

ŞİŞEBİLEN KİLLİ ZEMİNLERİN  
DOĞAL JİPS KATKISI KULLANILARAK  
İYİLEŞTİRİLMESİ

BERRİN CİVELEKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
2009

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞİŞEBİLEN KİLLİ ZEMİNLERİN DOĞAL JİPS KATKISI  
KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

BERRİN CİVELEKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
DOÇ.DR. IŞIK YILMAZ

SİVAS  
2009

**Bu proje Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından M- 351 numaralı Araştırma Projesi olarak desteklenmiştir.**

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

## ÖZET

### ŞİŞEBİLEN KİLLİ ZEMİNLERİN DOĞAL JİPS KATKISI KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

Berrin CİVELEKOĞLU

Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Işık YILMAZ

2009, 53 sayfa

Özellikle hafif yapılar, şişebilen killerin şişme ve büzülmesinden kaynaklanan zemin hareketlerinden önemli ölçüde etkilenmektedirler. Jeoteknik mühendisleri, su içeriğindeki değişimlerin sonunda meydana gelen killerin şişmesi ile uzun süreden beri ilgilienirler. Bu değişimler, yüzeydeki yapılarda dikkate değer hasarlara neden olurlar ve mühendisler bu olayı mutlaka dikkate almalıdırlar. Uluslararası ve ulusal literatür şişebilen killerin kireç, çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmesine yönelik bir çok çalışmayı içermektedir. Ancak, jipsin killerin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kullanılabilirliği açık değildir.

Bu tez çalışması, şişebilen killerin şişme ve dayanım özelliklerinin iyileştirilmesinde jipsin katkı maddesi olarak kullanım performansını ortaya koymaktadır. Çalışmada ilk olarak, bentonitin en iyi kompaksiyonu için gerekli olan optimum su içeriğini belirlemek üzere standart kompaksiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. %2.5, %5, %7.5 ve %10 gibi kütlece farklı miktarlarda jips bentonite karıştırılmış ve hesaplanmış olan optimum su içeriğinde sıkıştırılmıştır. Daha sonra; hem karışimsız hem de 7 günlük küre bırakılmış jips karışımı numuneler üzerinde Atterberg limitleri, serbest şişme ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Jips katkı maddesine bağlı olarak plastisite, şişme ve dayanımda meydana gelen değişimler jipsin şişebilen killerin iyileştirilmesinde etkin bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Killi zeminler, bentonit, jips, iyileştirme, şişme, dayanım.

## ABSTRACT

### STABILIZATION OF SWELLING CLAY SOILS BY USE OF NATURAL GYPSUM ADDITIVE

Berrin CİVELEKOĞLU

Master of Science Thesis, Department of Geological Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Işık YILMAZ

2009, 53 pages

Low rise buildings are particularly vulnerable to ground movements sourced from swelling and shrinking of the expansive clay soils. Geotechnical engineers have long recognized that swelling of expansive clays caused by moisture variation may result in considerable damage to the overlying structures, and engineers should take them into the consideration. International and national literature contains a vast number of stabilizing techniques such as lime, cement, and fly-ash for treatment of expansive clay soils. However the use of gypsum as a stabilizing agent is currently not clear.

This thesis deals with the performance of the gypsum as an additive for treatment of the expansive clay soils by means of swell potential and strength. Optimum water content for the best compaction of the bentonite was first determined by standard compaction tests. Different quantities of gypsum such as 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% by mass were added to bentonite and compacted in optimum water content obtained. Atterberg limits, free swell and unconfined compressive strength tests were performed on treated and untreated samples, after a curing period of 7 days. Obtained changes in the plasticity, swell percent and strength parameters of treated and untreated samples indicated that gypsum can be used as a stabilizing agent for expansive clay soils, effectively.

**Key words:** Clay soils, bentonite, gypsum, stabilization, swell, strength.

*Yaşantılarıma aydınlık katan anneme ve babama ...*

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında, her aşamada titizlikle ve sabırla destek sağlayan, bilgi, deneyim ve kaynaklarından yararlandığım, sayın hocam Doç.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, Mineroloji-Petrografi Anabilim Dalı öğretim üyesi Prof.Dr. Hüseyin YALÇIN' a ve MİPJAL laboratuvarı elemanı Kim.Müh. Fatma YALÇIN' a teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğretimimi yaptığım Jeoloji Mühendisliği Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı'nın değerli öğretim üyeleri Prof.Dr. Fikret KAÇAROĞLU ve Yrd.Doç.Dr. Tülay EKEMEN KESKİN' e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

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

Berrin CİVELEKOĞLU

Haziran 2009



## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Önceki Çalışmalar .....	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi .....	5
<b>2. KİLLERDE NEM ETKİLEŞİMİ</b> .....	<b>8</b>
<b>3. ŞİŞEN ZEMİNLER VE SINIFLANDIRILMASI</b> .....	<b>14</b>
3.1. Şişmenin Mekanizması .....	16
3.2. Şişmenin Sınıflandırılması .....	18
<b>4. ŞİŞEN ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ</b> .....	<b>21</b>
4.1. Kireç ve Mermer Tozu ile İyileştirme .....	21
4.2. Uçucu Küllerle İyileştirme .....	23
4.3. İyileştirmede Çimento ve Kimyasal Kullanımı .....	23
<b>5. DENEYSSEL YÖNTEM</b> .....	<b>25</b>
5.1. Kullanılan Bentonit ve Jips' in Özellikleri .....	25
5.1.1. Bentonit .....	25
5.1.2. Jips .....	27
5.2. Numunelerin Hazırlanması .....	31
5.3. Katkısız Bentonit' in Özellikleri .....	32
5.3.1. Katyon Değişim Kapasitesi (KDK) .....	32

5.3.2. Atterberg sınırları .....	33
5.3.3. Şişme .....	33
5.3.4. Dayanım .....	34
5.4. Etkin Kür Süresinin Belirlenmesi .....	35
<b>6. JİPS KATKILI BENTONİT' İN ÖZELLİKLERİ VE DEĞİŞİM .....</b>	<b>37</b>
6.1. Likit Limit ve Plastik Limite Değişim .....	37
6.2. Şişme Potansiyelinde Değişim .....	38
6.3. Dayanımda Değişim .....	40
6.4. Katyon Değişim Kapasitesinde Değişim.....	41
<b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR .....</b>	<b>43</b>
<b>8. KAYNAKLAR .....</b>	<b>45</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>53</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çalışmada kullanılan numunelere ait yer bulduru haritası .....	6
Şekil 2.1. a) Tetrahedral birim, b) Silikat tabakası .....	8
Şekil 2.2. a) Oktahedral birim, b) Alümina tabakası .....	9
Şekil 2.3. Montmorillonit minerali .....	11
Şekil 2.4. Killerde kristaller arası şişme .....	12
Şekil 3.1. Zeminlerin çeşitli parametrelere bağlı olarak, şişme sınıflaması .....	20
Şekil 3.2. Katyon değişim kapasitesi ve likit limite bağlı olarak şişme potansiyeli sınıflaması .....	20
Şekil 5.1. Bentonit yatakları ve Türkiye’ deki dağılımları .....	26
Şekil 5.2. Kullanılan bentonitlere ait karakteristik XRD difraktogramı .....	26
Şekil 5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları: <b>a.</b> smektit lamelleri ve kısa prizmatik klinoptilolitler, <b>b.</b> zayıf paketlenme, kıvrımlanmış-lamelli simektit agregatları (Yalçın ve Gümüşer 2000’ den) .....	28
Şekil 5.4. Sivas havzasında jipsin dağılımını gösteren harita (Yılmaz ve Karacan 2005’ den) .....	29
Şekil 5.5. Jips numunelerinin alındığı lokasyonlara ait harita .....	30
Şekil 5.6. Jipse ait karakteristik tüm kayaç XRD difraktogramı .....	30
Şekil 5.7. Bentonite ait maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) ni gösteren kompaksiyon eğrisi .....	31
Şekil 5.8. Katkısız bentonit şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği .....	34
Şekil 5.9. <b>a)</b> Serbest basınç deneyi, <b>b)</b> Gerilme-deformasyon grafiği , <b>c)</b> Mohr dairesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi.....	34
Şekil 5.10. Serbest basınç deneyi gerçekleştirilen üç numune .....	35
Şekil 5.11. Kür süresine bağlı olarak şişme yüzdesinde azalma .....	36

<b>Şekil 6.1.</b> Likit limit ve plastisite indeksinin jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi .....	37
<b>Şekil 6.2.</b> Farklı jips katkı miktarına sahip bentonitlerin şişme yüzdesi-zaman grafikleri .....	39
<b>Şekil 6.3.</b> Şişme yüzdesinin jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi .....	39
<b>Şekil 6.4.</b> Farklı jips katkı miktarına sahip bentonitlerin gerilme-deformasyon grafikleri .....	40
<b>Şekil 6.5.</b> Serbest basınç dayanımının jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi..	41
<b>Şekil 6.6.</b> Katyon değişim kapasitesinin jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi .....	42

## **ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b>Çizelge 2.1.</b> Bazı kil minerali türleri .....	10
<b>Çizelge 3.1.</b> Zeminlerin şişme potansiyeli sınıflaması .....	15
<b>Çizelge 3.2.</b> Kil minerallerinin şişme indisi değerleri .....	17
<b>Çizelge 3.3.</b> Şişen zeminlerin sınıflaması .....	18
<b>Çizelge 3.4.</b> Şişme potansiyeli tanımlama ölçütlerinin özeti .....	19
<b>Çizelge 5.1.</b> XRD (Tüm Kayaç) analizi sonuçları ve kullanılan bentonitin kimyasal bileşimi .....	27
<b>Çizelge 5.2.</b> Bazı kil minerallerinin KDK değerleri .....	33
<b>Çizelge 5.3.</b> Katkısız Bentonit' in Atterberg sınırları değerleri .....	33
<b>Çizelge 6.1.</b> Değişik jips katkısı için bentonitin Atterberg sınırları değerleri .....	37
<b>Çizelge 6.2.</b> Değişik jips katkısı için bentonitin şişme yüzdesi değişimi değerleri	39
<b>Çizelge 6.3.</b> Değişik jips katkısı için bentonitin serbest basınç dayanımı değerleri	41
<b>Çizelge 6.4.</b> Değişik jips katkısı için bentonitin KDK değerleri .....	42

## 1.GİRİŞ

Birçok bina zorunlu olarak yeterli zemin koşullarının bulunmadığı yerlerde inşa edilirler. Çünkü özellikle sosyo-ekonomik gelişmenin bir sonucu olarak kentler büyümekte ve inşaat için gerekli yeterli taşıma gücüne sahip uygun alanların yüzölçümü azalmaktadır. Böylelikle, sıklıkla arzu edilmeyen koşulların bulunduğu alanlarda inşaat yapımı gerçekleşmektedir. Killi zeminlerin en önemli özelliklerinden birisi de bu tür zeminlerin şişme ve büzülme gibi hacimsel değişime karşı duyarlı olmasıdır. Bu tür hacimsel değişimler, temel zeminlerinde meydana gelen yükselme ve alçalma gibi hareketlere ve dolayısı ile üzerindeki yapılarda istenmeyen deformasyonlara neden olmaktadır.

Şişebilen killi zeminlerin şişme potansiyelleri; üzerlerinde bulunan örtü gerilmesine, yük kaldırılmasına veya su içeriğindeki artışlara bağlıdır. Bell ve Maud (1995), Yılmaz ve Karacan (1997), Yılmaz (2007.a); özellikle hafif yapıların şişme ile meydana gelen zemin kabarmalarına karşı yeterli miktarda mukavemet gösterememelerinin yapı üzerinde çok şiddetli hasarların oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Şişme ve büzülmeye en çok eğilimli olan zeminler genellikle aşırı konsolide/konsolide zeminler (Dhowian ve diğ., 1985) ile Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı alüvyal/kolüvyal zeminlerdir (Donaldson, 1969; Yılmaz, 2008).

Zeminler üzerine inşa edilen yapılar sırasında killer birincil öneme sahiptirler. Şişmeden kaynaklanan bina üzerindeki hasarlar ve hareketler genellikle çok yavaş gerçekleşirler ve heyelan, deprem, kasırga gibi dramatik felaketlere neden olmazlar. Meydana gelen hasarlar bazen küçük onarımlarla ortadan kaldırılabilirler ve estetik anlamda önem taşırken, çoğunlukla daha kötü ve binalarda maliyeti yüksek hasarlar ile temel yapısal sorunları ortaya çıkabilir. Zemin iyileştirmeleri genellikle yüksek maliyetlere neden olmasına rağmen, ortaya çıkacak sorunların sürekli onarımları ile mukayese edildiğinde çok önemli düzeylere ulaşmaz (Coduto, 1999).

Özellikle hafif yapılar, zemin şişmelerinden kaynaklanan hasarlara daha eğilimlidirler. Zemin yüzeyinde meydana gelecek kabarma ve büzülmenin büyüklüğü genellikle bir yapının altındaki alan içerisinde bile değişimler gösterebilir. Bunun sonucu

olarak da; bina temelinin değişik noktalarında farklı miktarlarda hareketler gerçekleşebilir.

Killi zeminler üzerinde yer alacak yapılar için şişmeye karşı aşağıda bahsedilen bazı koruyucu önlemler alınabilir:

- Temellerin daha derinlere kadar indirilmesi,
- Temellerde ekstra çelik donatıların kullanımı,
- Yüzey ve/veya yeraltı sularının drenajı,
- İnşaat öncesinde zeminde yapılan ön-nemlendirme,
- Şişebilen zeminin kaldırılarak şişmeyen zeminle değiştirilmesi,
- Zeminin, kireç, uçucu kül, kimyasallar gibi katkı maddeleri ile iyileştirilmesi.

### **1.1. Önceki Çalışmalar**

Şişebilen zeminlerin iyileştirilmesine yönelik ulusal ve uluslar arası literatürün genel olarak çimento, kireç ve uçucu kül gibi katkı maddelerinin kullanımında yoğunlaştığı dikkat çekmektedir.

Townsend ve Kylv (1966) ve Brandl (1981) killerin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kireci kullanmışlar ve geçirimsizlik değerlerinin yükseldiğini belirlemişlerdir. Broms ve Boman (1979); kireç katkısının zeminlerin makaslama dayanımı, sıkışabilirlik ve geçirimsizlikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında kireçle iyileştirmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. El-Rawi ve Awad (1981); kohezyonlu zeminlerin kireçle iyileştirilmesi çalışmasının sonucu olarak, plastisite indeksi, dispersivite ve şişmede azalma, geçirimsizlik ve dayanımda ise artış kaydetmişlerdir. Bell ve Coultherd (1990)' ın çalışması da killerin kireç katkısı ile iyileştirilmesine yönelik gerçekleştirilmiş ve şişmede etkin iyileştirme ile sonuçlanmıştır. Akawwi ve Kharabsheh (2000); şişebilen Amman killerinin kireçle iyileştirilmesine ilişkin çalışmalarında, %3.5–5 arasında katkı miktarı ile etkin bir iyileştirmenin gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Yeşilbaş (2004) ; şişen zeminlerin agrega artığı, taş unu ve kireç kullanılarak stabilizasyonu konulu çalışmasında şişen zemin numunesi olarak laboratuarda hazırladığı kaolin ve bentonit karışımını kullanmıştır. Kireç ağırlıkça %0 ila %9 arası oranlarda, agrega artığı ve taş unu ise ağırlıkça %0 ila %25 arası oranlarda katılmıştır. Örneklerin tane çapı dağılımı, kıvam limitleri, şişme yüzdeleri ve şişme hızı tespit edilmiştir. Ayrıca 7 ve 28 günlük kürler uygulanmıştır. Bu yöntemle iyileştirme şişme potansiyelinde azalmaya neden olmuş, şişme yüzdesi katkı miktarı arttıkça azalmıştır.

Ülker (2005); karayolu altyapısında zeminlerin kireçle iyileştirilmesi çalışmalarında iki tip killi zemini (CH ve CL) , farklı yüzdelerde (%1, 3, 5, 10) kireçle karıştırmıştır. Çalışma sonucunda; katılan kirecin, iki tip zeminde de dayanım artışında ve fiziksel özelliklerde gelişmeye önemli oranda katkıda bulunduğunu gözlemlemiştir.

Süt (2006); kohezyonlu zeminlerin kireçle iyileştirilmesinin CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değeri üzerindeki etkisinin irdelenmesi konulu çalışmalarında, zemin numunesi olarak yüksek plastisiteli (CH) kil kullanmıştır. Zemin, kuru ağırlığının %2, 4, 6 ve 8'i kadar sönmüş kireç ile karıştırılmıştır. Çalışmada özellikle artan kireç içeriğine bağlı olarak değişen; CBR, serbest basınç dayanımı ve şişme potansiyelindeki değişimler irdelenmiştir. CBR ve serbest basınç deneylerinin sonuçları beraber değerlendirilerek zeminin iyileşmesini sağlayan optimum kireç miktarı belirlenmiştir.

