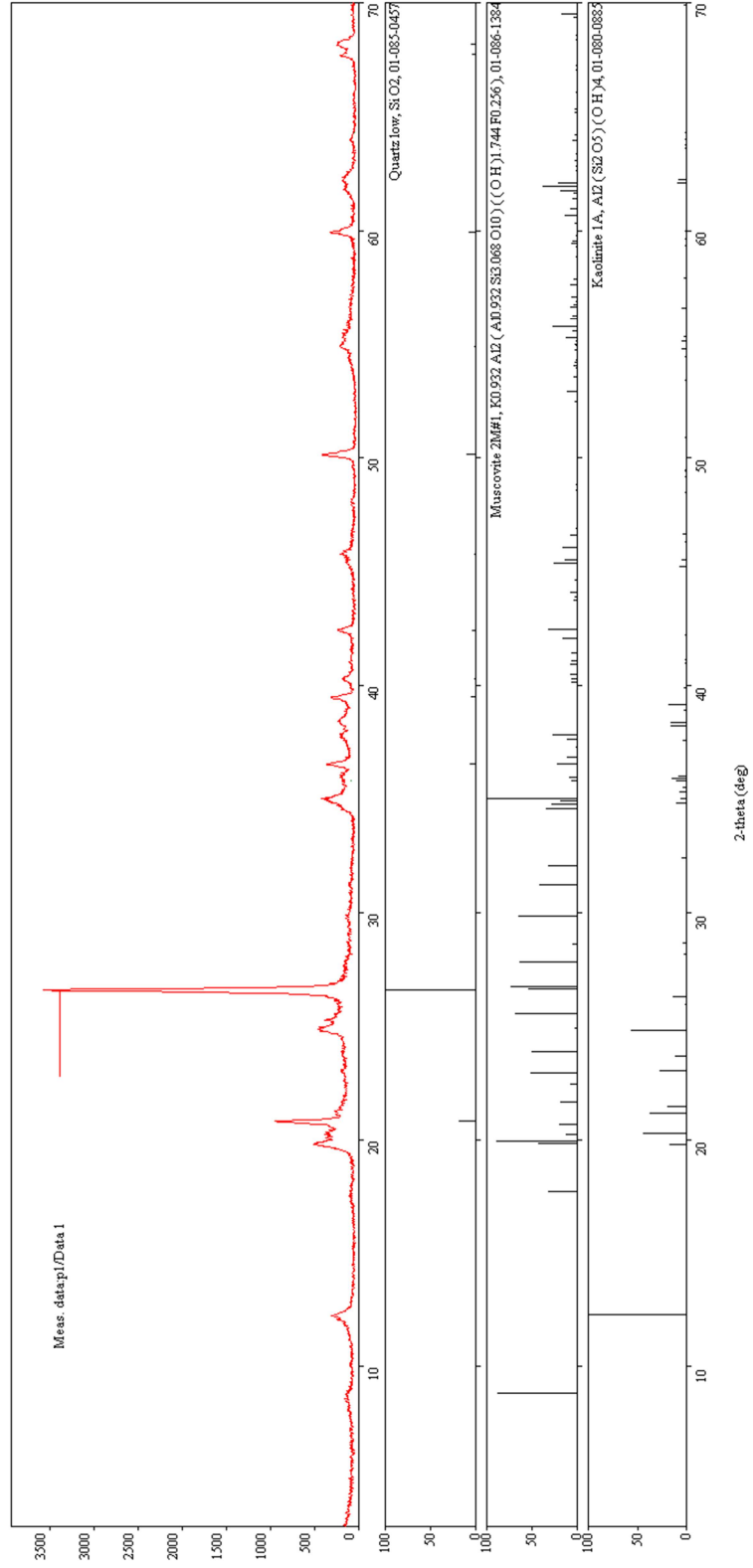
Şekil 6.1 Mineral analizinde kullanılan XRD cihazı (Yılmaz ve diğer., 2017)

Örnek içerisindeki mineral oranlarının çok düşük olması (cihazın dedeksiyon limitinin altında) halinde XRD metodu ile de bu minerallerin tespiti mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda düşük oranlarda bulunan mineral için bir ön zenginleştirme işlemi uygulanarak söz konusu mineralin örnek içerisindeki oranı cihazın dedeksiyon limitleri içerisinde yükseltilir (Yılmaz ve diğer., 2017).

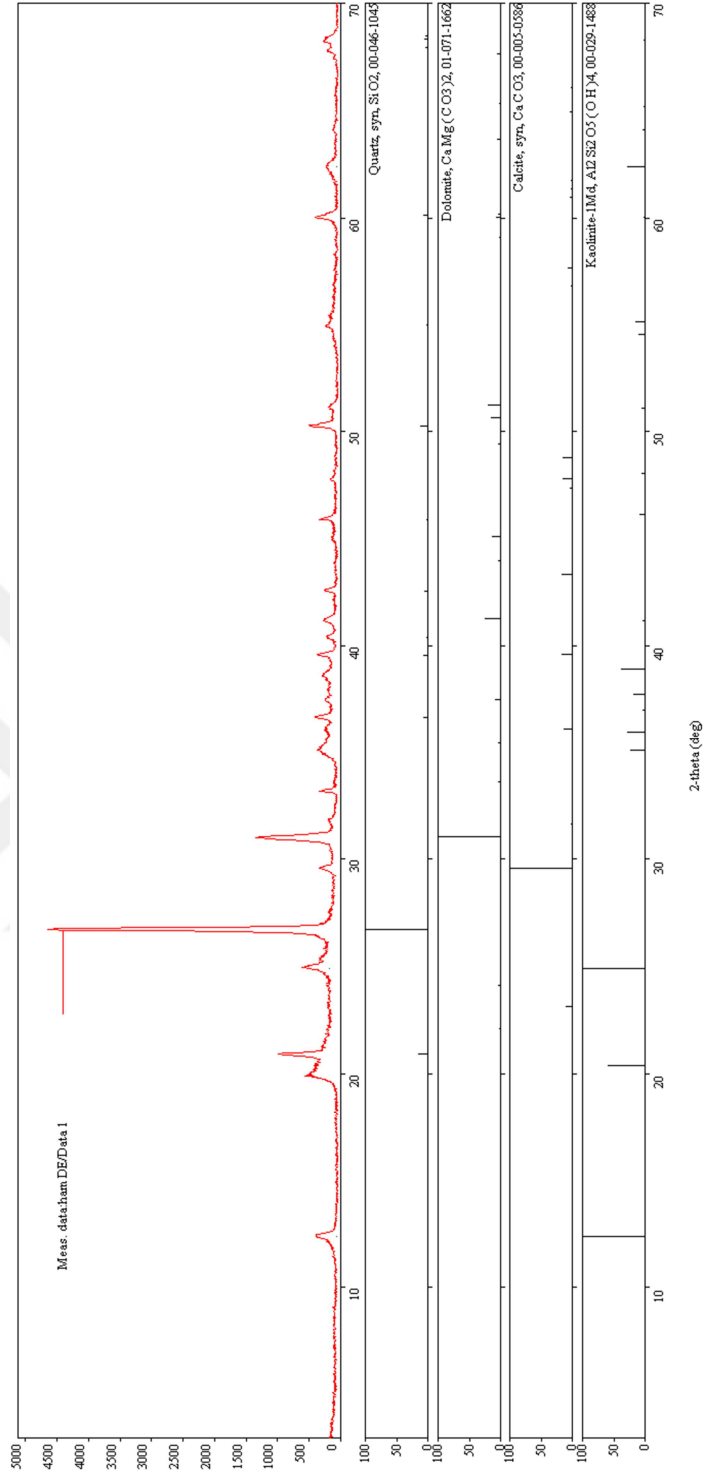
Bu tez çalışması kapsamında yürütülen XRD analizleri Şekil 6.1 de görülen Rigaku Miniflex II cihazıyla yapılmıştır.

XRD analizleri sonucunda Numune 1 için kuvars muskovit ve kaolinit piklerine rastlanmıştır (Şekil 6.2). Numune 2 kuvars kalsit dolomit ve kaolinit pikleri Şekil 6.3'te görülmektedir. Numune 3 ise kuvars, muskovit, montmorillonit ve kaolinit pikleri vermektedir (Şekil 6.4).

