

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KATI ATIK DEPOLARI İÇİN GEÇİRİMSİZ ŞİLTE OLUŞTURULMASINDA KUM-  
BENTONİT-KİREÇ KARIŞIMININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Fehime AKCANCA**

**HAZİRAN 2009  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI ATIK DEPOLARI İÇİN GEÇİRİMSİZ ŞİLTE OLUŞTURULMASINDA  
KUM-BENTONİT-KİREÇ KARIŞIMLARININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI

İnş. Yük. Müh. Fehime AKCANCA

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Doktor (İnşaat Mühendisliği)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.05.2009  
Tezin Savunma Tarihi : 25.06.2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Temel YETİMOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fikri BULUT

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

## ÖNSÖZ

Katı atık imha depolarında geçirimsiz şilte oluşturulmasında kum-bentonit-kireç karışımlarının kullanılabilirliğinin araştırılması konulu bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Doktora tez danışmanlığımı üstlenerek, çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN'e teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde görev yapmakta olan ve çalışmalarımın değişik aşamalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Öğretim Üyelerine ve Araştırma Görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı, yurt içi doktora bursu kapsamında maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında sağladıkları maddi ve manevi destekten dolayı değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunar, bu çalışmanın bilim ve uygulama alanlarına faydalı olmasını dilerim.

Fehime AKCANCA  
Trabzon 2009

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	3
1.3. Literatür İncelemesi.....	4
1.3.1. Şilte Malzemesi Olarak Kum-Bentonit Karışımlarının Kullanımıyla İlgili Çalışmalar .....	4
1.3.2. Kireç Katkısının Zeminin Şişme Davranışına Etkileri ile İlgili Çalışmalar .....	12
1.3.3. Kireç Katkısının Zeminin Geçirimliliğine Etkileri ile İlgili Çalışmalar.....	13
1.3.4. Islanma-Kuruma Çevrimlerinin Geçirimsizlik ve Şişme Davranışlarına Etkileri ile İlgili Çalışmalar .....	16
1.4. Katı Atıklar .....	21
1.4.1. Atık Yönetimi .....	22
1.5. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri.....	22
1.5.1. Geri Kazanma .....	23
1.5.2. Yakma.....	23
1.5.3. Kompostlama.....	24
1.5.4. Düzenli Depolama .....	24
1.6. Katı Atık Depolama Tesisi .....	27
1.6.1. Katı Atık Depolama Alanı Yer Seçiminde Gözönünde Bulundurulması Gerekten Başlıca Faktörler .....	32
1.6.2. Türkiye’deki Tehlikeli Atık Kontrolü Yönetmeliğine Göre Geçirimsiz Şilte Oluşturulması.....	33
1.6.2.1. Depo Tabanının Teşkili .....	33
1.6.2.2. Depo Tesisi Üst Örtüsünün Teşkili .....	34
1.7. Geçirimsizlik Malzemesi Olarak Bentonit .....	35

1.7.1.	Bentonitin Kullanıldığı Alanlar .....	36
1.7.2.	Bentonitin Kristal Yapısı .....	37
1.7.3.	Değişebilen Katyonlar .....	39
1.7.4.	Dane Büyüklüğü ve Adsorpsiyon Yeteneği .....	39
1.8.	Kireç Katkısının Zemine Etkileri .....	40
1.9.	Şişen Zeminler Hakkında Genel Bilgiler.....	42
1.9.1.	Şişme Mekanizması .....	45
1.9.2.	Şişmeye Etki Eden Faktörler .....	45
1.9.3.	Şişme Potansiyeli.....	48
1.9.4.	Şişme Basıncı .....	49
1.10.	Zeminlerde Su.....	51
1.10.1.	Zeminlerde Geçirimsizlik .....	52
1.10.1.1.	Geçirimsizlik Katsayısının Laboratuvar Deneyleriyle Belirlenmesi .....	53
1.10.1.2.	Geçirimsizlik Katsayısının Arazi Deneyleri ile Belirlenmesi.....	56
1.10.1.3.	Geçirimsizlik Katsayısının Ampirik Olarak Belirlenmesi.....	57
1.10.1.4.	Geçirimsizlik Katsayısının Bağlı Olduğu Etmenler .....	59
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	61
2.1.	Malzemeler .....	61
2.1.1.	Kum .....	61
2.1.2.	Bentonit .....	62
2.1.3.	Kireç .....	63
2.2.	Deney Yöntemi.....	63
2.2.1.	Bentonitin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	64
2.2.1.1.	Dane Yoğunluğunun Belirlenmesi .....	64
2.2.1.2.	Kıvam (Atterberg) Limitlerinin Belirlenmesi.....	64
2.2.2.	Başlangıç Kireç Yüzdesinin Belirlenmesi .....	64
2.2.3.	Kum-Bentonit-Kireç Karışımlarının Özelliklerinin Belirlenmesi.....	65
2.2.3.1.	Kompaksiyon Parametrelerinin Belirlenmesi.....	65
2.2.3.2.	Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi.....	65
2.2.4.	Şişme Basıncının Belirlenmesi .....	66
2.2.5.	Geçirimsizlik Katsayılarının Belirlenmesi.....	68
2.2.6.	Islanma-Kuruma Çevrimi Uygulanması.....	69
2.3.	Deney Programı .....	69
3.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	72

3.1.	Tanımlama ve Sınıflandırma Deneyleri .....	72
3.2.	Karışımların Başlangıç Kireç Yüzdelerinin Tayini Deneyleri .....	72
3.3.	Kompaksiyon Deneyleri .....	75
3.4.	Direkt Kesme Deneyleri .....	79
3.5.	Geçirimsizlik Deneyleri .....	80
3.6.	Şişme Basıncı Deneyleri.....	88
4.	SONUÇLAR.....	97
5.	ÖNERİLER .....	100
6.	KAYNAKLAR.....	101
7.	EKLER .....	111
ÖZGEÇMİŞ		

## ÖZET

Endüstri ve teknoloji alanında meydana gelen hızlı gelişmelere paralel olarak atıklar her geçen gün artan bir çevre problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Evsel ve tehlikeli katı atıkların çevreye gelişi güzel bırakılması insan sağlığı için büyük risk oluşturmaktadır. İnsanoğlunun çevreye olan zararını minimuma indirmek için bilimsel pek çok çalışma yapıla gelmiştir. Bunların başında gelenlerden bazıları da atıkların imha edilmesi, geri dönüştürülmesi ve depolanmasıdır. İnsan sağlığını tehdit eden her türlü atığın kontrolsüz olarak doğaya bırakılması yerine özel amaçla tasarlanan katı atık depo tesislerinde saklanması atık bertarafı için kullanılan en yaygın yöntemdir.

Bu çalışmada; atık depolama alanları için geçirimsiz şilte oluşturulmasında, kum-bentonit-kireç karışımının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç için, %20, 30, 40 ve 50 bentonit oranlarındaki kum-bentonit karışımlarına %0, 1, 2 ve 3 oranlarında kireç ilave edilerek hazırlanan örnekler üzerinde, geoteknik özelliklerin belirlenmesi deneylerinin yanı sıra düşen düzeyli geçirimsizlik ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde beş ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmış ve çevrimler sonucunda örneklerin geçirimsizlik ve şişme basıncı değerleri belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda, karışıma kireç ilavesiyle karışımın optimum su muhtevasının arttığı, maksimum kuru yoğunluğun azaldığı bulunmuştur. Yapılan şişme basıncı deney sonuçlarına göre, kireç ilavesi ile şişme basıncında azalma olduğu ancak ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda şişmedeki bu azalmanın kısmen geri kazanıldığı görülmüştür. Geçirimsizlik deney sonuçlarına göre, %20, 30 ve 40 bentonit oranlı karışımlarda %1 kireç oranı için geçirimsizlik azalırken %2 ve 3 kireç oranları için geçirimsizlik artmıştır. %50 bentonit oranlı karışımda ise %1 ve 2 kireç oranları için geçirimsizlik azalırken %3 kireç oranı için geçirimsizlik artmıştır. Islanma-kuruma çevrimlerinin kireç katkılı geçirimsizlik deney örnekleri üzerine kür etkisi yaptığı ve bundan dolayı örnekler üzerindeki ıslanma-kuruma çevrimleri boyunca geçirimsizlik katsayısının düşüş eğiliminde olduğu görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar, kireç katkısının çok düşük tutulması durumunda, kireç katkısız duruma göre geçirimsizliği daha düşük olan şilte oluşturulabileceğini göstermiştir. Şişme basıncının kireç ilavesiyle düşmesinin, kum-bentonit-kireç karışımının şilte malzemesi olarak kullanılabilirliğini desteklediği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kum-Bentonit Karışımları, Şişme Basıncı, Geçirimsizlik, Kireç Stabilizasyonu, Şilte, Islanma-Kuruma Çevrimi

## SUMMARY

### **Investigation on Usage of Sand-Bentonite-Lime Mixtures for Impermeable Liners of Waste Disposal Barriers**

Wastes appear as gradually increased environmental problem due to rapid developments in field of industry and technology. It forms major risk for human health that residential and industrial solid wastes cursorily thrown away. A lot of scientific studies have produced to reduce a minimum level of polluted environment by man. Some of those are annihilation, transforming, storing of wastes. Instead of throwing them blindly to the nature, the mostly used method to dispose the all type of waste threatening human health is to keep them in the waste disposal facilities which are designed for special goals.

In this study, it is investigated to be used sand-bentonite-lime mixtures to construct impermeable liner for sanitary landfills. For this aim, permeability and swelling pressure tests in addition to determination of geotechnical properties were performed on specimens prepared adding 0, 1, 2 and 3% of lime in sand-bentonite mixtures with 20, 30, 40 and 50% of bentonite. Five wetting-drying cycles were performed on specimens and permeability and swelling pressure values were determined at the end of each cycle.

In the result of tests, it was found that optimum water content is increased; maximum dry density is decreased by adding lime into the mixture. Results of swelling pressure tests indicated that swelling pressure is decreased when lime is added in the mixture but partly decrement on swelling pressure is acquired in the result of wetting-drying cycles. Results of permeability tests are indicated that permeability is increased when lime is added in the mixture but decreased in case of very low lime percents. It was found that wetting-drying cycles are indicated cure effect on permeability test specimens with lime addition and therefore permeability is decreased during wetting-drying cyclic. Experimental work performed in this study showed that lower dosages (1-2%) that is less than optimum percentage of lime have lowered the permeability more than no-lime added to the mixture. It is considered that decrease of swelling pressure with the addition of lime supports the employability of sand-bentonite-lime mixture as the liner material.

**Key Word:** Sand-Bentonite Mixtures, Swelling Pressure, Permeability, Lime Stabilization, Liner, Wetting-Drying Cycle



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1.	Vahşi çöp depolama alanı, deniz ve şehir (URL-3, 2008)..... 27
Şekil 1.2.	Vahşi çöp depolama alanı (URL-3, 2008)..... 28
Şekil 1.3.	Oluşturulan şevlerle sahanın kademelendirilmesi (URL-3, 2008). .... 29
Şekil 1.4.	İlk kademe yalıtım için kil-bentonit karışımının serilmesi (URL-3, 2008). 30
Şekil 1.5.	Kil-bentonit karışımı üzerine yüksek yoğunluklu polietilen malzeme (geomembran) serilmesi (URL-3, 2008). .... 30
Şekil 1.6.	İki geomembran örtü arasına yerleştirilen drenaj boruları (URL-3, 2008). 31
Şekil 1.7.	Drenaj borularının üzerine çakıl tabakası serilmesi ve gaz bacalarının oluşturulması (URL-3, 2008). .... 31
Şekil 1.8.	Çöplerin katı atık imha alanına serilmesi ve sıkıştırılması (URL-3, 2008). 32
Şekil 1.9.	Teşkil edilecek geçirimsiz taban için örnek kesit (Resmi Gazete, 2005)... 34
Şekil 1.10.	Teşkil edilecek depo üst örtüsünün örnek kesiti (Resmi Gazete, 2005)..... 35
Şekil 1.11.	Değişik kil minerallerinin yapısı (Graig, 1997)..... 38
Şekil 1.12.	Zemin suyu çeşitleri (Head, 1992; Çetin vd., 1998)..... 51
Şekil 2.1.	Deneylerde kullanılan kumun granülometri eğrisi ..... 62
Şekil 2.2.	Zemin-kireç karışımında kireç oranının pH değerine etkisi ..... 65
Şekil 2.3.	Düşen düzeyli geçirimsizlik deney düzeneği ..... 68
Şekil 3.1.	% 20 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi ..... 73
Şekil 3.2.	% 30 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi ..... 73
Şekil 3.3.	% 40 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi ..... 74
Şekil 3.4.	% 50 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi ..... 74
Şekil 3.5.	%20 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi ..... 76
Şekil 3.6.	%30 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi ..... 76
Şekil 3.7.	%40 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi ..... 77
Şekil 3.8.	%50 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi ..... 77

Şekil 3.9.	%20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimlilik katsayısının değişimi.....	84
Şekil 3.10.	%30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimlilik katsayısının değişimi.....	85
Şekil 3.11.	%40 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimlilik katsayısının değişimi.....	85
Şekil 3.12.	%50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimlilik katsayısının değişimi.....	86
Şekil 3.13.	Kireç oranına göre geçirimlilik katsayısının değişimi.....	86
Şekil 3.14.	Kireç oranına göre şişme basıncının değişimi.....	91
Şekil 3.15.	%20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	93
Şekil 3.16.	%30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	93
Şekil 3.17.	%40 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	94
Şekil 3.18.	%50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	94
Ek Şekil 1.1.	%20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi .....	111
Ek Şekil 1.2.	%20 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	112
Ek Şekil 1.3.	%20 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	112
Ek Şekil 1.4.	%20 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	113
Ek Şekil 1.5.	%30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi .....	113
Ek Şekil 1.6.	%30 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	114
Ek Şekil 1.7.	%30 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	114
Ek Şekil 1.8.	%30 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	115
Ek Şekil 1.9.	%40 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi .....	115
Ek Şekil 1.10.	%40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	116
Ek Şekil 1.11.	%40 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	116

Ek Şekil 1.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	117
Ek Şekil 1.13. %50 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi .....	117
Ek Şekil 1.14. %50 bentonit %1 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	118
Ek Şekil 1.15. %50 bentonit %2 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	118
Ek Şekil 1.16. %50 bentonit %3 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	119
Ek Şekil 2.1. %20 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	120
Ek Şekil 2.2. %20 bentonit %1 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	121
Ek Şekil 2.3. %20 bentonit %2 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	122
Ek Şekil 2.4. %20 bentonit %3 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirmesi-kayma gerilmesi ilişkisi.....	123
Ek Şekil 2.5. %30 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	124
Ek Şekil 2.6. %30 bentonit %1 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişki (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	125
Ek Şekil 2.7. %30 bentonit %2 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	126
Ek Şekil 2.8. %30 bentonit %3 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	127
Ek Şekil 2.9. %40 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi .....	128
Ek Şekil 2.10. %40 bentonit %1 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	129
Ek Şekil 2.11. %40 bentonit %2 kireç muhtevastaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	130

Ek Şekil 2.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	131
Ek Şekil 2.13. %50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	132
Ek Şekil 2.14. %50 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	133
Ek Şekil 2.15. %50 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	134
Ek Şekil 2.16. %50 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	135
Ek Şekil 3.1. %20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.....	136
Ek Şekil 3.2. %20 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 137	
Ek Şekil 3.3. %20 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 138	
Ek Şekil 3.4. %20 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 139	
Ek Şekil 3.5. %30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.....	140
Ek Şekil 3.6. %30 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 141	
Ek Şekil 3.7. %30 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 142	
Ek Şekil 3.8. %30 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 143	
Ek Şekil 3.9. %40 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.....	144
Ek Şekil 3.10. %40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 145	
Ek Şekil 3.11. %40 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.. 146	
Ek Şekil 3.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi. 147	
Ek Şekil 3.13. %50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.....	148

Ek Şekil 3.14.	%50 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.	149
Ek Şekil 3.15.	%50 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.	150
Ek Şekil 3.16.	%50 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi.	151
Ek Şekil 4.1.	%20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	152
Ek Şekil 4.2.	%20 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	152
Ek Şekil 4.3.	%20 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	153
Ek Şekil 4.4.	%20 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	153
Ek Şekil 4.5.	%30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	154
Ek Şekil 4.6.	%30 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	154
Ek Şekil 4.7.	%30 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	155
Ek Şekil 4.8.	%30 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	155
Ek Şekil 4.9.	%40 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	156
Ek Şekil 4.10.	%40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	156
Ek Şekil 4.11.	%40 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	157
Ek Şekil 4.12.	%40 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	157
Ek Şekil 4.13.	%50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	158
Ek Şekil 4.14.	%50 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	158
Ek Şekil 4.15.	%50 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	159
Ek Şekil 4.16.	%50 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi.....	159

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1.	Türkiye genelinde belediyelerdeki katı atık göstergeleri (URL-2, 2006). .. 26
Tablo 1.2.	Bentonitin tipik özellikleri..... 36
Tablo 1.3.	Şişmeye etki eden faktörler (Erol vd., 1988)..... 47
Tablo 1.4.	Şişen killerde muhtemel hacim değişikliği (Chen, 1988)..... 50
Tablo 2.1.	Çalışmada kullanılan bentonitin kimyasal özellikleri ..... 62
Tablo 2.2.	Çalışmada kullanılan kirecin kimyasal özellikleri..... 63
Tablo 2.3.	Yapılan deneylerin özeti..... 71
Tablo 3.1.	Kum ve bentonite ait bazı fiziksel özellikler ..... 72
Tablo 3.2.	Kum-bentonit karışımlarının başlangıç kireç yüzdesi değerleri..... 75
Tablo 3.3.	Kum-bentonit-kireç karışımlarının kompaksiyon parametreleri ..... 78
Tablo 3.4.	Kum-bentonit karışımlarına ait kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) ve görünür kohezyon (c) değerleri ..... 80
Tablo 3.5.	Her bir karışım için ıslanma-kuruma çevrimlerine ait geçirimsizlik katsayıları ..... 82
Tablo 3.6.	Her bir karışım için ıslanma-kuruma çevrimlerine ait şişme basınçları..... 90

## SEMBOLLER DİZİNİ

c	Kohezyon
CA	Konsolidasyon hücreli permeametre
CEC	Katyon değiştirme kapasitesi
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
CMB	Kil membran bariyeri
CT	Bilgisayarlı tomografi
DİE	Devlet istatistik enstitüsü
DTA	Diferansiyel termal analiz
e	Boşluk oranı
EDZ	Kazıdan zarar görmüş tabaka
EPA	Çevre koruma örgütü
ESEM	Çevresel tarama elektron mikroskobu
GCL	Geosentetik kil şilte
GRCL	Geogrid kil şilte
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
IP	Plastisite indisi
i	Hidrolik eğim
K	Bentonitin özellikleriyle ilgili bir katsayı
k	Geçirimsizlik (permeabilite) katsayısı
kPa	Kilo paskal
m	Metre
M	Molarite
mm	Milimetre
ML	Elastik mil
MPa	Mega paskal
N	Vuruş sayısı
P	Ağırlıkça elekten geçen malzeme yüzdesi
PVR	Potansiyel düşey yükselme
RWCM	Rijit duvarlı permeametre
SP	Uniform derecelenmiş kum
SPT	Statik penetrasyon deneyi

t	Zaman
TFWP	Esnek duvarlı permeametre
XRD	X ışını difraksiyonu
WDPT	Su damlası sızma deneyi
$a_v$	Sıkışmakatsayısı
$c'$	Efektif kohezyon
$C_r$	Eğrilik katsayısı
$C_u$	Uniformluluk katsayısı
$c_v$	Konsolidasyon katsayısı
$D_{10}$	Efektif çap
$D_r$	Rölatif sıklık
$D_s$	Efektif dane çapı
$H_0$	İlk örnek yüksekliği
$K_0$	Zeminin yatay basınç katsayısı
$k_{0.85}$	$e=0.85$ iken hidrolik geçirimsizlik katsayısı
$K_F$	Arazi hidrolik geçirimsizlik katsayısı
$K_L$	Laboratuvar hidrolik geçirimsizlik katsayısı
$K_p$	Maksimum şişme deformasyonu ve şişme basıncındaki K değeri
$i_0$	Sınır hidrolik eğim
$P_s$	Şişme Basıncı
$S_p$	Şişme potansiyeli
$S_r$	Doğunluk derecesi
$S_w$	Serbest şişme oranı
$V_m$	Kum-bentonit karışımındaki montmorillonit hacmi
$V_{sw}$	Sabit düşey basınçta kum-bentonit karışımındaki maksimum şişme deformasyonu
$V_v$	Kum-bentonit karışımındaki boşluk hacmi
$V_w$	Montmorillonit tarafından absorbe edilen su hacmi
w	Su muhtevası
$w_i$	Başlangıç su muhtevası
$w_L$	Likit limit
$w_{opt}$	Optimum su muhtevası
$w_p$	Plastik limit
$\Delta H$	Örnek yüksekliğindeki değişim miktarı
$\epsilon$	Birim deformasyon



$\varepsilon_s$	Şişme yüzdesi
$\varepsilon_{sp}$	Birincil şişme yüzdesi
$\varepsilon_{sv}^*$	Şişme deformasyon hacmi artış yüzdesi
$\phi$	Kayma mukavemeti açısı
$\gamma$	Akışkanın birim hacim ağırlığı
$\mu$	Akışkanın vizkozitesi
$\rho_k$	Kuru yoğunluk
$\rho_{kmax}$	Maksimum kuru yoğunluk
$\rho_n$	Doğal yoğunluk
$\rho_s$	Dane yoğunluğu
$\rho_w$	Suyun yoğunluğu
$\sigma_0$	Başlangıçtaki düşey gerilme
$\sigma_{se}$	Oturma basıncı
$\sigma_v$	Düşey gerilme

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Günümüzde hızla gelişen teknolojik ilerlemeler beraberinde kirlilik problemini de getirmiştir. Nüfus artışına paralel olarak katı atık miktarları da artmakta, özellikle büyük kentlerimizde tüketim alışkanlıklarının değişimine paralel olarak atık kompozisyonu da hızla değişmektedir. Son yıllardaki hızlı sanayileşme de sanayiden kaynaklanan atık miktarının artmasına yol açmıştır. Bu problemler karşısında çevre koruma politikaları geliştirilmek zorunda kalınmıştır. Düzenli katı atık depolama sahaları buna örnek teşkil etmektedir. Depolama alanları, sızıntı sularından zeminin ve zemin suyunun kirlenmesini önleyecek şekilde tasarlanırlar.

Katı atık düzenli depolama sahalarının kurulması ve işletilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmekle birlikte oldukça yetersizdir. Devlet İstatistik Enstitüsü (TÜİK) 2001 yılı belediye katı atık istatistikleri sonuçlarına göre ülkemizde yapımı tamamlanmış 12 adet düzenli katı atık depolama tesisi mevcuttur. Bunlar İstanbul, Ankara, Bursa, Gaziantep, İzmir, Mersin, Kocaeli, Balıkesir, Patara, Marmaris, Foça ve Göcek'te bulunmaktadır. Ayrıca Didim'de yapımı devam eden bir tesis mevcuttur. Buna karşın ülkemizde yaklaşık 3260 adet Belediye kurulmuştur (URL-1, 2006). Dolayısı ile katı atıklarımızın büyük bir bölümü vahşi çöp depolama alanlarında bertaraf edilmektedir. Bu da büyük çevre problemlerine yol açmaktadır.

Tamamen yok edilmesi mümkün olmayan atıkların kütlelerinin mümkün olduğunca azaltılarak çevreye en az zarar verecek şekilde sağlıklı depolarda saklanması amaçlanmaktadır. Bu amaç için katı atık depolama tesisleri tasarlanmaktadır. Atık bertarafı çalışmalarında iki önemli husustan bahsedilebilir; bunlardan birincisi atıkların kirletici özelliklerine göre sınıflandırılması ikincisi ise atıkların depo edileceği sahanın seçimidir. Atık tasnifi, atıkların arz ettiği tehlike derecesi ve türlerine (kağıt, cam, plastik gibi) göre yapılmaktadır. Modern bir atık deposu için yer tespit çalışmaları başlıca; atığın üretildiği alan, iklim, jeoloji, hidroloji, nüfus yoğunluğu, arazi kullanımı, bölge halkına etkileri ve diğer faktörleri kapsamaktadır.

Atık depolarında geçirimsizliği sağlamak için tesisin altına inşa edilen düşük geçirimsizliğe sahip malzemenin yapılan şiltelere kil şilte veya zemin şiltesi denilmektedir.

Depo şiltelerinin temel tasarım amacı; zeminin ve zemin suyunun kirlenme tehlikesini azaltmak için depo altındaki zemine çöp suyunun sızmasını engellemektir. Uygun şartlar altında doğal olarak oluşmuş kohezyonlu zeminler şilte olarak kullanılabilirler.

Sıkıştırılmış kil, katı atık depolarının taban şiltelerinde, tehlikeli ve diğer katı atık maddelerinin yeraltı suyuna ve çevreye yayılmasını önlemek için geçirimsizlik tabakası olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu amaç için en çok kullanılan killerden bir tanesi de bentonittir. Bentonit malzemesi, geoteknik mühendisliğindeki diğer kullanım alanlarının yanında, çok yüksek su emme ve çok düşük geçirimsizlik özellikleri sayesinde, atık depo alanlarının tabanında sızdırmazlık tabakası karışımının bir bileşeni olarak kullanılmaktadır.

Kum-bentonit karışımları katı atık imha depolarının taban şiltelerinde, endüstriyel, evsel ve diğer katı atık maddelerinin çevreye yayılmasını önlemek için geçirimsizlik tabakası olarak özellikle son dönemlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kum-bentonit karışımları çok düşük geçirimsizlik sağlayabilmektedirler. Ancak çevresel faktörlerin etkisiyle zamanla geçirimsizliklerinde artış görülebilmektedir. Katı atıkların kontrolü yönetmeliği ve tehlikeli atıkların kontrolü yönetmeliğinde, geçirimsiz şiltelerin nasıl oluşturulacağı ve hangi özellikleri taşıması gerektiği anlatılmıştır (Resmi Gazete, 1991; Resmi Gazete, 2005).

Tüm gelişmiş ülkelerde hemen hemen tüm denetleyici kuruluşlar, zemin kaplama ve örtülerinin belli bir maksimum değerden daha az veya eşit geçirimsizliğe sahip olacak şekilde tasarlanmasını istemektedirler. Genel olarak geçirimsizlik katsayısının tehlikeli atık, endüstriyel atık ve kentsel katı atıkları depolamada kullanılan zemin kaplama ve örtüleri için  $1 \times 10^{-9}$  m/s'den daha az veya eşit olması istenmektedir. Ülkemizde uygulanan yönetmeliklere göre üst ve alt örtü tabakalarının geçirimsizlik katsayılarının tehlikeli atıklar için  $1 \times 10^{-9}$  m/s'den, evsel atıklar için ise  $1 \times 10^{-8}$  m/s'den daha az veya eşit olması istenmektedir. Bentonit çok yüksek su emme ve çok düşük geçirimsizlik özellikleri sayesinde atık depolama sahalarının tabanında sızdırmazlık tabakası karışımının bir bileşeni olarak yaygın bir kullanıma sahiptir.

Yüksek plastisite ve şişme özelliğine sahip bir kil olması nedeniyle bentonitin işlenebilirliği zordur. Ayrıca şişme özelliğinden dolayı ciddi hacim değişimleri göstermektedir ve stabilitesi düşüktür. Bu sebeplerden dolayı, bentonit uygulama alanlarında tek başına kullanılmak yerine kum, kireç, uçucu kül vb. malzemelerle karıştırılarak kullanımı tercih edilmektedir.

Kum-bentonit karışımlarının, atık bertaraf depoları için geçirimsiz şilte oluşturulmasında kullanımı daha önce bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Wiebe vd., 1998; Tang vd., 2002; Xu vd., 2003; Komine ve Ogata, 2003). Kum-bentonit karışımları ile yapılan bu çalışmalarda doğa şartlarının etkisi dikkate alınmamıştır. Kum-bentonit karışımlarıyla atık bertaraf alanlarında yeterli geçirimsizliğe sahip şilte oluşturulabilmesine karşın sürekli meteorolojik değişikliklere maruz kalan bu yapıların, tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda geçirimsizliklerinde artış gözlenebilmektedir. Bu nedenle, böyle geçirimsiz şiltelerin inşasında, ileride meteorolojik değişimlerden kaynaklanan verimsizliklerle karşılaşılması için bu doğa koşullarının göz önünde tutulması önemlidir.

Pek çok araştırmacı, bentonit gibi şişen türde killerin ıslanma kuruma çevrimlerine maruz kaldıklarında şişme özelliklerini kısmen kaybettiklerini belirtmiştir (Al-Homoud ve Basma, 1995; Güney vd., 2007; Lin ve Benson, 2000; Alonso vd., 2005). Buna karşın kireç ile stabilize edilmiş şişen killerde, tekrarlı ıslanma kuruma çevrimlerine maruz kalmanın şişmeyi tetiklediği belirtilmiştir (Rao vd., 2001; Güney vd., 2007). Ayrıca Tsai ve Vesilind (1998) tarafından kireçle stabilize edilmiş kum ve montmorillonit karışımlarının sızıntıya karşı üstün direnç sağladığı ve çöp depolama alanlarında şilte malzemesi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Islanma-kuruma çevrimlerine maruz kaldıklarında, kireç katkısının şişen killere bu etkisi dikkate alındığında, kum-bentonit karışımlarına değişik oranlarda kireç ilavesiyle geçirimsizlik oranlarında meteorolojik değişikliklerle tehlikeli azalmaların oluşmadığı geçirimsiz şilte oluşturulabileceği fikrine varılabilir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu çalışmanın amacı; geçirimsiz şilte oluşturulmasında farklı oranlardaki kum-bentonit ve kireç karışımlarıyla hazırlanan örneklerin ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kaldıkları takdirde geçirimsizliklerindeki ve şişme özelliklerindeki değişimi incelemektir. Çalışmada bentonit malzemesinin çok yüksek su emme kapasitesi ve çok düşük geçirimsizlik özellikleri doğrultusunda dane boyutu 0.08-1.19 mm aralığındaki kum malzemeye çeşitli oranlarda karıştırılarak bir sızdırmazlık tabakası elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada; granüler zemine katılan bentonit miktarı toplam kuru karışım ağırlığının %20, 30, 40 ve 50'si olarak seçilmiştir. Kireç miktarları ise yapılan başlangıç kireç oranının belirlenmesi deneyleri sonucuna göre %1, 2 ve 3 olarak seçilmiştir.

Bu çalışma; yukarıda belirlenen oranlarda hazırlanan kireçle stabilize edilmiş kum-bentonit karışımlarının ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalmadan önce ve maruz kaldıktan sonra yapılan geçirimsizlik ve şişme basıncı deneylerini kapsamaktadır.

### 1.3. Literatür İncelemesi

#### 1.3.1. Şilte Malzemesi Olarak Kum-Bentonit Karışımlarının Kullanımıyla İlgili Çalışmalar

Wiebe vd. (1998) tarafından doymuş olmayan kum-bentonit karışımlarına basınç, sıcaklık ve doymuşluğun etkileri incelenmiştir. Genellikle "buffer" olarak adlandırılan kum-bentonit karışımları üzerinde, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde, örneklerdeki hava ve su drenaj yolları, sıcaklık, basınç ve kesme boyunca kapalı tutulmuştur. Açık drenaj etkilerinin de incelendiği belirtilmiştir. Sıcaklıklar 26, 65 ve 100°C arasında, çevre basınçları ise 0.2 ile 3.0 MPa arasında değişmiştir. Numunelerin 16.7 kN/m<sup>3</sup> sabit kuru birim hacim ağırlıklarda ve %35-%98 arasındaki doymuşluk derecelerinde statik şekilde yüklendiği belirtilmiştir. Deneylerde, ağırlıkça %50 silika kumu, %50 Na-bentonit kullanılmıştır. Tampon malzemesinin atık depolarında kullanıldığında, doymuşluğunun sıcaklık ve hidrolik eğimle değişeceği, bunun emmede ve bundan dolayı da dayanımda değişiklikler oluşturacağı ifade edilmiştir. Doymuşluk derecesinin azalması ( $50 \leq S_r \leq 100$ ), hücre basıncının artması ve sıcaklığın azalmasıyla drenajsız kuvvetlerin arttığı ifade edilmiştir.

Tang vd. (2002) tarafından kum-bentonit karışım oranı 1/1 olmak üzere, farklı hazırlama teknikleriyle hazırlanan örnekler üzerinde değişik gerilme şartları altında kum-bentonit karışımlarının emme ve gerilme karakteristikleri incelenmiştir. Örneklerin hazırlanmasında iyi derecelenmiş silika kumu ve likit limiti ( $w_L$ ) 230-250 ve plastisite indisi ( $I_p$ ) 200 olan sodyumca zengin bentonit kullanılmıştır. Emmeler, deneysel olarak saykometre ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılarak belirlenmiş ve bunların su muhtevası, doymuşluk, kuru yoğunluk ve eriyik etkileriyle ilişkili olduğu gösterilmiştir. İlk emmenin gerilme üzerinde etkisi; sabit kütle deneyi olarak adlandırılan hızlı drenajsız üç eksenli

basınç deneyleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Doymun olmayan, sıkıştırılmış kum-bentonit karışımındaki ilk emme değerinin örneklerin hazırlanması için kullanılan yöntemlerle biçimlendirilen zeminin yapısına bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan sodyumca zengin bentonitin doğasından dolayı bentonitteki tuz çözeltisi ve seçilen su muhtevaları hem kılcal emmeyi hem de eriyik emmesinin oluşmasına sebep olmuştur. Örnek hazırlama tekniklerinin, kuru yoğunluk ve doymunluk gibi faktörleri kontrol ettiği ve etkilediği belirtilmiştir. Bunun yanında, doymun olmayan sıkıştırılmış malzemenin mekanik davranışlarını da etkilediği ifade edilmiştir. Sonuç olarak, emme ve bununla ilgili faktörler arasındaki ilişkilerin, mekanik gerilme-basınç davranışının önceden tahminini sağladığı ifade edilmiştir. Zemin yapısından bağımsız olarak kılcal emmedeki artışla gerilmenin arttığı, yoğunlukların aynı olması şartıyla eriyik emmesinin artmasıyla gerilmenin azalabileceği ifade edilmiştir. Aynı kuru yoğunlukta hazırlanan örnekler üzerinde, kılcal emme artışı etkilerinin eşit artıştaki eriyik emmesinin etkilerinden daha önemli olduğu belirtilmiştir.

Xu vd. (2003) tarafından bentonit ve karışımlarının şişme basıncı ve şişme deformasyonunun kuru yoğunluğa, su muhtevalarındaki artışa ve boşluklardaki toplam bentonit partiküllerinin fractal yüzeyine bağlı oldukları gösterilmiştir. Bentonit tarafından absorbe edilen suyun hacminin bentonitin fractal yüzey boyutuyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Fractal dokulu yüzeye sahip bentonit için düşey basınçla su hacminin korelasyonu;  $V_w/V_m = K_p^{D_s-3}$  olarak elde edilmiştir. Düşey basınçla su hacminin korelasyonuna göre maksimum şişme deformasyonunu önceden tahmin edilmiştir. Bundan başka, şişme deformasyonu ve geçen zaman arasındaki ilişki de belirlenmiştir. Bentonit tarafından absorbe edilen su hacmiyle yüzey fractal boyutları arasındaki korelasyon deneysel sonuçlarla yapılandırılmış ve incelenmiştir. Şişme basıncı ve şişme deformasyonu deneylerinden bentonitin fractal yüzey boyutunu tahmin etmek için basit bir metot önerilmiştir. Bentonit ve kumlu karışımlarının maksimum şişme gerilmesinin değerlendirilmesinde bentonitin fractal yüzey boyutları kullanılmıştır.

Komine ve Ogata (2003), yüksek seviyeli nükleer atık depoları için tampon malzemesi olarak kullanılabilen bentonit ve kum-bentonit karışımlarının şişmesine kum-bentonit kütle oranlarının ve bentonitin değişebilir katyon kompozisyonunun etkilerini değerlendirmek için yeni denklemler türetmişlerdir. Montmorillonitin şişme hacmi deformasyonu  $[\epsilon_{sv}^* (\%)]$  şeklinde yeni bir parametre önermişlerdir. Bu yeni parametre, montmorillonitin kuru iken şişme deformasyon hacmi artışı yüzdesi olarak tanımlanmış ve

$$\varepsilon_{sv}^* = [(V_v + V_{sw})/V_m] \times 100 \quad (\%) \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada;

$V_m$  : Kum-bentonit karışımındaki montmorillonit hacmi

$V_v$  : Kum-bentonit karışımındaki boşluk hacmi

$V_{sw}$ : Sabit düşey basınçta kum-bentonit karışımındaki maksimum şişme deformasyonu ( $V_{sw} \geq 0$ )

anlamalarını taşımaktadır.

Gouy-Chapman çift tabaka teorisinin ve Van der Waals kuvvetinin teorik denklemleriyle bu yeni denklemler birleştirildi. Ayrıca kum-bentonit karışımları ve sıkıştırılmış bentonitin şişme basıncı ve şişme potansiyeli hakkında laboratuvar deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak, bu tahmin metodunun uygulanabilirliği teyit edildi.

Blatz vd. (2002), sıkıştırılmış doymun olmayan kum bentonit karışımlarının rijitlik ve dayanımı üzerine emmenin etkilerini incelemişlerdir. Bu amaç için üç farklı teknik kullanılarak hazırlanan kum-bentonit karışımlarının zemin-su karakteristik eğrileri çizilmiştir. Deneylerde, kum-bentonit karışım oranı 50:50 olarak belirtilmiştir. Bu şekilde hazırlanan örnekler üzerinde hızlı drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Emmenin artışıyla rijitlik ve dayanımın non-lineer bir şekilde arttığı gösterilmiştir.

Lingnau vd. (1996), kum-bentonit karışımlarının sıkışabilirliği ve dayanımı üzerine sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Kanada'daki  $1.67 \text{ Mg/m}^3$  yoğunluktaki kum-bentonit karışımını nükleer atık izolasyonu için birkaç tampon malzemesinden biri olarak önermişlerdir. Yaklaşık  $100^\circ\text{C}$  sıcaklık ve yüksek basınç şartları altında kum-bentonit karışımı üzerinde çalışılmıştır. Özet olarak, iki deney programı sunulmuştur: 1- izotermal drenajsız üç eksenli deneyler, 2- izotermal sabit drenajlı üç eksenli deneyler. Örnekler 9 MPa basınçta ve  $100^\circ\text{C}$  sıcaklıkta konsolide edilmiştir. Sonuçlar, yüksek sıcaklıklarda spesifik hacmin sistematik olarak daha düşük değerlerde sıkışma doğrusuna paralel olduğunu göstermiştir. Kesmede, artan sıcaklık maksimum deviator gerilme değerinde düşmeye ve boşluk suyu basıncında artışa sebep olmuştur. Sıkışabilirlik, sertlik, gerilme ve boşluksuyu basıncı değerlerinin hepsinin etkilendiği ancak bunlardaki değişimin büyük ölçüde olmadığı ifade edilmiştir.

Alawaji (1999), doymun kum-bentonit karışımlarının şişme ve sıkışabilirlik karakteristiklerini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmada, şişme ve sıkışabilirlik karakteristikleri üzerinde kimyasal akışkanın rolü araştırılmıştır. İki tip bentonit saf silika

kumuyla karıştırılmıştır. %20 bentonit karışımı  $18 \text{ kN/m}^{-3}$  kuru yoğunlukta ve %8 su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Şişme ve sıkışabilirlik,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ve  $\text{NaNO}_3$ 'ün farklı konsantrasyonları (0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 4.0 M) kullanılarak ödometre deneyiyle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, iki tip karışım için kimyasal konsantrasyonun artışıyla, şişme potansiyelinin, şişme süresinin, şişme basıncının ve hacimsel sıkışabilirliğin azaldığı gösterilmiştir. Bu yüzden, uygulama kapsamındaki yüksek kalite bentonitin (HQB) verimliliğinde düşüşün olduğu düşünülmüştür. (0.5-1 M) konsantrasyonlu  $\text{NaNO}_3$  ve  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ile hazırlanmış harçların temel ve yol mühendisliğinde şişmeyi kontrol etmek için alternatif bir uygulama olabileceği ifade edilmiştir.

Allen ve Wood (1988), Kolombia nehrindeki bazaltlarda yüksek seviyede nükleer atık deposunun güvenliği ve uygunluğunu araştırmışlardır. Ezilmiş bazalt ve sodyum bentonit karışımının atık depolama alanlarında geçirimsizlik malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmak için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneylerde,  $2.1 \text{ g/cm}^3$  yoğunluklu 75:25 bazalt/bentonit karışımı kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu bazalt/bentonit karışımının geçirimsizliği  $90^\circ\text{C}$ 'de yaklaşık olarak  $1 \times 10^{-10} - 4 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$  arasında değişirken, sıkıştırılmış bentonitin geçirimsizliği  $4 \times 10^{-13}$  ile  $7 \times 10^{-13} \text{ cm/s}$  arasında değişmiştir. Depo şartları altındaki kaplama malzemesinin şişme basıncının  $2.5 \text{ MPa}$ 'dan daha az olacağı umulmuştur. Bentonitin ısı iletkenliği  $0.3-1.6 \text{ W/mK}$  arasındadır. Hemen hemen bir yıl boyunca ısıtıcıyla kurumaya maruz bırakılan bentonit,  $370^\circ\text{C}$  sıcaklıkta sadece tersinir bir kuruma göstermiştir. Hidrotermal şartlar altında bentonitteki montmorillonit  $200^\circ\text{C}$ 'de düşük iyon değişim kapasitesi göstermiş fakat  $300^\circ\text{C}$ 'de önemli derecede erime ve çökme göstermiştir.

Kraus vd. (1997) tarafından kum-bentonit karışımlarının ve geosentetik kil tabakaların geçirimsizliklerinin donma-çözünmeden etkilenip etkilenmediklerini belirlemek için arazide ve laboratuvarında geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Laboratuvarında üç geosentetik kil tabakası örneği yirmi kez dondurulup çözdürüldü ve geçirimsizlikte artış olmadığı görülmüştür. Sıkıştırılmış kum-bentonitin de geçirimsizliğinin donma çözünmeden sonra artmadığı görülmüştür. Arazide iki tip geosentetik kil tabakası ve laboratuvarında kullanılan kum-bentonit karışımıyla aynı şekilde yapılanmış kum-bentonit deney yatağı bir veya iki kış donma-çözünme çevrimine maruz bırakılmıştır. Kum-bentonit karışımlarıyla yapılan arazi deneyleri için, geçirimsizlikteki artışın büyük olmadığı belirtilmiştir. Geosentetik kil tabakalı deney alanının sadece birinde geçirimsizlikte artış gözlemlenmiştir. Çözünmüş geosentetik kil tabakaları ve kum-bentonit karışım örnekleri incelendiğinde, sıkıştırılmış



killerin çözünmesinde genelde karşılaşılan kırılma belirtilerine rastlanmadığı ifade edilmiştir.

Komine (2004) tarafından yüksek seviyede nükleer atık imha alanları için şilte malzemesi olarak kullanılan kum-bentonit karışımlarının geçirimsizlikleri hakkında basit bir değerlendirme yapılmıştır. Kum-bentonit karışımlarının çok düşük geçirimsizlik ve yüksek şişme özelliklerinden dolayı çöp alanı kaplama malzemesi olarak büyük dikkat çektikleri ifade edilmiştir. Bu yüzden çöp alanı kaplama malzemelerinin kuru yoğunluk ve bentonit muhtevası gibi ayrıntılı bilgilerin belirlenmesi için kum-bentonit karışımlarının geçirimsizliklerinin deneysel ve nicel olarak değerlendirilerek hidrolik özelliklerinin araştırılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu amaç için farklı bentonit muhtevaları ve kuru yoğunluklar için laboratuvar geçirimsizlik deneylerinin yapılmıştır. Dolgudaki boşlukların, bentonitin şişmesi ile ilgili olarak bentonit muhtevası ve geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişki tartışılmıştır. Bir parametre kullanılarak geçirimsizlik katsayısı için basit bir değerlendirme önerilmiştir. Bu değerlendirme metodu ile değişik kuru yoğunluklardaki ve bentonit muhtevalarındaki şilte malzemelerinin geçirimsizlikleri ölçülebilmektedir. Bu yüzden bu değerlendirme metodunun çok düşük geçirimsizliklere ulaşılması amaçlandığında, kompaksiyon yoğunluğu ve bentonit muhtevasının belirlenmesi için kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Velosa ve Colmenares (2006) tarafından sıkıştırılmış kum-bentonit karışımlarının atık bölgelerinden çevreye tehlikeli maddelerin yayılımını veya göçünü kontrol etmek için geniş şekilde kullanıldığı ifade edilmiştir. Bu malzemelerle bariyer inşaatlarının, çok düşük geçirimsizlik, yüksek dayanım ve düşük sıkışabilirlik gösterdikleri belirtilmiştir. Bentonit ve yeteri kadar kum kullanılmasıyla bu karakteristiklere ulaşılacağı ifade edilmiştir. Sabit düşey basınç altında ıslanmayı takiben sıkıştırılmış kum-bentonit karışımının hacim davranışına ait deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Deneysel program farklı yoğunluklarda ve su muhtevalarında sıkıştırılmış örnekler üzerinde yapılan ödometre deneylerini içermiştir. Sonuçlar, zamanla şişme deformasyonu gelişiminin örneğin kompaksiyon şartlarına ve çevre basıncına yüksek oranda bağlı olduğunu göstermiştir.

Abeele ve Balkema (1986) tarafından Los Alamos şehrinden alınan malzemenin dokusunun yüksek hidrolik iletkenliğe sahip kumlu silt olduğu belirtilmiştir. Bu zemine bentonit eklenmesiyle geçirimsizliğin çarpıcı bir şekilde düştüğü belirtilmiştir. Bentonit-kumlu silt oranları için sıkışma indisi, şişme indisi ve geçirimsizlik değişim indislerinin bentonit oranıyla artarken, konsolidasyon katsayısının bu oranla ters orantılı olarak

düştüğü belirtilmiştir. Beklenen çökme ve oturmalar, bentonit-kumlu silt karışımının bilinen geoteknik karakteristiklerine dayanılarak hesap edilmiştir.

Holopainen (1984) tarafından ezilmiş kaya agregası, ince kaya agregası ve bentonitin, düşük ve orta seviyeli radyoaktif atık depoları için şilte malzemesi olmaya aday olan üç bileşen oldukları belirtilmiştir. %15 sodyum bentonitli karışımların geçirimsizlik katsayılarının laboratuvar deneylerine dayalı olarak yaklaşık  $5 \times 10^{-9}$  m/s olduğu belirtilmiştir. Aynı malzemenin şişme potansiyelinin yeraltı suyunun tuzluluğuna bağlı olarak 20 ve 60 kPa arasında değiştiği belirtilmiştir.

Nakashima vd. (1995) tarafından bentonit-kum karışımının, radyoaktif atık imha depoları için etkili bir bariyer bileşimi olmalarının beklendiği ifade edilmiştir. Bentonit muhtevasının arttırılmasıyla geçirimsiz bir karışımın elde edilebileceği ancak geçirimsizlik deneyinden önce kum-bentonit karışımının geçirimsizliğinin tahmin edilmesinin zor olduğu ifade edilmiştir. Bentonit-kum karışım dizaynında kullanılacak kum ve bentonit oranının ne olacağına karar vermek için farklı bentonit muhtevaları ve değişik kum çeşitleri kullanılarak çeşitli bentonit-kum karışımları hazırlanmış ve bu karışımlar üzerinde geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Geçirimsizlik deney sonuçlarının incelenmesinden sonra, kompaksiyon deneyleri ile elde edilen bentonit-kum karışımlarının etkin boşluk oranlarının geçirimsizliğini tahmin etmek için yeterli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Hepsinden sonra etkin boşluk oranı kullanılarak bentonit-kum karışımları için bir dizayn metodunun geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Esaki vd. (1997) tarafından sıcaklık kontrollü şartlar altında son zamanlarda geliştirilen çift kesme ve permeabilite deney aletleri kullanılarak bentonite-kum ve kaolin bentonit karışımları üzerinde karşılaştırma deneyleri yapılmıştır. Sabit akış pompa metoduyla aşırı düşük geçirimsizliğe sahip malzemelerinin geçirimsizliklerinin ölçülmesinde kontrollü sıcaklığın tercih edildiği belirtilmiştir. Geçirimsizliğin kaolin-kum karışımının kesme deformasyonu artışıyla arttığı, özel depolanmış kum karışımının kesme deformasyonundan etkilenmediği belirtilmiştir.

Zhang vd. (1995) tarafından uzun dönemli performansındaki uniform olmayan deformasyonlar ve/veya depremle oluşan karışımlarda meydana gelebilecek kesme deformasyonundan dolayı, düşük seviyede radyoaktif nükleer atık imha tesislerinde kullanılmaya aday malzeme olan sıkıştırılmış bentonit-kum karışımının geçirimsizlik değişimi incelenmiştir. Çalışmayı sistematik bir şekilde gerçekleştirmek için, oyuk silindirik örnek ve sabit akış pompası adapte edilmesiyle, çift kesme ve geçirimsizlik

aparaturleri geliştirilmiştir. Bu örnek üzerinde, hızlı ve başarılı bir şekilde, kesme düzlemi boyunca geçirimsizliğin ölçülmesini sağlamıştır. %15 bentonit oranlı sıkıştırılmış bentonit-kum karışımının geçirimsizliğinin kesme deformasyonu ile önemli ölçüde etkilenmediği ifade edilmiştir. Bunun farazi olarak, su hareketine eşlik eden radyoaktif atık deposu etrafında radyonükleit göçün yavaşlatılması için kullanılabilir hem yeni çift kesme ve geçirimsizlik deney aparaturlerinin hem de bentonit-kum karışımının etkisinin göstergesi olduğu belirtilmiştir.

Couture (1985) tarafından %25 bentonit ve %75 kuartz veya bazalt kumu içeren kutu blok malzemenin blok sütunlarının 260°C'yi aşan sıcaklıklarda su buharına maruz kaldıkları ifade edilmiştir. Bentonit ile hazırlanan kutu malzemenin, yüksek seviyeli nükleer atık depolarında yüksek sıcaklıkta su buharına maruz kalması durumunda performansının ciddi şekilde zayıflayacağı belirtilmiştir. Bentonit oranının artması ve malzemenin daha çok sıkıştırılması durumunda problemin daha az olacağı ifade edilmiştir.

Chauis (1990) tarafından zemin-bentonit karışımının, katı atık projelerinde su geçirmez örtü olarak sıklıkla kullanıldığı belirtilmiştir. %33'ünden çoğu bentonit olan kumlar için çok sayıda laboratuvar geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Hidratasyon periyodu, doygunluk derecesi ve düşük hücre basıncı altında şişme gibi özel parametrelerin kontrol edilmesinin kolay olmadığı, farklı deney metotları kullanıldığı için bu sonuçların analizini yapmanın zor görüldüğü ifade edilmiştir. Bununla birlikte geçirimsizliğin, bentonit muhtevasını, poroziteyi ve sadece kumun doygunluk derecesini hesaba katan ampirik denklemler kullanılarak elde edilebileceği ifade edilmiştir. Bu ön değerlendirmenin seçilecek zeminin belirlenmesine yardımcı olacağı belirtilmiştir. Daha sonra laboratuvar deney sonuçlarının, doğal kum ve bentonit muhtevısından sonra arazi geçirimsizlik performansını tahmin etmek için de kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Wang ve Huang (1984) tarafından zeminin sınıflandırma özelliklerinden olan geçirimsizlik, maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası ile ilişkili korelasyon denklemleri sunulmuştur. Bu korelasyon denklemleri sınıflandırma, kompaksiyon ve geçirimsizlik sonuçları ile istatistiksel analiz sonuçlarından geliştirilmiştir. Deney zeminleri, bentonit, kireç taşı tozu, kum ve çakıl olmak üzere dört bileşenden hazırlanmıştır. Maksimum kuru yoğunluk, optimum su muhtevası ve geçirimsizliğin her biri için üç grup korelasyon denklemi geliştirilmiştir. Her denklem grubunun iki farklı tahmin modeli içerdiği belirtilmiştir. Deney verileriyle karşılaştırma sonucunda, tahminler geliştirilen modellerden %95 güven aralığında elde edilebileceği gösterilmiştir.

Abichou vd. (2002), tarafından yeşil kum dökümüyle inşa edilen bariyer tabakaların laboratuarda normal olarak sıkıştırılan örnekler üzerinde ölçülen geçirimsizlik değerlerinin arazi geçirimsizlik değerleriyle uyuşup uyuşmadığını belirlemek için arazi deneyleri yapılmıştır. Yeşil kum dökümüyle üç deney yatağı inşa edilmiş ve bu tabakaların arazi geçirimsizlik değerleri ölçülmüştür. Bu tabakaların donma çözünme çevrimine sebep olan kış şartlarına ve kurumaya sebep olan yaz şartlarına maruz bırakıldıktan sonraki arazi geçirimsizlik değerleri de ölçülmüştür. Arazi geçirimsizlik değerlerinin laboratuarda gözlemlenen likit limit ve bentonit muhtevasıyla aynı eğimi takip ettiğinin gözlemlendiği belirtilmiştir. Bentonit muhtevasının %6'dan, plastisite indisinin 3'den ve likit limitin 20'den daha büyük olduğu durumda  $1 \times 10^{-7}$  cm/s'den daha düşük geçirimsizlik gözlenmiştir. Deney yataklarının kışa maruz kalmalarından sonra yapılan deneyler, bu tabakaların altı donma-çözünme çevrimine maruz kaldıklarında bile arazi geçirimsizliğinin kış soğuşundan etkilenmediğini göstermiştir. Benzer şekilde deney yataklarının yaz havasına maruz kalmaları da geçirimsizliklerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Arazi çalışmasının döküm kumunun hidrolik tampon malzemesi olarak kullanılabilen faydalı bir endüstriyel yan ürün olduğunu tasdik ettiği belirtilmiştir.

Gleason vd. (1997) tarafından kalsiyum ve sodyum bentonitin geçirimsizliği araştırılmıştır. Çalışmada, kum-bentonit ve kum-çimento karışımları kullanılmıştır. Deney sıvısı olarak, musluk suyu ve damıtık su içeren 0.25 M kalsiyum klorit kullanılmıştır. Kum-kil veya geosentetik kil tabaka uygulamalarında genel olarak kalsiyum bentonitin hidrolik performansının, sodyum bentonitin performansından daha iyi olmadığı ve bentonit-çimento karışımlarında ise sodyum bentonitin performansından çok daha kötü olduğu belirtilmiştir.

Hoeks vd. (1987) tarafından bentonitin atık imha bölgelerinin izolasyonunda şilte malzemesi olarak kullanılabilirliği arazide ve laboratuarda araştırılmıştır. Kum-bentonit karışımlarının geçirimsizliklerinin bentonitin tipine, karışımdaki bentonit muhtevasına ve kuru birim hacim ağırlıklarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Düşük geçirimsizliğe sebep olan bentonitin şişmesinin zamandan bağımsız bir işlem olduğu ifade edilmiştir. Geçirimsizliğin zamanla azaldığı ve iki ay sonra bile geçirimsizliğin sabit değere ulaşmamış olduğu belirtilmiştir. %5 bentonitle karıştırılmış kum-bentonit karışımlarında, nihai doygun geçirimsizlik değerinin katı atık depolama alanlarında şilte malzemesi olarak kullanılmasına yetecek kadar düşük olan  $1 \times 10^{-10}$  m/s değerinin altına düştüğü belirtilmiştir. Kum-bentonit karışımlarının, çöp alanlarındaki sızıntılar için, temiz su için olduğundan 10-100 kat daha

geçirimli oldukları ifade edilmiştir. Bu yüzden, taban şiltesinin, taban zeminindeki sızıntı sularının sızmasını engellemek için daha yüksek oranda bentonit gerektirdiği ifade edilmiştir. Deney bölgesindeki su dengesi çalışmalarının, iki yılın üzerinde bir süreçte katı atık depolama alanı için kullanılan kum-bentonit şiltesi boyunca sızıntı meydana gelmediği ifade edilmiştir.

### **1.3.2. Kireç Katkısının Zeminin Şişme Davranışına Etkileri ile İlgili Çalışmalar**

Rao ve Thyagaraj (2003) tarafından kireç çamuru ve kireç kolonu tekniklerinin şişen zemin depolarının arazi stabilizasyonu için uygun bir seçim olduğu ifade edilmiştir. Şişen zemin örneklerinin yapay olarak topaklaşması süresince kireç çamurunun nüfuz ettiği şişen zeminin arazideki kimyasal stabilizasyonu ile ilgili laboratuvar sonuçları sunulmuştur. Sıkıştırılmış şişen zemindeki büzülme çatlaklarını oluşturmak için zemin laboratuvarında topaklaştırılmıştır. Büzülme çatlakları, şişen zemin kütledeki kireç çamurunun hareketine büyük ölçüde yardımcı olmuştur. Topaklanmış şişen zeminin kimyasal stabilizasyonunda kireç çamurunun yeterliliği, fiziko-kimyasal özelliklerle ve bunlarla iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri ile karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Deney sonuçları, topaklanmış zemin boyunca kireç çamurunun hareketinin, zemin kütledeki güçlü kireç modifikasyonlarını ve puzolanik reaksiyonları ilerlettiğini göstermiştir. Güçlü zemin-kireç reaksiyonlarının zemini daha az plastik yaptığı, şişme büyüklüğünü azalttığı ve kireç çamuruyla iyileştirilmiş örneklerin sınırlanmamış sıkışma dayanımını arttırdığı ifade edilmiştir. Laboratuvar sonuçlarının, büzülme zemin depolarına çamur uygulanmasının etkili olduğu ve bu yüzden kuru sezon boyunca zemin depolarının kimyasal stabilizasyonu için tercih edilebileceği belirtilmiştir.

Türköz (2006) tarafından temel zemininin diğer bazı özelliklerinin iyileştirilmesinde olduğu gibi şişme potansiyeline sahip temel zemininin stabilizasyonunda da kireç, çimento, uçucu kül ve bazı organik bileşikler gibi katkı maddelerinin kullanılmakta olduğu ifade edilmiştir. Bunlar arasında sönmüş veya sönmemiş halde bulunan kireç katkısının etkili kullanımı nedeniyle yaygın uygulama alanı bulunduğu belirtilmiştir. Çalışmada, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi yerleşke alanında yer alan yüksek şişme potansiyeline sahip Meşelik killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu araştırılmıştır. Araştırmada sönmüş kireç katkısı-şişme yüzdesi ilişkisi, şişme yüzdesinin zamanla değişimi ve şişme yüzdesi-nihai su muhtevası değişimi incelenmiştir. Bu amaçla üç ayrı lokasyondan alınan, standart ve

modifiye enerji seviyelerinde ve farklı sönmüş kireç katkısı yüzdelerinde (%0, 1, 3 ve 5) hazırlanmış 88 ayrı numune üzerinde klasik odömetre cihazı ile serbest şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonunda, sönmüş kireç katkısının killerin şişme potansiyelinin kontrolünde başarıyla kullanılabileceği, bu katkının %3 seviyesinden sonra etkili olduğu ve etkinin yüksek enerji seviyesinde nispi olarak daha yüksek görüldüğü belirlenmiştir.

Kumar vd. (2007) tarafından uçucu kül zemin karışımlarının geoteknik karakteristikleri üzerinde kireç stabilizasyonun ve polyester fiber katılmasının etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneylerde Hindistan uçucu külünün farklı oranlarda şişen zeminlerle karıştırılmasıyla hazırlanan örnekler kullanılmıştır. Rastgele yönlenmiş fiberlerin farklı oranlarıyla karıştırılan uçucu kül-zemin, kireç-zemin ve kireç-zemin-uçucu kül örneklerinin geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Şişen zemine sırasıyla %1-10 ve %1-20 oranlarında kireç ve uçucu kül eklenmiştir. Deney örnekleri üzerinde kompaksiyon, serbest basınç ve kesme gerilmesi deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç ve kesme gerilmesi deneylerinin ardından örnekler üzerinde 7, 14 ve 28 gün kür uygulanmıştır. Kireç ve uçucu kül için elde edilen optimum değerlere binaen, 28 günlük kürden sonra uçucu kül-şişen zemin-kireç-fiber karışımından hazırlanan deney örnekleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Örnekler, kuru ağırlığın %0, 0.5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında kıvrımlı polyester fiberli karışımlarla deneye tabi tutulmuştur. Sonuçlar fiber, kireç ve uçucu kül eklenmesiyle şişen zeminlerin başarılı birer şekilde stabilize edilebileceğini göstermiştir.

### **1.3.3. Kireç Katkısının Zeminin Geçirimsizliğine Etkileri ile İlgili Çalışmalar**

Güler ve Bozbey (2002) tarafından kireç ilavesinin geçirimsizliğe etkilerini bulabilmek için, laboratuvar ve arazi şartlarında yapılan geçirimsizlik deneylerini kapsayan bir araştırma yapılmıştır. Geçirimsizliği düşük ama işlenilebilirliği az olan yüksek plastisiteli killerin kireç ile stabilize edilerek, işlenilebilirliğinin arttığı ancak kirecin flokülasyona neden olan boşlukları da arttıracığı belirtilmiştir. Bu olumsuz etkinin yüksek sıkıştırma enerjisi kullanılarak bertaraf edilebileceği belirtilmiştir. Bu amaçla, laboratuvarlarda, farklı kireç ilavesi ve sıkıştırma enerjileri ile hazırlanmış numuneler üzerinde, üç eksenli ve rijit duvarlı geçirimsizlik aletlerinde geçirimsizliğin ölçüldüğü ve kireç ilavesi ile geçirimsizlikte artış meydana geldiği ifade edilmiştir. Kullanılan kilde sıkıştırma enerjisinin etkisinin

görülmüdüğü belirtilmiştir. İkinci aşamada, arazide saf ve kireç ilave edilmiş kille farklı sıkıştırma enerjilerinde sıkıştırılmış bölümlerden oluşan bir kil kaplama imal edilmiş ve Türkiye'de ilk kez uygulanan ABD'de ise çok yaygın olarak kullanılan kapalı çift halkalı infiltrometre aletleri kullanılarak, infiltrasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından arazi şartlarında, geçirimsizlik artış göstermiştir. Arazide elde edilen değerler, laboratuarda bulunan değerlerin üzerinde olmuştur. Kireç ile stabilize edilen killerde, çöp sızıntı suyunun etkisi araştırılmış ve deneyler yapılmıştır. Kullanılan kilde, çöp suyunun deney yapılan süre içerisinde, geçirimsizliği etkilemediği belirtilmiştir.

Fleming ve Inyang (1995) tarafından termal eğim altında uçucu kütle modifiye edilmiş kilin geçirimsizliği incelenmiştir. Çalışmada hem C sınıfı hem de F sınıfı uçucu kül incelenmiştir. Uçucu külün geçirimsizliğinin saf bentonit eklenmesiyle azaldığı bulunmuştur. Geçirimsizlikte gözlemlenen azalmanın, uçucu kül taneleri arasında bulunan toplanmış kil minerallerinin dağılmasından kaynaklandığı varsayılmıştır.

Bozbey (2004) tarafından kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin deponi sahaları için kaplama imalatında kullanılabilirliğini incelemek üzere, laboratuarda ve arazide geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Arazide, saf ve kireç ilave edilmiş zemin kullanılarak özel bir kaplama imal edilmiştir. Kireç ilavesi ile artan boşluk oranının azaltılması amacıyla kaplamanın imalatında iki farklı sıkıştırma enerjisi kullanılmıştır. Arazi infiltrasyon deneyleri kapalı çift halkalı infiltrometre aletleri ile yapılmıştır. Deney sonuçları, kireç ilavesinin arazi geçirimsizlik değerlerini artırdığını ve sıkıştırma enerjisinin geçirimsizlik değerini etkileyen tek parametre olmadığını göstermiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler hidrolik geçirimsizliğin belirlenmesinde numune boyutunun önemini ortaya koymuştur.

El-Rawi ve Awad (1981) tarafından değişik su muhtevalarında sıkıştırılan kireçle stabilize edilmiş iki zeminin geçirimsizlik değerleri laboratuarda araştırılmıştır. Çalışmada kötü derecelenmiş dere kumu ve kumlu siltli kil kullanılmıştır. Kireç muhtevasının kür süresinin, kuru yoğunluğun ve zemin tipinin geçirimsizliğe etkisi araştırılmıştır. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan kilin geçirimsizliği artarken farklı su muhtevalarında incelenen kumun geçirimsizliği kireç eklenmesiyle düşmüştür. Bütün karışımların geçirimsizliği kür süresiyle düşmüştür. Geçirimsizliği minimuma ulaştıran kum-kireç karışımı için sabit bir su muhtevası mevcut olduğu ifade edilmiştir. Aynı kuru yoğunlukta, incelenen kumlu siltli kilin geçirimsizliği kireç muhtevasının artmasıyla artmıştır.

