

FARKLI TÜRLERDE SULARIN
KİLLERİN ŞİŞME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

AYŞEN OKŞAN ALTUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2011

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TÜRLERDE SULARIN
KİLLERİN ŞİŞME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

AYŞEN OKŞAN ALTUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
PROF.DR. IŞIK YILMAZ

SİVAS
2011

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof.Dr. Fikret KAÇAROĞLU _____
Üye Prof.Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ _____
Üye (Danışman) Prof.Dr. Işık YILMAZ _____

ONAY

Bu tez çalışması, ... / ... / 2011 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 009 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

Bu proje Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından M- 417 numaralı Araştırma Projesi olarak desteklenmiştir.

ÖZET

FARKLI TÜRLERDE SULARIN KİLLERİN ŞİŞME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ayşen Okşan ALTUN

Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Işık YILMAZ

2011, 52 sayfa

Killi zeminler üzerine inşa edilen özellikle hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, bu yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme potansiyeli, şişme sonucunda oluşacak maksimum basınç düzeyi ve buna bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşacak kabarma miktarının belirlenmesi ve öngörülmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda bahsedilen parametrelerin belirlenebilmesi için gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar bir standart olarak laboratuvarlarda yapılabilmektedir. Söz konusu deneysel yöntemin uygulanması sırasında deneylerde distile su kullanılmaktadır. Ancak, gerçekte zeminler buldukları ortama bağlı olarak laboratuvar ortamında kullanılan suyun kimyasal bileşiminden farklı kimyasal bileşimlere sahip sularla etkileşime girmekte ve dolayısı ile laboratuvar deneyleri sonunda öngörülen davranıştan farklı davranacakları açık bir gerçektir. Örneğin; karbonatlı kayalardan, evaporitlerden, mağmatiklerden, vb. beslenen ve zemin ile etkileşen suyun bileşimi birbirlerinden oldukça farklıdır. Bundan başka, denizlere ve/veya göllere yakın ve deniz ve/veya göl suyunun girişim yaptığı yerlerde de oldukça farklı su kimyasının söz konusu olduğu açık olup benzer örneklerin çoğaltılması mümkündür. Bu nedenle, zemin ortamının bulunduğu yerlerdeki zeminle etkileşecek olan suyun kimyasının deneysel ortama yansıtılmasının daha gerçekçi zemin davranışı öngörüsü bakımından gerekli olduğu düşünülmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalarla; kille etkileşime giren suyun kimyası ve türünün şişme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Killi zemin, şişme, şişme potansiyeli, su türü ve kimyası.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF WATER ON THE SWELLING BEHAVIORS OF CLAYS

Ayşen Okşan ALTUN

Master of Science Thesis, Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Işık YILMAZ

2011, 52 pages

In the design of the foundations of the structures, especially light buildings, on clayey soils, the main soil behaviors to be considered are swelling properties and heave on the surface as a result of soil expansion. That's why, during investigation of such soils and light structures on it, determination of swelling properties by means of swell percent and maximum swell pressure, and estimation of the surface heave has a great importance.

In order to obtain swelling parameters of clayey soils, there have been laboratory experimental tests which were standardized. Distilled water is generally used during these experimental tests, however the soils in-situ are interacted with different type of water having different water chemistry. So, swelling behavior of expansive soils tested with distilled water would be naturally different than the behavior of expansive soils tested with different water type and chemistry. For example, water sourced and interacted with carbonate rocks, evaporate, magmatic rocks, etc. are different by means of their chemistry. Moreover, water chemistry shows variations in locations closer to the sea and/or lake where sea and/or lake water intrusion into the soil is exist, and it is possible to give more examples. That's why, it is thought that the anticipation of the realistic soil behavior is needed the use of water, same with the water in-situ condition which will interact with the soil environ, in laboratory swelling experiments. In this thesis, the effect of the water type and chemistry on swelling behavior of the clays was investigated.

Key words: Clayey soil, swelling, swell potential, water type and chemistry.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında, her aşamada titizlikle ve sabırla destek sağlayan, bilgi, deneyim ve kaynaklarından yararlandığım, sayın hocam Prof.Dr. Işık YILMAZ' a sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez kapsamındaki laboratuvar çalışmalarında ve yazım aşamalarında, fikirlerinden, önerilerinden ve yardımlarından faydalandığım Araş.Gör. İnan KESKİN' e ve Jeo.Yük.Müh. Mustafa YILDIRIM' a, Jeo.Müh. Özge YÜCEL' e teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen AİLEME sonsuz teşekkür ederim.

Ayşen Okşan ALTUN

2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1.GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	6
2. KİLLERDE NEM ETKİLEŞİMİ VE ŞİŞMENİN MEKANİZMASI	8
2.1. Killerde Nem Etkileşimi	8
2.2. Şişmenin Mekanizması	13
3. DENEYLERDE KULLANILAN KİLLER	18
3.1. Mineralojik Özellikler	18
3.2. Kompaksiyon Özellikleri	21
4. DENEYLERDE KULLANILAN SULAR	24
4.1. Schoeller Diyagramı ile Değerlendirme	26
4.2. Piper Diyagramı ile Değerlendirme	28
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
6. SONUÇLAR	37
7. TARTIŞMALAR	45
8. YARARLANILAN KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. a. Tetrahedral birim, b. Silikat tabakası (Grim, 1968)	9
Şekil 2.2. a. Oktahedral birim, b. Alümina tabakası (Grim, 1968)	9
Şekil 2.3. Montmorillonit minerali	12
Şekil 2.4. Killerde kristaller arası şişme (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989)	14
Şekil 3.1. Kil numunelerinin alındığı yere ait bulduru haritası	18
Şekil 3.2. Kullanılan bentonitlere ait karakteristik XRD difraktogramı (Civelekoğlu, 2009' dan)	19
Şekil 3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları: a. smektit lamelleri ve kısa prizmatik klinoptilolitler, b. zayıf paketlenme, kıvrımlanmış-lamelli smektit agregatları (Yalçın ve Gümüüşer 2000' den)	22
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan bentonite ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriğini (w_{opt}) gösteren kompaksiyon eğrisi (Civelekoğlu 2009' dan)	23
Şekil 4.1. Su numunelerinin alındığı yerleri gösteren harita	24
Şekil 4.2. Su numunelerine ait yarı logaritmik Schoeller diyagramı	27
Şekil 4.3. Su numunelerinin Piper diyagramı üzerindeki dağılımları	28
Şekil 5.1. Serbest şişme deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği	32
Şekil 5.2. Saf su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafığı	35
Şekil 6.1. Akdeniz' den alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafığı	37
Şekil 6.2. Ege Denizi' nden alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafığı	38
Şekil 6.3. Karadeniz' den alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafığı	38

Şekil 6.4. Denizlerden alınan sularla gerçekleştirilen şişme deneylerinden elde edilen %S-t grafiklerinin birlikte mukayeseleri. (Δ: Akdeniz, □: Ege Denizi, o: Karadeniz)	39
Şekil 6.5. Kızılırmak' tan alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği	41
Şekil 6.6. Jipsten alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği	41
Şekil 6.7. Deli İlyas Gölü' nden alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği	42
Şekil 6.8. Tecer' den alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği	43
Şekil 6.9. Kösedag' dan alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği ve saf su ile elde edilen eğriyle mukayesesi. (Δ: Saf su, o: Kösedag)	44
Şekil 7.1. Değişik türde sularla killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafikleri	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Amerika’da şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık hasar (Jones and Holtz 1973; Jones and Jones 1987)	1
Çizelge 2.1. Bazı kil minerali türleri (www.agric.nsw.gov.au, 2004)	11
Çizelge 2.2. Kil minerallerinin şişme indisi değerleri (Lambe ve Whitman, 1959)	16
Çizelge 3.1. XRD (Tüm Kayaç) analizi sonuçları ve kullanılan bentonitin kimyasal bileşimi (Civelekoğlu, 2009’ dan)	20
Çizelge 4.1. Sulara ait kimyasal analiz sonuçları	25
Çizelge 4.2. Yarı Logaritmik Schoeller diyagramına göre iyonların sıralaması	27
Çizelge 5.1. Şişme potansiyelini etkileyen faktörler (Nelson ve Miller, 1992) (Uzundurukan 2006’ dan)	34
Çizelge 6.1. Suların tuzluluk sınıflaması (Lewis, 1982)	39

1. GİRİŞ

Killi zeminlerin belirli türleri, ıslatıldıklarında şişerler ve kuruduklarında büzülürler. Bunlara *şişen zeminler* adı verilir, sorunlu zeminlerdir. Bu zeminler örneğin sadece Amerika’ da binalara, yollara, hava alanlarına ve diğer tesislere bir yılda yaklaşık 9 milyar dolar zarar vermektedir. Bu miktar depremlerden, taşkınlardan, kasırgalardan ve hortumlardan kaynaklanan hasarın neredeyse iki katıdır (Jones and Holtz 1973, Jones and Jones 1987). Bu hasarların dağılımı, Çizelge 1.1’ de görülmektedir.

Çizelge 1.1. Amerika’da şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık hasar (Jones and Holtz 1973; Jones and Jones 1987).

Kategori	Yıllık Hasar (U.S. \$)
Karayolları ve caddeler	4 550 000 000
Ticari binalar	1 440 000 000
Müstakil evleri	1 200 000 000
Yaya yolları, taşıt yolları ve park alanları	440 000 000
Gömülü kamu kuruluşları ve servisleri	400 000 000
Çok katlı binalar	320 000 000
Havaalanı tesisleri	160 000 000
Yerleşim alanı heyelanı	100 000 000
Diğer	390 000 000
<i>Toplam yıllık hasar (1987)</i>	<i>9 000 000 000</i>

Bazen, şişen zeminlerden kaynaklanan hasarlar çok küçük olup sadece estetik sorunlarla sınırlı kalabilir. Ancak sonuçlar kimi zaman da büyük yapısal değişikliklere neden olur. Holtz and Hard (1978)’ e göre; Amerika’ da her yıl şişen zeminler üzerinde inşa edilen 250 000 yeni konutun %60’ ı az hasara, %10’ u önemli hasara uğramakta olup, bazıları tamir edilemez durumdadır. Günümüzde ise, istatistikler inşa edilen yeni konutlar için muhtemelen iyi sonuçlar vermekle birlikte, şişen zeminler sorun olmaya devam etmektedir. Bunlarda zemin hareketleri ve hasar genellikle çok yavaş olmakta, bu nedenle sonuçlar kasırga ve depremlerdeki kadar dramatik olmayıp ve sadece hasara neden olurlar. Can kayıplarına neden olmazlar, ancak bu hasarlar küçük yersel alanlar

üzerinde yoğunlaşmayıp yayılı geniş alanlar üzerinde meydana gelmektedir. Bununla birlikte, ekonomik kayıp büyük olup bu kayıpların büyük kısmından; yeni tesislerin hazır hale getirilmesi, inşaat ve tasarım çalışmalarında uygun koruyucu önlemlerin alınması ve sorunun teşhis edilmesiyle kaçınılabilmektedir.

Killi zeminler üzerine inşa edilen özellikle hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, bu yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme potansiyeli, şişme sonucunda oluşacak maksimum basınç düzeyi ve buna bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşacak kabarma miktarının belirlenmesi ve öngörülmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda bahsedilen parametrelerin belirlenebilmesi için gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar bir standart olarak laboratuvarlarda yapılabilmektedir. Söz konusu deneysel yöntemin uygulanması sırasında deneylerde distile su kullanılmaktadır. Ancak, gerçekte zeminler buldukları ortama bağlı olarak laboratuvar ortamında kullanılan suyun kimyasal bileşiminden farklı kimyasal bileşimlere sahip sularla etkileşime girmekte ve dolayısı ile laboratuvar deneyleri sonunda öngörülen davranıştan farklı davranacakları açık bir gerçektir. Örneğin; karbonatlı kayalardan, evaporitlerden, mağmatiklerden, vb. beslenen ve zemin ile etkileşen suyun bileşimi birbirlerinden oldukça farklıdır. Bundan başka, denizlere ve/veya göllere yakın ve deniz ve/veya göl suyunun girişim yaptığı yerlerde de oldukça farklı su kimyasının söz konusu olduğu açık olup benzer örneklerin çoğaltılması mümkündür. Bu nedenle, zemin ortamının bulunduğu yerlerdeki zeminle etkileşecek olan suyun kimyasının deneysel ortama yansıtılmasının daha gerçekçi zemin davranışı öngörüsü bakımından gerekli olduğu açıktır.

1.1. Literatür Özeti

Şişme davranışı yol ve sığ temeller gibi bir çok jeoteknik uygulamalarda yaratacakları sorunlar nedeni ile arzu edilmezken, diğer taraftan şişebilen zeminler başlıca hidrolik kapsamda gerçekleştirilen uygulamalarda zaman zaman arzu edilmekte olup,

- A. Kaplama sistemleri ve toprak dolgularda bariyer olarak (Weiss, 1989; Daniel and Benson, 1990; Brandl, 1992; Daniel, 1993; Daniel and Wu, 1993; O'Sadnick et al., 1995; vb.);
- B. Jeosentetik kil kaplaması olarak (Daniel, 1993; Koerner, 1994; Koerner et al., 1995; vb.)
- C. Geri dolgularında düşey cutoff duvarı olarak (Evans, 1993; vb.),
- D. Radyoaktif atıkların depolanmasında bariyer olarak (Pitsch et al., 1992; Pusch, 1995 and Pusch, 1998; Tang et al., 1998; vb.) kullanılmaktadırlar.

Bu tür zeminler yukarıda bahsedilen uygulamalarda, ıslanmadan kaynaklanan şişme ile ıslanma/kuruma sonrasında gerçekleşecek büzülmenin sonucu olarak meydana gelmesi olası çatlaklar ile ilgili olarak hidrolik iletkenlikte meydana gelebilecek sorunların önlenmesinde sisteme olanak tanımaktadırlar (Shan and Daniel, 1991; Boardman and Daniel, 1994). Daha yüksek şişme kapasitesine sahip olması ve dolayısıyla çok düşük geçirimsizlik değeri nedeni ile sodyum bentonitler genellikle kalsiyum bentonitlerden daha fazla kullanılırlar (e.g., Reschke and Haug, 1991).

Simektit kil mineralleri belli kimyasallarla etkileşime girdiğinde yüksek düzeyde tabakalararası büzülmeye uğrarlar, bunun sonucu olarak da çift tabaka hacminde yüksek düzeyde kayıp, potansiyel çatlama ve geçirimsizlik değerinde yükselme meydana gelir.

Evans ve Quigley (1992), kentsel katı atıklardan sızmanın kum-bentonit karışımı zeminlerin hidrolik geçirimsizliklerinde artışa ve hacimsel küçülmelerine neden olduğunu göstermişlerdir.

Simons ve Reuter (1985) kum-bentonit karışımları üzerinde atık sızıntı suyu (leachate) ve absorpsiyon etkisini araştırmışlar, sıvının sızmasından sonra iyon değişimindeki izler ile kildeki elektrostatik kuvvetlerdeki değişimi göstermişlerdir.

Maio (1996) ise, NaCl, KCl veya CaCl₂ çözeltilerine maruz kalan ve tekrar su ile etkileşen bentonitlerdeki hacimsel değişimi araştırmıştır. Çalışmanın sonucu olarak;

çözelti ile doygun hale gelen numunelerde yüksek düzeyde hacımsal genişlemenin meydana geldiğini, daha sonra su ile etkileşime girdiğinde Na^+ değişimlerinin geri dönüşümlü Ca^{+2} veya K^+ değişimlerinin ise kalıcı olduğunu ifade etmiştir.

Bir zeminin şişme kapasitesi başlıca;

- a. zemindeki kil minerallerinin türüne,
- b. kil tanelerinin dizilimi spesifik yüzey alanına ve
- c. taneleri saran zemin suyunun kimyasına bağlıdır.

Farklı türdeki kil mineralleri; her bir minerale ait değişik elektriksel alanlar nedeni ile değişen şişme potansiyellerine sahiptirler. Killi zeminlerin jeoteknik özellikleri; mineralojik bileşim (özellikle kil mineralojisi) ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin; plastisite, sıkışabilirlik ve şişme potansiyeli simektit gibi kil minerallerinin yüzdesinin artışına bağlı olarak artış gösterir (Grim, 1949; Seed vd., 1962; Terzaghi ve Peck, 1967; Gillot, 1968). Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Killer üzerine uygulanan gerilimler, doğal ve yapay yükler ise kilin yapısında nem hareketine neden olur; ve killerdeki hacımsal değişimler, hemen her zaman bu nem hareketi ile kontrol edilir. Eğim yenilmesi ve konsolidasyon gibi süreçler de yine bir ölçüde, bu nem hareketi ile ilgilidir. Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan kuvvetlerle oluşur. İçsel eğim ise, sıcaklık değişmesi, doygunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989). Zemin suyunun kimyası da zeminlerin şişme potansiyeli ile ilgili çok büyük önem taşır. Zemin suyunda çözülmüş olan kalsiyum, sodyum, magnezyum ve/veya potasyum katyonları kil yüzeyinde değişebilen katyonlar olarak absorbe edilebilirler. Bu katyonların hidrasyonu kil taneleri arasında büyük miktarlarda suyun toplanmasına sebep olabilir.

Zemin taneleri arasındaki boşlukları dolduran suyun kimyası killer üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakla beraber, mineralojik birimler arasındaki mesafe araya giren katyonların değerliklerine, boyutlarına ve hidrasyon durumlarına bağlıdır. Boşlukları dolduran çözeltinin iyonik gücü mikro boşlulardaki ozmotik basıncı ve taneler arasındaki itme kuvvetlerini de kontrol etmektedir (Musso vd., 2003).