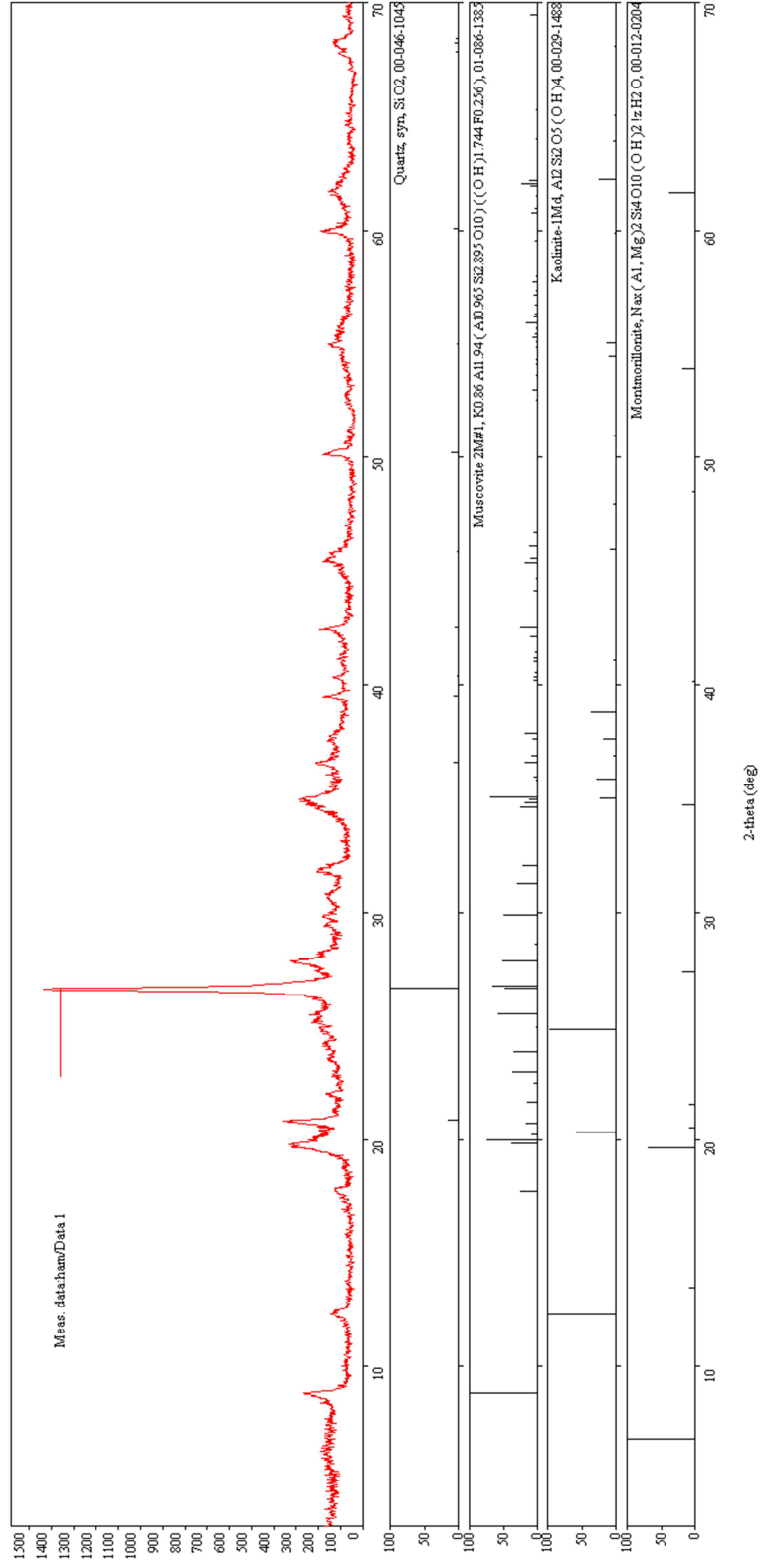




Şekil 6.2 Numune 1 Ham XRD görüntüsü



Şekil 6.3 Numune 2 Ham XRD görüntüsü



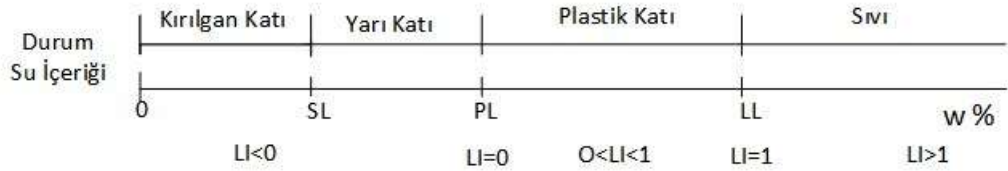
Şekil 6.4 Numune 3 Ham XRD görüntüsü

### 6.1.2 Atterberg Limitleri

Atterberg limitleri, silt ve kil arasında ayırım yapmak için kullanılabilir ve farklı tiplerde silt ve killeri de ayırt edebilir. Bu limitler İsveçli bir kimyacı olan Albert Atterberg tarafından oluşturulmuştur. Daha sonra Arthur Casagrande tarafından daha detaylı ve kesin bir hale getirilmiştir.

Boşluklardaki suyun varlığı zeminlerin mühendislik davranışını, özellikle de ince taneli zeminlerinkini etkilemektedir. Bir zeminde ne kadar su bulunduğunu ( $\omega$ ) bilmek tek başına yeterli olmamaktadır. Bu su içeriğinin belirli mühendislik davranışını veren standart değerler ile karşılaştırılması gerekmektedir.

Atterberg limitlerine göre numunenin su içeriğinin nerede olduğunu bilmek, onun mühendislik davranışı hakkında bilgi sahibi olmak demektir. Dolayısıyla Atterberg limitleri, zemin davranışında belirli limitlerdeki veya kritik aşamalardaki su içeriğini ifade etmektedir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Atterberg limitleri

Kıvam ile kohezyonlu zeminlerde, zeminin sertlik-yumuşaklık durumu belirtilir. Bu durumlar, böyle zeminlerin taşıma gücü vb. özelliklerini etkiler. İsveçli Atterberg (1911), bu durumları ve bunları ayıran sınır su muhtevalarına, Atterberg limitleri veya kıvam limitleri denir.

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

Likit limit, alete sıvanmış zeminde, standart boyutta bir oluk ile ikiye ayrılan zeminin 25 darbede oluk boyunca 1 cm kapandığı andaki su içeriğidir. Bu deney için, havada kurutulmuş ve 40 numaralı elekten elenmiş zemin numunesi üzerinde likit limit deneyi yapılır ve likit limit grafiği çizilir (Alataş, 1996). Şekil 6.6' da Casagrande Likit Limit Deney Cihazına ait bir görsel verilmektedir.



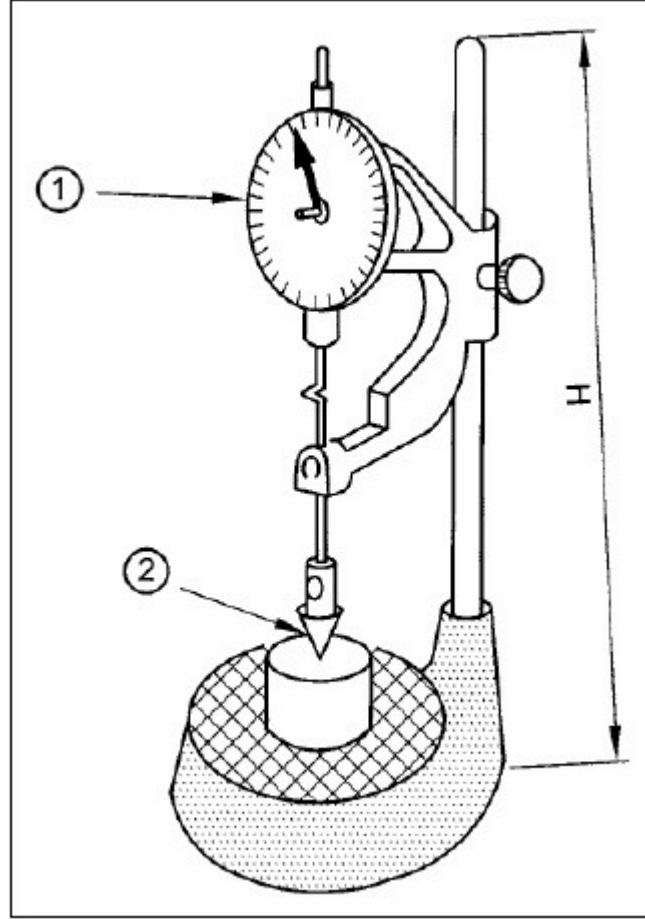
Şekil 6.6 Casagrande Likit Limit Deney Cihazı (Megap, 2016)

- b) *Plastik Limit*: Plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran sınır su içeriğidir. Diğer bir deyişle, zeminin, el altında, cam bir yüzey üzerine, çubuk haline getirilirken, çubukların çapları yaklaşık 3mm olduğunda kopmaların meydana geldiği durumdaki su içeriğidir. Plastik durumda zemin; kırılma, çatlama olmaksızın zemine istenilen şekil kolayca verilebilir (Uzuner, 2005). Havada kurutulmuş ve 40 numaralı elekten elenmiş zemin numunesi üzerinde plastik limit deneyi yapılır. Tayin edilen su içeriği zeminin plastik limitini vermektedir (Alataş, 1996).

#### 6.1.2.1 Koni Düşürme (Penetrasyon) ile Likit Limit Tayini

Koni düşürme yöntemi operatör ve ekipmana bağlı kalmadan daha kolay tekrar edilebilir olması ve daha az değişkenlik göstermesi sebebiyle Casagrande yöntemine göre daha tercih edilebilir bir seçenektir (Houlsby, 1982).