Selvam ve Barkdoll (2005) tarafından killer ve bileşenlerinin, yeraltı depolama tankları ve katı atık deponi sahalarında geniş şekilde kullanıldıkları belirtilmiştir. Şilte olarak adlandırılan bu malzemelerin katı atık deponi sahalarından ve yeraltı depolama tanklarından kimyasalların sızmasını engellemek için ucuz bir kullanıma sahip oldukları ifade edilmiştir. Çalışmada kil şiltelerin davranışları mikroskobik boyutlarda incelenmiştir. Çevresel tarama elektron mikroskobundan (ESEM) elde edilen görüntülerden gözlemlenen kilin dokusundaki değişimler, benzer şartlar altındaki killerin geçirimsizliklerindeki değişimlerle karşılaştırılmıştır. Geçirimsizlik değişimleri esnek duvarlı permeametre kullanılarak kaydedilmiştir. Kil şilteler boyunca kimyasalların sızmasını azaltmak için modifiye edilen kil içerisinde önemli dallanmalar olduğu görülmüştür.

Galvão vd., (2004) tarafından yapılan çalışmada, iki farklı zeminden birincisine %2 oranında kireç ilave edildiğinde geçirimsizlik değerinin beş kat artmış olduğu, daha fazla kireç ilave edilmesi durumunda ise geçirimsizlik değerinin düştüğü belirtilmiştir. Bu durum zemin içerisinde oluşan kimyasal bağlar ve flokülasyon sebebine dayandırılmıştır. Diğer zeminde ise kireç katkısıyla geçirimsizlik değerinin düştüğü belirtilmiştir. Bu durum da aynı mekanizmayla açıklanmıştır, ancak ikinci zeminde oluşan bağların birinci zeminde oluşan bağlardan daha zayıf olduğu ifade edilmiştir.

Lakshmi kantha ve Sivapullaiah, (2006) tarafından yapılan çalışmada, şilte malzemesi teşkili için bölgede mevcut üç farklı zemine (kaolinitik kırmızı zemin, illit ve uçucu kül) %20 oranında bentonit ilave edilmiştir. Seçilen şilte malzemesine bentonit ilavesinin geçirimsizlik değerini iyileştirmiş olduğu ancak hacim stabilitesini azalttığı belirtilmiştir. Karışımların her birine %1 oranında kireç ilave edilmesiyle, hacim stabilitesinin iyileştirilebileceği ve kimyasal etkilere karşı dayanımlarının artırılmasının mümkün olabileceği ifade edilmiştir.

Nhan vd. (1996) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül, kireç tozu ve bentonit karışımlarının katı atık deponi sahaları için potansiyel şilte malzemesi olarak kimyasal bariyer olma özellikleri araştırılmıştır. Hem su hem de çöp sızıntı suyu kullanılarak malzemenin kimyasal bariyer özelliklerini ve geçirimsizliğini ölçmek için bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Karışım malzemesinin geçirimsizliğinin suyla  $4.3 \pm 1.6 \times 10^{-8}$  m/s olduğu bulunmuştur. Sızıntı suyundaki metal iyonlar için, kimyasal bariyer özelliğine de sahip olduğu ifade edilmiştir.



### 1.3.4. İslanma-Kuruma Çevrimlerinin Geçirimsizlik ve Şişme Davranışlarına Etkileri ile İlgili Çalışmalar

Parashar ve Wong (1994) tarafından sıkıştırılmış killerin şişme ve rötre davranışlarını incelemek için bir seri deney yapılmıştır. İslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutulan killerin son boşluk oranlarının başlangıçtaki kompaksiyon koşullarından bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir.

Day (1994) tarafından ıslanma-kuruma çevrimlerinin zeminin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Mukavemetteki bu artışın ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda efektif kohezyonda ( $c'$ ) meydana gelen artıştan kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Proktor kalıbında optimum su muhtevsından %6 daha fazla su muhtevsında hazırlanan numuneler ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. İslanma-kuruma çevrimleri sonucunda zemin numunelerinin şişme potansiyelleri artmış, maksimum artış birinci çevrim sonunda meydana gelmiştir. Şişme potansiyelinde meydana gelen bu artışın, optimum su muhtevsında sıkıştırılan numunelerin ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra numunelerin optimum su muhtevalarının değişmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Al-Homoud ve Basma (1995), ıslanma-kuruma çevrimlerinin zemin numunelerinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda şişme potansiyelinin azaldığını gözlemlemişler ve şişme potansiyelinde meydana gelen maksimum azalmanın ilk çevrim sonunda meydana geldiği belirtilmiştir.

Rao vd. (2001), stabilize edilmiş şişen zeminlerin üzerine ıslanma-kuruma çevrimlerinin etkisini incelemişlerdir. Kuzey Kantaka'dan alınan atık malzeme, odun, kül ve organik malzeme içeren zemin alınmış ve uçucu külle stabilize edilmiştir. Böyle bir çalışmanın geoteknik uygulamalarda kimyasal şekilde stabilize edilen zeminlerin uzun süreli davranışlarını değerlendirmek için gerekli olduğu belirtilmiştir. İslanma-kuruma çevrimleri, örneklerin daha gözenekli ve daha az doygun olmasına yol açmıştır. Uçucu külle modifiye edilmiş organik zemin örnekleri ıslanma-kuruma çevrimleriyle, kireçle stabilizasyonun yararlı etkilerini kısmen kaybetmişlerdir.

Güney vd. (2007), kireçle stabilize edilen zeminin şişme davranışına ıslanma-kuruma çevrimlerinin etkilerini incelemişlerdir. Kaolinit ve bentonit killerinin değişik oranlarıyla hazırlanan zemin karışımlarının ve yüksek plastisiteli killi zemin örneklerinin üzerinde

şişme potansiyeli ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deneyler farklı karışım oranlarıyla hazırlanan örnekler kireç ilave edildikten sonra tekrarlanmıştır. Her çevrimde, deneye tabi tutulan örneklerin ilk su muhtevalarına kadar kurutulmaları sağlanmıştır. Böylece örneklerin ilk yüksekliklerinde kısmi büzülme olarak adlandırılan büzülme meydana gelmiştir. Kireç stabilizasyonunun ilk etkisinin ilk çevrimden sonra kaybedildiği ve ardından gelen çevrimlerle şişme potansiyelinin arttığı ifade edilmiştir. Şişme potansiyelinin maksimum azalmasının ilk çevrimde gözlemlendiği, takip eden çevrimlerle dereceli olarak azaldığı ve 4-6 çevrimden sonra dengeye ulaştığı belirtilmiştir. Kireçle stabilize edilen zeminler ıslanma-kuruma çevrimlerinden negatif olarak etkilenmişlerdir. Yani kireçle iyileştirilmiş örneklerin şişme potansiyelini kontrol etmede, kireç stabilizasyonunun yararlı etkisi örneklerin ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalmalarından sonra kısmen kaybolmuştur. Çevrime tabi tutulan örneklerin kil muhtevalarının, kireçle iyileştirilmiş şişen zeminin likit limitine, plastik limitine, çekme limitine ve şişme potansiyeline etkisini arttırdığı belirtilmiştir. Bu sonuçlara göre, kireçle stabilize edilmiş şişen killi zeminlerin önemli ölçüde ıslanma-kuruma çevrimlerinden etkilenen alanlarda kullanılmaması gerektiği ifade edilmiştir.

Montes-H vd. (2003), MX80 bentonitinin şişme-çekme kinetiklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, endüstriyel bentonitin (MX80) şişme-çekme kinetikleri, çevresel tarama elektron mikroskobu (ESEM)'un yeni bir tekniği ve dijital görüntü analiz programları kullanılarak araştırılmıştır. Bu şişen kil, yeni ESEM tekniği uygulanmadan önce, bir kaç analitik araçla (ICP-AES, SEM, STEM, XRD, vb.) karakterize edilmiştir. Şişme-çekme, farklı rölatif nem durumlarında ESEM'de büyütülerek direk olarak gözlemlenmiştir. Örnekler üzerinde dokuz ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır. Her çevrim farklı rölatif nemde (%55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 ve 95) uygulanmıştır. Şişme ve çekmeyi tayin etmek için dijital görüntü analiz programı kullanılmıştır. Bu yöntem, zamanın fonksiyonu olarak yüzey artış oranının tahmin edilmesini kapsamıştır. Sonuç olarak, şişme-çekme kinetik modeli, lineer kinetik denkleminde dayandırılarak test edilmiştir. Sonuçların, ESEM ve DIE'nin şişen killerin şişme-çekme potansiyellerini tahmin etmek için güçlü bir yöntem olabileceğini gösterdiği ve bunlardan elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Lin ve Benson (2000), ıslanma-kuruma çevrimlerinin geosentetik kil tabakalarının şişme ve geçirimsizliklerine etkisini incelemişlerdir. ıslanma-kuruma çevrimlerinin bentonitin plastisitesine, şişmesine ve geosentetik kil tabakasının geçirimsizliğine nasıl

etkileyeceğini belirlemek için deiyonize edilmiş su, musluk suyu ve 0.0125 M  $\text{CaCl}_2$  çözeltileriyle; Attarberg limitleri, serbest şişme ve geçirimlik deneyleri yapılmıştır. Her ıslanma-kuruma çevrimi süresince musluk suyuyla ve  $\text{CaCl}_2$  ile hidrate edilen bentonitin plastisitesi azalırken deiyonize edilmiş suyla hidrate edilmiş bentonitin plastisitesi artmıştır. Deiyonize edilmiş suyla ve musluk suyuyla yapılan ıslanma-kuruma çevrimi deneylerinin yedi ıslanma-kuruma çevriminden sonra bentonitin şişmesi üzerinde çok az etkiye sahip olmuştur. Bununla birlikte,  $\text{CaCl}_2$  çözeltisiyle yapılan iki ıslanma-kuruma çevriminden sonra şişme çarpıcı bir şekilde azalmıştır. Geosentetik kil şiltelerin geçirimliliklerinin ilk dört çevrim boyunca düşük ( $1 \times 10^{-9}$  cm/s) kaldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte 5-6 çevrim arasında  $\text{CaCl}_2$  çözeltisi içine işlemiş bütün örneklerin geçirimliliklerinde  $7.6 \times 10^{-6}$  cm/s'ye kadar çarpıcı bir düşüş gözlenmiştir.

Alonso vd. (2005), emme kontrollü ıslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutulan kumbentonit karışımlarının şişmesini incelemişlerdir. Deneyler, yapay olarak hazırlanan kumbentonit karışımları (kuru ağırlığın %80'i kadar bentonit) üzerinde odömetre deneyleri kullanılarak yapılmıştır. Zemin davranışını kontrol eden en önemli özellikleri belirlemek için 130 ve 4 MPa arasında birkaç emme kontrollü ıslanma-kuruma çevrimi deneyi yapılmıştır. Test edilen örneklerin düşey net gerilme artışında, yığılımlı çekme deformasyonları gösterdikleri belirtilmiştir.

Lichner vd. (2005), ıslanma-kuruma çevrimlerinden önce ve sonra bileşenleri bilinen basit modellenmiş bir zemin karışımı için suyun uzaklaşmasının azaltılmasında kaolinit, illit,  $\text{Na}$  ve  $\text{Ca}$  montmorillonitinin etkisini değerlendirmişlerdir. Kilin kendi ağırlığının %1, 2 ve 3 oranlarında kil eklenmesine müteakip 10 ve 30  $\text{gkg}^{-1}$  stearik asit eklenerek kumdan su uzaklaştırılmıştır. İyileştirilen ve iyileştirilmeyen kontrol kumu ıslatılmıştır ve ıslanmanın etkilerini simule etmek için  $50^\circ\text{C}$ 'de kurumaya bırakılmıştır. Suyun uzaklaştırılma süresi su damlası sızma deneyiyle (WDPT) ölçülmüştür. Islanma-kuruma çevrimleri süresince kontrol örneklerinin (stearik asitle iyileştirilen kum) ve kille iyileştirilen kumların, zeminden suyun uzaklaştırılmasında gözlenen tipik davranışı göstermedikleri belirtilmiştir. Su muhtevastaki artma ile uzaklaştırma süresinin arttığı ifade edilmiştir. Kaolinit ve sodyum monmorillonit katkılarının stearik asit ile iyileştirilen kumdan suyun uzaklaştırılma süresinin azalmasına yol açmasına rağmen  $\text{Ca}$  monmorillonit ve illit katkılarının bu süreyi arttırdığı belirtilmiştir.

Alonso vd. (1999), şişen killerin mekanik davranışlarının modellenmesi üzerinde çalışmışlardır. Dane yapısının iki düzeyi düşünülmüştür. Her iki yapı düzeyi arasındaki

mekanik bağlantı, biri ıslanma biri de kuruma için olmak üzere iki fonksiyonla tanımlanmıştır. Dane yapılarındaki boşluk oranı değişimi ve değerlerinin dane yapısının sıkışma durumuna bağlı olmasından dolayı bu fonksiyonların dane yapılarındaki boşluk oranını ifade ettikleri belirtilmiştir. Deformasyonun gerilme-emme izine bağımlı olduğu, düşük hücre basınçlarında emme çevrimleri süresince genişleme deformasyonlarının toplandığı, yüksek hücre basınçlarında emme çevrimleri boyunca sıkışma deformasyonlarının toplandığı, ıslanma-kuruma çevrimleri boyunca ise yorulma deformasyonlarının olduğu belirtilmiştir. Dane yapısının genişlemesiyle büyük gözeneklerin olduğu ve ıslanma süresince bu gözeneklerin daha da büyüdüğü gibi bir olgu tasvir edilmiştir.

Albrecht ve Benson (2001) tarafından sıkıştırılmış doğal killer üzerine kurumanın etkileri incelenmiştir. Bu amaç için, kil tabakalarda ve kaplamalarda kullanılan sekiz doğal killi zeminden hazırlanan örnekler ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Islanma boyunca hacimsel çekme deformasyonu oluşmuştur. Kuruma süresince çatlağın olduğu örnekler, yeniden ıslanmayla geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları; hacimsel çekme deformasyonlarının, zemin özellikleri ve kompaksiyon şartlarından etkilendiğini göstermiştir. Kil muhtevası ve plastisite indeksinin artışı ve optimum su muhtevasıyla ilişkili olarak kompaksiyon su muhtevası artken veya azalırken hacimsel çekme deformasyonu artmıştır. Hacimsel çekme deformasyonu sıkıştırma etkilerinin artışıyla azalmıştır. En büyük hacimsel çekme deformasyonlarının görüldüğü örnekler, genellikle en çok çatlak sayısını içermişlerdir. Geçirimsizlik deneyleri, örneklerdeki çatlamların geçirimsizliği arttırdığını göstermiştir.

Al-Chaar (1997) tarafından ılımlı yağmur periyoduna müteakip kurak periyot incelendiğinde, pek çok yapının aşırı yer deformasyonlarından dolayı zarar gördüğü belirtilmiştir. Bu kuruma-ıslanma çevrimlerinin, şişen zemin tabakalarının üstündeki yapılar üzerinde ciddi etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Serbest suyun, monmorillonitli kil partikülleri tarafından adsorbe edildiği ve daha sonra kurumayla ortadan kalktığı termodinamik-kimyasal işlemin zemindeki genişleme ve büzülmenin sebebi olduğu belirtilmiştir. Bu işlemin yapıları tehlikeye düşüren zemin deformasyonlarıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu kuruma ıslanma çevriminin peyzaj ve mimarideki çok sayıda eksikliğin belirlenmesine sebep olduğu belirtilmiştir. Zarar gören yapıların tamir edilmesi ve eski zeminin iyileştirilmesi için teşhis ve tedavi edici teknikler sunulmuştur.

Lu vd. (2002) tarafından ıslanma-kuruma çevrimi boyunca kalıplanmış şişen zeminin çatlak gelişimi bilgisayarlı tomografiyle (CT) araştırılmıştır. CT görüntülerine göre, yeni çatlakların yavaş yavaş oluşmasına ve bir çatlak ağı oluşmamasına rağmen zeminde orijinal çatlakların geliştiği görülmüştür. CT tabanında değişik çatlak hasarları belirlenmiş ve zeminin toplam kuru hacim değişimiyle ilişkileri analiz edilmiştir.

Dif ve Bluemel (1991) tarafından zeminin arazide maruz kalacağı gerçek yük hareketi altında laboratuarda şişen zemin örneklerinin şişme büzülme davranışını incelemek için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Islanma-kuruma çevriminden dolayı yorulma olgusu araştırılmıştır ve bu çalışmada kullanılacak modifiye edilmiş odometre aletinin detayları tanımlanmıştır. Bazı tipik deney sonuçları, ıslanma-kuruma çevrimi boyunca örselenmemiş şişen zemin örneklerinin yorulma davranışını temsil etmek için kullanılmıştır.

Zhang vd. (2006) tarafından ıslanma-kuruma çevrimi boyunca, örselenmemiş şişen zeminin deformasyon ve gerilme karakteristikleri üzerinde düşey basıncın etkisi ile ilgili bir dizi deney yapılmıştır. Ek olarak, genişleme ve büzülme de ölçülmüştür. Deney verilerinin, şişen zeminin şişme ve büzülmesinin tamamıyla geriye dönebilir olmadığını ve ıslanma-kuruma çevrimleri tekrarlandığında şişme yeteneğinin düşmesi sonucu her çevrimden sonra zeminin yorulma sinyalleri gösterdiği belirtilmiştir. Buna ek olarak, ilk çevrimin şişme-büzülme potansiyelinde en çok azalmaya sebep olduğu vurgulanmıştır. Çevrim sayısı artarken, ek azalma denge durumuna ulaşmaya kadar gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan şişen zemin için denge çevrim sayısının 3 ve 4 arasında sıralandığı belirtilmiştir. Bunlara ilaveten belirli bir alandaki düşey basıncın, şişme-büzülme deformasyonunu sınırlamak ve kesme direncini hafifletmek için etkin olduğu belirtilmiştir. Düşey basınç ne kadar artarsa, etkinin de o kadar artacağı ifade edilmiştir. Bu yüzden, uygulama mühendisliğine göre parametreler elde etmek için, şişen zeminlerin ıslanma-kuruma deneylerinde düşey basıncın hesaba katılmasının zorunlu olduğu ifade edilmiştir.

Pusch ve Alstermark (1984) tarafından atık kazıklarında yüzey suyunun infiltrasyonunu minimize etmeye yarayan kil tabanlı şiltelerin, İsviçre'deki ıslanma-kuruma çevrimlerinin yararlı bir sonucu olarak hiç su geçirmeyecek kadar düşük geçirimsizlikler sağlayabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte problemlerin şişmenin yanı sıra fiziko-kimyasal işlemlerden dolayı artabileceği ifade edilmiştir. Üst tabaka dizayn kriterleri, kil şilte bileşim prensipleri ve uygulama problemleri üzerinde çalışılmıştır.

Allen ve Gilbert (2006) tarafından şişen zeminlerin su muhtevası ve düşey hareketi arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir laboratuvar metodu geliştirilmiştir. Deney metodu, düşey hareket ve su muhtevası arasındaki ilişkiyi geliştirecek normal sıkıştırma yükü altındaki ıslanma-kuruma çevrimlerini kapsamıştır. Deneyler, çekme safhasının hızlanması için hava sirkülasyon kuvvetini hesaba katan modifiye edilmiş yük başlıklı geleneksel odometre kullanılarak tamamlanmıştır. Çekmenin hızlanmasının hem deney süresini bir haftadan daha az zamana düşürdüğü hem de kil örneğin yüzeyinde, arazide gözlemlenenlere benzer çatlak şekillerinin oluşmasına yol açtığı ifade edilmiştir. Verilen değişik su muhtevaları için ölçülen düşey hareket, genellikle pratikte kullanılan deneysel potansiyel düşey yükselme (PVR) metoduyla tahmin edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. PVR metodunun 25-50 mm'den daha küçük hareketleri tahmin ettiği örnekler için, ölçülen hareketin daha büyük oluşu ifade edilmiştir. PVR metodunun 25-50 mm'den daha büyük hareketleri tahmin ettiği örnekler için, ölçülen hareketin daha küçük olduğu ifade edilmiştir. Bu sonuç, PVR tahminleriyle arazi ölçümlerinin karşılaştırılmasının tutarlı olduğunu göstermiştir. Bu yüzden bu deney yöntemi, şişen zeminlerde düşey hareketi doğru şekilde tahmin etmek için hem pratik hem de potansiyel olarak etkili olacağı garantisini vermiştir.

Villar (1999), tarafından yüksek seviyedeki radyoaktif atıkların depolanabileceği uygun arazinin araştırılması hususunda Febex projesi kapsamında bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Sıkıştırılmış yüksek oranda şişme gösteren killer üzerinde emme kontrollü odometre, yükleme ve ıslanma-kuruma çevrimi deneyleri yapılmıştır. Çalışılan emme değerleri 0 ile 500 MPa arasında, düşey yükler ise 0.1 ile 9 MPa arasında değişmektedir. Hava girişi olması durumunda emme değerlerinin 120 MPa olduğu belirtilmiştir. Şiddetli kuruma işleminden sonra kilin şişmesinin engellendiği ifade edilmiştir.

#### **1.4. Katı Atıklar**

Endüstriyel ve teknolojik ilerlemeler, bir yandan insanın yaşam düzeyini yükseltip daha rahat yaşamasına imkan tanırken, öte yandan artan nüfus ve hızlı kentleşme ile birlikte doğal dengelerin bozulmasına ve tüm canlıları tehdit edecek seviyelere varan hava, su ve toprak kirliliklerine sebep olmaktadır. Hızla büyüyen bu kirlenmenin önüne

geçebilmek için, atıkların düzenli bir şekilde toplanması, taşınması, depolanması ve değerlendirilip zararsız hale getirilmesi gerekmektedir.

Türkiye’de 1960’lı yıllarda üretilen toplam katı atık miktarı 3-4 milyon ton/yıl iken, bugün sadece evsel katı atık miktarı 25 milyon ton/yıl’dır. Dolayısı ile çöp, artık sadece gözden uzak bir yerde bertaraf edilmesi gereken bir atık türü olmaktan çok toplama, taşıma, geri kazanım ve bertaraf gibi birçok farklı unsuru içine alan bir yönetim sistemini gerekli kılmaktadır. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak “Atık Yönetimi” terimi günlük lisanımıza yerleşmiş ve daha yeni bir terim olan “Entegre Atık Yönetimi” tanımı da kullanılmaya başlanmıştır (Anonim, 2004).

#### **1.4.1. Atık Yönetimi**

Ülkemizde katı atıkların toplanması, taşınması ve insan sağlığına zarar vermeden bertaraflarına ilişkin yükümlülük, yetki ve sorumluluklar 1580 ve 3030 sayılı kanunların ilgili maddeleri gereğince belediyeler ile büyükşehir belediyelerine verilmiştir (Anonim, 2004). Bu işlemler gerçekleştirilirken uyulması gereken kriterler Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından belirlenmiştir.

Katı atık yönetiminde uygulanacak ilkelerin, teknik esasların ve standartların belirlenmesi amacıyla Çevre ve Orman Bakanlığınca yayımlanan yönetmelikler aşağıda verilmiştir;

- Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (Resmi Gazete, 1991)
- Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (Resmi Gazete, 1993)
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (Resmi Gazete, 2005)

Bu yönetmeliklerde atıkların kaynağında azaltılması, atıkların mümkün olan en yüksek oranda geri kazanılması, geriye kalan atıkların ise tekniğine uygun olarak nihai bertaraflarının sağlanması ana ilkeler olarak benimsenmiştir (Anonim, 2004).

#### **1.5. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri**

Katı atıkların insan sağlığına ve çevreye zarar vermeden etkisiz hale getirilmesine, içerisinde bulunan, yeniden değerlendirilebilir ekonomik değere sahip maddelerin ekonomiye kazandırılmasına atık bertarafı denilmektedir. Katı atıkların bertarafında genel

olarak tercih edilen yöntemler geri kazanma, yakma, kompostlama ve düzenli depolamadır. Bunlardan da sadece düzenli depolama nihai bir çöp uzaklaştırma yöntemidir. Zira yakma ve kompostlama gibi teknikler geriye nihai olarak bertaraf edilmesi gereken kalıntılar bırakır.

### **1.5.1. Geri Kazanma**

Atıkların ekonomiye katkı sağlamak ve nihai bertarafa gidecek atık miktarının azaltılması amacıyla, fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye dönüştürülmesi işlemidir. Geri kazanma tesislerinin projelendirilmesi ve işletilmesinde kolaylıklar sağlanabilmesi için atıkların ayrı ayrı toplanması esastır.

### **1.5.2. Yakma**

Yakma işlemi çöpleri stabil bir hale getiren ve atık hacmini %70-80 azaltılmasını sağlayan bir işlemdir. Bu yöntem uygulamasında çevreye zarar vermemek için hava kirlenmesine karşı özel tedbirler alınması gerekmektedir. Meydana gelen küllerin uzaklaştırılması aşamasında, içlerinde bulunması muhtemel toksik maddelerin olumsuz etkileri için de tedbirler alınması gereklidir. Yanma işlemi genellikle çöplerin kalorifik değerinin kendi kendilerini yakmaya müsait olduğu durumlarda kullanılması önerilmektedir. Aksi takdirde ek yakıt gerektireceği için bertarafı çok pahalıya mal olur. Yakma yöntemi genellikle depolama sıkıntısı çekilen metropollerde, nihai ürünün stabilize edilmesinin gerektiği durumlarda ve ısı değeri yüksek katı atıklardan enerji üretimimin söz konusu olması durumunda tercih edilmektedir.

Bir bertaraf yöntemi olarak yakma, ülkemizin atık kompozisyonu içindeki organik madde yüzdesinin yüksekliği, kışın artan kül oranı, buna bağlı olarak çöp kalorifik değerinin düşük olması ve ayrıca yüksek yatırım ve işletme maliyetleri nedeniyle uygun bir bertaraf yöntemi değildir (Anonim, 2004).

Tehlikeli atıkların yakıldığı tesisler, mümkün olduğunca tam yanmanın sağlanabileceği şekilde işletilmelidir. Bunu sağlamak için bazen uygun tekniklerle atık ön işlemlerinin uygulanması gerekebilir. Yakma tesislerinden oluşan ısı mümkün olduğunca geri kazanılmalıdır (Resmi Gazete, 2005). Evsel katı atık, evsel arıtma çamuru ve evsel



katı atık benzeri endüstriyel atıkları yakmak maksadı ile inşa edilen yakma tesislerinde, ağırlık olarak katı atık toplam miktarının %1'ini geçen organik bağlı klor veya 1 kg atıkta 50 mg'dan fazla halojenli organik madde ihtiva eden tehlikeli atıkların yakılması yasaktır (Resmi Gazete, 1991).

### **1.5.3. Kompostlama**

Kompostlama işlemi genel olarak atığın içindeki organik atıkların bozunması işlemidir. Bu yöntemle katı atık içerisindeki organik kısımlar (mutfak atıkları, arıtma tesisi çamurları vb.) kompost yapılarak tekrar değerlendirilmiş olur. Kompostlama sonucu ortaya çıkan ürün toprak iyileştirici madde olarak tarım amaçlı kullanım alanına sahiptir (Anonim, 2004). Atıkların uygun kısımları kompost yapılırsa bile, geri kalan kısmının nihai olarak başka bir yöntemle bertarafı gerekmektedir.

### **1.5.4. Düzenli Depolama**

Taban geçirimsizliği sağlanmış bir alan üzerine çöplerin ince tabakalar halinde serilip sıkıştırılması ve daha sonra da üzerlerinin uygun bir örtüyle örtülüp bertaraf edilmesi yöntemidir. Düzenli depolama için öncelikle seçilen alanın geçirimsizliği sağlanır. Bu amaç için kil ve gerekirse özel şekilde hazırlanmış membranlar kullanılabilir. Depolama sahasının geçirimsizliği sağlanırken çöplerden kaynaklanacak süzüntü sularını toplayacak drenaj sistemi de yapılmaktadır. Bu hazırlıklar tamamlandıktan sonra çöplerin bu sahaya dökülmesine başlanmaktadır. Dökülen çöpler her gün iyice sıkıştırıldıktan sonra her taraftan en az 20 cm kalınlığında toprakla örtülmektedir. Arazi doldukça, çürüme neticesinde oluşacak gazları uzaklaştırmak için gerekli boru tertibatı da yerleştirilmektedir. Arazi tamamen dolduktan sonra üzeri geçirimsiz bir örtü ile kapatılıp tarım toprağı serilmektedir (Resmi Gazete, 2005).

Uygun arazilerin bulunması şartıyla bu yöntem en ekonomik ve en kolay imha seçeneğidir. Bu yöntemin avantajlarını ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Avantajlar;

- Uygun arazi bulunduğu takdirde ekonomik bir yöntemdir.
- Nihai imha metodudur, her türlü çöp için uygulanması mümkündür.

- Ön yatırımı nispeten az olan yöntemdir.
- Esnek bir yöntemdir, katı atık miktarına göre kapasite kolaylıkla arttırılabilir.
- Kullanılıp kapatılan araziden rekreasyon amacıyla faydalanılabilir.

Dezavantajlar;

- Kalabalık bölgelerde, ekonomik taşıma mesafesi içerisinde uygun yer bulma güçlüğü vardır.
- Yerleşim bölgelerine yakın deponi sahaları için, yöre halkının muhalefeti ile karşılaşlabilmektedir.
- Tamamlanmış deponi sahalarında göçük ve çökmeler olabileceği için sürekli kontrolü ve bakımı gerekmektedir.
- Sıvı ve gaz sızıntıları kontrol edilmezse olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir.

Düzenli depolama yukarıda sayılan avantajlar nedeniyle ülkemiz en uygun ve önerilen bertaraf yöntemidir (Anonim, 2004).

1994 yılından itibaren DİE çevre istatistikleri kapsamında; Türkiye genelinde belediye teşkilatı kurulmuş olan tüm belediyelerdeki katı atık hizmeti ve katı atık bertaraf tesislerinin mevcut durumu ile ilgili veri derlenmektedir. Bu çalışma kapsamında uygulanan anket sonuçları Tablo 1.1’de verilmiştir (URL-2, 2008).



## 1.6. Katı Atık Depolama Tesisi

Atıkların düzenli olarak depolandıkları alanlara “katı atık depolama tesisi” denilmektedir. Katı atık depolama tesisleri özellikle temiz ve sağlıklı bir çevre için önemlidir.

Vahşi depolama, ülkemizde en yaygın kullanılan katı atıkların uzaklaştırılması yoludur. Gözden uzak olsun düşüncesi ile genelde çöpler şehir ve kasaba dışında açık alanlara gelişigüzel bir şekilde atılarak insan çevresinden uzaklaştırılır. Şekil 1.1-1.2’de çöplerin hiçbir muhafaza olmadan gelişigüzel döküldüğü vahşi çöp depolama alanlarından örnekler görülmektedir. Halkın yaşam alanıyla iç içe ve gelişigüzel dökülmüş çöp yığınının her türlü kirliliği ve hastalığı beraberinde getirdiği aşikardır.



Şekil 1.1. Vahşi çöp depolama alanı, deniz ve şehir (URL-3, 2008).



Şekil 1.2. Vahşi çöp depolama alanı (URL-3, 2008).

Bu olumsuz görüntüleri ortadan kaldırmak için katı atıkların insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Diğer yöntemlere göre daha ucuz ve nihai bir atık bertaraf yöntemi olan düzenli depolama, çöplerin çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden muhafazasını sağlar.

Düzenli depolama; sızdırmazlığı sağlanmış ve gaz kontrolü yapılmış alanlara atıkların kademeli bir şekilde depolanması işlemidir. Bir düzenli depolama alanını vahşi çöp sahalarından ayıran en önemli fark; düzenli depolama sahalarında sızıntı sularının ve depo gazının olumsuz etkilerini kontrol altına alacak bir tasarımın var olmasıdır (URL-3, 2008).

Şekil 1.3-1.7’de düzenli bir katı atık depolama tesisinin (Trabzon, Çamburnu katı atık depolama tesisi) yapım aşamaları görülmektedir. Katı atık depolama alanı inşası işi için ilk olarak, saha şevlerle kademelendirilmiştir (Şekil 1.3). Daha sonraki aşamada, Şekil 1.4’de görüldüğü gibi kil-bentonit karışımı sahaya serilmiştir. Serilen bu ilk yalıtım malzemesinin üzerine yüksek yoğunluklu polietilen örtü (geomembran) serilerek geçirimsizlik sağlanmıştır (Şekil 1.5). Birinci geomembran tabakasının üzeri en az 10 cm kalınlığında kum koruma tabakası ve bunu takiben drenaj borularını içeren, en az 30 cm kalınlığında

drenaj tabakası oluşturulduktan sonra ikinci geomembran tabakası serilir (Resmi Gazete, 2005). İki geomembran örtünün arasına, atıklardan sızan suların drenajını sağlamak için drenaj boruları yerleştirilmiştir (Şekil 1.6). Katı atık içerisinde oluşacak gazların herhangi bir tehlike oluşturmaması için drenaj borularının üzerine gaz çıkış bacaları tesis edilmiştir (Şekil 1.7). Geomembran örtünün muhafazasını sağlamak için ve atıklardan gelen sızıntı suyunun kolayca süzülebilmesine imkan tanımak için ince çakıl tabakası serilerek alan çöp dökümüne hazır hale getirilmiştir. Şekil 1.8'de görüldüğü gibi alana getirilen çöpler tabakalar halinde serilerek sıkıştırılmaktadır.



Şekil 1.3. Oluşturulan şevlerle sahanın kademelendirilmesi (URL-3, 2008).



Şekil 1.4. İlk kademe yalıtım için kil-bentonit karışımının serilmesi (URL-3, 2008).



Şekil 1.5. Kil-bentonit karışımı üzerine yüksek yoğunluklu polietilen malzeme (geomembran) serilmesi (URL-3, 2008).



Şekil 1.6. İki geomembran örtü arasında yerleştirilen drenaj boruları (URL-3, 2008).



Şekil 1.7. Drenaj borularının üzerine çakıl tabakası serilmesi ve gaz bacalarının oluşturulması (URL-3, 2008).





Şekil 1.8. Çöplerin katı atık imha alanına serilmesi ve sıkıştırılması (URL-3, 2008).

Atık depolama alanında, kademeli bir şekilde sıkıştırılan çöpler ilk seddeyi doldurduktan sonra ihtiyaca göre yeni seddeler oluşturulabilmektedir. Saha dolduktan sonra üzeri yine geçirimsiz bir örtüyle örtülüp, yeşil alan, futbol sahası gibi amaçlar için kullanılabilir.

#### **1.6.1. Katı Atık Depolama Alanı Yer Seçiminde Gözönünde Bulundurulması Gereken Başlıca Faktörler**

Katı atık depolama alanı yer seçiminde aşağıdaki genel kriterler dikkate alınmalıdır;

- Kireçtaşları, yoğun çatlak sistemli taş ocakları, kum ve çakıl depoları katı atık depolama alanları için uygun değildir. Çünkü bu jeolojik malzemeler iyi birer akifer oluştururlar.
- Bataklık alanlar, atıkların durgun suları kirletmesini engelleyecek şekilde çok iyi drene edilmedikleri sürece, yine katı atık depolama alanları için uygun değildirler.
- Kil çukurları, kuru tutulmaları koşulu ile en uygun katı atık depolama alanlarını oluştururlar.

- Üstü düz tepeler, akifer zonu üzerinde yeterli kalınlıkta kil gibi geçirimsiz malzeme içermeleri koşulu ile yine uygun bir katı atık depolama alanı oluştururlar.
- Taşkın alanları, periyodik olarak yüzey suları ile yıkanma olasılıkları yüzeye yakın olduğu geçirimli jeolojik malzemelerde yine katı atık depolama alanı olarak uygun değildirler.
- Depo alanlarının meskun mahallere olan uzaklığı bir kilometreden daha az olmamalı, depo yerleri kötü manzara etkisi yapmayacak noktalarda bulunmalı ve görüntü kirliliğine yol açmamalıdır. Bunun yanında atıkların depolama alanlarına taşıma mesafesinin optimal olması ulaşım ekonomisi açısından önemlidir.
- Katı atık depolama tesisinin tasarımında sıcaklık, yıllık yağış miktarı, buharlaşma değerleri ve rüzgar yönlerinin bilinmesi gereklidir. Kokudan etkilenme olmaması için, hakim rüzgar yönünü meskun mahallerle ayın doğrultuda olan bölgeler depo yeri olarak seçilmemelidir.
- Zeminin taşıma kapasitesi ve deşeremselliği de dikkate alınmalıdır.

Son olarak, engebeli topografyaya sahip bölgelerde, yüzey sularının minimum olduğu vadi başları en uygun katı atık depolama alanlarını oluştururlar. Ancak şunu da vurgulamak gerekir ki, yukarıda sözü edilen kriterler dikkate alınır, fakat bunlar, katı atık depolama alanı olarak seçilecek yerlerde ayrıntılı hidrojeolojik incelemelerin yapılmasını engellemezler (Anonim, 2004).

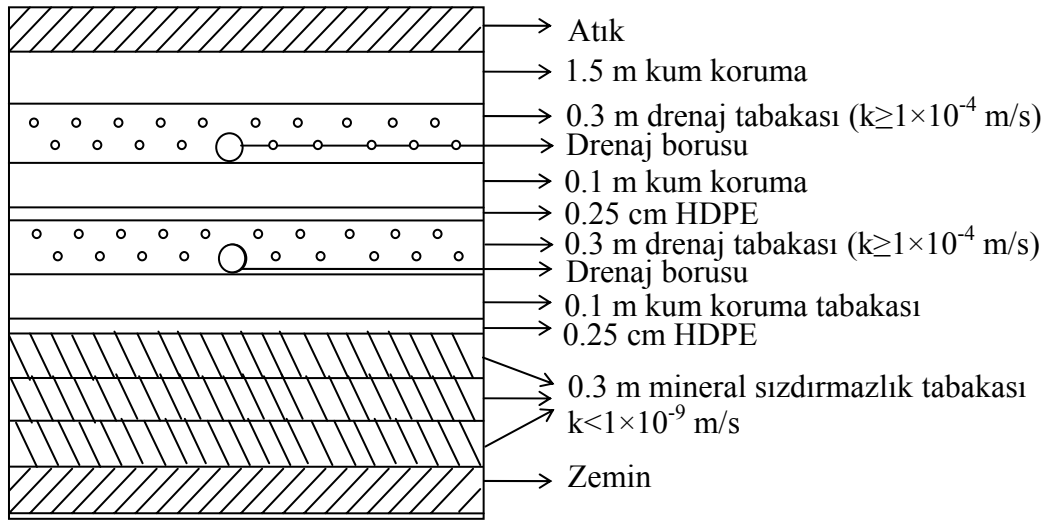
## **1.6.2. Türkiye'deki Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğine Göre Geçirimsiz Şilte Oluşturulması**

### **1.6.2.1. Depo Tabanının Teşkili**

Depo tabanı, sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde düzenlenir. Bunun için mineral sızdırmazlık tabakası (kil) ile plastik geçirimsizlik tabakası birlikte kullanılır. Bu malzemelerle eşit düzeyde geçirimsizliği sağlayacak diğer malzemeler de bu amaçla kullanılabilir. Bu taban oluşturulurken geçirimsizlik katsayısı (permeabilitesi)  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/sn ve kalınlığı en az 5 metre olan kile eşdeğer geçirimsizlik sağlanması gerekmektedir.

Teşkil edilecek taban için örnek olarak Şekil 1.9'da şematik bir kesit verilmiştir. Bu örneğe göre tabii zemin üzerine yerleştirilen malzeme kil ise sızdırmazlık tabakasının

kalınlığı en az 0.90 metredir. Bu tabaka en fazla 0.30 metre kalınlığındaki üç tabaka halinde sıkıştırılarak döşenir. Bu tabakanın üstüne serilen plastik geçirimsizlik tabaka kalınlığı (Yüksek yoğunluklu polietilen, HDPE) en az 0.25 cm olmalıdır. Plastik tabakanın korunması ince kum ve benzeri bir malzeme ile sağlanır. Bu koruyucu kalınlığı en az 0.10 metre olmalıdır. Depo tabanına balıksırtı şeklinde bir form verilir ve tabanın boyuna eğimi %3'den, enine eğimi de %1'den küçük olmamalıdır (Resmi Gazete, 2005).

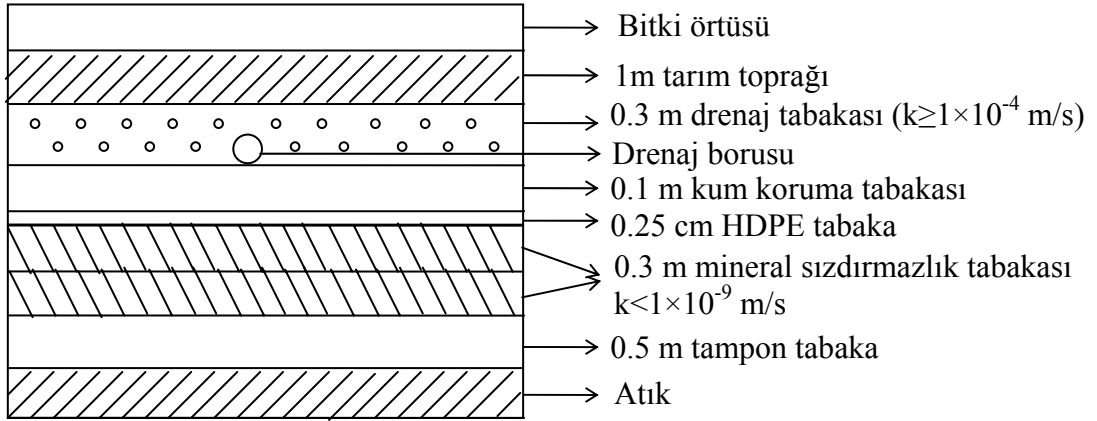


Şekil 1.9. Teşkil edilecek geçirimsiz taban için örnek kesit (Resmi Gazete, 2005).

#### 1.6.2.2. Depo Tesisi Üst Örtüsünün Teşkili

Depo tesisine dolgu işlemi tamamlandıktan sonra, dolgu üst depo gövdesi yüzeysel su girmeyecek şekilde sızdırmaz hale getirilir. Şekil 1.10'de örnek üst örtü kesiti verilmiştir.

Atık üstündeki ilk örtü tabakası homojen ve kohezyonsuz zeminden teşkil edilir ve tabaka kalınlığı 0.5 m'den az olamaz. Depo gövdesinden gaz çıkışı söz konusu ise gaz dren sistemleri yerleştirilir. Depo üst yüzeyinin nihai eğiminin en az %5 ve eğer plastik tabaka üzerinde sürtünmeyi artırıcı ilave özellikte maddeler yoksa en fazla %15 olması zorunludur. Sızdırmaz tabaka üstüne serilen tarım toprağı bitki çeşidine bağı olarak değişmekle birlikte, kalınlığı bir metreden az olamaz (Resmi Gazete, 2005).



Şekil 1.10. Teşkil edilecek depo üst örtüsünün örnek kesiti (Resmi Gazete, 2005).

### 1.7. Geçirimsizlik Malzemesi Olarak Bentonit

Bir kil türü olan bentonit doğal haliyle yumuşak, suda hemen dağılan, el ile temas edildiğinde yağlı bir izlenim uyandıran özelliktedir. Partiküllerinin çok ince ve özgül yüzey alanının büyük olması sebebiyle oldukça yüksek su emme kapasitesine sahiptir.

Bentonit terimi, volkanik kül ve tüflerin alterasyonu ile oluşan ve başlıca simektit grubu kil minerallerini içeren killer için kullanılmaktadır (Grim ve Güven, 1978; Chiristidis vd., 1995). Bentonitler, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle pek çok endüstri alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir (Grim, 1962; Chiristidis ve Scott, 1997; Yıldız ve Kuşçu, 2002). Bentonitlerin kullanım alanlarına etken olan özelliklerin tümü ana kil minerali olarak içerdikleri simektitlerden kaynaklanmakta, simektitlerin yüzey asitliği ( $n_m/\text{mol g}^{-1}$ ), özgül yüzey alanı ( $A/\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ), özgül gözenek hacmi ( $V/\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) ve kation değişirme kapasitesi [ $\text{KDK}/\text{meg}(100\text{g})^{-1}$ ] gibi bir takım yüzey özellikleri de bu kullanım alanlarında önem taşımaktadır (Demir, 2003).

Büyük şişme özelliği gösteren bentonit bir montmorillonit çeşidi olup, koloidal bir kildir. Su ile temas ettiğinde çok fazla şişer ve tiksotropik jeller teşkil eder. Bentonitler zayıf konsantrasyondaki alkali çözeltiler tarafından koloidal hale getirilirler ve aksine zayıf konsantrasyonlu asitler, sulandırılmış alkali çözeltiler ve kuvvetli konsantrasyonlu alkinler tarafından çökeltirler. Eğer bentonit saf su ile şişerse ve bir alkalın (NaOH) ilave edilirse jel teşekkül eder ve gitgide koyulaşır. Aksi olursa kolloidleşme olur ve jel sulanır. Sıcaklık ve şişme özelliği arasında belirli paralellik vardır. Bentonit koloidal özelliklerinden dolayı ayrılma yüzeyini yoğunlaştırır. Özellikle bentonit yağ emülsiyonlarının veya hidrokarbon

bağlayıcıların bağlayıcılık özelliklerini kuvvetlendirir. Aynı nedenden dolayı bentonit az bir su ile yüksek bir yapışkanlık özelliğine sahip olabilmektedir. Ağırlık olarak 5/1000 oranında sulandırılmış bentonit süspansiyonu hiç bir çökme olmaksızın stabil kalır. Bentonit negatif bir kolloittir. Bentonit parçacıklarının %80 kadarı 1 mikrondan daha küçüktürler (Hekimoğlu, 1996).

Dünyadaki bentonitlerin pek çoğu simektit grubu kayaçlarla ilişkilidir ve genellikle simektit kül veya tüflerin yerinde bozuşmasıyla oluşmuştur (Grim ve Güven, 1978). Bentonit oluşumunu sağlayan ve taze volkanik malzemenin bozuşmasına sebep olan jeolojik süreci hidrotermal bozuşma (Reyes vd., 1987; Chiristidis vd., 1995) ve diyajenetik oluşum (Huff ve Türkmenoğlu, 1981; Türkmenoğlu ve Aker, 1990; Brusewitz, 1986, Teale ve Spears, 1986) olarak iki grupta incelemek mümkündür.

Türkiye'deki bentonit yataklarının büyük bir bölümü volkanik kül veya tüflerin hidrotermal bozuşmasıyla oluşmuşlardır (Akbulut, 1996). Mihalgazi (Eskişehir), Çayırılık (Kütahya), Artvin, Giresun, Ünye (Ordu), Trabzon ve Çanakkale'de hidrotermal bozuşma sonucunda oluşmuş bentonit yatakları mevcuttur (Çoban, 1994; Çoban, 2001).

Bentonit olarak tanımlanan killerin oluşumları ve kökenleri Grim ve Güven (1978) tarafından üç temel tipe ayrılmıştır. Bunlar; volkanik kül ve tufün yerinde bozuşması, magmatik kayaçların hidrotermal bozuşması, magmatik kökenli malzemenin döterik (post-magmatik evrede meydana gelen ayrışmalar) bozuşmasıdır. Bu üç temel tipin dışında magmatik kökene sahip olmayan ve ayrışma, sedimentasyon gibi olaylar neticesinde oluşan bentonitler de mevcuttur. Bentonite ait tipik bazı özellikler Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Bentonitin tipik özellikleri (Lambe ve Whitman, 1969).

Yoğunluk ( $\rho_s$ , Mg/m <sup>3</sup> )	Likit limit ( $w_L$ , %)	Plastisite indisi ( $I_p$ , %)	Özgül yüzey (m <sup>2</sup> /g)	Kasyon değişim kapasitesi (CEC, meq/100g)
1-1.2	200-700	150-650	700-840	80-150

### 1.7.1. Bentonitin Kullanıldığı Alanlar

Bentonitler fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle pek çok endüstri dalında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanları daha çok değişebilir katyonlara bağlıdır.

Bugün bentonitler, yüzün üzerinde endüstri dalında kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarının bazıları;

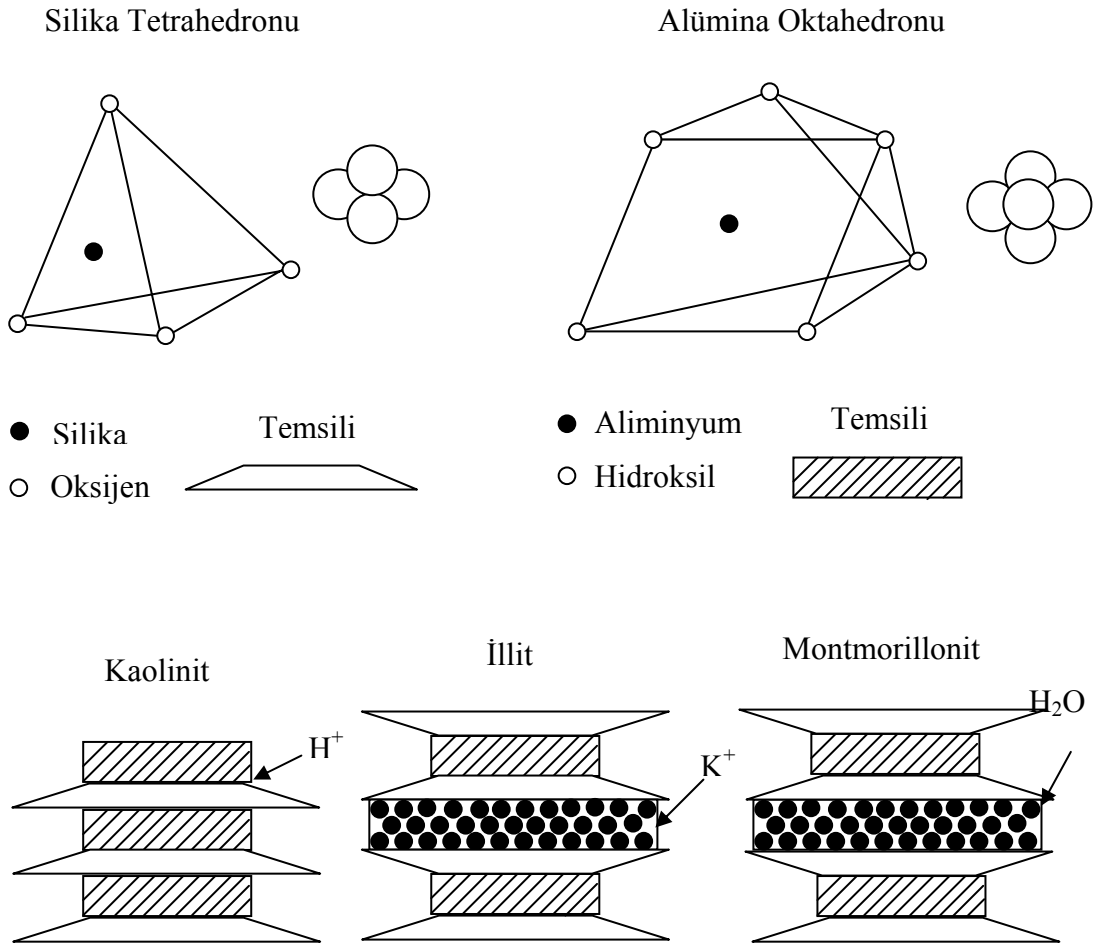
- Nükleer atık bertaraf depolarında sızdırmazlık şiltesi oluşturma
- Baraj, yol, köprü inşaatları
- Sondaj kuyuları
- Çimento enjeksiyon karışımları
- Seramik, petrokimya, lastik, plastik, ilaç, boya, gıda, parfümeri ve kâğıt

olarak sıralanabilir.

### 1.7.2. Bentonitin Kristal Yapısı

Bentonit, kristal yapısı Şekil 1.11’de görüldüğü gibi iki boyutlu silisyum-oksijen (Si-O) tetrahedra tabaka ile iki (Si-O) tabaka arasında bulunan iki boyutlu (Al-O-OH) oktahedral tabakadan meydana gelmiştir (Güngör, 1998). Silikon-Oksijen tabakalarında, silikon atomları 4 oksijen atomuyla bağlanmıştır. Oksijen atomları merkezde bir silikon atomu olmak üzere düzenli bir tetrahedromun 4 köşesine yerleştirilmiştir. Tabakalarda her bir tetrahedronun 4 oksijen atomundan üçü komşu tetrahedra yapılar tarafından paylaşılır. Her bir tetrahedronun dördüncü oksijen atomu aşağıya doğru sivrilmiş olup, alümina oktahedral tabakasının (OH) grupları ile aynı düzendedir.

Al-O-OH tabakalarında Al atomları sekiz oksijen atomuyla ya da bir oktahedranın alt köşesi üzerinde merkezleri olan Al atomlarının çevresinde lokalize olmuş hidroksil (OH) grubuyla bağlıdır. Hidroksil grupları iki paralel tabaka olarak uzanır. Oksijen atomları ile hidroksil grupları hegzogonal sıkı bir yapı oluştururlar. Tetrahedral ve oktahedral tabakalarındaki benzer simetri ve aynı boyut, oksijen atomlarının bu tabakalar arasında paylaşılmasını olanaklı kılar. Tetrahedral tabakadan çıkan dördüncü oksijen atomu oktahedral tabaka tarafından ortak kullanılır. Bentonitte bir alümino tabakası, oksijen atomlarını iki tetrahedral tabaka ile paylaşır. Böylece bir oktahedral ve iki tetrahedral tabaka kombinasyonu, birim hücre olarak tanımlanır. Bu tabakalar birbirine kuvvetli iyonik bağlarla bağlanmıştır. Yüzlerce birim hücrenin üst üste gelmesiyle bentonit minerali meydana gelir. Komşu birim hücreler birbirlerine zayıf Van der Waals kuvveti ile bağlanmıştır. Bu yüzden sulu bir süspansiyonda bunların birim hücrelere kırılması mümkündür. Çok şiddetli olmayan deflokulan (kil taneciklerinin topaklanmasını önleyen) ortamlarda bu birim yapılar birbirine tekrar bağlanma eğilimindedir.



Şekil 1.11. Değişik kil minerallerinin yapısı (Craig, 1997).

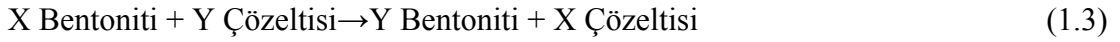
Yukarıda bahsedilen tabaka yapısındaki mevcut Si ve Al iyonları zaman içinde başka iyonlarla yer değiştirebilir. Tetrahedral tabakalardaki  $\text{Si}^{+4}$  yerine  $\text{Al}^{+3}$  ve oktahedral tabakadaki  $\text{Al}^{+3}$  yerine  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Li}^{+2}$  iyonları yer alabilir. Bu iyon değişimi yapının elektriksel dengesini bozar ve yapıda bir (+) yük noksanlığı doğar. Birim yapılar arasında su molekülleri ve katyonlar mevcut olup yük noksanlığı bu katyonların adsorplanmasıyla giderilir. Montmorillonitin kimyasal formülü,



şeklinde verilmiştir (Lambe ve Whitman, 1969). Bentonitin bilinen belli başlı özellikleri değişebilen katyonların varlığı, dane boyutu ve adsorpsiyon yeteneğidir (Grim, 1978).

### 1.7.3. Değişebilen Katyonlar

Birim yapılar arasında bulunan ve yük eksikliği nedeniyle adsorplanan katyonlar zayıf elektriksel kuvvetlerle tutulduklarından bentonitin bir çözelti içinde bulunması durumunda çözeltideki diğer bazı katyonlarla yer değiştirebilirler, bu nedenle değişebilir katyon adını alırlar. Ayrıca Si-Al kristal yapısının dışında bulduklarından, iyon değiştirme reaksiyonları yapıda bir değişiklik yapmazlar. Bu reaksiyonlar tamamen stokiometriktir (kimyasal tepkimelerdeki giren maddelerle, ürünler arasındaki kütle ilişkileri) ve denge sabitesi yazılabilir. Bu reaksiyonlar genelde,



şeklinde gösterilebilir (Özdemir, 1998).

Burada verilmesi gereken bir tanım, katyon değiştirme kapasitesidir. Katyon Değiştirme Kapasitesi; 100 g kil içinde değişebilir katyonların miliekivalanti (bir element veya bileşiğin, dolaylı veya dolaysız olarak, 1.008 gram hidrojenle veya 8.00 gram oksijenle (ya da herhangi bir element veya bileşiğin eşdeğer gramıyla) birleşen veya yer değiştirebilen ağırlıkça miktarının 1/1000'i ) olarak tanımlanır. Katyonların yer değiştirme güçleri değerliklerine göre değişmektedir. Bağlı nem, pH, spesifik iletkenlik, geçirimsizlik, gözeneklilik, şişme kapasitesi, rehidratasyon hızı, disperse olabilme derecesi gibi özellikler değişebilir katyonların cinsine bağlıdır (Özdemir, 1998).

### 1.7.4. Dane Büyüklüğü ve Adsorpsiyon Yeteneği

Bentonit kristalinde birim yapılar arasındaki bağların (Van der Walls) zayıf olmasından dolayı, yapı içinde sulu bir süspansiyonda bunların tek birim hücrelere kırılma eğilimleri vardır. Flokülün ortamlarda bu birim hücreler birbirlerine yüz-kenar bağıntılarıyla bağlanırlar. Bu yüzden bentonitin görünen parçacık boyutu büyük oranda erişilen dispersiyon derecesine bağlıdır. Buna bağlı olarak parçacık boyutuyla ilgili yaklaşımlar, bu amaçla yapılan deneysel tekniklere bağlı olarak değişir. Parçacıklar arasında çeşitli etkileşimler olduğundan görünen boyuttan söz etmek daha doğrudur, görünen çap 0.02 ile 2.0 µ arasında bulunmuştur. Kalınlığın hesaplanması ise oldukça



güçtür. X-Ray difraksiyonu, lazer ve birtakım kimyasal yöntemler, parçacık boyutları konusunda daha detaylı bilgiler verebilmektedir.

Bentonit kil minerallerinin boyutunun çok küçük olması nedeniyle, spesifik alanları bir hayli büyüktür ve ağırlıklarının yaklaşık 5-6 katı kadar su adsorplayabilirler. Su alarak ilk hacminin 10 katı kadar da bir hacme ulaşabilirler, yani şişerler. Bunun dışında organik ve inorganik iyonları katyonlar gibi adsorplama özelliklerine sahiptirler. 400°C civarında suyunu kaybederler. Sertlikleri 1-2 arasında, özgül yoğunlukları ise değişken olup genellikle 2-3 g/cm<sup>3</sup>'dür (Özdemir, 1998).

Bugün genel olarak kilin yüzeyindeki suyu tutan iki mekanizmadan söz edilmektedir. Bu mekanizmalardan biri kilin yüzeyinde adsorbe edilen suyun, su molekülünün dipol özelliğinden ileri geldiğini öne sürer. Buna göre negatif yüklü kil yüzeyinde, suyun pozitif ucu kile doğru gelir ve negatif taraf ise dışarıya doğrudur. Böylece diğer su molekülleri de birbirleri üzerinde yer alırlar. Kil yüzeyinde suyu tutan ikinci mekanizma ise değişebilen katyonların mobilitesidir. Katyonlar negatif kil yüzeyinden uzaklaşamayacaklarından suyu çekerler, bu nedenle değişebilen katyonlar kil-su sisteminde önemli yer tutar (Özdemir, 1998).

Kuru kil yüzeyi tarafından adsorplanan katyonlar negatif yüklü yüzey tarafından sıkıca tutulurlar. Kilin negatifliğini dengeleyecek miktardan fazla olan katyonlarla onlara ait anyonlar kilin su ile temasında çözeltiye geçerler, adsorplanan katyonlar parçacıkların yüzeyleri yakınında çok daha büyük konsantrasyonlara sebep oldukları için parçacığın yüzeyinden dışa doğru konsantrasyonu dengelemek için difüze olma eğilimleri vardır. Ancak katyonların difüze olma eğilimleri parçacığın orijinal elektrik alanı tarafından sınırlandırılır (Özdemir, 1998).

### **1.8. Kireç Katkısının Zemine Etkileri**

Kireç, zemine genellikle stabilizasyon amaçlı karıştırılmaktadır. Düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirliğe sahip killerin stabilizasyonu için katkı maddesi olarak kireç kullanılması, kilin bünyesinde bulunan silikatlar ve alüminatlarla kirecin reaksiyona girmesi sonucunda kayma direncinin ve geçirimsizliğin zamanla artmasını sıkışabilirliğin ise azalmasını sağlar. Bu değişiklikler sayesinde toplam ve farklı oturmalar azalmakta konsolidasyon hızı artmaktadır. Zeminlerin kireçle stabilizasyonunda hem kimyasal hem de fiziksel olaylar meydana gelmektedir.

Zemine kireç ilavesiyle meydana gelen kimyasal olaylar; katyon değişimi, çimentolaşma ve karbonatlaşmadır (Yıldırım, 2002). Killi bir zemine kireç eklenip bir süre beklendiğinde killi zeminler kolay dağılabilir bir hal alırlar. Bu dane yapısının sonucu olarak killi zeminler, siltli ve kumlu zeminlere benzer davranış gösterirler (Thompson, 1969). Zemine kireç ilavesi zemini kalsiyum iyonları açısından zengin hale getirir. Kirecin kuvvetli kalsiyum katyonları, kil parçacığının yüzeyinde bulunan sodyum ( $Na^+$ ) gibi zayıf metalik katyonların yerini alma eğilimi gösterirler. Kil mineralleri kalsiyum katyonlarını yüzeylerinde tutarlar ve mineral yüzeyinde kalsiyum katyonları hakim duruma gelir. Kil taneciğinin yüzeyindeki zayıf katyonlarla kirecin kuvvetli kalsiyum katyonları arasında katyon değişimi meydana gelir (Thompson, 1969). Bu reaksiyon olurken killi zeminlerin plastisitesi düştüğü gibi, zemin daha gevşek bir hal alır, işlenebilirlik artar ve mukavemet ile sıkışabilirlikte iyileşme görülür (Yıldırım, 2002).

Zemin ve kireç karışımında meydana gelen önemli reaksiyonlardan biri de çimentolaşmadır. Kireçte bulunan kalsiyum katyonu, zeminde bulunan alüminyum ve silikat mineralleri ile reaksiyona girerek çimentonun hidrasyonundan meydana gelen bileşiklere benzer olan kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikatları oluşturur. Bu tepkimeye çimentolaşma olayı denilmektedir. Montmorillonit minerali içeren killer gibi bir kısım killer bağlayıcı olup kireçle çimentolaşmayı meydana getirirler. Kaolinit, illit ve klorid gibi mineraller içeren bazı killerde ise bu bağlayıcılık özelliği mevcut değildir (Yıldız, 1998).

Kirecin önemli tepkimelerinden birisi de havadan karbondioksit emmesidir. Kireç ile atmosferik karbondioksitin tepkimeye girmesi sonucunda kalsiyum karbonat oluşur. Bu olay karbonatlaşma olarak adlandırılır. Zemin kireç karışımında kalsiyum karbonat oluşumu çimentolaşma olayını etkilediği gibi puzolanik reaksiyona da engel olur. Karbonatlaşma tepkimeleri, kireçle stabilize edilen zeminin uzun süreli mukavemetine ve dayanıklılığına zararlı olmaktadır (Yıldız, 1998).

Zemin-kireç karışımında fiziksel olaylar da meydana gelmektedir. Bu olaylardan bir tanesi topaklanmadır. Topaklanma zeminin cinsine göre değişiklik gösterir. Killi zeminlerde fazla olan topaklanma siltli ve kumlu zeminlerde daha az olmaktadır. İlave edilen kireç miktarı arttıkça topaklanma artmaktadır (Yıldız, 1998).

Zemine kireç ilavesi zeminin plastisitesini de etkilemektedir. Kil zeminlerde kireç katkısıyla plastisite indisi düşürülür (Özaydın, 1995; Uzuner, 2000). Kireç miktarı artarken zeminin likit limitinde düşüş, plastik limitinde artış meydana gelmektedir (Aytekin, 2004). Kireç katkısı, zemine daha kolay karıştırılabilme özelliği kazandırır (Uzuner, 2000).

