

58208

**ÇEVRESEL KİRLİLİK ŞARTLARININ  
BENTONİT KİLİNİN ŞİŞME/BÜZÜLME  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

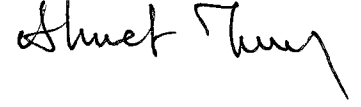
**MUHSİN YALÇIN**  
Yüksek Lisans Tezi

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**EKİM - 1997**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**OKUMANTASYON MERKEZİ**

Muhsin YALÇIN'ın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı “Çevresel Kirlilik Şartlarının Bentonit Kilinin Şişme/Büzülme Özelliklerine Etkisi” başlıklı tez 8.10.1997 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Lisansüstü Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye (Tez Danışmanı) : Doç.Dr. Ahmet TUNCAN



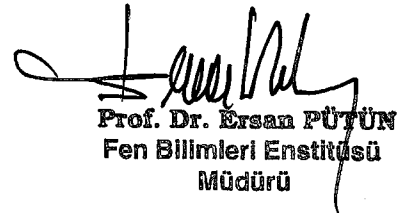
Üye : Doç.Dr. Mustafa TUNCAN



Üye : Yard.Doç.Dr. Gülgün ÜNAL



Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
.....8.10.1997.....tarih ve ...18./13.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Ersan PÜTÜN  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Müdürü

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇEVRESEL KİRLİLİK ŞARTLARININ BENTONİT KİLİNİN ŞİŞME/BÜZÜLME ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİ

MUHSİN YALÇIN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Ahmet TUNCAN

1997, Sayfa 97

Bu çalışmada, çevresel kirlilik şartları altında distile su ile sıkıştırılmış bentonit kilinin şişme/büzülme özellikleri belirlenmiştir. Sıkıştırılmış aktif kil minerali içeren zeminler üzerine gerekli önlemler alınmadan inşa edilen karayolu, demiryolu ve havaalanı kaplamaları, sulama kanalları, akaryakıt tankları, petrol boru hatları, istinat duvarları ve çöp depolama alanları gibi yapılarda mevsimsel ve çevresel kirlilik şartlarından dolayı önemli boyutlarda hasarlar meydana gelmektedir. Zeminde meydana gelen şişme olayının üst yapıda meydana getireceği hasarları azaltmak için zeminin değişik çevresel kirlilik şartları altındaki şişme potansiyelinin ve şişme basıncının önceden belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle suya doygun olmayan killi zeminlerin su emmeleri sonunda meydana gelen hacim artışı şişme potansiyeli olarak tanımlanmakta ve kil minerali cinsi, su muhtevası, zeminin kirlilik durumu ve kompaksiyon enerjisi gibi faktörlerle etkilenmektedir. Buharlaşmadan veya zemin içindeki sıvının azalmasından dolayı büzülme meydana gelmekte ve böylece zemin sıkışmaktadır.

Yapılan çalışmaları iki bölümde toplayabiliriz. Birinci bölümde, sıkıştırılmış bentonit kilinin distile su, tuzlu su, çöp suyu ve gazyağı gibi çevresel kirlilik şartları altındaki serbest şişme miktarı ve şişme basıncı belirlenmiştir. Öncelikle, bentonit kili standart kompaksiyon deneyine tabi tutularak optimum su muhtevası belirlendi. Optimum su muhtevasında proktor kalıbında hazırlanan numuneden 2 ayrı numune ödometre (konsolidasyon) hücresine alındı. Numunelerden birine 0.07 kg/cm<sup>2</sup> düşey gerilme uygulanarak zamana bağlı şişme miktarı ölçülmüştür. Daha sonra ıslanma/kuruma çevrimleri uygulanarak bentonit kilinin şişme/büzülme davranışları belirlenmiştir. Diğer numune üzerinde ise, sıkıştırılmış bentonit kilinin şişme basıncı belirlenmiştir. Daha sonra ıslanma ve kuruma çevrimleri uygulanarak şişme/büzülme davranışları belirlenmiştir. Bu deneyler her bir çevresel kirlilik şartlarında yapılmıştır. İkinci bölümde ise, bentonit kiline belirli oranlarda kireç ilavesi yapılarak bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerinin ıslahı yapılmıştır.

Bentonit kili distile suda en yüksek kabarma potansiyeline sahipken, tuzlu suda en düşük kabarma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Çünkü, yüksek tuz konsantrasyonunda daneler arasında agregasyon ve flokulasyon meydana gelmekte ve dolayısıyla kil daneleri daha az şişmektedir. Distile suda bentonit kili en yüksek kabarma basıncına sahipken, tuzlu suda en düşük kabarma basıncına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, beklenildiği gibi fazla şişen zeminlerdeki şişme basıncının yüksek olduğunu göstermektedir. Çöp suyu ve gazyağı şartlarında ise şişme özellikleri distile suya göre daha az oranda meydana gelmiştir. Deneysel çalışmalar sıkıştırılmış bentonitin her bir çevrimden sonra kabarma ve büzülme davranışının azaldığını göstermiştir. Sıkıştırılmış bentonite belirli oranlarda kireç ilavesi sonucunda şişme özelliklerinde önemli derecede azalmalar görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler :** Bentonit, kireç, flokulasyonlu yapı, agregasyonlu yapı, serbest şişme, şişme basıncı, distile su, tuzlu su, çöp suyu, gazyağı

**ABSTRACT**  
**Master of Science Thesis**

**THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION CONDITIONS ON SWELL AND SHIRNK  
PROPERTIES OF BENTONITE CLAY**

**MUIHSİN YALÇIN**

**Anadolu University**  
**Institute of Technical Sciences (Graduate School)**  
**Civil Engineering Division**

**Supervisor : ASSOC. Prof. Ahmet TUNCAN**  
**1997, Page 97**

In this study, swell/shrink properties of compacted bentonite clay with distilled water were determined under environmental pollution conditions. Civil Engineering structures such as highway pavement, railway, airport pavement, irrigation channels, oil storage reservoirs, underground pipe lines, retaining walls and municipal landfills built on soils contained active clay minerals such as montmorillonite are subjected to large damages due to the seasonal changes and different environmental conditions. Swelling potential and swelling pressure of clays should be known under changing environmental conditions to reduce or prevent damages of the upper part of structures. When the unsaturated expansive clays absorb water, it swells. This is called swelling potential. Swelling potential of clays depends on some factors such as type of clay minerals, water content, properties of pollutants and compaction effort. Shrinkage of clays can occur when the expansive clays lose their moisture or water.

This study can be divided into two groups. In the first group, environmental pollution effects such as distilled water, saline water, kerosene and municipal leachate on swelling potential and swelling pressure of compacted bentonite clay were determined. First of all, optimum moisture content of bentonite clay was determined by using standard compaction test. Then, two samples prepared at optimum moisture content were placed in oedometer test apparatus. Swelling potential was determined under  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  pressure on one of the samples. Then, wet/dry cycles were applied to determine swell and shrink behavior of compacted bentonite clay. Swelling pressure was also determined by preventing swelling of bentonite clay on the other one. Then wet/dry cycles were applied to determine swell and shrink behavior of compacted bentonite clay. These experiments were conducted under each environmental pollutant. In the second group, lime was added to bentonite clay to improve swell/shrink properties of bentonite clay.

While bentonite clay has the highest free swell in the distilled water, saline water has the lowest free swell among them. Because the aggregated and flocculated structures were occurred between particles at high salt concentration. Therefore, clay particles swell less. While bentonite clay has the highest swelling pressure in the distilled water, saline water has the lowest swelling pressure among them. These results showed that swelling pressure of expansive clays was high. Swelling properties of bentonite clay in kerosene and municipal leachate were less than of distilled water. The experimental results showed that after each cycle, swelling and shrinking behavior of compacted bentonite clay were decreased. Addition of lime showed that its swelling properties were significantly reduced to bentonite clay.

**Keywords:** Bentonite clay, lime, flocculated structure, aggregated structure, free swell, swelling pressure, distilled water, saline water, municipal leachate, kerosene

## TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanmasında ve deneylerin yapılışı sırasında bilgisiyle beni yönlendiren ve her türlü yardımda bulunan danışman hocam Doç. Dr. Ahmet TUNCAN'a ve Doç. Dr. Mustafa TUNCAN hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmaları sırasında maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Arş. Grv. Yücel GÜNEY, Arş. Grv. Hakan KOYUNCU, Uzman Altan ÇETİN ve Tekniker Adnan KILIÇ'a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, deney çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Geoteknik Laboratuvarı'nın bağlı bulunduğu Anadolu Üniversitesi'ne ve Scanning Elektron Mikroskobu fotoğraflarının çekilmesinde yardımlarından dolayı Yard. Doç. Dr. Ferhat KARA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle, benim bu durumlara gelmemde her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan aileme de en içten dileklerle şükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Serbest Şişme Potansiyelinin (Yüzdesinin) Belirlenmesi.....	3
2.2. Şişme Basıncının Belirlenmesi.....	4
2.3. Serbest Şişme Yüzdesi ve Şişme Basıncının Belirlenmesi.....	5
2.4. Şişme Potansiyelinin Farklı Çevresel Şartlar Altında Belirlenmesi.....	6
2.5. Islak ve Kuru Çevrimlerin Şişme/Büzülme Davranışına Etkisi.....	7
2.6. Şişme Potansiyeline Sahip Zeminlerin Tanımlanması.....	9
2.7. Şişme Zeminlerin Şişme Derecesinin Belirlenmesi.....	10
2.8. Şişme Mekanizmasının Belirlenmesi.....	12
2.9. Şişen Potansiyelinin Belirlenmesi ile İlgili Formüller.....	13
2.9.1. Şişme yüzdesinin (potansiyelinin) belirlenmesine ait formüller.....	13
2.9.2. Şişme basıncının belirlenmesine ait formüller.....	15
2.10. Şişen Zeminlerin Islahı ile İlgili Çalışmalar.....	16
3. KİL MİNERALLERİN ÖZELLİKLERİ.....	18
3.1. Killer Minerallerinin Mineralojik Özellikleri.....	18
3.2. Kil Minerallerinin Şekli ve Genel Yapıları.....	20
3.3. Çeşitli Kil Minerallerinin Mineralojik Yapıları.....	21
3.4. Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri.....	25
3.4.1. İyon değişim kapasitesi.....	25
3.4.2. Katyon değişim kapasitesi (KDK).....	25
3.4.3. Anyon değişimi kapasitesi (ADK).....	26
3.4.4. Elektriksel iletkenlik.....	27
3.4.5. pH.....	27
3.4.6. Ağır metaller.....	28
3.4.7. Özgül (spesifik) yüzey alanı.....	28

## İÇİNDEKİLER (DEVAM)

4. ŞİŞME/KABARMA MEKANİZMASI.....	29
4.1. Kil Zeminlerde Hacim Değişimleri.....	29
4.1.1. Killerde suyun tutulma mekanizması.....	29
4.1.2. Şişme mekanizmasının modeli.....	29
4.1.3. Şişmenin fiziksel yönü.....	31
4.1.4. Şişen zeminler ile ilgili problemler.....	33
4.1.5. Şişme potansiyelini etkileyen faktörler.....	33
4.1.6. Arazide (yerinde) şişme potansiyelinin belirlenmesi.....	34
4.2. Zeminlerin İyileştirilmesi.....	36
4.2.1. Şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonu.....	37
4.2.1.1. Kireç stabilizasyonun mekanizması.....	37
4.2.1.2. Kil-kireç karışımlarında meydana gelen kimyasal olaylar.....	37
4.2.1.3. Kil-kireç karışımlarında meydana gelen fiziksel olaylar.....	39
5. KULLANILAN MALZEMELER.....	42
5.1. Bentonit Kili.....	42
5.2. Kireç.....	44
5.3. Çöp Suyu.....	45
5.4. Tuzlu Su.....	46
5.5. Gazyağı.....	46
6. DENEY METODLARI.....	47
6.1. Standart Kompaksiyon Deneyi.....	47
6.2. Serbest Basınç Deneyi.....	48
6.3. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi.....	49
6.4. Yanal Şişme Basıncı Deneyi.....	49
6.5. Bentonit Kilinin Fiziko-Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi.....	50
6.5.1. Katyon değişim kapasitesi tayini.....	50
6.5.2. pH tayini.....	51
6.5.3. Elektriksel iletkenlik tayini.....	51
6.5.4. Organik madde miktarı tayini.....	51
6.6. Şişme/Büzülme Özelliklerin Belirlenmesi.....	52
6.6.1. Ödometre deney aleti.....	52
6.6.2. Deney numunelerinin hazırlanması.....	53
6.6.3. Serbest şişme deneyi.....	54
6.6.4. Şişme basıncı deneyi.....	55
6.6.5. Islak ve kuru çevrimlerin uygulanması.....	57

## İÇİNDEKİLER (DEVAM)

6.7. Kil Minerolojisinin Scanning Elektron Mikroskobu (SEM) ile Belirlenmesi..	58
6.7.1. Scanning elektron mikroskobu için numunelerin hazırlanması.....	58
6.7.2. Kritik nokta kurutma metodu.....	59
6.7.3. Scanning elektron mikroskobu hakkında bilgi.....	60
6.8. Şişme Potansiyelinin İyileştirilmesi .....	60
6.8.1. Numunelerin hazırlanması ve deneylerin yapılışı.....	60
<b>7. DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>62</b>
7.1. Serbest Şişme Potansiyeli.....	62
7.2. Şişme Basıncı .....	64
7.3. Şişme/Büzülme Çevrim Sonuçları.....	65
7.3.1. Distile su şartları altındaki sonuçlar.....	65
7.3.2. Tuzlu su şartları altındaki sonuçlar.....	66
7.3.3. Çöp suyu şartları altındaki sonuçlar.....	68
7.3.4. Gazyağı şartları altındaki sonuçlar.....	69
7.3.5. Genel sonuçlar.....	72
7.4. Şişme Potansiyelinin İyileştirilmesi.....	77
7.4.1. Serbest şişme deney sonuçları.....	77
7.4.2. Şişme basıncı deney sonuçları.....	79
<b>8. SCANNING ELEKTRON MİKROSKOPİ (SEM) SONUÇLARI.....</b>	<b>81</b>
8.1. Distile Su Altındaki Sonuçlar.....	81
8.2. Tuzlu Su Altındaki Sonuçlar.....	83
8.3. Çöp Suyu Altındaki Sonuçlar.....	85
8.4. Gazyağı Altındaki Sonuçlar.....	86
<b>9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>90</b>
9.1. Şişme/Büzülme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	90
9.2. Şişme Potansiyelinin İyileştirilmesi.....	93
<b>10. KAYNAKLAR.....</b>	<b>95</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa	
2.1.	Şişme potansiyelinin sınıflandırılması ile ilgili grafik	12
3.1.	Tetrahedron ve tetrahedron kil yapısı	18
3.2.	Oktahedron ve oktahedron kil yapısı	19
3.3.	Kaolinit kilinin yapısı	21
3.4.	Montmorillonit kilinin yapısı	23
3.5.	Tipik bir montmorillonit danesi	23
3.6.	İllit kilinin yapısı	24
4.1. (a)	Osmotik ile çekim	32
4.2. (b)	İyon hidrasyonu	32
4.3. (c)	Dipollerin çekilmesi	32
6.1.	Bentonit kiline ait standart proktor eğrisi	47
6.2.	Bentonit kiline ait serbest basınç direnci-şekil değiştirme eğrisi	48
6.3.	Ödometre haznesinin parçaları	52
6.4.	Standart kompaksiyon aletleri	53
6.5.	Ödometre haznesine yerleştirilmiş numune	54
6.6.	Serbest şişme deneyinden bir görünüş	55
6.7.	Şişme basıncı deneyinden bir görünüş	56
6.8.	Islak/kuru çevrimlerin uygulanması	57
6.9.	Kritik nokta kurutma aleti	59
6.10.	Kireç katkılı numunelere ait şişme deneyleri	61
7.1.	Çevresel kirlilik şartları altındaki serbest şişme yüzdeleri	63
7.2.	Farklı çevresel kirlilik şartları altındaki serbest şişme yüzdesi-zaman ilişkisi	63
7.3.	Farklı çevresel kirlilik şartları altındaki şişme basıncı değerleri	64
7.4.	Distile su şartlarında serbest şişme basıncı altındaki çevrimler	65
7.5.	Distile su şartlarında şişme basıncı altındaki çevrimler	66
7.6.	Tuzlu su şartlarında serbest şişme basıncı altındaki çevrimler	67
7.7.	Tuzlu su şartlarında şişme basıncı altındaki çevrimler	67

7.8.	Çöp suyu şartlarında serbest şişme basıncı altındaki çevrimler	68
7.9.	Çöp suyu şartlarında şişme basıncı altındaki çevrimler	69
7.10.	Gazyağı şartlarında serbest şişme basıncı altındaki çevrimler	70
7.11.	Gazyağı şartlarında şişme basıncı altındaki çevrimler	70
7.12.	Distile su şartlarında serbest şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	73
7.13.	Distile su şartlarında şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	73
7.14.	Tuzlu su şartlarında serbest şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	74
7.15.	Tuzlu su şartlarında şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	74
7.16.	Çöp suyu şartlarında serbest şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	75
7.17.	Çöp suyu şartlarında şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	75
7.18.	Gazyağı şartlarında serbest şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	76
7.19.	Gazyağı şartlarında şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	76
7.20.	Farklı kireç miktarlarındaki serbest şişme yüzdeleri	78
7.21.	Serbest şişme yüzdesinin kireç yüzdesini olarak değişimi	78
7.22.	Farklı kireç yüzdelerindeki şişme basıncı değerleri	79
8.1.	Dispers (agregasyonsuz) yapı	81
8.2.	Dispers (agregasyonlu) yapı	81
8.3.	Distile su şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (1500X)	82
8.4.	Distile su şartlarında şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (1500X)	82
8.5.	Flokulasyonlu yapı	83
8.6.	Agregasyonlu flokulasyonlu yapı	83
8.7.	Tuzlu su şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (500X)	84
8.8.	Tuzlu su şartlarında şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (630X)	84
8.9.	Tuzlu su şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (1200X)	85
8.10.	Çöp suyu şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (1500X)	85

8.11.	Çöp suyu şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (3200X)	86
8.12.	Gazyağı şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (300X)	87
8.13.	Gazyağı şartlarında serbest şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (500X)	87
8.14.	Gazyağı şartlarında şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (1500X)	88
8.15.	Gazyağı şartlarında şişme basıncı altında sıkıştırılmış bentonit kiline ait SEM fotoğrafı (5000X)	88
8.16.	Gazyağı şartlarında oluşan aglomere yapının mekanizması	89
8.17.	Gazyağı yumağının şematik gösterimi	89
9.1.	Serbest şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	91
9.2.	Şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler	92
9.3.	Farklı çevresel şartlar için serbest şişme yüzdesi-şişme basıncı ilişkisi	92
9.4.	Farklı kireç yüzdeleri için serbest şişme yüzdesi-şişme basıncı ilişkisi	94

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
2.1. Şişen zeminlerin sınıflandırılması için grafik	9
2.2. Likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve kolloid yüzdesine bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması	10
2.3. Şişme derecesi ve şişme potansiyelinin belirlenmesi için nomograf	10
2.4. Rötire limit ve lineer büzülme ile şişme derecesinin belirlenmesi	11
2.5. Şişme potansiyeli ve büzülme ölçümlerinden şişme derecesinin belirlenmesi	11
2.6. İndeks özelliklerine bağlı olarak şişme derecesinin belirlenmesi	11
2.7. Şişme derecesinin şişme potansiyeline göre belirlenmesi	11
5.1. Bentonit kiline ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler	43
5.2. Bentonit kiline ait bazı kimyasal özellikler	44
5.3. Bentonit kiline ait X-ray analiz sonuçları	44
5.4. Sönmüş kirece ait bazı fiziksel özellikler	45
5.5. Sönmüş kirece ait X-ray analiz sonuçları	45
5.6. Distile su, çöp suyu, tuzlu su ve gazyağına ait bazı özellikler	46
5.7. Gazyağına ait bazı özellikler	46
7.1. Serbest şişme çevrimleri altındaki bentonit kiline ait su muhtevsındaki değişimler	71
7.2. Şişme basıncı çevrimleri altındaki bentonit kiline ait su muhtevsındaki değişimler	71
7.3. Serbest şişme çevrimleri sonucunda bentonit kiline ait bazı fiziko-kimyasal özelliklerdeki değişimler bazı kimyasal özelliklerdeki değişimler	71
7.4. Serbest şişme deneyleri sonucunda su muhtevsındaki değişimler	77
7.5. Farklı kireç yüzdelerinde su muhtevsındaki değişimler	80
9.1. Bentonit kilinde çevresel şartlarda belirlenen şişme potansiyellerine ait şişme dereceleri	91
9.2. Kireç ilaveli bentonit kilinde belirlenen şişme potansiyellerine ait şişme dereceleri	93

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>A</b>	: Aktivite
<b>A<sub>1</sub></b>	: Numunenin ıslak ağırlığı (gr)
<b>A<sub>2</sub></b>	: Numunenin kesit alanı (cm <sup>2</sup> )
<b>a</b>	: Regrasyon katsayısı
<b>B</b>	: 10 <sup>15</sup> cm/m (dielektrik sabitine ve sıcaklığa bağlı bir sabit)
<b>B<sub>1</sub></b>	: Numunenin 105 <sup>0</sup> 'de bekletildikten sonraki kuru ağırlığı (gr)
<b>b</b>	: Regrasyon katsayısı
<b>C</b>	: 2µm'den küçük kil danelerinin yüzdesi (%)
<b>C<sub>c</sub></b>	: İki kil tabakası arasında orta noktadaki katyonların konsantrasyonu (mol/l)
<b>C<sub>e</sub></b>	: Gerilme değerinin log'una karşılık boşluk oranındaki artış
<b>C<sub>0</sub></b>	: Boşluk suyundaki tuz konsantrasyonu (mol/l)
<b>C<sub>1</sub></b>	: Numunenin 550 <sup>0</sup> 'de bekletildikten sonraki kuru ağırlığı (gr)
<b>c</b>	: Regrasyon katsayısı
<b>d</b>	: İki kil plaka arasındaki mesafenin yarısı (mm)
<b>e<sub>0</sub></b>	: Başlangıç boşluk oranı
<b>H</b>	: Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)
<b>h</b>	: Lineer birimlerde tabaka kalınlığı
<b>i</b>	: Tabaka sayısı
<b>K</b>	: Zemin tipine bağlı katsayısı.
<b>k</b>	: Permeabilite katsayısı (cm/sn)
<b>LI</b>	: Likidite indisi (%)
<b>LL</b>	: Likit limit (%)
<b>l</b>	: Numune boyu (cm)
<b>n</b>	: Porozite
<b>P</b>	: Hesaplanmış şişme basıncı (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>P<sub>0</sub></b>	: Toplam gerilme-boşluk suyu basıncı
<b>PI</b>	: Plastisite indisi (%)
<b>PL</b>	: Plastik limit (%)
<b>P<sub>s</sub></b>	: Şişme basıncı (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>R</b>	: Gaz (hava) sabiti
<b>S</b>	: Şişme potansiyeli (%)
<b>SA</b>	: Şişme aktivitesi
<b>SI</b>	: Büzülme indeksi
<b>s</b>	: Kilin yüzey alanı (m <sup>2</sup> /gr)
<b>S<sub>1</sub></b>	: Lineer serbest şişme yüzdesi (%)
<b>T</b>	: Mutlak sıcaklık
<b>z</b>	: Değişebilir iyonların dengesi
<b>X<sub>0</sub></b>	: Kilin yük yoğunluğu ve iyon dengesine bağlı düzeltme faktörü
<b>X<sub>1</sub></b>	: Zemin özelliği
<b>X<sub>2</sub></b>	: Zemin özelliği
<b>Q</b>	: Belirli zamanlarda geçen su miktarı (cm <sup>3</sup> /sn)
<b>W</b>	: Su muhtevası (%)
<b>W<sub>ilk</sub></b>	: Deney başlangıcı su muhtevası (°o)

<b><math>W_{son}</math></b>	: Deney sonu su muhtevası (%)
<b><math>W_L</math></b>	: Likit limit su muhtevası (%)
<b><math>W_n</math></b>	: Tabii su muhtevası (%)
<b><math>\gamma_d</math></b>	: Zemin numunesinin kuru yoğunluğu ( $kg/cm^3$ )
<b><math>\Delta H</math></b>	: Numunede stabil haldeki düşey şişme miktarı (mm)
<b><math>\Delta h</math></b>	: Basınç seviye farkı (cm)
<b><math>\Delta S</math></b>	: i'ninci tabaka için lineer birimlerde şişmenin büyüklüğü (%)
<b><math>\Delta P</math></b>	: İnşaattan daha sonra kazıya bağlı olarak $P_0$ 'daki azalma

<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>ADK</b>	: Anyon Değişim Kapasitesi
<b>ASCE</b>	: American Society of Civil Engineering
<b>ASTM</b>	: American Society of Testing and Materials
<b>KDK</b>	: Katyon Değişim Kapasitesi
<b>PVR</b>	: Düşey Şişme Potansiyeli

## 1. GİRİŞ

Zeminin şişme ve büzülmesi, suya doymun olmayan/olan kohezyonlu zeminlerin mevsimsel ve çevresel şartlar altında su/sıvı ile temas etmesi veya su/sıvı kaybetmesi neticesinde meydana gelen hacim artması/azalması olarak tanımlanabilir. Şişme ve büzülme ile meydana gelen hacim değişikliği ile zemin yapısının stabilitesi bozulmakta ve buna bağlı olarak üst yapıda aşırı deformasyonlar meydana gelerek yapıda büyük hasarlar oluşabilmektedir.

Şişen zeminlerde meydana gelen hacim değişikliği, zeminin pH, elektriksel iletkenlik ve katyon değişim kapasitesi gibi fiziko-kimyasal özelliklerine, zemin içindeki kil minerali cinsi ve miktarına, yeraltı su seviyesindeki değişikliklere, zeminin permeabilitesine, şişme özelliğine sahip zemin tabakasının kalınlığına, zeminde meydana gelebilecek dış yüklerle ve iklim şartlarına büyük ölçüde bağlıdır. Şişme kapasitesine sahip suya doymun olmayan killi zeminlerin su alarak hacminin artması ve bu hacim artışının engellenmesi durumunda şişme basıncı oluşabilmektedir. Şişen bir zemin üzerine yapılan bir yapıdan dolayı meydana gelen gerilme artışı zeminin şişme basıncının altında ise, üst yapıda hasarlar meydana gelebilir. Bir zemin için şişme potansiyeli ne kadar yüksek ise şişme basıncı da o kadar yüksektir. Yol ve havaalanı kaplamaları ve atık sahaları altında oluşturulan geçirimsiz kil tabakalarındaki şişme basıncı kompaksiyon enerjisinin, optimum su muhtevasının ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının bir fonksiyonudur.

Şişen zeminlerle ilgili problemler, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Avustralya, Hindistan, Afrika ve Güney Amerika gibi ülkelerde görülmüştür [23]. Amerika Birleşik Devletlerinde şişen zeminlerden dolayı yılda 2.3 milyar dolar civarında zarar meydana geldiği ve bu zararın sel, kasırga, fırtına ve deprem gibi zararlardan yaklaşık iki kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir [23]. Zeminlerde meydana gelen şişme, inşaat mühendisliği yapılarında büyük hasarlara neden olan bir problemdir. Şişme ile hacimde meydana gelen bu artışın pratik mühendislik açısından önemi, temel altı zemininde farklı ve tekrarlı kabarma ve büzülmeden dolayı üzerinde bulunan hafif yapılarda çatlama, kırılma hatta göçme gibi önemli hasarlara neden olabilmesidir. Bu tür problemler Kanada, Avustralya, Hindistan, Ürdün, Afrika ve A.B.D. gibi ülkelerde önemli derecede maddi hasarlara neden olmuştur. Özellikle Ürdün'de binaların

%40'ından fazlasında şişen zeminlerdeki şişme nedeniyle çok büyük hasarlar meydana gelmiştir [22]. Bütün bu nedenler araştırmacıları şişen zemin cinslerinin ve bu tür zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesi yönünde araştırmalara yöneltmiştir. Bu amaçla bugüne kadar çok sayıda laboratuvar ve arazi deneyleri yapılmasına rağmen şişme olayı çok çeşitli faktörlere bağlı olmasından dolayı yeni yaklaşımların geliştirilmesi ihtiyacı duyulmaktadır.

Şişmeden dolayı meydana gelebilecek hasarlar gözardı edilmek istenmiyorsa, yapıların tasarım aşamasında aktif kil minerali içeren zeminlerin varlığının araştırılması ve bulunması durumunda arazi şartlarında şişme potansiyeli ve şişme basıncının belirlenmesi oldukça önemlidir. Ancak bu durumda yapılacak yapıya uygun olarak zemin için daha sağlıklı ıslah yöntemleri ve temel sisteminin seçimi yapılabilir. Zeminlerdeki şişmeden dolayı meydana gelen zararlar gözönüne alındığında yapılar altındaki bu tür zeminlerin ıslahı kaçınılmazdır. Zeminlerin ıslahı, zemine katkı maddelerinin ilavesi veya sakıncalı olan zeminin kazılarak uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Bu amaçla, kullanılan en eski yöntemlerden birisi de kireç katkısı ile stabilizasyondur.

Şişme ve büzülme kapasitesine sahip killi zeminlerin tuzlu su, çöp suyu ve gazyağı gibi çevresel kirlilik şartları altındaki davranışları şişen zeminin normal su altındaki davranışlarından farklıdır. Bu farklılık, özellikle tuzlu su durumunda çok daha belirgin olarak görülmektedir. Kireç stabilizasyonu sonunda bentonit kilinin şişme potansiyelinde ve şişme basıncında oldukça fazla azalmalar görülmüştür.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Serbest Şişme Potansiyelinin (Yüzdesinin) Belirlenmesi

Bandyopadhyay [1], doğal zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla Kansas eyaletinin 22 şehrinden elde edilen 259 doğal zemin üzerinde zemin indeks ve şişme potansiyeli deneyleri yapmıştır. Bu deney verilerine göre indeks özellikleri ile şişme potansiyeli arasında regrasyon analizleri yapılarak şişme potansiyeli, aktivite ve kil dane boyutu arasındaki ilişkiler verilmiştir.

O'Neill and Ghazzaly [2], şişme potansiyelinin zemin indeks özelliklerini doğrudan belirleyebilmek amacıyla örselenmemiş doğal kil zeminler üzerinde arazide yapılan 370 şişme deneyinin verilerini kullanarak lineer regrasyon analizleri yapmışlar ve şişme yüzdesi, başlangıç su muhtevası ve likit limit arasında ilişkiler vermişlerdir.

Parashar et al. [3], Singapur bölgesindeki montmorillonit ve kaolinit içerikli sıkıştırılmış zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla şişme deneyleri yaparak zamanla düşey şişmede meydana gelen yıpranma etkilerini araştırmışlardır. Serbest şişme deneyi, ödometre sisteminde optimum su muhtevasında ve 1.5 kPa'lık basınç altında yapılmıştır. Kür süresinin şişme potansiyeli üzerindeki etkini araştırmak için standart kopaksiyon deneyi ile sıkıştırılan numuneler 0,1,3,7,25 ve 255 günlük zaman aralıklarında alüminyumlu levha ile kaplanmış, parafinlenmiş ve nemli bir odada bekletilmiştir. Bu bekleme sürelerinden sonra numuneler 24 saat şişmeye bırakılmıştır. Kür zamanı ile düşey şişme yüzdesi arasında grafiksel bir ilişki verilmiştir. 21 günlük kür süresinden sonraki sürelerde başlangıç şişme miktarında azalmalar görülmüştür.

Ranganatham and Satyanarayana [4], kil zeminlerin potansiyeli belirlemek amacıyla, laboratuvarında 4 ayrı doğal zemin üzerinde yapılan indeks ve şişme deneyleri sonuçlarına göre regrasyon analizleri yapmışlardır. Bu analizlere göre de indeks özellikleri (büzülme indisi, şişme aktivitesi ve kil boyutu dağılımının yüzdesi) ile şişme potansiyeli arasında ilişkiler vermişlerdir.

Seed et al. [5], kum-kil karışımlarının şişme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla laboratuvarında şişme deneyleri yapmışlardır. Şişme potansiyeli, AASHTO kompaksiyon standardında ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmış yatay çevrilmiş numunelerin 1

psi (6.9 kN/m<sup>2</sup>)'lik sürsarj yükü altında ve damıtık su ortamındaki şişmenin yüzdesi olarak belirlemişler. Bu deney sonuçlarına göre aktivite, kil dane yüzdesi (2 µm boyutundan az) ve şişme potansiyeli arasında ilişkiler vermişlerdir.

## 2.2. Şişme Basıncının Belirlenmesi

Livneh [6], İsrail killerinin şişme basıncının belirlenmesi amacıyla şişme deneyleri yapmıştır. Bu deney sonuçları üzerinde regrasyon analizleri yapılarak zemin indeks özellikleri ile şişme basıncı arasında ilişkiler verilmiştir.

Lav and Ansal [7], şişen kil özelliği gösteren 63 adet örselenmemiş zemin numunesi üzerinde ödometre deney sisteminde, şişme basıncı ile zemin indeks özellikleri arasında matematiksel ilişkiler çıkarmak amacıyla istatistiksel analizler yapmışlardır. Analizler sonucunda şişme basıncı ile zemin özellikleri arasında yok denecek kadar düşük korelasyonlar bulmuşlardır. Sonuç olarak, killerin şişme özelliğine doğrudan etki eden kil mineral yapısının ve su emme kapasitesini temsil edebilecek parametrelerin arazi ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi ve bunların kullanılarak korelasyonlar geliştirmesinin en doğru yol olacağı belirtilmiştir.

Sridharan and Sivapulloiah [8], killerin şişme basıncının belirlenmesi amacıyla üç farklı deney metodu ile şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Bunlar üst sınır değeri veren ve bilinen ödometre metodu, en düşük değeri veren değişik konsolidasyon basınçları için boşluk oranı denge metodu ve ortalama değerler veren sabit hacim metodu olduğunu ifade etmişlerdir. Üç metod ile elde edilen şişme basınçları ve zemin şişme basıncını etkileyen faktörlerin (zaman etkileri, gerilme izi etkileri v.b.) nispi etkisi karşılaştırılarak deney sonuçlarını vermişlerdir. Sonuç olarak, üç yöntem ile bulunan şişme basıncı değerlerinde önemli düzeyde farklı değerler bulmuşlar. Kullanılan metodlar birbirine göre karşılaştırılması sonucunda birinci metodun çok zaman aldığı görülmüş fakat bir numune için yeterli olduğunu, ikinci metod için, en az üç numune gerekli olduğunu fakat daha az zaman aldığını, üçüncü metod için ise, hızlı ve sadece bir numune için yeterli olduğunu ifade etmişlerdir. Üçüncü metodun yük artışına ve yükleme oranına duyarlı olduğunu belirlenmişlerdir.

Komornik and David [9], doğal (örselenmemiş) İsrail kil zeminleri üzerinde şişme basıncının belirlenmesi amacıyla şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Bu deney sonuçlarına göre regrasyon analizleri yapılarak şişme basıncı ile bazı indeks özellikleri arasında bir ilişki bulmuşlardır.