Bu proje kapsamında Atterberg limitlerinin tayini kapsamında koni düşürme yöntemi uygulanmıştır. Bu metot, havada kurutulmuş zeminin likit limitinin bulunması ile ilgili olup, doğal su muhtevsındaki zeminlere uygulanabilmektedir. Şekil 6.7 'de likit limit tayininde kullanılan koni düşürme cihazı verilmektedir.



Şekil 6.7 Likit limit tayininde kullanılan koni düşürme cihazı (TSE, 2006)

*Gerekli araç gereç:* Görünümü Şekil 6.3'de verilen tipe uygun olan penetrometre, paslanmaz çelik veya dural aminden yapılmış, 35 mm boylu, yüzeyi cilalı, tepe açısı  $30 \pm 1^\circ$  olan koni, düz tabanlı 55 mm çaplı ve 40 mm derinlikte metal kap, en az 150 mm çapında porselen pota, damıtık suyla dolu yıkama şişesi (piset) bulundurulmalıdır (TSE, 2006; Beşparmak, 2010).

Deneye hazırlanmış zemin örneklerinin su muhtevalarını kaybetmeden saklanabilmesi için desikatör ve zeminin deney kabına yerleştirilmesinden sonra

yüzeyini tesviyelemek amacıyla kullanılacak çelik cetvelde bulundurulmalıdır. Ayrıca, su muhtevası deneyi için gerekli araç gereçler de kullanılacaktır (TSE, 2006; Beşparmak, 2010).

Deneyin Yapılışı: 425 mikronluk elekten elenen yeteri kadar malzeme suyla ıslatılıp çamur hale getirildikten sonra homojen karıştırılıp, desikatöre bir gün bekletilmek üzere konulmaktadır. Deneylere operatörce belirlenen nispeten düşük su muhtevasından başlanıp likit limit kıvamına doğru artırılarak devam edilmektedir. Numune ertesi gün desikatörden alınarak en az 10 dakika süre ile karıştırılır. Bazı ağır killerde bu süre 40 dakikaya kadar çıkabilmektedir. Hazırlanan numune metal deney kabına sıkıca yerleştirilmektedir. Yüzeyi çelik cetvelle tesviyelenir ve penetrometre tabanına konulmaktadır. Koni kaptaki zeminin yüzeyini belirsiz bir şekilde çizecek seviyeye indirilir. Mikrometre sıfır okuması alınır. Sonra koniyi serbest bırakacak düğmeye basılır ve süre (5±1 sn) beklenir. Süre sonunda son mikrometre okuması alınır. İki okuma arası fark koni penetrasyon değeridir. Koni kaldırılıp dikkatle temizlenir. Kaba, biraz daha çamur eklenerek yüzeyi düzeltildikten sonra deney tekrarlanır ve bu okuma değeri diğerinden 0.5 mm küçük ya da 1 mm büyük çıkarsa, bir üçüncü deney yapılır. Deneylerde 1 mm civarı bir değer değişimi yakalanırsa, her bir denemede 20 g malzeme alınır ve su muhtevaları tespit edilir. Değerlerin ortalaması alınır. Eğer fark 1 mm den fazla ise örnek kap dışına alınır ve tekrar karıştırılıp deney tekrarlanır. Deney, değişen su muhtevaları için tekrarlanır ve bu deney 15 mm ve 25 mm penetrasyon değerleri arasında yapılır. 20 mm penetrasyon değerine karşılık gelen su muhtevası likit limit değeri olarak kabul edilir. Bu değer değişik su muhtevaları için çizilmiş lineer grafikten okunur (Beşparmak, 2010).

#### *6.1.2.2 Plastik Limit Tayini*

Bu deney, zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu, su muhtevasının ölçülmesi ile ilgilidir (ASTM D 4318, 2000).

*Gerekli araç gereç:* Kalınlığı en az 1 cm, bir kenarının uzunluğu en az 30 cm olan, kare biçiminde ve düz yüzeyli olan cam plaka, boyutları standartta belirtilmiş

akrilikten yapılmış olan plastik limit yuvarlama aleti (mevcutsa kullanılması önerilmektedir), boyu 10 - 13 cm kalınlığı 2 cm olan spatula, 200 mm çapında ve 425 µm (40 no'lu) göz açıklıklı standartta belirtilen nitelikte elek, deliklerinin üzerinde en az 5 cm yüksekliğinde bir hacim olan ayrıca aynı nitelikte 2 mm (10 no'lu) göz açıklıklı elek olan elek ve tavası, zemine kontrollü bir şekilde su karıştırabilecek ve ince malzemeyi uzaklaştırabilecek nitelikte olan su kabı (piset), zemin kurutma işlemi için 105±5°C sabit sıcaklık sağlayabilecek nitelikte olan etüv, en az 7.6 cm derinliğinde ve üs çapı en az 20.3 cm çapında yıkama kabı deney için gereklidir (Beşparmak, 2010).

*Gerekli malzemeler:* Minerallerinden ayrıştırılmış, dinlendirilmiş saf su kullanılmalıdır. Deneyin yapılışı: Likit limit deneyi için hazırlanmış 425 µm'lik elekten geçen numunenin, ikinci kez karıştırılmış ya da deney sonunda kalan kısmından yaklaşık 20 - 30 g kadar alınır. Numune homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilecek kadar plâstik olana dek, cam plâka üzerinde, damıtık su ile iyice karıştırılıp yoğrulur. Bu şekilde hazırlanmış numune, yaklaşık olarak iki eşit parçaya bölünür (ASTM D 4318, 2000).

Bunlara yeniden top biçimi verildikten sonra, bir danesi 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar, cam plâka ile el ayası arasında yuvarlanır. Numunenin çapı yaklaşık 3 mm olduğu anda çatlama ve kopma belirmemişse, zemin tekrar topak haline yoğrulur ve yeniden yumrulur. Çap tam 3 mm'ye indiği anda, yuvarlanan zeminde çatlayıp dağılmalar görülene değin bu işlem sürdürülür (ASTM D 4318, 2000).

Çapın doğru olarak belirlenmesinde, karşılaştırma ölçeği olarak bir metal çubuk kullanılmaktadır. Numunenin dağılan parçaları toplanıp bir numune kabına konularak su muhtevası ölçülmektedir. Ölçüm için alınan numunenin yaş haldeki kütlesi en az 10 g olmalıdır. Diğerleri ise daha sonra denenmek üzere paslanmaz ve hava geçirmez bir kap içerisine konur. Yukarıda belirtilen işlemler, başlangıçtaki numunenin ikinci yarısı için tekrarlanmaktadır. Bulunan su muhtevalarının ortalaması, zeminin plâstik limiti (PL) olarak kabul edilmekte ve % olarak en yakın 0.1 hanesine yuvarlatılarak verilmektedir (Beşparmak, 2010).



Bu tez çalışması kapsamında Soma bölgesindeki ocaklardan temin edilmiş olan 3 numunenin Likit limit, Plastik limit değerleri ve zemin sınıfı tanımları aşağıdaki Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Çalışmada Kullanılan Numunelerin Özellikleri

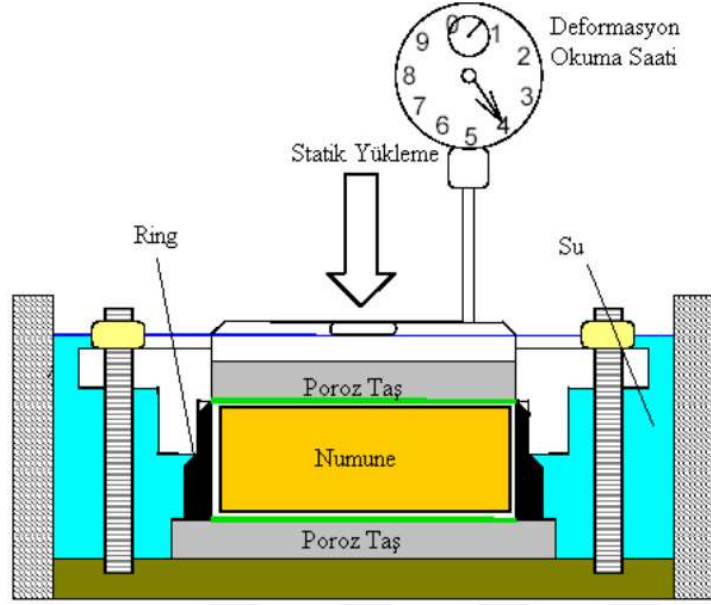
Numune Özellikleri	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Likit Limit	67	54	70
Plastik Limit	30	19	30
Plastiklik İndeksi	37	35	40
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH

### **6.1.3 Konsolidasyon**

Konsolidasyon, sabit bir yük altında, suya doymuş, düşük permabiliteli zeminlerde, boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu meydana gelen hacimsel şekil değişikliğidir. Suyun dışarı çıkışı zamana bağlı olarak gerçekleşeceği için, oturmalarda zamana bağlı olacaktır. Zemin türü ve uygulanan yüke bağlı olmakla beraber konsolidasyon oturmalarının onlarca yıl sürdüğü bilinmektedir.