Killerde boşlukları dolduran suyun iyonik konsantrasyonu ve iyonların değeri, kilin hacimsel değişimini büyük ölçüde etkilemektedir. Örneğin; iyon konsantrasyonunun artması ozmotik basınç farkının azalmasına neden olur ve çift tabaka (double-layer) bölgesindeki su dışarı çıkmaya başlar, bu suyun çıkışı ile birim tabakalar arasındaki mesafe azalır azalmasına ve kilin sıkışmasına neden olur. Tam tersi olarak da konsantrasyonun azalması kilin şişmesine neden olur. Düşük değeri katyonlar ise çift tabaka kalınlığının artmasına ve kilin şişmesine neden olur (Di Maio, 1996).

Şişme potansiyelinin tek değeri değişebilir katyonlar içeren killerde suyun tuz konsantrasyonundaki artışla birlikte düştüğü Yong ve Warkentin (1975) tarafından özellikle işaret edilmiştir. Daha sonra; Basma ve Al-Sharif (1994) ise boşlukları dolduran suyun tuz konsantrasyonunun belli bir değeri aşması ile şişme üzerindeki etkinin azalmaya başladığını bulmuşlardır.

Sridharan vd. (1990), serbest şişme indisi deneyleri sırasında, Boşluk suyunda elektrolit konsantrasyonundaki artışın serbest şişme deneyleri esnasında kaolinit türü killerde hacmin artışına, montmorillonit gibi simektit grubu killerde ise tersi olarak hacim azalmasına neden olduğunu bildirmişlerdir. Bunun nedeni, simektitte çok fazla topraklanmış yapının oluşması ile elektriksel çift tabaka kalınlığının azalması olarak açıklanmaktadır.

Jullien vd. (2002), Fo-Ca kili üzerinde gerçekleştirdikleri şişme deneyleri sırasında, saf su yerine $\text{Cu}(\text{NO}_3)$ çözeltisi kullanılmasının deney sonuçlarını etkilediğini ve çözeltideki Cu iyonlarının artmasıyla kilin şişme yeteneğinin azaldığını ifade etmişlerdir.

Tuz çözeltilerinin killerin şişme özellikleri üzerindeki etkisi (Petrov and Rowe, 1997; Alawaji, 1999; Shackelford et al., 2000; Jo et al., 2001; Jo et al., 2004; Kolstad et al., 2004; Lee and Shackelford, 2005; Jo et al., 2005; Lee et al., 2005; Mishra et al., 2005; vb.) araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, tuz çözeltilerinin kilin yapısını bozduğu, difüzyon çift tabaka (Diffusion Double Layer-DDL) kalınlığını azalttığı ve bunun neticesinde hidrolik iletkenliğin arttığını ve şişmenin ise azaldığını belirlenmiştir.

Mowafy vd. (1985)' in yaptıkları çalışmada; suda elektrolit olmasının kil tanelerinin yüzeylerinde değişimlere neden olduğunu ve tuz konsantrasyonunun artması ile tanelerin hızla topaklanarak tane boyunu arttırdığını ve böylece topaklanan tane boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve absorbe edilen su miktarının azaldığını belirlemişlerdir. Böylelikle kilin şişme potansiyeli de azalmıştır. Bundan başka, çalışmalarında kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyundaki katyonlar arasında meydana gelen değişimin levhalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına neden olduğu da özellikle vurgulanmıştır.

Kilin sahip olduğu çözünebilir tuzların konsantrasyonu ve SAR değerleri dispersiyon yoluyla kilin yapısının bozulmasına neden olarak geçirimsizlik değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun nedeni ise dispers kil tanelerinin hidrolik akışın gerçekleştiği makrogözenekleri tıkamasıdır (Karimpour, 2002).

Su kimyasının özellikle Ca ve sodyum içeriğine bağlı olarak killerin şişme potansiyellerinin değişimi uluslararası literatürde genellikle açıklanmış olup bundan başka yukarıda da örnekleri verildiği gibi suların kimyasını değiştiren başta kentsel atıklardan sızma olmak üzere değişik etken unsurların şişme üzerindeki etkilerine ilişkin araştırmalar da bulunmaktadır. Buna karşın değişik türde suların killerin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini ortaya koyan ve dolayısı ile standart deneysel yöntemi tartışan araştırmalar yaygın değildir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Killi zeminlerin mühendislik açıdan değerlendirilmeleri bakımından şişme davranışlarının belirlenmesi, olası şişme sonunda zemin ile üzerindeki yapı arasındaki etkileşimin özellikle de zeminin şişmesi sonunda zeminde meydana gelecek kabarmaların üst yapı üzerindeki etkilerinin doğrulukla öngörülmesi çok büyük önem taşımaktadır. Söz konusu davranışın ve zemin üstyapı etkileşiminin ortaya konulması için zeminden alınan numuneler üzerinde yaygın olarak laboratuvar ortamında şişme deneyleri yapılmakta ve killi zemine ait şişme potansiyeli ile şişme sonunda oluşacak şişme basınçları belirlenebilmektedir. Söz konusu deneysel yöntemde, killi zeminin şişme deneyleri yapılırken kullanılan su genellikle distile edilmiş saf sudur. Ancak, doğal ortamda killi zeminin etkisi altında kaldığı su saf olmamakla beraber, çok farklı

kimyasal içeriği sahiptir. Killi zeminlerin şişme potansiyellerinin özellikle de taneleri saran zemin suyunun kimyasına bağlı olduğu düşünüldüğünde aynı killi zeminin farklı suyun türü ve kimyasına bağlı olarak farklı şişme davranışları göstereceği açıktır ve bilinmektedir. Bu nedenle, laboratuvar ortamında saf su kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarını kullanarak, killi zeminlerin yapı altındaki şişme davranışının öngörülmesinin çok da doğru ve kesin olacağını söylenmesi oldukça zordur.

Örneğin; karbonatlı kayalardan, evaporitlerden, mağmatiklerden, vb. beslenen ve zemin ile etkileşen suyun bileşimi birbirlerinden oldukça farklıdır. Bundan başka, denizlere, göllere ve/veya akarsulara yakın ve deniz, göl ve/veya akarsu suyunun girişim yaptığı yerlerde de oldukça farklı su kimyasının söz konusu olduğu açık olup benzer örneklerin çoğaltılması mümkündür. Bu nedenle, killi şişebilen zeminlerin yerinde etkileşeceği suyun kullanımı ile şişme davranışının belirlenmesi, daha kesin ve doğru olacağı açıktır. Çünkü zeminler buldukları ortama bağlı olarak kimyaları ve türleri birbirlerinde oldukça farklı sularla etkileşirler.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarla, killi zeminlerle etkileşime giren suyun kimyası ve türünün şişme davranışı üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Amaca yönelik olarak yapılan deneysel çalışmalarda standart deney yöntemi ile saf su kullanılarak elde edilen sonuçlarla farklı türde ve kimyasal içeriğe sahip suların kullanımı ile elde edilen serbest şişme sonuçları karşılaştırılmış, farklılıkların uygulama sırasındaki etkileri tartışılmış ve öneriler sunulmuştur.

2. KİLLERDE NEM ETKİLEŞİMİ VE ŞİŞMENİN MEKANİZMASI

Şişme potansiyeli terimi, birçok araştırmacı tarafından genellikle, zeminlerin hem şişme yüzdesi hem de şişme basıncı olarak tanımlanır. Serbest şişme deneyleri doygun koşullarda, kilin hacımsal değişiminin ölçülmesi olarak kabul edilebilir. Şişme basıncı ile ilgili kabul edilen tanımlama; su eklendiğinde zemin hacminin sabit kalması için gerekli olan, karşı koyan kuvvet olarak kabul edilir.

Killerin şişme basınçları bir çok faktör tarafından denetlenmektedir. Yerinde (arazide) veya sonraki su içeriği, yerinde yoğunluk, yöntem ve kompaksiyon derecesi şişme basıncını denetleyen fiziksel faktörlerdir. Bununla birlikte, fizikokimyasal davranış ve taneler arası, taneler içi kuvvetler ve reaksiyonlarla kontrol edilen zemin türleri nedeni ile zeminin türü majör bir faktördür. Killerin şişmesi birincil olarak elektriksel çift tabakaya bağlıdır. Kil-su sistemindeki değişebilen katyonlar kil üzerinde yer almayıp, yüzeyden farklı uzaklıklarda bulunurlar. Pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü kil yüzeyi arasındaki elektriksel kuvvet, katyonları yüzeye çeker, fakat termal enerjileri onları yüzeyden uzağa dağıtır. Elektriksel çekme ve termal dağıtma arasındaki denge yüzeydeki yüksek konsantrasyonlu ve yüzeyden düşük uzaklıktaki katyonları dağıtmayı sağlar. Bitişik tanelerin dağılmış iyon tabakalarının birbirleri ile etkileşimi şişme özelliğini açıklayıcı bilgi verir. Negatif yüklü yüzeydeki iyonların teorik dağılımı Gouy ve Chapman tarafından hesaplanmıştır (Sridharan ve diğ. 1986).

Toplam su içeriği ve su tutma enerjisi killerin tüm özelliklerini etkileyen en önemli iki faktördür. Su içeriği; kıvamlılık, dayanım ve yoğunluğu, su tutma enerjisi ise; hacımsal değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkilemektedir.

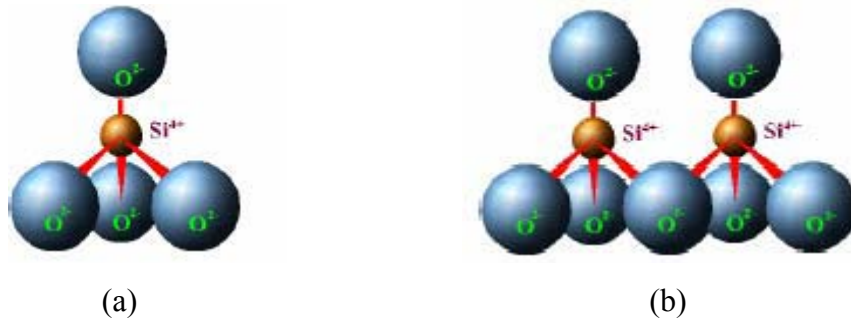
2.1. Killerde Nem Etkileşimi

Kil, kristal yapıları birbirinden farklı birkaç mineralin oluşturduğu bir karışımın genel ismidir. Bu tanım şu şekilde formüle edilebilir;

$$KİL = Ana\ kil\ minerali + Diğer\ kil\ mineralleri + Eser\ organik\ maddeler$$

Killer tabakalı yapıda minerallerdir. İki değişik yapı biriminin birleşmesinden oluşan kil minerallerinin tabakaları tetrahedral birim ve oktahedral birim olarak tanımlanmaktadır.

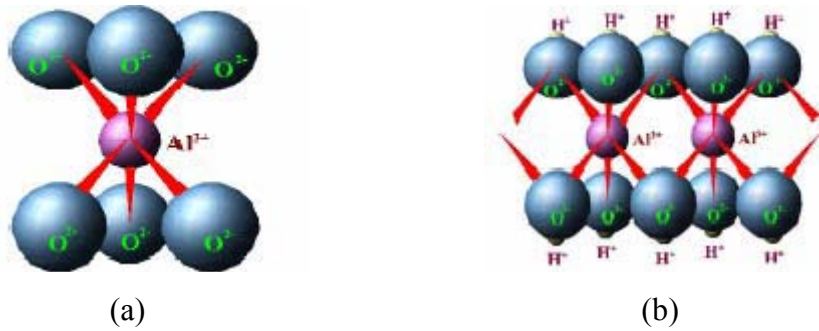
Tetrahedral birim; geometrik şekli düzgün dört yüzlü, merkezde silisyum atomu, köşelerde ise merkez atomundan eşit uzaklıkta oksijen ya da hidroksil iyonlarının yer almasıyla oluşan birimdir.



Şekil 2.1. a. Tetrahedral birim, b. Silikat tabakası (Grim, 1968).

Tetrahedral dizilim sonucunda oksijen atomlarının ortasında 0.55 \AA çapında bir boşluk oluşur. Çapı 0.5 \AA olan Si atomu için bu boşluk çok uygun bir büyüklüktedir. Silikat yapılar, tetrahedral oksijenlerinin diğer tetrahedral birimler tarafından paylaşılmasıyla oluşur.

Oktahedral birim ise; geometrik şekli düzgün sekiz yüzlü, merkezde alüminyum iyonları, köşelerde ise oksijen ya da hidroksil iyonları bulunan yapı birimidir. Alümina tabakalar, oktahedrallerin diğer oktahedral birimler tarafından paylaşılması sonucu oluşur.



Şekil 2.2. a. Oktahedral birim, b. Alümina tabakası (Grim, 1968).

İki silisyum tetrahedralinin arasına bir alüminyum oktahedralinin girmesi sonucu montmorillonit minerali birim katmanı oluşur ve bu yapı kısaca TOT şeklinde simgelenir. Çok sayıda montmorillonit birim katmanlarının üst üste yerleşmesi sonucunda ise montmorillonit tanecikleri oluşur.

Montmorillonit $(Mg, Ca) Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 8H_2O$ formülü ile gösterilen bir kil mineralidir. Baydelit ise $Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$ formülü ile gösterilen simektit grubu kil minerallerinin alüminyumca zengin bir üyesidir. Ana minerali sodyum montmorillonit olan killere sodyum bentonit (Na-B), kalsiyum montmorillonit olan killere ise kalsiyum bentonit (Ca-B) denir. Na-B ve Ca-B karışımı olan bentonitlere de “*ara bentonit*” olarak adlandırılır.


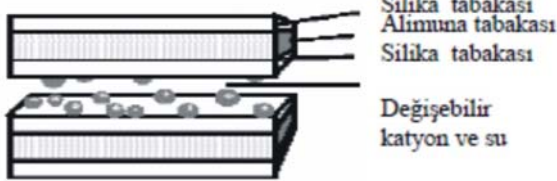
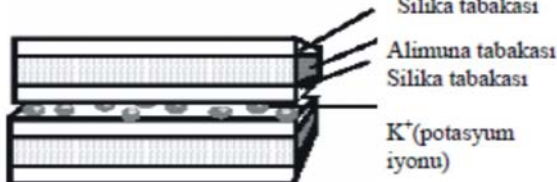
Montmorillonit; iki silisyum tetrahedralinin arasına alüminyum oktahedralinin girmesiyle oluşan üç tabakalı bir mineraldir (Şekil 2.3). Birim hücreler birbirlerini Van der Waals bağlarıyla tutarlar. Bu bağların çok zayıf olması sonucu kolay ayrılabilir ve elde sabun gibi kaygan bir his bırakırlar. Montmorillonit içeren killer yüksek plastiklik özeliği taşır.

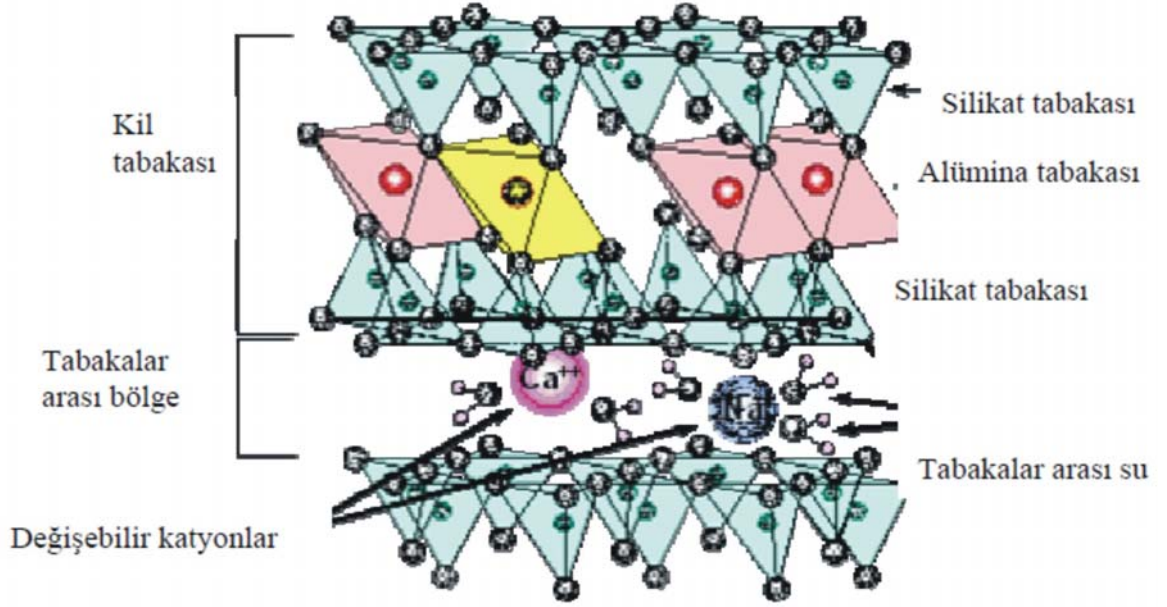
Montmorillonit mineralinin diğer önemli bir özeliği de su ile şişmesidir. Şişme, suyun tabakalar arasında adsorblanmasından ileri gelir. Montmorillonit grubu mineralleri, $0.05\mu m$ 'den daha küçük tane büyüklüğüne sahiptir.

Kil kütleleri, içerdiği kil minerallerine göre kaolin, şiferton, bentonit, illit gibi özel isimler alırlar. Killer, belirli yapısal özelliklerine göre çeşitli sınıflara ayrılmışlardır (Çizelge 2.1).

Toplam su içeriği ve su tutma enerjisi killerin, tüm özelliklerini etkileyen en önemli iki faktördür. Su içeriği; kıvamlılık, dayanım ve yoğunluğu, su tutma enerjisi ise; hacimsel değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkilemektedir.

Çizelge 2.1. Bazı kil minerali türleri (www.agric.nsw.gov.au, 2004).