Uysal (1993); Türkiye' de ilk uygulamalardan biri olan Manisa Öğretmen Evi'nin zemin iyileştirme çalışmasında, zeminde yer alan düşük plastisiteli CL inorganik killerinin sönmüş kireç tozu ile stabilize edilebilirliğini belirtmiştir.

Çetiner (2004); şişen zeminlerin Çayırhan uçucu külü ve desülfojips ile stabilizasyonu konulu çalışmalarında, şişen zemin Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül ve desülfojips ile stabilize edilmiştir. Uçucu kül ve desülfojips şişen zemine 0'dan yüzde 30'a kadar eklenmiştir. Uçucu kül ve desülfojipsin şişen zemin stabilizasyonunda ne kadar verimli olduklarını anlamak için kireç kullanılmış ve şişen zemine 0'dan yüzde 8'e kadar eklenmiştir. Uçucu kül, desülfojips ve kireç eklenmiş numunelere, sonrasında serbest şişme deneylerine tabi tutulmak üzere, 7 günlük ve 28 günlük kür uygulanmıştır. Katkının artmasıyla şişme yüzdesi düşmüş ve şişme hızı artmıştır. Kür, daha çok şişme yüzdesi düşüşü ve şişme hızı artışına sebep olmuştur.

Terashi ve diğ. (1980) ile Locat ve diğ. (1990) ise killeri kireç ve uçucu kül katkısı ile iyileştirmişler ve geçirimsizliği azaldığını belirlemişlerdir. Ji-ru ve Xing (2002) de benzer şekilde kireç ve uçucu kül katkı maddesi olarak kullanarak şişebilen zeminleri iyileştirmişlerdir. Transportation Research Board (1987); Kamon ve Nontanandh (1991), Basma ve Tuncer (1991) dünyanın değişik bölgelerinde zeminlerin uçucu kül ve kireç-uçucu kül karışımı ile iyileştirilmesi bakımından gerçekleştirdikleri çalışmalarında etkin stabilizasyon sonuçlarını rapor etmişlerdir.

Amu ve diğ. (2005); %9 çimento + %3 uçucu kül katkı maddesi olarak kullandıklarında taşıma gücü ve makaslama dayanımında optimum iyileştirme elde etmişlerdir. Bu sonucu uçucu kül kullanmadan %12 çimento ile elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırarak, iyileştirmede uygun oranda uçucu külün de kirece eklenmesinin iyileştirmeyi önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir.

Kennedy ve diğ. (1987); kireç ve çimento ile stabilizasyonun şişen zeminler üzerindeki etkisini şişme potansiyelindeki azalma ile ifade etmişlerdir. Mathew ve Narasimha (1997); çimento ve kireç katkısı kullanarak zeminleri stabilize etmişler ve iyileştirme mekanizmasını açıklamışlardır.

Edral (1999); uçucu külün şişebilen zeminlere karıştırılması ile şişme basıncında kayda değer düşüş belirlemiştir. Muntohar ve Hantoro (2000); zeminlerin uçucu kül ve pozolan malzemeler kullanılarak iyileştirilebildiğini bulmuşlardır. Nalbantoğlu ve Güçbilmez (2001); Kıbrıs adasında önemli temel sorunlarına neden olan şişen killeri iyileştirmek üzere uçucu kül katkı maddesi olarak kullanmış olup, elde ettikleri sonuçlar şişmenin düştüğünü buna karşın geçirimsizliğin arttığını göstermiştir.

Aruntaş (2006); uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli konulu çalışmasında jeoteknik uygulamalarda uçucu külün dolgu yapmak ve zemin stabilizasyonu sağlamak amacıyla kullanılmakta olduğunu belirtmiştir.

Zha ve diğ. (2008); şişebilen zeminlerin uçucu külle stabilizasyonu konulu çalışmalarında, şişen zemin Hefei kilini uçucu kül ve uçucu kül- kireç karışımı ile stabilize edilmiştir. Uçucu kül şişen zemine 0, 3, 6, 9, 12 ve % 15'e kadar eklenmiştir. Uçucu külün şişen zemin stabilizasyonunda ne kadar verimli olduğunu anlamak için



kireç kullanılmış ve şişen zemine 0, 1, 2 ve % 3'e kadar eklenmiştir. Uçucu kül ve kireç eklenmiş numunelere, sonrasında serbest şişme deneylerine tabi tutulmak üzere, 7 günlük kür uygulanmış ve optimum katkı maddesi % 9- 12 olarak saptanmış. 7 günlük kür uygulanması sonucunda şişme yüzdesi düşmüş ve şişme hızı artmıştır.

Okagbue ve Onyeobi (1999); yaptığı çalışmada mermer tozunun killi zeminlerin deformasyona olan direncini arttırmakta olduğunu ve iyileştirmede kullanılabilirliğini belirtmiştir. Zorluer ve Usta (2003); zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi çalışmasında atık mermer tozunun zemin iyileştirilmesinde kullanılabilir bir malzeme olduğunu belirlemiştir. Gürer ve diğ. (2004); inşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi çalışmasında atık mermer tozunun zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini saptamıştır. Taşpolat ve diğ. (2006) ise; atık depolama sahalarındaki geçirimsiz kil tabakalarda çevresel koşullara karşı % 10 ve 15 mermer tozu ilavesinin zeminin mukavemetini arttırdığını göstermiştir.

Çokça ve Baytar (2005); uçucu kül ve desülfojipsin Çayırhan zemininin jeoteknik özellikleri üzerindeki etkileri konulu çalışmalarında uçucu kül ve desülfojips eklenen numunelerin çökme potansiyellerinde, sıkıştırılmış numuneyle karşılaştırıldığında, çok belirgin bir değişim gözlenmemiş olsa da, stabilizasyondan dolayı serbest basınç dayanımlarında artış görülmekte olduğunu belirlemiştir.

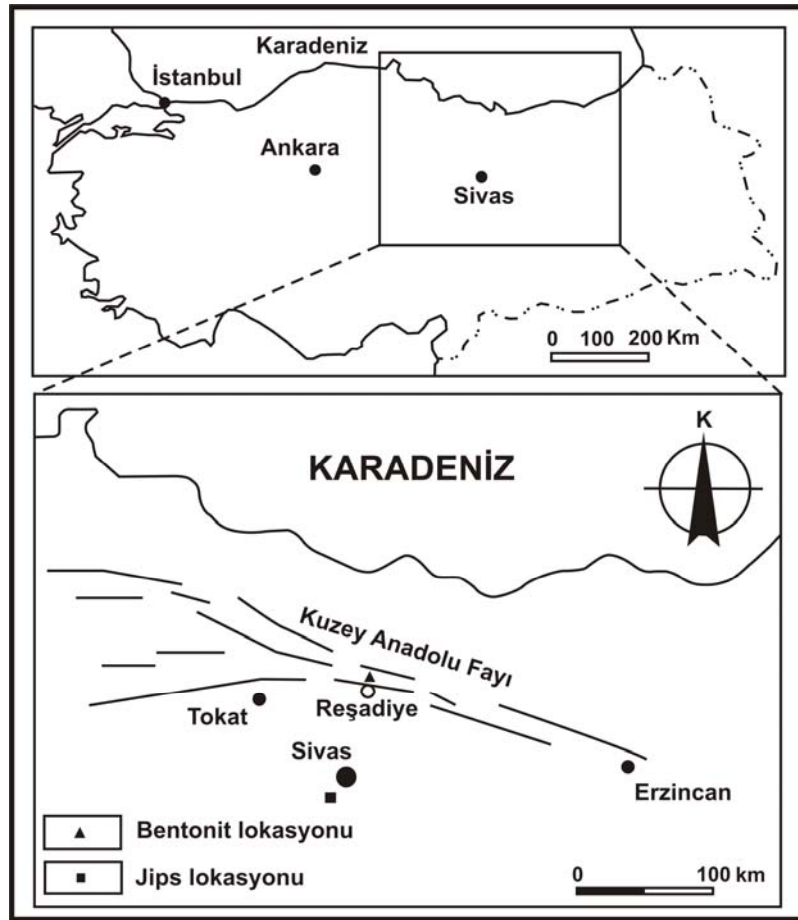
Tonoz ve diğ. (2003); laboratuvar ölçeğinde kireç kolonları oluşturarak fiziksel, şişme, dayanım ve konsolidasyon özelliklerinin geliştirilmesindeki performansı araştırmışlardır. Çalışmanın sonucu olarak, özellikle şişme basıncında %40 ile 75 arasında önemli ölçüde artış belirlemişlerdir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi**

Yukarıda verilen literatür araştırmasının bir sonucu olarak; killi zeminlerin şişme problemlerinin iyileştirilmesinde kullanılan katkı maddelerinin genel olarak çimento, kireç ve uçucu kül ile sınırlı kaldığı, alternatif malzemelerin katkı maddesi olarak kullanımına ilişkin çalışmaların sayısının göreceli olarak çok sınırlı olduğu açıktır.

Şişebilen killerin iyileştirilmesinde jipsin doğrudan katkı maddesi olarak kullanımına ilişkin ise, her hangi bir çalışmanın bulunması hemen hemen mümkün olmamasına karşın, Ameta vd. (2007) şişme basınçlarının düşürülmesi için kireç-jips karışımlarının kullanımını ekonomik açıdan araştırmışlardır. FIPR (1988), fosfatik zemin numunelerini jipsle karıştırıp 360 günlük kürde bekleterek zeminin dayanımında artış kaydetmiştir. Bell ve Maud (1994), toprak dolgu baraj inşaatında özellikle dispersif zeminlerin stabilizasyonunda jipsin etkisinden bahsetmişler ve yaklaşık toz halindeki jipsin iyileştirme malzemesi olarak kullanımının suda çözünübilirliğinden dolayı göreceli olarak daha ekonomik olacağını düşünmüşlerdir.

Bu tez çalışmasında; şişebilen killerin şişme potansiyeli ve dayanım bakımından iyileştirilmesinde jipsin kullanımı ve iyileştirme performansı araştırılmıştır. Çalışmada, kütlece %2.5 - %5 - %7.5 - %10 gibi farklı miktarlarda jips (Sivas havzası'ndan), bentonit (Reşadiye' den) (Şekil 1.1) ile karıştırılmış, her bir karışım zemine ait optimum su içeriği değeri Standart Kompaksiyon Deneyi ile belirlenmiştir.



Şekil 1.1. Çalışmada kullanılan numunelere ait yer bulduru haritası.

60 günlük kür sresinin değerlendirilmesiyle etkin değişimin ilk bir hafta içerisinde gerçekleştiği belirlenerek kr süresi 1 hafta olarak alınmıştır. Kr sonunda her bir karışıma ait plastisite, şişme yüzdesi ve dayanım değerlerindeki değişim elde edilmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar jipsin şişebilen killerin iyileştirilmesinde etkin bir katkı maddesi olarak kullanılabilceğini, maliyetin ise kirece göre 2–3 kat daha ekonomik olacağını göstermiştir. Bundan başka endüstri üretiminde açığa çıkan jips atıklarının bu amaçla kullanılması ile de çevrenin korunması bakımından katkıda bulunulmuş olacaktır.

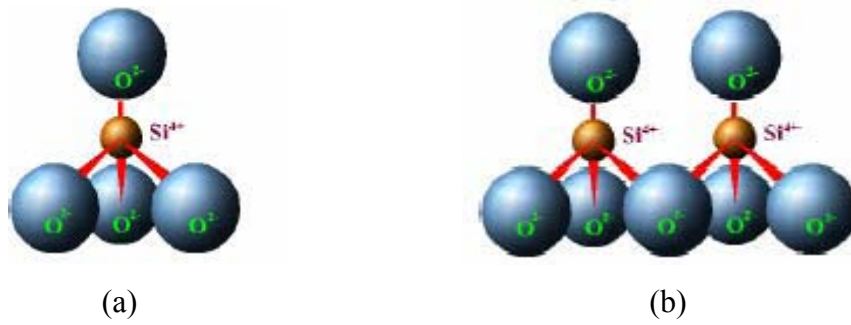
## 2. KİLLERDE NEM ETKİLEŞİMİ

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.

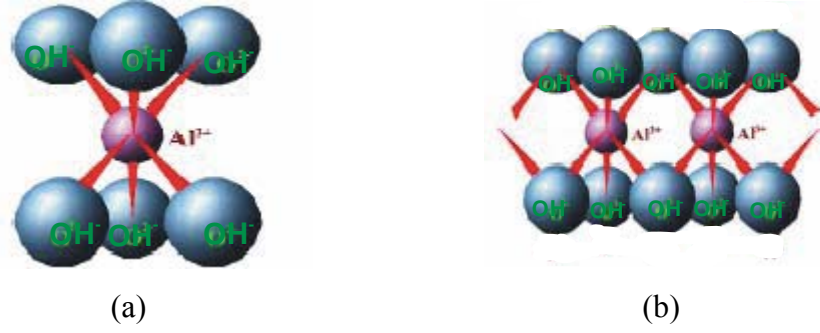
*Tetrahedral birim*; geometrik şekli düzgün dört yüzlü, merkezde silisyum atomu, köşelerde ise merkez atomundan eşit uzaklıkta oksijen iyonlarının yer almasıyla oluşan birimdir.



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

Tetrahedral dizilim sonucunda oksijen atomlarının ortasında  $0.55 \text{ \AA}$  çapında bir boşluk oluşur. Çapı  $0.5 \text{ \AA}$  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 genellikle alüminyum ve/veya magnezyum iyonları, köşelerde ise hidroksil iyonları bulunan yapı birimidir. Alümina ve/veya magnezyen tabakalar, oktahedrallerin diğer oktahedral birimler tarafından paylaşılması sonucu oluşur.



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

İki silisyum tetrahedralin arasında bir alüminyum oktahedralinin girmesi sonucu dioktahedral birim katmanı oluşur ve bu yapı kısaca TOT şeklinde simgelenir. Çok sayıda dioktahedral birim katmanlarının üst üste yerleşmesi sonucunda ise dioktahedral mineral tanecikleri (montmorillonit, baydelit, nontronit) oluşur.

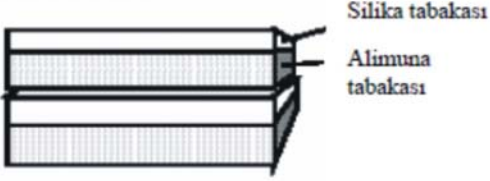
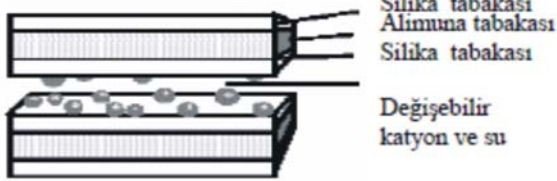
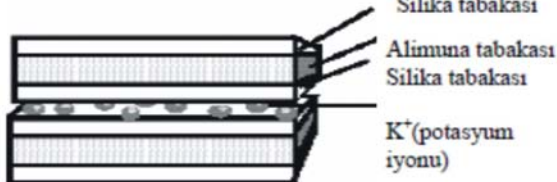
Montmorillonit (Mg, Ca) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5SiO<sub>2</sub> . 8H<sub>2</sub>O formülü ile gösterilen bir kil mineralidir. Baydelit ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3SiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O nH<sub>2</sub>O formülü ile gösterilen simektit grubu kil minerallerinin alüminyumca zengin bir üyesidir. 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.

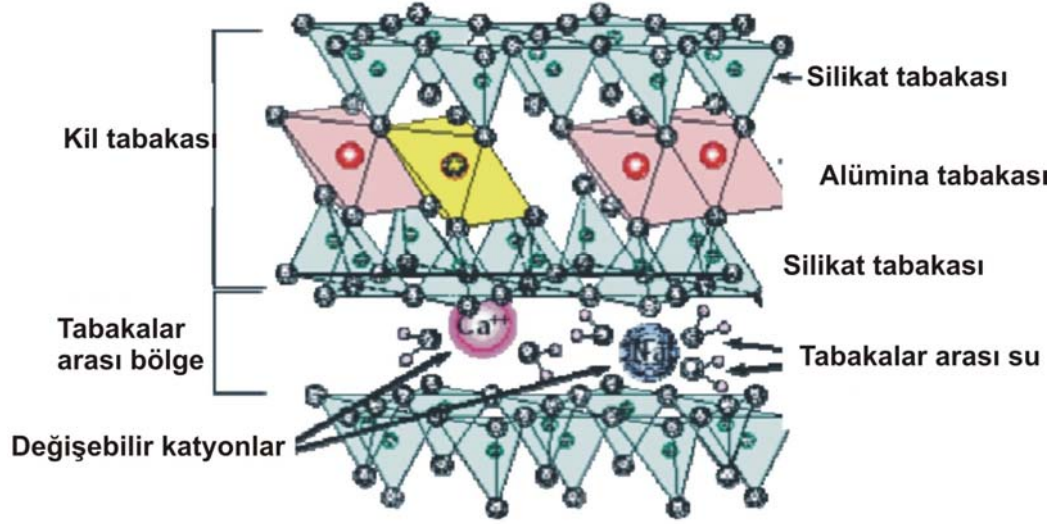
Montmorillonit; iki silisyum tetrahedralinin arasında alüminyum oktahedralinin girmesiyle oluşan üç tabakalı bir mineraldir (Şekil 2.3). Birim hücreler birbirlerini Van der Waals bağlarıyla tutarlar. Bu bağların çok zayıf olması sonucu kolay ayrılabilir ve elde sabun gibi kaygan bir his bırakırlar. Montmorillonit 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, 0.05µm’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).