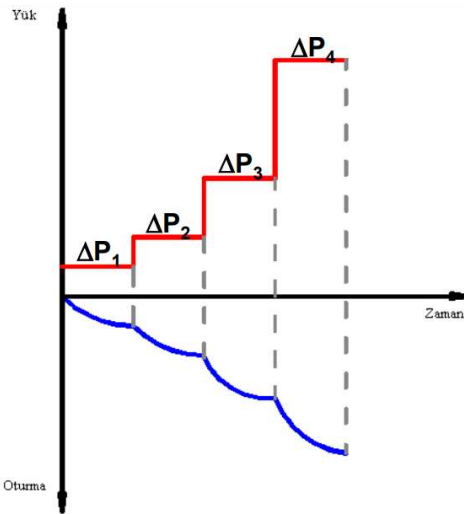
#### *6.1.3.1 Konsolidasyon (Ödometre) Deneyleri*

Bir boyutlu ödometre (konsolidasyon) deneyi ilk olarak Terzaghi tarafından sunulmuştur. Arazideki zemin tabakalarının düşey yüklemeler altında sıkışması esas olarak, laboratuvardaki doymuş zemin numunesinin yatay genişlemesini engellemek için numune çelik halka içine yerleştirilir. Numunenin alt ve üst yüzlerine konan poroz taşlar, zemin içindeki suyun düşey doğrultuda hareketle dışarı çıkmasını sağlamaktadır. Uygulanan sabit yük altında meydana gelen düşey şekil değiştirmeler deformasyon okuma saatinden, zamana bağlı olarak sürekli ölçülmektedir. Buradan da numunenin hacim değişikliğine ulaşılabilmektedir. Şekil 6.8’ de konsolidasyon deneyleri ile ilgili görsel verilmektedir (Gündüz 2015).



Şekil 6.8 Konsolidasyon deneyleri (Gündüz, 2015)

Standart bir boyutlu konsolidasyon deneyinde genellikle, yaklaşık 1'' (2,54 cm) kalınlığında, 2,5'' (6,35 cm) çapında suya doymun numuneler kullanılmaktadır. Yükleme işlemi kademeli olarak yapılmaktadır. Yükleme kademeleri, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa'dır. Benzer şekilde yükün boşaltma işlemi de kademeli olarak 800, 400, 200, 100, 50, 25 kPa'lık yüklerle yapılmaktadır. Her yükleme durumunda, başlangıçtan itibaren, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, ....., 1440 dakikalarında oturma değerleri kaydedilmektedir. Yükleme kademeleri ve oturma değerlerinin zamanla değişimi şekilde gösterilmektedir (Gündüz, 2015).



Şekil 6.9 Yük- zaman ve Oturma- zaman grafikleri. (Gündüz, 2015)

Şekil 6.9’ da Yük- zaman ve Oturma- zaman grafikleri verilmektedir. Sıkışma, boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu, zemin iskeletindeki hacim değişiminden kaynaklanmaktadır (Gündüz, 2015). Bu nedenle, boşluk oranındaki değişim büyük önem kazanmaktadır. Şekil 6.10’ da bir boyutlu sıkışma ifade edilmektedir.



Bir boyutlu sıkışma ile ilgili formülleri aşağıda verile Denklem (6.1), Denklem (6.2) ve Denklem (6.3) şeklinde ifade edebiliriz.

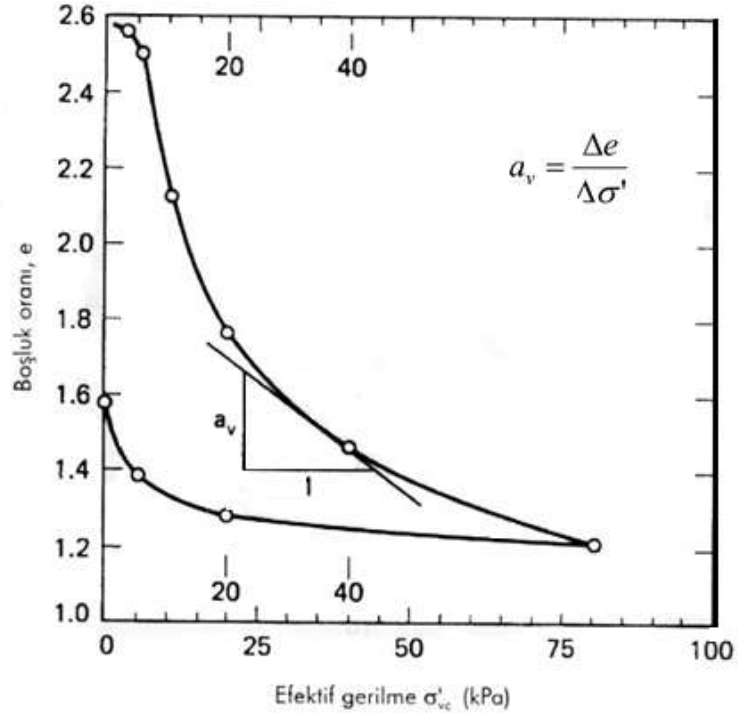
$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (6.1)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_s(1+e_0) - V_s(1+e)}{V_s(1+e_0)} = \frac{e_0 - e}{1+e_0} \quad (6.2)$$

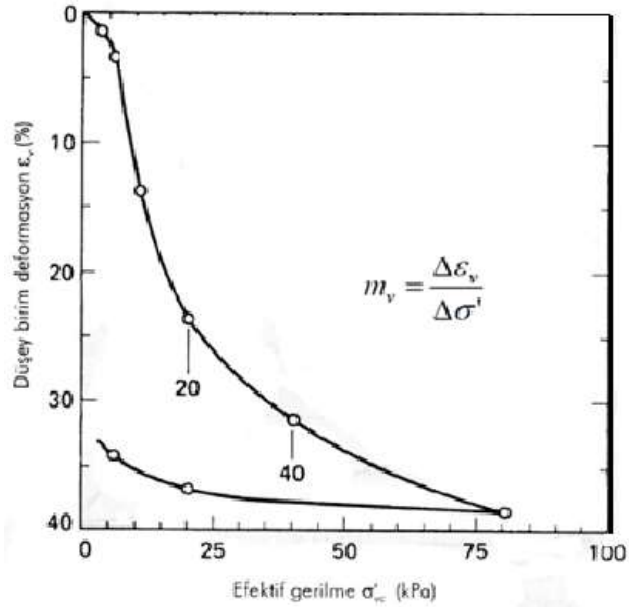
$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (6.3)$$

### 6.1.3.2 Konsolidasyon Parametreleri

Konsolidasyon parametreleri ile ilgili sıkışma katsayısı Şekil 6.11’de ifade edilirken, hacimsel sıkışma modülü Şekil 6.12 ile ifade edilmektedir.



Şekil 6.11 Sıkışma Katsayısı (Gündüz, 2015)



Şekil 6.12 Hacimsel sıkışma modülü (Gündüz, 2015)

Formüllerde yer alan  $a_v$  ve  $m_v$  değerleri sırasıyla sıkışma katsayısı ve hacimsel sıkışma modülünü ifade etmektedir. Hacimsel sıkışma modülü formülü düzenlendiğinde Denklem (6.4) elde edilmektedir. Bu denklem incelendiğinde Denklem (6.5) ile ifade edilen toplam sıkışma miktarına ulaşılmaktadır.

$$m_v = \frac{\Delta H / H_0}{\Delta \sigma'} \quad (6.4)$$

$$\Delta H = S_\infty = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta \sigma' \quad (6.5)$$

Bununla birlikte  $a_v$  ve  $m_v$ , sıkışma eğrisinde değişken olduğu için, her gerilme aralığı için yeni bir hesap gerekmektedir. Tablo 6.2’de kilin tipi ve sıkışabilirliği ile ilgili bilgiler verilmektedir. Aynı Tablo üzerinde  $m_v$  değerleri de yer almaktadır.

Tablo 6.2 Kilin tipi ve sıkışabilirlik sınıfı (Gündüz, 2015)

KİLİN TİPİ	SIKIŞABİLİRLİK SINIFI	$m_v$ ( $m^2/kN$ )
Yüksek organik killer ve turba	Çok yüksek	> 1.5
Körfez ve delta çökelleri (NL) gibi alüvyal ve hassas killer	Yüksek	0,3-1,5
Sert killer, göl çökelleri, marn (ayrışmış), tropik kırmızı killer	Orta	0,1-0,3
Çakıllı kil, marn, katı kırmızı kil	Düşük	0,05-0,1
Sert, OC killer ve yumuşak kayalar (ayrışmış marn, kıltaşı, çamurtaşı)	Çok Düşük	<0,005