Kireç ile stabilizasyonun, kilin geçirirliğine (permeabilitesine) olan etkisini belirlemek için yapılan çalışmalarda, kireç ile stabilizasyonun kilin yapısını floküle hale getireceği ve dolayısıyla kilin geçirirliğinin artacağı savunulmuştur (Evans ve Bel, 1981). Zemin kireç katkısının şişme potansiyeline etkisi Güney vd. (2007) tarafından araştırılmıştır. İslanma-kuruma çevrimleri boyunca kireç katkısının şişen zeminin şişme potansiyelini nasıl etkilediği incelenmiştir. Kireç stabilizasyonunun ilk etkisinin ilk çevrimden sonra kaybedildiğini ve ardında gelen çevrimlerle şişme potansiyelinin arttığı ifade edilmiştir. Şişme potansiyelinin maksimum azalmasının ilk çevrimde gözlemlendiği, takip eden çevrimlerle dereceli olarak azaldığı ve 4-6 çevrimden sonra dengeye ulaştığı belirtilmiştir. Kireçle stabilize edilen zeminler ıslanma-kuruma çevrimlerinden negatif olarak etkilenmişlerdir. Yani kireçle iyileştirilmiş örneklerin şişme potansiyelini kontrol etmede kireç stabilizasyonunun yararlı etkisi ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalmalarından sonra kısmen kaybolmuştur (Güney vd., 2007).

### **1.9. Şişen Zeminler Hakkında Genel Bilgiler**

Bünyelerine su aldıklarında şişen, su kaybettiklerinde büzülen plastik killere doğada sıkça rastlanmaktadır. Bu tür zeminler üzerinde inşa edilmiş hafif yapılarda kabarma, çatlama ve bazı hallerde yıkılma türü olumsuzluklar görülebilmektedir. Şişme büzülme görülen zeminlerde plastisite yüksek olmakla birlikte her yüksek plastisiteli zeminde bu potansiyel yüksek olmayabilir (Yıldırım, 2002).

Genleşen killerde şişme mekanizması karmaşık olup birçok faktörden etkilenmektedir. Genleşme, iç gerilme dağılımını bozan zemin suyunun miktarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak oluşur. Kil mineralleri, yüzeylerinde negatif kenarlarında ise pozitif elektrik yüklerine sahip tabakalı partiküllerdir. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler nedeniyle bu partiküllerin yüzeyine yapışan zemin suyunun içindeki katyonlar tarafından dengelenir. Partiküller arası elektriksel kuvvet alanı, negatif yüzey yüklerinin ve zemin suyu elektro-kimyasının bir fonksiyonudur. Kil kristalleri ve su molekülleri arasındaki Van der Waals yüzey kuvvetleri ve emilme kuvvetleri, bu kuvvet alanını etkilemektedir. İç elektrokimyasal kuvvet sistemi, dıştan uygulanan gerilmeler ve zemin suyundaki kapiler gerilmeler ile denge içerisinde olmalıdır (Chen, 1988).

Zemin suyu kimyası, şişme potansiyeli miktarı açısından önemlidir. Sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi tuz katyonları, zemin suyu içerisinde çözünür.

Bunlar, negatif elektriksel yüzey yüklerini dengelemek için kil yüzeyleri tarafından emilen yer değiştirebilir katyonlardır. Bu katyonların hidratasyonu sonucunda emici kuvvetler kil kristalleri tarafından kullanılır ve kil partikülleri arasında büyük miktarda su toplanmasına sebep olur (Nelson ve Miller, 1992).

Killer çok nadir olarak saf halde bulunurlar. Diğer yabancı maddeler ile karışık halde bulunan killerin fiziksel özellikleri, bu maddelerin etkisi sonucunda karmaşıklaşır. Fizikokimyasal özellikleri bakımından alkali bazlar, toprak alkaliler ve asitler killerin karakterlerinin değişmesine yol açarlar. Ayrıca killerin morfolojik ve kolloidal karakterlerini de göz önünde bulundurmak gerekir. Kolloidlik karakterleri özellikle montmorillonitlerde ve bentonitlerde bariz olarak görülmektedir. Bentonitler kendi ağırlıklarının 6-7 katı su ile şişerler ve jelliklerini arttırmırlar (Sowers ve Sowers, 1970).

Killerin değişik cinsleri, oluşum farklılıkları ve mineralleri killerin özellikle şişme davranışını değiştirmektedir. Şişmeye yol açan kil minerallerinin ana kaynağı magmatik kayalar, özellikle de bazalttır. Feldspat bulunan metamorfik ve püskürük kayaların kimyasal ayrışması sonucunda ortaya çıkan montmorillonit şişmeye neden olan en önemli kil mineralidir. Gillot (1963), Lambe ve Whitman (1969), Millot (1970), Chen (1983), şişmenin ayrışma koşulları ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Örneğin, montmorillonit ve kaolinit her ikisi de magmatik kayalardan ayrışmasına rağmen ayrışma koşullarındaki farklılıklar nedeniyle montmorillonit yüksek, kaolinit düşük şişme potansiyeline sahiptir. Ayrışmamış kayalarda ana kil mineral klorittir. Kayaçtaki geçirimsizliğin düşük olması nedeniyle ayrışma sırasında yıkama oluşur ve klorit smektite dönüşür (Chen, 1988).

Kaolinit, kil mineralleri arasında en düşük şişme kapasitesine sahip kildir. İllit %15 şişme yüzdesine sahipken, illit-montmorillonit karışımı için şişme yüzdesi %60-100 arasındadır. Ca-montmorillonit, Na-montmorillonitten daha az şişme gösterir ve şişme ancak %50-100 aralığında değişmektedir. Şişme olayının kilin mineralojik özellikleriyle doğrudan ilişkili olması sebebiyle, kil mineralojistleri tarafından kilin ana mineral öğelerinin belirlenmesiyle şişme potansiyelinin değerlendirilebileceği ifade edilmiştir (Chen, 1988).

Kristal yapıya sahip kil minerallerinin özgül yüzeyleri büyüktür ve dolayısıyla su tutma kapasiteleri de fazladır. Örneğin illitten sekiz kat, kaolinitten kırk kat daha fazla özgül yüzeye sahip montmorillonitin su tutma kapasitesi diğerlerine oranla daha büyüktür. Değişebilir katyon cinsi ve miktarı su tutma kapasitesinde ve buna bağlı olarak da şişme

potansiyelinde önemli rol oynar. Özellikle kil minerallerinin üzerindeki negatif elektron şarjları, tabakalar arası bağ kuvvetlerini ve katyon değiştirme kapasitesini dolayısıyla kilin şişme potansiyelini bütünüyle arttırmaktadır (Basma, 1991).

Şişen türde kil içeren zeminlerde yüzeyden ilk birkaç metre derinlikte inşa edilen hafif yapılar, mevsimsel değişimlere bağlı olarak, zeminin su içeriğindeki artış veya azalma sonucu meydana gelen hacimsel büyüme ve küçülmeden etkilenmektedir. Mevsime bağlı olarak zemin profilindeki su içeriğinin değiştiği ve şişmenin etkin olduğu seviyenin üstündeki kısım “aktif zon” (Active Zone) olarak tanımlanmaktadır (Basma, 1991). Killi zeminlerde şişme, aktif zon içerisinde meydana gelmekle birlikte, uzun zaman içerisinde aktif zondan daha derin yerlerde de gerçekleşebilmektedir (Komornik, 1973; Popescu, 1979). Herhangi bir bölgedeki aktif zon; değişik mevsimlerde, farklı derinliklerde yapılan örneklemeyle saptanabilmektedir. Buna göre, su içeriğinin yaklaşık sabit olduğu derinlik aktif zonun derinliği olarak verilebilir (Ergüler, 2001).

Şişme potansiyeline sahip zeminler ile ilgili olarak üzerinde durulması gereken başlıca hususlar; başta indeks parametreler olmak üzere, zeminde mevcut şişebilen ve/veya şişmeyen kil türlerinin yüzdesi ve özellikle killerin indeks parametreleriyle şişme parametreleri arasında belirlenebilecek ilişkilerden, şişmenin daha pratik şekilde tayin edilebilmesidir. Bu konularda bazı belirsizlikler olmakla birlikte, indeks parametrelerin şişme potansiyeli açısından önemli bir gösterge olabileceği üzerinde durulmaktadır (Ergüler, 2001).

Zeminin su muhtevası değişikliğinden etkilenen emme kapasitesi killi zeminlerde şişmeye yol açan önemli bir faktördür. Zeminin su muhtevası arttığında kaolinit ve illitte şişme eğilimi sınırlı iken, montmorillonitte şişme çok fazladır. Su muhtevasının sabit kalması kilin şişme göstermemesine neden olabilir. Dolayısıyla sabit su muhtevalı killer üzerine inşa edilen yapılar kabarmanın etkisi ile meydana gelecek hareketlerle karşılaşmayacaklardır. Şişme potansiyeline sahip kilin su muhtevası arttığında hem düşey hem de yatay doğrultuda şişme meydana gelmektedir. Şişen zeminlerin başlangıç su muhtevaları şişme davranışını oldukça etkilemektedir. Doğal su muhtevası %15'in altında çok kuru killer genellikle şişme açısından çok tehlikelidirler (Holtz, 1959; Seed vd., 1962). Bu tür killer su muhtevaları ortalama %35'e kadar su adsorbe ederler ve şişerler. Bu oldukça büyük üst yapı hasarlarına neden olabilmektedir. Tabii su muhtevası %30'un üzerinde olan killer şişmenin büyük bir kısmını tamamladıklarından ilave genişlemeye uğramazlar. Başlangıç su muhtevası ile doğrudan ilişkili olan kilin birim hacim ağırlığı

şışmeyi etkileyen diğer önemli bir parametredir. Belli bir kuru birim hacim ağırlığın üzerindeki ( $17.6 \text{ kN/m}^3$ ) killer genellikle daha fazla şışme gösterirler (Snethen, 1984).

### 1.9.1. Şışme Mekanizması

Zeminlerde şışme, yanal basınçların azalmasından su muhtevâsından doğan hacim genişlemeleri sonucunda oluşur. Killi zeminlerde şışme çok daha yüksek boyutlardadır.

Grim (1974); kil zeminlerde şışme olgusunu, daneler arası ve daneler içi olmak üzere ikiye ayırmıştır. “Daneler arası şışme, kilin mineralojik kompozisyonundan bağımsız olarak herhangi bir kil zeminde meydana gelebilir. Nispeten kuru olan killerde daneler, kapiler kuvvetlerden kaynaklanan çekimle bir arada tutulur. Islanma meydana geldiğinde ise, kapiler kuvvetlerin etkisi azalır ve kil zemin şişer. Diğer bir deyişle, suyun dıştaki kristal yüzeylere ulaşması engellenip, kristaller arası boşluğu doldurmasıyla şışme meydana gelir. Bu özellik montmorillonit mineralinin karakteristik özelliğidir. Montmorillonit kristalini oluşturan ayrı ayrı molekül tabakaları zayıf bir şekilde birbirine bağlıdır. Dolayısıyla ıslanma meydana geldiğinde su sadece kristallerin arasına değil, kristalleri de kapsayan birim tabakaların arasına girer. Bu durum sonucunda montmorillonit esas hacminin %2000’i kadar genişleyerek jel kıvamına gelir.

Serbest şışmeyi belirlemek için su ile dolu  $100 \text{ cm}^3$  ölçekli bir silindire  $10 \text{ cm}^3$  kuru zemin koyulur ve zeminin silindirin dibinde denge haline gelmesi durumunda zemin hacmi okunur. İlk ve son hacimler arasındaki fark (hacim yüzdesi olarak) serbest şışme değerini verir (Holtz ve Gibss, 1956). Bu aslında bir şışme deneyinden çok bir çökme deneyidir ve tuz konsantrasyonu, sıcaklık vb. birçok etkene bağlıdır (Lambe ve Whitman, 1969). Bu terim bazı araştırmacılar tarafından arazi şışme deneyini ya da  $1 \text{ kPa}$  yük altında şışmeyi tanımlamak için kullanılmıştır (Williams, 1980).

### 1.9.2. Şışmeye Etki Eden Faktörler

Şışme potansiyeli üzerinde etkili olan mikro ölçekli faktörler olarak kilin mineralojisi ve zemin suyu kimyası dikkate alınabilir. Her mineralin elektriksel alanındaki çeşitliliklerinden dolayı farklı tipteki kil mineralleri farklı şışme potansiyellerine sahiptirler. Bir zeminin şışme kapasitesi, zemin içerisindeki kil minerallerinin miktarı ve

tipine, kil partiküllerinin yüzey alanlarına ve bu partikülleri çevreleyen zemin suyunun kimyasına bağlıdır.

Şişme mekanizmasını etkileyen diğer faktörler ise, plastisite veya yoğunluk gibi zeminin fiziksel özellikleridir. Bu karakteristikler şişme davranışının birincil göstergesidir. Atterberg limitleri tarafından tanımlanan zemin, genleşme potansiyelinin başlıca belirteçleridir. Şişen zeminlerin çoğu, büyük nem içeriklerinde plastik konumda yer alır. Bu davranış, büyük miktarda su içeren geniş kil minerallerinin kapasitesi ve elektriksel kuvvetler nedeniyle kohezif bir yapının oluşması sonucudur. Zemin plastisitesi şişme potansiyelini kontrol eden ve sağlayan aynı mikro ölçekli faktörlerden de etkilenir. Bundan dolayı, şişme potansiyelinin kullanışlı bir göstergesi olarak değerlendirilir. Partiküller arasındaki elektriksel kuvvet alanı, partiküller arası boşluklarla ilişkilidir. Bundan dolayı, kuru yoğunluk ve partiküllerin fiziksel bileşimi şişme potansiyelini etkiler. Kompaksiyon veya jeolojik yükler doğrultusundaki artan zemin yoğunluğu, daha büyük miktarlarda şişmeye ve yüksek şişme basıncına sebep olur.

Şişmede çift katman etkileşimleri, yüzey gerilimi ve emme önemli rol oynar (Zhou vd., 1999). Şişmeye etki eden faktörler Erol vd., (1988) tarafından zemin özellikleri ve çevresel şartlar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Bu faktörler Tablo 1.3'de verilmiştir.

Tablo 1.3. Şişmeye etki eden faktörler (Erol vd., 1988).

<b>Zemin Özellikleri</b>	
Katıların bileşimi	Aktif kil mineralleri, montmorillonitleri ve montmorillonitlerin karışık tabaka kombinasyonları ve diğer kil minerallerini kapsar.
Gözenek sıvısı tuzlarının konsantrasyonu	Gözenek sıvısındaki katyonların yüksek konsantrasyonu, hacim değişiminin büyüklüğünün etkilenmesine yol açar: Ozmoz'dan kaynaklanan şişme uzun zaman periyodunda önemli boyutta olabilir.
Gözenek sıvısının bileşimi	Monovalent katyonların hakim olması çekme-şişmeyi artırır. Divalent ve trivalent katyonlar çekme-şişmeyi yavaşlatır.
Kuru yoğunluk	Artan kuru yoğunluk dane boşluklarının azalmasına ve şişmenin artmasına sebep olur.
Yapı	Topaklanmış partiküller, dağınık partiküllerden daha fazla şişme eğilimindedirler; çimentolaşmış partiküllerde şişme düşme eğilimindedir, su verilmiş dokuda şişme artar.
<b>Çevre Şartları</b>	
İklim	Nemli iklimler, ıslak zemin profilini geliştirirken, kuru iklimler kuruluğu geliştirir.
Yeraltı suyu	Dalgalanma ve sığ su tabakaları kabarma için gerekli nemin kaynağını sağlar.
Drenaj	Az yüzey drenajı nem birikintilerine yol açar.
Bitkilerle kaplı olması	Ağaçlar, çalılar ve çimler terlemeyle nem birikintilerini iletirler: Nem bitkileri soyulmuş olan alanlar altında toplanma eğilimindedir.
Sınırlamak	Çevre basınçlarının artmasıyla şişme azalır, yarılmış alanların şişmesi daha muhtemeldir: yanal basınçlar, aşırı düşey basıncı aynı düzeyde tutmayabilir.
Arazi geçirirliliği	İnce çatlaklar geçirirliliği ve şişme hızını önemli ölçüde arttırabilir.



### 1.9.3. Şişme Potansiyeli

Şişme potansiyeli, genel olarak zeminlerin şişme yeteneğini ifade eden bir kavram olarak kullanılmaktadır. Serbest şişme oranı ( $S_w$ ), yükseklik artışının ( $\Delta H$ ), ilk yüksekliğe oranı ( $H_0$ ) olarak tanımlanır ve

$$S_w = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (1.4)$$

eşitliği ile ifade edilir (Uzuner, 1998). Bu hacimsel artış yüzdesi iki şekilde tanımlanabilir. Birincisi; sabit ve küçük bir sürşarj yükü altında numune doygun hale gelirken, sıfır yanıl deformasyon durumunda oluşan düşey boy değişimidir. İkincisi ise; düşey deformasyonların engellenmesi durumunda, zeminin yanıl şişme yüzdesinin, çapındaki değişime bağılı olarak ifade edilmesidir (Komine ve Ogata, 2003).

Zeminin içerdığı kil yüzdesi, kil mineralinin cinsi ve çökelleme koşulları, arazideki gerilme şartları, kilin gerilme geçmişi, zeminin kuru birim hacim ağırlığı, danelerin yerleşim biçimi, başlangıç su muhtevası, doygunluk derecesi, boşluk oranı, geçirimsizlik, sıkıştırılmış zeminler için kompaksiyon yöntemi gibi faktörler şişme potansiyelini etkileyen başlıca faktörlerdir. Zemin suyu kimyası, şişme potansiyeli miktarı açısından önemlidir. Sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi tuz katyonları, zemin suyu içerisinde çözünür. Bunlar, negatif elektriksel yüzey yüklerini dengelemek için kil yüzeyleri tarafından emilen yer değiştirebilir katyonlardır. Bu katyonların hidratasyonu sonucunda emici kuvvetler kil kristalleri tarafından kullanılır ve kil partikülleri arasında büyük miktarda su toplanmasına sebep olur (Nelson ve Miller, 1992).

Zeminlerin şişme potansiyeli, kil mineralinin türü ve miktarı tarafından kontrol edildiğinden ve bu da plastik limit değerlerini etkilediğinden birçok araştırmacı şişme potansiyeli ile Attarberg limitleri arasında bağlantı kurmaya çalışmıştır. Örneğin Seed vd. (1962) serbest şişme için,

$$S = 60K(I_p)^{2.44} \quad (1.5)$$

eşitliğini önermiştir. Burada  $K=3.6 \times 10^{-5}$  olan bir sabit,  $I_p$  plastisite indisi,  $S$  ise şişme potansiyelidir. Eşitliğin kil yüzdesinin %8-65 arasındaki değerleri için geçerli olduğu ve laboratuvar deneylerinden elde edilen değerlerle  $\pm\%33$  uyumlu olduğu belirtilmektedir. Buna göre plastisite indisinin %0-15 değeri için düşük, %15-24 değeri için orta, %25-46 değeri için yüksek ve  $>\%46$  için çok yüksek şişme potansiyeli tahmin edilebilecektir (Yıldırım, 2002).

Chen (1988) 321 adet örselenmemiş örnek üzerinde yaptığı deneyler sonucunda

$$S = Be^{A(I_p)} \quad (1.6)$$

eşitliğini önermektedir. Burada  $B=0.2558$ ,  $A=0.0838$  olan sabitlerdir (Yıldırım, 2002).

Weston (1980) şişme yüzdesini zeminin başlangıçtaki su kapsamına da bağlı olarak

$$\%S = 0.000411w_{LW}^{4.17}P^{-0.386}w_i^{-2.33} \quad (1.7)$$

eşitliği ile bulunabileceğini belirtmektedir. Burada  $w_i$  başlangıç su muhtevası,  $P$  düşey basınç ( $\text{kN/m}^2$ ),

$$w_{LW} = (\% < 0.425\text{mm} / 100) \times LL \quad (1.8)$$

olarak tanımlanan ağırlıklı likit limit değeridir (Yıldırım, 2002).

#### 1.9.4. Şişme Basıncı

Şişme özelliğine sahip olan killi bir zeminin, su muhtevasının artması sonucu meydana gelen hacim değişikliğine engel olabilecek basınç veya şişmesi tamamlandıktan sonra ilk durumuna geri döndürülmesi için gereken basınç, şişme basıncı olarak tanımlanır (ASTM 4546-96, 2003). Yol kaplamaları, havaalanı kaplamaları, su kanalları ve atık depolama sahalarındaki kil şilteler gibi hafif yapılar için şişme basıncı oldukça önemli bir kavramdır.

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

Şişme basıncının rutin olarak ölçülen parametrelere bağlı tahmini için çok sayıda araştırma vardır. Şişme basıncının ampirik tahmini için Komornik ve David (1969) tarafından

$$\log p_s = 2.132 + 2.08w_L + 0.665\rho_d - 2.69w_N \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (1.9)$$

eşitliği önerilmektedir. Burada  $w_L$  likit limit,  $\rho_d$  gr/cm<sup>3</sup> cinsinden kuru yoğunluk,  $w_N$  doğal su muhtevasıdır (Yıldırım, 2002).

Chen (1988) ince danelerin yüzdesi, likit limit ve SPT'ye bağlı olarak aşağıdaki değerleri önermektedir (Tablo 1.4). Tablodaki olası hacimsel şişme yüzdesi 48 kPa'a eşit hafif yapı temelleri altında beklenecek düşey gerilme için şişme yüzdesidir. Olası şişme yüzdeleri farklı oturmaların tahmini için gerekmektedir.

Tablo 1.4. Şişen killerde muhtemel hacim değişikliği (Chen, 1988).

Laboratuvar ve Arazi Verileri			Olası Hacimsel Şişme (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Derecesi
200 No'lu Elekten Geçen Yüzde	Likit Limit (%)	SPT Darbe Sayısı			
>35	>60	>30	>10	>1000	Çok Yüksek
60-95	60-40	20-30	3-10	250-1000	Yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	Orta
<30	<30	<10	<1	<50	Düşük

Johnson ve Snethen (1979) tarafından,

$$\log S_p = 0.0367w_L - 0.0833w_N + 0.458 \quad (1.10)$$

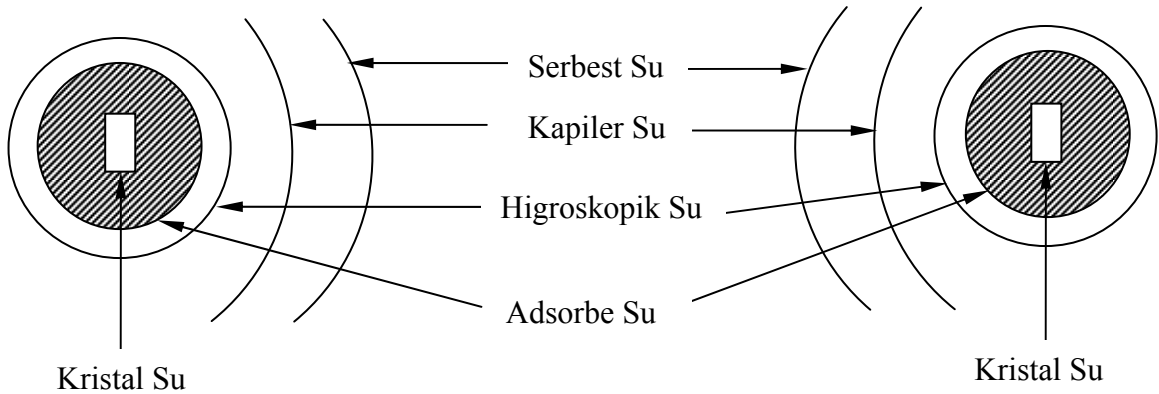
O'Neill ve Ghazzaly (1977) tarafından,

$$S_p = 2.27 + 0.131w_L - 0.2w_N \quad (1.11)$$

eşitlikleri önerilmektedir. Bu eşitliklerde su muhtevası yüzde olarak kullanılmalıdır (Yıldırım, 2002).

### 1.10. Zeminlerde Su

İnce daneli zeminlerde özellikle kil daneleri etrafında gravitasyonel (serbest), kapiler (kılcal), higroskopik, adsorbe (katı) ve kristal su (kimyasal bağlı) olmak üzere zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyen beş çeşit su bulunabilir (Şekil 1.12). Bu sulardan gravitasyonel (serbest) su yer çekimi etkisi ile daneler arasında serbestçe akabilen ve drenaj ile zeminden uzaklaştırılabilen sudur. Havada kurutma ile kaybedilebilen, daneler arasındaki boşluklarda yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile yükselen su ise, kapiler (kılcal) su olarak adlandırılmaktadır. Kapiler su havada kurutmaya zeminden uzaklaştırılabilir. Danelerin etrafında adsorbe sudan daha az bir kuvvetle tutulan ve havada kurutma sonucunda zeminden uzaklaştırılmayıp ancak fırında  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutma ile kaybedilebilen su da higroskopik su olarak adlandırılmaktadır. Adsorbe su ise, zemin danelerinin etrafını kalınlığı yaklaşık 0,005 mikron olan ince bir film gibi saran ve  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutma ile kaybedilemeyen sudur. Danelerin kristal ağında bulunan ve o daneleri oluşturan minerallerin kimyasal formüllerinin bir parçası olan su da kristal su olarak tanımlanmaktadır. Adsorbe (katı) su ile kristal su ancak çok yüksek sıcaklıklarda kurutma ile kaybedilir. Jips ve bazı tropikal killer dışında kristal su genelde fırında  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutma ile uzaklaştırılmaz (Lambe ve Whitman, 1969; Head, 1992; Mitchell, 1993 ve Çetin vd., 1998).



Şekil 1.12. Zemin suyu çeşitleri (Head, 1992; Çetin vd., 1998).

Kuru numune ağırlığı tayininde numunenin hangi sıcaklıkta kurutulduğu çok önemlidir. Ayrıca organik ve jips içeriği fazla olan numunelerin  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  yerine  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulması önerilmektedir. Çünkü  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki kurutmalarda organikler dekompoze olurken jips dehidratasyona uğramaktadır (Liu and Evett, 1984; ASTM D 2216-92, 1993). Zemin numunesinin gerçek özelliklerinin kaybedilme tehlikesinden dolayı, kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri gibi bazı deneylerde deney öncesi kurutmalarda  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkılmaması veya hava ile kurutma önerilmektedir (Liu ve Evett, 1984; Head, 1992; ASTM D 2216-92, 1993; Çetin vd., 1998).

### 1.10.1. Zeminlerde Geçirimsizlik

Zeminlerde geçirimsizlik arazide ve laboratuarda çeşitli deneylerle ölçülebilir veya teorik denklemlerle belirlenebilir. Kumlarda yapılan laboratuvar ölçümleri gerçekçi olabilsede, çakıllarda olası türbülanslı akım koşulları, killerde ise doygunluğun tam sağlanamaması sonuçların sağlıklı bulunmasına neden olabilir. Özetle, zeminlerin geçirimsizlik katsayısı,

Laboratuarda;

- Sabit düzeyli permeametre ile
- Düşen düzeyli permeametre ile
- Yatay kılcallık deneyiyle
- Konsolidasyon deneyinde dolaylı olarak
- Pompalama-akım deneyi ile

Arazide;

- Zeminden su çekerek (serbest akifer, basınçlı akifer)
- Zemin su vererek (açık uç deneyleri, tıkaç deneyleri)
- Zemin itilen piyezometre ucu ile

ölçülebilmektedir. Kullanılacak yöntem zeminin türüne ve söz konusu projenin niteliğine bağlı olarak değişir. Ödenek ve zamanın yeterli olduğu durumlarda geçirimsizliğin yerinde deneylerle ölçümü en gerçekçi sonuçları verecektir. Ancak arazide geçirimsizlik ölçümlerinde deneyi yapanın becerisi de sonuçların sağlıklı olması açısından önemlidir (Önalp, 2002).

### 1.10.1.1. Geçirimsizlik Katsayısının Laboratuvar Deneyleriyle Belirlenmesi

Zeminlerin geçirimsizlikleri laboratuvar ve arazide yapılan deneylerle belirlenebilmektedir. Laboratuvarda yapılan iki türlü deney yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar sabit düzeyli ve düşen düzeyli deneylerdir. Geçirimsizliği yüksek zeminler için sabit düzeyli geçirimsizlik deneyi, geçirimsizliği düşük zeminler için düşen düzeyli geçirimsizlik deneyi kullanılmaktadır.

#### a) Sabit Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi:

Geçirimsizliğin en kolay ölçümü laboratuvarda yapılabilir. Sabit düzeyli geçirimsizlik deneyi çakıllar, kumlar ve bunların karışımlarında en doğru sonuçları verir. Bu deneyin uygulanabilmesi için kural, numuneden makul bir süre içerisinde ölçülebilir hacimde suyun geçirilebilmesidir. Deney ASTM D 2434-68'e uygun olarak yapılır.

Bu deney geçirimsizliği  $10^{-4}$  cm/s ve daha fazla olan zeminlerde uygulanır. Deneylerde suyun numuneden hızlı geçirilmesi için aşırı yüksek hidrolik eğimler türbülans önleme açısından uygulanmamalıdır. Genel kural olarak hidrolik geçirimsizliğin  $10^{-3}$  cm/s dolayında olması durumunda hidrolik eğim  $i=2$ ,  $10^{-7}$  cm/s'ye düşmesi durumunda  $i=20$  olarak uygulanmaktadır (Önalp, 2002).

#### b) Düşen (Değişen) Düzeyli Geçirimsizlik Deneyi:

Laboratuvarda sağlanan hidrolik eğimler altında numuneden yeterli su hacmi geçirilemiyorsa zeminin geçirimsiz olduğu anlaşılır ve deney düşen düzeyli olarak gerçekleştirilir. Bu tür kil ve silt gibi kohezyonlu zeminlerin geçirimsizlik katsayılarını belirlemek için düşen düzeyli geçirimsizlik deneyleri kullanılmaktadır. Deney ASTM D 5856'ya uygun olarak yapılır. Bu deney için kullanılan zemin örneği, geçirimsizliği belirlenecek zeminden alınan, örselenmemiş örnek olabileceği gibi, silindirik metal kap içinde, laboratuvarda yerleştirilmiş de olabilir. Bu deney düzenlerinde, dış basıncı olan veya olmayan bir düşey borudan veya tüpten akışkanın zeminden geçmesi sağlanarak zemin doygun hale geldikten sonra geçirimsizlik katsayısı elde edilir.

Deneyin en önemli özelliği numunenin geçirimsizliğine bağlı olarak üstteki cam tüpün çapının değiştirilebilmesidir. Kil çok geçirimsiz ise tüpün çapı olabildiğince küçük seçilir ve suyun düşey hareketinin rahatça izlenmesine olanak sağlanır (Önalp, 2002).

Temelde kohezyonlu zeminlerin permeabilitesini belirlemek için üç tip permeametre kullanılmaktadır. Bunlar; üç eksenli hücreli veya esnek duvarlı (flexible-wall) permeametre (TFWP), kompaksiyon kalıp hücreli veya rijit duvarlı (rigid-wall)

permeametre (RWCM) ve konsolidasyon hücreli permeametrelerdir (CA). İlk iki alet üçüncüsünden daha yaygın kullanılmaktadır.

- Rijit Duvarlı (Kompaksiyon Kalıplı) Permeametre ile Geçirimsizlik Deneyi:

Rijit duvarlı permeabilite deneyleri, 101 mm çaplı kalıplarda sıkıştırılmış numunelerden sıvının yukarıdan aşağıya doğru geçirilmesi ile yapılır. Deney ASTM D 5856'ya uygun olarak yapılır. Numuneler kompaksiyon kalıbında, standart proktor veya modifiye edilmiş proktor enerjisine göre sıkıştırılır ve taban ve üst plakasından çıkarılarak kalıbın her iki ucu özenle düzeltilir. Daha sonra kalıbın her iki ucuna gözenekli taşlar konularak permeametre setine yerleştirilir. Üst plaka genellikle numunenin serbestçe şişmesine izin verecek şekilde yerleştirilir. Numuneye giriş sıvısı, hava basınçlı bir sistemle basınçlı bir şekilde verilir ve numuneden çıkış sıvısı atmosfere açık bir kapta toplanır. Deneylerde hidrolik eğim genellikle 20-100 arasında seçilir. Bütün deneyler, geçirimsizlik katsayısı (k) sabit oluncaya ve giriş ve çıkış sıvıları yaklaşık eşit oluncaya kadar sürdürülür. Geçirimsizlik deneyi,  $k > 10^{-7}$  cm/s olan zeminler için 1 veya 2 hafta,  $k < 10^{-7}$  cm/s olan zeminler için birkaç ay sürebilir. Kompaksiyon kalıbının kenar duvarındaki sızıntıların, geçirimsizlik katsayısını etkileyip etkilemediklerini belirlemek amacıyla çift halkalı kompaksiyon kalıplı permeametre setleri kullanılabilir.

- Esnek Duvarlı (Üç Eksenli Hücreli) Permeametre ile Geçirimsizlik Deneyi:

Kompaksiyon kalıbından çıkarılan numuneler, esnek duvarlı (üç eksenli hücreli) permeametrelerde test edilebilirler. Deney ASTM D 5084'e uygun olarak yapılır. İstenilen çapta çıkarılan numunelerin her iki ucu, yapışma etkisi en aza indirilecek şekilde tıraşlanır. Daha sonra numunelerin her iki ucuna gözenekli taşlar ve filtre kağıtları yerleştirilerek permeametre setine yerleştirilir. Gözenekli taşlar ve filtre kağıtları yerleştirilmeden önce ıslatılmalıdır. Numune kauçuk membran içerisine yerleştirilir, alt ve üst başlığa çift halka geçirilerek hücre sıvısının numune içine girmesi önlenir. Hücre içi ve drenaj yolları, hava kabarcığı kalmayacak şekilde su ile doldurulur.

Hücre basıncı ve hidrolik eğim, uyumlu bir şekilde uygulanır. Akım, başlangıçta maksimum efektif gerilmede (17 kPa) ve düşük hidrolik eğimde (yaklaşık 10) düşey olarak numune içine verilir. Deney, sabit geçirimsizlik katsayısı (k) değeri elde edilinceye kadar başlangıç hidrolik eğimde sürdürülür. Daha sonra istenilen hidrolik eğime yükseltir. Numuneyi doymuş hale getirmek için ters basınç kullanılabilir. Su ile yapılan geçirimsizlik deneylerinde havası alınmış su kullanılır. Deney, giriş ve çıkış sıvıları eşit oluncaya ve sabit geçirimsizlik katsayısı (k) değeri elde edilinceye kadar sürdürülür (Yıldız, 1998).

- Konsolidasyon Hücresel Permeametre ile Geçirimsizlik Deneyi:

Konsolidasyon deneyi, içinde zemin numunesinin (genelde çapı 75 mm ve yüksekliği 20 mm) bir halkada tutulduğu ve çeşitli gerilme seviyelerinde, düşey olarak basıncın uygulandığı dolaylı bir geçirimsizlik deneyidir. Bu yöntemle, numuneye uygulanan gerilme ile akışkanın numuneden düşey yönde drenaj ile atılması sağlanır. Geçirimsizlik katsayısı şu bağıntı ile hesaplanabilir;

$$k = \frac{c_v a_v \gamma_p}{1 + e} \quad (1.12)$$

burada,

$c_v$  : Konsolidasyon katsayısı

$a_v$  : Sıkışma katsayısı

$\gamma_p$  : Akışkanın birim hacim ağırlığı

$e$  : Boşluk oranı

anlamındadır.

Geçirimsizlik deneyi ile ilgili olarak laboratuarda kullanılan aletlerin her birinin kendine ait çalışma prensibi vardır. Hangisinin daha iyi olduğuna dair kesin bir bilgi yoktur. Bazı araştırmacılar, rijit duvarlı permeametrede sorun olan numune yanları boyunca meydana gelen sızıntıların engellenmesinden dolayı esnek duvarlı permeametrelerin en uygun sistem olduğunu ifade etmişlerdir (Yıldız, 1998).

Düşen düzeyli deneyler ile konsolidasyon deneyleri arasındaki asıl fark, numunelerdeki gerilme durumunun farklı olmasıdır. Düşen düzeyli permeametrelerde akışkanın akışı, dış ilave basınçlı veya basınçsız olarak yerçekimi ivmesi ile sağlanır, ancak konsolidasyon deneyinde akış zemin gözenekleri dışında sıkışan akışkanın çıkması sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Burada sürükleyici kuvvet, numunenin yüklenmesinden dolayı ortaya çıkan düşey gerilmedir. Her ne kadar bir kayma gerilmesi düşen düzeyli permeametrede örneklere doğrudan etki etmiyorsa da, konsolidasyon deneyi boyunca, zemin örneğinde bir makaslama gerilmesi vardır. Bu şu ifade ile tanımlanmıştır,

$$\tau_1 = \frac{\sigma_v}{2(1 - K_0)} \quad (1.13)$$



$\tau_1$  : Kayma gerilmesi

$\sigma_v$  : Düşey gerilme

$K_0$  : Zeminin yatay basınç katsayısı

anlamındadır. Danecik yüzeyine bağlı çift tabakadaki akışkan, ancak akışkanın yüzey gerilimine eşdeğer olabilen büyük bir kayma gerilmesinin uygulanmasıyla yerinden çıkarılabilir. Böylece  $\tau_1$ , sıvının yüzey gerilimine eşit olduğunda bağlı akışkanı yerinden çıkarır. Düşen düzeyli permeametrede, akışkanın yüzey gerilimine bağlı olan bir sınır hidrolik eğimi ( $i_0$ ), akış meydana gelmeden önce çok artabilir. Bu nedenle, belirli bir akışkan için yüzey gerilimi ne kadar küçük ise, belli bir hidrolik eğimi için ölçülen permeabilitenin o kadar büyük olduğu da ortaya çıkar. İki deney arasındaki temel farklılıktan dolayı benzer zeminler için ölçülen geçirimsizlik katsayıları farklı olmaktadır (Yıldız, 1998).

#### 1.10.1.2. Geçirimsizlik Katsayısının Arazi Deneyleri ile Belirlenmesi

Zeminin hidrolik geçirimsizliği arazide sağlıklı bir şekilde ölçülebilmektedir. Bu ölçümlerde beş etken önem taşır;

- Yeraltı su seviyesinin durumu
- Ortamın türü ve özelliği
- Ölçüm yapılacak bölgenin derinliği
- Zeminin geçirimsizliği
- Ölçüm bölgesinin heterojenliği ve anizotropluğu

Deney tipi bu özellikler göz önünde tutularak seçilir (Önalp, 2002). Atık suların ve zararlı maddeler içeren sıvıların zemine ne denli girecekleri, girdiklerinde nasıl hareket edeceklerini gözlemleyebilmek açısından bu tür durumlarda geçirimsizliğin arazide ölçümü önemlidir.

Sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin arazide geçirimsizlik deneyleri dokuz farklı metotla yapılabilmektedir. Bunlar, boutwell permeametresi, muayene deliği açılarak yapılan sabit düzeyli permeametre, porozlu sonda ve buna benzer BAT aleti, açık tek halkalı infiltrometre, açık çift halkalı infiltrometre, kapalı tek halkalı infiltrometre, kapalı çift halkalı infiltrometre, hava girişli permeametre ve lysimetre tavaıdır. Her bir permeametrenin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Boutwell permeametresi özellikle yatay ve düşey geçirimsizlik katsayısının ölçümü için uygundur. Sondaj deliği

açılarak veya porozlu sondaj ile oluşturulan permeametreler ile ölçümler daha hızlıdır, fakat nispeten küçük bir zemin hacminde etkilidir. Diğer permeametreler ile geniş bir zemin hacmi permeabilite deneyine tabi tutulabilir, bilhassa kapalı çift halkalı infilitrometre ve Iysimetre, çok yönlü kullanımı olan geçirimsizlik deney aletleridir (Yıldız, 1998).

### 1.10.1.3. Geçirimsizlik Katsayısının Ampirik Olarak Belirlenmesi

Zeminlerin hidrolik geçirimsizlik katsayılarını belirlenmesi için geliştirilmiş ampirik yöntemler bulunmaktadır. Burada bazı ampirik yöntemler verilecektir.

Taylor (1948), permeabilite katsayısını farklı permeametrelere bağlı olarak, geçirimsiz bir ortamda akışın

$$k = \frac{c \cdot D_s^3 S^3 \gamma}{\mu(1 + e)} \quad (1.14)$$

eşitliği ile ifade edilebileceğini belirtmiştir (Uzuner, 1998). Burada;

c : Şekil faktörü

$D_s$  : Efektif dane çapı

$\gamma$  : Akışkanın birim hacim ağırlığı

S : Doygunluk derecesi

$\mu$  : Akışkanın vizkozitesi

e : Boşluk oranı

anlamındadır. Taylor tarafından önerilen denklem kohezyonsuz zeminler için oldukça iyi sonuçlar vermesine karşın, killi zeminlerde geçerli olmamaktadır. Yine de denklemdeki bazı faktörler, zeminlerin geçirimsizliğini anlamak açısından önemlidir (Uzuner, 1998).

Hazen, ince ve üniform kumlarda geçirimsizlik katsayısının,

$$k = 100D_{10}^2 \quad (1.15)$$

ifadesi ile gerçeğe yakın olarak hesaplanabileceğini bulmuştur (Lambe ve Whitman, 1969). Burada efektif çap  $D_{10}$  (cm),  $k$  (cm/sn) olarak verilmiştir. Ancak bu eşitlik diğer daneli zeminlerde dahi geçerli olmamaktadır (Uzuner, 1998).

Cassagrande, ince ve orta irilikteki temiz kumlar için,

$$k = 1.4e^2 k_{0.85} \quad (1.16)$$

bağıntısını önermiştir. Burada  $k$ ,  $e$  boşluk oranına sahip temiz kumun permeabilite katsayısı,  $k_{0.85}$  ise  $e=0.85$  iken aynı kumun hidrolik geçirimsizlik katsayısıdır (Aytekin, 2004).

Samarasinge vd. (1982) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda normal konsolide killerin geçirimsizlik katsayıları için şu bağıntıyı önermişlerdir;

$$k = C_3 \frac{e^n}{1+e} \quad (1.17)$$

burada  $C_3$  ve  $n$  sabit birer katsayı olup deneysel olarak belirlenir (Aytekin, 2004). Bu eşitlik aşağıdaki gibi de olabilmektedir.

$$\log[k(1+e)] = \log C_3 + n \log(e) \quad (1.18)$$

Herhangi bir kil zemin için permeabilite katsayısının,  $k$ , boşluk oranı  $e$  ile değişimi biliniyorsa  $k(1+e)$  düşey ekseninde,  $e$  yatay ekseninde olmak üzere logaritmik bir grafik çizilir. Elde edilen doğrunun düşey ekseni kestiği değer  $C_3$  ve eğim  $n$  olarak alınır (Aytekin, 2004).

Daha sonra yapılan araştırmalarda, geçirimsizlik katsayısının zeminin dane dağılımına, boşluk oranına, dokusuna, bileşimine ve doygunluk derecesine bağlı olduğu bulunmuş ve geçirimsizlik Kozeny-Carman denklemiyle doygun durumda,

$$k = \frac{1\rho_w e^3}{\tau S^2 \nu (1+e)} \quad (1.19)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada  $\tau$  suyun ortamda ne denli akım yönünde hareket ettiğini gösteren çapraşıklık faktörü, S zemin danelerinin özgül yüzey alanı, v deneyin yapıldığı anda suyun viskozitesini,  $\rho_w$  suyun yoğunluğunu, e boşluk oranını göstermektedir (Lambe ve Whitman, 1969).

Daneli zeminlerin geçirimsizlik katsayısı barajlarda ve arıtma tesislerinde düşük maliyetli filtre gereci olarak kullanılmaları sebebiyle de önem taşımaktadır. Bundan dolayı, zeminlerin geçirimsizlik katsayılarının önceden bilinmesi faydalı olacaktır.

#### 1.10.1.4. Geçirimsizlik Katsayısının Bağlı Olduğu Etmenler

Geçirimsizlik katsayısı 'k', başlıca şu etmenlere bağlıdır;

**a)** Zeminin ortalama dane çapına bağlı olup, kabaca dane çapının karesi ile orantılıdır (Uzuner, 1998).

**b)** 'k', zeminin boşluk oranına bağlı olup, boşluk oranının aşağıdaki ifadeleri ile orantılıdır (Uzuner, 1998).

**c)** 'k', boşluk sıvısının (suyunun) birim hacim ağırlığı ile doğru orantılı, sıvının viskozitesi ile ters orantılıdır. Muskat, fiziksel permeabilite ( $k_p$ ) diye, boşluk sıvısının özelliklerinden bağımsız olan ve sadece boşluklu ortamın fiziksel durumuna bağlı bir terim tanımlamıştır (Uzuner, 1998).

$$k_p = k \cdot \frac{\eta}{\gamma_{su}} \quad (1.20)$$

k : Boşluk sıvısıyla boşluklu ortamın (zeminin) geçirimsizlik katsayısı (Darcy geçirimsizlik katsayısı)

$\eta$  : Boşluk sıvısının viskozitesi

anlamındadır. Suyun birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişmesi ihmal edilebilirken, viskozitenin sıcaklıkla değişmesi önemlidir (Uzuner, 1998).

**d)** Zeminde danelerin dizilişi ve tabakalaşmasına bağlıdır. k, aynı boşluk oranında; zemin danelerinin dizilişine, zeminin oluşumuna veya sıkıştırılmasına bağlı olarak farklı olabilir. Sonuçta, aynı zemin, yatay ve düşey yönlerde farklı geçirimsizlik katsayılarına

(anizotropik zemin) sahip olabilir. Örneğin; yatay doğal bir tabakada, genellikle yatay doğrultudaki geçirimsizlik katsayısı düşey doğrultudakinden daha büyüktür (Uzuner, 1998).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Çalışmanın amacı, geçirimsiz şilte oluşturulmasında farklı oranlardaki kum-bentonit ve kireç karışımlarıyla hazırlanan örneklerin ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kaldıkları takdirde hidrolik geçirimsizliklerindeki ve şişme özelliklerindeki değişimi incelemektir. Bu amaç için farklı oranlarda kum-bentonit ve kireç karışımları hazırlanmış ve her bir karışım için geoteknik özelliklerin belirlenmesi deneylerinin yanı sıra düşen düzeyli geçirimsizlik ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Her örnek üzerinde beş ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmış ve her çevrim sonunda geçirimsizlik katsayısı ve şişme basıncı değerleri belirlenmiştir.

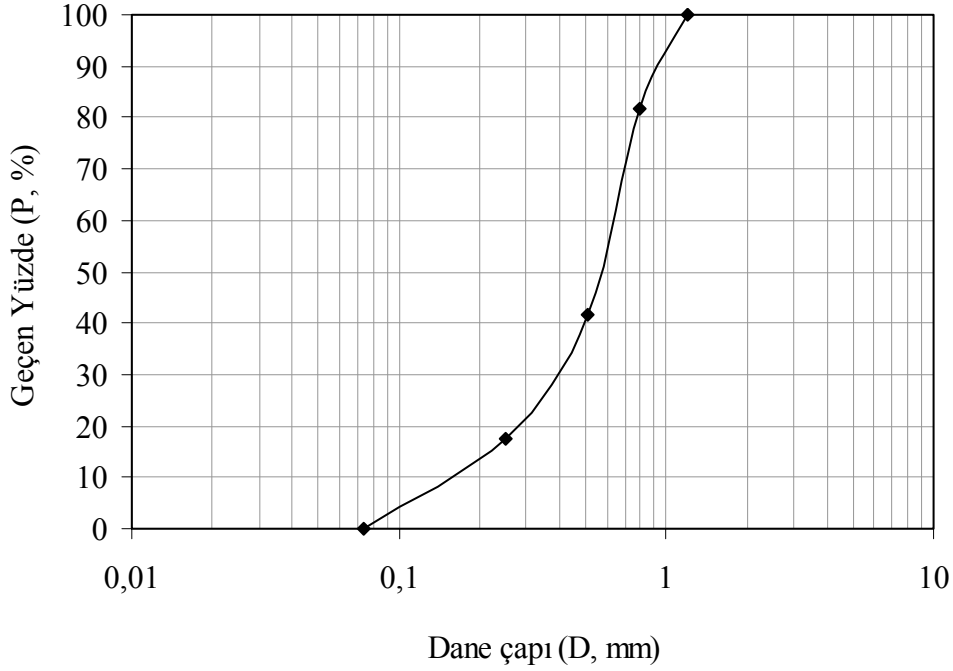
Kum-bentonit karışımlarının katı atık depolama alanlarında kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda bentonit oranı %20 ve 50 arasında seçilmiştir (Wiebe vd., 1998; Tang vd., 2002; Komine ve Ogata, 2003). Sonuçların mukayese edilebilmesi ve uygulamaya taşınabilir olması açısından bu çalışmada; granüler zemine katılan bentonit miktarı toplam kuru karışım ağırlığının %(20, 30, 40 ve 50)'si olarak seçilmiştir. Kireç miktarları ise yapılan başlangıç kireç yüzdesi deneyleri sonucuna göre %(0, 1, 2 ve 3) olarak belirlenmiştir.

### **2.1. Malzemeler**

Deneylerde kullanılan ana malzemeler, kum ve toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak kullanılan bentonit ve kireçtir. Malzemelere ait özellikler aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

#### **2.1.1. Kum**

Çalışmada kullanılan kumun granülometri eğrisi Şekil 2.1'de verilmiştir. Dane boyutu 0.08-1.19 mm (16-200 No'lu elek arası) arasındaki kum yıkandıktan sonra elenerek deneylerde kullanılmıştır. Uniformluk sayısı ( $C_u$ ) 4, eğrilik katsayısı ( $C_g$ ) ise 1.749'dur. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)'ye göre kullanılan kumun zemin sınıfı kötü derecelendirilmiş kum (SP) dur.



Şekil 2.1. Deneyselerde kullanılan kumun granülometri eğrisi

### 2.1.2. Bentonit

Deneysel çalışmada kullanılan bentonit, Çankırı Karakayalar ocağından temin edilmiştir. Malzemenin dane yoğunluğu (örneğin 24 saat süreyle piknometre şişesinde şişmesine izin verildiği durumda)  $1.04 \text{ Mg/m}^3$ , likit limiti yaklaşık %518 ve plastisite indisi de yaklaşık %478'dir. Üretici firma tarafından temin edilen malzemeye ait kimyasal özellikler Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan bentonitin kimyasal özellikleri

İçerik	Ağırlıkça %
SiO <sub>2</sub>	60.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.05
CaO	2.75
MgO	2.1
Na <sub>2</sub> O	2.7
K <sub>2</sub> O	0.95
Kızdırma Kaybı	8.8

### 2.1.3. Kireç

Bu çalışmada, piyasadan alınan ticari kireç kullanılmıştır. Kireç, havadaki kalsiyum dioksit (CO<sub>2</sub>)'in karbonat etkisini engellemek için plastik bir kaptan depolanmıştır. Üretici firma tarafından temin edilen malzemeye ait kimyasal özellikler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan kirecin kimyasal özellikleri

İçerik	Ağırlıkça %
SiO <sub>2</sub>	2.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.43
CaO	69.85
MgO	0.76
Na <sub>2</sub> O	0.83
K <sub>2</sub> O	0.08
Kızdırma Kaybı	24.45

### 2.2. Deney Yöntemi

İnceleme kapsamında, bentonitin geoteknik özellikleri ve kum-bentonit karışımları için başlangıç kireç yüzdeleri belirlenmiştir. Kuma toplam kuru karışım ağırlığının %(20, 30, 40 ve 50)'si oranlarında bentonit ve başlangıç kireç yüzdesi deney sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda belirlenen %(0, 1, 2 ve 3) oranlarında kireç eklenmesi ile karışımlar hazırlanmıştır. Kompaksiyon deneyleri ile her bir karışıma ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Daha sonra direkt kesme, geçirimsizlik ve şişme basıncı deney numuneleri her bir karışım oranı için optimum su muhtevalarında, standart proktor enerjisinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Direkt kesme deneyine ait numuneler, 20 mm yükseklikli ve 60 mm × 60 mm boyutlu kare kalıplara alınmıştır. Geçirimsizlik deneyine ait numuneler, 100 mm çaplı ve 130 mm yükseklikli rijit duvarlı kalıplara alınmıştır. Şişme basıncı deney numuneleri ise, 50 mm çaplı ve 20 mm yükseklikli halkalara yerleştirilmiştir.

Belirlenen kum-bentonit-kireç karışım oranlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanarak geçirimsizlik ve şişme basıncı deneyleri



yapılmıştır. Karışımların geoteknik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler aşağıda verilmiştir.

## **2.2.1. Bentonitin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi**

### **2.2.1.1. Dane Yoğunluğunun Belirlenmesi**

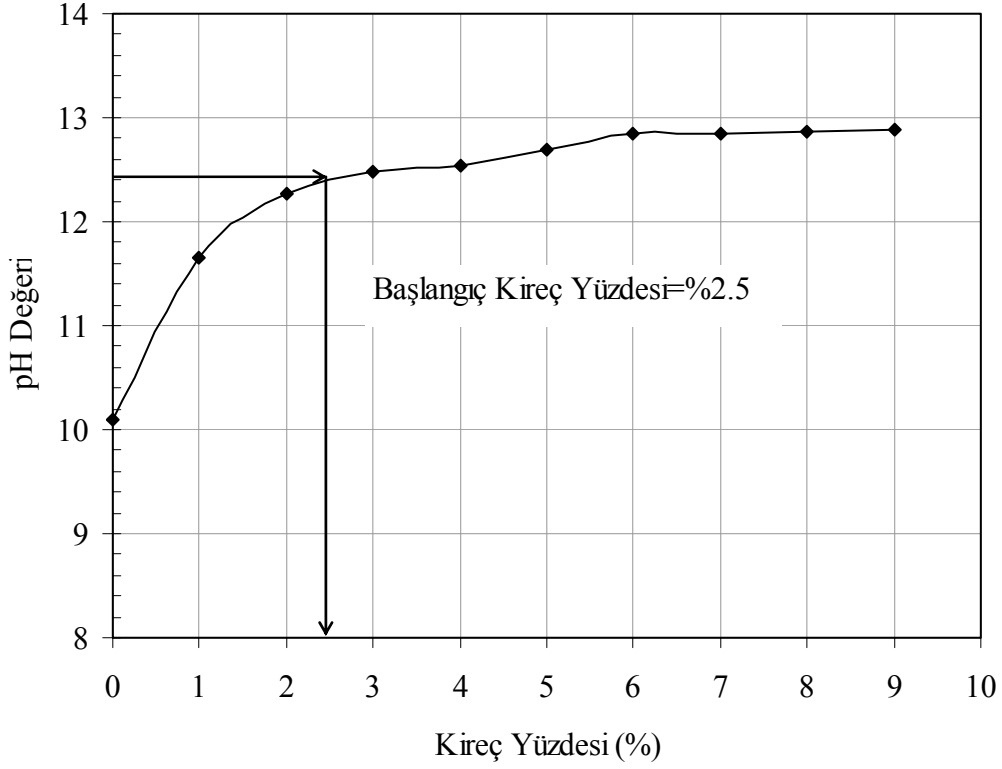
Dane yoğunluğu değerinin belirlenmesinde piknometre şişesi kullanılarak TS-1900 (zemin mekaniği laboratuvar deneyleri)'da belirtilen esaslara uygun olarak deneyler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan bentonit ve kuma ait dane yoğunlukları belirlenmiştir.

### **2.2.1.2. Kıvam (Atterberg) Limitlerinin Belirlenmesi**

Bentonitin, likit limit ve plastik limit değerleri laboratuvarında TS-1900'a göre deneysel olarak belirlenmiştir. Likit limit değeri Cassagrande yöntemiyle belirlenmiştir.

## **2.2.2. Başlangıç Kireç Yüzdesinin Belirlenmesi**

TS 6166'da, pH değeri efektif hidrojen iyonu konsantrasyonunun negatif on tabanlı logaritması ( $pH = -\log H^+$ ) olup, elektrometrik olarak ölçülen değer olarak tanımlanmaktadır. Başlangıç kireç oranının belirlenmesi için, 40 nolu elekten geçen kuru zemin % (0, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7) oranlarında hidrate kireçle karıştırılır. Her bir kireç yüzdesi için 20 gramlık zemin+kireç karışımı hazırlanır. 100 ml saf su ile çözelti hazırlanır ve homojenliği sağlamak için karışım iyice karıştırılır. Yaklaşık 1 saat sonra iyice karıştırılan çözeltinin pH değeri ölçülür. Her bir kireç yüzdesi için ölçülen pH değerleriyle çizilen tipik grafik Şekil 2.2'de görülmektedir. ASTM D 6276'da pH'ın yaklaşık 12.4 olduğu kireç yüzdesinin başlangıç kireç yüzdesi olarak alınabileceği ifade edilmektedir. Kireç-zemin karışımının pH değeri sıcaklığa bağlı olduğu için, deneyin 25°C oda sıcaklığında yapılmasına özen gösterilmelidir.



Şekil 2.2. Zemin-kireç karışımında kireç oranının pH değerine etkisi

### 2.2.3. Kum-Bentonit-Kireç Karışımlarının Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 2.2.3.1. Kompaksiyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Kompaksiyon parametreleri olan optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ ) ve maksimum kuru yoğunluk ( $\rho_{kmak}$ ) değerleri kompaksiyon (standart proctor) deneyleriyle (TS-1900) belirlenmiştir. On altı farklı karışım üzerinde standart proktor deneyi yapılmıştır.

#### 2.2.3.2. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi

Kayma direnci parametreleri olan kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) ve görünür kohezyon ( $c$ ) değerleri direkt kesme (kesme kutusu) deneyleriyle (TS-1900) belirlenmiştir. Deneylerde yükleme hızı 1 mm/dak olarak uygulanmış ve her bir örnek 49, 98 ve 196 kPa düşey gerilme altında kesilmiştir.

#### 2.2.4. Şişme Basıncının Belirlenmesi

Bir boyutlu şişme ve oturma potansiyellerinin belirlenmesi için ASTM D 4546'da Metot A, B ve C olarak üç farklı yöntem sunulmuştur. Bu yöntemler kısaca aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

-Metot A:

Bu metotta; optimum su muhtevasında statik kompaksiyon kalıbında sıkıştırılan zemin 20 mm yüksekliğinde, 75 mm veya 50 mm çapındaki kalıplara alınarak hazırlanır. Hazırlanan zemin örneği suya doymun duruma getirilir. 1 kPa'lık düşey basınç altında birincil şişme tamamlanincaya kadar yanıl deformasyon engellenerek düşey şişmeye izin verilir. Değişik zamanlarda deformasyonlar kaydedilir. Okumaların 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0 ve 30.0 dakika ve 1, 2, 4, 8, 24, 48 ve 72 saatte yapılması genellikle yeterli olur. Birincil şişme meydana geldikten sonra ilk boşluk oranı ya da ilk yükseklik elde edilinceye kadar yüklenerek şişme basıncı belirlenir. Yükleme için; genellikle 5, 10, 20, 40, 80 kPa gibi düşey basınç kademeleri uygulanır. Örnek yeniden ilk boşluk oranına ya da yüksekliğe sıkışana kadar basınç artışı sürdürülür. Her yükleme kademelerinin süreleri eşit olmalı ve bu süre birincil konsolidasyonu %100 sağlamalıdır.

Bu deney metoduyla; serbest şişme, şişme basıncına kadar olan düşey basınçlar altındaki şişme yüzdesi ölçülür. Ayrıca şişme basıncı belirlenir.

-Metot B:

Bu metotta; Metot A'daki gibi hazırlanan ve konsolidasyon aletine yerleştirilen zemin örneğine, konsolidasyon aletinin içine su gönderilmeden önce, oturma basıncını aşan düşey basınç uygulanır. Düşey basıncın büyüklüğü genellikle yapı ağırlığına veya arazideki aşırı düşey basınca eşit alınır. Fakat deney sonuçlarının uygulanmasına bağlı olarak değişebilir. Düşey basıncın uygulanmasından 5 dakika sonra deformasyon okuması yapılır. Birincil şişme tamamlanincaya kadar Metot A'da bahsedilen zaman aralıklarında kaydedilen deformasyon okumasından sonra örnek hızlı bir şekilde suya doymun duruma getirilir. Bu durum, şişmeye, büzülmeden sonra şişmeye, büzülmeye veya şişmeden sonra büzülmeye neden olabilir. Şişme veya oturma miktarı, hareket önemsiz hale geldikten sonra yani birincil şişme tamamlandıktan sonra uygulanan basınçtan ölçülür.

Bu deney metoduyla; şişme basıncına ulaşılanı kadar, genellikle tahmin edilen arazi basıncına veya diğer düşey basınca eşit olan düşey basınç için oturma ölçülebilir. Ayrıca şişme yüzdesi ile şişme basıncı belirlenir.

-Metot C:

Bu metotta; şişme basıncını elde etmek için Metot A'da anlatıldığı gibi hazırlanan zemin örneğine düşey basınç uygulanır ve 5 dakika içerisinde şişme basıncı veya tahmin edilen arazi basıncına eşit düşey basınç ( $\sigma_1$ ) uygulanır.  $\sigma_1$  uygulanmasından 5 dakika sonra deformasyon okunur ve örnek suya doygun duruma getirilir. Sonra, düşey basınçtaki ayarlamalarla örneğin yüksekliği sabit tutulur.

Şişmenin engellenmesi sağlanıncaya kadar düşey basınç artışı uygulanır. Doyurulan örneklerin deformasyon okumalarındaki değişim 0,005 mm ile 0,010 mm arasında tutulur. Metot A'da ifade edilen örnek yüklemesine göre şişme eğilimi ilerlemez. Yükleme kademeleri, konsolidasyon eğrisi üzerindeki eğriliğin maksimum noktasını tayin etmeye ve bakir kompaksiyon eğrisinin belirlenmesine yetecek kadar olmalıdır.

Bu deney metoduyla; şişme basıncı ve ön konsolidasyon basıncı belirlenebilir. Ayrıca uygulanan düşey basınç oranı dahilinde örnekte meydana gelen oturma ve şişme yüzdeleri de belirlenir.

Bu çalışmada, şişme basınçları Metot C'ye göre belirlenmiştir. Kuma toplam kuru karışım ağırlığının %(20, 30, 40 ve 50)'si oranlarında bentonit ve başlangıç kireç yüzdesi deneylerinden belirlenen %(1, 2 ve 3) kireç miktarlarının eklenmesi ile optimum su muhtevasında, standart proktor enerjisinde hazırlanan her bir numune üzerinde şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca %(20, 30, 40 ve 50) bentonit oranlarının her biri için kireç katkısız olarak hazırlanan örnekler üzerinde de şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Her bir ıslanma-kuruma çevriminden sonra her bir karışım üzerinde şişme basıncı deneyleri, sonuçların doğruluğunun kontrol edilebilmesi amacıyla iki ayrı örnek üzerinde yapılmıştır.

Deneyler, optimum su muhtevasında, standart proktor enerjisinde sıkıştırılarak 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğindeki konsolidasyon halkalarına yerleştirilen örnekler üzerinde konsolidasyon deney aletinde yapılmıştır. Her ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında, şişme basıncı deney süresi 5 ila 7 gün arasında değişmiştir. Her örnek üzerinde beş ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır. Uygulanan beş ıslanma-kuruma çevrimiyle, her bir örneğin 1 ila 1,5 ay arasındaki şişme değişimlerinin incelenmesi sağlanmıştır.

### 2.2.5. Geçirimsizlik Katsayılarının Belirlenmesi

Geçirimsizlik (permeabilite) katsayısı, düşen düzeyli geçirimsizlik deney yöntemiyle (TS-1900) belirlenmiştir. On altı farklı karışım üzerinde düzenli düzeyli geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır.