Kil Türleri	Özellikleri
<p data-bbox="293 362 384 394">Kaolin</p>  <p data-bbox="644 461 791 560">Silika tabakası Alimuna tabakası</p> <p data-bbox="293 676 552 712">$Al_2[(OH)_2(Si_2O_5)]$</p>	<p data-bbox="912 362 1374 452">Kaolin partikülleri yaklaşık 1µm çapında ve 0,1 µm kalınlığındadır.</p> <p data-bbox="912 524 1299 560">Çok az şişme özeliği gösterir.</p> <p data-bbox="912 631 1248 667">Seramikler için kullanılır.</p>
<p data-bbox="293 788 619 824">Montmorillonit (smektit)</p>  <p data-bbox="676 860 858 1021">Silika tabakası Alimuna tabakası Silika tabakası Değişebilir kation ve su</p> <p data-bbox="293 1128 785 1164">$Si_8(Al_{3,31}Mg_{0,66})O_{20}(OH)_4M^{+}_{0,66}nH_2O$</p> <p data-bbox="293 1240 858 1330">M^{+}: değişebilir kationlar, n: katmanlar arası suyun mol olarak miktarı</p>	<p data-bbox="912 739 1374 990">Na-montmorillonit partikülleri oldukça küçük taneciklerdir ve genellikle tek kristal tabakası şeklindedir ve kalınlığı yaklaşık 1nm'dir.</p> <p data-bbox="912 1012 1374 1263">Ca-montmorillonit partikülleri Na-montmorillonite göre daha büyüktür ve 8–10 kristal tabakası şeklindedir ve kalınlığı yaklaşık 20–30 nm' dir.</p> <p data-bbox="912 1285 1374 1375">Na-montmorillonit şişme özeliği gösterir.</p> <p data-bbox="912 1397 1374 1487">Ca-montmorillonit az şişme özeliğine gösterir.</p>
<p data-bbox="293 1509 347 1541">İllit</p>  <p data-bbox="676 1568 858 1751">Silika tabakası Alimuna tabakası Silika tabakası K^{+}(potasyum iyonu)</p> <p data-bbox="293 1796 587 1832">$KAl_2[(OH)_2(AlSi_3O_{10})]$</p>	<p data-bbox="912 1509 1374 1711">Birim katmanında, iki silika tabakası arasında alimuna tabakası yer alır ve tabakalar arasında K^{+} kasyonu bulunur.</p> <p data-bbox="912 1733 1374 1823">İllit partikülleri oldukça küçük ve genellikle 10 nm boyutundadır.</p> <p data-bbox="912 1845 1299 1881">Çok az şişme özeliği gösterir.</p>



Şekil 2.3. Montmorillonit minerali.

Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Killer üzerine uygulanan gerilimler, doğal ve yapay yükler ise kilin yapısında nem hareketine neden olur; ve killerdeki hacımsal değişimler, hemen her zaman bu nem hareketi ile kontrol edilir. Eğim yenilmesi ve konsolidasyon gibi süreçler de yine bir ölçüde, bu nem hareketi ile ilgilidir. Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan kuvvetlerle oluşur. İçsel eğim ise, sıcaklık değişmesi, doygunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır (Gillot, 1968) (Kasapoğlu, 1989).

Killerde, kuruma sonucu büzülme, su emme sonucu şişme gibi istenmeyen kötü sonuçlar, bu nem hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Buharlaşma, bitki terlemesi ve ısınma, killerde kurumaya neden olduğu gibi; yeraltı su tablasındaki yükselmeler, yağışlar ve barajlar gibi mühendislik yapılarından sızan kaçak suları da kildeki nem miktarını artırır. Killerin nem miktarındaki değişim, hemen her zaman hacımsal değişimlere neden olur. Nem artışı hacımsal büyümeyi, nem kaybı ise hacımsal küçülmeyi oluşturur.

Kuru bir kilin nem absorbe etme kapasitesi çok büyüktür. Su ile temas halindeki ıslak bir kil örneği üzerindeki basıncın azaltılması, kilin su emmesine neden olur.

Örneğin, aşırı konsolide bir kilin şişmesi gibi. Su emme ve hacımsal büyüme, kil denge gözeneklilik oranına erişinceye kadar devam eder. Killerdeki su emme sonucu oluşan hacımsal büyüme; kil üzerine etkileyen yük ve şişme basıncının bir fonksiyonudur (Gillot, 1968) (Kasapoğlu, 1989).

Killerdeki bu şişme basıncı birkaç kg/cm^2 den birkaç ton/m^2 ye kadar değişebilir. Eğer bu şişme basıncı, kil üzerine etkileyen inşaat yükünü aşarsa, zeminde oluşacak kabarma önemli temel sorunlarına neden olabilir. Kilin mineralojisi, dokusu, kimyasal bileşimi ve konsolidasyon miktarı, bu tür zemin kabarmalarını etkileyen en önemli jeolojik faktörlerdir.

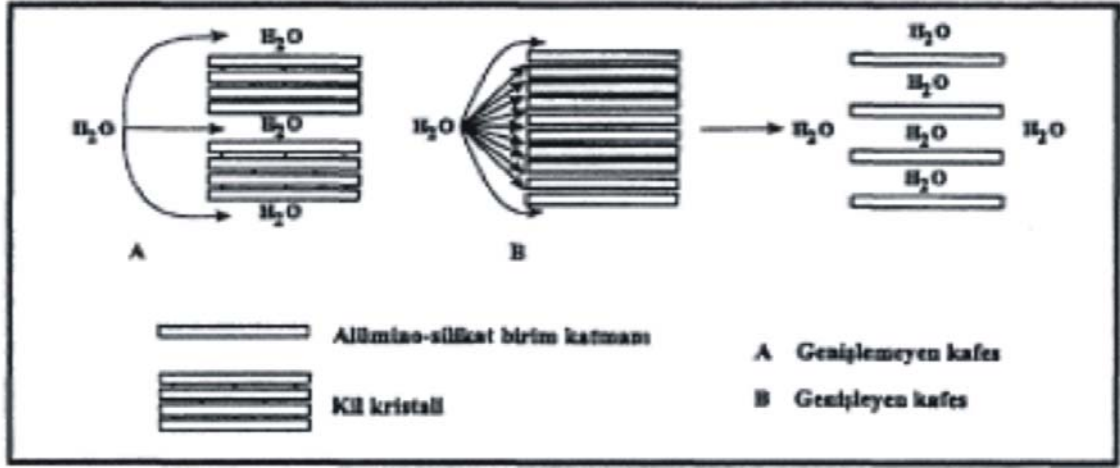
Bilindiği gibi, kil mineralleri arasında “montmorillonit” şişme potansiyeli en yüksek olanıdır. İnce tabaka yapısına sahip olan montmorillonit kristalleri içerisine giren su, bu tabakalar arasındaki yaklaşık 10 \AA olan mesafeyi önemli ölçüde genişleterek büyük hacımsal büyümeye neden olur (Şekil 2.4). Bu tür hacımsal büyüme “kristallerarası şişme” (intra-crystalline swelling) olarak tanımlanır. Simektitin yanısıra, bu tür genişleyebilen kil mineralleri arasında, vermikülit, şişebilen klorit, halloysit ve bazı interstratifiye kil minerallerini sayabiliriz.

Killerdeki şişme olayında, kil minerallerinin kristal kimyasının en önemli rolü oynadığı kuşkusuzdur. Örneğin, kristal yapısı bakımından, montmorillonit, şişmeyen kil minerali olarak bilinen illite yüzeysel olarak çok benzer. Ancak illitin, birim yüzey alanındaki elektron yükü montmorillonitinkinden daha fazladır. Bu nedenle illitteki katmanlararası bağ (interlayer-bond) montmorillonitinkinden çok daha güçlüdür, ve bu nedenle su, bu güçlü bağları kopararak katmanlararasına girememektedir (Gillot, 1968: Kasapoğlu, 1989).

2.2. Şişmenin Mekanizması

Kil zeminlerde şişme mekanizması oldukça karmaşıktır ve birçok faktörden etkilenmektedir. Şişme ve büzülme işleminin bir bütünü olarak tanımlanan genleşme, iç gerilme dağılımını bozan zemin suyunun miktarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak gelişir. Kil mineralleri, genellikle yüzeylerinde negatif ve uç kısımlarında ise pozitif elektrik yüklerine sahip tabakalı partiküllerdir. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler

nedeniyle bu partiküllerin yüzeyine yapışan zemin suyunun içindeki katyonlar tarafından dengelenir. Partiküller arası elektriksel kuvvet alanı, negatif yüzey yüklerinin ve zemin suyu elektro-kimyasının bir fonksiyonudur.



Şekil 2.4. Killerde kristaller arası şişme (Gillot, 1968: Kasapoğlu, 1989).

Kil kristalleri ve su molekülleri arasındaki Van der Waals yüzey ve emilme kuvvetleri, bu kuvvet alanını etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, dıştan uygulanan gerilmeler ve zemin suyundaki kapiler gerilmeler ile denge içerisinde olmalıdır (Chen, 1988). Eğer zemin suyunun kimyası, su miktarı ya da kimyasal kompozisyon ile değişirse, buna bağlı olarak kuvvet alanı da değişir. İç kuvvetler arasındaki nihai değişme, dıştan uygulanan gerilmelerdeki değişiklikler tarafından dengelenmezse, iç kuvvetler dengeleninceye kadar partikül boşlukları da değişecektir. Bu partikül boşluklarındaki değişiklik, kendini “büzülme” yada “şişme” olarak gösterir. Su içeriğindeki değişime bağlı olarak hacim değişiminin üniform olarak gelişmesi durumunda, değişim kolayca gözlenemez ve nihayetinde büyük düşey zemin hareketleri fark edilmeden oluşur. Bu durum, çok ciddi problemlere neden olabilir. Hacim değişimiyle ilgili mühendislik problemleri yalnızca yüklemeye bağlı olarak gelişen hacim değişiminden değil, buna ilaveten yükleri destekleyen zeminin düzensiz şişme ve büzülmesinde de kaynaklanır (Oweiss ve Bowman, 1981).

Kil mineralleri; belirli anyon ve katyonları adsorblayarak, onları değişebilir durumda tutma özelliğine sahiptir. Adsorbe edilen katyon miktarı zemin içindeki kil miktarıyla orantılıdır. Değişebilir iyonlar, kil mineral yapı biriminin dış yüzeyi etrafında

tutulur. Kil minerallerinde en yaygın değişebilir katyonlar Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ ve Li^+ gibi pozitif iyonlardır. Bazı iyonlar, su içerisindeki diğer anyon ve katyonlarla yer değiştirebilir. Bu iyonların varlığı kilin çöztiden iyonları adsorblama yeteneğinin bir göstergesidir. Değişim reaksiyonu bazen dengesiz bir çevrede de olabilir. Değişebilir iyonlar kil mineral yapı biriminin dış yüzeyi etrafında tutulur ve değişim silika-alümina kil minerali kristal yapısını etkilemez. Kil yüzeyinde negatif yüklerin hakim olması, katyonların anyonlardan çok daha kolay yüzeye çekilmesini mümkün kılar. İllit ve kaolinitle karşılaştırıldığında daha büyük yüzey alanına sahip montmorillonit partiküllerince taşınan büyük net elektriksel yük nedeniyle, montmorillonitler kaolinitlere oranla katyon adsorblamada 10 kat daha aktiftirler.

Lambe ve Whitman (1959), kil mineral bileşiminin ve değişebilir iyon tipinin, kilin su adsorblama yeteneği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Konsolidasyon deneyi ile killerin şişme özelliklerini, değişebilir katyon ve etkin kil mineral tipine bağlı olarak şişme indisi değerlerini kullanarak tanımlamışlardır (Çizelge 2.2).

Zemin numunesindeki değişebilir iyon ve kil mineral tipinin etkinliğine bağlı olarak konsolidasyon deneyi sonucunda elde edilen $e\text{-log}\sigma'$ eğrilerinden şişme indisi değerlerini tespit etmişlerdir. Elde edilen eğrilerden her mineral tipinde aynı olmasa da şişebilme özelliğinin büyük oranda değişebilir iyona bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Kil mineralinin levhaları arasında bulunan adsorbe su ile kil mineralleri arasındaki etkileşim, aşağıda belirtilen birkaç farklı mekanizmayla gerçekteşmektedir (Keren ve Shainberg, 1975; Dakshanamurthy, 1978; Sposito ve Prost, 1982; Low, 1992; Komine ve Ogata, 1994,1996) (Uzundurukan, 2006' dan).

- a. Su, kil minerallerinin negatif yüklü silikat yüzeyleriyle etkileşir ve silikat oksijenleri ile oksijen bağları meydana gelir.
- b. Su, negatif yüklü kil yüzeylerine çekilen katyonlarla etkileşir. Silikat yüzeylerindeki katyonların hidrasyonu sonucunda suyun serbest enerjisi azalır. Bu suyun aktivitesi veya kimyasal potansiyeli, serbest suyunkine eşit olana kadar, su adsorbsiyonuna ve şişmeye neden olan bir itme kuvveti oluşur.

- c. Negatif yüklü kil yüzeylerine yaklaşıldıkça, katyon konsantrasyonu artmaktadır. Elektrostatik çekimin bir sonucu olarak, iyonların difüzyonundaki sınırlanma ve artan konsantrasyon nedeniyle, su molekülleri konsantrasyonu dengelemek için yüzeye yayılır. Suyun bu şekildeki ozmotik hareketi, bazen çift tabaka şişmesi olarak da isimlendirilmektedir.

Çizelge 2.2. Kil minerallerinin şişme indisi değerleri (Lambe ve Whitman, 1959).

Kil Tipi	Değişebilir İyon	Şişme İndisi
Montmorillonit	Na ⁺	2,50
	Li ⁺	2,00
	Ca ⁺²	0,51
	Mg ⁺²	0,44
	H ⁺	0,34
	K ⁺	0,30
	Fe ⁺³	0,03
İllit	K ⁺	0,27
	Ca ⁺²	0,21
	Mg ⁺²	0,18
	Fe ⁺³	0,15
	Na ⁺	0,15
	H ⁺	0,10
Kaolinit	Na ⁺	0,20
	Mg ⁺²	0,08
	K ⁺	0,06
	Ca ⁺²	0,06
	Fe ⁺³	0,06
	H ⁺	0,05

Sposito (1973), şişme basıncının katyonlar tarafından ortaya çıkarılan ozmotik basınçlarla ve bu nedenle çift tabaka teorisi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte Low ve Margheim (1979), şişme basıncının esasen tabakalar arası suyun, komşu kil tabakasının yüzeyleriyle etkileşiminin bir sonucu olarak potansiyel enerjisindeki

azalmadan ileri geldiğini ve ozmotik basınçların etkisinin düşük olduğunu öne sürmüşlerdir (Uzundurukan, 2006).

Borchardt (1989), yüksek su içeriğine ve büyük tabakalar arası mesafeye sahip ortamlarda, çift tabaka teorisinin zemin şişmesini en iyi açıklayan teori olduğunu ileri sürmüştür. Bununla birlikte, düşük – orta tabakalar arası mesafelerde, büyük ölçüde değişen yük yoğunluklarına sahip birkaç montmorillonit, potansiyel enerji azalma teorisini destekleyen şekilde hemen hemen aynı şişme basınçları üretmişlerdir (Viani vd. 1983; Oloo ve Fredlund, 1995) (Uzundurukan, 2006).

Tabakalar arası katyonların rehidrasyonu sırasında binlerce bar (1 bar = 1.0194 kg/cm²) mertebesinde basınç meydana gelebilmektedir. Tabakalar arasına üç-dört su tabakası girdikten sonra, yani tabakalar arası mesafe 1nm (10-9m-10Å)' yi aştığında yüzey hidrasyonunun önemi azalmakta ve elektriksel çift tabaka etkisi en önemli şişme mekanizması haline gelmektedir (Van Olphen, 1977; Bradbury ve Baeyens, 2003) (Uzundurukan, 2006).

Literatürde, zeminlerin hacim artışı ile ilgili olarak verilen diğer mekanizmalar ise; yük boşalması sonucunda kristallerin elastik esnemesi nedeniyle meydana gelen genişleme ve zeminde ıslanmanın ilerlemesi sırasında sıkışan havadaki basınçtan ileri gelen şişme olarak sıralanabilir (Terzaghi, 1927; Emerson, 1964; Parker vd., 1980;1982) (Uzundurukan, 2006).

