T.C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞİŞEN KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ KOLONU TEKNİĞİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ SIRASINDA İYON GÖÇÜ VE KOLON PERFORMANSININ ŞİŞEN KİL ORANINA BAĞLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Derya TOKSÖZ

(201392082010)

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Işık YILMAZ

SİVAS
KASIM 2017

Derya TOKSÖZ' ün hazırladığı "**ŞİŞEN KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ KOLONU TEKNİĞİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ SIRASINDA İYON GÖÇÜ VE KOLON PERFORMANSININ ŞİŞEN KİL ORANINA BAĞLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ "** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Işık YILMAZ** .....
Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ergun KARACAN**
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi .....

Prof. Dr. Hüseyin YALÇIN
Cumhuriyet Üniversitesi .....

Doç. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU
Akdeniz Üniversitesi .....

Yrd. Doç. Dr. İnan KESKİN
Karabük Üniversitesi .....

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İdris ZORLUTUNA
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-602 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Derya TOKSÖZ, 2017

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

27.11.2017

Derya TOKSÖZ

ÖZET

ŞİŞEN KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ KOLONU TEKNİĞİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ SIRASINDA İYON GÖÇÜ VE KOLON PERFORMANSININ ŞİŞEN KİL ORANINA BAĞLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Derya TOKSÖZ

Doktora Tezi

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Işık YILMAZ

2017, 128 sayfa

Şişen killi zeminlerin kireç kolonları ile iyileştirilmesinde temel amaç sönmüş veya sönmemiş kirecin zemin içerisine açılan deliklere doldurulduktan sonra kireç içerisindeki iyonların zamanla kolonu çevreleyen zemine göç etmesi ve kil mineralleri ile reaksiyona girerek zemini iyileştirmesidir. Kireç kolonu tekniği dünya çapında çeşitli ülkelerde başarılı bir biçimde uygulanmaktadır ancak kolonun iyileştirme mekanizması başlıca ulusal olmak üzere literatürde yeterince açıklanmış gözükmemektedir. Bu tez çalışmasının amaçlarından birisi de ulusal ve uluslararası literatürdeki eksiklikler de dikkate alınarak kireç kolonunun çalışma mekanizmasının anlaşılır bir şekilde ortaya konması olmuştur. Şişen killi zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi aşamasındaki en önemli süreç kireç içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesidir. Killi zeminlerde iyon göçünü etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar; zeminin nem içeriği, geçirimliliği, gözenekliliği, kil mineralojisi, zemin içerisindeki kayma düzlemleri, zeminin emme basıncı, kür zamanı ve kür sıcaklığı olarak sayılabilir. Bu tez çalışmasının asıl amacı ise şişen killi zeminlerde kireç kolon tekniği ile iyileştirme sırasında şişen kil oranına bağlı olarak iyon göçü mesafesi ve kolon performansının incelenmesi ve değerlendirilmesidir.

Arazi ölçeğinde zemin kütlesinin homojen ve izotrop olmayan yapısı değişik yöntemlerin karşılaştırılmasını, korelasyonunu olanaksız kılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada laboratuvar ölçeğinde model çalışması gerçekleştirilmiştir. Amaca yönelik olarak değişik oranlarda Na-bentonit içeren zemin örnekleri hazırlanmış olup her

zemin örneği için laboratuvar ölçekli modeller oluşturulmuştur. Hazırlanan zemin örneklerinin bentonit içeriği oranları %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olarak seçilmiştir. Kür süresi sonunda bütün zemin örneklerinde oluşan Ca^{+2} ve OH^{-} iyon göçü mesafeleri kimyasal analizlerle belirlenerek bentonit içeriği ve iyon göçü mesafesi arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. Ayrıca zemin örneklerinin şişme davranışlarındaki değişimler deneysel yöntemlerle belirlenerek bentonit içeriğinin kireç kolonunun iyileştirme yüzdesi ve iyileştirme mesafesi üzerine etkisi tanımlanmıştır. Son olarak laboratuvarda her zemin örneği için daha büyük ölçekli bir model oluşturularak örnek olay çalışması yapılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar kireç içerisindeki Ca^{+2} ve OH^{-} iyonlarının göç mesafelerinin zeminlerdeki bentonit içeriği arttıkça azaldığı ancak %60 bentonit içeriğinden sonra sabit bir seyir izlediği yönündedir. %0, %20, %40 bentonit içeren zemin örneklerinde Ca^{+2} iyonu OH^{-} iyonuna göre daha geniş mesafelere göç etmiş ancak %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde OH^{-} iyonu ile eşit mesafede göç etmiştir. Ayrıca en büyük iyon göçü mesafesi %0 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenirken en yüksek iyileştirme yüzdesi %100 bentonit içeren zemin örneğinde belirlenmiştir. Büyük ölçekli modellerde ise kolon çapının artması bütün zemin örneklerinde kolonun iyileştirme mesafesini arttırmıştır. Bu tez çalışmasında, şişen killi zeminlerin kireç kolon tekniği ile iyileştirilmesi sırasında şişen kil oranının iyon göçü mesafesi ve kolon performansı üzerinde önemli ölçüde ve değişik şekillerde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şişen kil, bentonit, kireç kolonu, kolon performansı, iyon göçü, modelleme.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE ION MIGRATION AND COLUMN PERFORMANCE DEPENDING ON THE SWELLING CLAY CONTENT DURING EXPANSIVE CLAYEY SOIL STABILIZATION BY LIME COLUMN TECHNIQUE

Derya TOKSÖZ

Doctor of Philosophy Thesis
Geological Engineering Department
Supervisor: Prof. Dr. Işık YILMAZ
2017, 128 pages

The main purpose of construction of lime columns in the soil is to improve the surrounding soil as a result of clay-lime reaction sourced from the migration of ions from the column to the surrounding soil after adding lime into holes opened inside the soils. Lime columns have been successfully used in practice in several countries worldwide however it seems that mainly in the national literature, their mechanism has not been adequately explained. One of the aims of this study is to clearly explain their mechanism by considering lacks of national and international literature. The most important process of stabilisation of swelling clays with lime colums is migration of ions from the columns to the surrounding soil. Some of the factors affecting ion migration in clay soils are water content, permeability, clay mineralogy, porosity, slip planes, suction pressure, curing time and curing temperature. The main purpose of this study is to investigate and evaluate the effects of swelling clay mineral content in the soil on migration of ions and column performance during stabilization of expansive clay soils by lime column technique.

Nonhomogenous and anisotroic nature of the soils make it imposible for comparison of different methods at land scale. Therefore, model studies were performed by creating the model of the land at laboratory scale. For the purpose of the study, soil samples which contain Na-bentonite in different percent amounts were prepeared

and laboratory scale models were built for each sample. Na-bentonite proportions of samples were chosen to be 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. At the end of the curing time, migration of Ca^{2+} and OH^- ions were determined by chemical analysis and the relations between bentonite proportion and migration distances of ions were revealed. Moreover, the changes on swelling behaviour of soil sapmles were also determined by using experimental methods, and the effects of bentonite proportion on stabilisation gain and stabilisation distance were then determined. Additionally, a case study was conducted to be a larger scale laboratory models for each sample.

The results of this study reveals that migration distances of Ca^{2+} and OH^- ions reduced with increasing bentonite content. But migration distances of ions followed a steady course after 60% of bentonite content. Ca^{2+} ion migrated to larger distances than OH^- ions in the soils with 0%, 20%, 40% of bentonite while migration distance of the ions in soils with 60%, 80% and 100% of bentonite were the same. Additionally, the highest stabilisition was detected in the soil with 100% of bentonite although the bisggest migration distance was detected in the soil with 0% of bentonite. Finally, stabilisation distance increased with increasing column diameter in the larger scale models. The results of this study shows that the effects of swelling clay proportion in the soil on ion migration and column performance while stabilizing of swelling soils with lime column technique are quite important.

Keywords: Swelling soil, bentonite, lime column, column performance, ion migration, modelling.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bana titizlikle ve sabırla destek sağlayan, bilgi, deneyim ve kaynaklarından yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Işık YILMAZ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamındaki laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan, çalışmam süresince fikir ve katkılarından yaralandığım Jeo. Yük. Müh. Mustafa YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim.

XRD anazlileri sırasındaki yardımlarından dolayı Prof. Dr. Hüseyin YALÇIN ve Kimya Yük. Müh. Fatma YALÇIN' a teşekkürlerimi sunarım.

Kimyasal analizler sırasında, bizzat tanışma fırsatım olmadığı halde telefon ve mail aracılığıyla sorduğum soruları kibarlıkla yanıtlayan Prof. Dr. Mehmet Turgut SAĞLAM' a teşekkürlerimi sunarım.

Yine kimyasal analizler sırasındaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç Dr. Evren GÖLGE' ye ve Tekniker Ersin BEKÇİOĞULLARI' na teşekkür ederim.

Yazım aşamalarında yaptığı önerilerinden, XRD analizlerindeki yardımlarından ve stresli olduğum dönemdeki desteklerinden dolayı Arş. Gör. Deniz HOZATLIOĞLU' na teşekkür ederim.

Ayrıca öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen AİLEME özellikle canım ANNEME sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT……..... iii
TEŞEKKÜR v
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xii

1.GİRİŞ 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR……..... 4
2.1. Şişen Zeminlerin Tanımlanmasına İlişkin Çalışmalar……..... 4
2.2. Şişen Zeminlerin Yol Açtığı Problemlere İlişkin Çalışmalar……..... 6
2.3. Şişen Zeminlerin İyileştirilmesine İlişkin Çalışmalar……..... 7
2.4. Şişen Zeminlerin Katkı Maddeleri ile İyileştirilmesine İlişkin Çalışmalar……..... 9
2.5. Şişen Zeminlerin Kireç ile İyileştirilmesine İlişkin Çalışmalar…..... 11
2.5.1. Zeminlerin kireç ile yüzeysel olarak iyileştirilmesine ilişkin çalışmalar……..... 11
2.5.2. Zeminlerin kireç kolonu kullanılarak iyileştirilmesine ilişkin çalışmalar……..... 14

3. KİL MİNERALLERİNİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ..... 22

4. KİL MİNERALLERİNİN SINIFLANDIRILMASI…… 25
4.1. İki Tabakalı Kil Mineralleri……..... 26
4.1.1. Kaolin-serpantin grubu……. 26
4.2. Üç Tabakalı Kil Mineralleri ……... 26
4.2.1. Profillit-talk grubu……... 26
4.2.2. Smektit grubu……... 26
4.2.3. Vermikülit grubu…….. 28
4.2.4. İllit-mika grubu ……..... 28
4.2.5. Klorit grubu…….. 28

5. ŞİŞEN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ……..……..... 29
5.1. Şişmenin Mekanizması……... 29
5.2. Zeminlerin Şişme Davranışına Etki Eden Faktörler……... 31
5.2.1 Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri……..... 31
5.2.2. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler…….. 32
5.2.3. Şişme potansiyelini etkileyen gerilme şartları…….. 35

6. ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANMASI….. 36
6.1. Şişen Zeminlerin Dolaylı Olarak Tanımlanması……..... 36
6.2. Şişen Zeminlerin Doğrudan Tanımlanması ……..... 41
6.2.1. Serbest şişme deneyi……..... 41
6.2.2. Şişme indeksi deneyi……..... 42
6.2.3. Genişleme indeksi deneyi……..... 43
6.2.4. Ödometre yöntemleri……..... 43
6.2.5. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)……..... 44
6.2.6. Potansiyel hacim değiştirme (PVC) deneyi…….. 44
6.2.7. Doğrudan genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi……... 45
7. ŞİŞEN ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ…….. 46
7.1. Temel Altındaki Şişen Zeminlerin Kaldırılması……..... 46
7.2. Kompaksiyon……... 47
7.3. Su İçeriğinin Korunması……..... 47
7.4. Ön Nemlendirme……..... 47
7.5. Temeller ve Döşemeler İnşa Edilmesi……..... 48
7.6. Şişen Zeminlerin Kimyasal Katkı Maddeleri ile İyileştirilmesi…….. 48
7.6.1. Şişen zeminlerin çimento ile iyileştirilmesi…….. 49
7.6.2. Şişen zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi……..... 49
7.6.3. Şişen zeminlerin tuz ile iyileştirilmesi……..... 50
7.6.4. Şişen zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi……..…. 50
7.6.4.1. Kireç elde edilmesi……... 50
7.6.4.2. Kirecin iyileştirme performansını etkileyen faktörler... 51
7.6.4.3. Zemin ve kireç arasında meydana gelen reaksiyonlar.. 52
7.6.4.4. Zeminlerin kireç ile iyileştirilmesinde kullanılan teknikler……..……... 54
7.6.4.4.1. Yüzeysel karıştırma tekniği……..... 54
7.6.4.4.2. Kireç harcı enjeksiyonu tekniği…….. 54
7.6.4.4.3. Kireç kolonu tekniği …….. 54
8. KİLLİ ZEMİNLERDE İYON GÖÇÜ MEKANİZMASI…….. 56
8.1. Killi Zeminlerde İyon Göçünü Etkileyen Faktörler……..... 57
8.1.1. Zeminin su içeriği……..... 57
8.1.2. Hidrolik gradyan……... 57
8.1.3. Geçirimlilik……..... 58
8.1.4. Gözeneklilik ve kayma düzlemleri……..... 58
8.1.5. Mineraloji……..……..... 58
8.1.5. Kür zamanı ve kür sıcaklığı……... 59
9. MATERYAL VE YÖNTEM…….. 61
9.1. Hazırlanan Zemin Örneklerinin ve Kullanılan Kirecin Özellikleri..... 62
9.1.1. Zemin örneklerinin mineralojik bileşimi……..... 63
9.1.2. Zemin örneklerinin sınıflama ve fiziksel özellikleri……..... 70
9.1.3. Zemin örneklerinin şişme potansiyelleri……..... 73
9.1.4. Zemin örneklerinin kalsiyum (Ca^{+2}) içerikleri…….. 76
9.1.4.1. EDTA titrasyonu yöntemi ile kalsiyum (Ca^{+2}) tayini..... 77
9.1.5. Zemin örneklerinin hidrolik iletkenlikleri……..... 82
9.1.6 Kullanılan kirecin özellikleri……..... 84
9.2. Laboratuvar Modellerinin Oluşturulması……..... 85
9.2.1. Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modeller..... 86
9.2.2. OH^{-} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modeller……..... 87

9.2.3. Örnek olay çalışması……..... 88

10. BULGULAR……..... 90

10.1. Zeminlerdeki Şişen Kil Oranının Ca^{+2} İyon Göçü Mesafesi Üzerine Etkisi……..... 90

10.2. Zemin Örneklerinin Şişme Davranışlarındaki Değişim……..... 98

10.3. Zeminlerdeki Şişen Kil Oranının OH^{-} İyon Göçü Mesafesi Üzerine Etkisi……..... 103

10.4. Büyük Ölçekli Modellerde Gözlenen Kolon Performansları…..... 106

11. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR…..……..... 112

KAYNAKLAR ….……..……...……...… 119

ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 (a) Tetrahedral birim; **(b)** Silika katmanı (Grim, 1968)..……..... 22

Şekil 3.2 (a) Oktahedral birim; **(b)** Alümina katmanı (Grim, 1968)…..... 23

Şekil 3.3 (a) İki katmanlı (TO, 1:1) ; **(b)** Üç katmanlı (TOT, 2:1) kil mineralleri……..... 23

Şekil 3.4 Kil minerallerinde, tabakalar arasına su moleküllerinin girişi ile mineralin tabakalı yapısı arasındaki ilişki (Yalçın, 2010)…….. 24

Şekil 4.1 (a) Kaolinitin ; **(b)** Montmorillonitin atomik yapısı …….. 27

Şekil 5.1 (a) Parçacıklar arasında görülen şişme mekanizması ; **(b)** Kristal içerisinde görülen şişme mekanizması (Popescu,1986)……..... 30

Şekil 5.2 (a) Foliküle yapı; **(b)** dispersif yapı (Lambe and Withman, 1969)……..... 32

Şekil 5.3 Aktif zon derinliğinin yaklaşık olarak tayini (Das, 1999)…….. 34

Şekil 6.1 Şişen zeminlerin çeşitli parametrelere bağlı olarak tanımlanması... 39

Şekil 6.2 Şişen zeminlerin KDK ve likit limite bağlı olarak tanımlanması (Yılmaz, 2006)……..... 40

Şekil 9.1 Tez çalışması kapsamında uygulanan iş akış şeması…….. 62

Şekil 9.2 %0 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları; **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim……..... 64

Şekil 9.3 %20 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları; **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim……..... 65

Şekil 9.4 %40 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları; **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim……..... 66

Şekil 9.5 %60 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları; **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim……..... 67

Şekil 9.6 %80 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç;**(b)** Kil çekim…….. 68

Şekil 9.7 %100 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim……..... 72

Şekil 9.8 Zemin örneklerinin şişme abağı üzerindeki dağılımı……..... 72

Şekil 9.9 Hazırlanan zemin örneklerine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerlerini gösteren kompaksiyon eğrileri……..... 73

Şekil 9.10 Şişme indeksi deneyinde 24 saat sonra zemin örneklerinin hacmi……..……..... 74

Şekil 9.11 Serbest şişme deneyi için oluşturulan deney düzeneğinde kullanılan malzemeler……..... 75

Şekil 9.12 Serbest şişme deneyi için oluşturulan deney düzeneği: **(a)** Yandan görünüm; **(b)** Üstten görünüm……..…. 76

Şekil 9.13 EDTA' nın molekül formülü.,……..……..……..… 77

Şekil 9.14 Zemin ve amonyum asetatı çalkalama işleminde kullanılan makine: **(a)** Yandan görünüm; **(b)** Üstten görünüm…….... 79

Şekil 9.15 Zemin ekstraktının süzülmesi işlemi……..... 79

Şekil 9.16 (a) Sodyum hidroksit ilave edilmesi işlemi; **(b)** pH' ın 13' e yükseltilmesi……..……..... 80
Şekil 9.17 (a) Kullanılan müreksidden bir görünüm; **(b)** Müreksid ilave edildikten sonra çözeltinin rengi……..... 80
Şekil 9.18 Titrasyon işlemi……..…….. 81
Şekil 9.19 (a) Başlangıçta; (**b)** Eşdeğerlik noktasını aşınca……... 81
Şekil 9.20 Kullanılan kirece ait karakteristik XRD difraktogramı……..... 84
Şekil 9.21 Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan bir laboratuvar modelinin kesiti……... 87
Sekil 9.22 Fenoftaleinin molekül formülü……..… 87
Şekil 9.23 OH^{-} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan bir laboratuvar modelinin kesiti……... 88
Şekil 9.24 Örnek olay çalışması kapsamında oluşturulan büyük ölçekli laboratuvar modelleri……..... 89
Şekil 9.25 Örnek olay çalışması kapsamında oluşturulan büyük ölçekli laboratuvar modelinin tipik bir kesiti……..… 89
Şekil 10.1 Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modellerden numune alım düzeni……..... 90
Şekil 10.2 % 0 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi…….…..... 91
Şekil 10.3 % 0 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi…….…..... 92
Şekil 10.4 % 20 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi……..…….. 92
Şekil 10.5 % 20 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi……..... 93
Şekil 10.6 % 40 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi…….. 93
Şekil 10.7 % 40 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi…….. 94
Şekil 10.8 % 60 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi…….. 95
Şekil 10.9 % 60 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi…….. 95
Şekil 10.10 % 80 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi…… 96
Şekil 10.11 % 80 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi..…….. 96
Şekil 10.12 % 100 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi…….. 97
Şekil 10.13 % 100 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi..……..... 97
Şekil 10.14 Zeminlerdeki bentonit oranı ve Ca^{+2} iyon göçü mesafesi arasındaki ilişki……..... 98
Şekil 10.15 Zemin örneklerinin şişme indekslerinin kolondan itibaren olan değişimi…….……..... 99
Şekil 10.16 Zeminlerdeki bentonit oranı ve şişme indeksi azalım mesafesi arasındaki ilişki……..…. 100

Şekil 10.17 Şişme indeksi azalım değerlerinin kolondan itibaren olan değişimi……..... 102
Şekil 10.18 Zeminlerdeki bentonit oranı ve şişme indeksi azalım değeri arasındaki ilişki……..……..... 103
Şekil 10.19 OH^- iyon göçü mesafesini saptamak için oluşturulan laboratuvar modellerinde kür süresi sonunda gözlenen renk değişimleri..... 104
Şekil 10.20 OH^- iyon göçü mesafesini saptamak için oluşturulan laboratuvar modellerinde gözlenen renk değişimlerini gösteren kesit..... 105
Şekil 10.21 %100 bentonit içeren zemin örneğinde oluşan renkli zonun derinlikle olan değişimi……..... 105
Şekil 10.22 Zeminlerdeki bentonit oranı ve OH^- iyon göçü mesafesi arasındaki ilişki……..…..... 106
Şekil 10. 23 Büyük ölçekli modellerde numune alım düzeni……..… 107
Şekil 10.24 Büyük ölçekli modellerde serbest şişme yüzdelerinin kolondan itibaren olan değişimi……..... 108
Şekil 10.25 Serbest şişme deneyinde zeminlerdeki bentonit oranı ve iyileşme mesafesi arasındaki ilişki…….…..….. 109
Şekil 10.26 Serbest şişme azalım yüzdelerinin kolondan itibaren olan değişimi……..……....… 110
Şekil 10.27 Zeminlerdeki bentonit oranı ve serbest şişme azalım yüzdesi arasındaki ilişki……..……..….. 111
Şekil 11.1 Şişme azalım indeksi değerinin bentonit içeriği ve kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi……....…. 116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Kil minerallerinin tabaka tipine ve tabaka yüküne göre sınıflandırılması (Grim, 1968)……..... 25

Çizelge 6.1 Çeşitli kil minerallerine göre şişme potansiyelinin sınıflanması (Mitchell, 1976)……..... 37

Çizelge 6.2 Plastisite indeksine bağlı olarak yapılan şişen zemin sınıflaması (Chen,1988)……..… 37

Çizelge 6.3 Şişme davranışının indeks özelliklere bağlı olarak tanımlanması (Holtz ve Gibbs, 1956)……..... 38

Çizelge 6.4 Bazı kil minerallerinin KDK değerleri (Grim, 1968)…….. 40

Çizelge 6.5 Zeminlerin şişme davranışının modifiye serbest şişme indeksine bağlı olarak tanımlanması (Sivapullaiah vd., 1987)……..…. 42

Çizelge 6.6. Zeminlerin şişme davranışının PVC deney sonuçlarına göre tanımlanması (Anonymous, 1993)……...….. 45

Çizelge 6.7 Şişen zeminlerin COLE değeri kullanılarak tanımlanması (USDA, 2005)……...….. 45

Çizelge 9.1 Hazırlanan zemin örneklerine ait sınıflama özellikleri……..... 71

Çizelge 9.2 Hazırlanan zemin örneklerinin özgül ağırlık değerleri……..... 71

Çizelge 9.3 Hazırlanan zemin örneklerinin aktivite katsayıları…… 71

Çizelge 9.4 Hazırlanan zemin örneklerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri…….. 72

Çizelge 9.5 Hazırlanan zemin örneklerinin şişme indeksleri……..….... 74

Çizelge 9.6 Hazırlanan zemin örneklerinin şişme potansiyelleri……...…. 76

Çizelge 9.7 Hazırlanan zemin örneklerinin Ca^{+2} içerikleri……..….... 82

Çizelge 9.8 Hazırlanan zemin örneklerinin geçirimlilik katsayıları……..... 84

Çizelge 10.1 Kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin Ca^{+2} iyon içerikleri……..... 91

Çizelge 10.2 Kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin şişme indeksleri…….. 99

Çizelge 10.3 Kolondan itibaren gözlenen şişme indeksi azalım değerleri..... 101

Çizelge 10.4 Büyük ölçekli modellerde kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin serbest şişme yüzdeleri……..... 107

Çizelge 10.15 Kolondan itibaren gözlenen serbest şişme azalım yüzdeleri... 109

1.GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan beri barınma ve savunma gibi ihtiyaçları için gerekli olan yapıları zemin üzerinde inşa etmekte veya zemini çeşitli toprak yapıların (toprak dolgu barajı, yol temeli gibi) oluşturulmasında kullanmaktadır. İnşa edilecek yapıların güvenli ve ekonomik olabilmesi için kullanılacak zeminin özeliklerinin jeolojik ve jeoteknik yönden incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bazı zemin koşulları sorunlu olup, tasarımdan önce ek iyileştirmeler istemektedir. Özellikle killi zeminler karmaşık bir yapıya sahip olup, jeoteknik mühendisleri için genellikle problem oluşturmaktadırlar. Bu durum killerin plastisitesi, boşluk suyu basıncına sebep olan düşük geçirimliliği, su içeriğine bağlı hacim değiştirme özelliği, kimyası ve mineralojisinden kaynaklanmaktadır (Rogers ve Glendinning, 1997). Killi zeminlerde uygulamada karşılaşılan en yaygın sorunlardan biri şişme problemidir.

Şişen zeminler bünyelerine su aldıklarında şişen ve kuruduklarında büzülen zeminler olarak tanımlanır. Bu zeminlerin, örneğin sadece Amerika'da binalara, hava alanlarına ve diğer tesislere verdiği zarar yılda yaklaşık 9 milyar dolardır. Bu miktar taşkınların, kasırgaların, depremlerin ve hortumların sebep olduğu hasarın yaklaşık iki katıdır (Jones ve Holtz, 1973; Jones ve Jones, 1987). Şişen zeminlerde zemin hareketlerinin çok yavaş olmasından dolayı hasar uzun süre içinde oluşmaktadır, dolayısıyla sonuçlar depremler ve kasırgalardaki kadar acıklı olmaz ve yalnızca hasara sebep olurlar. Bununla beraber ekonomik kayıp fazla olup, bu kayıpların önemli bir kısmından sorunun tasarım ve inşaat çalışmalarında tespit edilmesi ve uygun önlemlerin alınmasıyla kaçınılabilmektedir (Yılmaz, 2007).

Zemin şişmelerinin neden olduğu hasarlar özellikle hafif yapılar (tek katlı binalar), park alanları, yollar ve tretuvarlar, havaalanları, altyapı tesisleri, sulama kanalları, bahçe duvarları ve tüneller gibi yapılarda daha fazla oluşmaktadır. Zemin yüzeyinde oluşacak kabarma ve büzülmenin miktarı çoğunlukla bir yapının altındaki alan içerisinde dahi farklılıklar gösterebilir. Bunun sonucu olarak, temel sisteminin farklı noktalarında değişik miktarlarda hareketler oluşabilir.

Çeşitli nedenlerle bir zemini sorunlu olarak değerlendiren mühendis bu problemi çözebilmek için aşağıdaki 3 yöntemden birini seçmektedir.

1. Sorunlu zemini özellikleri daha iyi olan zeminle değiştirmek; bunun için sorunlu zemin ortamdan kazılarak uzaklaştırılır, yerine özellikleri daha iyi olan zemin uygun bir teknikle yerleştirilir. Bu yöntem hacim büyüdükçe oldukça maliyetli olmaktadır.
2. Yapı elemanlarının boyutlarını zeminin özelliklerine uygun olarak seçmek veya sorunlu zemini aşarak yapıyı alttaki sağlam tabakaya taşıtmak. Bu yöntem de bazen ekonomik değildir.
3. Zemin özelliklerini istenilen yönde değiştirmek; insanlar bu yöntemi yüzyıllardır kullanmışlar, zemine çeşitli maddeler ekleyerek, zemini ısıtarak, dondurarak, kurutarak, sıkıştırarak zemini iyileştirmeye çalışmışlardır (Tüdeş, 1996).

Birinci yol oldukça pahalı olup çok az uygulama görmüştür. İkinci yolun uygulanmasıyla ilgili örnekler olmakla birlikte bu yöntem de bazen ekonomiklikten uzaktır. Bu teknikler içinde en çok başvurulan yöntem zeminin yerinde yapılan işlemlerle sağlamlaştırılmasıdır (Tüdeş, 1996).

Zemin iyileştirmesi jeoteknik çalışmalarda kullanılan en eski yöntem olmasına rağmen ilgi çekmeye devam etmekte ve sürekli gelişim göstermektedir. Zamanımızdan yaklaşık beş bin yıl önce Babil Tapınağının inşasında zemin iyileştirme tekniğinin kullanıldığı bilinmektedir. Yaklaşık aynı dönemlerde Çinlilerin odun, bambu ve saman çöpü kullanarak zemin iyileştirdikleri düşünülmektedir (Van Impe, 1989).

Zemin iyileştirmesi zeminlerin istenmeyen özelliklerinin yapılması planlanan bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılarak istenilen yönde değiştirilmesi olarak tanımlanabilir. Şişen zeminler için çeşitli iyileştirme yöntemleri olmasına karşın bunlar arasında en sık başvurulanı kimyasal katkı maddeleri ile yapılan iyileştirmedir. Kimyasal iyileştirmede amaç zemini çeşitli katkı maddeleri ile karıştırarak özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesidir. Kimyasal iyileştirmenin uygulandığı projelerde en yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri başta kireç olmak üzere uçucu kül, çimento ve bitümlü malzemelerdir (Van Impe, 1989).

Katkı maddeleri ile iyileştirilmiş bir zemin elde etmek için en sık kullanılan iki yöntem vardır; zemin içerisinde kolonlar oluşturulur veya katkı maddesi arazideki zemin ile

karıştırılır. Katkı maddesi ile zeminin karıştırılması yöntemi fazla derinlere inilmeden yüzeysel olarak uygulanmakta olup, bu yöntemde zemin kazılarak çıkartılır, belirli oranlarda katkı maddesi ile uygun su içeriğinde karıştırılır ve tekrar yerine serilerek sıkıştırılır. Kolon tekniğinde ise zemin içerisinde yaklaşık 0.5 m çapında, 10 m derinliklerde delikler açılır ve gerekli katkı maddesi zeminle karıştırılmaksızın deliklere doldurulur (Abiodun ve Nalbantoğlu, 2015). Kolon tekniğinin iyileştirme mekanizması katkı maddesinin kolonu çevreleyen zemine zamanla difüzyonu sonucu kil ile katkı maddesi arasında oluşan fizikokimyasal reaksiyonlara dayanır. Bu reaksiyonlar katkı maddesinin içerdiği pozitif iki değerlikli iyonlar ve negatif olarak yüklü kil mineralleri arasında meydana gelir ve iyileştirme mekanizmasının temelini oluşturur. Katkı maddesinin içerdiği iyonların kolonu çevreleyen zemine olan göçü bu reaksiyonların ve dolayısıyla iyileşmenin oluşabilmesi için en önemli süreçtir. İyonların zemin içerisine göç etmesini etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar; zeminin nem içeriği, geçirimliliği, gözenekliliği, kil mineralojisi, zemin içerisindeki kayma düzlemleri ve zeminin emmesi olarak sayılabilir (Rogers ve Glendinning, 1994).

Bu tez çalışmasının amacı şişen killi zeminlerde kolon tekniği ile iyileştirme sırasında şişen kil oranına bağlı olarak iyon göçü mesafesi ve kolon performansının incelenmesi ve değerlendirilmesidir. Uluslararası literatürde şişen killerin iyileştirilmesi bakımından yaygın olarak kullanılan ve performansı konusunda hemen hemen görüş birliği oluşmuş olan kireç bu çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Arazi ölçeğinde zeminin homojen ve izotrop olmayan yapısı değişik yöntemlerin karşılaştırılmasını, korelasyonunu olanaksız kılmaktadır. Bu nedenle laboratuvar ölçeğinde ortamın modeli oluşturularak model çalışması gerçekleştirilmiştir.

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışmanın amacı doğrultusunda geniş bir literatür taraması yapılarak konu ile ilgili ulusal ve uluslararası çalışmalar derlenmiştir. Bu bölüm kapsamında öncelikle şişen zeminlerin tanımlanması ve yol açtığı problemler ile ilgili çalışmalara değinilmiştir. Ardından bu problemleri en aza indirgemek için kullanılan tekniklere ilişkin çalışmalar sunulmuştur. Bu kısımda özellikle katkı maddeleri ile yapılan iyileştirme çalışmalarına ağırlık verilmiştir. Son olarak kireç kolonu tekniği ile ilgili çalışmalar geniş bir biçimde sunulmaya çalışılmıştır.

2.1. Şişen Zeminlerin Tanımlanmasına İlişkin Çalışmalar

Holtz ve Gibbs (1956), Altmeyer (1956), Williams (1957), Ranganatham ve Satyanarayana (1965), şişen zeminleri tanımlamak için likit limit, plastisite indeksi, büzülme limiti, serbest şişme indeksi ve kolloid içeriği değerlerini kullanan çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemlere göre şişen zeminler düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şişebilen zeminler olarak sınıflandırılmıştır.

Hanafy, (1991); Fredlund ve Rahardjo, (1993); Marinho ve Stuermer, (2000); Ferber vd. (2009), zeminlerin şişme davranışını etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Araştırmacılara göre, şişme davranışını etkileyen ilk faktör zemindeki kil partiküllerinin miktarı ve zeminde suyun bulunmasıdır. Şişme davranışını etkileyen diğer faktörler, zeminin türü, zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve nem içeriği, sürşarj basıncının büyüklüğü ve şişmeyen kısmın miktarıdır. Genel olarak, şişme potansiyeli kuru yoğunluğun artması ve su içeriğinin azalmasıyla artar.

Yılmaz ve Karacan (1998), yapmış oldukları derlemede şişen zeminlerin özelliklerini genel hatlarıyla açıklamış olup, killi zeminlerin şişme özelliklerinin iyi bir şekilde belirlenmesinin zemin davranışının açıklanması açısından büyük önem taşıdığını belirtmişlerdir.

Xu vd. (2003), bentonit ve bentonit-kum karışımlarının şişme özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, bentonit ve karışımlarının şişme basınçlarının kuru yoğunluğa, su içeriğindeki artışa ve boşluklarda bulunan bentonit partiküllerinin fraktal yüzeyine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bentonit tarafından absorbe edilen suyun hacminin bentonitin fraktal yüzey boyutu ile ilgili olduğu vurgulanmıştır.

Çalışma sonucunda fraktal dokulu yüzeye sahip bentonit için düşey basınç ve su hacmi arasında bir ilişki elde edilmiştir. Bu ilişki kullanılarak maksimum şişme gerilmesi tahmin edilmiş ve bu tahminler deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca, şişme gerilmesi ve geçen süre arasında iyi bir ilişki gözlenmiştir.

Komine (2004), değişik türdeki bentonitlerin şişme özelliklerini incelemiştir. Bu amaçla 4 farklı bentonit üzerinde şişme basıncı ve şişme deformasyonu deneyleri yapmıştır. Çalışmada kullanılan bentonit türleri sırasıyla; %48, %69, %76 Na-montmorillonit ve %80 Ca-montmorillonit içermektedir. Çalışma sonucunda bentonitin maksimum şişme basıncının bentonitin içerdiği değişebilir katyonların türünden çok montmorillonit miktarından etkilendiği, bentonitin şişme gerilmesinin ise bentonitin içerdiği montmorillonit miktarından ziyade değişebilir katyonların türüne bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yılmaz (2006), zeminlerin likit limit ve katyon değişim kapasitesi değerlerini kullanarak şişme yüzdesini dolaylı olarak tahmin eden istatistiksel bir model geliştirmiştir. Araştırmacı ayrıca şişen zeminler için yeni bir sınıflama abağı geliştirmiş olup bu sınıflamanın mühendislere şişen zeminleri değerlendirmede yardımcı olacağını vurgulamıştır.

Genç (2009), bentonit ve kaolini belirli oranlarda karıştırarak, bu karışımların şişme özelliklerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda hazırlanan karışımların bentonit oranı arttıkça şişme yüzdelerinin de arttığı gözlenmiştir. Ayrıca yazar şişme yüzdesinin su içeriğindeki artma ile azalmakta olduğu sonucuna varmıştır.

Sun vd. (2009), sıkıştırılmış kum-bentonit karışımlarının şişme özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar montmorillonitin birim hacmi tarafından absorbe edilen maksimum su hacminin sabit olduğu görüşünden yola çıkarak, kum-bentonit karışımlarında meydana gelen şişme deformasyonlarını montmorillonitin boşluk oranını kullanarak tanımlamışlardır. Çalışma sonucunda tam bir şişmenin meydana geldiği durumda montmorillonitin boşluk oranıyla düşey basınç arasındaki ilişkinin başlangıç kompaksiyon koşulundan ve kum-bentonit karışım oranından bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca düşey basıncın yeteri kadar büyük ve karışımdaki bentonit içeriğinin küçük olduğu durumda, grafiklerin doğrusallıktan saptığı gözlenmiştir.

Demir ve Kılıç (2010), yapmış oldukları derlemede şişen zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılmasını genel hatlarıyla açıklamış olup, şişme problemlerinin çoğunlukla montmorillonit kil minerali içeren zeminlerde görülmekte olduğunu belirtmişlerdir.

Tiwari ve Ajmera (2011), ana kil minerallerinin ve karışımlarının şişme davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla laboratuvarda montmorillonit, kaolinit, illit ve kuvars karışımlarından oluşan 55 farklı zemin örneği hazırlamışlardır. Sonuçlar şişme indeksinin başlangıç boşluk oranı, likit limit ve plastisite indeksi ile iyi ilişkiler sergilediğini göstermiştir. Ayrıca likit limit değerini kullanarak şişme indeksini tahmin eden bir eşitlik geliştirmişlerdir.

Bozkurtoğlu vd. (2015), killi zeminlerin şişme davranışını likit limit ve doğal su içeriğine bağlı olarak incelemişlerdir. Zeminlerin likit limit ve doğal su içeriği değerlerinden hareketle olası şişme yüzdesinin tahminine yönelik bir denklem belirlemişlerdir.

Forouzan (2016), farklı oranlarda kaolinit ve bentoniti karıştırarak elde ettiği zemin örnekleri üzerinde modifiye serbest şişme indeksi, şişme basıncı ve metilen mavisi deneyleri yaparak örneklerin şişme davranışları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Araştırmacı ayrıca zeminlerin şişme davranışını tahmin eden bir model geliştirmiştir.

2.2. Şişen Zeminlerin Yol Açtığı Problemlere İlişkin Çalışmalar

Pek çok araştırmacı, hafif yapılardaki temel yenilmelerinin başlıca sebebinin killi zeminlerin şişme-büzülme davranışının olduğunu belirtmişlerdir.

Rogers vd. (1994), şişen zeminlerin temeller üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar şişen zeminlerin nem artışıyla birlikte hafif yüklü şerit temelleri yukarı doğru kaldırdığını, çatlattığını ve çoğunlukla taban plakasında tehlike oluşturduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca temelin her yerinde uniform bir hareketin olmayacağını ve bunun da binanın iskeletine zarar vereceğini belirtmişlerdir.

Aynı araştırmacılar şişen zeminlerin en önemli karakteristiğinin belirgin hacim değiştirme potansiyelleri olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, yağışlı mevsimler süresince, şişen zeminlerin neden olduğu yukarı kaldırma basıncının 250 kPa' dan büyük olabileceğini ve bu değerin hafif yapılara kolaylıkla zarar verebileceğini vurgulamışlardır.

Chen (1998), çalışmasında özellikle yol kaplamalarının şişen zeminlere karşı hassas olduğunu ve şişen zeminlerden kaynaklanan tüm masrafın yaklaşık yarısının yol kaplamalarıyla ilgili olduğunu vurgulamıştır.

Wray ve Meyer (2004), ABD'de şişen zeminlerin neden olduğu hasarın giderilmesi için gereken yıllık ekonomik masrafın 15 milyar dolardan fazla olduğunu rapor etmişlerdir.

Phanikumar (2009), çalışmasında şişen zeminlerin yol açtığı problemleri ve bu problemlerin çözümünü araştırmıştır. Araştırmacı, zeminlerdeki şişme ve büzülme olayının hafif yüklü temellerde, istinat duvarlarında, kaldırımlarda, yol kaplamalarında, hava alanlarında, kanal yataklarında ve kaplamalarında önemli hasarlara yol açtığını vurgulamıştır.

Türköz (2009), şişen zeminler üzerine inşa edilen sığ temellerde zeminin aşağı ve yukarı doğru hareketi sonucu yorgunluğa ve çatlamaya sebep olduğunu rapor etmiştir.

Jones ve Jefferson (2012), zeminin şişmesinin yapıların kabarmasına ve yükselmesine neden olurken zemin büzülmesinin farklı oturmalara sebep olduğunu ve hacim değişiklikleri sonucu ortaya çıkan bozulmaların temelin altında eşit olmayan bir biçimde dağıldığını belirtmişlerdir.

Aynı araştırmacılar, yol kaplamalarında şişen zeminlerden kaynaklanan hasarların 4 farklı şekilde gözlendiğini rapor etmişlerdir. Bunlar; büyük uzunluklar boyunca uzanan belirgin pürüzlükler veya engebeler, uzunlamasına oluşan çatlamalar, lokal deformasyonlardan kaynaklanan yanal çatlamalar ve yüzeyin ayrışmasıyla oluşan yenilmelerdir.

2.3. Şişen Zeminlerin İyileştirilmesine İlişkin Çalışmalar

Şişen zeminlerin ıslahı için kullanılan farklı yöntemler Chen (1988), Nelson ve Miller (1992) tarafından detaylı bir biçimde açıklanmıştır. Ayrıca Petry ve Little (2002), son 60 yıldaki iyileştirme tekniklerini detaylı bir şekilde araştırmıştır.

Rogers vd. (1994), şişen zeminlerden kaynaklanan zararlardan kaçınmak için uygulanacak en iyi yolun, bina temellerinin su içeriği dalgalanma zonunun altına kadar uzatılması olduğunu belirtmiştir. Bunun iki nedeni olduğunu; bunlardan ilkinin kuruma zonunun altında etkili yüzey sürtünmesini sağlamak, ikincisinin ise yüzeydeki

zeminin ıslanmaya ve şişmeye başladığında yukarı doğru olan hareketine karşı koymak olduğunu vurgulamıştır.

Phanikumar (2009), çalışmasında şişen zeminlerin yol açtığı problemleri ve bu problemlerin çözümünü araştırmıştır. Araştırmacı, şişen zeminlerden kaynaklanan zararları en aza indirmek için kullanılan başarılı tekniklerin şişen zeminin şişmeyen bir zeminle değiştirilmesi ya da şişen zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca şişen zeminlerin ıslahı için granüler kazık ankraj temel sistemi olarak bilinen yeni bir tekniğin geliştiğini rapor etmiştir. Bu yöntemde temel, granüler kazığın altındaki çelik bağlantı çubuğu aracılığıyla çelik bağlantı tabakasına ankrajlanır. Araştırmacı, söz konusu tekniğin performansını hem laboratuvar hem de arazi deneyleri ile incelemiştir. Deney sonuçları granüler kazığın uzunluğu, çapı ve yoğunluğunun sistemin mühendislik davranışını kontrol ettiğini göstermiştir.

Şengül (2010), yüksek su içerikli killi yol taban zeminlerinin kireç stabilizasyonu ve hücresel dolgu sistemi ile iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Araştırmacı, her iki yöntemin de tek başına yeterli performans sağlamadığını, ancak zeminin önce kireçle stabilize edilip daha sonra hücresel dolgu sistemi ile güçlendirilmesi ile istenilen iyileştirmenin sağlandığı sonucuna varmıştır.

Jones ve Jefferson (2012), şişen zeminlerden kaynaklanan hasarları en aza indirmek için kullanılan yöntemleri iki ana grupta toplamıştır. Bunlardan ilki, kompaksiyon, ön nemlendirme, kimyasal stabilizasyon tekniklerinden oluşan zemin stabilizasyonu yöntemi, ikincisi ise yatay ve düşey nem bariyerleri, elektrokimyasal ve ısıl işlemlerden oluşan su içeriğinin kontrol edilmesi ile ilgili yöntemlerdir.

Chen ve Bulut (2016), şişen zeminlerde inşa edilen yol kaplamalarında kullanılan yatay nem bariyerlerinin sayısal analizi üzerine çalışmışlardır. Analiz sonuçları yatay nem bariyerlerinin performansının yalnızca zeminin özelliklerine değil aynı zamanda iklim etkisine de bağlı olduğunu göstermiştir. Analiz sonuçları ayrıca yatay nem bariyerlerinin performansının çatlaklara bağlı olarak azaldığını göstermiştir.

2.4. Şişen Zeminlerin Katkı Maddeleri ile İyileştirilmesine İlişkin Çalışmalar

Şişen zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi uluslararası literatürde en sık rastlanılan ve araştırmacılar tarafından ekonomikliği ve uygulanabilirliği konusunda fikir birliği oluşmuş bir tekniktir.

Zorluer ve Usta (2003), mermer fabrikalarından atık olarak elde edilen mermer tozunu şişen killi zeminleri iyileştirmek amacıyla kullanmışlardır. Çalışmalarında farklı oranlarda mermer tozu ile karıştırılan zemin örnekleri üzerinde belirli bir kür süresi sonunda serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları mermer tozunun zeminin şişme yüzdesini azalttığını göstermiştir.

Al-Rawas vd. (2005), şişen killi zeminleri iyileştirmek için kireç, çimento, kireç-çimento karışımları ve yapay puzolan kullanmışlardır. Çalışma kapsamında iyileştirilecek zemin kireç, çimento ve yapay puzolan ile sırasıyla zemin kuru ağırlığının %3, %6 ve %9' u oranlarında karıştırılmıştır. Ayrıca farklı oranlardaki çimento-kireç karışımları da zeminle karıştırılmıştır. Deney sonuçları %6 kireç katkısının zeminin hem şişme basıncını hem de şişme basıncını 0'a indirdiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda kirecin diğer katkı maddelerine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Bhuvaneshwari vd. (2005), değişik yüzdelerde uçucu kül ile karıştırılmış şişen bir zeminin davranışındaki gelişmeleri kontrol eden bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar hem laboratuvar hem de arazi deneyleri uygulamışlardır. Arazi uygulamasındaki en büyük zorluklardan birinin homojen bir malzeme elde etmek için iki malzemenin doğru bir şekilde karıştırılması olduğunu vurgulamışlardır. Çalışma sonucunda uçucu kül ile yapılan iyileştirmede maksimum çalışabilirliğin %25 uçucu kül içeriği ile sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Al-Zoubi (2008), çimento katkısının şişen zeminlerin davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kuru zemin ağırlığının %0-25' i arasında değişen çimento içeriği aralığı seçilmiştir. Çalışma sonucunda zeminin likit limitin %6' ya kadar olan çimento içeriklerinde şiddetli bir şekilde azaldığı, likit limit kısmen sabitleştikten sonra %6-10 çimento aralığında keskin bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Çalışma ayrıca şişme potansiyelinin %4 çimento içeriğine kadar şiddetli bir şekilde azaldığını, %4-6 çimento içeriklerinde ise keskin bir şekilde arttığını göstermiştir. Zeminin kayma

dayanımının ise %0-20 arasındaki çimento içeriklerinde arttığını ancak maksimum artışın %6-10 arasında olduğu gözlenmiştir.

Yılmaz ve Civelekoğlu (2009), şişen killi zeminlerin şişme potansiyeli ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinde jipsin performansını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında, farklı oranlarda jips bentonite katılmış ve zemin örnekleri 7 günlük bir kür süresince bekletilmiştir. 7 günün sonunda örnekler üzerinde Atterberg limitleri, serbest basınç dayanımı ve şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları jipsin şişen killerin iyileştirilmesinde etkin bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Phanikumar (2009), kireç ve uçucu külün zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Zemine karıştırılacak kireç içeriği %0, %2, %4 ve %6, uçucu kül içeriği ise %0, %10 ve %20 olarak seçilmiştir. %20 uçucu kül ile karıştırılmış zeminin şişme potansiyeli ve şişme basıncında önemli bir azalma görülmüştür. Ayrıca şişme basıncı ve şişme potansiyelinin artan kireç içeriği ile birlikte azaldığı gözlenmiştir.

Başer vd. (2010), bentonit ve kaolini karıştırarak elde ettikleri şişen zeminin iyileştirilmesi için atık mermer tozunu kullanmışlardır. Çalışmada %0-30 arasında değişen oranlarda mermer tozu atığı şişen zemine eklenerek 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda zemin örneklerinin şişme davranışındaki değişimler incelenmiştir. Çalışma sonucunda katkı yüzdesinin artmasıyla zeminin şişme yüzdesinde düşüş gözlenirken şişme hızında artma gözlenmiştir. Ayrıca, kür süresinin artmasıyla örneklerin şişme yüzdesinde azalma gözlenmiştir.

Küçükali (2011), kireç ve jipsin Üst Pliyosen yaşlı yüksek plastisiteli killerin şişme ve dayanım özelliklerine etkisini araştırmıştır. Araştırmacı, kildeki en yüksek basınç dayanımını %12 kireç katkısı ile 90 günde elde etmiştir. Çalışmanın sonucunda, zemine %3 oranında jips katılmasının zeminin şişme ve dayanım özelliklerini olumsuz etkilediğini ayrıca kireç içerisine jips katılması halinde iyileştirme performansının azaldığı gözlenmiştir.