Geçirimsizlik deneyleri direkt araziden alınan örnekler üzerinde yapılabileceği gibi laboratuarda hazırlanmış örnekler üzerinde de yapılabilir. Bu çalışmada geçirimsizlik deneyleri laboratuarda, optimum su muhtevalarında, standart proktor enerjisinde rijit duvarlı permeametreye yerleştirilmiş örnekler üzerinde yapılmıştır. Deneyler her bir ıslanma-kuruma çevrimi için tekrarlanmıştır. Her bir ıslanma-kuruma çevriminden sonra her bir karışım üzerinde geçirimsizlik deneyleri, sonuçların doğruluğunu kontrol etmek amacıyla iki ayrı örnek üzerinde yapılmıştır. Deneyler, optimum su muhtevalarında, standart proktor enerjisinde sıkıştırılarak 100 mm çapında ve 130 mm yüksekliğindeki rijit duvarlı permeametreye yerleştirilen örnekler üzerinde yapılmıştır. Her ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında, geçirimsizlik deney süresi 2 ila 2,5 ay arasında değişmiştir. Uygulanan beş ıslanma-kuruma çevrimiyle, her bir örneğin 1 ila 1,5 yıl arasındaki geçirimsizlik değişimlerinin incelenmesi sağlanmıştır. Şekil 2.3’de geçirimsizlik katsayılarının belirlenmesi için kullanılan düşen düzeyli geçirimsizlik deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.3. Düşen düzeyli geçirimsizlik deney düzeneği

### 2.2.6. İslanma-Kuruma Çevrimi Uygulanması

İslanma-kuruma çevrimi, ıslak zemin örneğinin en az ilk su muhtevasına (optimum su muhtevasına) kadar kuruduktan sonra tekrar şişmesi için yeniden ıslanma sürecidir. Çalışmada örnek kurutma sıcaklığı, hem doğa şartlarını temsil etmesi hem de yüksek sıcaklıktan bentonitin şişme özelliğinin etkilenmemesi için  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada; üzerinde geçirimsizlik deneyi yapılan örnek, deney tamamlanınca  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde 48 saat kurutulmuştur. Bir sonraki ıslanma çevriminden önce örnekler dikkatli bir şekilde etüvden çıkartılıp tartılarak su muhtevalarının ilk su muhtevalarına yani optimum su muhtevalarına kadar düşüp düşmediği kontrol edilmiştir. Bu kontrol işlemi, başlangıç ağırlıkları bilinen numunelerin hassas teraziyle tartılmasıyla gerçekleştirilmiştir. En az ilk ağırlıklarına yani ilk su muhtevalarına (optimum su muhtevası) kadar kuruyan numuneler daha sonra yeniden permeametreye yerleştirilerek geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Çevrimler boyunca deney değerlerinde sabitleme meydana gelinceye kadar ıslanma-kuruma çevrimleri tekrarlanmıştır. Bu sabitleme, genellikle dördüncü çevrimden sonra elde edildi. Bu deneyin en büyük avantajı, aynı örnekler üzerinde deneylerin tekrarlanabilmesidir.

Üzerinde şişme basıncı deneyi yapılan örnek ise, deney tamamlandıktan sonra  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde 24 saat kurutulmuştur. Şişme basıncı için hazırlanan numunelerin çap ve yükseklikleri geçirimsizlik için hazırlanan numunelere göre daha küçüktür. Aynı sıcaklıkta kurutmaya bırakılan numune, ilk su muhtevası (optimum su muhtevası) değerine 48 saatten daha kısa sürede ulaşmıştır. Bu nedenle, şişme basıncı deney örnekleri için etüve kurutma süresi (örneğin en az ilk su muhtevasına kadar kurummasını sağlayan süre) 24 saat olarak belirlenmiştir.

### 2.3. Deney Programı

Çalışmada, ilk olarak deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Sonra, Başlık 2.2.2'de anlatıldığı gibi %(20, 30, 40 ve 50) bentonitli kum-bentonit karışımları için başlangıç kireç yüzdeleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, %(20, 30, 40 ve 50) bentonit yüzdeleri için belirlenen başlangıç kireç yüzdeleri sırasıyla %1.2, 1.3, 1.8 ve 2.5'dir. Deneyler, optimum kireç oranını belirlemek için önceden belirlenen başlangıç kireç yüzdelerinin biraz altında ve biraz üstünde gerçekleştirilmiştir.

Karışımlar, toplam ağırlığın %(20, 30, 40 ve 50) oranlarında bentonit ve %(0, 1, 2 ve 3) oranlarında kireç bileşenlerinden oluşturulmuştur. Her bir karışım örneği üzerinde standart kompaksiyon, şişme basıncı ve geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Şişme basıncı ve geçirimsizlik deney örnekleri üzerinde beş ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır. Her çevrim sonunda her bir karışıma ait şişme basıncı ve geçirimsizlik katsayısı değerleri belirlenmiştir. Geçirimsizlik ve şişme basıncı deneyleri sonuçların doğruluğunun kontrol edilebilmesi amacıyla ikişer defa tekrarlanmıştır. Tablo 2.3 yapılan deneylerin özetini göstermektedir.

Tablo 2.3. Yapılan deneylerin özeti

Karışımlar	Yapılan Deneyler									
	Elek Analizi	Likit limit	Plastik Limit	Yoğunluk	Başlangıç Kireç Yüzdesinin Belirlenmesi	Standart Proctor	Geçirimsizlik	Şişme Basıncı	Islanma-Kuruma Çevrimlerinden Sonra Geçirimsizlik	Islanma-Kuruma Çevrimlerinden Sonra Şişme Basıncı
Kum	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Bentonit	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-
%20 Bentonit	-	-	-	-	1	1	2	2	10	10
%20 Bentonit %1 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%20 Bentonit %2 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%20 Bentonit %3 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%30 Bentonit	-	-	-	-	1	1	2	2	10	10
%30 Bentonit %1 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%30 Bentonit %2 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%30 Bentonit %3 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%40 Bentonit	-	-	-	-	1	1	2	2	10	10
%40 Bentonit %1 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%40 Bentonit %2 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%40 Bentonit %3 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%50 Bentonit	-	-	-	-	1	1	2	2	10	10
%50 Bentonit %1 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%50 Bentonit %2 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10
%50 Bentonit %3 Kireç	-	-	-	-	-	1	2	2	10	10



### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

#### 3.1. Tanımlama ve Sınıflandırma Deneyleri

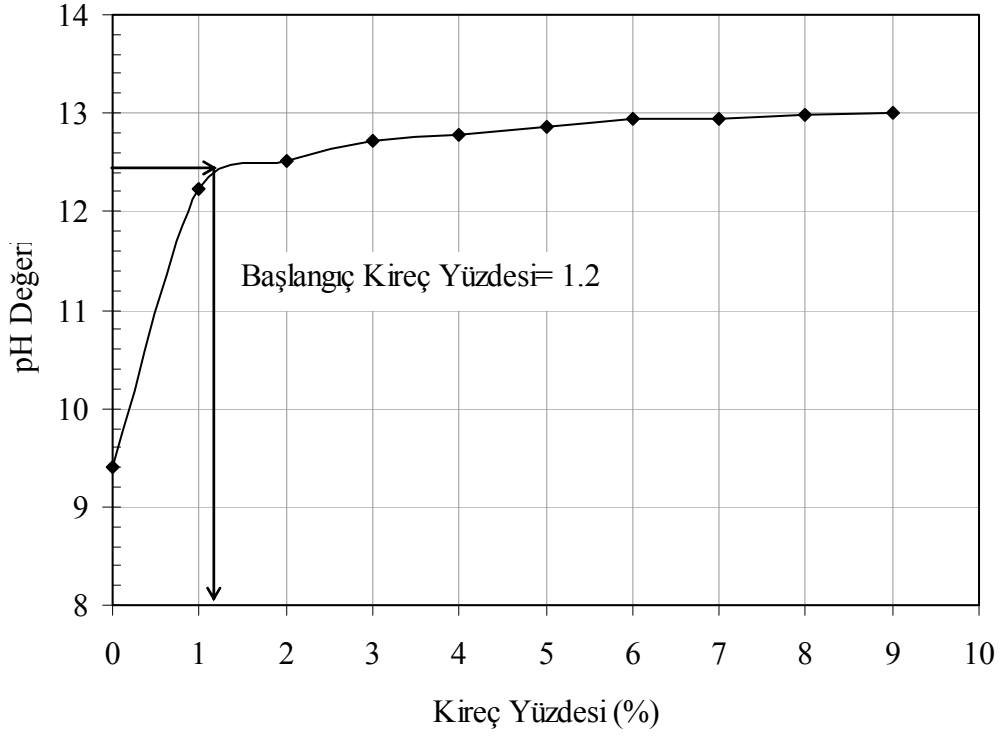
Çalışmada kullanılan malzemelerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için zemin mekaniği laboratuvarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, malzemelerin dane yoğunlukları, kumun dane dağılım (granülometri) eğrisi ve bentonitin kıvam limitleri belirlenmiştir. Kumun dane dağılım (granülometri) eğrisi Şekil 2.1’de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda belirlenen dane yoğunluğu, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kum ve bentonite ait bazı fiziksel özellikler

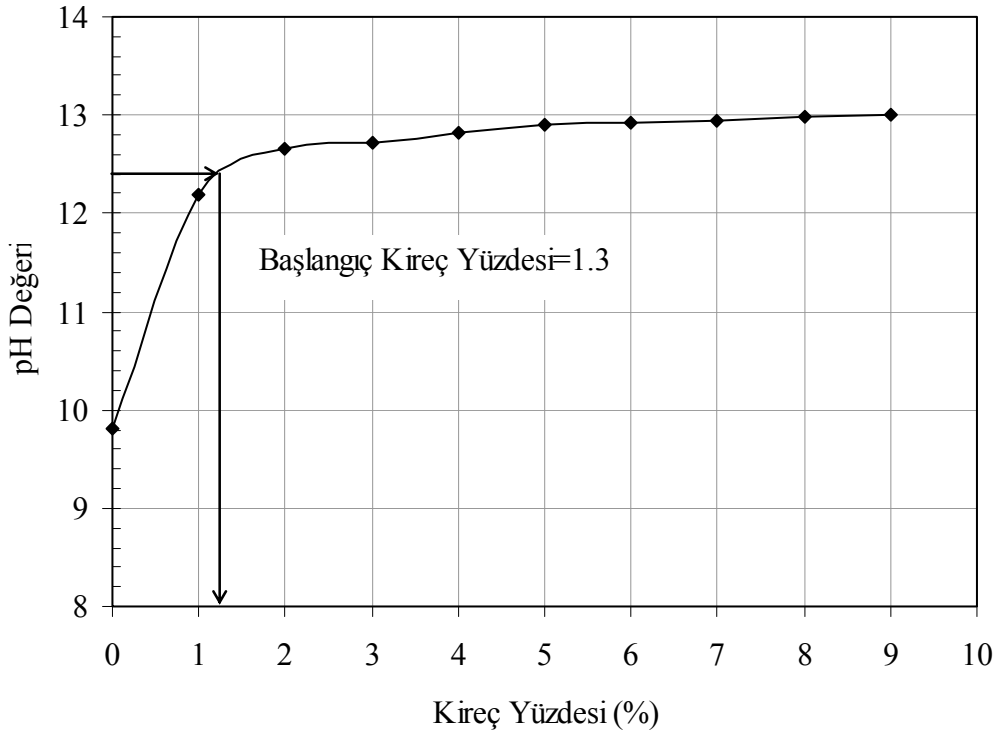
Malzeme	Dane Yoğunluğu (Mg/m <sup>3</sup> )	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Kum	2.66	-	-	-
Bentonit	1.04	518	40	478

#### 3.2. Karışımların Başlangıç Kireç Yüzdelerinin Tayini Deneyleri

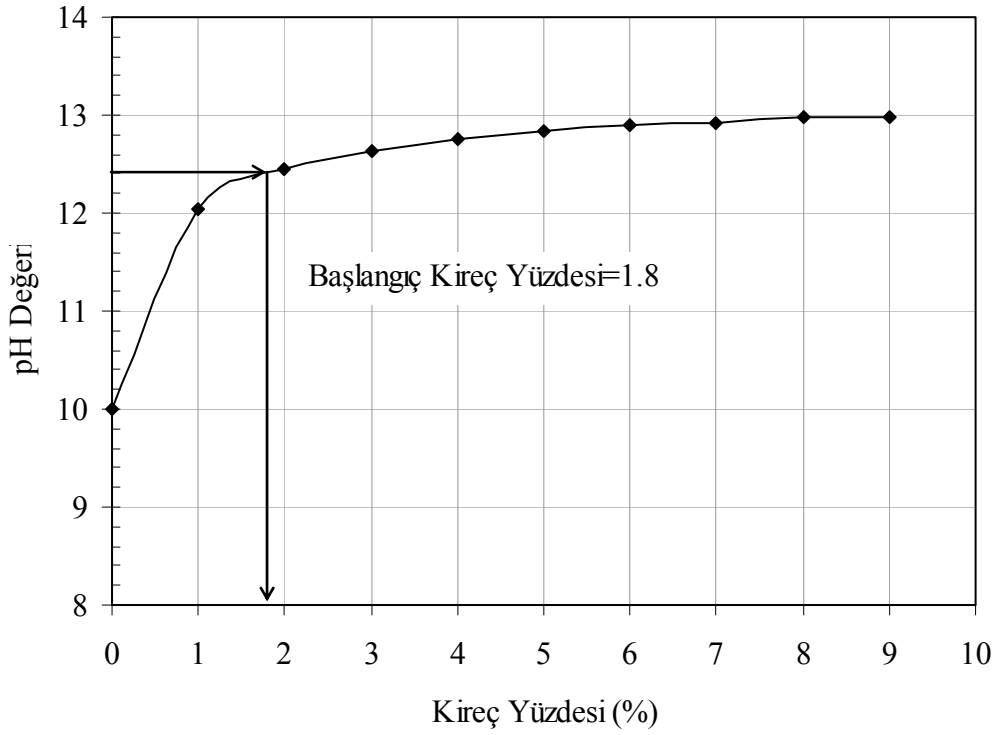
Çalışmada kullanılacak kireç yüzdesinin belirlenmesine yardımcı olması için %(20, 30, 40 ve 50) bentonit oranlarıyla hazırlanan kum-bentonit karışımlarının her biri için Bölüm 2.2.2’de anlatıldığı gibi başlangıç kireç yüzdesi belirleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, her bir karışım için kireç yüzdesine karşılık ölçülen pH değerleriyle grafikler çizilmiştir. Şekil 3.1-3.4 sırasıyla %(20, 30, 40 ve 50) bentonit katkılı kum-bentonit karışımları için kireç yüzdelerine karşılık gelen pH değerlerinin değişimini göstermektedirler. Grafik üzerinde, pH’ın yaklaşık 12.4 olduğu kireç yüzdesi başlangıç kireç yüzdesi olarak tercih edilmiştir. Deneyler sonucunda her bir kum-bentonit karışımı için toplam kuru karışım ağırlığının %1, 2 ve 3’ü oranlarında kireç ilavesinin kullanılmasına karar verilmiştir.



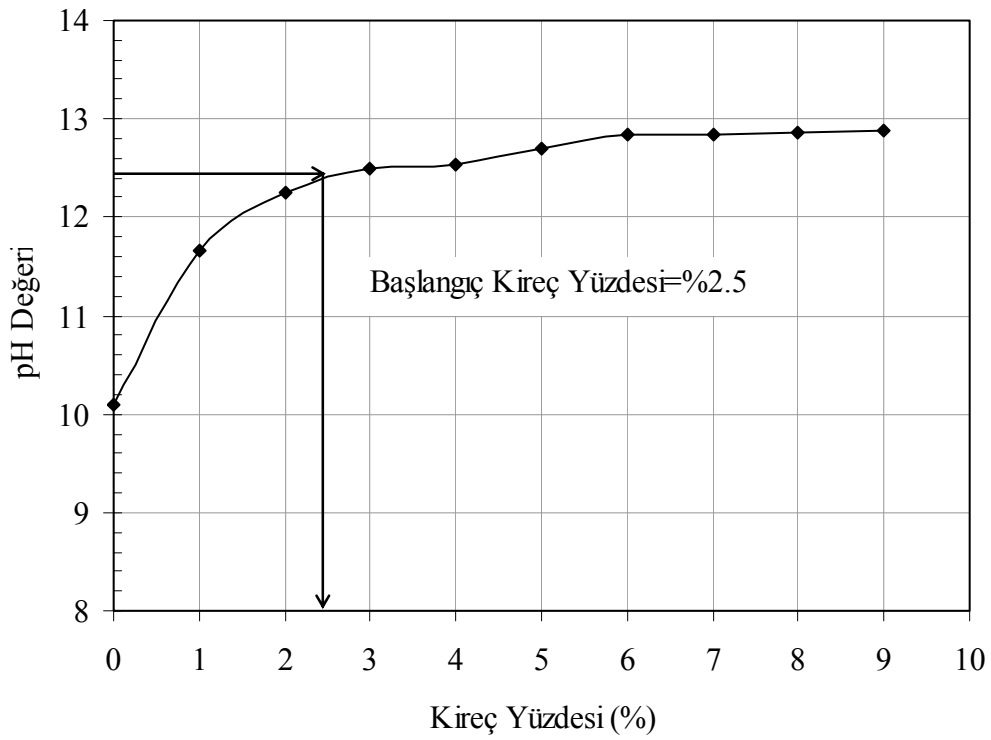
Şekil 3.1. % 20 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi



Şekil 3.2. % 30 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi



Şekil 3.3. % 40 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi



Şekil 3.4. % 50 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için kireç yüzdesine göre pH değerinin değişimi

Kum-bentonit karışımlarının başlangıç kireç yüzdesi değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre karışımdaki bentonit oranının artmasıyla başlangıç kireç yüzdesinin arttığı görülmektedir.

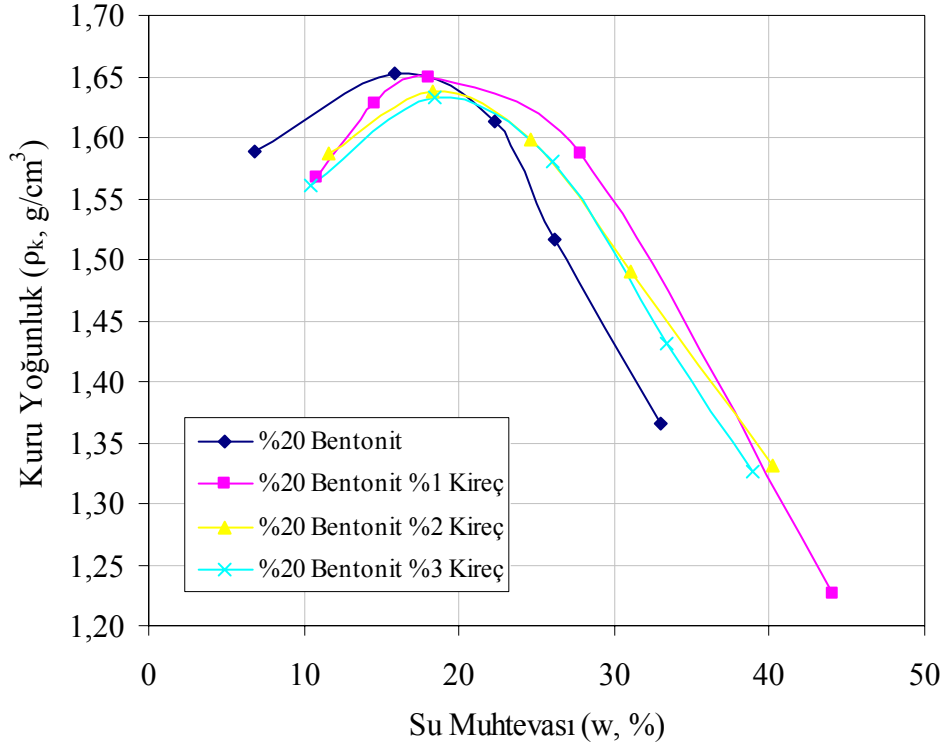
Tablo 3.2. Kum-bentonit karışımlarının başlangıç kireç yüzdesi değerleri

Bentonit Oranı (%)	Başlangıç Kireç Yüzdesi (%)
%20 Bentonit	1.2
%30 Bentonit	1.3
%40 Bentonit	1.8
%50 Bentonit	2.5

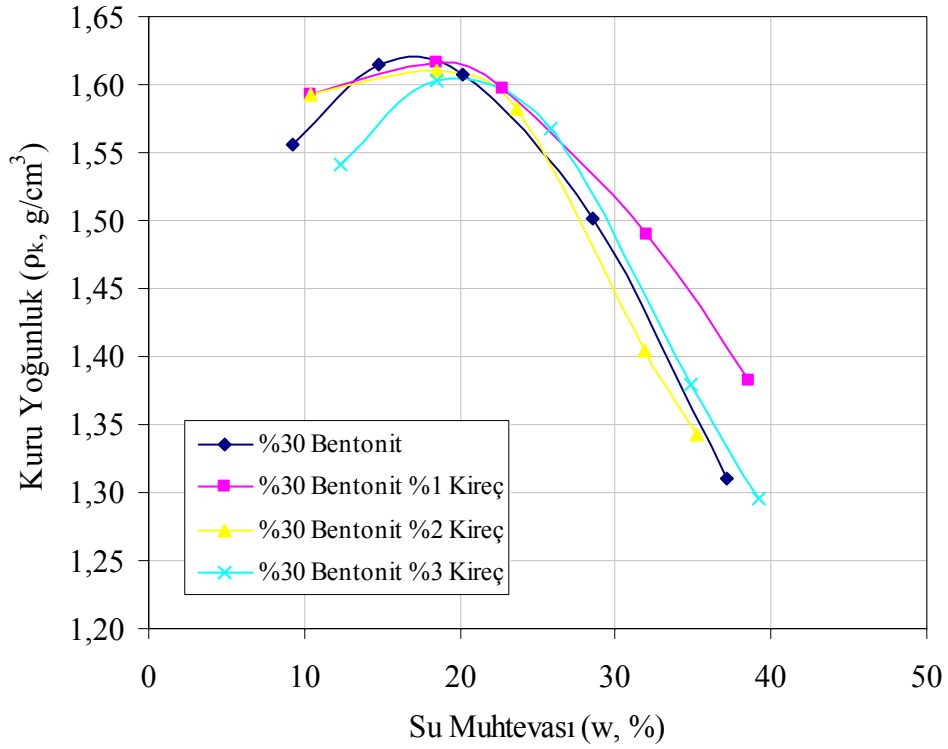
### 3.3. Kompaksiyon Deneyleri

Her bir karışım için optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ ) ve maksimum kuru yoğunluk ( $\rho_{kmax}$ ) değerleri laboratuarda TS-1900’a göre yapılan kompaksiyon (standart proctor) deneyleri ile belirlenmiştir. Deney sonuçlarıyla çizilen kuru yoğunluk ( $\rho_k$ )-su muhtevası ( $w$ ) grafikleri Ek 1’de gösterilmiştir (Ek Şekil 1.1-1.16). Elde edilen grafikler üzerindeki eğrilerin tepe noktaları belirlenerek bu noktaların düşey eksen üzerindeki izdüşüm değeri maksimum kuru yoğunluk ( $\rho_{kmax}$ ) değeri, yatay eksen üzerindeki izdüşüm değeri de optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ ) değeri olarak alınmıştır.

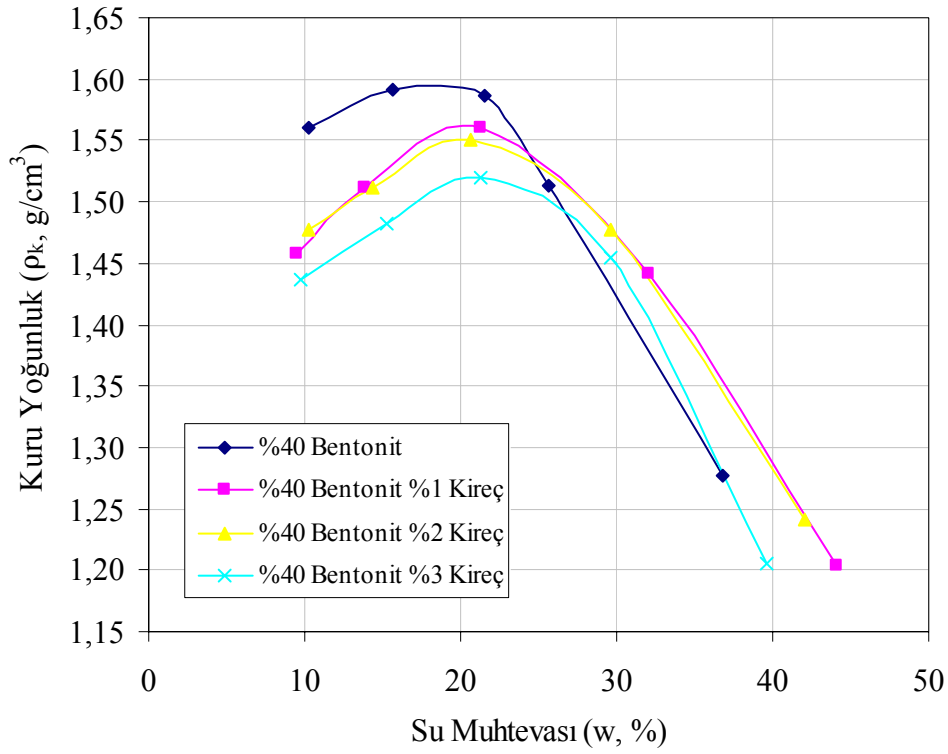
Kum-bentonit karışımları için hazırlanan  $\rho_k$ - $w$  grafikleri %20 bentonit oranı için Şekil 3.5’de, %30 bentonit oranı için Şekil 3.6’de, %40 bentonit oranı için Şekil 3.7’de ve %50 bentonit oranı için Şekil 3.8’de verilmiştir. Şekil 3.5-3.8, her bir kum-bentonit karışımının kireç katkısıyla optimum su muhtevalarındaki ve buna bağlı olarak maksimum kuru yoğunluklardaki değişimi göstermektedir.



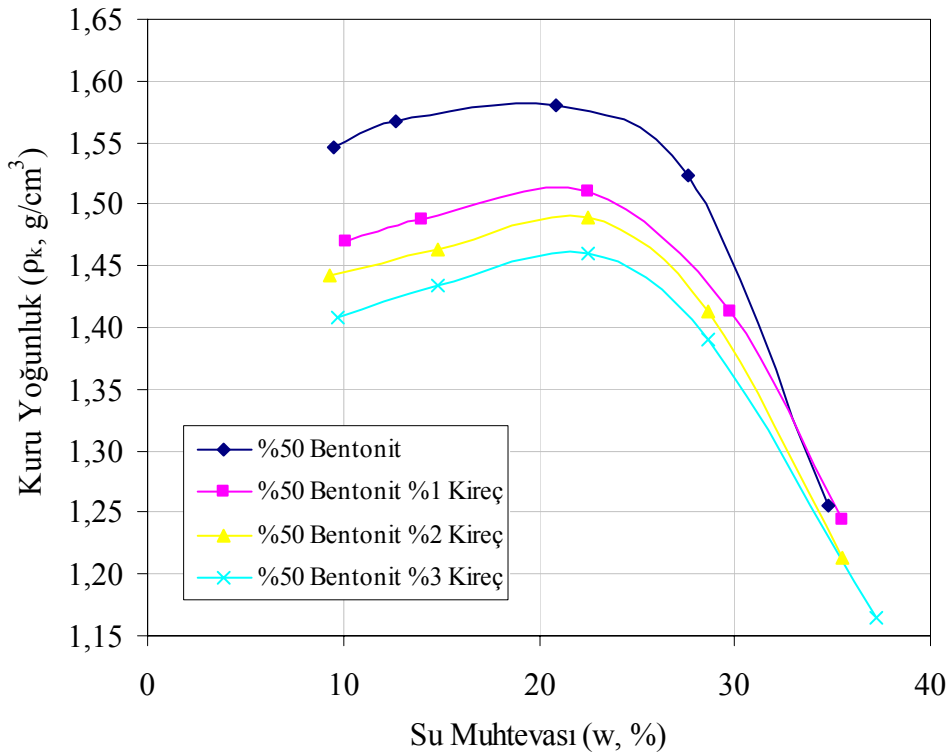
Şekil 3.5. %20 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi



Şekil 3.6. %30 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi



Şekil 3.7. %40 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi



Şekil 3.8. %50 bentonit oranlı kum-bentonit karışımlarında kireç katkısının kompaksiyon parametrelerine etkisi

Kum-bentonit ve kireç karışımlarının maksimum kuru yoğunluk ( $\rho_{kmax}$ ) ve optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ ) değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, karışımdaki bentonit muhtevasının artmasıyla maksimum kuru yoğunluğun azaldığı, optimum su muhtevasının ise arttığı görülmektedir. Bu durumun, karışımda daha yüksek yoğunluğa sahip kumun yerini daha düşük yoğunluğa sahip bentonite bırakmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca Şekil 3.5-3.8’de görüldüğü üzere, bentonit oranındaki artışla kompaksiyon eğrisi tipik (konkav) kompaksiyon eğrisinden yarı konkav bir kompaksiyon eğrisine dönüşmüştür.

Tablo 3.3. Kum-bentonit-kireç karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Bentonit ve Kireç Oranı (%)	Maksimum Kuru Yoğunluk ( $\rho_{kmax}$ , Mg/m <sup>3</sup> )	Optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ , %)
%20 Bentonit	1.65	16.1
%20 Bentonit %1 Kireç	1.65	18.0
%20 Bentonit %2 Kireç	1.64	18.2
%20 Bentonit %3 Kireç	1.63	18.2
%30 Bentonit	1.62	17.0
%30 Bentonit %1 Kireç	1.62	19.2
%30 Bentonit %2 Kireç	1.61	19.2
%30 Bentonit %3 Kireç	1.60	19.5
%40 Bentonit	1.60	18.0
%40 Bentonit %1 Kireç	1.56	20.0
%40 Bentonit %2 Kireç	1.55	20.2
%40 Bentonit %3 Kireç	1.52	20.5
%50 Bentonit	1.59	19.0
%50 Bentonit %1 Kireç	1.52	21.0
%50 Bentonit %2 Kireç	1.49	21.5
%50 Bentonit %3 Kireç	1.46	21.5

Dört bentonit oranı için hazırlanmış olan kum-bentonit karışımlarının kireç katkılı örneklerine ait sonuçlar incelendiğinde, kireç katkısının artmasıyla maksimum kuru yoğunlukta düşüş, optimum su muhtevasında ise artış meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara benzer olarak zemine kireç eklenmesinin optimum su

muhtevasını arttırdığı maksimum kuru yoğunluğu azalttığı birçok araştırmacı tarafından da tespit edilmiştir (Bozbey, 2004; El-Rawi ve Awad, 1981; Güney vd., 2007; Sargın, 1996).

### 3.4. Direkt Kesme Deneyleri

Her bir karışıma ait kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) ve görünür kohezyon ( $c$ ) değerleri laboratuarda yapılan direkt kesme (kesme kutusu) deneyleriyle (TS-1900) belirlenmiştir. Deneylerde yükleme hızı 1 mm/dak olarak uygulanmış ve her bir örnek 49, 98 ve 196 kPa düşey gerilme altında kesilmiştir. Deney sonuçlarıyla normal gerilme ( $\sigma$ )-kayma gerilmesi ( $\tau$ ) grafikleri ve yatay yer değiştirme ( $\Delta l$ )-kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ilişkileri çizilmiştir. Çizilen grafikler Ek 2’de verilmiştir. Normal gerilme ( $\sigma$ )-kayma gerilmesi ( $\tau$ ) eksen takımında deney sonuçları işaretlenip bir doğru geçirilmiştir. Doğrunun eğimi zeminin kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) değeri, doğrunun düşey eksenini kestiği nokta zeminin görünür kohezyon ( $c$ ) değeri olarak alınmıştır.

Metehan (1994) tarafından yapılan çalışmada, kireç katkısının bentonit ve kumlu karışımlarının kayma mukavemeti açılarını ve kohezyonlarını arttırdığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada, literatürle uyumlu olarak karışımdaki bentonit ve kireç oranlarının artmasıyla görünür kohezyon artmakta buna karşılık kayma mukavemeti açısı azalmaktadır. Kayma mukavemeti açılarındaki bu düşüş, numunedeki bentonit ve kireç oranlarındaki artışla kum oranının düşmesi ile açıklanabilir. Toplam kuru karışım ağırlığının %(20, 30, 40, ve 50) oranlarında bentonit ve %(0, 1, 2 ve 3) oranlarında kireç eklenmesiyle hazırlanan örneklerle ait kayma mukavemeti açısı ve görünür kohezyon değerleri Tablo 3.4’de verilmiştir.



Tablo 3.4. Kum-bentonit karışımlarına ait kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) ve görünür kohezyon (c) değerleri

Karışım Oranları	Görünür Kohezyon (c, kPa)	Kayma Mukavemeti Açısı ( $\phi$ , Derece)
%20 Bentonit	78	32
%20 Bentonit %1 Kireç	79	27
%20 Bentonit %2 Kireç	79	25
%20 Bentonit %3 Kireç	80	24
%30 Bentonit	81	22
%30 Bentonit %1 Kireç	81	20
%30 Bentonit %2 Kireç	83	19
%30 Bentonit %3 Kireç	83	18
%40 Bentonit	84	17
%40 Bentonit %1 Kireç	85	15
%40 Bentonit %2 Kireç	85	13
%40 Bentonit %3 Kireç	86	11
%50 Bentonit	87	12
%50 Bentonit %1 Kireç	87	10
%50 Bentonit %2 Kireç	87	9
%50 Bentonit %3 Kireç	87	8

### 3.5. Geçirimsizlik Deneyleri

Her bir karışım oranıyla hazırlanan örnekler üzerinde TS 1900'a uygun olarak düşen düzeyli geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Her bir karışım örneği üzerinde ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Islanma-kuruma çevrimlerine, ölçülen geçirimsizlik katsayısı değeri sabitleninceye kadar devam edilmiştir. Bu sabitlenme genellikle dördüncü çevrimden sonra elde edilmiş ve her bir örnek üzerinde beş ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır.

Sıcaklık artışıyla bentonitin şişme basıncında azalmalar olduğunu gösteren çalışmalar mevcut olup (Akcanca, 2004; Villar ve Lloret, 2004), Cho vd. (1999) tarafından 80°C'ye kadar ısıtılan sıkıştırılmış bentonitin geçirimsizliğinin 20°C'deki bentonitin geçirimsizliğinden üç kat daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Bunlara ek olarak literatürde şişen zeminler üzerine ıslanma-kuruma çevrimlerinin uygulandığı çalışmalarda kurutma

işlemi oda sıcaklığında ya da maksimum 40°C’de yapılmıştır (Rao vd., 2001; Güney vd., 2007). Literatürden elde edilen bu bilgiler ışığında, bentonitte sıcaklıktan kaynaklanan bir takım değişikliklerinin meydana gelmemesi ve ayrıca uygulamada karşılaşılabilecek sıcaklık şartlarını da temsil etmesi için kurutma işlemi 35±5°C’de gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ilk su muhtevalarına kadar kurumaları için 48 saat beklenmiştir.

Deneyler sonucunda her bir ıslanma-kuruma çevrimi için belirlenen geçirimsizlik katsayıları Tablo 3.5’de görülmektedir. Çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısı değerlerindeki değişim Ek 3’de gösterilmiştir (Ek Şekil 3.1-3.16). Her bir karışım için, deney sonuçları iki ayrı grafikte gösterilmiştir. Birinci grafikte geçirimsizlik katsayılarının değişim aralığı verilmiştir. Değişim aralıklarındaki geçirimsizlik katsayıları, her bir karışım oranı için aynı deney düzeneğinde kararlı akım sağlandıktan sonra belli zaman aralıklarında tekrarlanan okumalardan hesaplanmıştır. Her ıslanma-kuruma çevrimi için bu yöntem tekrarlanmıştır. İkinci grafik ise geçirimsizlik katsayılarının ortalaması alınarak çizilmiştir (Ek Şekil 3.1-3.16). Ayrıca %20, 30, 40 ve 50 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımlarının farklı kireç yüzdeleri için geçirimsizlik katsayılarının ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre değişimi sırasıyla Şekil 3.9, 3.10, 3.11 ve 3.12’de gösterilmektedir. Karışımlara kireç ilavesiyle geçirimsizlikte meydana gelen değişim Şekil 3.13’de gösterilmektedir.

Ek Şekil 3.1’den görüleceği üzere %20 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla artış eğiliminde olmuştur. Geçirimsizlikteki artış beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %30 civarında olmuştur. %20 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla azalma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 3.2-3.4). %20 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda geçirimsizlik değerlerindeki azalma oranları sırasıyla %40, 93 ve 88 civarında olmuştur.

Ek şekil 3.5’den görüleceği üzere %30 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla artma eğiliminde olmuştur. Geçirimsizlikteki artış beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %34 civarında olmuştur. %30 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla azalma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 3.6-3.8). %30 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda geçirimsizlik değerlerindeki azalma oranları sırasıyla %8, 30 ve 49 civarında olmuştur.

Tablo 3.5. Her bir karışım için ıslanma-kuruma çevrimlerine ait geçirimlilik katsayıları

Karışım Oranları	Geçirimlilik Katsayıları (m/s)					
	0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
%20 Bentonit	4.36E-09	4.68E-09	4.93E-09	5.52E-09	5.20E-09	5.70E-09
%20 Bentonit %1 Kireç	3.82E-09	2.95E-09	2.79E-09	2.15E-09	2.56E-09	2.28E-09
%20 Bentonit %2 Kireç	3.50E-08	5.95E-09	4.78E-09	4.23E-09	3.45E-09	2.55E-09
%20 Bentonit %3 Kireç	4.49E-08	6.41E-09	5.79E-09	2.81E-09	3.96E-09	5.40E-09
%30 Bentonit	2.85E-09	3.60E-09	3.64E-09	3.34E-09	3.70E-09	3.81E-09
%30 Bentonit %1 Kireç	2.77E-09	3.06E-09	2.88E-09	3.10E-09	2.74E-09	2.55E-09
%30 Bentonit %2 Kireç	3.29E-09	2.74E-09	2.59E-09	2.09E-09	2.32E-09	2.31E-09
%30 Bentonit %3 Kireç	5.90E-09	4.75E-09	4.37E-09	3.99E-09	2.98E-09	3.01E-09
%40 Bentonit	1.62E-09	1.63E-09	2.10E-09	2.46E-09	2.79E-09	2.35E-09
%40 Bentonit %1 Kireç	1.59E-09	1.47E-09	1.38E-09	1.41E-09	1.24E-09	1.12E-09
%40 Bentonit %2 Kireç	2.79E-09	1.50E-09	1.43E-09	1.65E-09	1.53E-09	1.36E-09
%40 Bentonit %3 Kireç	3.25E-09	2.30E-09	2.39E-09	1.93E-09	1.80E-09	1.57E-09
%50 Bentonit	1.42E-09	1.64E-09	1.85E-09	2.08E-09	2.28E-09	2.27E-09
%50 Bentonit %1 Kireç	1.06E-09	1.13E-09	8.23E-10	7.79E-10	7.25E-10	6.98E-10
%50 Bentonit %2 Kireç	9.25E-10	6.33E-10	8.89E-10	7.58E-10	8.35E-10	8.85E-10
%50 Bentonit %3 Kireç	2.78E-09	1.71E-09	1.10E-09	1.33E-09	1.07E-09	1.04E-09

Ek Şekil 3.9'dan görüleceği üzere %40 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla artma eğiliminde olmuştur. Geçirimsizlikteki artış beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %45 civarında olmuştur. %40 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla azalma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 3.10-3.12). %40 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda geçirimsizlik değerlerindeki azalma oranları sırasıyla %30, 51 ve 52 civarında olmuştur.

Ek Şekil 3.13'den görüleceği üzere %50 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla artma eğiliminde olmuştur. Geçirimsizlikteki artış beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %60 civarında olmuştur. %50 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için geçirimsizlik, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla azalma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 3.14-3.16). %50 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda geçirimsizlik değerlerindeki azalma oranları sırasıyla %34, 5 ve 63 civarında olmuştur.

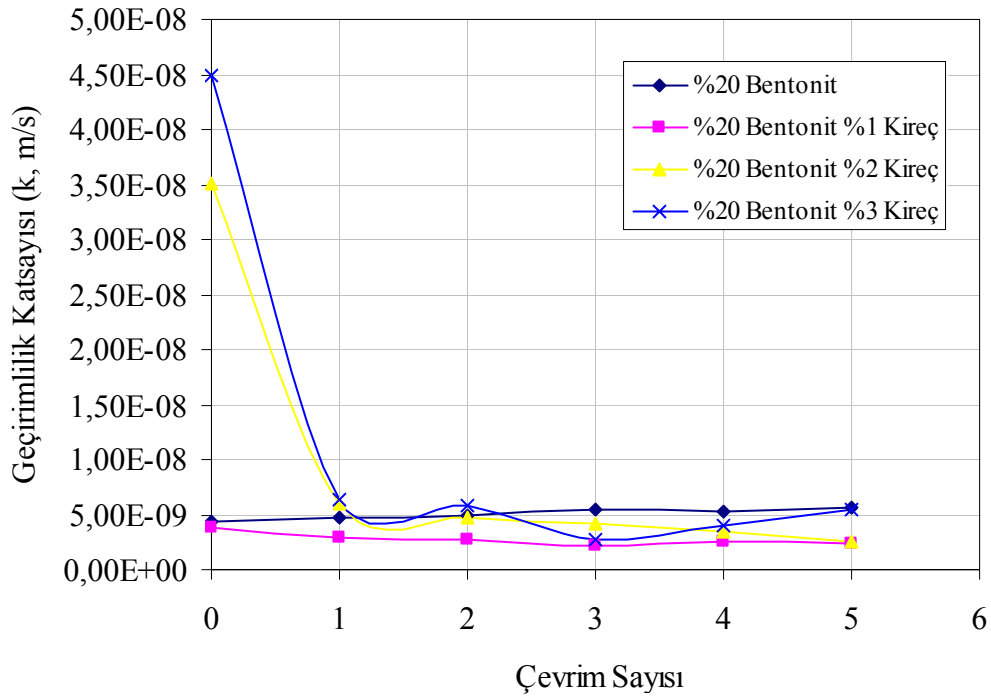
Deney sonuçları incelendiğinde kireç katkısının, ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra ciddi mertebede olmasa da geçirimsizliği azaltma eğiliminde olduğu görülebilmektedir (Şekil 3.9-3.12). Geçirimsizlikte meydana gelen bu düşüş eğilimi bentonit miktarının artmasıyla azalmıştır. %20 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki geçirimsizlik katsayısı  $4.36 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda geçirimsizlik katsayısı  $5.7 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur. Buna karşın kireç katkılı örneklerde geçirimsizlik katsayıları, %1 kireç oranında başlangıçta  $3.82 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $2.28 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur. Kireç katkısız örnekte geçirimsizlik katsayısı düşüş eğilimi, %1 kireç katkılı örnekte de artış eğilimi göstermesine rağmen geçirimsizlikte meydana gelen bu değişimler ciddi mertebelerde değildir. %2 kireç oranında ise başlangıçta  $3.5 \times 10^{-8}$  m/s olan geçirimsizlik katsayısı beşinci çevrim sonunda  $2.55 \times 10^{-9}$  m/s mertebesine düşmüştür. %3 kireç oranında başlangıçta  $4.49 \times 10^{-8}$  m/s olan geçirimsizlik katsayısı beşinci çevrim sonunda  $5.40 \times 10^{-9}$  m/s mertebesine düşmüştür (Şekil 3.9).

%30 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki geçirimsizlik katsayısı  $2.85 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda geçirimsizlik katsayısı  $3.81 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur. Kireç katkılı örneklerdeki geçirimsizlik katsayıları ise, %1 kireç oranında başlangıçta  $2.77 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $2.55 \times 10^{-9}$  m/s, %2 kireç oranında başlangıçta  $3.29 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $2.31 \times 10^{-9}$  m/s ve %3

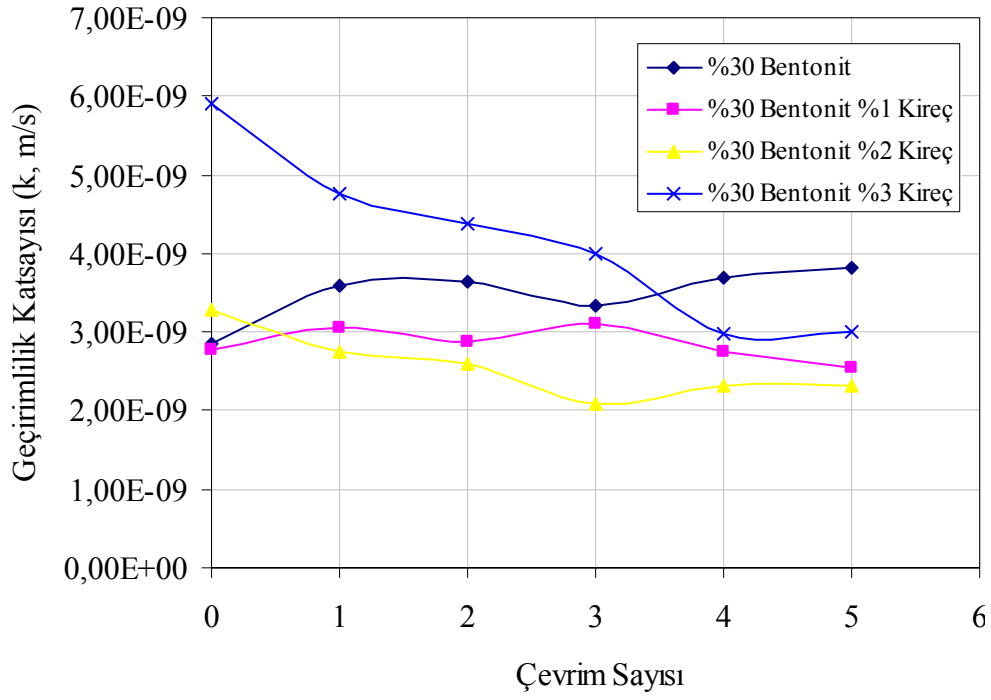
kireç oranında başlangıçta  $5.90 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $3.01 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur (Şekil 3.10).

%40 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki geçirimlilik katsayısı  $1.62 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda geçirimlilik katsayısı  $2.35 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur. Kireç katkılı örneklerdeki geçirimlilik katsayıları ise, %1 kireç oranında başlangıçta  $1.59 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $1.12 \times 10^{-9}$  m/s, %2 kireç oranında başlangıçta  $2.79 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $1.36 \times 10^{-9}$  m/s ve %3 kireç oranında başlangıçta  $3.250 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $1.57 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur (Şekil 3.11).

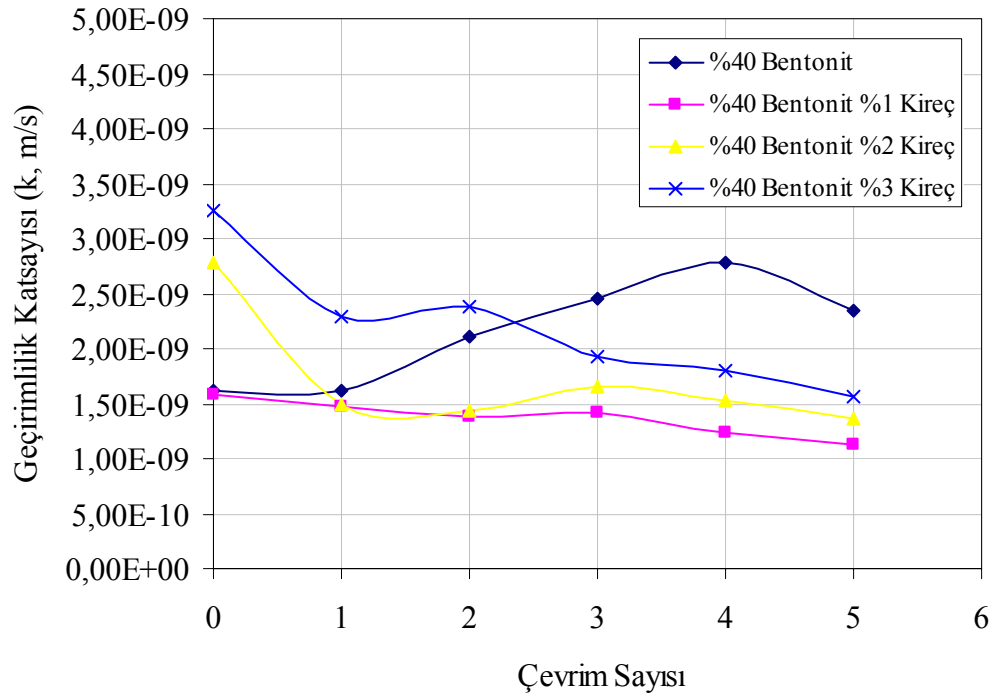
%50 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki geçirimlilik katsayısı  $1.42 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda geçirimlilik katsayısı  $2.27 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur. Kireç katkılı örneklerdeki geçirimlilik katsayıları ise, %1 kireç oranında başlangıçta  $1.06 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $6.98 \times 10^{-10}$  m/s, %2 kireç oranında başlangıçta  $9.25 \times 10^{-10}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $8.85 \times 10^{-10}$  m/s ve %3 kireç oranında başlangıçta  $2.78 \times 10^{-9}$  m/s iken beşinci çevrim sonunda  $1.04 \times 10^{-9}$  m/s olmuştur (Şekil 3.12).



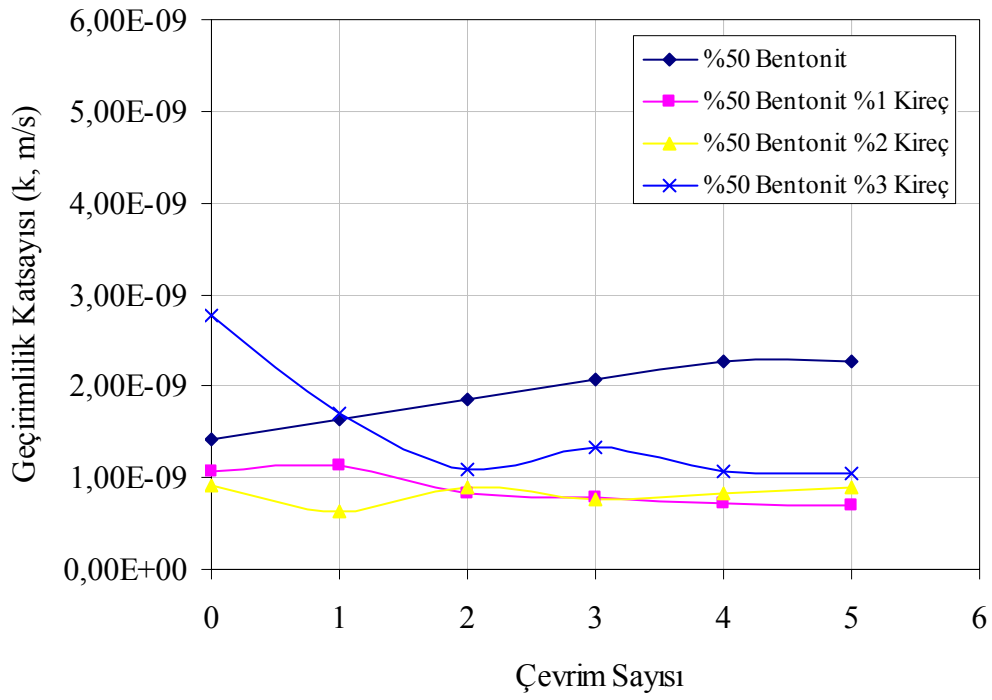
Şekil 3.9. %20 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimlilik katsayısının değişimi



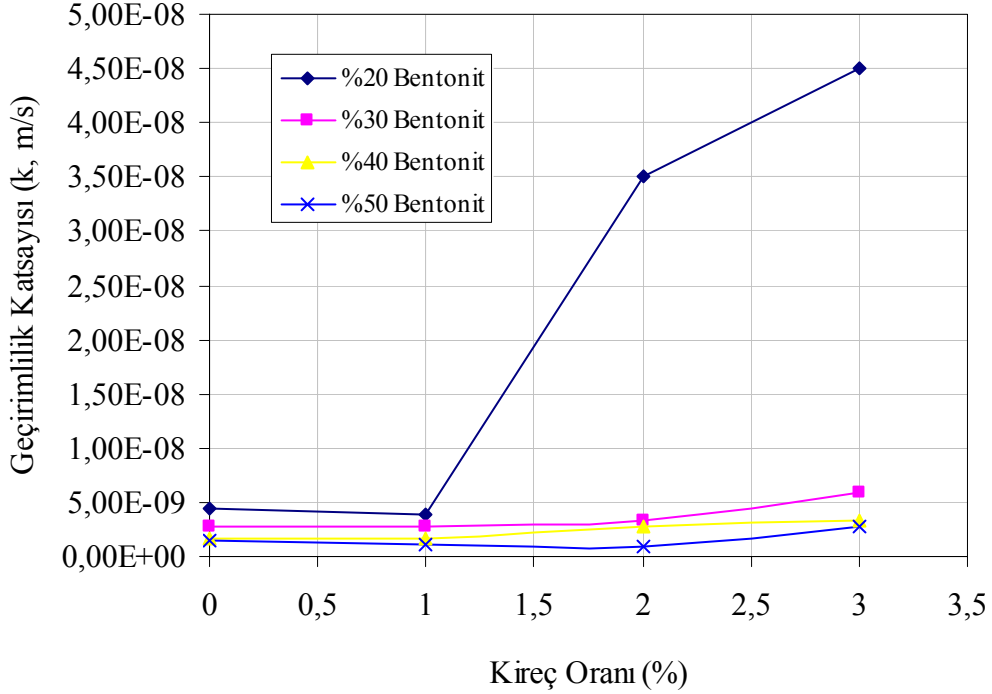
Şekil 3.10. %30 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değışimi



Şekil 3.11. %40 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değışimi



Şekil 3.12. %50 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi



Şekil 3.13. Kireç oranına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Şekil 3.13, %20, 30, 40 ve 50 oranındaki kum-bentonit karışımları için geçirimsizlik katsayısının kireç oranına göre değişimini göstermektedir. Sonuçlara göre, %20, 30 ve 40 bentonit oranlı karışımların %2 ve 3 kireç katkılı örnekleri ve %50 bentonit oranlı karışımın %3 kireç katkılı örneği için geçirimsizlikte artış görülmüştür. Ancak %20, 30 ve 40 bentonit oranları için %1 kireç oranı, %50 bentonit oranı için %1 ve 2 kireç oranları için kireç katkısıyla geçirimsizlikte düşüş görülmüştür. Geçirimsizlikte meydana gelen bu düşüşün, deneyler süresince çimentolaşma yoluyla gözeneklerin tıkanması, kireç miktarının flokülasyona sebep olacak seviyede olmaması ve zeminde meydana gelen şişmeden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Killi zemine kireç katkısının zeminin hidrolik geçirimsizliğine etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalarda; Evans ve Bel, (1981) kireç ile stabilizasyonun killi zeminin yapısını floküle hale getireceğini, dolayısıyla killi zeminin geçirimsizliğinin artacağı fikrini savunmuşlardır. Mc Callister ve Petry (1991) ise, kireç ile stabilize edilmiş bir kilde önce geçirimsizlikte bir artış olmasına karşın, zamanla geçirimsizlikte bir düşüş gözleneceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, yetersiz miktarda kireç eklenen zeminler için geçirimsizlik deneyleri boyunca çimentolaşma yoluyla boşlukların tıkanması veya zeminin şişmesinden dolayı geçirimsizlikte azalma meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir. Bunun yanında, artan kür süresinin sıkıştırma su muhtevalarına bağlı olmaksızın geçirimsizlik değerlerini düşürdüğünü gösteren çalışmalar mevcuttur (El-Rawi ve Awad, 1981; Tavus, 1995; Sargın, 1996). Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre kireç katkısıyla geçirimsizlik artmıştır ancak çok düşük yüzdelerdeki (%1 ve %2 gibi) kireç katkısı için geçirimsizlikte azalma görülmüştür. Bulunan sonuçlar, Mc Callister ve Petry (1991)'ın sonuçları ile uyumludur.

Kireç katkılı örnekler için ıslanma-kuruma çevrimleri sonrasında geçirimsizlik değerlerinin büyük oranlarda olmasa da düşüş eğiliminde olduğu gözlenmiştir.  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde 48 saat kurutularak uygulanan ıslanma-kuruma çevrimlerinin kireç katkılı örneklerle kür etkisi yaptığı tahmin edilmektedir. Sonuçlar, El-Rawi ve Awad (1981) ve Tavus'un (1995) sonuçlarıyla uyumludur. Deney sonuçlarına göre, 5. çevrim sonunda, %50 bentonit oranlı karışımların bütün kireç oranları (%1, 2 ve 3) için geçirimsizlik değerlerinin  $1\times 10^{-9}$  m/s'den küçük ya da eşit oldukları görülmektedir. Tehlikeli atıkların kontrolü yönetmeliğine (Resmi Gazete, 2005) göre, bu karışımlar geçirimsizlik şartını sağlamaktadır. Katı atıkların kontrolü yönetmeliğinde geçirimsizlik şartı  $1\times 10^{-8}$  m/s'den küçük ya da eşit olarak verilmiştir (Resmi Gazete, 1991). Bu yönetmeliğe göre, ıslanma-kuruma çevrimi



uygulanmadan önce geçirimsizlik şartını sağlamayan %20 bentonit-(2 ve 3) kireç karışımları, 5. çevrimin sonunda geçirimsizlik şartını sağlamışlardır.

### 3.6. Şişme Basıncı Deneyleri

Katı atık depolama alanlarında kullanılan şiltelere ait şişme basıncı değerlerinin bilinmesi, ileride herhangi bir stabilite problemiyle karşılaşılması için önemlidir. URL-4'de Tunus'ta inşa edilen bir katı atık depolama tesisine ait bilgiler verilmektedir. Burada bahsi geçen katı atık depolama tesisinde, 33000 m<sup>2</sup>'lik düzenli depolama alanı üzerine 25000 ton/yıl'lık atık depolanacağı ve 20 yıllık işletme ömründe ise toplam 500000 ton atığın depolanacağı ifade edilmiştir (URL-4, 2009). Bu bilgilere göre bahsi geçen düzenli depolama alanının üzerine atığın ilk depolandığı yıl gelen basınç 7.5 kPa civarındadır. Bu basınç 20 yıl sonunda nihai atık miktarı depolandığında 150 kPa mertebesine çıkmaktadır. Bu örnek dikkate alındığında, katı atık depolama tesislerinin inşasında kullanılan şilte malzemesine ait şişme basıncı değerinin önceden belirlenmiş olması ileride karşılaşılabilecek olası tehlikeleri önlemek için şarttır.

Bu çalışmada kullanılan kuma, ağırlığının %(20, 30, 40 ve 50) oranlarında bentonit ve her bir bentonit karışımı için %(0, 1, 2 ve 3) oranlarında kireç eklenmesiyle optimum su muhtevalarında, standart kompaksiyon enerjisinde hazırlanan örnekler üzerinde Başlık 2.2.4.'de anlatıldığı şekilde şişme basıncında meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla odometre deney düzeneğinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Her bir karışım için şişme basıncı deneyi, 35±5°C etüvde 24 saat bekletilerek gerçekleştirilen beş ıslanma-kuruma çevrimi yapılarak tekrarlanmıştır.

Deneyler sonucunda her bir ıslanma-kuruma çevrimi için belirlenen şişme basınçları Tablo 3.6'da görülmektedir. Çevrim sayısına göre şişme basıncı değerlerindeki değişim grafikleri Ek 4'te gösterilmiştir (Ek Şekil 4.1-4.16). Şekil 3.14'de kireç oranına göre şişme basıncındaki değişim gösterilmektedir. Ayrıca %20, 30, 40 ve 50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımlarının farklı kireç yüzdeleri için şişme basınçlarının ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre değişimi sırasıyla Şekil 3.15, 3.16, 3.17 ve 3.18'da gösterilmektedir.

Ek Şekil 4.1'den görüleceği üzere %20 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla ciddi seviyede olmasa da azalma eğiliminde olmuştur. Şişme basıncındaki azalma beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %9 civarında olmuştur. %20 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-

kireç karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla artma eğilimi göstermiştir (Ek Şekil 4.2-4.4). %20 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda şişme basıncı değerlerindeki artış oranları sırasıyla %23, 24 ve 58 civarında olmuştur. Kireç oranının artmasıyla ıslanma-kuruma çevrimleriyle şişme basıncındaki artış miktarı yükselmiştir.

Ek Şekil 4.5'den görüleceği üzere %30 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla ciddi seviyede olmasa da azalma eğilimi göstermiştir. Şişme basıncındaki azalma, beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %12 civarında olmuştur. %30 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla artma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 4.6-4.8). %30 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda şişme basıncı değerlerindeki artış oranları sırasıyla %6, 19 ve 47 civarında olmuştur. Islanma-kuruma çevrimleriyle şişme basıncındaki en büyük artışı %3 kireç katkılı örnek göstermiştir.

Ek Şekil 4.9'dan görüleceği üzere %40 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla ciddi seviyede olmasa da azalma eğiliminde olmuştur. Şişme basıncındaki azalma beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %13 civarında olmuştur. %40 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla artma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 4.10-4.12). %40 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda şişme basıncı değerlerindeki artış oranları sırasıyla %7, 7 ve 35 civarında olmuştur.

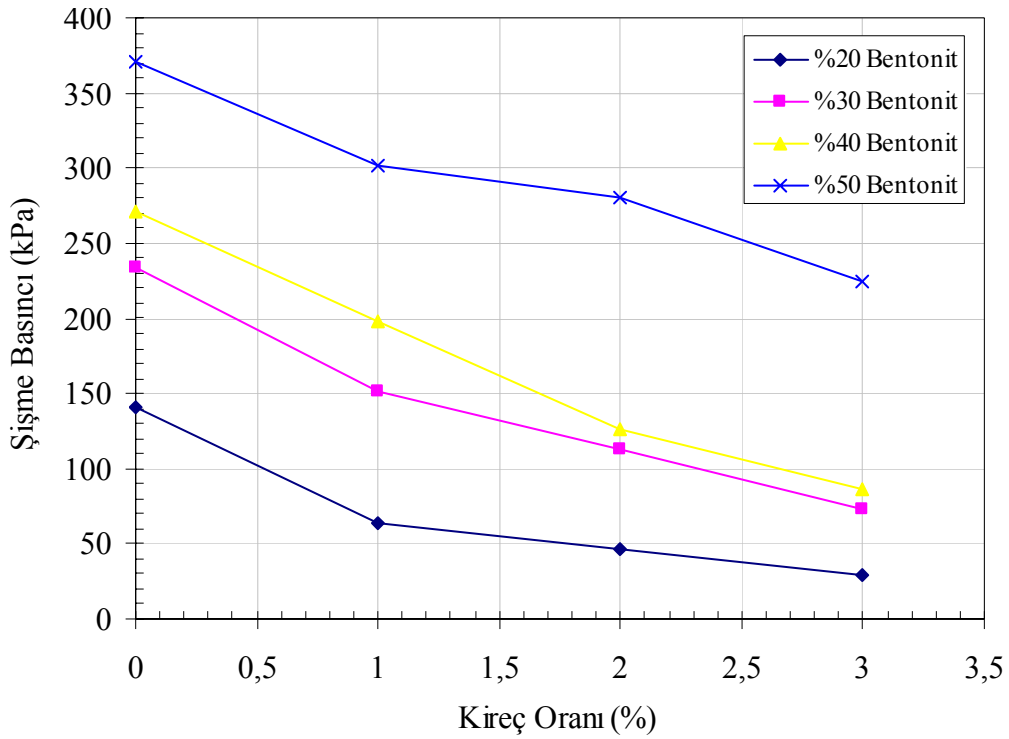
Ek Şekil 4.13'den görüleceği üzere %50 bentonit oranlı kum-bentonit karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrim sayısının artmasıyla azalma eğiliminde olmuştur. Şişme basıncındaki azalma, beşinci ıslanma-kuruma çevrimi sonunda %23 civarında olmuştur. %50 bentonit ve %1, 2 ve 3 kireç oranlı kum-bentonit-kireç karışımı için şişme basıncı, ıslanma-kuruma çevrimi sayısının artmasıyla artma eğiliminde olmuştur (Ek Şekil 4.14-4.16). %50 bentonit ve %1, 2, 3 kireç yüzdeleri için beşinci çevrim sonunda şişme basıncı değerlerindeki artış oranları sırasıyla %9, 9 ve 27 civarında olmuştur. Kireç katkısız örneklerde, karışımdaki bentonit oranı arttıkça şişme basınçlarının ıslanma-kuruma çevrimlerinden etkilenmesi de artmıştır.

Tablo 3.6. Her bir karışım için ıslanma-kuruma çevrimlerine ait şişme basınçları

Karışım Oranları	Şişme Basınçları (kPa)					
	0. Çevrim	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim
%20 Bentonit	140	130	132	128	124	127
%20 Bentonit %1 Kireç	64	50	52	63	77	79
%20 Bentonit %2 Kireç	46	41	41	48	56	58
%20 Bentonit %3 Kireç	30	33	41	46	48	47
%30 Bentonit	234	200	194	201	207	206
%30 Bentonit %1 Kireç	152	159	156	159	159	161
%30 Bentonit %2 Kireç	113	118	133	133	130	134
%30 Bentonit %3 Kireç	73	82	95	106	108	107
%40 Bentonit	271	252	256	241	233	236
%40 Bentonit %1 Kireç	197	190	200	211	212	213
%40 Bentonit %2 Kireç	127	122	123	132	136	136
%40 Bentonit %3 Kireç	87	87	97	123	117	117
%50 Bentonit	371	342	331	294	304	285
%50 Bentonit %1 Kireç	302	276	281	321	336	332
%50 Bentonit %2 Kireç	280	278	286	299	306	306
%50 Bentonit %3 Kireç	225	249	258	282	273	285

Her bentonit oranına ait %1 ve 2 kireç katkılı örneklerin ıslanma-kuruma çevrimleriyle şişme basınçlarındaki değişimin, kireç katkısız ve daha yüksek kireç katkılı örneklerle göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlardan, %1 ve 2 kireç katkısının bu karışımları kireç katkısız ve daha yüksek kireç katkılı karışımlara göre daha stabil bir hale getirdiğini söyleyebiliriz.