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

Kil Türleri	Özellikleri
<p data-bbox="296 362 384 394">Kaolin</p>  <p data-bbox="644 461 791 560">Silika tabakası Alümina tabakası</p> <p data-bbox="296 676 533 712"><math>Al_2[(OH)_2(Si_2O_5)]</math></p>	<p data-bbox="916 362 1378 452">Kaolin partikülleri yaklaşık 1µm çapında ve 0,1 µm kalınlığındadır.</p> <p data-bbox="916 524 1238 560">Şişme özeliği göstermez.</p> <p data-bbox="916 636 1251 672">Seramikler için kullanılır.</p>
<p data-bbox="296 788 619 824">Montmorillonit (smektit)</p>  <p data-bbox="676 860 858 1021">Silika tabakası Alümina tabakası Silika tabakası Değişebilir kation ve su</p> <p data-bbox="296 1128 785 1164"><math>Si_8(Al_{3,31}Mg_{0,66})O_{20}(OH)_4M^{+}_{0,66}nH_2O</math></p> <p data-bbox="296 1240 858 1330"><math>M^{+}</math>: değişebilir kationlar, n: katmanlar arası suyun mol olarak miktarı</p>	<p data-bbox="916 739 1378 990">Na-montmorillonit partikülleri oldukça küçük taneciklerdir ve genellikle tek kristal tabakası şeklindedir ve kalınlığı yaklaşık 1nm'dir.</p> <p data-bbox="916 1008 1378 1258">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="916 1285 1378 1375">Na-montmorillonit şişme özeliği gösterir.</p> <p data-bbox="916 1393 1378 1482">Ca-montmorillonit daha az şişme özeliğine sahiptir.</p>
<p data-bbox="296 1509 347 1541">İllit</p>  <p data-bbox="676 1568 858 1729">Silika tabakası Alümina tabakası Silika tabakası <math>K^{+}</math>(potasyum iyonu)</p> <p data-bbox="296 1796 587 1832"><math>KAl_2[(OH)_2(AlSi_3O_{10})]</math></p>	<p data-bbox="916 1509 1378 1706">Birim katmanında, iki silika tabakası arasında alümina tabakası yer alır ve tabakalar arasında <math>K^{+}</math> kasyonu bulunur.</p> <p data-bbox="916 1724 1378 1814">İllit partikülleri oldukça küçük ve genellikle 10 nm boyutundadır.</p> <p data-bbox="916 1832 1238 1868">Şişme özeliği göstermez.</p>



Şekil 2.3. Montmorillonit minerali.

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.

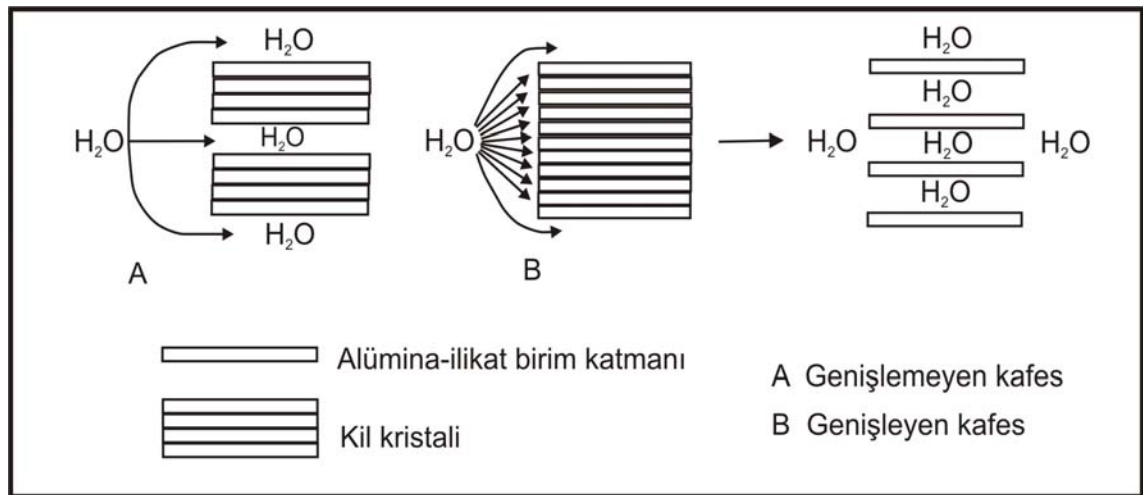
Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Killer üzerine uygulanan gerilimler, doğal ve yapay yükler ise kilin yapısında nem hareketine neden olur ve killerdeki hacimsel değişimler, hemen her zaman bu nem hareketi ile kontrol edilir. Eğim yenilmesi ve 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. Buharlaşıma, bitki terlemesi ve ısınma, killerde kurumaya neden olduğu gibi; yeraltı su tablasındaki yükselmeler, yağışlar ve barajlar gibi mühendislik yapılarından sızan kaçak sular da kildeki nem miktarını artırır. Killerin nem miktarındaki değişim, hemen her zaman hacimsel değişimlere neden olur. Nem artışı hacimsel büyümeyi, nem kaybı ise hacimsel 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 hacimsel büyüme, kil denge gözeneklilik oranına erişinceye kadar devam eder. Killerdeki su emme sonucu oluşan hacimsel büyüme; kil üzerine etkiyen yük ve şişme basıncının bir fonksiyonudur (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989).

Killerdeki bu şişme basıncı çok düşükten den çok yükseğe kadar değişebilir. Eğer bu şişme basıncı, kil üzerine etkiyen 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  $10\text{\AA}$  olan mesafeyi önemli ölçüde genişleterek büyük hacimsel büyümeye neden olur (Şekil 2.4).



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

Bu tür hacimsel büyüme "kristaller arası şişme" (intra-crystalline swelling) olarak tanımlanır. Simektitin yanı sıra, 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 katmanlar arası bağ (interlayerbond) montmorillonitinkinden çok daha güçlüdür ve bu nedenle su, bu güçlü bağları kopararak katmanlar arasına girememektedir (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989).

### 3. ŞİŞEN ZEMİNLER VE SINIFLANDIRILMASI

Suya doymun olmayan veya kısmen doymun olan killi zeminlerin su içeriğinde meydana gelen değişimler sonucu, zemin hacminde meydana gelen artış şişme özelliği olarak tanımlanmaktadır. Şişebilen zeminler, yapılar, deprem ve sel baskını gibi doğal afetlerden çok daha fazla zarara neden olmaktadır. Çevreyle uyumlu doğru bir arazi kullanım planlamasının yapılabilmesi için, doğal risk alanları olarak nitelendirilen bu tür zeminlerde meydana gelen şişme davranışının belirlenmesi gereklidir.

Şişen zeminlerin üzerinde yapılması zorunlu olan üst yapıda zeminin aşağı ve yukarı doğru hareketlerine paralel olarak deformasyonlar oluşur. Bazı durumlarda üst yapıdan dolayı zeminde meydana gelen gerilme artışı şişme basıncından küçük ise bu yapılar ciddi mühendislik problemlerine maruz kalırlar. Ayrıca şişen zeminlerde neme ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak şişme özelliklerinde aşırı değişikliklerde görülebilmektedir.

Dünyanın birçok bölgesinde, özellikle de kurak ve yarı - kurak alanlarda şişen zeminlere sıkça rastlanmaktadır. Genellikle aktif kil mineralleri ihtiva eden bu zeminler, kapiler yoldan su alarak büyük hacim değişikliklerine uğramakta, bilhassa yol, havaalanı gibi hafif yapılarda büyük hasarlar meydana getirmektedirler. Bu tür zeminlerin şişme davranışlarının ve bunları etkileyen faktörlerin önceden belirlenmesi ile meydana gelebilecek zararlar azaltılabilmekte ya da tamamen önlenmektedir.

Günümüzde 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 olmaktadır. 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.

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 zeminlerde 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.b).

Şişebilirlik derecesinin belirlenmesinde, Atterberg limitleri deneyleri ve bunlardan elde edilen sonuçlara dayandırılan şişebilirlik sınıflaması gibi bazı tahmine yönelik yöntemler vardır. Çizelge 3.1' de bu tür bir sınıflama gösterilmektedir (Holtz 1969 ve Gibbs 1969'dan).

**Çizelge 3.1.** Zeminlerin şişme potansiyeli sınıflaması (Holtz 1969 ve Gibbs 1969'dan).

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

Şişen zeminlerle ilgili olarak, geliştirilen tanımlama ve sınıflama teknikleri, problemleri olduğundan şüphelenilen zeminlerin olası hacim değiştirme davranışlarının nitel olarak belirlenmesinde kullanılır. Potansiyel hacim değişikliğinin nitel olarak tanımlanması; şişen zeminlerin neden olacağı olası problemlerin planlama aşamasında önceden belirlenmesini ve mühendislik yapıları altında var olan şişen zeminle ilgili olarak yapının tasarımında gerekli ön bilgiyi sağlar.

Islanma ile birlikte gelişen ve "hacim artışı" olarak bilinen şişme; kil taneleri arasında etkin bir itme sağlamak için kil zemin içine suyun alınımını gerekli kılar. Termodinamik bakış açısından zemin içindeki suyun enerjisi serbest suyunkinden daha az olduğu sürece, su zemin içine doğru hareket eder. Kum zemin içinde su önemli bir hacim değişikliği oluşturmaksızın boşlukları doldururken, kil zeminlerde genellikle

hacim artışı oluşturur. Genellikle aşırı konsolidasyona veya kurumaya maruz kalmış zeminlerde şişen kil mineralinin varlığı, kil tane yüzeyleri üzerindeki katyonların hidratasyonuna bağlı olarak iç gerilmelerin rahatlaması neticesinde şişmeye sebep olur (O'Neill ve Poormoayed, 1980).

### 3.1. 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.

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 tekdüze 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 değiştirebilir durumda tutma özelliğine sahiptir. Adsorbe edilen katyon miktarı zemin içindeki kil

miktarıyla orantılıdır. Değişebilir iyonlar, kil mineral yapı biriminin tabakaları arasında tutulur. Kil minerallerinde en yaygın değişebilir katyonlar  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $H^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Na^+$  ve  $Li^+$  gibi pozitif iyonlardır. Bazı iyonlar, su solüsyonu içerisinde diğer katyonlarla yer değiştirebilir. Bu iyonların varlığı kilin solüsyondan iyonları adsorblama yeteneğinin bir göstergesidir. Değişim reaksiyonu bazen dengesiz bir çevrede de olabilir. Değişebilir iyonlar kil mineral yapı biriminin tabakaları arasında 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 3.2).

**Çizelge 3.2.** Kil minerallerinin şişme indisi değerleri (Lambe ve Whitman, 1959' dan değiştirilerek).

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
İllit	$K^+$	0,27
	$Ca^{+2}$	0,21
	$Mg^{+2}$	0,18
	$Na^+$	0,15
	$H^+$	0,10
Kaolinit	$Na^+$	0,20
	$Mg^{+2}$	0,08
	$K^+$	0,06
	$Ca^{+2}$	0,06
	$H^+$	0,05

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.

### 3.2. Şişmenin Sınıflandırılması

O'Neil ve Poormoayed (1980)' in plastisite indeksi ve likit limite bağlı olarak önerilen şişme potansiyeli sınıflamasının (Çizelge 3.3) dışında, kıvam sınırları kullanılarak zeminlerin şişme potansiyeline bir yaklaşımda bulunulmak amacı ile birçok araştırmacı tarafından önerilen sınıflama sistemleri de sık sık kullanılmaktadır (Çizelge 3.4).

**Çizelge 3.3.** Şişen zeminlerin sınıflaması (O'Neill ve Poormoayed, 1980).

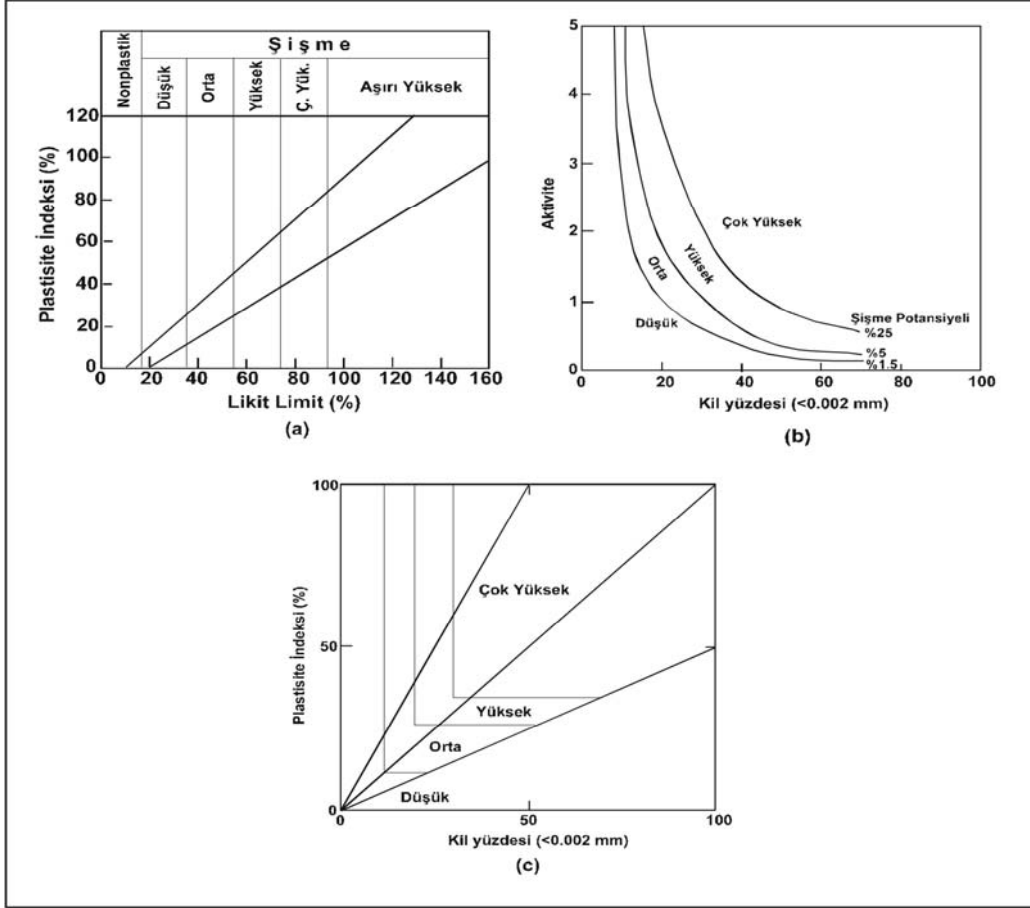
Likit Limit	Plastisite İndeksi	Şişme Potansiyeli	Sınıflama
<50	<25	<0.5	Düşük
50-60	25-35	0.5-1.5	Orta
>60	>35	>1.5	Yüksek
Şişme Potansiyeli= Örtü basıncına eşit basınç altındaki düşey şişme			

Bu şişme potansiyeli sınıflarının içerisinde en çok kullanılanı; Van der Merwe (1964) tarafından geliştirilen, daha sonra Williams ve Donaldson (1980) tarafından değiştirilen sınıflamadır (Şekil 3.1) (Yılmaz 2007.b).

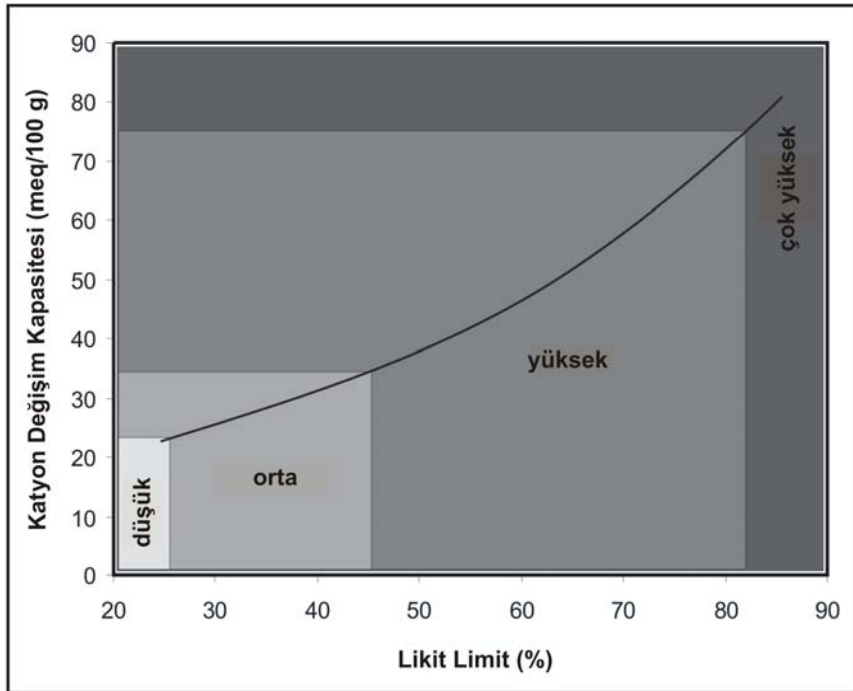
Yılmaz (2006), yapmış olduğu çalışma ile kation değişim kapasitesi ve likit limite bağlı olarak yeni bir sınıflama önermiş ve Şekil 3.2'de olduğu gibi şişmeyi sınıflamıştır.