### 2.3. Serbest Şişme Yüzdesi ve Şişme Basıncının Belirlenmesi

Kandemir ve Erol [10], şişme miktarının tayini için önerilen emme basıncı yöntemi ve ödometre yöntemine göre şişme değerlerini karşılaştırmak amacıyla yüksek şişme potansiyeline sahip kil numuneleri üzerinde (LL= %108, PI= %80) şişme deneyleri yapmışlardır. Numuneler değişik kuru birim hacim ağırlıklarında ve su muhtevalarında hazırlanarak hem ödometre düzeneğinde serbest şişme miktarı ve şişme basıncı değerleri ve hemde emme basıncı yönteminde saykrometre tekniği ile emme basıncı ve şişme değerlerini belirlemişlerdir. Yapılan değerler sonucunda,

- Saykrometre tekniği ile bulunan şişme miktarları ödometre düzeneğinde ölçülen değerlerden daha yüksek bulmuşlar.
- Logaritmik şişme basıncı ve emme basıncı arasında tüm su içerikleri için lineer bir ilişki belirlemişlerdir.

Nayak and Christensen [11], sıkıştırılmış zeminlerin şişme davranışının modellenmesi ve önceden belirlenmesi amacıyla zemin indeks özelliklerine dayanan yarı amprik yaklaşımlar vermişlerdir. Bunun için değişik oranlarda kaolinit, grundite ve bentonit killeri silika kumu ile karıştırılmış ve AASHTO standardında sıkıştırılmış 18 farklı zemin üzerinde şişme deneyleri yapmışlar. Şişme potansiyeli deneyleri 1 lb/inç<sup>2</sup> 'lik sürsarj yükü altında damıtık su ortamında yapmışlardır. Sonuç olarak, zemin indeks özelliklerine bağlı olarak bazı amprik ilişkiler vermişlerdir.

Kassiff and Baker [12], Ca-Montmorillonit içerikli (%60-%70) İsrail killerinin farklı başlangıç özelliklerinde şişme davranışlarındaki değişimleri araştırmışlardır. Bunun için şişme basıncı ve 0.1 kg/cm<sup>2</sup> 'lik hafif bir yük altında şişme potansiyeli deneyleri üç eksenli deney düzeneğini kullanarak yapmışlardır. Numuneler, aynı kompaksiyon işlemi ile üç farklı enerji uygulanarak sıkıştırmış ve deneyler 2, 4, 8, 16, 30, 60 ve 90 günlük sürelerde kür'e müsaade edildikten sonra yapılmıştır. Sıcaklığın

şişme üzerindeki etkisini minimuma indirebilmek için numuneler üç eksenli hücrede sabit bir banyo suyu sıcaklığında korunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda,

- Sıkıştırılmış kilin şişme basıncının, özellikle yüksek başlangıç yoğunluğunda zamanla arttığı gözlenmiştir.
- Şişme basıncı ve şişme yüzdesinin, başlangıç yoğunluğuna ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

Gabriel and Raphael [13], sıkıştırılmış killer üzerinde şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Deneyler, 1 kPa'lık çevresel basınç altında üç eksenli deney düzeneğinde yapılmıştır. Aynı zamanda kür etkisi ile kuru birim hacim ağırlığın etkisini araştırmışlardır. Yüksek başlangıç yoğunluğundaki numunelerde 10 günlük kür süresine kadar düşey şişme miktarında artış gözlenirken, 20 günden sonraki kür sürelerinde ise şişme miktarında yavaş yavaş azalmalar gözlemişlerdir. Maksimum 90 güne kadar kür süreleri uygulanmıştır. Bu şişme miktarındaki azalmanın sebebi olarak, yıpranma etkisinin yanında montmorillonit yüzdesinin oldukça büyük etkisi olduğu belirtilmiştir.

Sikh [14], araziden yüzeye yakın zeminden alınan kumlu-killi (montmorillinit ağırlıklı) numuneler üzerinde ödometre deney sisteminde şişme potansiyeli ve şişme basıncı deneyleri yapmıştır. Şişme potansiyeli ile şişme basıncı arasında grafiksel bir ilişki belirlenmiş ve şişme potansiyeli arttıkça şişme basıncının arttığı gözlenmiştir.

#### 2.4. Şişme Potansiyelinin Farklı Çevresel Şartlar Altında Belirlenmesi

Özbayoğlu [15], belirli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) bentonitle karıştırılan kumlu numunelerin değişik çözelti ortamlarında şişme miktarını belirlemek amacıyla serbest şişme deneyleri yapmıştır. Deneylerde damıtık su, asit (HCl, pH=3), tuz (NaCl, %5, %10 ve %15 oranlarında), baz (NaOH, %5 ve %10 oranlarında) gibi çözeltiler belirli yüzdelerde kullanılmıştır. Deneyler, farklı sıkıştırılmış numuneler üzerinde basit olarak geliştirilmiş bir deney düzeneğinde yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Damıtık su içindeki şişme değerlerinin, diğer çözelti ortamlarındaki şişme değerlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu değerlerin, bentonit katkı miktarıyla orantılı olarak arttığı belirlenmiştir.

- Tuz çözeltisi içinde şişme miktarının büyük ölçüde azaldığı ve şişmenin kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür.
- %20 bentonit katkılı numunelerde farklı çözeltiler içindeki şişme miktarının büyükten küçüğe doğru damıtık su, baz çözeltisi, asit çözeltisi ve tuzlu çözelti şeklinde olduğu bulunmuştur.

## 2.5. Islak ve Kuru Çevrimlerin Şişme/Büzülme Davranışına Etkisi

Siyahi v.d. [16], dolgu olarak kullanılması planlanan bir zemini farklı başlangıç su muhtevalarında (optimum su muhtevasının kurusunda ve ıslağında) ıslak/kuru çevrimlerine maruz bırakarak, çevrimlerin zeminin şişme-büzülme özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla deneyler yapmışlardır. Deneyler, sıkıştırılmış numuneler üzerinde ödometre deney düzeneğinde serbest şişme (7 kPa'lık düşey gerilme altında) ve şişme basıncı deneyleri olarak yapılmıştır. Islak/kuru çevrimleri, 4 gün şişmede (ıslak) ve 4 gün büzülmede (kuru) bırakılmak suretiyle 7 çevrim olarak uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Tekrarlı ıslak/kuru çevrimleri sonucunda sıkıştırılmış kil zeminin şişme deformasyonlarında ve şişme basınçlarında azalma görülmüştür. Bu azalma ilk çevrimlerde daha fazla olmakta, 4. çevrim sonucunda dengelenmektedir.
- Optimumun kuru tarafında sıkıştırılan numunelerde ıslak tarafında sıkıştırılan numunelere göre daha fazla şişme deformasyonları ve şişme basınçları bulunmuştur.

Osipov et al, [17], farklı tip killerin (deniz kili karışımı) ıslak/kuru çevrimler altında şişme özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla Rusya'dan çeşitli bölgelerden farklı özelliklerde elde edilen numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Deneyler, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde ödometre düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Serbest şişme deneylerine ve çevrimlere maksimum şişme miktarı stabil hale gelene kadar devam edilmiştir. Kuru çevrimler, numunelerin başlangıç su muhtevasına geri dönünceye kadar açık havada kurutulmasından sonra uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Herbir çevrimdeki maksimum şişme yüzdesi çevrim sayısı arttıkça artmıştır. Bu da çevrim sayısı arttıkça kil yapısındaki sağlam bağların bozulmasına bağlanmıştır.

- Herbir çevrimdeki şişme basıncı değeri, çevrim sayısı arttıkça artmıştır.

Day [18], sıkıştırılmış killeri arazi şartlarındaki sıcaklıklarda ıslak ve kuru çevrimlere maruz bırakarak şişme/büzülme davranışlarındaki değişimleri araştırmıştır. Proktor kalıbında hazırlanan siltli/kil numuneler farklı sürelerde kür'e müsaade edildikten sonra ödometre düzeneğinde 0.7 kPa (15 psf)'lık düşey gerilme altında 10 defa ıslak-kuru çevrimlere bırakılmıştır. Kuru çevrimler, numunelerin güneş ışığı altında büzülme limitinin altına düşene kadar bekletildikten sonra ödometre düzeneğinde 2.5 gün bekletilerek uygulanmıştır. Islak çevrimler ise 1.5 gün bekletilmek suretiyle uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Kür süresindeki artış ile başlangıç bir boyutlu düşey şişmenin miktarı önemli oranda azalmıştır.
- Islak ve kuru çevrimlerin sayısı arttıkça şişme/büzülme miktarı artmıştır.
- Başlangıç su muhtevası düşük olan numunelerdeki şişme miktarının başlangıç su muhtevası fazla olan numunelere göre daha fazla olduğu bulunmuştur.

Dif and Bluemel [19], şişme özelliğine sahip araziden alınan iki farklı aşırı konsolide kil zeminlerin arazide maruz kaldığı yük etkisi altındaki şişme/büzülme davranışlarını belirlemek amacıyla laboratuvarında deneyler yapmışlardır. Aynı zamanda farklı başlangıç su muhtevalarının ve kuru birim hacim ağırlığının şişme/büzülme davranışlarına etkisini iki farklı sürsarj yükü üzerinde araştırmışlardır. Deneyler, geliştirilmiş bir ödometre hücresinde yapılmıştır. Toplam 8 çevrim uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Islak/kuru çevrim sayısının artması ile şişme özellikleri artmış ve dördüncü çevrimden sonra sabitleşme görülmüştür.
- Özellikle çevrimlerin başlangıcında büzülme sırasındaki deformasyonun, şişme sırasındaki deformasyondan daha büyük olduğu görülmüştür.
- Eksenel deformasyonun başlangıç su muhtevasına ve uygulanmış düşey basınca bağlı olduğu belirtilmiştir.

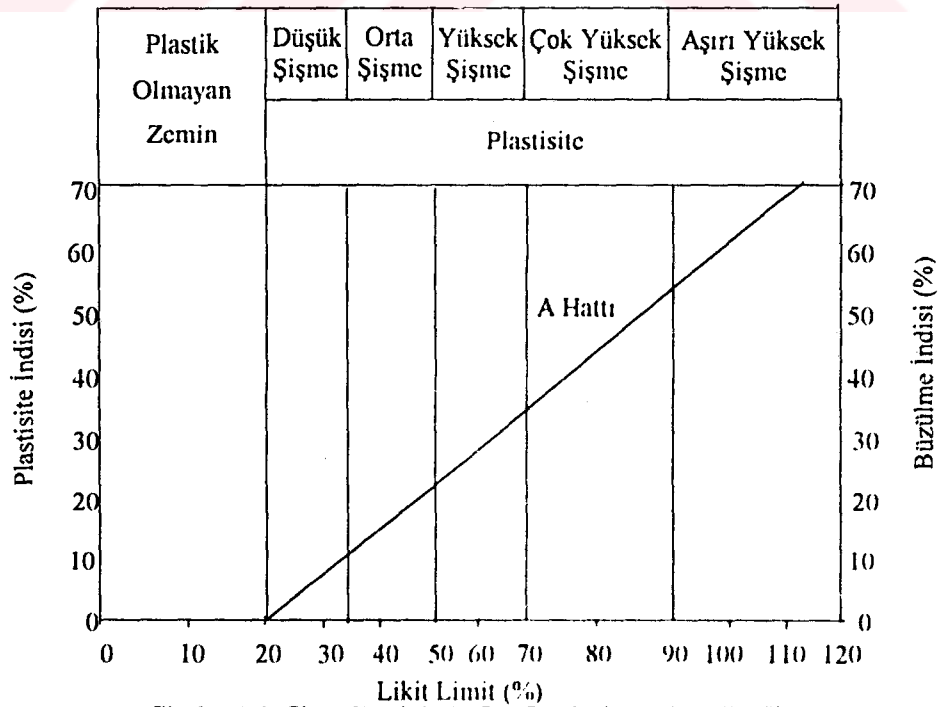
Al-Homoud et al. [20], araziden alınan şişme özelliğine sahip killi zeminler üzerinde ıslak/kuru çevrimler uygulayarak, çevrimlerin killerin şişme özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Herbir çevrimden sonra şişme potansiyeli ve şişme basıncı belirlenmiştir. Herbir zemin için iki numune hazırlanmıştır. Birinci numune, şişme

yüzdesinin belirlenmesinde ikinci numune ise şişme basıncı tayininde kullanılmıştır. Şişme yüzdesinin belirlenmesinde numune, ödometre deney aletinde distile su içinde en az 40 saat veya şişme tamamlanıncaya kadar bırakılmıştır. Daha sonra numuneler başlangıç su muhtevasına kadar laboratuvar şartlarında ring içerisinde hava kurusunda bırakılmak suretiyle çevrimler uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Çevrimlerin sayısı arttıkça şişme yüzdesi ve şişme basıncı azalmıştır.
- Şişme yüzdesi ve şişme basıncındaki azalmanın çoğu birinci çevrimden sonra gözlenmiştir.
- Kullanılan altı farklı indeks özelliğine sahip zeminler için 4. veya 5. çevrimde şişme potansiyelinde dengelenme gözlenmiştir.

## 2.6. Şişme Potansiyeline Sahip Zeminlerin Tanımlanması

Raman et al. [21], şişen zeminlerin tanımlanması ile ilgili deneyler yapmışlardır. Dumbleton'un modifiye plastisite kartına dayanarak zeminlerin şişme potansiyeli için bir grafik geliştirmişlerdir. Bu grafikte A çizgisinin altına düşen zeminleri şişme potansiyeline sahip zeminler olarak sınıflandırmışlardır. Raman tarafından önerilen grafik Çizelge 2.1'de gösterilmiştir



Çizelge 2.1. Şişen Zeminlerin Sınıflandırılması için Grafik

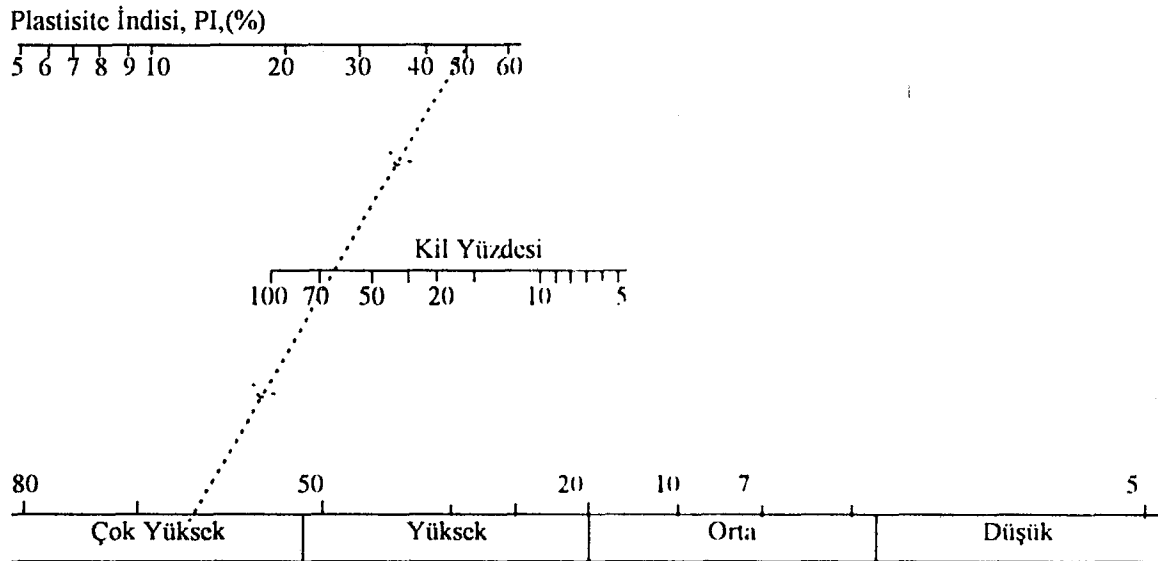
## 2.7. Şişme Potansiyeline Sahip Zeminlerin Şişme Derecesinin Belirlenmesi

Basma [22], şişen zeminler üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda bazı indeks özelliklerine bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırıldığı abaklar ve nomograf tipi bir abak vermiştir.

Çizelge 2.2. Likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve kolloid yüzdesine bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması.

Düşük		Orta		Yüksek		Çok Yüksek	
20	30	40	50	60	70	80	
Likit Limit, LL, (%)							
Düşük		Orta		Yüksek		Çok Yüksek	
0	10	20	30	40	50	60	
Plastisite İndisi, PI, (%)							
Düşük		Orta		Yüksek		Çok Yüksek	
10	20	30	40	50	60	70	
Kil İçeriği, (<0.002 mm), (%)							
Düşük		Orta		Yüksek		Çok Yüksek	
0	10	20	30	40	50	60	
Kolloid İçeriği (<0.001 mm), (%)							

Çizelge 2.3. Şişme derecesi ve şişme potansiyelinin belirlenmesi için nomograf.





Gromko [23], şişen zeminler üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda zemin indeks özelliklerine ve şişme ölçümlerine dayanarak şişme derecesinin ve şişme potansiyelinin belirlendiği tablolar vermiştir.

Çizelge 2.4. Rötire Limiti ve Lincer Büzülme ile Şişme Derecesinin Belirlenmesi

Rötire Limiti (%)	Lincer Büzülme (%)	Şişme Derecesi
<10	<8	Kritik
10-12	5-8	Orta
>12	0-5	Düşük

Çizelge 2.5. Şişme Potansiyeli ve Büzülme Ölçümlerinden Şişme Derecesinin Belirlenmesi

Şişme Potansiyeli, <sup>a</sup> (%)	Toplam Şişme <sup>b</sup> (%)	Büzülme İndeksi USBR	Şişme Derecesi
0-1.5	0-10	0-20	Düşük
1.5-5	10-20	20-30	Orta
5-25	20-35	30-60	Yüksek
>25	>35	>60	Çok Yüksek

<sup>a</sup> AASHTO standardında sıkıştırılmış numuneler için nihai şişme

<sup>b</sup> İpsi yük altında doyunlaştırılmış numuneler için toplam şişme

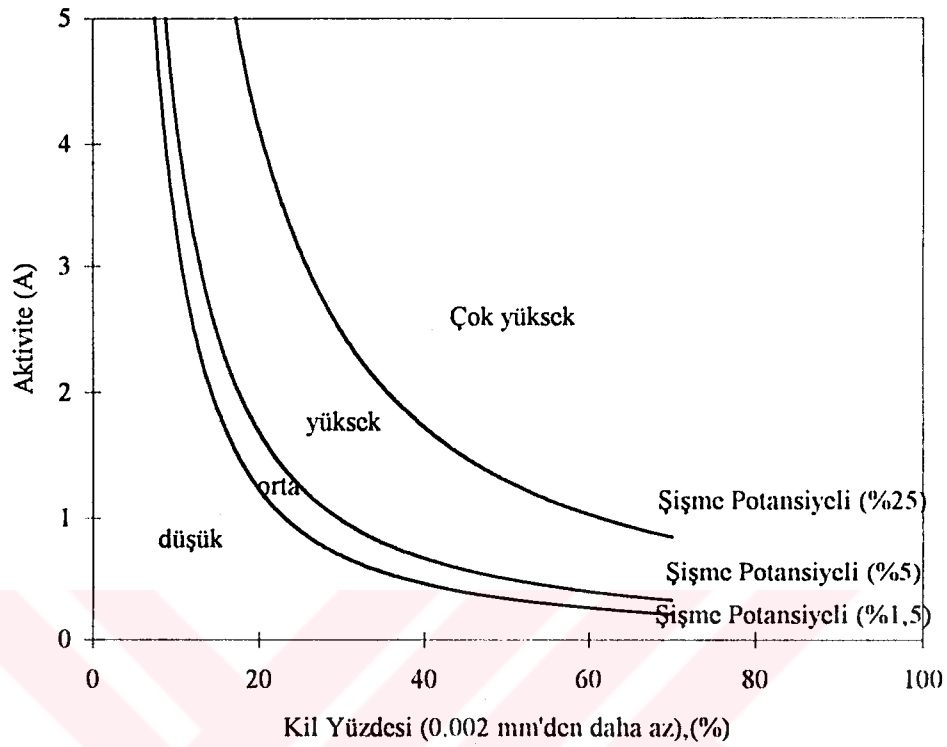
Çizelge 2.6. İndeks Özelliklerine Bağlı Olarak Şişme Derecesinin Belirlenmesi

Kolloid İçeriği (%)	Plastisite İndisi	Rötire Limiti	Muhtemel Şişme (%)	Şişme Derecesi
>28	>15	<11	>30	Çok Yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-20	Orta
<15	<18	<15	<10	Düşük

Çizelge 2.6'nın Devamı

#200 Elek Altı	Limit Limit	Muhtemel Şişme	Şişme Derecesi
>95	>60	>10	Çok Yüksek
60-95	40-60	3-10	Yüksek
30-60	30-40	1-5	Orta
<30	<30	<1	Düşük

Seed et al [5], şişme potansiyelini sınıflandırmak için verdiği şekil Şekil 2.1'de ve bir zeminin şişme kapasitesini pratik olarak tanımlayabilmek için USBR sistemine uygun olarak önerdiği değerler ise Çizelge 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Şişme Potansiyelinin Sınıflandırılması ile İlgili Grafik

Çizelge 2.7. Şişme Derecesinin Şişme Potansiyeline Göre Belirlenmesi

Şişmenin Derecesi	Şişme Potansiyeli (%)
Düşük	0-1.5
Orta	1.5-5
Yüksek	5-25
Çok Yüksek	>25

## 2.8. Şişme Mekanizmasının Belirlenmesi

Parker et al. [24], şişme ve su adsorbsiyon mekanizmalarını açıklamak amacıyla Ca-Montmorillonitin şişme ve toplam su adsorbsiyonuna kompaksiyon etkilerini araştırmışlardır. Ca-Montmorillonit farklı yoğunluklarda sıkıştırıldıktan sonra ıslatılmadan önce ve sonra  $N_2$  desorpsiyonu ile kompaksiyon etkisi bulunmuştur. Toplam su adsorbsiyonu, osmotik adsorbsiyon ve toplam şişme, 0.01 N  $CaCl_2$  ve 0.001 N  $CaCl_2$  ile doyurulmak suretiyle bulunmuştur. Sonuç olarak, kuru statik kompaksiyonun kristal arası ve osmotik su adsorbsiyonu üzerinde az bir etkiye sahip

olduğu belirtmişlerdir. Kompaksiyon etkisi gözenek boyutunu azalttığı gibi sıkıştırılmış hava basınçları nedeniyle şişmede artış görülmüştür.

Gromko [23], şişme konusunda son 10 yılda yapılan deneysel çalışmalara dayanarak şişen zeminlerin tanımlanması, şişen zeminlerin yapısı ve davranışı, şişme potansiyeline etkiyen faktörler, şişme potansiyelini belirleme yöntemleri, şişen zeminlerdeki şişme ve büzülme değerine göre şişme derecesinin belirlenmesi, şişen zeminlerin stabilizasyonu ve şişen temel zemini üzerindeki yapıların tasarımı gibi konularda teorik ve de tablolar halinde bilgiler vermiştir.

## 2.9. Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi ile İlgili Formüller

Araştırmacılar tarafından şişen zeminler üzerinde yapılan deneysel ve istatikselsel çalışmalar sonucunda zemin indeks özelliklerine bağlı olarak verilen ve önerilen formüller bu başlık altında belirtilmiştir.

### 2.9.1. Şişme yüzdesinin (potansiyelinin) belirlenmesine ait formüller

$$S = K \times A^{2.44} \times C^{2.44} \quad [5]; \quad (2.1)$$

$$A = \frac{PI}{C} \quad (2.2)$$

$$S = K \times M \times PI^{2.44} \quad (2.3)$$

Burada;

S= Şişme potansiyeli

C= 2µm'den küçük kil danelerinin yüzdesi

A= Aktivite

K= 3.6\*10<sup>-5</sup> , kil mineralinin bütün tipleri için sabittir.

M= 60 (doğal zeminler için), 100 (yapay zeminler için)

$$S = K \times C^{3.44} \quad [1]; \quad (2.4)$$

$$K = a \times A^b \quad (2.5)$$

$$A = \frac{PI}{C - 5} \quad (2.6)$$

Burada;

K= Zemin tipine bağlı katsayısı.

C= 0.002 mm'den küçük ince kil danelerinin yüzdesi.

A= Kilin aktivitesi

a, b= Regrasyon denklemlerinden bulunan katsayılar.

$$S = 2.27 \times 0.131w_L - 0.274w \quad [2]; \quad (2.7)$$

Burada;

S= Lineer serbest şişme yüzdesi

w= Başlangıç su muhtevası.

w<sub>L</sub>= Likit limit

$$S = (4.57 \times 10^{-5}) \times SA^{2.67} \times C^{3.44} \quad [4]; \quad (2.8)$$

$$S = (41.13 \times 10^{-5}) \times SI^{2.67} \quad (\text{Doğal zeminler için}) \quad (2.9)$$

Burada;

SA= Şişme aktivitesi

SI= Büzülme indeksi= Likit limit-plastik limit

$$SP_{100} = a \times (X_1)^b \times (X_2)^c \quad [22]; \quad (2.10)$$

$$SP_{100} = (6.4 \times 10^{-4}) \times PI^{1.37} \times C^{1.37} \quad (2.11)$$

Burada;

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>= Zemin özelliği

a,b,c= Regrasyon katsayıları

PI= Plastisite indisi, %

C= Kolloid dane boyutu, %

$$S_p = (1.3548 \times 10^{-2}) \times PI^{1.59} \times \frac{C}{w_i} + 4.8046 \quad (\text{Grundite+Bentonit zeminler için}) \quad [11] \quad (2.12)$$

$$S_p = (4.4938 \times 10^{-3}) \times PI^{1.74} \times \frac{C}{w_i} + 14.722 \quad (\text{Kaolinit+Bentonit zeminler için}) \quad (2.13)$$

$$S_p = (2.29 \times 10^{-2}) \times PI^{1.45} \times \frac{C}{w_i} + 6.38 \quad (\text{Bütün zeminler için}) \quad (2.14)$$

Burada;

$S_p$ = Şişme potansiyeli, %

$w_i$ = Numunenin başlangıç su muhtevası, %

$C$ = < 2 $\mu$ m kil yüzdesi

$PI$ = Plastisite indisi

### 2.9.2. Şişme basıncının belirlenmesine ait formüller

$$P_s = 0.622 \times LI - 0.083w_n + 0.074 \times PL + 0.019 \times PI + 0.262 \quad [7]; \quad (2.15)$$

Burada;

$LI$ = Likidite indisi, %

$w_n$ = Tabii su muhtevası, %

$PL$ = Plastik limit, %

$PI$ = Plastisite indisi, %

$P_s$ = Şişme basıncı, kg/cm<sup>2</sup>

$$\log P_s = 2.132 + 0.0208 \times LL + 0.000665 \times \gamma_d - 0.0269 \times w \quad [9]; \quad (2.16)$$

Burada;

$P$ = Şişme basıncı, kg/cm<sup>2</sup>

$LL$ = Likit limit, %

$\gamma_d$ = Zemin numunesinin kuru yoğunluğu, kg/cm<sup>2</sup>

$w$ = Su muhtevası, %

$$P_p = (5.05 \times 10^{-3}) \times PI^{1.66} \times \frac{C^2}{(w_i)^2} + 4.1239 \quad (\text{Grundite+bentonit zeminler için}) \quad [11]; \quad (2.17)$$

$$P_p = (6.982 \times 10^{-4}) \times PI^{1.92} \times \frac{C^2}{(w_i)^2} + 9.1191 \quad (\text{Kaolinit+Bentonit zeminler için}) \quad (2.18)$$

$$P_p = (3.5817 \times 10^{-2}) \times PI^{1.12} \times \frac{C^2}{(w_i)^2} + 3.7912 \quad (\text{Bütün zeminler için}) \quad (2.19)$$

Burada;

$S_p$ = Şişme potansiyeli, %

$w_i$ = Numunenin başlangıç su muhtevası, %

$C$ = < 2 $\mu$ m kil yüzdesi

PI= Plastisite indisi

$$\log P = -0.07 - 0.018 \times n + 0.021 \times \lambda \quad [6]; \quad (2.20)$$

$$\lambda = LL - 1.3 \times w_0 \quad (2.21)$$

$$\log P = -\frac{(n - a)}{b} \quad (2.22)$$

Burada;

P= Şişme basıncı, kg/cm<sup>2</sup>

n= Porozite

LL= Likit limit, %

w<sub>0</sub>= Tabii su muhtevası, %

a, b= λ'ya bağlı olarak bulunan katsayılar

## 2.10. Şişen Zeminlerin Islahı ile İlgili Çalışmalar

Dinçer ve Berilgen [25], ince daneli kil zeminlere farklı oranlarda (%4 ve %6.5) katılan sönmüş kirecin, zeminin mühendislik özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi amacıyla laboratuvarında zemin indeks deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda,

- Zemine kireç katılmasıyla optimum su muhtevalarında önemli bir değişiklik olmazken maksimum kuru birim hacim ağırlığında artan kireç yüzdeleriyle birlikte çok küçük artışlar olmuştur.
- Şişme potansiyelinde belirgin bir azalma gözlenmiştir.
- Serbest basınç mukavemetinde ve CBR değerlerinde artan kireç yüzdelerine bağlı olarak artışlar görülmüştür.
- Zemine karıştırılan kireç yüzdeleri arttıkça konsolidasyon oturmalarında azalma, kaldırıldığında şişme miktarlarında büyük azalmalar gözlenmiştir.

Çinicioğlu [26], silt-kil karışımı zeminlere değişik oranlarda kireç (%1,2,3,4,6,8,10,15) ve çimento (%4,6,7,8,10,12.5,15.20) katılarak katkı malzemesi miktarının zeminin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneylerde kür süresi

15 gün olarak sabit tutulmuştur. Numuneler modifiye proktor kalıbında hazırlanmış ve cam kavanozlar (desiccator) içerisinde küre bırakılmıştır. Varılan sonuçlar;

- Kireç ve çimento katılması ince daneli zeminin likit limit, plastik limit değerlerini artırıcı ve plastisiteye azaltıcı yönde etki yapmıştır.
- Her iki katkı cinsinde de zeminin mukavemet parametrelerinde artışmeydana gelmiştir.
- İncelemenin yapıldığı ince daneli zemin için tüm parametreler açısından en uygun katkı oranları; kireç stabilizasyonunda %3- %6 arası, çimento stabilizasyonunda %6- %10 olarak bulunmuştur.

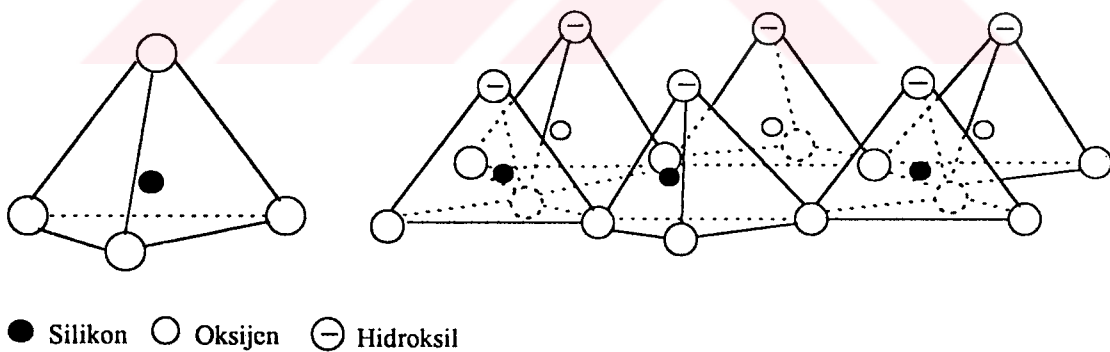


### 3. KİL MİNERALLERİNİN ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. KİL MİNERALLERİN MİNEROLOJİK ÖZELLİKLERİ

Kil mineralleri çoğunlukla kompleks alüminyum hidrosilikatlardır. Killerin saf olarak bulunduğu hallerde dahi çok çeşitleri vardır. Alüminyum, silis ve suyun farklı şekillerde birleşmesinden meydana gelen kil mineralleri çoğunlukla yaprak şeklindedir. İğne şeklinde olan kil minerallerine tabiatta rastlamak mümkündür (attupulgit ve sepiolit gibi). Kil minerallerin iç yapısı kafes yapı şeklinde olup atomlar birbirini takip eden levhalar üzerine yerleşmişlerdir [33]. Kil minerallerinin yapısı iki temel üiteden oluşmuştur.

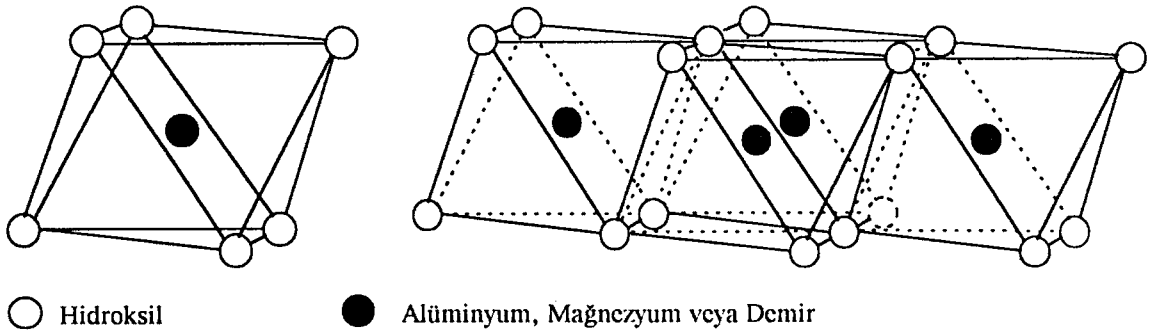
1. Silika tetrahedron, her bir tetrahedron ünitesi bir silikon atomunu çevreleyen dört oksijen atomundan oluşmuştur. Bütün tetrahedronların tepeleri aynı yöndedir ve tetrahedronlar yaprak şeklinde bağlanırlar. Bütün tetrahedronların tabanını oluşturan oksijenler aynı düzlemedir. Her oksijen atomu iki tetrahedrana aittir. Şekil 3.1'de tetrahedron kil yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1. Tetrahedron ve Tetrahedron kil yapısı

2. Alümina oktahedron, oktahedral üniteler alüminyum, magnezyum veya demir atomunu çevreleyen altı hidroksilden oluşur ve oktahedral alüminyum hidroksil ünitelerinin kombinasyonu oktahedral levhasını verir. Metalik atom alüminyum ise Brusit, magnezyum ise Gibsit olarak adlandırılır. Oktahedral üniteleri Şekil 3.2'de gösterildiği şekilde kil yapraklarını oluşturur [29].





Şekil 3.2. Oktahedron ve Oktahedron Kil Yapısı

Kil mineralini oluşturan levhalar arasında kimyasal bir bağ mevcut değildir. Levhaların birbirine temas yüzeyleri klavaj düzlemleri olup mineraller kolaylıkla bu düzlemler boyunca ayrılabilir. Oksijen atomları ile birleşmiş silisyum, alüminyum, mağnezyum veya demir atomlarından meydana gelen bu levhalar, silis ( $\text{SiO}_2$ ) veya alüminyum ( $\text{AlO}_3$ ) levhası olabilir. Silis levhası çok sayıda 4 yüzeylinin birbiriyle birleşmesinden meydana gelir. Bu tetrahedranın 4 köşesine eşit aralıkla yerleştirilmiş oksijen atomları merkezinde de bu atomlardan eşit uzaklıkta bir silisyum atomu bulunur. Alümin levhası ise çok sayıda oktahedronun birbiriyle birleşmesinden meydana gelmiştir. Hidroksiller ise oktahedronunun köşelerinde bulunmaktadır. Bu bakımdan alümin levhasında, iki hidroksil tabakası ile bunların arasında bir alüminyum, demir veya mağnezyum atomları bulunur. Levhaların yanyana geliş şekli ana kil mineralini tayin eder.