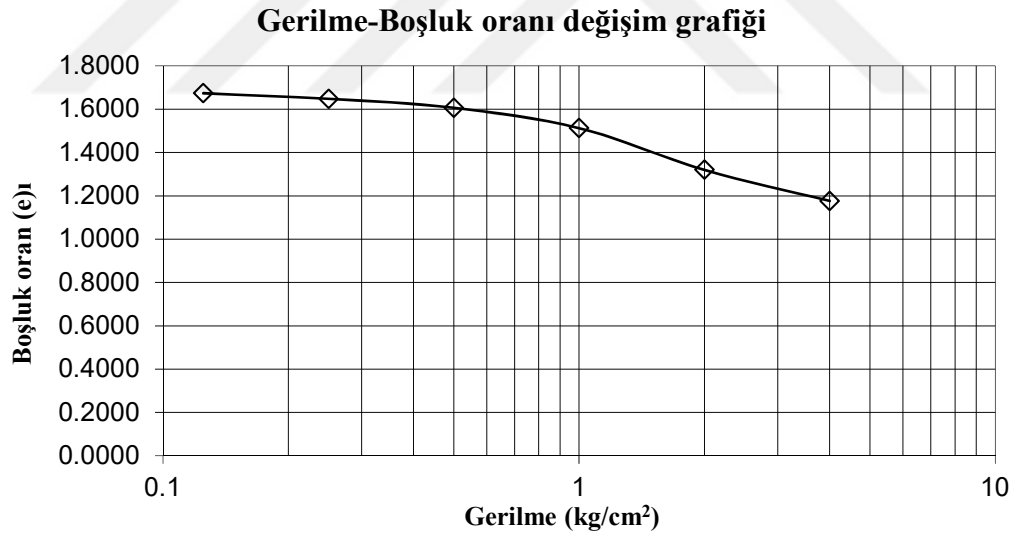
### 6.1.3.3 Doğal Numunelerin Konsolidasyon Sonuçları

Çalışma kapsamında kullanılan konsolidasyon cihazı şekil 6.13’ de verilmektedir. Sırasıyla 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4  $kg/cm^2$  yüklenerek killerin içerisindeki boşluk oranları belirlenmiştir.

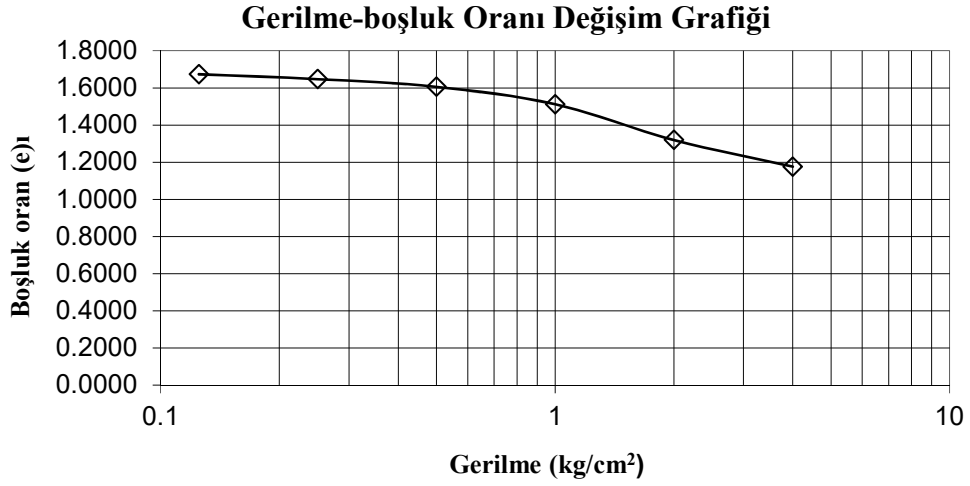


Şekil 6.13 Konsolidasyon Cihazı (Taşkın, 2011)

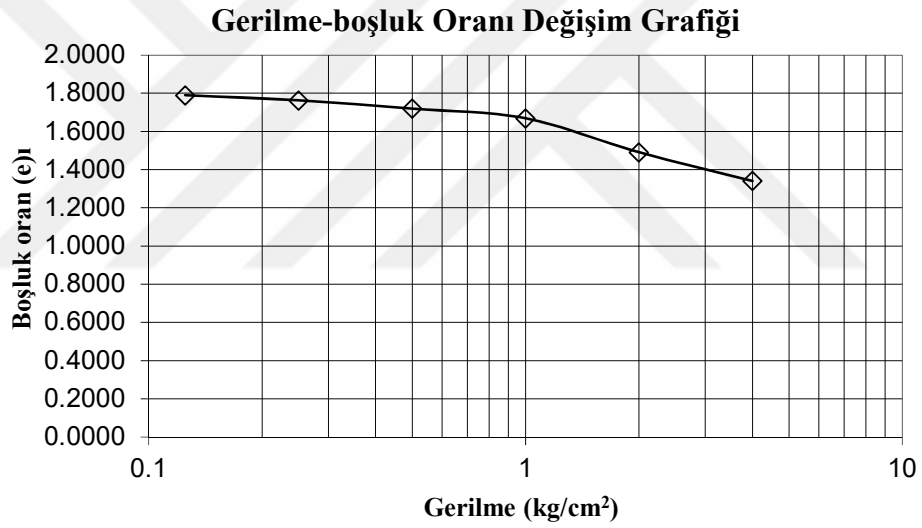
Doğal numuneler için çizilen gerilme – boşluk oranı değişim grafikleri Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.12’de verilmektedir.



Şekil 6.14 Numune 1 için Gerilme-Boşluk Oranı değişim Grafiği



Şekil 6.15 Numune 2 için Gerilme-Boşluk Oranı değişim Grafiği



Şekil 6.16 Numune 3 için Gerilme-Boşluk Oranı değişim Grafiği

#### 6.1.4 Birim Hacim Ağırlık Tayini

Proje kapsamında bölüm laboratuvarlarımızda mevcut olan Helyum piknometresi kullanılmıştır.

Helyum piknometresi, Arşimet'in akışkan taşması prensibini ve Boyle kanunu'nu kullanarak hacim ve gerçek yoğunluğu bulmayı amaçlar. Ölçümlerin doğruluğunun

maksimum olması için taşan akışkan, en küçükleri dışındaki tüm gözeneklere girebilen bir tesirsiz gaz olmalıdır. Bu nedenle, ölçümler için küçük atomik boyutları 0.25 nm çapındaki girinti ve gözeneklere yaklaşan Helyum gazı uygun görülmektedir. Helyum'un ideal gaz olarak davranışları da tercih nedenidir. Başka gazlar kullanıldığında da (azot gibi), genellikle ölçülebilir bir fark meydana gelmemektedir. Helyum geçirgenliğine sahip yapılar için (düşük yoğunluklu polimerler ve bitki kökenli malzemeler gibi) azot veya SF<sub>6</sub> gazı kullanılması gereklidir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan piknometre deney düzeneği şekil 6.17 da verilmektedir. Numunelerin birim hacim sonuçları Tablo 6.3 te verilmektedir.



Şekil 6.17 Helyum Piknometresi Micromeritics Accupyc II ( Kişisel arşiv, 2017)

Tablo 6.3 Birim Hacim Ağırlık Deneyi sonuçları

	<b>Numune 1</b>	<b>Numune 2</b>	<b>Numune 3</b>
Birim Hacim Ağırlık	2,55	2,45	2,8



### **6.1.5 Kimyasal Analiz**

Proje kapsamında saha çalışmalarından alınan numunelerin kimyasal içeriklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli analizler yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları Tablo 6.4 te verilmektedir.

#### **6.1.5.1 Eritiş**

Halkalı değirmende -100 µm altına getirilerek kimyasal analize uygun hale getirilen yaklaşık 20-25 gram numune vezine konur ve 105 °C lik etüvde 2 saat bekletilir. Etüvden çıkarılan vezinler soğuması için desikatöre konur Platin kroze 1000 °C'lik fırında yaklaşık bir saat bekletilir ve soğuması için desikatöre konur.

Soğuyan platin kroze hassas teraziye konur darası alınır ve üzerine 0,2500 gr numune eklendikten sonra üzerine toplam ağırlığı 3,00 gr olacak şekilde Lityum Tetraborat eklenir, homojen olana kadar karıştırılır. 1000 °C derecelik fırında 2 saat bekletilir ve desikatörde soğutulur. Soğuyan krozelerin içeriği saf suyla temizlenen beherlere konur üzerine 10 ml HCl, 100 ml saf su eklenir 185 oC'de karıştırılarak (kroze içine konan balık yardımıyla) kaynatılır. Kaynatılan numune huniler yardımıyla balon jodelere aktarılır ve balon jopenin çizgisine gelecek şekilde saf su eklendikten sonra ağzı kapatılır. Ve cihazda okuma işlemine geçilir.

#### **6.1.5.2 Kızdırma Kaybı**

Halkalı değirmende -100 µm altına getirilerek kimyasal analize uygun hale getirilen yaklaşık 20-25 gram numune vezine konur ve 105 C<sup>0</sup> lik etüvde 2 saat bekletilir. Etüvden çıkarılan vezinler soğuması için desikatöre konur. Platin kroze tartılır ve üzerine 1 gr numune konur ve kroze 1000 C<sup>0</sup> lik fırında 2 saat bekletilir soğuması için desikatöre konur ve soğuduğunda tartımı alınır.