Deney sonuçları incelendiğinde, optimum su muhtevasında, standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmış farklı bentonit yüzdeleri (%20, 30, 40 ve 50) kum-bentonit karışım örneklerinin şişme basıncı değerlerinin artan bentonit yüzdesi ile birlikte arttığı görülmektedir (Şekil 3.14). Kireç ilavesiyle şişme basıncı değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Zemine kireç ilavesiyle meydana gelen katyon değişimi ve çimentolaşma reaksiyonlarının zeminin şişmesini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Ancak sonuçlar incelendiğinde kireç katkısının, ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra şişme basıncında ciddi mertebelerde olmasa da artışa sebep olduğu görülebilmektedir (Şekil 3.20-3.23). Kireç katkılı örneklerde ıslanma-kuruma çevrimleriyle meydana gelen bu artış eğiliminin ıslanma-kuruma sürecinde zeminin yorulmasından ve kireç katkısıyla başlangıçta oluşan çimentolaşma gibi reaksiyonlarının bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.14. Kireç oranına göre şişme basıncının değişimi

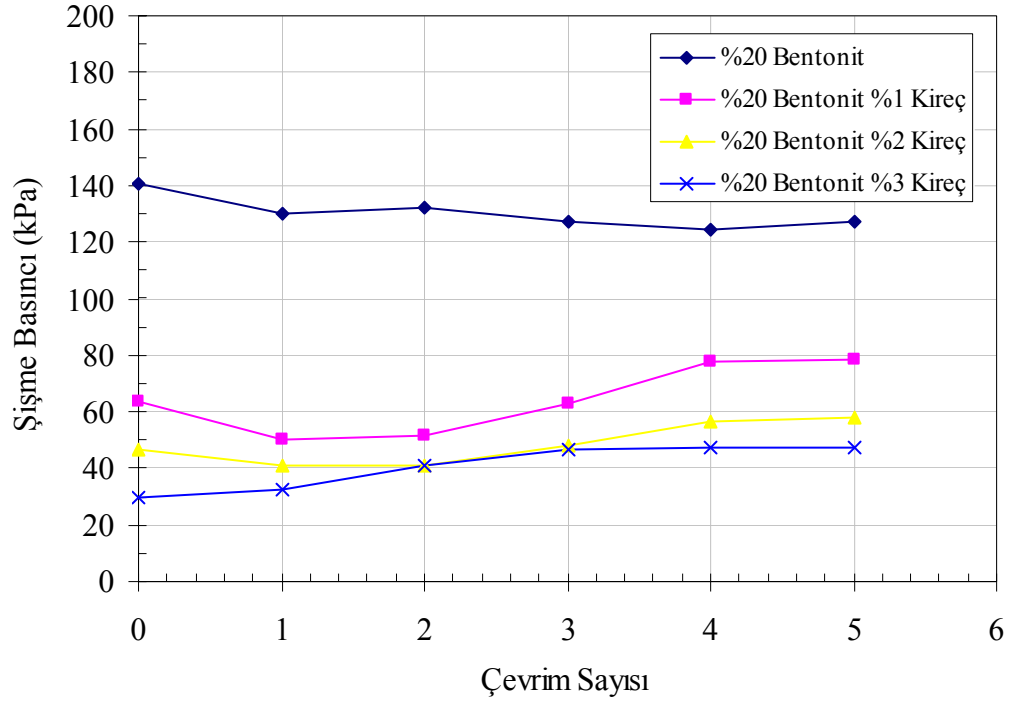
%20 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki şişme basıncı 140 kPa iken beşinci çevrim sonunda şişme basıncı 127 kPa olmuştur. Kireç katkılı örneklerin şişme basınçları, %1 kireç oranı için başlangıçta 64 kPa iken beşinci çevrim sonunda 77 kPa, %2 kireç oranı için başlangıçta 46 kPa iken beşinci çevrim sonunda 58 kPa ve %3 kireç oranı için başlangıçta 30 kPa iken beşinci çevrim sonunda 47 kPa olmuştur (Şekil 3.15). Gerek kireç katkılı gerekse kireç katkısız örneklerin şişme basınçlarında, ıslanma-kuruma çevrimleriyle ciddi mertebelerde değişim olmamıştır. Ancak ıslanma-kuruma çevrimleriyle, kireç katkısız örneğin şişme basıncı düşüş eğilimi gösterirken kireç katkılı örneklerin şişme basınçları artış eğilimi göstermişlerdir.

%30 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki şişme basıncı 234 kPa iken beşinci çevrim sonunda şişme basıncı 206 kPa olmuştur. Kireç katkılı örneklerin şişme basınçları, %1 kireç oranı için başlangıçta 152 kPa iken beşinci çevrim sonunda 161 kPa ve %2 kireç oranı için başlangıçta 113 kPa iken beşinci çevrim sonunda 134 kPa olmuştur. %3 kireç oranı için ise başlangıçta 73 kPa olan şişme basıncı değeri beşinci çevrim sonunda 107 kPa'a yükselmiştir (Şekil 3.16).

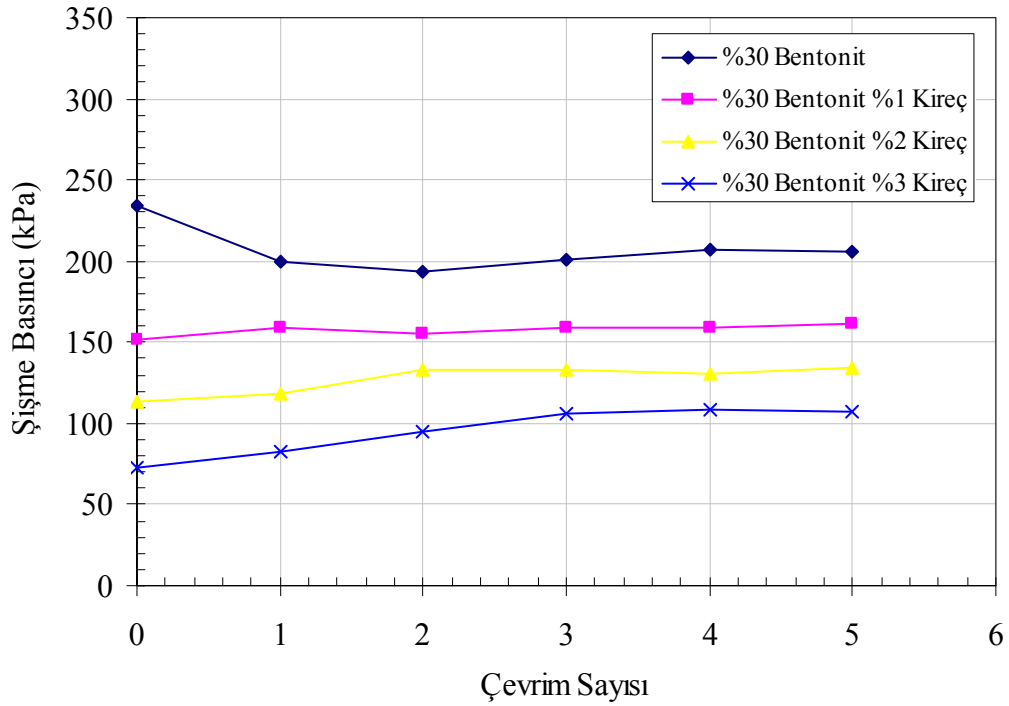
%40 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki şişme basıncı 271 kPa iken beşinci çevrim sonunda şişme basıncı 236 kPa mertebesine düşmüştür. Kireç katkılı örneklerin şişme basınçları, %1 kireç oranı için başlangıçta 197 kPa iken beşinci çevrim sonunda 213 kPa, %2 kireç oranı için başlangıçta 127 kPa iken beşinci çevrim sonunda 136 kPa olmuştur. %3 kireç oranı için ise başlangıçta 87 kPa olan şişme basıncı değeri beşinci çevrim sonunda 117 kPa'a yükselmiştir (Şekil 3.17).

%50 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrimi öncesindeki şişme basıncı 371 kPa iken beşinci çevrim sonunda şişme basıncı 285 kPa mertebesine düşmüştür. Buna karşın kireç katkılı örneklerde şişme basıncı, %1 kireç oranında 302 kPa'dan 332 kPa'a, %2 kireç oranında 280 kPa'dan 306 kPa'a ve %3 kireç oranında 225 kPa'dan 285 kPa'a yükselmiştir (Şekil 3.18).

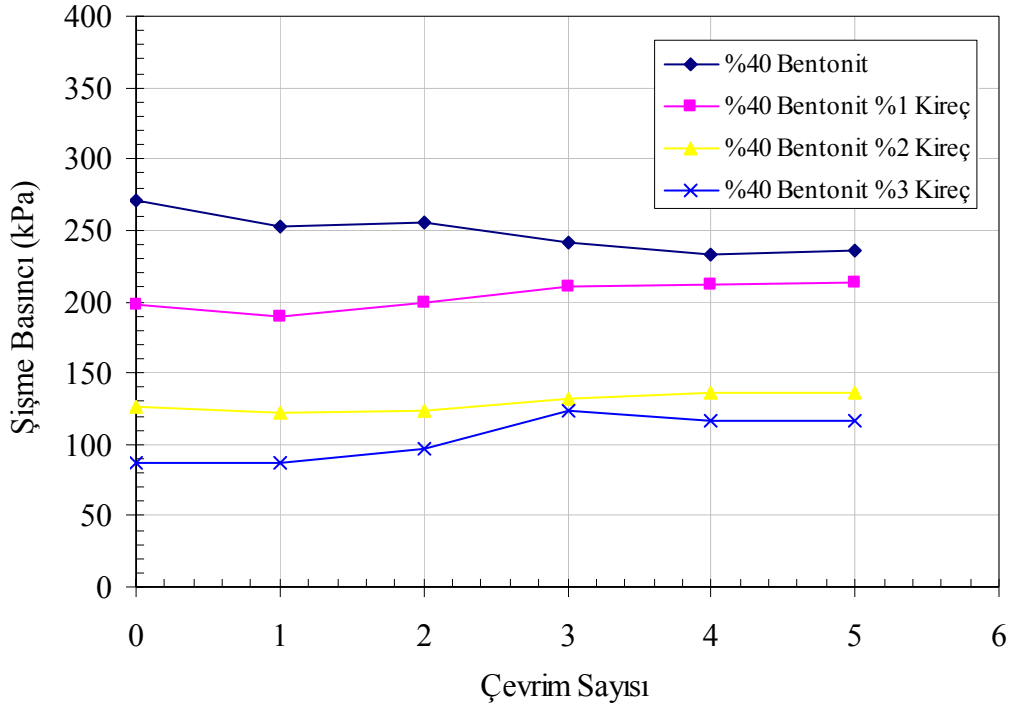
%20, 30, 40 ve 50 bentonitli karışımların kireç katkısız örneklerinde ıslanma-kuruma çevrimleriyle şişme basıncında meydana gelen değişim, karışımdaki bentonit oranının artmasıyla artmıştır. %20, 30, 40 ve 50 bentonit için %1 ve 2 kireç oranlarında şişme basıncı değişimleri, kireç katkısız ve %3 kireç katkılı örneklere oranla daha düşük olmuştur. Bu sonuçlara göre, %1 ve 2 kireç katkısının karışımların hacim stabilitelerini arttırdığı söylenebilir.



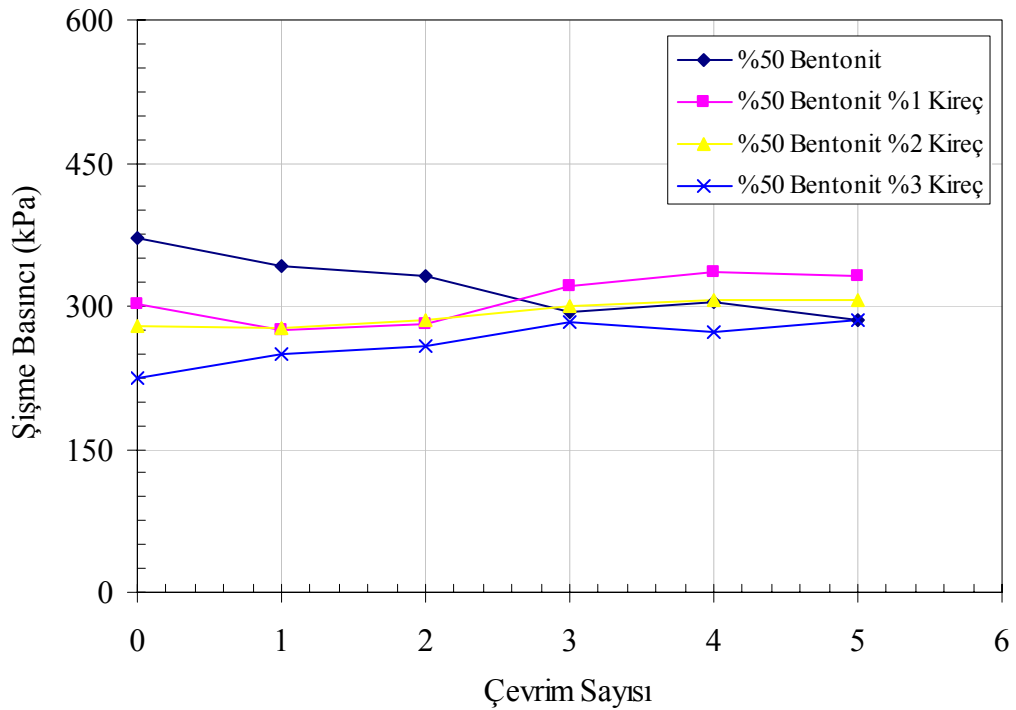
Şekil 3.15. %20 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi



Şekil 3.16. %30 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi



Şekil 3.17. %40 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi



Şekil 3.18. %50 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi

Şişen zeminlerin kireçle stabilizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda, kireç miktarının artmasıyla şişme basıncında azalma olduğu ifade edilmiştir (Güney vd., 2007; Rao vd., 2001; Türköz, 2001; Tono, 2001; Demirdağ, 1994). Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak, karışımlardaki kireç katkısını artmasıyla şişme basınçlarının azaldığı tespit edilmiştir. Zemine kireç eklenmesiyle, kirecin kuvvetli katyon iyonları, kil parçacığının yüzeyinde bulunan zayıf metalik katyonların yerini alma eğilimi gösteriler. Bu iyon değişimi çok hızlı gelişir ve plastisitede azalmaya sebep olur. Kil partikülleri elektriksel olarak bir birlerini çekerler. Bu durum, zeminin kohezyonlu bir malzemedan çok granüler bir malzeme gibi davranış göstermesine sebep olan flokülasyon ve agregasyona neden olur. Meydana gelen diğer bir reaksiyon da, zamana ve sıcaklığa bağlı puzolanik reaksiyondur. Kireçte bulunan kalsiyum katyonu, zeminde bulunan alüminyum ve silikat mineralleri ile reaksiyona girerek çimentonun hidratasyonundan meydana gelen bileşiklere benzer olan ve partikülleri birbirine bağlayan kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikat gibi çimentolaşma jellerini oluşturur. Montmorillonit minerali içeren killer gibi bir kısım killer bağlayıcı olup kireçle çimentolaşmayı meydana getirirler. Puzolanik reaksiyon, kireçle stabilize edilmiş zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirir.

Islanma-kuruma çevrimlerinin şişen zeminlerin şişme basıncına etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalarda; Day (1994), Al-Homoud vd. (1995) ve Opisov vd. (1987), ıslanma-kuruma çevrim sayılarının artmasıyla şişme potansiyelinin ve şişme basıncının artacağını ifade etmişlerdir. Chen (1965) ve Dif ve Bluemel (1991) ise, şişen zeminlerin tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalmaları durumunda zeminin yorulma sinyalleri vereceğini böylece şişme potansiyelinde azalma olacağını savunmuşlardır. Güney vd. (2007), şişen zeminlerin tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalmaları durumunda şişme basınçlarının azalacağını ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan %20, 30, 40 ve 50 bentonit oranındaki kum-bentonit karışımlarının şişme basınçları çevrim sayısının artmasıyla azalmıştır. Bulunan sonuçlar, Chen (1965), Dif ve Bluemel (1991) ve Güney vd.'nin (2007) sonuçları ile uyumludur.

Güney vd. (2007) ve Rao vd. (2001) yaptıkları çalışmalarda, kireçle stabilize edilmiş şişen zeminlerin tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalmaları durumunda şişme basınçlarında artış olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, kireç katkılı karışımların şişme basınçlarının, ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra arttığı tespit edilmiştir. Bulunan sonuçlar, Güney vd. (2007) ve Rao vd.'nin (2001) sonuçlarıyla uyumludur. Burada elde



edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesinden, ıslanma-kuruma çevriminin, kireçle stabilize edilen zemindeki puzolanik reaksiyonun kademeli olarak bozuşmasına sebep olduğu sonucuna varılabilir.

Katı atık depolama alanlarında şilte malzemesi, atık depolamasının yapılmasıyla giderek artan bir düşey basınca maruz kalır. Bu yüzden, bu yapılarda kullanılacak malzemelerin başlangıçta daha düşük şişme göstermeleri, inşa edilen yapının stabilitesi açısından önemlidir. Atık depolaması yapıldıkça ıslanma-kuruma çevrimleriyle kireç katkılı örneklerde düşük seviyede de olsa meydana gelen şişme basıncı artışlarının, atık depolaması yapıldıkça artan düşey gerilmelerle karşılanabileceği düşünülmektedir. Kireç katkısıyla kum-bentonit karışımlarının şişme basıncında düşüş sağlanmıştır. Ayrıca zeminin şişmesindeki artışla gözeneklerinin daha çok tıkanacağı ve böylece daha geçirimsiz olacağı düşünülmektedir. Geçirimsizlik deneyleri sonucunda elde edilen bulgular bu düşüncüyü destekleyici niteliktedir. Bu çalışmada elde edilen veriler değerlendirildiğinde, uygulama aşamasında işlenebilirlikte sağlayacağı kolaylık, karışımların hacim stabilitelerini arttırırması ve ıslanma-kuruma çevrimleriyle geçirimsizlikte sağladığı düşüş eğiliminden dolayı kum-bentonit karışımlarına kireç ilavesinin faydalı olacağı düşünülebilir.

#### 4. SONUÇLAR

Endüstri ve teknoloji alanında meydana gelen hızlı gelişmelere paralel olarak atıklar her geçen gün artan bir çevre problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Katı atıkların bertarafı için kullanılan en yaygın yöntem, atıkların depolama alanlarında toplanmasıdır. Katı atıkların depolama sahasına yerleştirilmesinden sonra fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimler nedeniyle sızıntı suyu oluşur. Bu nedenle, depolama alanları sızıntı sularından zeminin ve zemin suyunun kirlenmesini önleyecek şekilde tasarlanırlar. Depolama alanları tasarlanırken sızıntı sularına karşı geçirimsizliğin sağlanması amacıyla şilte inşa edilir. Uygun şartlarda doğal olarak oluşmuş kohezyonlu zeminler şilte olarak kullanılabilir. Özellikle son dönemlerde şilte malzemesi olarak kum-bentonit karışımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmada; geçirimsiz şilte oluşturulması için, farklı oranlardaki kum-bentonit ve kireç karışımlarıyla hazırlanan örneklerin doğa şartlarında ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kaldıkları takdirde geçirimsizliklerindeki ve şişme özelliklerindeki değişimi incelemek amacıyla bir seri laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deneylerde, toplam kuru karışım ağırlığının %20, 30, 40 ve 50 oranında bentonit ve her bir karışıma %0, 1, 2 ve 3 oranlarında kireç eklenmesiyle hazırlanan kum-bentonit-kireç karışımları kullanılmıştır. Her karışım oranı için, optimum su muhtevasında standart proktor enerjisinde rijit duvarlı permeametrede sıkıştırılan numuneler üzerinde, düşen düzeyli geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Numuneler  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$  etüvde 48 saat kurutularak beş ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmuştur ve her çevrim için geçirimsizlik katsayıları ölçülmüştür. Optimum su muhtevasında standart proktor enerjisinde sıkıştırılıp, 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğine konsolidasyon halkasına yerleştirilen her bir numune üzerinde şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Yine numuneler  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$  etüvde 24 saat kurutularak beş ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmuştur ve her çevrim için şişme basınçları ölçülmüştür.

On altı farklı karışım üzerinde yapılan şişme basıncı deney sonuçlarına göre, karışımdaki bentonit miktarının artması şişme basıncının artmasına, kireç miktarının artması ise şişme basıncının azalmasına sebep olmuştur.  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$  etüvde 24 saat kurutularak gerçekleştirilen ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda elde edilen şişme basıncı deney sonuçlarına göre, kireç katkısız örneklerde çevrimler boyunca şişme basıncının azalma eğiliminde, kireç katkılı örneklerde ise, ıslanma-kuruma çevrimleri boyunca şişme

basıncının literatürle uyumlu olarak artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu artışla şişme basınçları, %50 bentonit oranlı karışım hariç, kireç katkısız örneklerin şişme basıncına erişememiştir. %20, 30, 40 ve 50 bentonitli karışımların kireç katkısız örneklerinde ıslanma-kuruma çevrimleriyle şişme basıncında meydana gelen değişim, karışımdaki bentonit oranının artmasıyla artmıştır. %20, 30, 40 ve 50 bentonit için %1 ve 2 kireç oranlarında şişme basıncı değişimleri, kireç katkısız ve %3 kireç katkılı örneklere oranla daha düşük olmuştur. Bu sonuçlara göre, %1 ve 2 kireç katkısının karışımların hacim stabiliteğini arttırdığı söylenebilir.

Kireç katkısız kum-bentonit karışımlarına ait düşen düzeyli geçirimsizlik deney sonuçlarına göre, karışımdaki bentonit miktarının artması geçirimsizlikte azalmaya sebep olmuştur. Kireç katkılı kum-bentonit karışımları üzerinde yapılan düşen düzeyli geçirimsizlik deney sonuçlarına göre ise, %20, 30 ve 40 bentonit oranlı karışımların %2 ve 3 kireç katkılı örnekleri ve %50 bentonit oranlı karışımın %3 kireç katkılı örneği için geçirimsizlikte artış görülmüş, ancak %20, 30 ve 40 bentonit oranları için %1 kireç oranı, %50 bentonit oranı için %1 ve 2 kireç oranları için kireç katkısıyla geçirimsizlikte düşüş görülmüştür.  $35\pm 5^{\circ}\text{C}$  etüvde 48 saat kurularak gerçekleştirilen ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda elde edilen geçirimsizlik deney sonuçlarına göre, kireç katkısız örneklerde geçirimsizliğin çevrimler boyunca ciddi seviyelerde olmasa da artış eğiliminde olduğu, kireç katkılı örneklerde ise azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.

Deney sonuçlarına göre, 5. çevrim sonunda, %50 bentonit oranlı karışımların bütün kireç oranları (%1, 2 ve 3) için geçirimsizlik değerlerinin  $1\times 10^{-9}$  m/s'den küçük ya da eşit oldukları görülmektedir. Ülkemizdeki tehlikeli atıkların kontrolü yönetmeliğine göre, bu karışımlar geçirimsizlik şartını sağlamaktadır. Ülkemizdeki katı atıkların kontrolü yönetmeliğine göre, ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmadan önce geçirimsizlik şartını sağlamayan %20 bentonit-%(2 ve 3) kireç karışımları, 5. çevrimin sonunda geçirimsizlik şartını sağlamışlardır. Yapılan çalışmalarda; düşük geçirimsizliğe sahip şilteye küçük oranlarda kireç ilavesi yapılması durumunda geçirimsizliğinin daha da düştüğü, daha yüksek kireç oranlarının ise geçirimsizliğe başlangıçta olumsuz etki göstermesine karşın ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda geçirimsizlikte düşük oranlarda da olsa azalmaya sebep olduğu görülmüştür.

Atık depolama alanlarında şilte malzemesi, atık depolamasının yapılmasıyla giderek artan bir düşey basınca maruz kalır. Bu yüzden, bu yapılarda kullanılacak malzemelerin başlangıçta daha düşük şişme göstermeleri, inşa edilen yapının stabilitesi açısından

önemlidir. Bu bağlamda, kirecin karışımların şişme basınçlarını düşürmüş olması da şilte oluşturulması açısından avantajlı bir durumdur.

Islanma-kuruma çevrimlerinden sonra gerek şişme basıncı gerekse geçirimsizlik deney sonuçlarına bakıldığında, %1 ve 2 kireç katkılı örneklerin çevrimler sonunda daha stabil kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlardan yola çıkarak, kum-bentonit-kireç karışımıyla oluşturulan şiltelerin sadece kum-bentonit karışımıyla oluşturulan şiltelere göre geçirimsizlik ve stabilitelerini daha uzun dönemde koruyacakları düşünülmektedir. Bütün bu sonuçlar değerlendirildiğinde, kum-bentonit-kireç karışımlarının atık depolama sahaları için geçirimsiz şilte oluşturulmasında kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

## 5. ÖNERİLER

Bu çalışmada, kum-bentonit-kireç karışımlarının geçirimsizlik ve şişme basıncı değerleri laboratuvar ortamında belirlenerek geçirimsiz şilte malzemesi olarak kullanımının mümkün olup olmayacağı araştırılmıştır. Benzer çalışmalar, arazi deneyleriyle yapılarak çalışmanın arazi boyutunda nasıl değişim gösterdiği gözlemlenebilir. Arazide ölçülen geçirimsizlik ve şişme basıncı değerleri deneysel olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılarak arazideki geçirimsizlik değerlerine ve şişme basınçlarına geçiş katsayıları hesaplanabilir.

Bu çalışmada geçirimsizlik deneyleri rijit duvarlı permeametrede yapılmıştır. Farklı permeametreler kullanılarak geçirimsizliğin kullanılan deney düzeneğinden bağımsız olup olmadığı araştırılabilir.

$35\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilen ıslanma-kuruma çevrimleri, oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Islanma-kuruma çevrimlerinin yanında donma-çözünme çevrimleri de uygulanabilir.

Çalışmada, geçirimsizlik deneylerinde geçirimsizlik sıvısı olarak saf su kullanılmıştır. Geçirimsizlik sıvısı olarak atık sularını temsil edebilecek farklı çözeltiler kullanılıp bunların şilte malzemesi üzerinde nasıl bir etki bıraktığı araştırılabilir.

Çalışmadaki karışım oranlarına farklı dane dağılım eğrisine sahip granüler malzeme karıştırılarak, deneylerde kullanılan kumun dane dağılımının deney sonuçlarına etkisi araştırılabilir.

Karışımların dayanım özelliklerinin ıslanma-kuruma çevrimleriyle nasıl değiştiği araştırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abeele, W. V. ve Balkema, A. A., 1986. Consolidation and Compaction as A Means to Prevent Settlement of Bentonite/Sandy Silt Mixes for Use in Waste Disposal Sites, *Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management, Proceedings of the 8th Annual Symposium.*, Fort Collins, CO, USA, 255-264.
- Abichou, T., Benson, C. H. ve Edil, T. B., 2002. Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Field Study, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128, 3, 206-215.
- Akbulut, A., 1996. Bentonit Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Eğitim Serisi, No: 32, Ankara, 72 s.
- Akcanca, F., 2004. Kum-Bentonit Karışımlarının Şişme Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alawaji, H. A., 1999. Swell and Compressibility Characteristics of Sand-Bentonite Mixtures Inundated with Liquids, *Applied Clay Science*, 15, 3-4, 411-430.
- Albrecht, B. A. ve Benson, C. H., 2001. Effect of Desiccation on Compacted Natural Clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 1, 67-75.
- Al-Chaar, G., 1997. Condition Assessment of Structures Damaged from Drought/Rain Cycles, *Proceedings of the Speciality Conference on Infrastructure Condition Assessment: Art, Science, Practice*, Boston, 237-246.
- Al-Homoud, A. S. ve Basma, A. A., 1995. Cyclic Swelling Behaviour of Clays, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 121, 7, 562-565.
- Allen, C. C. ve Wood, M. I., 1988. Bentonite in Nuclear Waste Disposal: A Review of Research in Support of the Basalt Waste Isolation Project, *Applied Science Clay*, 3, 1, 11-30.
- Allen, J. M. ve Gilbert, R. B., 2006. Accelerated Swell-Shrink Test for Predicting Vertical Movement in Expansive Soils, *Unsaturated Soils*, ASCE, 189, 1764-1774.
- Alonso, E. E., Romero, E., Hoffmann, C. ve Escudero, E. G., 2005. Expansive Bentonite-Sand Mixture in Cyclic Controlled-Suction Drying and Wetting, *Engineering Geology*, 81, 3, 213-226.
- Alonso, E. E., Vaunat, J. ve Gens, A., 1999. Modeling The Mechanical Behaviour of Expansive Clays, *Engineering Geology*, 54, 1, 173-183.
- Anonim, 2004. Türkiye Çevre Atlası, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.

- ASTM D 2216-92, 1993. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock, In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, 294-297.
- ASTM D 2434-68, 2000. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), PA, 19428-2959, United States.
- ASTM D 4546-96, 2003. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. Annual Book of ASTM Standards, 992-1001.
- ASTM D 5084, 2002. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, PA, 19428-2959, United States.
- ASTM D 5856-95, 2007. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter.
- ASTM D 6276, 2006. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Mühendislik&Mimarlık Yayınları, Ankara, 624 s.
- Basma, A. A., 1991. Estimating Uplift of Foundations Due to Expansion: A Case History, Geotechnical Engineering, 22, 2, 217-231.
- Blatz, J. A., Graham, J. ve Chandler, N. A., 2002. Influence of Suction on the Strength and Stiffness of Compacted Sand-Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 39, 4, 894-907.
- Bozbey, İ., 2004. Kireç ile Stabilize Edilmiş Bir Zeminin Hidrolik Geçirgenliğinin Arazi Boyutlarında Belirlenmesi, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 17, 1, 57-78.
- Brusewits, A. M., 1986. Chemical and Physical Properties of Paleozoic Potassium Bentonites from Kinnekule, Sweden, Clays & Clay Minerals, 34, 442-454.
- Chen, F. H., 1988. Foundations of Expansive Soils, American Elsevier Science Publ., New York.
- Chen, F. N., 1983. Behaviour Soils Under Influence of Temperature Gradient, Research Report, Science of Architecture.
- Christidis, G. ve Scott, P. W., 1997. The Origin and Control of Color of White Bentonites from the Aegean Island of Milos and Kimolos Greece, Minerals Deposits, 32, 3, 271-279.

- Chiristidis, G., Scott, P. W. ve Marcopoulas, T., 1995. Origine of the Bentonite Deposits of Eastern Milos and Kimalos, Greece, Geology, Geological, Mineralogical and Geochemical Evidence, Clays & Clay Minerals, 43, 1, 63-77.
- Cho, W. J., Lee, J. O. ve Chun, K. S., 1999. The Temperature Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite, Applied Clay Science, 14, 47-58.
- Couture, R. A., 1985. Rapid Increases in Permeability and Porosity of Bentonite-Sand Mixtures Due to Alteration by Water Vapor, Materials Research Society Symposia Proceedings, 44, 515-522.
- Çetin, H., Atış, C.D. ve Laman, M., 1998. Zemin Mekaniği DeneYlerinde Fırın Sıcaklığının Önemi, Harran Üniversitesi, GAP 2. Mühendislik Kongresi, Bildiriler Kitabı, Şanlıurfa, 218-224.
- Çoban, F., 1994. Mihalgazi (Eskişehir) Bentonitinin Mineralojik Özellikleri ve Oluşumu, T. J. K. Kurultay Bülteni, 9, 297-303.
- Çoban, F., 2001. Çayırılık Tepe (Başören-Kütahya) Bentonitlerinin Alterasyon Sırasında Majör, Eser ve Toprak Elementlerinin Mobilizasyonu, Türkiye 10. Ulusal Kil Sempozyumu, Konya, 282-304.
- Das, B. M., 1983. Advanced Soil Mechanics, McGraw Hill, New York, 511 s.
- Day, R. W., 1994. Swell-Shrink Behaviour of Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120, 3, 618-623.
- Demir, E., 2003. Tirebolu (Giresun) Bentonitinde Yüzey Özelliklerinin Asit Aktivasyonu ile Değişimi, XI. Ulusal Kil Sempozyumu, 3-6 Eylül, İzmir, Türkiye.
- Demirdağ, A., 1994. Şişen Zeminler ve Bir Kilin Şişme Basıncına Kireç Katkısının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dif, A. E. ve Bluemel, W. F., 1991. Expansive Soils under Cyclic Drying and Wetting, Geotechnical Testing Journal, 14, 1, 96-102.
- El-Rawi, N. M. ve Awad, A. A. A., 1981. Permeability of Lime Stabilized Soils, Transportation Engineering Journal, 107, 1, 25-35.
- Ergüler, Z. A., 2001. Ankara Kilinin Şişme Davranışının ve Örselenmenin Şişmeye Etkisinin İncelenmesi, Şişme Potansiyelinin Görgül Yaklaşımlarla Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erol, O., Dhowian, A. W. ve Youssef, A., 1988. Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in Kingdom of Saudi Arabia, King Saud University Press 1400, Saudi Arabia, 123 s.



- Esaki, T., Zhang, M. ve Mitani, Y., 1997. Comparative Tests for Evaluating Permeability Changes of a Compacted Bentonite/Sand Mixture During Shear, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 20, 979-986.
- Evans, G. L. ve Bell, D. H., 1981. Chemical Stabilization Odloes, New Zealand, 10th ICSMFE, Stockholm., 3, 649-658.
- Fleming, L. N. ve Inyang, H. I, 1995. Permeability of Clay-Modified Fly Ash under Thermal Gradients, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 7, 3, 178-182.
- Galvão, T. C. B., Elsharief, A. ve Simões, G. F., 2004. Effects of Lime on Permeability and Compressibility of Two Tropical Residual Soils, Journal of Environmental Engineering, 130, 8, 881-885.
- Gillot, J. E., 1963. Clay in Engineering Geology, Elsevier, Amsterdam, 296 s.
- Gleason, M. H., Daniel, D. E. ve Eykholt, E. R, 1997. Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 5, 438-445.
- Graig, R. F., 1997. Soil Mechanics, Sixth Edition, Spon Press, New York, 485 s.
- Grim, R. E., 1962. Applied Clay Mineralogy: Int. Series in Earth Sciences, Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 421 s.
- Grim, R. E., 1974. Clay Mineralogy, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Grim, R. E. ve Güven, N., 1978. Bentonites, Geology, Mineralogy, Properties and Uses, Devel. Sedimentol., 24, Elsevier, Amsterdam, 256 s.
- Güney, Y., Sari, D., Cetin, M. ve Tuncan, M., 2007. Impact of Cycling Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil, Building and Environment, 42, 2, 681-688.
- Güler, E. ve Bozbey, İ. S., 2002. Deponi Sahalarında Kullanılan Kil Geçirimsiz Kaplamalarının Kimyasal ve Mekanik Yöntemlerle İyileştirilmesi, TÜBİTAK İNTAG, Proje No. 718;197I013, 1-136.
- Güngör, N. ve Yelkenkaya, A., 1998. Bentonit Kil Minerallerinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri Üzerine Değişebilir Katyonların Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi, 46, 4, 1-6.
- Head, K.H., 1992. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol.I. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Hekimoğlu, S., 1996. Kil Zeminlerin Şişme Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Hoeks, J., Glas, H., Hofkamp, J. ve Ryhiner, A. H., 1987. Bentonite Liners for Isolation of Waste Disposal Sites, Waste Management & Research, 5, 1, 93-105.
- Holopainen, P., 1984. Crushed Aggregate-Bentonite Mixtures as Backfill Material for Repositories of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Engineering Geology, 21, 3-4, 239-245.
- Holtz, W. G., 1959. Expansive Clay-Properties and Problems, Colorado School of Mines.
- Holtz, W. G. ve Gibbs, H. J., 1956. Engineering Properties of Expansive Clays, Transactions, ASCE, 121, 641-663.
- Huff, W. D. ve Türkmenoğlu, A. G., 1981. Chemical Characteristics and Origin of K-Bentonites along the Cincinnati Arch, Clays and Clay Minerals, 29, 2, 113-123.
- Komine, H., 2004. Simplified Evaluation on Hydraulic Conductivities of Sand-Bentonite Mixture Backfill, Applied Clay Science, 26, 1-4, 13-19.
- Komine, H. ve Ogata, N., 2003. New Equations for Swelling Characteristics of Bentonite-Based Buffer Materials, Canadian Geotechnical Journal, 40, 2, 460-475.
- Komornik, A. ve David, D., 1973. Prediction of Swelling Potential of Clays, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 95, 1, 209-225.
- Kraus, J. F., Benson, C. H., Erickson, A. E. ve Chamberlain, E. J., 1997. Freze-Thaw Cycling and Hydraulic Conductivity of Bentonitic Barriers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123, 3, 229-238.
- Kumar, A., Walia, B. S. ve Bajaj, A., 2007. Influence of Fly Ash, Lime and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil, Journal of Materials in Civil Engineering, 19, 3, 242-248.
- Lakshmikantha, H. ve Sivapullaiah, P. V., 2006. Relative Performance of Lime Stabilized Amended Clay Liners in Different Pore Fluids, Geotechnical and Geological Engineering, 24, 5, 1425-1448.
- Lambe, T. W. ve Whitman, R. V., 1969. Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 553 s.
- Lichner, L., Dlapa P., Doerr, S. H. ve Solera, J. M., 2005. Evaluation of Different Clay Minerals as Additives for Soil Water Repellency Alleviation, Applied Clay Science, 31, 3-4, 238-248.
- Lin, L. C. ve Benson, C. H., 2000. Effect of Wet-Dry Cycling on Swelling and Hydraulic Conductivity of GCLs, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126, 1, 40-49.

- Lingnau, B. E., Graham, J., Yarechewski, D., Tanaka, N. ve Gray, M. N., 1996. Effects of Temperature on Strength and Compressibility of Sand-Bentonite Buffer, Engineering Geology, 41, 1-4, 103-115.
- Liu, C. ve Evett, J. B., 1984. Soil Properties: Testing, Measurement and Evaluation, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 448 s.
- Lu, Z., Chen, Z. ve Pu, Y., 2002. CT Study on the Crack Evolution of Expansive Soil During Drying and Wetting Cycles, Rock and Soil Mechanics, 23, 4, 417-422.
- McCallister, L. D. ve Petry, T. M., 1991. Physical Property Changes in a Lime-Treated Expansive Clay Caused by Leaching, Transportation Research Record, 1295, 37-44.
- Metehan, T. C., 1994. Shear Strength Improvement at The Interface of Lime-Treated Soil and Concrete Structures, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Millot, G., 1970. Geology of Clays. Springer, New York, 429 s.
- Mitchell, J. K., 1993, Fundamentals of Soil Behavior, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 437 s.
- Montes-H, G., Duplay, J., Martinez, L. ve Mendoza, C., 2003. Swelling-Shrinkage Kinetics of MX80 Bentonite, Applied Clay Science, 22, 6, 279-293.
- Nakashima, H., Ishii, T., Nagasawa, T., Ogata, N. ve Komine, H., 1995. Method for Designing Bentonite/Sand Mixture to Achieve The Target Permeability, Materials Research Society Symposium - Proceedings, 353, 1, 247-252.
- Nelson, J. D. ve Miller, D. J., 1992. Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wley & sons, Inc., New York.
- Nhan, C. T., Graydon, J. W. ve Kirk, D. W., 1996. Utilizing Coal Fly Ash as a Landfill Barrier Material, Waste Management, 16, 7, 587-595.
- Osipov, V. I., Bik, N. N. ve Rumjantseva, N. A., 1987. Cyclic Swelling of Clays, Apply Clay Science, 2, 7, 363-374.
- Önalp, A., 2002. Geoteknik Bilgisi I Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 408 s.
- Özaydın, K., 1995. Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 261 s.
- Özdemir, N., 1998. Radyoaktif Atıkların Saklanması Zeolit ve Bentonitin Kullanılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Parashar, S. P. ve Wong, K. S., 1995. Discussion of Paper The Swelling-Shrink Behaviour of Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121, 4, 385-386.
- Popescu, M. E., 1979. Engineering Problems Associated with Expansive Clays from Romania, Engineering Geology, 14, 1, 43-53.
- Pusch, R. ve Alstermark, G., 1984. Experience from Preparation and Application of Till/Bentonite Mixtures, Engineering Geology, 21, 3-4, 377-382.
- Rao, S. M. ve Thyagaraj T., 2003. Lime Slurry Stabilisation of an Expansive Soil, Geotechnical Engineering, 156, 3, 139-146.
- Rao, S. M., Reddy, B. V. V. ve Muttharam, M., 2001. Impact of Cycling Wetting and Drying on the Swelling Behaviour of Stabilized Expansive Soils, Engineering Geology, 60, 3-4, 221-233.
- Resmi Gazete, 1991. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Başbakanlık Basımevi 20814.
- Resmi Gazete, 1993. Tıbbı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Başbakanlık Basımevi 21586.
- Resmi Gazete, 2005. Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Başbakanlık Basımevi 25755.
- Reyes, E., Caballero, E., Huertes, F. ve Linares, J., 1987. Bentonite Deposits from Caba de Gata Region Almeria, SE Spain, Guidebook, the 6th Meeting of the European Clay Groups, Sevilla, M. O. Huertas (Ed), 9-31.
- Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H. ve Drvenich, V. P., 1982. Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 108, 6, 835-850 (Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Mühendislik&Mimarlık Yayınları, Ankara, 624 s.'de atıfta bulunmuştur).
- Sargın, İ., 1996. Effect of Lime and Compactive Effort on Hydraulic Conductivity of Clay Liners, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Seed, H. B., Woodward, R. J. ve Lundgreen, R., 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 88, 3, 53-88.
- Selvam, A. ve Barkdoll, B., 2005. Clay Permeability Changes-Flexible Wall Permeameter & Environmental Scanning Electron Microscope, World Water Congress, 173, 302.
- Snethen, D. R., 1984. Evaluation on Expedient Methods for Identification on Classification of Potentially Expansive Soils, Proc. 5th Int. Conf. On Expansive Soils, Adelaide, 22-26.

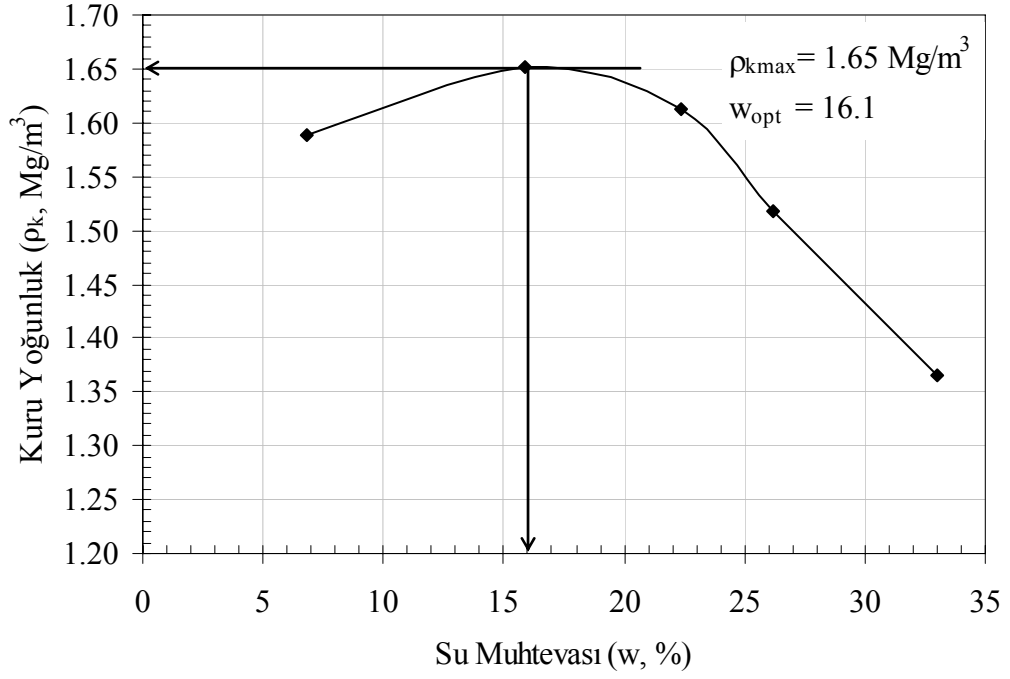
- Sowers, G. B. ve Sowers, G. F., 1970. Introductory Soil Mechanics and Foundations, Macmillan Publishing Co., New York.
- Tang, G. X., Graham, J., Blatz, J., Gray, M. ve Rajapakse, R. K. N. D., 2002. Suctions, Stresses and Strengths in Unsaturated Sand-Bentonite, Engineering Geology, 64, 2-3, 147-156.
- Tavus, İ. F., 1995. Effect of Lime and Curing on Permeability Properties of Compacted Clay, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taylor, D., W., 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. Wiley, New York, 700 s. (Uzuner, B. A., 1998. Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği, Teknik Yayınevi, Mühendislik, Mimarlık Yayınları, Ankara, 290 s.'da atıfta bulunmuştur).
- Teale, C. T. ve Spears, D. A., 1986. The Mineralogy and Origin of Some Silurian Bentonites, Welsh Borderland, U. K., Sedimentology, 33, 5, 757-765.
- Thompson, M. R. 1969. Engineering Properties of Lime-Soil Mixtures, Journal of Materials, 4, 4.
- Tonoz, M. C., 2001. Killi Zeminlerin Kireçle Stabilizasyonu: Ankara Kilinde İndeks Şişme ve Dayanım Özellikleri Açısından Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 6166, 1988. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri: Kimyevi Deneyler - Zeminde pH Değerinin Ölçümü, TS Enstitüsü, Ankara.
- Tsai, T. ve Vesilind, P. A., 1998. A New Landfill Liner To Reduce Ground Water Contamination from Heavy Metals, Journal of Environmental Engineering, 24 (11), 1061-1065.
- Türkmenoğlu, A. G. ve Aker, S., 1990. Origin of Sedimentary Bentonite Deposits of Çankırı Basin, Turkey, Proceedings of the 5th Int. Clay conference, Strasburg, 88, 63-72.
- Türköz, M., 2001. Şişen Zeminlerin Sönmüş Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik Killere Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Türköz, M., 2006. Şişen Killerin Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik Killere Uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19, 2, 75-88.
- URL-1, <http://www.die.gov.tr/TURKISH/SONIST/CEVRE/14052003.htm> Devlet İstatistik Enstitüsü Başkanlığı, 01/03/2006.

- URL-2, [http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab\\_id=496](http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=496), 01/07/2008.
- URL-3, <http://www.trabzon.bel.tr/Projeler/kati-atik.html>, 01/07/2008.
- URL-4, <http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/life/taske/02.pdf>, 06/06/2009.
- Uzuner, B. A., 1998. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Mühendislik, Mimarlık Yayınları, Ankara, 290 s.
- Uzuner, B. A., 2000. Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon, 205 s.
- Velosa, C. L. ve Colmenares, J. E., 2006. Analysis of The Volume Change Behavior of Expansive Compacted Soils, Unsaturated Soils, 189, 916-927.
- Villar, M. V., 1999. Investigation of Behaviour of Bentonite by Means of Suction-Controlled Oedometer Tests, Engineering Geology, 54, 1-2, 67-73.
- Villar, M. V. ve Lloret, A., 2004. Influence of Temperature on The Hydro-Mechanical Behaviour of A Compacted Bentonite, Applied Clay Science, 26, 1-4, 377-350.
- Wang, M. C. ve Huang, C. C., 1984. Soil Compaction and Permeability Prediction Models, Journal of Environmental Engineering, 110, 6, 1063-1083.
- Wiebe, B., Graham, J., Tang, G. X. ve Dixon, D., 1998. Influence and Pressure, Saturation, and Temperature on The Behavior of Unsaturated Sand-Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 35, 2, 194-205.
- Williams, A. B. ve Donaldson, G. W., 1980. Building on Expansive Soils in South Africa 1973-1980. Proc. 4th. Int. Conf. On Expansive Soils, Denver, Colorado, 834-84.
- Xu, Y. F., Matsuoka, H. ve Sun, D. A., 2003. Swelling Characteristics of Fractal-Textured Bentonite and Its Mixtures, Applied Clay Science, 22, 4, 197-209.
- Yıldırım, S., 2002. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 466 s.
- Yıldız, A. ve Kuşçu, M., 2002. Geological and Technological Properties of Başören (Kütahya) Bentonite Deposits, 4th Int. Symp. On Eastern Mediterranean Geology, 21-25 May 2001, Ö. T. Akıncı (Ed), Isparta, Turkey, 295-306.
- Yıldız, M., 1998. Katı Atık Depolarında Taban Malzemesinin Hidrolik ve Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Zhang, M., Esaki, T. ve Mitani, Y., 1995. Permeability Variation of Bentonite-Sand Mixture Due to Shear Strain, Materials Research Society Symposium-Proceedings, 353, 1, 261-268.

- Zhang, R., Yang, H. ve Zheng, J., 2006. The Effect of Vertical Pressure on The Deformation and Strenght of Expansive Soil During Cyclic Wetting and Drying, *Unsaturated Soils*, 189, 894-905.
- Zhou, Z. J., Kehler, G., Chalaturnyk, R. J., Wong G. ve Scott J. D., 1999. A New Method for Chemical Road Stabilization. 52nd Canadian Geotechnical Conference, October 25-27. Regina SK, 250-261.

## 7. EKLER

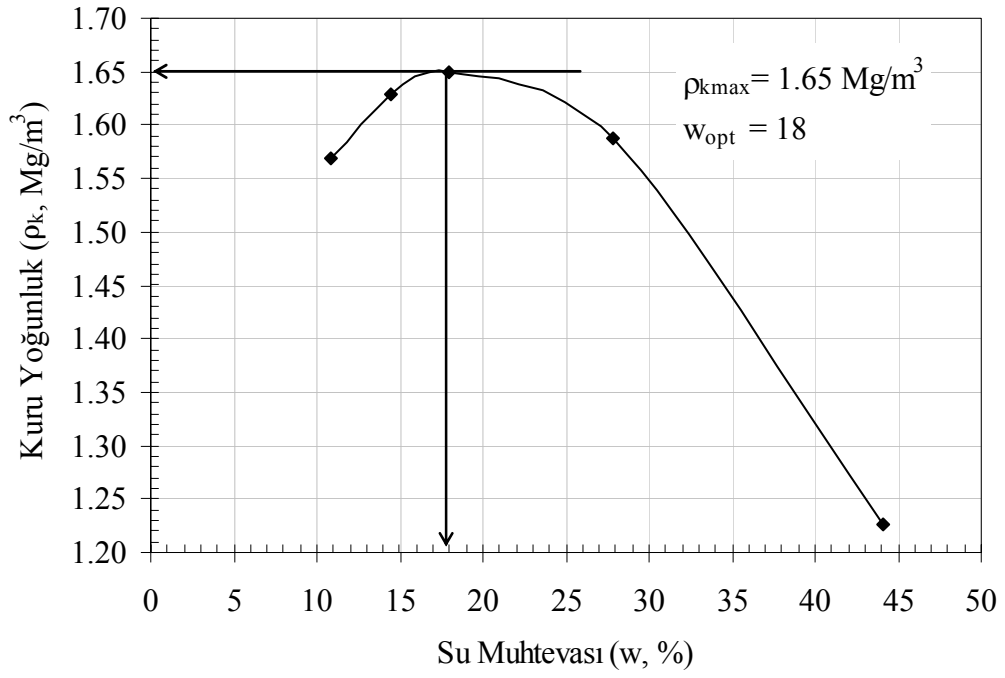
### Ek 1. Kompaksiyon Deney Sonuçları



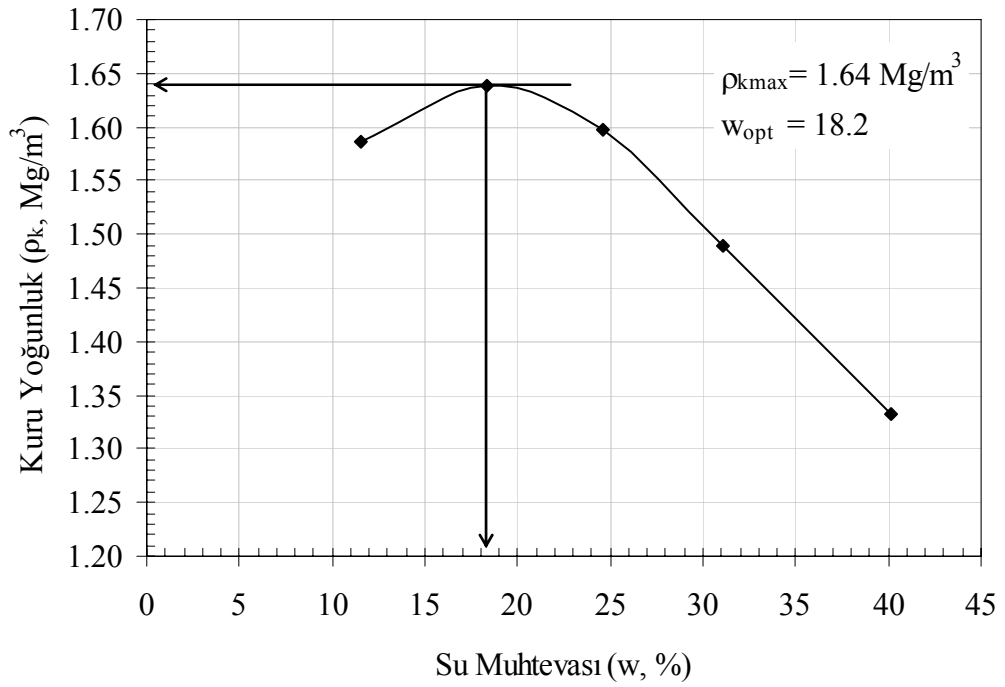
Ek Şekil 1.1. %20 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi



Ek 1'in devamı

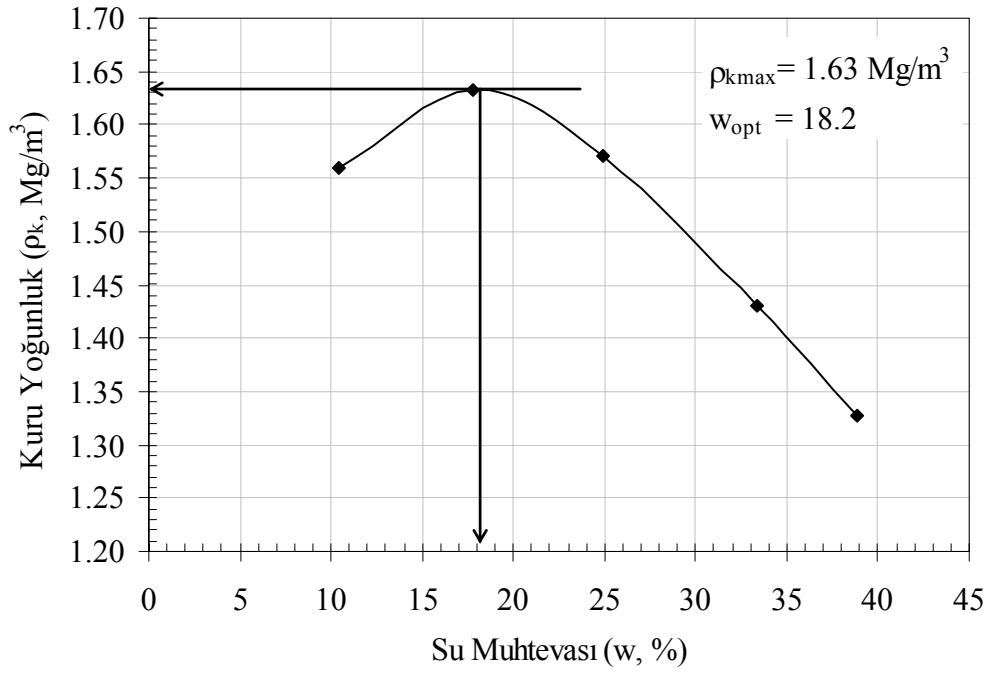


Ek Şekil 1.2. %20 bentonit %1 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

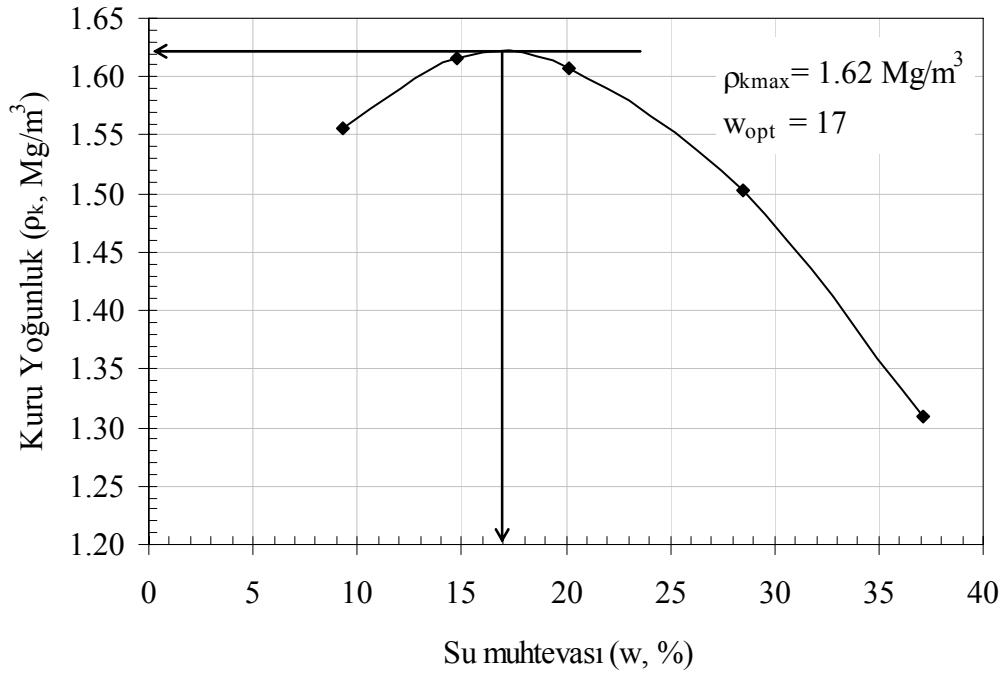


Ek Şekil 1.3. %20 bentonit %2 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 1'in devamı

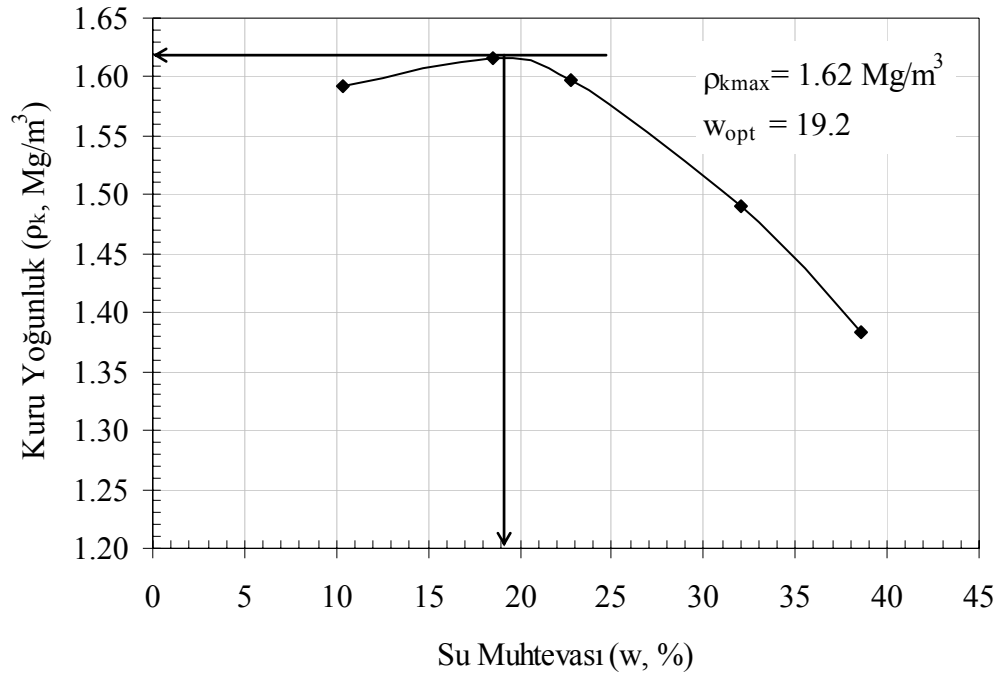


Ek Şekil 1.4. %20 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

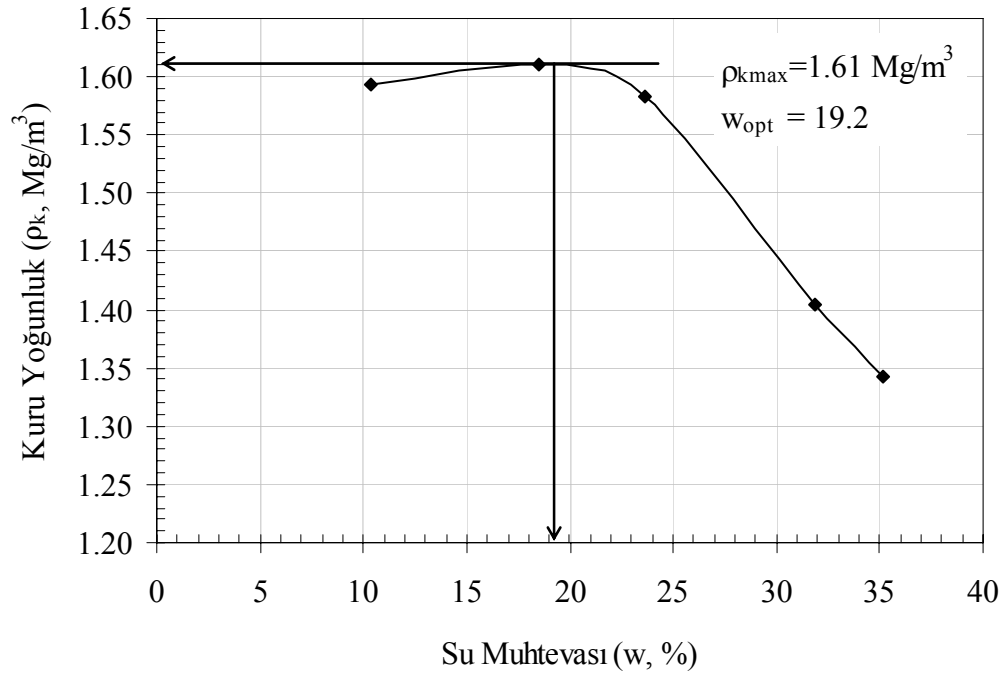


Ek Şekil 1.5. %30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 1'in devamı

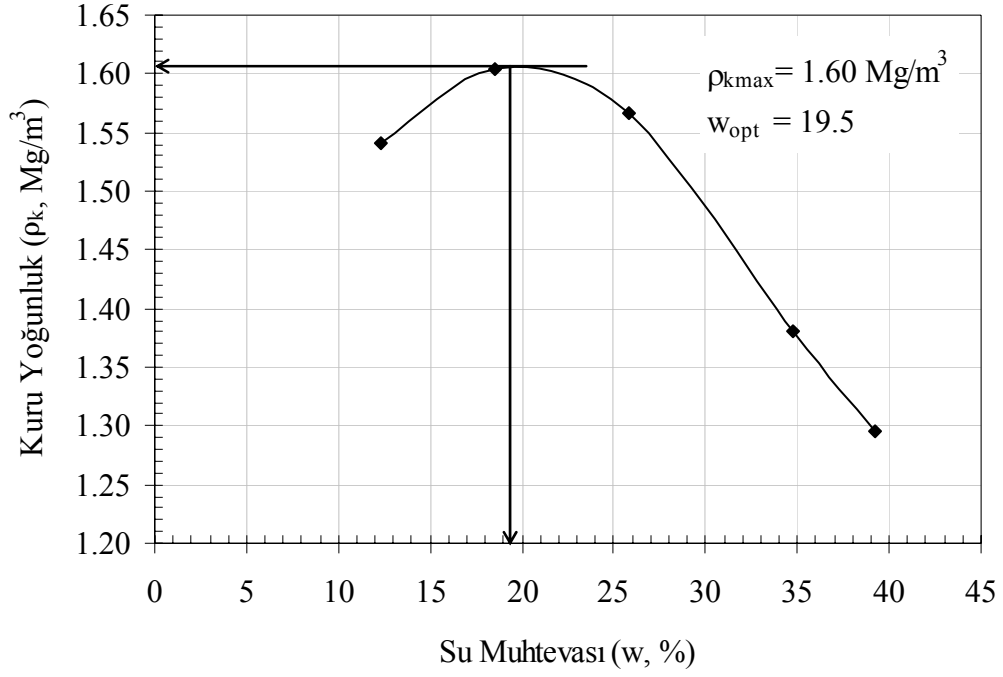


Ek Şekil 1.6. %30 bentonit %1 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