3. DENEYLERDE KULLANILAN KİLLER

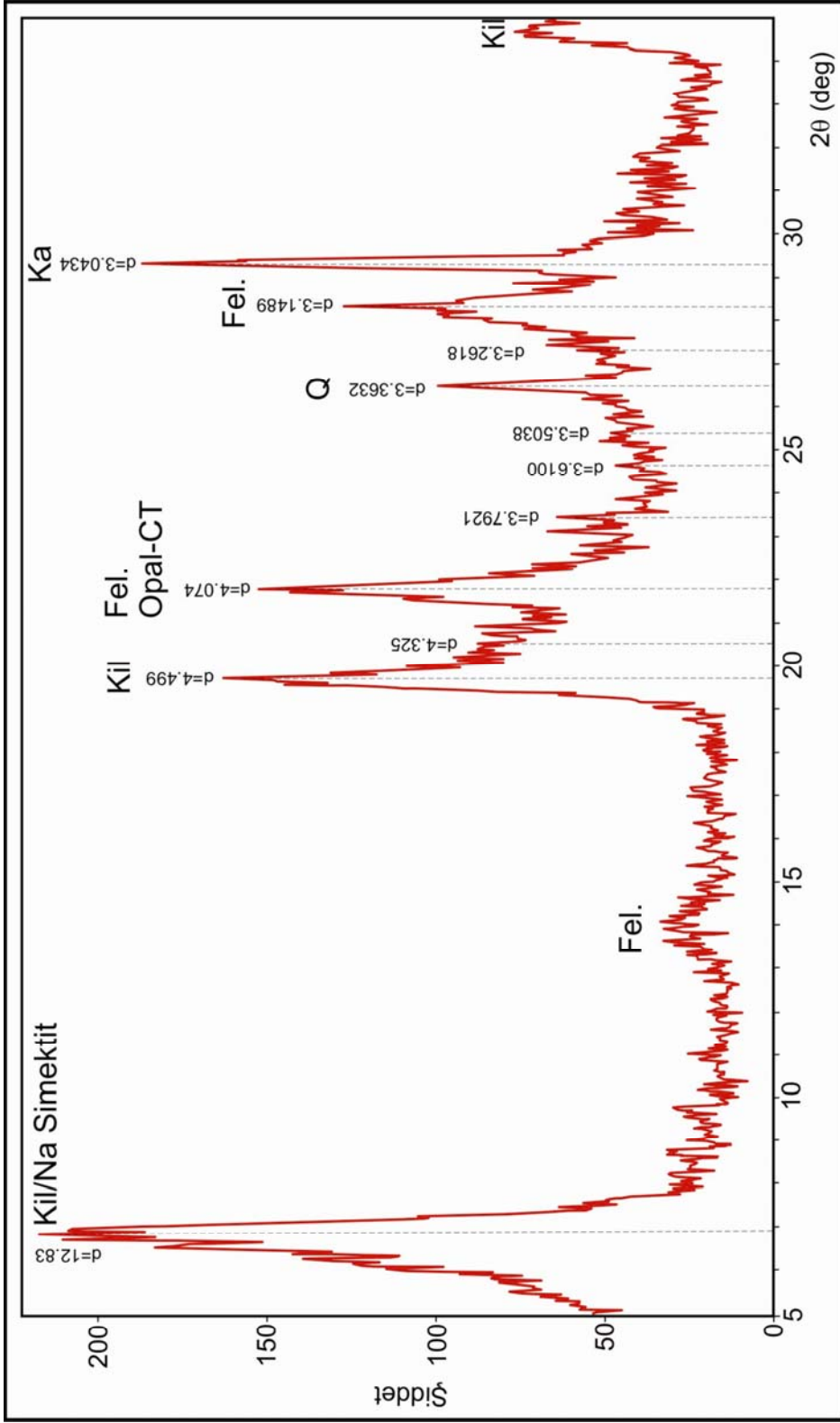
3.1. Mineralojik Özellikler

Araştırmada kullanılan bentonit Reşadiye' nin 25 km kuzeyinde yer alan Samaş A.Ş. tarafından işletilen kil yataklarından alınmıştır (Şekil 3.1). Kullanılan bentonit, doğal, saf ve işlem görmemiş sodyum bazlı malzemeler arasından seçilmiştir. Söz konusu bentonit, Na-Simektit (montmorillonit) türü kil minerali içermekte olup, yüksek şişme potansiyeline sahiptir.

Buna karşın, kullanılan bentonitte Şekil 3.2' de verilen karakteristik difraktogramda da görüldüğü gibi çok küçük miktarda feldispat, kalsit ve opal-CT gözlenmiştir. XRD tüm kayaç sonuçları ile kullanılan bentonitin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kil numunelerinin alındığı yere ait bulduru haritası.



Şekil 3.2. Kullanılan bentonitlere ait karakteristik XRD difraktogramı (Civelekoğlu, 2009' dan).

Çizelge 3.1. XRD (Tüm Kayaç) analizi sonuçları ve kullanılan bentonitin kimyasal bileşimi (Civelekoğlu, 2009' dan).

<i>XRD</i>	
Na-Smektit (%)	81
Feldispat (%)	7
Kuars (%)	2
Kalsit (%)	2
Opal- CT (%)	8

<i>Kimyasal Bileşim (Yalçın ve Gümüşer, 2000)</i>	
Silis, SiO ₂ (%) olarak	60.11
Titanyum, TiO ₂ (%) olarak	0.39
Alüminyum, Al ₂ O ₃ (%) olarak	18.77
Toplam ferrik oksit, ΣFe ₂ O ₃ (%) olarak	4.82
Manganez, MnO (%) olarak	0.054
Magnezyum, MgO (%) olarak	2.38
Kalsiyum, CaO (%) olarak	1.03
Sodyum, Na ₂ O (%) olarak	3.46
Potasyum, K ₂ O (%) olarak	1.75
Fosfor, P ₂ O ₅ (%) olarak	0.086
Ateşte kayıp (%)	6.34

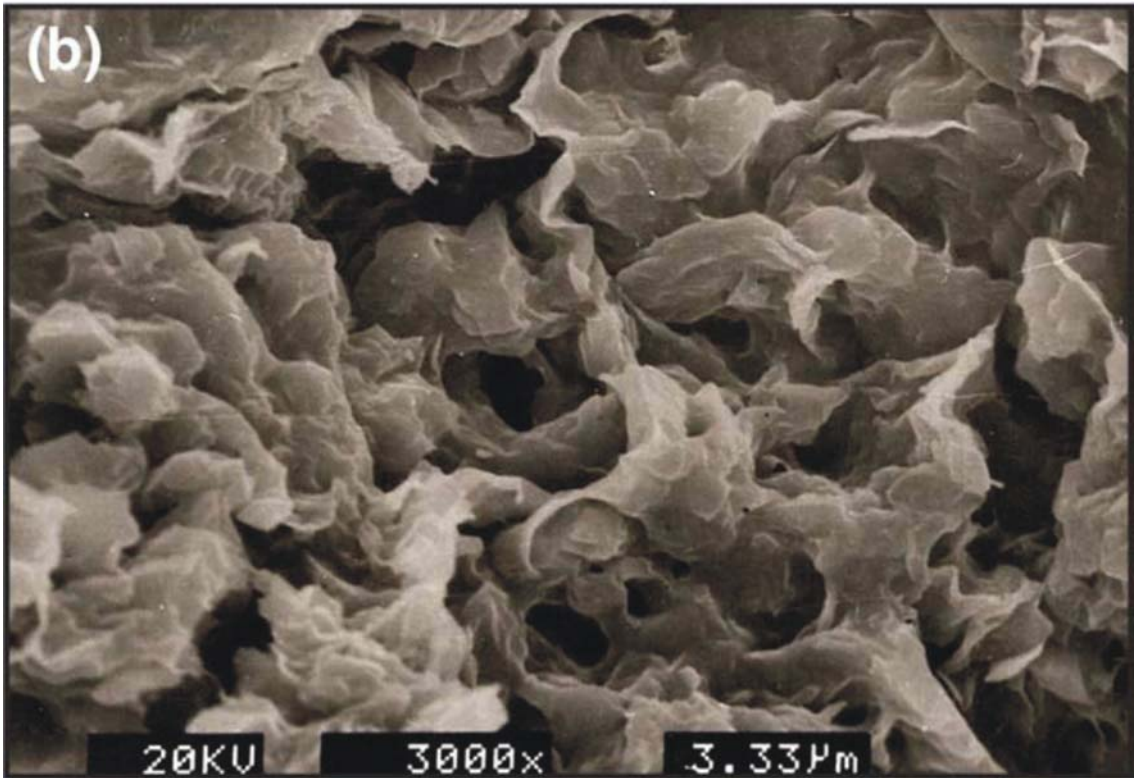
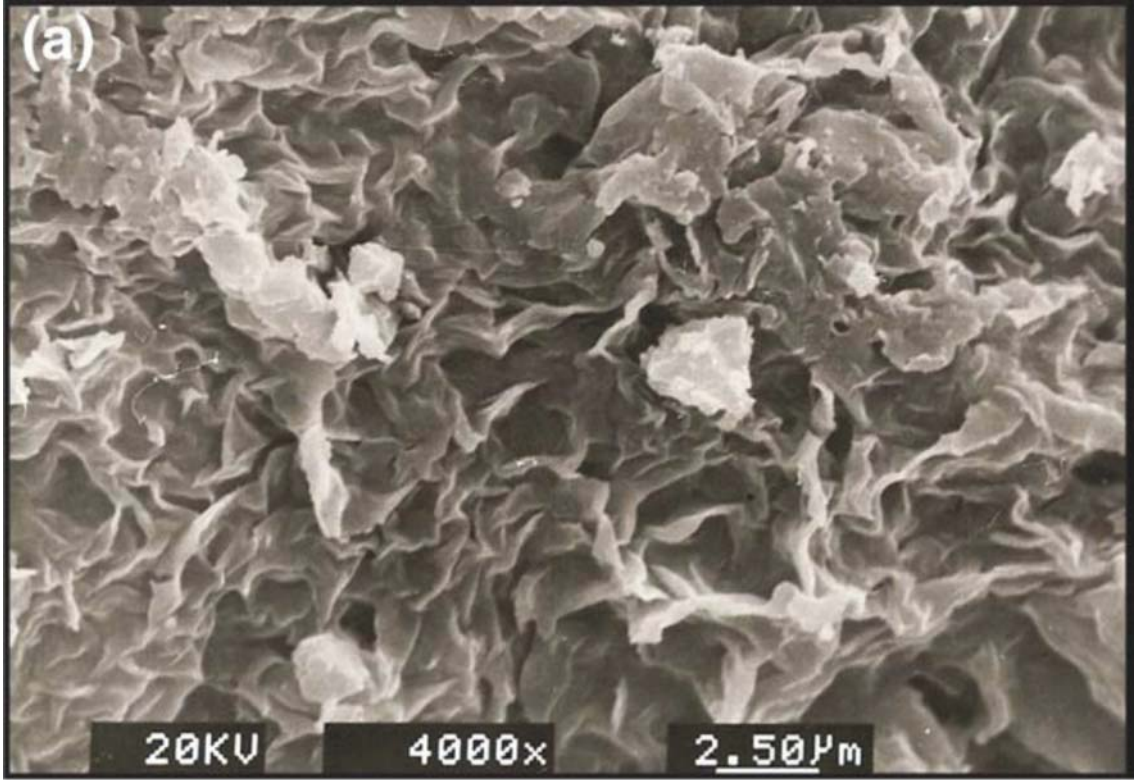
Yalçın ve Gümüşer (2000)' in belirttiği gibi; simektit agregaları taramalı elektron mikroskopisi (SEM) fotoğrafında görüldüğü gibi (Şekil 3.3.a) eğik/kıvrımlı, ince ve subhedral lamellidir. Bunlar zayıf derecede sıkışmış, kıvrımlı agregalar olup (Şekil 3.3.b) Wyoming türü (Grim ve Güven, 1978) ve Keller (1978)' in tanımladığı “corn-flake” dokuya sahiptir. Simektit lamelleri ~2–5 µm uzunluğa sahip olup, kısa prizmatik klinoptilolit ile ilgilidir (Yalçın ve Gümüşer, 2000).

3.1.2. Kompaksiyon Özellikleri

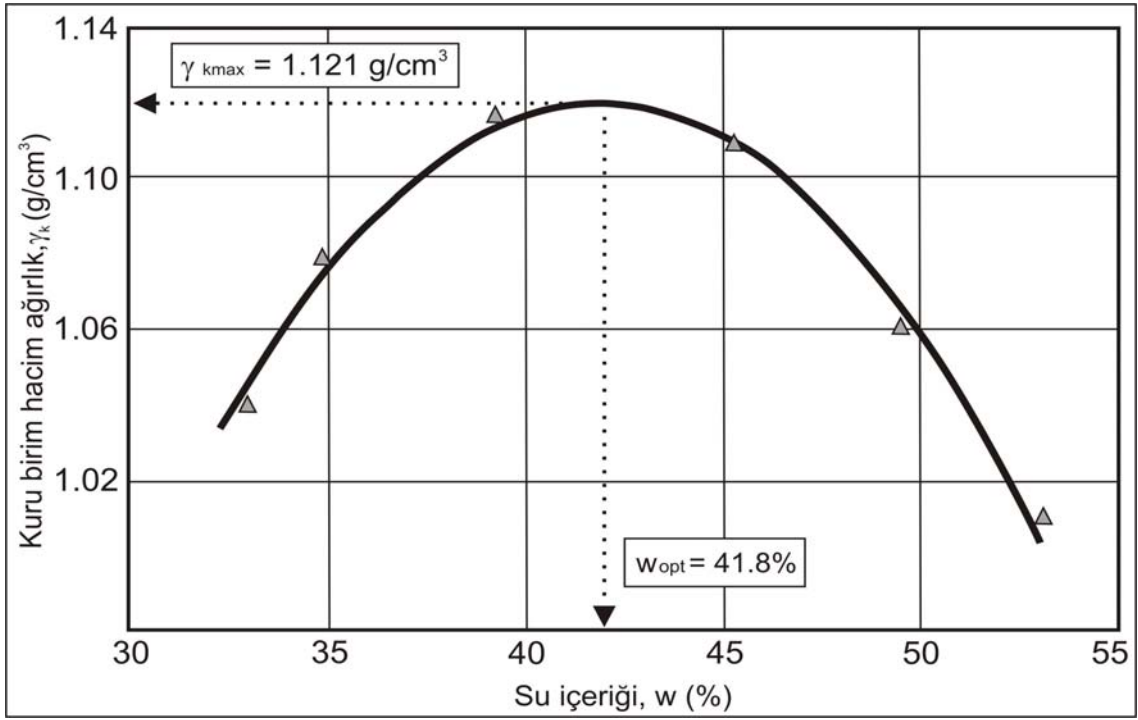
Özellikle farklı türlerde sularla gerçekleştirilecek deneylerde kullanılacak numunelerin birbirleri ile kompaksiyon derecesi başta olmak üzere benzer özelliklere sahip olması çalışmaların sonuçlarının yorumlanabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

Böylelikle, yapılan deneylerden elde edilen şişme yüzdesi değerleri mukayese edilebilir. Aksi takdirde değerlerin mukayesesi akılcı sonuçların elde edilmesine olanak tanımayacaktır. Bu nedenle; daha önce Civelekoğlu (2009) tarafından aynı killer üzerinde ASTM D-698 (1994) standardına uygun olarak Standart Proktor deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiş olan maksimum kuru birim hacim ağırlığın elde edildiği optimum su içeriği değeri kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.

Şekil 3.4' de verilmiş olan kompaksiyon eğrisinden de görüldüğü gibi maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) 1.121 g/cm³ ve optimum su içeriği (w_{opt}) %41.8 dir. Daha sonra, bentonit numuneleri değişik türlerdeki sularla söz konusu optimum su içeriğinde sıkıştırılmışlar ve deneyler için hazır hale getirilmişlerdir. Ancak böylelikle kullanılan suyun türü hariç tüm numunelerin birbirleri ile benzer oldukları kabul edilebilir.



Şekil 3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları: **a.** smektit lamelleri ve kısa prizmatik klinoptilolitler, **b.** zayıf paketlenme, kıvrımlanmış-lamelli smektit agregatları (Yalçın ve Gümüşer 2000' den).



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan bentonite ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriğini (w_{opt}) gösteren kompaksiyon eğrisi (Civelekoğlu 2009' dan).

4. DENEYLERDE KULLANILAN SULAR

Farklı türlerdeki suların killerin şişme davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacı ile gerçekleştirilmiş olan bu tez çalışması kapsamında deneylerde kullanılan sular Şekil 4.1’ deki haritada lokasyonları verildiği şekilde; Akdeniz, Karadeniz ve Ege denizi olmak üzere üç farklı denizden, Kızılırmak’ tan, Deli İlyas gölünden ve 3 farklı kaya türünden çıkan su kaynaklarından elde edilmiştir. Grafik ve şekillerde bu su numunelerinin adlamasına ilişkin kısaltmalar aşağıdaki gibidir.

Akdeniz: AD, Ege denizi: ED, Karadeniz: KD, Kızılırmak: KZRMK, Jips: JPS, Deli İlyas gölü: GOL, Tecer dağı: TCR, Köseadağ: KSD. Bu sulardan; Akdeniz suyu Mersin ilinin yaklaşık 50 km batısında Erdemli’ den, Ege denizi suyu Didim (Aydın) Altinkum’ dan, Karadeniz suyu ise Samsun ilinin yaklaşık 20 km batısında İncesu’ dan sahilden itibaren yaklaşık 5 km açıklardan alınmıştır. Kızılırmak’ tan alınan suyun lokasyonu ise Sivas ili içerisinde Hafik – Zara ilçeleri arasındadır. Jipsli su Sivas ili Cumhuriyet Üniversitesi kampüs alanından, göl suyu Ulaş (Sivas) ilçesindeki Deli İlyas gölü’ nden, diğer iki farklı su ise Suşehri (Sivas) ilçesinin yaklaşık 40 km güneybatısındaki Köseadağ su kaynaklarından ve Sivas ilinin yaklaşık 50 km güneydoğusunda Beypınarı yakınlarında Tecerdağı’ ndan alınmıştır.



Şekil 4.1. Su numunelerinin alındığı yerleri gösteren harita.

Söz konusu 8 adet farklı türdeki sulara ait su kimyası analizi sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1’ de toplu olarak verilmiştir. Değerlendirmelerde kullanılmak üzere Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidrojeoloji Anabilim Dalı Su Kimyası Laboratuvarı’ nda yapılan analiz sonuçlarından da görüleceği gibi en fazla tuzluluğa Akdenizden alınan su (%34.89) sahip olmakla beraber tüm deniz suları tuzca oldukça zengin sulardır. Tuzluluk değeri deniz sularında, ‰15.03 den ‰34.89 a kadar değişim gösterirken diğer sularda bu değer ‰0.03 ile ‰1.21 arasında değişmektedir.

Suların tümü yaklaşık benzer pH değerine sahip olup, sular bazik karakterdedir. Bununla beraber, suların EC’ leri bakımından değerlendirmelerine göre ise; deniz suları tuzluluklarına da bağlı olarak diğer sulara göre çok büyük farklılık göstermekle beraber EC 24760 $\mu\text{S/cm}$ dan 53100 $\mu\text{S/cm}$ ’ ye kadar değişim göstermektedir. Diğer sularda ise EC 94 $\mu\text{S/cm}$ - 2520 $\mu\text{S/cm}$ arasındadır.