**Çizelge 3.4.** Şişme potansiyeli tanımlama ölçütlerinin özeti (Yılmaz 2006).

Referans	Ölçüt	Düşünceler
Holtz (1959)	CC>28, IP>35, SL<11 (çok yüksek) 20≤CC≤31, 25≤IP≤41, 7≤SL≤12 (yüksek) 13≤CC≤23, 15≤IP≤28, 10≤SL≤16 (orta)	CC, IP ve SL ye bağlı olarak
Altmeyer (1955)	LS<5, SL>12, PS<0.5 (kritik değil) 5≤LS≤8, 10≤SL≤12, 0.5≤PS≤1.5 (orta) LS>8, SL<10, PS>1.5 (kritik)	LS, SL, PS ye bağlı olarak.
Dakshanamurthy ve Raman (1973)	Bkz. Şekil 3.1a	Plastisite kartına bağlı olarak.
Seed vd. (1962)	Bkz. Şekil 3.1b	Sıkıştırılmış örnek kullanılan ödometre deneyi, %kil<2 µm ve aktiviteye bağlı olarak.
Raman (1967)	IP>32 ve SI>40 (çok yüksek) 23≤IP≤32, 30≤SI≤40 (yüksek) 12≤IP≤23, 15≤SI≤30 (orta) IP<12 ve SI<15 (düşük)	IP ve SI ya bağlı olarak.
Sowers ve Sowers (1970)	SL<10 ve IP>30 (yüksek) 10≤SL≤12, 15≤IP≤30 (orta) SL>12 ve IP<15 (düşük)	IL=0.25 deki doğal su içeriğinde çok küçük şişme oluşacaktır.
Van Der Merwe (1964)	Bkz. Şekil 3.1c	IP, % kil<2µm ve aktiviteye bağlı olarak.
Snethen (1984)	LL>60, IP>35, τ <sub>nat</sub> >4, SP>1.5 (yüksek) 30≤LL≤60, 25≤IP≤35, 1.5≤τ <sub>nat</sub> ≤4 ve 0.5≤SP≤1.5 (orta) LL<30, IP<25, τ <sub>nat</sub> <1.5, SP<0.5 (düşük)	PS arazi şartları için ortaya konur, τ <sub>nat</sub> olmadan kullanılabilir, fakat doğruluk azalır.
Chen (1988)	IP≥35 (çok yüksek), 20≤IP≤55 (yüksek) 10≤IP≤35 (orta) ve IP≤15 (düşük)	IP ye bağlı olarak.
Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973)	logSP=(1/12)(0.44LL-w <sub>o</sub> +5.5)	Eşitlikten.
Nayak ve Christensen (1974)	SP=(0.00229IP)(1.45c)/w <sub>o</sub> +10.38	Eşitlikten.
Weston (1980)	SP=0.00411(LL <sub>w</sub> ) <sup>4.17</sup> q <sup>-3.86</sup> w <sub>o</sub> <sup>-2.33</sup>	Eşitlikten.
Yılmaz (2006)	%S= 0.155LL - 0.00763CEC - 2.04	Eşitlik ve grafikten (Şekil 3.2).
<b>Not.</b>		PS= muhtemel şişme, % ; q= sürşarj SI= büzülme indeksi= LL-SL, % SL= büzülme sınırı, % ; SP= şişme potansiyeli, % w <sub>o</sub> = doğal su içeriği τ <sub>nat</sub> = doğal zemin su emmesi, tsf
C= kil, % ; CC= koloid içeriği, %		
IL= sıvılık indeksi, % ; LL= likit limit		
LL <sub>w</sub> =ağırlıkça likit limit, % ; LS= lineer büzülme, %		
IP= plastisite indeksi, %		



Şekil 3.1. Zeminlerin çeşitli parametrelere bağlı olarak, şişme sınıflaması.



Şekil 3.2. KDK ve likit limite bağlı olarak şişme potansiyeli sınıflaması (Yılmaz, 2006).



#### 4. ŞİŞEN ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Bazı kil zeminlerin su ile etkileşimde bulunarak kabarmaları, üzerinde var olan mühendislik yapılarında önemli yapısal hasarlar oluşturmaktadır. Şişme potansiyelinin kontrol edilmesi, diğer bir ifade ile karşılanabilir kabarma miktarlarına ulaşmak için farklı içerikte katkı malzemeleri çok eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. Günümüzde kireç, çimento, uçucu kül gibi katkılar ve polimer bazlı poliüretan malzemeler üzere farklı malzemeler kullanarak şişen kil zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi, güncel bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Özellikle kireç katkısı, ucuz oluşu ve diğer katkılara göre şişme potansiyelinin düşürülmesinde daha etkin sonuçlar vermesi açısından stabilizasyon amaçlı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Katkı malzemeleri kullanılarak yapılan iyileştirmelerde zemin mühendislik özellikleri üzerinde etkili olan tepkimelerle ilgili olarak çok sayıda araştırma ve açıklama yapılmıştır. Bunlar; katyon değişimi, kilin flokülasyonu ve pozolanik tepkimeleri içerir. İlk iki tepkime hızlı olur, kürsüz dayanım ve yük-deformasyon özelliklerine ilaveten plastisite, işlenebilirlik ve şişme özelliklerinde ani değişimlere neden olur (Bell, 1988a). Oluşan diğer tepkime pozolanik veya bağlayıcı tepkime olup zamana bağımlıdır. Aglomeralaşma sonucunda artan yapı bütünlüğü, zeminin ilave su tutma kabiliyetinde düşüşe neden olarak şişme potansiyelinin düşmesini sağlar.

##### 4.1. Kireç ve Mermer Tozu ile İyileştirme

Genellikle ince-taneli zeminlerde uygulanır. Zemine kireç eklendiğinde kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bunlar katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyondur ve bunlar pozolanik reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar sırasında genellikle zemindeki tek değerlikli katyonlar, kireçteki iki değerlikli kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirir. Bu katyon değişimi reaksiyonlarıyla killer daha büyük boyutlu parçacıklar oluştururlar. Zemin sertleşerek plastik kıvamdan katı kıvama geçer. Bu sayede de zeminde şu değişiklikler görülür:

- Likit limit azalır
- Plastik limit artar
- Plastisite indisi azalır
- Rötire limiti artar
- Çalışabilirlik artar
- Zeminin dayanım ve deformasyon özellikleri gelişir

Zeminde organik madde bulunması pozolanik reaksiyonları etkilemez ve yaklaşık %2' lik kireç katkısıyla organik malzemenin temel değişim kapasitesi doyurulabilir.

Arazide kireçle stabilizasyon üç şekilde yapılabilir:

1. Mevcut veya dolgu yapılacak zemin, inşaat alanında uygun miktarda kireç katılarak ve su eklenerek karıştırılıp sıkıştırılabilir.
2. Zemin, kireç ve suyla başka bir yerde karıştırılarak dolgu yapılacak yere getirilip sıkıştırılabilir.
3. Sulu kireç 2~2,5m mesafelerle 2~3,5m derinliğe kadar belli bir basınçla enjekte edilebilir. Bu, genleşebilen zeminlerdeki şişmeyi kontrol edebilmek ve mevcut zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanışlı bir tekniktir. Bu yöntem uygulandıktan sonra üst kısımdaki 0,25m'lik zemin uygun tekniklerle sıkıştırılmalıdır.

Mermer tozu en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Bozuk zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Farklı özelliklerdeki zeminlerde, farklı oranlarda şişme potansiyeline etkisinden dolayı iyileştirme yapılacak zemin için katkı miktarının deneylerle belirlenmesi gerekmektedir.

Mermer tozu bir atık olduğu için, zemin iyileştirmesinde kullanılması mermer tozundan kaynaklanan çevre kirliliğinin önlenmesi veya azaltılması yönünde katkı yaparken ekonomi de sağlayacaktır.

## 4.2. Uçucu Küllerle İyileştirme

Uçucu kül alüminyum, silisyum, çeşitli oksitler ve alkaliler içeren pozolanik yapıda bir malzeme olup sönmüş kireçle reaksiyonunda çimentolaşma görülür. Bu yüzden çimentoyla beraber (%10~35 uçucu kül, %2~10 kireç) kullanılarak etkili karışımlar elde etmek mümkündür.

Bundan başka; yapısında kireç bileşeni içeren uçucu küller de vardır ve bunlar normal uçucu küllerle karıştırılarak, kirece ihtiyaç duyulmadan aynı etkiyi gösterecek karışım elde edilebilir. Maliyeti önemli ölçüde azalttığı için tercih edilir.

## 4.3. İyileştirmede Çimento ve Kimyasal Kullanımı

Çimento stabilizasyonu daha çok kumlu ve düşük plastisiteli killi zeminler için uygun bir yöntemdir. Çimento stabilizasyonu için kalsiyum killeri daha uygundur. Genişleyebilir yapıdaki sodyum ve hidrojen killeri kireçle stabilizasyonda daha iyi sonuçlar verir.

Çimento karışımı ile aşağıda verilen özelliklerde iyileştirmeler elde edilebilir.

- Likit limiti azaltır
- Plastisite indeksini artırır
- Killerde çalışabilirliği artırır
- Zeminin dayanımını artırır (kür süresi arttıkça dayanım artar)

Killi zeminler için, 200 No.lu elekten geçen malzeme miktarı %40'tan az, likit limit 45~50'den az ve plastisite indeksi 25'ten az olduğu durumlarda çimento stabilizasyonu etkilidir.

Kireç stabilizasyonunda olduğu gibi zemin bulunduğu yerde çimentoyla karıştırılabilir veya başka bir alanda karıştırılıp inşaat sahasına getirilerek uygun su içeriğinde sıkıştırılabilir. Bunun yanında zemine çimento enjeksiyonu da mümkündür ve bu yöntemle mukavemet artırılır.

Düşük titreşimli makinelerin kullanılacağı türden yapılarda, zeminin titreşim sıklığını azaltmak için de çimento enjeksiyonu uygulanabilir. Organik zeminlerde çimento bağ yapmayacağı için bu yöntem uygulanamaz. Killerde çimento oranı %10'u aştığı takdirde katyon yığılmasından dolayı itme kuvvetleri meydana gelir ve mukavemet düşer.

Kimyasal kullanımı ile yapılan iyileştirmelerde ise polimer, polyester, polietilen ve polipropilen gibi hammaddesi genellikle petrol olan katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

## 5. DENEYSEL YÖNTEM

### 5.1. Kullanılan Bentonit ve Jips' in Özellikleri

#### 5.1.1. Bentonit

Volkanik kül ve tüflerin alterasyonu ve parçalanması (fiziksel) ile oluşan montmorillonit grubu killerce zengin kil yada kayaç; genellikle baydelit içerir. Az miktarda feldispat, biyotit, amfibol, piroksen ve zirkon hemen her zaman bulunur. Ham iken yumuşak kırılğan ele yağsı his verir. Beyazdan sarı bej pembe ve yeşilimsiye değişen renklerde nadiren de kahverengi veya siyah renklerde bulunabilir. Kuru halde yoğunluğu 2.75 g/cm<sup>3</sup> olup su alarak şişme özelliğine sahiptir. Bentonit; kendi hacim ve ağırlığının birçok katı kadar suyu emebilir, kendi hacimlerinin 10 veya 30 katı kadar şişebilir. Suyun silikat düzlemleri arasındaki bentonit kütesine nüfuz etmesi ile genişleyen hacim şişmeyi sağlar.

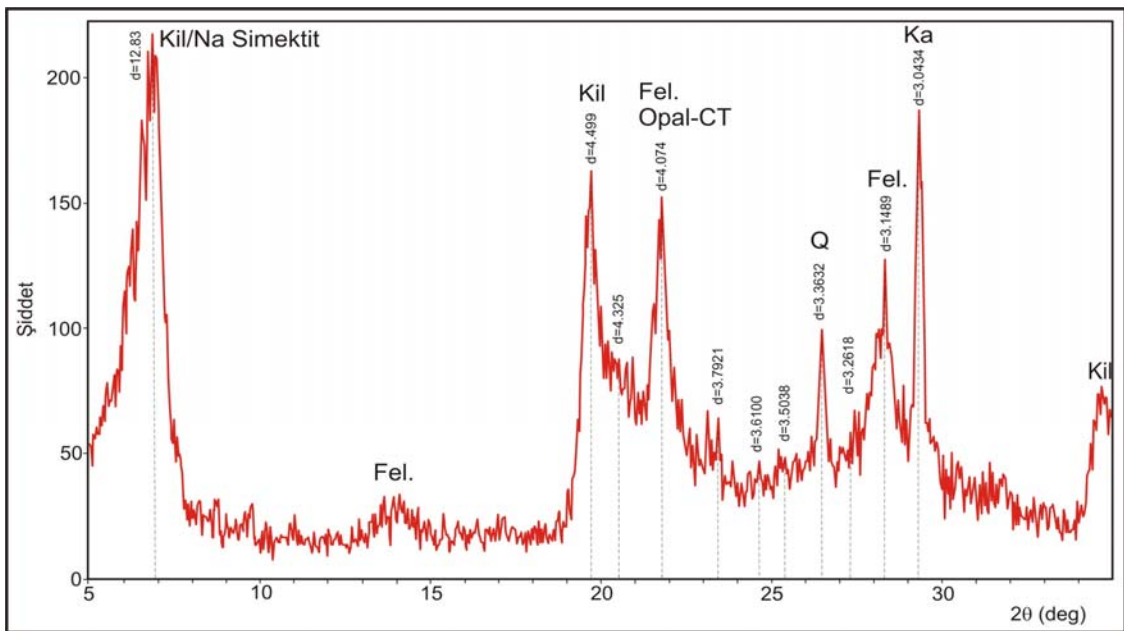
Bentonit ilk kez ABD'de Wyoming eyaletinin Fort Benton yöresinde 1888'de keşfedilmiş ve Knight tarafından 1898'de bu adla adlandırılmıştır. Diğer kil çeşitleri gibi bentonitin de oluşumu ile ilgili çeşitli görüşler ortaya atılmıştır. Kesinlikle bir tanım yapılmamasına karşılık çok kişinin benimsediği bir yol olarak volkanik camın, su ve havanın etkisi ile değişimi sonucu bentonitin meydana geldiği ileri sürülmektedir. Oluşumunda olduğu gibi bentoniti tanımlamada da birçok görüş ayrılıkları bulunmaktadır. Ross ve Shannon içinde % 75 veya daha fazla kristal, kil minerali montmorillonit veya baydelit bulunduran bütün kayaların bentonit adı altında incelenmesi gerektiği görüşünü savunmaktadırlar.

Dünya bentonit rezervleri yaklaşık 2 milyar tondur. Önemli yataklar A.B.D. (toplam rezervin yaklaşık yarısı) Rusya, Yunanistan, Japonya, Almanya, Türkiye ve İspanya'da bulunur. Türkiye'nin bentonit rezervleri yaklaşık 330 milyon tondur. Başlıca bentonit yatakları Reşadiye – Akdoğan (Tokat), Enez (Edirne), Fatsa ve Ünye (Ordu), Kalecik – Hançılı Köyü (Ankara), Tirebolu (Giresun) ve Sağlık (Konya)'da bulunmaktadır (Şekil 5.1). Yerli üretimin büyük bölümü iç piyasada tüketilmektedir.



Şekil 5.1. Bentonit yatakları ve Türkiye’deki dağılımları.

Araştırmada kullanılan bentonit Reşadiye’ nin 25 km kuzeyinde yer alan Samaş A.Ş. tarafından işletilen kil yataklarından alınmıştır. 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 5.2’ 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 5.1’ de verilmiştir.



Şekil 5.2. Kullanılan bentonitlere ait karakteristik XRD difraktogramı.