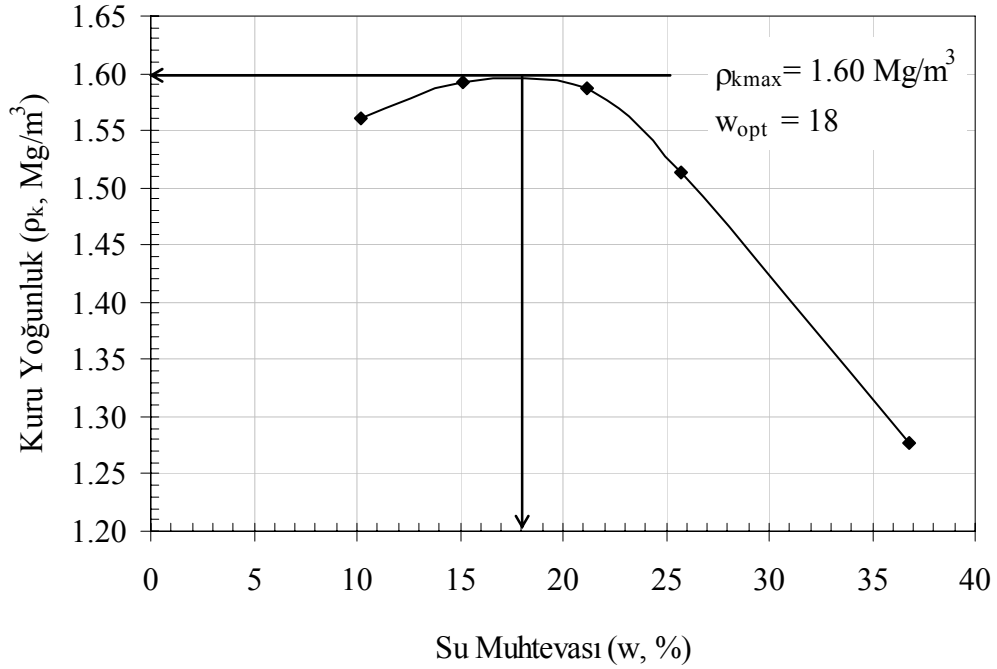


Ek Şekil 1.7. %30 bentonit %2 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 1'in devamı

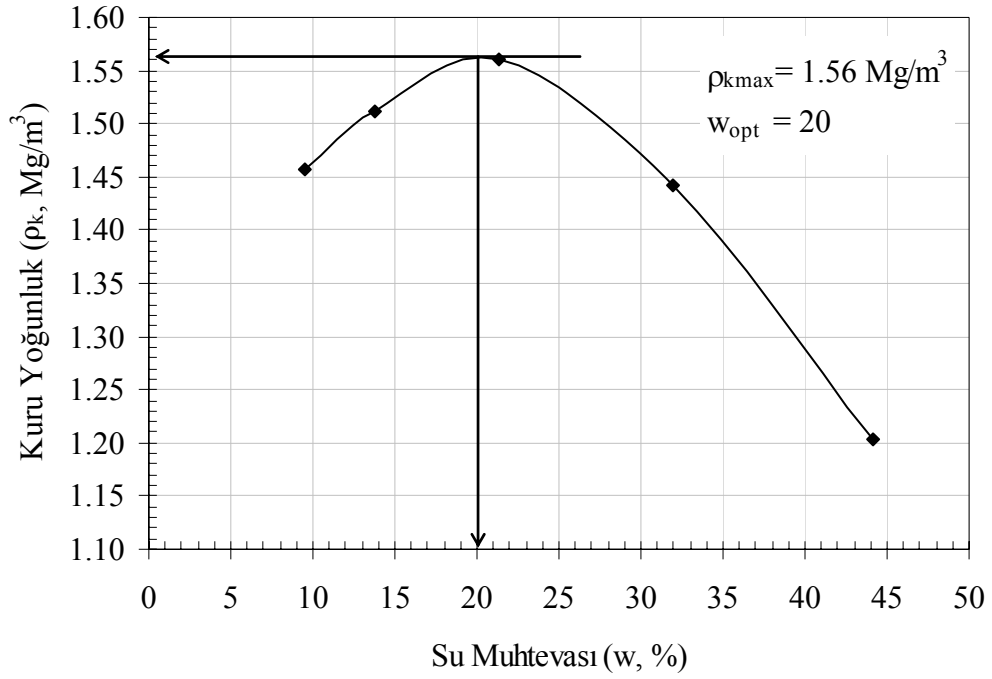


Ek Şekil 1.8. %30 bentonit %3 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

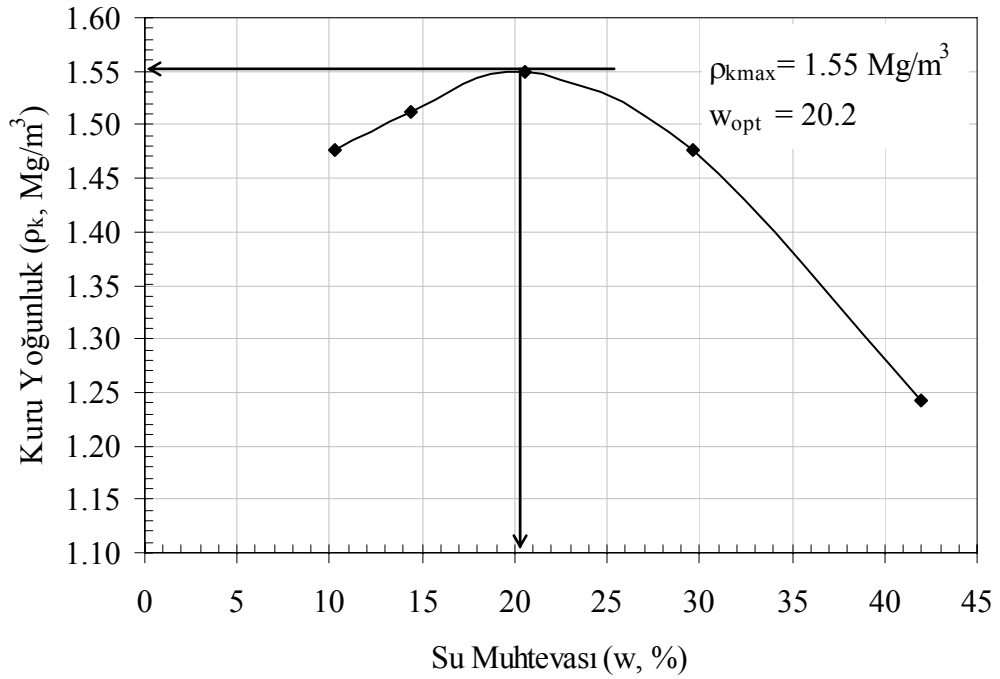


Ek Şekil 1.9. %40 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 1'in devamı

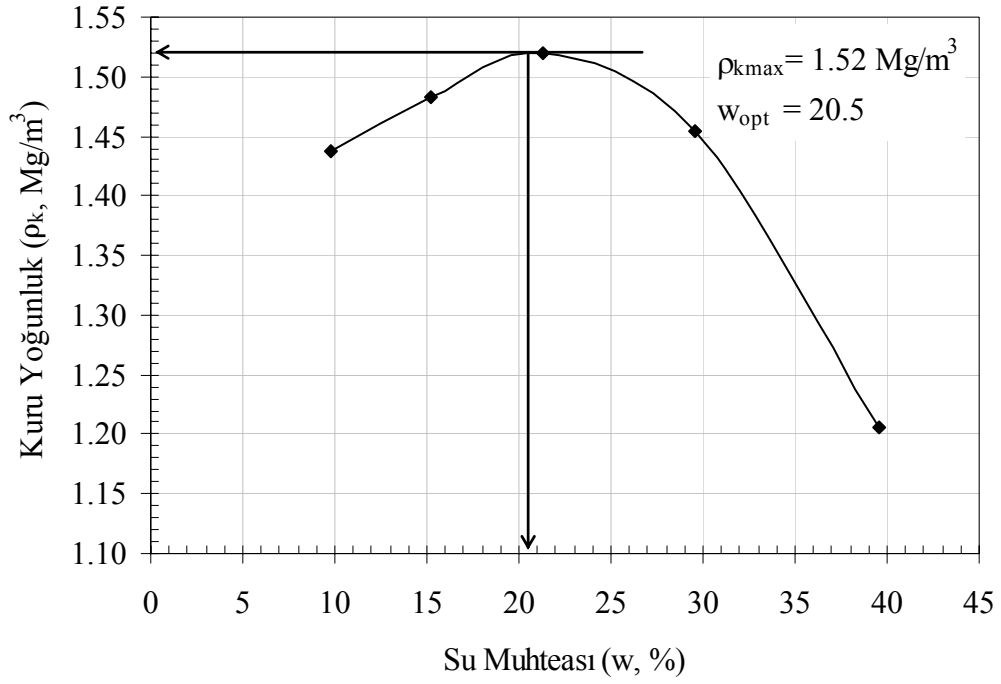


Ek Şekil 1.10. %40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

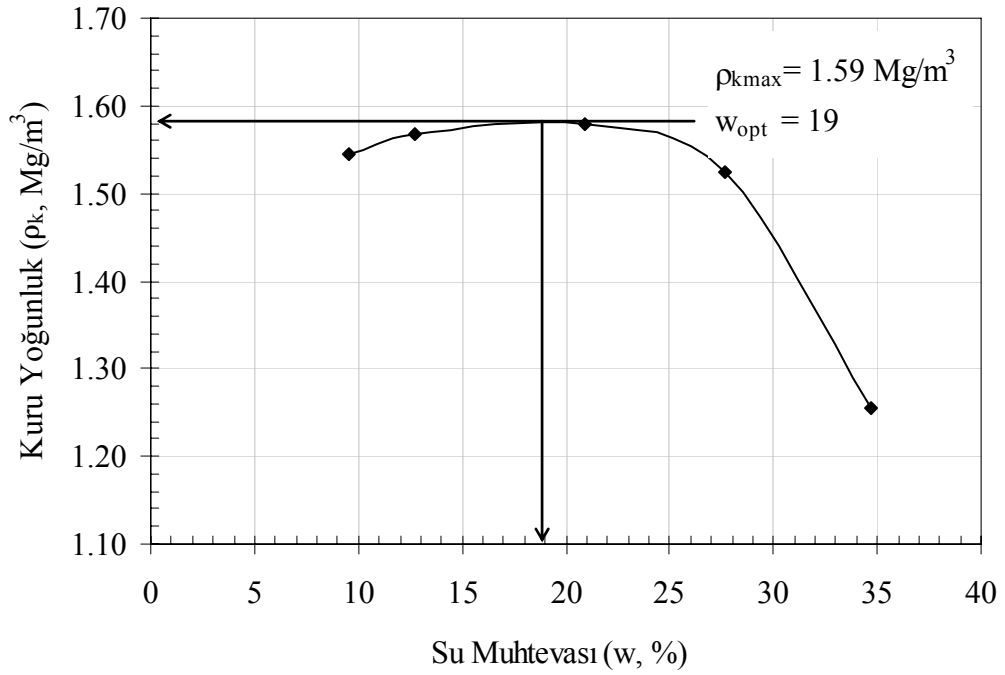


Ek Şekil 1.11. %40 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 1'in devamı

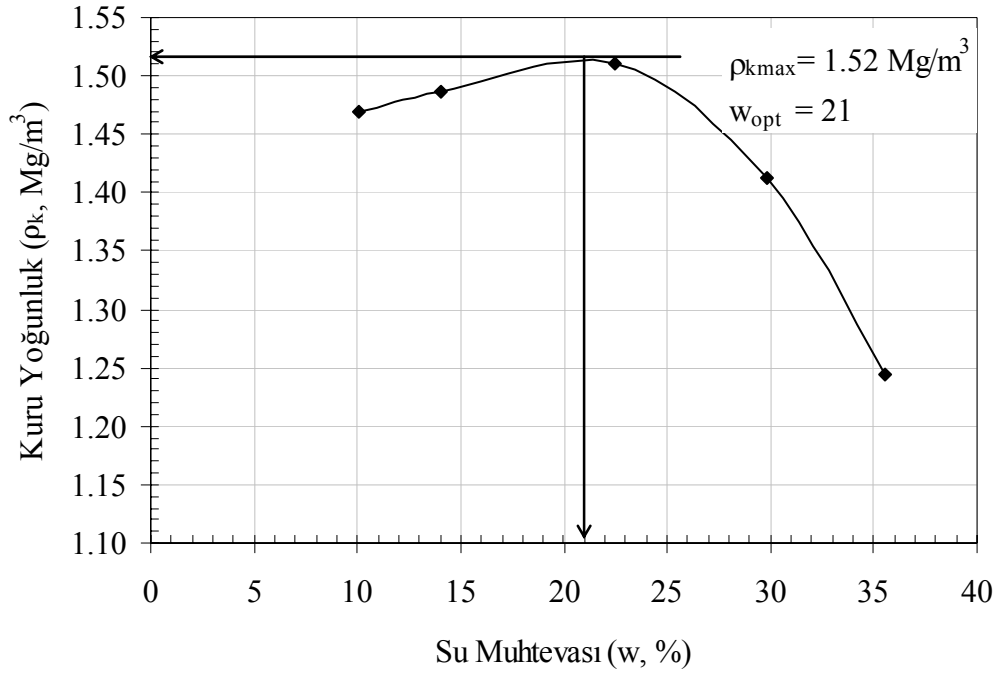


Ek Şekil 1.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

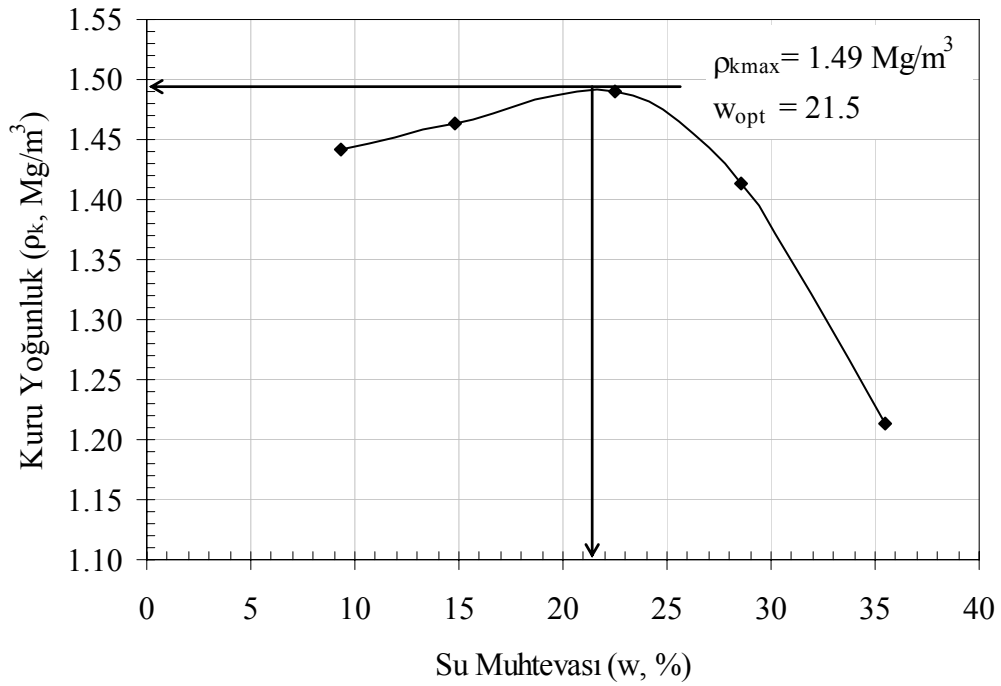


Ek Şekil 1.13. %50 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 1'in devamı

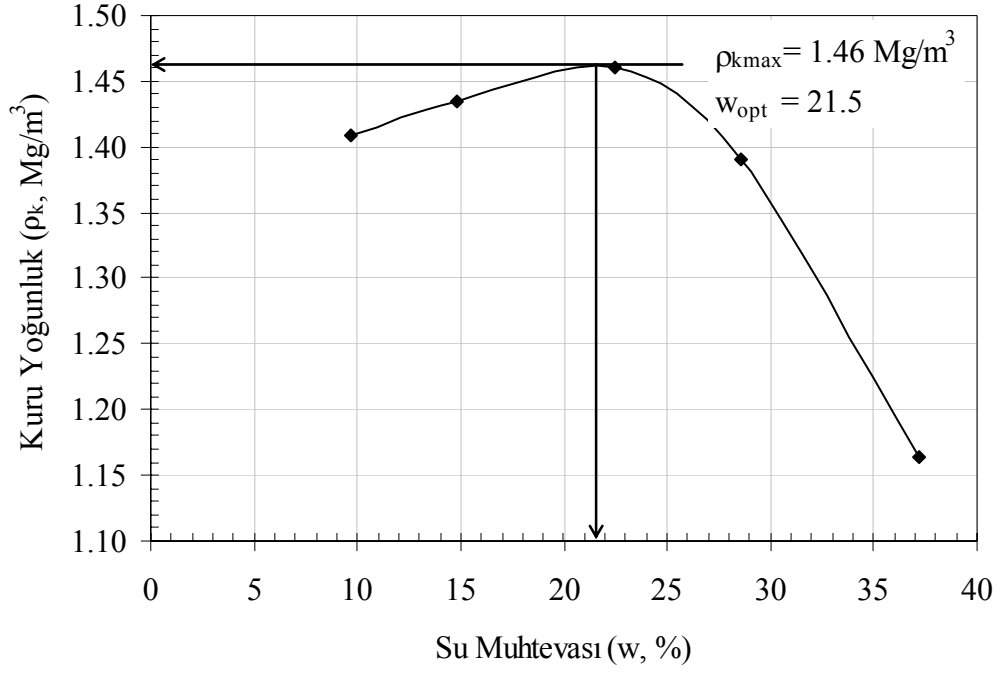


Ek Şekil 1.14. %50 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi



Ek Şekil 1.15. %50 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi

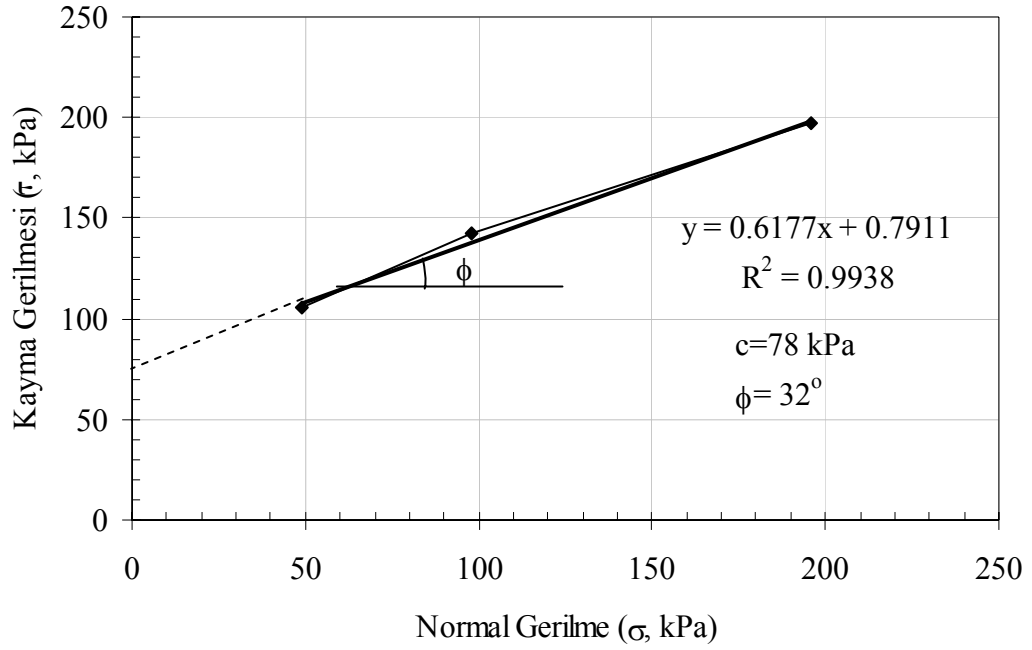
Ek 1'in devamı



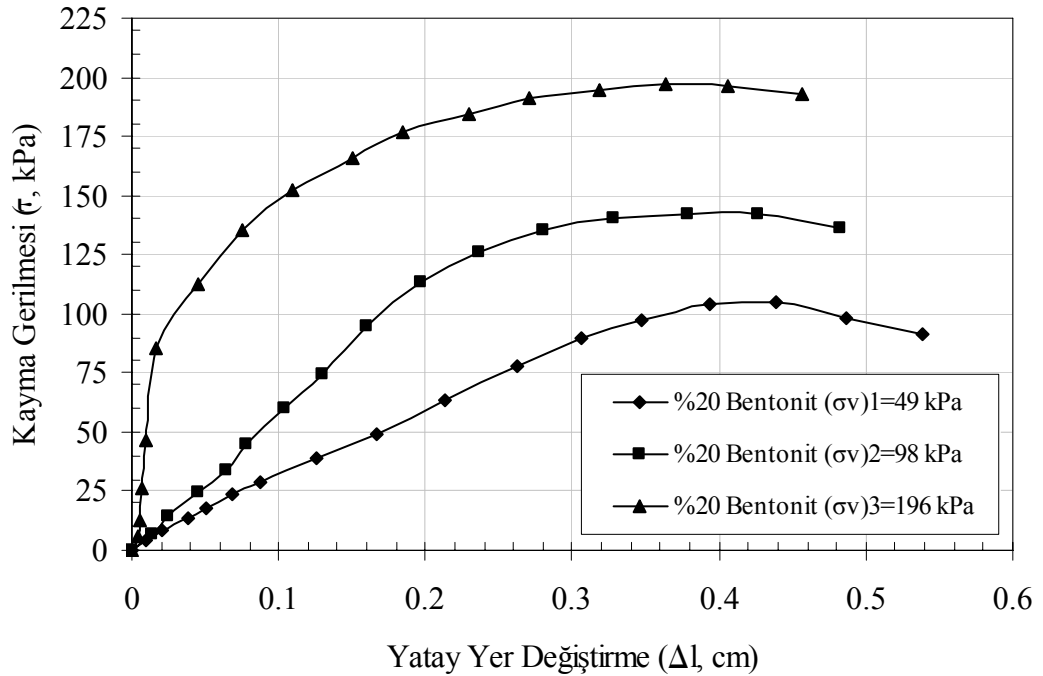
Ek Şekil 1.16. %50 bentonit %3 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımına ait kompaksiyon eğrisi



## Ek 2. Direkt Kesme Deney Sonuçları



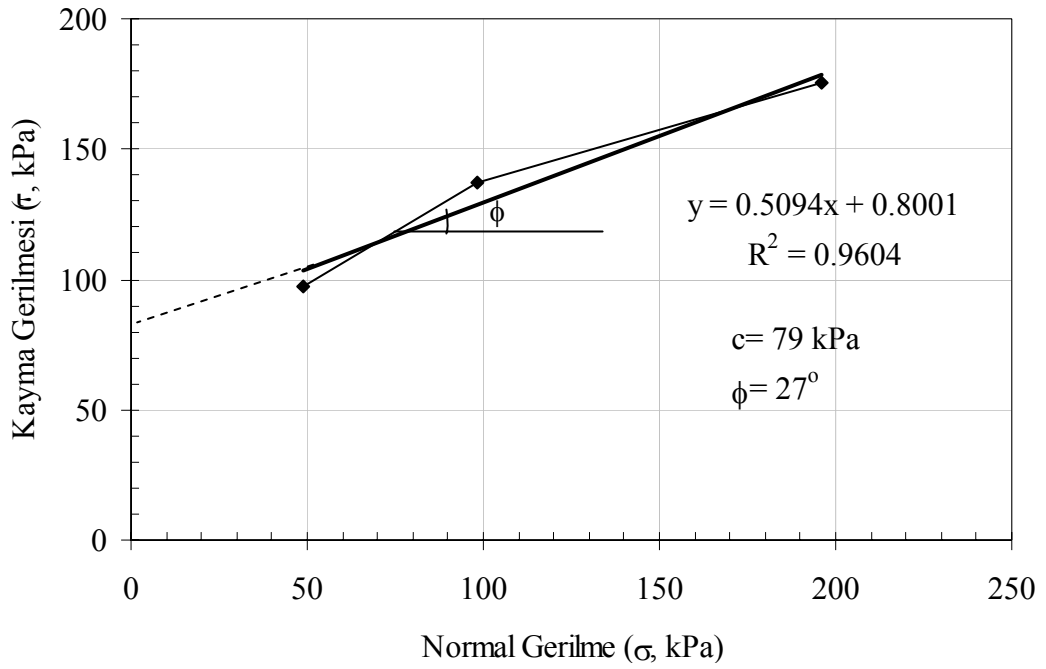
(a)



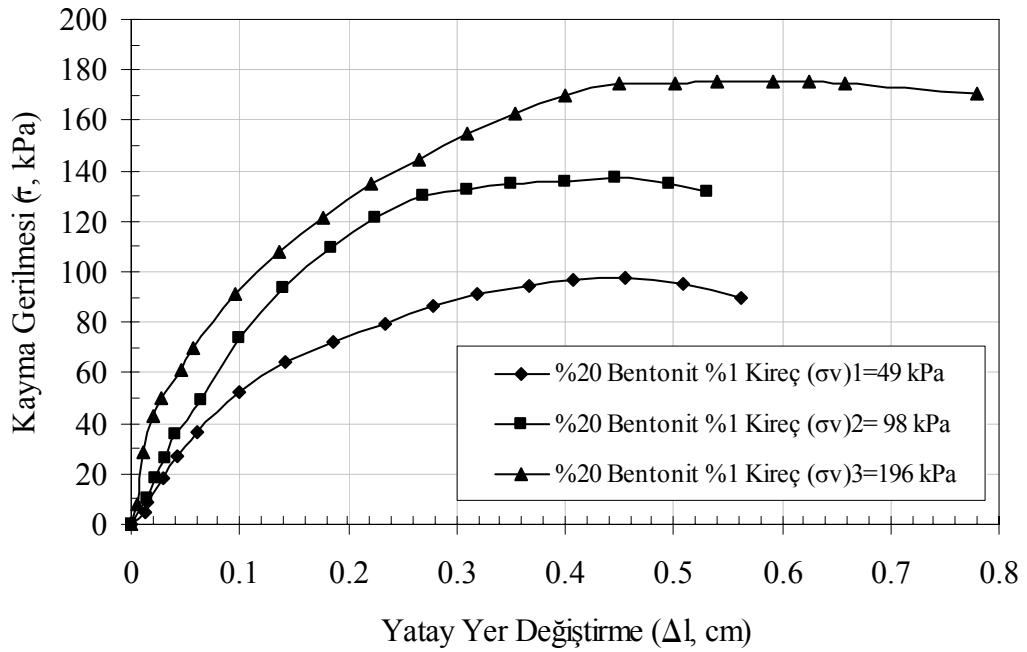
(b)

Ek Şekil 2.1. %20 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



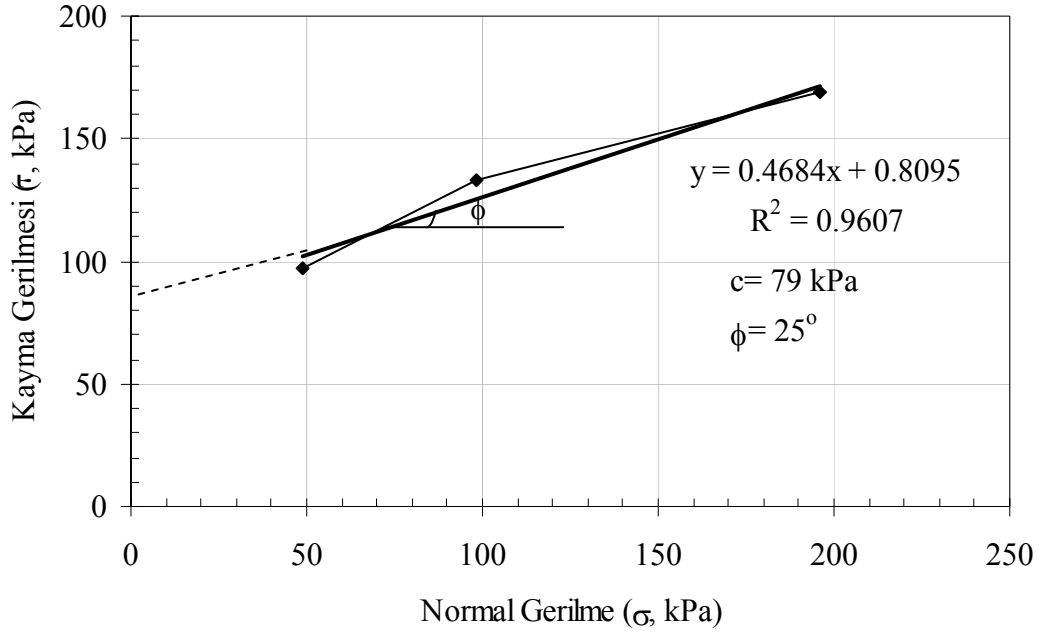
(a)



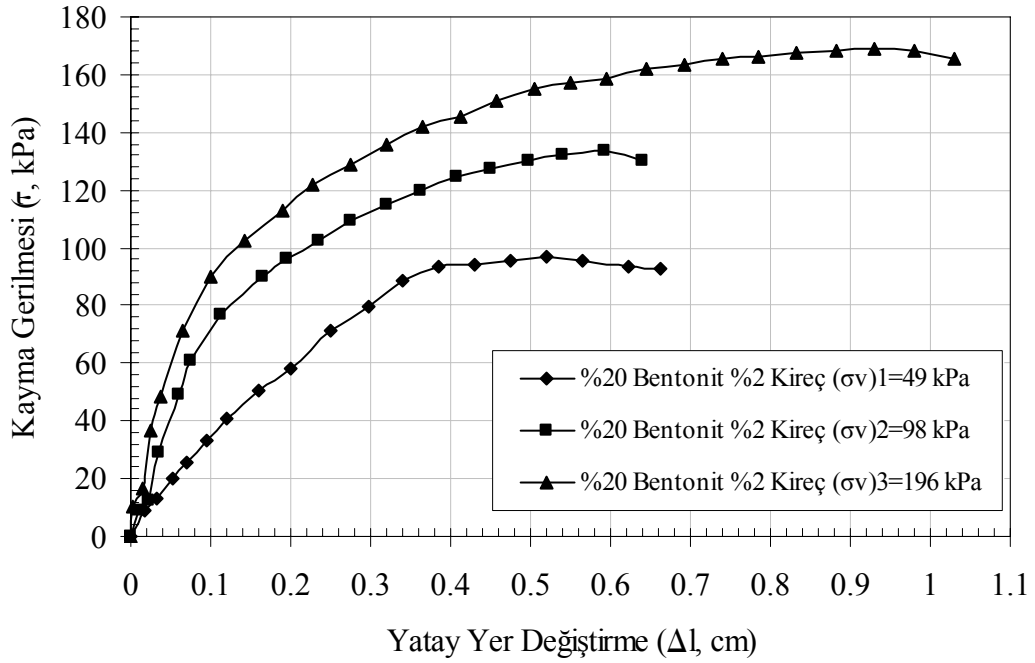
(b)

Ek Şekil 2.2. %20 bentonit %1 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



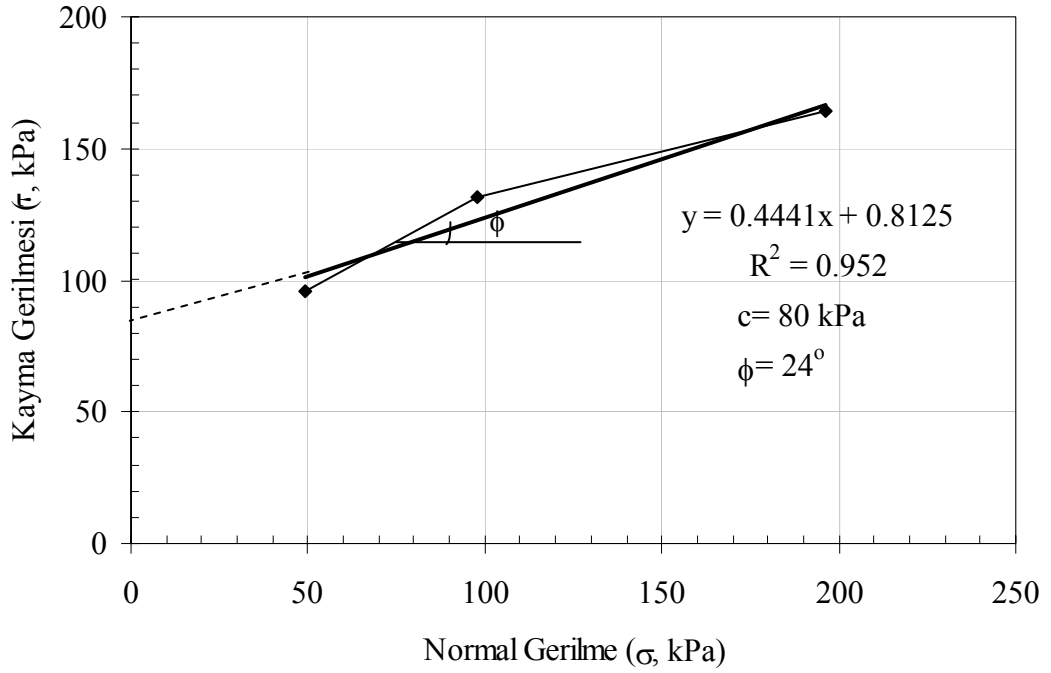
(a)



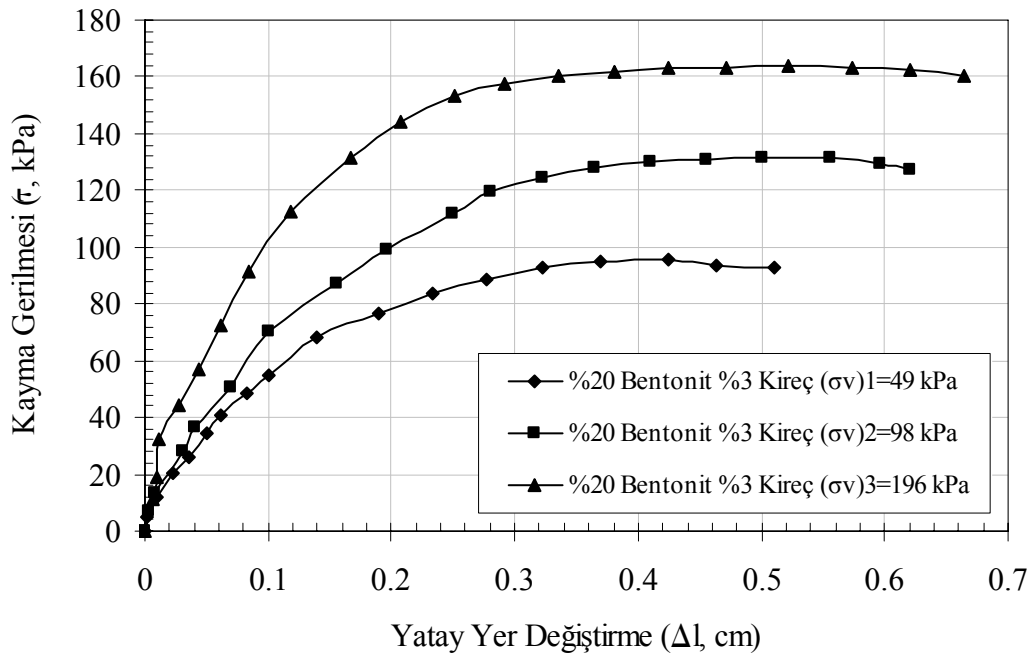
(b)

Ek Şekil 2.3. %20 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



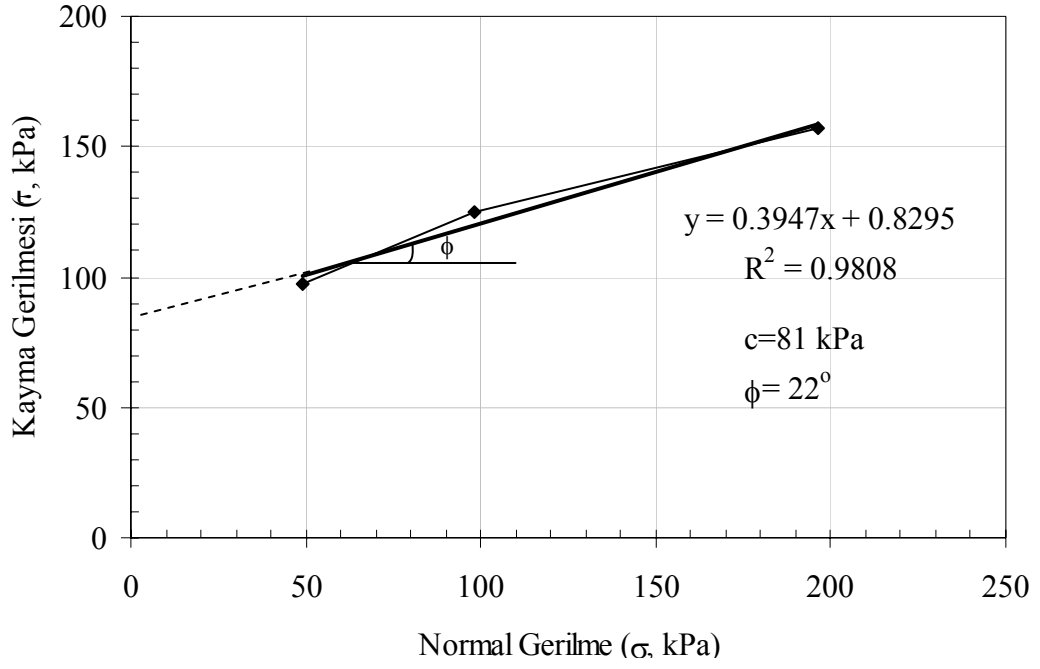
(a)



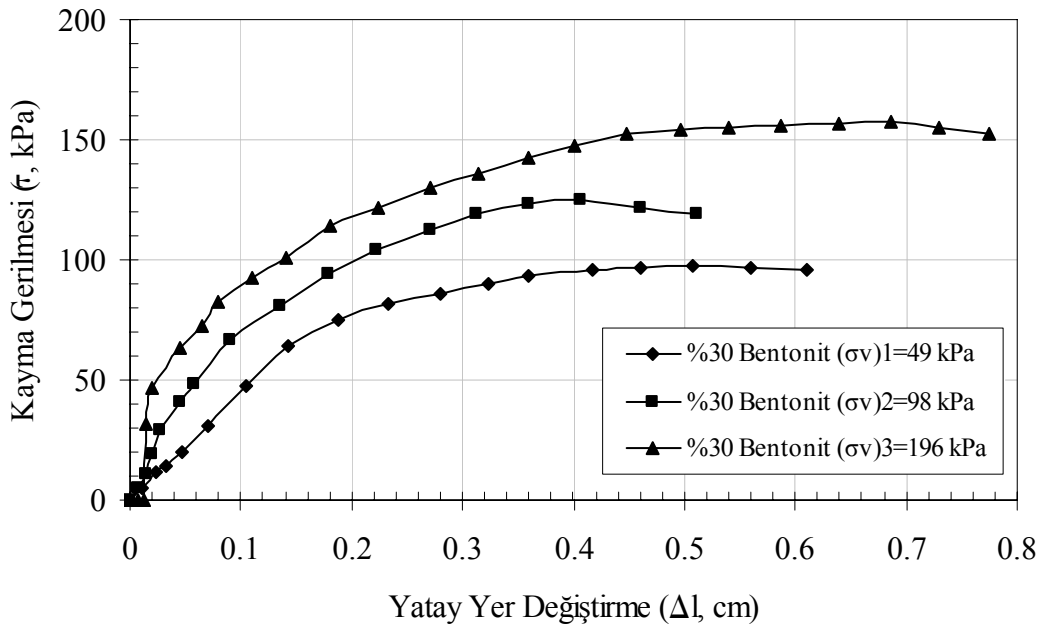
(b)

Ek Şekil 2.4. %20 bentonit %3 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



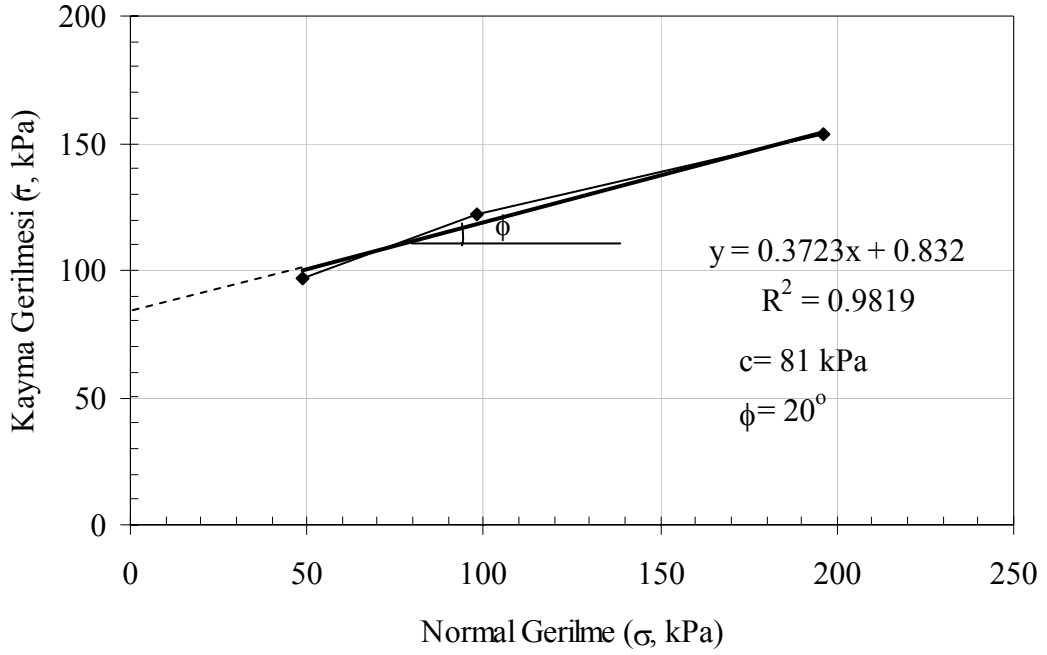
(a)



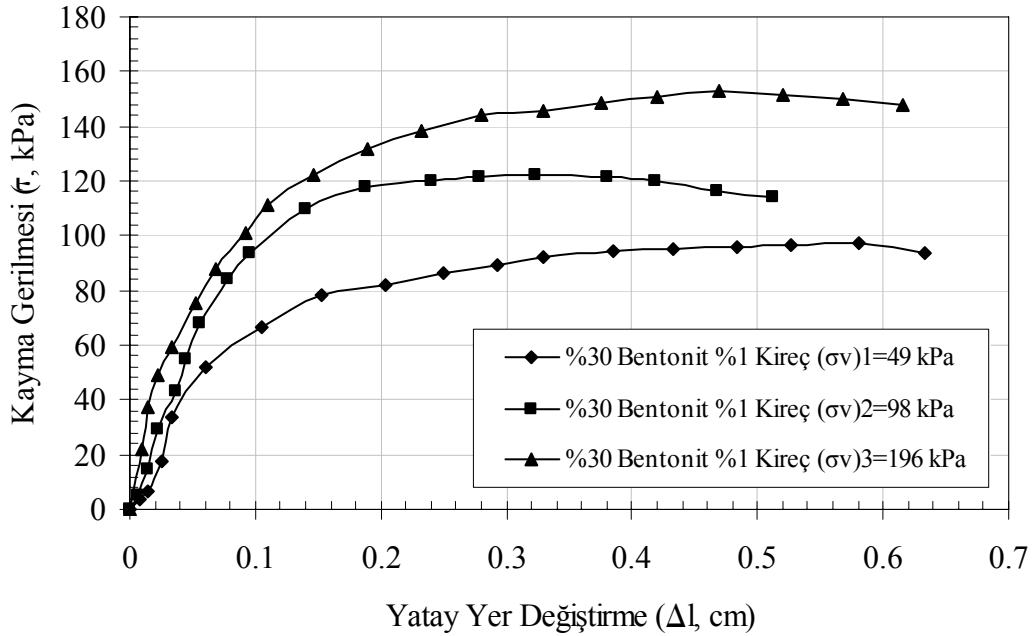
(b)

Ek Şekil 2.5. %30 bentonit muhtevastındaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



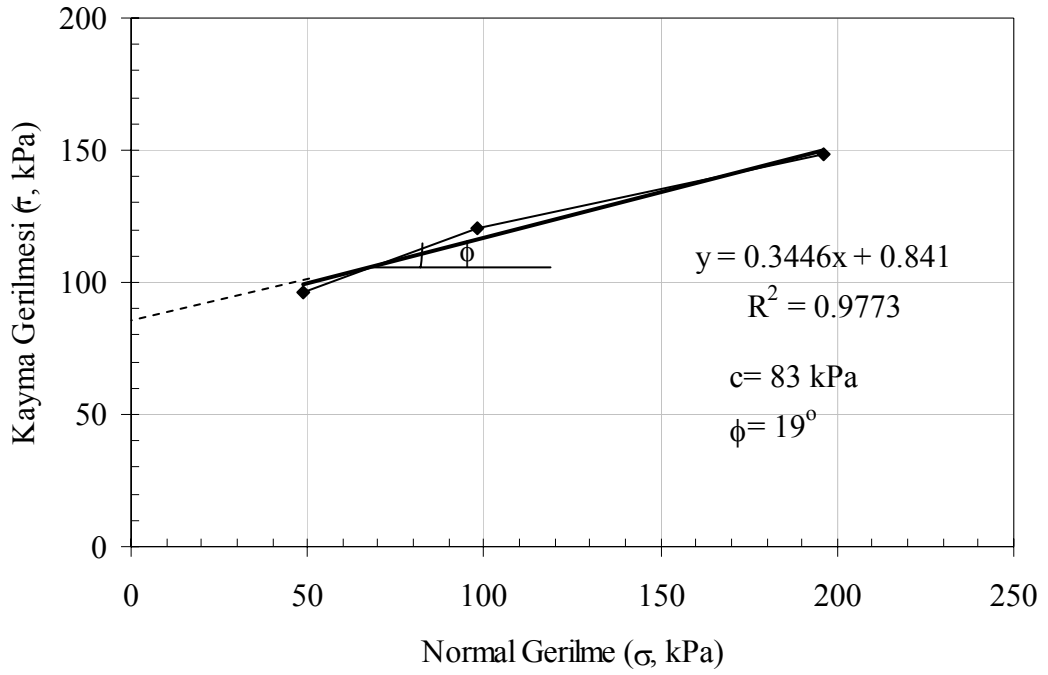
(a)



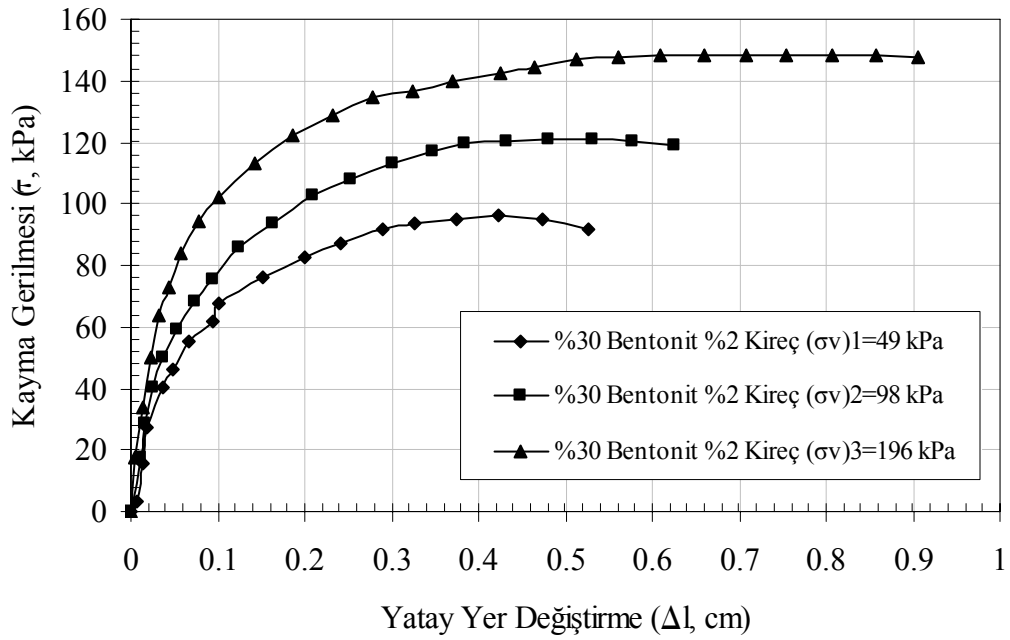
(b)

Ek Şekil 2.6. %30 bentonit %1 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



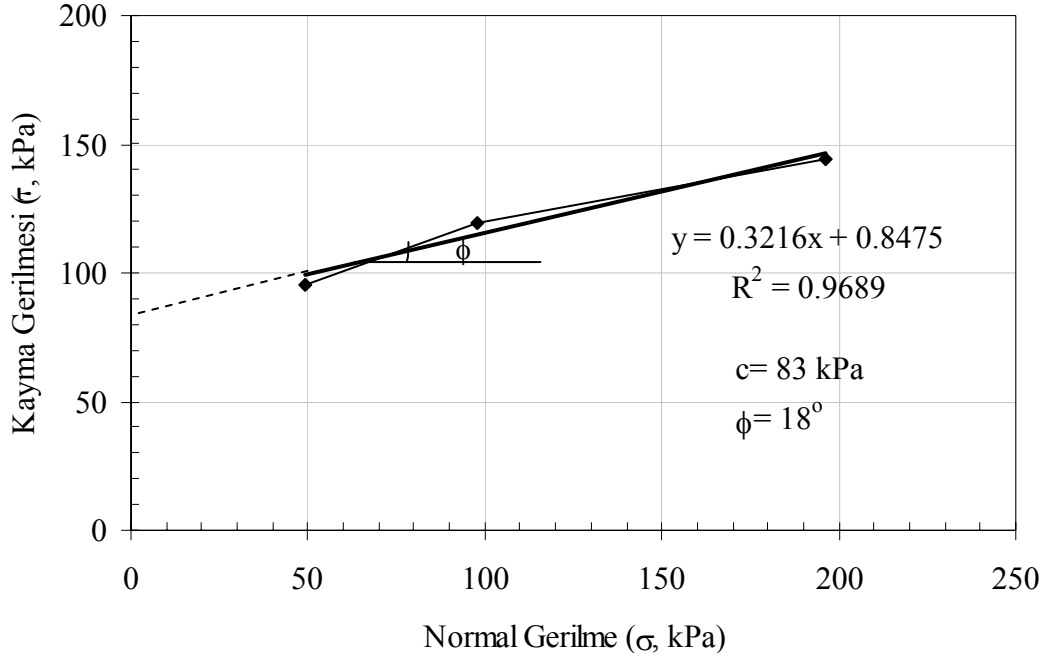
(a)



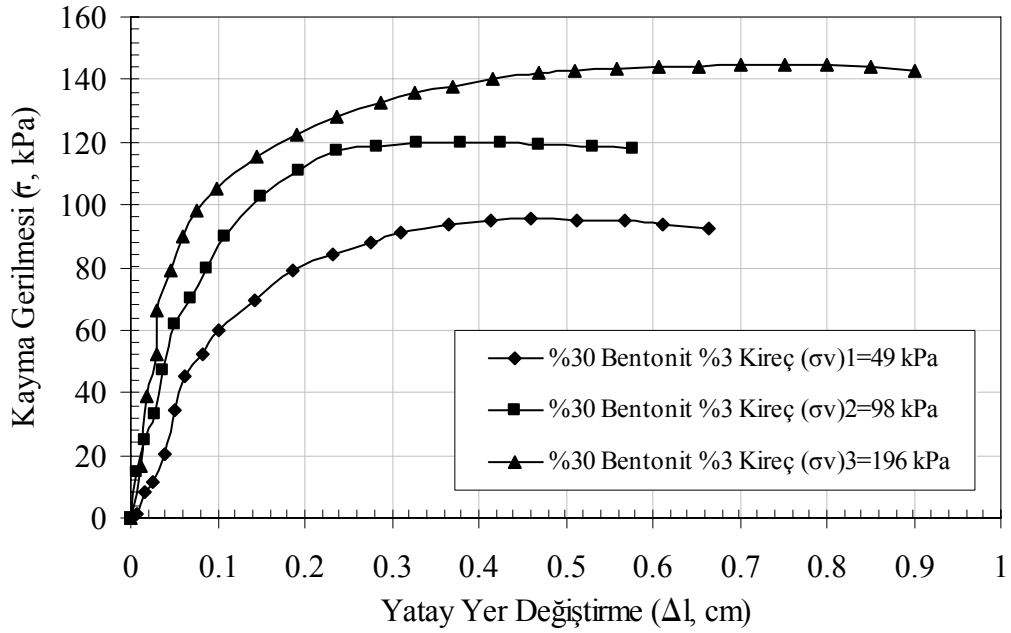
(b)

Ek Şekil 2.7. %30 bentonit %2 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



(a)

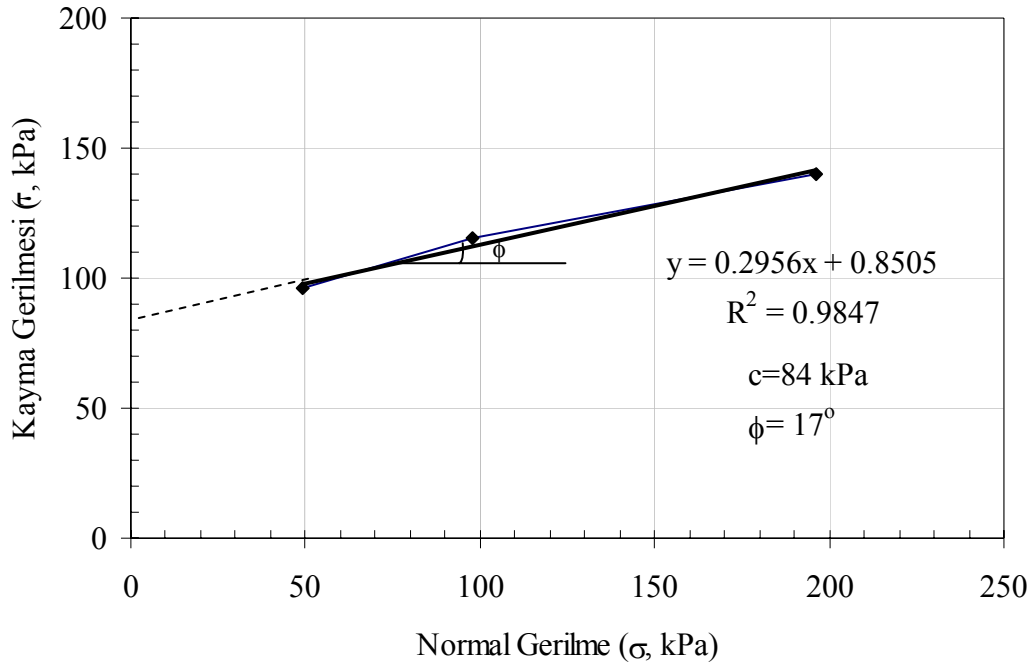


(b)

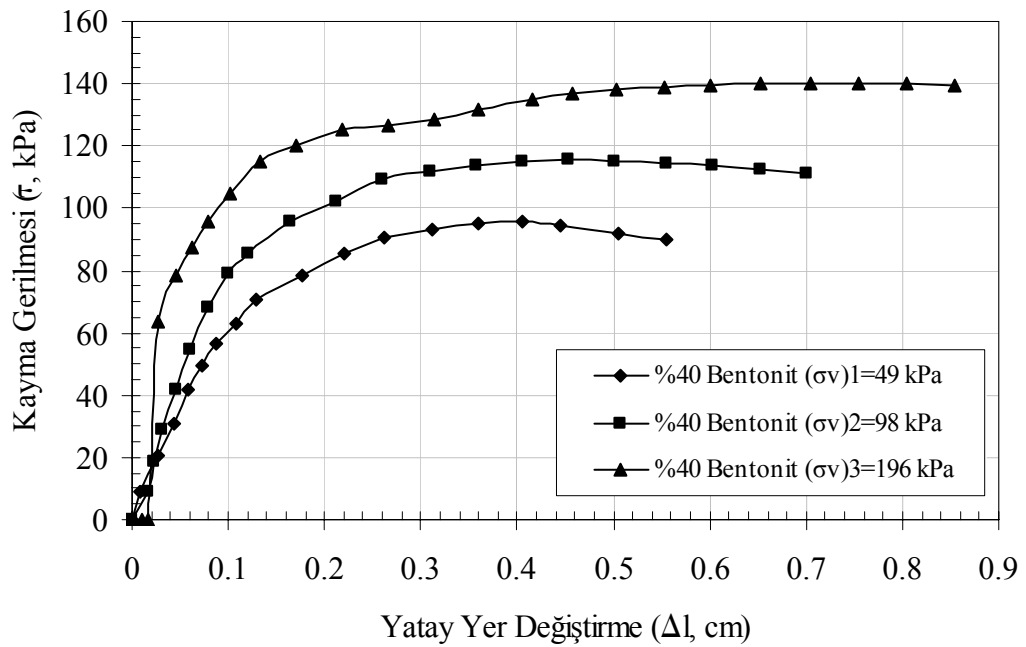
Ek Şekil 2.8. %30 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi



Ek 2'nin devamı



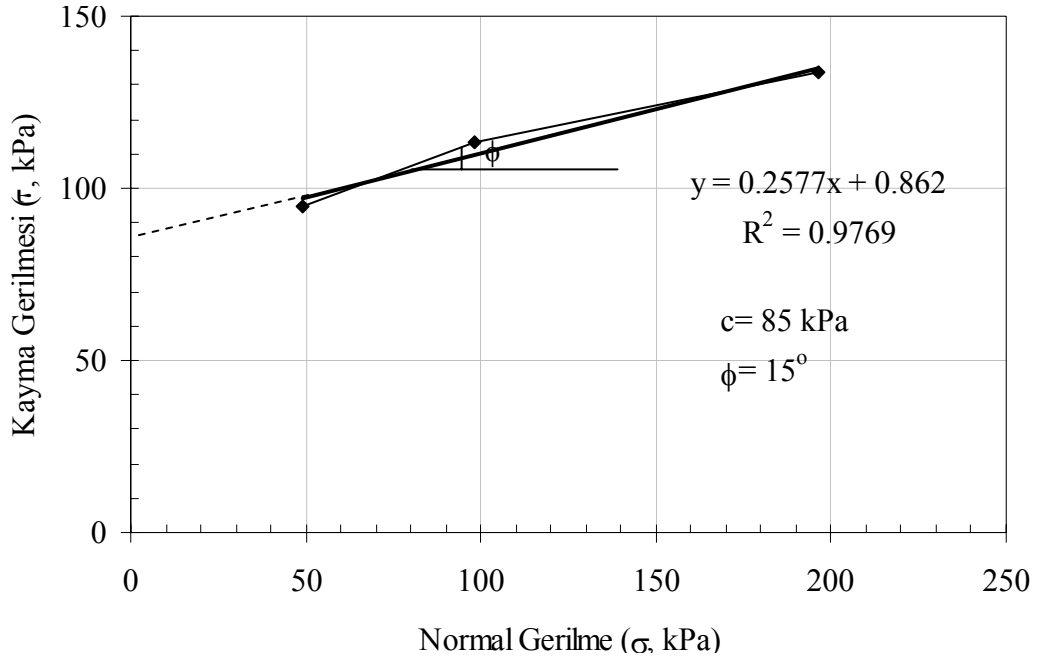
(a)



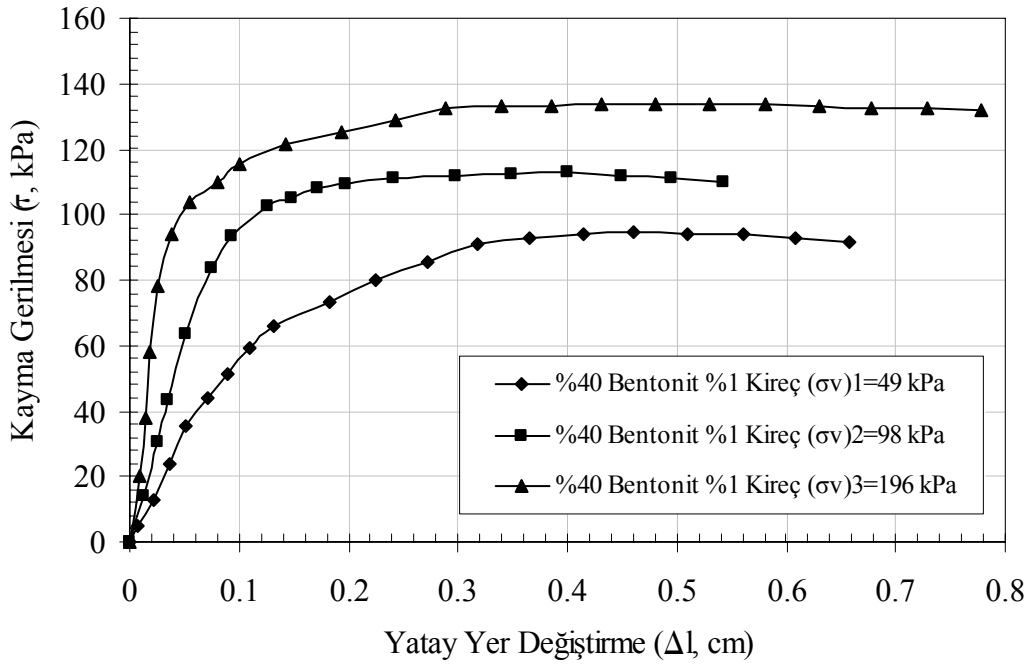
(b)

Ek Şekil 2.9. %40 bentonit muhtevasındaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



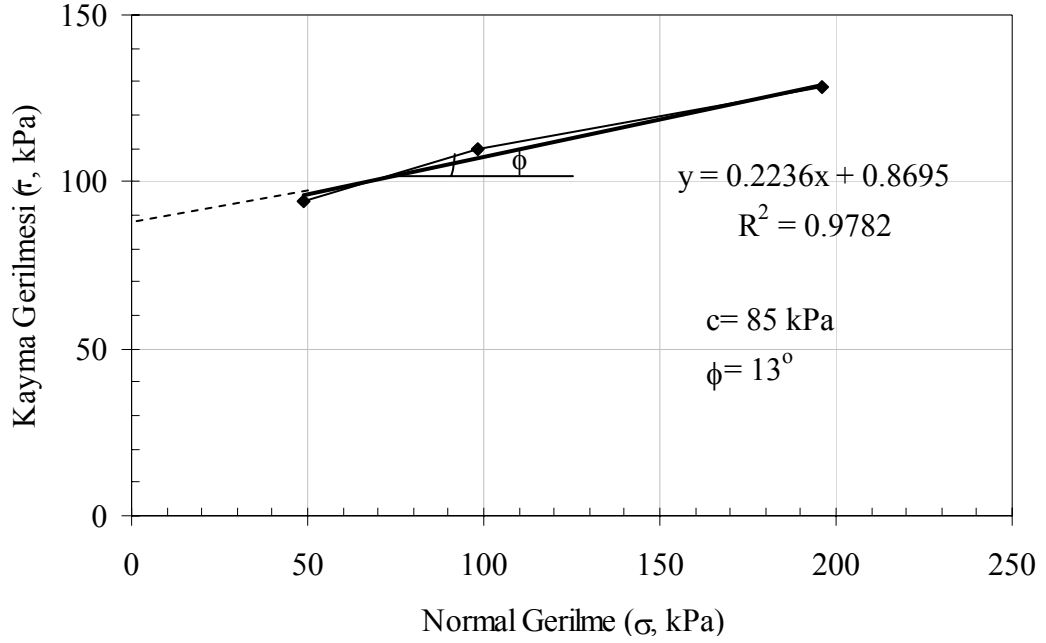
(a)