Türköz vd. (2011), yaptıkları çalışmada magnezyum klorür solüsyonunun killi zeminlerin şişme potansiyeli ve dispersibilite özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, değişik oranlarda magnezyum klorür zemin örneklerine katılarak belirli bir kür süresi sonunda örnekler üzerinde şişme ve dispersibilite deneyleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda magnezyum klorür solüsyonunun

problemli killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği ve en iyi iyileştirmenin %7 katkı oranında sağlandığı gözlenmiştir.

Çimen ve Dereli (2014), yüksek şişme potansiyeline sahip bentonit kilinin iyileştirilmesi için bor grubu oksitlerinden biri olan kolemanit mineralini kullanmışlardır. Bu amaçla bentonit kiline değişik oranlarda kolemanit minerali eklenerek tüm karışımlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda kolemanit miktarının artmasıyla zemin örneklerinin şişme basıncında azalmalar gözlenmiştir.

2.5. Şişen Zeminlerin Kireç ile İyileştirilmesine İlişkin Çalışmalar

Birinci bölümde bahsedildiği gibi şişen bir zeminin katkı maddesi ile iyileştirilmesi için katkı maddesi yüzeysel olarak zemine karıştırılır ya da zemin içerisinde kolonlar oluşturulur. Zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi konusunda ulusal ve uluslararası alanda pek çok çalışma yapılmış ve yeni teknikler uygulanmıştır. Hem yüzeysel iyileştirme hem de kireç kolonu tekniği ile ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiş olup özellikle kireç kolonu uygulamasıyla ilgili çalışmalara ağırlık verilmiştir.

2.5.1. Zeminlerin kireç ile yüzeysel olarak iyileştirilmesine ilişkin çalışmalar

Diamond ve Kinter (1966), kaolinit ve montmorillonitin kireci adsorplamaları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada ilk olarak kaolinit ve montmorillonit Ca iyonu ile doyurulmuşlardır. Ca ile doygun killer $Ca(OH)_2$ (kireç) çözeltisine batırılarak bu kil minerallerinin $Ca(OH)_2$' i adsorplamaları incelenmiştir. Çalışma sonucunda kaolinde $Ca(OH)_2$ adsorpsiyonunun hızlıca gerçekleştiği ve 10 dakikada tamamlandığı ancak 2 saat sonra tekar başlayıp birkaç saat daha devam ettiği gözlenmiştir. Montmorillonitte ise ilk iki dakika içinde çok hızlı bir adsorpsiyon olmuş daha sonra azalmaya başlamış, 10. ve 20. dakika arasında yatay bir seyir izlemiştir. Bu süre zarfında adsorpsiyon yavaşlamış ancak durmamıştır. 20 dakika sonra adsorpsiyonda ani bir artış olmuş ve bunu zamanla yaklaşık lineer olan kısmen yavaş bir adsorpsiyon süreci izlemiştir. Bu yavaş adsorpsiyon azalarak birkaç gün devam etmiştir. Araştırmacı, iki kil türünün $Ca(OH)_2$ adsorpsiyonunun farklı olmasının sebebini kil minerallerinin düzlemsel yüzeylerinin bileşimindeki farklılık yüzünden olabileceğini belirtmiştir.

Güler ve Edinçliler (1993), killi bir zemini iyileştirmek için kireç ile karıştırmışlar ve kilin kayma dayanımında bir artış saptamışlardır. Ayrıca zemin örneklerinin üzerine yüzeyden kireç serpmişler ve kirecin yüzeyden olan difüzyonu sonucu kilin üst kısmında taşıma gücünü arttıran taşıyıcı bir kabuk tabakasının oluştuğunu

gözlemişlerdir. Araştırmacılar, derinliğin bir fonksiyonu olarak kayma dayanımındaki artışın derinlere doğru azaldığını vurgulamışlardır. Ayrıca, kilin kayma mukavemetindeki artışın kilin su içeriğine, zamana ve serpilen kireç miktarına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir.

Güler ve Avcı (1993), yaptıkları çalışmada killi zemin örneklerine değişik oranlarda kireç katarak, bu örneklerin geçirimlilik değerlerini ölçmüşlerdir. Örneklerin geçirimlilik değerlerinin %6 kireç katıldığında 1000 kat arttığı, ancak daha fazla oranlarda kireç katıldığında permebilite değerinin tekrar düştüğü gözlenmiştir.

Basma ve Al-Sharif (1994), killi zemine çeşitli oranlarda kireç eklemişler ve zemine %6 kireç eklenmesiyle zeminin şişme basıncını 0,4 MPa'dan sıfıra düştüğünü gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, zeminin sıfır şişme basıncına ulaştığı andaki kireç miktarı değerinin zemine katılması gereken kireç miktarının sınır değeri olduğunu belirtmişlerdir.

Bell (1996), killi zeminlerde sıklıkla gözlenen kaolinit ve montmorillonitin kireçle olan reaksiyonları sonucu meydana gelen değişimleri incelemiştir. Bu amaçla kaolin ve montmorillonitden oluşan iki tür zemine değişik oranlarda kireç katılarak bir seri laboratuvar deneyi yapılmıştır. Çalışma sonucunda montmorillonitin plastisitesinin kireç eklenmesiyle düştüğü gözlenirken kaolinitin plastisitesi artmıştır. Ancak iki tür zeminin de optimum su içeriği ve California taşıma oranında bir artış, maksimum kuru birim hacim ağırlığında ise azalma gözlenmiştir. Araştırmacı ayrıca kür süresinin dayanım artışındaki önemini vurgulamıştır. Montmorillonitik killerde eklenmesi gereken optimum kireç içeriğinin ve dayanımın kür süresi ile lineer olduğu ancak kaolinitik killerde optimum kireç içeriğinin kür süresiyle önemli ölçüde değişmediği belirtilmiştir. Çalışmada son olarak kireçle iyileştirilmiş zeminlerde dayanım artışı ile kireç miktarı arasında lineer bir ilişki olmadığı, belirli miktardaki kirecin zeminin dayanımını arttırdığı ancak aşırı miktardaki kirecin dayanımı azalttığı vurgulanmıştır. Bunun sebebi ise kirecin dikkate değer bir içsel sürtünme açısı ve kohezyonunun olmaması olarak açıklanmıştır.

Güler ve Sargın (1998), kirecin ve artan sıkıştırma enerjisinin kilin hidrolik geçirgenliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yazarların yaptığı çalışmada üç değişik kil, kireç karışımı; iki değişik sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırılmış, bir grup zemin örneği bir gün süre ile ve 50 ^{0}C' de kür edilmiş, diğer bir grup ise kür edilmeden

hidrolik geçirgenlik deneylerine tabii tutulmuştur. Hidrolik geçirgenlik deneyleri rijit duvarlı sıkıştırma kalıbı permeabilite düzeni ve musluk suyu kullanılarak yapılmıştır. Yazarların yaptıkları çalışma sonucunda, sıkıştırılma enerjisinin artırılması, hidrolik geçirgenlik değerlerini azaltmış, gerekli kürün sağlanması durumunda kireç ilavesi ile hidrolik geçirgenlik değerlerinin aynı kaldığı görülmüştür.

Türköz (2001), belirli bir araziden alınan yüksek şişme potansiyeline sahip killerin kireç katkısı ile iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Araştırmacı, sönmüş kireç katkısı ile şişme yüzdesi ve kireç katkısı ile şişme basıncı arasındaki ilişkiyi, ayrıca şişme yüzdesinin ve şişme basıncının zamanla değişimini araştırmıştır. Çalışma sonucunda yüksek şişme potansiyeline sahip killerin iyileştirilmesinde kireç katkısının başarıyla uygulanabileceği, bu katkının % 3 seviyesi üzerine etkili olduğu belirlenmiştir.

Keskin (2004), Ankara'da bulunan bir yolu kireç stabilizasyonu ile iyileştirmiştir. Çalışmada ilk olarak zeminin kireç stabilizasyonuna uygunluğunun tespiti için laboratuvar deneyleri yapılmış, ardından arazi uygulamalarına geçilmiştir. Laboratuvar deney sonuçlarına göre, zemin kireç ile iyileştirildikten sonra CBR değerlerinde 16-21 kat oranında artışlar olmuştur. Bu sonuçlar, yolun temel alttemel kalınlıklarını 25 cm kadar azaltmıştır. 1 ay ve 3 ay sonra yapılan gözlemler sonucunda çalışmanın başarılı olduğu görülmüştür.

Tüylüce (2010), kireç ile iyileştirilmiş deniz killerinin karadaki dolgu çalışmalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Sönmemiş kireç katkılı zemin örneklerinin 60 gün sonraki serbest basınç dayanımlarının, doğal zemine oranla 7 kat, CBR değerlerinin ise 5 kat arttığı gözlenmiştir. Çalışma sonucunda, deniz kilinin kireçle stabilizasyonu ile arazide dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Şengül (2010), killi yol taban zeminlerinin kireç ile iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, killi zeminin su içeriği %20 arttırıldıktan sonra, zemin % 5, % 10, % 15 oranlarında kireç ile karıştırılarak CBR deneyleri yapılmıştır. Killi zemin % 15 kireçle stabilize edildikten sonra, zeminin CBR değeri % 0,2'den % 7'lere yükselmiştir.

Muhmed ve Wanatowski (2013), sönmüş kirecin killerin mikroyapısındaki ve dayanımındaki etkisini araştırmışlardır. Bu etkiyi tanımlayabilmek için bir seri laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Deneyler kapsamında, %5 sönmüş kireç ve kil

karışımı üzerinde Atterberg limitleri, kompaksiyon ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri yapmışlardır. Deney sonuçları, kireç ilavesinin kilin plastisitesini azalttığını ve sıkışma özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Kireç ilavesiyle kilin tek eksenli sıkışma dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Tran vd. (2014), kireç stabilizayonunun sıkıştırılmış şişen bir kilin hidrolik iletkenliği ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin örneklerinin hidrolik iletkenliği örnekler doygun hale geldikten 7 gün sonra incelenmiştir. Kil sıkıştırılmadan önce kireç hidrasyonunun etkisini çalışmak amacıyla kil sönmemiş kireç ile karıştırılmıştır. Kireç hidrasyonunun tane içi boşlukları etkilemediği ancak taneler arası boşlukların boyutlarını arttırdığı gözlenmiştir. Bu artış, hidrolik iletkenliğin de artmasına sebep olmuştur. İyileştirilmiş örneğin hidrolik iletkenliği değişim aşamasının ilk 3 günü boyunca sürekli olarak artmış ve sonraki 4 gün boyunca dengelenmiştir. Kilin mikroyapısındaki gözlemler, iyileştirme reaksiyonlarının 7 gün sonra meydana geldiğini göstermiştir. Daha uzun bir süre içinde, çimentolaşma ürünlerinin oluşumundan dolayı hidrolik iletkenlikte bir azalma beklenebilir.

2.5.2. Zeminlerin kireç kolonu kullanılarak iyileştirilmesine ilişkin çalışmalar

Anon (1963), kaymış bir dolgu şevinde dolgu malzemesini iyileştirmek için sönmüş kireç kolonlarını kullanmıştır. Tehlikenin kolonların inşasından sonra 3-4 hafta içinde durduğu gözlenmiştir. Ayrıca, 5 hafta sonra kolonlardan 1,5 m uzaklıkta zemin içerisinde kireç varlığı saptanmış ancak kirecin nasıl saptandığı açıklanmamıştır.

Chui ve Chin (1963), uygun kutulara sıkıştırılmış kil içerisinde sönmemiş kireç kolonları oluşturarak laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, başlangıç su içeriğinin iyileştirme sürecindeki başarının anahtarı olduğunu vurgulamışlar ve kil-kireç arasındaki kimyasal reaksiyonun öneminden bahsetmişlerdir.

Handy ve Williams (1967), 150 mm çapındaki sönmemiş kireç kolonlarını zayıf bir kil dogulu şevi iyileştirmek için kullanmışlardır. Söz konusu kil dolgunun baskın olarak kalsiyum montmorillonit içerikli, aktif kayma zonunun içsel sürtünme açısının 17° ve kohezyonunun 4 kPa, su içeriğinin % 27.2 olduğu belirtilmiştir. Tasarım yönteminde, yapılan ön çalışmalardan elde edilen kireç göçü mesafesi ve kil-kireç reaksiyonuna bağlı olarak zemin tipi dikkate alınmıştır. Kireç kolonları 1,5 m

aralıklarla asılı su tablasının altındaki aktif kayma zonunu kesecek şekilde inşa edilmiştir. Kolonların inşasından 1 yıl sonraki tek eksenli basınç dayanımının kolonların inşasından 3 ay sonraki dayanıma göre %55 arttığı görülmüştür. 2 yıl sonra, kireç kolonlarının birinden 300 mm uzaklıkta 2 m derinlikten örnek alınmış ve örneğin içsel sürtünme açısı ve kohezyonu sırasıyla 21° ve 9,5 kPa olarak ölçülmüştür. Su tablasının üstündeki seviyelerde herhangi bir kireç göçü tanımlanmamış ve suyun kireç göçü için önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, kayma dayanımı parametrelerinde artış ve şevin duyarlılığının sağlandığı gözlenmiştir.

Noble ve Anday (1967), mineralojisi bilinmeyen 150 mm çapındaki sıkıştırılmış kil örneklerinin içerisine 25 mm çapında kireç kolonları oluşturmuştur. Zemin örneklerinin asitle özütlenmesi ve akabinde EDTA (Etilen Diamin Tetra Asetik Asit) ile titre edilmesiyle serbest kalsiyum miktarı saptanarak kireç göçü mesafesi tanımlanmıştır. İyonların 44 günde 45 mm göç ettiği ve daha kısa mesafelerde 99 gün sonra iyon konsantrasyonlarının arttığı görülmüştür.

Katti ve Gupta (1970), vertisol toprak olarak bilinen Black Cotton Soil (LL=%80, PL=%40)' de kireç göçünü bulmak için zemin içerisinde sönmemiş kireç kolonları ve kireç içerisinde zemin kolonları oluşturmuştur. Kirecin göç mesafesini ölçmek için tek eksenli sıkışma dayanımını ve büzülme limitini kullanmıştır. Çalışma sonucunda, kirecin 150 mm çapındaki zemin örneğinin merkezine 120 gün sonra ulaştığı görülmüştür.

Tystovich vd. (1971), killi zeminlerin iyileştirilmesinde sönmemiş kireç kolonları kullanmışlardır. Çalışmada sönmemiş kireç kolonlarının doygun killi zeminlerin sıkıştırılmasına katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan uygulamalarda oluşturulan kolonların çaplarında zaman içerisinde %26–60 ve hacimlerinde %160–260 oranında artış olduğu gözlenmiştir. Kireç kolonunun hacminin artmasıyla birlikte kolon çevresindeki killi zeminde radyal çatlaklar oluşmuş ve bu durum zeminlerin daha kolay sıkışabilmesini mümkün kılmıştır.

Fosh ve Kinter (1972), küçük bloklar halindeki montmorillonitik ve kaolinitik killeri iyileştirmek için yüksek kalsiyum hidratlı kireci kullanarak bir laboratuvar deneyi uygulamışlardır. Kirecin göç mesafesini bulmak amacıyla, zemindeki serbest kalsiyum miktarı EDTA titrasyonu olarak adlandırılan bir asit baz titrasyonu ile saptanmıştır. Kirecin zemin içerisindeki göç mesafesi 180 gün sonra 40 mm den daha

az olarak ölçülmüştür. Yazarlar, su hareketi ve iyon göçünün ayrı süreçler olduğunu, kil su içeriğinden bağımsız bir zemine en çok kireç katkısının en yoğun kireç çözeltisiyle sağlanabileceğini vurgulamışlardır.

Broms ve Boman (1976), yumuşak killi zeminlerde yapılan derin kazılardaki yanal desteğin sağlanması için palpanş istinat duvarlarının yerine kireç kolonlarıyla iyileştirilmiş kil bloklarının kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, kolonların birbirleriyle etkileşim içinde olması için kolon aralıkları oldukça küçük seçilmiş ve sağlam zemin blokları elde edilmiştir. Derin bir test kazısı yapılarak, iyileştirilmiş zeminden oluşan bir duvarla yanal destek sağlanmıştır.

Birçok araştırmacı (Broms ve Boman, 1976 ve 1979; Holm ve Broms,1981; Ayyar ve Ramesan, 1989; Rogers ve Glendinning, 1997) killi toprak zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan kireç kolonlarının çevresinde meydana gelen genişleme mekanizmasını açıklamalarına rağmen, bu konunun daha önceki savunucuları Japonlar olmuştur. Kitsugi ve Azakami (1982), kireç kolonlarının inşasında taneler halinde sönmemiş kireç kullanmışlardır. Stabilizasyon süresince kireç kolonu çevresinde dehidratasyon ve yanal genişleme meydana geldiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Holm ve Broms (1981), kireç kolonlarının zaman zaman beton kazık temeller yerine kullanılabileceğini belirterek bazı yapıların temel sistemi için kireç kolonu tekniğini önermişlerdir.

Brandl (1981), kireç kolonlarının Avusturya'da 1968'den beri olan kullanımını araştırmıştır. Laboratuvar testleri ve arazi çalışmaları, uzun dönemli dayanımın kireç içerisindeki iyonların kolondan zemin içerisine olan difüzyonundan kaynaklandığını göstermiştir. Belirli bir uygulama için kireç kolonunun etkinliğinin kil mineral içeriği, iyon değişebilirliği ve taşınır silikanın varlığı tarafından kontrol edildiği düşünülmüştür. Kireç kolonu uygulaması için en uygun zeminlerin yüksek doğal geçirimliliğe sahip olduklarından dolayı gevşek paketlenmiş ve düşük plastisiteli zeminler olduğu belirtilmiştir. Yüksek geçirimliliğin kireç içerisindeki iyonların daha fazla difüzyonunu engelleyen çabuk çimentolaşma reaksiyonlarının önüne geçtiği vurgulanmıştır.

Ruenkrairergsa ve Pimsarn (1982), Tayland'da bulunan killi-şeyl dolguların stabilizasyonu için kireç kolonu tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada 3 metre arayla açılan 150 mm çapındaki kuyulara kireç ve su karışımı doldurulmuştur. Uygulama

sonrası kuyu çevresinden alınan zemin numulerinin kayma dayanım parametreleri incelenmiş ve bir artış olduğu gözlenmiştir.

Lutenegger ve Dickson (1984), orta-batı Amerika'da kireç kolonlarının kullanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar, hem kil-kireç reaksiyonlarında hem de iyonların difüzyon oranlarında zemin mineralojisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Sadece montmorillonitik killerin kireç ile iyileştirmede uygun olduğu belirtilmiştir. Ancak, diğer killerin kireç iyileştirmesi için uygun olup olmadığını gösteren bir delil sunmamışlardır.

Chummar (1987), denizel ve kısmen şişen killeri iyileştirmek için 200 mm aralıklarda, 20 mm çapında sönmemiş kireç-kum kolonlarını kullanarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Araştırmacı ayrıca, bir kil dolgusundaki kayma düzleminin iyileştirilmesi için arazi deneyleri yapmıştır.

Benzer arazi çalışması, Shanker vd. (1989) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada su akışının kireç göçü için gerekli olduğu düşünülerek 3 hafta boyunca kireç kolonlarından su girişi sağlanmıştır. Ayrıca, kireç kolonu içerisinde 50 mm çaplı kum çekirdek oluşturularak drenajın sağlanması amaçlanmıştır. Araştırmacılar iyileştirme mekanizmasının kalsiyum iyonlarının zemin içerisinde hidrolik iletimi sonucu oluşan kil-kireç reaksiyonlarına dayandığını belirtmişlerdir.

Ayyar ve Ramesan (1989), ıslatılmış ve sıkıştırılmış kilde sönmemiş kireç kolonlarının davranışını tanımlamak için laboratuvar çalışması yapmışlardır. Araştırmada, likit limiti ve plastik limiti sırasıyla %60 ve %21 olan, baskın olarak smektit kil mineralinden oluşan killi bir zemin kullanılmıştır. Kolonların inşasından 1, 2, 3 ve 6 hafta sonra sabit mesafelerde zemin örnekleri alınarak, bu örneklerin kalsiyum içeriği, kayma dayanımı ve su içeriği analiz edilmiştir. Yazarlar kireç kolonlarının zemini iyileştirme etkisinin kil dehidrasyonu ve kil-kireç reaksiyonlarından kaynaklandığını vurgulamışlardır. Ayrıca, daha büyük yüzey alanlarına sahip kolonların daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Venkatanarayana vd. (1989), zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesinde kolon aralıklarının etkisini araştırmak için bir laboratuvar modeli oluşturmuşlardır. Kolonlar arasından alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan testler sonucu daha küçük kolon aralıklarının daha büyük iyileştirme dereceleri verdiği gözlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar, kolon tekniği ve yüzeysel karıştırma tekniği arasında bir kıyaslama

yapmayı denemişler fakat farklı iyileştirme yöntemleri arasındaki kireç yüzdelerinin doğrudan kıyaslanması yazarlar tarafından uygun bulunmamıştır. Yazarlara göre karıştırma tekniğinde zeminin plastisitesinin, dayanımının ve çalışabilirliğinin iyileştirilme süreci kısmen pulverizasyon (tozlaştırma), flokülasyon (topaklanma) ve yeniden sıkışmaya bağlıdır. Daha sonraki çimentolaşma reaksiyonları küçük kil topaklarını birbirine bağlar. Bu süreçler iyon göçü aracılığıyla meydana gelmez. Kil-kireç reaksiyonlarından kaynaklanan iyileştirme sadece moleküler seviyede türetilir, ana iyileştirme mekanizması tamamen başka süreçlerden kaynaklanır.

Rogers ve Glendinning (1993), kireç kolonlarının toprak kil dolgularının iyileştirilmesi amacıyla kullanımı üzerinde çalışmışlardır. Sonuçlar, kireç kolonlarının kayma düzlemleri boyunca kili sağlamlaştıran negatif boşluk suyu basıncını ve çimentolaşma ile dayanımı arttırdığını göstermiştir.

Rogers ve Glendinning (1994), kireç kolonu uygulamasının çalışma mekanizması konusunda bir araştırma programı yürütmüşlerdir. Araştırmacılar kireç kolonu uygulamasındaki en önemli iyileştirme sürecinin kireçteki kalsiyum iyonlarının kolon çevresindeki zemin içerisine göç etmesi ve akabindeki kil kireç reaksiyonlarının olduğunu vurgulamışlardır. Araştırma kapsamında iyileştirme mekanizmasını etkileyen her bir süreç için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Kireç göçünün etkisini saptamak için, 0,4x0,4x0,4 m boyutlarındaki rijit bir kutuya killi bir zemin uygun su içeriğinde sıkıştırılmış ve akabinde kutunun merkezinde 50 mm çapında sönmemiş bir kireç kolonu oluşturulmuştur. 8 hafta sonra kolondan itibaren çeşitli mesafelerde zemin örnekleri alınarak, örneklerin serbest kalsiyum iyon içerikleri saptanmıştır. Testler sonucunda kireç göçünün istenilen mesafede olmadığı görülmüştür. Kirecin göç mesafesini saptamak için, ayrıca kilin yüzeyi bir asit baz indikatörü olan fenoftaleine boyanmıştır (kireç alkalin olduğu için fenoftalein ile temas edince pembe renk alır). Fakat sadece 20 mm'lik bir göç mesafesi saptamışlardır.

Aynı araştırmacılar iyileştirme sürecini etkileyen bir diğer faktör olan nem içeriğinin iyileştirme üzerindeki etkisini araştırmak için, asit baz indikatörü ile karıştırılmış killeri farklı nem içeriklerinde, 32 mm çapındaki perpeks tüplere doldurmuşlardır. Her tüpün merkezine 6 mm çapında sönmemiş kireç kolonu oluşturulmuş ve kirecin renk değişiminden faydalanarak iyonların tüpün ucuna ulaşması için gereken zaman

ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda, nem içeriğindeki artışın iyon göçünü artırdığı sonucuna varılmıştır.

Glendinning (1995), kireç kolonlarının zayıf şevlerdeki çalışma mekanizmasını anlamak için bir takım laboratuvar deneyleri yapmış ve bu deneylerden elde ettiği verileri kullanarak üç adet arazi deneyi yapmıştır. İlk olarak bir kanal kazısında küçük ölçekli bir deney yapılmış ve boşluk suyu basıncında değişimler ve kurulum süreciyle ilgili faydalı veriler elde edilmiştir. Bir diğer arazi deneyinde 30 m uzunluğunda sorunlu bir şevi iyileştirmek için kireç kolonlarını kullanmıştır. Bu deney kapsamında açılan deliklere sönmemiş kireç dökülerek sıkıştırılmıştır. Çalışma iki hafta içinde tamamlanmıştır. Üçüncü arazi deneyi yine bir kanal kazısı üzerinde yapılmıştır, 200 mm çapında ve 3 m uzunluğundaki kireç kolonları iki haftalık bir süreç içinde oluşturulmuştur.

Rogers ve Glendinning (1996), kolon uygulamasında kireç göçü mesafesi ile ilgili literatürü gözden geçirmişler ve kireç göçü mekanizmasını tanımlamak için sönmemiş kireç kolonlarını kullanarak bir araştırma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, örselenmemiş doğal kilde difüzyon süreciyle meydana gelen hidroksil (OH^-) iyon göçünün yaklaşık 20-30 mm ile sınırlı olduğu görülmüştür. Ancak kil kütlesindeki dehidrasyon çatlağı ya da diğer süreksizlikler aracılığıyla artan hidrolik iletkenliğin daha büyük mesafelerde göçe yol açtığı vurgulanmıştır. Ayrıca, kalsiyum (Ca) iyon göçünün 10 yıl içerisinde 1 m'den daha büyük mesafelerde olabileceği tahmin edilmiştir.

Glendinning ve Rogers (1996), şev stabilizasyonunda kireç kolonu tekniğini kullanarak iki adet arazi deneyi yapmışlardır. İlk deneyde aşırı konsolide Liyas kilinde 2,5-3 m derinliğinde, 63 m çapında, 75 adet kireç kolonu oluşturulmuştur. Diğer bir deneyde ise Londra kilinde 150-200 mm çapında, 3-4 m derinliğinde kireç kolonları oluşturulmuştur. Deney sonuçları kireç kolonu tekniğinin sığ şev stabilizasyonu için uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca kireç kolonu tekniğinin küçük ölçekli teçhizat kullanımına uygunluğu sayesinde özellikle sınırlı erişimin olduğu ya da çevresel açıdan hassas olan yerler için uygun olduğu görülmüştür.

Mathew ve Rao (1997), kirecin killerin katyon değişim kapasitesine olan etkisini araştırmak için bir seri laboratuvar deneyi uygulamışlardır. Bu amaçla 1000 mm x 1000 mm x 750 mm boyutlarındaki bir kasa denizel bir kil ile doldurulmuş ve zemin

içerisinde 9 adet 50 mm çaplı kireç kolonları oluşturulmuştur. Belirli bir kür süresinden sonra kolonlar arasından farklı derinliklerde zemin örnekleri alınmıştır. Kirecin kolonu çevreleyen zemine olan göçünü tanımlamak amacıyla alınan zemin örneklerinin kireç içeriği ve pH değerleri ölçülmüştür. Ayrıca örnekler üzerinde yapılan ölçümler sonucu zemininin katyon değişim kapasitesinde bir artış gözlenmiştir.

Tonoz, vd. (2003), kireç kolonlarının Ankara kiline olan etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada araziden alınan örselenmemiş zemin örneklerinde kireç kolonları oluşturarak kilin şişme basıncını, mukavemet parametrelerini ve oturmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kireç difüzyonunun en etkili olduğu bölgenin kolon çapının iki katı mesafede ve 28 günlük kür süresinde olduğu gözlenmiştir. Uygulamadan sonra dayanımda %40-%80 arasında bir artma, ön konsolidasyon basıncında bir artma ve konsolidasyon özelliklerinde bir azalma görülmüştür. Bunun yanında kireç kolonlarının zeminin şişme basıncını %40 ile %75 arasında azalttığı görülmüştür.

Barker vd. (2006), bir dizi laboratuvar deneyi aracılığıyla, Londra kilinde kireç kolonundan olan iyon göçünün sebep olduğu fiziksel ve kimyasal olayları incelemişlerdir. Çalışmada, iyon göçünün üç etmenin (kimyasal, elektriksel ve hidrolik eğim) etkisi altında meydana geldiği görülmüştür.

Erkan (2007), jips içerikli yumuşak killi zeminlerin mukavemet ve sıkışma özelliklerinin kireç kolonu tekniği kullanılarak iyileştirilmesi üzerinde çalışmıştır. Bu amaçla araziden 30x30x30cm boyutlarında 10 adet küp seklindeki kalıplar içerisinde örselenmemiş zemin örnekleri almıştır. Alınan her bir zemin örneğinde 20 mm ve 38 mm çapında farklı geometrik dizilimlerde sönmemiş kireç kolonları oluşturulmuş ve 7, 14, 28, 56, 112 günlük süreler boyunca küre tabii tutulmuştur. Ayrıca kolonların merkezinde 3 cm çapında delikler açılarak kolonların bu deliklerden sulanması sağlanmıştır. Her iki çapta da kür süresinin artmasının serbest basınç dayanımının da artmasına sebep olduğu ancak belirli gün sonra bu dayanım artışının yavaşladığı görülmüştür. Bu dayanım artış hızının yavaşlaması D=20mm'lik kireç kolonu uygulamasında 14 günden sonra, D=38 mm'lik kireç kolonu uygulamasında ise 56 günden sonra görülmüştür. Çalışma sonucunda jips içerikli yumuşak killi zeminlerin kireç kolonlarıyla mukavemet özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

Abiodun ve Nalbantoğlu (2015), laboratuvar ölçekli bir modelde kireç kolonu tekniğini kullanarak killi zeminlerin iyileştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Deneysel analizler boyunca katyon değişimi sonucu oluşan kil-kireç fizikokimyasal reaksiyonları incelemişlerdir. Zeminin elektriksel özelliklerindeki değişimleri incelemek için iyileştirilmiş zemin üzerinde elektriksel iletkenlik ölçümleri uygulanmıştır. Dairesel çelik tanklara killi zemin yoğrularak sıkıştırılmış ve içerisinde kireç kolonları oluşturulmuştur. Sonuçlar kil-kireç reaksiyonlarının zeminin elektriksel özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu, zeminin tek eksenli basınç dayanımını arttırdığını ve parçacıklar arası bağı kuvvetlendirdiğini göstermiştir. Bu durum, kireç kolonlarından zemin içerisine olan Ca^{+2} ve Mg^{+} göçüne, partiküllerin flokülasyonuna ve puzolonik reaksiyonlara dayandırılmıştır.

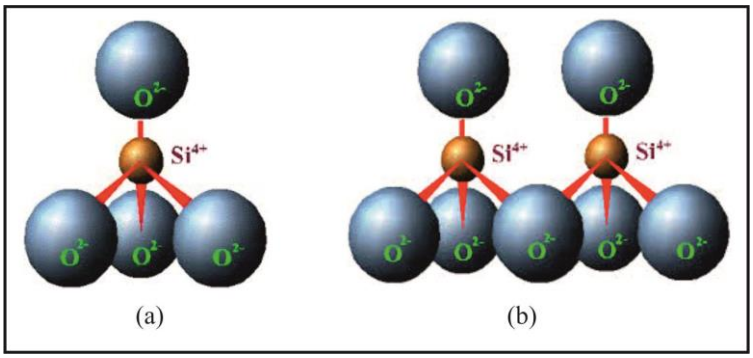
Konu ile ilgili yapılan önceki çalışmalardan da görüldüğü üzere zeminlerin iyileştirilmesi sırasında kireç kolonu tekniği dünya genelinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda iyon göçünün kireç kolonunun performansını etkileyen en önemli faktör olduğu konusunda görüş birliği oluşmuştur, ancak iyon göçünü etkileyen faktörler iyi bir şekilde açıklanmamış gözükmektedir. Bu tez çalışması kapsamında öncelikle kireç kolonunun çalışma mekanizması literatür çalışmalarından yararlanılarak ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Böylelikle okuyucunun konu hakkında bilgi sahibi olması amaçlanmıştır. Tez çalışmasının asıl amacı ise şişen killi zeminlerde kireç kolon tekniği ile iyileştirme sırasında şişen kil oranına bağlı olarak iyon göçü mesafesi ve kolon performansının değerlendirilmesidir. Amaca yönelik olarak, değişik oranlarda Na-smektit türü kil minerali içeren zemin örnekleri hazırlanmış olup laboratuvarda küçük ölçekli modeller oluşturulmuştur. Kolondan itibaren olan iyon göçü mesafeleri laboratuvar deneyleri ile tanımlanmış olup sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Bu tez çalışmasının diğer bir önemli özelliği ise daha genelleştirilebilir ilişkilerin elde edilmesine olanak tanıyan farklı içeriklerdeki zeminlerin kullanılmış olmasıdır. Literatürde kullanılan zeminler genellikle herhangi bir bölgeyi temsil etmektedir. Her çalışmada kullanılan zeminlerin özellikleri faklı olup bir zemin için elde edilen sonuçlar başka bir zemin için geçerli olmayabilir. Yapılan bu tez çalışması ile herhangi bir araştırmacı performansı etkileyen diğer faktörlerin yanında zemin içerisindeki Na-smektit oranına bakarak kireç kolonu uygulamasının o zemin için uygun olup olmadığı hakkında fikir sahibi olacaktır.

3. KİL MİNERALLERİNİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Kil doğada yaygın olarak bulunan, kimyasal bileşimi sulu alüminyum silikat olan, kayaçların kimyasal ayrışmasıyla oluşmuş, tane boyu çok küçük (< 2 mikron) doğal bir malzeme olarak tanımlanabilir. Kilin mühendislikteki tanımı ise; su ile karıştırıldığında hamur gibi kolayca şekil verilebilen (plastiklik özelliği), kuruduğu zaman dayanımı artan, kohezif özelliğe sahip, ıslandığı zaman şişen, kuruduğu zaman büzülen ve sıkıştığı zaman suyunu dışarı atabilen kolloidal tane boyundaki ince dokulu malzeme olarak tanımlanabilir (Kasapoğlu, 1989).

Kil mineralleri fillosilikatlara (tabaka veya levha silikatları) ait minerallerdir. Fillosilikatlar yumuşak, yaprağımsı veya pulsu bir yapıya sahiptir. Levha ve pulcukları esnek hatta plastiktir. Fillosilikatların bu karakteristik özellikleri yapıda silis oksijen levhasının sonsuz boyutta uzanımı ile kazanılmıştır (Velde, 1992). Bir kil mineralinin yapısında başlıca iki yapıtaşı vardır. Bunlardan biri silis dörtyüzlüsü olarak bilinen tetrahedral birim, diğeri ise alümina sekiz yüzlüsü olarak bilinen oktahedral birimdir.

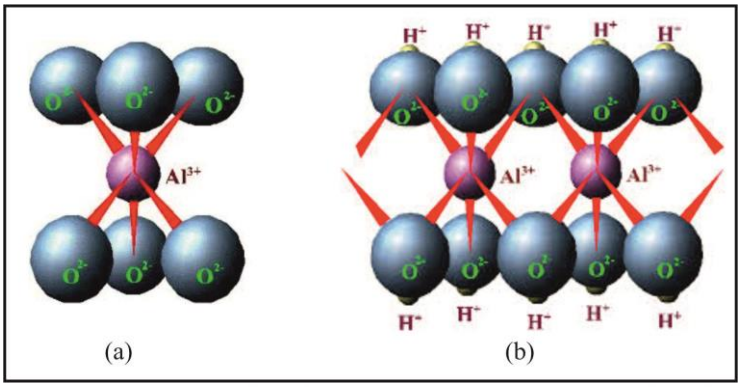
Tetrahedral birimde, her bir silisyum atomu bir tetrahedron oluşturmak için dört oksijen atomu tarafından kuşatılır (Şekil 3.1a). Bu kil yapılarının en temel birimidir ve kimyasal formülü $[SiO_4]^{-4}$ şeklinde verilir. Tetrahedral olarak düzenlenen silisyum katyonları, tetrahedral birimlerin tabanları aynı düzlemde olmak üzere, oksijenleri paylaşmak suretiyle kuvvetli kovalent bağ ile birbirlerine bağlanarak silika katmanını oluştururlar (Şekil 3.1b).



Şekil 3.1 (a) Tetrahedral birim; **(b)** Silika katmanı (Grim, 1968).

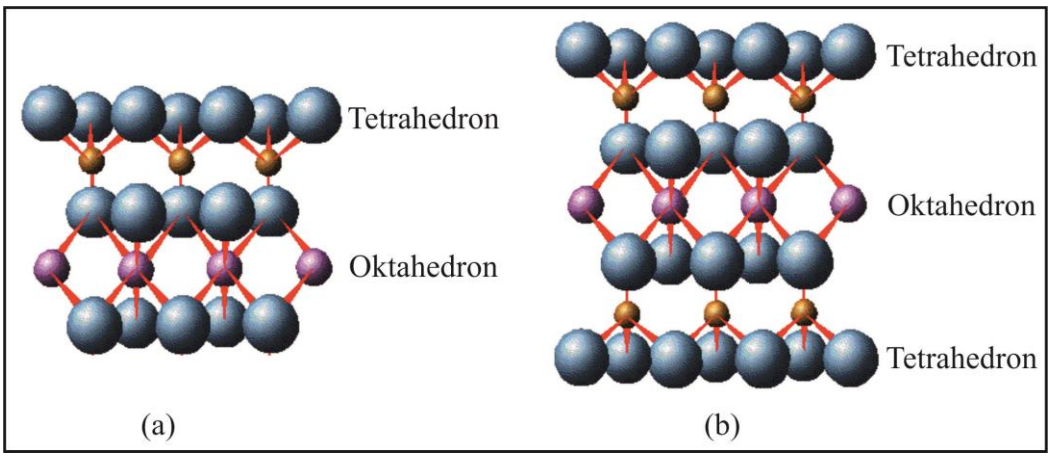
Oktahedral birim, her bir kil yapısındaki oktahedral birim altı oksijen veya hidroksil atomları ile bağlı olarak bulunan bir alüminyum veya magnezyum katyonundan

meydana gelir ve kimyasal formülü $[AlO_3(OH)_3]^{-6}$ şeklinde verilir. Oktahedral birimlerin birer yüzeyleri aynı düzlemde kalacak şekilde köşelerinden birleşerek oluşturdukları yapıya alümina katmanı denir (Velde, 1992).



Şekil 3.2 (a) Oktahedral birim; **(b)** Alümina katmanı (Grim, 1968).

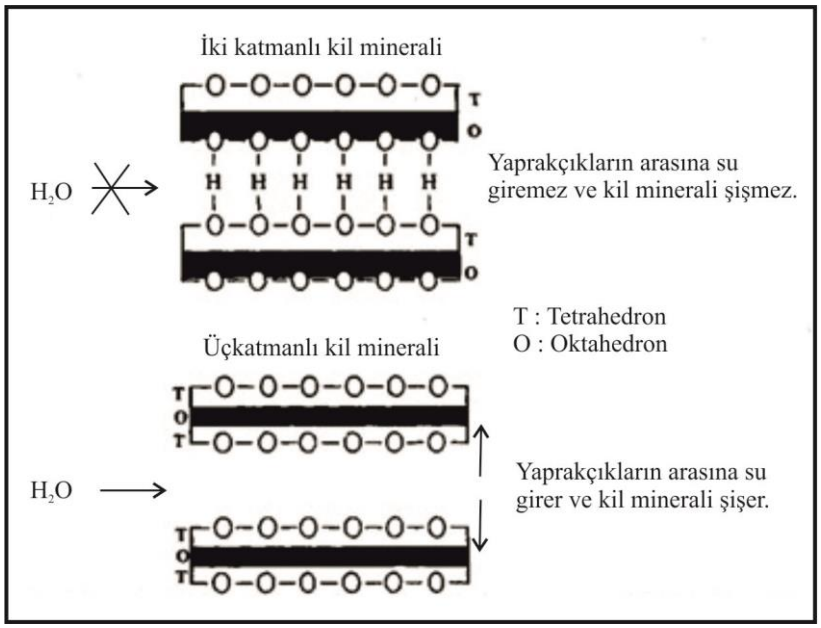
Oktahedral katman (alümina katmanı) oktahedronların hepsinde veya üçte ikisinde katyon bulunmasına göre trioktahedral ve dioktahedral olmak üzere iki şekilde bulunur (Bailey, 1980a). Yük denkliğinin sağlanabilmesi için alümina katmanındaki oktahedronlardan yalnızca 2/3'ünün merkezinde alüminyum (Al^{+3}) atomu bulunmakta, geri kalan 1/3'ü ise boş kalmaktadır. Bu şekilde olduğunda dioktahedral (ikili düzgün sekizyüzlü) yapı oluşmaktadır. Alüminyum (Al^{+3}) yerine merkez iyonu olarak magnezyum (Mg^{+2}) geçtiğinde her oktahedronun merkezi tamamıyla dolu olduğu durumlarda ise trioktahedral yapı (üçlü düzgün sekizyüzlü) oluşmaktadır (Grim, 1968; Sarıkaya, 1987; Sarıkaya vd., 1993; Chitnis ve Sharma, 1997).



Şekil 3.3 (a) İki katmanlı (T.O, 1:1) ; **(b)** Üç katmanlı (T.O.T, 2:1) kil mineralleri.

Kil mineralleri çok sayıda silika ve alümina katmanlarının paket şeklinde yan yana ve üst üste gelmeleri ve ortak olarak bulunan oksijen iyonları vasıtasıyla bağlanmaları sonucu oluşur. Tetrahedron ve oktahedron katmanlarının tekrarlı olarak bağlanmasıyla iki katmanlı kil mineralleri (1:1 yapısı), bir oktahedron katmanının iki tarafında birer tetrahedron katmanı olacak şekilde periyodik bir tekrarlanma ile ise üç katmanlı kil mineralleri (2:1 yapısı) oluşur (Şekil 3.3).

İki katmanlı kil tabakalarında tetrahedron katmanına ait oksijenler tabakanın üst yüzeyinde oksijen düzlemlerini oluştururken, tabakanın alt yüzeyinde oktahedronlara ait oksijenlerin açıkta kalan eksi yükleri hidrojen iyonu (H^+) ile OH düzlemi oluşturmaktadır. İki katmanlı iki tabaka üst üste geldiğinde tetrahedronların oksijenleri ile oktahedronların hidroksitleri arasında hidrojen bağları (O-H-O) oluşur. Bu nedenle katmanlar arasına su ve benzeri moleküllerin girmesi zorlaşır ve katmanlar arası istenilen ölçüde açılamaz (Şekil 3.4). Üç katmanlı kil tabakalarında oktahedron katmanın iki tarafında bulunan tetrahedron katmanları nedeniyle tabakanın iki yüzeyinde de oksijen düzlemleri yer alır. Üç katmanlı iki tabakanın üst üste gelmesi ile oksijen düzlemleri de karşı karşıya gelmiş olur ve eksi yüklü oksijen iyonlarını birbirine bağlayacak bir katyon olmaması sebebiyle tabakalar elektriksel olarak birbirini çekmez. Bu nedenle üç katmanlı kil minerallerinde tabakalar arasındaki açıklık çekilen su miktarı ile artarak 1,8 nm'ye kadar yükselebilir (Yalçın, 2010).



Şekil 3.4 Kil minerallerinde tabakalar arasına su moleküllerinin girişi ile mineralin tabakalı yapısı arasındaki ilişki (Yalçın, 2010).

4. KİL MİNERALLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Kil mineralleri çok karmaşık bir yapı gösterdiklerinden dolayı günümüze kadar herkes tarafından kabul edilmiş bir sınıflama sistemi mevcut değildir. Çünkü kil minerallerinin sınıflandırılmasında; kristal yapı, tabaka kalınlığı, tabakalar arası mesafe, tabaka tipi, tabaka yükü, tabakalar arası malzemenin doğası, iyon içeriği, tabakaların dizilişi ve düzeni olmak üzere farklı özellikler göz önüne alınabilmektedir. Grim' in (1968) tabaka tipi ve tabaka yüküne göre yaptığı bir sınıflama Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kil minerallerinin tabaka tipine ve tabaka yüküne göre sınıflandırılması (Grim, 1968).

Tip	Tabaka Yükü(x)	Grup	Alt Grup	Türler
1:1 T.O	~ 0	Kaolin-Serpantin	Kaolinler	Kaolinit, dikit, nakrit, halloysit
			Serpantinler	Krizotil, lizardit, antigorit, amesit
2:1 T.O.T	~ 0	Pirofillit-Talk	Pirofillitler	Pirofillit
			Talklar	Talk, vilemsit
	~ 0.2-0.6	Smektit	Dioktahedral smektitler/ Montmorillonitler	Montmorillonit, baydelit, nantronit
			Trioktahedral smektitler/ Saponitler	Saponit, stevensit, hektorit, sakonit
	~ 0.6-0.9	Vermikülit	Dioktahedral vermikülitler	Dioktahedral vermikülit
			Trioktahedral vermikülitler	Trioktahedral vermikülit
	~ 1	Mika	Dioktahedral mikalar	Muskovit, paragonit
			Trioktahedral mikalar	Biyotit, filogopit, lepidolit
	~ 1	Gevrek mikalar	Dioktahedral gevrek mikalar	Margarit
			Trioktahedral gevrek mikalar	Sybertit, ksantofillit, klintonit, anandit
2:1:1 T.O.T.O	Değişken	Klorit	Dioktahedral kloritler	Donbasit
			Trioktahedral kloritler	Klinoklor, şamozit, nimit, pennantit

4.1. İki Tabakalı Kil Mineralleri

4.1.1. Kaolin-serpantin grubu

Kaolinit en yaygın olan dioktahedral iki tabakalı kil mineralidir. 1 silika ve 1 alümina katmanının oluşturduğu silikat tabakalarının kuvvetli hidrojen bağları ile bağlanması ile meydana gelir ve kimyasal formülü $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ şeklinde verilir (Şekil 4.1). Kaolinitin yapısında her silikat tabakasının bir tarafında O iyonları, diğer tarafında ise OH iyonları yer almaktadır. Silikat tabakaları karşı karşıya geldiğinde O iyonları ve OH iyonları arasında O-H-O şeklinde hidrojen bağları oluşur ve tabakalar bu kuvvetli hidrojen bağları ile birbirine tutunur. Bu kuvvetli köprü sayesinde tabakalar arasına su moleküllerinin girmesi zorlaşır ve katmanlar arası açıklık oldukça az miktarda artar. Kaolin grubu kil minerallerini elektrik yükü bakımından nötr katmanlar oluşturmaktadır (Bailey 1980b). Serpantin ise kaolinite çok benzeyen trioktahedral 1:1 yapısına sahip kil minerali olup kimyasal formülü $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$ şeklinde verilir.

4.2. Üç Tabakalı Kil Mineralleri

4.2.1. Profillit-talk grubu

Talk ve profillit sırasıyla en basit trioktahedral ve dioktahedral üç katmanlı minerallerdir. Talk, sulu bir magnezyum silikattır ve Mg-Fe sübstitüsyonlarının bütün aralığına sahiptir. Profillit mineralinde, tetrahedral katmanda sadece Si ve oktahedral katmanda yalnızca Al bulunur (Velde, 1992).

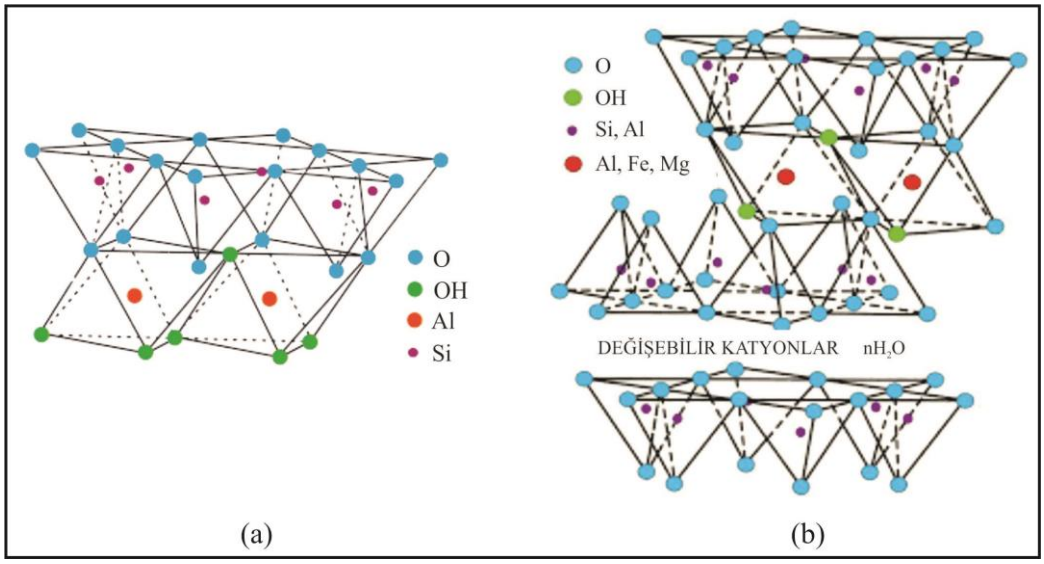
4.2.2. Smektit grubu

Smektitler dioktahedral yapıda üç katmanlı kil mineralleri olup en yaygın olan smektit minerali montmorillonittir. Montmorillonit ve montmorillonitten izomorfik iyon degişimi ile doğal olarak türeyen bidellit, nontronit, hektorit ve saponit gibi kil minerallerinin oluşturduğu sınıf simektit grubu olarak adlandırılır (Grim, 1968; Pinnavaia, 1983). Montmorillonit dioktahedral yapıda bir mineral olup genel formülü $(Na,Ca)_{0,33}(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$ şeklindedir (Şekil 4.1). Birim hücreleri arasındaki Van der Waals bağlarının çok zayıf olmasından dolayı kolay ayrılabilir ve sabun gibi kayganlık hissi verirler. Montmorillonit minerali içeren killi zeminler yüksek plastiklik özelliği gösterirler.