**Çizelge 5.1.** XRD (Tüm Kayaç) analizi sonuçları ve kullanılan bentonitin kimyasal bileşimi.

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

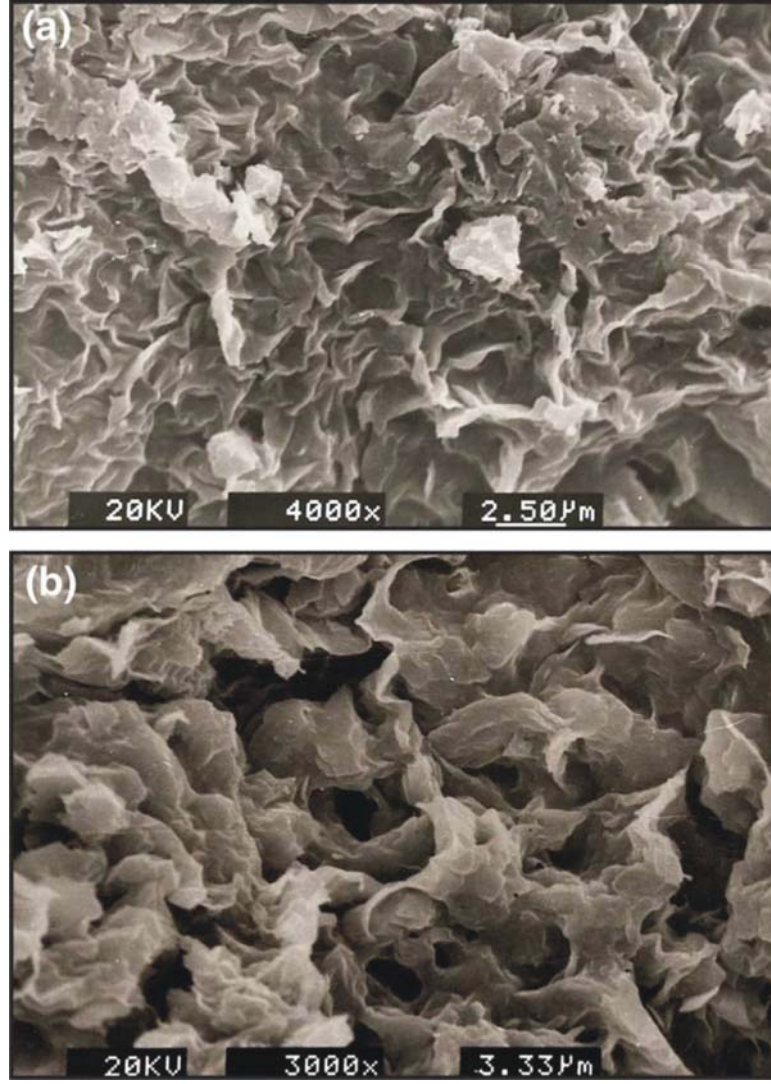
  

<b>Kimyasal Bileşim (Yalçın ve Gümüşer, 2000)</b>	
Silis, SiO <sub>2</sub> (%) olarak	60.11
Titanyum, TiO <sub>2</sub> (%) olarak	0.39
Alüminyum, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) olarak	18.77
Toplam ferrik oksit, ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) olarak	4.82
Manganez, MnO (%) olarak	0.054
Magnezyum,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

Yalçın ve Gümüşer (2000)' in belirttiği gibi; smektit agregaları taramalı elektron mikroskopisi (SEM) fotoğrafında görüldüğü gibi (Şekil 5.3.a) eğik/kıvrımlı, ince ve subhedral lamellidir. Bunlar zayıf derecede sıkışmış, kıvrımlı agregalar olup (Şekil 5.3.b) Wyoming türü (Grim ve Güven, 1978) ve Keller (1978)' in tanımladığı “corn-flake” dokuya sahiptir. Smektit lamelleri ~2–5 µm uzunluğa sahiptir (Yalçın ve Gümüşer, 2000).

### 5.1.2. Jips

CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O kimyasal bileşiminde, monoklin kristalli, renksiz, şeffaf, kil veya demir oksit karışmış hali ile gri, sarı veya kırmızı renkli olabilen bir mineraldir. Jips 120°C' e kadar ısıtılarak kristal suyunun bir kısmı buharlaştırılarak pudra haline getirildikten sonra alçı haline getirilebilir. Bu haliyle; hekimlikte, model yapmada, duvar sıvıları gibi değişik alanlarda çabuk donma özelliği sebebiyle kullanılabilir. Bundan başka; 500 °C veya 1000 °C' ye kadar ısıtılarak elde edilen jips, özel inşaat harçları, suni taş yapımı, jips-beton yapı işleri gibi özel bir kullanım alanına sahiptir.



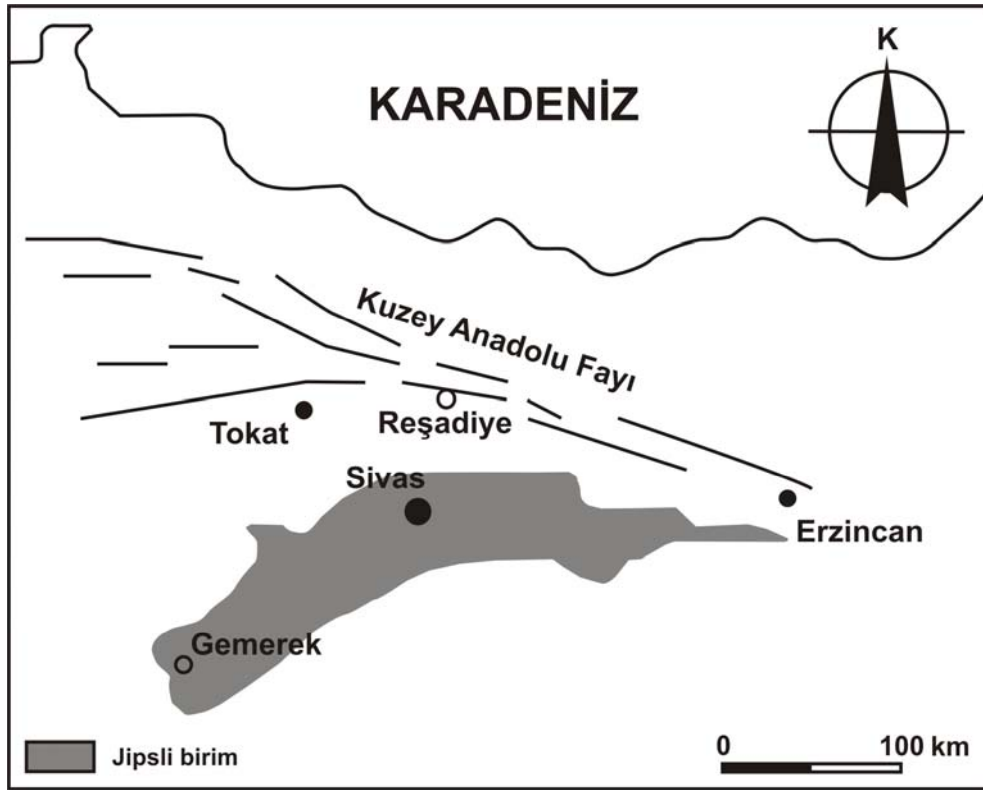
**Şekil 5.3.** Taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları: **a.** smektit lamelleri ve kısa prizmatik klinoptilolitler, **b.** zayıf paketlenme, kıvrımlanmış-lamelli simektit agregatları (Yalçın ve Gümüşer 2000' den).

Doğada kalsiyum sülfat kimyasal bileşiminde bir mineralden oluşan evaporit kayanın, bünyesinde iki molekül kristal suyu bulunan türüne jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ve susuz olanına ise anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ) denir. Kalsiyum sülfat mineralleri evaporit oluşumlu yatakların tipik mineralleri olup, her birinin ayrı ayrı bulunduğu yataklar olmasına rağmen, bu iki mineral çok defa birlikte bulunabilirler.

Dünya'da bilinen ve işletilen jips yatakları çok yaygın olmakla beraber, özellikle Sivas havzasında da kayda değer önemli bir rezerve sahiptir. Havza içerisinde yer alan Hafik formasyonu, batıda Gemerek' ten doğuda İmranlı'ya kadar havzanın kuzey kenarı boyunca uzanan kalın, masif jipsleri içermektedir (Şekil 5.4).



Kurtman (1973)' e göre bu formasyon, tabandan tavana doğru; kırmızı renkli kumtaşı ve konglomeralar, kırmızı renkli kil aratabakalı, tabakalı jipsler ve masif jipslerden meydana gelmektedir. Jipsin daha altındaki tektonik dokanak nedeniyle diğer birimlerle geçişi izlenemediğinden dolayı Hafik formasyonu masif jipslerle sınırlandırılmıştır. Tektonik etkinin fazla olmadığı yerlerde masif jipsler ince ve kalınlıkları 10 m ye ulaşan içerisinde ince taneli kum ve kil içeren düzenli tabakalanma göstermektedir. Buna karşın birçok yerde kalınlığı 100–200 m ye varan masif jipsler gözlenmektedir (Öztürk ve diğ., 1996).

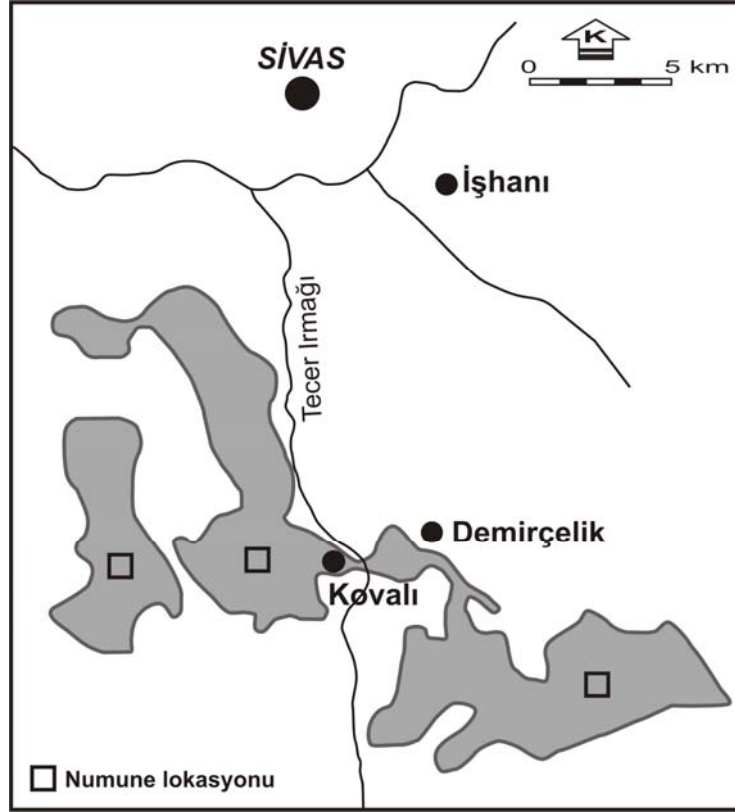


Şekil 5.4. Sivas havzasında jipsin dağılımı (Yılmaz ve Karacan 2005' den).

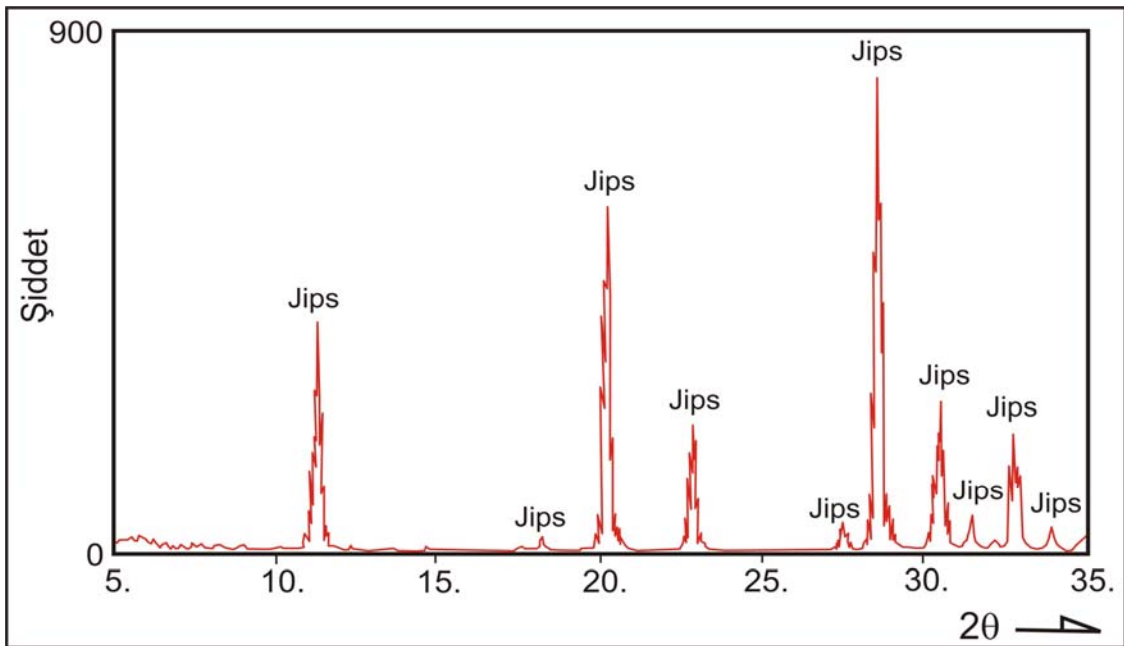
Killi zeminlerin iyileştirilmesi amacı ile gerçekleştirilmiş olan bu tez çalışmasında kullanılan jipsler, Sivas havzasında Kurtman (1973) tarafından adlandırılmış olan Hafik formasyonuna ait masif jipslerden alınmıştır (Şekil 5.5).

Jips numunelerinden alınan parçaların öğütülmesinden sonra X- Işınları Difraksiyonu (XRD) ile tüm kayaç çözümlenmeleri yapılmış olup, karakteristik difraktogram Şekil 5.6' da görülmektedir. Çözümlenmelere göre, numuneleri oluşturan minerallerin tamamı jips olarak değerlendirilmiş olup, jips içeriği %100 dür.

Çözümlemelerde ihmal edilebilir düzeyde de olsa başka bir iz mineraline rastlanmamıştır. Bu sonuçlar, Yılmaz ve Sendir (2002), Yılmaz ve Yüksek (2008 a ve b) tarafından elde edilen sonuçlarla benzerdir.



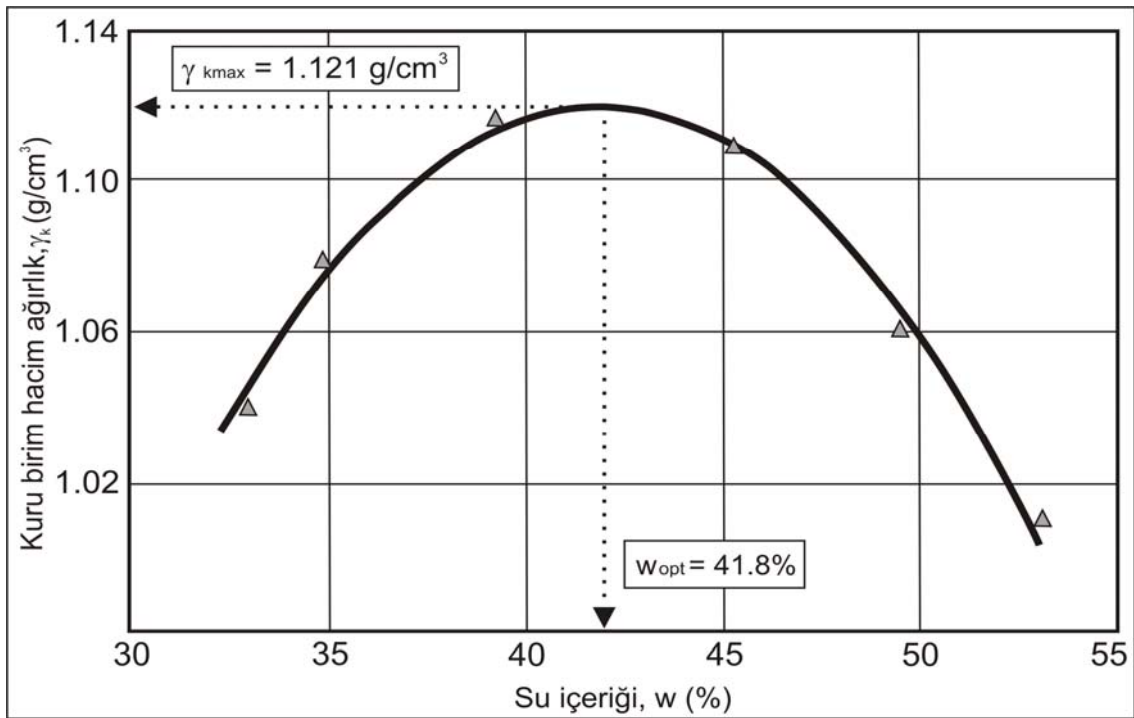
Şekil 5.5. Jips numunelerinin alındığı lokasyonlara ait harita.



Şekil 5.6. Jipse ait karakteristik tüm kayaç XRD difraktogramı.