Çizelge 4.1. Sulara ait kimyasal analiz sonuçları.

Numune	pH	EC	Tuzluluk	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃
AD	7.73	53100	34.89	763.73	1669.6	12364	577.13	22547	2750.6	149.51
ED	7.57	50950	33.45	695.38	1606.8	11400	515.75	20794	2530.4	155.49
KD	7.58	24760	15.03	342.88	695.55	4897	158.97	8698	1086.33	152.5
KZRMK	7.74	2520	1.21	214.7	29.52	238	6.05	349.7	454.6	254.2
JPS	7.45	1970	1	285.07	36.84	58.04	2.89	150.56	445.19	245.2
GOL	8.16	544	0.26	55.93	43.8	10.65	2.46	6.8	135.2	203.3
TCR	8.10	325	0.15	46.9	11.01	6.88	0.84	5.29	16.75	167.5
KSD	7.62	94	0.03	11.65	2.36	2.48	0.75	1.19	2.5	50.71

NOT: EC ($\mu\text{S/cm}$), tuzluluk (‰), iyon derişimleri (ppm).

Sulardaki iyon derişimleri dikkate alındığında Ege denizi ve Akdeniz sularının sodyum, kalsiyum, klor, sülfat ve magnezyum bakımından dikkate değer şekilde yüksek değerlere ulaştığı, Karadenizden alınan suyun bu suları takip ettiği görülmektedir. Karbonat bakımından ise suların genellikle yakın değerlere sahip olduğu, en düşük

değerin Kösedag suyunda belirlendiği görülmüştür. Kızılırmak' tan alınan ve jipsten çıkan suların sodyum, kalsiyum, klor, sülfat bakımından deniz sularından sonra en yüksek değere ulaştığı ve bu sulara sülfat değerinin birbirine yakın ve büyük olduğu belirlenmiştir. Tecer ve Kösedag' dan alınmış olan suların ise tüm iyon derişimleri, tuzluluk ve EC leri en düşük değerler olarak saptanmış olmakla beraber Tecer' den alınan suyun değerleri görel olarak Kösedag' dan daha büyüktür.

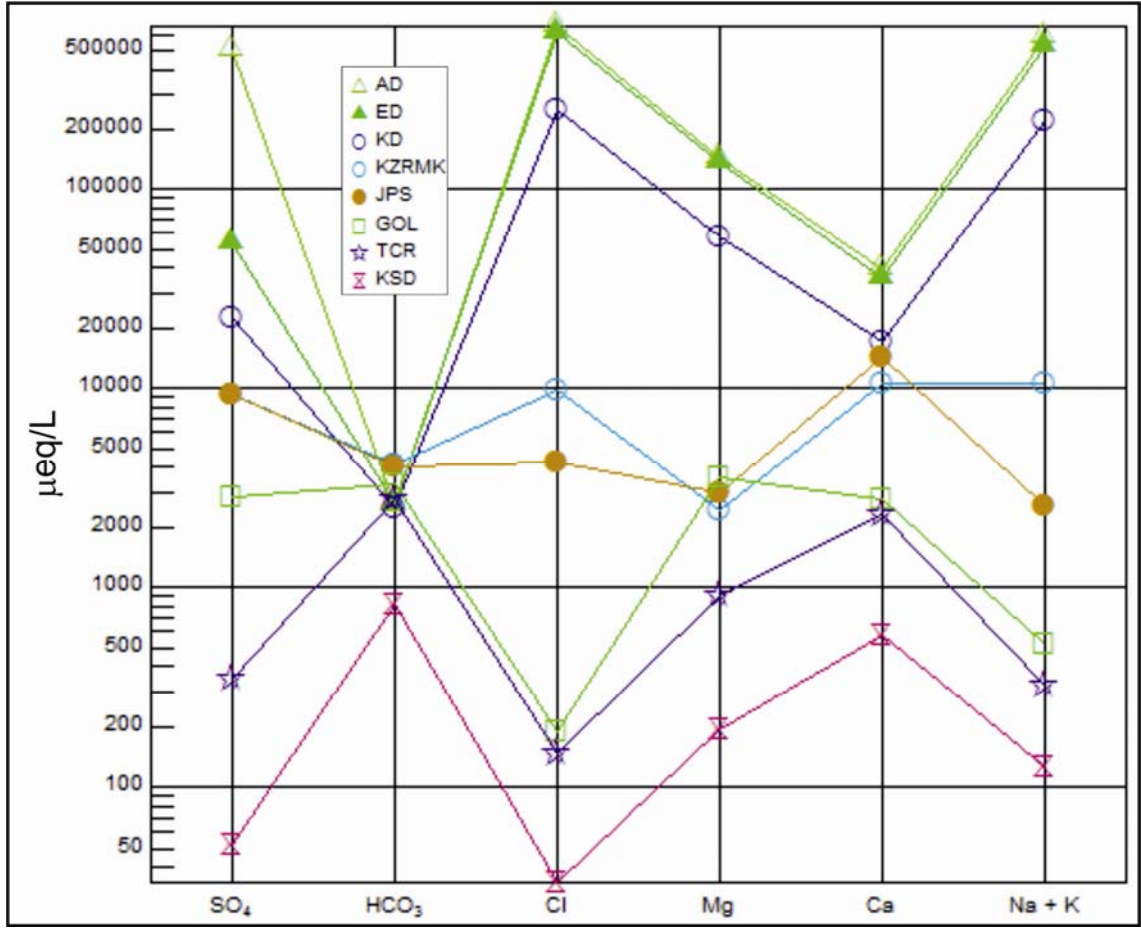
Suların belirlenmiş olan kimyasal verilerine göre değerlendirilmeleri sırasında kullanılmak üzere birçok grafiksel gösterim yöntem bulunmakla beraber, bu yöntemler içerisinde birçok analizin aynı diyagramda sunulmasına olanak sağlayan Piper ve Schoeller diyagramları sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar pek çok su numunesinin katyon ve anyon bileşimlerinin birlikte gösterilmesi bakımından oldukça kullanılışıdır.

4.1. Schoeller Diyagramı ile Değerlendirme

Eldeki su numunelerine ait kimyasal analiz sonuçlarının üzerinde gösterilmesi için RockWare Aq-QA Version 1.1.1 (1.1.5.1) (2006) yazılımı kullanılarak hazırlanmış olan yarı logaritmik Schoeller diyagramı Şekil 4.2' de görülmektedir.

Schoeller diyagramı ile yapılan değerlendirmelerde temel olarak birbirlerine yakın ve paralel çizgilere ait olan suların köken bakımından benzer oldukları kabul edilmektedir. Buna göre; Şekil 4.2' de de görüldüğü gibi 3 deniz suyu kendi aralarında ve Kösedag ve Tecer' den alınan sular da kendi aralarında birbirleri ile benzerlik göstermekle beraber diğer suların daha farklı olduğu sonucu çıkmaktadır.

Çizelge 4.2' de verilen iyon sıralamalarına bakıldığında, denizsularında hakim iyonların Na^+ ve Cl^- , Göl, Tecer ve Kösedag sularında $Ca^{+2} + HCO_3^-$, Kızılırmaktan alınan suda $Na^+ + SO_4^{-2}$ ve jips bulunan lokasyondan alınan suda ise $Ca^{+2} + SO_4^{-2}$ olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. Su numunelerine ait yarı logaritmik Schoeller diyagramı.

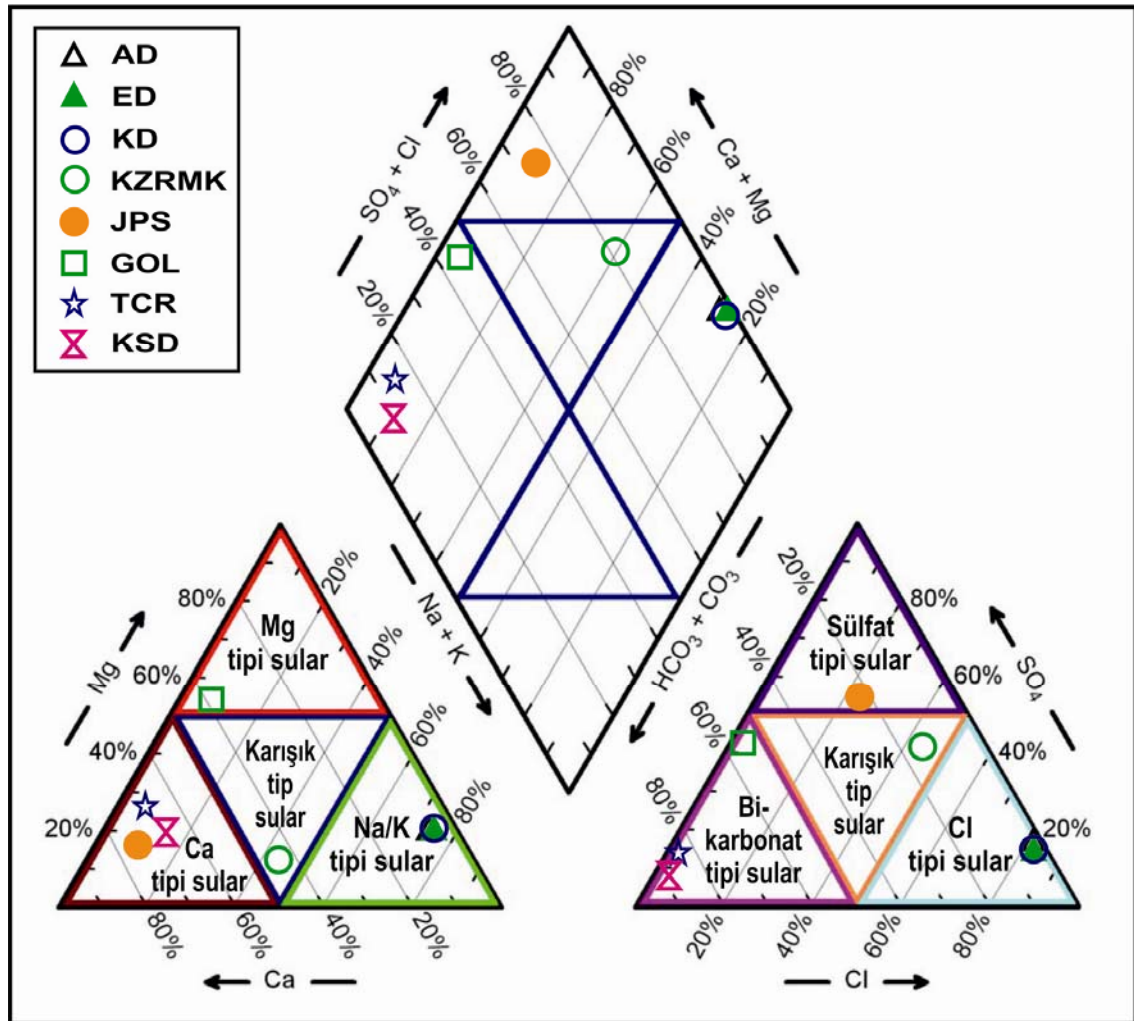
Çizelge 4.2. Yarı Logaritmik Schoeller diyagramına göre iyonların sıralaması.

Numune	Baskın İyonlar	Katyonlar	Anyonlar
AD	$\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r(\text{Mg}^{+2}) > r(\text{Ca}^{+2})$	$r(\text{Cl}^-) > r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{HCO}_3^-)$
ED	$\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r(\text{Mg}^{+2}) > r(\text{Ca}^{+2})$	$r(\text{Cl}^-) > r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{HCO}_3^-)$
KD	$\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r(\text{Mg}^{+2}) > r(\text{Ca}^{+2})$	$r(\text{Cl}^-) > r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{HCO}_3^-)$
KZRMK	$\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{-2}$	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r(\text{Ca}^{+2}) > r(\text{Mg}^{+2})$	$r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{Cl}^-) > r(\text{HCO}_3^-)$
JPS	$\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2}$	$r(\text{Ca}^{+2}) > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r(\text{Mg}^{+2})$	$r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{HCO}_3^-) > r(\text{Cl}^-)$
GOL	$\text{Ca}^{+2} + \text{HCO}_3^-$	$r(\text{Ca}^{+2}) > r(\text{Mg}^{+2}) > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	$r(\text{HCO}_3^-) > r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{Cl}^-)$
TCR	$\text{Ca}^{+2} + \text{HCO}_3^-$	$r(\text{Ca}^{+2}) > r(\text{Mg}^{+2}) > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	$r(\text{HCO}_3^-) > r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{Cl}^-)$
KSD	$\text{Ca}^{+2} + \text{HCO}_3^-$	$r(\text{Ca}^{+2}) > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r(\text{Mg}^{+2})$	$r(\text{HCO}_3^-) > r(\text{SO}_4^{-2}) > r(\text{Cl}^-)$

4.2. Piper Diyagramı ile Değerlendirme

Yarı logaritmik Scholler diyagramı ile gerçekleştirilmiş olan değerlendirmelerden başka, ayrıca su numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları benzer şekilde RockWare Aq-QA Version 1.1.1 (1.1.5.1) (2006) yazılımı kullanılarak Piper diyagramı üzerinde de gösterilmiştir.

Piper diyagramlarının en önemli yaygın kullanım nedeni, birden fazla sulara ait analizlerin birlikte gösterilebilmesine olanak sağlaması, sulara ilişkin sınıfların belirlenmesinde kullanılabilirliği ve suların karışımlarının da bu diyagramlar vasıtasıyla anlaşılır şekilde ortaya konulabilmesidir. Şekil 4.3’ de verilen Piper diyagramının yorumlanması sırasında diyagram üzerindeki üçgen ve eşkenarlar ilgili suların türünü temsil etmektedir.



Şekil 4.3. Su numunelerinin Piper diyagramı üzerindeki dağılımları.

Su numunelerinin Piper diyagramı üzerindeki dağılımlarının verildiği Şekil 4.3 incelendiğinde; Akdeniz, Ege Denizi ve Karadeniz sularının sodyum potasyum ve klorür tipi, jips kayasının bulunduğu yerden alınan suyun kalsiyum ve sülfat tipi, Tecer ve Köseadağ' dan alınan suların kalsiyum ve bikarbonat tipi, Deli İlyas gölünden alınan suyun magnezyum ve bikarbonat tipi oldukları ancak Kızılırmak' tan alınan suyun ise karışık tip su olduğu görölmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Zeminlerde şişme yüzdesi kavramı örselenmemiş (undisturbed) veya istenilen herhangi bir başlangıç koşulunda sıkıştırılarak (re-moulded) hazırlanan zemin numunelerinin suya boğularak hacimde meydana gelen artışın başlangıç hacmine oranı ile yüzde olarak ifade edilebilir. Şişme yüzdesi aşağıdaki iki koşulda elde edilebilmektedir.

- a. *Tek eksenli ödometre koşulu:* Suya boğulan zemin numunesinde yanal deformasyonları engellenerek düşey yönde meydana gelen değişimin belirlenmesi esasına dayanır. Sıklıkla kullanılan tek eksenli ödometre koşulunda, numunenin kesit alanı sabit tutulmuş olması nedeni ile meydana gelen şişmeye ait yüzde değer (şişme yüzdesi) aşağıda verilen Eşitlik 5.1. kullanılarak elde edilir.

$$\%S = [(H_1 - H_0) / H_0] * 100 \quad (5.1)$$

Eşitlikteki;

$\%S$: Şişme yüzdesi

H_0 : Numunenin ilk yüksekliği

H_1 : Şişme sonrasında numunenin son yüksekliğidir.

- b. *Üç eksenli koşul:* Eksenel deformasyonlar engellenerek oluşan çapsal değişimin belirlenmesi esasına dayanır ve bu koşulda numune yüksekliği sabit tutularak meydana gelen çapsal (yanal) değişim şişme yüzdesi olarak Eşitlik 5.2' de verilen denklemle elde edilir.

$$\%S = [(D_1^2 - D_0^2) / D_0^2] * 100 \quad (5.2)$$

Eşitlikteki;

Burada,

S : Şişme yüzdesi

D_0 : Numunenin ilk çapı

D_1 : Şişme sonrasında numunenin son çapıdır.

Ancak, uluslararası literatür dikkate alındığında, şişme yüzdesi belirlenirken birbirinden farklı deney yöntemleri ve uygulama şekli dikkati çekmektedir. Örneğin; su içerikleri bakımından zemin numuneleri;

- a. Örselenmemiş
- b. Havada kurutularak su içeriği düşürülmüş örselenmemiş
- c. Arzu edilen su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık için kompaksiyona hazırlanmış olarak farklı şekillerde hazırlanmaktadır.

Şişme deneyleri sırasında numunenin maruz bırakıldığı sürşarj yükleri bakımından ise;

- a. 1 kPa, 7 kPa, 10 kPa, vb.
- b. Zeminin uygulama sırasında etkisi altında kalacağı yüklere eşit sürşarj yükleri kullanımı şeklinde farklılık göstermektedir.

Bir zeminin şişme potansiyeli Holtz ve Gibbs (1956) tarafından, kuru durumdan 7 kPa sürşarj basıncı altında doymuş hale gelmesi sırasında oluşan toplam hacim değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Seed vd. (1962) de benzer şekilde; şişme yüzdesini istenilen su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zemin numunesinin ödometre koşullarında 7 kPa sürşarj basıncı altında, zemin suya boğularak oluşan düşey boy değiştirmesinin başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamışlardır. Buna karşın; Snethen (1984) ise şişme yüzdesini, örselenmemiş zemin numunesinin ödometre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşit sürşarj basıncı altında ıslatılması sonucunda son denge doymuşluk durumuna kadar meydana gelen hacim değişiminin, başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamıştır.