Kil minerali çoğunlukla karışık yapıli kristaller şeklinde olup bu kristallerin sıranılışına göre gruplandırılırlar ve aynı gruba ait kil mineralleri de aşağı yukarı benzer özelliklerle birbirine bağlantılı olurlar. Alkali mineraller veya alkali metaller, kil minerallerinin esas bileşimi olarak killerin bileşiminde bulunurlar. Bazı killer tek bir minerallerden ibarettir. Killeri büyük bir kısmı bir kaç mineralin karışımından meydana gelmiştir. Killerin içerisinde kil mineraline ilave olarak, kuvars, kalsit, feldispat ve prit gibi kil olmayan yabancı maddelerde bulunabilir. Bazı killer organik maddeleri ve suda çözünebilir tuzları da içerirler. Killerin oluştukları ortamın ısısı, asit dengesi ve basınç değeri meydana gelecek kil mineralinin cinsini tayin etmektedir. Asidik ortamda, düşük ısı ve basınç altında kaolinit tipi mineraller meydana gelmektedir. Eğer alkali iyonu olarak

potasyum mevcutsa ve bunun konsantrasyonu belirli bir miktarın üzerinde ise montmorillonit veya mika oluşmaktadır. Alkali iyon olarak magnezyum bulunması montmorillonitin oluşmasına neden olur. Yüksek sıcaklık ne basınçlarda diğer alüminyumlu killer meydana gelir. Killerin kimyasal analizleri nadiren kil minerallerini birbirinden ayırabilmektedir. Fakat x ışınları difraksiyonu ve diferansiyel termal analizler gibi tanıma metodları ile kil mineralleri birbirinden ayırt edilebilmektedir.

Killerin başlıca özelliklerinden biri de ısısal işlemlerle eski haline gelmeyecek şekilde değişikliğe uğramalarıdır. Killerin yoğunluğu içerdikleri kristal arası su miktarıyla orantılı olarak değişir. Killerin yoğunlukları genel olarak 2.0-2.3 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır [33].

### 3.2. Kil Minerallerinin Şekli ve Genel Yapıları

İlk zamanlarda topraktaki mineral kolloidlerin amorf ve şekillerinin yuvarlak olduğu zannedilmekteydi. Bugün tekniğin ilerlemesi sayesinde kil parçacıklarının levha şeklinde oldukları kesinlikle ortaya konulmuştur. Bu parçacıklardan bazıları mikaya benzer ve hegzagonaldir. Diğerleri düzensiz levha şeklindedir. Bütün hallerde yatay eksenleri düşey eksenlerden uzundur.

Her kil parçacığı şekli ne olursa olsun, levha şeklinde ve çok sayıda kristal ünitelerden meydana gelmiştir. Levhaların, bir kil parçacığı içindeki dizilişi bir mika parçacığına çok benzer. Bu kristal üniteleri kolloidin tipine bağlı olarak değişik derecelerde birbirine bağlanmışlardır. Bazı kil minerallerinde (bentonit gibi) bu üniteler arasındaki mesafeler ıslanma ve şişme ile genişler. Diğer bazı killerde (kaolinit gibi) ise üniteler birbirine çok daha sıkı bağlanmışlardır ve çok az bir genişleme gösterebilirler.

Kil parçacıkları, danelerinin küçüklüğü nedeniyle çok büyük bir spesifik yüzeye sahiptir. Kil parçacıkları her bir parçacığı oluşturan levha şeklindeki kristal üniteleri arasındada iç yüzeylere sahiptirler. Yani kil fraksiyonunun büyük yüzey alanı sadece parçacıkların küçük oluşundan değil, aynı zamanda sahip oldukları iç yüzeylerden kaynaklanmaktadır.

Her bir kil parçacığı izomorfus yerdeğiştirmeden dolayı negatif elektrikle yüklü olduğu için elektriksiz olarak aktiftir. Negatif elektrik yükleri nedeniyle kil parçacıkları pozitif elektrikle yüklü kationları kendine çeker ve bağlar. Bu çift tabakanın (double layer)

meydana gelmesi ile sonuçlanır. Bir ortamda kil kolloidi hareket ettiği zaman ona bağlı binlerce katyonda birlikte hareket eder. Kristal yapıdaki kil parçacıkları negatif elektrik yükü taşıdıklarından elektrik akımı geçen bir ortamda hareket eder.

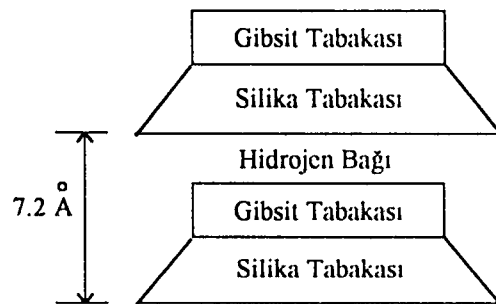
Kil parçacıkları etrafında fazla miktarda su adsorbe edilmiştir. Bu suyun bir kısmı kil parçacıklarına bağlı bulunan katyonların hidrasyonu sonucunda tutulmaktadır. Bir değerlikli katyonlar iki değerlikli katyonlara nazaran daha fazla hidrate olurlar. Ayrıca kil parçacıkları etrafında su tuttıkları gibi kristalleri oluşturan levhalarda su tutarlar [28].

### 3.3. Çeşitli Kil Minerallerinin Mineralojik Yapıları

Kil mineralleri çok küçük olmalarına rağmen kristal bir yapı gösterirler. Kristal özelliklere göre, genel olarak dört grup kil mineralleri bulunur.

1. Kaolinit kil minerali
2. Montmorillonit kil minerali
3. İllit kil minerali
4. Klorit kil minerali

**1. Kaolinit Grubu;** bu grup içine bir çok kil mineralleri girer. Zeminlerin çoğunda bulunur ve önemlidir. Bu minerallerin kristalleri levha şeklindedir ve düz kristal üniteleri oluştururlar. Kristal üniteleri bir gipsit ve bir silika tabakasının üst üste gelmesiyle meydana gelmiştir. Her bir tabaka  $7.2 \text{ \AA}$  kalınlığındadır. Her bir tabakanın yanal boyutları  $1000 \text{ \AA}$ - $20000 \text{ \AA}$  ve kalınlığı  $100 \text{ \AA}$ - $1000 \text{ \AA}$  arasındadır. Bu sebeple bunlara 1:1 kristal tipinde olan killer denir. Kaolinit kilinin yapısı Şekil 3.3.'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kaolinit Kilinin Yapısı

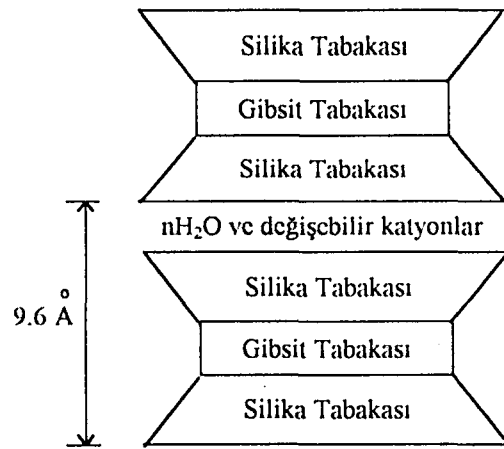
Kristali oluşturan üniteler birbirine oksijen hidroksit bağı ile sıkıca bağlanmışlardır. Bu yüzden kil ıslandığı zaman kristal üniteleri arasındaki mesafe genişlemez. Kristal

üniteleri arasına su moleküllerinin ve katyonlarının girmesi çok güçtür. Bu sebeble kaolinitin efektif yüzeyi sadece dış yüzeylerdir. Bunun sonucu olarak kaolinitin katyon değişim kapasitesi diğer kil mineralleri gruplarından daha düşüktür (3-15 meq/100gr).

Kaolinit kristalleri kabaca hegzagonaldir. Montmorillonit kristallerine nazaran daha büyüktür. Çapları genel olarak 0.1-0.5 mikron arasında değişir. Diğer silikat kil minerallerinin aksine, kaolinitin plastiklik, kohezyon, büzülme ve şişme özellikleri çok zayıftır. Kaolinit yüksek oranda kollait özellikleri göstermez. Kaolinit ıslandığı zaman orta derecede bir plastisiteye sahip olurken, diğer kil minerallerinden daha büyük içsel sürtünmeye sahiptir. Bu gruptaki minerallerin özgül ağırlıkları 2.60-2.68 gr/cm<sup>3</sup> ve özgül yüzeyleri 10 m<sup>2</sup>/gr. civarındadır. Kaolinit kilinin formülü 2H<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub> şeklindedir [29].

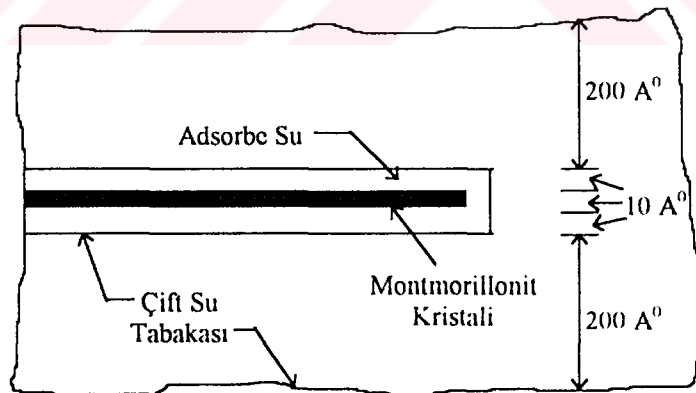
**2. Montmorillonit Grubu;** montmorillonit grubu da bir çok mineral içerir. Bu grupta montmorillonitten başka Saponit, Hektorit, Nontronit gibi minerallerde vardır. Montmorillonit kristali alt ve üstten iki silika tabakası ile kuşatılmış bir gipsit tabakasından ibaret kristal ünitelerinin üst üste gelmesiyle meydana gelmiştir. Silis ve gipsit tabakaları oksijen atomuyla birbirine bağlanmıştır. Montmorillonit kristalleri 2:1 tipindedir. Yani iki silika tabakası ve bir gipsit tabakasından oluşan ünitelerden meydana gelmiştir. Montmorillonit kilinin yapısı Şekil 3.4'de şematik olarak gösterilmiştir.

Kristal üniteleri birbirine H<sub>2</sub>O ve katyonlar ile bağlanmıştır ve kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebilir. Montmorillonit kristallerinin çapları 0.01-2 mikron arasında değişir. Kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebildiğinden katyonlar ve su molekülleri üniteler arasına girebilir. Böylece montmorillonit miktarı yüksek olan killer ihtiva ettikleri değişebilir katyonların tabiatına bağlı olarak önemli miktarda şişme veya büzülme gösterebilir. Montmorillonit kil kristalinin dış yüzeylerine ek olarak geniş bir iç yüzey mevcuttur. Bu iç yüzeylerde negatif elektrikle yüklüdür. Bu yüzden montmorillonit kili yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahiptir. Katyon değişim kapasitesi 80-150 meq/100gr arasında değişmektedir ve kaolinitin 10-12 mislidir.



Şekil 3.4. Montmorillonit Kilinin Yapısı

Suyun kristal üniteleri arasına girmesiyle montmorillonit kristalleri büyük oranda genişler ve şişerler. Montmorillonit yaprakları suyla sarılmış olup ıslandıkları zaman yüksek plastisiteye ve düşük içsel sürtünmeye sahiptir. Kurdukları zaman çok miktarda büzülme ve çatlama gösterirler. Bu gruptaki killerin özgül ağırlıkları  $2.2-2.3 \text{ gr/cm}^3$  özgül yüzeyleri ise  $800 \text{ m}^2/\text{gr}$  civarındadır. Bu gruptaki killerin genel formülü  $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{O}_2\text{NH}_2\text{O}$  şeklindedir. Tipik bir montmorillonit kil danesi Şekil 3.5’de gösterilmiştir [29].

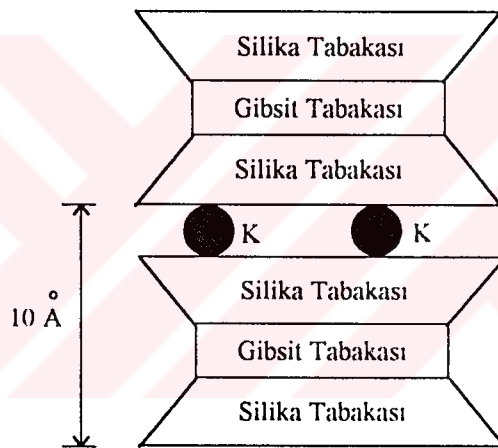


Şekil 3.5. Tipik Bir Montmorillonit Danesi

**3. İllit Grubu;** toprakta en fazla önem taşıyan kil minerali grubudur. Kristal yapısı 2:1 tipindedir. Genel yapısı bakımından montmorillonit kiline benzer. Bununla beraber daneciklerin çapı nisbeten daha büyüktür. Silis tabakasındaki silisin %15’i alüminyumla yer değiştirir. Açıkta kalan valanslar ise geniş ölçüde  $\text{K}^+$  iyonları tarafından

doldurulmuştur. Potasyum atomlarının kristal üniteleri arasında yer aldığı ve üniteleri birbirine bağladığı kabul edilmektedir. Bu sebeplede kristal üniteleri arasındaki mesafeler fazla genişleme göstermez. Bunun sonucu olarak hidrasyon, kation adsorpsiyonu, şişme, büzülme ve plastiklik gibi özellikler belirgin değildir. Fakat bu özellikleri kaolinit ile montmorillonit arasındadır.

İllit kilinin şişme özelliği montmorillonit kilinden az, içsel sürtünmesi ise fazladır. Bu gruptaki kil minerallerinin özgül ağırlıkları  $2.64-3.0 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişir, özgül yüzeyleri ise  $80 \text{ m}^2/\text{gr}$  civarındadır. Kimyasal formülü,  $(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{Si}_4-x\text{Al}_x\text{O}_{10}$   $0.5 <x> 0.75$  şeklinde değişik bir tarzda gösterilir. İllit kilinin yapısı şematik olarak Şekil 3.6'da gösterilmiştir [29].



Şekil 3.6. İllit Kilinin Yapısı

**4. Klorit grubu;** Demirli taşlar içinde yeşil renkte ve zengin phyllit'li mineralleri belirtmek için bu terim kullanılmaktadır. Kloritler kristalin şistler, hidrotermal taşlar ve çok sayıda silikatların alterasyonundan meydana gelmektedir.

Aktüel sedmanlar, toprak ve sedimanter kayalar içerisinde bulunurlar. Bazı sedimanların başlıca kompozisyonlarını kloritler oluşturur. Klorit daneleri dört katlı (2:1:1) yapısal tabakaya sahiptir. Kloritleri kristal yapısını mika ve brusit tabakaları meydana getirir [33].

### 3.4. Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri

#### 3.4.1. İyon değişim kapasitesi

Fazla özgül yüzeye sahip kil mineralleri, humik maddelerin yüzeyleri üzerindeki molekülleri, anyon ve katyon halindeki iyonları adsorbe edebilirler. İyon adsorbsiyonu dönüşümlüdür, yani adsorbe edilmiş diğer iyonlarla eşit miktarlarda (değerlikte) yer değiştirir. Örneğin,  $6K^+$  ile  $3Ca^{+2}$  veya  $2Al^{+3}$ ;  $2NO_2^-$  ile 1  $SO_4^{2-}$ 'ün yer değiştirmesidir. Değişim, katı ve sıvı fazlar arasındadır. Yani ortamda su mevcut olmalıdır.

Değişebilir iyonlar, sınırlı bir periyod içerisinde, örneğin katyonlar için 1 N amonyum asetat veya 0.2 N  $BaCl_2$ , anyonlar için 1 N amonyum oksalat gibi olağan ayıraçlar tarafından değiştirilebilen iyonlardır. Değişemeyen iyonlar ise minerallerin kafesi içinde hapsedilmiş veya organik bileşiklerde kimyasal olarak bağlanmış ve sınırlı bir periyod içerisinde alışılmış ayıraçlarla salıverilmeyen iyonlardır. Bazı iyonlar bu ikisi arasında bir karaktere sahiptir.  $K^+$  iyonları düzlemsel yüzeyler üzerindeki daha kolay değişebilen iyonlardan daha kuvvetli, fakat ara katman pozisyonlardaki iyonlardan daha zayıf bir şekilde tutulurlar [28].

#### 3.4.2. Katyon değişim kapasitesi (KDK)

Katyon değişim kapasitesi, izomorfus yer değiştirme kapasitesinin bir ölçüsüdür. İzomorfus yer değiştirme olayı kristal yapıda herhangi bir değişiklik olmadan iyonların yerlerine eşit veya farklı değerli başka iyonlara bırakmasıdır. Örneğin, zeminde alüminyumun çok olduğu bir yerde bir silikon atomunun yerini bir alüminyum atomu alması şeklinde olabilir. Böyle bir durumda silikon +4 alüminyum +3 olduğu için:

- Bu değişimle her değişim için bir dengelenmemiş elektrik yükü ortaya çıkar.

İyonlar eş boyutlu olmadıkları için kristal yapıda şekil bozulması olur.

Bunun bir sonucu, kristal yapısının büyümesi engellenmektedir. Kaolinit kilinde bu tip değişimler az olup kaolinit kil daneciğinin elektriksel yükü gözönüne alınırsa yaklaşık her 400 silikon iyonundan birisinin bir alüminyum iyonu tarafından tutulduğu söylenebilir [7].

İzomorfus yer değiştirme kil danelerine negatif yük sağlamaktadır. Bu dengesizliği önlemek için ortamdaki katyonlar kil danelerinin kenarlarına ve bloklar arasına girmektedir. Bu katyonlar birçok durumda yerlerini bir başka katyona da bırakabilmektedir. Yük dengesizliğini giderebilmek için gerekli katyon miktarına katyon değiştirme kapasitesi denir. Katyon değişim kapasitesi spesifik yüzey alanının artması ile artmaktadır. Katyon değişim hızı kil mineraline, katyonlarına ve anyonlarına bağlıdır [28].

Killerde katyon değişimlerinin nedenleri:

1. Silika-alumina birimlerinin kenarlarındaki kırık bağlar, değişebilir katyonlarla dengelenmiş olan doyurulmamış yükler oluşturur. Danecik boyutu küçüldükçe kırık bağ sayısı ve buna bağlı olarak da katyon değişim kapasitesi artar. Kaolinit kilinde kırık bağlar katyon değişiminin en önemli nedenidir. Montmorillonit kilinde ise katyon değişiminin %20'si kırık bağlardan, %80'i örgü içi yer değiştirmelerinden ileri gelir.
2. Örgü içi yer değiştirme ile örgü içinde dengelenmemiş yükler oluşur ve yüklerin çoğu, adsorplanmış katyonlarla dengelenmiştir.
3. Açıktaki hidroksillerin hidrojeni değişebilir katyonlarla yer değiştirebilir. Bu etki de kaolinit kilinde önemlidir [30].

### 3.4.3. Anyon değişim kapasitesi (ADK)

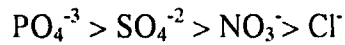
Kil mineralleri, hidroksitler ve organik maddeler üzerinde pozitif yükler bulunmakla birlikte, negatif yükler çok daha fazla sayıda olduğundan anyon değiştirme kapasitesi, katyon değiştirme kapasitesine oranla daha azdır. Bu nedenle anyonların yer aldığı değişim reaksiyonları, katyonların yer aldığı değişim reaksiyonlarından daha az önemlidir.

Kil mineralleri, düşük pH'da kırılmış kenarlar üzerindeki Al-OH gruplarından OH<sup>-</sup> iyonları dissosiyeye olarak değişebilir hale geçer. Yine H<sup>+</sup> iyonları bu kesimlere eklenir (AlOH+H<sup>+</sup>=AlOH<sub>2</sub><sup>+</sup>) ve anyonlar pozitif yükü çekilir.

Başlıca değişebilir anyonlar PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> ve Cl; malate ve citrate gibi organik anyonlar ve MoO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> gibi iz elementlere ilişkin anyonlardır. As, Fe, Se gibi potansiyel zehirler arsenat, florür ve selenat olarak adsorbe edilebilir.



Anyonların değişim ilgisi ve bağlanma gücü katyonlarda olduğu gibi hidrasyon ve değerliğe bağlı olup řu sıraya göre azalır.



$\text{PO}_4^{-3}$  ve  $\text{SO}_4^{-2}$  önemli miktarda adsorbe edilirken,  $\text{NO}_3^{-}$  ve  $\text{Cl}^{-}$  çok zayıf bir şekilde tutulur ve hemen tümüyle kil çözeltisinde olacak şekilde kilde bulduklarından yıkanmadan çok çabuk etkilenir.  $\text{PO}_4^{-3}$  iyonları gerçekte sadece alkalın şartlarda mevcuttur, nötral ve asit topraklarda fosfat esas olarak  $\text{HPO}_4^{-2}$  ve  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$  iyonları halinde bulunur ve bunların değişim davranışları  $\text{PO}_4^{-3}$  iyonu ile büyük ölçüde aynıdır.  $\text{SO}_4^{-2}$  iyonları önemli ölçüde sadece asit topraklarda adsorbe edilir ( $\text{pH} < 5.5$ ) [28].

#### 3.4.4. Elektriksel İletkenlik

Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, ortamın elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, karışımdaki iyonların tipi ve sayısı ile ilgilidir. Dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği ve kolloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliği arttırmaktadır.

Bir danede elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kitle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütlesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim kütlesine gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir [29].

#### 3.4.5. pH

Karışımın yüksek pH değeri kil danelerini dispers yapmakta ve kil daneleri yüzeyindeki negatif yükü arttırmaktadır. Dolayısıyla daneler arasındaki itmeyi arttırmaktadır. pH değeri, ortamda  $\text{H}^{+}$  veya  $\text{OH}^{-}$  iyonlarının bulunma derecesini ifade etmektedir. pH değişimi zemin/su karışımını önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük pH değeri, toprakta flokulasyonu ve gevşek zemini ifade etmektedir. Yüksek pH değeri ise dispersiyonu ve sıkı zemini belirtir.

pH değeri kil danelerinin adsorpsiyon karakterini etkiler. Asit durumunda adsorpsiyon artar. Kil danelerinin köşeleri pozitif yükle yüklenir. pH değerinin düşük olması kil dane yüzeyinin elektriksel potansiyelini azaltmaktadır. Yani negatif yüzeyleri nötralize etmektedir. Zeminin pH değeri metal miktarlarının azaltılmasında oldukça önemlidir. Zeminin pH değeri, genellikle kirliliğin zeminiçinde ilerlemesini azaltmak veya durdurmak için 6-8 arasında olmalıdır [29].

#### **3.4.6. Ağır metaller**

Metaller, zemin içindeki kil mineralinin yüzeylerine katyon değişim kapasitesi ile adsorbe olur. Metaller genellikle killere ve organiklere sıkıca bağlıdır. Metal ile kil arasındaki işlemler; metal tipi, zemin tipi, pH ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Düşük katyon değişim kapasitesine sahip topraktaki metal konsantrasyonun ilerlemesi kolaylıkla gözlenebilir. Toprak pH'ının ayarlanması ile düşük katyon değişim kapasitesine sahip topraklarda metallerin toprak içinde ilerlemesi durdurulabilir [29].

#### **3.4.7. Spesifik yüzey alanı**

Kil danelerinin spesifik yüzey alanı dane davranışına etki eden en önemli özelliklerden birisidir. Bunun nedeni,

1. Flokulasyon, dispersiyon ve iyon değişimi spesifik yüzey olayına bağlıdır.
2. Spesifik yüzey alanı, kil mineralinin dane çapına ve şekline bağlıdır.

Çift tabaka kalınlığı kil danesinin yüzey alanına direk olarak bağlıdır. Çift tabaka kalınlığı yüzey alanı arttıkça artmaktadır [29].

## 4. ŞİŞME/KABARMA MEKANİZMASI

### 4.1. Kil Zeminlerde Hacim Değişimleri

#### 4.1.1. Killerde suyun tutulma mekanizması

Kil minerallerinin sudan etkileşiminde kil mineralleri arasına suyun girmesi halinde elektriksel yüklerde ve dolayısıyla iyonlarda değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişebilir iyonlar kil mineralinin olduğu ortamdaki var olan iyonların durumuna göre değişmektedir. Değişebilir bu iyonların hacimlerinde hidrasyon sonucunda bir büyüme meydana gelir. Hidrasyona uğramış bu değişebilir iyonlar mineral yüzeyindeki tekli iyon tabakasına sığmazlar. Bu değişebilir iyonlar etrafında su tabakaları ile birlikte mineral yüzeyinden uzaklaşarak dengede olacakları bir noktaya gelirler. Burada iyonlar mineral yapısındaki elektriksel yükü dengeledikleri için mineral yüzeyine çekilmekte, fakat aynı anda da kendi termal enerjileri nedeniyle birbirinden uzakta olmak isterler. Dolayısıyla konumları bu iki kuvvetin dengelendiği noktadır. Burada iyonların su almaları ve mineral yüzeyinden uzaklaşarak dengede oldukları bir noktaya gelmeleri kil danesi etrafında bağlı su tabakası (dağınık çift tabaka) oluşmasına yol açar.

Bağlı su tabakanın kalınlığı dane etrafındaki elektriksel yükün dengelendiği mesafeyi göstermektedir. Bağlı tabakadaki su iyonlarının mineral yüzeyine çekilme kuvvetleriyle bağlı olmalarından bu sudaki çekim kuvvetlerinin etkisi altında dane yüzeyine çekilirler. Mineral yüzeyindeki elektriksel yük ile polar su arasındaki kuvvetler, hidrojen bağları, van der Waals kuvvetleri gibi diğer bazı kuvvetlerin etkisi de su moleküllerinin çekilmelerine neden olan kuvvetlerdir [28].

#### 4.1.2. Şişme mekanizmasının modeli

Islanma ile meydana gelen şişme yani hacim artışı, şişen kilde kil parçacıkları arasında etkili itme sağlayan suyun varlığına bağlıdır. Termodinamik koşullar nedeniyle zemin içerisindeki suyun serbest enerjisi, serbest suyun enerjisinden daha az olduğu sürece zemin içerisinde su hareketi olacaktır. Bir kumun boşlukları su ile tamamen dolması

halinde hacimdeki artış önemsizdir. Fakat kil için bu ıslanma genellikle bir hacim artışı meydana getirir. Bunun sebebi kilin özgül yüzey alanı ve katyon değişim kapasitesi gibi fiziko-kimyasal özelliklerindedir.

Şişme hacmi, çekme ve itme kuvvetleri arasında dengeye bağlı olduğundan belirlenmesi zordur. Nihai hacim ve şişen hacim artışları, parçacıklar arası itmedeki azalmalar gibi dış etkilere duyarlıdır.

Şişme basıncı, kil parçacıkları arasındaki iyonların konsantrasyonundaki farklılığa bağlı olan osmotik basınç gibi hesaplanmıştır. Bu sadece itme kuvvetlerini verir ve herbir çekme kuvvetinin miktarı ile şişmenin belirlenmesi yanlış olabilir. Parçacıklar arası iyon konsantrasyonu sonucunda meydana gelen üst üste binen değişebilir iyonların difüzyon tabakaları ile paralel düzenlenmesinin düz parçacıklara bağlandığı bir model kabul edilmiştir. Bu hesaplamaların yapılmasında bilinmesi gereken sistemin özellikleri kilin özgül yüzey alanı, değişebilir iyonların cinsi, boşluk suyundaki iyonların konsantrasyonu ve değişebilir iyon kapasitesi veya kil yükünün yüzey yoğunluğudur.

Toplam kil ağırlığının %60'ının altındaki su muhtevaları ve 0.001M altındaki tuz konsantrasyonları için kil parçacıkları arasındaki anyonların konsantrasyonu ihmal edilerek hesaplama basitleştirilmiştir. İki etkileşimli kil plakası arasında orta noktadaki katyonların konsantrasyonu aşağıdaki formülle ifade edilmiştir.

$$C_c = \frac{\pi^2}{z^2 \times B \times (d + X_0)^2 \times 10^{-16}} \quad (4.1)$$

Burada;

$C_c$  : mol/lit cinsinden iki kil tabakası arasında orta noktadaki katyonların konsantrasyonu

$z$  : Değişebilir iyonların dengesi

$d$  : İki kil plaka arasındaki mesafenin yarısı

$X_0$  : Kilin yük yoğunluğu ve iyon dengesine bağlı düzeltme faktörü

$B$  :  $10^{15}$  cm/m (dielektrik sabitine ve sıcaklığa bağlı bir sabit)

Tek değerlikli iyonlar için Van't Hoff denkleminde şişme basıncı hesaplanabilir.

$$P = R \times T \times (C_c - 2C_0) \quad (4.2)$$

Burada;

$P$  : Hesaplanmış şişme basıncı

R : Gaz (hava) sabiti

T : Mutlak sıcaklık

$C_0$  : mol/lt cinsinden gözenek suyundaki tuz konsantrasyonu.

Parçacıklar arası mesafe ve su muhtevası arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$w = \frac{S \times d}{100} \quad (4.3)$$

Burada;

w : Ağırlık yüzdesi olarak su muhtevası

S : Kilin yüzey alanı,  $m^2/gr$

Bu hesaplamalar, düşük tuz konsantrasyonlarında yüksek şişme gösteren Na-montmorillonit için ölçülmüş şişme basınçları için uygun olduğu belirlenmiştir. Yüksek tuz konsantrasyonlarında ise Na-montmorillonitin ölçülmüş basınçlarının hesaplanmış değerleri aştığı belirlenmiştir [31].

#### 4.1.3. Şişmenin fiziksel yönü

Şişme mekanizması büzülmeden daha karışıktır. Bir zeminin büzülme karakteristikleri kil mineralinin tipine, dane çapı dağılımına ve oriyantasyonuna bağlıdır. Şişme bazı olaylara neden olmaktadır. Bunlar,

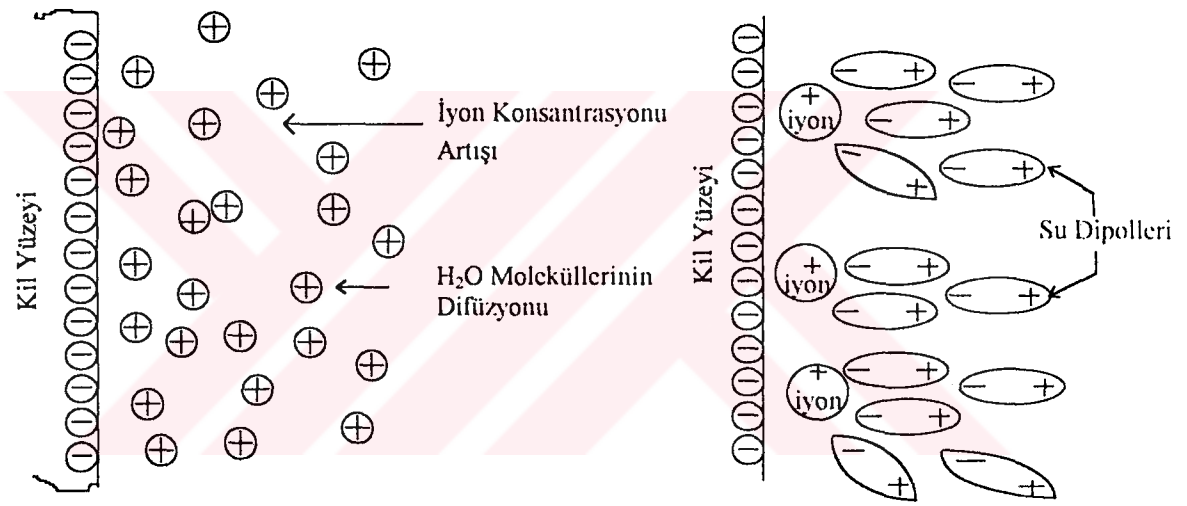
1. Kil mineralinin elastik geri dönmesi,
2. Su içinde kil minerallerinin birbirini itmesi,
3. Kil minerallerinin ve emilmiş katyonların elektriksel itmesi,
4. Kil mineralleri arasında sıkışan havanın genişlemesidir.

Düzlem şekilli kil mineralleri, sık sık yatay yönelmeyi tercih ederler. Danecikler arasındaki itmenin kuvveti yassı (düz) yüzeylerin düşeyinde en büyüktür. Düşey yönde danelerin ayrılma mesafesi yatay doğrultudan daha büyüktür. Aşırı konsolide killerin çoğunda danecikler arasında kısmi paralel yönlendirme vardır.

Şişme potansiyeline sahip bir zemin, şişme ve büzülmeye maruz kaldığı konum arasında su muhtevasının üst ve alt sınırlarına sahiptir. Bundan dolayı zeminde meydana gelebilecek harekete neden olan su muhtevasındaki değişimler bu kritik bölge içinde bulunmaktadır. Su muhtevasındaki değişimlerin üst sınır üzerinde ve alt sınır altındaki bölgelerde bulunması zeminde hacim değişimine neden olmayacaktır. Alt ve üst şişme

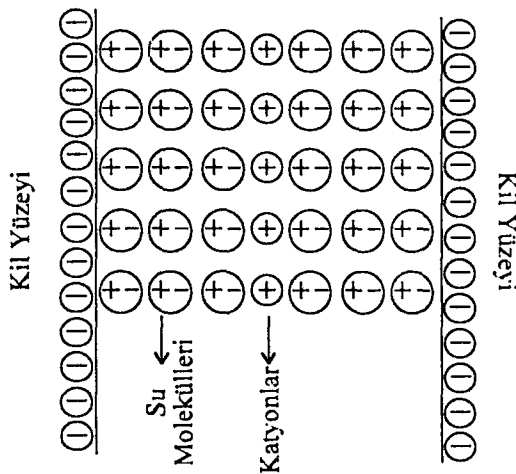
limitindeki su muhtevası arasındaki fark şişme indeksi olarak adlandırılmaktadır. Bu belirlenmiş zemin tipi için sabit bir parametre değildir.

Killerde şişme esas olarak elektriksel çift tabaka ile ilgilidir. Kil-su sistemindeki değişebilir katyonların hepsi kil yüzeyinin yan kenarında tutunamaz. Fakat yüzeyden belirli bir mesafede bulunurlar. Negatif yüklenmiş kil yüzeyi ve pozitif iyonlar arasındaki elektriksel kuvvet, kil yüzeyine katyonları çeker. Fakat onların termal enerjisi, yüzeyden uzaklaştıkça azalır. Komşu parçacıkların iyon dağılım tabakalarının birbirine tesiri şişme özellikleri için bir açıklama verir [19]. Şişme nedeniyle parçacıklar arasındaki itme ve su adsorpsiyonu için farklı mekanizmalar Şekil 4.1 (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir [31].