Silika katmanındaki tetrahedronlardan bazılarının merkezine Si^{+4} iyonları yerine Al^{+3} ve Fe^{+3} gibi, alümina katmanındaki oktahedronlardan bazılarının merkezlerine ise Al^{+3} iyonları yerine Fe^{+2}, Mg^{+2}, Zn^{+2}, Ni^{+2} ve Li^{+} gibi yükseltgenme basamağı daha düşük

olan iyonlar geçer. İyonların değerliklerindeki bu farklılık sebebiyle yapıda negatif yük fazlalığı ya da pozitif yük eksikliği meydana gelir. Oluşan negatif yük fazlalığı da katmanlar arasına giren Na^{+}, Ca^{+2} ve Mg^{+2} gibi katyonların kil minerallerine bağlanması ile yani bir diğer deyişle katyonların adsorpsiyonu ile dengelenir. Bu şekilde örgü içinde yaklaşık aynı çapa ancak farklı pozitif elektrik yüküne sahip katyonların yer değiştirmesi izomorfik yer değiştirme olarak tanımlanır. İzomorfik yer değiştirmeler özellikle montmorillonit minerallerinde önemlidir. İzomorfik yer değiştirmelerin montmorillonitlerde fazla olması nedeniyle de yüklerin dengelenmesi için bağıl olarak adsorplanan katyonların miktarının fazla olması gerekir ve bu nedenle montmorillonitlerin katyon değişim kapasitesi değerleri yüksektir (Yalçın, 2000).

İnorganik ve organik tüm katyonlarla yer değiştirebilen Na^{+}, Ca^{+2} ve Mg^{+2} gibi katyonlar, katmanlar arasında doğal olarak yer alan suyun içinde bulunmaktadırlar. Bu katyonlardan Na^{+} iyonu katmanlar arasına girdiğinde sodyum montmorillonit, Ca^{+2} iyonu girdiğinde ise kalsiyum montmorillonit oluşmaktadır. Na^{+} iyonu Ca^{+2} iyonuna göre tabakalar arasına oldukça fazla miktarda suyun girmesine ve mineralin çok şişmesine neden olmaktadır (Parker vd. 1980). Na-montmorillonitin katman kalınlığı d(001)=1,26 nm iken Ca-montmorillonitin katman kalınlığı d(001)=1,55 nm'dir. Katman kalınlıkları farkı yardımıyla X-ışınları difraksiyonu izlerinden kil içindeki mineralin Na ya da Ca-montmorillonit olduğu kolaylıkla belirlenebilir. İyon değişimi ile Na ve Ca-montmorillonit birbirine tersinir olarak dönüştürülebilmektedir.



Şekil 4.1 (a) Kaolinitin ; **(b)** Montmorillonitin atomik yapısı.

4.2.3. Vermikülit grubu

Vermikülitler genişleyebilen üç tabakalı kil mineralleri olup dioktahedral ya da trioktahedral yapıda olabilirler. Yapıdaki yük 0,6-0,9 olup, montmorillonite oranla daha fazla tabaka yüküne sahiptir. Bu tabaka yükü tetrahedrondaki Al^{+3}'dan kaynaklanmaktadır. Tabakalar arasında iki moleküler su katmanı ve Ca^{+2} veya Mg^{+2} gibi katyonlar bulunmaktadır (Velde, 1992).

4.2.4. İllit-mika grubu

İllit grubu veya mika grubu kil minerallerinin simektit grubundan farkı potasyum (K^{+}) içermeleridir. T.O.T (2:1) tabaka yapısında olmalarının yanı sıra tabakaları negatif yüklüdür. Montmorillonit mineralinin T.O.T katmanlarındaki Si^{+4} iyonlarının %15-25'i yerine Al^{+3}, Al^{+3} iyonlarının bir kısmı yerine ise Fe^{+3} ve Mg^{+2} iyonlarının geçmesiyle illit minerali oluşmaktadır (Wentworth, 1970; Eberl ve Hower, 1976). İllit mineralindeki yük denkliği katmanlar arasında bulunan ve bir başka iyonla kolayca yer değiştiremeyen K^{+} iyonları ile sağlanmaktadır (Wentworth, 1970).

4.2.5. Klorit grubu

Tetrahedronların merkezindeki Si^{+4} yerine kısmen Al^{+3} geçmesiyle eksi yüklenen 2:1 tabakaları ile Mg^{+2} yerine kısmen Al^{+3} geçmesiyle artı yüklenen burisit tabakası arasındaki iyonik çekim kuvveti nedeniyle dört katmanlı klorit (T.O.T-O) tabakası oluşur. Kloritlerin dört tabakalı yapısında oluşan katmanların alt yüzeyinde tetrahedronlara ait oksijenlerin oluşturduğu oksijen düzlemi, üst yüzeyinde ise oktahedronlara ait hidroksillerin oluşturduğu hidroksil düzlemi bulunur. Bir katmanın oksijen düzlemi ile diğer katmanın hidroksilli düzlemi arasında oluşan hidrojen bağları nedeniyle yüzeyler ve dolayısıyla T.O.T-O tabakaları birbirine bağlanarak klorit partiküllerini oluşturur. Bu nedenle, klorit grubu killerin aynı kaolinit grubunda olduğu gibi şişmeleri ve tabakalar arası katyonları azdır. Klorit grubu kil mineralleri hidratlaşmış magnezyumlu alüminyum silikatlar olarak nitelenebilir (Yalçın, 2010).

5. ŞİŞEN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

Şişen zeminler su içeriği arttığında hacmi artan ve kuruduğu zaman büzülen zeminler olarak tanımlanır. Şişen bir zeminin söz konusu olması için bir zeminin önemli miktarda kil minerali içermesi ve muhtemelen Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması' nda CL veya CH grubunda yer alması gerekir. Bununla birlikte unutulmamalıdır ki bazı ML, MH ve SC grubundaki zeminler de şişme özelliği gösterebilir. Şişen zeminler kuruduklarında genellikle belirgin büzülme çatlaklarına ve önceden şişme büzülmenin diğer kanıtlarına sahiptirler. Bu tür bir görsel tanımlama sadece ilk aşama olup özel tasarım önerilerini geliştirmeden önce daha fazla bilgi elde edilmelidir (Yılmaz, 2007).

Killerin şişme özellikleri şişme potansiyeli kavramı ile ifade edilmektedir. Bir zemin örneği suya doygun hale gelinceye kadar bir şürşarj yükü altında bırakıldığında zeminde meydana gelen hacim artışının, başlangıçtaki örnek hacmine oranı şişme potansiyeli olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, zemin örneğinde oluşan hacimsel artış yüzdesidir (Uzer ve Olgun, 2006). Bir zeminin şişme potansiyeli Eşitlik 5.1 ile ifade edilir.

$$Sw = (\Delta H / H) * 100 \qquad [5.1]$$

Burada;
Sw = şişme potansiyeli,
ΔH = zeminde oluşan hacim artışı ve
H = zeminin başlangıçtaki yüksekliğidir.

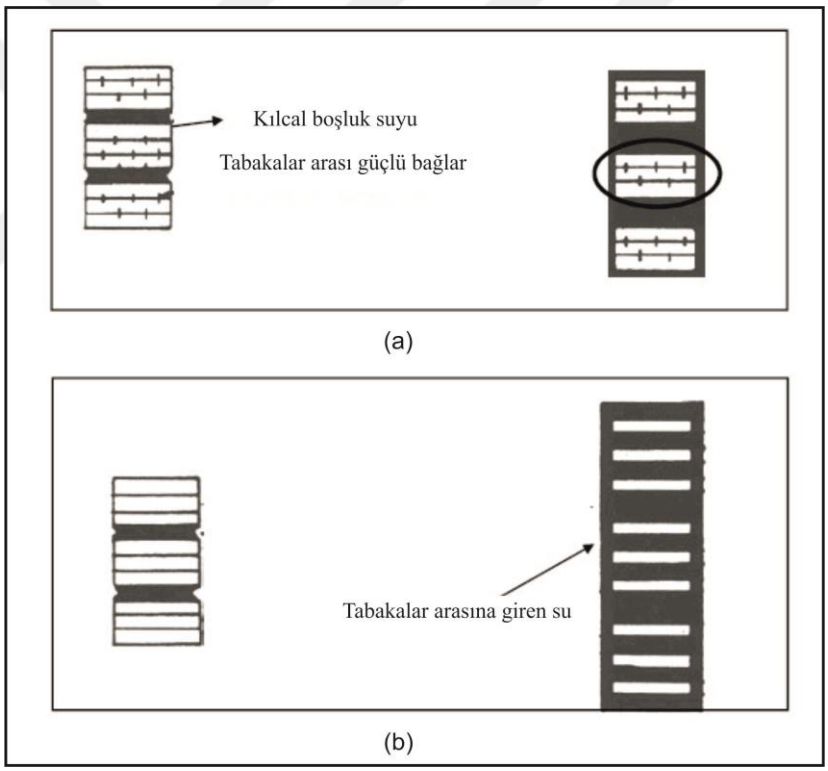
Zeminlerinin şişme davranışını ifade eden diğer bir kavram ise şişme basıncıdır. Şişme basıncı şişme potansiyeline sahip killi bir zeminin hacminde meydana gelebilecek değişikliğe engel olmak için uygulanan ek basınç olarak tanımlanabilir.

5.1. Şişmenin Mekanizması

Kil minerallerinin kristal kimyası killerdeki şişme olayında en önemli rolü oynamaktadır. Örneğin; kristal yapısı bakımından şişme potansiyeli yüksek olan montmorillonit, illit mineraline kristal yapısı açısından çok benzer. Ancak montmorillonite kıyasla birim yüzey alanındaki elektron yükü illitte daha fazladır. Dolayısıyla katmanlar arası bağ illitde çok daha güçlüdür ve bunun sonucu olarak su

illitteki bu güçlü bağları koparamamakta ve katmanlar arasına girememektedir (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989).

Killerdeki şişme olayında başlıca iki temel mekanizma vardır. Parçacıklar arasında oluşan şişme bunlardan ilkidir. Bütün kil minerallerinde bu tür şişme özelliği görülmektedir. Yaklaşık kuru kıvamda bulunan kil zeminlerde kristaller arasında bulunan kılcal boşluk kil kristallerini yüzey çekim kuvveti ile bir arada tutar. Bu kuvvetler kil zeminin su almasıyla beraber boşalır ve kilde şişme meydana gelir. İkinci şişme mekanizması ise kristal içerisindeki şişme olarak bilinir ve genellikle montmorillonit kil minerallerinde görülür. Bu şişme mekanizmasında kilin su ile temas etmesi sonucu suyun kristali oluşturan birbirine zayıf bir şekilde bağlı tabakaların arasına girmesi ile kilde şişme meydana gelmektedir (Popescu, 1986).



Şekil 5.1 (a) Parçacıklar arasında görülen şişme mekanizması ; **(b)** Kristal içerisinde görülen şişme mekanizması (Popescu,1986).

Montmorillonitin örgü yapısı, tetrahedral yapıdaki iki silika tabakası arasında yer alan oktahedral yapıda bir alümina tabakasından ibarettir. Oktahedral yapıdaki Al^{+3} iyonları yerine Fe^{+3} ya da Mg^{+2} iyonlarının veya tetrahedral yapıdaki Si^{+4} iyonları yerine Al^{+3} iyonlarının geçmesi ile kristal örgüsünde değişiklik olabilir. Bu sırada bozulan iyonik yük dengesinin yeniden kurulabilmesi için mineral Na^{+} ve Ca^{+2} gibi

iyonları adsorblar. Bu iyonlar yer değiştirebilir katyonlar adını alır ve su ile temas halinde su içerisindeki diğer iyonlarla yer değiştirebilir. Na^{+} iyonu Ca^{+2} iyonuna göre tabakalar arasına oldukça fazla miktarda suyun girmesine ve mineralin çok şişmesine neden olmaktadır.

5.2. Zeminlerin Şişme Davranışına Etki Eden Faktörler

Zeminlerin şişme davranışını etkileyen faktörleri üç grupta sınıflandırabilir (Nelson ve Miller, 1992). Bunlar;

- Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri,
- Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler,
- Şişme potansiyelini etkileyen gerilme şartları şeklinde sıralanabilir.

5.2.1 Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri

Kil mineralojisi

Mühendislik jeolojisinde yaygın olarak bilinen üç grup kil minerali montmorillonit, kaolinit ve illittir. Smektit grubuna ait montmorillonit şişen zeminlerin çoğunlukla içerdiği kil mineralidir. İllit minerali az veya orta derecede şişme gösterirken kaolinit genellikle şişme potansiyeline sahip olmayan bir kil mineralidir. Aşırı şişme gösteren ve problem oluşturan kil minerali ise montmorillonit mineralidir. Smektit grubu kil minerallerinde suyun tabakalar arasına girmesi ile büyük hacimsel artışların olması bu gruptaki kil minerallerinin en önemli özelliğidir (Önalp, 1997).

Zemin suyu kimyası

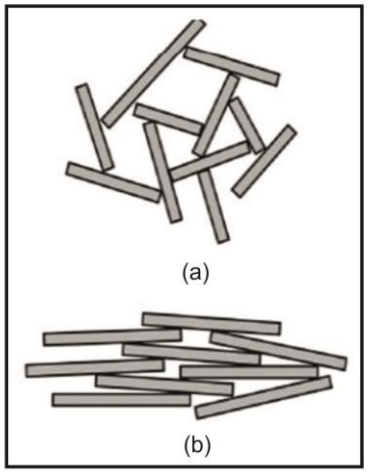
Killerde boşlukları dolduran suyun iyonik konsantrosyonu ve iyonların değerliği kilin hacimsel değişimini büyük ölçüde etkilemektedir. Örneğin; iyon konsantrasyonunun artması osmotik basınç farkının azalmasına neden olur ve çift tabaka bölgesindeki su dışarı çıkmaya başlar. Bu suyun çıkışı ile birim tabakalar arasındaki mesafeler azalır ve kilin sıkışmasına neden olur. Tam tersi olarak da konsantrasyonun azalması kilin şişmesine neden olur. (Di Maio, 1996).

Plastisite

Aslında bir zeminin şişme potansiyeli onun plastisitesi aracılığıyla gösterilebilir. Genel olarak daha yüksek şişme potansiyeline sahip zeminler daha yüksek plastite indisi ve daha yüksek likit limit değerlerine sahiptirler.

Zemin yapısı ve dokusu

Zemin partiküllerinin etkileşimi partiküller arası boşluk ve partiküllerin yönlenmesi tarafından etkilenir. Kilin temel yapısı foliküle ve dağınık (dispersif) yapı olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 5.2). Dağınık yapı net partikül kuvveti itici, foliküle yapı ise net partikül kuvveti çekici olduğu zaman oluşur. Dağınık (dispersif) killer foliküler yapılı killere oranla daha çok şişerler.



Şekil 5.2 (a) Foliküle yapı; **(b)** dispersif yapı (Lambe and Withman, 1969).

Kuru birim hacim ağırlık

Aynı su içeriğindeki örneklerin başlangıç kuru birim hacim ağırlığı arttıkça şişme basıncının artığı birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık ne kadar büyükse, bu o kilin partikülleri arasındaki mesafenin azaldığını gösterir. Başlangıç kompaksiyon koşulları örselenmiş zemin örnekleri için son derece önemlidir (Yıldırım, 2009).

5.2.2. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler

Başlangıç su içeriği

Sabit su içeriğine sahip killi bir zeminde, yüksek şişme potansiyeli hesaba katılmadan, zeminin su içeriği değişmezse hacim değişimi olmaz. Doğal su içeriği % 15'in altında olan çok kuru killer tehlikelidir. Bu tür killer kolaylıkla % 35 su içeriğine kadar su emebilir ve şişerek yapılara zarar verir. % 30 su içeriğinin üzerindeki killer şişmenin büyük oranda gerçekleştiğini ve daha fazla şişmenin çok az olacağını gösterir. Bununla beraber; yeraltı su seviyesinin altındaki killer su seviyesinin düşmesi veya fiziksel boşluklardaki değişimler yüzünden kuruyabilir. Tekrar suya doymaları halinde şişme potansiyeli yeniden ortaya çıkar (Yıldırım, 2009).

Nem değişimleri

Killerin bütün özelliklerine etki eden en önemli iki etmen su tutma enerjisi ve toplam su içeriğidir. Kilin su tutma enerjisi; hidrolik iletkenlik, konsolidasyon ve hacimsel değişimi, su içeriği ise; dayanım, yoğunluk ve kıvamlılık gibi temel özelliklere etki etmektedir (Kasapoğlu, 1989).

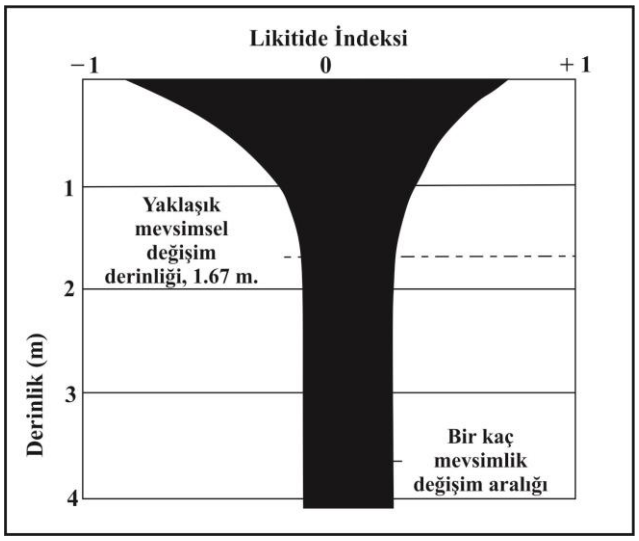
Kilin doğal su içeriği mühendislik uygulamalarının neredeyse hepsi tarafından bozulmaktadır. Doğal ve yapay yükler ile killer üzerine uygulanan gerilmeler ise kilin yapısındaki nemin hareket etmesine sebep olur ve bu nem hareketi killerde meydana gelen hacimsel değişimleri kontrol eden temel faktördür. Killerdeki nem hareketi kil-su sistemi içerisinde doygunluğun artması, sıcaklığın ve kimyasal bileşimin değişmesi sonucu oluşan içsel eğimden kaynaklanan kuvvetler ile oluşur (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989).

Killerin kuruduğu zaman büzülmesi, su emdiği zaman şişmesi gibi istenmeyen olaylar bu nem hareketlerinden ileri gelmektedir. Killerdeki kurumaya bitki terlemesi, ısınma ve buharlaşma neden olurken; yağışlar, yeraltı su tablasının yükselmesi ve baraj gibi bazı gibi mühendislik yapılarından sızan sular kildeki nem miktarının artmasına sebep olur. Killerdeki nem miktarının değişmesi, hemen her zaman hacimsel değişmelere sebep olur (Kasapoğlu, 1989).

Kuru bir kilin nem emme kapasitesi çok yüksektir. Kilin su emmesine neden olan diğer bir faktör su ile temas halinde bulunan ıslak bir kil zemine uygulanan basıncın azaltılmasıdır. Aşırı konsolide bir kilin şişmesi örnek olarak verilebilir. Kil denge gözeneklilik oranına ulaşıncaya kadar su emme ve hacimsel büyüme devam eder. Killerin su emmesi ile oluşan hacimsel büyüme kil üzerine uygulanan yük ve şişme basıncının bir fonksiyonudur (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989).

Aktif zon derinliği

Aktif zon derinliği su içeriği dalgalanmalarının en büyük olduğu derinlik olarak tanımlanır ve şişen zemin problemlerini değerlendirme aşamasında önemli bir kriterdir. Su içeriğinin bu derinlik altında sabit olduğu ve bu derinliğin altındaki bölgede şişme meydana gelmediği kabul edilir (Coduto, 2005). Şekil 5.3' de görüldüğü gibi bir sahadaki aktif zon derinliği likidite indeksinin (Lİ) derinlikle değişiminden yararlanarak yaklaşık olarak saptanabilmektedir (Das, 1999).



Şekil 5.3 Aktif zon derinliğinin yaklaşık olarak tayini (Das, 1999; Güngör, 2002).

İklim

İklim koşullarının değişmesi şişen killerin zemin emme basınçlarında önemli miktarda değişiklik oluşturmaktadır (Angın ve Angın, 2005). Ilıman iklimler zeminin nemli olmasına neden olurken, kurak iklimler zeminin kurumasını arttırır.

Yeraltı Suyu

Yeraltı suyunun değişken ve yüzeysel olması zeminin nem içeriğinin artmasına ve şişmesine yol açar (Mollamahmutoğlu ve Taşkıran, 2000).

Drenaj

Yüzey drenajının yetersiz olması nemin birikmesine ve göllenmeye neden olur. Bir bina temelinin etrafındaki zayıf yüzey drenajı, zayıf çatı drenajı ve sığ temelin yan tarafındaki bahçe küçük su kütlelerinin oluşmasına yol açar. Bu durum suyun temelin altında bulunan daha büyük derinliklerdeki zemine ulaşmasını sağlar. Ve su içeriğindeki artış şişen zeminlerin şişmesine neden olur (Forouzan, 2016).

Bitki örtüsü

Bir bölgede bitki örtüsünün yoğun olması zemin neminin azalmasına neden olur. Bitki örtüsünün seyrek olması ise nem birikimine yol açar.

Geçirimlilik

Arazideki fisür ve çatlaklar yüzünden oluşan yüksek geçirimlilik daha fazla su göçüne sebep olur ve bu durum daha çabuk şişmeye sebep olur (Forouzan, 2016).

5.2.3. Şişme potansiyelini etkileyen gerilme şartları

Gerilme tarihçesi

Killi zeminlerin şişme miktarını etkileyen faktörlerden biri de kilin gerilme tarihçesidir. Ön yükleme almamış olan zeminler daha önce aşırı yüklenmiş ve boşaltılmışlara oranla daha az şişme gösterirler.

Şişme büzülme çevrimi

Killerdeki şişme-büzülme davranışının yol açtığı sonuçları birçok araştırmacı farklı şekilde yorumlamıştır. Kimi araştırmacılar killi zeminlerin periyodik olarak şişme ve büzülmeye bırakılmaları durumunda, zeminin her bir çevrimin ardından yorgunluk işareti gösterdiği ve bunun sonucu olarak daha az şişme gösterdiğini düşünürken (Chen ve Ma, 1987; Subba Rao ve Satyatas, 1987), başka araştırmacılar ıslanma ve kuruma çevrimi sayısının arttıkça zeminin şişme potansiyelinin de arttığı sonucuna varmışlardır (Popesco, 1980; Day, 1994). Ancak konu üzerinde çalışmış olan bütün araştırmacılar şişmenin belirli bir sayıdaki şişme-büzülme çevriminin ardından denge durumuna geldiği konusunda hem fikir olmuşlardır.

Yükleme

Sürşarj yükünün büyüklüğü belirli nem içeriği ve yoğunlukta meydana gelecek hacim değişiminin miktarını belirler.

Zemin Profili

Şişen zeminlerdeki potansiyel hacim değişimleri, zemin profilindeki potansiyel olarak şişen katmanların kalınlığı ve lokasyonundan önemli ölçüde etkilenir. Zemin yüzeyinden aktif zonun derinliklerine kadar uzanan bir kalınlığa ve yüksek şişme potansiyeline sahip killerin bulunduğu durumlarda çok büyük hareketler meydana gelir. Şişen zemin katmanı şişmeyen bir malzeme tarafından örtüldüğü zaman daha az şişme hareketleri meydana gelir (Forouzan, 2016).

Zemin Emmesi

Zemin emmesi bağımsız bir etkin gerilme değişkeni olan önemli bir parametredir. Doygun olmayan zeminlerde zemin emmesi negatif boşluk suyu basıncı ile temsil edilir. Yerçekimi, yüzey gerilmesi, boşluk boyutu ve şekli, doygunluk, zemin partiküllerinin ve suyun elektriksel ve kimyasal özellikleri zemin emmesini etkiler (Forouzan, 2016).

6. ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANMASI

Projenin ön araştırma safhasında şişen zeminlerin doğru olarak tanımlanması, ileri aşamalarda yapılacak olan tasarım işlemlerinin doğru bir şekilde yapılmasına yardımcı olacaktır. Bu amaçla, zemin şişen zemin olarak tanımlandıktan sonra uygun örnekler alınarak tasarımda kullanılacak değerler belirlenmelidir. Şişen zeminlerin şişme özelliklerini belirlemek maksadıyla çok sayıda deney ve tanımlama yöntemi olmasına rağmen bunlardan hiçbiri dünya çapında geniş bir uygulama alanına sahip değildir. Sonuç olarak, hatalar ve farklı değerlendirmeler ortaya çıkmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Taşkıran, 2000). Zeminlerin şişme karakteristiklerini belirleyen yöntemler temelde iki gruba ayrılabilir. İlk grup niteliksel yöntemler olup, bu yöntemde kolloid içeriği, Atterberg limitleri, birim hacim ağırlıkları gibi zemin parametreleri kullanılarak korelasyon yoluyla zeminin şişme potansiyeli düşük, orta, yüksek, çok yüksek gibi terimlerle ifade edilir. Diğer grup niceliksel yöntemler olup, çeşitli deneyler ile zeminin tek eksenli şişme değerleri elde edilir. Ayrıca tarım ve jeolojik amaçlı başka deney yöntemleri de vardır ve bunlar zeminin mineralojik ve kimyasal yapısı ile ilgili ek bilgi verdiği için önemlidir (Demir ve Kılıç, 2010).

6.1. Şişen Zeminlerin Dolaylı Olarak Tanımlanması

Günümüzde, bütün zeminler için şişme-büzülme potansiyelini kesin olarak tahmin eden bir yöntem bulunmamaktadır. Zemin bilimciler zeminin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin bir kombinasyonunun incelenmesiyle şişme büzülme davranışının en iyi şekilde tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Bir zeminin içerdiği kil mineralinin türü ve miktarı zeminin şişme özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla, killi bir zeminin içerdiği ana kil mineralinin belirlenmesiyle o zemine ait şişme özelliklerine de yaklaşımda bulunulabilmektedir. Örneğin; smektit içeriği zeminlerde şişme ve büzülme davranışını kontrol eden bir zemin özelliği olarak bilinmektedir. Şişen zeminlerle ilgili çalışmaların çoğu smektit grubu kil miralleri içeren zeminler üzerinde yürütülmüştür. Çeşitli kil minerallerine ait şişme potansiyeli tanımlanması Çizelge 6.1‘de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Çeşitli kil minerallerine göre şişme potansiyelinin sınıflanması (Mitchell, 1976).

Kil Minerali	Şişme Potansiyeli
Kaolinit	Çok düşük
İllit	Orta
Montmorillonit	Yüksek
Vermikülit	Yüksek
Klorit	Yok

Kil minerallerinin tanımlanması için kullanılan çeşitli teknikler vardır. Bunlar arasında en yaygın olanları; X-ışını kırınımı (XRD), diferansiyel termal analiz (DTA), taramalı elekton miktaskobu (SEM), kızıl ötesi spektroskopisi ve boya adsorbsiyonu yöntemleridir.

Plastisite indeksi (I_p) en yaygın olarak kullanılan şişme davranışı göstergesidir. Atterberg limitleri zeminlerin kıvam değişimini veren su içeriği sınırlarıdır. Likit limit zeminin kendi ağırlığı altında akabilmesi için gerekli olan su içeriğidir. Tipik olarak smektitin baskın olduğu killi zeminler şişmeyen killerden (kaolin, mika) ya da sınırlı şişmeye sahip minerallerden (vermikülit) oluşan killi zeminlerden daha fazla su adsorbe ederler. Plastik limit zeminin plastik halden yarı katı hale geçtiği durumdaki su içeriğidir. Yani zeminlerin plastik durumda olduğu su içeriği aralığının alt sınırını karakterize eder (Hillel, 1980). Plastisite indeksi likit limit ve plastik limit arasındaki farktır, yani zeminin plastik halde bulunduğu su içeriği aralığıdır. Şişen zeminlerde plastisite indeksine bağlı olarak yapılan sınıflama Çizelge 6.2 de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Plastisite indeksine bağlı olarak yapılan şişen zemin sınıflaması (Chen,1988).

Şişme Potansiyeli	Plastisite İndeksi
Düşük	0-15
Orta	10-35
Yüksek	20-55
Çok yüksek	≥35

Ayrıca, Holz ve Gibbs (1956) zeminlerin şişme davranışını Atterberg limitleri, kolloid içeriği ve tahmini şişme değerleriyle ilişkilendirmiştir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3 Şişme davranışının indeks özelliklere bağlı olarak tanımlanması (Holtz ve Gibbs, 1956).

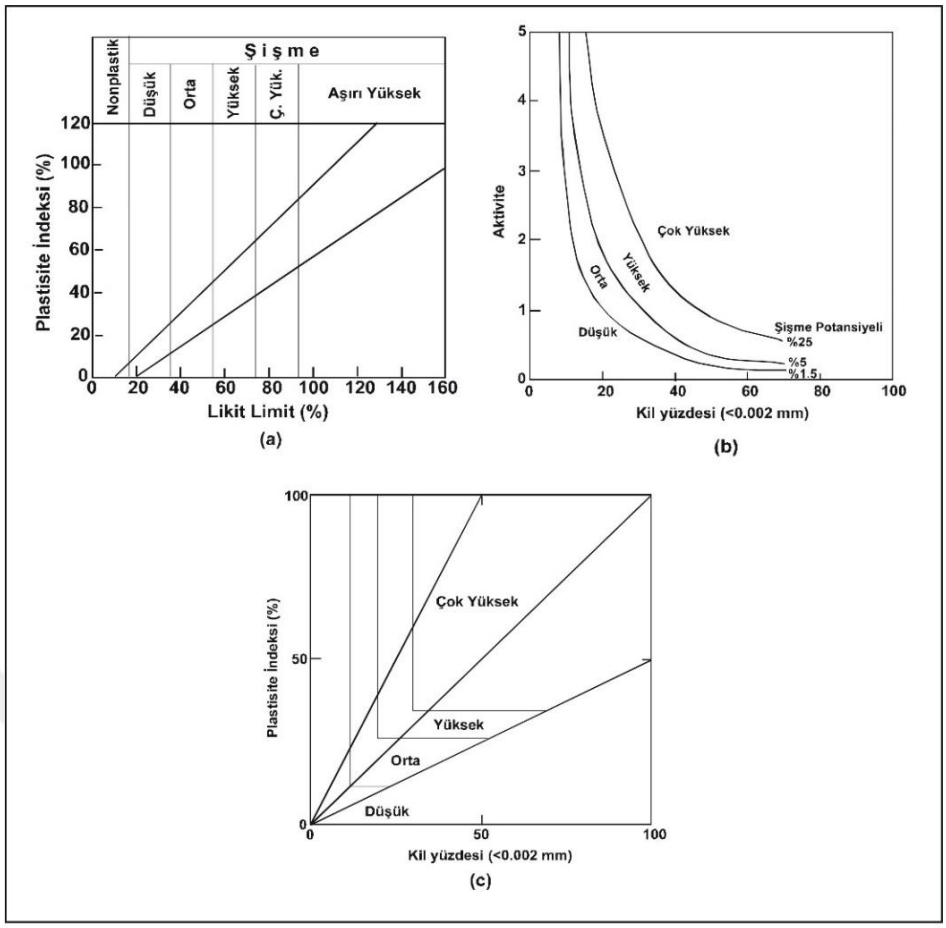
Kolloid içeriği (%)	Plastisite indeksi (%)	Büzülme limiti (%)	Likit limit (%)	Tahmini şişme (%)	Şişme potansiyeli
<15	<18	>15	<39	<10	Düşük
13-23	15-28	10-16	39-50	10-20	Orta
20-31	25-41	7-12	50-63	20-30	Yüksek
>28	>35	<11	>63	>30	Çok yüksek

Zeminlerin plastisite özellikleri ve hacim değişimi davranışının zemindeki kolloidal tane miktarıyla doğrudan ilişkili olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle Atterberg limitleri ve kil içeriği Skempton (1953) tarafından geliştirilen, aktivite katsayısı olarak adlandırılan tek bir parametrede birleştirilmiştir. Bu katsayı aktivite indeksi olarak da bilinir ve Eşitlik 6.1 ile tanımlanır.

Aktivite (A) = Plastisite indeksi (Ip) / Kil yüzdesi [6.1]

Skempton (1953), killeri aktivite katsayısına göre 3 sınıfa ayırmıştır; aktivite katsayısı 0.75'den küçük olan killer inaktif killer, aktivite katsayısı 0.75-1.25 arasında olan killer normal killer ve aktivite katsayısı 1.25'den büyük olan killer aktif killerdir. Aktif killer şişme potansiyeli en yüksek olan killerdir. Ca-montmorillonitin tahmin edilen aktivite katsayısı 1,5 iken Na-montmorillonit 7' den büyük bir aktivite katsayısına sahiptir. Kaolinitin aktivitesi 0.3, mikanın aktivitesi ise yaklaşık 1' dir. Fakat aktivite sınıflaması karışık mineralojiye sahip zeminlerde şişme potansiyelini kesin olarak tahmin edememektedir. Parker vd. (1977), aktivite katsayısının hem karışık hem de montmorillonitik mineralojiye sahip zeminlerde kesin ve doğru sonuçlar vermediğini vurgulamıştır. Diğer taraftan Schreiner (1988), zemin ve bentonit-kum karışımlarında şişme potansiyelini tahmin etmek amacıyla aktivite katsayısını kullanmış ve tutarlı eğilimler gözlemiştir.

Bazı araştırmacılar şişen zeminlerin tanımlanması amacıyla çeşitli parametrelere bağlı olarak sınıflama abakları önermişlerdir. Şişen zeminleri tanımlamak için Dakshanamanthy ve Raman (1973) plastisite indeksi ve likit limite; Seed vd. (1962) aktivite ve kil yüzdesine; Van Der Merve (1964) ise plastisite indeksi ve kil yüzdesine bağlı olarak sırasıyla Şekil 6.1' deki abakları geliştirmişlerdir.



Şekil 6.1 Şişen zeminlerin çeşitli parametrelere bağlı olarak tanımlanması.

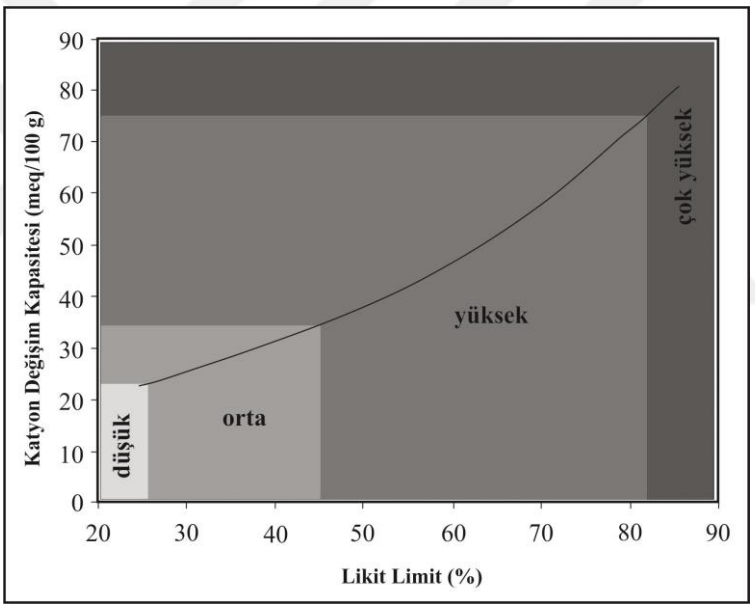
Şişen zeminleri tanımlamak için kullanılan diğer bir parametre katyon değişim kapasitesidir. Kil partiküllerinin yüzeyindeki negatif yükleri dengelemek için gereken değişebilir katyonların miktarı katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak ifade edilir. Kil minerallerinin oluşumu sırasında, tetrahedronlarda veya oktahedronlarda bulunan katyonların yerine daha düşük değerlikli katyonlar, örneğin tetrahedronlardaki Si^{+4} yerine Al^{+3} katyonu veya oktahedronlardaki Al^{+3} yerine Mg^{+2} katyonu geçebilir. Diğer bir deyişle, birbirine yaklaşık aynı çapta fakat farklı pozitif elektrik yüküne sahip katyonlar yer değiştirmiş olur. Bunun sonucu olarak kil minerallerinde negatif yük fazlalığı ortaya çıkar (Uğur, 2005). Katyon değişim kapasitesi ortaya çıkan bu yük dengesizliğini giderebilmek için gerekli katyon miktarıdır ve meq/100 g olarak ifade edilir. Katyon değişim kapasitesi bir zemindeki kilin türü ve miktarıyla yakından ilişkilidir. Şişme potansiyelindeki artışa bağlı olarak KDK değerlerinde artış gözlenir. Ayrıca spesifik yüzey alanının artmasıyla da KDK değerleri artmaktadır. Çizelge 6.4' de en çok bilinen üç kil mineralinin katyon değişim kapasitesi değerleri verilmiştir. İzomorfik yer değiştirmelerin montmorillonitlerde fazla olması nedeniyle de yüklerin

dengelenmesi için bağıl olarak adsorplanan katyonların miktarının fazla olması gerekir ve bu nedenle montmorillonitlerin KDK değerleri yüksektir (Yalçın, 2000).

Çizelge 6.4 Bazı kil minerallerinin KDK değerleri (Grim, 1968).

Kil Minerali	KDK (meq/100 g)
Kaolinit	3-15
İllit	10-40
Montmorillonit	80-150

Yılmaz (2006), yapmış olduğu çalışmada şişen zeminleri tanımlamak için katyon değişim kapasitesi ve likit limite bağlı olarak yeni bir şişme abağı önermiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Şişen zeminlerin KDK ve likit limite bağlı olarak tanımlanması (Yılmaz, 2006).

Yukarıdaki bilgilerden anlaşılacağı üzere zeminlerin şişme davranışını etkileyen farklı fiziksel, kimyasal ve mineralojik zemin özellikleri vardır. Sadece tek bir özellik bütün zemin türleri için şişme potansiyelini kesin olarak tahmin edemez. Fakat en çok şişen zeminlerin genellikle yüksek katyon değişim kapasitesine, yüksek özgül yüzey alanına, yüksek likit limite ve yüksek aktivite katsayısına sahip killer olduğunu söyleyebiliriz. Şişen zeminlerle ilgili olarak geliştirilen tanımlama ve sınıflama teknikleri nitel yöntemler olup zeminde meydana gelecek olası hacim değişikliklerine bir yaklaşımda bulunmayı sağlar. Dolayısıyla, bu yöntemler şişen zeminler üzerine

inşa edilecek mühendislik yapılarının tasarımı sırasında gerekli ön bilgiyi sağlamaktadır.

6.2. Şişen Zeminlerin Doğrudan Tanımlanması

Nem içeriği değişimlerine maruz kalan bir zeminin şişme davranışını doğrudan tanımlamak için farklı laboratuvar yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler; serbest şişme deneyi, şişme indeksi deneyi, genişleme indeksi deneyi, ödometre yöntemleri, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), potansiyel hacim değiştirme deneyi (PVC) ve doğrudan genişleyebilirlik katsayısı deneyi (COLE) olarak sıralanabilir.

6.2.1. Serbest şişme deneyi

Serbest şişme deneyi diğer yöntemlere göre daha basit bir yöntem olup zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Deney, belirli miktardaki bir zeminin şişmesi sonucu hacminde oluşan değişimin dereceli bir silindir yardımıyla ölçülmesi esasına dayanmakla birlikte literatürde farklı araştırmacılar tarafından önerilen değişik deney yöntemleri mevcuttur.

Holtz ve Gibbs' in (1956) önerdiği yönteme göre, 40 nolu elekten geçen 10 cm^3 kuru zemin örneği dereceli bir silindire eklenir ve su ile doldurulur. Zeminde oluşan hacim değişiminin ilk hacme oranı serbest şişme değerini vermektedir ve aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir.

$$FS = ((V - V_0) / V_0)) * 100 \quad [6.2]$$

Burada;

FS = Serbest şişme indeksi (%),
V = Zeminin son hacmi (cm^3),
V_0 = Zeminin ilk hacmidir.

Bu yöntemde, 10 cm^3' lük kuru zemin hacminin ölçülmesinde zorluklar ve belirsizlikler söz konusu olabilir. Bu sorunları giderebilmek için, Sivapullaiah vd. (1987) killerin şişme potansiyelini daha kolay ve iyi bir şekilde belirleyen modifiye serbest şişme indeksini (MFSI) önermişlerdir. Bu deneyde, öncelikle 10 gr zemin örneği kurutulur ve iyice öğütülür. Daha sonra örnek içerisinde 100 ml saf su bulunan dereceli bir silindire boşaltılır ve 24 saat sonra zeminin hacmi dereceli silindirden okunur. MFSI aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$MFSI = (Vd - Vs) / Vs \quad [6.3]$$

Burada;

MFSI = Modifiye serbest şişme indeksi,

Vd = Şişmeden sonraki zemin hacmi,

Vs = Zeminin tane hacmidir.

Sivapullaiah vd. (1987), modifiye serbest şişme indeksine bağlı olarak zeminlerin şişme davranışını Çizelge 6.5' deki gibi tanımlamışlardır.

Çizelge 6.5 Zeminlerin şişme davranışının modifiye serbest şişme indeksine bağlı olarak tanımlanması (Sivapullaiah vd., 1987).

MFSI	Şişme Potansiyeli
<2.5	Önemsiz
2.5-10	Orta
10-20	Yüksek
>20	Çok Yüksek

Sridharan ve Rao'nun (1988) önerdikleri yönteme göre ise, 10 gr ağırlığındaki kuru zemin örneği, içerisinde 40 ml saf su bulunan bir dereceli silindire boşaltılır ve süspansiyon karıştırılır. 24 saat bekledikten sonra dereceli silindire 100 ml'ye kadar su ilave edilir ve zemin örneğinin şişmesinin tamamlanması için beklemeye bırakılır. Zemin denge hacmine ulaştıktan sonra, hacmi kaydedilir. Serbest şişme indeksi Eşitlik 6.4 kullanılarak hesaplanır.

$$FSI = Vd / 10 \quad [6.4]$$

Burada;

FSI = Serbest şişme indeksi,

Vd = Zeminin son hacmidir.

6.2.2. Şişme indeksi deneyi

Bu deney yöntemi genellikle Na-bentonit gibi oldukça yüksek şişme potansiyeline sahip zeminlerin serbest şişmesini belirlemek için uygulanır. ASTM D-5890' da belirtilen deney yöntemine göre belirli miktardaki zemin örneği etüvde kurutulduktan sonra %100' ü 100 nolu ve %65'i 200 nolu elekten geçecek şekilde öğütülür. Öğütülen

zemin örneğinden 2 gr numune alınarak içerisinde 90 ml saf su bulunan dereceli silindire 0.1 g / 10 dk hızda boşaltılır. Böylelikle tanelerin iyice ıslanmasına ve dibe çökmesine izin verilir. Son ekleme yapıldıktan sonra silindirin kenarında kalan taneleri alacak şekilde su seviyesi 100 ml' ye tamamlanır ve 24 saat sonra zemin örneğinin hacmi dereceli silindirden okunur. Zeminin şişme indeksi ml / 2 g olarak ifade edilir.

6.2.3. Genişleme indeksi deneyi

Genişleme indeksi (EI) deneyi, şişme potansiyelini tahmin etmek için kullanılan basit ve etkili bir yöntemdir. ASTM D-4829' da belirtilen deney yöntemine göre, 4 nolu elekten geçen belirli miktardaki zemin örneği bir konsolidasyon halkasına sıkıştırılır ve örneğe 6.9 kPa' lık bir yük uygulanır. Daha sonra zemine saf su eklenerek, örnek doygun hale gelinceye kadar hacim değişimi ölçülür. Şişme indeksi (EI) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$EI=100\Delta h \times F \qquad [6.5]$$

Burada;

EI = genişleme indeksi,
Δh = şişme yüzdesi,
F = 4 nolu elekten geçen zemin yüzdesidir.

Şişme indeksi (EI) değerleri 50 den az olan zeminler düşük şişme potansiyeline sahip zeminler olarak değerlendirilirken, şişme indeksi 91'den büyük olan zeminler yüksek şişme potansiyeline sahip zeminler olarak kabul edilir (ASTM D4829-11).

6.2.4. Ödometre yöntemleri

ASTM D4546' da belirtilen deney standardına göre zeminlerin şişme davranışını belirlemek amacıyla geliştirilmiş üç değişik ödometre deneyi mevcuttur.

A yöntemi

Bu yöntemde zemin örneği 1 kPa sürşarj yükü atlında suya doygun koşullarda ödometre deney aletine yerleştirilir ve şişme tamamlanıncaya kadar beklenir. Daha sonra doğal boşluk oranı elde edilinceye kadar belirli yük kademeleri altında yüklenir.

B yöntemi

Doğal su içeriğine sahip zemin örneği ödometre aletinde sürşarj gerilmesi ve temel yüküne eşdeğer bir P_0 düşey gerilmesi altında bekletilir. Ardından örnek suya

doyurularak P_0 gerilmesi altında şişmenin dengelenmesi sağlanır. Son olarak klasik ödometre deneyindeki yükleme ve boşaltma aşamaları uygulanır.

C yöntemi

Bu yöntemde şişme basıncını bulmak için örnek suya daldırıldıktan sonra yüksekliğinin değişmemesini sağlayacak şekilde düşey basınç ayarlanır. Daha sonra konsolidasyon deneyindeki gibi yükleme ve boşaltma işlemleri uygulanır.

6.2.5. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi, karayolu ve havaalanı kaplamalarının projelendirilmesinde sıklıkla kullanılan, düşey şişmenin penetrasyon direncinin ölçülerek tanımlandığı bir yöntemdir. Zemin CBR silindirine belirli su içeriğinde sıkıştırılır ve bir sürşarj yükü altında birkaç gün boyunca su altında bırakılır. Sürşarj yükü zeminin arazide maruz kalacağı gerilmeye uygun olarak seçilir. Şişme okumaları ıslatma periyodundan önce ve sonra bir ölçüm saatiyle alınır. Zeminin şişme yüzdesi Eşitlik 6.6 kullanılarak hesaplanır (AASHTO T 193, 1993).

$$S = (\Delta H / 116.43) * 100 \qquad [6.6]$$

Burada;

S = Şişme yüzdesi,

ΔH = Yükseklikteki değişimdir (mm).

6.2.6. Potansiyel hacim değiştirme (PVC) deneyi

Potansiyel hacim değiştirme (PVC) deneyi Lambe (1960) tarafından Federal Konut İdaresi için geliştirilmiştir. Deneyde örselenmiş zemin örneği bir konsolidasyon halkasına 2600 kj/m^{3}' lük bir sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırılır ve örneğe su eklenir. Şişme davranışı yük halkasına karşı olan basıncın ölçülmesiyle tanımlanır. PVC yönteminin başlıca avantajı basit ve hızlı olmasıdır. Başlıca dezavantajı ise deneyde örselenmiş bir örnek kullanılır ve bu yüzden şişme-büzülme davranışı yaklaşık olarak tahmin edilir. Dolayısıyla bu yöntem temel tasarımlarında kullanılamaz (Thomas, 1998). Zeminin şişme-büzülme davranışının PVC deney sonuçlarına göre tanımlanması Çizelge 6.6' da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Zeminlerin şişme davranışının PVC deney sonuçlarına göre tanımlanması (Anonymous, 1993).

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

6.2.7. Doğrudan genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi

Doğrudan genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi şişen zeminleri tanımlamak için kullanılan bir büzülme deneyidir. Deneyde örselenmemiş bir zemin örneği suyu geçirmeyen fakat su buharını geçiren esnek ve plastik bir reçine ile kaplanır. Elde edilen bu zemin topağı 33 kPa' lık bir zemin emmesine getirilir ve hacmi Arşimet prensibi yardımıyla ölçülür. Daha sonra zemin topağı fırında kurutulur ve hacmi aynı yöntemle ölçülür. COLE zemin örneğinin nemli durumdan kuru duruma geçirildiğinde oluşan hacim değişikliği olarak tanımlanır ve Eşitlik 6.7 ile hesaplanır.

$$COLE = (\gamma_{kD} / \gamma_{kM})^{0.33\,-1} \qquad [6.7]$$

Burada;

COLE = Doğrudan genişleyebilirlik katsayısı,

γ_{kD} = Fırında kurutulmuş zemin örneğinin birim hacim ağırlığı,

γ_{kM} = 33 kPa emmede zemin örneğinin kuru birim hacim ağırlığıdır.