Tablo 6.4 Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Oksitler	(%)	(%)	%
SiO <sub>2</sub>	66,40	49,67	60,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,06	19,86	18,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,87	1,85	6,93
CaO	0,22	7,12	0,36
MgO	0,66	3,14	2,07
Na <sub>2</sub> O	0,41	0,09	1,25
K <sub>2</sub> O	2,50	1,50	3,80
MnO	<0,01	<0,01	0,02
TiO <sub>2</sub>	<0,01	<0,01	0,16
SO <sub>3</sub>	<0,01	<0,01	0,20
Kızdırma Kaybı	9,39	16,75	6,30

## 6.2 Kimyasal Katkı Uygulamaları Ve Sonuçları

Bu çalışma kapsamında zemin stabilizasyonu amacıyla kimyasal katkı olarak Potasyum Klorür (KCl) ve Mg(OH)<sub>2</sub> bileşikleri seçilmiştir. Bu kimyasal katkılar ile modifiye edilmiş zemin örnekleri ile Atterberg Limitleri uygulanmıştır.

### 6.2.1 Atterberg Limitleri

#### 6.2.1.1 Potasyum Klorür İle Zemin İyileştirilmesi

Saha çalışmaları kapsamında alınan 3 örneğe ağırlıkça %10 %15 %20 oranında Potasyum Klorür (KCl) karıştırıcı yardımıyla karıştırılmak suretiyle eklenmiştir. Modifiye edilmiş bu numuneler üzerinde Katkı maddesi eklenmiş numunelerin Atterberg Limitleri Tablo 6.5, 6.5 ve 6.7’de verilmektedir.

Tablo 6.5 KCl Katkısı Eklenmiş Numune 1 için Atterberg Limitleri

	Doğal Numune	Numune 1		
		Katkı Oranı		
		%10	%15	%20
Likit Limit	67	49	29	25
Plastik Limit	30	22	14	18
Plastisite İndeksi	37	27	15	7

Tablo 6.6 KCl Katkısı Eklenmiş Numune 2 için Atterberg Limitleri

	Doğal Numune	Numune 2		
		Katkı Oranı		
		%10	%15	%20
Likit Limit	54	31	26	24
Plastik Limit	19	22	20	19
Plastisite İndeksi	35	9	6	5

Tablo 6.7 KCl Katkısı Eklenmiş Numune 3 için Atterberg Limitleri

	Doğal Numune	Numune 3		
		Katkı Oranı		
		%10	%15	%20
Likit Limit	70	45	27	21
Plastik Limit	30	21	21	17
Plastisite İndeksi	40	24	6	4

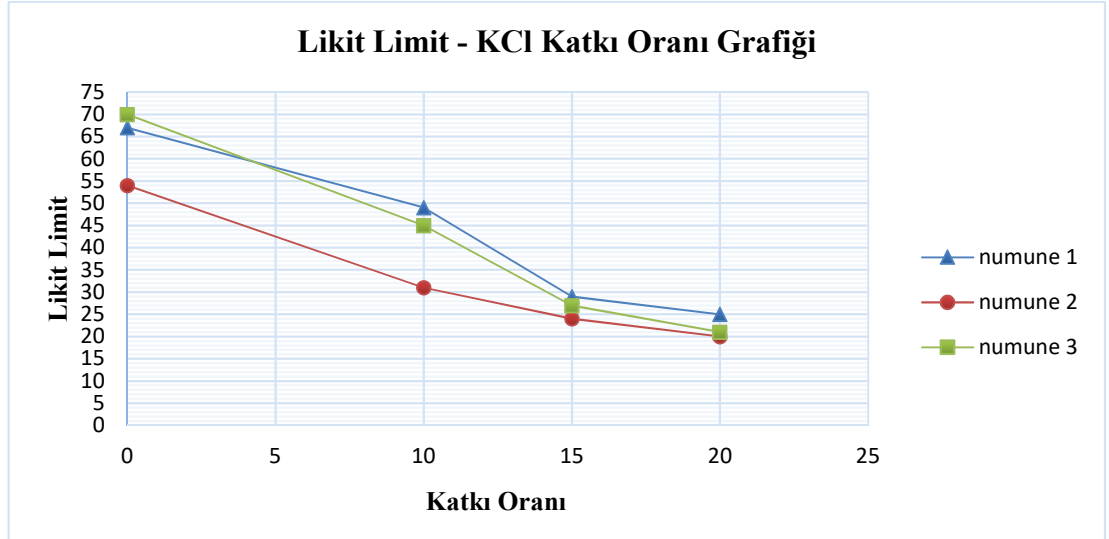
Tablo 6.5, 6.6 ve 6.7 de görüleceği üzere, ortamda bulunan Potasyum klorür oranı artıkça Likit limit değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Ağırlıkça %10 oranında KCl katkısı eklenmiş numunelerin Likit limitindeki azalma oranları sırasıyla; Numune 1 için %26, Numune 2 için %42 ve Numune 3 için %35 olmaktadır

Ağırlıkça %15 oranında KCl katkısı eklenmiş numunelerin Likit limitindeki azalma oranları sırasıyla; Numune 1 için %57, Numune 2 için %52 ve Numune 3 için %61.4 olmaktadır.

Ağırlıkça %20 oranında KCl katkısı eklenmiş numunelerin Likit limitindeki azalma oranları sırasıyla; Numune 1 için %63, Numune 2 için %55 ve Numune 3 için %70 olmaktadır.

Katkı maddeleri eklenmiş numunelerin likit limit ve katkı oranı grafikleri şekil 6.18 de verilmiştir.



Şekil 6.18. Likit Limit KCl katkı oranı Grafiği

### 6.2.1.2 Mg(OH)<sub>2</sub> İle Zemin İyileştirilmesi

Saha çalışmaları kapsamında alınan 3 örneğe ağırlıkça %10 %15 %20 oranında Magnezyum Hidroksit (Mg(OH)<sub>2</sub>) karıştırıcı yardımıyla karıştırılmak suretiyle eklenmiştir. Katkı maddeleri eklenmiş numunelerin Atterberg Limitleri Tablo 6.8 6.9 ve 6.10 de verilmektedir.

Tablo 6.8 (Mg(OH)<sub>2</sub> Katkısı Eklenmiş Numune 1 için Atterberg Limitleri

	Doğal Numune	Numune 1		
		Katkı Oranı		
		%10	%15	%20
Likit Limit	67	51	32	24
Plastik Limit	30	24	16	18
Plastisite İndeksi	37	27	16	6

Tablo 6.9 (Mg(OH)<sub>2</sub> Katkısı Eklenmiş Numune 2 için Atterberg Limitleri

	Doğal Numune	Numune 2		
		Katkı Oranı		
		%10	%15	%20
Likit Limit	54	34	25	24
Plastik Limit	19	21	17	20
Plastisite İndeksi	35	13	8	4

Tablo 6.10 (Mg(OH)<sub>2</sub> Katkısı Eklenmiş Numune 3 için Atterberg Limitleri

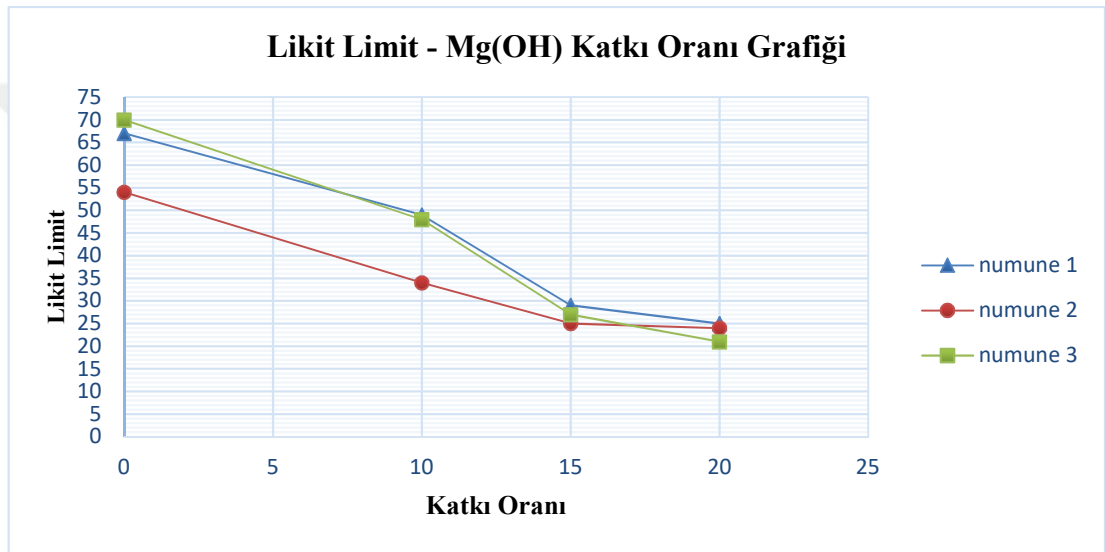
	Doğal Numune	Numune 3		
		Katkı Oranı		
		%10	%15	%20
Likit Limit	70	48	26	21
Plastik Limit	30	20	19	17
Plastisite İndeksi	40	28	7	4

Tablo 6.8 6.9 ve 6.10 de görülebileceği üzere ortamda bulunan Mg(OH)<sub>2</sub> oranı artıkça Likit limit değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Ağırlıkça %10 oranında Mg(OH)<sub>2</sub> katkısı eklenmiş numunelerin Likit limitindeki azalma oranları sırasıyla; Numune 1 için %24, Numune 2 için %37 ve Numune 3 için %35 olmaktadır.