## 5.2. Numunelerin Hazırlanması

Özellikle serbest basınç dayanımı ve şişme deneylerinde kullanılacak katkısız ve değişik oranlarda (ağırlıkça %2.5, %5, %7.5 ve %10) jips katkısı içeren numunelerin birbirleri ile kompaksiyon derecesi başta olmak üzere benzer özelliklere sahip olması büyük önem taşımaktadır. Ancak bu durumda yapılan deneylerden elde edilen dayanım ve şişme yüzdesi değerleri mukayese edilebilir. Aksi takdirde değerlerin mukayesesi akılcı sonuçların elde edilmesine olanak tanımayacaktır. Bu nedenle; öncelikle katkısız bentonit üzerinde ASTM D-698 (1994) standardına uygun olarak Standart Proktor deneyi gerçekleştirilmiş, maksimum kuru birim hacim ağırlığın elde edildiği optimum su içeriği belirlenmiştir. Yapılan deney sonunda; maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ )  $1.121 \text{ g/cm}^3$  ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) %41.8 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Bentonite ait maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriğini ( $w_{opt}$ ) gösteren kompaksiyon eğrisi.

Katkısız bentonit numunelerinden elde edilen kompaksiyon değerleri kullanılarak ağırlıkça %2.5, %5, %7.5 ve %10 jips karıştırılarak küre bırakılan bentonit numuneleri de kür sonunda %41.8 su içeriğinde sıkıştırılmışlar ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

### 5.3. Katkısız Bentonit' in Özellikleri

#### 5.3.1. Katyon Değişim Kapasitesi (KDK)

Kil minerallerinin katmanları arasında  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  gibi inorganik ve organik katyonlarla yer değiştirebilen katyonlar vardır. Bu inorganik katyonlara “Değişebilen Katyonlar” denir. Montmorillonit mineralinin ve diğer kil minerallerinin 100 gramında bulunan değişebilir inorganik katyonların mili eşdeğer molar kütle sayısına “ Katyon Değişim Kapasitesi ” denir.

Silika tabakasındaki tetraederlerin bazılarının merkezlerine  $\text{Si}^{4+}$  yerine  $\text{Al}^{3+}$  ve  $\text{Fe}^{2+}$  gibi alümina tabakasındaki oktaederlerin merkezlerine ise  $\text{Al}^{3+}$  yerine  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  ve  $\text{Li}^+$  gibi yükseltgenme basamağı daha küçük olan iyonların geçmesi nedeni ile kil mineralleri içinde negatif yük fazlalığı ortaya çıkmaktadır. Bu negatif yük fazlalığı, tabakalar arasına giren katyonlar tarafından dengelenerek, mineral içinde elektronötrallik sağlamaktadır (Rhoades, 1982; Ceyhan, 1996).

Grim (1968)' e göre, kil minerallerinde katyon değişiminin nedenleri başlıca üç başlık altında toplanabilir:

- a. Silika alümina birimlerinin kenarlarındaki kırık bağlar, değişebilir katyonlarla dengelenebilecek doyurulmamış yükler oluştururlar.
- b. Düşük değerlikli iyonların ve tetraeder tabakadaki  $\text{Si}^{4+}$  nın  $\text{Al}^{3+}$ , oktaeder tabakadaki  $\text{Al}^{3+}$  nın  $\text{Mg}^{2+}$  ile yer değiştirmesi sonucu örgü içinde dengelenmemiş yükler oluşur ve bu yüklerin çoğu adsorblanan katyonlar ile dengelenir.
- c. Korumasız hidroksillerin hidrojeni, değişebilir bir katyon ile yer değiştirebilir.

Deneylerde, zeminin önce sodyum iyonları ile doyurulmuş, daha sonra amonyumlu çözelti ilave edilerek, tutulan Na ile  $\text{NH}_4$  iyonlarının yer değiştirilmesi sağlanmış ve  $\text{NH}_4$  ile yer değiştirerek çözeltiliye geçen Na miktarı belirlenmiştir. Sodyum (Na) okumaları alev fotometresinde yapılmıştır. Katyon değişim kapasitesi deneyleri sonucunda Reşadiye kili için KDK değeri 118.7 meq/100g bulunmuştur.

Zeminlerin KDK değerleri, içerdikleri kil minerali türüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Çizelge 5.2’de bazı kil minerallerinin KDK değerleri verilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Bazı kil minerallerinin KDK değerleri (Grim, 1968).

<b>Kil minerali</b>	<b>Katyon Değişim Kapasitesi (meq/100g)</b>
Kaolinit	3-15
Smektit	80-150
İllit ve Klorit	10-40

### 5.3.2. Atterberg sınırları

Likit limit ve plastisite indeksi killi zeminlerde şişebilen kil minerallerinin türüne ve miktarlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişim göstermektedir. Üzerinde çalışılan bentonit numuneleri üzerinde, BS 1377 (BSI, 1975)’ ye uygun olarak likit limit (LL) ve plastik limit (PL) deneyleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.3). Elde edilen likit limit ve plastik limit değerlerine bağlı olarak da plastisite indeksi (Ip) hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; katkısız bentonitin ortalama likit limit değeri %237.3, plastik limiti %50.5 ve plastisite indeksi ise %186.9 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.3.** Katkısız Bentonit’ in Atterberg sınırları değerleri.

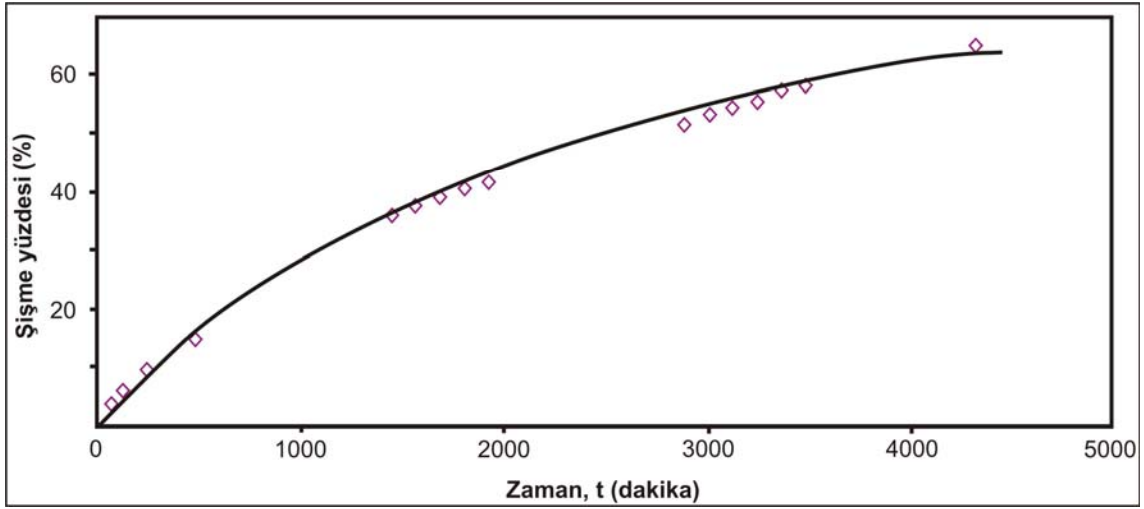
<b>Atterberg sınırları</b>	<b>Değerler</b>
Likit limit (%)	237.3
Plastik limit (%)	50.5
Plastisite indeksi (%)	186.9

### 5.3.3. Şişme

Bentonit numunelerinin şişme yüzdelerini belirlemek amacıyla optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numunelerde ASTM D – 4546 (1994) standartlarına uygun olarak şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 0.07 kg/cm<sup>2</sup> lik ön yükleme basıncı ve 7.5 cm çaplı numuneler kullanılmıştır. 0.07 kg/cm<sup>2</sup> 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.

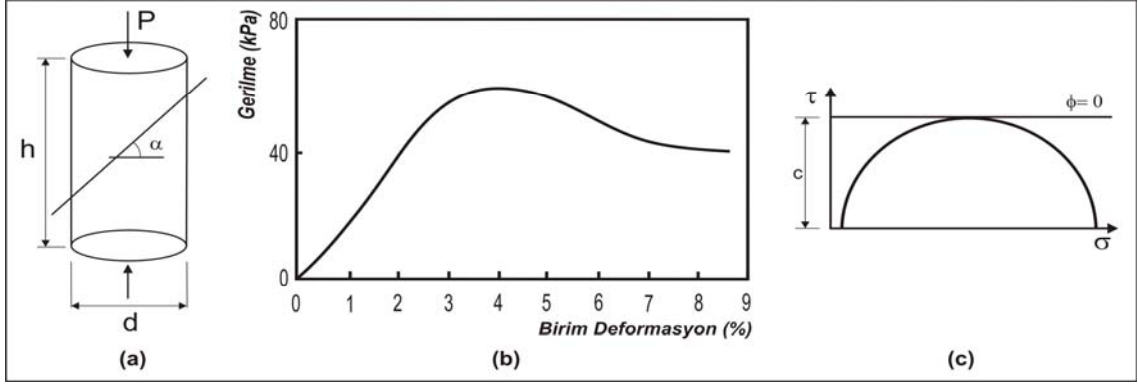
Deneylerde hücre tamamen su ile doldurulduktan sonra serbest şişmeye bırakılan numunedeki şişme değerleri 10–15–30 sn, 1–2–4–6–8–15–30 dk, 1-2-4-8–24–26–28–30–32–48–50–52–54–56–58–72 s olmak üzere periyodik olarak kaydedilmiş ve şişme yüzdesi-zaman (%S-t) grafikleri çizilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Katkısız bentonit şişme deneyinden elde edilen %S-t grafiği.

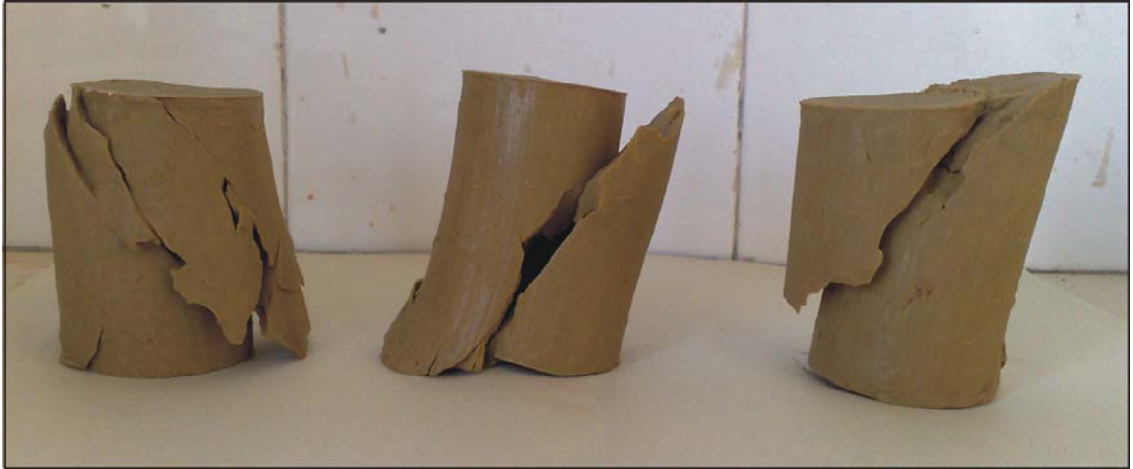
#### 5.3.4. Dayanım

Bentonit kil numunelerinde içsel sürtünme açısının “0” olacağı gerçeğinden dolayı dayanımın belirlenmesi amacıyla serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyinde silindirik numune eksenini doğrultusunda yüklemeye tabi tutulmuştur (Şekil 5.9.a). Eksen boyunca uygulanan yüklere karşılık gelen boydaki kısalmalar ölçülmüş, yük artışı ile meydana gelen çap değişimleri ile ilgili alan düzeltmeleri yapılarak gerilme deformasyon grafikleri elde edilmiştir (Şekil 5.9.b). Deneylerde optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numunelerden 80 mm yükseklik, 38 mm çaplı karotlar kullanılmış olup, ASTM- D 2166 (ASTM, 1994) standardında önerildiği gibi yenilme gerçekleşinceye kadar veya yaklaşık %20 deformasyona ulaşıncaya kadar 1.2 mm/dk sabit yüklem hızı uygulanmıştır. Bu deney üç adet numune üzerinde tekrarlanmış (Şekil 5.10) ve ortalama değer kaydedilmiştir.



**Şekil 5.9.** a) Serbest basınç deneyi, b) Gerilme-deformasyon grafiği , c) Mohr dairesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi.

Gerilme-deformasyon grafiklerindeki aksenal gerilmenin en büyük değeri zeminin serbest basınç dayanımı değeri olarak alınmış, yenilme anındaki gerilme durumunu gösteren Mohr dairesi ve drenajsız kayma dayanımı zarfı (Şekil 5.9.c) çizilerek c (kohezyon) değeri saptanmıştır. Çalışmada kullanılan bentonite ait kayma dayanımı parametreleri  $\phi = 0^\circ$  ve  $c = 58.7$  kPa olarak belirlenmiştir.



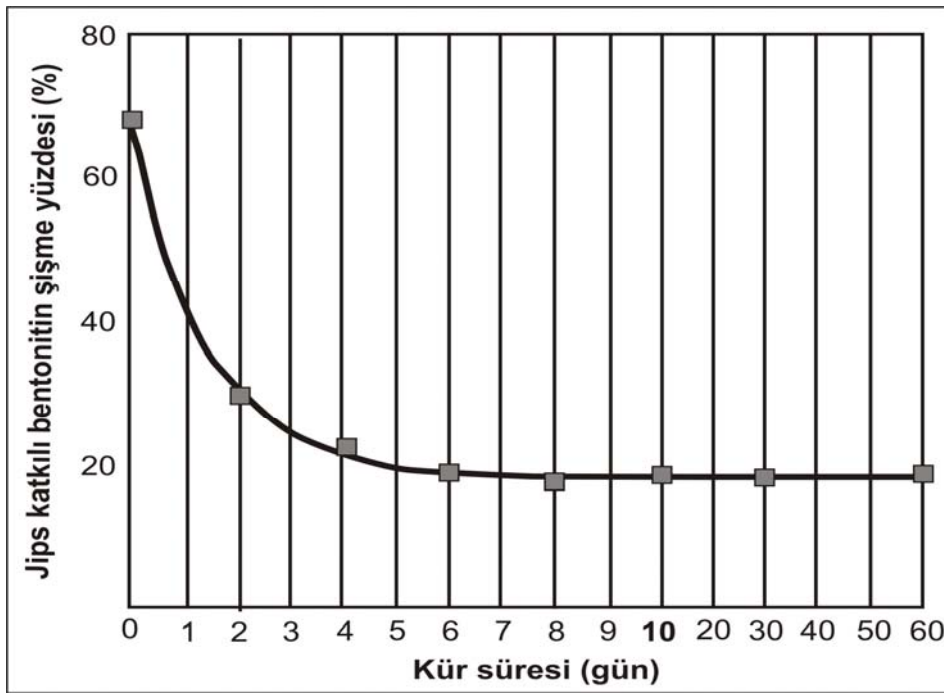
**Şekil 5.10.** Serbest basınç deneyi gerçekleştirilen üç numune.

#### 5.4. Etkin Kür Süresinin Belirlenmesi

Jipsin iyileştirme üzerindeki etkisi, başta kür süresi olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Özellikle kür süresi çok büyük önem taşır. Optimum iyileştirme için gerekli olan kür süresini belirlemek üzere; seçilen en büyük jips katkısı miktarında (ağırlıkça %10) hazırlanan numune, 2 aya kadar (60 gün) değişik kür zamanlarında şişme

yüzdelerinin değişimini belirlemek üzere küre bırakılmıştır. Daha sonra elde edilen şişme değerleri ile kür süresi grafiğe geçirilmiştir (Şekil 5.11).

Kür zamanı – şişme yüzdesi grafiğinde de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 6. kür gününden sonra önemli ölçüde bir değişim olmadığı, değişimin hemen hemen tamamının ilk bir hafta içerisinde hızla gerçekleştiği gözlenmiştir. Buna bağlı olarak, deneylerde kullanılacak kür süresi bir hafta (7 gün) olarak tespit edilmiş, değişik miktardaki jips-bentonit karışımları bir hafta boyunca desikatörde küre bırakılmıştır.