COLE yüzde olarak da belirlenebilmekte ve bu durumda doğrusal genişleyebilirlik yüzdesi (LEP) olarak isimlendirilmektedir. Zeminlerin şişme davranışı ve COLE (doğrusal genişleyebilirlik katsayısı) arasındaki ilişki Amerika Birleşik Devletleri Ziraat Departmanı Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından tanımlanmış ve bu tanımlama Çizelge 6.7' de sunulmuştur (USDA, 2005).

Çizelge 6.7 Şişen zeminlerin COLE değeri kullanılarak tanımlanması (USDA, 2005).

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

7. ŞİŞEN ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Şişen zeminlere dünyanın ve ülkemizin pek çok bölgesinde sıklıkla rastlanılmaktadır. Bu zeminlerin çeşitli faktörlerden dolayı nem içeriği değişimlerine maruz kalmaları sonucu hacimlerinde değişimler meydana gelmektedir. Bu hacim değişikleri özellikle hafif yapılar (tek katlı binalar), park alanları, yollar ve tretuvarlar, havaalanları, altyapı tesisleri, sulama kanalları, bahçe duvarları ve tüneller gibi yapılarda hasarlara neden olmaktadır. Şişen zeminlerde zemin hareketlerinin çok yavaş olmasından dolayı hasar uzun süre içinde oluşmaktadır, dolayısıyla sonuçlar depremler ve kasırgalardaki kadar acıklı olmaz ve yalnızca hasara sebep olurlar. Bununla beraber ekonomik kayıp fazla olup, bu kayıpların önemli bir kısmından sorunun tasarım ve inşaat çalışmalarında tespit edilmesi ve uygun önlemlerin alınmasıyla kaçınılabilmektedir (Yılmaz, 2007).

Şişen bir zeminle karşılan bir mühendis öncelikle temel zemininin şişme davranışını ve şişme potansiyelini doğru olarak tanımlamalıdır. Mühendislik projesinin inşa edileceği temel zemini düşük şişme potansiyeline sahipse standart inşaat çalışmaları uygulanır. Temel zemininin yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu durumlarda ise gerekli önlemler alınarak oluşacak sorunlar en aza indirgenir. Bu önlemler;

- **a.** Temel altındaki şişen zeminlerin kaldırılması,
- **b.** Kompaksiyon,
- **c.** Su içeriğinin korunması,
- **d.** Ön nemlendirme,
- **e.** Temeller ve döşemeler inşa edilmesi,
- **f.** Zeminin kimyasal katkı maddeleri iyileştirilmesi olarak sıralanabilir.

7.1. Temel Altındaki Şişen Zeminlerin Kaldırılması

Bu yöntemde şişen zemin ortamdan kazılarak uzaklaştırılır, yerine daha az şişen, özellikleri daha iyi olan zemin serilir ve optimum koşullarda sıkıştırılır (Das, 1995). Bu yöntem şişen tabakanın düşük bir kalınlığa sahip olması durumunda tabakanın tamamının kaldırılması, şişen tabakanın kalınlığının fazla olduğu durumda ise kaldırılması gereken kalınlığın belirlenip sadece bu kısmın kaldırılması ilkesine dayanır. Kaldırılacak kısmın kalınlığı alttaki tabakanın şişme potansiyeline bağlı olarak belirlenir. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin alttaki tabakaya su geçirmesini önlemek amacıyla granüler zemin olmamasına dikkat edilmelidir. Bu

yöntem özel aletler gerektirmediği için ve kısa sürede tamamlandığı için ekonomik olabilir. Ancak, dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin yapıya yakın bölgede bulunmasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde malzemenin taşınması için fazladan maliyet gerekebilir. Ayrıca, bazı durumlarda kaldırılması gereken zemin kaldırılamayacak kadar büyük ölçeklerde olabilir.

7.2. Kompaksiyon

Kompaksiyon zeminlerin tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtası ile su ve tane hacmi sabit iken havanın dışarı atılıp zemin tanelerinin sıkıştırılması olayıdır. Sıkıştırılmış bir zeminde kompaksiyon derecesi o zemine ait kuru birim hacim ağırlığıdır. Kuru birim hacim ağırlığı ne kadar büyükse zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir. Zeminlerin sıkıştırılması ile zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Şişen zeminlerin yüksek su içeriğinde ve düşük birim hacim ağırlığında sıkıştırılması ile zeminin kabarma miktarı düşer (Das, 1995). Kompaksiyon yöntemi kullanılarak zeminlerin şişme özelliğini azaltmak için gerekli olan koşul sağlanmaya çalışılır.

7.3. Su İçeriğinin Korunması

Zeminlerdeki şişme olayı şişen zeminin su içeriğindeki değişimler sonucu meydana gelmektedir. Dolayısıyla zeminin su içeriği kontrol altında tutulursa, şişmeden kaynaklanan hasarlar önemli ölçüde azaltılabilir. Nem bariyerleri kullanılarak, zeminde oluşan su içeriği değişimleri en aza indirgenebilir. Bu amaçla, yapıya yakın bölgelerde geçirimsiz tabakalar oluşturulur. Ayrıca, inşaattan sonra, yapı altındaki ve çevresindeki zeminin su içeriğinin değişmemesi için yüzey drenajı uygulanabilir. Buna ek olarak, sulama ile toprak neminin artmasına sebep olduğu için ve kökleriyle aşırı su çektiği için yakın mesafedeki bitki örtüsü kontrol edilerek de nem içeriği değişimleri önlenebilir (Yılmaz ve Karacan, 1998).

7.4. Ön Nemlendirme

Bu yöntemde yapının inşasından önce temel zemini su altında bırakılarak zeminin şişmesi sağlanır. Zeminin şişmesi sağlandıktan sonra düşük şişme değerleri göstereceği düşünülmektedir. Yüksek plastisiteli killerin oldukça düşük geçirimlilik değerlerine sahip olmalarından dolayı bu yöntem çok uzun zaman alabilmektedir. Ayrıca, zeminin su içeriği arttırıldığında zeminin dayanımının önemli ölçüde azalabileceği göz önüne alınmalıdır. Su ıslatılan zeminin altındaki tabakaya da

sızabileceğinden dolayı buradaki zemini de etkileyecektir. Bunun sonucu olarak yapıda önemli hasarlar meydana gelebileceği unutulmamalıdır (Demir ve Kılıç, 2010).

7.5. Temeller ve Döşemeler İnşa Edilmesi

Tek katlı binalar şişme ve büzülme olayından kaynaklanan hasarlara eğilimlidirler. Temel zemininin şişmesi veya büzülmesi sonucu binanın değişik noktalarında yer değiştirme hareketi meydana gelir. Ve genellikle binanın bir noktasındaki yer değiştirme ile başka bir noktasındaki yer değiştirme miktarı eşit değildir. Dolayısıyla farklı oturmalardakine benzer problemler ortaya çıkar. Koruyucu önlem olarak temeller en büyük nem değişim bölgesini geçerek daha kararlı bir zemine kadar uzatılabilir. Ayrıca, temellere ve döşemelere ilave donatı çeliği koyulabilir.

7.6. Şişen Zeminlerin Kimyasal Katkı Maddeleri ile İyileştirilmesi

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi diğer yöntemlere göre daha ekonomik olduğundan dolayı çok geniş bir şekilde uygulanmaktadır. Jeoteknikte deniz kabuğundan yanmış yağ atığına hatta fosforik asite kadar pek çok kimyasal madde zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Ancak yüzlerce madde incelenmesine rağmen bunlardan sadece bir kaçı sürekli uygulanma olanağı bulmuştur. Bunlar etkinlik, ucuzluk ve kolayca bulunabilme özelliklerine sahip olan çimento, kireç, uçucu kül, bitüm, kalsiyum bileşikleri, reçine ve polimerlerdir (Van Impe 1989). Bu maddeler arasında şişen killerin iyileştirilmesi bakımından yaygın olarak kullanılan ve performansı konusunda hemen hemen görüş birliği oluşmuş olan katkı maddesi ise kireçtir.

Sorunlu bir zemini iyileştirmek için kullanılacak en uygun katkı maddesini seçmek için aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır (Molenaar, 2007).

- Kullanılacak katkı maddesinin söz konusu zemini iyileştirme performansı iyi olmalıdır,
- Kullanılacak katkı maddesi çevreye (su, bitki, toprak ya da hayvan) zarar vermemelidir,
- Taşıma maliyetini arttırmaması için kolay ulaşılabilir olmalıdır,
- Doğada kolay bulunabilir olmalıdır,
- Ekonomik olarak uygun olmalıdır,
- Kür süresinin inşaat süresi üzerinde negatif bir etkisi olmamalıdır.

Aşağıda zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan bazı katkı maddelerinin özellikleri açıklanmıştır.

7.6.1. Şişen zeminlerin çimento ile iyileştirilmesi

Ana hammaddesi kalker, kil ve alçıtaşı olan çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bağlayıcı bir maddedir. Çimento ile iyileştirme daha çok çakıllı, kumlu ve düşük plastisiteli killi zeminler için uygulanmakta ve etkili olmaktadır. Çimento stabilizasyonu ile zeminlerin hacim değiştirme potansiyeli, likit limiti ve plastisite indeksi azalmakta iken rötre limiti artmaktadır. Ayrıca çimento, zeminlerin geçirgenliğini azaltıcı yönde bir etki yapmaktadır. Çimento ile iyileştirilmiş bir zemin elde etmek için çimento arazideki zemine serilerek zeminle karıştırılır, ardından su eklenerek tekrar karıştırılır ve çok bekletmeden sıkıştırma işlemine geçilir. Çimento ile iyileştirilmiş bir zeminde sonradan çatlaklar oluşabileceği göz önünde tutulmalıdır (Aytekin, 2004).

7.6.2. Şişen zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi

Uçucu küller termik santrallerde linyit kömürü ve taş kömürünün yanması sonucu oluşan silisli ve alimünosilisli toz halindeki bir yanma kalıntısıdır (TS 639). Uçucu kül puzolon bir maddedir. Puzolonlar kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun sıcaklıklarda ve su içeriklerinde kireçle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği olan ürünler (kalsiyum silika hidrat, CSH) açığa çıkaran silis veya silis-alümin kökenli malzemelerdir (ASTM C618). Genel bir puzolonik reaksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \longrightarrow CSH$$

Burada, SiO_2: puzolon, $Ca(OH)_2$: sönmüş kireç, H_2O: su ve CSH: kalsiyum silika hidrate yapıdır.

Uçucu külün puzolonik özelliklerinden dolayı uçucu kül katkılı zemin belirli bir süre sonunda dayanım kazanır. Bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolonik özelliği de artar. Ayrıca, CaO içeriği yüksek olan uçucu küller daha iyi puzolonik özellik gösterirler (EİE, 1979).

Uçucu küller, ASTM C618' e göre F ve C sınıfı uçucu küller olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller taş kömürünün yakılması sonucu elde edilir ve içerisindeki serbest kireç (CaO) oranı % 10'dan azdır. Bu tür uçucu küller su ile

karıştırıldığında sertleşme özelliğine sahip değildirler. Sulu ortamda kireç ile karıştırıldıklarında sertleşme gösterebilirler, dolayısıyla kireç ile beraber kullanılmaları tercih edilmektedir. C sınıfı uçucu küller ise linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilirler. Bünyelerinde % 10'dan fazla CaO bulunmaktadır. İçerdiği yüksek kireç oranı nedeniyle kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptirler (Alkaya, 2002).

Şişen killer uçucu külle iyileştirildikleri zaman uçucu kül içerisindeki Ca iyonları kilin içerisinde bulunan Na iyonları ile yer değiştirerek kilin şişme potansiyelinin azalmasını sağlar. Uçucu kül ile yapılan iyileştirme sonucu zeminin plastisite indeksi azalır, rötre limiti ise artar (Alkaya, 2002).

7.6.3. Şişen zeminlerin tuz ile iyileştirilmesi

Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan tuzlar sodyum klorid ve kalsiyum klorid olarak sayılabilir. Bu tuzlar zeminin su içeriğinin korunmasını sağlamakta ayrıca rötre limitini ve kayma dayanımını arttırmaktadır. Tuzlar suyun donma derecesini düşürürler, dolayısıyla donmadan kaynaklanan şişme problemlerini çözmek için kullanılabilirler. Ancak çözünerek ortamdan uzaklaştıkları için belirli aralıklarda stabilizasyon tekrarını gerekli kılmaktadırlar. Dolayısıyla bu yöntem çok ekonomik olmamaktadır (Çetin, 2003).

7.6.4. Şişen zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi

Şişen zeminlerin iyileştirilmesi için en sık başvurulan yöntem kireç katkısıdır. Kireç tabiatta serbest olarak bulunmamaktadır. Fakat çok eski zamanlardan beri tanınmakta, elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Eski Mısırlılar ve Yunanlılar kireç yapma ve kullanmasını birçok yerlerde tatbik ettikleri gibi eski Romalılar da yanardağ küllerini kireçle karıştırma suretiyle bağlayıcı bir takım maddeler elde etmişlerdir. Romalıların kullandığı bu karışımlar su altında bile sertleşme kabiliyetini göstermektedir (Hakdiyen, 1972). Kireç, zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla da çok eski zamanlardan günümüze kadar değişik yöntemler denenerek kullanılmakta ve olumlu sonuçlar elde edilmektedir.

7.6.4.1. Kireç elde edilmesi

Kireç elde edilmesinde kireçtaşı yani kalker ($CaCO_3$) kullanılır. Kullanılacak kalkerin saflık derecesinin ve ısıtma işinin elde edilecek kireç üzerinde büyük tesiri vardır. Kalkerin özel fırınlarda 9000-1000 °C ısıtılmasıyla sönmemiş kireç elde edilir.

Sönmemiş kirece su ilave edilirse ısı açığa çıkar ve sönmüş kireç elde edilir. Sönmüş kireç ince toz halinde bir malzeme iken, sönmemiş kireç granüler bir malzemedir (Tüdeş, 1996).

$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2 — 42,500$ cal (CaO: sönmemiş kireç)

$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$ ($Ca(OH)_2$: sönmüş kireç)

7.6.4.2. Kirecin iyileştirme performansını etkileyen faktörler

Kirecin şişen zeminleri iyileştirmesindeki performansını etkileyen faktörlerden biri kullanılan kirecin türüdür. Kireç ile iyileştirme sırasında sönmüş kireç ya da sönmemiş kireç kullanılabilir. Genel olarak sönmemiş kireç sönmüş kirece göre daha etkili olmasına rağmen sönmemiş kirecin yakıcı ve tehlikeli olmasından dolayı sönmüş kireç daha çok tercih edilmektedir.

Kirecin iyileştirme performansını etkileyen bir diğer faktör ise zeminin içerdiği kil mineralinin türüdür. Bütün kil mineralleri kireçten etkilenir, ancak yüksek silis içeriğine sahip killer daha güçlü bir reaksiyon verirler. Bu yüzden, tabakalarının her iki tarafında da silika katmanı bulunan üç katmanlı kil mineralleri, tabakalarının yalnızca bir yüzeyinde silika katmanı bulunan iki katmanlı kil minerallerine göre daha reaktiftirler. Ancak, bir silika katmanı diğer bir katmana kolaylıkla değişmeyen iyonlarla bağlı ise bu durumda kil üç katmanlı bile olsa silis reaktif olarak değerlendirilemez. Dolayısıyla, illit ve klorit mineralleri montmorillonit mineraline göre daha az reaktiftirler (Bell ve Coulthard, 1990).

Zeminin içerdiği kil mineral fraksiyonu da kirecin iyileştirme performansını etkilemektedir. Yüzeysel karıştırma yönteminde eklenmesi gereken uygun kireç miktarı zeminin kil mineral içeriğiyle ilgilidir. Ingles ve Metcalf (1972), siltli killerin iyileştirilmesi için % 2-4 oranında kireç miktarı önerirken, yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesi için %3-8 oranında kireç kullanılmasını önermektedirler. Mukavemete olan etkisinin az olmasından dolayı %8' in üzerinde kireç katkısı önerilmemektedir. Ingles' a (1987) göre, karışım oranları belirlenirken dikkate alınması gereken temel kural zemindeki her % 10 kil içeriği için % 1 kireç uygulanması yönündedir.

Zeminin içerdiği kilin türü ve miktarına ek olarak, kirecin killi zeminleri iyileştirme performansını etkileyen diğer faktörler zeminin organik madde içeriği, sülfat içeriği

ve nem içeriğidir. Organik maddeler kalsiyum iyonlarını adsorbe ettikleri için hidrasyonu geciktirebilir veya engelleyebilirler. Bu durum kireçle iyileştirilmiş zeminin dayanımında olumsuz bir etkiye yol açar. Genel olarak fazla organik madde ihtiva eden zeminler kireç ile iyileştirmek için elverişli değillerdir. Ancak bazı araştırmacılar organik maddenin zeminde oluşan puzzolonik reaksiyonları etkilemediğini ve yaklaşık %2' lik kireç katkısının organik maddenin temel değişim kapasitesini karşıladığını belirtmişlerdir (Yıldırım, 2002). Zeminin kireç ile iyileştirilmesinde önemli olan diğer bir faktör sülfat içeriğidir. Sherwood (1962), zemin içerisinde aşırı miktarda bulunan sülfatın kireçle iyileştirilmiş zemin üzerinde yıkıcı etkilere sahip olduğunu rapor etmiştir. Zemin içerisindeki sülfat kireç ile reaksiyona girerek zeminde şişme ve kabarmalara yol açmakta ve zemin içerisinde oluşan bağları zayıflatmaktadır. Dolayısıyla aşırı miktarda sülfat içeren zeminlerde kireç stabilizasyonu önerilmemektedir. Zeminin nem içeriği de kireç ile iyileştirmede oldukça önemlidir. Kireç katkısı zeminin su içeriğini azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Kireç-zemin reaksiyonları zemindeki su içeriğinin çok düşük olduğu durumlarda sekteye uğrayacaktır. Bu yüzden daima nemli kürler tercih edilmektedir (Bell ve Coulthard, 1990). Ayrıca kolon tekniği kullanılarak yapılan iyileştirmelerde, zemin içerisindeki su kireçteki iyonların kolondan itibaren göç edebilmeleri için oldukça gerekli bir faktördür.

Genel olarak plastik olmayan veya düşük plastisite indeksine sahip olan zeminlerin iyileştirilmesi için kirecin tek başına kullanılması etkili olmamaktadır. Bu durumda kireç ve uçucu kül beraber kullanılırsa kirecin zeminle olan reaksiyonu sağlanmış olur. İri taneli zeminler için ise kireç-çimento-uçucu kül karışımı daha iyi sonuçlar vermektedir (Tumluer, 2006). Dolayısıyla kireç genellikle yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde etkili olabilmektedir.

7.6.4.3. Zemin ve kireç arasında meydana gelen reaksiyonlar

Kili bir zemine kireç eklendiği zaman zeminin mühendislik özelliklerini değiştiren bir takım kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bunlar; katyon değişimi, kilin flokülasyonu (topaklaşması), karbonatlaşma ve puzzolonik reaksiyonlardır. İlk iki reaksiyon kısa bir süre içinde gerçekleşir. Puzzolonik reaksiyonlar ise uzun bir dönem içerisinde yavaş bir şekilde gerçekleşir. Killi zemin ile kireç arasında ilk olarak kilin kirece olan kimyasal afinitesinden dolayı katyon değişimi reaksiyonu meydana gelir.

Kil minerallerinin katmanları arası kalsiyumla doyurulduktan sonra puzzolonik reaksiyonlar oluşmaya başlar.

Katyon değişimi reaksiyonlarında, kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonları kil içerisinde mevcut olan tek değerlikli katyonlar ile yer değiştirir. Örneğin; Na-montmorillonit kilinden oluşan bir zemine kireç eklendiği zaman kireçteki Ca^{+2} iyonları kildeki Na^{+} iyonları ile yer değiştirir. Böylelikle Na-montmorillonit Ca-montmorillonite dönüştürülebilmektedir. Na-montmorillonit Ca-montmorillonite oranla oldukça fazla şişme özelliği göstermektedir. Dolayısıyla, kirecin eklenmesiyle oluşan katyon değişimi reaksiyonu ile zeminin şişme özelliği önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Flokülasyon topaklanma anlamına gelir. Flokülasyona katyon değişimi ya da kil partiküllerini çevreleyen sulu çift katmanların boyutlarındaki değişim neden olur. Hilt ve Davidson (1960), her iki sürecin de kil partiküllerinin etrafındaki elektriksel yükü değiştirerek partiküller arasındaki elektriksel çekimi arttırdığını ve bu durumun flokülasyona sebep olduğunu rapor etmişlerdir.

Zemine eklenen kirecin neden olduğu bir diğer reaksiyon karbonatlaşmadır. Karbonatlaşma, kirecin havadaki CO_2 (karbondioksit) ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Bu reaksiyon, $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat) gibi zayıf çimentolama maddeleri oluşturduğu için kirecin iyileştirme performansını azaltacaktır. Bu bağlamda, kirecin zeminle karıştırılma aşaması oldukça önemlidir. Bu reaksiyonu önlemek için, karıştırma işlemi mümkün oldukça kısa bir süre içinde tamamlanmalıdır.

Dördüncü reaksiyon olan puzzolonik reaksiyonlar zamana bağımlı reaksiyonlardır. Diğer bir deyişle, puzzolonik reaksiyonlar sonucu oluşan dayanım artışı yavaştır ve uzun bir süre boyunca devam eder. Puzzolonik reaksiyonlar aşamasında, kireçteki kalsiyum kildeki silika ve alümina ile reaksiyona girerek zeminin dayanımını ve durabilitesini önemli ölçüde arttıran kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikat çimento öğelerinin oluşmasına neden olur. Kil ve kireç arasında oluşan genel bir puzzolonik reaksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir (Bell ve Coulthard, 1990):

$$CH + RS \longrightarrow CSH + R$$

Burada; C: CaO, H: H_2O, S: SiO_2 ve R: degrade olmuş rezidüel kildir.

Sonuç olarak killi bir zemin kireçle iyileştirildiği zaman oluşan reaksiyonlar sonucu kil tanecikleri birbirine kenetlenir, likit limit ve plastsite indeksi azalırken plastik limit artar, zeminin şişme-büzülme potansiyeli azalır, çekme mukavemeti, suya karşı direnci ve geçirimsizlik artar, çalışabilirlik ve mukavemette iyileşme görülür.

7.6.4.4. Zeminlerin kireç ile iyileştirilmesinde kullanılan teknikler

Kireç ile iyileştirilmiş bir zemin elde etmek için en sık kullanılan iki yöntem vardır; kireç arazideki zemin ile yüzeysel olarak karıştırılır veya zemin içerisinde kireç kolonları oluşturularak derin iyileştirme yapılır. Bunların dışında, basınçlı sulu kireç enjeksiyonu da kullanılan teknikler arasındadır.

7.6.4.4.1. Yüzeysel karıştırma tekniği

Yüzeysel karıştırma yönteminde, zemin özel bir araçla gevşetilir, üzerine belirli miktarda kireç serilir ve killi malzeme ile kireç uygun su içeriğinde karıştırılır ve son olarak sıkıştırılır. Eklenmesi gereken uygun kireç miktarı zeminin kil mineral içeriğiyle ilgilidir. Ingles' a (1987) göre, karışım oranları belirlenirken dikkate alınması gereken temel kural zemindeki her % 10 kil içeriği için % 1 kireç uygulanması yönündedir.

7.6.4.4.2. Kireç harcı enjeksiyonu tekniği

Kireç harcı enjeksiyonu yönteminde sulu kireç belirli aralıklarda 2-3,5 m derinliğe kadar belirli bir basınçla enjekte edilir. İşlem tamamlandıktan sonra üst kısımdaki 0,25 m' lik zemin uygun tekniklerle sıkıştırılır. Kil içeriği düşük zeminlerde kireç tek başına etkili olamamaktadır, bu durumda uçucu kül ile karıştırılarak enjekte edilmektedir.

7.6.4.4.3. Kireç kolonu tekniği

Kolon tekniğinde zemin içerisinde yaklaşık 0.5 m çapında ve 10 m ya da daha büyük derinliklerde delikler açılır ve sönmüş veya sönmemiş kireç zeminle karıştırılmaksızın deliklere doldurulur. Kolon tekniğinin iyileştirme mekanizması kirecin kolonu çevreleyen zemine zamanla difüzyonu sonucu kil ile kireç arasında oluşan fizikokimyasal reaksiyonlara dayanır. Bu reaksiyonlar kirecin içerdiği pozitif iki değerlikli iyonlar ve negatif olarak yüklü kil mineralleri arasında meydana gelir ve iyileştirme mekanizmasının temelini oluşturur. Difüzyonun oluşabilmesi için zeminin yeterli nem içeriğine sahip olması gerekir. Bu yüzden Ruenkrairergsa ve Pimsarn (1982), kireç göçünün gerçekleşebilmesi için kireç kolonlarının yağmurlu mevsimlerden önce inşa edilmesi gerektiğini önermişlerdir. Kirecin zemin içerisine

olan difuzyonundan hemen sonra meydana gelen reaksiyon katyon değişimidir. Kireç kolonundan zemin içerisine difüze olan Ca^{+2} iyonları kil içerisinde mevcut olan tek değerlikli Na^{+} iyonlarıyla yer değiştirir. Ca^{+2} iyonlarının yanı sıra kireçteki hidroksil (OH^{-}) iyonları da zemin içerisine göç eder. Hidroksil iyonları zeminin alkalitesini arttırır. Yüksek alkalin koşullar silika ve alümina bileşenlerinin kil minerallerinden ayrışmasına sebep olur. Ayrışan bu bileşenler kireçten gelen Ca^{+2} iyonlarıyla reaksiyona girerek kalsiyum silika hidrat (CSH) ve kalsiyum alümina hidrat (CAH) gibi zeminin çimentolaşmasını sağlayan puzzolonik bileşenler oluşturur. Bu puzzolonik reaksiyonlar uzun bir süre içerisinde gerçekleşir ve zeminin dayanımını arttırır.

Kolon uygulamasında sönmemiş kireç kullanıldığı takdirde, yukarıda bahsedilen reaksiyonlara ek olarak başka iyileştirme mekanizmaları da söz konusudur. Bunlardan ilki kolonun genişleme mekanizmasıdır. Sönmemiş kireç kolonu çevreleyen zemin içerisindeki su ile reaksiyona girerek sönmüş kirece dönüşür. Sönmüş kireç sönmemiş kireçten daha düşük bir yoğunluğa sahiptir ve bu yüzden kirecin hacminde bir artma oluşur. Bunun sonucu olarak kolonun çapı %30-60 oranında artabilir. Bu genişleme mekanizması kolonu çevreleyen zeminin yanal konsolidasyonuna neden olur. Oluşan bir diğer süreç ise zeminin su içeriğindeki azalmadır. Sönmemiş kirecin su ile olan reaksiyonu sonucu zeminin su içeriğinde azalma meydana gelir. Buna ek olarak zeminin boşluk suyu basıncında da bir azalma oluşur. Sönmemiş kireç kolonundaki sönme reaksiyonu kolona doğru bir su akışına sebep olur ve bu emme işlemi zemindeki boşluk suyu basıncını azaltıcı yönde bir etki yapar (Rogers ve Glendinning, 1994).

Sonuç olarak kirecin içerdiği kalsiyum ve hidroksil iyonlarının kolonu çevreleyen zemine olan göçü, şişen zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi sırasında en önemli süreçtir. Buna rağmen, kireç kolonu tekniği ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda iyon göçü mekanizmasından çok az sayıda araştırmacının bahsettiği görülmüştür. Bundan başka, killi zeminlerde iyon göçü mekanizması ile ilgili bilgilere genellikle katı atık depolama sahası sızıntı sularında bulunan kirleticilerin yeraltı suyuna geçişini inceleyen çalışmalarda rastlanmıştır. Kireç kolonu uygulamasında önemli bir süreç olan iyon göçü mekanizması literatürden elde edilen bilgilerden yararlanılarak aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

8. KİLLİ ZEMİNLERDE İYON GÖÇÜ MEKANİZMASI

Killi zeminlerde iyon göçünü sağlayan başlıca iki mekanizma vardır. Bunlar adveksiyon ve difüzyondur. Advektif geçiş iyon göçünün kil boyunca su akımıyla gerçekleşmesi olarak tanımlanabilir (Edil, 2003). Difüziv geçişte ise iyonlar yüksek konsantrasyonda bulundukları bir bölgeden düşük konsantrasyonda bulundukları bölgeye hareket ederler. Rogers ve Glendinning (1996), difüzyon sürecinin iyon değişimiyle kontrol edildiğini belirtmişlerdir. Yüksek plastisiteli zeminlerde iyonların hareketinde difüzyon mekanizması etkindir. Adveksiyon mekanizması ise zeminin geçirimliliği oranında etkili olabilmektedir. Dolayısıyla düşük plastisiteli ya da önemli oranda iri bileşen içeren zeminlerde iyonların iletiminde adveksiyon mekanizması daha etkilidir denilebilir (Mitchell ve Soga, 2005).

Elektriksel ve magnetik alanlar gibi değişik tipteki kuvvetlerin varlığı da iyonların hareketini etkileyebilir. Her iyonun bir difüzyon katsayısı vardır, ancak iyonlar iyon çifti olarak bulunduklarında kendi difüzyon hızlarında hareket etmezler. Bunun nedeni elektriksel kuvvetlerdir. Elektriksel kuvvetler hızlı iyonu yavaşlatmaya yavaş iyonu ise hızlandırmaya eğilimlidirler. Böylece iyon çifti iyon hızlarının ağırlıklı ortalamasında hareket eder. Ancak eğer iyonlar ve kil arasında herhangi bir reaksiyon söz konusu olursa, örneğin; iyonlardan birinin kilin yapısındaki herhangi bir iyonla yer değiştirmesi söz konusuysa bu durumda difüzyon sadece iyon çiftine değil, ayrıca kilin ve kildeki değişebilir iyonun türüne de bağlıdır (Jungnickel vd., 2004). Kireçle iyileştirilmiş bir zeminde, Ca^{+2} iyonu OH^{-} iyonuna göre daha hızlı ve daha geniş mesafelere göç eder (Davidson vd., 1965). Bu durum kirecin kil içerisinde advektif sistemde umulduğu gibi $Ca(OH)_2$ iyon çifti halinde göç etmediğini gösterir. Rogers ve Glendinning (1996), OH^{-} iyonunun Ca^{+2} iyonundan daha yavaş ve daha dar mesafelere göç etmesinin OH^{-} iyonlarının alümina silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Ancak, suya doygun bir zeminde boşluk suyu moleküler hareketi tetikleyen termal iletkenliği arttırır ve bu olay OH^{-} iyonlarının difüzyon hızının ve oranının önemli ölçüde artmasına neden olur (Barker vd., 2007). Beetham vd. (2014) ise Ca^{+2} katyon değişim sürecinin flokülasyona sebep olarak kil partiküllerinin yüzey alanını azalttığını ve bu durumun onların OH^{-}

iyonlarıyla olan etkileşimini azaltarak OH^- iyonunun daha geniş mesafelere göç etmesini sağlayacağını belirtmişlerdir.

8.1. Killi Zeminlerde İyon Göçünü Etkileyen Faktörler

Kireçteki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesini etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar; zeminin nem içeriği, geçirimliliği, gözenekliliği, kil mineralojisi, zemin içerisindeki kayma düzlemleri, zeminin emme kuvveti, osmotik basınç, kür zamanı, kür sıcaklığı olarak sayılabilir (Mitchell ve Hooper, 1961; Rogers and Glendinning, 1994).

8.1.1. Zeminin su içeriği

Bazı araştırmacılar zeminin su içeriğindeki artışın iyon göçünü arttırdığını savunurken (Ruenkrairergsa ve Pimsarn, 1982; Lutenegger ve Dickson, 1984; Shanker vd., 1989; Rogers and Glendinning, 1996) diğer araştırmacılar su içeriğindeki artışın iyon göçü üzerinde bir etkisi olmadığını savunmuşlardır (Katti ve Gupta, 1970; Fosh ve Kinter, 1972). Katti ve Gupta (1970), yaptıkları çalışmada iyon göçünün düşük su içerikleri ve yüksek yoğunluklar ile sağlandığını ve kapileritenin göçü kontrol eden faktör olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak Rogers and Glendinning (1996), yaptıkları deneylerde su içeriğindeki artışın iyon göçünü arttırdığını bulmuşlardır. Pek çok araştırmacı zemin içerisinde gözlenebilir bir su hareketi olmasa bile suyun varlığını iyon göçü için gerekli görmüştür (Barker vd., 2007). Zeminin su içeriğinin iyon göçü üzerindeki etkisi hakkında literatürde kesin bir görüş birliği olmamasına rağmen gözlemlerin çoğu su içeriğindeki artışın iyon göçünü arttırdığı ve bu yüzden kireç kolonlarının yağmurlu mevsimlerden önce inşa edilmesi gerektiği yönündedir.

8.1.2. Hidrolik gradyan

Hidrolik gradyan ve iyon göçü arasındaki ilişkiyi araştıran çok az çalışma mevcuttur. Farklı arazi gözlemlerinden iyon göçünün yer altı suyu tablasının altındaki seviyelerde arttığı anlaşılmaktadır (Handy ve Williams, 1967). Ancak bu durumun yer altı suyunun hareketinden mi yoksa zeminin doygun olmasından mı kaynaklandığı hakkında kesin bir sonuca varılamamıştır.

Lutennegger ve Dickson (1984) tarafından kireç kolonu tekniği ile ilgili yapılan bir derlemede Ca^{+2} iyonlarının göçünün zeminde suyun varlığı ile sağlandığı vurgulanmıştır. Araştırmacılar Katti ve Gupta'nın (1970) en büyük iyon göçün suyun

akış yönünde olduğunu gözlemlediklerini rapor etmişlerdir. Dolayısıyla kireçteki iyonların tercihen suyun akış yönünde göç ettikleri oldukça olasıdır.

8.1.3. Geçirimlilik

Brandl (1981), kireç kolonu uygulaması için en uygun zeminlerin gevşek paketlenmiş ve düşük plastisiteli zeminler olduğunu ve bunun nedeninin bu zeminlerin yüksek geçirimliliğe sahip olduklarından kaynaklandığını vurgulamıştır. Araştırmacı yüksek geçirimliliğin kirecin daha fazla difüzyonunu engelleyen çabuk çimentolaşma reaksiyonlarının önüne geçtiğini belirtmiştir. Ayrıca, zeminin geçirimliliği hidrolik iletkenliği arttıracağından iyon göçünü de arttıracaktır (Rogers ve Glendinning, 1996).

8.1.4. Gözeneklilik ve kayma düzlemleri

Rogers ve Glendinning (1996), farklı kil türleri üzerinde yapmış olduğu çalışmada yüksek gözenekliliğe sahip olan zemin türünde daha fazla iyon göçü mesafeleri saptamışlardır. Bunun nedeninin artan gözenekliliğe bağlı olarak su içeriğindeki artış olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, iyon göçünün tercihen zemin içerisindeki en az dayanımlı yollar diğer bir deyişle kayma düzlemleri boyunca olacağını vurgulamışlardır. Bunun nedeni yine kayma düzlemlerinin geçirimliliği arttırmasıdır.

8.1.5. Mineraloji

Killi zeminler geniş bir mineralojik bileşim aralığına sahiptirler. Bu zeminler farklı oranlarda kil türleri içerebilirler. Bu kil mineralleri başlıca kaolinit, illit, karışık katmanlı killer ve montmorillonittir. Kil olmayan minerallerden ise kuvars, kalsit ve organik madde içerebilirler. Belirli kil minerallerinin küçük bir miktarı killi bir zeminin fiziksel özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir (Bell, 1996).

Kireç stabilizasyonu ile ilgili bugüne kadar yapılan araştırmalara göre zeminin mineralojisi kireç-kil-su reaksiyonunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Fosh ve Kinter (1972), montmorillonit kil mineralinin baskın olarak bulunduğu killi balçık (killi kum) bir zemindeki kalsiyum iyonu göç mesafesinin kaolin kil mineralinin baskın olduğu killi bir zemindekinden daha fazla olduğunu gözlemlemiştir. Bunun nedeninin killi balçık zeminin daha büyük partikül boyutlarına sahip olduğundan kaynaklandığını ileri sürmüştür. Ancak 80 günden az bir kür süresinde kireç kolonundan itibaren 8-14 mm'lik bir bölgede kaolinitik kilin daha yüksek seviyede

kalsiyum içeriğine sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bunun nedeninin ise kesin olmadığını belirtmiştir.

Lutennegger ve Dickson (1984), zeminin mineralojisinin hem iyileştirme reaksiyonlarının gerçekleşmesinde hem de iyonların difüzyon oranında etkili olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar sadece montmorillonitik zeminlerin kireç kolonu tekniğiyle iyileştirmek için uygun olduklarını savunmuşlardır. Ancak diğer zeminlerin kireç kolonuyla iyileştirilemeyeceğini gösteren bir delil sunmamışlardır.

Diamond ve Kinter (1966), montmorillonit ve kaolinit kil minerallerinin $Ca(OH)_2$ adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Adsorpsiyonun kilin dış yüzeyleriyle sınırlı olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar elde ettikleri verilerden yaptıkları gözlemden montmorillonitin tüm dış yüzeyinin $Ca(OH)_2$ ile kaplandığını kaolinitin ise sadece yarısının $Ca(OH)_2$ ile diğer yarısının su ile kaplandığı sonucunu çıkarmışlardır. Bunun nedeninin iki kil mineralinin düzlemsel yüzeylerinin bileşimindeki farklılık olabileceği vurgulanmıştır. Montmorillonitin düzlemsel yüzeyleri silika tabakasına bağlı oksijenlerden oluşur. Kaolinitin ise sadece yarısı bu tiptir, diğer yarısı alümina tabakasına bağlı hidroksil iyonlarından oluşur.

8.1.5. Kür zamanı ve kür sıcaklığı

Barker vd., (2007) iyon göçünün başlangıç su içeriğine, kür zamanına, zemin mineralojisine ve kimyasal, elektriksel, hidrolik ve termal gradyanların varlığına bağlı olduğunu belirtmiştir. Kireç içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesi zaman içerisinde gerçekleşir. İyonların zemin içerisinde belli bir mesafe boyunca göç etmeleri için gerekli zaman tahmin edilebilseydi en uygun kür süresine karar verilebilirdi. Davidson vd., (1965) tarafından önerilen eşitliğe göre difüzyon mesafesi zamanın karaköküyle orantılıdır.

$$L = k.t^{0.5} \qquad [8.1]$$

Burada;

L = difüzyon mesafesi,

t = zaman,

k = kil türüne bağlı katsayı (kil içeriği, kil mineralojisi, yoğunluk, adsorbe edilen katyonlar ve sıcaklığın bir fonksiyonudur).

Davidson vd., (1965), bu eşitliğin kil-kireç reaksiyon oranının kireç göçü oranından büyük olduğu durumlarda geçerli olduğunu ve bu yüzden su hareketinin çok fazla olduğu durumlarda uygulanmaması gerektiğini belirtmiştir.

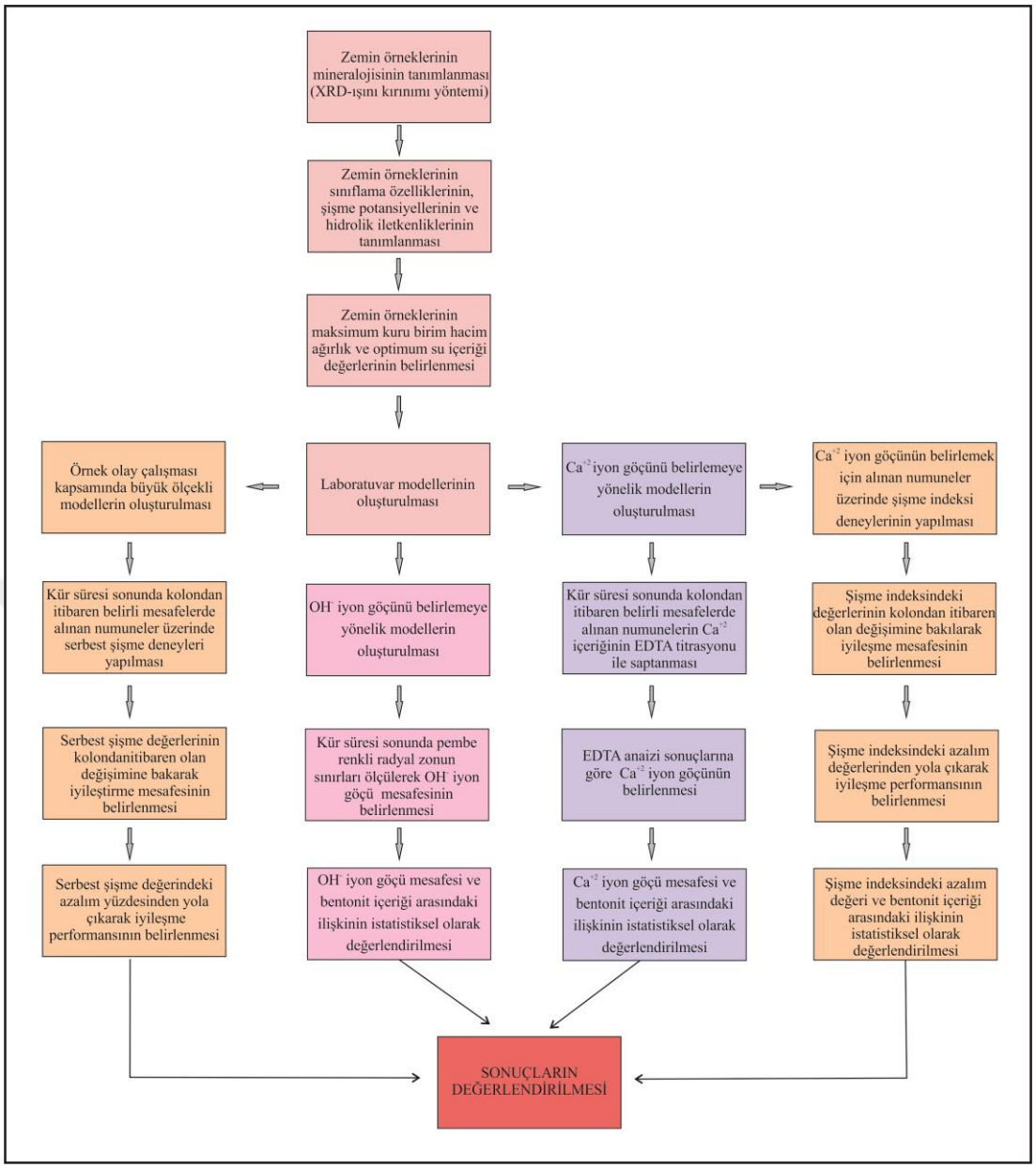
Zemin içerisindeki iyonların göçünü etkileyen faktörlerden biri de sıcaklıktır. Sıcaklık iyon göçünü sağlayan elektriksel, hidrolik ve termal gradyanların varlığına sebep olan etmenler arasındadır (Barker vd., 2007). Sıcaklığın artması ile birlikte iyonların kinetik enerjisi artmakta ve difüzyon hızlanmaktadır.

Diamond ve Kinter (1965), sıcaklığın montmorillonitin $Ca(OH)_2$'i adsorblaması üzerindeki etkisini araştırmak için 5 °C, 25 °C ve 50 °C sıcaklıklardaki adsorpsiyon oranlarını karşılaştırmıştır. Deney sonucunda, 5 °C ve 25 °C sıcaklıklardaki $Ca(OH)_2$ adsorpsiyonunun yaklaşık eşit oranlarda olduğu gözlenirken sıcaklığın 50 °C' ye çıkması ile adsorpsiyon oranının önemli bir şekilde arttığı görülmüştür. Yazar, bunun sebebini $Ca(OH)_2$' in çözünebilirliğinin sıcaklıkla birlikte artmasına bağlamıştır. Ayrıca, $Ca(OH)_2$ adsorpsiyonunun yaklaşık oda sıcaklığında fiziksel olabileceğini ancak daha yüksek sıcaklıklarda kemisorpsiyonun etkin olabileceği belirtilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında kolon tekniği ile iyileştirme sırasında killi zeminlerin içerdiği şişen kil oranının iyon göçü mesafesi ve kolon performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmalar Bölüm 9'da sunulmuştur.

9. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasının amacı doğrultusunda ilk aşamada değişik yüzdelerde şişen kil içeren zemin örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan zemin örneklerinin özelliklerini belirlemek amacıyla örnekler üzerinde XRD (X-ışını kırınımı) analizi, tane boyu dağılım analizi, Atterberg limitleri deneyi, özgül ağırlık deneyi, standart kompaksiyon (Proktor) deneyi, EDTA (etilen diamin tetra asetik asit) analizi, serbest şişme ve konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır. Kireç kolonu tekniğinin söz konusu zemin örnekleri üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla laboratuvar ortamında modeller oluşturulmuştur. Kireç kolonlarının performansını değerlendirmek için kolondan itibaren olan iyon göçü mesafesi, ayrıca zeminin şişme değerlerindeki değişim dikkate alınmıştır. Kireci oluşturan Ca^{+2} ve OH^{-} iyonlarının göç mesafeleri ayrı olarak ölçülmüştür. Ca^{+2} iyonunun göç mesafesi kimyasal bir analiz olan EDTA titrasyonu ile saptanmışken, OH^{-} iyonunun göç mesafesi bir asit baz indikatörü olan fenoftalein kullanılarak tanımlanmıştır. Zemin örneklerinin şişme değerlerindeki değişimi belirlemek için ise serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Oluşturulan küçük ölçekli laboratuvar modellerinin yanı sıra her zemin örneği için daha büyük ölçekli bir laboratuvar modeli oluşturularak örnek olay çalışması yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında uygulanan iş akış şeması Şekil 9.1' de sunulmuştur.



Şekil 9.1 Tez çalışması kapsamında uygulanan iş akış şeması.