Ağırlıkça %15 oranında  $Mg(OH)_2$  katkısı eklenmiş numunelerin Likit limitindeki azalma oranları sırasıyla; Numune 1 için %52, Numune 2 için %53 ve Numune 3 için %63 olmaktadır.

Ağırlıkça %20 oranında  $Mg(OH)_2$  katkısı eklenmiş numunelerin Likit limitindeki azalma oranları sırasıyla; Numune 1 için %64, Numune 2 için %55 ve Numune 3 için %70 olmaktadır.



Şekil 6.19 Likit Limit  $Mg(OH)_2$  katkı oranı Grafiği

Katkı maddesi eklenmiş numunelerin likit limit ve katkı oranı grafikleri şekil 6.19 de verilmiştir.

## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR

Bir madencilik veya tünelticilik operasyonuna başlarken killi zeminlerin şişme özelliklerinin çok iyi belirlenmesi zemin davranışının açıklanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Çalışma kapsamında, inorganik tuzlar ile stabilizasyon amacıyla Soma bölgesindeki 3 farklı ocaktan alınan kil örnekleri üzerinde ağırlıkça %10 %15 %20 KCl ve Mg(OH)<sub>2</sub> konsantrasyonları eklenmiş ve likit limit ve plastisite indeksi değerlerindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında alınan örneklerin kıvam limitleri; düşen koni ve plastik limit deneyleri yapılarak bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre doğal numunelerin sırasıyla likit limit değerleri %67, % 54, % 70 'dir.

Çalışmada kullanılan numuneler birleşik zemin sınıflama sisteminde CH sınıfına girmektedir. Kullanılan inorganik tuzlar CH sınıfına giren killerin Likit limit değerlerini ölçüde azaltmıştır.

Ağırlıkça %10 luk katkı maddesi eklendiğinde Numune 1 için likit limit değeri katkı maddesi KCl olduğu koşulda %24 Mg(OH)<sub>2</sub> olduğu koşulda ise %26 oranında azalmıştır.

Ağırlıkça %15 luk katkı maddesi eklendiğinde Numune 2 için likit limit değeri katkı maddesi KCl olduğu koşulda %52 Mg(OH)<sub>2</sub> olduğu koşulda ise %53 oranında azalmıştır.

Ağırlıkça %20 luk katkı maddesi eklendiğinde Numune 3 için likit limit değeri katkı maddesi KCl olduğu koşulda %70 Mg(OH)<sub>2</sub> olduğu koşulda ise %70 oranında azalmıştır.

Bu araştırmaya göre kil örneklerinde, Yüksek plastisiteli killi (CH) zeminlerin stabilizasyonunda inorganik tuzlar olan KCl ve Mg(OH)<sub>2</sub> kullanılması sonucunda likit limit değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak da plastisite indislerinin azaldığı görülmüştür.

Deneyler sonucunda katkı maddesi eklenmiş numunelerde plastisite indeksi değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Plastisite indeksi değerlerindeki bu azalma zeminin şişme potansiyelini kaybetmeye başladığının göstergesidir.

%20 KCl ve Mg(OH)<sub>2</sub> katkı uygulandığında bütün numuneler USCS Sınıflandırma sistemine göre düşük plastisiteli silt – ML olarak sınıflandırılmıştır.

Her 3 numune içinde ağırlıkça %20 oranının üzerinde uygulanan katkı miktarı likit limit değerlerinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.

Aynı koşullarda farklı cins katyonlarla yapılan deneylerde emilmiş katyonların artışı ile birlikte konsolidasyon oturma miktarlarında azalma meydana gelmektedir.

İnorganik tuzlarla stabilizasyon, homojen karıştırılmış numuneler açısından başarılı sonuçlar vermektedir. Fakat yeraltı madencilik ve tünelcilik operasyonları esnasında zeminlere çok daha büyük miktarlarda katkı uygulanması ve uygulamanın periyodik olarak yenilenmesi gerekmektedir. Bu durum madencilik operasyonlarındaki maliyete doğrudan yansıyacaktır. Potasyum klorürün ton başına fiyatı 300 ila 500 Euro arasında Magnezyum hidroksitin ton fiyatı 200 ila 500 Euro arasında değişmektedir. Buna karşılık zemin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılan kirecin ton fiyatı sadece 30 Euro civarındadır. Görüldüğü üzere, inorganik tuz stabilizasyonu ekonomik açıdan uygun değildir.

Ayrıca katkı maddesinin zemine homojen olarak yayılması da başlı başına bir sorun teşkil etmektedir. Çünkü inorganik tuzlar, ortamdaki suda iyonlarına ayrışarak katyon ve anyonlarına ayrışabilmektedir. Başka bir deyişle, hazırlanan karışımlar su yardımıyla çözelti haline getirilebilecek ve dispersiyonu bu sayede sağlanabilecektir.



Yer altı işletmelerinde çalışılırken ortamdaki suyun varlığı istenmeyen bir durumdur. Su yardımıyla inorganik tuzların taşınması özellikle katlı üretim yapan yeraltı işletmelerinde daha büyük düzensizliklere yol açacaktır.



## KAYNAKLAR

- Acosta, H.A., Edil, T.B. and Benson, C.H., (2003). Soil stabilization and drying using fly ash *Geo Engineering Report No. 03-03*, Madison, Wisconsin.
- Aften, C.W., Gabel, R.K., (1994). Clay stabilizer. *US Patent 5-342-530*.
- Akıncı, Ö. (2001) Seramik killeri ve jeolojisi, *IV.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye*.
- Aksoy, H. S., Yılmaz, M., Akarsu, E. E. (2007). Killi Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu, 2. *Geoteknik Sempozyumu*, 466-472.
- Alataş, T. (1996) *Afşin – Elbistan Termik Santrali uçucu külünün yol Stabilizasyonunda çeşitli malzemelerle birlikte kullanımı üzerine bir araştırma*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Alford, S. E., (1991). North Sea field application of an environmentally responsible water-base shale stabilizing system. *Proceedings, SPE/IADC Drilling Conf.* (Amsterdam, Netherland, 3/11–14/91), 341–355.
- Akawwi, E., ve Al-Kharabsheh, A. (2001). “Consolidation Coefficient and Swelling Potential for the Expansive Soils in Jordan”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering, (EJGE)*.
- Altmeyer, W. T., (1955). Discussion of-engineering properties of expansive clays.. *Journal of the Soil Mechanics, and Foundations Division. American Society of Testing and Materials, 81*, 17-1.9.
- Al-Rawas, A. A. (1998). The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of northern Oman. *Engineering Geology 53* (1999), 327–350.

- Ammann, L. (2003). *Cation exchange and adsorption on clays and clay minerals*. Submitted for the degree Doctor rerum naturalium of the faculty of mathematics and natural sciences Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.
- USDA, (1993). Soil survey manual, *USDA-SCS Agric. Handbook. 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC*.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2005). *National Soil Survey Handbook, VI 430*.
- ASTM D 4318 (2000). "Standart Test methods for liquid limit, plastik limit and plasticity index of soils", *Annual Book of ASTM Standarts 4 (1)*: 1-14.
- Aviles-Alcantara, C., Guzman, C.C., Rodriguez, M.A., (2000). Characterization and synthesis of synthetic drilling fluid shale stabilizer. *Proceedings SPE Int. Petrol. Conf. in Mex.*
- Beşparmak, Ö., (2010). *Atterberg limitlerinin tayininde casagrande, düşen koni ve ekstrüzyon yöntemlerinin karşılaştırılması*. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cai, J., Chenevert, M. E., Sharma, M. M. ve Friedheim, J. E. (2012). Decreasing water invasion into Atoka shale using nonmodified silica nanoparticles. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/146979-PA.
- Celestine, O. (2007). Okagbue Stabilization of clay using woodash *Journal of Materials in Civil Engineering 19 (1)*.
- Çetin, M. (2003). *Değişik çevresel koşullar altında, şişen zeminlerin özelliklerinin belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

- Chen, G., Yana, J., Lili, L., Zhang J., Gu, Z. ve Song, H., (2016). Preparation and performance of amine-tartaric salt as potential clay swelling inhibitor *Applied Clay Science* 138, 12–16.
- Chen, F.H. (1988). Foundation on expansive soils., *Developments in Geotechnical Eng.* American Elsevier Science Publication, New York.
- Cheshomi, A., Eshaghi, A. ve Hassanpour, J. (2016). Effect of lime and fly ash on swelling percentage and Atterberg limits of sulfate-bearing clay. *Applied Clay Science* ,135.
- Çokça, E. (1991). *Swelling potential of expansive soils with a critical appraisal of the identification of swelling of Ankara soils by methylene blue tests.* PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Coduto, D. P. (2001). *Foundation design-principles and practices.* (Second Edition), Prentice-Hall, New Jersey, USA. 655-694.
- Crawshaw, J. P., Way, P. W., Thiercelin, M., (2002). A method of stabilizing a wellbore wall. GB Patent 2-363-810, assigned to Sofitech NV.
- C. Ureña, J.M. Azañón, F. Corpas, F. Nieto, C. León, L. Pérez, (2013) Magnesium hydroxide, seawater and olive mill wastewater to reduce swelling potential and plasticity of bentonite soil. *Constr. Building Material* 45, 289–297.
- Dakshanamanthy, V. and Raman, V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and Foundations* 13 (1) 97-104.
- Das B. M. (1995). *Principles of foundation engineering.* PWS Publishing Company,, a division of International Thomson Publishing Inc. Boston, U.SA,