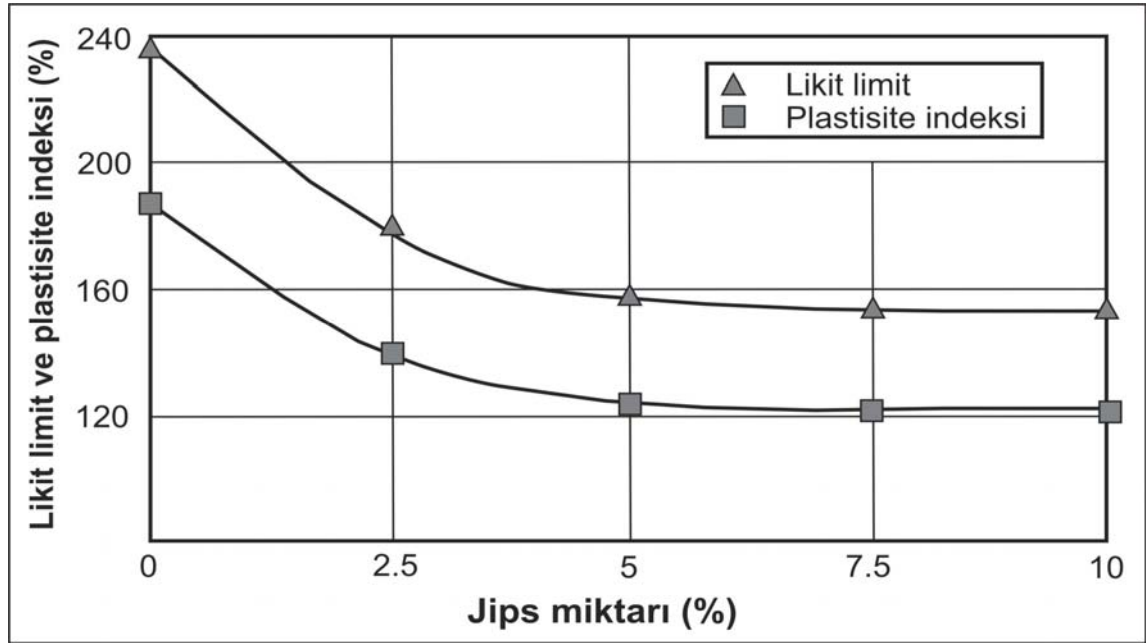
Şekil 5.11. Kür süresine bağlı olarak şişme yüzdesinde azalma.



## 6. JİPS KATKILI BENTONİT' İN ÖZELLİKLERİ VE DEĞİŞİM

### 6.1. Likit Limit ve Plastik Limite Değişim

Katkısız bentonitte yapılan deneylerin ardından, sırasıyla ağırlıkça %2.5, %5, %7.5 ve %10 öğütülmüş jips eklenmiş olan bentonit numunelerinin 7 günlük kür uygulaması sonrasında benzer şekilde Likit limit ve plastik limit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre ise her bir katkı oranı için plastisite indeksi değeri hesaplanmıştır. Jips katkı miktarına bağlı olarak likit limit ve plastisite indeksindeki değişimi (Çizelge 6.1) gösteren grafik Şekil 6.1' de verilmektedir.



Şekil 6.1. Likit limit ve plastisite indeksinin jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi.

Çizelge 6.1. Değişik jips katkısı için bentonitin Atterberg sınırları değerleri.

Jips Miktarı	%0	%2.5	%5	%7.5	%10
Likit limit (%)	237.3	180.7	157.4	155.2	152.8
Plastik limit (%)	50.4	41.2	33.1	33.3	32.0
Plastisite indeksi (%)	186.9	139.5	124.3	121.9	120.8

Likit limit ve plastisite indeksi değerlerinin Şekil 6.1' de görüldüğü gibi %5 jips katkısı düzeyine kadar hızla düştüğü ve sonraki katkı artışlarında ise önemli bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Meydana gelen düşüş yüzdesi; hemen hemen tamamen gerçekleştiği %5 jips katkısında, likit limit için %33.7 ve plastisite indeksi için ise %33.6 olarak hesaplanmıştır.

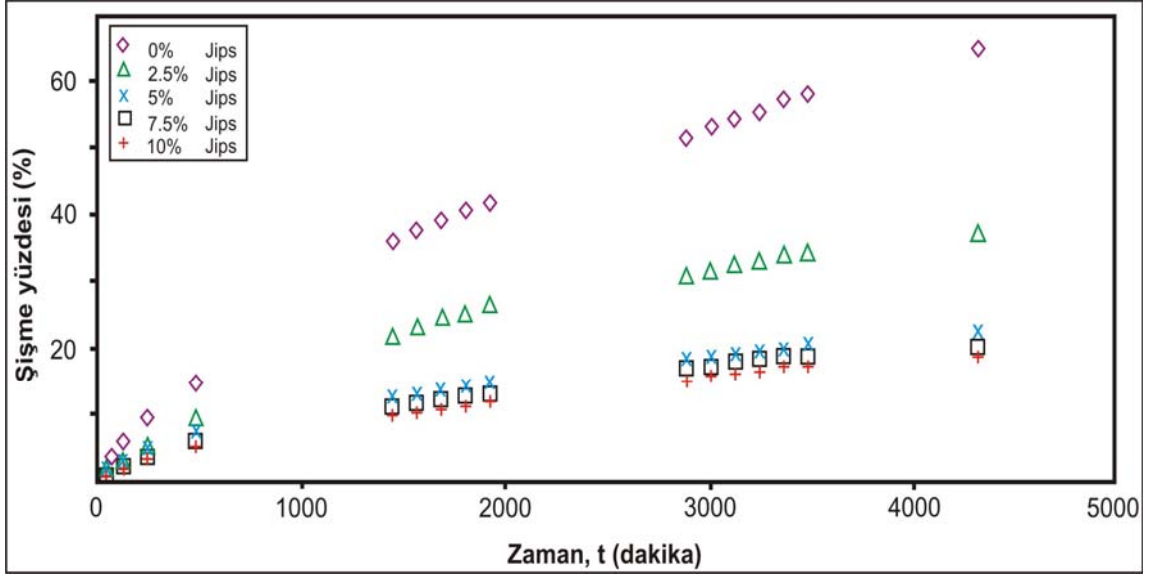
Bentonite jipsin karıştırılmasının bir sonucu olarak, tek değerlikli (monovalent) sodyum iyonlarının kalsiyumla yer değiştirmesi ile çift tabaka kalınlığında (diffuse double layer) meydana gelen azalma, likit limit ve plastik limitteki düşmeye neden olmuştur.

## **6.2. Şişme Potansiyelinde Değişim**

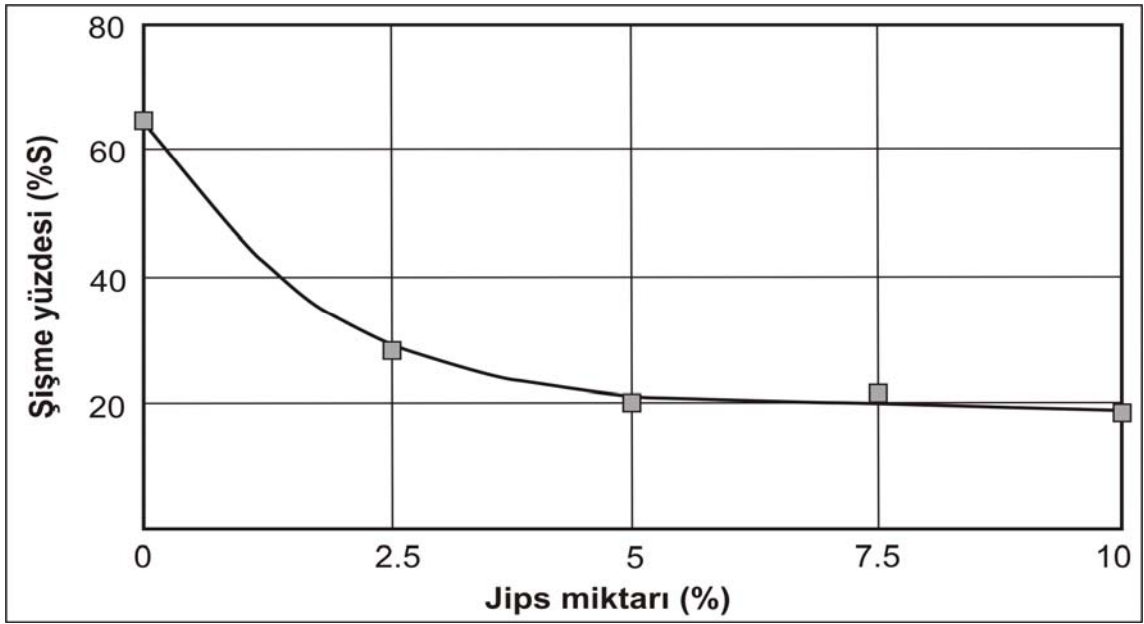
Elektrik yük dengesizliği, sodyumlu kil mineralleri ve KDK bentonitin şişme özelliğini belirler. Sodyum iyonunun inorganik bileşenlerle yer değiştirmesi düşük iyon değişimi kapasitesine neden olur ve zemin yapısındaki elektriksel yük dengelenir. Bunun bir sonucu olarak, killerin şişme potansiyeli düşer.

Katkısız bentonitte yapılan şişme deneylerinden sonra, katkı miktarına bağlı olarak şişme yüzdesindeki değişimi izlemek üzere deney aynı şekilde ağırlıkça %2.5-5-7.5-10 jips katkısına sahip bentonit numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlardaki karışımlar için elde edilen şişme yüzdesi-zaman grafikleri (Şekil 6.2) %2.5 dan %5 e çok yüksek şişme yüzdesi düşüşünü, ancak sonraki miktarlarda ise artan jips miktarlarında şişme yüzdesi-zaman eğrilerinin birbirlerine çok yaklaşarak neredeyse benzer eğriyi takip ettiklerini göstermiştir.

Değişik oranlarda jips katkısı için bentonitin şişme yüzdesi değişimi değerleri Çizelge 6.2' de ve şişme yüzdesindeki azalma eğilimi ise Şekil 6.3' de verilmektedir. Şekil 6.3' de de görüldüğü gibi; önemli düzeyde ve dikkate alınabilir değişim yaklaşık %5 jips katkı miktarı için elde edilmiş ve bu oran etkin iyileştirme için gerekli olan katkı miktarı olarak kabul edilmiştir. Daha fazla miktarlardaki jips katkısının daha fazla iyileştirmeye neden olmayacağı söylenebilir.



Şekil 6.2. Farklı jips katkı miktarına sahip bentonitlerin şişme yüzdesi-zaman grafikleri.



Şekil 6.3. Şişme yüzdesinin jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi.

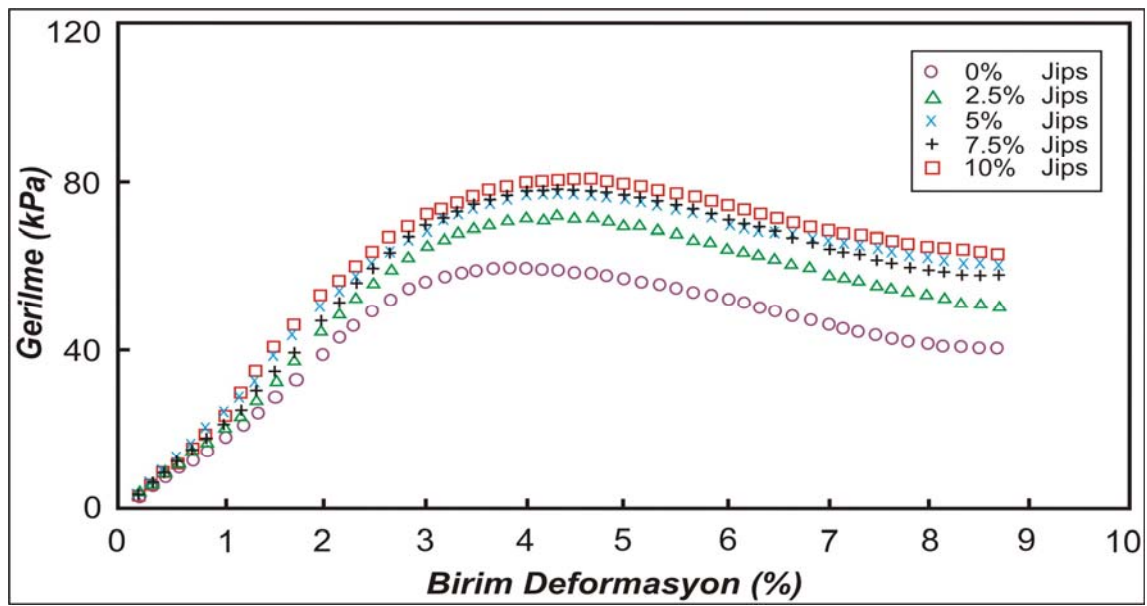
Çizelge 6.2. Değişik jips katkısı için bentonitin şişme yüzdesi değişimi değerleri.

Jips Miktarı	%0	%2.5	%5	%7.5	%10
Şişme Yüzdesi (%)	64.9	28.2	20.1	20.5	19.8

Bentonitteki yer deęiřtirebilir tek deęerlikli iyonların jipsteki kalsiyum iyonları ile yer deęiřtirmesinin sonucu olarak, %5 jips katkısına sahip bentonitte řiřme yüzdesi ortalama %69.1' lik deęiřimle %64.9' dan %20.1' e dūřmüřtür (řekil 6.3).

### 6.3. Dayanımda Değişim

Genellikle ~%5 lik deformasyonlarda yenilmelerin meydana geldiği (şekil 6.4) serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon grafiklerinden belirlenen pik değerleri kullanılmıştır.



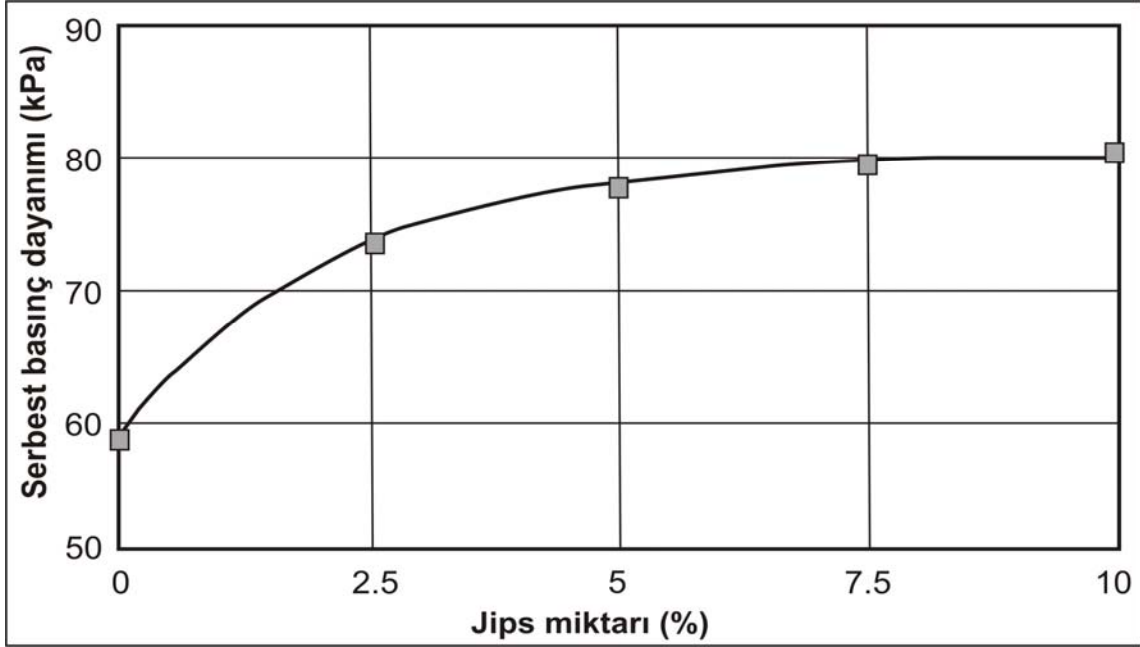
şekil 6.4. Farklı jips katkı miktarına sahip bentonitlerin gerilme-deformasyon grafikleri.

Bentonitin dayanımının jips katkısına bağlı olarak artması da bu tez çalışmasının önemli bir sonucudur. Jips katkısı sonucunda ilk 7 gün içerisinde önemli düzeyde dayanım artışı meydana gelmiş ve pik dayanım değeri elde edilmiştir. 7 günden sonra ise dikkate alınır bir artış gerçekleşmemiş olup, 7 günlük kür sonunda %5 jips katkısında %31.9' luk dayanım artışı gözlenmiştir. şişmedekine benzer şekilde; şekil 6.4 ayrıca %5' lik katkıdan itibaren artan jips miktarlarında gerilme-birim deformasyon eğrilerinin artık birbirlerine çok yaklaştığını ve hemen hemen aynı çizgiyi takip ettiklerini de göstermektedir.

Jips katkı miktarına bağlı olarak serbest basınç dayanımındaki kazanımlar izelge 6.3' de, %2.5-5-7.5-10 katkı oranları ile dayanım değişimi ise şekil 6.5' verilmektedir.

**Çizelge 6.3.** Değişik jips katkısı için bentonitin serbest basınç dayanımı değerleri.

Jips Miktarı	%0	%2.5	%5	%7.5	%10
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	58.7	73.1	77.4	79.6	80.1

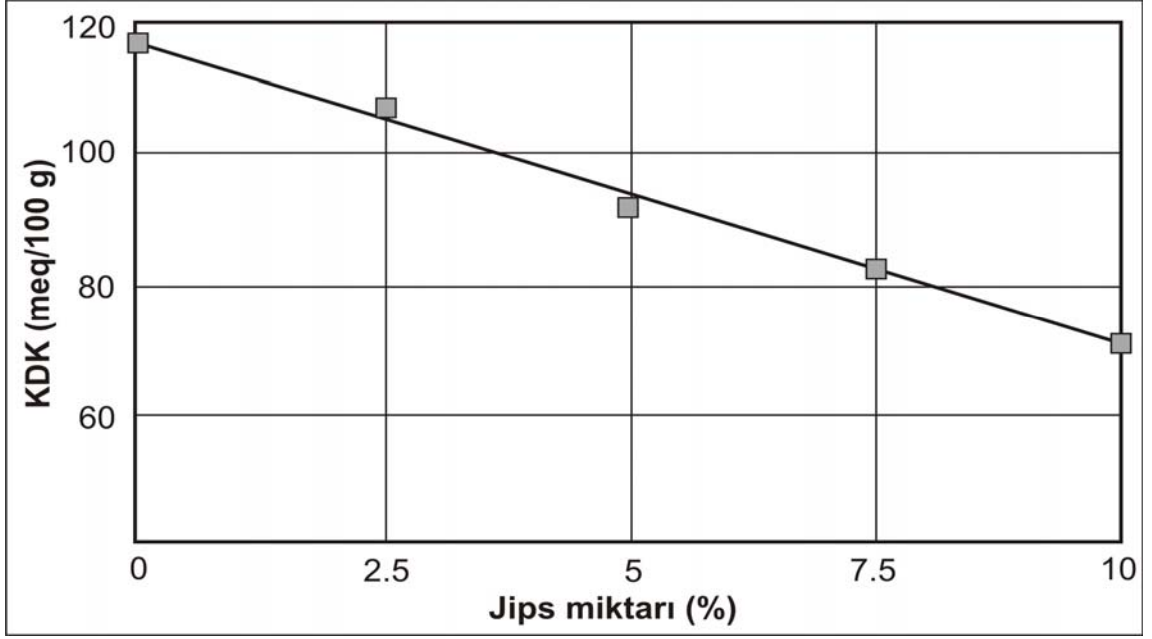


**Şekil 6.5.** Serbest basınç dayanımının jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi.

#### 6.4. Katyon Değişim Kapasitesinde Değişim

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, jipsin bentonite karıştırılması ile katyon değişim kapasitesinde de önemli düzeyde bir düşüş olduğu belirlenmiştir. Düşme şeklinde meydana gelen bu değişimin nedeni, bentonitteki tek değerlikli iyonların jipsteeki kalsiyum iyonları ile yer değiştirmesidir.

Katkısız bentonitten itibaren %10 jips katkısına ulaşıldığında KDK' da meydana gelen değişim miktarı %40 civarındadır. Bu çalışmada elde edilmiş etkin iyileştirme için gerekli olan %5 jips katkısındaki değişim ise %21.9 olarak elde edilmiştir. Katkı miktarına bağlı olarak KDK' nın değişimi Şekil 6.6' da, her bir katkı miktarı için KDK değerleri ise Çizelge 6.4' de görülebilir.



Şekil 6.6. Katyon değişim kapasitesinin jips katkı miktarına bağlı olarak değişimi.

Çizelge 6.4. Değişik jips katkısı için bentonitin KDK değerleri.

Jips Miktarı	%0	%2.5	%5	%7.5	%10
<i>KDK (meq/100 g)</i>	118.7	106.2	92.7	82.2	71.2

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, killerin jips katkısı ile iyileştirilmesi ve bu katkı maddesinin fiziksel, şişme ve dayanım üzerindeki etkileri araştırılmış, aşağıda verilen temel sonuçlar elde edilmiş ve tartışılmıştır.

1. Başta özellikle kür süresi olmak üzere, jips katkısının iyileştirme bakımından etkisi birçok faktöre dayanır. Çalışmada, optimum iyileştirme için gerekli olan etkin kür süresi, eklenmesi düşünülen maksimum jips katkısına sahip (%10) bentonit için şişme yüzdesinin kür zamanına (2 aya kadar) bağlı olarak değişimini gösteren grafikten (Şekil 5.11) elde edilmiştir. Elde edilen grafikten de görüldüğü gibi değişimin tamamının ilk bir hafta içerisinde hızla gerçekleştiği gözlenmiş olup, deneylerde kullanılacak kür süresi 7 gün olarak tespit edilmiştir.
2. Jips katkı miktarına bağlı olarak likit limit ve plastisite indeksindeki değişimi gösteren Şekil 6.1' de görüldüğü gibi, %5 jips katkısında likit limit %33.7 ve plastisite indeksi ise %33.6 düşmüştür. Tek değerlikli sodyum iyonlarının kalsiyumla yer değiştirmesi ile çift tabaka kalınlığında (diffuse double layer) meydana gelen azalma likit limit ve plastik limitteki düşmeye neden olmuştur.
3. Bentonitteki yer değiştirebilir tek değerlikli iyonların jipsteki kalsiyum iyonları ile yer değiştirmesinin sonucu olarak, %5 jips katkısına sahip bentonitte şişme yüzdesi ortalama %69.1' lik değişimle %64.9' dan %20.1' e düşmüştür (Şekil 6.3).
4. Bentonitin dayanımının jips katkısına bağlı olarak artması da bu tez çalışmasının önemli bir sonucudur. 7 günlük kür sonunda %5 jips katkısında %31.9 luk dayanım artışı gözlenmiştir.
5. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, jipsin bentonite karıştırılması ile katyon değişim kapasitesinde de önemli düzeyde bir değişim olduğu belirlenmiştir. Düşme şeklinde meydana gelen bu değişimin nedeni, bentonitteki tek değerlikli iyonların jipsteki kalsiyum iyonları ile yer değiştirmesidir.
6. Her ne kadar şişen killer günümüzde yaygın olarak özellikle kireç katkısı ile iyileştirilebiliyor olsa da, jipsin özellikle Sivas havzasında yaygın olması ve endüstriyel sektörde kullanılan jipsin atıklarının da değerlendirilebilme

olanağı ile jipsin kirece göre yaklaşık 2-3 kez ucuzluğu, jips katkısı kullanımı bakımından önemli avantajları oluşturmaktadır.

7. Yalnızca %5 jips katkısı ile şişebilen killerin etkin şekilde iyileştirilebileceği gerçeği de jipsin ekonomik bir katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.
8. Bu tez çalışmasının sonuçları, şişebilen killi zeminlerin jipsle etkin bir şekilde iyileştirilebileceğini ve jipsin iyi bir katkı maddesi olduğunu göstermiştir. Ancak, jipse bağlı olarak yeraltısuyu kirlenme olasılığı söz konusu olabilir. Bundan başka, jipsle temas olasılığı olan beton yapıların olumsuz etkilenmemesi için sülfat dirençli imento kullanımına ihtiyaç duyulabilir.



## 8. KAYNAKLAR

- Akawwi, E., Kharabsheh, A. (2000). Lime stabilization effects on geotechnical properties of expansive soils in Amman, Jordan. *Journal of Geotechnical Engineering*, 5.
- Amu, O.O., Fajobi, A.B., Afekhuai, S.O. (2005). Stabilizing potential of cement and fly ash mixture on expansive clay soils, *Journal of Applied Sciences*, 5, 9, 1669-1673.
- Ameta, N.K., Prohit, D.G.M., Wayal, A.S., Sandeep, D. (2007). Economics of stabilizing bentonite soil with lime-gypsum, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 12, Bundle E.
- Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 1, 193-203.
- ASTM (1994). *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Volume 04.08 – Soil and Rock.
- Basma, A.A., Tuncer, E.R. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays, *Transportation Research Record*, 1295, 52-61.
- Baytar, A. Ö. (2005). Uçucu Kül Ve Desülfojipsin Çayırhan Zemininin Geoteknik Özellikleri Üzerindeki Etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 82s.
- Bell, F., Coultherd, J. (1990). Stabilization of clay soils with lime, *Municipal Engineer*, 7, 125–140.

- Bell, F.G., Maud, R.R. (1994). Dispersive Soils and Earth Dams with Some Experiences From South Africa, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31, 4, 433-446
- Bell, F.G., Maud, R.R. (1995). Expansive clays and construction, especially of low-rise structures: a viewpoint from Natal, South Africa, *Environmental and Engineering Geoscience*, 1, 41-59.
- Brandl, H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime, *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 587-594.
- Broms, B., Boman, P. (1979). Lime columns-a new foundation method, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105, 539-556.
- BS 1377 (1975). *Methods of test for soils for civil engineering purposes*, British Standards Institution, London.
- Ceyhan, Ö. (1996). İnorgano- ve organo- killer tarafından bazı organik kirleticilerin sıvı fazı adsorbsiyonu. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 102 s.
- Chen, F.H. (1988). *Foundation on Expansive Soils*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Coduto, D.P. (1999). *Geotechnical Engineering, Principles and Practices*, Prentice Hall, NJ, 759 p.
- Çetiner, S. I. (2004). Şişen Zeminlerin Çayırhan Uçucu Külü Ve Desülfojips İle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 107 s.
- Dhowian, A., Ruwiah, I., Erol, A. (1985). The distribution and evaluation of expansive soils in Saudi Arabia, In: *Proceedings 2nd Saudi Engineering Conference*, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, 4, 1969-1990.

- Donaldson, G.W. (1969). The occurrence of problem heave and the factors affecting its nature, Proceedings, 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas, A & M Press, College Station, TX.
- Edral, C. (1999). Effect of fly ash on swelling pressure of expansive soil, J Geotech Eng 4.
- El-Rawi, M.N., Awad, A.A.A. (1981). Permeability of lime stabilized soils, Journal of Transportation Engineering Division, ASCE, 107, 25-35.
- FIPR (Florida Institute of Phosphate Research) (1988). Stabilization of phosphatic clay with lime columns, Report prepared by Bromwell and Carrier Inc. under a grant sponsored by the Florida Institute of Phosphate Research, Bartow-Florida, 102 p.
- Gibbs, H. J. (1969). Discussion of Holtz W.G. The engineering problems of expansive clay subsoils, Proceedings of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M Press, 478-479.
- Gillot, E. J. (1968). Clay in Engineering Geology, Elsevier, Amsterdam, 296 p.
- Grim, R.E., Güven, N. (1978). Bentonites:Geology, Mineralogy, Properties and Uses, Developments in Sedimentology, Elsevier, Amsterdam, 24.
- Grim, R.E. (1968). Clay Mineralogy, 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill, New York, 596p.
- Gürer, C., Akbulut H. ve Kurklu G. (2004). Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 Mayıs, İzmir, 28-36.
- Holtz, W. G. (1959). Expansive clays-properties and problems. Journal of the Colorado School of Mines, 54, 4, 89-125.

Holtz, W. G. (1969). Volume change in expansive clay soils and control by lime treatment, Proceedings of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M Press, pp. 157-173.

<http://www.agric.nsw.gov.au>

Ji-ru, Z., Xing, C. (2002). Stabilization of expansive soil by lime and fly ash, Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition, 17, 73-77.

Kamon, M., Nontanandh, S. (1991). Combining industrial wastes with lime for soil stabilization, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117, 1-17.

Kasapoğlu, K. E. (1989). Killerin jeo-mühendislik özellikleri, IV. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitapçığı, 3-29.

Keller, W.D. (1978). Classification of kaolins exemplified by their textures in scan electron micrographs, Clays and Clay Minerals, 26, 1-20.

Kennedy, T., Smith, R., Holgreen, R., Tahmoressi, M. (1987). An evaluation of lime and cement stabilization, Transportation Research board, Washington, D.C. TRR (1119), 11-25.

Kurtman, F. (1973). Sivas-Hafik-Zara ve İmranlı bölgesinin jeolojik ve tektonik yapısı, M.T.A. Dergisi, 80, 1-32.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1959). The role of effective stress in the behaviour of expansive soils, Quarterly of Colorado School of Mines, 54, 4, 33-61.

Locat, J., Berube, M.A., Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development, Canadian Geotechnical Journal, 27, 294-304.

- Mathew, P.K., Narasimha, R.S. (1997). Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123, 183-185.
- Muntohar, S., Hantoro, G. (2000). Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade, *Journal of Geotechnical Engineering*, 5.
- Nalbantoğlu, Z., Gbilmez, E. (2001). Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid Environments, *Journal of Arid Environments*, 47, 453–463.
- Okagbue, C.O., Onyeobi, T.U.S. (1999). Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction, *Engineering Geology*, 53, 371–380.
- O'Neill, M.N., and Poormayed, N. (1980). Methodology for foundations on expansive clays, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 106, 1345-1367.
- Oweiss, I. and Bowman, J. (1981). Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 107, 319-338.
- ztrk, A., İnan, S., Grsoy, H., Kavak, K. Ő. ve zden,S. (1996). Tectonic setting and evolution of the Sivas basin, Central Anatolia, Turkey, *International Geology Review*, 38, 838-853.
- Rhoades, J. D. (1982). Cation exchange capacity, In: *Methods of Soil Analysis Part 2*, (C.A. Black, Ed), American Society of Agronomy, Madison,149-157.
- St İ. (2006). Kohezyonlu Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesinin CBR Değeri zerindeki Etkisinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Taşpolat, L. T., Zorluer İ. ve Koyuncu H. (2006). Atık Mermer Tozunun Geirimsiz Kil Tabakalarda Donma - zlmeye Etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2, 11–16

- Terashi, M., Tanaka, H., Niidome, Y., Sakanoi, H. (1980). Permeability of treated soils, Proceedings, 15th Japan Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 773-776.
- Tonoz, M.C., Gokceoglu C. and Ulusay R. (2003). A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 62, 91–106.
- Tonoz, M.C., Ulusay, R., Gokceoglu, C. (2004). Effects of Lime Stabilization on Engineering Properties of Expansive Ankara Clay, Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe, 100, 466-474.
- Townsend, D.C., Kylv, T.W. (1966). Durability of lime-stabilized soils, Highway Research Board Bulletin, 139, 25-41.
- Transportation Research Board (1987). Lime stabilization: reaction, properties, design and construction, Committee on Lime and Lime-fly ash Stabilization, State-of-the-Art-Report, 5, Washington, D.C., 1-59.
- Unsal, N. (1993). Sekiz Katlı 3 Üniteli Manisa Öğretmenevi İnşaatında Uygulanan Sönmüş Kireçtozu İle Zemin Islahı, Bayındırlık Ve İskan Müdürlüğü, Manisa, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Sayı 43, 82-84.
- Ülker, Ş. (2005). Karayolu Altyapısında Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yalçın, H., Gümüşer, G. (2000). Mineralogical and geochemical characteristics of late Cretaceous bentonite deposits of the Kelkit Valley Region, northern Turkey, Clay Minerals, 35, 807-825.
- Yeşilbaş, G. (2004). Şişen Zeminlerin Agrega Artığı, Taş Unu Ve Kireç Kullanılarak Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 112s.

- Yılmaz, I. and Karacan, E. (1997). Geotechnical properties of alluvial soils: an example from south of Sivas (Turkey), *IAEG Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 55: 159-165.
- Yılmaz, I., Karacan, E. (2005). Slaking durability and its effect on the doline occurrence in the gypsum, *Environmental Geology*, 47 (7), 1010-1016.
- Yılmaz, I., Sendir, H. (2002). Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and elasticity modulus in gypsum from Sivas (Turkey), *Engineering Geology*, 66, 211-219.
- Yılmaz, I., Yüksek, A.G. (2008.a). An example of artificial neural network application for indirect estimation of rock parameters, *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 41 (5), 781-795.
- Yılmaz, I., Yüksek, A.G. (2008.b). Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, ANFIS models and their comparison, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 46 (4): 803-810.
- 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.a). The effect of swelling clays on a water transport canal between Köklüce HPP and Erbaa HPP (Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66 (4), 467-472.
- Yılmaz I. (2007.b). *Mühendislik Jeolojisi – İlkeler ve Temel Kavramlar*, Teknik Yayınevi, Ankara, 490 s.
- Yılmaz, I. (2008). A case study for mapping of spatial distribution of free surface heave in alluvial soils (Yalova, Turkey) by using GIS software, *Computers & Geosciences*, 34 (8), 993-1004.

Zha, F., Liu, S., Du, Y. and Cui, K. (2008). Behavior of expansive soils stabilized with fly ash, Springer Science+Business Media B.V. Natural Hazards DOI 10.1007/s11069-008-9236-4

Zorluer, İ. ve Usta, M. (2003). Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem '2003) Bildiriler Kitabı, 18-19 Aralık, 305-311.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Berrin Civelekoğlu
Doğum Yeri ve Tarihi	Kastamonu, 03/03/1984
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	berrin.civelekoglu@cumhuriyet.edu.tr

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Göl Anadolu Öğretmen Lisesi, 2002
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2007
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi

### İş Tecrübesi

Cumhuriyet Üniversitesi	Öğrenci Araştırma Görevlisi, 2008-2009
-------------------------	--

### Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler

TÜBİTAK	Yayın Teşvik Ödülü, 2009
---------	--------------------------