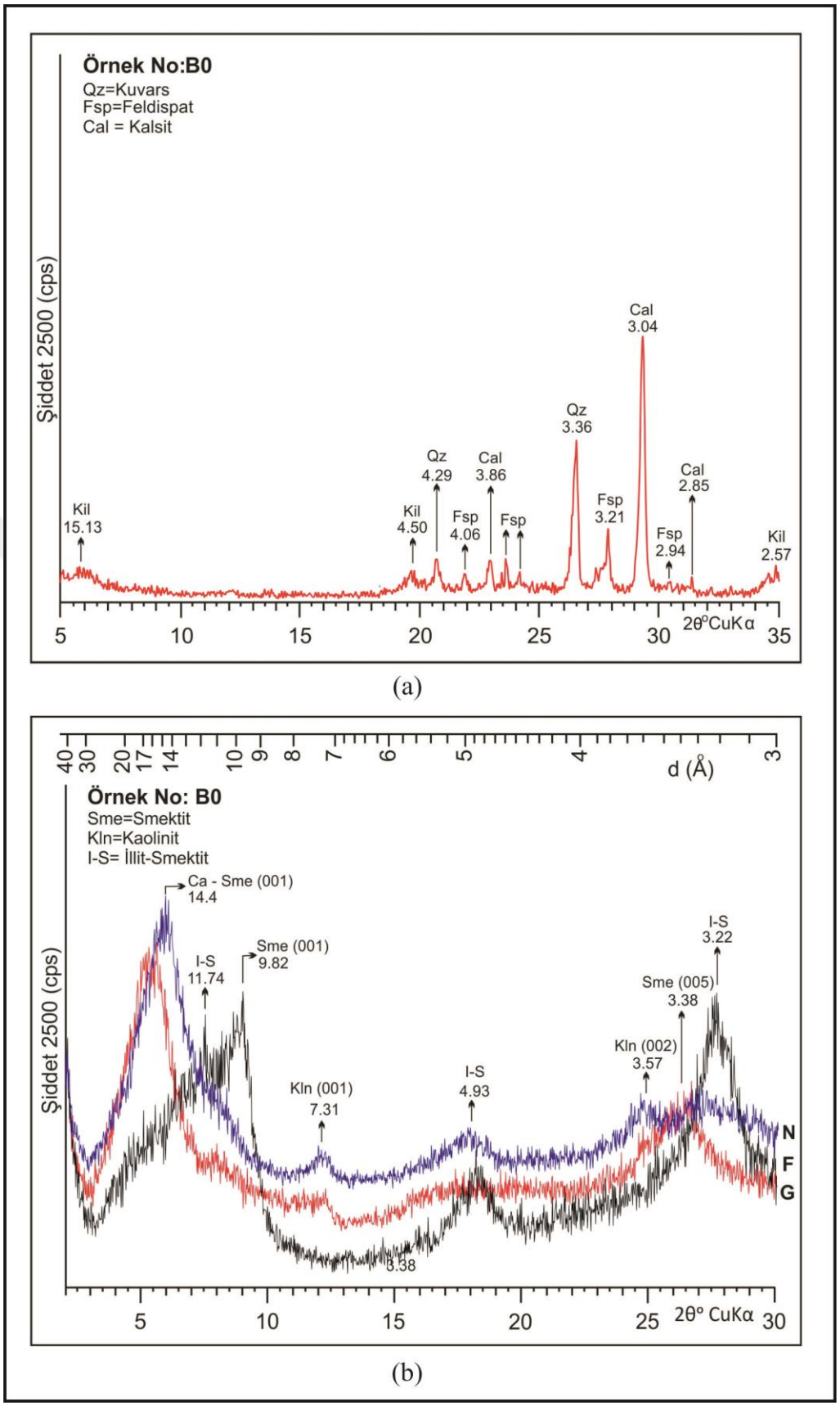
9.1. Hazırlanan Zemin Örneklerinin ve Kullanılan Kirecin Özellikleri

Zemin örnekleri hazırlanırken araziden alınan doğal bir zemine değişik oranlarda bentonit katılarak yapay zemin örnekleri oluşturulmuştur. Doğal zemin Cumhuriyet Üniversitesi kampüs alanındaki bir inşaat temel kazısından alınmıştır. Bentonit ise Reşadiye (Tokat)' de bulunan ve Samaş A.Ş. tarafından işletilen kil yataklarından elde edilmiştir. Bentonit, volkanik kül ve tüflerin yerinde ayrışması ve alterasyonu sonucu oluşan büyük ölçüde montmorillonit kil minerali içeren yüksek plastisiteli bir kil çeşididir (Yalçın ve Gümüşer, 2000). Özgül yüzey alanının büyük olması sebebiyle oldukça yüksek su emme kapasitesine sahiptir. Bentonit oldukça yüksek şişme

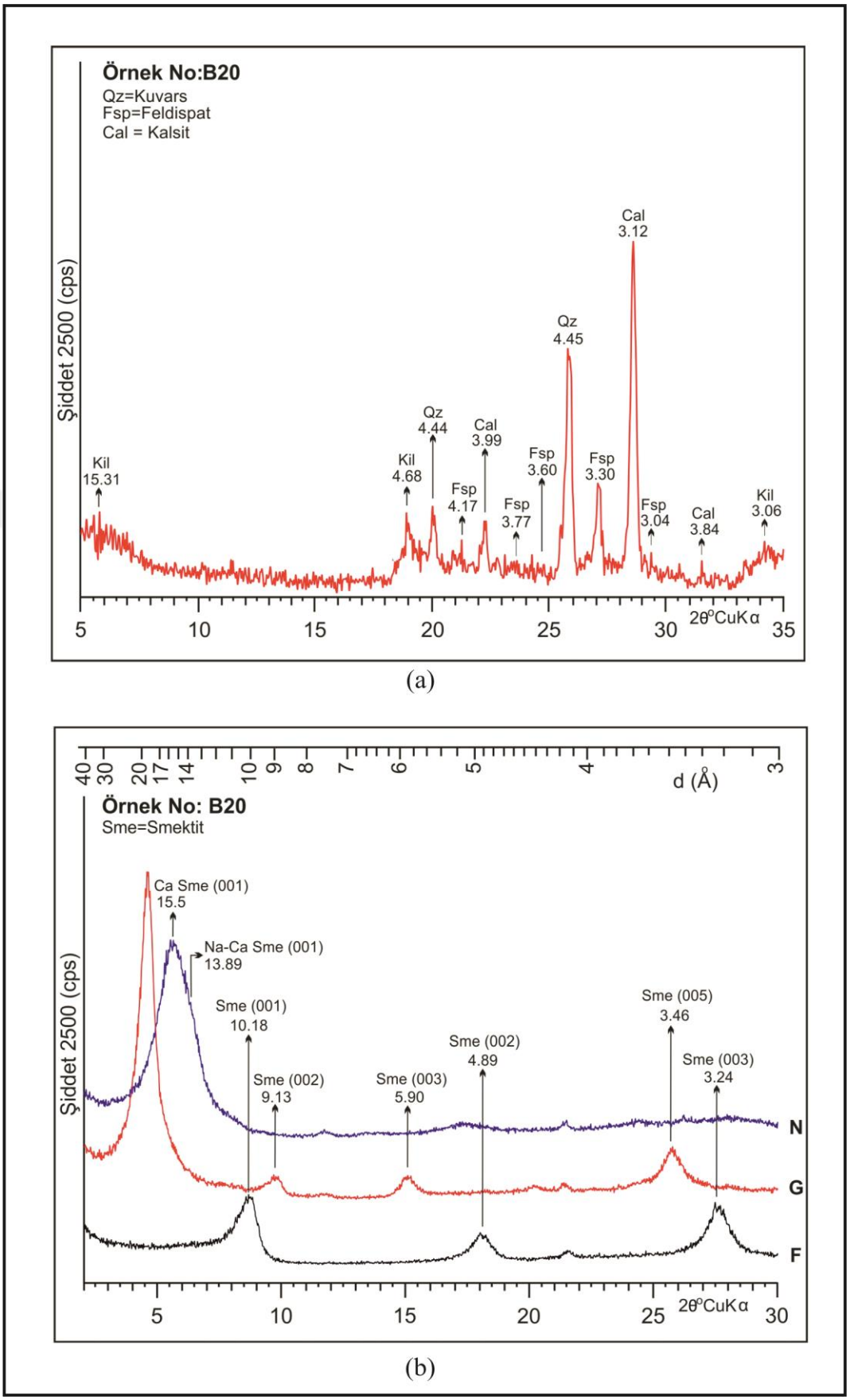
potansiyeline sahip olup kendi hacminin yaklaşık 10 veya 30 katı kadar şişebilir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan bentonit Na-montmorillonit türü kil minerali içermekte olup oldukça yüksek bir şişme potansiyeline sahiptir. Her bir zemin örneği için kullanılan ağırlıkça bentonit yüzdeleri sırasıyla %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olarak seçilmiştir.

9.1.1. Zemin örneklerinin mineralojik bileşimi

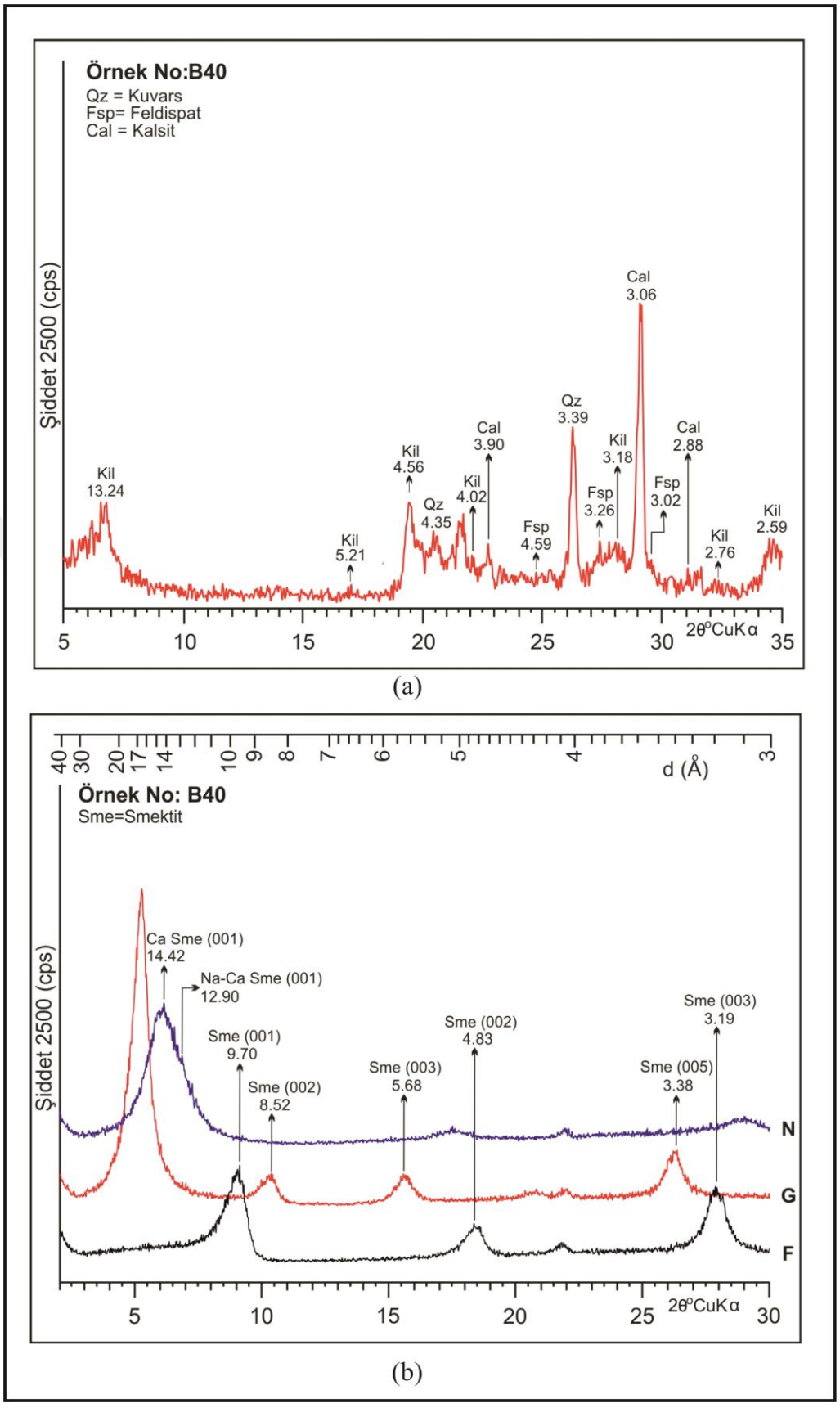
Killi zeminlerin mineralojik bileşimi kireç stabilizasyonu için çok önemli olduğundan dolayı hazırlanan zemin örnekleri üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. XRD difraktogramları Cumhuriyet Üniversitesi Mineraloji-Petrografi-Jeokimya Araştırma Laboratuvarı'nda (MİPJAL) Rigaku marka XRD cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen difraktogramlar değerlendirilmiş ve sonuçlar yarı nicel olarak hesaplanmıştır. Zemin örneklerine ait XRD tüm kayaç çekim ve kil çekim difraktogramları Şekil 9.2 - 9.7' de sunulmuştur. XRD tüm kayaç çekimlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde hazırlanan zemin örneklerinde mevcut olan minerallerin kil, kuvars, kalsit ve feldispat olduğu görülmektedir. Zemin örneklerinin ortalama yarı niceliksel kil mineral içeriği %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru sırasıyla %22, %57, %76, %80, %82 ve %89 olarak değişim göstermektedir. Karakteristik XRD kil çekim difraktogramlarından görüldüğü üzere zemin örneklerinin ortalama yarı niceliksel Na-Smektit içeriği ise %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru sırasıyla %0, %12, %27, %44, %71 ve %89 olarak değişim göstermiştir.



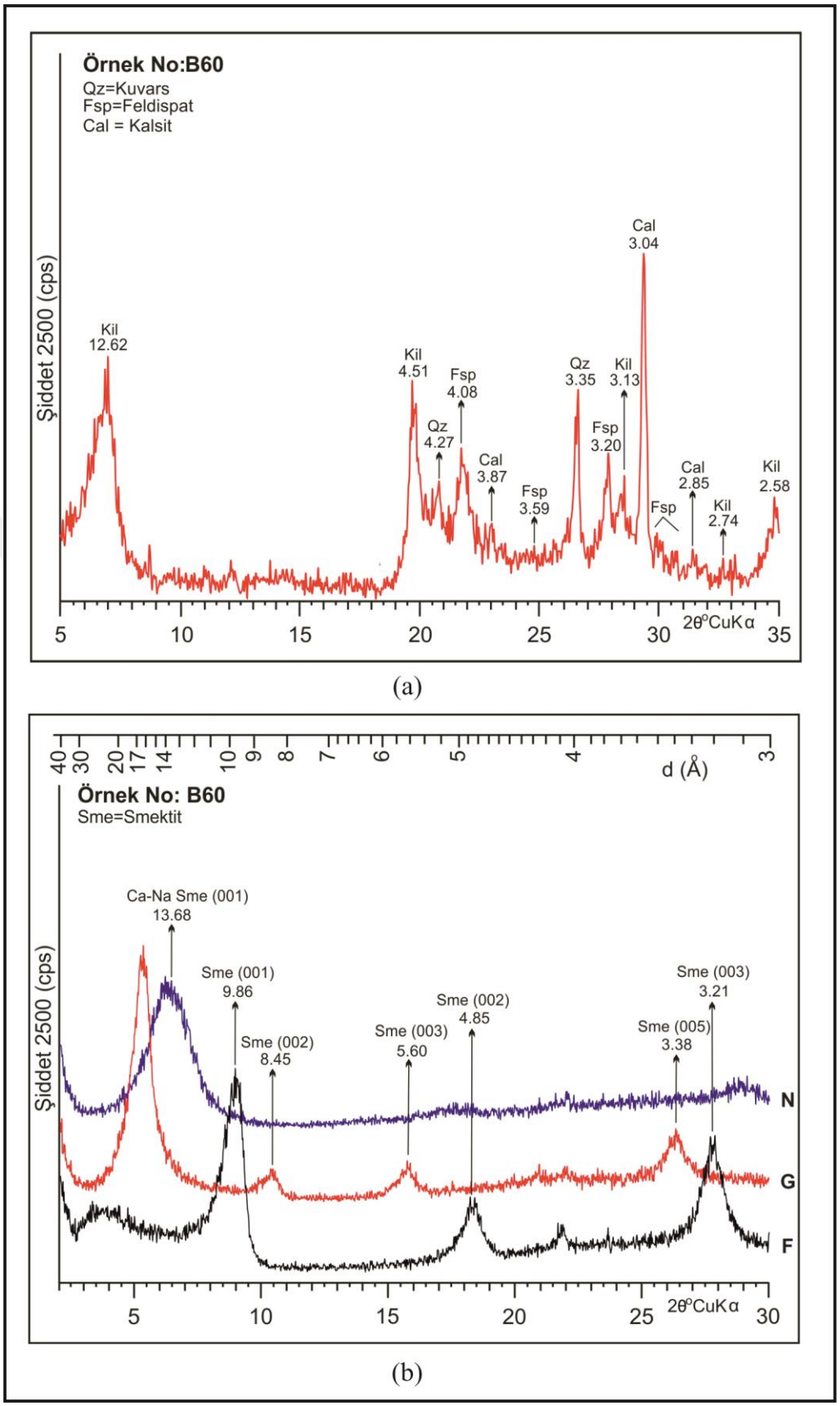
Şekil 9.2 %0 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim.



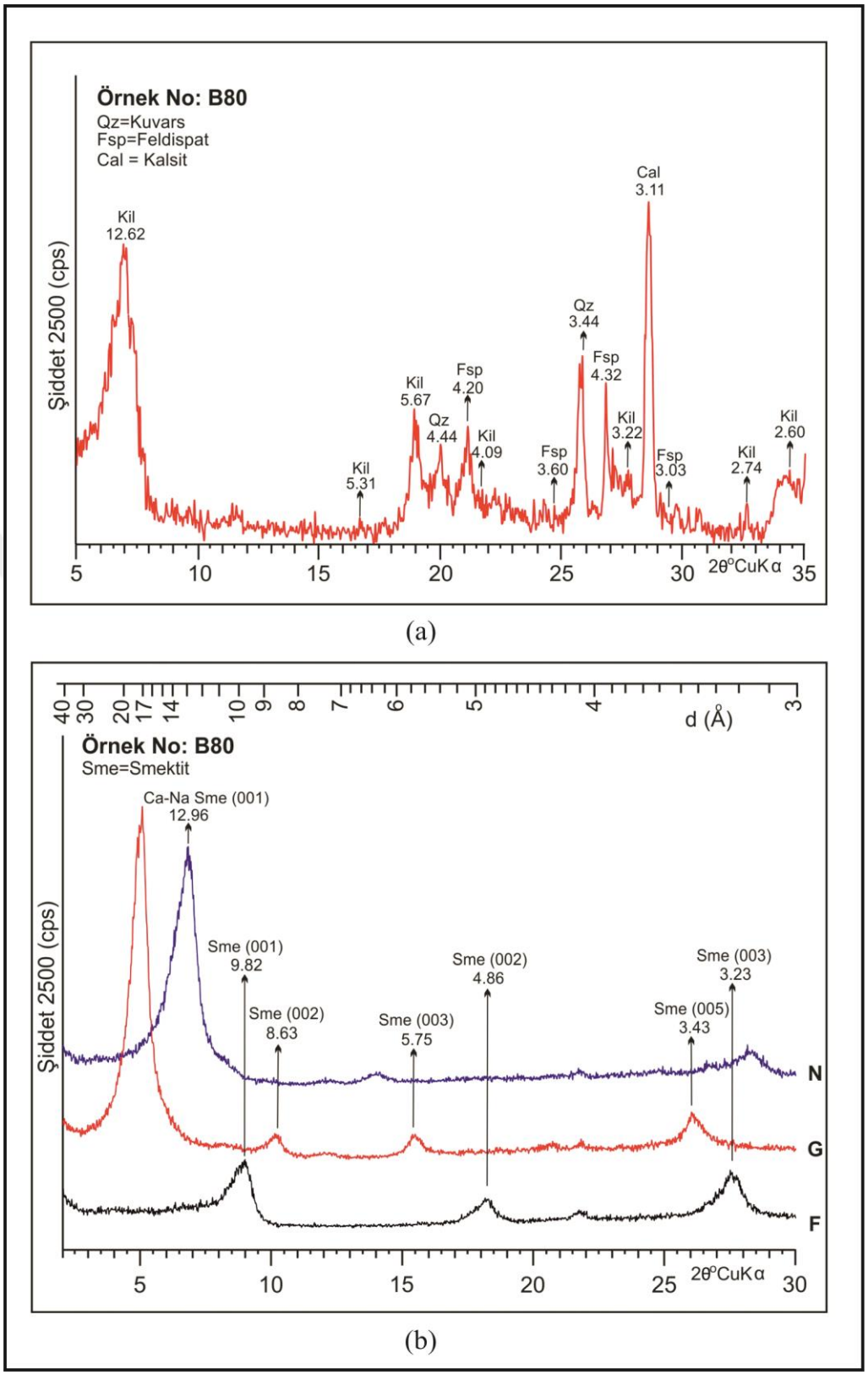
Şekil 9.3 %20 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim.



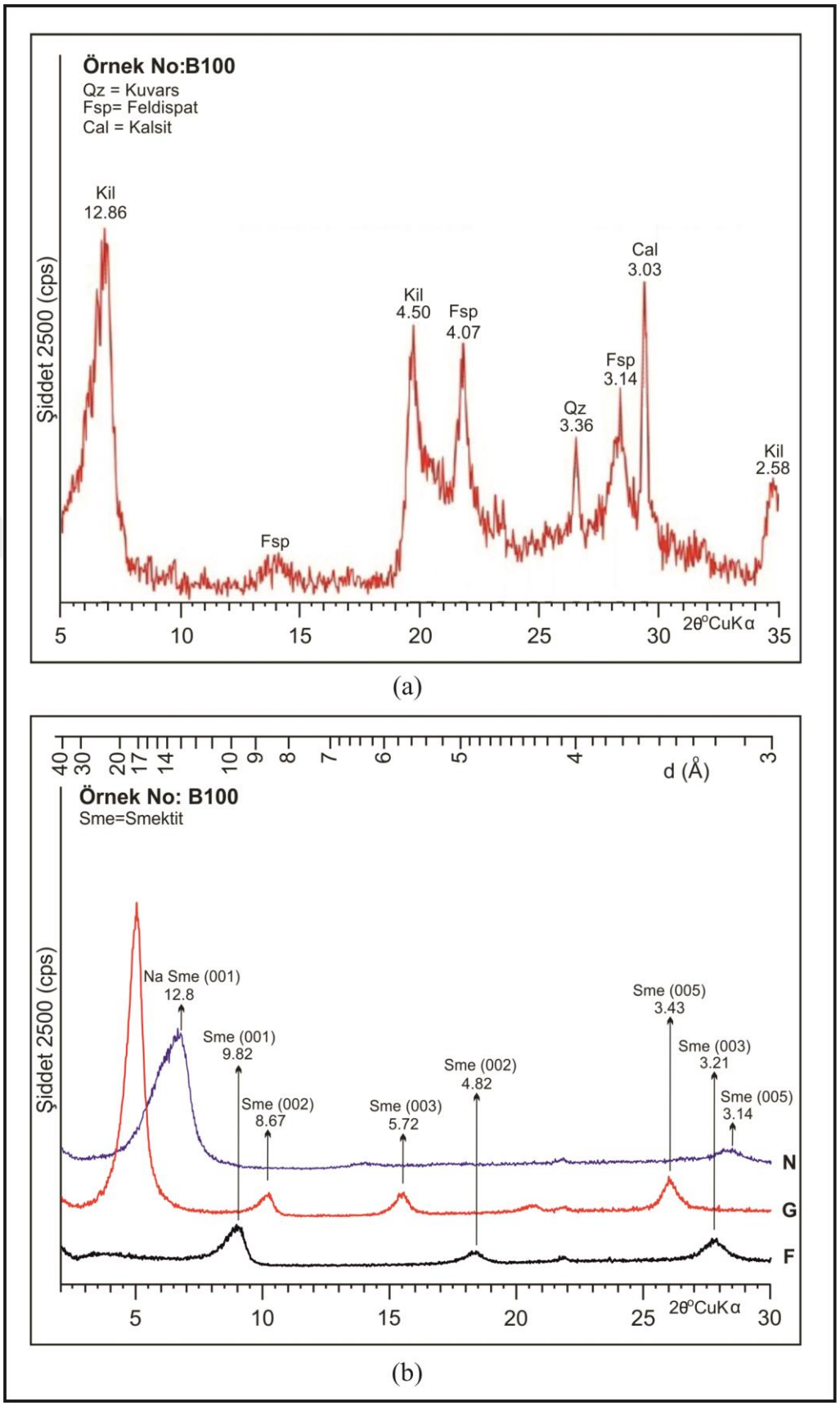
Şekil 9.4 %40 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim.



Şekil 9.5 %60 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim.



Şekil 9.6 %80 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim.



Şekil 9.7 %100 bentonit içeren zemin örneğine ait XRD difraktogramları: **(a)** Tüm kayaç; **(b)** Kil çekim.

9.1.2. Zemin örneklerinin sınıflama ve fiziksel özellikleri

Hazırlanan zemin örnekleri üzerinde TS 1900-1'e göre tane boyu dağılım analizi ve BS 1377 (BSI, 1975)' ye uygun olarak Atterberg limitleri deneyleri yapılmıştır. Elde edilen likit limit ve plastik limit değerlerine bağlı olarak plastisite indeksi (Ip) hesaplanmıştır. Çizelge 9.1'de verilen tane boyu dağılım verileri incelendiğinde hazırlanan bütün zemin örneklerinde baskın tane boyunun kil olduğu gözlenmektedir. Hiçbir zemin örneğinde çakıl tane boyunda malzemeye rastlanmamıştır. %0 bentonit içeren zemin örneğinden % 100 bentonit içeren zemin örneğine doğru kum ve silt boyu malzemenin oranı göreceli olarak azalmakta iken kil boyu malzemenin oranı artmaktadır. Hazırlanan zemin örnekleri geniş bir likit limit ve plastik limit değeri aralığına sahiptir. Likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerlerinin %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru göreceli olarak arttığı, özellikle %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinin çok yüksek değerlere sahip olduğu gözlenmiştir (Çizelge 9.1). Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS)'ne göre zemin örneklerinin sınıfı CH (yüksek plastisiteli inorganik kil) olarak bulunmuştur. Ayrıca, Toksoz vd. (2016) tarafından yapılan çalışmadan yararlanılarak zemin örneklerinin bulanık zemin sınıfları elde edilmiştir. Bu sınıflamada, plastisite abağı üzerindeki belirli bir tanımlama noktasının A hattına ve LL=%50 olan doğruya olan dik uzaklığı ve su içeriğindeki belirsizlik yüzdesi dikkate alınarak söz konusu tanımlama noktasının C, M, L ve H kümelerine olan üyelik dereceleri bulunur ve bulanık işlemciler kullanılarak bulanık zemin sınıfı belirlenir. Buna göre; su içeriğinde %5 oranında belirsizlik olması durumunda, %0 bentonit içeren zemin örneğinin bulanık zemin sınıfı $CH_{(0.97,0.80)}$ olarak bulunmuşken diğer zemin örneklerinin sınıfı $CH_{(1,1)}$ olarak belirlenmiştir. Bunun anlamı, %0 bentonit içeren zemin örneği %97 oranında kil (C) iken %3 oranında siltdir (M) ve %80 oranında yüksek plastisiteli (H) iken %20 oranında düşük plastisitelidir (L). Diğer zemin örnekleri ise %100 oranında yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına düşmektedirler. Zemin örneklerinin özgül ağırlık değerleri ise Çizelge 9.2'de verilmiş olup, 2.55 ile 2.40 aralığında değişmektedir.

Çizelge 9.1 Hazırlanan zemin örneklerine ait sınıflama özellikleri.

Örnek No	Tane Boyu %				Atterberg Limitleri %			Zemin Sınıfı	Bulanık Zemin Sınıfı
	Çakıl	Kum	Silt	Kil	LL	PL	PI		
B0	0	20	38	42	51	23.06	27.94	CH	$CH_{(0.97,\ 0.80)}$
B20	0	16	30.4	53.6	73.5	25.19	48.31	CH	$CH_{(1,1)}$
B40	0	12	22.8	65.2	119.3	30.12	89.18	CH	$CH_{(1,1)}$
B60	0	8	15.2	76.8	167.5	33.85	133.65	CH	$CH_{(1,1)}$
B80	0	4	7.6	88.4	213	34.05	178.95	CH	$CH_{(1,1)}$
B100	0	0	0	100	269	34.72	234.28	CH	$CH_{(1,1)}$

B0 %0; B20 %20; B40 %40; B60 %60; B80 %80; B100 %100 bentonit içeren örnektir.

Çizelge 9.2 Hazırlanan zemin örneklerinin özgül ağırlık değerleri.

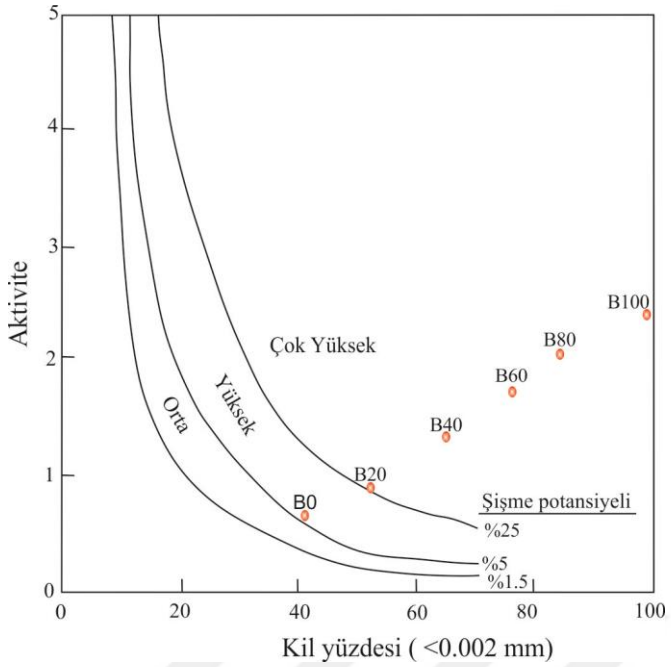
	Örnek No					
	B0	B20	B40	B60	B80	B100
Özgül Ağırlık (Gs)	2.55	2.52	2.51	2.48	2.42	2.40

Skempton (1953) tarafından geliştirilen formül kullanılarak, hazırlanan zemin örneklerinin aktivite katsayıları hesaplanmıştır (Çizelge 9.3). Sonuçlar incelendiğinde zemin örneklerinin aktivitelerinin 0.66 ile 2.34 arasında değişiklik gösterdiği ve %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru göreceli olarak arttığı görülmektedir. Skempton (1953) tarafından önerilen sınıflamaya göre %0 bentonit içeren zemin örneği inaktif kil, %20 bentonit içeren zemin örneği normal kil, %40, %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örnekleri ise aktif kil sınıfına düşmektedir.

Çizelge 9.3 Hazırlanan zemin örneklerinin aktivite katsayıları.

	Örnek No					
	B0	B20	B40	B60	B80	B100
Aktivite	0.66	0.90	1.37	1.74	2.02	2.34

Şekil 9.8’ de zemin örneklerinin Seed vd. (1962) tarafından geliştirilen şişme abağı üzerindeki dağılımı verilmiştir. Zemin örneklerinin abak üzerindeki konumuna bakıldığında % 0 bentonit içeren zemin örneğinin yüksek, diğer zemin örneklerinin ise çok yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

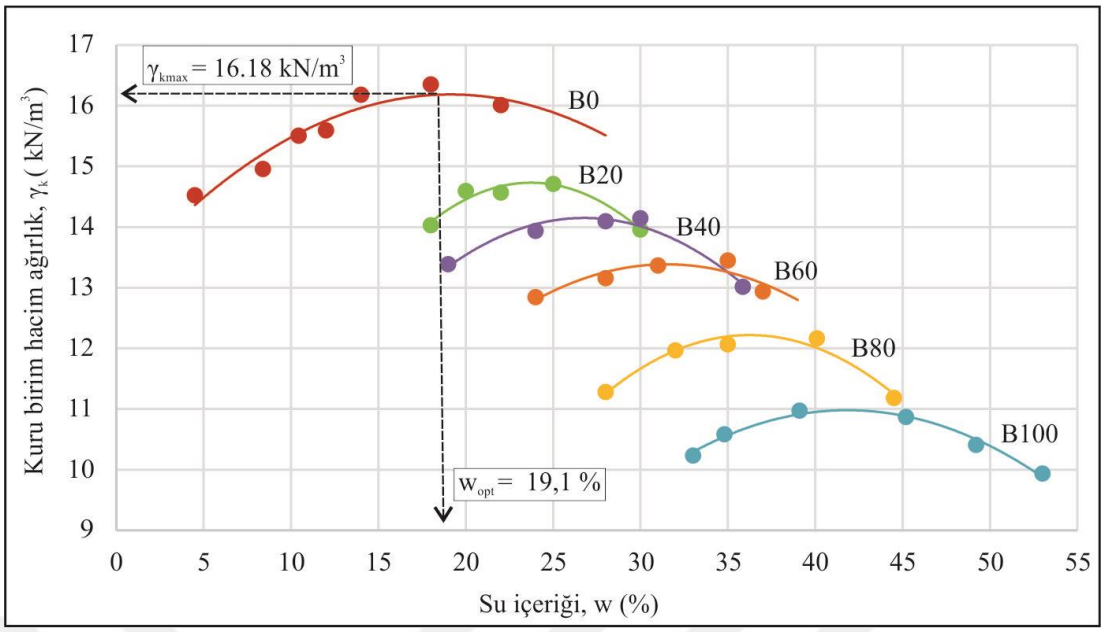


Şekil 9.8 Zemin örneklerinin şişme abağı üzerindeki dağılımı.

Benzer özellikte laboratuvar modelleri hazırlayabilmek için modeller hazırlanırken zemin örneklerinin maksimum sıkışma enerjisinde sıkışmasına dikkat edilmiştir. Bu amaçla örnekler üzerinde ASTM D-698 (1994) standardına uygun olarak standart kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve zemin örneklerinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri belirlenmiştir (Çizelge 9.4). Deneyler sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 9.9' da sunulmuştur. Zemin örneklerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri 16.18-10.98 kN/m^3 ve optimum su içerikleri ise %19-42 aralığında değişmektedir.

Çizelge 9.4 Hazırlanan zemin örneklerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri.

Örnek No	γ_{kmax} (kN/m^3)	Wopt (%)
B0	16.18	19
B20	14.72	24
B40	14.13	27
B60	13.34	30.8
B80	12.26	36.9
B100	10.98	42



Şekil 9.9 Hazırlanan zemin örneklerine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerlerini gösteren kompaksiyon eğrileri.

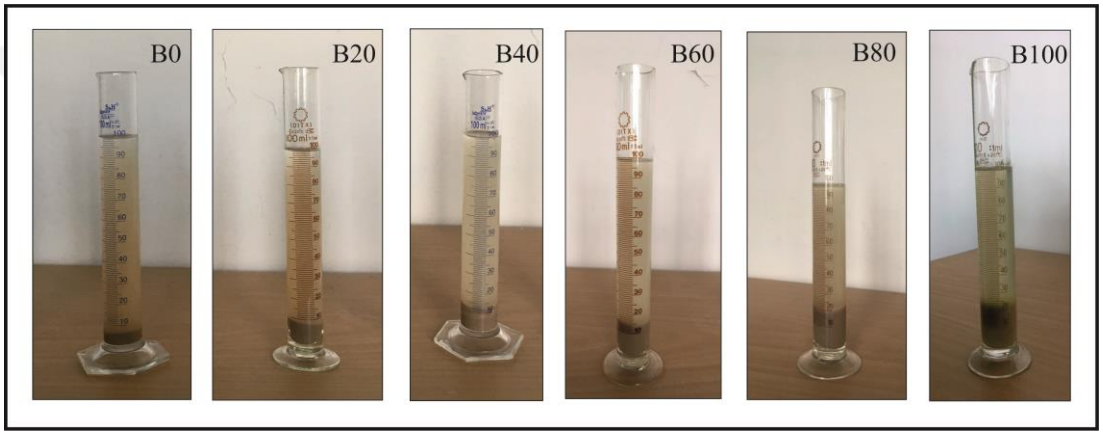
9.1.3. Zemin örneklerinin şişme potansiyelleri

Hazırlanan zemin örneklerinin şişme potansiyellerini belirlemek amacıyla zemin örnekleri üzerinde şişme indeksi ve serbest şişme deneyleri yapılmıştır. ASTM D 4546' da belirtilen deney yöntemine göre serbest şişme deneyinde zemin örneği ödometre deney aletine yerleştirilerek suya doygun koşullarda 1 kPa'lık yük altında şişmeye bırakılır. Ancak bu tez çalışmasında kullanılan bentonit oldukça yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Yüksek kalitedeki ticari bir bentonitin (Na montmorillonit) serbest şişmesi % 1200-2000 arasında değişmektedir (Demir ve Kılıç, 2010). Dolayısıyla şişmeye başladıktan bir süre sonra zemin örneğinin yüksekliği konsolidasyon halkasının yüksekliğini (20 mm) aşmakta ve zemin örneği dışarıya taşmaktadır. Diğer bir deney yöntemi olan modifiye serbest şişme indeksi deneyinde ise belirli bir miktardaki kurutulan zemin örneği öğütüldükten sonra içerisinde 100 ml saf su bulunan dereceli silindire boşaltılır ve 24 saat sonra zeminin hacmi dereceli silindirden okunur. Fakat bu tez çalışmasında söz konusu deney yöntemi uygulanmış ve bentonit için uygun olmadığı görülmüştür. Bentonit içerisinde saf su bulunan dereceli silindire boşaltıldığında topaklaşmaya uğramış ve topaklar arasında boşluklar kalacak şekilde bir topak yığını oluşmuştur. Dolayısıyla zemin örneklerinin şişme davranışlarını belirlemek için en uygun yöntemin ASTM D 5890-06 standardında belirtilen şişme indeksi deneyi olduğu düşünülmüştür. Bölüm 6.2.2' de açıklanan

deney yöntemine göre zemin örneği dereceli silindire 0.1 g / 10 dk hızda boşaltıldığı için zemin tanelerinin iyice ıslanmasına ve dibe çökmesine izin verilmekte ve topaklaşmanın oluşması engellenmektedir. Söz konusu deney bütün zemin örnekleri üzerinde uygulanmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 9.5 ve Şekil 9.10' da sunulmuştur.

Çizelge 9.5 Hazırlanan zemin örneklerinin şişme indeksleri.

	Örnek No					
	B0	B20	B40	B60	B80	B100
Şişme indeksi (ml / 2 g)	5	8	12	15	20	24



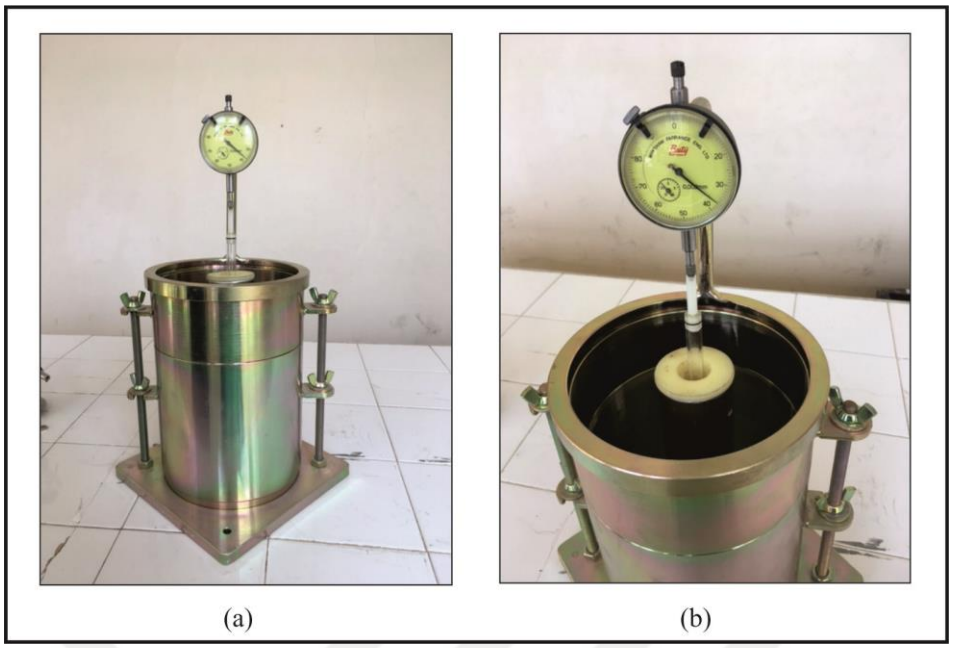
Şekil 9.10 Şişme indeksi deneyinde 24 saat sonra zemin örneklerinin hacmi.

Ayrıca bu tez çalışması kapsamında zemin örneklerinin serbest şişmelerini belirlemek amacıyla yeni bir deney düzeneği kurulmuştur. Oluşturulan bu deney düzeneği ödometre deney düzeneği ile aynı özelliklere sahiptir ancak konsolidasyon halkası yerine metal tüpler kullanılmış ve zemin örnekleri üzerine bir yükleme yapılmamıştır. Deney düzeneğini oluşturan malzemeler Şekil 9.11' de verilmiştir.



Şekil 9.11 Serbest şişme deneyi için oluşturulan deney düzeneğinde kullanılan malzemeler.

Deneyler optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış zeminlerden alınan silindirik örnekler üzerinde yapılmıştır. 50 mm çapındaki metal tüpler yardımıyla alınan örnekler tüplerden çıkarılarak 20 mm yüksekliğinde olacak şekilde kesilmiştir. Gerekli boyutlara getirilen zemin örnekleri metal tüpler içerisine tekrar yerleştirilerek alt ve üst kısımlarına suyun geçmesini sağlamak için poroz taşları ve zeminin geçmesini engellemek için filtre kağıtları eklenmiştir. Ardından metal tüp bir CBR kalıbının içine merkezde olacak şekilde konulmuş ve CBR kalıbının üst kısmına bir deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Zemindeki boy değişimlerinin deformasyon ölçer tarafından algılanabilmesi için deformasyon saatinin ucuna zemin örneğiyle temas eden cam bir boru eklenmiştir. Cam borunun düşey bir şekilde merkezlenmesini sağlamak için ise ortasında delik bulunan bir aparat kullanılmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinin yandan ve üstten görünümü Şekil 9.12’ de sunulmuştur.



Şekil 9.12 Serbest şişme deneyi için oluşturulan deney düzeneği: **(a)** Yandan görünüm; **(b)** Üstten görünüm.

Söz konusu düzenek her bir zemin örneği için oluşturulmuş ve 2 hafta süreyle kür havuzunda bekletilmişlerdir. Kür süresi sonunda her bir zemin örneğinin boyunda meydana gelen değişim deformasyon ölçerlerden okunmuş ve zemin örneklerinin serbest şişme yüzdeleri hesaplanmıştır. Serbest şişme yüzdesi zeminde oluşan hacim artışının başlangıçtaki örnek hacmine oranı şeklinde hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 9.6' da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde zemin örneklerinin serbest şişme yüzdelerinin %6.07-25.18 aralığında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 9.6 Hazırlanan zemin örneklerinin serbest şişme yüzdeleri.

	Örnek No					
	B0	B20	B40	B60	B80	B100
Serbest Şişme Yüzdesi (%)	6.07	9.12	17.25	20	23.02	25.18

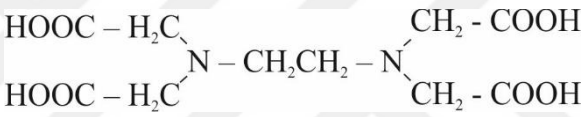
9.1.4. Zemin örneklerinin kalsiyum (Ca^{+2}) içerikleri

Kireç kolonu tekniği kullanılarak yapılan iyileştirmede kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonunun kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesi sonucu zeminin Ca^{+2} içeriği değişecektir. Hazırlanan zemin örneklerinin Ca^{+2} içeriklerini belirlemek amacıyla her bir zemin örneği üzerinde kimyasal bir analiz olan EDTA (Etilendiamin tetra asetik asit) titrasyonu yapılmıştır. EDTA titrasyonu ile Ca^{+2} tayini aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

9.1.4.1. EDTA titrasyonu yöntemi ile kalsiyum (Ca^{+2}) tayini

Miktarı bilinmeyen bir maddenin, konsantrasyonu bilinen bir çözelti ile tepkimeye sokularak derişiminin bulunması işlemine titrasyon denilmektedir. Titrasyon işleminde derişimi bilinen çözeltiye standart veya ayarlı çözelti denir. Derişimi bilinmeyen çözeltiye ise titre edilen çözelti ya da titrand denir (Onur vd., 1999).

Çözelti tepkimelerinde bir kompleks iyon veya kompleks bileşiğin oluştuğu titrasyonlara kompleksometrik titrasyon denir. Kompleks, yüklü veya yüksüz iyon veya iyon gruplarının bir araya getirmiş olduğu yeni yapıdır (Onur vd., 1999). Kompleksometrik titrasyonlarda en çok kullanılan ayarlı çözelti "*etilen diamin tetra asetik asit"*dir. Kısaca EDTA ile gösterilir. EDTA toz halinde beyaz renkli bir madde olup kimyasal formülü $C_{10}H_{16}N_20_8$ şeklindedir. EDTA' nın molekül formülü aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 9.13 EDTA' nın molekül formülü.

Kompleksometrik titrasyonlarda titre edilen (titrand) genelde bir metal katyonudur. EDTA +2 ve +3 değerlikli iyonlarla 1:1 kompleksi oluşturur. Diğer bir deyişle, bir mol EDTA bir mol metal katyonu ile kompleks oluşturur.

Bir titrasyonda ayarlı maddenin titre edilen maddeyi tam olarak tükettiği noktaya eşdeğerlik noktası veya dönüm noktası denir. Eşdeğerlik noktasını belirlemek için indikatörler kullanılır. EDTA ile metal katyonlarının titrasyonu sırasında eşdeğerlik noktasında bir pH değişimi meydana gelir. pH değişimi indikatörün renk değiştirmesine sebep olur ve bu da bize dönüm noktasını gösterir. Bu nedenle titrasyon esnasında ortamın pH' ı önemlidir.

Bu olayı daha iyi anlayabilmek için Ca^{+2} tayinini inceleyelim. Ca^{+2} tayininde indikatör olarak müreksid (amonyum purpurat) kullanılır. Ca^{+2} çözeltisine tampon çözelti ilave edilerek pH=13'e ayarlanır. Müreksid indikatöründen birkaç gram eklenir. Çözeltinin rengi pembe veya portakal kırmızısından mor menekşesine dönünceye kadar EDTA çözeltisi ile titre edilir. Titrasyon başında çözeltide müreksidin Ca^{+2} ile yaptığı pempe

ya da portakal kırmızısı rengindeki kompleks bileşiği vardır, sisteme EDTA ilave edildikçe Ca^{+2} iyonunun EDTA ile olan kompleksi müreksid ile yaptığı kompleksten daha güçlü olduğu için EDTA onu kompleksten çıkarır ve yerine kendisi geçer. Titrasyonun dönüm noktasında Ca^{+2} iyonunun hepsi EDTA ile kompleks haline geçer ve müreksid serbest kalır. Serbest müreksidin rengi mor-menekşesi olduğundan, dönüm noktasında çözeltinin rengi pembe veya portakal kırmızısından mor menekşesine döner (Onur vd., 1999). EDTA titrasyonu yöntemi ile Ca^{+2} iyonu tayini aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

EDTA titrasyonu ile Ca^{2+} tayininde gerekli olan kimyasallar

1 N amonyum asetat: 77 gr amonyum asetat (CH_3COONH_4) saf suda eritilir ve 1 litreye tamamlanır. Asetik asit veya amonyum hidroksit kullanmak suretiyle çözeltinin pH değeri 7'ye ayarlanır.

4 N sodyum hidroksit: 160 gr sodyum hidroksit (NaOH) bir miktar saf suda eritilerek 1 litreye tamamlanır.

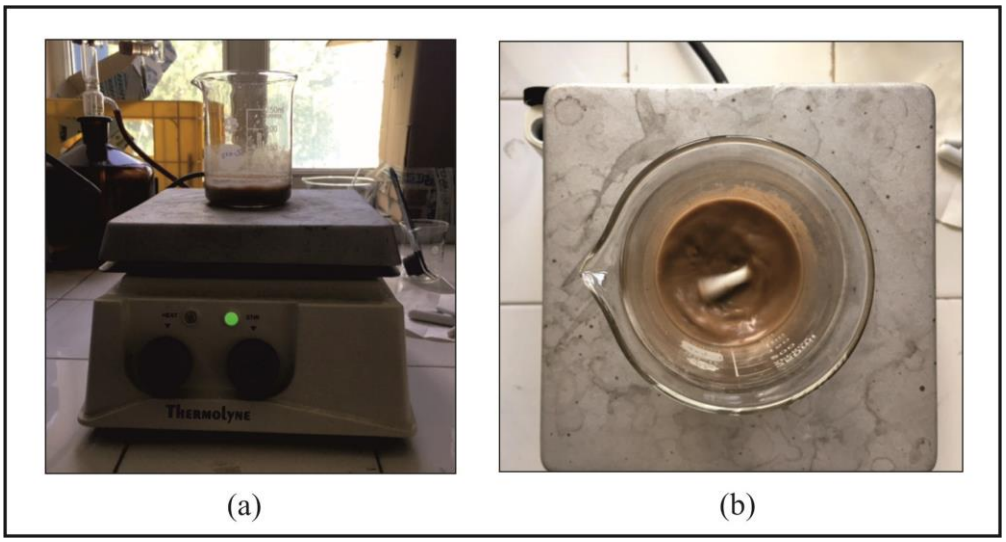
Amonyum purpurat indikatörü (Müreksid): 0.5 gr müreksid toz halindeki 100 gr potasyum sülfat (K_2SO_4) ile karıştırılır.

0.01 N disodyum etilen diamin tetra asetat dihidrat (EDTA) çözeltisi: 2 gr EDTA ve 0.05 gr magnezyum klorür suda çözülerek 1 litreye tamamlanır.

Deneyin yapılışı

Bu tez çalışması kapsamında yapılan EDTA analizleri, Laboratuvar Analizleri Kitabı (2011) isimli eserden ve Sağlam (2012) tarafından yapılan bir çalışmadan yararlanılarak yapılmıştır. Deney aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Deneye başlamadan önce Ca^{+2} içeriğini belirleyeceğimiz zeminin ekstraktı elde edilmelidir. Zemin ekstraktını elde etmek için 3 gr havada kuru zemin örneği alınır ve 25 ml amonyum asetat ile bir erlenmayer veya beher içerisinde 10 dk çalkalanır. Bu çalışmada çalkalama işlemini yapmak için Thermolyne marka bir manyetik karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 9.14).



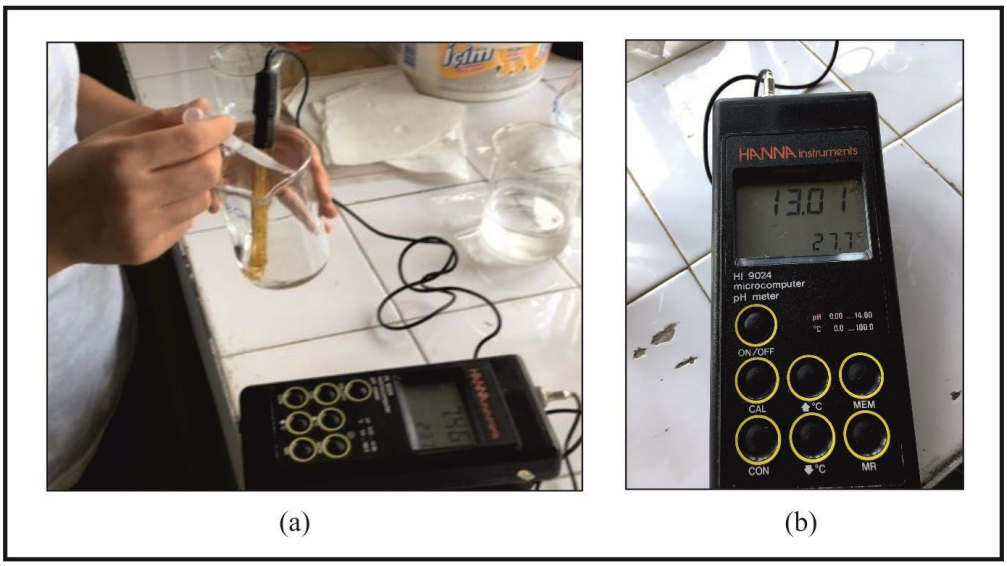
Şekil 9.14 Zemin ve amonyum asetatı çalkalama işleminde kullanılan makine: **(a)** Yandan görünüm; **(b)** Üstten görünüm.