Şekil 4.1. (a). Osmotik ile Çekim

Şekil 4.1. (b). İyon Hidrasyonu



Şekil 4.1. (c). Dipollerin Çekilmesi

#### 4.1.4. Şişen zeminler ile ilgili problemler

Şişen zeminler, mevsimsel değişimlere maruz kaldığında zemin içindeki su periyodik olarak yükselir ve alçalır. Şişen zeminler, temellerin tasarım ve yapımında oldukça önemlidir. Dünyada buharlaşmanın yağışı aştığı kurak ve yarı kurak yerlerde zeminlerin çoğunun tabii su muhtevası şişme üst sınırının altındadır. Şişen zeminlerin bulunduğu yerlerde hacim değişimi ile su muhtevasındaki değişim aynıdır. Bu bölgelerde yağış ve buna bağlı olarak su muhtevasında büyük değişimler meydana gelir. Şişen zeminler üzerinde bulunan hafif yapılar, gömülmüş borular ve otoyollar genellikle bu zeminlerde faklı şişme ve/veya büzülmeden meydana gelen hareketlere ve istenilmeyen çatlaklara maruz kalır. Şişen zeminlerden dolayı binalardaki yapısal hasarların başlıca nedeni, temel altı zeminin farklı kabarma özelliği göstermesidir. Aynı zamanda farklı oturma, kil tabakasının yatay kalınlığına, yapı altındaki zeminde su muhtevasındaki değişimlere ve zeminin üniform olmaması gibi faktörlere bağlıdır. Yapıların civarındaki zeminde su muhtevasında oluşacak değişimler bölgesel ve yerel şartlardaki değişimlerle ilgilidir. Bölgesel şartlar, yüzey sularının yetersiz drenajı, bahçeler ve çayırların bölgesel suları ve su dren borularının kırık olması gibi durumlardır. Diğer yerel çevresel değişimler büyük fırın, buhar kazanı ve ocaklar gibi ısıtılmış alanlardaki bölgesel buharlaşmalar ve binalara yapışık bitkiler tarafından suyun emilmesine bağlı olarak zeminde su muhtevasında azalmalara sebep olabilir [23].

#### 4.1.5. Şişme potansiyelini etkileyen faktörler

Belirli bir alandaki çevresel şartlar ve şişen zeminlerin yerleşimi zeminlerin davranışında önemli rol oynar. Nihai şişme miktarını (potansiyelini) etkileyen faktörler kilin aktivitesi, kil tabakasının kalınlığı, şişen kil miktarı ve derinliği boyunca buharlaşmanın oranı ve yağış miktarının yoğunluğu, sıcaklık, sürsarj yükü, Y.A.S.S'nin derinliği, zeminde yatay ve düşey gerilmeler, mevsimsel su (nem) değişiminin doğal durumu ve derinliği, zaman ve sıvı özelliğindeki değişiklikler gibi parametrelerdir.

Kil mineralinin tipi, şişen zeminlerde kabarmanın belirlenmesinde önemli rol oynar. Üç tip kil mineralinden kaolinit, illit, montmorillonit en sonuncusu en fazla

şişme/büzülme potansiyeline sahiptir. Şişen kil mineralinin şişme potansiyeli kil mineralinin yapısına (bileşimine), kristal yapısına, özgül yüzey alanına ve katyon değişim kapasitesine bağlıdır. Zeminin hacim değişikliğinde etkili olan ve şişme potansiyelini doğrudan etkileyen parametrelerin bazıları aşağıda verilmiştir.

1. **Mineral tipi ve miktarı;** mineral tipi, optik ve elektron mikroskobu, X-ray difraksiyonu, diferansiyel termal analizi, ışınım (lazer) analizi, boya absorpsiyonu ve kimyasal analiz teknikleri ile belirlenir. Daha küçük danecik boyutunda, kil danelerinin birim hacmi başına daha fazla su adsorpsiyonuna (emmesine) müsaade edilir.
2. **Yoğunluk;** yoğun killer, aynı başlangıç su muhtevasında ve daha düşük yoğunlukta benzer bir kil ile karıştırılıp, ıslanmışta daha fazla şişme özelliği gösterir.
3. **Yük şartları;** sürsarj yükleri şişmeyi azaltır. Şişen bir zeminde yük şartlarının fazla olması halinde ortamda su bulursa bile sürsarj yükü şişmeyi sıfırda tutabilir. Şişme basıncındaki büyük azalmalar, şişme miktarındaki azalmanın sonucudur.
4. **Zemin yapısı;** gerilme tarihi şişmeyi etkiler. Örselenmemiş veya çimentolaşmış şişen zeminler, şişme basıncının büyük bir kısmını emebilir ve deformasyona karşı yüksek dirence sahiptirler. Örselenmiş killerde şişme, tanımlanmış aynı şartlar altında örselenmemiş benzer killerden daha fazladır.
5. **Zaman;** şişen kil zeminlerde su geçisi yavaştır. Tabakanın kalınlığına ve permeabilitesine bağlı olarak doygunlaşması için haftalar hatta yıllar gerekebilmektedir.
6. **Akıcı boşluk;** yüksek pH, katyonları ayırmaya çalışır. Boşluk (serbest) suyu içindeki yüksek tuz konsantrasyonu, daha az şişmeye ve daha az emmeye sebep olmaktadır.
7. **Su muhtevası;** Kuru killer, yüzey basıncı ve su muhtevası arasındaki direkt ilişkiden dolayı, ıslağa göre daha fazla şişecektir [23].

#### 4.1.6. Arazide (yerinde) şişme potansiyelinin belirlenmesi

Temel zeminin şişme üç şekilde meydana gelir;

1. Binanın bitiminden sonra yaklaşık 4 yıl veya daha fazla yıl içinde kabaca yapının başlangıcından ve bitiminden sonra genellikle yukarı doğru bir hareket başlar.
2. Çevrimli şişme/büzülme normalde binaların çevresel alanında oluşur. Başlangıçta yağışla, yağışın sıklığı ve miktarı, buharlaşmanın oranı ile ilgilidir.



3. Bölgesel kabarma, su veya kanalizasyon borularındaki veya her ikisindeki kırılmanın sonucu olabilir [23].

Arazide yüzeye yakın bulunan zeminin şişme ve büzülme potansiyelini etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir.

1. Yüksek spesifik yüzey alanına sahip bazı killerin bulunması (genellikle montmorillonit).
2. Zemin elemanında, su muhtevasında değişiklikler meydana getiren;
  - a) Bitkisel su ihtiyacının zemindeki su ile karşılanamadığı (dengelenemediği) alanların bulunması.
  - b) Yağış miktarındaki mevsimsel değişimlerden etkilenen yüzey yakınında zemin tabakalarının bulunması.
3. Geçirimsiz bir tabaka ile kaplanmış bir yüzey alanında zemindeki kapiler kuvvetlerin bertaraf edildiği yerlerde veya insanlar tarafından bir bina için kazı yapılması ile zemindeki efektif gerilmelerin azalması gibi faktörlerdir

McDowell, mevsimsel su muhtevası değişim derinliği ve zemin yüzeyi arasındaki su muhtevasındaki artışla şişmeye neden olan mekanizmalarda bazı durumlarda yüzeydeki düşey şişme potansiyelinin büyüklüğü için uygun bir metod geliştirmiştir. Bu metod PVR (düşey şişme potansiyeli) olarak adlandırılır. Bu metotta bitkinin su ihtiyacındaki değişimler, osmotik emme sonucu meydana gelen boşluk sıvısındaki kimyasal değişimler, zemin yapısına uygulanmış içsel gerilmedeki azalma gibi denge su muhtevasının altında oluşan olağandışı sonuçlar gözönüne alınmamaktadır. Sadece denge su muhtevası derinliğinin altında bulunan serbest gerilmeye bağlı olan PVR metodunda gözönüne alınmayan şişme potansiyelindeki ilave bir artışın, içsel gerilmedeki azalma ile meydana geldiği bilinmektedir. Bu ilave şişme potansiyeli hesaplanmak istendiğinde, aşırı yüklere bağlı olarak başlangıç düşey gerilmenin (veya aşırı konsolide killerde; toplam gerilme-boşluk suyu basıncı değeri) ve şişmenin hemen hemen bittiği en son noktada denge derinliğinin altında bazı yatay alt tabakalarda negatif kazı yükleri nedeniyle meydana gelen gerilmedeki değişimlerin belirlenmesi yeterlidir. Zemindeki bu derinlik, sıfır hacim değişimindeki basınç veya sıfır şişme basıncındaki efektif gerilme derinliğine eşittir. Herbir tabaka için düşey gerilmedeki azalmalara bağlı olarak boşluk oranındaki artış ve başlangıç boşluk oranı değerlendirilmiştir. Doymun zeminlerin çoğunda boşluk oranındaki artış, gerilme artışının logaritmik bir fonksiyonudur [2].

$$\Delta S_i = \frac{C_{e_i}}{1 + e_{0_i}} \times h_i \times \log \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \quad (4.4)$$

Burada,

$C_e$ : Gerilme değerinin log'una karşılık boşluk oranındaki artış

$e_0$ : Başlangıç boşluk oranı

$\Delta S$ : i'ninci tabaka için lineer birimlerde şişmenin büyüklüğü

$h$ : Lineer birimlerde tabaka kalınlığı

$P_0$ : Toplam gerilme-boşluk suyu basıncı

$\Delta P$ : İnşaattan daha sonra kazıya bağlı olarak  $P_0$ 'daki azalma

$i$ : Tabaka sayısı

#### 4.2. Zeminlerin İyileştirilmesi

Zeminlerin içine değişik katkı maddeleri karıştırılarak bazı fiziksel özelliklerini değiştirmek ve buna bağlı olarak belirli mühendislik özelliklerini iyileştirmek mümkün olmaktadır. Kireç ve çimento zemin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan katkı maddeleridir.

Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılacak yöntemler iki ana grupta toplanabilir.

1. Toprak dolgularda kullanılacak zeminlerin malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi ve uygun dolgu hazırlama yöntemleri;

a) Sıkıştırma

b) Katkı maddeleri kullanılması ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi

2. Tabii zemin tabakası özelliklerinin yerinde iyileştirilmesi ;

a) Ön yükleme

b) Drenaj

c) Enjeksiyon

d) Dinamik stabilizasyon

gibi yöntemler sayılabilir [32].

#### 4.2.1. Şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonu

##### 4.2.1.1. Kireç stabilizasyonun mekanizması

Sönmemiş kirecin su ile etkileşiminden hidratasyon sonucu sönmüş kireç meydana gelir. Sönmüş kireç killi zeminlerle karıştırıldığında kildeki alüminyum ve silika ile kireç içindeki kalsiyum iyonları arasında puzolanik reaksiyon meydana gelir. Puzolanlar ile kirecin reaksiyona girmesi neticesinde tabii çimento gibi hareket eden bir karışım meydana gelir. Ortamda kalan kalsiyum ve magnezyum hidroksit grubu ve başlangıçtaki çimentolaşmada meydana gelen kalsiyum oksit ile havadaki karbondioksit birleşerek karbonatlaşma olur ve bunun neticesinde kireç taşı meydana gelir [33].

##### 4.2.1.2. Kil-kireç karışımlarında meydana gelen kimyasal olaylar

Kil+kireç stabilizasyonunda aşağıda belirtilen kimyasal olaylar meydana gelmektedir.

- a) İyon alışverişi (iyon değişimi)
- b) Çimentolaşma
- c) Karbonatlaşma

**a) İyon değişimi;** rutubetle birlikte killi topraklara kireç ilave edilerek iyice karıştırılıp bir müddet bekletildiğinde killi zeminler kolay dağılabilir. Siltimsi bir hal alır. Killi zeminin kireç ilavesiyle siltli bir zemine dönüşmesi aşağıdaki durumlardan dolayı olmaktadır.

1. Kil daneciğinin yüzeyindeki sodyum ve hidrojen gibi zayıf metalik iyonlarla kirecin kuvvetli kalsiyum iyonları (pozitif yüklü) arasında iyon değişimi meydana gelmektedir.
2. Kil daneleri kalsiyum katyonları yüzeylerinde tutar. Her ne kadar kil daneleri üzerinde başka iyonlar varsa da dane yüzeyindeki kalsiyum katyonları hakim durumdadır.

Her iki olayda kil danelerinin yüzeyindeki elektriksel yüklerin sayısı değişmektedir. Kil daneleri arasındaki adsorpsiyon iyonların yük ve büyüklüğüne bağlı olduğundan, tek değerli iyonların yerini alan iki değerli kalsiyum iyonları kil daneleri birbirine çeker. Bu reaksiyon olurken killi zeminin plastisitesi azaldığı gibi zemin daha gevşek bir hal alır. Karışım gevşek durumda iken kireç ile zemin arasındaki kimyasal reaksiyon hızlı olur.

**b) Çimentolaşma olayı;** zemin+kireç karışımlarında meydana gelen önemli reaksiyonlardan birisi de çimentolaşmadır. Kireçte mevcut olan kalsiyum katyonu kil zeminde mevcut olan alüminyum ve silisyum mineralleri ile reaksiyona girerek kalsiyum aluminat ve kalsiyum silikatlar meydana getirirler. Meydana gelen bu bileşikler çimentonun hidrasyonundan meydana gelen bileşiklere benzer. Bu reaksiyona çimentolaşma olayı denir.

Zemin içindeki çimentolaşmayı meydana getiren minerallere puzolan denir. Çimentolaşmayı puzolanın tipi, miktarı ve kirecin aktivitesi etkiler. Zemin içinde istenilen miktarda puzolan mevcut değilse, suni puzolanlar (uçucu kül) ilave etmek suretiyle çimentolaşma sağlanır. Killerin bir kısmı (montmorillonit) esasen puzolanik olup, kireçle çimentolaşma yaparlar. Bir kısım killerde tabii puzolon mevcut değildir (kaolinit, illit ve klorit killerinde olduğu gibi).

Zemin+kireç karışımında çimentolaşmanın olabilmesi için çimentoya göre daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Diğer taraftan çimentolaşmanın iyi olabilmesi için zemin+kireç karışımının uygun su muhtevasında ve yoğunlukta çok iyi sıkıştırılması gereklidir.

**c) Karbonatlaşma;** Kirecin önemli reaksiyonlarından üçüncüsü havadan karbondioksit emmesidir. Karbondioksit kalsiyum karbonat meydana getirmek üzere kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer. Zemin+kireç karışımında kalsiyum karbonatın meydana gelmesi çimentolaşma olayını etkilediği için puzolanik reaksiyona mani olur ve zemin+kireç karışımlarının normal mukavemet kazanmalarını önler. Karbonatlaşma olayı ne kadar fazla olursa karışımın mukavemet kazanması o oranda azalır.

Şişen zeminlerin kimyasal stabilizasyonunun temeli, serbest sudaki iyon konsantrasyonunu artırarak katyon değişiminin sağlanmasıdır. Örneğin, kireç ile yapılacak stabilizasyonda kireçte bulunan  $Ca^{+2}$  iyonları, kil parçacığının yüzeyinde bulunan  $Na^{+}$  gibi daha düşük değerli iyonlarla yer değiştirirler. Buna ilaveten katyon değişimi olayına katılmamış  $Ca^{+2}$  iyonları da adsorbe edilebilir, bu da toplam iyon yoğunluğunu artırır. Sonuçta danecik için düşük katyon değişimi ve düşük hacim değiştirme potansiyeli meydana gelir [33].

#### 4.2.1.3. Kil+kireç karışımlarında meydana gelen fiziksel olaylar

Zemin+kireç karışımlarında aşağıda belirtilen olaylara rastlanmaktadır.

1. Topaklanma
2. Plastisite indisinde azalma
3. Hacim değişimi
4. Optimum su muhtevasında artış ve yoğunlukta azalma
5. Stabilitenin artması
6. Kil-kireç karışımının uzun ömürlü olması (süreklilik)
7. Tabii su muhtevasında ve boşluk basıncında artma
8. Don ve rutubete karşı mukavemet (durabilitenin dayanıklılık üzerine etkisi)

**1. Topaklanma;** ince daneli zeminlere (kil minerallerine) kireç ilave edildiği zaman meydana gelen ilk fiziki değişimlerden birisi de kil daneciklerin topaklanmasıdır. İnce daneli killi zeminlere kireç ilavesi ile iri daneli ve gevrek bir zemin meydana gelir.

Topaklanma zeminin cinsine göre değişmektedir. Killi zeminlere göre siltli, kumlu zeminlerde topaklanma daha az olmaktadır. Bu da kirecin killi zeminlerin dane çapı dağılımı üzerindeki etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Topaklaşma, ilave edilen kireç miktarının artmasıyla orantılı olarak artmaktadır.

**2. Plastisite indisinde azalma;** kireç hem zeminin plastik limitine ve hemde likit limitine etki etmektedir. Zemine kireç ilave edildiğinde likit limit miltarında azalma ve plastik limit miktarında ise artış meydana gelmektedir. İlave edilen kireç miktarının arttırılması ile likit limitin azalması bazı zeminlerde görülmeyebilir. Çok plastik zeminlere kireç ilavesiyle likit limit azalmakta, az plastik veya plastik olmayan zeminlerde ise likit limit artmaktadır. Plastisite indeksi yüksek olan zeminlere az miktarda kireç ilave edildiğinde plastisite indisinde %50-80 arasında bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

**3. Hacim değişimi;** killi zeminlere kireç ilave edildiği zaman hacim değişimlerinde azalma olmaktadır. İlave edilen kirecin tesiri ile büzülme limiti artar ve büzülme oranı azalır.

**4. Optimum su muhtevasında artış ve kuru birim hacim ağırlığında azalma;** aynı enerji ile sıkıştırıldığında zemin+kireç karışımı kirecsiz olan orijinal zeminden daha düşük yoğunlukta sıkışmaktadır. Zemine ilave edilen kireç miktarı arttıkça maksimum kuru

birim hacim ağırlığında azalma o oranda fazla olur. Zeminlere kireç ilavesi ile kuru birim hacim ağırlığındaki azalma çoğu zeminlerde ortalama % 2.5 civarındadır.

Zemin+kireç karışımlarında optimum su muhtevası fazla olmakla birlikte bu karışımlar, kireç ilave edilmeyen zemine oranla daha iyi sıkışabilmektedir. Zemin+kireç karışımları standart proktor enerjisinin üstünde bir enerji ile sıkıştırıldığında yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olurlar.

**5. Stabilitenin artması;** zemin+kireç karışımlarının mukavemetini etkileyen başlıca faktörler, zemine ilave edilen kireç miktarı, kireç cinsi, zemin cinsi, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı, kür şekli ve kür süresidir. Zemin+kireç stabilizasyonunda ilave edilen ilk kireç yüzdesinde karışımda yüksek mukavemet artışı meydana gelmektedir. Daha sonraki kireç ilaveleri ise mukavemette oldukça küçük artışlar meydana gelmektedir.

Zemin+kireç stabilizasyonunda maksimum mukavemet belirlenen optimum kireç yüzdesinde elde edilmektedir. Zemine optimum kireç yüzdesinden daha fazla kireç ilave edildiğinde mukavemette azalmalar görülmektedir.

**6. Kil-kireç karışımının uzun ömürlü olması (süreklilik);** zemin+kireç karışımları üzerinde yapılan arazi deneyleri mukavemetin zamanla arttığını göstermektedir. Bu amaçla arazi tatbikatı yapılan zemin+kireç karışımları üzerinde belirli zamanlarda plaka yükleme deneyi yapmak suretiyle mukavemette artış meydana geldiği belirlenmiştir. Zemin+kireç karışımı, zamanla kireç ilave edilmeyen zeminin özelliklerine dönmemektedir. Bundan dolayı zemin+kireç karışımı uzun ömürlü sayılmaktadır. Plastisite indisinde az çok değişmeler olmakta ise de taşıma değerlerinde azalma meydana gelmemektedir.

Zemin+kireç karışımlarının uzun ömürlü olmasına tesir eden faktörler:

- a) Kirecin uygun miktarda ilave edilmesi (optimum kireç miktarı).
- b) Sıcak havada ve yeterli sürede kür edilmesi.
- c) İstenilen maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılması.
- d) Kireç çeşidi ve zemin cinsi.

**7. Tabii su muhtevasında ve boşluk basıncında artma;** killi zeminlere ilave edilen kireç miktarının artmasına paralel olarak karışımın arazi su muhtevası da artar. Bazı killi zeminler suyun tesiri altında kendi hacminin birkaç katı artar. Neticede şişme basıncında artış olur. Kireç ilavesi ile şişme basıncında bariz miktarda azalmalar meydana gelir.

**8. Don ve rutubete karşı mukavemet (durabiliteye etkisi);** zemin+kireç karışımlarının çeşitli iklim şartlarına karşı mukavemeti ilave edilen kireç miktarına, kür süresine, kür şekline, sıkıştırma enerjisine, kireç ve zemin cinslerine bağlıdır [33].



## 5. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada bentonit kili, distile su ve çevresel kirlilik şartlarını yansıtabilme amacıyla tuzlu su, çöp suyu ve gazyağı kullanılmıştır. Bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla da belirli yüzdelerde sönmüş kireç kullanılmıştır.

### 5.1. Bentonit Kili

Ana minerali montmorillonit yada montmorillonitten izomorfik iyon değişimi ile türeyen smektit grubunun bir başka elemanı olan killere genel olarak "bentonit" adı verilmektedir. Ana minerali Na-Montmorillonit olanlara sodyum bentonit (Na-B), ana minerali Ca-Montmorillonit olanlara ise kalsiyum bentonit (Ca-B) denilmektedir. Su ile şişen sodyum bentonitlerin süspansiyonları çok uzun ömürlü olduğu halde, su ile az şişen kalsiyum bentonitlerin süspansiyonları kısa ömürlü olmaktadır. Bentonit su ile izotropik jeller meydana getirir. Bentonit içinde ikinci kil minerali olarak genellikle illit bulunmaktadır.

Bentonit kili, volkanik killerin normal ortamlarda kalıp, kimyasal reaksiyonlara uğramasıyla veya primer kayaların suda ayrışmasıyla oluşmaktadır. Bentonit, çok ince yassı kolloidal parçacıklardan oluşur. Tabii bentonit, kazıldığı zaman yüksek su muhtevasına sahip, kaygan dokulu, yumuşak bir kaya görüntüsüne sahiptir. Ticari üretim sırasında, sodyum karbonatlar ve magnezyum hidroksitle karıştırılıp, öğütülür ve kurutulur. Böylece %10 su muhtevasına sahip kuru bir toz haline getirilir.

Bentonit kolloidal alüminyum hidrosilikattır ve hacmi su ile 10 ile 30 kat artar. Bu şişme özelliği hidrofillerin neden olduğu bir olaydır. Bentonit sıcaklığı 200°C' nin üstüne çıkıncaya kadar, şişme özelliğini korumaktadır ve 600°C 'nin üstünde ise şişme özelliğini tamamen kaybetmektedir. Özellikle bentonit yağ emülsiyonların veya hidrokarbon bağlayıcıların (özel olarak katranların) bağlayıcılık özelliklerini kuvvetlendirir. Aynı sebepten dolayı bentonit az bir su ile yüksek yapışkanlık özelliğine sahip olabilmektedir. Ağırlık olarak % 0.5 oranında sulandırılmış bentonit süspansiyonu hiçbir çökme olmaksızın stabil kalır.

Bentonit kili petrol sondajı ve inşaat alanında ise diyafram duvar yapımında



dünyanın her yerinde geniş çapta kullanılmaktadır. Petrol sondajı ve inşaat alanındaki kullanımı için bentonitin reolojik davranışı ve su kaybetme özelliği büyük önem taşır. Örneğin, bentonit kilinin petrol çamurundaki fonksiyonu, çamuru uygun vizkoziteye getirmek ve sıvı kaybını önlemektir. Son yıllarda bentonit, diyafram duvar inşaatlarında kullanılmaktadır. Bu duvarlar, tünel ve metro inşaatları dahil olmak üzere çeşitli yeraltı yapılarında, şehir merkezlerinde yapılan derin kazılara ait şevlerin ve bu kazılara uygun komşu binaların desteklenmesinde ve de sızdırmazlık perdelerinin inşaatında yaygın olarak kullanılmaktadır [33].

Bu çalışmada kullanılan bentonit kili Ankara Karakaya Bentonit Kil Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Bentonit kilinin dane boyutu dağılımının belirlenmesi amacıyla elek ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Bentonit kilinin zemin indeks özelliklerini belirlemek içinde özgül ağırlık ve Atterberg kıvam limitleri gibi deneyler yapılmıştır. Bentonit kiline ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 5.1'de ve bazı kimyasal özellikler ise Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Bentonit Kiline ait Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Bentonit Kili	
Su Muhtevası (%)	13
Dane Özgül Ağırlığı	2.6
Dane Çapı Dağılımı	
Silt (%)	12
Kil (%)	88
Atterberg Kıvam Limitleri	
Likit Limit (%)	447
Plastik Limit (%)	60
Rötre Limit (%)	32
Standart Kompaksiyon Dencyi	
Optimum Su Muhtevası (%)	40
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ( $t/m^3$ )	1.19
Düşey Permeabilite (cm/sn)	$4.09 \times 10^{-10}$
Yanal Şişme Basıncı ( $kg/cm^2$ )	4.48

Çizelge 5.2. Bentonit Kiline ait Bazı Kimyasal Özellikleri

pH	9.5
Elektriksel İletkenlik (milisimens/cm)	2.69
Kasyon Değişim Kapasitesi (mcg/100gr)	90
Organik Madde Miktarı (%)	6.8
Toplam Metal Miktarı [34]	
Kurşun (Pb)	91.8
Krom (Cr)	9.7
Çinko (Zn)	71.3
Nikel (Ni)	7.6
Bakır (Cu)	81
Mangan (Mn)	2419.21
Demir (Fe)	10724.4

Bentonit kiline ait X-Ray analizi, Eskişehir Çimento Fabrikasında yapılmıştır. Analizde radyasyon olarak kobalt kullanılmıştır. X-Ray difraksiyonu, kohezyonlu zeminlerin minerallerini ve kristal yapılarını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bentonit kiline ait X-Ray difraksiyon analiz sonuçları Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Bentonit Kiline ait X-Ray Analiz Sonuçları

Bileşimler	Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	59.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.14
CaO	3.72
MgO	2.42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11
K <sub>2</sub> O	0.91
Na <sub>2</sub> O	2.50
SO <sub>3</sub>	0.10
Cl	0.003
K.K	8.02
Toplam	99.47

## 5.2. Kireç

Kireç, çoğunlukla kalsiyum oksit (CaO) olarak adlandırılır. Kalker veya kireçtaşının (CaCO<sub>3</sub>) öğütülerek 1.800 ° F (980 ° C) 'de pişirilmesi ile elde edilir. Kireç, stabilizasyon malzemesi olarak çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcı bir malzemedir ancak su içinde tekrar çözünmediği için hidrolik bağlayıcı değildir. Bunun nedeni ise su içinde sertleşmek için yeterli CO<sub>2</sub>'i bulamaz [33]. Çalışmada, orijinal

torbalanmış, sönmüş kireç  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Hydrated Lime) kullanılmıştır. Sönmüş kirece ait bazı kimyasal özellikleri Çizelge 5.4'de verilmiştir. Sönmüş kirece ait X-ray analizi Eskişehir Çimento Fabrikası'nda yapılmıştır. Sönmüş kirece ait X-ray analiz sonuçları ise Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Sönmüş Kireç'e ait Bazı Kimyasal Özellikler

pH	12.60
Kasyon Değişim Kapasitesi (meq/100gr)	16.43
Elektriksel İletkenlik (milisimens/cm)	6.29
Su Muhtevası (%)	0.50
Organik Madde Miktarı (%)	24.38
Dane Özgül Ağırlığı	2.45
Dane Çapı Analizi	
İnce Kum (%)	7
Silt (%)	77
Kil (%)	16

Çizelge 5.5. Sönmüş Kireç'e ait X-Ray Analiz Sonuçları

Bileşimler	Miktar (%)
$\text{SiO}_2$	2.72
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.37
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.25
$\text{CaO}$	63.88
$\text{MgO}$	4.00
$\text{K}_2\text{O}$	0.06
$\text{SO}_3$	0.02
$\text{NaCl}$	0.23
$\text{CO}_2$	10.52
KK	27.48
Toplam	98.78

### 5.3. Çöp Suyu

Katı atık depolama alanlarında, katı atık yüzeylerinden ve içinden sızarak oluşan sudur. Depolama alanlarında yağış sebebiyle katı atık kütlelerin yüzeyinden, çeşitli kaynaklardan veya atığın kendisinden gelen sular fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerle yüklü sızıntı sularını oluşturur. Sızıntı suları oldukça yüksek kirlilik konsantrasyonuna sahiptir. Rengi koyu kahve veya siyaha yakındır. Yüksek miktarda organik madde içerir ve alıcı ortama deşarjları sakıncalıdır. Bu çalışmada kullanılan çöp suyu Eskişehir Seyitgazi yolu üzerinde 13 km'de bulunan çöp döküm sahasından alınmıştır. Çöp suyuna ait bazı özellikler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

#### 5.4. Tuzlu Su

Petrol sondaj kuyularında petrol çıkarma işlemi sırasında, petrol sondaj kuyularından elde edilen ve tuz içeriği oldukça fazla olan bir sudur. Deneyleerde kullanılan tuzlu su Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO), Lüleburgaz Bölge Müdürlüğü bünyesinde bulunan Alacaoğlu-1 sondaj lokasyonundan temin edilmiştir. Tuzlu suya ait bazı özellikler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

#### 5.5. Gazyağı

Rafineride benzinden sonra elde edilen bir üründür ve yaklaşık 150°C ile 300°C arasındaki sıcaklıklarda kaynayan hidrokarbonları içerir. Gazyağına ait elektriksel iletkenlik ve pH değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Gazyağına ait bazı özellikler ise Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. Distile Su, Çöp Suyu, Tuzlu Su ve Gazyağına ait Bazı Özellikler

Çevresel Kirlilik Şartları	Elektriksel İletkenlik (miliSimens/cm)	pH
Distile Su	0.0264	6.87
Çöp Suyu	2.8	6.65
Tuzlu Su	33.1	7.39
Gazyağı	0.04	7.05

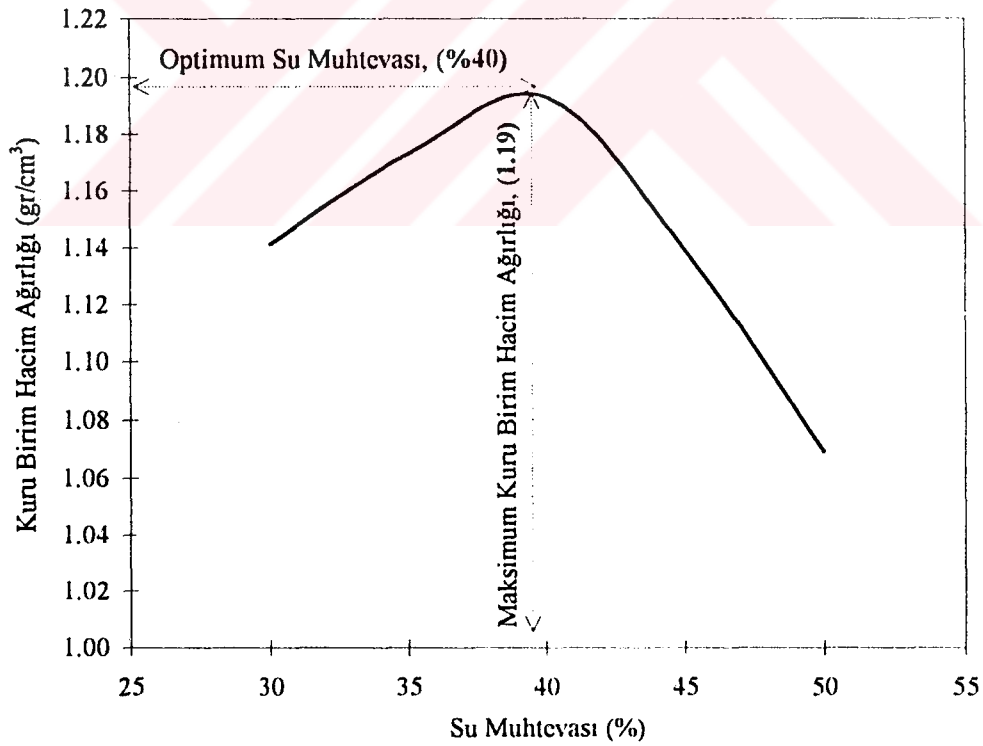
Çizelge 5.7. Gazyağına ait Bazı Özellikler [34]

API Gravitesi (°C)	6
Viskozite (cs)	10.6
Alevlenme Noktası (°C)	57.8
Donma Noktası (°C)	10
Toplam Aromatikler	11.8
Kükürt Oranı (%)	0.08

## 6. DENEY METODLARI

### 6.1. Standart Kompaksiyon Deneyi

Zeminlerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde değişik su muhtevalarında zemin numuneleri, standart boyutlarda bir kalıp içinde, üç tabaka halinde üzerine 2.5 kg ağırlığında bir kütlenin her tabakaya 30 cm yükseklikten 25'er kere düşürülmesi ile 590 kJ/m<sup>3</sup> enerji uygulanarak sıkıştırılmıştır. Deney sırasında alınan değerlere göre su muhtevası-kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiden standart proktor eğrisi çizilmiştir. Bu çizilen eğrinin maksimum büküm noktasına göre optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri belirlenmiştir. Bentonit kiline ait standart proktor eğrisi Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

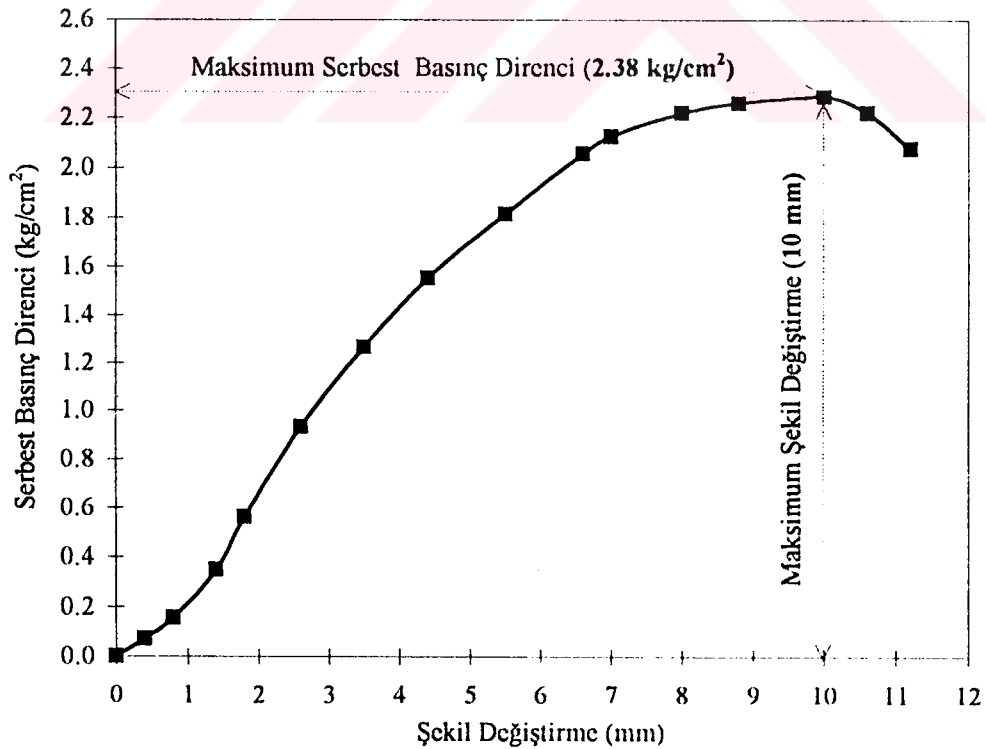


Şekil 6.1. Bentonit Kiline Ait Standart Proktor Eğrisi

## 6.2. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanal destek olmaksızın ayakta durabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir. Bu deneyin kum zemin numuneleri üzerinde uygulanması mümkün değildir, yalnızca killi zemin numuneleri üzerinde yapılabilir. Deney sırasında numunenin deney drenaj koşulları kontrol edilmediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemeti elde edilmektedir.