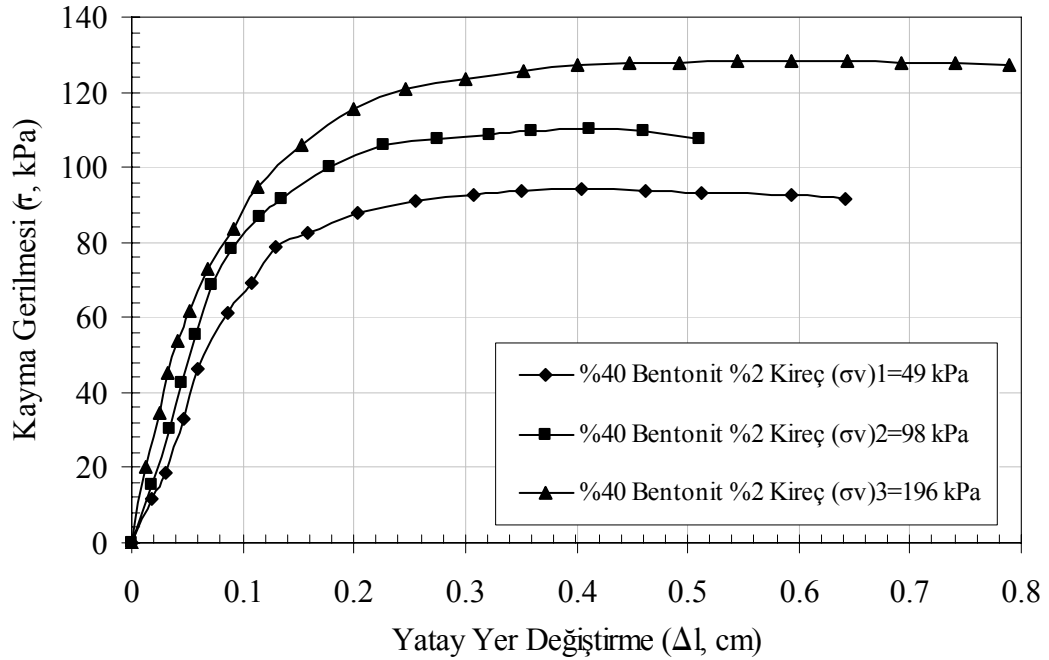
(b)

Ek Şekil 2.10. %40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



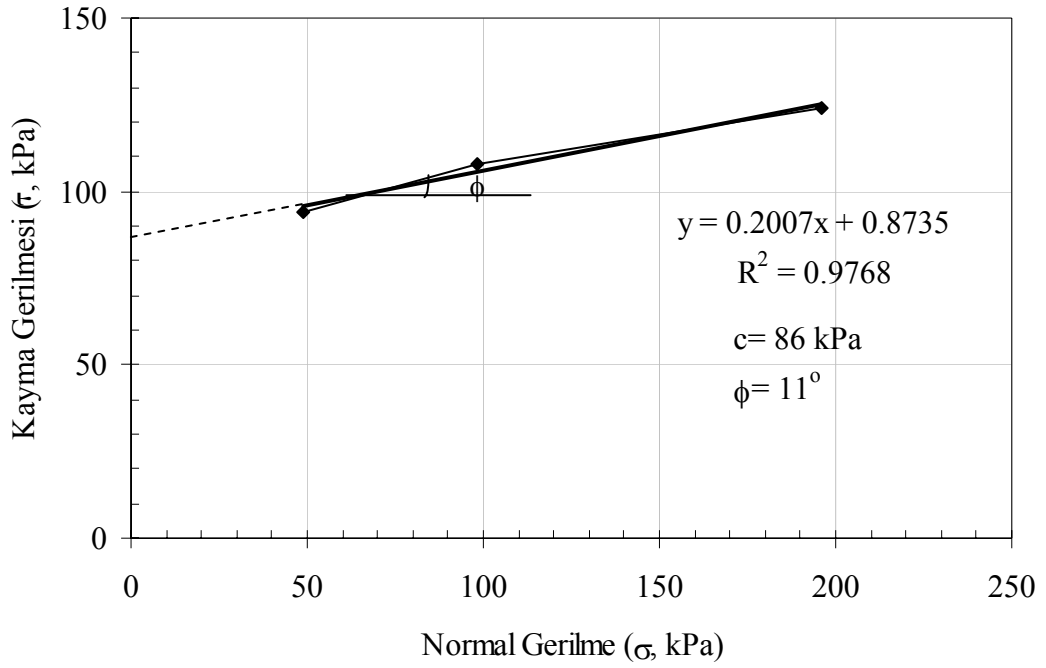
(a)



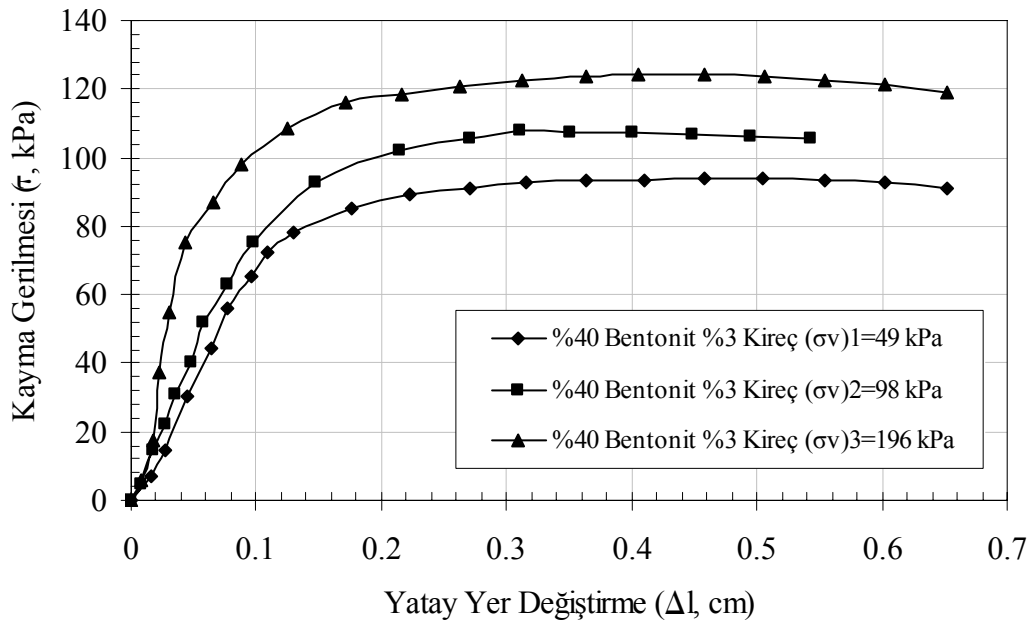
(b)

Ek Şekil 2.11. %40 bentonit %2 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



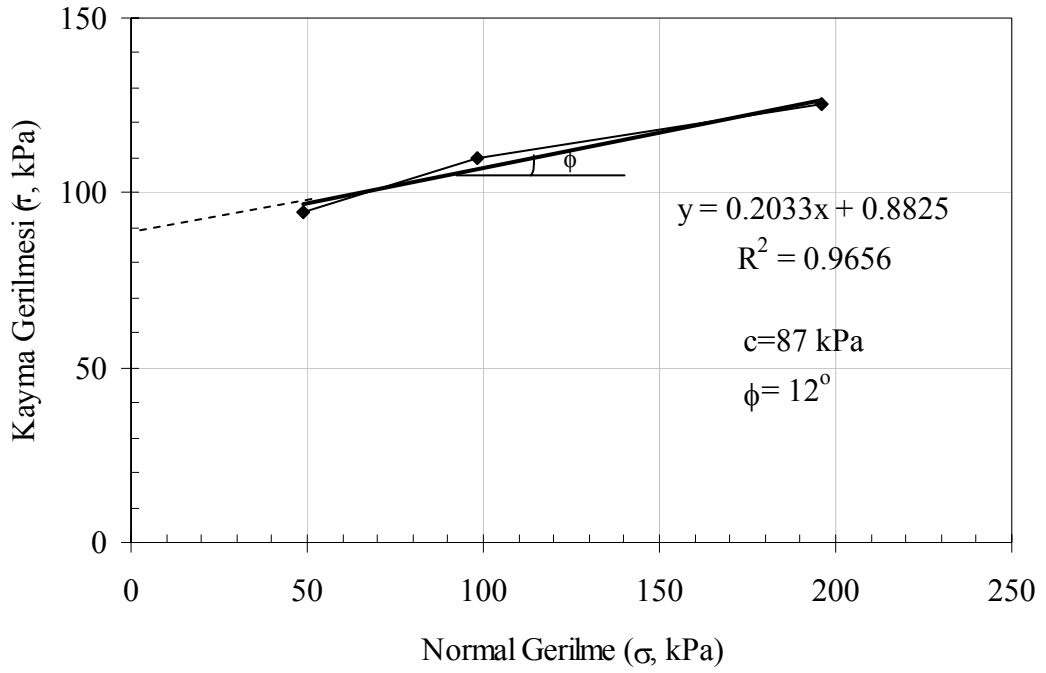
(a)



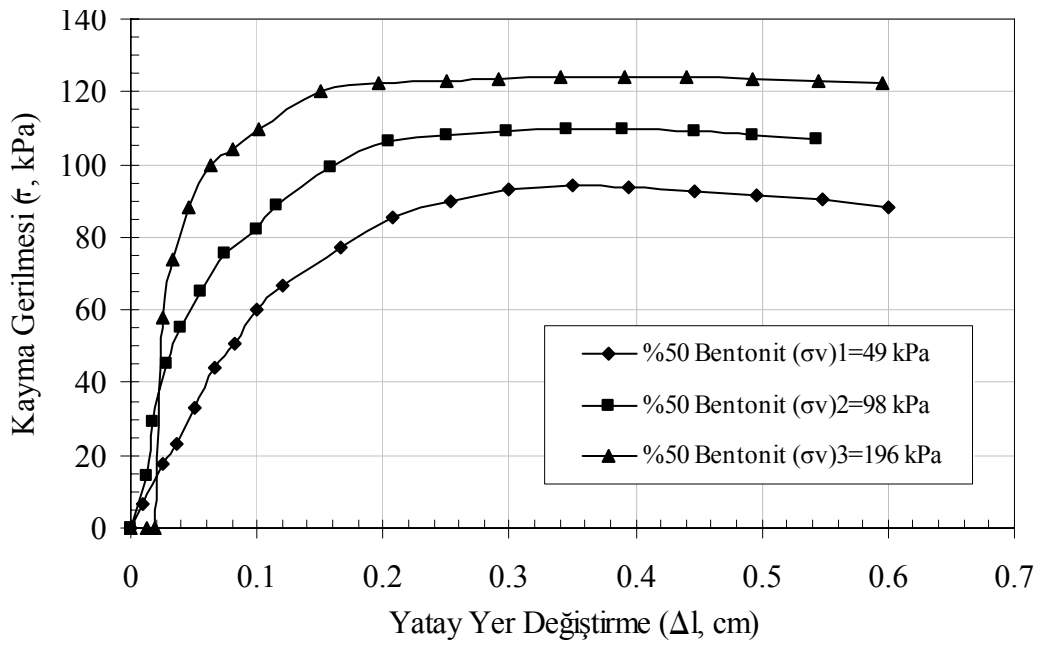
(b)

Ek Şekil 2.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



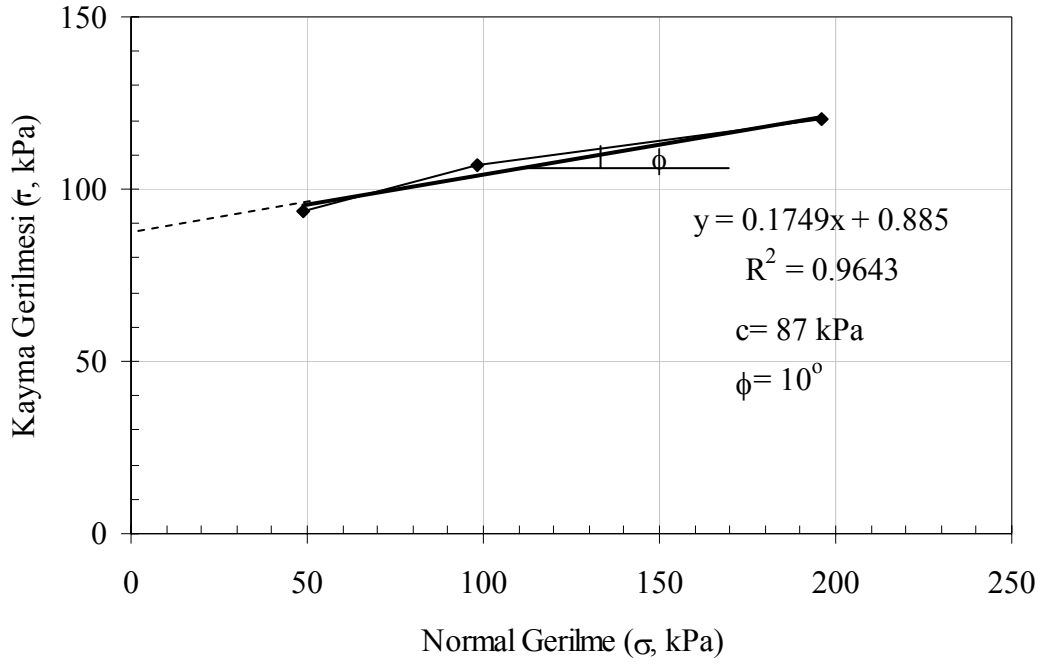
(a)



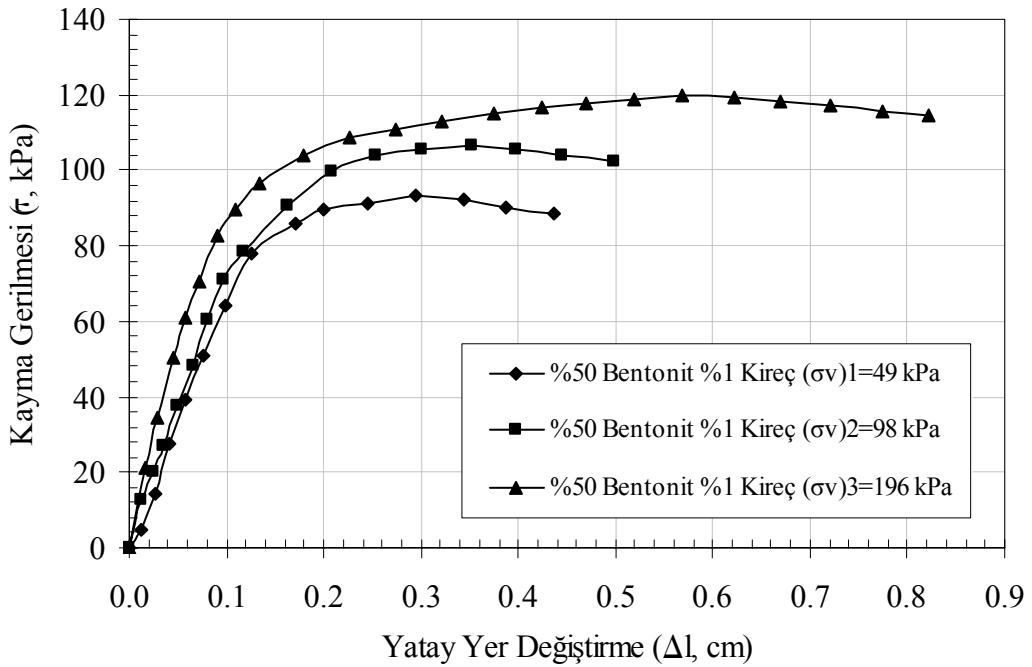
(b)

Ek Şekil 2.13. %50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



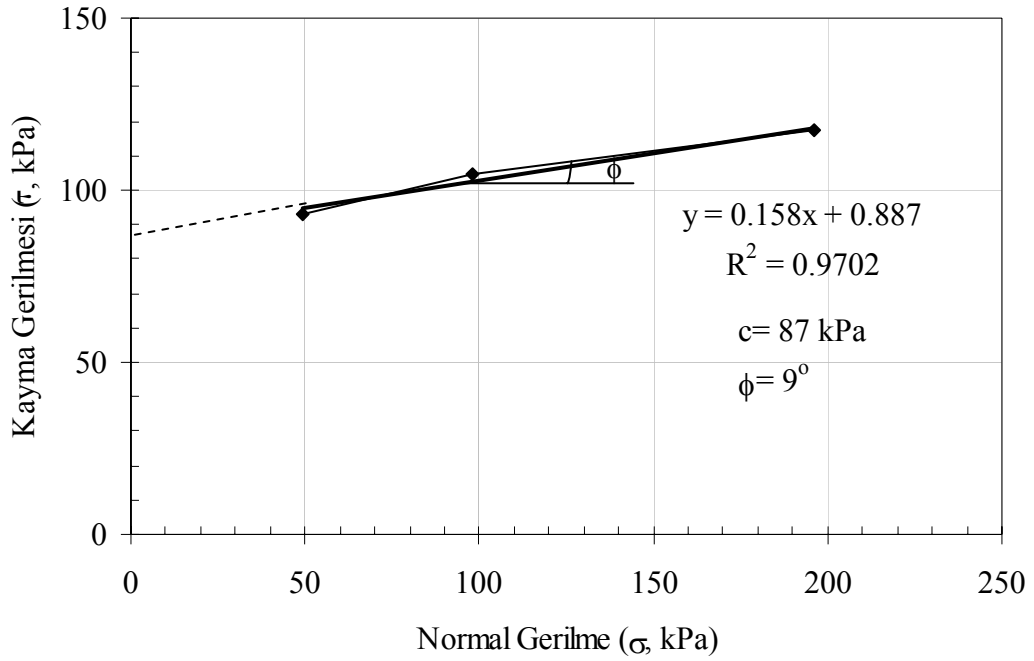
(a)



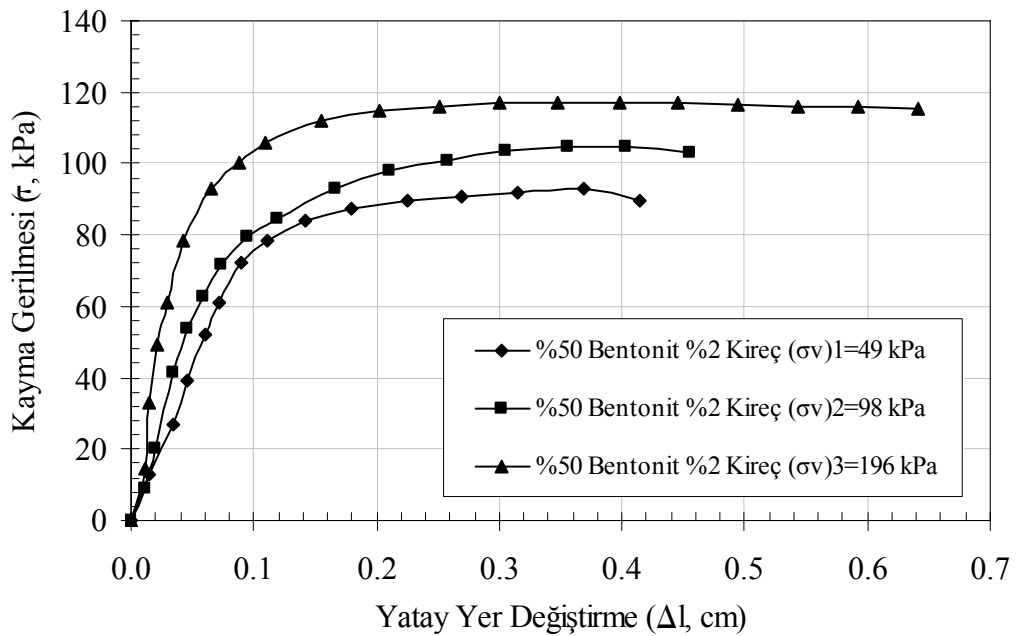
(b)

Ek Şekil 2.14. %50 bentonit %1 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirmesi-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



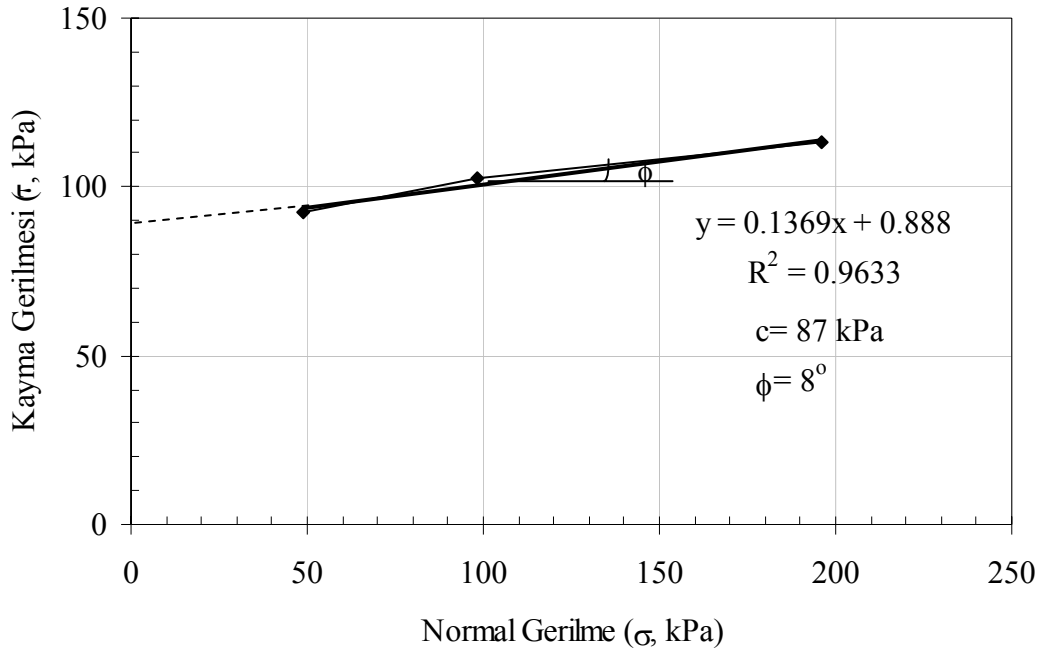
(a)



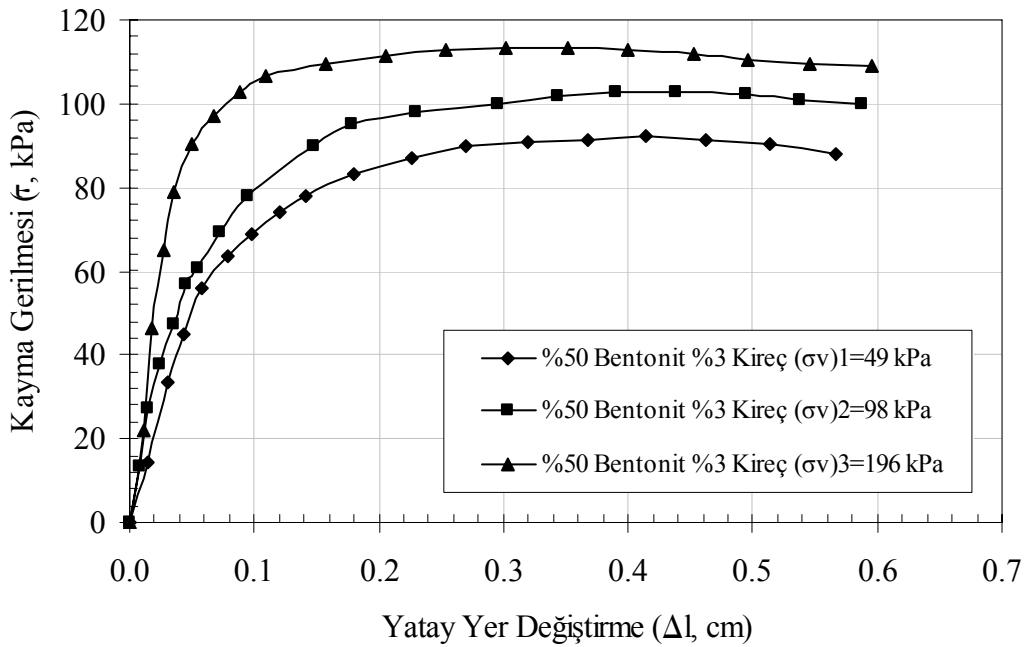
(b)

Ek Şekil 2.15. %50 bentonit %2 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi

Ek 2'nin devamı



(a)

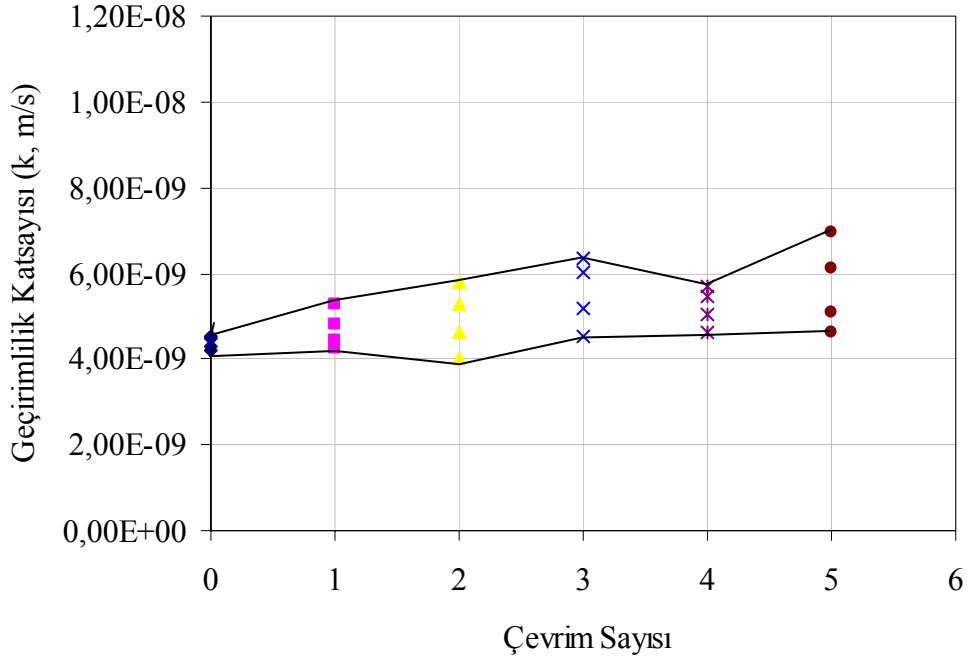


(b)

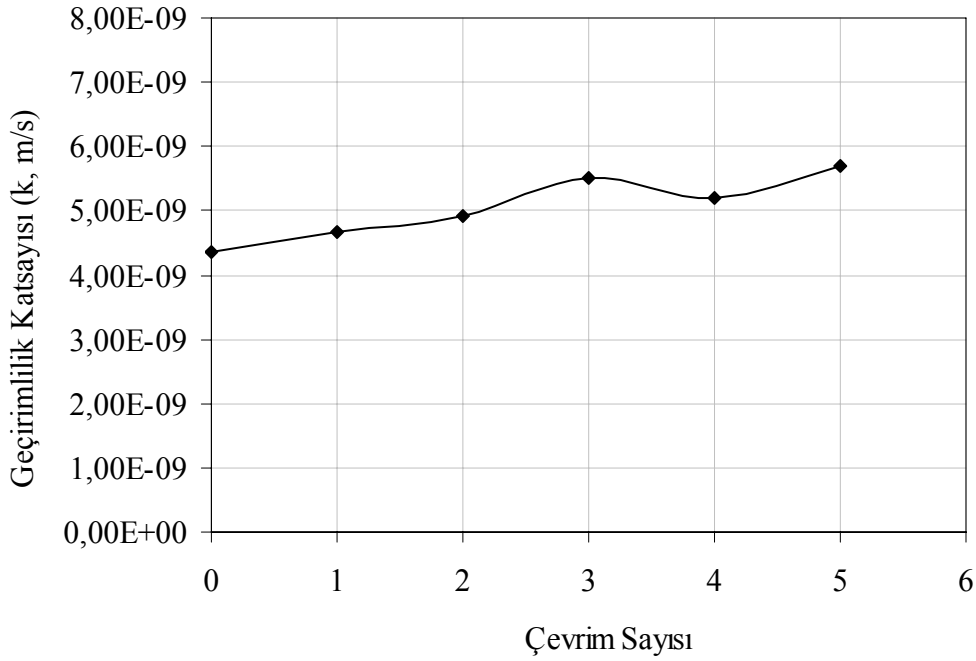
Ek Şekil 2.16. %50 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için (a) normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi (b) yatay yer değiştirme-kayma gerilmesi ilişkisi



### Ek 3. Geçirimsizlik (Hidrolik İletkenlik) Deney Sonuçları



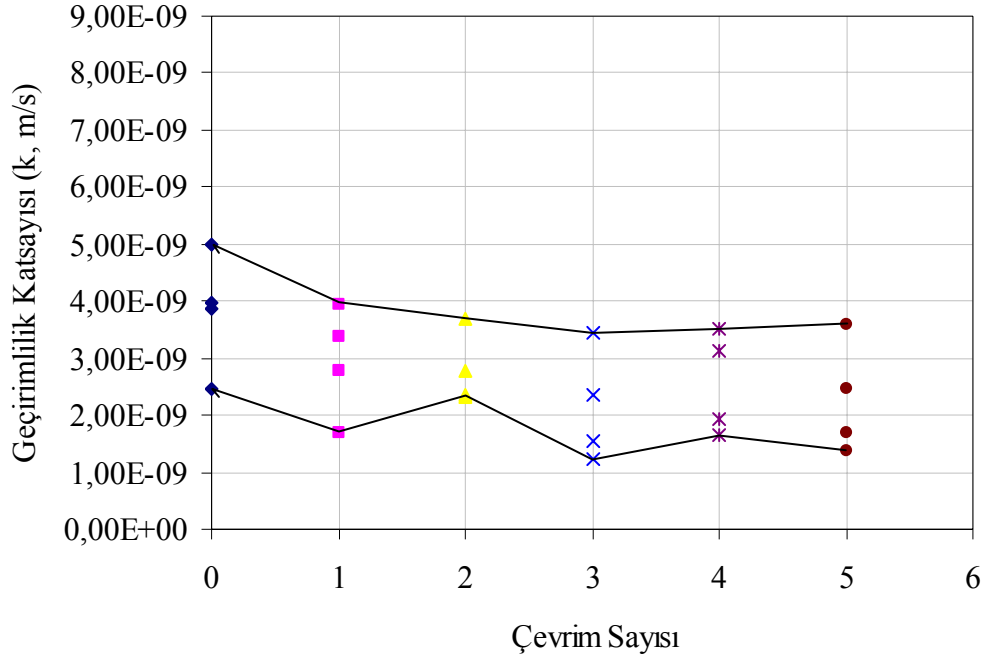
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



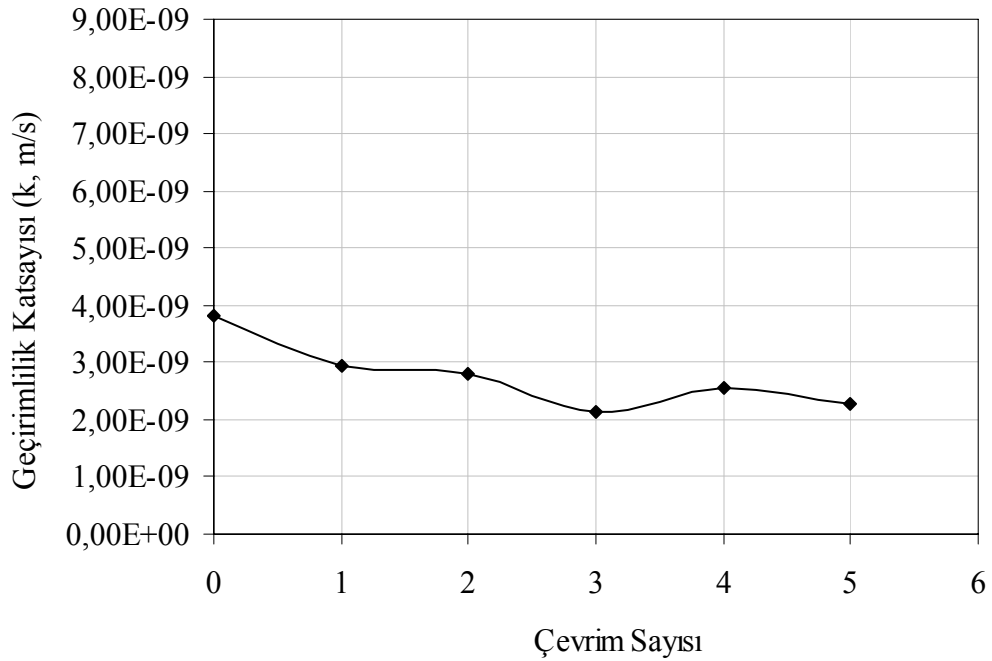
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.1. %20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



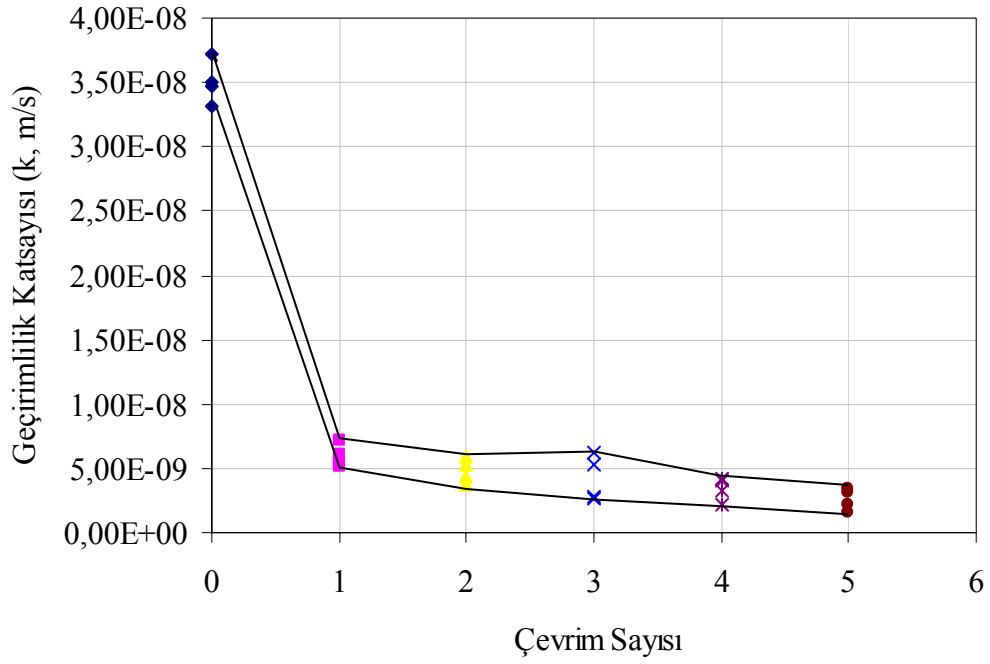
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



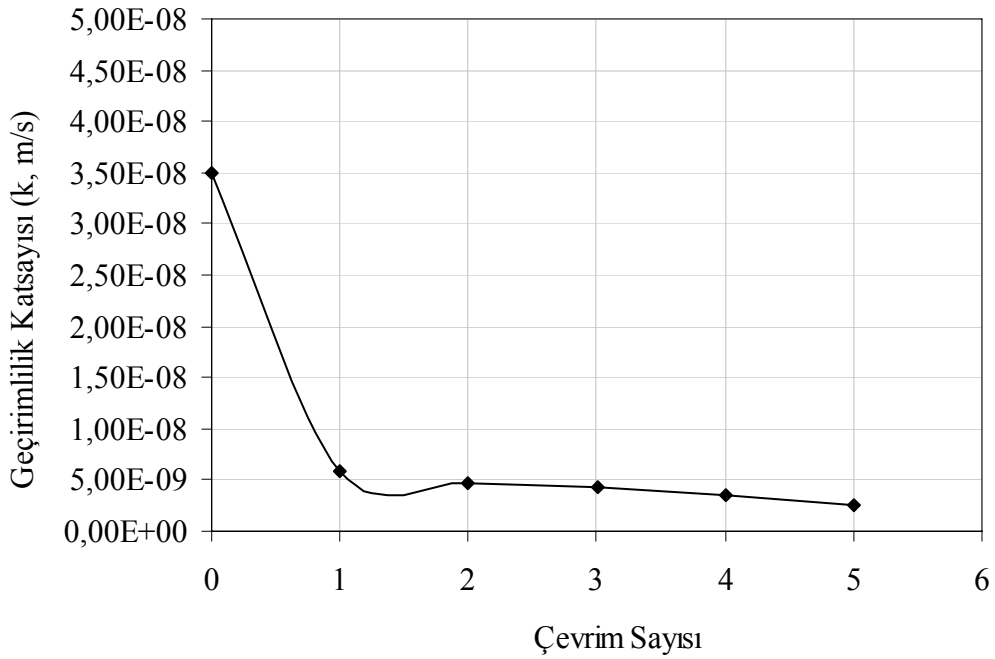
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.2. %20 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



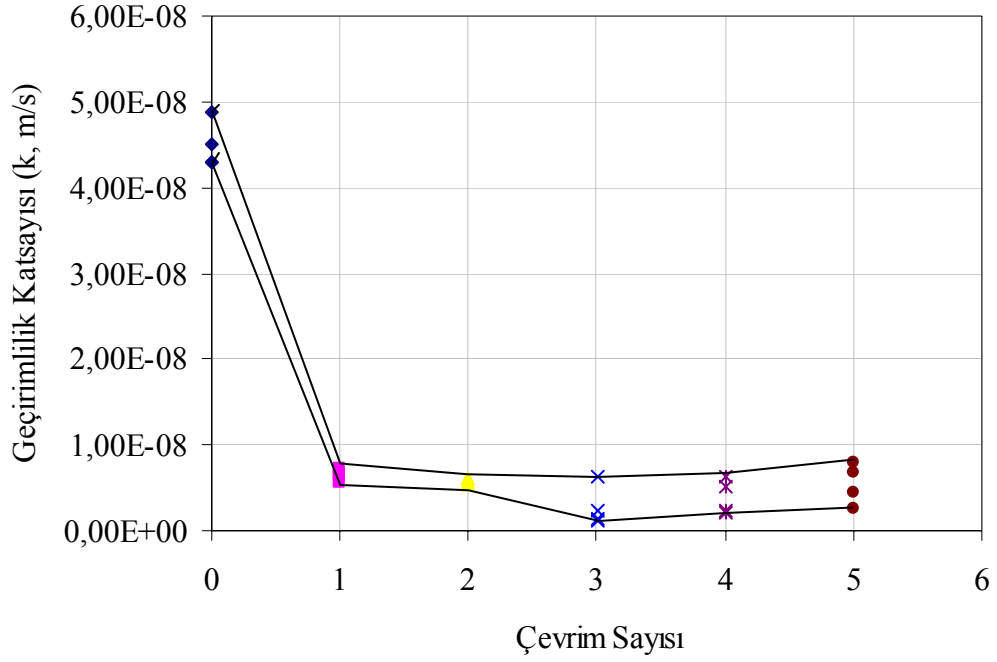
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



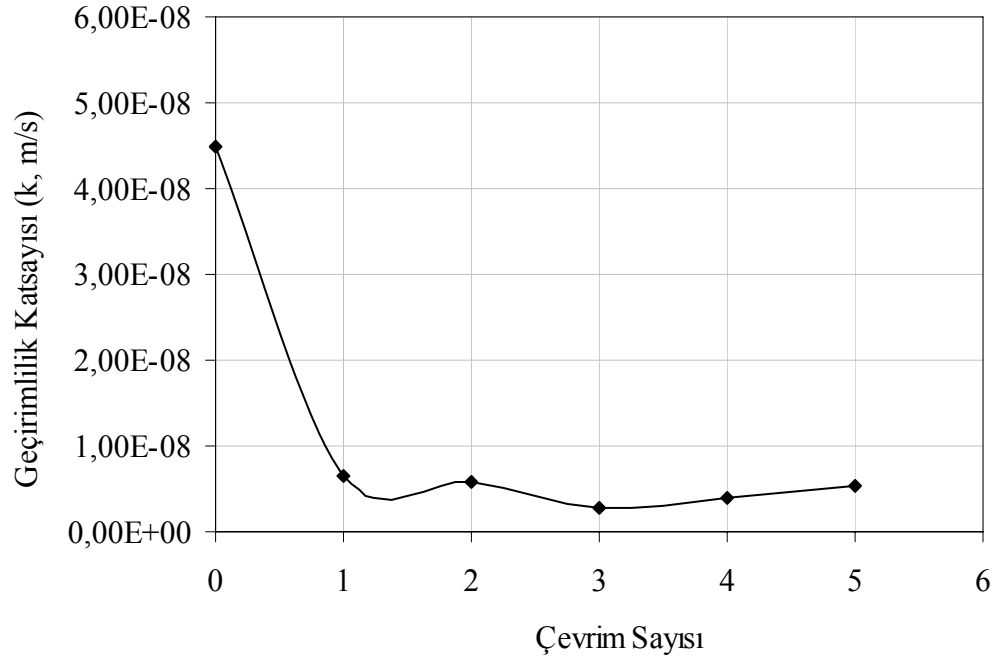
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.3. %20 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



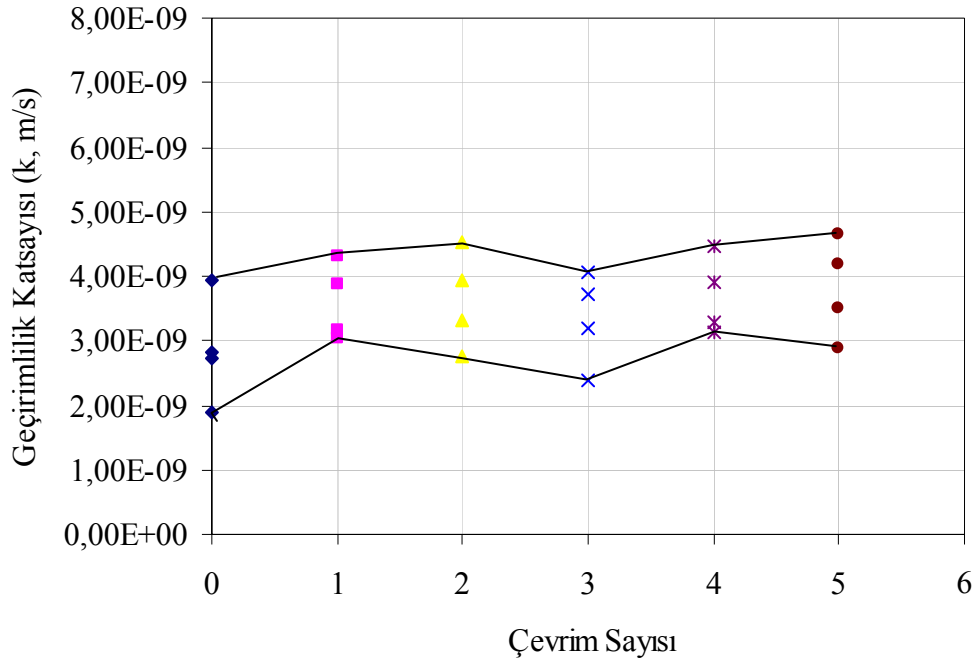
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



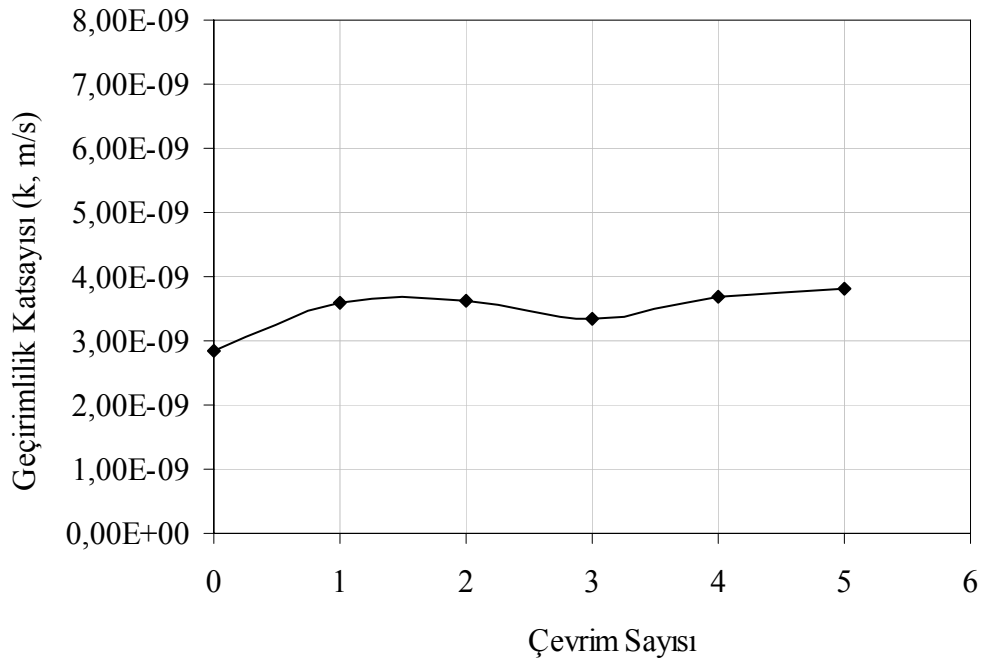
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.4. %20 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



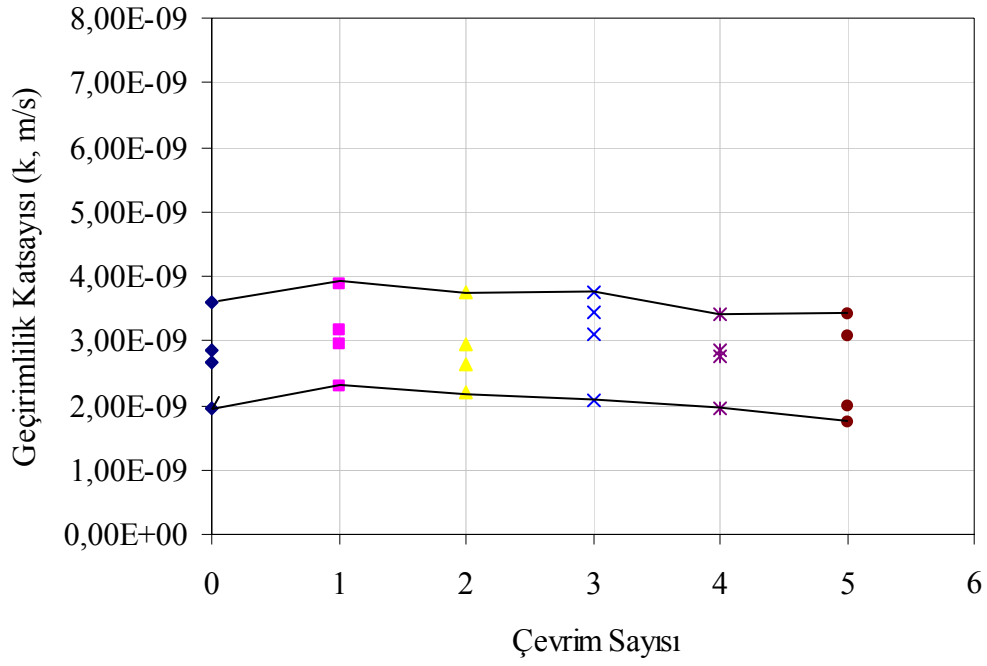
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



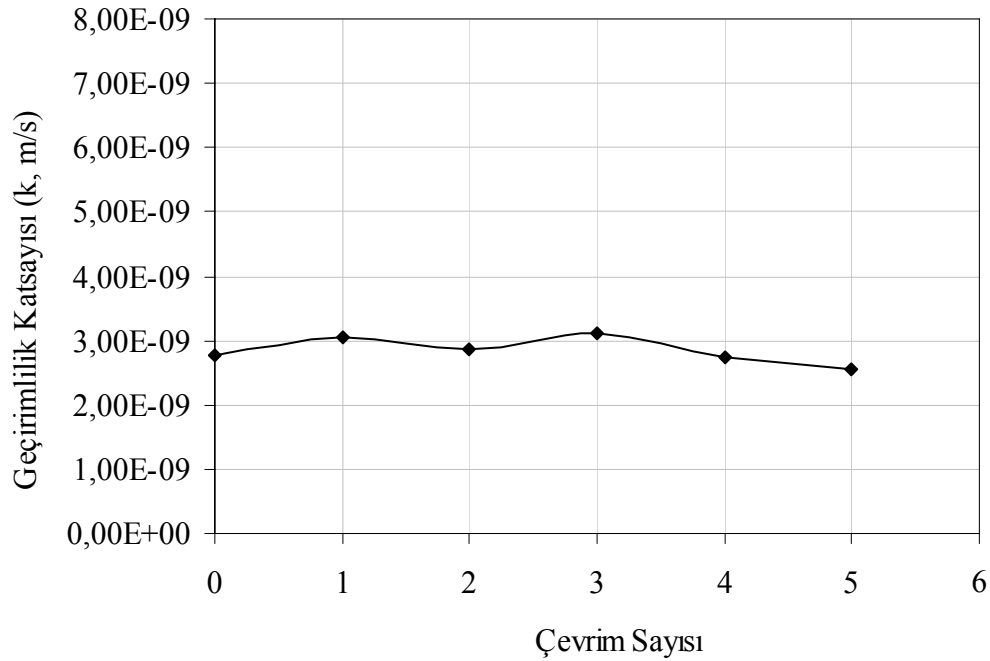
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.5. %30 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



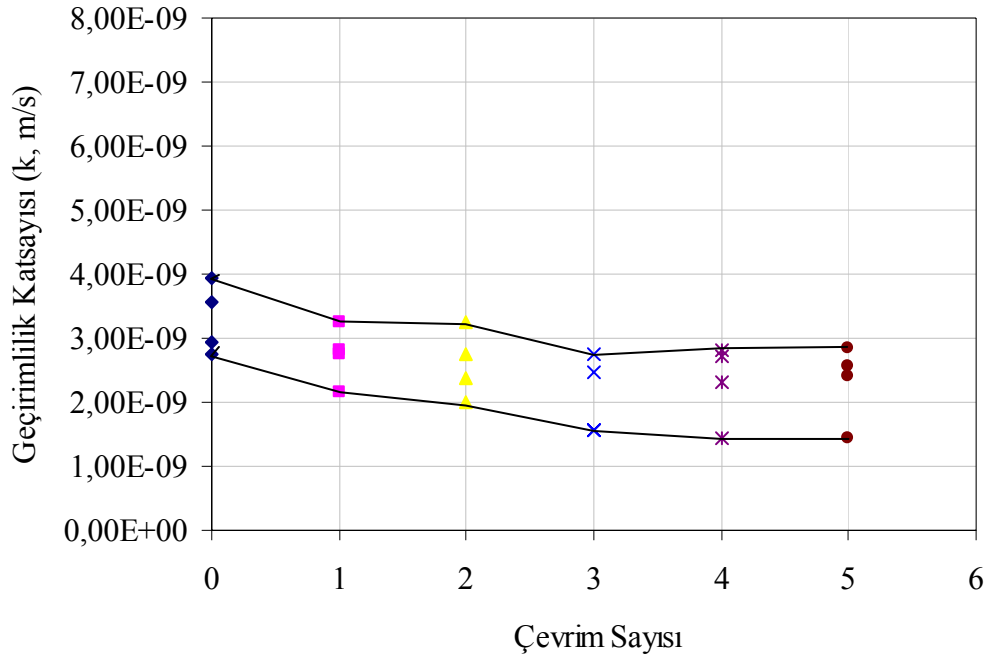
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



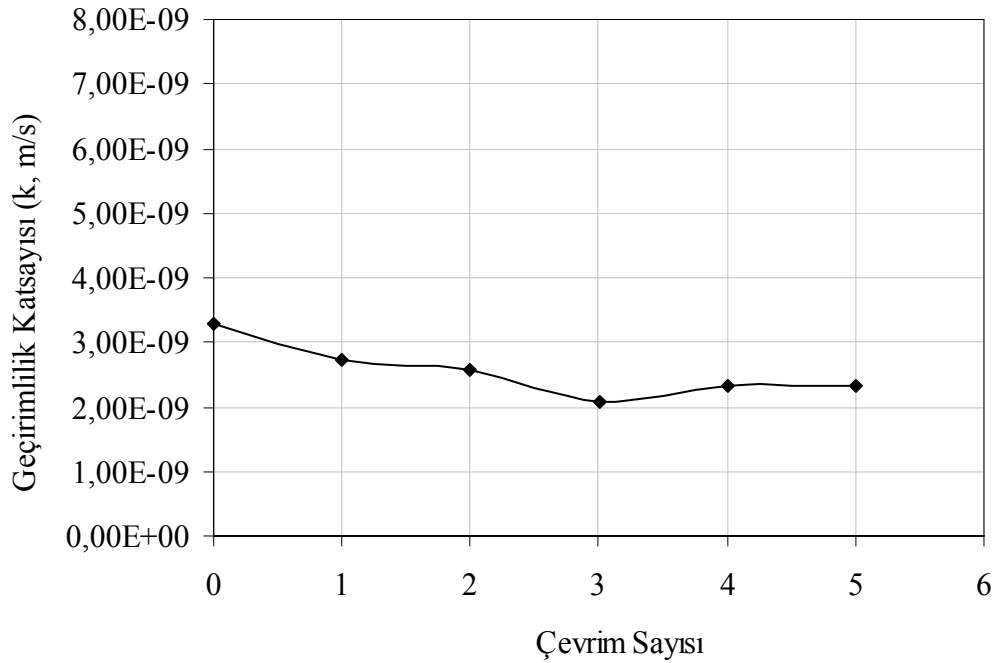
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.6. %30 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



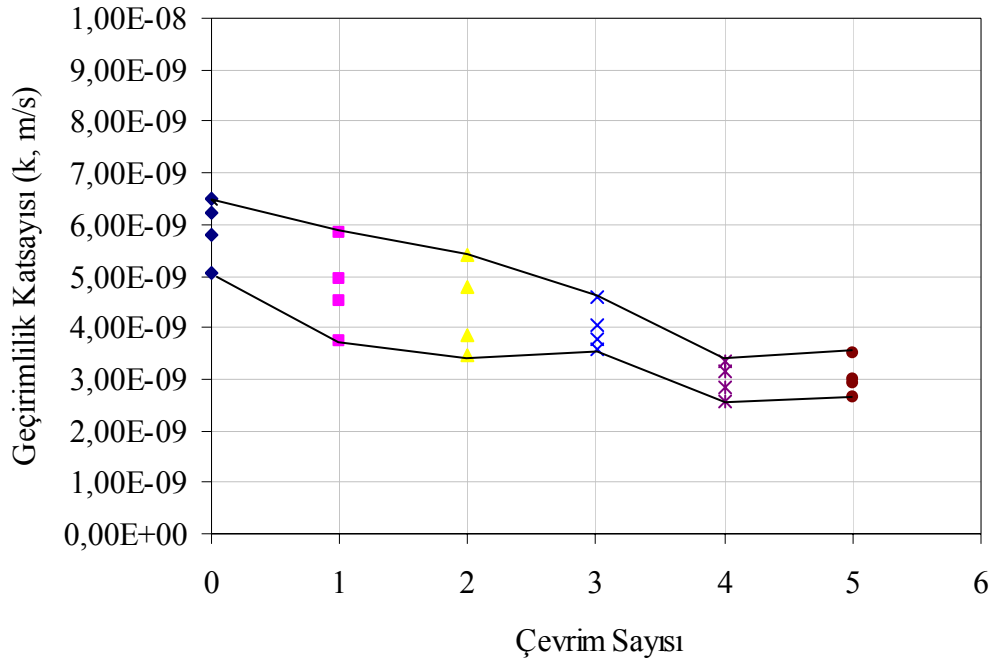
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



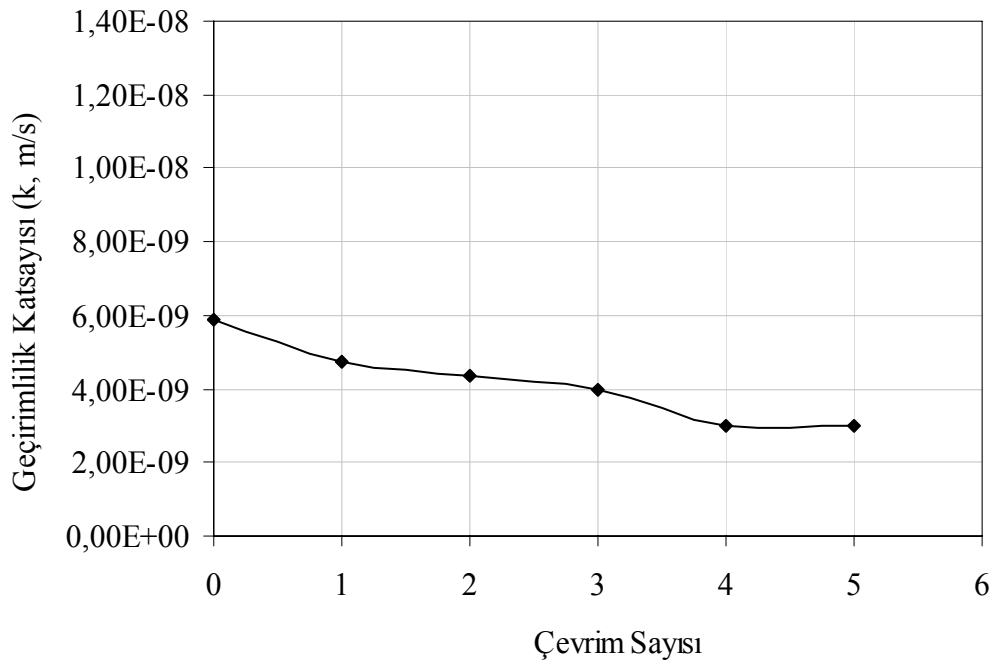
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.7. %30 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı

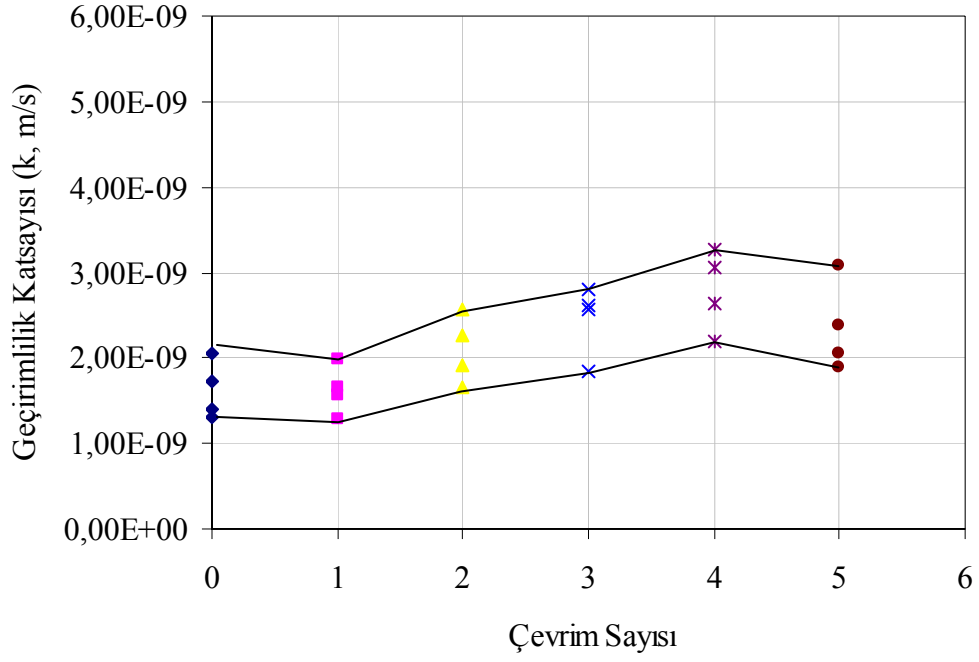


b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

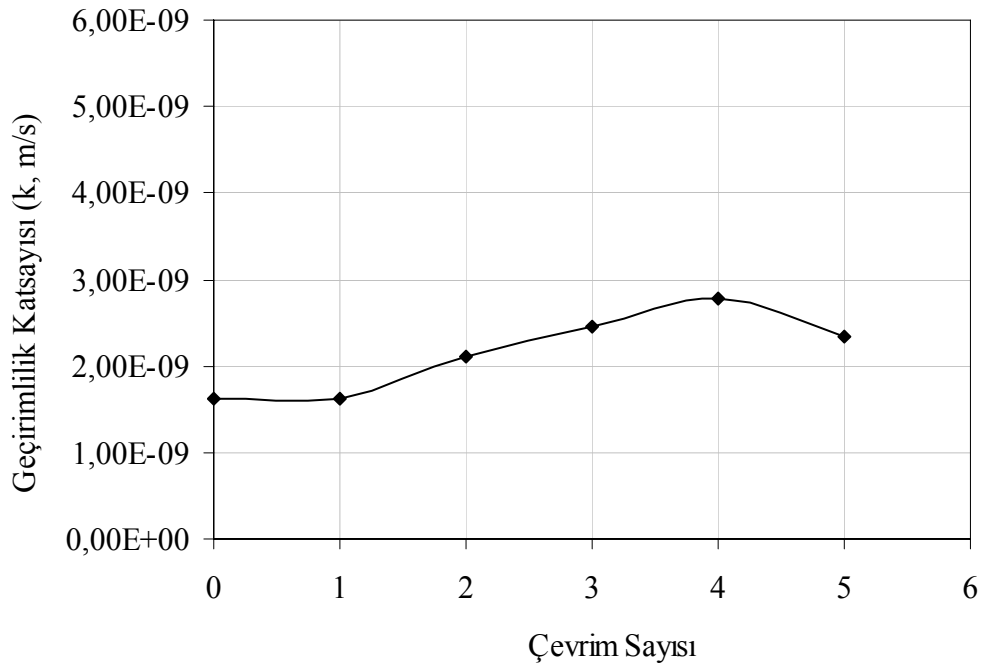
Ek Şekil 3.8. %30 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi



Ek 3'ün devamı



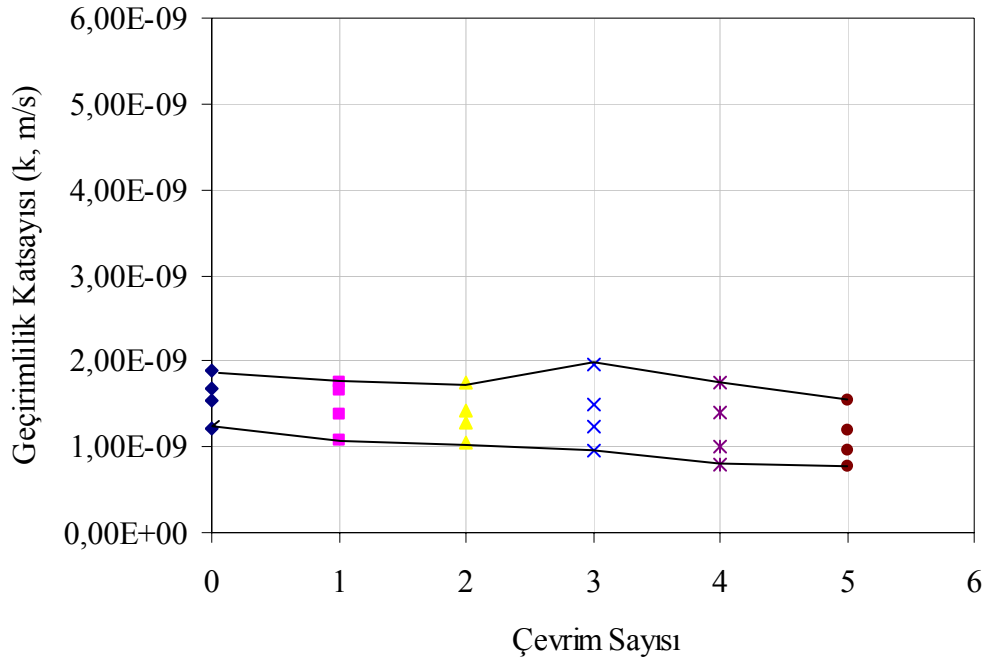
a) Geçirimlilik deney sonuçlarının değişim aralığı