- Karışım bir filtre kağıdı kullanılarak süzülür (Şekil 9.15). Alta geçen süzüntüdeki kalsiyum miktarı EDTA titrasyonu ile tayin edilir.



Şekil 9.15 Zemin ekstraktının süzülmesi işlemi.

- Elde edilen zemin ekstraktından 5 ml uygun bir erlene aktarılır. Toplam hacim 25 ml'ye tamamlanacak şekilde saf su ilave edilir.
- 4 N sodyum hidroksitden ilave ederek pH 13'e yükseltilir (Şekil 9.16).



Şekil 9.16 (a) Sodyum hidroksit ilave edilmesi işlemi; **(b)** pH' ın 13' e yükseltilmesi.

- Yaklaşık 0.05 gr müreksid eklenerek karıştırılır. Çözeltiye müreksid ilave edilince çözeltinin portakal kırmızısı veya pembe bir renk aldığı görülür (Şekil 9.17).

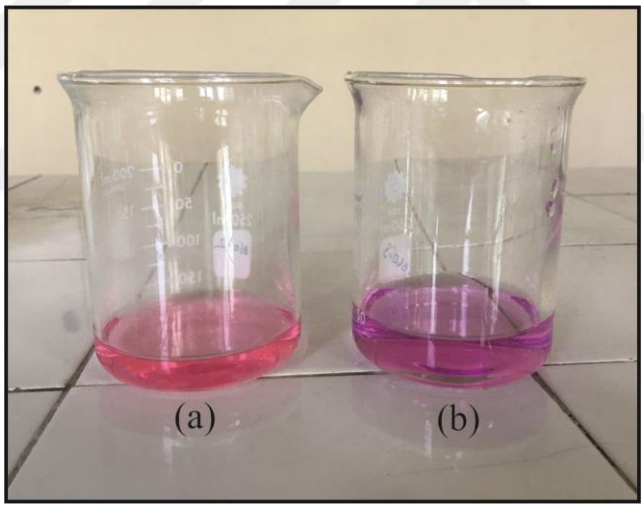


Şekil 9.17 (a) Kullanılan müreksidden bir görünüm; **(b)** Müreksid ilave edildikten sonra çözeltinin rengi.

- Elde edilen çözelti EDTA ile titre edilir. Renk portakal kırmızısından yavaş yavaş mor menekşesine dönmeye başlayınca titrasyon yavaşlatılır. Son damlalar 5-10 sn aralıklarla damlatılır. Çözeltinin rengi mor menekşesi olunca titrasyona son verilerek harcanan EDTA miktarı kaydedilir (Şekil 9.19).



Şekil 9.18 Titrasyon işlemi.



Şekil 9.19 (a) Başlangıçta; (**b)** Eşdeğerlik noktasını aşınca.

- Şahit için numune çözeltisinin titrasyonunda kullanılan süzüntü miktarı kadar (5 ml) amonyum asetat çözeltisinden alınarak aynı işlemler yapılır ve harcanan EDTA miktarı kaydedilerek hesaplamalara geçilir.

Zemin içerisindeki Ca^{+2} miktarı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$Ca = ((A-B)*N*1000)/a \quad [9.1]$$

Burada;

Ca : Zemindeki kalsiyum miktarı (miliekivalant/litre, meq/l),

A : Analizde harcanan EDTA miktarı (ml),

B : Şahitde harcanan EDTA miktarı (ml),

N : EDTA çözeltisinin normalitesi,

a : Alınan süzüntü miktarıdır (ml).

Hazırlanan zemin örnekleri üzerinde yapılan EDTA titrasyonu sonucu elde edilen Ca^{+2} içerikleri Çizelge 9.7' de sunulmuştur.

Çizelge 9.7 Hazırlanan zemin örneklerinin Ca^{+2} içerikleri.

	Örnek No					
	B0	B20	B40	B60	B80	B100
Ca miktarı (meq /l)	38.1	37	36.2	34.6	27,2	21.5

Sonuçlar incelendiğinde Ca^{+2} içeriklerinin 38.1-21.5 meq / l arasında değiştiği ve %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru azaldığı görülmektedir.

9.1.5. Zemin örneklerinin hidrolik iletkenlikleri

Bazı araştırmacılar zeminlerin hidrolik iletkenliğinin iyon göçünü arttırdığını savunmuşlardır (Brandl, 1981; Rogers ve Glendinning, 1996). Bu bilgiden yola çıkarak bu tez çalışması kapsamında hazırlanan zemin örneklerinin hidrolik iletkenlikleri hesaplanmıştır. Killi zeminlerin hidrolik iletkenliğinin belirlenmesi için kullanılan en uygun deney yöntemi düşen seviyeli permeametre deneyidir. Ancak bentonitin geçirimliliğinin oldukça düşük olması örneğin doygunluğa ulaşmasında ve düşen seviyeli permeametre deneyi ile geçirimlilik katsayısının ölçülmesinde zorluklar yaratmaktadır. Mevcut laboratuvar imkanları da göz önüne alınarak bu tez

çalışmasında zemin örneklerinin hidrolik iletkenlikleri konsolidasyon deneyi ile dolaylı olarak saptanmıştır. Bu amaçla her bir örneği üzerinde ASTM D 2435-90 standardına uygun olarak konsolidasyon deneyleri uygulanmış ve gerekli bağıntılar kullanılarak zemin örneklerinin hidrolik iletkenlikleri hesaplanmıştır. Deney kapsamında optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış zeminlerden konsolidasyon halkası kullanılarak alınan örnekler konsolidasyon aletine yerleştirilip hücre su ile doldurulmuştur. Örnekler sırasıyla 1.0 - 2.0 - 4.0 - 16.0 kg/cm^2' lik yük altında yüklenmiş ve her bir yük aşaması için 10., 15., 30., saniyelerde, 1., 2., 4., 8., 15., 30., dakikalarda ve 1., 2., 4., 8., 24. saatlerde deformasyon ölçerden sıkışma okumaları yapılmıştır. Zemin örneklerinin geçirimlilik katsayısını (k) bulmak için her gerilme aşaması için aşağıdaki parametreler hesaplanmıştır.

$$Cv = (0.848 / t_{90}) * (H/2)^2 \quad [9.2]$$

ilişkisinden konsolidasyon katsayısı,

$$H_s = W_k / A.Gs.\gamma_w \quad [9.3]$$

ilişkisinden tane yüksekliği,

$$H_v = H-H_s \quad [9.4]$$

ilişkisinden boşluk kalınlığı,

$$e = H_v / H_s \quad [9.5]$$

ilişkisinden boşluk oranı,

$$a_v = \Delta e/\Delta P \quad [9.6]$$

ilişkisinden sıkışabilirlik katsayısı,

$$m_v = a_v / 1+e \quad [9.7]$$

ilişkisinden ise hacimsel sıkışabilirlik katsayısı hesaplanmıştır.

Eşitliklerdeki; t_{90}: sıkışma zaman eğrilerinden karakök bağdaştırma yöntemi ile elde edilen değer, H: örnek kalınlığı, Wk: numunenin kuru ağırlığı, A: numunenin yüzey alanı, Gs: numunenin özgül ağırlığı, γ_w = suyun birim hacim ağırlığı, Δe: hesap yapılan gerilme aşamasındaki boşluk oranı ile bir önceki gerilme aşamasındaki boşluk oranı

arasındaki fark, ΔP: hesap yapılan aşamadaki gerilme değeri ile bir önceki gerilme düzeyi arasındaki farktır.

Yukarıdaki parametreler hesaplandıktan sonra her bir zemin örneğinin geçirimlilik katsayısı (k) aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenmiştir.

$$k = c_v * m_v * \gamma_w \quad [9.8]$$

Elde edilen sonuçlar Çizelge 9.8' de sunulmuştur.

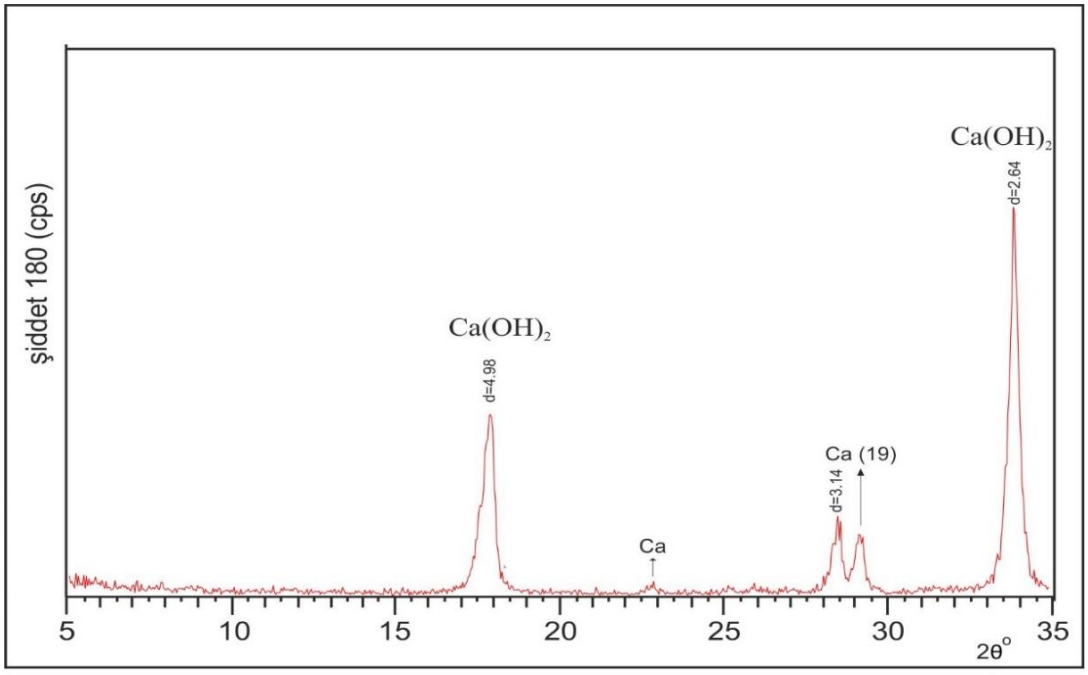
Çizelge 9.8 Hazırlanan zemin örneklerinin geçirimlilik katsayıları.

	Örnek No					
	B0	B20	B40	B60	B80	B100
k (m/s)	$1.34.\ 10^{-8}$	$2.18.\ 10^{-8}$	$5.05.\ 10^{-9}$	$3.49.\ 10^{-11}$	$2.23.\ 10^{-11}$	$1.83.\ 10^{-11}$

Sonuçlar incelendiğinde zemin örneklerinin geçirimlilik katsayılarının $1.34.\ 10^{-8}$ ile $1.83.\ 10^{-11}$ m/s arasında değiştiği ve %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru göreceli bir şekilde azaldığı görülmektedir.

9.1.6 Kullanılan kirecin özellikleri

Araştırma kapsamında kullanılan kireç sönmüş kireç olup Niksar (Tokat)'da bulunan bir kireç ocağından alınmıştır. Kimyasal formülü $Ca(OH)_2$ olan kirece ait karakteristik XRD difraktogramı Şekil 9.20' de verilmiştir.



Şekil 9.20 Kullanılan kirece ait karakteristik XRD difraktogramı.

9.2. Laboratuvar Modellerinin Oluşturulması

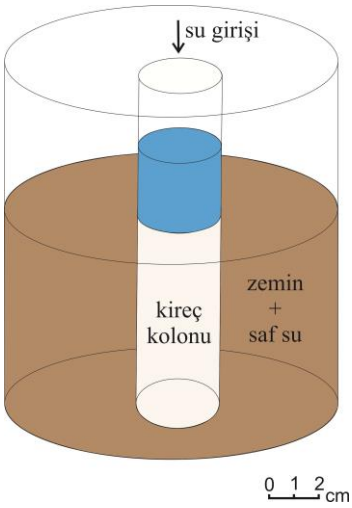
Değişik oranlarda şişen kil içeren zeminlerin iyileştirilmesinde kireç kolonu tekniğinin performansını değerlendirmek için laboratuvarda modeller oluşturulmuştur. Daha önce kireç kolonu uygulamasıyla ilgili yapılan çalışmalarda birçok araştırmacı kireç kolonu uygulamasındaki en önemli sürecin iyon göçü olduğunu vurgulamıştır. (Glendinning ve Rogers, 1996; Fosh ve Kinter, 1972; Tonoz vd., 2003). Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında kireç kolonunun performansı iyon göçü mesafesi, ayrıca zeminin şişme değerlerindeki değişim dikkate alınarak tanımlanmıştır. Bazı araştırmacılar kirecin kil içerisinde $Ca(OH)_2$ iyon çifti halinde göç etmediğini, Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının ayrı olarak göç ettiğini belirtmişlerdir (Davidson vd., 1965; Rogers ve Glendinning, 1996; Mitchell ve Soga, 2005; Beetham vd., 2014). Bu sebeple Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının göç mesafelerini belirlemek amacıyla iki ayrı laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modellerde zeminin şişme değerindeki değişimler de belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan modellerin boyutunun yeterli olduğunu teyit etmek amacıyla daha büyük ölçekli bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan büyük ölçekli modelde de zeminin şişme değerlerindeki değişim belirlenmiş ve küçük ölçekli modellerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Hazırlanan laboratuvar modellerinin benzer özeliklere sahip olması büyük önem taşımaktadır. Ancak bu durumda yapılan deneylerden elde edilen değerler mukayese edilebilir. Bu nedenle modeller hazırlanırken bütün zemin örneklerinin maksimum sıkışma enerjisinde sıkıştırılmasına dikkat edilmiştir. Maksimum sıkışmayı sağlayabilmek için her bir zemin örneği kendi optimum su içeriği değerinde sıkıştırılmıştır. Laboratuvar modelleri hazırlandıktan sonra maksimum sıkışmanın sağlandığını anlayabilmek için modellerden alınan numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları (γ_k) belirlenmiş ve standart kompaksiyon deneyinden elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Sonuçların göreceli olarak mukayeseleri; modellerden alınan numuneye ait kuru birim hacim ağırlık (γ_k) değerinin standart kompaksiyon deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerine oranı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu oranın 1 olması beklenir ve bu maksimum sıkışmanın sağlandığı anlamına gelir. Dolayısıyla elde edilen oran değerlerinin 0.95'in altına düşmesine müsaade edilmemiştir.

Kireç kolonu uygulamasıyla ilgili yapılan önceki çalışmalarda bazı araştırmacılar su hareketi olmasa bile suyun varlığını iyon göçü için yeterli bulmuşlardır (Barker vd. 2007). Ancak bir çok araştırmacı suyun hareketini iyon göçü için gerekli bulmuş ve su akışının iyon göçünü arttırdığını belirtmişlerdir (Shanker vd., 1989; Rogers ve Glendinning, 1996). Bu bilgiden yola çıkarak bu tez çalışması kapsamında oluşturulan modellerde suyun hareketine izin verilmiştir. Bazı araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarda su girişini hem kireç kolonundan hem de zeminin üst kısmından sağlamışlardır (Mathew ve Rao, 1997; Abiodun ve Nalbantoğlu, 2015), Ancak bu durumun zeminin alt ve üst kesimlerindeki su içeriklerinde farklılıklar oluşturacağı düşünülerek, ayrıca Shanker vd., (1989) ve Erkan' ın (2007) yapmış oldukları çalışmalar da dikkate alınarak bu tez çalışması kapsamında oluşturulan modellerde su girişi sadece kireç kolonlarından sağlanmıştır.

9.2.1. Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modeller

Kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonlarının zemin içerisindeki göç mesafesini bulabilmek için kimyasal bir analiz olan EDTA titrasyonu yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle her bir zemin örneği için laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Laboratuvar modellerini oluşturmak için zemin örnekleri 152 mm çapında 115 mm yüksekliğindeki kompaksiyon kalıplarına optimum su içeriğinde ve kompaksiyon çekici kullanılarak standart sıkıştırma enerjisinde sıkıştırılmıştır. Ardından bir örnek çıkarıcı kullanılarak tüplerin ortasında 20 mm çapında delikler açılmıştır. Açılan deliklere sönmüş kireç doldurulmuştur. Metal olmayan silindirik bir boru kenarlardan su sızmayacak şekilde kireç kolonun üst kısmına yerleştirilmiş ve buradan kür süresi boyunca su girişi sağlanmıştır. Böylelikle kirecin zemin içerisindeki difüzyonuna izin verilmiştir. Kireç kolonu tekniği ile ilgili olarak yapılan önceki araştırmalar (Ruenkrairergsa ve Pimsarn, 1982; Rogers ve Bruce, 1991; Rogers ve Glendinning, 1997) kür süresinin 28 gün ve 2 yıl arasında olması gerektiğini önermişlerdir. Bu tez çalışmasında ise Rogers ve Glendining (1994) ve Tonoz vd. ' nin (2003) yapmış oldukları çalışmalar dikkate alınarak kür süresi 2 ay olarak seçilmiştir. Modeller kür süresi boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur. Modellerin su içeriklerindeki homojenliği koruyabilmek için ise üst kısımları membranlarla kapatılmıştır. Hazırlanan tipik bir modelin kesiti Şekil 9.21' de verilmiştir.

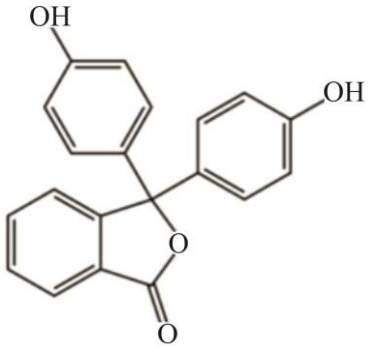


Şekil 9.21 Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan bir laboratuvar modelinin kesiti.

Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modellerde zemin örneklerinin Ca^{+2} içeriklerindeki değişimin yanı sıra şişme değerlerindeki değişimi de belirlemek amacıyla şişme indeksi deneyleri yapılmıştır.

9.2.2. OH^- iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modeller

Kireç içerisindeki OH^- iyonlarının kolondan zemin içerisine olan göç mesafesini ölçebilmek için bir asit baz indikatörü olan fenoftalein kullanılmıştır. Fenolftalein toz halinde beyaz renkli bir bileşik olup asitli ve nötral ortamda renksiz iken bazik ortamda pembe renklidir. Fenoftaleinin kimyasal formülü $C_{20}H_{14}O_4$ olup molekül formülü ise aşağıda verilmiştir:

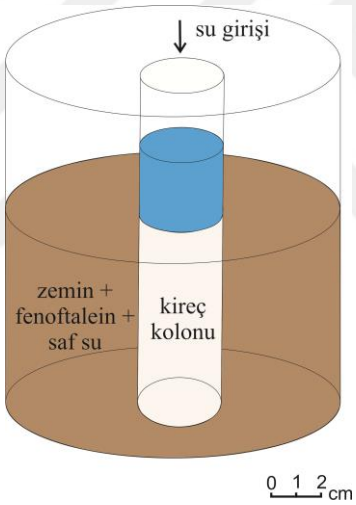


Sekil 9.22 Fenoftaleinin molekül formülü.

Kireç içerdiği hidroksil iyonlarından dolayı yüksek oranda alkalin (bazik) özellik göstermektedir (Glendinning ve Rogers, 1996; Tonoz vd., 2003). Dolayısıyla fenolftalein ile temas halinde pembe bir renk almaktadır. Fenoftalein ile OH^- iyon

göçünü belirleyebilmek için öncelikle fenoftalein çözeltisi hazırlanmalıdır. Fenoftalein çözeltisini hazırlamak için 1 gr fenoftalein 50 ml etil alkolde çözülür ve hacim 100 ml'ye tamamlanacak şekilde etil alkol ilave edilir. Eğer bir çökelti oluşursa süzgeç kağıdı yardımıyla süzülür (Dölen, 2002).

Laboratuvar modellerini oluşturmak için öncelikle hazırlanan zemin örnekleri optimum su içeriğinde ve bir miktar (50 ml) fenoftalein çözeltisi ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar Ca^{2+} iyon göçünü belirlemek için kurulan modellere benzer şekilde 152 mm çapında 115 mm yüksekliğindeki kompaksiyon kalıplarına standart sıkıştırma enerjisinde sıkıştırılmıştır. Ardından tüplerin merkezinde 20 mm çapında kireç kolonları oluşturulmuştur. Kolonların üst kısmına metal olmayan silindirik bir boru yerleştirilerek kür süresi boyunca buradan su girişi sağlanmıştır. Hazırlanan tipik bir modelin kesiti Şekil 9.23' de verilmiştir.

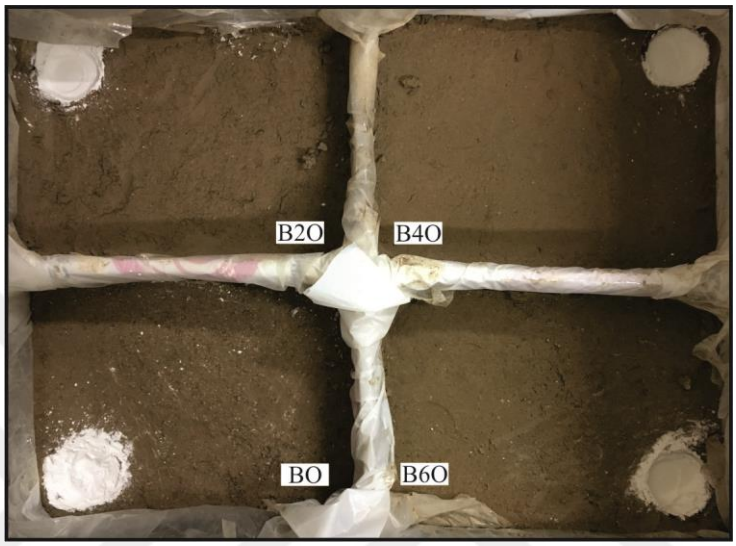


Şekil 9.23 OH^- iyon göçünü belirlemek için oluşturulan bir laboratuvar modelinin kesiti.

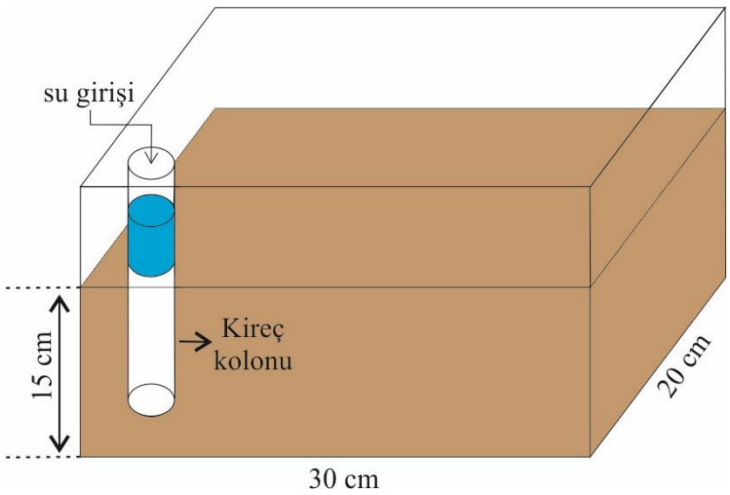
9.2.3. Örnek olay çalışması

Oluşturulan küçük ölçekli laboratuvar modellerinin yanı sıra her zemin örneği için daha büyük ölçekli bir laboratuvar modeli oluşturularak örnek olay çalışması yapılmıştır. Büyük ölçekli laboratuvar modelleri oluşturulurken hazırlanan zemin örnekleri 20 cm x 30 cm x 45 cm boyutlarındaki kasalara 15 cm yüksekliğinde olacak şekilde optimum su içeriğinde ve standart sıkıştırma enerjisinde sıkıştırılmıştır. Her bir kasanın köşesinde örnek çıkarıcı yardımıyla 50 mm çapında delikler açılmış ve bu delikler sönmüş kireç ile doldurulmuştur. Kireç kolonlarının üst kısmına metal olmayan silindirik bir boru yerleştirilerek bu borudan kür süresi boyunca su girişi

sağlanmıştır. Kür süresi önceki modellerde olduğu gibi 2 ay olarak seçilmiştir. Modellerin hava ile temaslarını kesip su içeriklerindeki homojenliği koruyabilmek için üst kısımları membranlarla kapatılmıştır. Hazırlanan modellerden bir kısmının üstten görünümü Şekil 9.24'de görülmektedir. Ayrıca tipik bir modelin kesiti Şekil 9.25' de sunulmuştur.



Şekil 9.24 Örnek olay çalışması kapsamında oluşturulan büyük ölçekli laboratuvar modelleri.



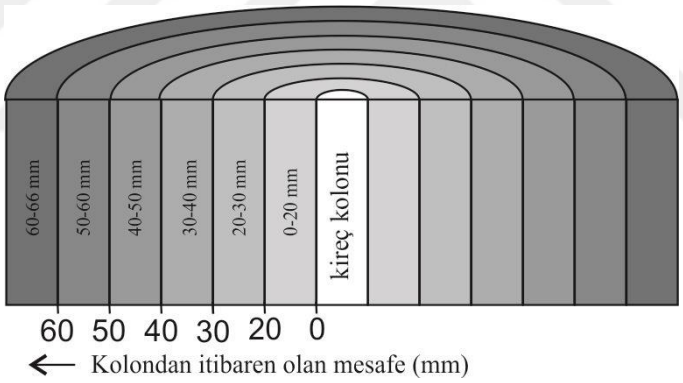
Şekil 9.25 Örnek olay çalışması kapsamında oluşturulan büyük ölçekli laboratuvar modelinin tipik bir kesiti.

10. BULGULAR

İki aylık kür süresi sonunda söz konusu modeller üzerinde gerekli incelemeler yapılarak her bir zemin için kireç kolonundan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü mesafesi, OH^- iyon göçü mesafesi, ayrıca zeminlerin şişme davranışlarındaki değişimler belirlenmiştir.

10.1. Zeminlerdeki Şişen Kil Oranının Ca^{+2} İyon Göçü Mesafesi Üzerine Etkisi

Zeminlerdeki şişen kil oranının Ca^{+2} iyon göçü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla kolonlardan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin Ca^{+2} içerikleri EDTA analizi ile saptanmıştır. Bu amaçla ilk olarak modellerdeki zeminler proktor kalıplarından dikkatli bir şekilde örselenmeden çıkarılmıştır. Daha sonra kireç kolonundan itibaren belirli mesafelerden numuneler alınarak kurumaya bırakılmıştır. Numune alma düzeni Şekil 10.1' de gösterilmiştir.



Şekil 10.1 Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modellerden numune alım düzeni.

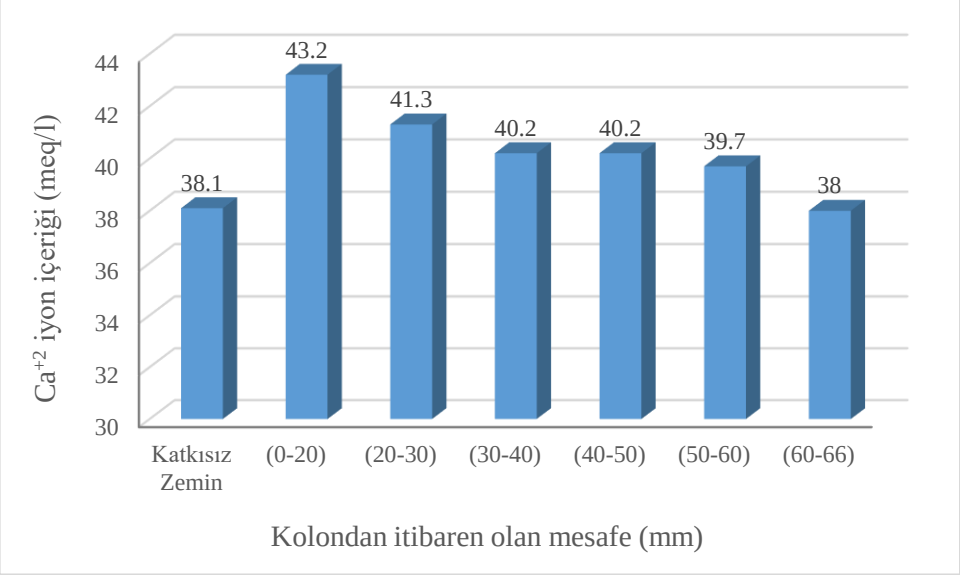
Kuruyan numunelerin Ca^{+2} içerikleri laboratuvarda yapılan EDTA titrasyonları ile belirlenmiştir. Elde edilen bulgular Çizelge 10.1' de sunulmuştur.

Çizelge 10.1 Kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin Ca^{+2} iyon içerikleri.

Örnek No	Ca^{+2} İyon İçeriği (meq/l)						
	Katkısız Zemin	Kolondan İtibaren Olan Mesafe					
		0-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	40-50 mm	50-60 mm	60-66 mm
B0	38.1	43.2	41.3	40.2	40.2	39.7	38
B20	37	43	42.1	41.9	41	37.2	37
B40	36.2	42.5	41.9	41.1	36.2	36.1	36.2
B60	34.6	42.1	40.8	34.5	34.2	34.6	34.5
B80	27.2	42	38.1	27.2	27.3	27.1	27
B100	21.5	41.3	39.7	21.4	21.3	21.4	21.5

B0 %0; B20 %20; B40 %40; B60 %60; B80 %80; B100 %100 bentonit içeren örnektir.

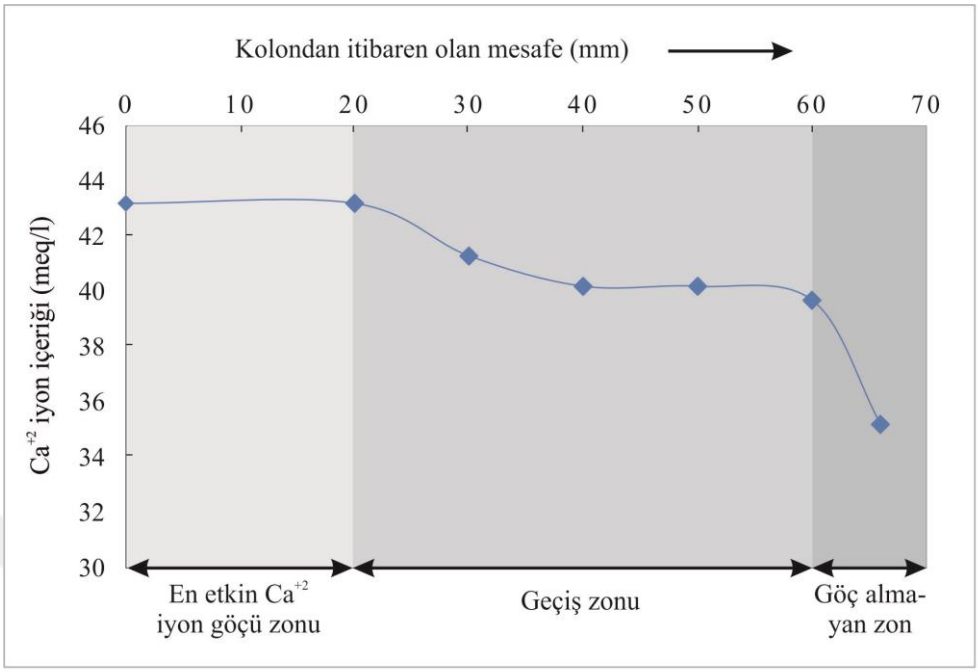
Ayrıca her bir zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.



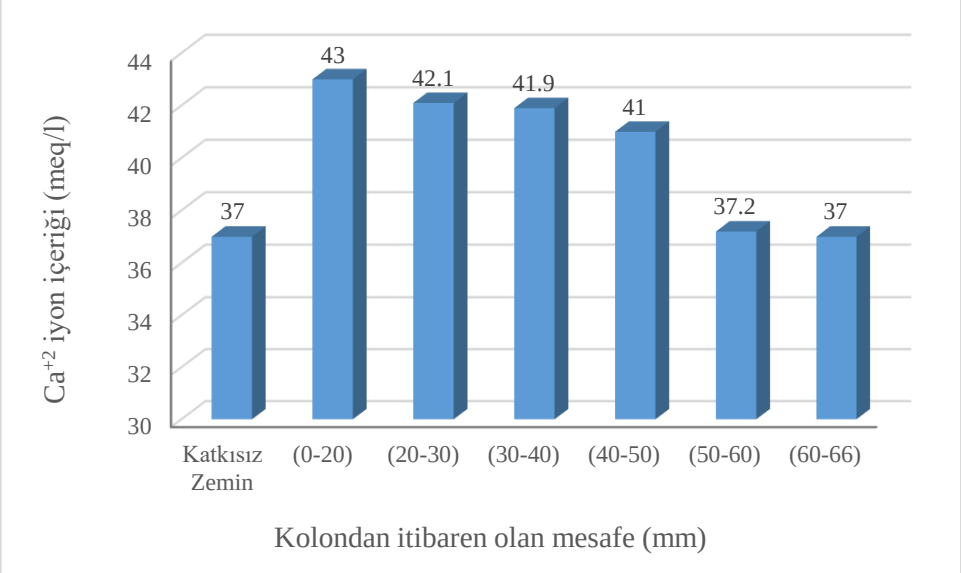
Şekil 10.2 % 0 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi.

%0 bentonit içeren zemin örneğinde en yüksek Ca^{+2} içeriği kolondan itibaren ilk 20 mm' lik mesafe içerisinde gözlenmiştir. Bu mesafeden sonra 60 mm' ye kadar Ca^{+2} içeriği giderek azalmaktadır. 60 mm' den sonra ise katkısız zeminle yaklaşık aynı değerde Ca^{+2} içeriği saptanmıştır (Şekil 10.2). Dolayısıyla %0 bentonit içeren zemin örneğinde kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonunun kolondan itibaren 60 mm' lik bir mesafeye

kadar göç ettiği ancak en etkin iyon göçünün ilk 20 mm' lik mesafede olduğu söylenebilir (Şekil 10.3).



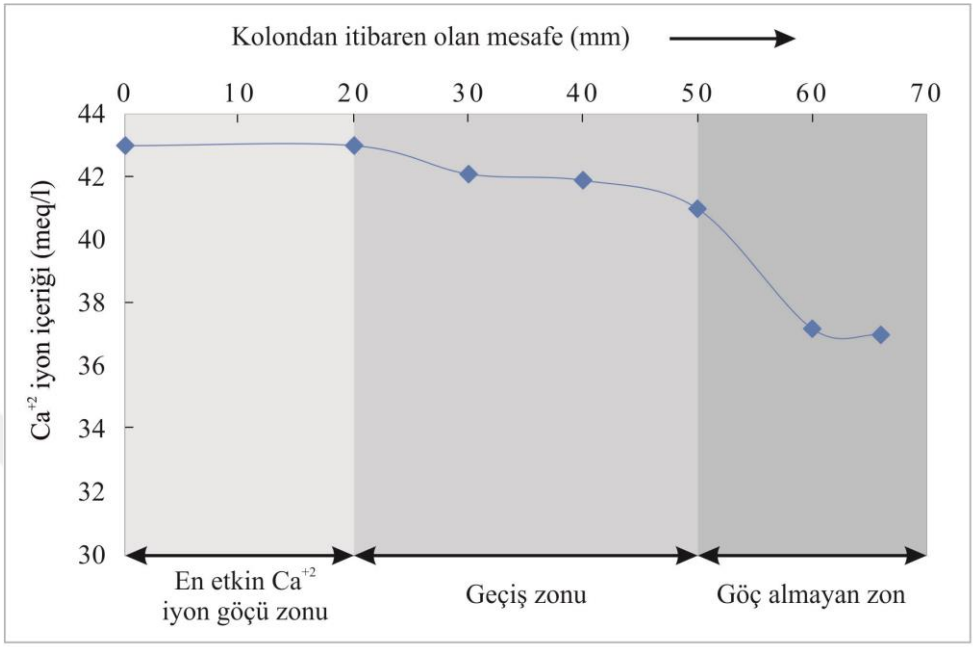
Şekil 10.3 % 0 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi.



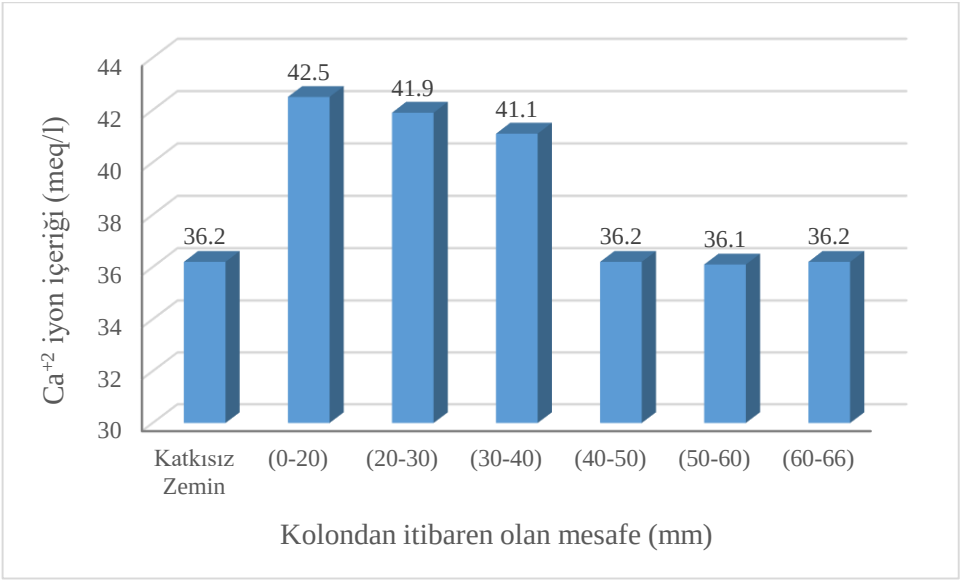
Şekil 10.4 % 20 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi.

%20 bentonit içeren zemin örneğinde en yoğun Ca^{+2} içeriği kolondan itibaren ilk 20 mm'de gözlenmiş ve 50 mm' lik mesafeye kadar gittikçe azalmıştır. 50 mm' den sonra ise katkısız zeminle yaklaşık aynı değerlerde Ca^{+2} içerikleri saptanmıştır (Şekil 10.4).

Dolayısıyla %20 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyonu kolondan itibaren 50 mm' lik bir mesafeye kadar göç etmiş fakat en etkin iyon göçü ilk 20 mm' lik mesafede gözlenmiştir (Şekil 10.5).

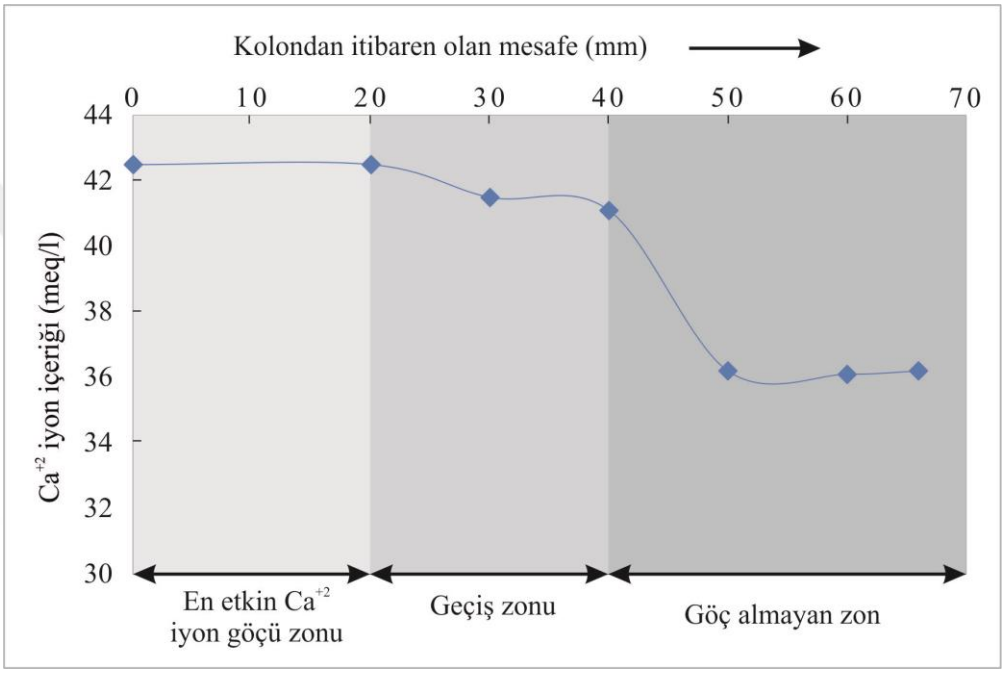


Şekil 10.5 % 20 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi.



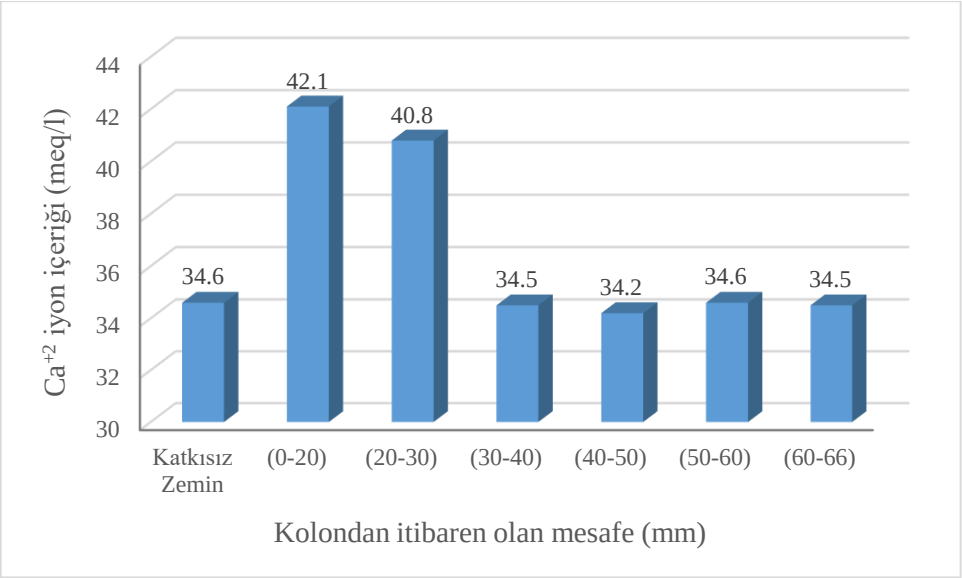
Şekil 10.6 % 40 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi.

Şekil 10.6 incelendiğinde %40 bentonit içeren zemin örneğinde en yüksek Ca^{+2} içeriğinin kolondan itibaren ilk 20 mm' lik mesafe içerisinde olduğu ve 40 mm'ye kadar gittikçe düştüğü görülmektedir. 40 mm' den sonra ise iyileştirilmemiş zeminle yaklaşık aynı değerlerde Ca^{+2} içerikleri saptanmıştır. Dolayısıyla %40 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyonunun kolondan itibaren 40 mm' lik mesafeye kadar göç ettiği ancak en etkin iyon göçünün ilk 20 mm' lik mesafede oluştuğu söylenebilir (Şekil 10.7).

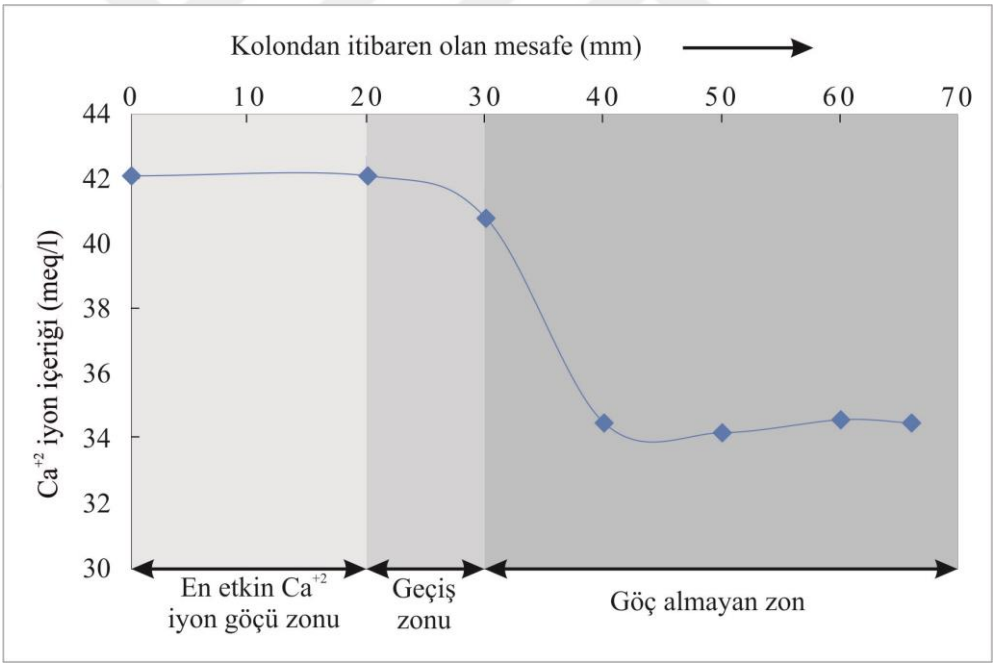


Şekil 10.7 % 40 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi.

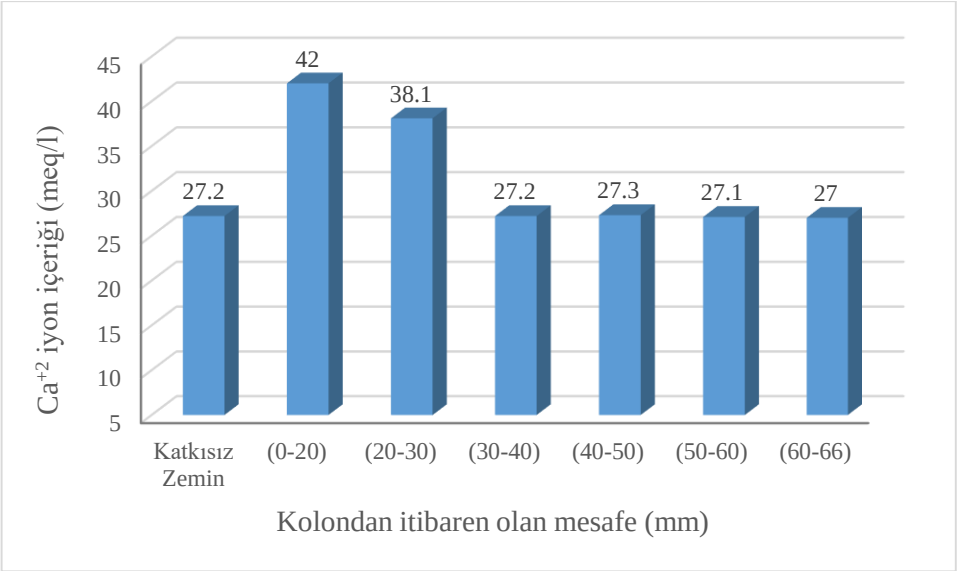
%60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde ise eşit mesafelerde Ca^{+2} iyon göçü saptanmıştır. Söz konusu zemin örneklerinde en yüksek Ca^{+2} içeriği kolondan itibaren ilk 20 mm' lik mesafe içerisinde saptanmışken, 20 ile 30 mm arasında bir düşüş gözlenmiştir. 30 mm' den sonra elde edilen Ca^{+2} içerikleri ise katkısız zemin örneklerinin Ca^{+2} içerikleriyle yaklaşık olarak aynıdır (Şekil 10.8, 10.10, 10.12). Dolayısıyla, Ca^{+2} iyonu %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde kolondan itibaren ilk 30 mm' lik bir mesafeye kadar göç etmiş olup en etkin iyon göçü ise ilk 20 mm' lik mesafe içerisinde saptanmıştır (Şekil 10.9, 10.11, 10.13).



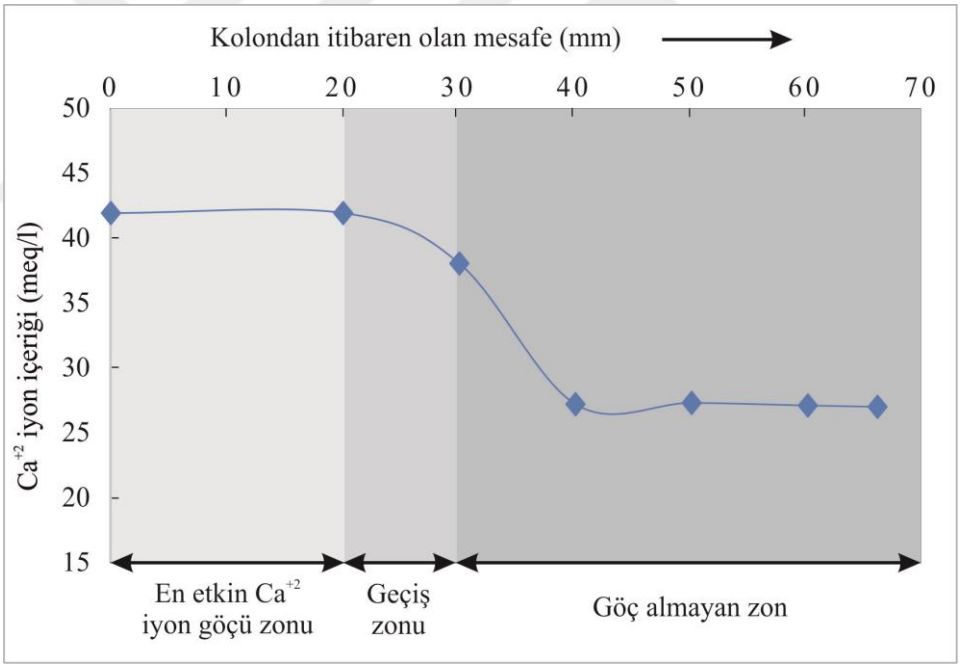
Şekil 10.8 % 60 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi.