Serbest basınç deneyi, optimum su muhtevasında (%40) standart proktor kalıbında sıkıştırılan bentonit kil numunesinin aksenal doğrultuda yüklenmesiyle yapılmıştır. Aksenal yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısalması ölçülerek gerilme-şekil değiştirme eğrisi çizilmiştir. Aksenal gerilmenin en büyük değeri (veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri) bentonit kilinin serbest basınç mukavemeti değerini vermektedir. Bentonit kiline ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Bentonit Kiline Ait Serbest Basınç Direnci-Şekil Değiştirme Eğrisi

### 6.3. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi

Permeabilite katsayısının belirlenmesi için laboratuvarında bilinen iki yöntemden farklı olarak üç eksenli deney sistemi ile permeabilite deneyi yapıldı. Bilinen iki yöntemden birincisi çakıl ve kum gibi iri daneli zeminlere uygulanan sabit seviyeli permeabilite deneyi diğeri kil ve silt gibi ince daneli zeminlere uygulanan düşen seviyeli permeabilite deneyidir.

Üç eksenli deney aletinde deney hücresine optimum su muhtevasında (%40) distile su ile standart proktor kalıbında hazırlanan bentonit kil numunesi örselenmeden yerleştirildi. Hücre basıncı 15 psi olarak uygulandı. Numunenin alt ve üst drenaj muslukları ayrı ayrı basınç ayar tablosunda bulunan ölçekli bir cam tüpe bağlandı. Numunenin alt ve üst seviyelerindeki basınç farkından dolayı üstten alta doğru akım oluşmaktadır. Cam tüplerdeki seviyeler belirli zaman aralıklarında ölçüldü. Numuneye giren su miktarı ve çıkan su miktarı eşit olana kadar deneye devam edildi. Cam borulardaki basınç su sütunu cinsinden hesaplandı ve iki borudaki seviye farkına ilave edildi. Bu değerlere bağlı olarak permeabilite katsayısı aşağıdaki formülle hesaplandı. Buna göre optimum su muhtevasında distile su ile hazırlanan bentonit kiline ait permeabilite katsayısı  $4.09 \times 10^{-10}$  cm/sn olarak belirlendi.

$$k = \frac{Q \times l}{t \times \Delta h \times A_2} \quad (6.1)$$

Burada,

Q : Belirli zamanlarda geçen su miktarı (cm<sup>3</sup>/sn)

l : Numune boyu (cm)

t : Zaman (sn)

$\Delta h$  : Basınç seviye farkı (cm)

$A_2$  : Numune kesit alanı (cm<sup>2</sup>)

### 6.4. Yanal Şişme Basıncı Deneyi

Yanal şişme basıncı deneyi üç eksenli düzende optimum su muhtevasında (%40) distile su ile standart proktor kalıbında sıkıştırılan bentonit kil numunesi üzerinde

yapılmıştır. Numundeki düşey yöndeki şişme, üç eksenli deney hücresinin yük halkasına yerleştirilmek suretiyle engellendi. Yanal şişme basıncının belirlenebilmesi için numunenin alt drenaj çıkışına manometre takıldı. Numuneye üstten yapılan su girişi ile meydana gelen yanal şişme basınç ölçümleri manometre ile belirli aralıklarda yapıldı. Yanal şişme basıncı deneyine manometredeki basınç değerinde dengelenme yani numunede şişme meydana gelmeyinceye kadar devam edildi. Sonuçta standart proktor kalıbında optimum su muhtevasında (%40) distile su ile hazırlanan bentonit kil numunesine ait yanal şişme basıncı  $4.48 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlendi.

## 6.5. Bentonit Kilinin Fiziko-Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi

### 6.5.1. Katyon değişim kapasitesinin tayini

Katyon değişim kapasitesi sodyum doyurma (saturasyon) metodu ile belirlendi. Numuneler öncelikle, 24 saat  $105^\circ\text{C}$ 'de kurutuldu, 100 nolu (0.15 mm) elekten elenen numuneler sodyum asetat ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  veya kısaca  $\text{NaOAc}$ ) ile doymuş hale getirildi. Böylece numune içindeki kil yüzeyindeki ve tabakalar arasındaki katyonlar ile sodyum yer değiştirmiş oldu. Daha sonra, numuneler isopropyl alkol ( $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ ) ile tuzları atmak için yıkandı. Son olarak, numuneler amonyum asetat ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  veya kısaca  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) ile zemin içindeki kil yüzeyine adsorbe edilen sodyumun ortama çıkarılması için yıkandı. Buradan, sodyum miktarı Atomik absorpsiyon cihazı ile belirlendi. Elde edilen sodyum, miktarları ise aşağıdaki formülle, katyon değişim kapasitesine çevrildi. Deneyler  $\text{pH}=7$ ' de yapılmıştır.

$$\text{CEC (meq / 1000 gr zemin)} = \frac{A \times B}{\text{Sodyumun Atom Ağırlığı (23)}} \quad (6.2)$$

$$\text{CEC (meq / 100 gr zemin)} = \frac{\text{CEC (meq / 1000 gr zemin)}}{10} \quad (6.3)$$



### 6.5.2. pH tayini

Laboratuvarda oda sıcaklığında (18-21°C) kurumaya bırakılan numuneler tamamen hava kurusu normuna (yani %3-5 su muhtevasına) ulaştıktan sonra 40 nolu (0.425 mm) elekten elenerek 10 gr alındı. Alınan numune 100 ml saf su ile bir beher içinde doygun hale getirildi. Karıştırılan karışımların üzeri kapatılarak bir gün beklemeye bırakıldı. Bekletilen çözeltilerin üstteki berrak kısmı içerisine pH metrenin cam elektrodu daldırılarak numunenin pH değeri belirlendi.

### 6.5.3. Elektriksel iletkenlik tayini

Laboratuvarda oda sıcaklığında (18-21°C) kurumaya bırakılan numuneler tamamen hava kurusuna (yani %3-5 su muhtevasına) ulaştıktan sonra 16 nolu (1.31 mm) elekten elendi. Daha sonra bu numunelerden 150-250 gr arasında alınarak saf su ile bir beher içinde doygun hale getirildi. Toprağın su ile doygun hale gelmesi durumunda çamurun yüzeyi ışığı yansıttığı için parıldar kap eğilince yavaşça çamur aktı. Karıştırma işi bitince doygun hale getirilmiş çamurun üzeri kapatılarak 1 gün bekletildi. Elektriksel iletkenliği ölçülecek çözeltilerin içerisine elektrot daldırılarak numunenin elektriksel iletkenliği belirlendi.

### 6.5.4. Organik madde miktarı tayini

Zeminlerin bünyesinde bulunabilen organik madde miktarının belirlenmesinde izlenen aşamalar;

1. Numunenin ıslak ağırlığı belirlenir (A).
2. Numune 105° C sıcaklıkta 24 saat bekletilir ve kuru ağırlık belirlenir (B).
3. Ardından 550° C sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra tekrar kuru ağırlığı belirlenir (C).

Numune içindeki organik maddeler 550°C sıcaklıkta tamamen yanmaktadır. Organik madde miktarı yüzde olarak aşağıdaki formüllerle hesaplanır

$$D = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (6.4)$$

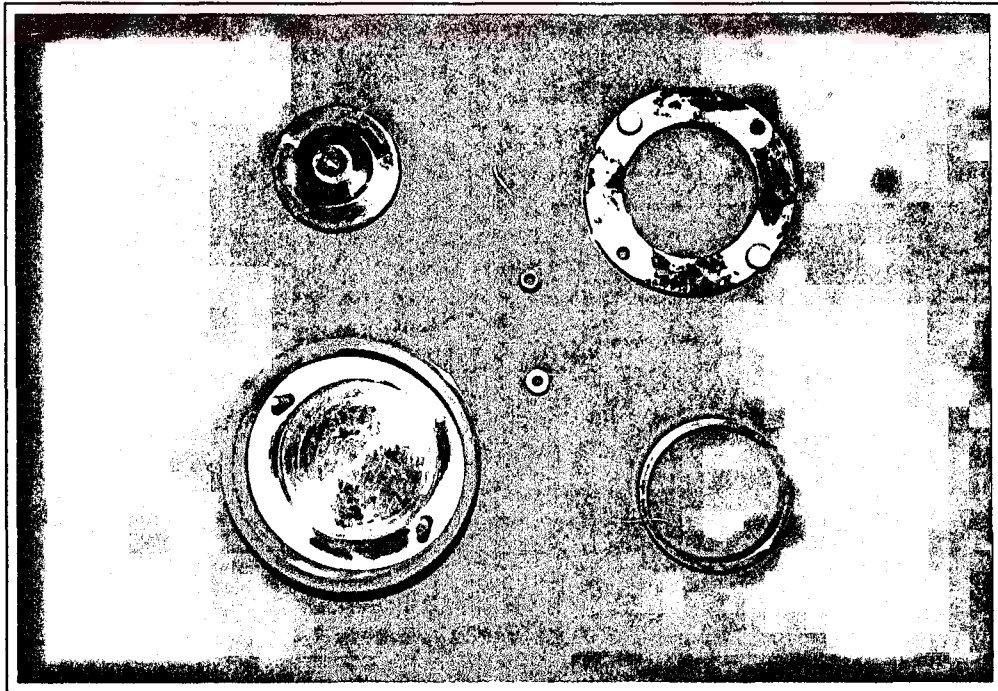
$$E = \frac{C}{A} \times 100 \quad (6.5)$$

$$\text{Organik madde miktarı (\%)} = 100 - (D + E) \quad (6.6)$$

## 6.6. Şişme/Büzülme Özelliklerinin Belirlenmesi

### 6.6.1. Ödometre Deney Aleti

Deneyler, ince daneli zeminlerin şişme özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ödometre deney sisteminde laboratuvar şartlarında yapıldı. Deneyler yapıldığı sürece ortamın sıcaklığı 23°C-27°C arasında değişimler göstermiştir. Yüklemelerde, küçük ağırlıklarda metal parçaları, ufak çakıl taşları ve 1, 2, 5 ve 10 kg ağırlıklardaki hazır döküm yükler kullanılmıştır. Kullanılan ödometre haznesini oluşturan parçalar Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

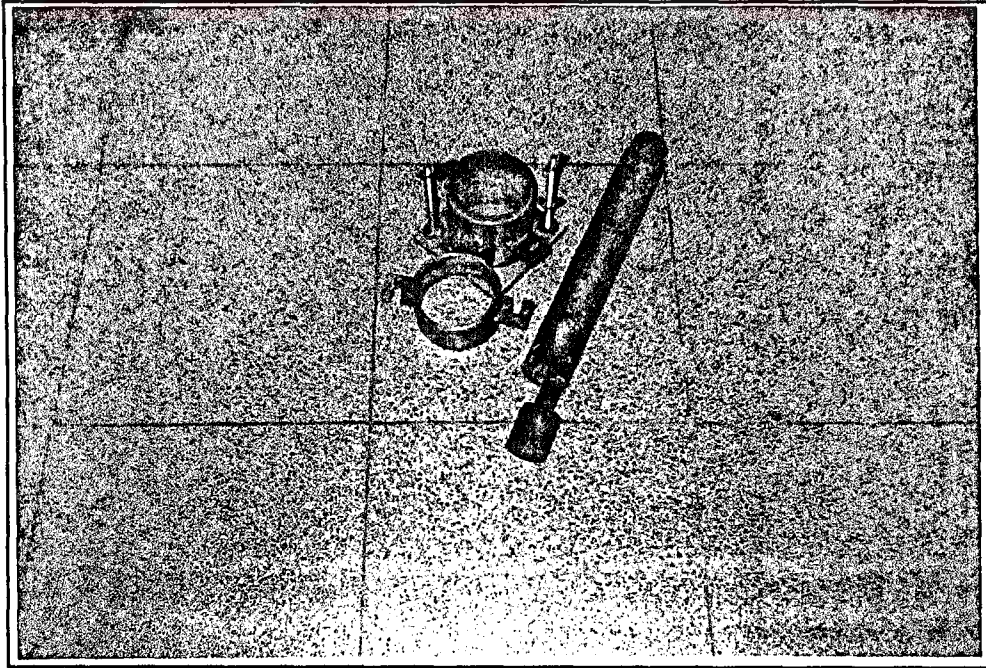


Şekil 6.3. Ödometre Haznesinin Parçaları

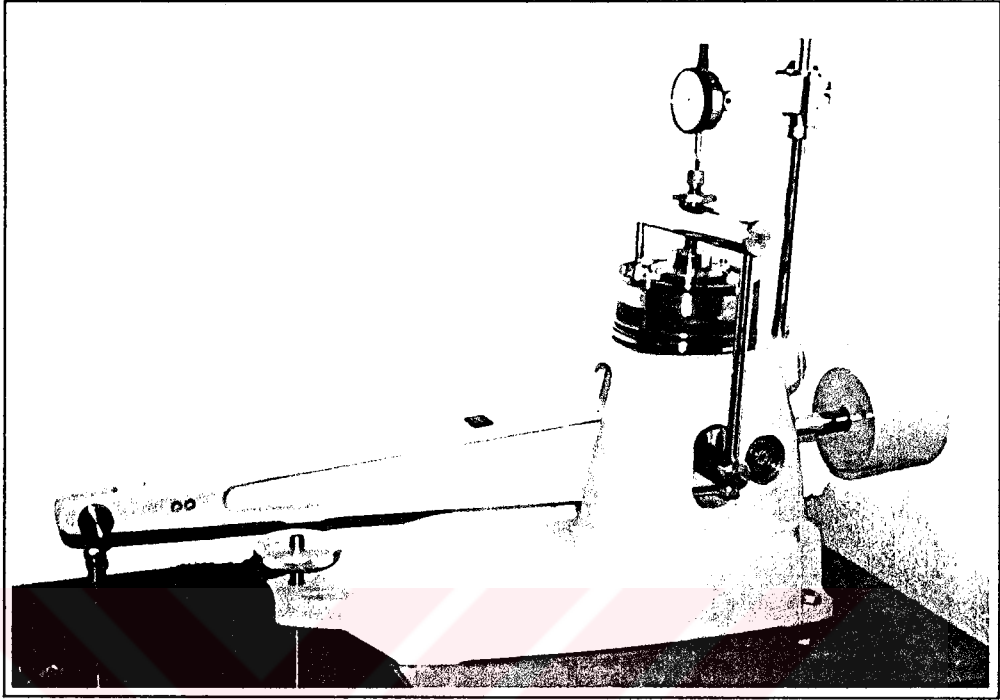
### 6.6.2. Deney numunelerinin hazırlanması

Serbest şişme ve şişme basıncı deney numunelerinin hazırlanması için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- Bentonit kili 105° C'de etüvde kurutuldu.
- Bentonit kili üzerinde distile su kullanılarak standart kompaksiyon deneyi yapıldı ve optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlendi. Standart kompaksiyon deneyinde kullanılan aletler Şekil 6.4'de görülmektedir.
- Numuneler, optimum su muhtevasında distile su kullanılarak standart proktor kalıbında 25 vuruş ile üç tabaka halinde sıkıştırıldı.
- Sıkıştırılan proktor kalıbının alt ve üst tarafından ödometre ringleri zeminin içine sokuldu. Daha sonra ring+numune moldun içinden çıkarılıp ödometre haznesine girmeye hazır hale getirildi. Hazırlanma sırasında ring+numunenin alt ve üstünden su muhtevası için numuneler alındı.
- Hazır haldeki numuneler, iki poroz taş arasına, alt ve üstüne filtre kağıtları konulmak suretiyle ödometre haznesine yerleştirildi. Hazne içerisine sıvı boşaltılarak serbest şişme ve şişme basıncı deneylerine başlandı. Ödometre haznesine yerleştirilmiş haldeki numune Şekil 6.5'de görülmektedir.



Şekil 6.4. Standart Kompaksiyon Aletleri



Şekil 6.5. Ödometre Haznesine Yerleştirilmiş Numune

### 6.6.3. Serbest şişme deneyi

Serbest şişme deneyi, şişen bir zeminde meydana gelebilecek maksimum hacim değişiminin düşey yöndeki şişme ile ifade edilmesi esasına dayanır. Genellikle düşey yöndeki şişme miktarı, yüksüz veya çok küçük sürsarj yükleri altında belirlenmektedir. Kullanılan yöntem gereği numune ring ile çevrelendiği için yatay yöndeki şişme engellenmiş ve sadece düşey yöndeki değişimler belirlenmiştir. Bu deney sonucunda bulunan büyüklük, şişen zeminlerin şişme özelliklerinin ifade edilmesinde kullanılan büyüklüklerden biridir.

Optimum su muhtevasında distile su ile sıkıştırılan bentonit kili farklı çevresel kirlilik şartları altında ASTM D-4546'da belirtilen  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  (1psi) basınç altında serbest şişmeye bırakıldı [27]. Numunede meydana gelen düşey yöndeki şişme miktarı değerleri, belirli zaman aralıklarında deformasyon saati ile belirlendi. Deney ortamındaki sıcaklık değişimlerini belirlemek için termometre ile sıcaklık ölçümü yapıldı. Serbest şişme deneyine, numunedeki şişme miktarı stabil hale gelinceye kadar devam edildi. Bentonit kili üzerinde yapılan serbest şişme deneyi Şekil 6.6'da görülmektedir.

Herbir çevresel şartta belirli bir süre sonra stabil hale gelen serbest şişme miktarına göre serbest şişme yüzdeleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

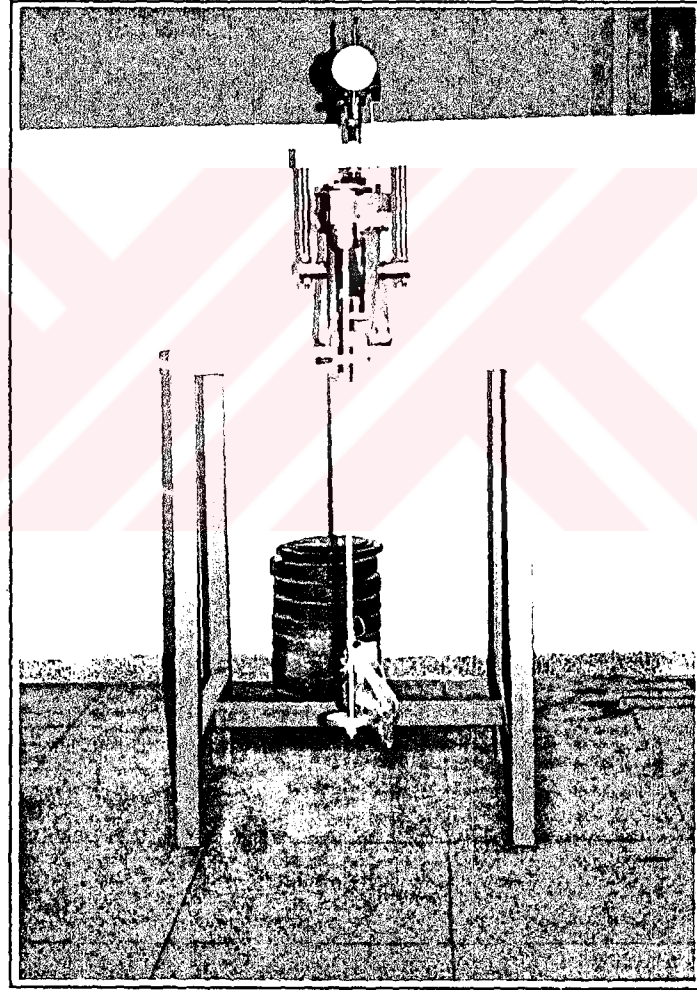
$$S_p = \frac{\Delta h}{H} \times 100 \quad (6.7)$$

Burada;

$\Delta H$  : Numunede stabil haldeki düşey şişme miktarı (mm)

$H$  : Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)

$S_p$  : Serbest şişme yüzdesi (%)



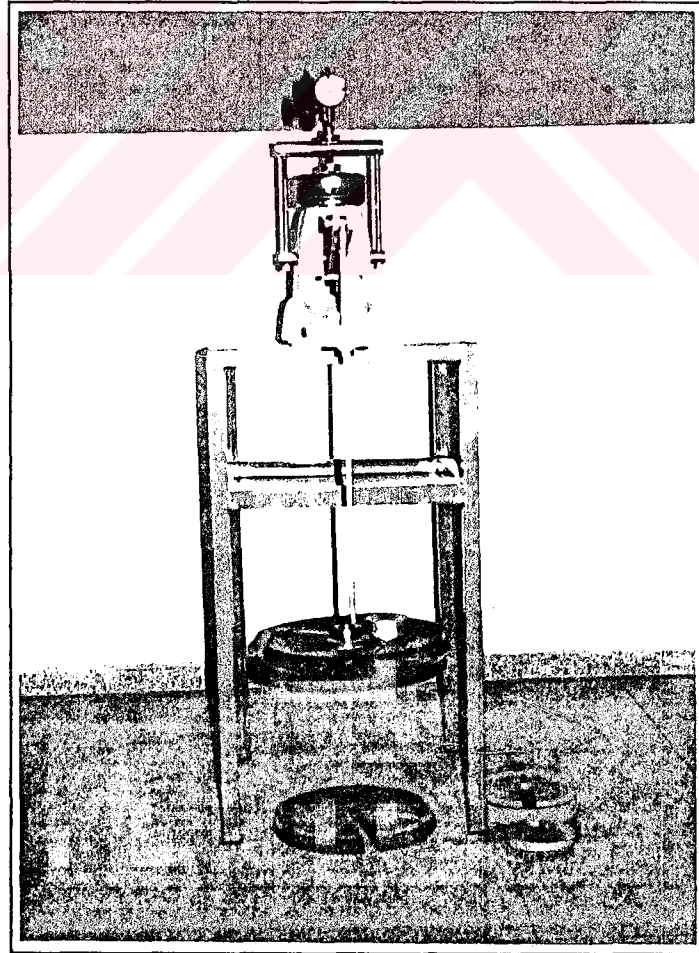
Şekil 6.6. Serbest Şişme Deneyi

#### 6.6.4. Şişme basıncı deneyi

Bu deney şişme özelliğine sahip killi zeminlerde hacim artışı sonucunda meydana gelebilecek maksimum şişme basıncının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu deney şişen

zeminde meydana gelebilecek maksimum şişme durumunda şişen zeminden dolayı üst yapıya etkileyecek basıncın belirlenmesi açısından önemlidir.

Optimum su muhtevasında distile su ile sıkıştırılan bentonit kili farklı çevresel kirlilik şartları altında şişme basıncı deneylerine tabi tutulmuştur. Şişme basıncı deneyi, numunede meydana gelen ve deformasyon saati ile belirlenen düşey şişme miktarındaki her artış durumunda numuneye yük uygulanması ile yapıldı. Deney başında sıfır konumuna getirilen deformasyon saati, deney süresince numunede meydana gelen şişmeye paralel olarak yapılan yüklemeler ile sıfırda tutuldu. Şişme basıncı değeri belirlenirken en son yük altında, en az 24 saat boyunca düşey şişmenin değişmemesi esas alınmıştır. Numunelerdeki şişmeyi stabil halde tutan yük değerinin numunenin yüzey alanına bölünmesi ile şişme basıncı değerleri belirlenmiştir. Şişme basıncı deneyleri bitiminde zemin numunelerinin su/sıvı muhtevası belirlenerek meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Şişme basıncı deneyi Şekil 6.7'de görülmektedir.

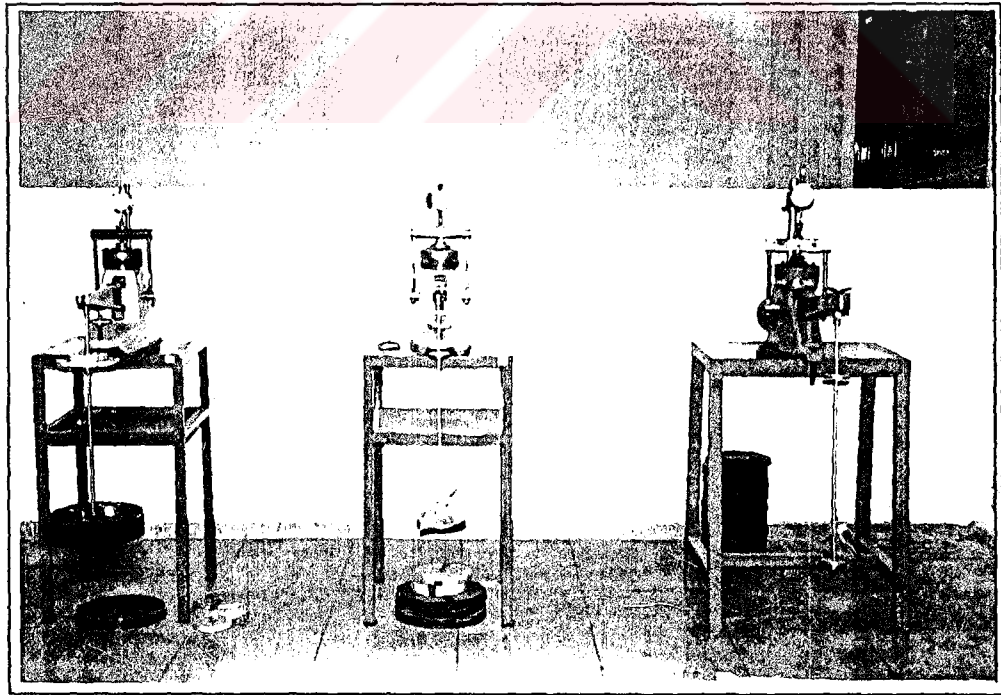


Şekil 6.7. Şişme Basıncı Deneyi

### 6.6.5. Islak ve kuru çevrimlerin uygulanması

Islak ve kuru çevrimler, doğadaki yüzeye yakın şişen zeminlerin su ile ıslanması ve daha sonra güneş ışığı altında kuruması ve boru hatları, çöp deponi alanı altında bulunan şişen zeminlerde ise yeraltı su seviyesindeki artma ve azalma hallerini temsil etmesi açısından önemlidir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde şişen zeminlerin ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz kalması zemindeki hareketlerin asıl nedenidir.

Proktor kalıbından çıkarılan iki numunedan birisi serbest şişme deneyine diğeri de şişme basıncı deneyine tabi tutulduktan sonra numune ödometre haznesinden çıkarılmadan haznedeki sıvı uzaklaştırıldı. Sıvının uzaklaştırılmasıyla numune kuru ortamda bırakılarak çevrimlere başlandı. Çevrimler, serbest şişme deneyinde kullanılan  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  ve şişme basıncı deneyi ile bulunan basınçlar altında yapıldı. Her bir çevresel şartta kuru+ıslak bir çevrim kabul edilerek toplam 4 çevrim uygulandı. Bir çevrim, numunenin 7 gün kuruda ve 7 gün ıslak ortamda bırakılması şeklinde yapıldı. Islak ve kuru çevrim deneyleri Şekil 6.8'de görülmektedir.



Şekil 6.8. Islak/Kuru Çevrimlerin Uygulanması

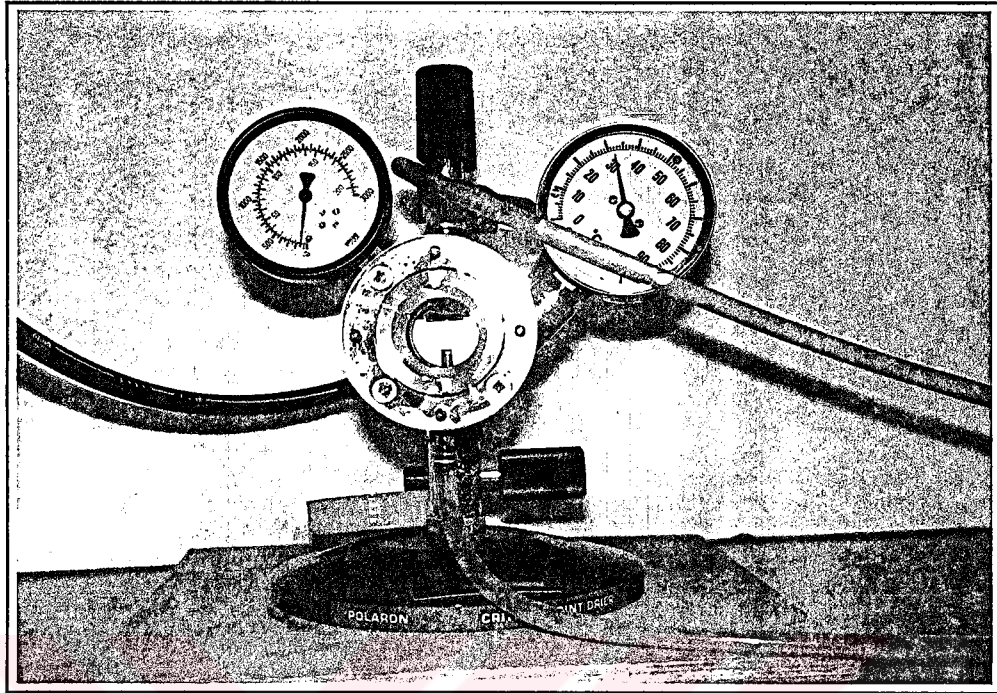
## 6.7. Kil Minerolojisinin Scanning Elektron Mikroskobu (SEM) ile Belirlenmesi

Distile su, tuzlu su, çöp suyu ve gazyağı gibi çevresel etkilerin sıkıştırılmış bentonit kilinin mikro yapısına nasıl etki ettiğini belirlemek amacıyla elektron mikroskop fotoğrafları çekilmiştir. Böylece kil danelerinin çevresel etkiler altındaki oriyantasyonları daha net bir şekilde anlaşılması mümkün olacaktır.

### 6.7.1. Scanning elektron mikroskobu için numunelerin hazırlanması

Scanning elektron mikroskobu çalışmaları, farklı çevresel kirlilik şartlarında ıslak/kuru çevrim deneyleri sonundaki bentonit kil numuneleri üzerinde yapıldı. Numunelerin kurutulması için kritik nokta kurutma aleti kullanıldı. Her bir numuneden düşey ve yatay olmak üzere iki örnek alındı. Bu örnekler, kritik nokta kurutma aletine yerleştirilen numune kaplarına, ince ve şeffaf bir kağıt ile sarılarak yerleştirildi. Daha sonra bu özel kap aseton ile dolduruldu. Kritik nokta kurutucu aletine yerleştirilen numunelere belirli bir basınçta CO<sub>2</sub> sıvı olarak verildi. Özel kap içindeki asetonun sıvı CO<sub>2</sub> ile yer değiştirebilmesi için aseton çıkış valfi açıldı. Bu işleme numunelerden aseton tamamen atılana kadar devam edildi. Aseton tamamen uzaklaştırıldıktan sonra numuneler sıvı CO<sub>2</sub> içinde 2 saat bekletildi. Daha sonra alet 36°C-38°C arasında sıcaklığa getirildi. Böylece sıvı CO<sub>2</sub> tekrar gaz haline dönüştü. CO<sub>2</sub> çıkış valfi, CO<sub>2</sub>'nin tekrar sıvı haline dönüşmesini engel olacak şekilde az açılmak suretiyle CO<sub>2</sub> gazı haznedan dışarı atıldı. Burada önemli olan CO<sub>2</sub>'nin sıvı hale dönüşmeden uzaklaştırılmasıdır. Bu işlem tamamlandıktan sonra numuneler kurutulmuş olarak aletten çıkarıldı. Kurutulan numuneler, kapalı bir kaptan nem almaması için SEM fotoğrafları çekilene kadar bırakıldı. Kullanılan kritik nokta kurutma aleti Şekil 6.9'da verilmiştir. Bentonit kil numunelerine ait SEM fotoğrafları Anadolu Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Seramik Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı'nda çekilmiştir.





Şekil 6.9. Kritik Nokta Kurutma Aleti

### 6.7.2. Kritik nokta kurutma metodu (CPDM)

Bu metod, sıvı CO<sub>2</sub> ile boşluklardaki suyun veya nemin yer değiştirmesini içerir. Kritik bir nokta üzerindeki sıcaklık ve basınçta bir sıvı ve buharın fiziksel özelliklerinin ayırt edilebilmesi olanaksızdır. Bu iki durum bir sınır tabakası ile ayırt edilecek kadar uzun değildir ve bu durumlarda yüzey çekme kuvvetleri kaybolur. Bir sıvının kritik sıcaklık ve basınçta sıvı ile gaz aşaması arasında bir sınır yoktur. Kritik nokta üzerindeki sıcaklıkta tutulan bir sıvı atmosfer basıncında serbest bırakıldığında gaz durumuna ulaşır. Böylece kilin yapısal boşluklarına zarar veren yüzey çekme gerilmesi olmaksızın numune kurutulmuş olur. Sıvısal dönüşümlerde aseton, alkol ve amil alkol gibi sıvılar kullanılmaktadır. Sıvı CO<sub>2</sub> ve numunenin sulu durumu arasında bu sıvıların girişi yapılmaktadır. Numunenin CO<sub>2</sub> ile kurutulması 36<sup>0</sup>C sıcaklıkta ve 1400 psi basınçta olabilmektedir.

Bir kil numunesinin SEM için hazırlaması, numunede çatlaklar oluşmadan kurutulmasını içerir. Çoğu kil zeminler, havada kurutulduğunda ve büzülme ile yapısı değiştiğinde oldukça fazla hacim azalması gösterir. Bundan dolayı kil numunelerin kritik

kurutma metodu ile kurutulması hava kurusu, fırın kurusu ve donma ilekuruma metoduna göre daha efektif bir metotdur [35].

### **6.7.3. Scanning elektron mikroskobu hakkında bilgi**

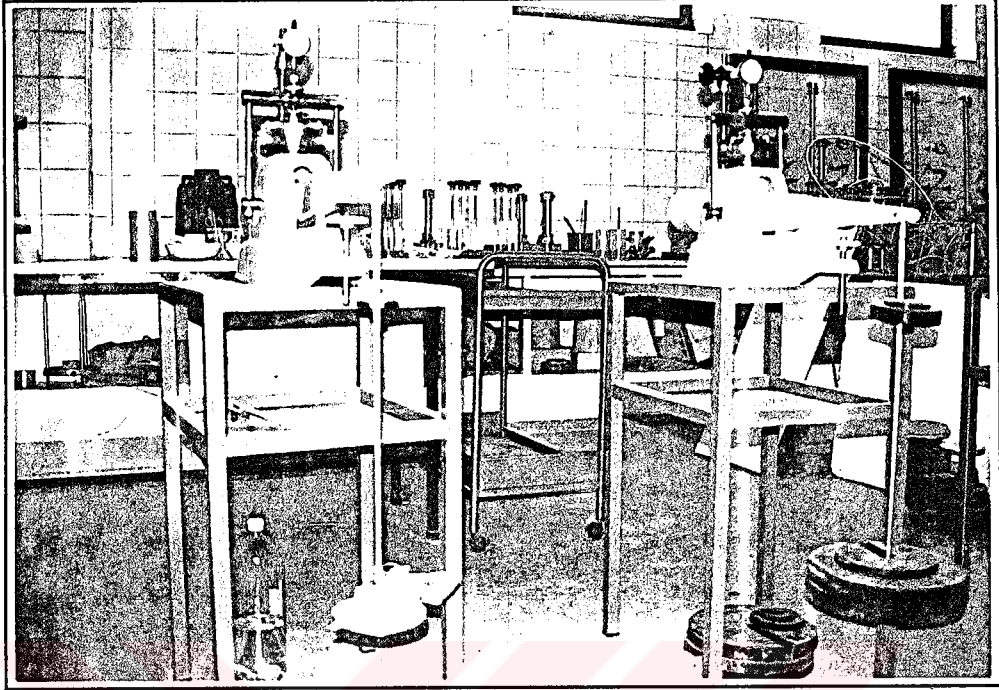
Scanning elektron mikroskobu bir yüzeyin büyütülmüş şeklini elde edebilmek için tasarlanan bir alettir. Scanning elektron mikroskobu ile kil minerolojisi, kil plakalarının yerleşim biçimleri veya kil dokusunun incelenmesi mümkün olmaktadır. Scanning elektron mikroskobu ile numune yüzeyi üzerine elektron bombardımanı yapılmaktadır. Elektronlar kil daneleri gibi katı objeler tarafından dağıtılması ile dane yüzeyinin fotoğrafı çekilir [35].