- Demiral, A. (2013). *Killerin elektrokinetik özellikleri ve flokülasyon*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Demir, S. ve Kılıç, M. (2010). Şişen zeminlerin tanımlanması ve zemin iyileştirme yöntemleri, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 99-104.
- Demiröz, A. (2009). Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, *Teknik-Online Dergi*, 8,(3).
- Foster, M. D., (1955). The relation between composition and swelling in clays *ReportSeries number: 54-91 U.S. Geological Survey*.
- Gangopadhyay, S. (2013). *Engineering geology*; Oxford University Press India.
- Grim, R. E., (1953). *Clay mineralogy*, McGraw Hill Book Co., New York.
- Grim, R. E. (1942). Modern concepts of clay minerals, *Jour. Geology*, 50 (3), 225-275.
- Grim, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. McGraw Hill Book Co. NewYork, 422.
- Gueddouda M.K , Goual I., Lamara M. (2011) Chemical stabilization of expansive clays from Algeria. *Global Journals Inc. 11 (5)*.
- Gücek, S., (2011). *Mermertozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Gündüz, Z. (2015). *Zeminlerin sıkışması, konsolidasyon ve oturmalar*. Sakarya Üniversitesi Zemin Mekaniği Ders Notları, Sakarya.

Hale, A.H., van Oort, E., (1997). Efficiency of ethoxylated/propoxylated polyols with other additives to remove water from shale. *US Patent 5-602-082*.

Harrison, R.M., (1999). *Understanding our environment - an introduction to environmental chemistry and pollution (3rd Edition)*, Royal Society of Chemistry.

Henry C. H. Darley, George Robert Gray, (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids* (6 th. edition ) Gulf Professional Publishing.

Himes, R.E., (1992). Method for clay stabilization with quaternary amines. US Patent 5-097-904, assigned to Halliburton Co.

Holtz, W. G. (1959). Expansive clays-properties and problems. *Journal of the Colorado School of Mines* 54 (4) 89-125.

Houlsby, G. T. (1982). Theoretical analysis of the fall cone test. *Geotechnique* 32, (2), 11-18.

Hughes, R. V. (1950). *The application of modern clay concepts to oil field development, in drilling and production practice*. American Petroleum Institute, New York, NY, 1951, 151–167.

Keskin, İ. (2010). *Kil mineralleri ve zemin yapısı*. Karabük Üniversitesi Zemin Mekaniği Ders Notları, Karabük.

Kurt, Z. N. (2009). *Yüzey aktif madde ile muamele edilmiş kilin mukavemet özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği , Erzurum

Lambe, T. W. (1960). *The Character and Identification of Expansive Soils* Massachusetts Institute of Technology.

- Malhotra V. M. & Ramezaniyanpour, A. A. (1994). *Fly ash in concrete*, published by Canadian centre for mineral and energy technology (CANMET).
- Marshall, C. E. (1949). *The colloid chemistry of silicate minerals*, Academic Press, New York.
- Megep (Meslekî Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi) (2006). *İnşaat Teknolojisi Zemin Deneyleri-II* Ankara.
- McKeen, R.-G. (1992). A model for predicting expansive soil behaviour. *Proceedings, 7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas, 1 1-6.
- Mollamahmutoglu, M. ve Taskiran, T. (2000). *Diyarbakır ili, Kayapınar – Yeniköy - Bağcılar yöresi kilinin şişme potansiyelinin irdelenmesi*, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği. Ankara.
- Mukherjee, S. (2013) Physical properties of clay and soil mechanics. *The Science of Clays* (54-68) Springer, Dordrech.
- Nayak, N. V. & Christensen, R. W., (1974). Swell characteristics of compacted expansive soils.. *Clay and Clay Minerals* 19, 251-261.
- Nelson, J.D & Miller J. D., (1992). *Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering*, (259). J. Willey and Sons, New York. 1997.
- Palalı, A. (2006). *Handere kilinde su içeriği değişimi ve kompaksiyon enerjisinin mukavemete olan etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Patel, A. D. & McLaurine, H. C., (1993). Drilling fluid additive and method for inhibiting hydration. *CA Patent 2-088-344*, assigned to MI Drilling Fluids Co.

- Patel, A. D., Stamatakis, E., Davis, E., Friedheim, J. (2007). High performance water based drilling fluids and method of use. US Patent 7-250-390, assigned to M-I L.L.C. (Houston, TX).
- Pettijohn, F. J. (1957). *Sedimentary rocks*. (second edition )Harper and B., New York.
- Li Q., Shi W., Yang R. (2016). Deformation mechanisms in a coal mine roadway in extremely swelling soft rock. *SpringerPlus*. 2016;5 (1)
- Raman, V.(1967). Identifications of expansive soils from the plasticity index and. the: shrinkage index data. *The Indian Engineer*, 11 (1). 17-22
- Ruhin, L. B. (1961). *Osnovy Litologii*, Published by YoYo Media 1961.
- Seed, .H. B, Woodward,, R, J., Jr., Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and. Foundations Division,, American Society of Civil Engineers*, 88, (SM3), 53-87.
- Smith, C. K., Balson, T. G., (2000). Shale-stabilizing additives. GB Patent 2-340-521, assigned to Sofitech NV and Dow Chemical Company.
- Snethen, D., R., (1984). Evaluation of expedient methods, for identification and classification of potentially expansive soils., *Proceedings, 5th International Conference on. Expansive Soils*, Adelaide, Australia, 22-26.
- Sowers, G. B., & Sowers, G. F., (1970). *Introductory soil mechanics and foundations* (3rd ed). Mcmillan, New York.
- Sridharan. A., Rao,, A., S. & Sivapuaiah, P.V. (1986). Swelling pressure- of clays., *Geotechnical Testing Journal, American. Society for Testing and. Materials*, 9 ( I), 24-33.



Sridharan A. & Gurtug Y., (2004). Swelling behaviour of compacted fine-grained soils, *Engineering Geology*, 9 –18.

Şensoy, T., Chenevert, M. E., Sharma, M. M., (2009). Minimizing water invasion in shales using nanoparticles. SPE-124429-MS *presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 4-7 October, New Orleans, Louisiana.

Taşçı, G. (2011). *Problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerine silis dumanı ve kireç katkısının etkisi.*, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Taşkın, N. (2011). *İzmir yöresine ait dört zemin örneğinin malzeme özellikleri ve katı atık alanlarında bariyer zemin olarak kullanılabilirliğinin araştırılması* Yüksek Lisans Tezi Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir.

Tokay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu, *TÇMB AR-GE Yayın 98 (3)* Ankara.

Tovey, N. K., (1971). *A selection of scanning electron micrographs of clays*, University of Cambridge, Department of Engineering.

Türk Standardı 1901-1, (2006). Likit limitin ve plastik limitin tayini, *TSE, Deney 2 (B)*, 14-24. Ankara.

Türköz, M. (2006). Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir-meşelik killere uygulanması *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi XIX, (2)*.

Türköz, M., Savaş, H., Acaz, A. ve Tosun, H. (2014). The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics” *Applied Clay Science, 101*, 1-9.

- Uzuner, B.A., (2005). *Temel Zemin Mekaniği*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Ünver, E. (2015). *Problemlili kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi*, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Van der Merwe, D. H. (1964). The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction of Soils. *Civil. Eng. South Africa*, 103-107.
- Vijayvergiya, V. N. ve Ghazzaly, O. L. (1973). Prediction, of swelling potential of natural clays., *Proceedings,, 3rd Int.. Research and Engineering, Conference on Expansive Clays,,* 227-234.
- Vural, P. (2012). *Şişme ve dispersif karakteristikteki kil zeminlerin mühendislik özelliklerine çimento ve zeolitin (doğal puzolan) etkisi*. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Eskişehir.
- Weaver, C. E., Pollard, L. D., (1973). *The Chemistry of Clay Minerals*, Elsevier Scientific Publ. Co., New York.
- Wentworth C. K. (1922). A scale of grade and class terms of clastic sediments. *J. Geol.* 30, 377 – 392.
- Weston, D. J. (1980). Expansive roadbed, treatment for Southern Africa. *Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils 1*, 339-360.
- Xeidakis, G., Koudoumakis, P., Tsirambides, A., (2004). “Road construction on swelling soils: the case of Strymi soils, Rhodope, Thrace, Northern Greece”, *Bulletin of Engineering*.

Yıldırım H. ve Acar C. (1994). *Killi zeminlerin şişme davranışına ön yüklemenin etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Yılmaz, I. ve Karacan, E. (1998). Zeminlerin Şişme Özellikleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, 52, 17-26.