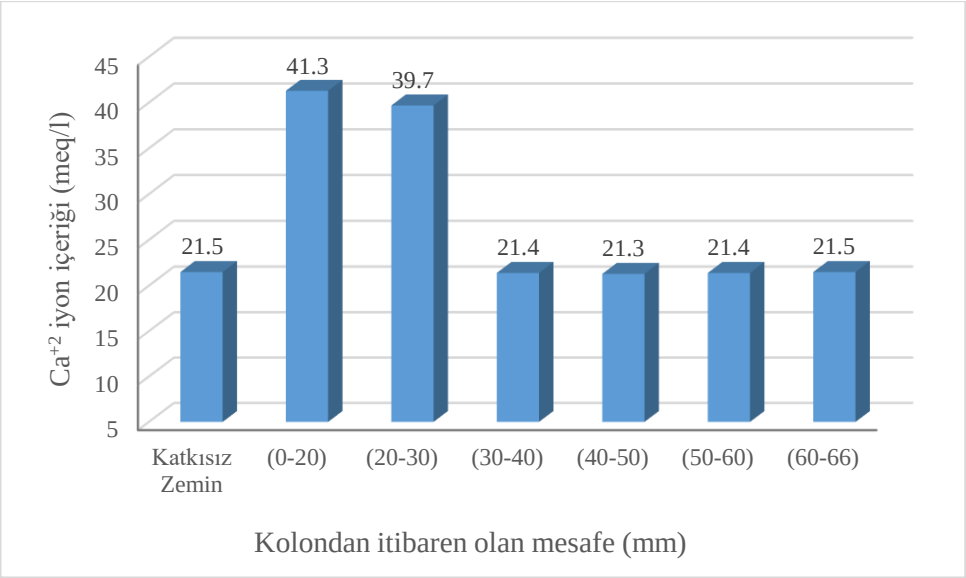
Şekil 10.9 % 60 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi.



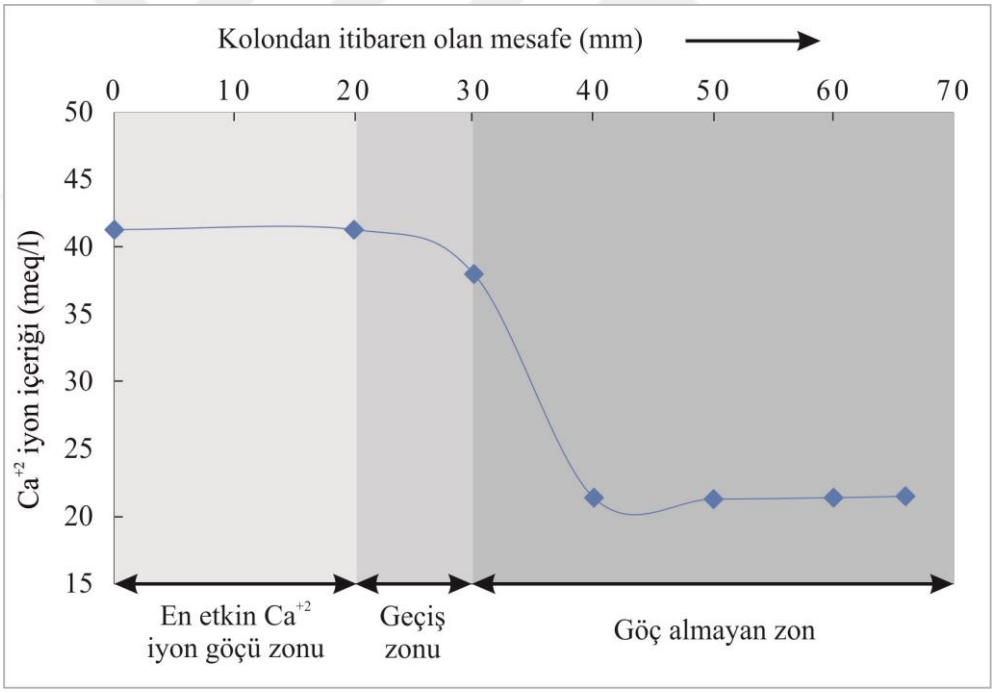
Şekil 10.10 % 80 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi.



Şekil 10.11 % 80 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi.

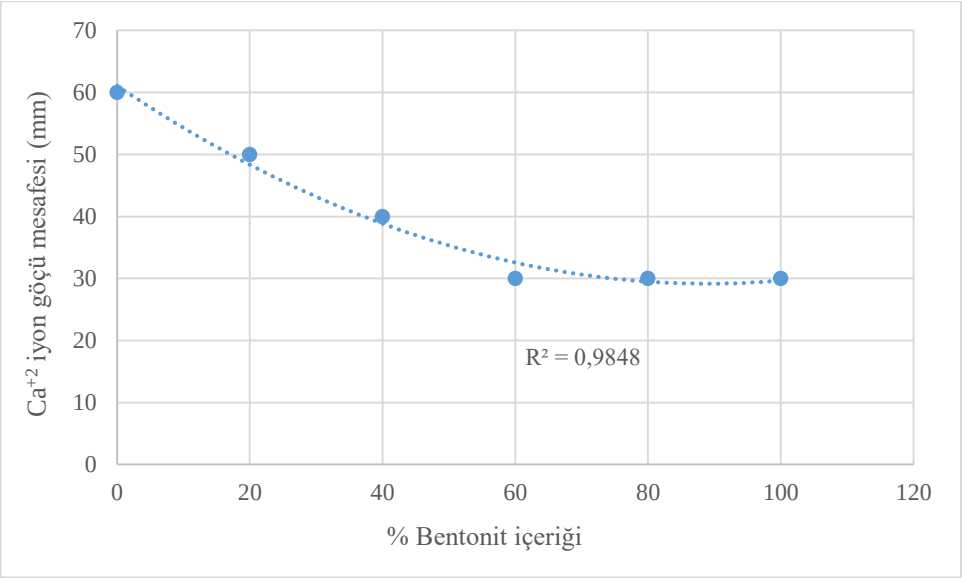


Şekil 10.12 % 100 bentonit içeren zemin örneğinde Ca^{+2} iyon içeriğinin kolondan itibaren olan değişimi.



Şekil 10.13 % 100 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren olan Ca^{+2} iyon göçü değişimi.

Her bir zemin örneği için Ca^{+2} iyon göçü mesafesi saptandıktan sonra zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı ve Ca^{+2} iyon göçü mesafesi arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiştir (Şekil 10.14).



Şekil 10.14 Zeminlerdeki bentonit oranı ve Ca^{+2} iyon göçü mesafesi arasındaki ilişki.

Ca^{+2} iyon göçü mesafesi ve bentonit oranı arasındaki ilişkiye bakıldığında belirlilik (determinasyon) katsayısının R^2 = 0,9848 olduğu görülmektedir. Bunun anlamı iki değişken arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Diğer bir ifadeyle, Ca^{+2} iyon göçü mesafesindeki toplam değişimin % 98,48' i bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 1,52' lik değişimin sebebi ise bilinmemektedir. Ayrıca, zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı arttıkça Ca^{+2} iyon göçü mesafesinde bir azalma olduğu, ancak %60 bentonit içeriğinden sonra eşit mesafelerde iyon göçü oluştuğu saptanmıştır (Şekil 10.14).

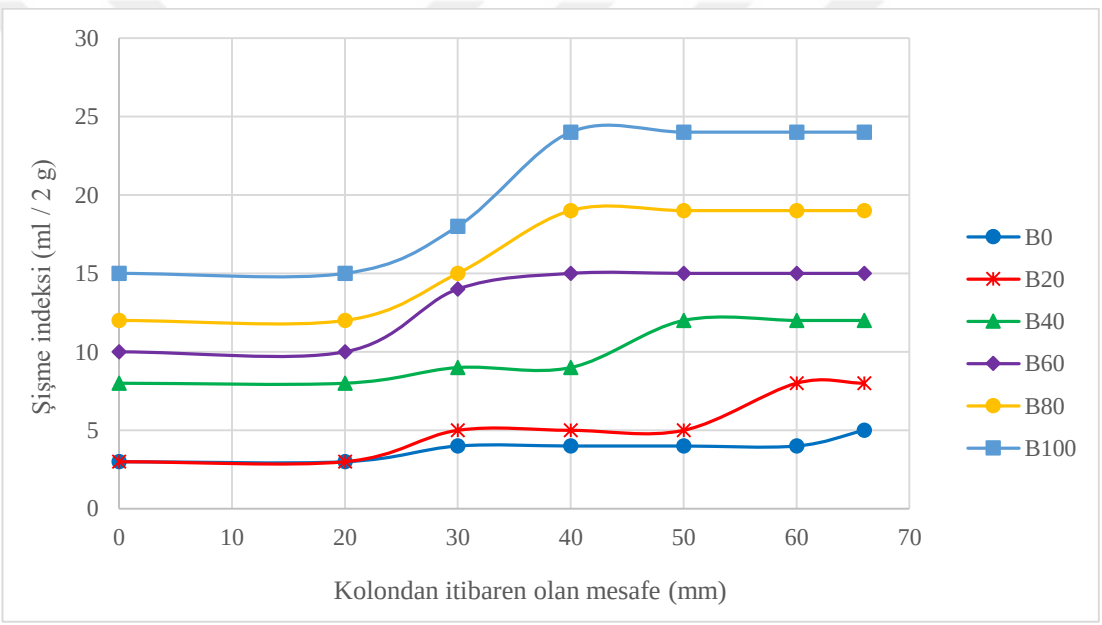
10.2. Zemin Örneklerinin Şişme Davranışlarındaki Değişim

Zemin örneklerinin şişme davranışlarının kolondan itibaren değişimini belirlemek amacıyla Ca^{+2} iyon içeriğini belirlemek için alınan numuneler üzerinde ayrıca şişme indeksi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 10.2 ve Şekil 10.15' de sunulmuştur.

Çizelge 10.2 Kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin şişme indeksleri.

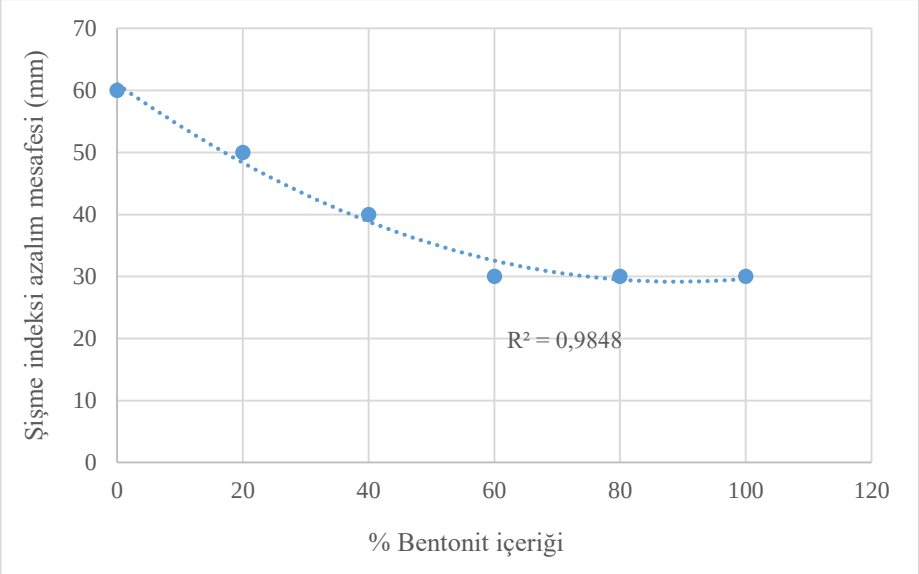
Örnek No	Şişme İndeksi (ml / 2 g)						
	Katkısız Zemin	Kolondan İtibaren Olan Mesafe					
		0-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	40-50 mm	50-60 mm	60-66 mm
B0	5	3	4	4	4	4	5
B20	8	3	5	5	5	8	8
B40	12	8	9	9	12	12	12
B60	15	10	14	15	15	15	15
B80	19	12	15	19	19	19	19
B100	24	15	18	24	24	24	24

B0 %0; B20 %20; B40 %40; B60 %60; B80 %80;B100 %100 bentonit içeren örnektir.



Şekil 10.15 Zemin örneklerinin şişme indekslerinin kolondan itibaren olan değişimi.

Zemin örneklerinin şişme indekslerinin kolondan itibaren olan değişimine bakıldığında Ca^{+2} iyon göçü mesafesi ile eşit mesafelerde iyileşmenin sağlandığı görülmektedir. Bütün zemin örnekleri için en etkin iyileştirme mesafesi kolondan itibaren ilk 20 mm olup, % 0, %20, %40 zemin örnekleri için sırasıyla 60 mm, 50 mm, 40 mm' lik bir mesafeye, %60, %80 ve % 100 bentonit içeren zemin örnekleri için ise 30 mm' lik mesafeye kadar iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 10.16 Zeminlerdeki bentonit oranı ve şişme indeksi azalım mesafesi arasındaki ilişki.

Zeminlerin içerdiği bentonit oranı ve şişme indeksi azalım mesafesi arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiş olup iki değişken arasındaki belirlilik (determinasyon) katsayısı R^2 = 0,9848 olarak bulunmuştur. Bu durum iki değişken arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğu anlamına gelmektedir. Şişme indeksi azalım mesafesindeki toplam değişimin % 98,48' i bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 1,52' lik değişimin sebebi ise bilinmemektedir. Ayrıca, şişme indeksi azalım mesafesinin bentonit oranı arttıkça azaldığı ancak %60 bentonit içeriğinden sonra sabit bir seyir izlediği görülmektedir (Şekil 10.16).

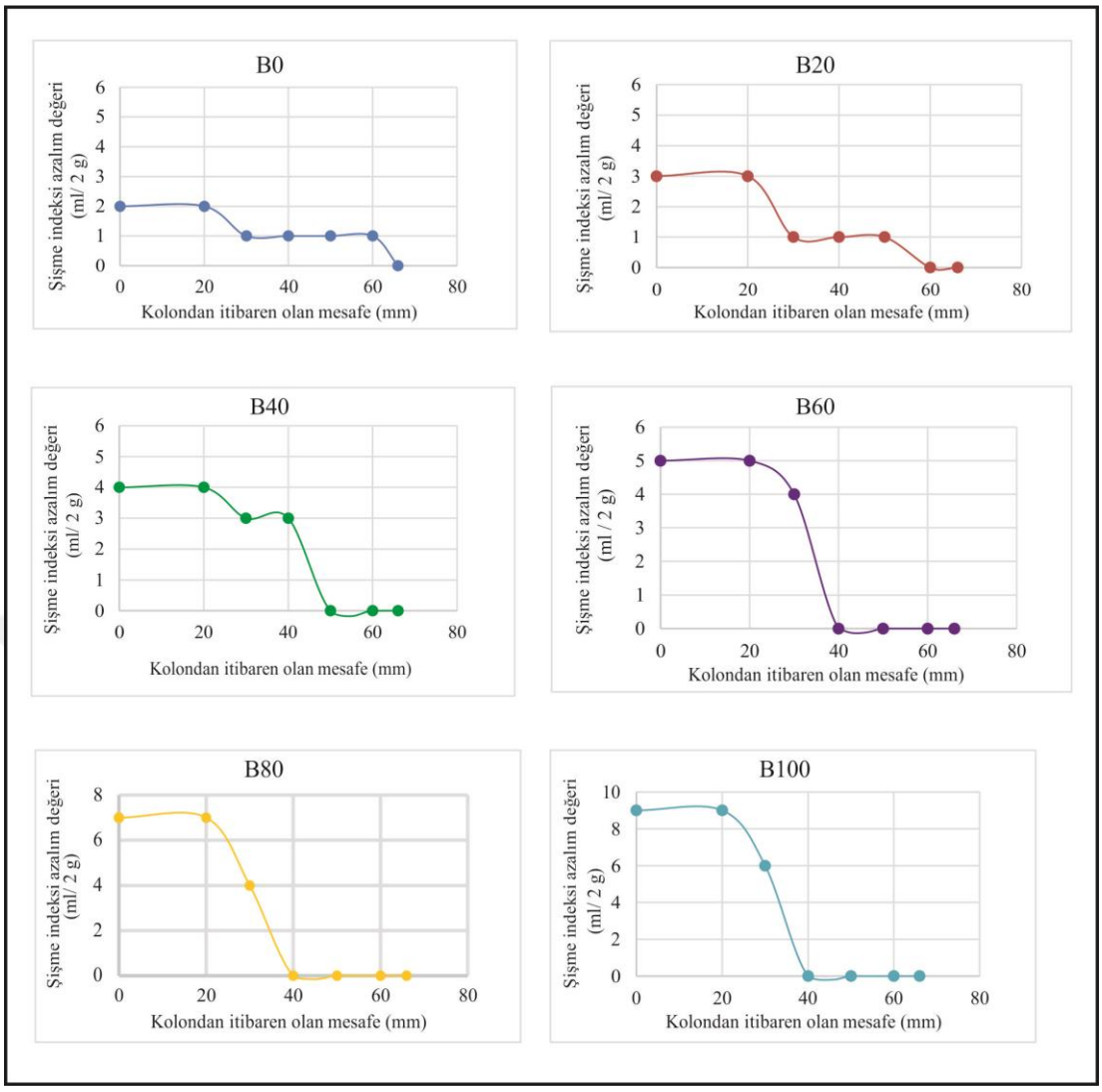
Şişme indeksi değerlerinin kolondan itibaren olan değişimine bakıldığında en etkin Ca^{+2} iyon göçü mesafesinde (20 mm) %0 bentonit içeren zemin örneğinin şişme indeksinin 5 ml / 2 g' dan 3 ml / 2 g' a düştüğü görülmektedir. Başka bir deyişle, 2 ml / 2 g' lık bir iyileşme sağlanmıştır. % 100 bentonit içeren zemin örneğinin şişme indeksi ise 24 ml / 2g' dan 15 ml / 2 g' a düşmüştür. Diğer bir ifadeyle, 9 ml / 2 g' lık bir iyileşme elde edilmiştir. Zemin örneklerinin şişme indekslerindeki azalım değerleri her bir zemin örneği ve her bir örnekleme mesafesi için hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge 10.3' de verilmiştir. Şişme indeksi azalım değerleri katkısız zeminin şişme indeksi değerinden örnekleme mesafelerindeki şişme indeksi değerlerinin çıkarılması ile elde edilmiştir.

Çizelge 10.3 Kolondan itibaren gözlenen şişme indeksi azalım değerleri.

Örnek No	Şişme İndeksi Azalım Değeri (ml / 2 g) Kolondan İtibaren Olan Mesafe					
	0-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	40-50 mm	50-60 mm	60-66 mm
B0	2	1	1	1	1	0
B20	3	1	1	1	0	0
B40	4	3	3	0	0	0
B60	5	4	0	0	0	0
B80	7	4	0	0	0	0
B100	9	6	0	0	0	0

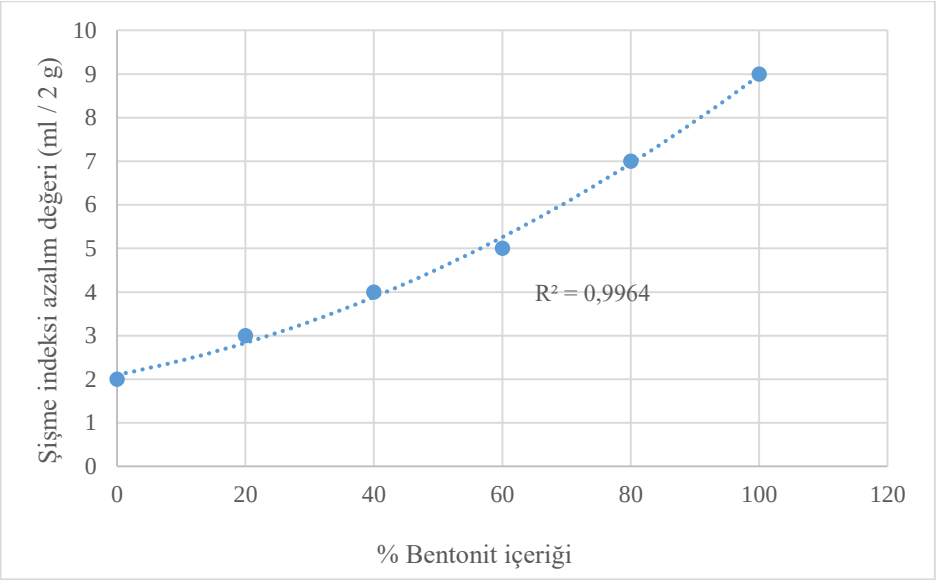
B0 %0; B20 %20; B40 %40; B60 %60; B80 %80; B100 %100 bentonit içeren örnektir.

Şişme indeksi azalım değerlerine bakıldığında her zemin örneği için en yüksek azalım değerinin en etkin Ca^{+2} iyon göçü mesafesinde (0-20 mm) oluştuğu görülmektedir. Bu mesafe içerisinde en yüksek şişme indeksi azalım değeri %100 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmekte olup bu değer %0 bentonit içeren zemin örneğine doğru göreceli olarak azalmaktadır. Dolayısıyla en iyi iyileştirme performansı %100 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmiştir. Elde edilen şişme indeksi azalım değerlerinin kolondan itibaren olan değişimi her zemin örneği için grafiksel olarak Şekil 10.17' de sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere en büyük iyileştirme mesafesi %0 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmekte iken en iyi iyileştirme %100 bentonit içeren zemin örneğinde sağlanmıştır.



Şekil 10.17 Şişme indeksi azalım değerlerinin kolondan itibaren olan değişimi.

Zeminlerin içerdiği bentonit oranı ile şişme indeksi azalım değeri arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiş olup iki değişken arasındaki belirlilik (determinasyon) katsayısı $R^2 = 0{,}9964$ olarak bulunmuştur. Bunun anlamı iki değişken arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Şişme indeksi azalım değerindeki toplam değişimin % 99,6' sı bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 0,4' lük değişimin sebebi ise bilinmemektedir. Ayrıca, zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı arttıkça şişme indeksi azalım değerlerinin de arttığı görülmektedir (Şekil 10.18).



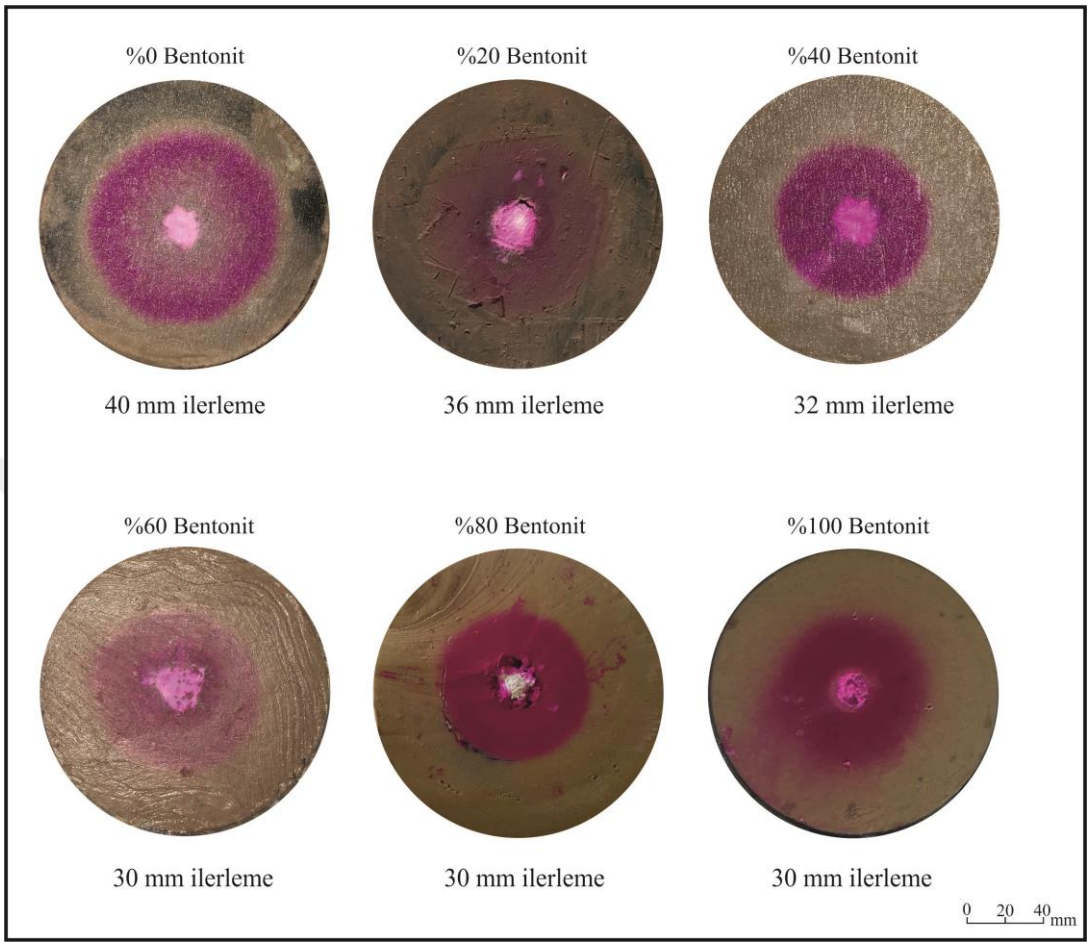
Şekil 10.18 Zeminlerdeki bentonit oranı ve şişme indeksi azalım değeri arasındaki ilişki.

10.3. Zeminlerdeki Şişen Kil Oranının OH^- İyon Göçü Mesafesi Üzerine Etkisi

Zeminlerdeki şişen kil oranının OH^- iyon göçü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla oluşturulan modeller 2 aylık kür süresi sonunda açılmış ve modelleri oluşturan zemin örnekleri kompaksiyon kalıplarından dikkatli bir şekilde çıkarılmıştır. Zemin örnekleri üzerinde meydana gelen renk değişimleri incelendiğinde her bir zemin örneğinde kireç kolonundan itibaren radyal şekilde pembe renkli bir zon gözlenmiştir. Zeminlerdeki renk değişiminin kireç kolonundan itibaren radyal bir şekilde gözlenmesi renk değişiminin kireçteki OH^- iyonunun zemin içerisine göç etmesi sonucu oluştuğunu göstermektedir. Bölüm 9.2.2' de belirtildiği gibi hidroksil iyonları kil zemin içerisine oldukça yüksek alkalin şartlara neden olmaktadır. Dolayısıyla, alkalin özellik kazanmış kil zemin örnekleri fenoftalein çözeltisi ile temas ederek pembe bir renk almışlardır. Kireç kolonundan itibaren gözlenen bu pembe renkli zonun sınırları ölçülerek kireçteki OH^- iyonunun zemin içerisindeki göç mesafesi saptanabilir. Bu amaçla her bir zemin örneğinde kireç kolonunun etrafında oluşan renkli zonun sınırları dikkatli bir şekilde mm ölçeğinde ölçülmüştür. İyon göçü sınırları belirlenirken, kireç kolonunun kenarı ile renkli zonun sınırı arasındaki mesafe dikkate alınmıştır.

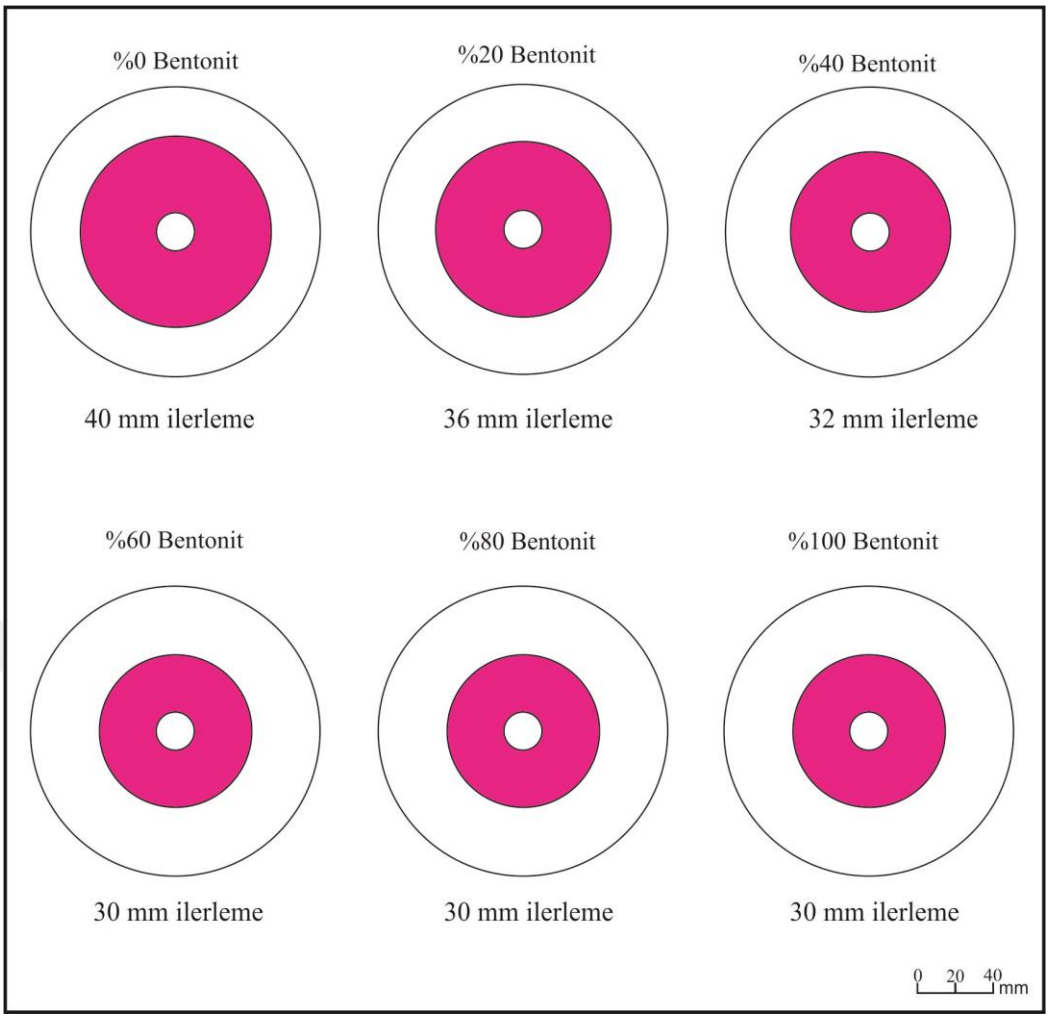
Modellerde gözlenen renk değişimleri Şekil 10.19' da, söz konusu modelleri temsil eden bir kesit ise Şekil 10.20' de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde OH^- iyonunun %0, %20 ve %40 bentonit içeren zemin örneklerinde kolondan itibaren sırasıyla 40 mm, 36 mm ve 32 mm' lik mesafe' ye kadar göç ettiği görülmektedir. %60, %80 ve

%100 bentonit içeren zemin örneklerinde ise OH^- iyon göçü mesafesi eşit olup 30 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 10.19 OH^- iyon göçü mesafesini saptamak için oluşturulan laboratuvar modellerinde kür süresi sonunda gözlenen renk değişimleri.

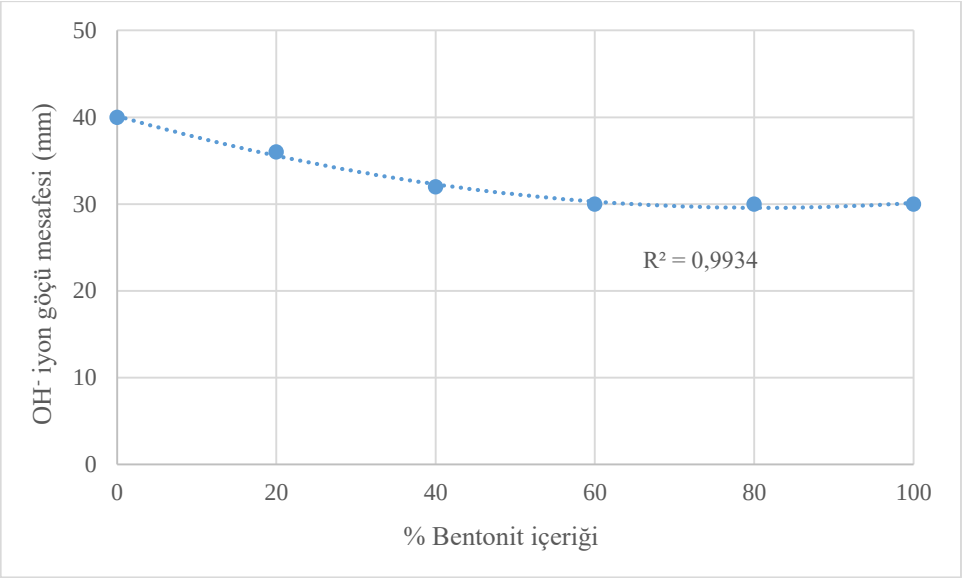
Kireç kolonu çevresinde oluşan renkli zonun derinlikle olan değişimini görmek için modeller düşey olarak kesilmiştir. Örnek oluşturması amacıyla %100 bentonit içeren zemin örneğinden kesilen bir parça Şekil 10.21' de sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere yüzeyde gözlenen renkli zon derinlik boyunca da oluşmuştur ve yüzeydeki sınırla yaklaşık aynı sınır değerine sahiptir.



Şekil 10.20 OH^- iyon göçü mesafesini saptamak için oluşturulan laboratuvar modellerinde gözlenen renk değişimlerini gösteren kesit.



Şekil 10.21 %100 bentonit içeren zemin örneğinde oluşan renkli zonun derinlikle olan değişimi.

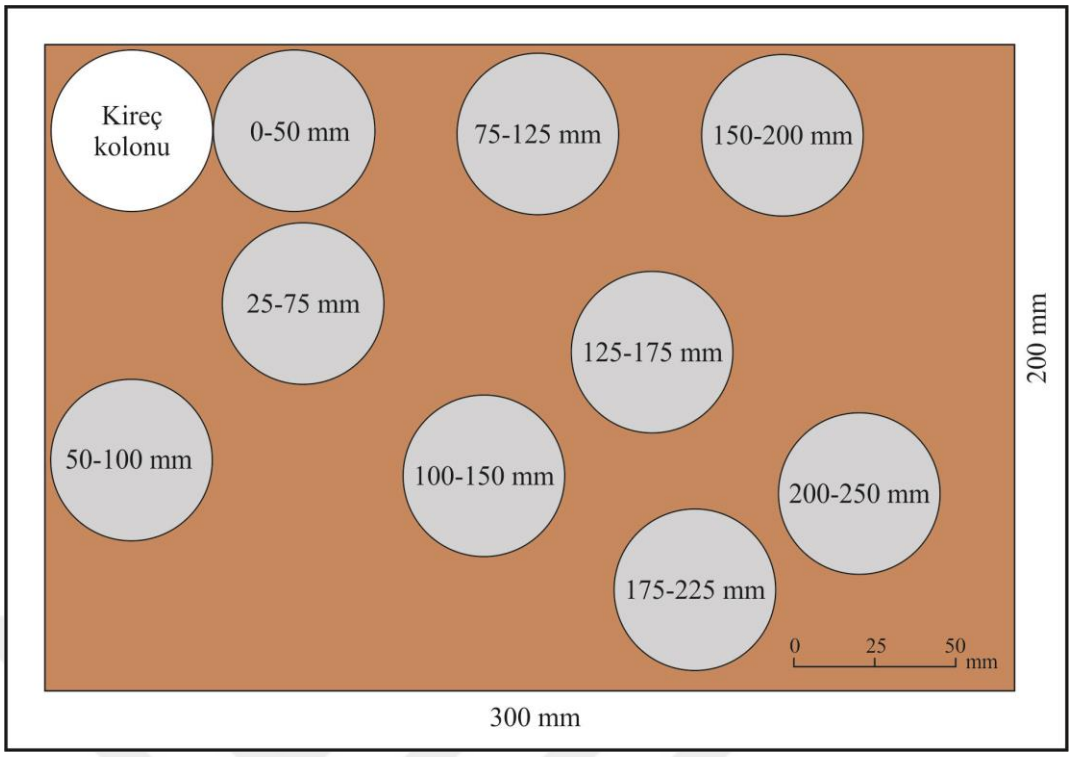


Şekil 10.22 Zeminlerdeki bentonit oranı ve OH^- iyon göçü mesafesi arasındaki ilişki.

Zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı ve OH^- iyon göçü mesafesi arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiş olup belirlilik (determinasyon) katsayısı R^2=0,9934 olarak bulunmuştur. Bu iki değişken arasında kuvvetli bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. OH^- iyon göçü mesafesindeki toplam değişimin % 99,34' ü bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 0,66' lık değişimin sebebi ise bilinmemektedir. Ayrıca zeminlerdeki bentonit oranı arttıkça OH^- iyon göçü mesafesinde bir azalma gözlenmesine rağmen %60 bentonit içeriğinden sonra zemin örneklerinde aynı miktarda OH^- iyon göçü mesafesi saptanmıştır (Şekil 10.22).

10.4. Büyük Ölçekli Modellerde Gözlenen Kolon Performansları

Örnek olay çalışması kapsamında oluşturulan büyük ölçekli laboratuvar modelleri 2 aylık kür süresi sonunda açılmış ve 50 mm iç çaplı örnek tüpleri kullanılarak kolondan itibaren değişik mesafelerde numuneler alınmıştır. Numune alım düzeni Şekil 10. 23' de gösterilmiştir.



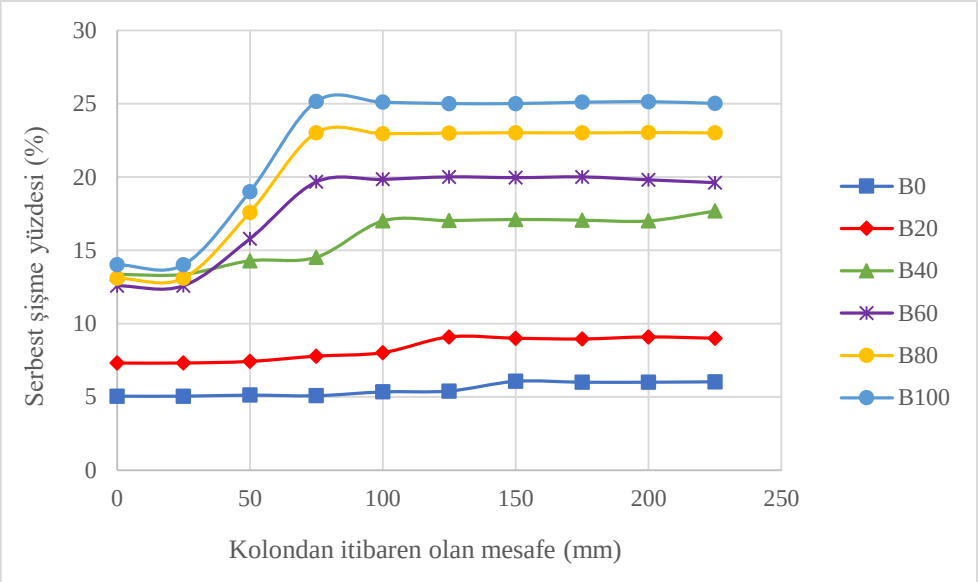
Şekil 10. 23 Büyük ölçekli modellerde numune alım düzeni.

Numune alım düzenine dikkat edildiğinde numune çaplarının 50 mm, numune aralıklarının ise 25 mm olduğu görülmektedir. Numune aralıklarının 25 mm olarak seçilmesinin sebebi olabildiğince çok numune alarak daha hassas verilerin elde edilmesidir. Alınan numuneler üzerinde bu tez çalışması kapsamında oluşturulan deney düzeneği kullanılarak serbest şişme deneyleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 10.4' de, şişme potansiyellerinin kolondan itibaren olan değişimi ise Şekil 10.24' de sunulmuştur.

Çizelge 10.4. Büyük ölçekli modellerde kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin serbest şişme yüzdeleri.

Örnek No	Serbest Şişme Yüzdesi (%) Kolondan İtibaren Olan Mesafe (mm)								
	0-50	**25-75**	**50-100**	**75-125**	**100-150**	**125-175**	**150-500**	**175-225**	**200-250**
B0	5.05	5.12	5.08	5.34	5.40	6.06	6	6	6.03
B20	7.31	7.42	7.78	8.02	9.09	9	8.95	9.09	9
B40	13.35	14.28	14.52	17	17.02	17.10	17.05	17	17.67
B60	12.58	15.78	19.66	19.83	20	19.95	20	19.80	19.61
B80	13.10	17.58	23.01	22.95	22.98	23.01	23	23.02	23
B100	14.01	19	25.15	25.09	25	25	25.09	25.13	25.01

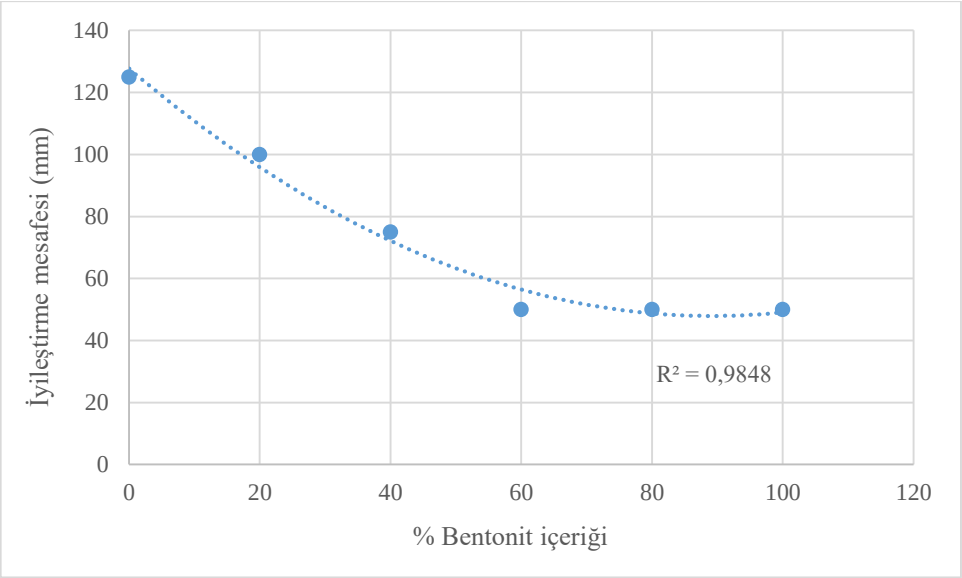
B0 %0; B20 %20; B40 %40; B60 %60; B80 %80; B100 %100 bentonit içeren örnektir.



Şekil 10.24 Büyük ölçekli modellerde serbest şişme yüzdelerinin kolondan itibaren olan değişimi.

Sonuçlar incelendiğinde bütün zemin örneklerinin serbest şişme yüzdelerinde kolondan itibaren belirli bir mesafeye kadar azalma görülmektedir. Numune alım mesafelerinin kısmen çakışmasından dolayı zeminlerde gözlenen iyileştirme mesafeleri hesaplanırken numune alım mesafelerinin merkez noktaları baz alınmıştır. Örneğin; %0 bentonit içeren zeminin serbest şişmesi 100-150 mm arasında % 5.40, 125-175 mm arasında ise % 6.06 olarak hesaplanmıştır. Bu iki numunenin mesafesi 125-150 mm aralığında kesişmektedir. Dolayısıyla, % 0 bentonit içeren zemin örneğinde kolondan itibaren ilk 125 mm' lik bir mesafeye kadar iyileştirme sağlandığı söylenebilir. Benzer şekilde, % 20 bentonit içeren zemin örneğinde 100 mm, %40 bentonit içeren zemin örneğinde 75 mm, %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde ise 50 mm' lik bir mesafeye kadar iyileştirme sağlanmıştır.

Elde edilen iyileştirme mesafeleri ve zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiş olup sonuçlar Şekil 10.25' de sunulmuştur.



Şekil 10.25 Serbest şişme deneyinde zeminlerdeki bentonit oranı ve iyileştirme mesafesi arasındaki ilişki.

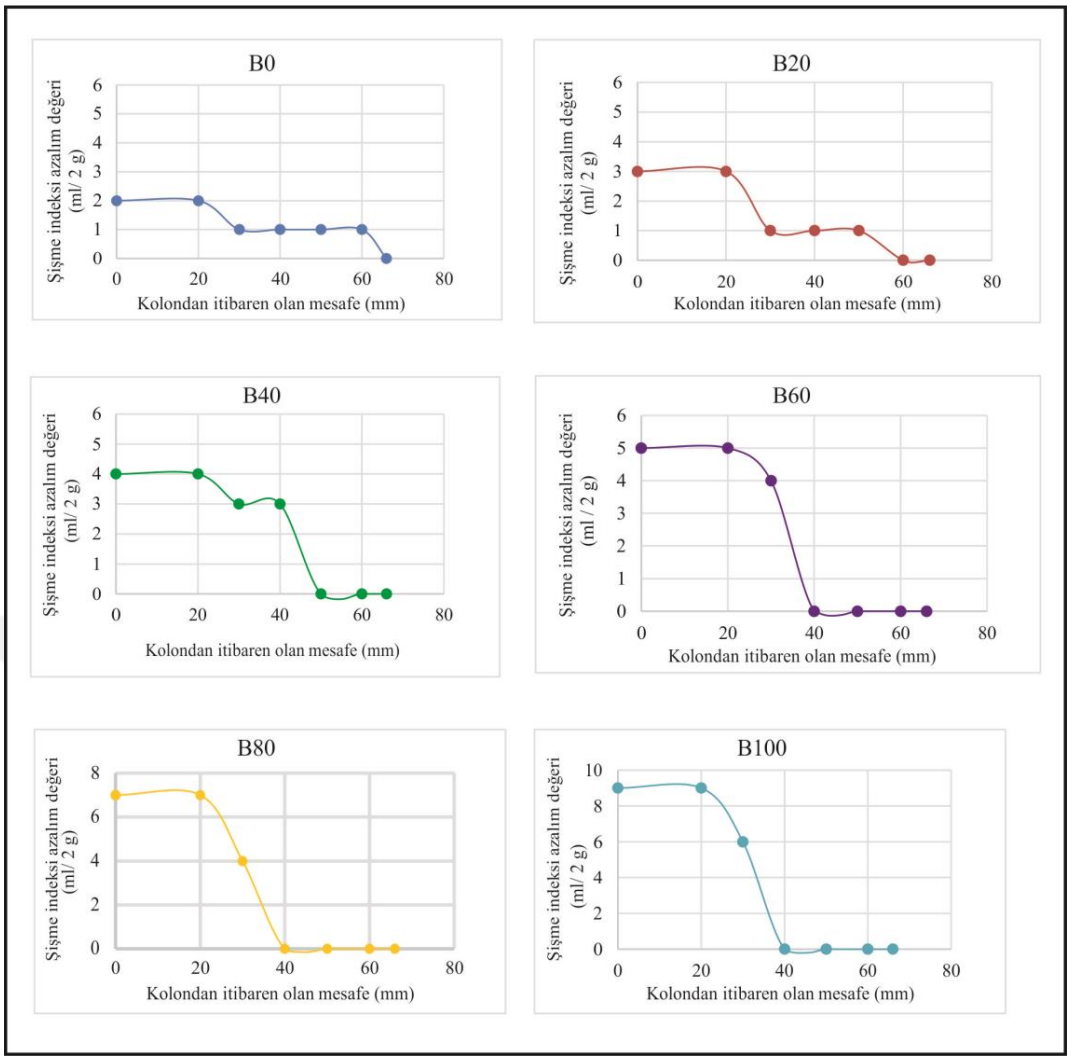
Zemin örneklerinin iyileşme mesafesi ve bentonit oranı arasındaki ilişkiye bakıldığında belirlilik (determinasyon) katsayısının $R^2 = 0,9848$ olduğu görülmektedir. Bunun anlamı iki değişken arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Diğer bir ifadeyle, iyileştirme mesafesindeki değişimin % 98,48' si bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 1,52' lik değişimin sebebi ise bilinmemektedir. (Şekil 10.25).

Zemin örneklerinin serbest şişme yüzdelerinde oluşan azalım miktarlarından yola çıkılarak zemin örneklerinin serbest şişme azalım yüzdeleri bütün örnekleme mesafeleri için hesaplanmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 10.15' de sunulmuştur. Bütün zemin örneklerinde gözlenen serbest şişme azalım yüzdelerinin kolondan itibaren olan değişimi ise Şekil 10.26' de verilmiştir.