Deneylerin gerçekleştirilmesi esnasında, numunelerin içinde bulunduğu su koşulu açısından da farklılık söz konusudur. Deneyler bu bakımdan aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir.

- a. Numuneler suya boğularak şişirilmekte veya
- b. Kılcal yükselim ile zeminlerin su emmeleri sağlanarak şişmelerine izin verilmektedir.

Gerçekleştirilmiş olan bu tez çalışmasında, bentonit numunelerinin şişme yüzdelerini belirlemek amacıyla optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numunelerde ASTM D – 4546 (1994) standartlarına uygun olarak şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Serbest şişme deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği.

Deneylerde 0.07 kg/cm^2 lik ön yükleme basıncı ve 7.5 cm çaplı numuneler kullanılmıştır. 0.07 kg/cm^2 yük altında suya doyurulan numunenin maksimum hacimsel şişmesi sağlandıktan sonra, deney sonunda elde edilen numune yüksekliğinin ilksel numune yüksekliğine oranı ile şişme yüzdesi (%S) elde edilmiştir.

Deneylerde hücre tamamen su ile doldurulduktan sonra serbest şişmeye bırakılan numunedeki şişme değerleri 10–15–30 sn, 1–2–4–6–8-15-30 dk, 1-2-4-8–24–26–28–30–32–48–50–52–54–56–58–72 s olmak üzere periyodik olarak kaydedilmiş ve şişme yüzdesi-zaman (%S-t) grafikleri çizilmiştir.

Zeminlerin şişme potansiyellerini etkileyen bir çok faktör söz konusudur. Nelson ve Miller (1992) bu faktörleri;

- a. Zemin özellikleri (mineraloji, zemin suyunun kimyası, zemin yapısı ve fabrik, zeminin su emmesi, plastisite ve kuru birim hacim ağırlık).
- b. Çevresel faktörler (başlangıç su içeriği ve su içeriğinde meydana gelen değişimler).
- c. Gerilme koşulları (önyükleme basıncı, arazi koşulları ve zemin profili, uygulanacak sürşarj yükü).

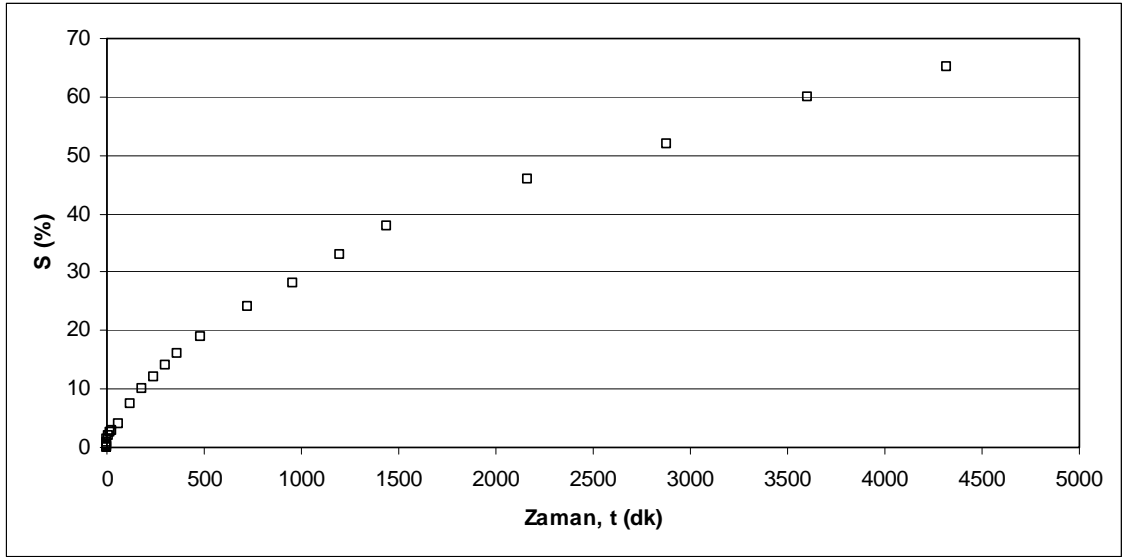
olmak üzere 3 temel grup olarak ayırmış olup ayrıntıları Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında; mineraloji, zemin yapısı ve fabrik, zeminin su emmesi, plastisite ve kuru birim hacim ağırlık her deneyde aynı bentonit kil numunesi kullanılarak; başlangıç su içeriği ve su içeriğinde meydana gelen değişimler aynı deney koşulu uygulanarak, önyükleme basıncı ise aynı su içeriğinde standart kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılarak sabit tutulmuş, sadece farklı türlerde sular kullanılarak zemin suyunun kimyası değiştirilmiştir.

Çalışmalarda ilk olarak kil numuneleri üzerindeki serbest şişme deneyi, saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3 gün boyunca devam ettirilen deney sırasında periyodik olarak alınan şişme yüzdesi değerleri zamana karşı grafiğe geçirilmiş olup 72 saat sonunda meydana gelmiş olan şişme yüzdesi değeri %65 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.2).

Çizelge 5.1. Şişme potansiyelini etkileyen faktörler (Nelson ve Miller, 1992)
(Uzundurukan 2006' dan).

	Faktör	Şişme üzerindeki etkisi
1. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri		
a.	Kil mineralojisi	Zemin hacim değişikliklerine neden olan mineraller, genellikle, montmorillonitler, vermikülitler vb. minerallerdir. İllit ve kaolinitler genellikle, tane boyutlarının çok küçük olduğu durumlarda şişebilirler.
b.	Zemin suyu kimyası	Artan kation konsantrasyonu ve kation değeri, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki Mg ²⁺ kationları, Na ⁺ kationlarından daha az şişmeye neden olur.
c.	Zemin yapısı ve fabrik	Floküle olmuş killer ayrık killerden daha fazla şişme eğilimindedir. Çimentolanma şişmeyi azaltır. Yüksek su muhtevalarında sıkıştırma veya yoğurma sonucunda fabrik ve strüktür değişir. Yoğurarak sıkıştırma, düşük su muhtevalarında statik olarak sıkıştırmadan daha düşük şişme potansiyeli ile ayrık strüktürler oluşturduğu göstermiştir.
d.	Zemin emmesi	Zemin emmesi, doymamış zeminlerde negatif boşluk basıncıyla ifade edilen, bağımsız efektif gerilme değişkenidir. Doymunluk, yer çekimi, boşluk boyutu ve şekli, yüzey gerilmesi, zemin tanelerinin elektriksel ve kimyasal karakteristikleri ve suya bağlıdır.
e.	Plastisite	Genel olarak, geniş bir su muhtevası aralığında plastik davranış gösteren ve yüksek likit limite sahip zeminler daha yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahiptir.
f.	Kuru birim hacim ağırlık	Yüksek birim hacim ağırlıklar, tanelerin birbirine yaklaştığını gösterir ki bu da taneler arasında daha büyük itki kuvvetleri ve daha yüksek şişme potansiyeli anlamına gelir.
2. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler		
a.	Başlangıç su İçeriği	Kurumuş şişebilen bir zeminin suya eğilimi veya emmesi, yüksek su muhtevasındaki aynı zeminden daha fazladır.
b.	Su içeriğindeki değişimleri	Su içeriğindeki değişiklikler, esas olarak iklim, yeraltı su seviyesi, drenaj ve yapay su kaynakları, bitkiler, permeabilite ve sıcaklıktan etkilenir.
3. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi		
a.	Gerilme tarihçesi	Aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı ıslanma-kuruma ve yaşlanmanın, şişme üzerinde önemli etkileri vardır.
b.	Arazi şartları ve zemin profili	Bir zemindeki başlangıç gerilme durumunun, şişme potansiyeline sahip tabakaların yeri ve kalınlığının, şişme üzerinde önemli etkileri vardır.
c.	Yükleme	Sürşarj yükü, taneler arası itki kuvvetlerini dengelemeye çalışır ve şişmeyi azaltır.



Şekil 5.2. Saf su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

Saf su ile gerçekleştirilen deney sonunda elde edilmiş olan bu şişme yüzdesi değeri (%65), diğer farklı sularla gerçekleştirilmiş olan şişme deneylerinden elde edilen değerlerle karşılaştırılarak, suların türünün şişme davranışı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Daha sonra farklı sular kullanılarak aynı su içeriğinde sıkıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde şişme deneyleri yapmak üzere numuneler hazırlanmış olmakla beraber, söz konusu numunelerin hazırlanması sırasında;

- a. Deneye başlamadan önce kuru ve öğütülmüş kil numunesi deney yapılacak olan su ile iyice karıştırılarak çamur numune elde edilmiştir.
- b. Daha sonra bu numuneler desikatöre alınarak 72 saat boyunca küre bırakılarak bekletilmişlerdir.
- c. 72 saat sonrasında numune desikatörden çıkarılmış ve kompaksiyon kalıbında sıkıştırılmıştır.
- d. Kalıp içerisinden numune konsolidasyon halkasına örselenmeden alınmıştır.

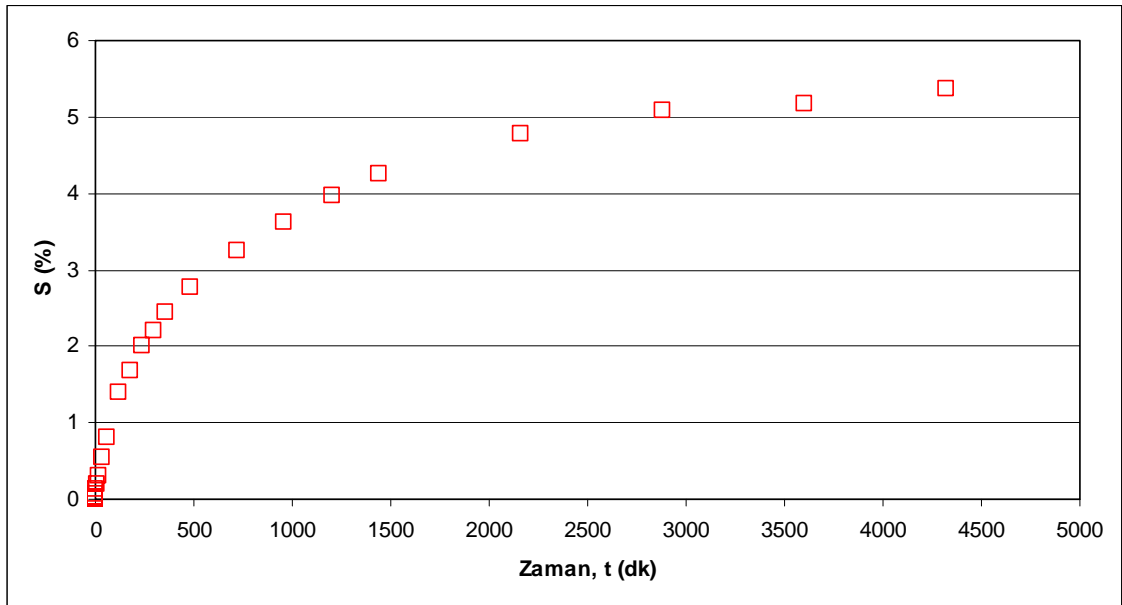
- e. Konsolidasyon halkası yerine yerleştirildikten sonra hücre gene aynı suyla tamamen doldurulmuş ve numune serbest şişmeye bırakılmıştır.
- f. Buharlaşma ile az da olsa eksilen su aynı suyla tamamlanarak deney 72 saat boyunca sürüdürlmüştür.

Herbir farklı su ile gerçekleştirilmiş olan şişme deneyleri sonunda elde edilmiş olan şişme yüzdesine karşı zaman grafikleri Şekil 6.1 - 6.8' de görölmektedir.

6. SONUÇLAR

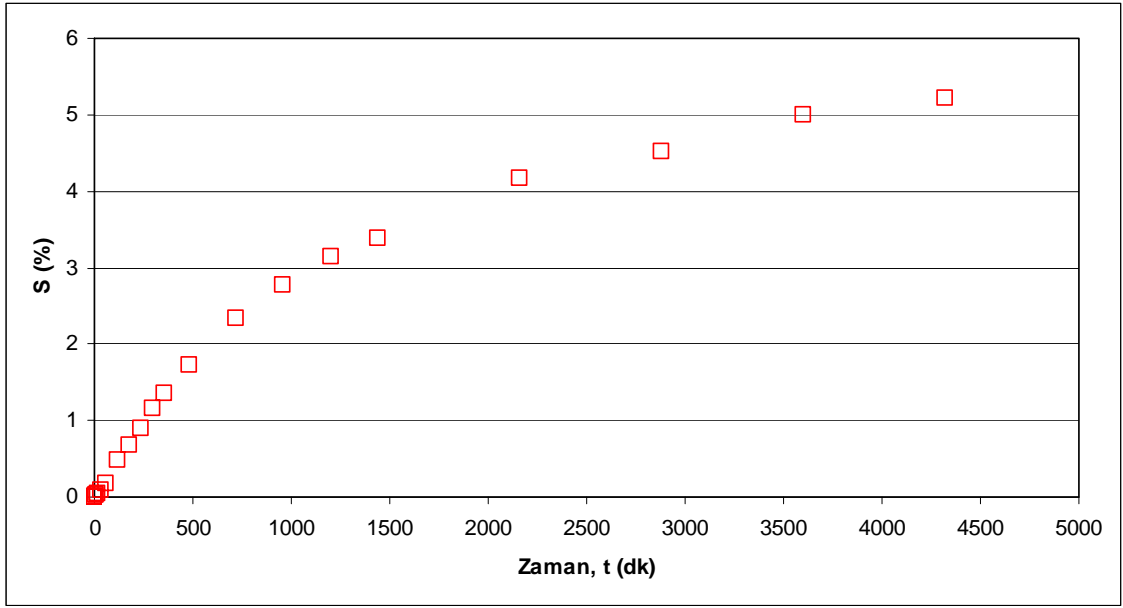
Akdeniz, Ege Denizi ve Karadeniz' den alınan sularla gerçekleştirilen serbest şişme deneylerinin bir sonucu olarak, her üç su ile yapılan deneylerin sonunda şişme yüzdesinin önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir.

Saf su ile elde edilen %65 serbest şişme değerine göre değerlendirme yapıldığında; Akdeniz suyu için 72 saat sonundaki toplam serbest şişme değeri % 5.19 (Şekil 6.1) olup saf suya göre %59.81 daha düşük olmakla beraber, yüzde değişim %92.02 kayıp şeklindedir.



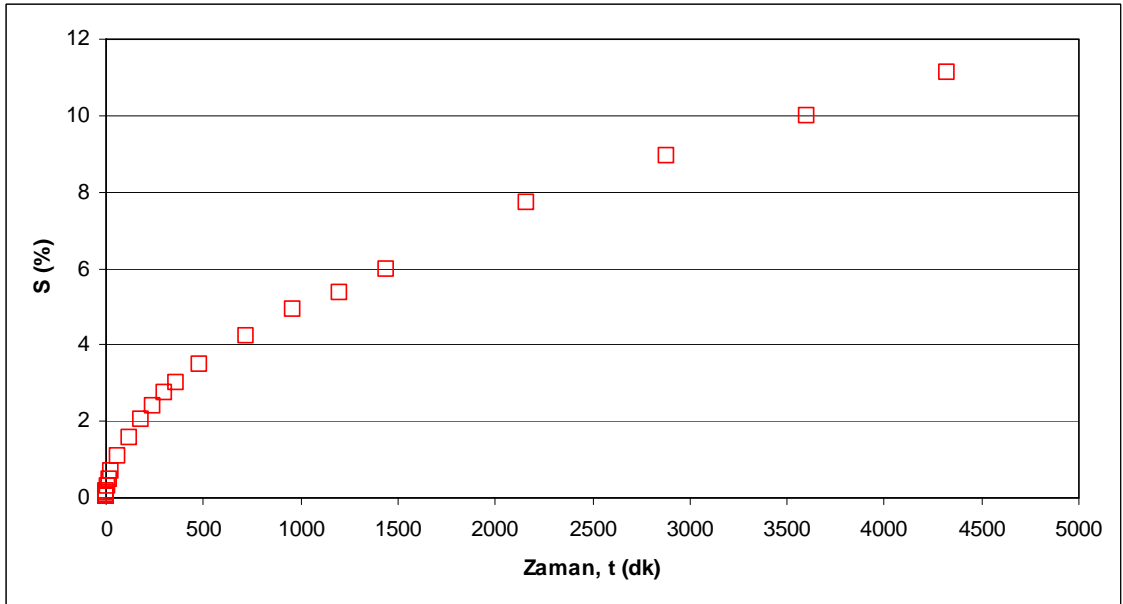
Şekil 6.1. Akdeniz' den alınan su ile kilerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

Ege Denizi' nden alınan su ile gerçekleştirilmiş olan şişme deneyleri sonunda ise toplam %5.48 lik şişme meydana gelmiştir (Şekil 6.2). Bu şişme değeri saf su ile yapılan deneyden elde edilen %65 serbest şişme değerinden daha düşüktür. Akdeniz suyu ile yapılan deneyde olduğu gibi yüzde değişim %92 kayıp olarak tesbit edilmiştir. Saf su ve Egedenizi suyu ile elde edilen serbest şişme değerleri arasındaki fark %59.53 olarak elde edilmiştir.