## **6.8. Şişme Potansiyelinin İyileştirilmesi**

Belirli oranlarda kireç ilavesiyle hazırlanan bentonit kil numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapıldı.

### **6.8.1. Numunelerin hazırlanması ve deneylerin yapılışı**

Numuneler bentonit kiline kuru ağırlıkça %15, %30, %60 ve %100 oranlarında kireç ilave edildikten sonra standart proktor kalıbında optimum su muhtevasında (%40) sıkıştırılması ile hazırlandı. Sıkıştırılan proktor kalıbının alt ve üstünden toplam iki numune alındı. Numunelerden biri  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  basınç altında serbest şişme deneyine diğer numune ise şişme basıncı deneyine tabi tutuldu. Kireç katkılı numuneler üzerinde yapılan serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri Şekil 6.9'de görülmektedir.



Şekil 6.10. Kireç Katkılı Numunelere ait Şişme Deneyleri

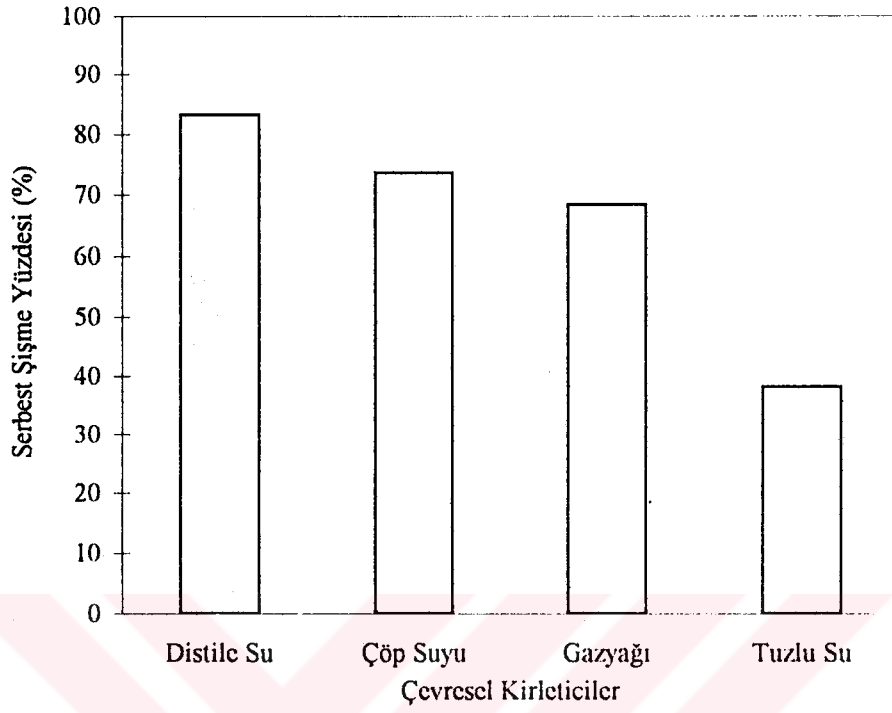
## 7. DENEY SONUÇLARI

### 7.1. Serbest Şişme DeneY Sonuçları

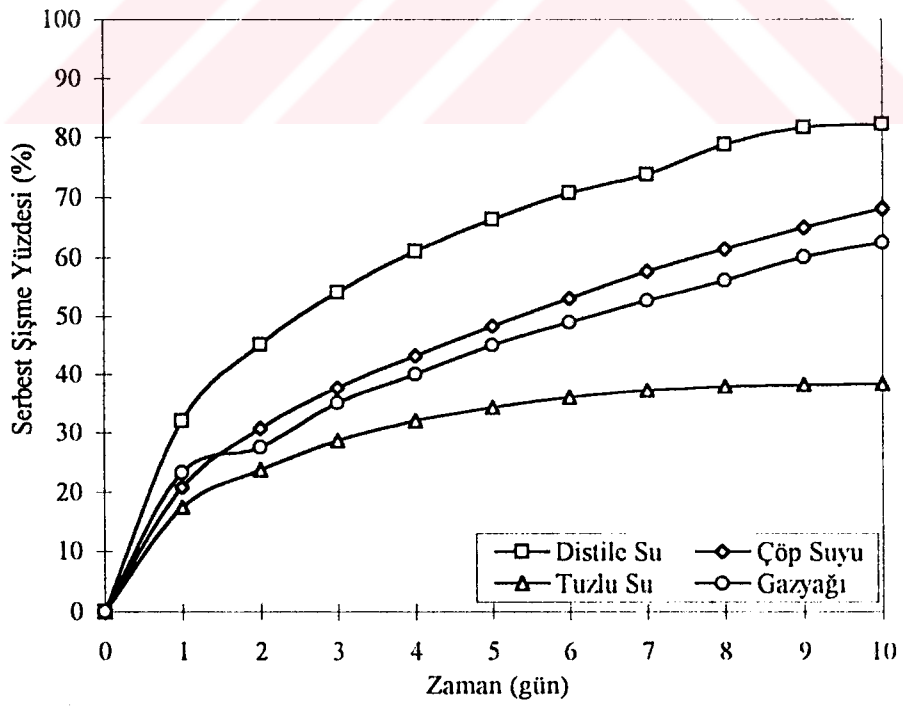
Bentonit kili üzerinde  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  sürsarj yükü altında farklı çevresel şartlarda yapılan serbest şişme deneyleri ile çevresel şartlarda meydana gelebilecek serbest şişme miktarı ve şişme yüzdesi değerleri belirlenmiştir. Serbest şişme yüzdesi, nihai serbest şişme miktarının numunenin başlangıç yüksekliğine oranı şeklinde hesaplanmıştır. Farklı çevresel kirlilik şartlarındaki serbest şişme yüzdeleri Şekil 7.1'de verilmiştir. Laboratuvar şartlarında yapılan serbest şişme deney sonuçlarına göre en fazla serbest şişme yüzdesi distile su içerisindeki bentonit kilinde ve en az serbest şişme yüzdesi ise tuzlu su içerisindeki bentonit kilinde meydana gelmiştir. Distile su ortamında kil daneleri arasında itici (repulsive) kuvvetler daha etkili olduğundan kil danesi etrafındaki çift tabaka kalınlığı artmış, böylece kil daneleri daha fazla şişmiştir. Tuzlu su ilavesi, serbest şişme yüzdesini azaltmıştır. Yüksek tuz konsantrasyonunda agregasyonlu ve flokulasyonlu yani Cardhouse (petek) yapı oluşmakta ve tuz içindeki iyonlar kil yüzeyine adsorbe olmakta ve kil daneleri daha az sıvı emmektedir. Dolayısıyla, serbest şişme yüzdesi azalmıştır. Ödometre haznesine gazyağı ilavesi, kil daneleri arasında aglomerasyonu (yumaklaşmayı) arttırmakta ve daha az sıvı emmesi meydana gelerek kil daneleri distile su ve çöp suyuna göre daha az şişme göstermiştir. Çöp suyu içindeki bentonit kilinin serbest şişme yüzdesi, distile sudan az fakat diğerlerinden fazla olmuştur. Çöp suyunun elektriksel iletkenliğinin distile sudan oldukça fazla olması dolayısıyla, daha yüksek tuz konsantrasyonu bu olaya neden olmuştur.

Bentonit kilinin farklı çevresel kirlilik şartlarındaki serbest şişme miktarları veya yüzdeleri yaklaşık 10 gün sonunda stabil hale gelmiştir. Çevresel kirlilik şartlarındaki serbest şişme yüzdelerinin zamanla değişimi Şekil 7.2'de verilmiştir.

$0.07 \text{ kg/cm}^2$  serbest şişme basıncı altında toplam şişme yüzdesi %35'den büyük ise, o zemin yüksek şişme özelliğine sahip zemin olarak adlandırılmaktadır [23]. Bentonit kilinin çevresel kirlilik şartlarında serbest şişme yüzdeleri %35'den büyük olarak bulunmuştur. Dolayısıyla bentonit kilinin çevresel şartlarda da şişme özelliği yüksektir.



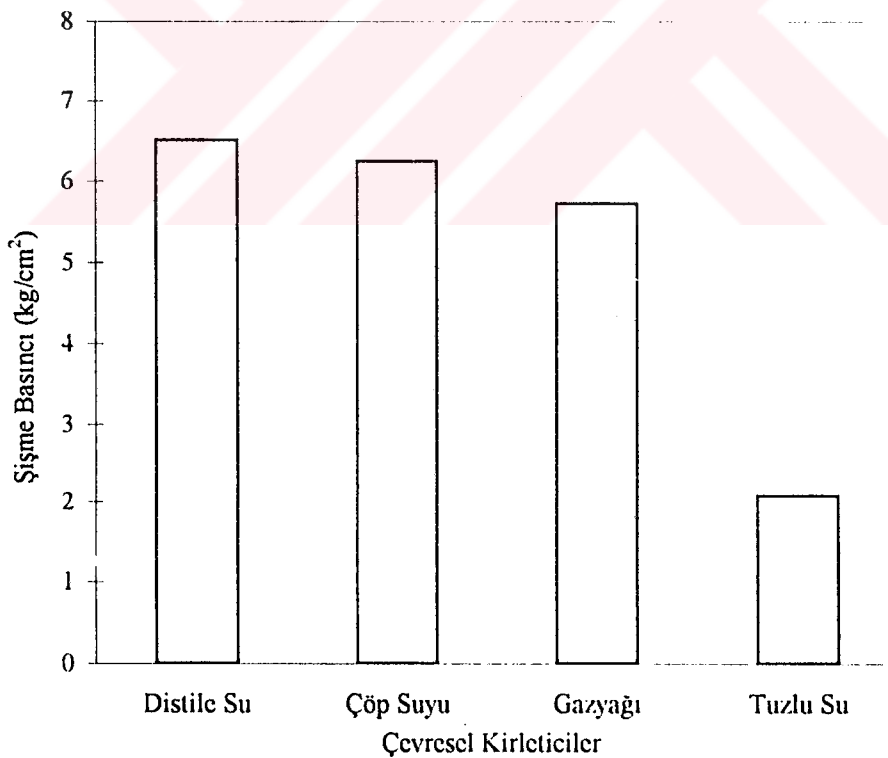
Şekil 7.1. Çevresel Kirlilik Şartları Altındaki Serbest Şişme Yüzdesi



Şekil 7.2. Farklı Çevresel Kirlilik Şartları altındaki Serbest Şişme Yüzdesi-Zaman İlişkisi

## 7.2. Şişme Basıncı Deney Sonuçları

Çevresel kirlilik şartları altındaki şişme basıncı değerleri Şekil 7.3' de verilmiştir. Farklı çevresel kirlilik şartlarında laboratuvarda yapılan şişme basıncı deney sonuçlarına göre maksimum şişme basıncı distile suda ve minimum şişme basıncı ise tuzlu suda meydana gelmiştir. Serbest şişme yüzdesinde en fazla distile su şartlarında en düşük ise tuzlu su şartlarında belirlenmesi şişme basıncı değerleri ile serbest şişme yüzdelerinin uyum sağladığını göstermiştir. Bu da şişen bir zeminde şişme potansiyeli arttıkça şişme basıncı değerinin arttığı sonucuna uyum sağlamıştır. Çöp suyu içinde distile su hariç diğer çevresel şartlara göre daha fazla anyon ve katyon iyonların bulunması daha fazla şişmesine ve daha fazla şişme basıncı oluşmasına neden olmuştur. Distile su, çöp suyu ve gazyağında meydana gelen şişme basınçları hemen hemen birbirine yakın iken tuzlu su şartlarında diğerlerine göre önemli bir azalma görülmüştür.



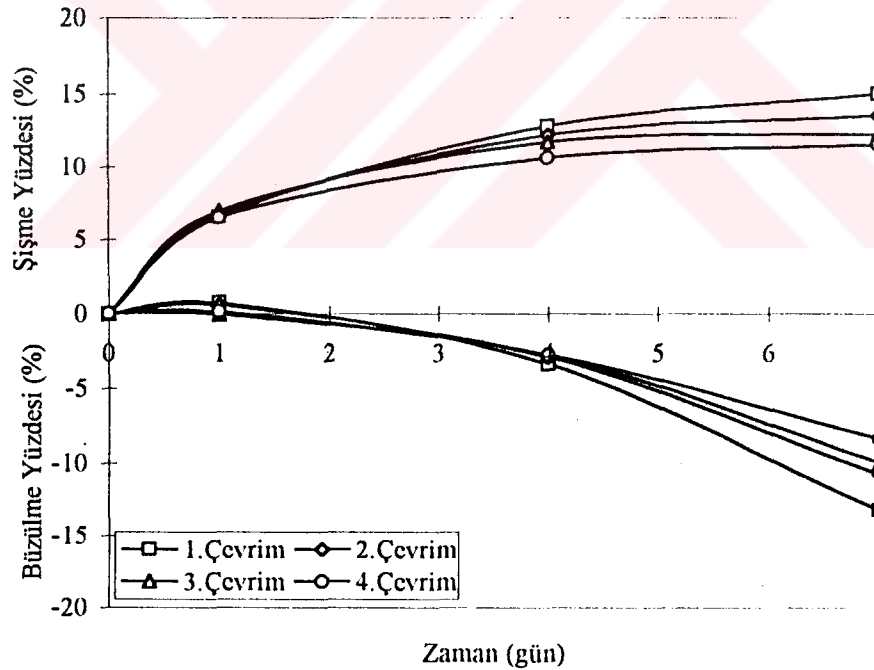
Şekil 7.3. Farklı Çevresel Kirlilik Şartları Altındaki Şişme Basıncı Değerleri

### 7.3. Şişme/Büzülme Çevrim Deneysel Sonuçları

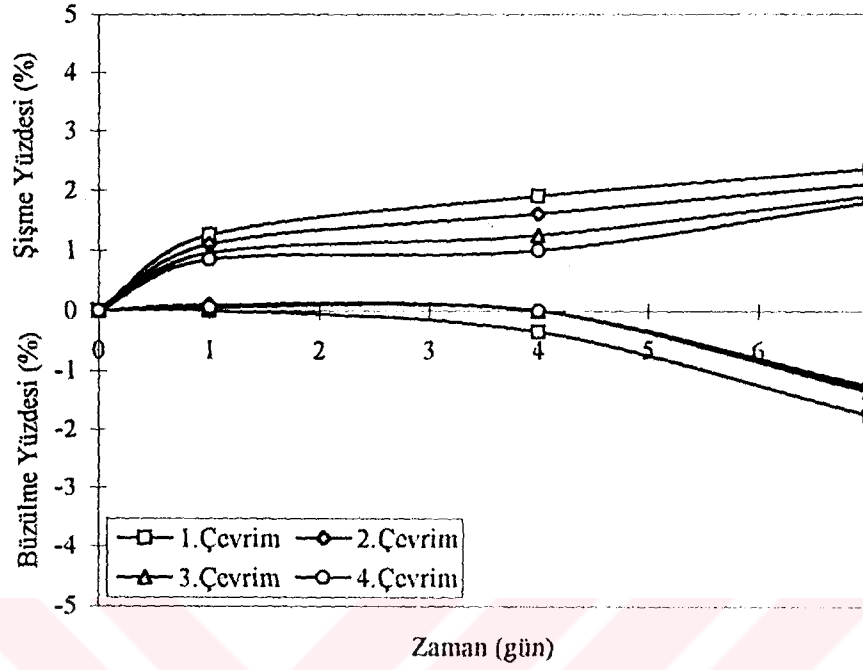
#### 7.3.1. Distile su şartları altındaki sonuçlar

Laboratuvar şartlarında yapılan serbest şişme altındaki ıslak/kuru çevrimlerde en fazla şişme yüzdesi distile suda görülmüştür. Distile su şartlarında kil mineralleri dispers yapı gösterdiğinden kil minerallerinin su ile temas yüzeyleri artmış ve serbest şişme basıncı altında en fazla şişme göstermiştir. Şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimlerde diğer çevresel kirlilik şartlarına göre daha fazla basınca maruz kaldığından daha az şişme/büzülme meydana gelmiştir.

Distile su şartlarında serbest şişme basıncı altındaki çevrimler Şekil 7.4'de distile su şartlarında belirlenen şişme basıncı altındaki çevrimler ise Şekil 7.5'de verilmiştir.



Şekil 7.4. Distile Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler



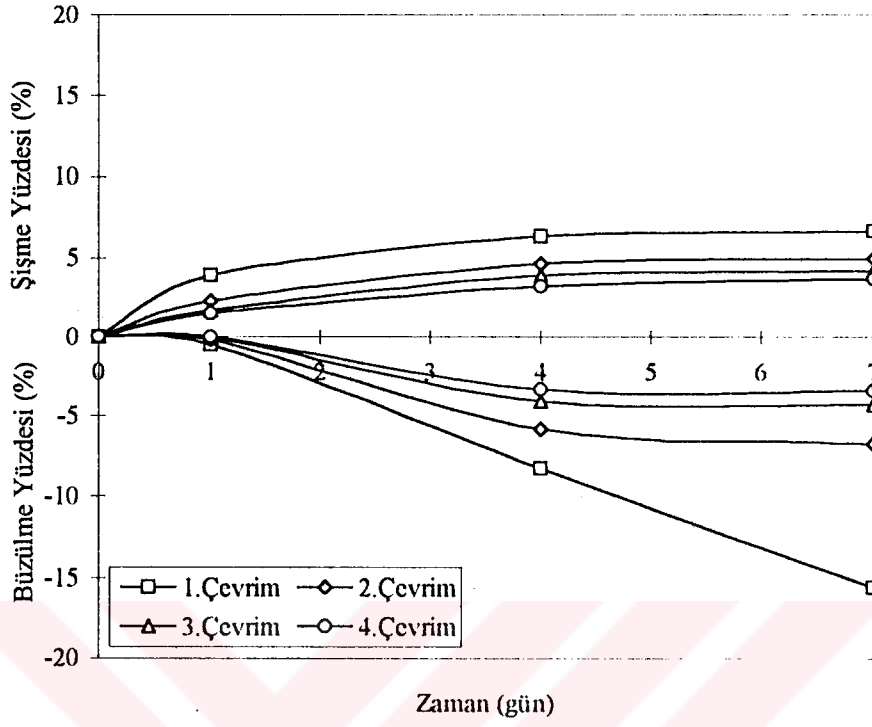
Şekil 7.5. Distile Su Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler

### 7.3.2. Tuzlu su şartları altındaki sonuçlar

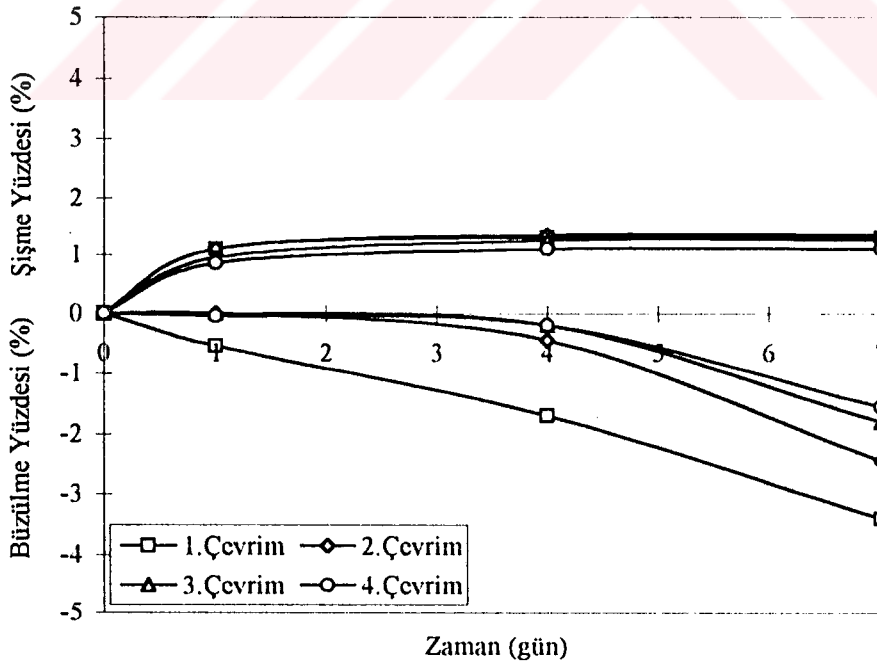
Laboratuvarda yapılan serbest şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimlerde en fazla büzülme yüzdesi tuzlu suda görülmüştür. Tuzlu su şartlarında kil mineralleri boşluklu bir yapı olan petek yapı gösterdiğinden serbest şişme ve şişme basıncı altında daha fazla büzülme göstermektedir. Tuzlu su şartlarında şişme basıncı altındaki şişme/büzülme yüzdeleri serbest şişme altındaki şişme/büzülme yüzdelerinden daha az meydana gelmiştir. Tuzlu su içindeki tuzlar kil danesi üzerine adsorbe olarak daneler arasındaki çekici kuvvetleri artırmış ve daneleri birbirine yaklaştırmıştır. Dolayısıyla distile suya göre şişme basıncı altında daha az şişme/büzülme özelliği göstermiştir.

Tuzlu su şartlarında serbest şişme altındaki çevrimler Şekil 7.6'da ve şişme basıncı altındaki çevrimler ise Şekil 7.7'de verilmiştir.





Şekil 7.6. Tuzlu Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler

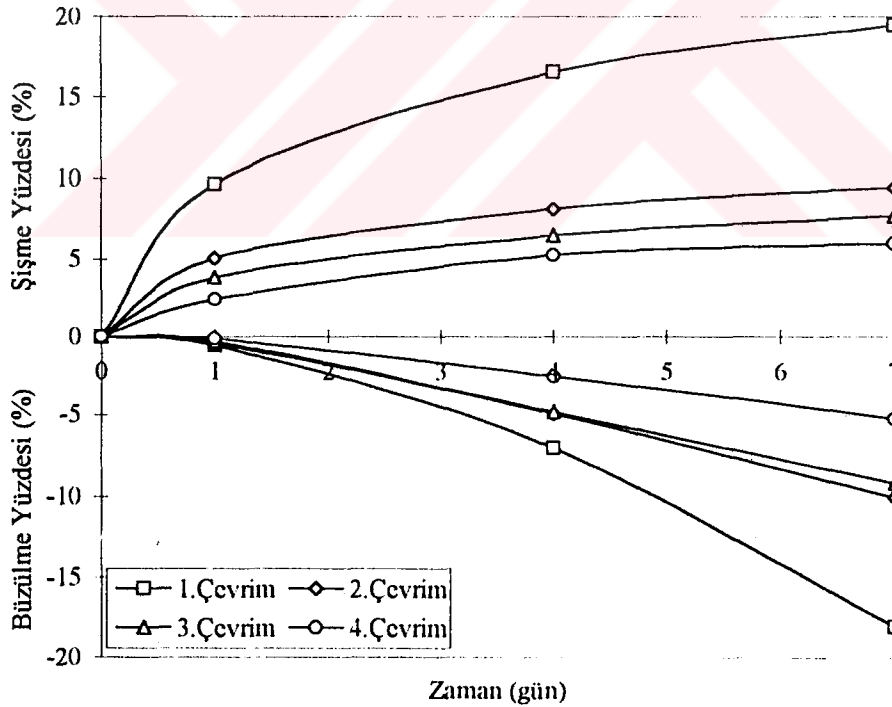


Şekil 7.7. Tuzlu Su Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler

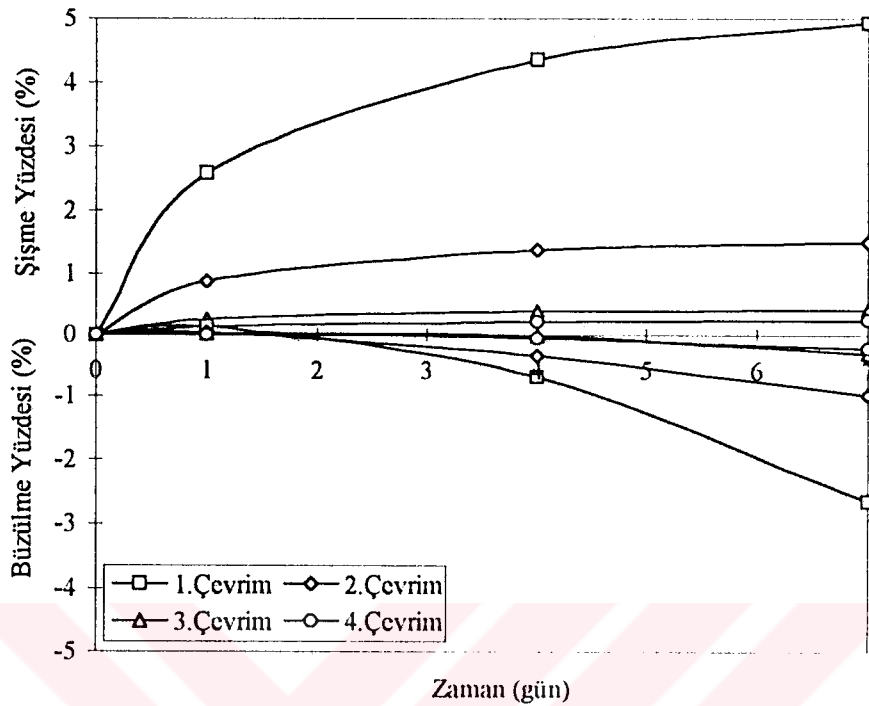
### 7.3.3. Çöp suyu şartları altındaki sonuçlar

Laboratuvarda şişme basınçları altında yapılan ıslak/kuru çevrimlerde en fazla şişme yüzdesi çöp suyu şartlarında görülmüştür. Çöp suyu şartlarındaki serbest şişme basıncı ve şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimlerin birinci çevriminden sonra şişme/büzülme yüzdelerinde önemli azalmalar görülmüştür. Bunun sebebi çöp suyu altındaki çevrimlerin havaya açık olarak yapılmasından dolayı zamanla etkisini kaybetmesi olabilir. Çöp suyu şartlarındaki şişme basıncı değeri distile sudaki şişme basıncı değerinden daha az olduğundan şişme basıncı altındaki şişme/büzülme yüzdeleri distile suya göre daha fazla meydana gelmiştir.

Çöp suyu şartlarında serbest şişme basıncı altında yapılan ıslak/kuru çevrimler Şekil 7.8’de ve şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler ise Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.8. Çöp Suyu Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler

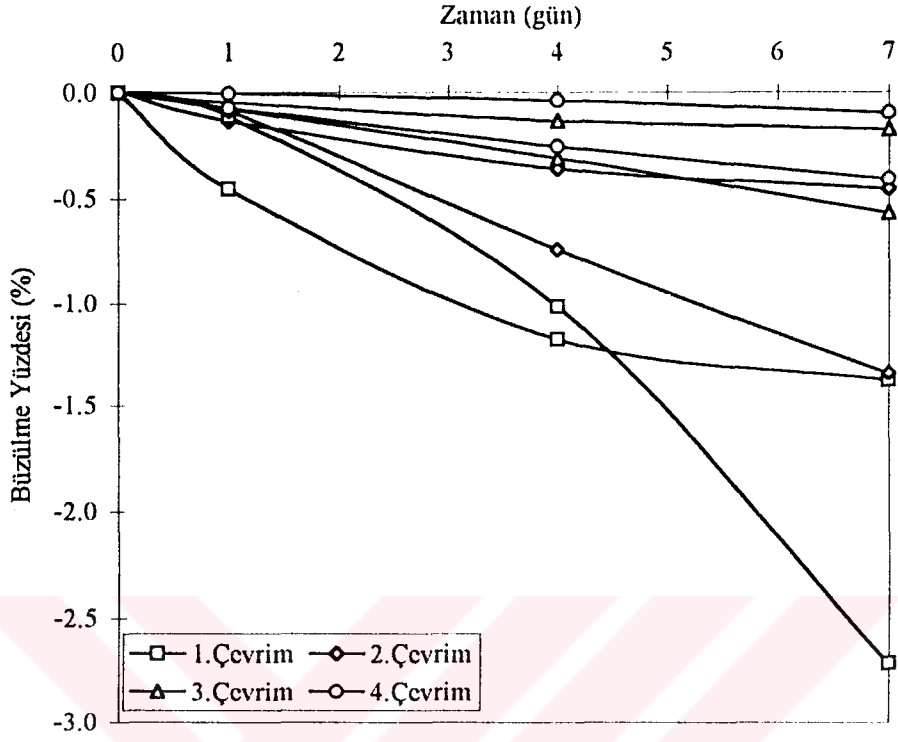


Şekil 7.9. Çöp Suyu Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler

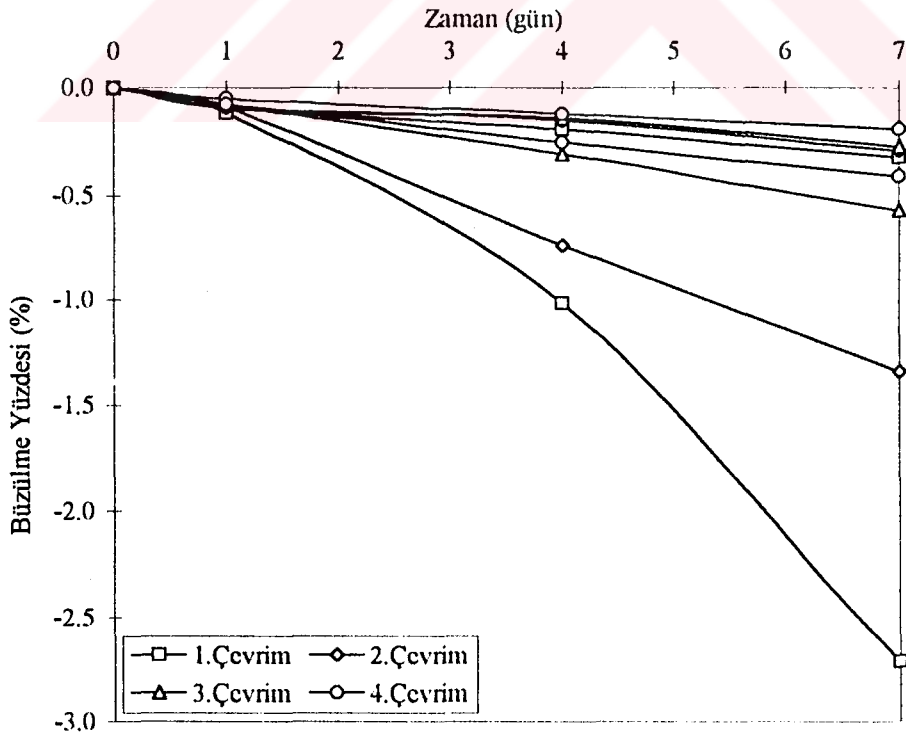
#### 7.3.4. Gazyağı şartları altındaki deney sonuçları

Gazyağı şartlarındaki deneylerde sadece serbest şişme deneyindeki numunelerde şişme görülürken daha sonraki ıslak/kuru çevrimlerde sürekli büzülme meydana gelmiştir. Bunun sebebi, numunelerin ilk ıslak ortamda gazyağına doymun hale gelmesi, çift tabakanın olabilecek maksimum kalınlığa ulaşmasından sonra gazyağının kilin bünyesinde hava ile teması olmadığından uzaklaşmaması olabilir. Yani gazyağı kil yüzeyine adsorbe olmakta ve şişmesini azalmaktadır. Bu büzülme yüzdeleri şişme basıncı ve serbest şişme altında hemen hemen aynı olmuştur. Serbest şişme altında ıslak ortamdaki büzülme yüzdeleri kuru ortamdaki büzülme yüzdelerine göre daha az olarak gözlenmiştir.

Gazyağı şartlarında serbest şişme altındaki ıslak/kuru çevrimler Şekil 7.10'da ve şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrimler ise Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.10. Gazyağı Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler



Şekil 7.11. Gazyağı Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Çevrimler

Çevresel kirlilik şartlarında serbest şişme basıncı ( $0.07 \text{ kg/cm}^2$ ) altındaki çevrimleri sonucunda bentonit kilinin su/sıvı muhtevalarında meydana gelen değişimler Çizelge 7.1'de ve şişme basıncı değerleri altında yapılan çevrimler sonucunda bentonit kilinin su/sıvı muhtevalarında meydana gelen değişimler ise Çizelge 7.2'de verilmiştir. Çevrimler sonucunda bentonit kiline ait bazı fiziko-kimyasal özelliklerdeki değişimler ise Çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Serbest Şişme Çevrimleri Altında Bentonit Kiline Ait Su Muhtevalarındaki Değişimler

Çevresel Kirlilik Şartları	Serbest Şişme Altında ( $0.07 \text{ kg/cm}^2$ )	
	$W_{ilk}$ (%)	$W_{son}$ (%)
Distile Su	41	192
Çöp Suyu	39	177
Tuzlu Su	39	55
Gazyağı	41	30

$W_{ilk}$  : Dency başlangıcı su muhtevaları

$W_{son}$  : Dency sonu su muhtevaları

Çizelge 7.2. Şişme Basıncı Çevrimleri Altında Bentonit Kiline Ait Su Muhtevalarındaki Değişimler

Çevresel Kirlilik Şartları	Şişme Basıncı Altındaki	
	$W_{ilk}$ (%)	$W_{son}$ (%)
Distile Su	41	52
Çöp Suyu	41	49
Tuzlu Su	39	45
Gazyağı	40	36

$W_{ilk}$  : Dency başlangıcı su muhtevaları

$W_{son}$  : Dency sonu su muhtevaları

Çizelge 7.3. Serbest Şişme ve Şişme Basıncı Çevrimleri Sonucunda Bentonit Kiline Ait Bazı Fiziko-Kimyasal Özelliklerdeki Değişimler

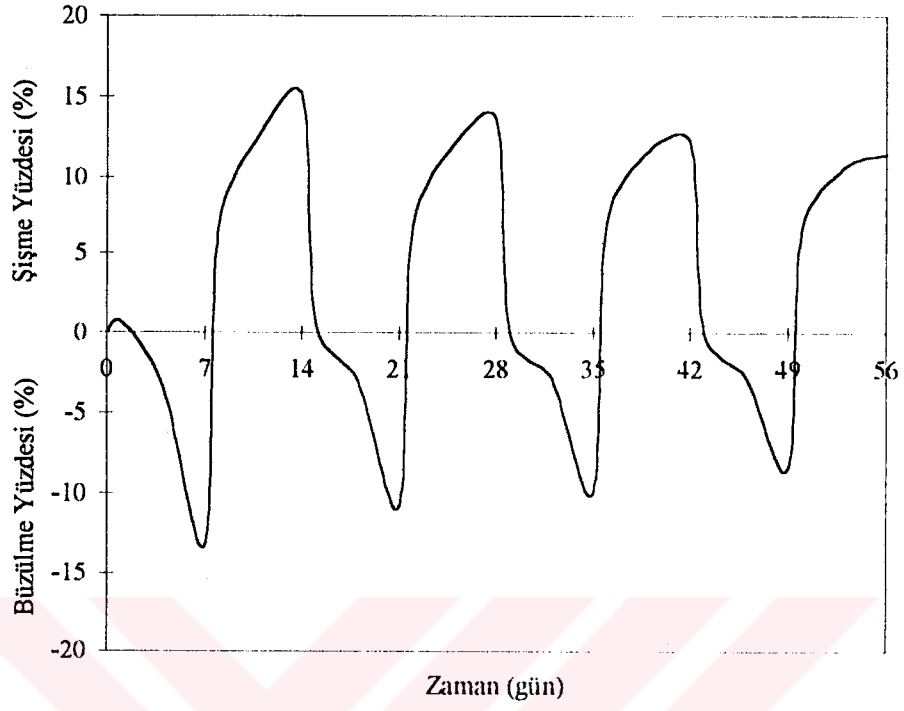
Çevresel Kirlilik Şartları	Fiziko-Kimyasal Özellikler		
	pH	Elektriksel İletkenlik (milisimens/cm)	K.D.K. <sup>a</sup> (meq/100gr)
Distile Su	10.19	1.84	128.53
Çöp Suyu	8.72	2.31	86.48
Tuzlu Su	9.55	4.71	107.41
Gazyağı	7.8	2.45	84.24

<sup>a</sup> K.D.K : Katyon Değişim Kapasitesi.