Çizelge 10.15 Kolondan itibaren gözlenen serbest şişme azalım yüzdeleri.

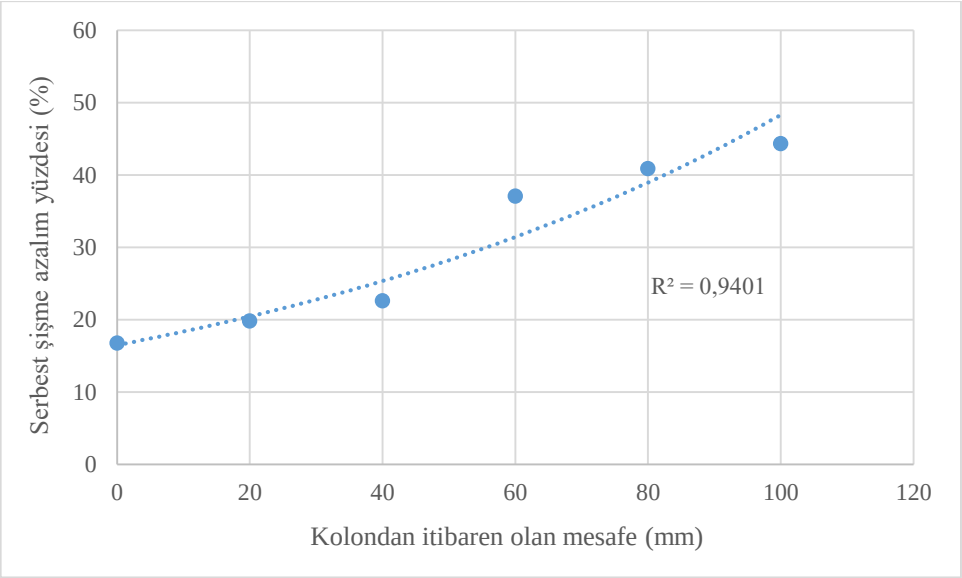
Örnek No	Serbest Şişme Azalım Yüzdesi (%) Kolondan İtibaren Olan Mesafe (mm)								
	0-50	**25-75**	**50-100**	**75-125**	**100-150**	**125-175**	**150-200**	**175-225**	**200-250**
B0	16.80	15.65	16.31	12.03	11.04	0.16	1.15	1.15	0.66
B20	19.85	18.64	14.69	12.06	0.33	1.32	1.86	0.33	1.32
B40	22.61	17.22	15.83	1.45	1.33	0.87	1.16	1.45	0.29
B60	37.10	21.10	1.70	0.85	0	0.25	0.00	1	1.95
B80	41.20	23.63	0.04	0.30	0.17	0.04	0.09	0	0.09
B100	44.36	24.54	0.12	0.36	0.71	0.71	0.36	0.20	0.68

B0 %0; B20 %20; B40 %40; B60 %60; B80 %80; B100 %100 bentonit içeren örnektir.



Şekil 10.26 Serbest şişme azalım yüzdelerinin kolondan itibaren olan değişimi.

Zemin örneklerinin serbest şişme azalım yüzdelerine bakıldığında kolondan itibaren ilk 50 mm' lik mesafe içerisinde en etkin iyileştirmenin %44.36' lık bir iyileştirme ile % 100 bentonit içeren zemin örneğinde sağlandığı görülmektedir. Bu değer %0 bentonit içeren zemin örneğine doğru göreceli olarak azalmaktadır. Dolayısıyla en büyük iyileştirme mesafesi %0 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmesine rağmen en iyi iyileştirme %100 bentonit içeren zemin örneğinde elde edilmiştir.



Şekil 10.27 Zeminlerdeki bentonit oranı ve serbest şişme azalım yüzdesi arasındaki ilişki.

Zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı ve serbest şişme azalım yüzdesi arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiş olup iki değişken arasındaki belirlilik (determinasyon) katsayısı $R^2 = 0,9401$ olarak bulunmuştur. Bunun anlamı iki değişken arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Başka bir deyişle, serbest şişme azalım yüzdesindeki değişimin % 94,01' i bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 5,99' luk değişimin sebebi ise bilinmemektedir. Ayrıca, zemin örneklerinin içerdiği bentonit oranı arttıkça serbest şişme azalım yüzdelerinin de arttığı gözlenmiştir (Şekil 10.27).

11. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Kolon tekniğinin iyileştirme mekanizması katkı maddesinin kolonu çevreleyen zemine zamanla difüzyonu sonucu kil ile katkı maddesi arasında oluşan fizikokimyasal reaksiyonlara dayanır. Katkı maddesinin içerdiği iyonların kolonu çevreleyen zemine olan göçü bu reaksiyonların ve dolayısıyla iyileşmenin oluşabilmesi için gereklidir. İyonların zemin içerisine göç etmesini etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar; zeminin nem içeriği, geçirimliliği, gözenekliliği, kil mineralojisi, zemin içerisindeki kayma düzlemleri, zeminin emmesi olarak sayılabilir (Rogers ve Glendinning, 1994). Bu tez çalışması kapsamında, şişen killi zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi sırasında zeminin içerdiği şişen kil oranının iyon göçü ve kolon performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Amaca yönelik olarak ağırlıkça %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında bentonit içeren zemin örnekleri hazırlanmış olup her zemin örneği için laboratuvar ölçekli modeller oluşturulmuştur. Bazı araştırmacılar kirecin kil içerisinde $Ca(OH)_2$ iyon çifti halinde göç etmediğini, Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının ayrı olarak göç ettiğini belirtmişlerdir (Davidson vd., 1965; Rogers ve Glendinning, 1996; Mitchell ve Soga, 2005; Beetham vd., 2014). Dolayısıyla Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının göç mesafelerini belirlemek amacıyla her zemin örneği için iki ayrı laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken zemin örnekleri 152 mm çapında 115 mm yüksekliğindeki kompaksiyon kalıplarına optimum su içeriğinde ve standart sıkıştırma enerjisinde sıkıştırılmış ve merkezde olacak şekilde 20 mm çapında kireç kolonları oluşturulmuştur. Kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonlarının kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesiyle oluşan katyon değişimi reaksiyonları ile zeminin şişme özelliği önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Dolayısıyla Ca^{+2} iyon göçünü belirlemek için oluşturulan modellerde zemin örneklerinin şişme davranışlarındaki değişimler de belirlenmiştir. Ayrıca her zemin örneği için daha büyük ölçekli bir model oluşturularak örnek olay çalışması yapılmıştır. Büyük ölçekli modellerde 20 cm x 30 cm x 45 cm boyutlarındaki kasalar kullanılmış, kolon çapı ise 50 mm olarak seçilmiştir. Hazırlanan bütün laboratuvar modelleri 2 aylık bir kür süresince oda sıcaklığında bekletilmişlerdir. Bu süre zarfınca iyon göçüne yardım edeceği düşünülerek kireç kolonlarından sürekli olarak su girişi sağlanmıştır.

Ca^{+2} iyon göçü mesafesini belirlemek amacıyla kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin Ca^{+2} iyon içerikleri EDTA analizi ile saptanmıştır. Ayrıca, zemin

örneklerinin şişme davranışlarındaki değişimi belirlemek amacıyla Ca^{+2} iyon içeriğini belirlemek için alınan numuneler üzerinde şişme indeksi deneyleri de yapılmıştır.

OH^- iyon göçü mesafesini belirlemek için oluşturulan modellerde ise bir asit baz indikatörü olan fenoftalein kullanılmıştır. Hidroksil iyonları kil zemin içerisinde oldukça yüksek alkalin şartlara neden olmaktadır. Dolayısıyla alkalin özellik kazanmış killi zemin örnekleri fenoftalein çözeltisi ile temas ederek pembe bir renk almaktadır. Kür süresi sonunda modellerde oluşan renk değişimleri incelendiğinde her bir modelde kolondan itibaren radyal şekilde pembe renkli bir zonun varlığı gözlenmiştir. Bu renk değişimin kolonun çevresinde radyal bir şekilde oluşu renk değişiminin OH^- iyonların zemin içerisine göç etmesinden kaynaklandığı göstermektedir. Bu renkli zonun sınırları ölçülerek modellerdeki OH^- iyon göçü mesafeleri belirlenmiştir.

Büyük ölçekli modellerde ise iyon göçü mesafeleri ölçülmeyerek sadece zemin örneklerinin şişme davranışlarındaki değişimler belirlenmiştir. Bu amaçla kolondan itibaren değişik mesafelerde alınan numuneler üzerinde bu tez çalışması kapsamında oluşturulan bir deney düzeneği kullanılarak serbest şişme deneyleri yapılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Hazırlanan zemin örneklerinin tane boyu dağılımı bu örneklerin çoğunlukla ince tane boylu malzemelerden oluştuğunu göstermekte olup kil tane boyu malzemenin miktarı %42 ile %100 arasında değişmektedir. Örneklerin kil mineral içeriği %22-89 arasında ve Na-smektit mineral içeriği %0-89 arasında değişmektedir. Örneklerin likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri sırasıyla %51-269, %23-35 ve %28-234 arasında değişmektedir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi' ne göre hazırlanan örneklerin zemin sınıfları CH (yüksek plastisiteli inorganik kil) olarak belirlenmiştir.

Zemin örneklerinin serbest şişme yüzdeleri %6.07-25.18, şişme indeksleri 5-24 ml/2g, Ca^{2+} içerikleri ise 38.1-21.5 meq/l arasında değişmektedir. Örneklerinin geçirimlilik katsayıları ise $1.34.\ 10^{-8}$ ile $1.83.\ 10^{-11}$ m/s arasında değişmekte olup ve %0 bentonit içeren zemin örneğinden %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru azalmaktadır.

2 aylık kür süresi sonunda bütün zemin örneklerinde en etkin Ca^{+2} iyon göçü mesafesi 20 mm olarak belirlenmiştir. 20 mm' den sonra Ca^{+2} iyon göçü her zemin örneğinde azalarak devam etmekte ancak belirli bir mesafede son bulmaktadır. Ca^{+2} iyonu % 0,

%20, %40 bentonit içeren zemin örneklerinde sırasıyla 60 mm, 50 mm ve 40 mm' lik mesafeye kadar göç etmiştir. %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde ise eşit mesafelerde iyon göçü saptanmış olup 30 mm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla en büyük Ca^{+2} iyon göçü mesafesi % 0 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmiştir. Bunun sebebini anlayabilmek için killi zeminlerde iyon göçünü sağlayan mekanizmalar incelenmelidir. Bölüm 8' de açıklandığı üzere killi zeminlerde iyon göçünü etkileyen başlıca iki mekanizma difüzyon ve adveksiyondur. Advektif geçişte iyon göçü kil boyunca su akımıyla gerçekleşmektedir. Difüziv geçişte ise iyonlar yüksek konsantrasyonda bulundukları bir bölgeden düşük konsantrasyonda bulundukları bölgeye hareket ederler. Yüksek plastisiteli zeminlerde iyonların hareketinde difüzyon mekanizması etkindir. Adveksiyon mekanizması ise zeminin geçirimliliği oranında etkili olabilmektedir. Geçirimlilik katsayısı 10^{-9} m/s' den büyük olan zeminlerde iyonların hareketinde adveksiyon mekanizması baskındır (Mitchell ve Soga, 2005). Zemin örneklerinin geçirimlilik katsayılarına bakıldığında %0 bentonit içeren zemin örneğinin en yüksek ve %100 bentonit içeren zemin örneğinin ise en düşük geçirimliliğe sahip olduğu görülmektedir. Diğer zemin örneklerinin geçirimliliği ise %100 bentonit içeren zemin örneğine doğru göreceli olarak azalmaktadır. Bütün zemin örnekleri yüksek plastisiteli olmasına rağmen %100 bentonit içeren zeminin likit limit ve plastisite indeksi sırasıyla %269 ve %234 iken, % 0 bentonit içeren zemin örneğinin likit limit ve plastisite indeksi %51 ve %28' dir. Diğer bir ifadeyle, %100 bentonit içeren zemin örneği %0 bentonit içeren zemin örneğine oranla oldukça yüksek plastisitelidir. Dolayısıyla, %0 bentonit içeren zemin örneğinde oluşan iyon göçünde adveksiyon mekanizması baskın iken %100 bentonit içeren zemin örneğinde difüzyon mekanizması baskındır. %20 ve %40 bentonit içeren zemin örneklerinde her iki mekanizma değişik oranlarda etkili olmaktadır. %60 ve %80 bentonit içeren zemin örnekleri ise %100 bentonit içeren zemin örneği gibi davranmıştır. Bunun sebebi bu zemin örneklerinin yaklaşık aynı geçirimlilikte olmasından kaynaklanıyor olabilir.

İyon göçünü etkileyen diğer bir faktör ise kil kireç arasında meydana gelen reaksiyonlardır. Killi bir zemine kireç eklendiği zaman öncelikle katyon değişimi reaksiyonları gerçekleşir ve kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonları kilin içerisindeki Na^{+} iyonları ile yer değiştirir. Bu iyon değişimi reaksiyonları Ca^{+2} iyonunun zemin

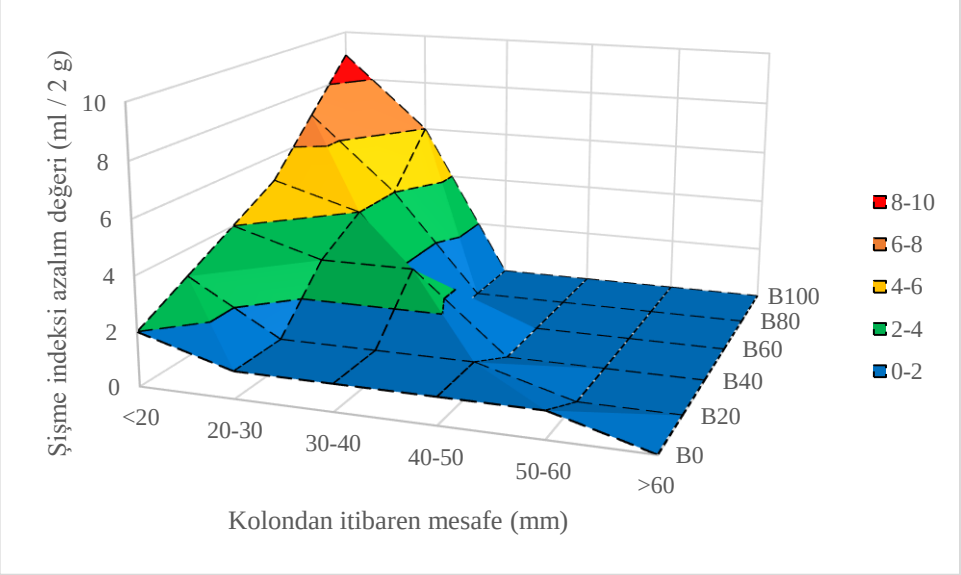
içerisindeki göçünü yavaşlatabilir. Dolayısıyla Ca^{+2} iyon göçü mesafesinin şişen kil oranının artmasıyla azalmasının diğer bir sebebi katyon değişimi reaksiyonları olabilir.

Ca^{+2} iyon göçü mesafesi ve bentonit oranı arasındaki belirlilik (determinasyon) katsayısı R^2=0,9848 olarak bulunmuştur (Şekil 10.14). Bunun anlamı iki değişken arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Diğer bir deyişle, Ca^{+2} iyon göçü mesafesindeki toplam değişimin % 98,48' i bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 1,52' lik değişimin sebebi ise bilinmemektedir.

Ca^{+2} iyon içeriğini belirlemek için alınan numuneler üzerinde yapılan şişme indeksi deneyleri sonucunda bütün zemin örnekleri için en etkin iyileştirme mesafesinin kolondan itibaren ilk 20 mm olduğu görülmüştür. Ayrıca % 0, %20, %40 zemin örnekleri için sırasıyla 60 mm, 50 mm, 40 mm' lik bir mesafeye kadar, %60, %80 ve % 100 bentonit içeren zemin örnekleri için ise 30 mm' lik bir mesafeye kadar iyileşme sağlanmıştır. Dolayısıyla bütün zemin örneklerinde Ca^{+2} iyon göçü mesafesi ile eşit mesafelerde iyileşme gözlenmiştir. Bunun sebebi zemin örneklerinin şişme davranışlarındaki azalmanın kireçteki Ca^{+2} iyonları ve kildeki Na^{+} iyonlarının yer değiştirmesi ile sağlanmasıdır. Na^{+} iyonu Ca^{+2} iyonuna göre tabakalar arasına oldukça fazla miktarda suyun girmesine ve mineralin çok şişmesine neden olmaktadır.

İyileşme mesafeleri sınırları içerisinde en yüksek şişme indeksi azalım değeri %100 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmiş olup bu değer %0 bentonit içeren zemin örneğine doğru azalmıştır. Dolayısıyla, en büyük iyileştirme mesafesi %0 bentonit içeren zemin örneğinde gözlenmesine rağmen en iyi iyileştirme %100 bentonit içeren zemin örneğinde sağlanmıştır. Bunun sebebi tabakalarının her iki tarafında da silika katmanı bulunan üç katmanlı kil minerallerinin tabakalarının yalnızca bir yüzeyinde silika katmanı bulunan iki katmanlı kil minerallerine göre daha reaktif olmasıdır. Diğer bir ifade ile % 100 bentonit içeren zemin örneğinin yüksek oranda Na-montmorillonit içermesi onu kireçteki Ca^{+2} iyonlarına karşı daha reaktif yapmış ve daha iyi bir iyileşme sağlamıştır. % 0 bentonit içeren zemin örneğine doğru Na-montmorillonit oranı azalmaktadır. Üstelik zeminlerdeki kil mineral içeriği %0 bentonit içeren zemin örneğinde %89 iken bu oran %0 bentonit içeren zemin örneğine doğru azalmakta ve %22' ye kadar düşmektedir. Bütün bunlar % 0 bentonit içeren zemin örneğini kireçteki Ca^{+2} iyonlarına karşı daha az reaktif yapmakta ve iyileşme performansını azaltmaktadır. Şekil 11.1' de şişme indeksi azalım değerinin hem kolondan itibaren

olan mesafe ile hem de bentonit içeriği ile olan değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere bentonit içeriği arttıkça şişme indeksi azalım değeri artmakta ancak iyileştirme mesafesi azalmaktadır. Renkli olan bölgeler şişme indeksi azalım değerlerinin yoğunluğunu vermektedir. Örneğin; mavi bölge 0 ve 2 ml/ 2g aralığındaki şişme indeksi azalım değerlerinin yoğunluğunu göstermektedir.



Şekil 11.1 Şişme azalım indeksi değerinin bentonit içeriği ve kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi.

2 aylık kür süresi sonunda OH^- iyonu %0, %20 ve %40 zemin örneklerinde sırasıyla kolondan itibaren 40 mm, 36 mm ve 32 mm' lik bir mesafeye kadar göç etmişken %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde 30 mm' lik bir mesafeye kadar göç etmiştir. Diğer bir ifade ile OH^- iyon göçü mesafesi zeminlerdeki bentonit oranı arttıkça azalmakta ancak %60 bentonit içeriğinden sonra sabit bir seyir izlemektedir. Bentonit oranı arttıkça OH^- iyon göçü mesafesinin azalmasına sebep olan faktörler Ca^{+2} iyon göçünü etkileyen faktörlere benzer şekildedir. Zeminlerdeki bentonit içeriği arttıkça geçirimlilik azalmakta ve iyon göçü yavaşlamaktadır. Ayrıca OH^- iyonlarının alümina silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesi iyonun hareketini kısıtlamaktadır. %100 bentonit içeren zemin örneğindeki montmorillonit kil mineralleri oldukça büyük yüzey alanına sahiptirler. Bu durum OH^- iyonunun kil mineralleriyle olan etkileşimi arttırmakta ve göç hızını yavaşlatmaktadır. %0 bentonit içeren zemin örneğine doğru hem montmorillonit miktarı hem de kil mineral içeriği

azalmaktadır. Dolayısıyla OH^- iyonunun hareketi %0, %20, %40 bentonit içeren zemin örneklerinde daha kolay olmakta ve iyon daha büyük mesafelere kadar göç edebilmektedir. %60 ve %80 bentonit içeren zemin örnekleri ise 2 aylık kür süresinde %100 bentonit içeren zemin örneği gibi davranmışlardır. Bu durum bu zemin örneklerinin yaklaşık aynı geçirimlilikte olmasından, ayrıca kil mineral içeriklerinin de yaklaşık aynı olmasından kaynaklanıyor olabilir.

OH^- iyon göçü mesafesi ve bentonit oranı arasındaki (determinasyon) katsayısı R^2 = 0,9934 olarak bulunmuştur (Şekil 10.22). Diğer bir ifade ile OH^- iyon göçü mesafesindeki toplam değişimin % 99,34' ü bentonit oranı değişkeni tarafından belirlenmektedir. % 0,66' lık değişimin sebebi ise bilinmemektedir.

OH^- iyonu ve Ca^{+2} iyonlarının göçleri kıyaslandığında %0, %20, %40 bentonit içeren zemin örneklerinde Ca^{+2} iyonu OH^- iyonuna göre daha büyük mesafelere kadar göç etmiştir. %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde ise iki iyon eşit mesafelerde göç etmişlerdir. %0, %20, %40 bentonit içeren zemin örneklerinde Ca^{+2} iyonunun daha büyük mesafelere göç etmesi OH^- iyonunun silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesinden kaynaklanmaktadır. OH^- iyonu büyük yüzey alanlarından dolayı montmorillonit kil minerallerine karşı daha reaktif olmakla beraber diğer kil minerallerine karşı da reaktiftir. Ancak Ca^{+2} iyonu katyon değişimi reaksiyonlarından dolayı sadece Na-montmorillonit gibi Ca^{+2} ile yer değiştirebilecek tek değerlikli iyon içeren kil minerallerine karşı reaktiftir. Başka bir ifadeyle OH^- iyonunun göçü bütün kil mineral içeriğiyle kısıtlanmakta iken Ca^{+2} iyonunun göçü ise Na-montmorillonit içeriği ile kısıtlanmaktadır. Dolayısıyla Ca^{+2} iyonu OH^- iyonuna göre daha büyük mesafelere kadar göç edebilmektedir. %100 bentonit içeren zemin örneğinde ise kil mineral içeriğinin sadece Na-montmorillonitten oluşması her iki iyonun da eşit mesafelerde göç etmesine neden olmuştur. %60 ve %80 bentonit içeren zemin örneklerinde ise Ca^{+2} iyonunun flokülasyona sebep olarak kil minerallerinin yüzey alanını azaltması sonucu OH^- iyonunun hareket hızının arttığı ve bu durumun OH^- iyonunun Ca^{+2} iyonu ile eşit mesafede göç etmesine yol açtığı düşünülmektedir.

Örnek olay çalışması kapsamında oluşturulan büyük ölçekli laboratuvar modellerinde % 0, %20, %40 bentonit içeren zemin örneklerinde sırasıyla 125 mm, 100 mm, 75 mm, %60, %80 ve %100 bentonit içeren zemin örneklerinde ise 50 mm' lik bir mesafeye kadar iyileştirme sağlanmıştır. Dolayısıyla model ölçeğinin büyümesi ve kolon çapının

20 mm' den 50 mm' ye çıkması sonucu bütün zemin örneklerinde iyileştirme mesafesi artmıştır. Bunun sebebinin kolon çapının artması ile kolon içerisindeki iyon konsantrasyonunun artması olduğu düşünülmektedir. Bu durum zemin ile kolon arasındaki konsantrasyon farkının ve dolayısıyla difüzyon hızının ve mesafesinin artmasına neden olmuştur.

Bazı araştırmacılar zeminin geçirimliliğin iyon göçünü arttırdığını savunurken (Ruenkrairergsa ve Pimsarn, 1982; Lutenegger ve Dickson, 1984; Shanker vd., 1989; Rogers ve Glendinning, 1996) diğer araştırmacılar geçirimliliğin iyon göçü üzerinde bir etkisi olmadığını ve kapileritenin göçü kontrol eden faktör olduğunu savunmuşlardır savunmuşlardır (Katti ve Gupta, 1970; Fosh ve Kinter, 1972). Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ise geçirimliliğin iyon göçü üzerinde etkisi olduğu ve iyon göçünü arttırdığı yönündedir.

Yapılan bu tez çalışması ile herhangi bir araştırmacı performansı etkileyen diğer faktörlerin yanında zemin içerisindeki Na-smektit oranına bakarak kireç kolonu uygulamasının o zemin için uygun olup olmadığı hakkında fikir sahibi olabilir.

Bu tez çalışması kapsamında şişen killi zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi sırasında zeminin içerdiği şişen kil oranının iyon göçü ve kolon performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda şişen kil oranının yanında iyon göçünü etkileyen diğer faktörlerin de iyon göçü üzerindeki etkisinin araştırılması ve elde edilen sonuçların bir araya getirilerek zeminde oluşacak iyon göçü mesafesine yaklaşımda bulunan bir ilişkinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Kireç kolonu uygulamasıyla ilgili önceki çalışmalara bakıldığında kolon performansı değerlendirilirken zeminde oluşan iyon göçü mekanizmasından ziyade zeminin şişme ve dayanım değerlerindeki değişimin dikkate alındığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre kireç kolonu uygulamalarında daha iyi sonuçlar elde edebilmek için iyon göçü mekanizması ve kolonun iyileştirme performansının birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

AASHTO T 193. (1993). The California Bearing Ratio. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C.

Abiodun, A.A. and Nalbantoglu, Z. (2015). Lime pile techniques for the improvement of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 52, No. 6, pp. 760-768.

Alkaya, D. (2002). Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi. Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* Denizli.

Al-Rawas, A.A., Hagoa, A.W. and Al-Sarmib, H. (2005). Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman. *Building and Environment*, 40: 681-687.

Al-Zoubi, M. S. (2008). Undrained Shear Strength and Swelling Characteristics of Cement Treated Soil. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 53-62.

Altmeyer, W. T. (1956). Discussion of Paper 2814. Trans. A.S.C.Z., Vol. 121, p. 666.

Angın, Z. ve Angın A. (2005). Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. *Geoteknik Sempozyumu*, Adana.

Anonymous, (1993). Soil survey manual, USDA-SCS Agric. Handb. 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Anon, (1963). Subgrade improved with drill-lime stabilization. *Rural and Urban Roads*. October, 24-27.

ASTM, D 4546 (1986). Standart Test Methods for one Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. Annual Book of ASTM Standards 4(8), 992-1100.

ASTM D 5890-11 (2011**)**. Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 2435-90 (1993). Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils, In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, 04.08, pp.313-324.

ASTM D 698 (1994). Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Volume 04.08 – Soil and Rock.

ASTM D 4829-11 (2011). Standard Test Method for Expansion Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 618-15 (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Aytekin, M. (2004). Deneysel zemin mekaniği, *Teknik yayınevi*, Ankara.

Ayyar, T. S. R. and Ramesan, K. (1989). A Study of Lime Columns in Expansive Clay In Proc, *Indian Geotechnical Conference*, Visakhapatnam, India, pp 185-189.

Barker, J.E., Rogers, C.D.F. and Boardman, D.I. (2006). Physio-chemical changes in clay caused by ion migration from lime piles. *J Mater Civ Eng* 18:182–189.

Barker, J.E., Rogers, C.D.F. and Boardman, D.I. (2007). Ion Migration Associated with Lime Piles: A Review. *Proceedings of the ICE* - Ground Improvement, 11(2):87-98.

Basma, A.A. and Al-Sharif, M.A. (1994). Treatment of expansive soils to control swelling. *Geotechnical Engineering Journal*, 25(2), 3-19.

Başer, O. ve Çokça, E. (2010). Şişen Zeminlerin Atık Mermer Tozu Kullanılarak İyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul, s. 143-152.

Bailey, S.W. (1980a). Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Am. Miner., 65, 1-7.

Bailey, S.W. (1980b). Structures of layer silicates, In: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification (eds. G.W.Brindley and G.Brown), ch.1, Mineralogical Society, London.

Beetham, P., Dijkstra, T.A., and Dixon, N. (2014). Lime Diffusion and Implications for Lime Stabilization Practice. *Compendium of papers from the Transportation Research Board 93rd annual meeting*, Washington DC. TRB, USA.

Bell, F.G and Coulthard, J.M. (1990). Stabilization of Clay Soils with Lime. *Municipal Engineer*, 7, pp. 125 -140.

Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *EngineeringGeology*, 42, 223-237.

Bhuvaneshwari, S., Robinson, R.G., Gandhi, S. R. (2005). Stabilization of Expansive Soils Using Fly ash. Fly Ash Utilization Programme , FAUP, TIFAC, DST, Vol. 8, pp 5.1-5.9.

Bozkurtoğlu, E., Şans, G. ve Eyüboğlu, R. (2015). Kohezyonlu Zeminlerin Şişme Potansiyeli için Bir Yaklaşım: Avcılar-Esenyurt Örneği. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 21(6): 270-275.

Brandl, H. (1981). Stabilization of Slippage-Prone Slopes by Lime Piles In Proc, 8th International *Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, USSR, Vol 4, pp 300-301.

Broms, B. and Boman, P. (1976). Stabilisation of deep cuts with lime columns. *Proc. 6. European Conf. Soil Mech. a. Found. Engng*., Vol. 1.1, pp. 207-210.

Broms, B. and Boman, P. (1979). Lime columns-a new foundation method. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 105(4), 539-557.

BS 1377 (1975). Methods of test for soils for civil engineering purposes, *British Standards Institution*, London.

Chen, F.H. (1988). Foundations on expansive soils. *Elsevier*, Amsterdam, the Netherlands.

Chen, L. and Bulut, R. (2016). Numerical Analysis of Horizontal Moisture Barriers in Pavements Constructed on Expansive Soils. *Procedia Engineering*, Vol 143, pp. 229-236.

Chen, F.H. and Ma, G. S. (1987). Swelling and shrinkage behavior of expansive clays. *6th Int. Conference on Expansive Soils*, Vol.1, New Delhi, India, pp.127-129.

Chitnis, S.R. and Sharma, M.M. (1997). Industrial applications of acid treated clays as catalysts. *Reactive and Functional Polymers*, 32, 93-115.

Chui, K. H and Chin, K. Y. (1963). The Study of Improving Bearing Capacity of Taipei Silt by Using Quicklime Piles In Proc, *Second Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 1, pp 387-393.

Chummar, A.V. (1987). Ground improvement by sand lime piles. *Proceedings of the Ninth S E Asian Geotechnical Conference*, Bangkok, Thailand.

Coduto, D. P. (2005). Temel Tasarımı, İlkeler ve Uygulamalar, 2. Baskı, Çevirenler: Mollamahmutoğlu, M. & Kayabalı, K., Gazi Kitapevi.

Çetin, M. (2003). Degisik çevresel kosullar altında, sisen zeminlerin özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 58 s.

Çimen, Ö. Ve Dereli, B. (2014). Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Mikronize Kolemanitin Etkisi. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, Cilt 4, No 2, 12-17.

Dakshanamanthy, V. and Raman, V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and Foundations*, Vol. 13, No. 1, p. 97-104.

Das, B. M. (1995). Principles of Foundation Engineering. PWS Publishing Company, a division of International Thomson Publishing Inc. Boston. U.SA, 828 p.

Das, B.M. (1999). Principles of Foundation Engineering, Fourth ed., Brooks/Cole Publishing.

Davidson, L.K., Demeril, T. and Handy, R.L. (1965). Soil Pulverization and Lime Migration in Soil Lime Stabilization. *Highways Research Board Record* 92:103-126.

Day, R.W. (1994). Swell-shrink behavior of compacted clay. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 120, No. 3, pp.618-623.

Demir, S. ve Kılıç, M. (2010). Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 95-104.

Diamond, S. and Kinter, E.B. (1966). Adsorption of calcium hydroxide by montmorillonite and kaolinite. *Journal of Colloid and İnterface Science*, 22(3), 240-249.

Di Maio, C. (1996). Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects, *Geotechnique*, 46 (4), 695-707.

Dölen, E. (2002). Analitik Kimyaya Giriş Sulu Çözeltilerde Denge. *Marmara Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi Yayınları*, İstanbul.

Eberl, D. and Hower, J. (1976). Kinetics of illite formation. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1326-1330.

Edil, T.B. (2003). A Review of Aqueous-Phase VOC Transport in Modern Landfill Liners, *Waste Management*, 23:561-571.

Erkan, İ.H. (2007). Yumuşak Killi Zeminlerin Kireç Kolonlarıyla Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

EİE, (1979). Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri, *E.E.E Genel Yayın Direktörlüğü*, Ankara.

Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J. and Magnan, J.P. (2009). On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology* 104, 200–210.

Fohs, D.G. and Kinter, C.B. (1972). Migration of lime in compacted soil. *Public Roads*, 37 (1), 1-8.

Forouzan, A.J. (2016). Prediction of Swelling Behavior of Expensive Soils Using Modified Free Swell Index, Methylene Blue and Swell Oedometer Tests, *Master of Science Thesis, Middle East Technical University*, Ankara.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. *John Wiley & Sons*, New York, USA.

Genç, S. (2009). Şişen Zeminler ve Bentonit-Kaolin Karışımlarının Şişme Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Glendinning, S. (1995). Deep Stabilisation of Slopes using Lime Piles. Ph.D. Thesis. *Loughborough University*, UK.

Gillot, E. J. (1968). Clay in Engineering Geology, *Elsevier*, Amsterdam, 296 p.

Glendinning, S. and Rogers, C.D.F. (1996). Deep Stabilisation Using Lime, In: Rogers, C.D.F., Glendinning, S and Dixon, N. (Editors). Lime Stabilisation: Proceedings Seminar on Lime Stabilisation, *Loughborough University*, Thomas Telford, London, pp. 127-138.

Grim, R.E. (1968). Clay Minerology, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 596p.

Güler, E. ve Edinçliler, A. (1993). Kireç Difüzyonunun Killerin Kayma Mukavemetine Etkisi. *Altıncı Ulusal Kil Sempozyumu*, İstanbul, s.411-418, 1993.

Güler, E. ve Avcı, C. (1993). Kil Tabakalarının Permeabilitesine Kireç Stabilizasyonunun Etkisi. *Altıncı Ulusal Kil Sempozyumu*, İstanbul, s.209- 216.

Güler, E. ve Sargın İ. (1998). Kireç ve Sıkıştırma Enerjisinin Kil Kaplamalarının Hidrolik Geçirgenliğine Etkisi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Cilt 2, s. 4.

Güngör, A. G. (2002). Bursa Yöresi Şişebilen Kil Zeminlerin Yol Dolgularında Kullanılması Amacı ile Uçucu Kül ile Islahı. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Hakdiyen, İ. (1972). Genel ve Teknik Kimya. *Birsen Kitabevi Yayınları*, İstanbul, 496 s.

Hanafy, E.A.D.E. (1991). Swelling/shrinkage chatracteristic curve of desiccated expansive clays. *Geotechnical Testing Journal*, 14 (2), 206–211.

Handy, R.L. and Williams, N.W. (1967). Chemical stabilization of an active landslide. *Civil Engineering*, 37 (8),62-65.

Hillel, D. (1980). Soil physics. *Academic Press*, New York.

Hilt, G. H. and Davidson, D. T. (1960). Lime fixation in clayey softs: Highway Res. *Board Bull.*, v.262, pp.20-32.

Holm, G. and Broms, B.B. (1981). Lime columns as foundation for light structures. *Proceedings of 10th International Conference Soil Mechanics Found Engineering*, Stockholm, 3, 687-694.

Holtz, W.G. and Gibbs, H.J. (1956). Engineering Properties Of Expansive Clays, *Transactions, ASCE*, Vol. 121, p.641-677.

Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil Stabilization (Principle and Practice). Butterworth, Sydney, pp. 165-186.

Ingles, O. H. (1987). Soil stabilization, Chapter 38. In : F. G. Bell (Editor), Ground Engineer's Reference Book, Butterworths, London, 38/1-38/26.

Jones, D.E., and Holtz, W.G. (1973). Expansive soils – the hidden disaster. *ASCE, Civil Engineering*, 43: 87-89.

Jones, D.E. and Jones, K.A. (1987). Treating expansive soils. *Civil Engineering* 57 (8), 62–65.

Jones, L.D. and Jefferson, I. (2012). Expansive Soils. *ICE Manuel of Geotechnical Engineering*, 1: 413-441.

Jungnickel C, Smith D. and Fityus S. (2004). Coupled Multi-Ion Electrodiffusion Analysis for Clay Soils. *Canadian Geotechnical Journal* 41(2):287-298.

Kasapoğlu, K. E. (1989). Killerin Jeo-mühendislik Özellikleri. *IV. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitapçığı*, s. 3-29.

Katti, R.K. and Gupta, A.K. (1970). Studies on the diffusion of lime in expansive soil. *Proceedings of the Second S E Asian Conference on Soil Engineering*, pp. 611-619.

Keskin, S.N. (1993). İstanbul neojen kilinin şişme davranışına ön konsolidasyonun, mineralojik özelliklerin ve çevresel faktörlerin etkisi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Keskin, E. (2004). Kireç Stabilizasyonu ve Yol Kesitine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.

Kitsugi, K. and Azakami, H. (1982). Lime-column techniques for the improvementof clay ground. *Proceedings of the Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, 29 Nov.-3 Dec. 1982, 105-115.

Komine, H. (2004). Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites. *Engineering geology*, 71(3-4): 265-279.

Küçükali, Ö. (2011). Kireç ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Lambe, T.W. (1960). The Character and Identification of Expansive Soils. *Federal Housing Administortion, Technical Studies Program*, FHA 701.

Lambe, T.W. and Withman, R. V. (1969). Soil Mechanics, John Wiley, New York.

Lutenegger, A.J. and Dickson, J.R. (1984). Experiences with drilled lime stabilisation in the mid-west USA. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslides*, 289-293.

Marinho, F.A.M. and Stuermer, M. (2000). The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil, Advances in Unsaturated Geotechnics. Geotechnical Special Publication, *ASCE*, Colorado, Denver, USA, 125–141.

Mathew, P. K. and Rao, S. N. (1997). Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 123, No. 2, 183–185.

Mitchell, J. K. and Hooper, D. R. (1961). Influence of time between mixing and compaction on properties of a lime-stabilized expansive clay. *Highway Research Board Bulletin* (304).

Mitchell, J.K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422p.

Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behaviour. 3rd ed.,Wiley, US.

Molenaar, A. (2007). Road Materials – Soil Stabilisation, CT 4850.

Mollamahmutoğlu M. ve Taşkıran T. (2000). Diyarbakır ili, Kayapınar-Yeniköy Bağcılar yöresi kilinin şişme potansiyelinin irdelenmesi. Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Muhmed, A. and Wanatowski, D. (2013). Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of clay. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* (IOSR-JMCE), 6(3), 87-94.

Nelson, J.D. and Miller, D.J. (1992). Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering. John Wiley & Sons, New York.

Noble, D.F. and Anday, M.C. (1967). Migration of lime deposited in drill holes. *Virginia Highway Research Council Publication*.

Onur, F. Biryol, İ., Yücesoy, C., Erk, N., Özkan, A.S., Dermiş, S., Dinç, E., Uslu, B., Yılmaz, N. (1999). Analitik Kimya Laboratuvar Föyü, *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi*, Yayın No:80.

Önalp, A. (1997). Geoteknik Bilgisi I, Zeminler ve Mekaniği, Sakarya Ün. Y. No: 27, 440 s., Sakarya.

Parker, J.C., Amos, D.F. and Kaster, D.L. (1977). An evaluation of several methods of estimating soil volume change. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:1059-1064.

Petry, T.M and Little, D.N. (2002). Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavement and Lightly Loaded Structures-History, Practice and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14 (6) .

Phanikumar, B. R. (2009). Effect of lime and fly ash on swell, consolidation and shear strength characteristics of expansive clays: a comparative study. *Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 4(2), 175-181.

Popesco, M. (1980). Behavior of expansive soils with crumb structure. *4th Int. Conf. On Expansive Soils*, Vol.1, ASCE, New York, N.Y., pp. 158-171.

Popescu, M.E. (1986). A comparison Between the Behavior of Swelling of Clayey Soils. *Geotechnical Engineering*, Vol. 12, pp. 19-39.

Ranganatham, B.V. and Satyanarayana, B. (1965). Laboratory studies on swelling pressure of Black Cotton Soils. *IIsc. Symposium*, Bangalore, pp. A13/1-15.

Rogers, J.D., Robert, O. and Rogers, R.B. (1994). Damage to foundation from expansive soils. *Claims People* 3(4), pp. 1-4.

Rogers, C.D.F. and Glendinning, S. (1993). Stabilisation of embankment clay fills using lime piles. *Proceedings of the International Conference on Engineered Fills*, Newcastle-upon-Tyne, September, Thomas Telford, London, pp. 226-238.

Rogers, C.D.F. and Glendining, S. (1994). Deep Slope Stabilisation Using Lime. Transportation Research Record 1440, *Transportation Research Board, National Research Council*, Washington D.C., USA, p.63-70.

Rogers, C.D.F. and Glendinning, S. (1996). The role of lime migration in lime pile stabilisation of slopes. *Quaterly Journal of Engineering Geology*, 29 (4), 276-284.

Rogers, C.D.F. and Glendining, S. (1997). Improvement of clay soils in situ using lime piles in the UK. *Engineering Geology*, 47, 243–257.

Reunkrairergsa, T. and Pimsarn, T. (1982). Deep hole lime stabilisation for unstable clay shale embankment. *Proceedings of the 7th SE Asia Geotechnics Conference*, Hong Kong, 22-26th November, 1982, p.631-645.

Sağlam, M.T. (2012). Toprak ve Suyun Kimyasal Analiz Yöntemleri. *Namık Kemal Üniversitesi, Zıraat Fakültesi*, Yayın No:2, Tekirdağ.

Sarıkaya, Y. (1987). Killerin önemi ve özelikleri. *III. Ulusal Kil Sempozyumu Bildirileri*: 13-32 (eds. A.G. Türkmenoğlu ve O. Akıman) ODTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara.

Sarıkaya, Y., Önal, M. ve Bozdoğan, İ. (1993). Bentonitle bir kilin adsorplama özeliklerinin değiştirilmesi. *VI. Ulusal Kil Sempozyumu*, Boğaziçi Üniversitesi, 491-499, İstanbul.

Schreiner, H.D. 1988. Identification and classification of expansive soils. p. 23-29. *In* C.V.J. Varma (ed.) *Proc. 6th Intl. Conf. on Expansive Soils*. New Dehli, India.

Sherwood, P.T. (1962). Effect of sulphates on cement and lime-stabilized soils. Hwy.Res. *Board Bull*.353, National Research Council, Washington, D.C.

Shanker, N., Babu N., Maruti, G. (1989). Use of lime soil piles for in-situ stabilisation of Black Cotton soils. *Indian Geotechnical Conference*, Visakhapatnam, 1, pp. 149-153.

Seed, H.B., Woodward, R.J., and Lundgren, R. (1962). Prediction of Swelling Potential of Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, American Society of Civil Engineers. Vol.88, No.SM3, pp. 53-87.

Skempton, A.W. (1953). The colloidal activity of clays. *Proc. 3rd Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 1:57-61.

Sridharan, A. and Rao, S. M. (1988). A Scientific basis for the use of index tests in identification of expansive soils, *Geotechnical Testing Journal*, 11 (3), 208- 212.

Subba Rao, K. S. and Satyadas, G. G. (1987). Swelling potential with cycled of swelling and partial shrinkage. *6th Int. Conf. On Expansive Soils*, Vol. 1, New Delhi, India, pp.137- 142.

Sun D.A., Cui H.B. and Sun W.J. (2009). Swelling of compacted sand bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, 43(3):485-492.

Sivapullaiah, P. V., Sitharan, T. G., Subba Rao, K. S. (1987). Modified free swell index for clays, *Geotechnical Testing Journal*, 10 (2), 80-85.

Şengül, E. (2010). Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.

Thomas, P.J. (1998). Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units. Doctoral Thesis, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, Virginia.

Tiwari, B. and Ajmera, B. (2011). Consolidation and swelling behavior of major clay minerals and their mixtures. *Applied Clay Science*, 54(3–4): 264-273.

Toksoz, D., Yilmaz, I., Nefeslioglu, H.A. and Marschalko, M. (2016). A fuzzy classification routine for fine-grained soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49 (4): 344-349.

Tonoz, M.C., Gökçeoğlu, C. and Ulusay, R. (2003). A laboratory – scale experimental investigation on the performance of lime columns in expensive Ankara (Turkey) Clay. B*ulletin of the Engineering Geology and the Environment*, 62:91 – 106.

Tran, T.D., Cui, Y.J., Tang, A.M., Audiguier, M. and Cojean, R. (2014). Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6: 399-404.

TS 1900-1, (2006). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri. TSE, Kızılay, Bakanlıklar, Ankara.

TS 639, (1975). Uçucu Küller Standardı. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Tumluer, G. (2006). Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana. (2006).

Tüdeş, E. (1996). Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı ile Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.

Türköz, M. (2001). Şişen zeminlerin sönmüş kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik killerine uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir *Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Türköz, M. (2009). Sıkıştırılmış Şişen Killerin Mikroyapısal Değişiminde Şişme-Büzülme Çevrimin Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt: XXII, Sayı 1, 2009.

Türköz, M., Savaş, H. Ve Tosun, H. (2011). Problemli Killi Zeminlerin Magnezyum Klorür Solüsyonu ile İyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 26, No 1, 233-242.

Tüylüce, F. (2010). Deniz killerinin kireç stabilizasyonu ile iyileştirilmesi. Yüksek lisans tezi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.

Tystovich, N.A., Abelev, M.Yu and Takhirov, I.G. (1971). Compacting saturated loeses soils by means of lime piles. *Proceedings of the 4th Conference On Soil Mechanics*, Budapest, p.837-842.

Uğur, F.A. (2005). Kil Minerallerinin Radyoaktif Maddeleri Tutma Özelliklerinin, Kilin Yapısına ve işlem Koşullarına Bağlılığının incelenmesi. Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, (2005). National Soil Survey Handbook, title 430-VI. [Online] Available: http://soils.usda.gov/technical/handbook/.

Uzer, A.U. ve Olgun, M. (2006). Şişen Zeminler Üzerinde İki Farklı Şişme Deneyi Yöntemi Sonuçların Değerlendirilmesi. Teknik-online dergi, *Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu*, Cilt 5, Sayı 3, s. 150-168.

Van Der Merwe, D.H. (1964). The Prediction of Heave from The Plasticity Ġndex and Percentage Clay Fraction of Soils. *Civil Engineer in South Africa*, Vol. 6, No. 6, pp. 103-106.

Van Impe, W.F. (1989). Soil Improvement Techniques and Their Evolution. A.A.Balkema Rotterdam Brookfield.

Velde, B. (1992). Introduction to Clay Minerals. Chapman and Hall, London, pp 198.

Venkatanarayana, P., Reddy, P., Suryanarayana, B.N., Ramesh, V. (1989). Ground improvement by sand-lime columns. *Indian Geotechnical Conference*, Visakhapatnam, 1, pp. 335-338.

Wentworth, S.A. (1970). İllite, *Clay Science*, 3, 140-155.

Williams, A.A.B. (1957). Discussion on the prediction of total heave from the double oedometer test. *Symposium on Expansive Clays*, South African Institutionof Civil Engineers, p. 57

Wray, W.L. and Meyer, K.T. (2004). Expansive clay soil-A widespread and costly geohazard.GeoStrata, *ASCE Geo-Institute*. Vol. 5, No. 4, pp. 24-28.

Xu, Y. F., Matsuoka, H. and Sun, D. A. (2003). Swelling Characteristics of Fractal-Textured Bentonite and Its Mixtures, *Applied Clay Science*, 22, 4, 197-209.

Yalçın, D. (2000). Atık sulardaki ağır metallerin bentonitlerle temizlenmesi. Yüksek lisans semineri, *Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Yalçın, H. ve Gümüşer, G. (2000). Mineralogical and geochemical characteristics of Late Cretaceous bentonite deposits at the north of Kelkit valley, Northern Turkey. *Clay Minerals*, 35, 5, 807-825.

Yalçın, E. (2010). Bentonitik Killer Üzerinde Etilen Glikol Monoetil Eter Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Yıldırım, S. (2002). Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı. *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 466 s.

Yıldırım, Ü.E. (2009). Şişen Killer ve Tünel Tasarımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Yılmaz, I. ve Karacan, E. (1998). Zeminlerin Şişme Özellikleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 52, s. 17-27, Ankara.

Yılmaz, I. (2006). Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85 (3-4), 295-301.

Yılmaz, I. (2007). Mühendislik Jeolojisi – İlkeler ve Temel Kavramlar, *Teknik Yayınevi*, Ankara, 490 s.

Yılmaz, I. ve Civelekoğlu, B. (2009). Gypsum: An additive for stabilization for swelling clay soils. *Applied Clay Science*, 44, 166-172.

Zorluer, İ. ve Usta, M. (2003). Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi, Türkiye IV. *Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ss 305-311, Afyon.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Derya TOKSÖZ
Doğum Yeri ve Tarihi	Bayburt, 09/09/1990
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	dtoksoz@cumhuriyet.edu.tr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lisans	Fırat Üniversitesi, 2011
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2013
Doktora	Cumhuriyet Üniversitesi, Devam Ediyor