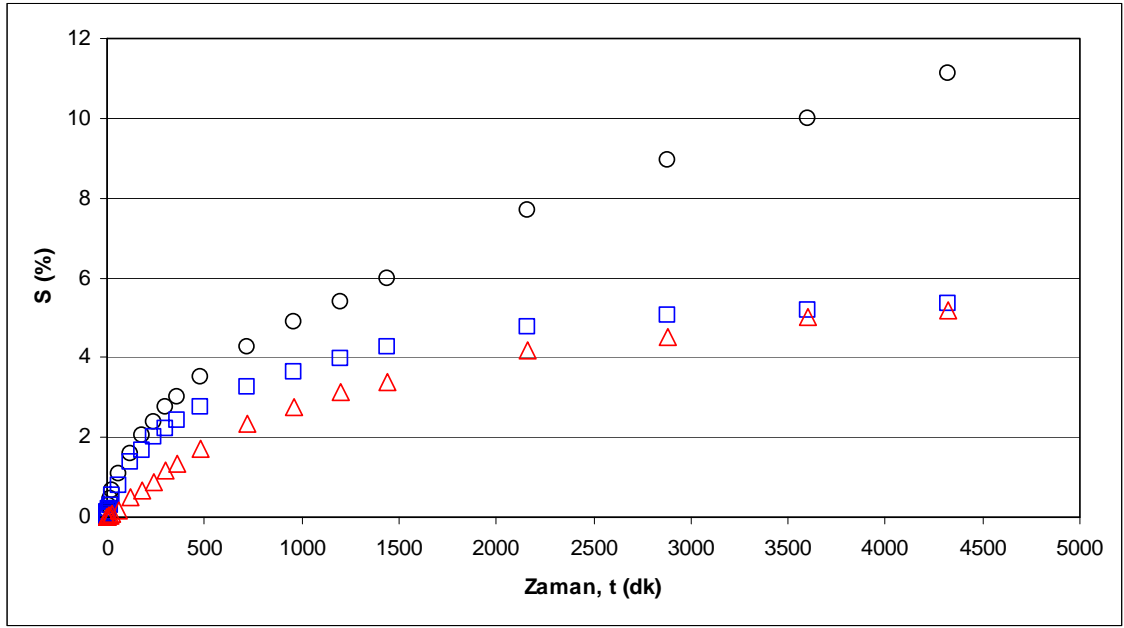
Şekil 6.2. Ege Denizi'nden alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

Karadeniz' den alınmış su ile yapılmış olan serbest şişme deneyleri sonucunda ise saf suya göre %91.57 lik şişme kaybı şeklinde bir değişim olmuştur. Karadeniz suyu ile 72 saat sonunda elde edilen toplam serbest şişme yüzdesi %11.11' dir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Karadeniz' den alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

Şekil 6.4’ te verilen ve her üç deniz suyu için elde edilmiş olan %S-t grafiklerinden de görüldüğü gibi en düşük serbest şişme yüzdesi değeri Akdeniz ve Ege Denizi birbirine çok yakın olmakla beraber Akdeniz’ den alınan su ile yapılan deneyden elde edilmiştir. Karadeniz için elde edilen değer diğer iki denizden elde edilenlere göre daha yüksektir.



Şekil 6.4. Denizlerden alınan sularla gerçekleştirilen şişme deneylerinden elde edilen %S-t grafiklerinin birlikte mukayeseleri. (Δ: Akdeniz, □: Ege Denizi, ○: Karadeniz)

Denizlerden alınan bu suların en önemli ortak özellikleri diğer sularla mukayese edildiğinde tüm parametreler diğer sulara göre daha yüksek olmakla beraber elde edilmiş olan yüksek düzeydeki EC ve tuzluluktur. EC ve tuzluluk değerleri Akdeniz, Ege Denizi ve Karadeniz için sırasıyla; 53100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – %34.89, 50950 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – %33.45 ve 24760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – %15.03 olarak belirlenmiştir. Bu sular Çizelge 6.1’ de verilen ve Lewis (1982)’ de önerilmiş olan tuzluluk sınıflamasına göre değerlendirildiklerinde genellikle “tuzlu su” sınıfında yer almaktadırlar.

Çizelge 6.1. Suların tuzluluk sınıflaması (Lewis, 1982).

Tatlı su	Hafif tuzlu su	Tuzlu su	Çok tuzlu su
< ‰ 0.5	‰ 0.5-30	‰ 30 – 50	> ‰ 50

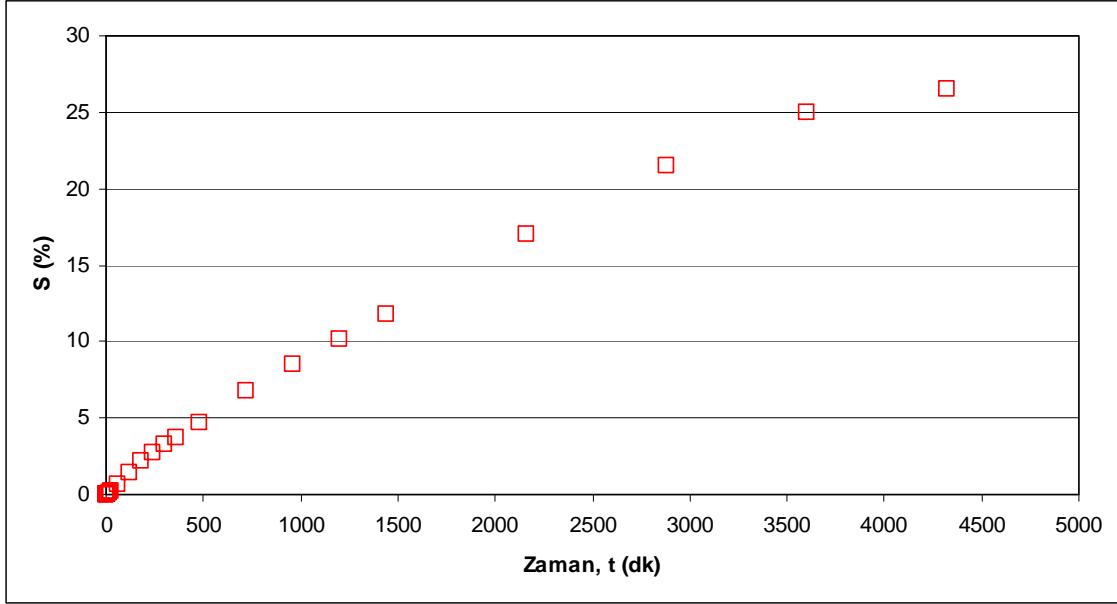
Akdeniz, Ege Denizi ve Karadeniz' den alınan sularla gerçekleştirilen serbest şişme deneylerinde; bu sulardaki elektrolit varlığı kil tanelerinin yüzeylerinde değişimlere neden olmuş ve tuz konsantrasyonunun artması ile de taneler hızla topaklanarak tane boyunu arttırmış ve böylece topaklanan tane boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve absorbe edilen su miktarı azalmıştır. Böylelikle kilin şişme potansiyeli de azalmıştır. Bundan başka, kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyundaki katyonlar arasında meydana gelen değişimin levhalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına da neden olmuştur.

Bundan başka; diğer sulara göre kullanılan deniz sularındaki kayda değer yüksek kalsiyum ve sodyum içerikleri (Çizelge 4.1) de serbest şişmedeki düşüğe önemli katkıda bulunmuştur. Kullanılan deniz sularındaki elde edilmiş olan sodyum içeriği Ege ve Akdeniz sularında diğerlerinin yaklaşık ortalama 80 katıdır. Karadeniz suyu için ise yaklaşık 35 katı kadardır. Bu oranlar kalsiyum bakımından değerlendirildiğinde ise diğerlerine göre 2-40 kat daha büyüktür. Sulardaki özellikle kalsiyum artışı katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon gibi puzolonik kimyasal reaksiyonlara neden olmakta, bu reaksiyonlar sırasında genellikle zemindeki tek değerlikli katyonlar, sulardaki iki değerlikli kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirmektedir. Bu katyon değişimi reaksiyonları sonucunda killer daha büyük boyutlu parçacıklar oluştururlar ve böylelikle kilin serbest şişmesi düşer.

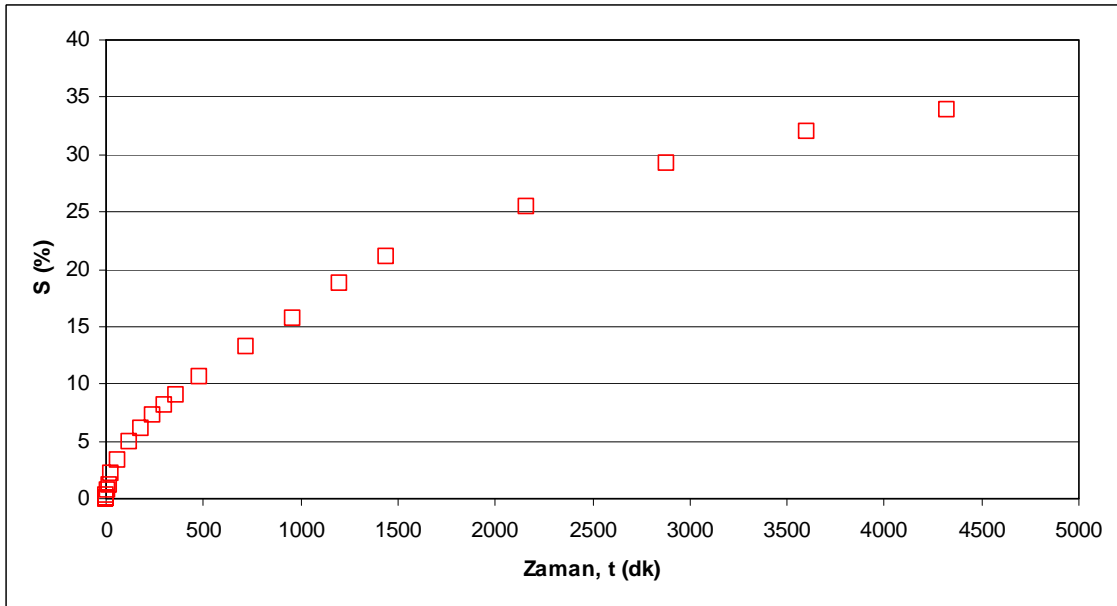
Kızılırmak' tan ve jipsten çıkan sulardan alınan numuneler ise birbirleri ile benzerlik göstermektedirler. Bu benzerlik Kızılırmak' tan alınan suyun lokasyonunun Sivas ili içerisinde Hafik – Zara ilçeleri arasında olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, bu bölgede jips kaya kütlesi büyük yayılım göstermekte olup Kızılırmak jipslerle sürekli etkileşim halindedir. Bu iki suyun da EC ve tuzluluk değerleri birbirlerine çok yakın olmakla beraber deniz sularından daha düşük diğer sulardan ise büyük olup “hafif tuzlu” olarak değerlendirilebilirler. Kalsiyum ve sodyum içerikleri bakımından benzer şekilde deniz sularından düşük diğer sulardan yüksektir.

Kızılırmak' tan alınan suyla gerçekleştirilen serbest şişme deneyi sonunda elde edilen değer %26.48 olup (Şekil 6.5), saf su ile yapılan deneye göre serbest şişme kaybı %38.52 dir. Yüzde değişim ise %82.91 olarak tesbit edilmiştir.

Jipsten çıkan sular kullanılarak elde edilen serbest şişme yüzdesi değeri %33.85’ dir (Şekil 6.6). Bu şişme değeri saf su ile yapılan deneyden elde edilen %65 serbest şişme değerinden daha düşüktür. Bu su ile yapılan deneyde yüzde değişim ise %59.26 kayıp olarak tesbit edilmiştir.



Şekil 6.5. Kızılırmak’ tan alınan su ile kilerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

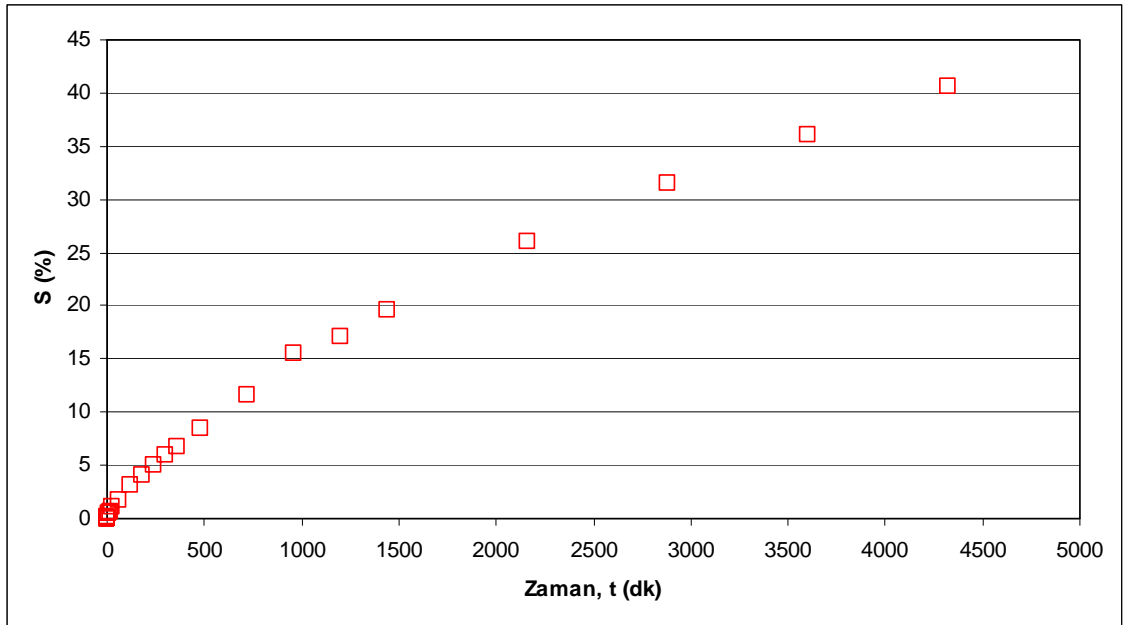


Şekil 6.6. Jipsten alınan su ile kilerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

Deli İlyas gölünden alınmış olan sularla gerçekleştirilen serbest şişme deneylerinin sonuçlarına bakıldığında; saf su ile yapılan deneye göre serbest şişme değeri düşmüş olmakla beraber bu düşüş Akdeniz, Ege Denizi, Karadeniz, Kızılırmak ve jipsten alınan sulardan elde edilen değerlere göre daha azdır.

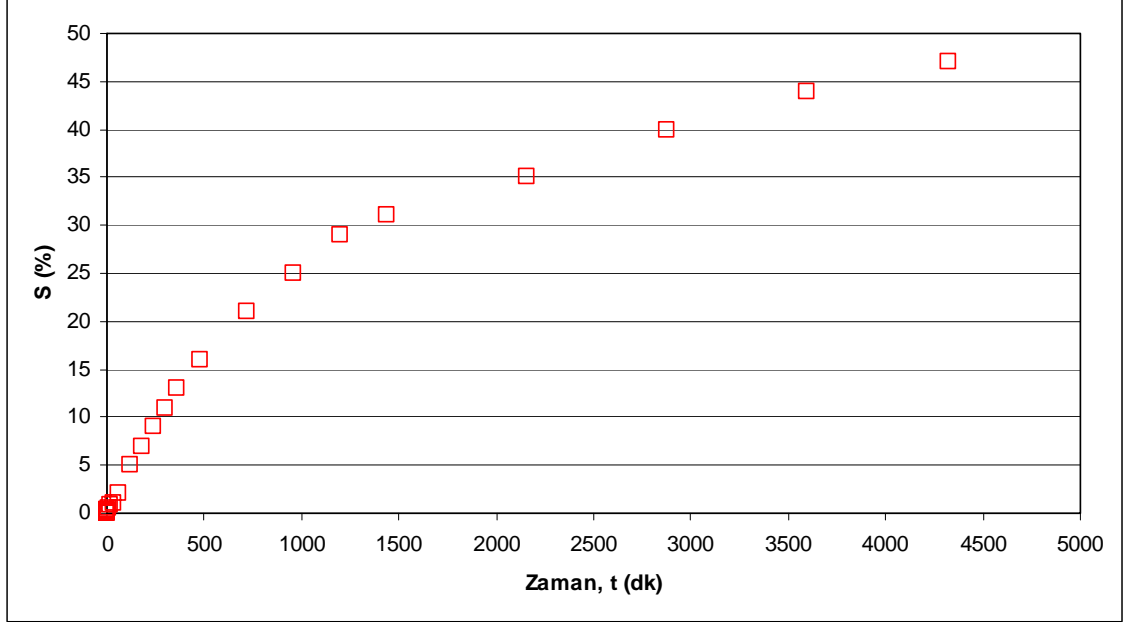
Deli İlyas Gölü' nden alınan su ile gerçekleştirilmiş olan şişme deneyleri sonunda toplam %40.61 lik şişme meydana gelmiştir (Şekil 6.7). Bu şişme değeri saf su ile yapılan deneyden elde edilen %65 serbest şişme değerinden daha düşüktür. Serbest şişmedeki düşme yüzdesi ise %37.52 olarak belirlenmiştir.