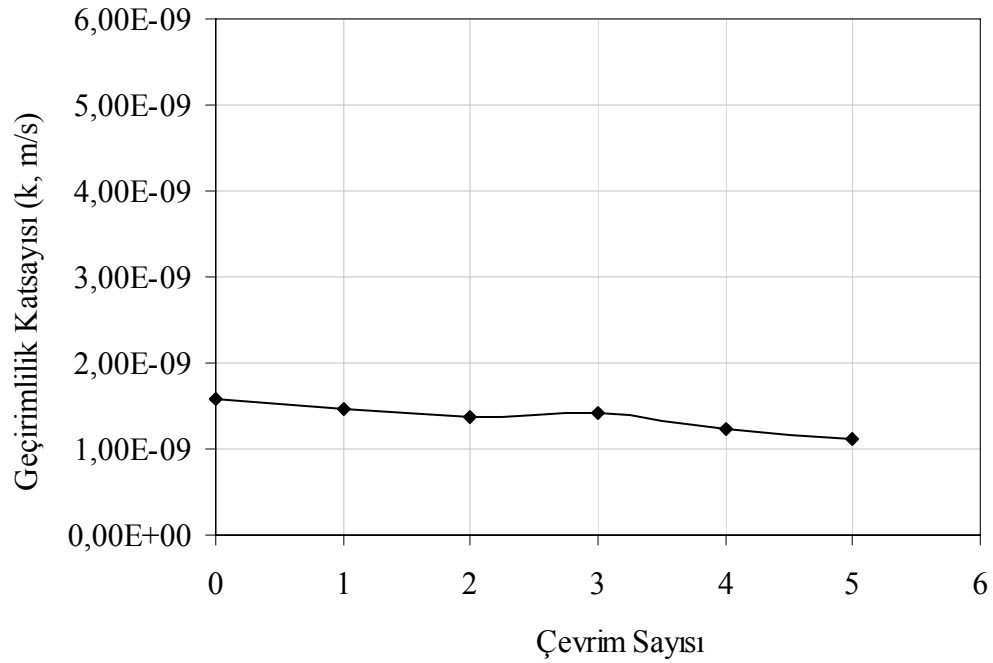
b) Geçirimlilik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.9. %40 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



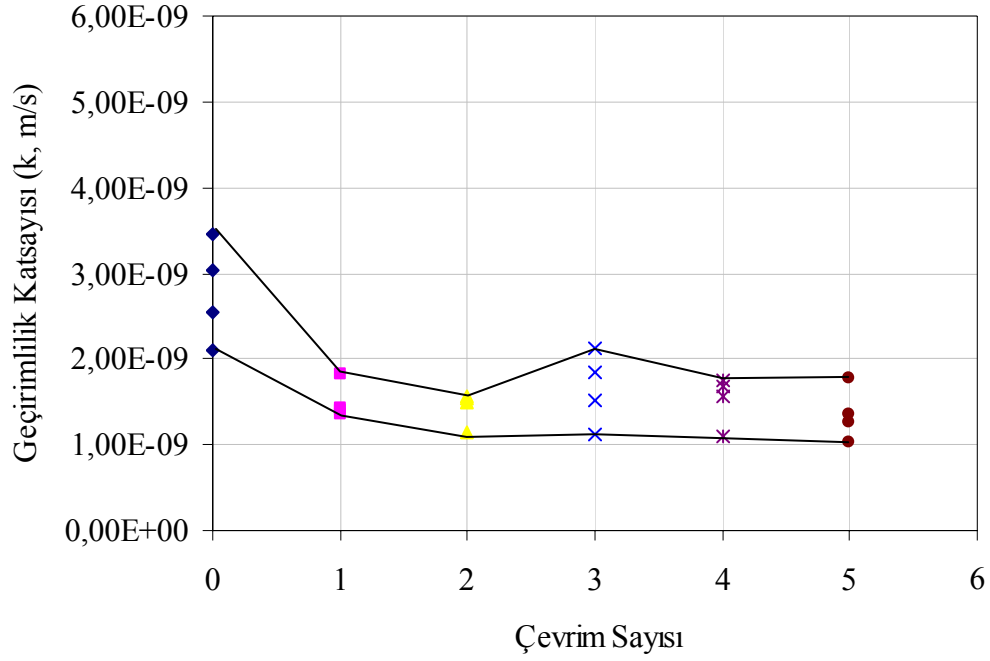
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



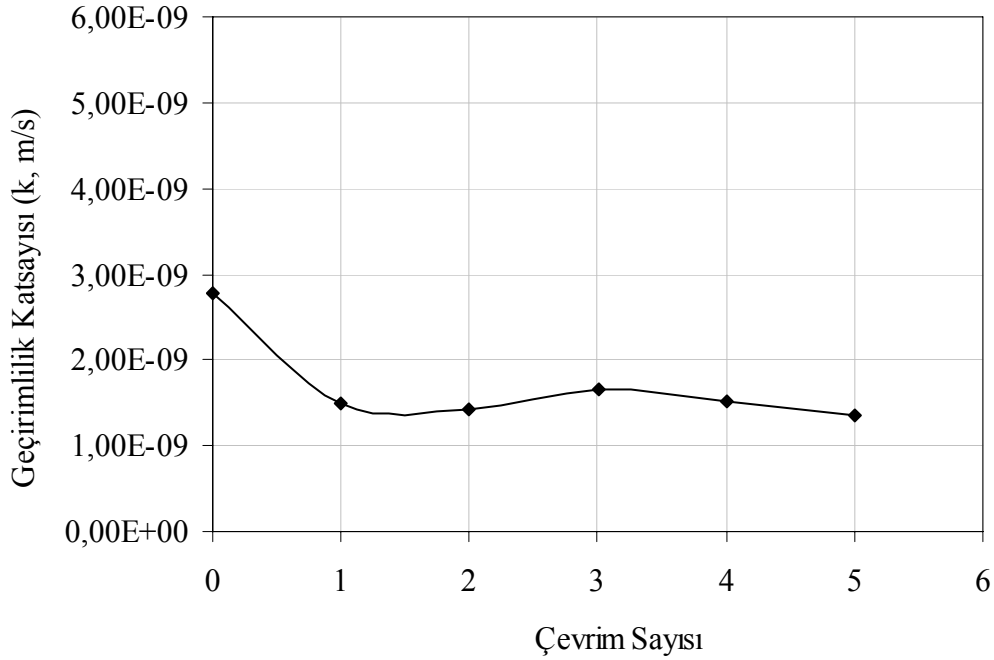
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.10. %40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



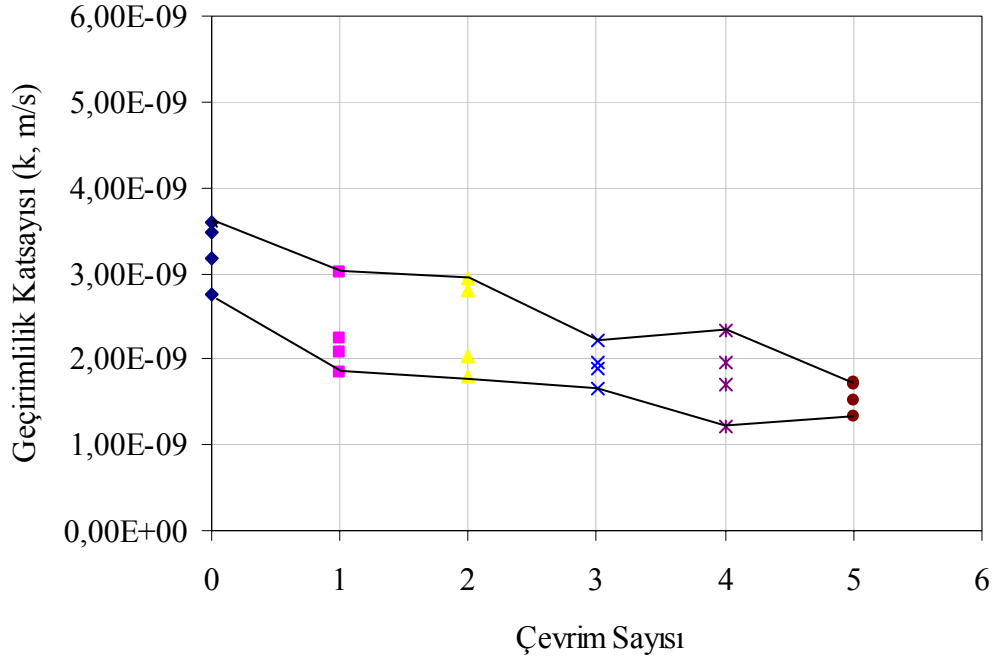
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



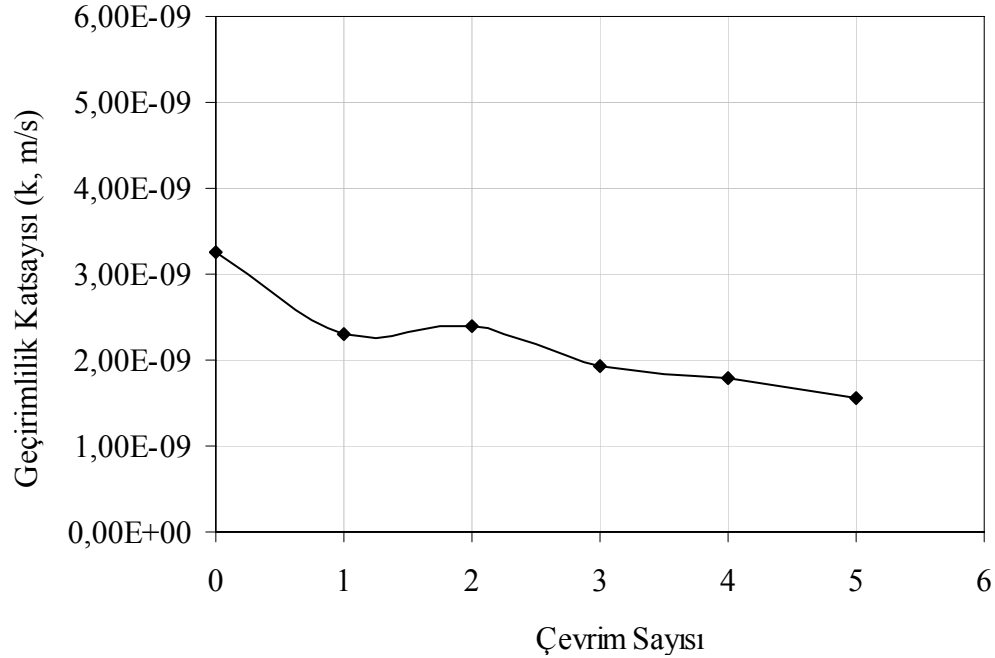
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.11. %40 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



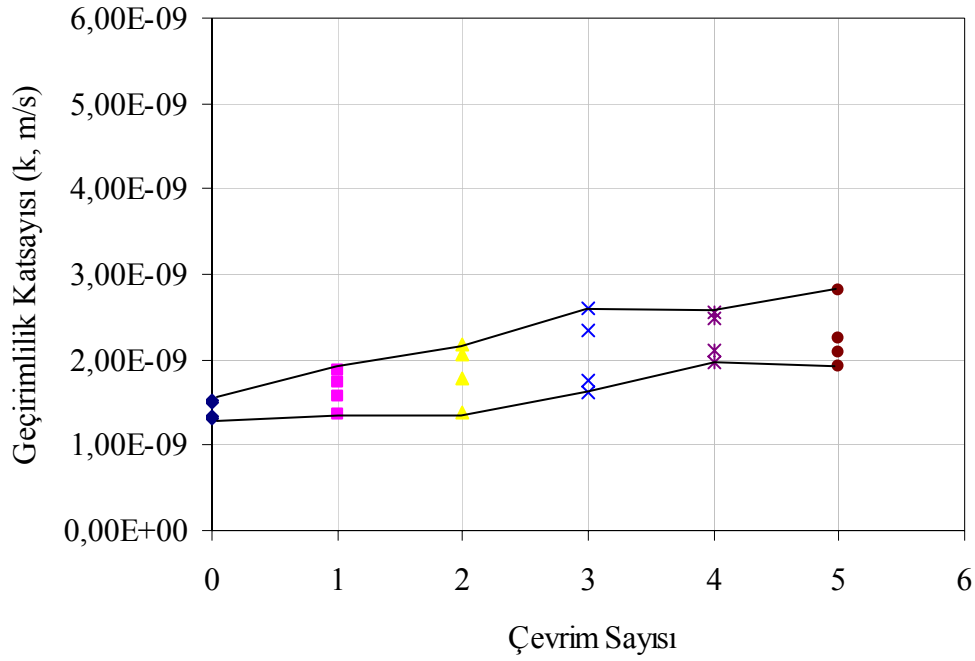
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



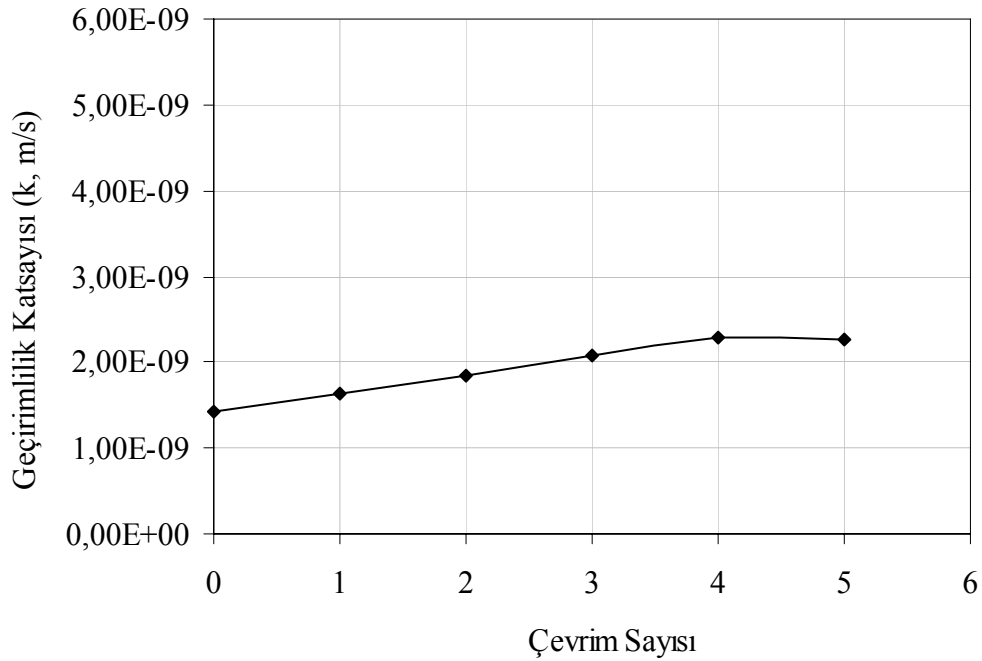
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



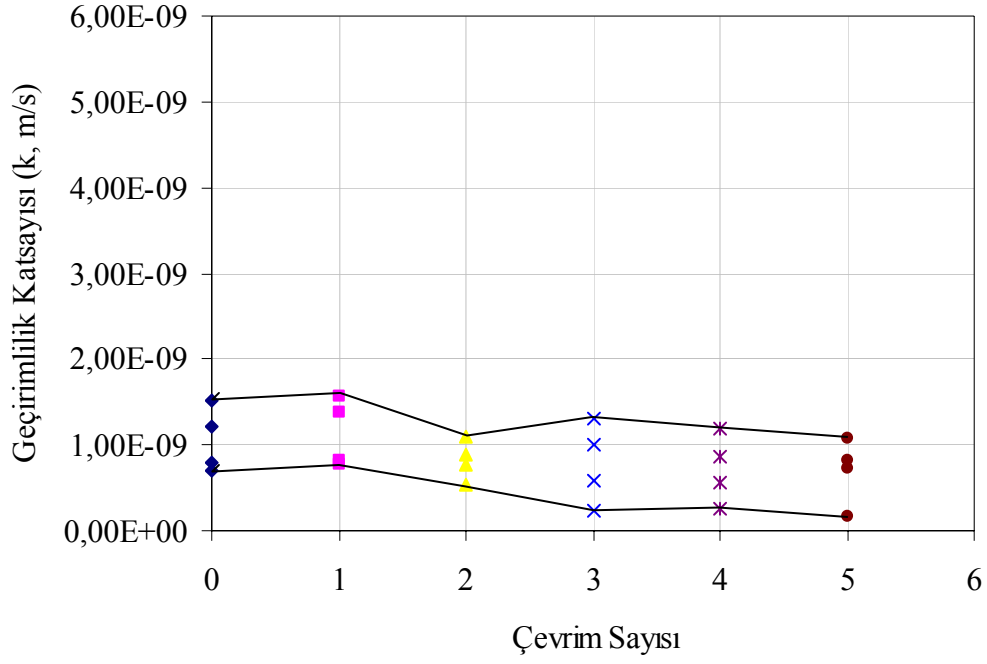
a) Geçirimlilik deney sonuçlarının değişim aralığı



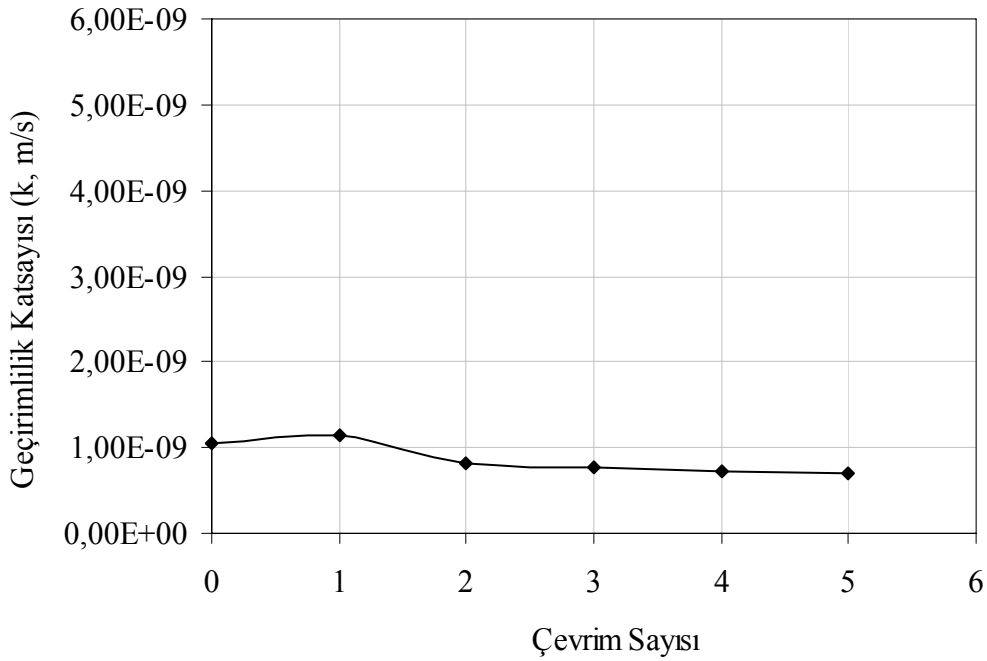
b) Geçirimlilik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.13. %50 bentonit muhtevastaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimlilik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



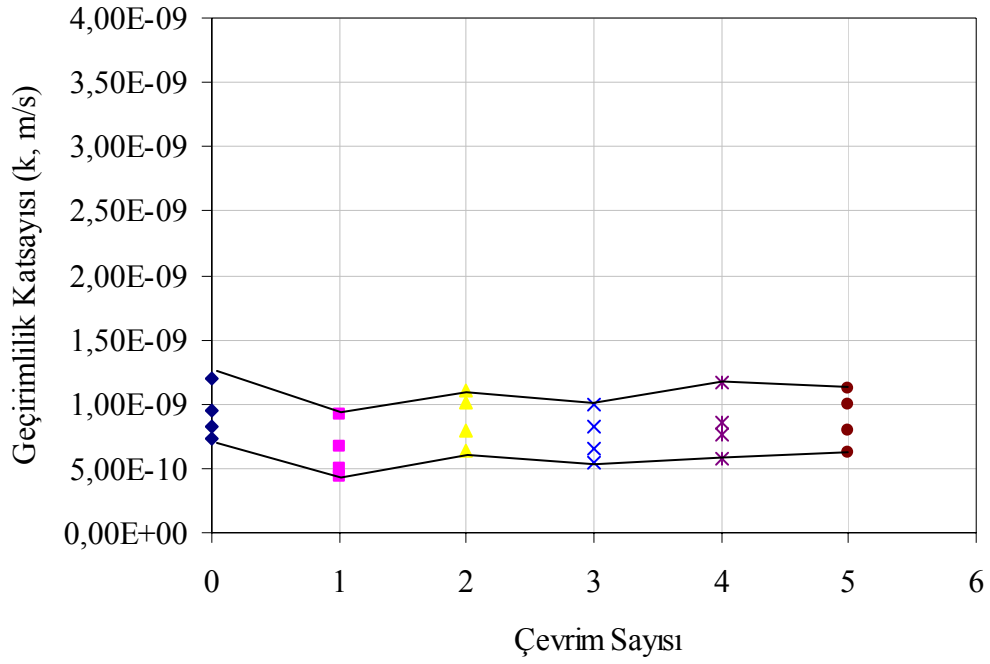
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



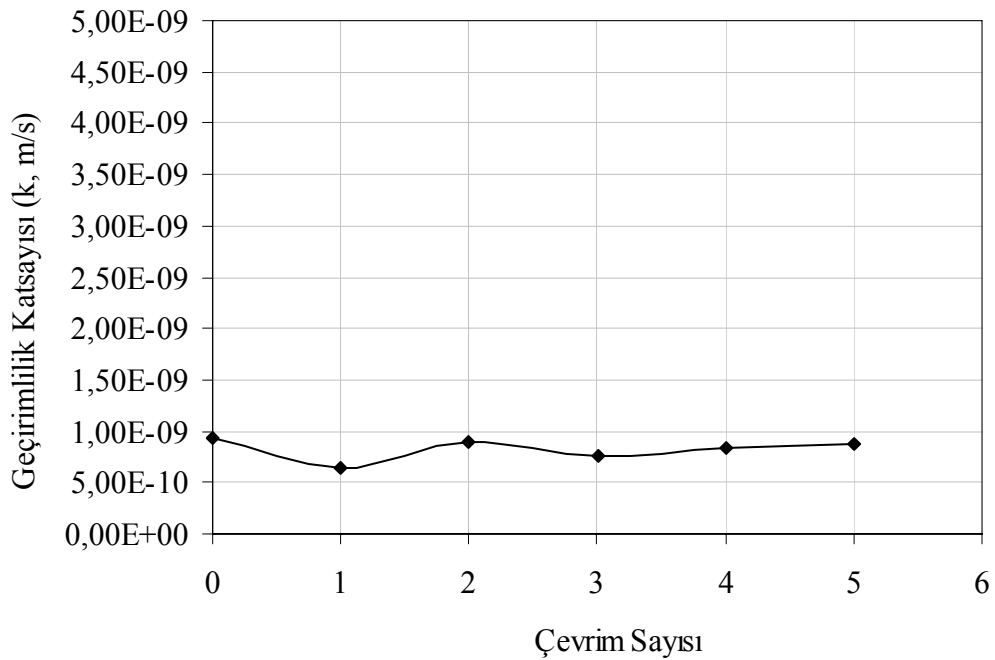
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.14. %50 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



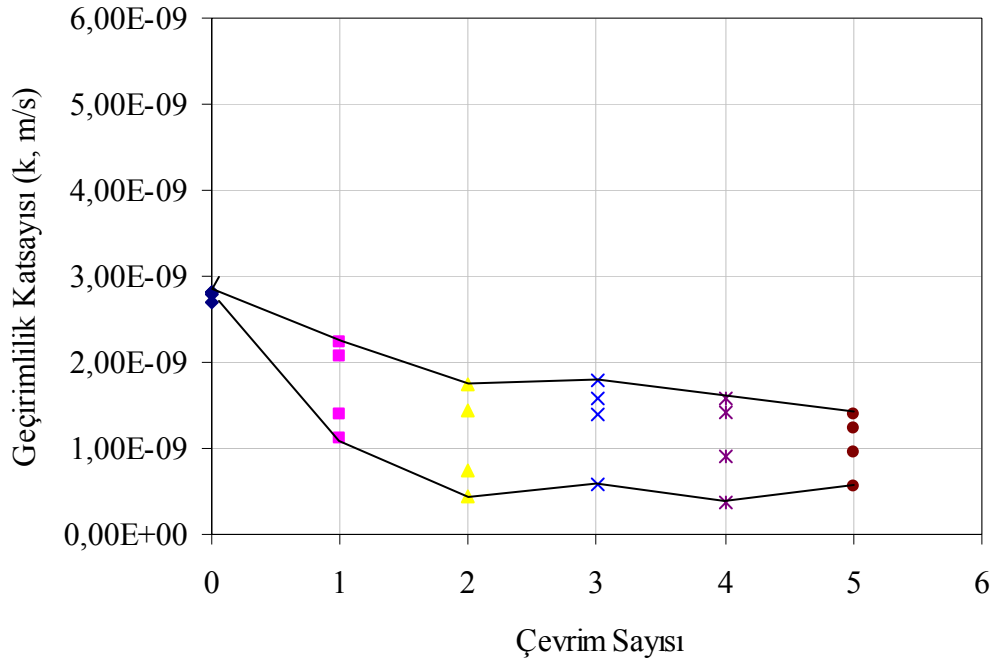
a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı



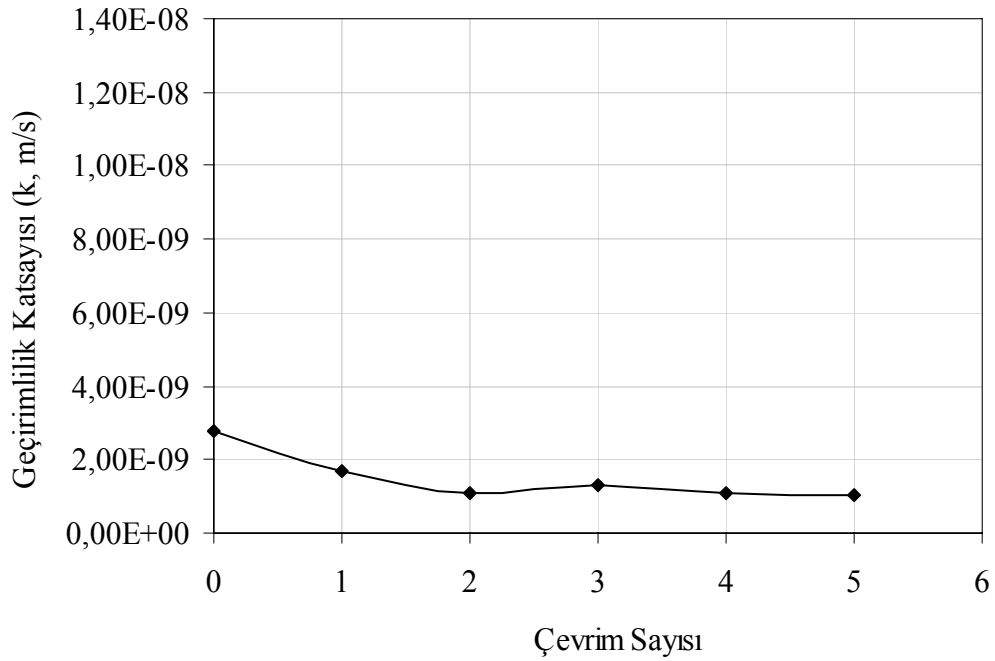
b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

Ek Şekil 3.15. %50 bentonit %2 kireç muhtevasındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi

Ek 3'ün devamı



a) Geçirimsizlik deney sonuçlarının değişim aralığı

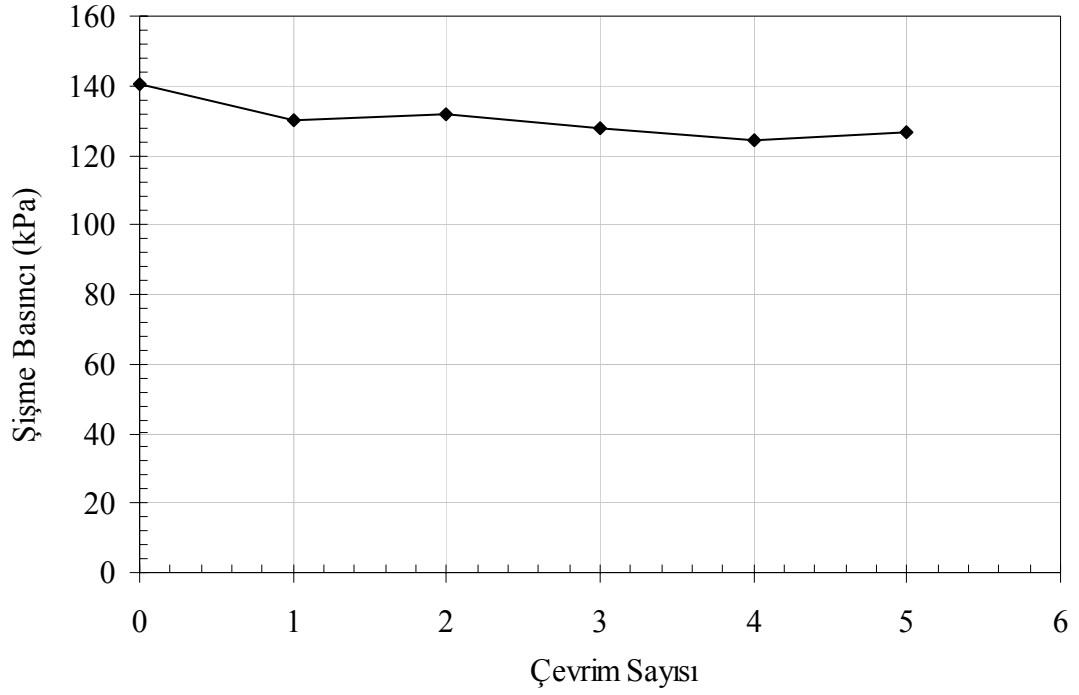


b) Geçirimsizlik deney sonuçlarının ortalama değerleri

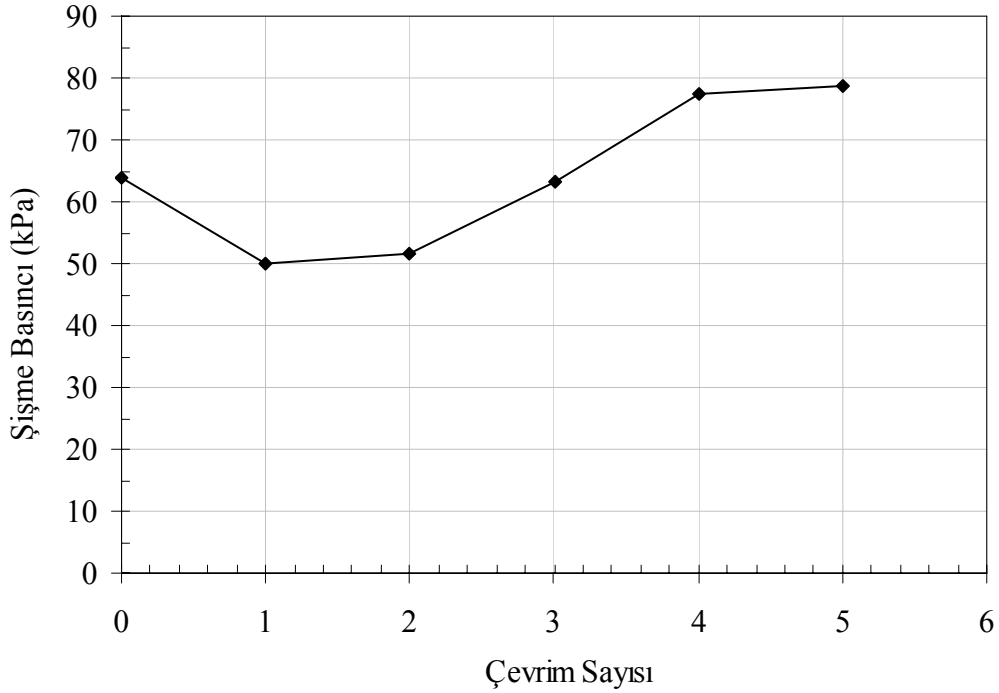
Ek Şekil 3.16. %50 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre geçirimsizlik katsayısının değişimi



#### Ek 4. Şişme Basıncı Deney Sonuçları

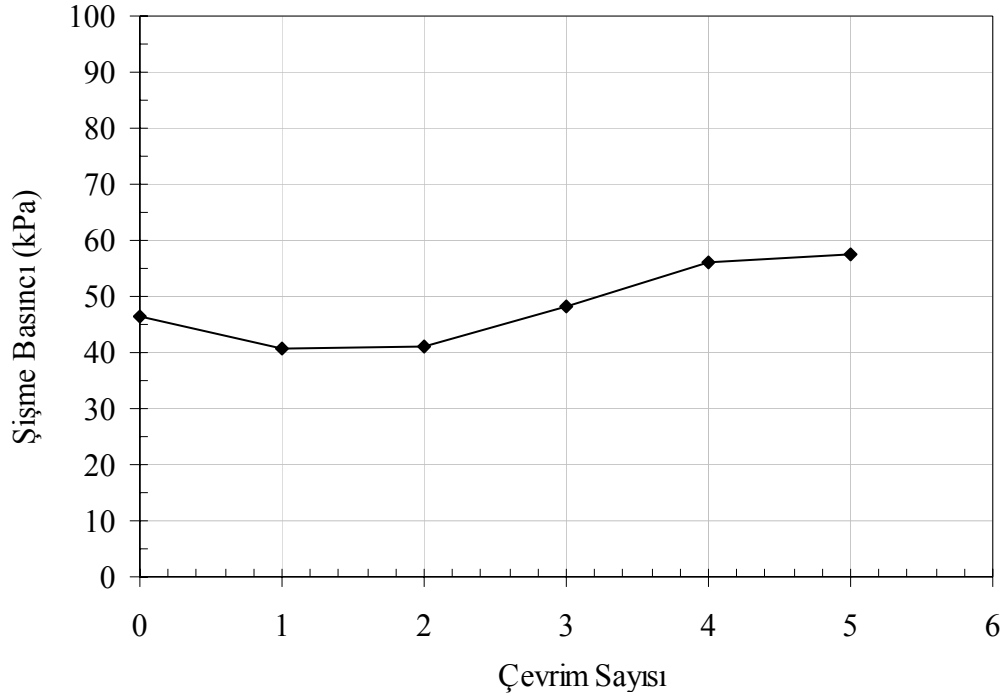


Ek Şekil 4.1. %20 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

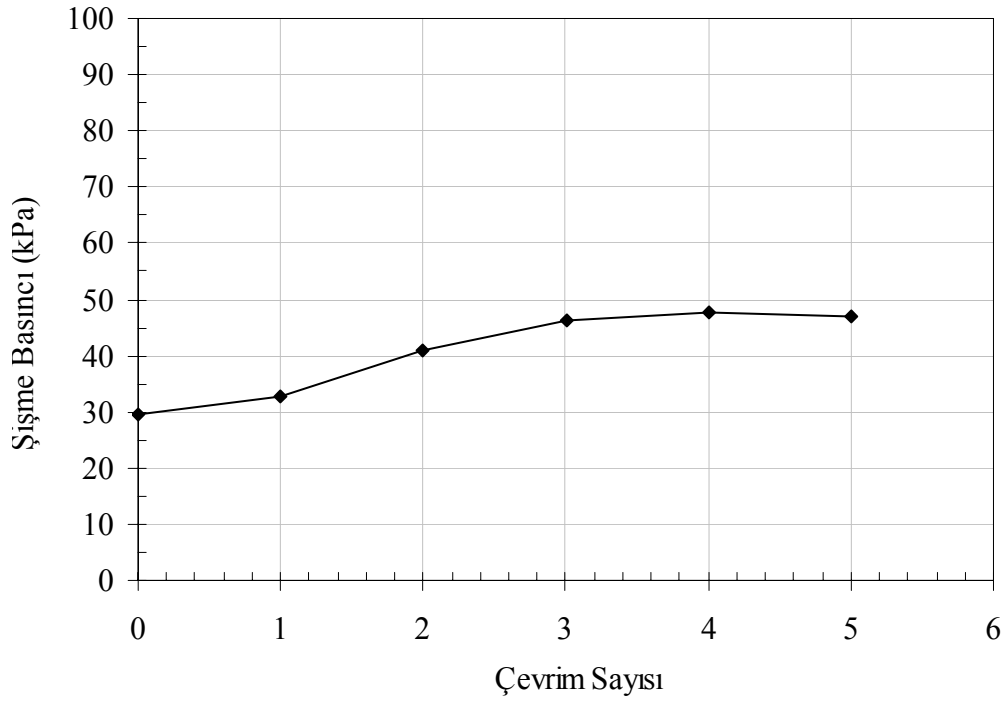


Ek Şekil 4.2. %20 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

Ek 4'ün devamı

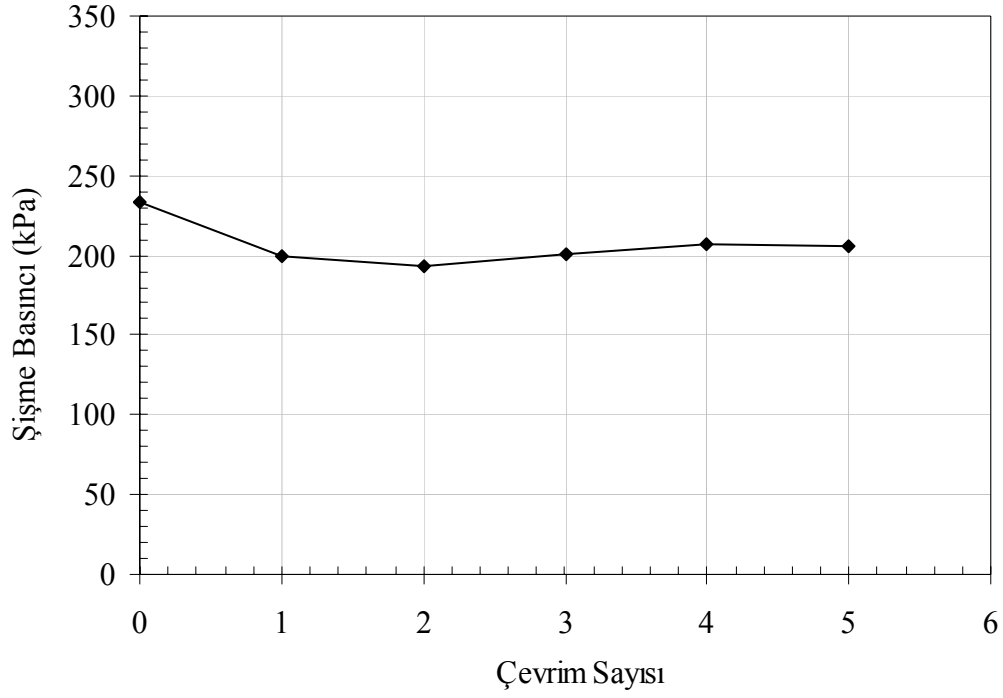


Ek Şekil 4.3. %20 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi

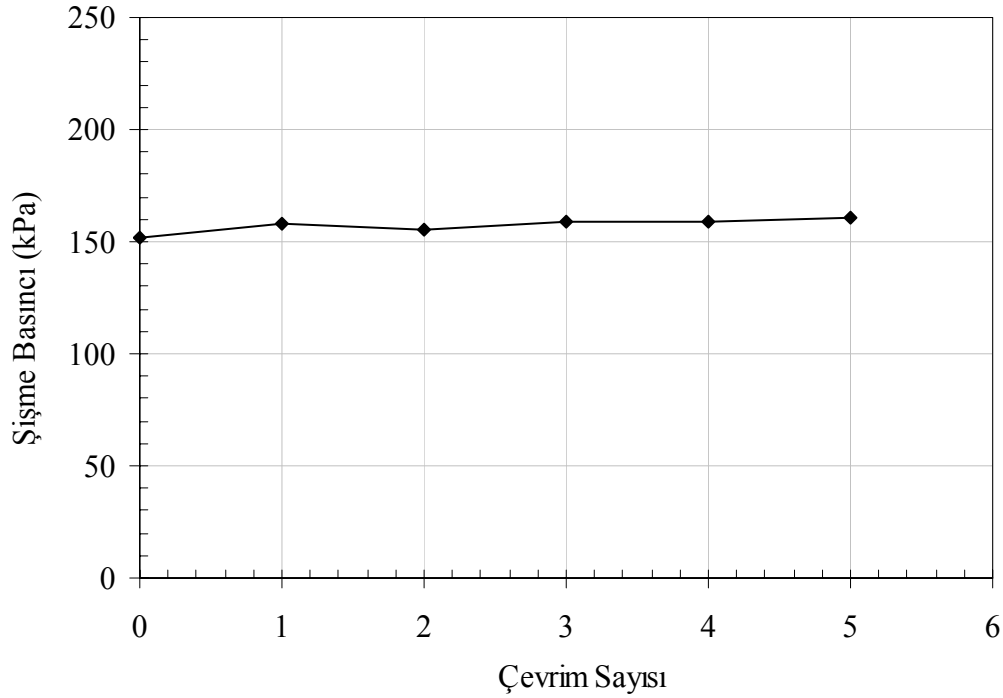


Ek Şekil 4.4. %20 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değişimi

Ek 4'ün devamı

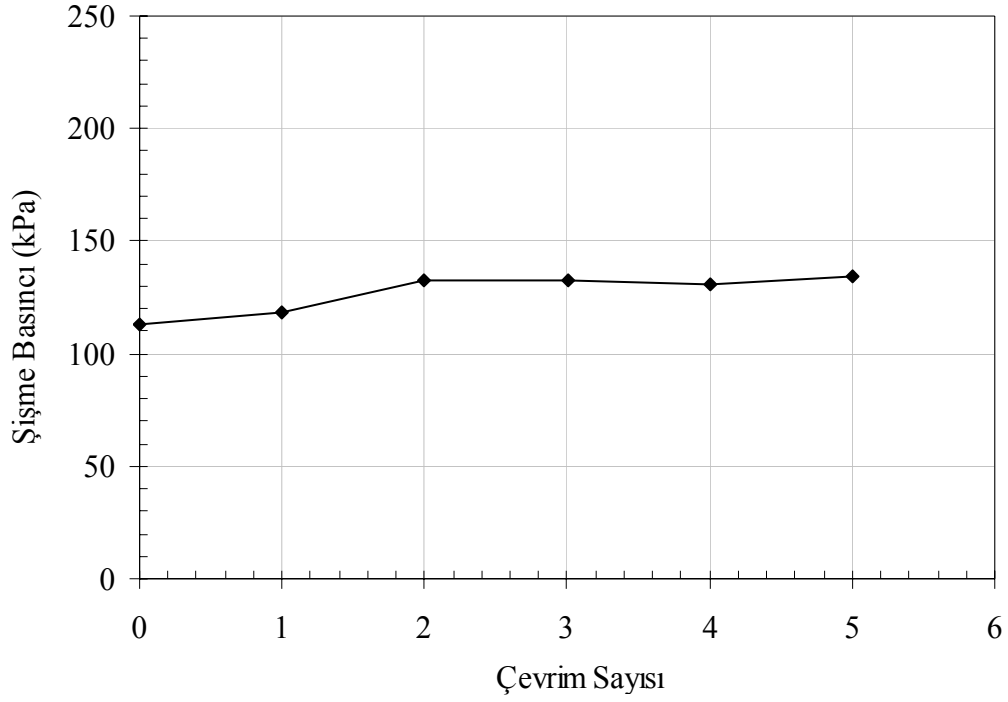


Ek Şekil 4.5. %30 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

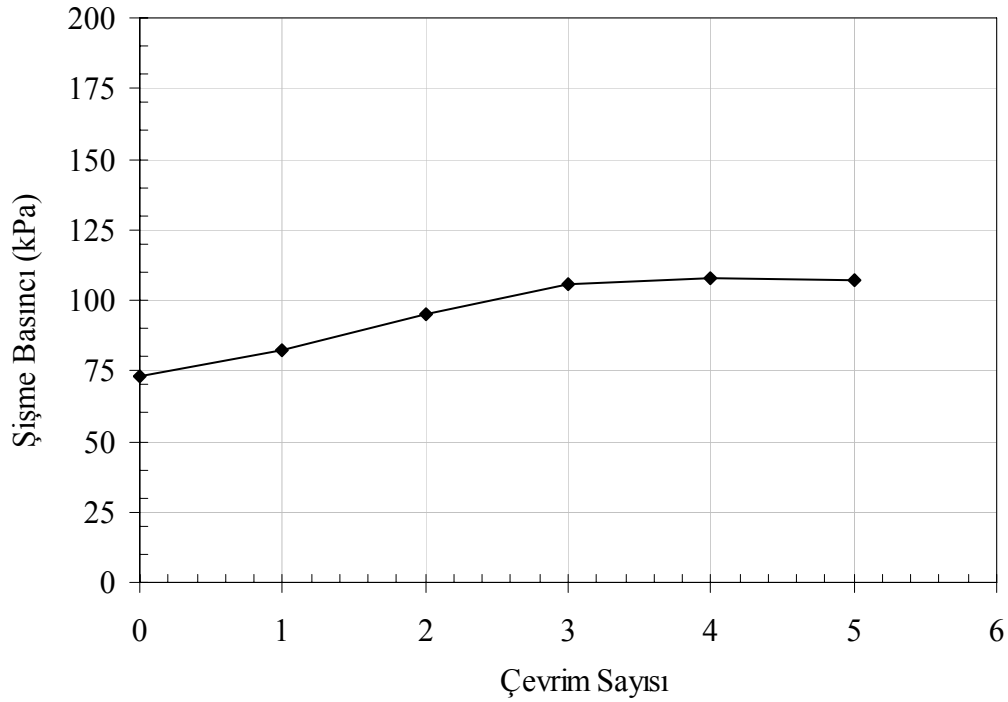


Ek Şekil 4.6. %30 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

Ek 4'ün devamı

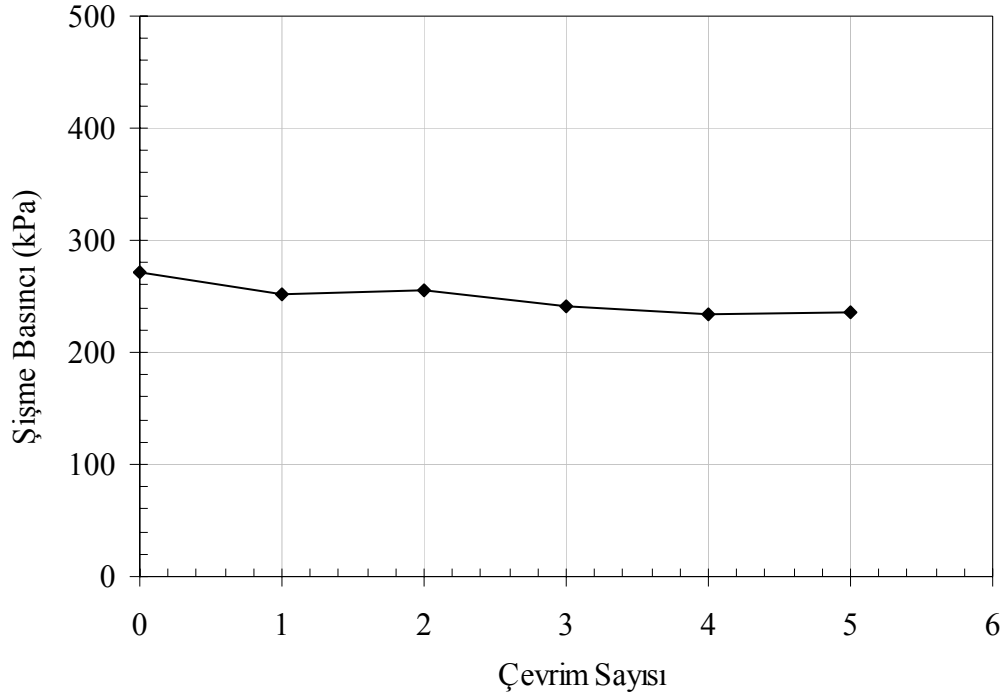


Ek Şekil 4.7. %30 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

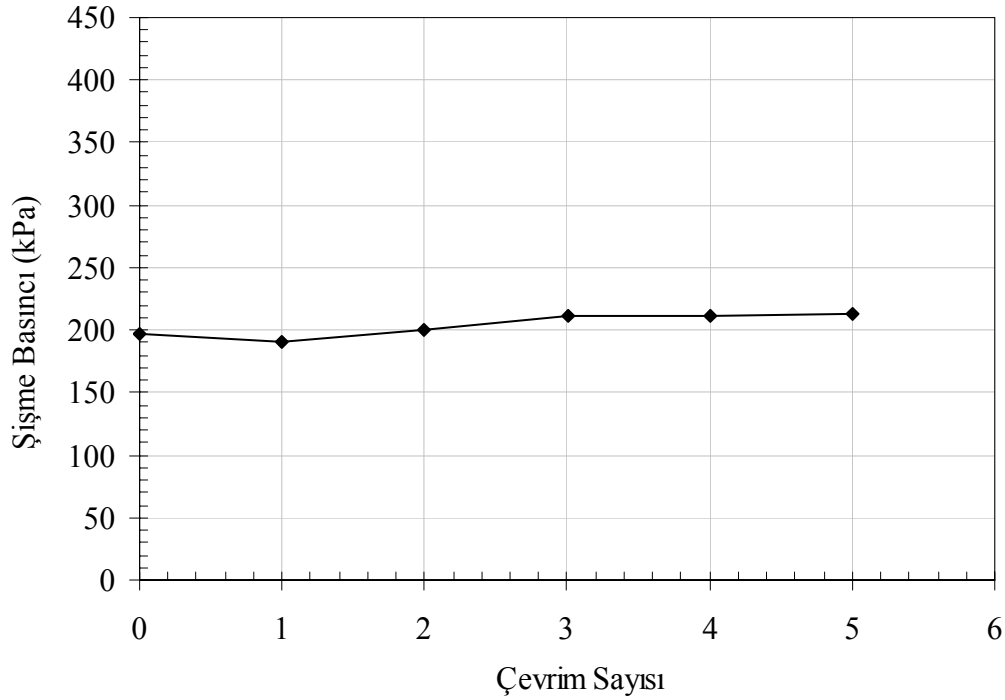


Ek Şekil 4.8. %30 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

Ek 4'ün devamı

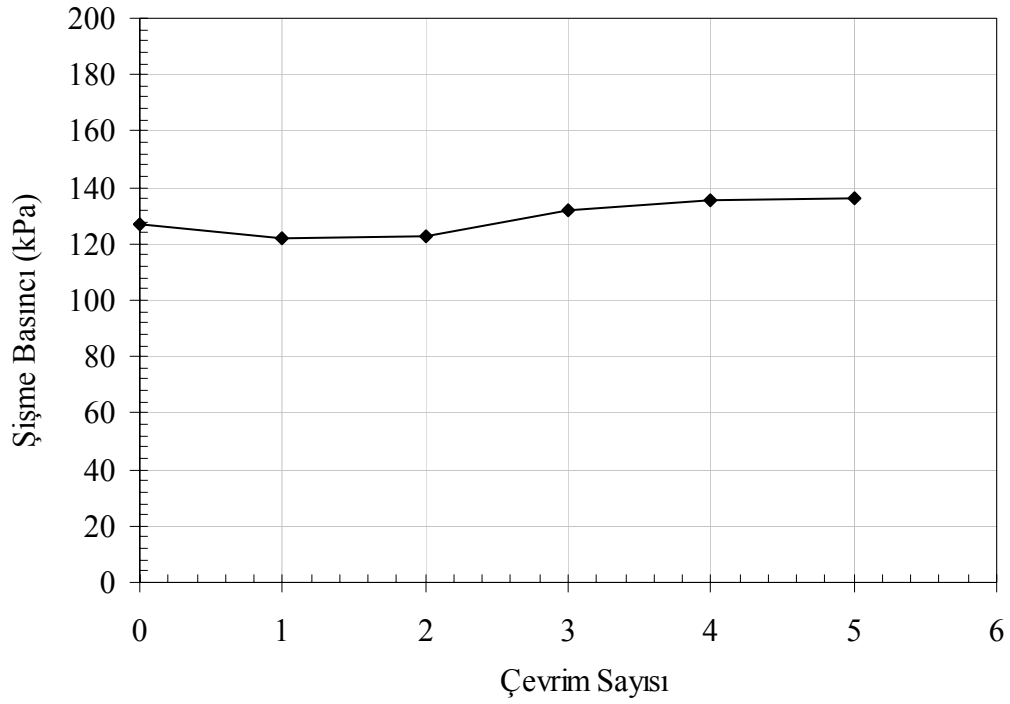


Ek Şekil 4.9. %40 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

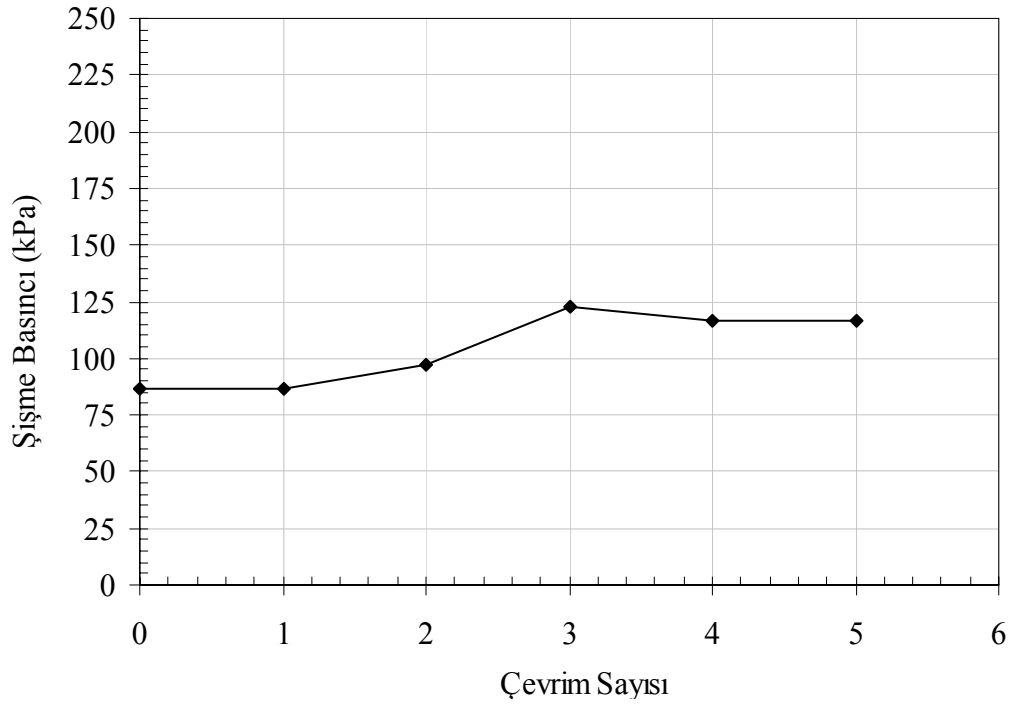


Ek Şekil 4.10. %40 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

Ek 4'ün devamı

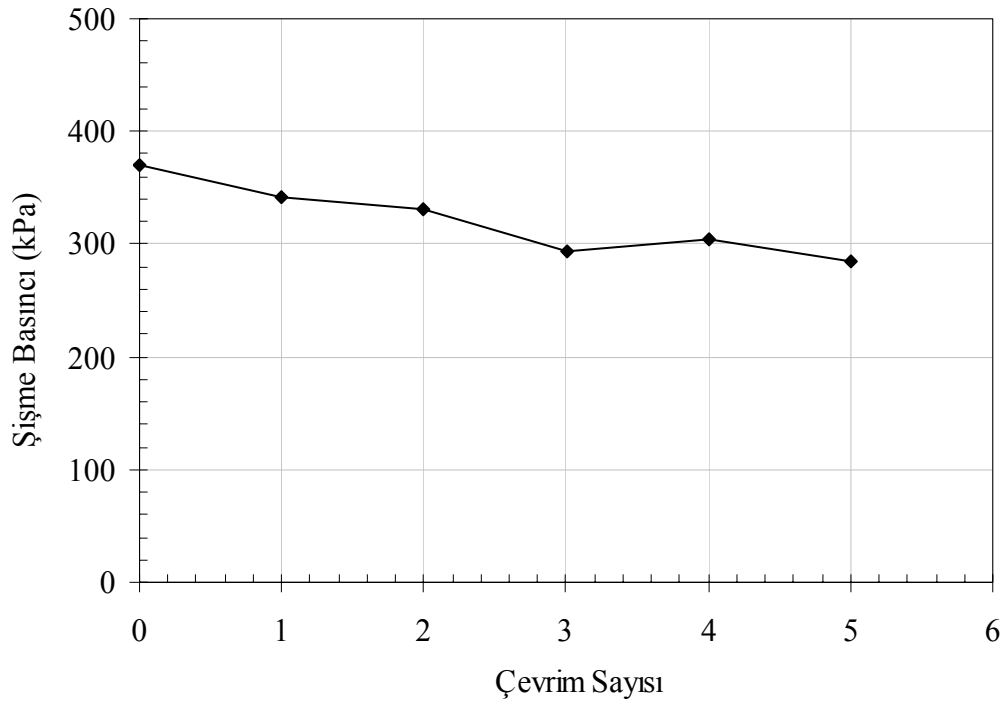


Ek Şekil 4.11. %40 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

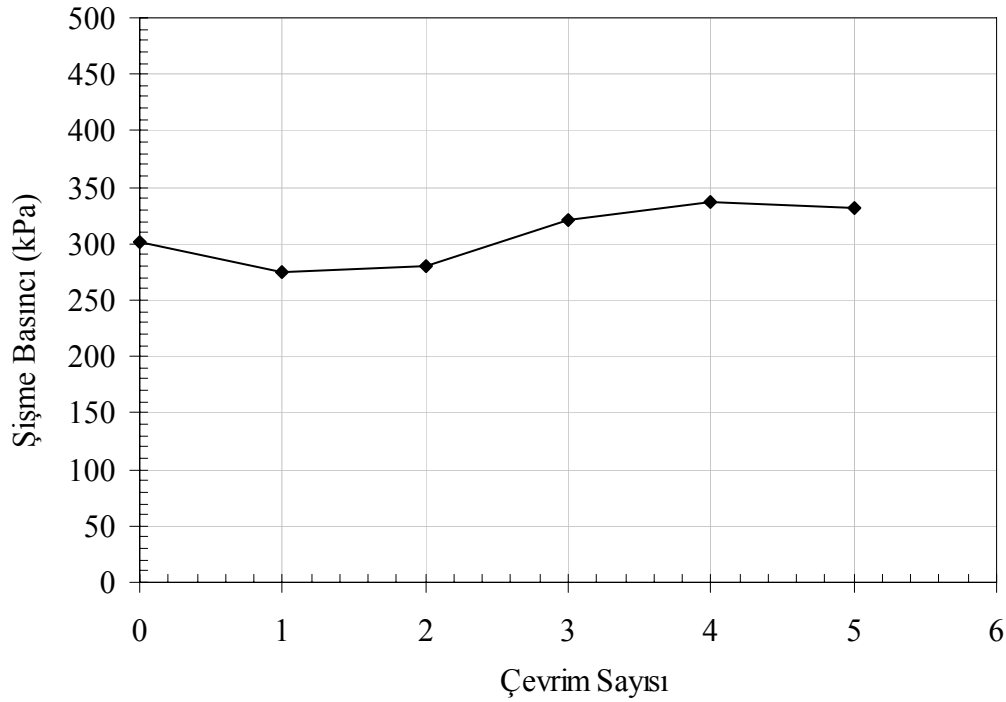


Ek Şekil 4.12. %40 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

Ek 4'ün devamı

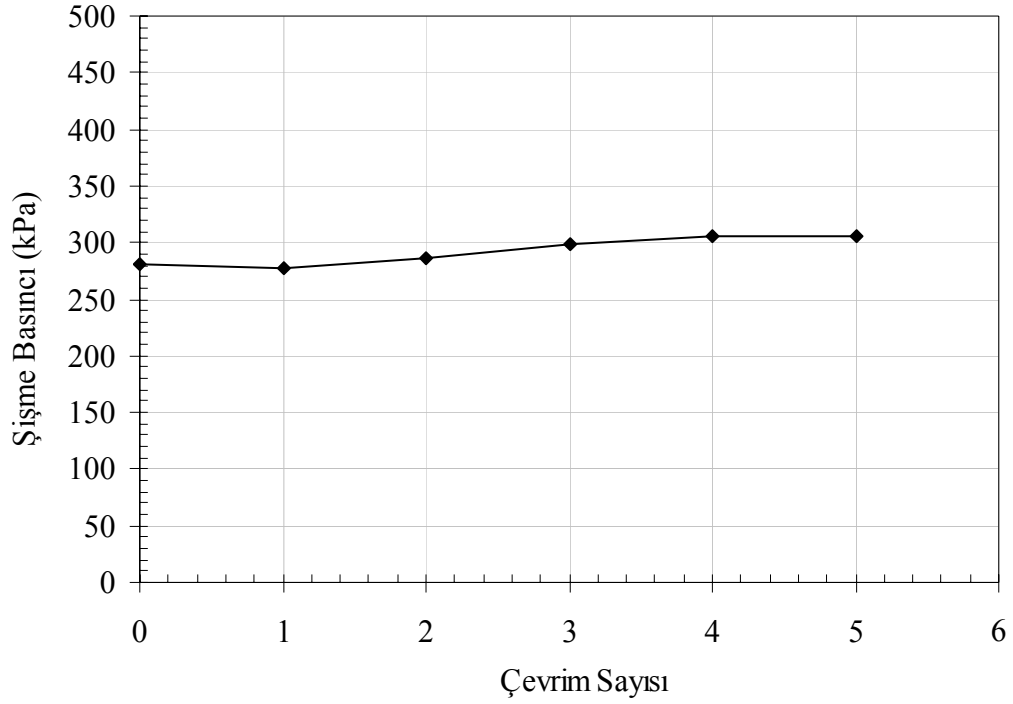


Ek Şekil 4.13. %50 bentonit muhtevsındaki kum-bentonit karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

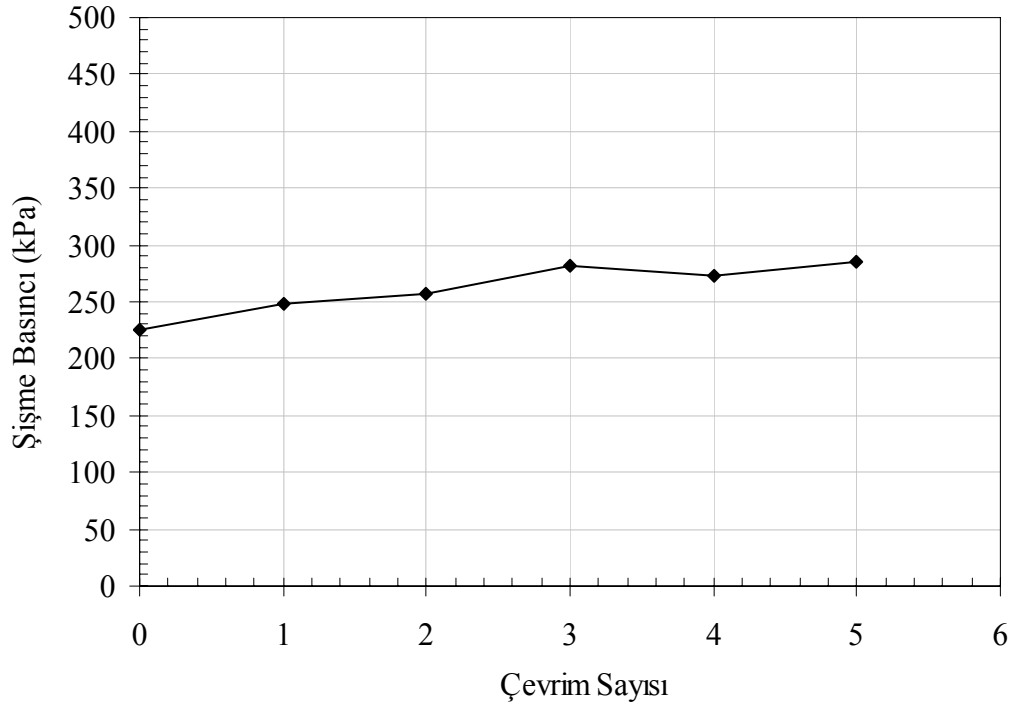


Ek Şekil 4.14. %50 bentonit %1 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi

Ek 4'ün devamı



Ek Şekil 4.15. %50 bentonit %2 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi



Ek Şekil 4.16. %50 bentonit %3 kireç muhtevsındaki kum-bentonit-kireç karışımı için ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre şişme basıncının değışimi



## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Rize ili, Ardeşen ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ardeşen’de tamamladı. 1997 yılında lise öğrenimini okul birinciliği ile tamamladı ve aynı yıl girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2001 yılında bölüm ikinciliği ile mezun olup İnşaat Mühendisi unvanı aldı. 2001–2002 öğretim yılında başladığı Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndaki yüksek lisans öğrenimini, Yrd. Doç Dr. Özcan TAN danışmanlığında hazırladığı “Kum-Bentonit Karışımlarının Şişme Özelliklerinin İncelenmesi” isimli yüksek lisans tez çalışmasıyla 2004 yılında tamamlayarak İnşaat Yüksek Mühendisi unvanı aldı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora öğrenimine başladı. 2006 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü bünyesindeki DSİ 26. Bölge Müdürlüğünde inşaat mühendisi olarak görev yapmaya başladı. Halen bu görevini sürdürmekte olan Fehime AKCANCA İngilizce bilmektedir.