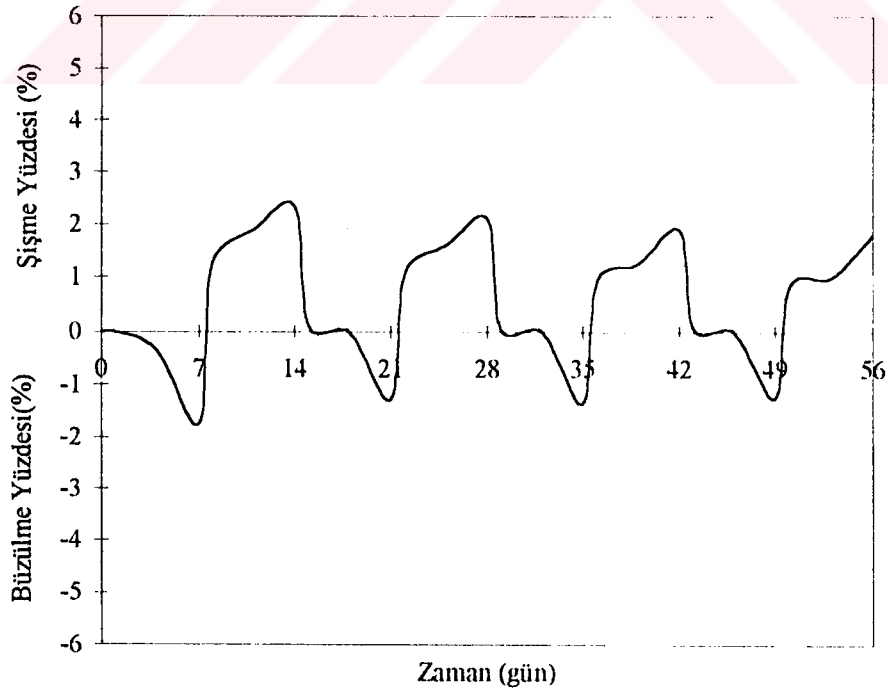
### 7.3.5. Genel sonuçlar

Bütün çevresel şartlarda serbest şişme ve şişme basıncı altındaki çevrimlerin sayısı arttıkça şişme/büzülme yüzdeleri azalmıştır. Bunun sebebi, ıslak/kuru çevrimler sonucunda kilin plastisitesinin azalmasıdır [13]. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyum sağlamaktadır. Yapılan çevrim deneylerinde numuneler ödometre haznesi içinde 23-27° C arasında değişen sıcaklıklarda kuru ortamda bırakıldığından numunenin kurummasının her seferinde başlangıç su/sıvı muhtevassından büyük seviyelerde olması şişme/büzülme yüzdelerinin azalmasına neden olabilir. Çevrim sayısının artması ile kil minerallerinin yeni düzenlenmeler göstermesi de şişme özelliklerindeki azalmanın sebebi olabilir. Kuruda kilin su ile temasta olan spesifik yüzey alanı azalmakta ve daneler arasında van der Waals kuvvetleri hakim olmakta ve agregalı bir yapı meydana gelmektedir. Böylece kil büzülme ve daneler arasında çimentolaşma oluşmaktadır. Bu olay, daneler arasındaki yüzey geriliminden dolayı meydana gelmektedir. Çevrimlerde serbest şişme yüzdesindeki azalmanın çoğu birinci çevrim sonucunda meydana gelmiştir. Genelde hemen hemen 4. çevrim sonucunda serbest şişme/büzülme yüzdeleri dengelenmiştir. Basınç altındaki çevrimlerde şişme/büzülme yüzdeleri, serbest şişme altındaki çevrimlere paralel olarak fakat daha az oranda meydana gelmiştir.

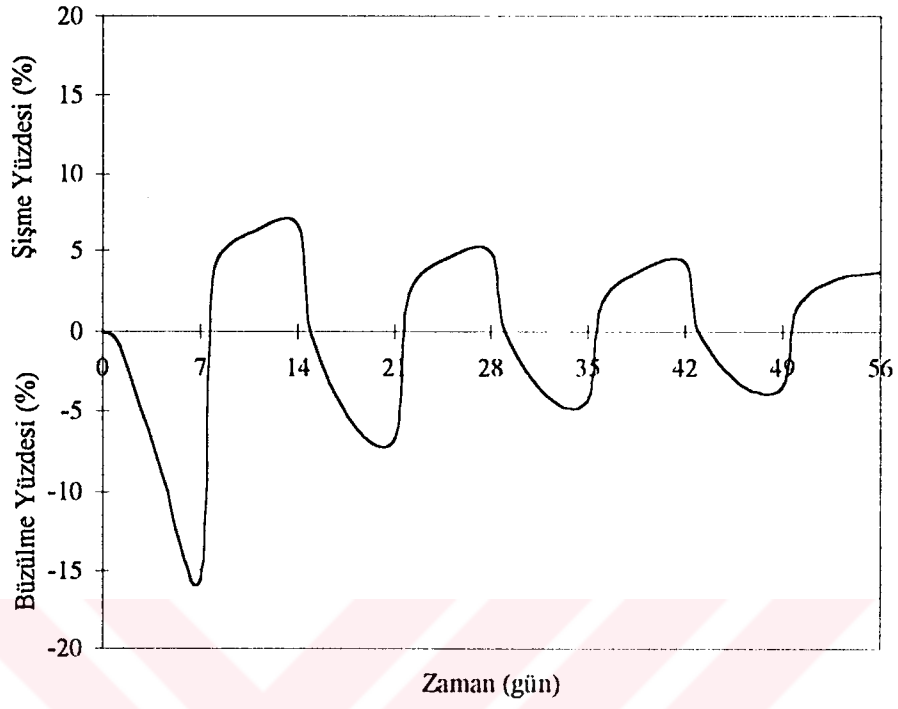
Farklı çevresel kirlilik şartları altındaki ıslak/kuru çevrimler sonuçları Şekil 7.12 ile Şekil 7.19 arasında verilmiştir.



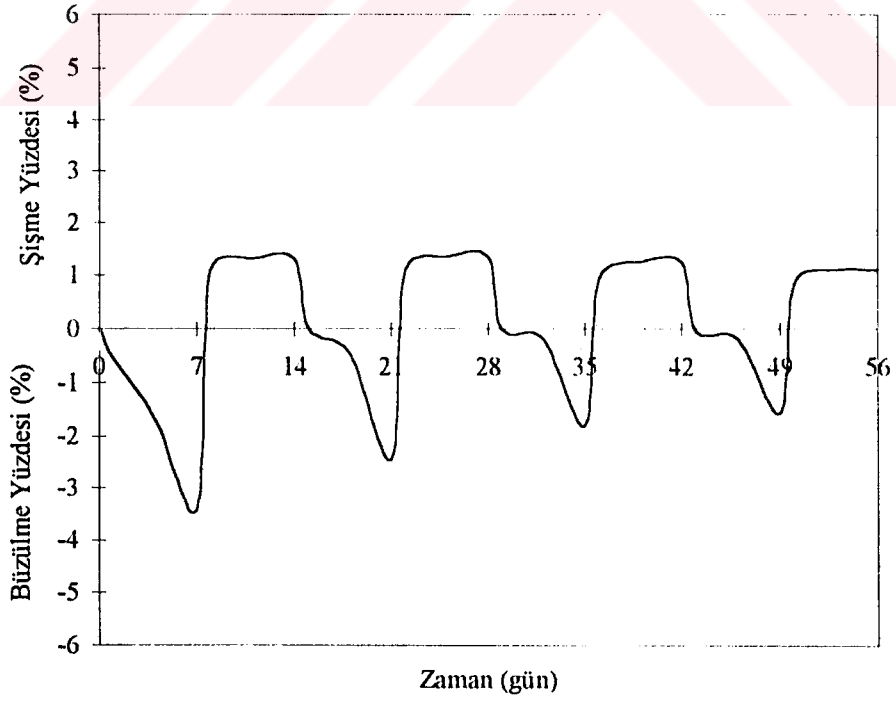
Şekil 7.12. Distile Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler



Şekil 7.13. Distile Su Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler

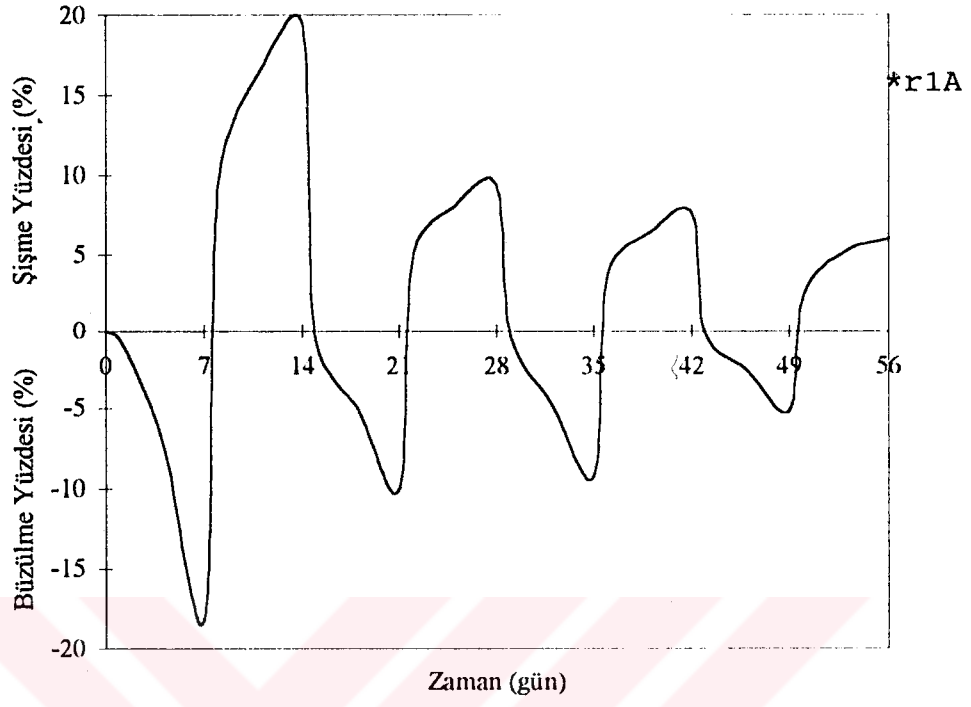


Şekil 7.14. Tuzlu Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler

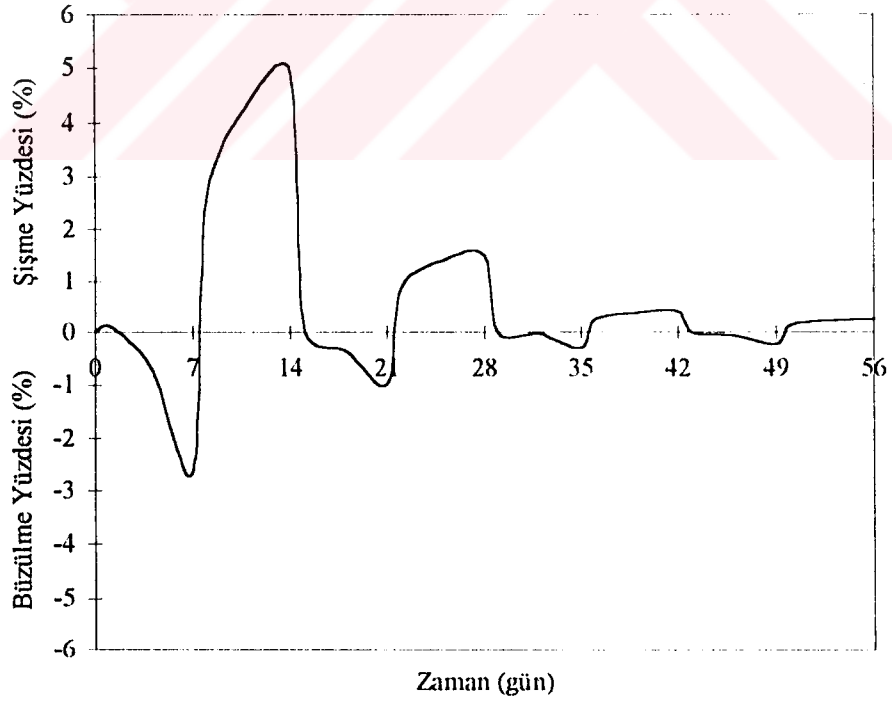


Şekil 7.15. Tuzlu Su Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler

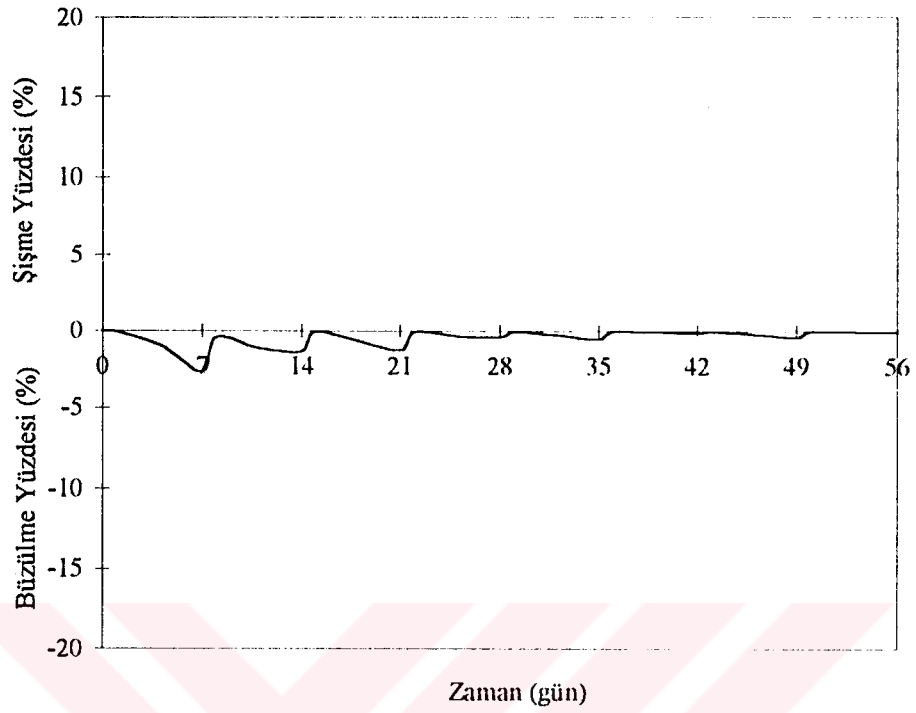




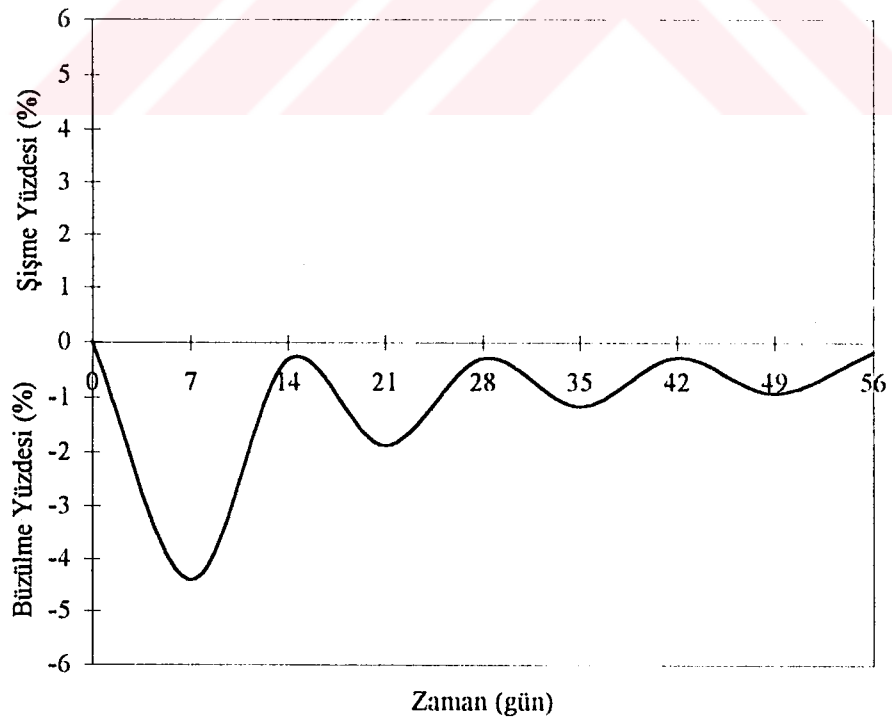
Şekil 7.16. Çöp Suyu Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler



Şekil 7.17. Çöp Suyu Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler



Şekil 7.18. Gazyağı Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler



Şekil 7.19. Gazyağı Şartlarında Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler

## 7.4. Şişme Potansiyelinin İyileştirilmesi

### 7.4.1. Serbest şişme deney sonuçları

Bentonit kilinin şişme özelliklerinin ıslahı amacıyla kullanılan kireç katkı miktarının artması ile serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde önemli derecede azalmalar görülmüştür. Kireç ilaveli numunelerde serbest şişme miktarları veya yüzdeleri şişme özelliklerinin azalmasından dolayı 3-4 gün gibi kısa bir zamanda stabil hale gelmiştir. Daha kısa zamanda şişmenin stabil hale gelmesi kil minarelli arasında meydana gelen çimentolaşma reaksiyonlarının hızlı olmasındandır. %15 kireç ilavesinden sonra serbest şişme yüzdelerinde önemli azalmalar meydana gelmemiştir. Serbest şişme yüzdelerinde meydana gelen azalmanın sebebi kireç danelerinin topaklaşmaya neden olmasıdır. Kireç içindeki kalsiyum ile kil içindeki silika ve alümina reaksiyona girerek çimentolaşmış silikatlar ve alüminatlar meydana getirmektedir. Böylece aglomera ve flokule bir yapı meydana gelmektedir.

%15, %30, %60 ve %100 kireç ilavesinde meydana gelen serbest şişme yüzdeleri surasıyla, %7.68, %6.21, %5.86 ve %3.96'dır. Bu deneyler sonucunda %15, %30, %60 ve %100 kireç ilaveli bentonit kilinin şişme potansiyelinin düşük olduğu bulunmuştur [23]. İki gün gibi kısa bir sürede serbest şişme yüzdeleri stabil hale gelmektedir.

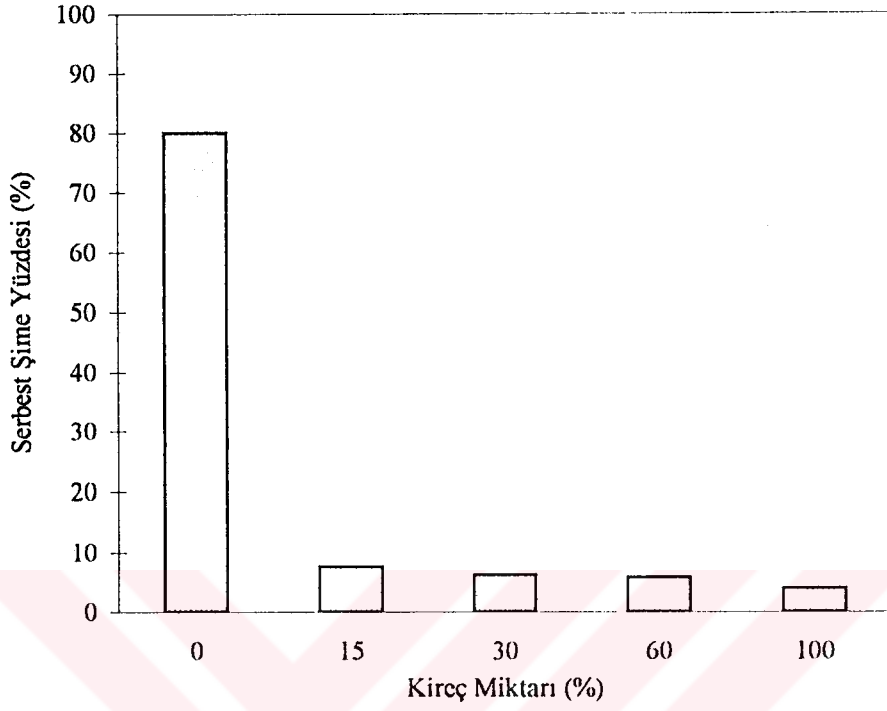
Farklı kireç yüzdelerindeki serbest şişme yüzdeleri Şekil 7.20'de ve farklı kireç yüzdelerindeki serbest şişme yüzdesinin zamanla değişimi Şekil 7.21'de verilmiştir. Kireç yüzdesine bağlı olarak serbest şişme deneyi sonucunda bentonit kilinin su muhtevalarında meydana gelen değişimler ise Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Serbest Şişme Dencyleri Sonucunda Su Muhtevalarındaki Değişimler

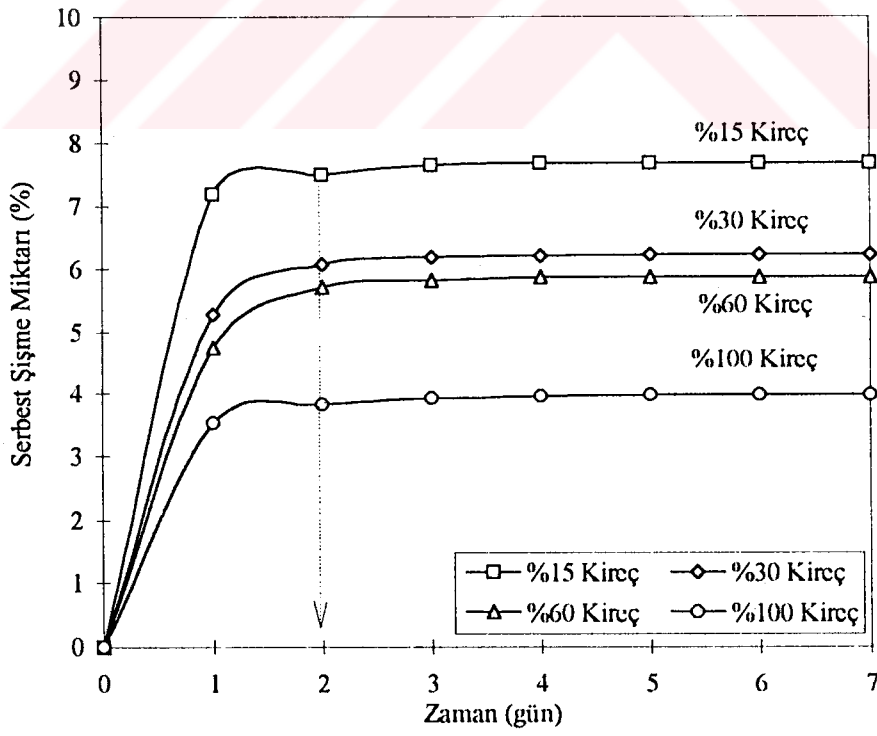
Karışım Oranları	Serbest Şişme Altında (0.07 kg/cm <sup>2</sup> )	
	W <sub>ilk</sub> (%)	W <sub>son</sub> (%)
%0 Kireç	41	192
%15 Kireç	41	54
%30 Kireç	40	51
%60 Kireç	39	46
%100 Kireç	39	30

W<sub>ilk</sub> : Dency başlangıcı su muhtevaları

W<sub>son</sub> : Dency sonu su muhtevaları



Şekil 7.20. Farklı Kireç Miktarlarındaki Serbest Şişme Yüzdeleri

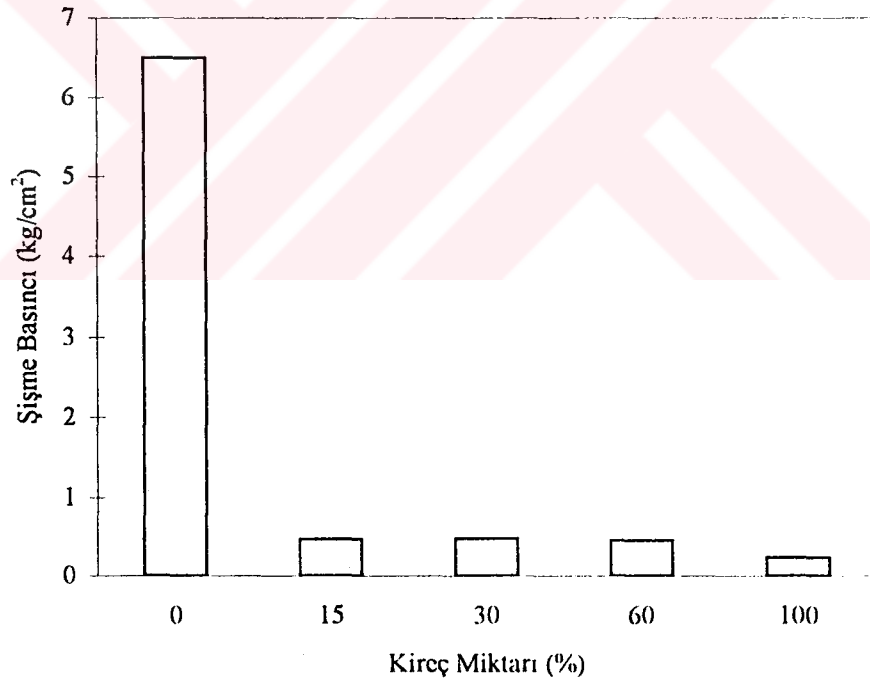


Şekil 7.21. Serbest Şişme Yüzdelerinin Kireç Yüzdelerine Bağlı Olarak Değişimi

#### 7.4.2. Şişme basıncı deney sonuçları

Bentonit kiline ilave edilen kireç yüzdesinin artması ile şişme basıncı değerlerinde önemli azalmalar görülmüştür. Farklı yüzdelerde kireç katılarak yapılan şişme basıncı deneylerinin sonuçları serbest şişme deneyinin sonuçları ile uyum sağlamış ve şişme basıncı azaldıkça serbest şişme yüzdesi de azalmıştır. Şişme basıncı deneylerinde %15 kireç ilavesinden sonraki yüzdelerde belirlenen şişme basıncı değerlerinde önemli değişimler olmamıştır. Kireç ilavesiyle şişme basıncı değerleri  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  değerinin altına indirilmiştir.

Farklı kireç yüzdelerindeki şişme basıncı değerleri Şekil 7.22’de verilmiştir. Farklı kireç yüzdelerindeki şişme basıncı deneyleri sonucunda su muhtevasında meydana gelen değişimler Çizelge 7.5’de verilmiştir.



Şekil 7.22. Farklı Kireç Yüzdelerindeki Şişme Basıncı Değerleri

Çizelge 7.5. Farklı Kireç Yüzdelerinde Su Muhtevsındaki Değişimler

Karışım Oranları	Şişme Basıncı Altında	
	$W_{ilk}$ (%)	$W_{son}$ (%)
%0 Kireç	41	52
% 15 Kireç	41	49
% 30 Kireç	40	47
% 60 Kireç	39	45
% 100 Kireç	40	44

$W_{ilk}$  : Dency başlangıcı su muhtevası

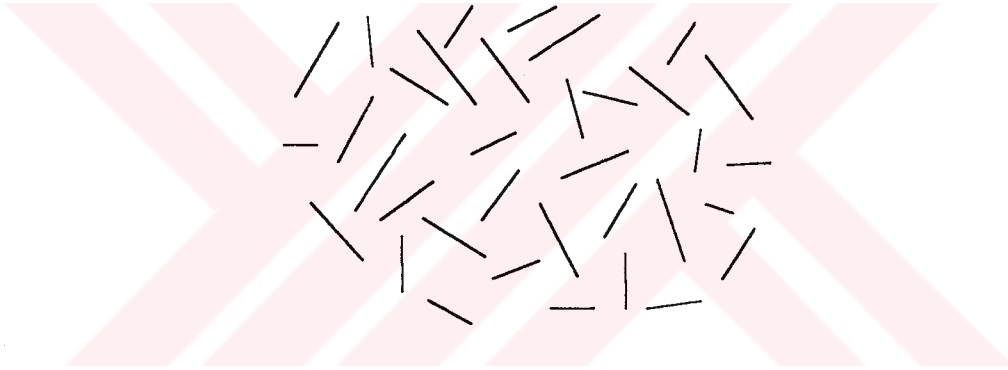
$W_{son}$  : Dency sonu su muhtevası



## 8. SCANNING ELEKTRON MİKROSKOPİ (SEM) SONUÇLARI

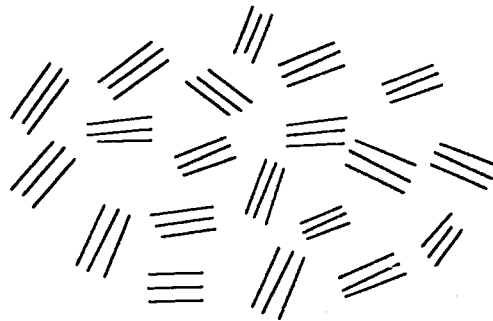
### 8.1. Distile su altındaki sonuçlar

Bentonit kili serbest şişme basıncı altında distile su şartlarında dispers (ayrık) yapı göstermiştir. Dispers yapı, çökme (danelerin yerleşmesi) sırasında komşu kil daneleri arasındaki elektriksel kuvvetlerde itme durumunun (repulsive kuvvetlerin) meydana geldiği (baskın olduğu) zaman oluşan bir yapıdır. Dispers yapılarda daneler birbirinden ayrık hareket etmeye eğilimlidir. Dispers yapıda kil danelerinde yüzey-yüzey ve köşe-yüzey birleşimleri meydana gelmez. Dispers yapı Şekil 8.1’de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Dispers (agregasyonsuz) Yapı

Dispers yapının bir diğer şekli agregasyonlu dispers yapıdır. Agregasyonlu dispers yapı Şekil 8.2’de gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Dispers (agregasyonlu) Yapı

Distile su şartlarında serbest şişme basıncı altında çevrimlere maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafı Şekil 8.3'de ve şişme basıncı altında çevrimlere maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafı ise Şekil 8.4'de verilmiştir.



Şekil 8.3. Distile Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (1500X)

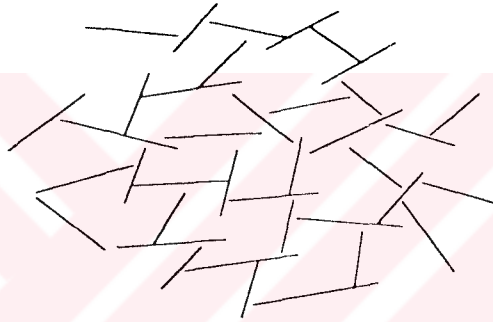


Şekil 8.4. Distile Su Şartlarında Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (1500X)

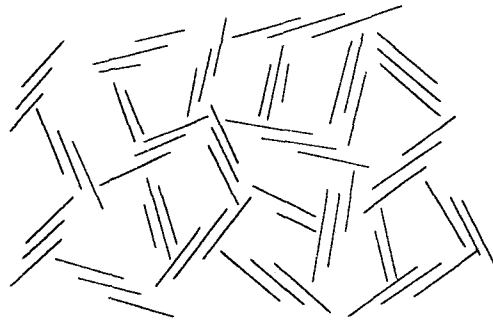


## 8.2. Tuzlu su altındaki sonuçlar

Bentonit kili serbest şişme basıncı altında tuzlu su şartlarında agregasyonlu flokulasyonlu yapı göstermektedir. Flokulasyonlu yapı, çökme (danelerin yerleşmesi) sırasında komşu daneler arasındaki elektriksel kuvvetlerde çekme durumunu (attractive kuvvetlerin) meydana geldiği (baskın olduğu) zaman oluşan bir yapıdır. Bundan dolayı, flokulasyonlu yapılarda daneler köşe-köşe veya köşe-yüzey gibi birleşimlere eğilimlidir. Flokulasyonlu yapı Şekil 8.5'de ve agregasyonlu flokulasyonlu yapı ise Şekil 8.6'da gösterilmiştir.



Şekil 8.5. Flokulasyonlu Yapı

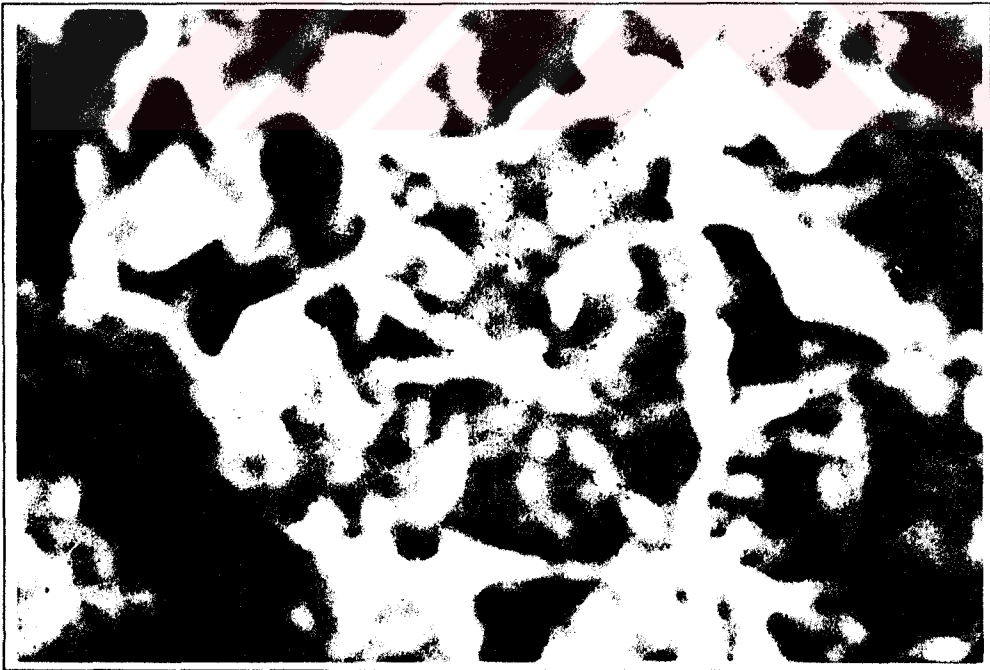


Şekil 8.6. Agregasyonlu Flokulasyonlu Yapı

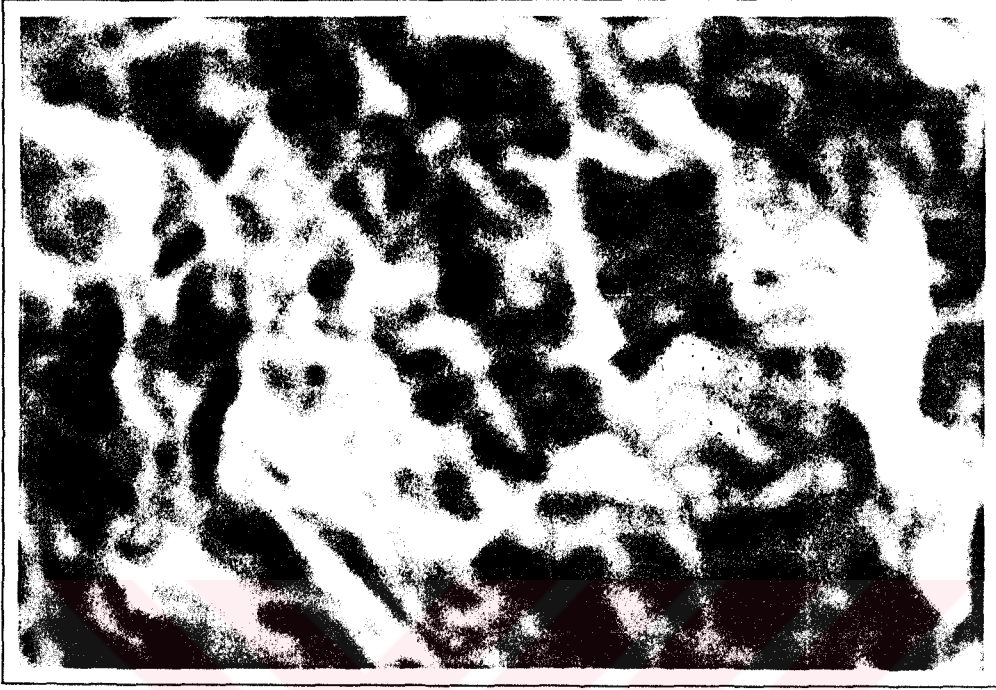
Tuzlu su şartlarında, serbest şişme basıncı altında çevrimlere maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafları Şekil 8.7 ve 8.8'de ve şişme basıncı altında çevrimlere maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafı ise Şekil 8.9'da verilmiştir.



Şekil 8.7. Tuzlu Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (500X)



Şekil 8.8. Tuzlu Su Şartlarında Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (630X)



Şekil 8.9. Tuzlu Su Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (1200X)

### 8.3. Çöp suyu altındaki sonuçlar

Serbest şişme basıncı altında çöp suyu şartlarına maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafları Şekil 8.10 ve 8.11’de verilmiştir.



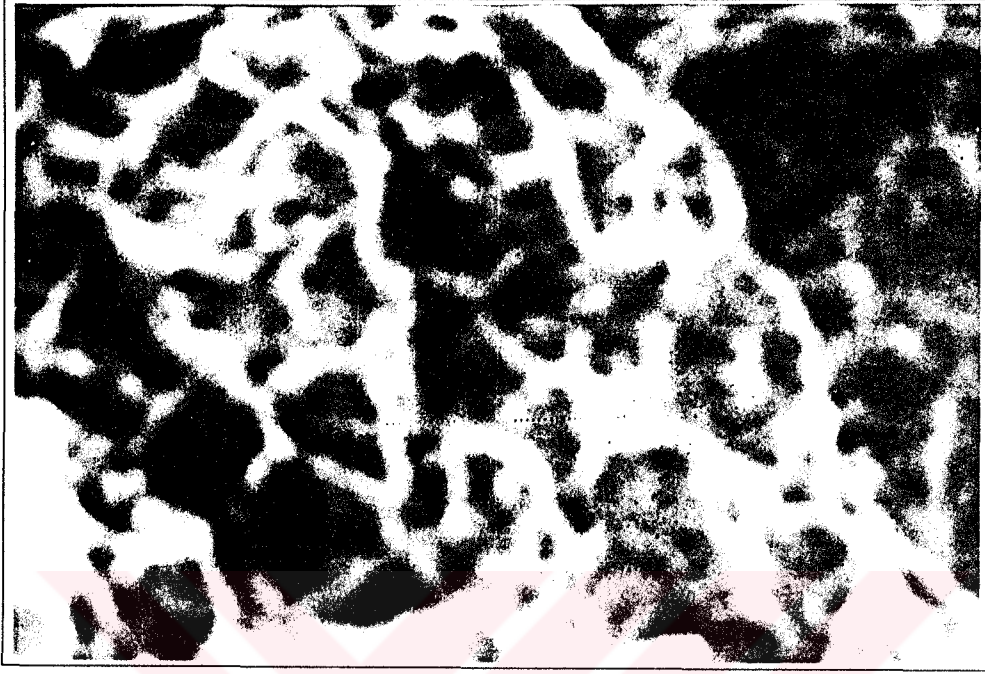
Şekil 8.10. Çöp Suyu Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altındaki Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (1500X)



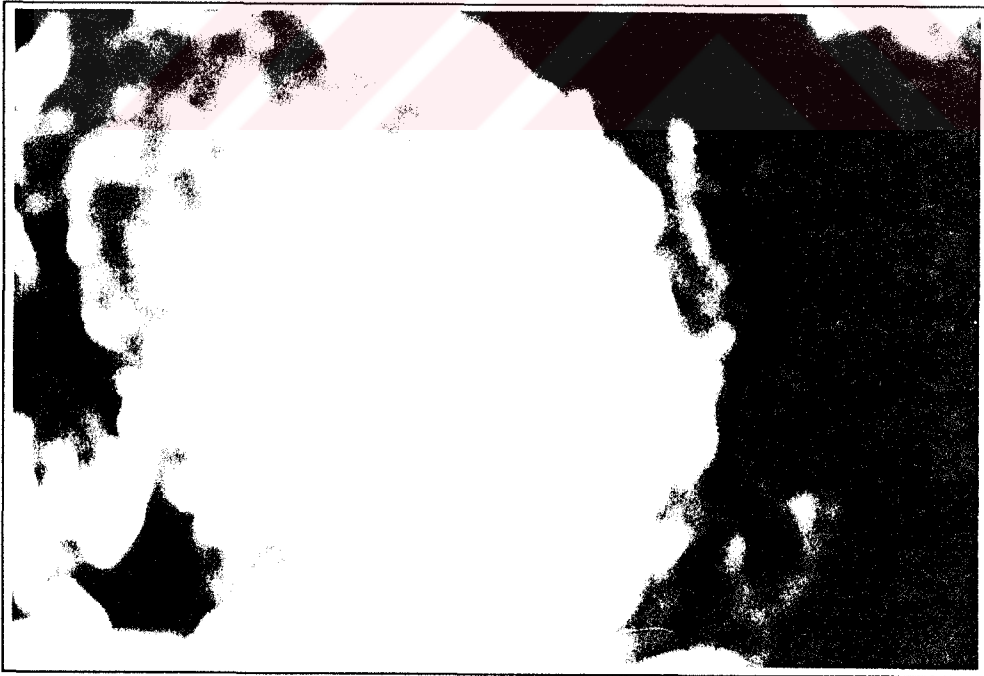
Şekil 8.11. Çöp Suyu Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafı (3200X)

#### 8.4. Gazyağı altındaki sonuçlar

Bentonit kili serbest şişme basıncı altında gazyağı şartlarında aglomere bir yapı göstermiştir. Aglomere yapı, kil danelerinin birbirine çekme yüzey gerilmesi, kohezyon ve adhezyon ile bağlanması sonucu oluşan yapıdır. Bu yapı petrol (oil) karıştırılmış kil daneleri durumunda küresel aglomere yapı olmaktadır. Gazyağı şartlarında serbest şişme basıncı altında çevrimlere maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafları Şekil 8.12 ve 8.14'de verilmiştir. Gazyağı şartlarında şişme basıncı altında çevrimlere maruz bırakılan bentonit kiline ait SEM fotoğrafları ise Şekil 8.13 ve 8.15'de verilmiştir. Bentonit kilinde gazyağı şartlarında oluşan aglomere yapının şematik olarak oluşum mekanizması Şekil 8.16'da ve bir gazyağı yumağının şematik gösterimi ise Şekil 8.17'de verilmiştir.



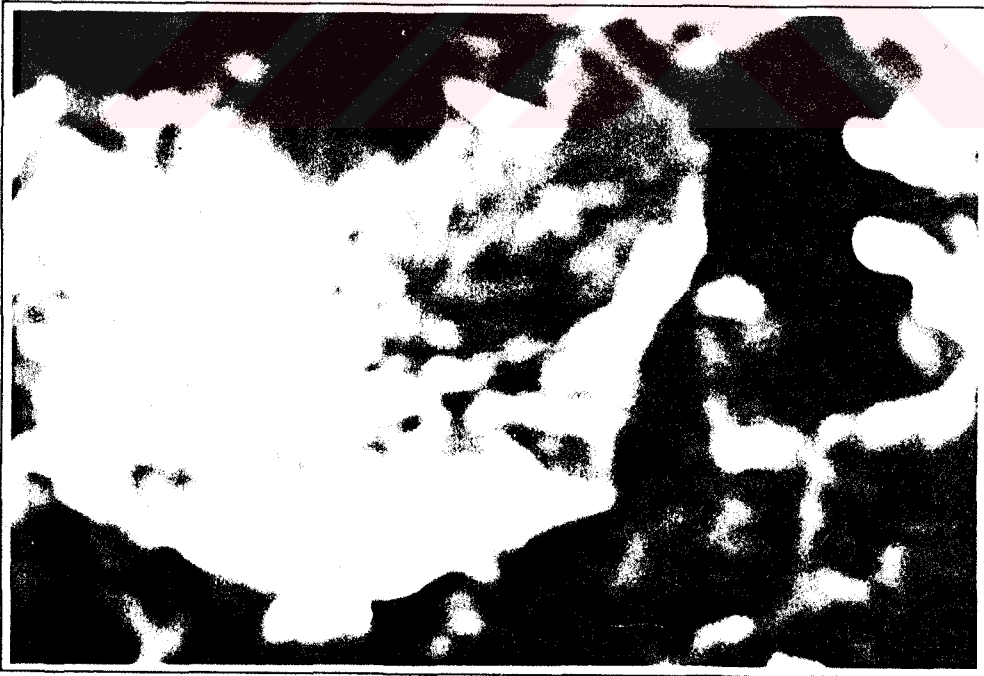
Şekil 8.12. Gazyağı Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafları (300X)



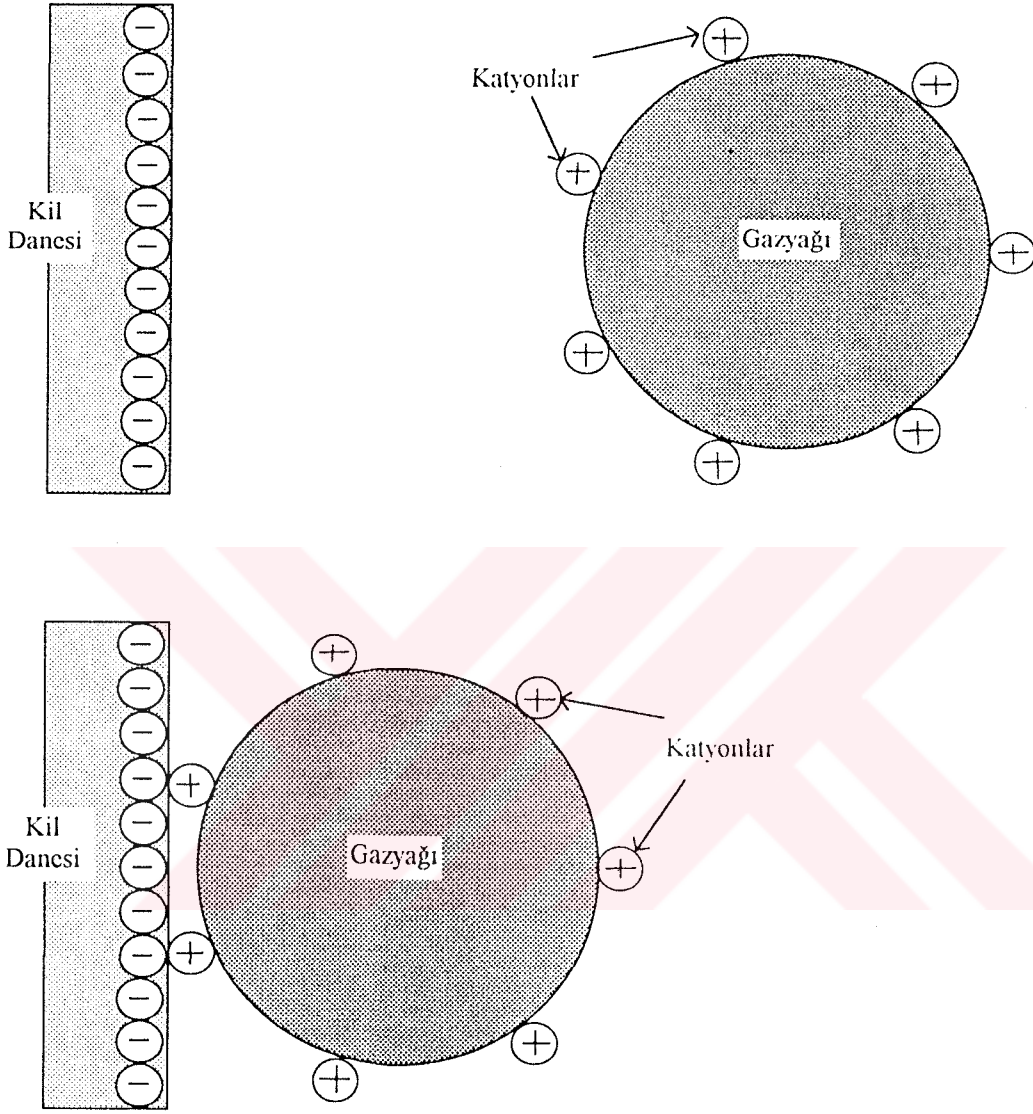
Şekil 8.14. Gazyağı Şartlarında Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafları (1500X)



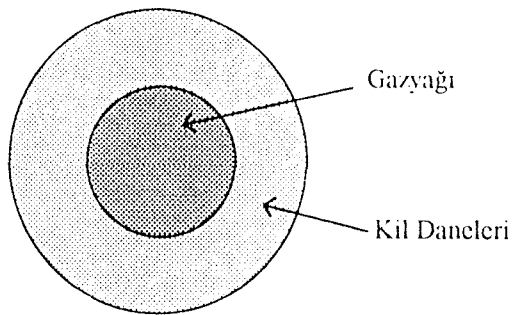
Şekil 8.13. Gazyağı Şartlarında Serbest Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (500X)



Şekil 8.15. Gazyağı Şartlarında Şişme Basıncı Altında Sıkıştırılmış Bentonit Kiline ait SEM Fotoğrafi (5000X)



Şekil 8.16. Gazyacı Şartlarında Oluşan Aglomere Yapının Mekanizması [35]



Şekil 8.17. Gazyacı Yumağının Şematik Gösterimi [35]

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1. Şişme/Büzülme Özelliklerinin Belirlenmesi

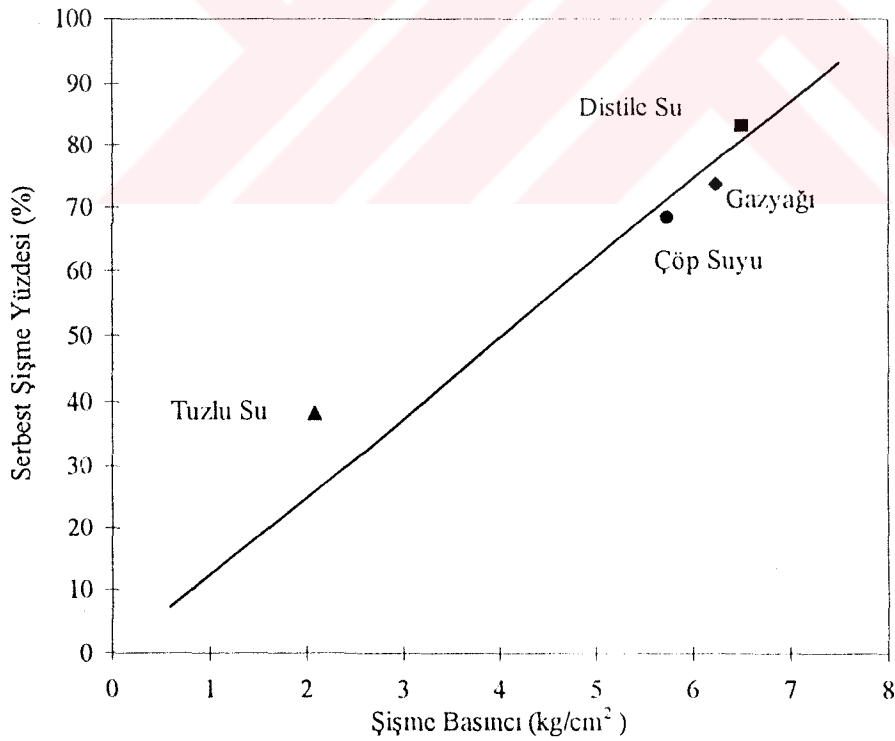
- Şişen zeminlerin şişme karakteristiklerinden olan şişme potansiyeli (yüzdesi) ve şişme basıncı değerleri laboratuvarında 23°C ile 27°C arasında değişen, zeminlerin doğada bulunabileceği sıcaklığa göre yüksek olan sıcaklıklarda belirlendiği için deneysel olarak belirlenen değerlerin arazide olabilecek değerlerden fazla olması doğaldır.
- Çalışmada saf bentonit kili kullanıldığı için her bir çevresel şartta belirlenen şişme değerleri o şartlarda olabilecek maksimum değerlerdir. Çünkü aktif kil yüzdesi, şişme potansiyeli etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bentonit kil yüzdesi daha düşük olan zeminler üzerinde aynı çevresel şartlarda yapılacak serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri ile farklı çevresel şartlardaki şişme özelliklerinin belirlenmesine yönelik matematiksel ilişkiler verilebilir.
- Distile su şartlarında belirlenen serbest şişme değerlerine göre, tuzlu sudaki serbest şişme yüzdesi % 45, gazyağı şartlarındaki serbest şişme yüzdesi % 14, çöp suyu şartlarındaki serbest şişme yüzdesi ise % 10 daha az meydana gelmiştir.
- Distile su şartlarında belirlenen şişme basıncı değerlerine göre, tuzlu sudaki şişme basıncı % 4.48, gazyağı şartlarındaki şişme basıncı % 0.7 ve çöp suyundaki şişme basıncı % 0.3 değerinden daha az meydana gelmiştir.
- Serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri sonucunda maksimum serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı distile suda gözlenmiştir.
- Genel olarak distile suya göre çöp suyunun, tuzlu suyun ve gazyağının bentonit kilinin şişme potansiyelini arttırmadığı görülmüştür. Tuzlu suyun ise, bentonit kilinin şişme potansiyelini önemli miktarda azalttığı gözlenmiştir.
- Çevresel kirlilik şartlarında yapılan ıslak/kuru çevrimler sonucunda çevrim sayısı arttıkça şişme/büzülme özelliklerinde azalmalar gözlenmiştir.
- Bentonit kilinin çevresel kirlilik şartlarda belirlenen serbest şişme yüzdelerinin Gromko [23] ve Seed [5] tarafından verilen değerlere göre karşılaştırılması ve belirlenen şişme dereceleri Çizelge 9.1'de verilmiştir.



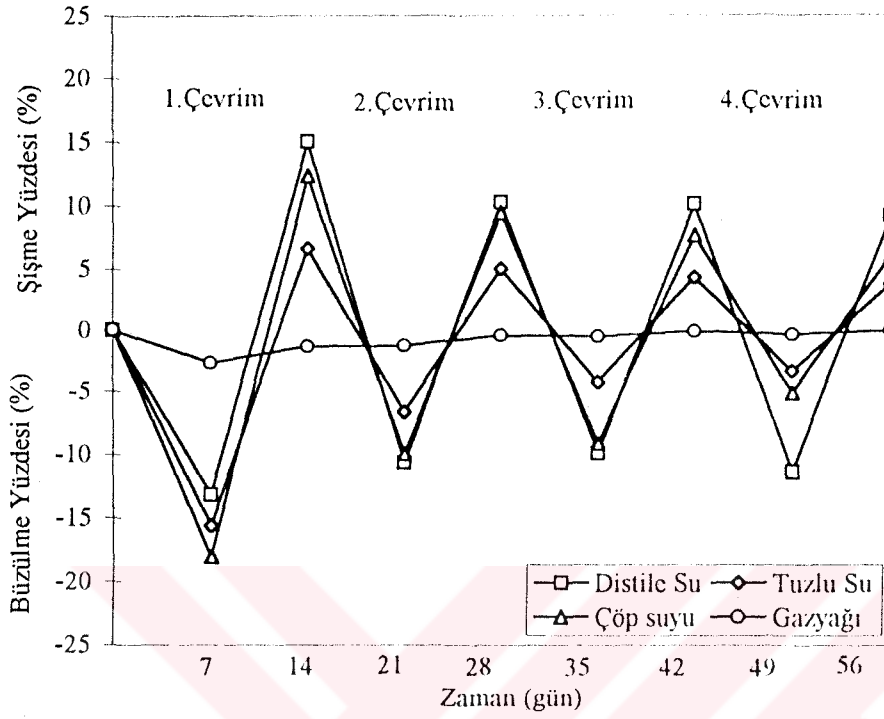
- Farklı çevresel kirlilik şartlarında belirlenen serbest şişme yüzdesi ile şişme basıncı arasındaki ilişki Şekil 9.1’de verilmiştir.
- Bentonit kiline ait farklı çevresel kirlilik şartlarındaki serbest şişme basıncı ve şişme basıncı altındaki ıslak/kuru çevrim deney sonuçları Şekil 9.2 ve Şekil 9.3’de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Çevresel Şartlarda Belirlenen Şişme Potansiyellerine Ait Şişme Dereceleri

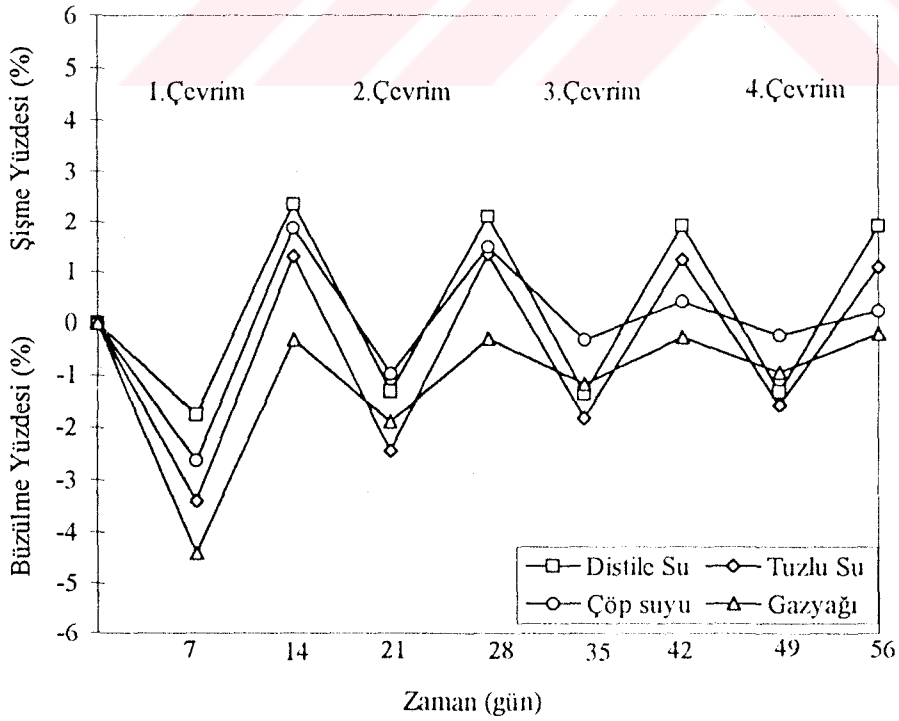
Karışım	Deney Sonuçları		Gromko [23] Şişme Yüzdesi (%)	Seed [5] Şişme Yüzdesi (%)
	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Derecesi		
Bentonit+Distile Su	83.25	Yüksek	>35	>25
Bentonit+Çöp Suyu	73.68	Yüksek	>35	>25
Bentonit+Gazyağı	68.42	Yüksek	>35	>25
Bentonit+Tuzlu Su	38.29	Yüksek	>35	>25



Şekil 9.1. Farklı Çevresel Şartları İçin Serbest Şişme Yüzdesi-Şişme Basıncı İlişkisi



Şekil 9.2. Serbest Şişme Basıncı Altındaki Islak/Kuru Çevrimler



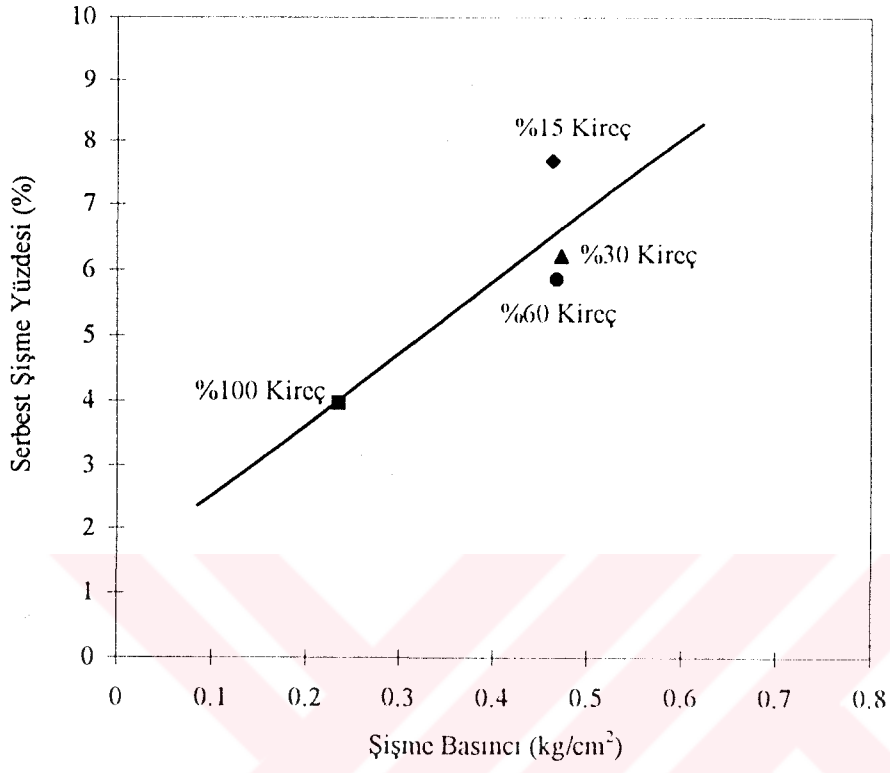
Şekil 9.3. Şişme Basınçları Altındaki Islak/Kuru Çevrimler

## 9.2. Şişme Potansiyelinin İyileştirilmesi

- Optimum su muhtevasında hazırlanan bentonit kilinin şişme potansiyelinin iyileştirilmesi amacıyla ilave edilen kireç yüzde miktarının artması ile serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde önemli azalmalar görülmüştür.
- % 15 kireç ilaveli bentonit kilinde distile su şartlarındaki serbest şişme yüzdesi, kireç ilavesiz bentonit kilinin distile su şartlarındaki serbest şişme yüzdesine göre yaklaşık % 75 azalma göstermiştir.
- % 15 kireç ilaveli bentonit kilinde distile su şartlarındaki şişme basıncı, kireç ilavesiz bentonit kilinin distile su şartlarındaki şişme basıncına göre yaklaşık % 6 azalma göstermiştir.
- Kireç ilaveli bentonit kilinin çevresel kirlilik şartlarda belirlenen serbest şişme yüzdelerinin Gromko [23] ve Seed [5] tarafından verilen değerlere göre karşılaştırılması ve belirlenen şişme dereceleri Çizelge 9.2’de verilmiştir.
- Kireç ilaveli bentonit kilinde belirlenen şişme basıncı ile serbest şişme yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 9.4’de verilmiştir.

Çizelge 9.2. Kireç İlaveli Bentonit Kilinde Belirlenen Şişme Potansiyellerine Ait Şişme Dereceleri

Karışım	Deney Sonuçları		Gromko [23] Şişme Yüzdesi (%)	Seed [5] Şişme Yüzdesi (%)
	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Derecesi		
Bentonit Kili	83.25	Yüksek/Yüksek	>35	>25
Bentonit+%15 Kireç	7.68	Düşük/Yüksek	0-10	5-25
Bentonit+%30 Kireç	6.21	Düşük/Yüksek	0-10	5-25
Bentonit+%60 Kireç	5.86	Düşük/Yüksek	0-10	5-25
Bentonit+%100 Kireç	3.96	Düşük/Orta	0-10	1.5-5



Şekil 9.4. Farklı Kireç Yüzdeleri İçin Serbest Şişme Yüzdesi-Şişme Basıncı İlişkisi

## KAYNAKLAR

1. BANDYOPADHYAY, S. S., 1981, *Prediction of Swelling Potential for Nature Soils*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.GT5, pp.658-661.
2. O'NEILL, M. W., and GHAZZALY, O. I., 1977, *Swell Potential Related to Building Performance*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.103, No. GT12, pp.1363-1379.
3. PARASHAR, S. P., WONG, K. S., and CHOA, V., 1969, *Swell-Shrink Behaviour of Compacted Clay*, Journal of Geotechnical Engineering, pp.385-386.
4. RANGANATHAM, B. V., and SATYANARAYANA, B., 1965, *A Rational Method Of Predicting Swelling Potential For Compacted Expansive Clays*, Proc. 6th Inter. Conf. Soil Mechanics Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 92-96.
5. SEED, H. B., Woodward, R. J., Jr. and Lundgren. R., 1962, *Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays*, J. ASCE, Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 88, No. SM3, pp. 53-87.
6. LİVNEH, M., KASSİFF, G., and WISEMAN, G., 1969, *Prediction of Swelling Pressure of Clays*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, No.SM1, pp.323-324.
7. LAW, M. A., ve ANSAL, A. M., 1991, *Killi Zeminlerde Şişme Basıncının Amirik Olarak Bulunması*, 5. Ulusal Kil Sempozyumu, shf.318-329.
8. SHİDHRAN, A., RAO, A. S. and SIVAPULLAIAH, P. V., 1986, *Swelling Pressure of Clays*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.9, No.1, pp.24-33.
9. KOMORNİK, A., and DAVID, D., 1969, *Prediction of Swelling Pressure of Clays*, J. ASCE, Soil Mechanics and Foundation Division, SM No. 1, pp. 209-225.
10. KANDEMİR, Ö., ve EROL, O., 1996, *Emme Basıncı-Şişme Parametreleri İlişkisi*, 6. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, shf.98-107.
11. NAYAK, N. V. and CHRISTENSEN. R. W., 1971, *Swelling Characteristic of Compacted, Expansive Soils, Clays and Clay Minerals*, Vol.19, pp.251-261.
12. KASSİFF, G., and BAKER, R., 1971, *Aging Effects on Swell Potential of Compacted Clay*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineering, Vol.97, No.SM3, pp.529-540.

### KAYNAKLAR (DEVAM)

13. GABRIEL, K., and RAPHAEL, B., 1971, *Aging Effects on Swell Potential of Compacted Clay*, Journal of Geotechnical Engineering, pp.386-387.
14. SIKH, T. S., 1993, *Swelling Soils*, Journal of the Geotechnical Engineering, Vol.119, No.4, pp.791-792.
15. ÖZBAYOĞLU, F., 1993, *Belirli Oranlarda Bentonit Katkılı Sıkıştırılmış Kum Örneklerinin Şişme Davranışları Üzerinde Bir Çalışma*, 6. Ulusal Kil Sempozyumu, shf.295-308.
16. SİYAHİ, B. G., HEKİMOĞLU, S., ve ANSAL, A. M., 1996, *Sıkıştırılmış Kil Zeminin Tekrarlı Şişme Davranışı*, 6. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, shf.179-188.
17. OSİPOV, V. I., BIK, N.N. and RUMJANTSEVA, N. A., 1987, *Cycling Swelling of Clays*, Applied Clay Science, Vol.2, pp. 363-374.
18. DAY, R. W., 1994, *Swell-Shrink Behaviour of Compacted Clay*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.120, No.3, pp.618-623.
19. DIF, A. E., AND BLUEMEL, W. F., 1991, *Expansive Soils under Cyclic Drying and Wetting*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.14, No.1, pp.96-102.
20. AL-HOMOUD, A.S., BASMA, A.A., MALKAWİ, A. I. H. and AL-BASHABSHEH, M. A., 1995, *Cyclic Swelling Behaviour of Clays*, Journal of the Geotechnical Engineering, Vol.121, No.7, pp.562-565.
21. DAKSHANAMURTY, V., and RAMAN, V., 1974, *Review of Expansive Soils*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, No.GT6, pp.588-590.
22. BASMA, A. A., 1993, *Prediction of Expansion Degree for Natural Compacted Clays*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.16, No.4, pp. 542-549.
23. GROMKO, G. J., 1974, *Review of Expansive Soils*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.100, No.GT6, pp.667-687.
24. PARKER, J. C., ZELAZNY, L. W., and AMOS, D. F., 1980, *Swelling Components of Compacted Ca-Montmorillonite*, Clays and Clay Minerals, Vol.28, No.2, pp.135-141.
25. DİNÇER, E. ve BERİLGEN, M. M., 1991, *İnce Daneli Bir Zeminin Kireç ile Stabilizasyonu*, 5. Ulusal Kil Sempozyumu, shf.280-290.

### KAYNAKLAR (DEVAM)

- 26.ÇİNİCİOĞLU, F. Ö., 1993, *İnce Daneli Zeminlerde Kireç ve Çimento Katkı Etkileri*, 6. Ulusal Kil Sempozyumu, shf.395-409.
- 27.Soil and Rock, *Standart Test Methods for One Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils*, Annual Book of ASTM Standart, Vol. 04.08, pp. 992-1001, 1991.
- 28.ERGENE, A., *Toprak Biliminin Esasları*, Atatürk Üniversitesi Yayınları, shf. 156-177, Erzurum, 1987.
- 29.BRAJA, D., *Principle of Geotechnical Engineering*, Second Edication, 1990, pp.10-16.
- 30.YURDAKOÇ, M.,K., GÜZEL, F., ve TEZ, Z., 1989, *Katyon Değişim Kapasitesi (KDK) ve Belirleme Yöntemleri*, 6. Ulusal Kil Sempozyumu, shf. 183-185.
- 31.MITCHEL, J. K., *Fundamental of Soil Behavior*, Second Edication, University of California, Berkeley, 1992.
- 32.ÖZAYDIN K.,*Zemin Mekaniği Kitabı*, 1989, shf. 290-295, 341-347, İstanbul, 1989.
- 33.ATANUR, A., 1973, *Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı*, Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No.208, shf. 19-38, 60-70 Ankara, 1973.
- 34.TUNCAN, M., TUNCAN, A., ve KOYUNCU, H., 1997, *Stabilization of Petroleum Contaminated Drilling Wasted by Additives*, International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolul, USA, pp.950-953
- 35.TUNCAN, A., *Mechanics of A Marine Clay Based on Physico-Chemical Interaction With Organic Contaminants*, Degree of Doctor of Philosophy, pp,214, 1992.