Bu deneyde kullanılan su kimyasal olarak Akdeniz, Ege Denizi, Karadeniz, Kızılırmak ve jipsten alınan sulara göre daha düşük EC, tuzluluk, anyon ve katyon derişimi değerlerine sahiptir. Ancak bu değerler Tecer ve Köseadağ' dan alınan sulara göre oldukça yüksek olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.7. Deli İlyas Gölü' nden alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

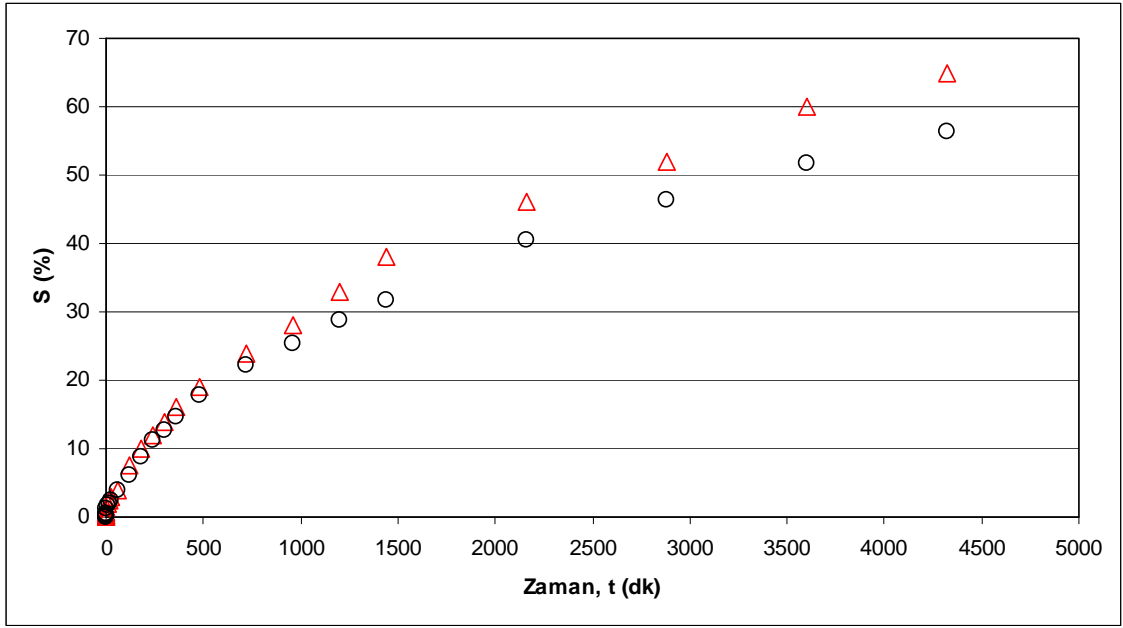
Tecer' den alınan su ile yapılan deneyde elde edilen şişme %47.39 (Şekil 6.8) ve saf suya göre yüzde değişim %27.08 kayıp olarak tesbit edilmiş olup, saf sudaki serbest şişme ile arasındaki fark %17.61 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.8. Tecer' den alınan su ile kilerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

Tecer dağından alınmış olan sulara ait kalsiyum, sodyum, klor, sülfat ve bikarbonat derişimleri Köseadağ' dan alınan sulara göre rölatif olarak yüksektir. Ancak diğer sularla mukayese edildiğinde daha düşük değerlere sahip olduğu görölmektedir.

Çalışmalarda kullanılan ve EC, tuzluluk, anyon ve katyonlar bakımından en fakir olan su Köseadağ' dan alınan sudur. Bu su ile yapılan deneyden elde edilen serbest şişme değeri saf su ile yapılan deney sonucuna en yakın olanıdır (Şekil 6.9) ve aralarındaki fark sadece %8.77 olarak bulunmuştur. Bu düşüş değışim yüzdesi olarak ise %13.5 dur.



Şekil 6.9. Kösedag' dan alınan su ile killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği ve saf su ile elde edilen eğriyle mukayesesi. (Δ: Saf su, O: Kösedag)

7. TARTIŞMALAR

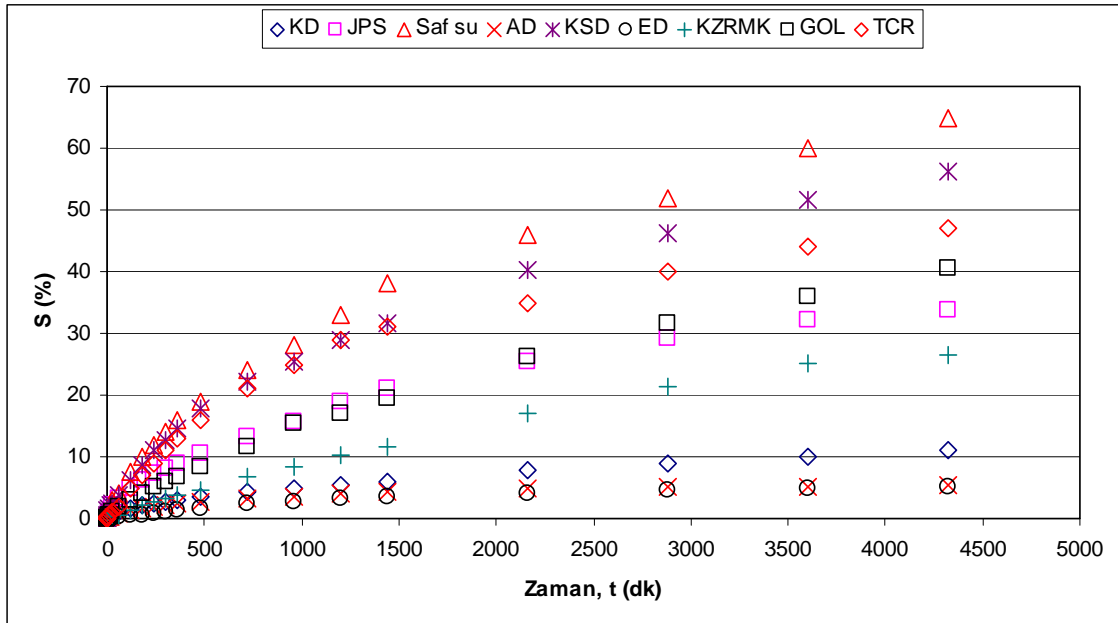
Bazı killi suya doymun olmayan zeminlerin su emerek hacminin artması veya su bulabildiği halde hacminin artmasının engellenmesi durumunda aşırı basınçlar oluşturması, zeminin şişme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Genellikle kurak veya yarı kurak iklimlerde karşılaşılan bu tip şişmeye eğilimli zeminler, su içerikleri azaldığında da, hacim azalmasına (büzülmeye) maruz kalırlar. Bina temelleri, yol, havaalanı ve kanal yapıları, boru hatları altındaki veya istinat yapıları arkasındaki şişme özelliğine sahip, nisbeten kuru zeminlerin, yüzey suyu, pis ve temiz su kaçakları, kapilarite sonucu su yükselmesi, yeraltı su seviyesinin yükselmesi, zeminde buhar halinde varolan rutubetin termal akımla hareketi ve daha serin bölgede yoğunlaşması gibi nedenlerle su içeriklerinin artarak şişmesi, üst yapıya büyük çaplı zararlar verebilmektedir. Özellikle şişme özelliğine sahip temel zeminleri, üzerlerindeki düşük sürşarj basıncına sahip hafif yapılara büyük zararlar verebilirler. Bu tür hafif yapıların temellerinin, mevsimlik yağış ve sıcaklık değışiminden etkilenen sığ derinliklerde inşa edilmesi durumunda birbirini takip eden şişme ve büzülme devrelerine maruz kalması, ciddi çatlak ve hasarlara neden olabilir. Yılmaz ve Karacan (1997) mevsimsel yeraltı su seviyesinin değışimine bağlı olarak, şişme ve büzülme sonucu temellerde iki yönlü hareket sonucu, binalarda hasarlar tesbit etmişlerdir. Yeraltı su seviyesi derinde ise, temel seviyesi ve su tablası arasında hacim değışikliğine maruz kalabilecek tabaka kalınlığı artacağından muhtemel hareketler de büyüyecektir.

Killi zeminlerin şişme özelliklerinin çok iyi belirlenmesi, zemin davranışının açıklanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Killi zeminler üzerine inşa edilen özellikle hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, bu yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme potansiyeli, şişme sonucunda oluşacak maksimum basınç düzeyi ve buna bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşacak kabarma miktarının belirlenmesi ve öngörülmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda bahsedilen parametrelerin belirlenebilmesi için gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar bir standart olarak laboratuvarlarda yapılabilmektedir. Söz konusu deneysel yöntemin uygulanması sırasında deneylerde distile su kullanılmaktadır. Ancak,

gerçekte zeminler buldukları ortama bağlı olarak laboratuvar ortamında kullanılan suyun kimyasal bileşiminden farklı kimyasal bileşimlere sahip sularla etkileşime girmekte ve dolayısı ile laboratuvar deneyleri sonunda öngörülen davranıştan farklı davranacakları açık bir gerçektir. Örneğin; karbonatlı kayalardan, evaporitlerden, mağmatiklerden, vb. beslenen ve zemin ile etkileşen suyun bileşimi birbirlerinden oldukça farklıdır. Bundan başka, denizlere ve/veya göllere yakın ve deniz ve/veya göl suyunun girişim yaptığı yerlerde de oldukça farklı su kimyasının söz konusu olduğu açık olup benzer örneklerin çoğaltılması mümkündür. Bu nedenle, zemin ortamının bulunduğu yerlerdeki zeminle etkileşecek olan suyun kimyasının deneysel ortama yansıtılmasının daha gerçekçi zemin davranışı öngörüsü bakımından gerekli olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalarla; kille etkileşime giren suyun türünün ve dolayısı ile kimyasının şişme davranışı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Akdeniz, Karadeniz ve Ege denizi olmak üzere üç farklı denizden, Kızılırmak' tan, Deli İlyas gölünden ve 3 farklı kaya türünden çıkan su kaynaklarından alınan sularla yapılan serbest şişme deneylerinden elde edilen sonuçlar açık bir şekilde suyun türünün şişme değerlerini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Değişik türde sularla killerde gerçekleştirilen şişme deneyinden elde edilen %S-t grafikleri.

Farklı türdeki doğal suların deneylerde kullanılarak doğal koşullardaki zemin su etkileşimine bağlı şişme davranışının açıklanabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özellikle şişebilen killi zeminlerin kimyasal bileşimleri farklı değişik türlerde suların (karbonatlı kayalardan, evaporitlerden, mağmatiklerden beslenen, deniz suyu, göl suyu, akarsu) kimyasının deneysel ortama yansıtılması ile şişme davranışında meydana gelecek değişimlerin daha gerçekçi zemin davranışı öngörüsünü sağlaması bakımından önem taşıdığını ortaya koymuştur. Ayrıca her ne kadar değişik iyon konsantrasyonlarındaki suların etkisi literatürde araştırılmış olsa da farklı türlerde doğal suların etkisine ilişkin ulusal ve uluslararası literatür hemen hemen yoktur. Bu bakımdan da bu çalışma ayrı bir özgün değere sahip sonuçları içermiştir.

Killerin gerçekçi ve doğru şişme davranışının önceden belirlenememesinin çok önemli bir sonucu olarak, özellikle hafif mühendislik yapılarında dikkate değer yapısal deformasyonlar meydana gelmektedir. Söz konusu bu yapı deformasyonları sürekli olarak bakım ve onarım gerektirmekte ve böylece estetik sorunların yanı sıra yapılar için büyük ek harcamalara neden olmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla, daha gerçekçi ve doğru şişme davranışının ön görülebilecek olup, sonuçların bir çok inşaat uygulamalarında inşaat, jeoteknik ve jeoloji mühendisleri ile dolayısı ile de yerel yönetimlere sorunsuz yapı üretimi bakımından yardımcı olacaktır.

Şişen zeminler üzerinde temel tasarımı yapılırken, şişme davranışına ilişkin özellikler arazide etkileşime gireceği sular kullanılarak belirlenmeli ve temel tasarımı buna göre gerçekleştirilmelidir. Şişebilen temel zeminlerinde, şişen zeminlerin kaldırılması, yapısının değiştirilmesi, yapı altındaki zeminin su içeriğinin kontrolü gibi bir çok iyileştirme yöntemleri söz konusu olup, yöntemin seçilmesinde bu çalışmada öngörüldüğü şekilde belirlenen şişme parametreleri kullanılmalıdır.

8. YARARLANILAN KAYNAKLAR

- Alawaji, H.A., 1999. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids. *Applied Clay Science*, 15: 411-430.
- Basma, A. A., Al-Sharif, M., 1994. Treatment of expansive soils to control swelling, *Geotechnical Engineering*, 25 (1), 3-18.
- Borchardt, G. 1989. Smectites, Minerals in soil environments, 2nd ed., Soil Sci. Soc. Am. Book Ser., No 1, Madison, 675-727.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., 2003. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX80 Bentonite, *Journal of Contaminant Hydrology*, 61, 329-338.
- Dakshanamurty, V., 1978. A new method to predict swelling using a hyperbolic equation, *Geotechnical Engineering*, 9 (1), 29-38.
- Di Maio, C., 1996. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects, *Geotechnique*, 46 (4), 695–707.
- Emerson, W.W., 1964. The slaking of soil crumbs as influenced by clay mineral composition, *Australian Journal of Soil Research*, 2, 211-217.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 596p.
- Holtz, W. G., Gibbs, H. J., 1956. Engineering Properties of Expansive Clays, *ASCE Transactions*, 121:641-663.
- Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C. H., Edil, T. B., 2001. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(7): 557-567.
- Jo, H.Y., Benson, C.H., Edil, T.B., 2004. Hydraulic conductivity and cation exchange in non-prehydrated and prehydrated bentonite permeated with weak inorganic salt solutions. *Clays and Clay Minerals*, 52(6): 661-679.
- Jo, H.Y., Benson, C.H., Shackelford, C.D., Lee, J.M., Edil, T.B., 2005. Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131(4): 405-417.
- Jullien, A., Proust, Ch., Le Forestier, L., Baillif, P., 2002. Hydro-chemio-mechanical coupling effects on permeability and swelling behaviour of a Ca smectite soaked by Cu solutions, *Applied Clay Science*, 21 (3-4), 143-153.
- Karimpour, R., 2002. Effect of salinity and sodicity on soil physical properties (structure&hydraulic conductivity) in Damghan Playa. 17th WCSS, 14-21 August, Thailand. Symposium No:33. Paper No: 2054.

- Keren, R. and I. Shainberg. 1975. Water vapor isotherms and heat of immersion of Na-Ca montmorillonite systems, I. Homoionic clay, *Clays and Clay Minerals*, 23, 193-200.
- Komine, H., Ogata, N., 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 478-490.
- Komine, H., Ogata, N., 1996. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 11-22.
- Kolstad, D. C., Benson, C. H., Edil, T. B., 2004. Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(12): 1236-1249.
- Lee, J. M. and Shackelford, C. D., 2005. Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(1): 64-77.
- Lee, J. M., Shackelford, C. D., Benson, C. H., Jo, H. Y., Edil, T. B., 2005. Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(11): 1319-1329.
- Lewis, E.L., 1982. The practical salinity scale of 1978 and its antecedents. *Marine Geodesy*, 5, 350.
- Low, P.F., 1992. Interparticle forces in clay suspensions: flocculation, viscous flow and swelling, *Proceedings of the 1989 Clay Minerals Society Workshop on the Rheology of Clay/Water Systems*.
- Low, P.F. and J.F. Margheim. 1979. The swelling of clay: I. Basic concepts and empirical equations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 473-481.
- Mishra, A.K., Ohtsubo, M., Li, L., Higashi, T., 2005. Effect of salt concentrations on the permeability and compressibility of soil-bentonite mixtures. *J. Fac. Agr. Kyushu Uni.* 50(2): 837-849.
- Mowafy, Y.M., Bauer, G.E., Sakeb, F.H., 1985. Treatment of expansive soils: a laboratory study, *Transportation Research Record*, 1032, 34-39.
- Musso, G., Morales, E.R., Gens, A., Castellás, E., 2003. The role of structure in the chemically induced deformations of FEBEX bentonite, *Applied Clay Science*, 23 (1-4), 229-237.
- Nelson J.D, Miller, D.J., 1992. *Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

- Oloo, S.Y., Fredlund, D.G., 1995. Matric Suction Monitoring in an Expansive Soil Subgrade in Kenya, 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils UNSAT 95, Paris, France, Vol. 2, 631-636.
- Parker, J.C., L.W. Zelazny, and D.F. Amos. 1980. Swelling components of compacted Ca-montmorillonite, *Clays and Clay Minerals*, 28, 135-141.
- Parker, J.C., D.F. Amos, and L.W. Zelazny. 1982. Water adsorption and swelling of clay minerals in soil systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 450-456.
- Petrov, R. J. and Rowe, R. K., 1997. Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Can. Geotech. J.*, 34(6): 863-885.
- RockWare Aq-QA Version 1.1.1 (1.1.5.1) (2006). The Spreadsheet for Water Analyses Software. RockWare Inc.
- Seed H. B., Woodward R. J., Lungreen R., 1962. Predicting of swelling potential of compacted clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 88 (3): 53-87.
- Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B., Lin, L., 2000. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standart liquids: *Geotext. Geomem.* 18: 133-161.
- Sposito, G. 1973. Volume changes in swelling soils, *Soil Science*, 115, 315-320.
- Sposito, G., Prost, R., 1982. Structure of water adsorbed on smectites, *Chem. Rev.* 82, 553–573.
- Snethen, D.R., 1984. Evaluation of expedient methods, for identification and classification of potentially expansive soils, *Proceedings, 5th International Conference on. Expansive Soils, Adelaide, Australia*, 22-26.
- Sridharan, A., Rao, S. M., Sashi, S., 1990. Classification of expansive soils by sediment volume method, *Geotechnical Testing Journal*, 13 (4), 375-380.
- Terzaghi, K. 1927. Soil classification for foundation purposes, *Trans. 1 Intl. Cong. Soil Science*, 4, 127-157.
- Uzundurukan, S., 2006. Zeminlerin şişme özelliklerine etkiyen temel parametrelerin belirlenmesi ve modellenmesi. *Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta*, 202 s.
- Van Olphen, H., 1977. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. 2nd ed., Wiley Interscience, New York.

- Viani, B.E., Low, P.F., Roth, C.B. 1983. Direct measurement of relation between interlayer force and interlayer distance in the swelling of montmorillonite. *J. Colloid. Interface Sci.*, 96, 229- 244.
- Yong, R. N., Warkentin, B. P., 1975. *Soil properties and behaviour*. Elsevier Scientific, Amsterdam, 449 p.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Ayşen Okşan ALTUN
Doğum Yeri ve Tarihi	Gaziantep, 07/01/1986
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	aoaltun@cumhuriyet.edu.tr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2009
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi