

**SEPIYOLİTİN ÇÖP DEPONİ TABAKALARINDA  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN  
BELİRLENMESİ**

Ali Hilmi Volkan ÖZDEMİR  
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Haziran – 2004

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ali Hilmi Volkan Özdemir'in Sepiyolitin Çöp Deponi Tabakalarında Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi ~~18.06.2004~~ tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yrd. Doç. Dr. Yücel Güney	
Üye	: Prof. Dr. Mustafa Tuncan	
Üye	: Doç. Dr. A. Savaş Koparal	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ~~23.06.2004~~ tarih ve ~~22/2~~ sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

**Prof. Dr. Altuğ İFTAR**  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SEPIYOLİTİN ÇÖP DEPONİ TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ali Hilmi Volkan ÖZDEMİR

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yücel GÜNEY  
2004, 227 sayfa

Bu tezde, yüksek özgül yüzey alanları, adsorpsiyon özellikleri ve uygun fizikokimyasal özelliklerinden, dolayı, sepiyolitın çöp deponi alanlarında düşük permeabiliteli sıkıştırılmış kil tabakası olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunun için sepiyolit, 0,75 sepiyolit + 0,25 kaolin, 0,50 sepiyolit + 0,50 kaolinit karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımların Atterberg kıvam limitleri ve dane çapı dağılımları belirlenmiştir. İndirgenmiş, standart ve modifiye enerji uygulanarak, karışımların kompaksiyon parametreleri tayin edilmiştir. Daha sonra bu enerjilerde sıkıştırılmış karışımlar için, permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi deneyleri, standart enerji ile sıkıştırılmış karışımlarda ise konsolidasyon ve şişme deneyleri yapılmıştır. Çöp deponi alanlarında yüksek miktarda bulunan ağır metal ve tuz çözeltileri kullanılarak, sızıntı deneyleri yapılmıştır. Karışımlar ve bentonit için, bakır adsorpsiyon izotermeleri belirlenmiştir. Sızıntı deneyleri sonrası karışımlarda ve toplanan sızıntı sularında pH, elektriksel iletkenlik ve ağır metal ölçümleri yapılmıştır. Adsorpsiyon ölçümlerine göre, sepiyolitli karışımların adsorpsiyon kapasitelerinin bentonit'in yaklaşık iki katı olduğu belirlenmiştir. Deneyler sonunda çöp deponi tabakaları için en önemli özelliklerden olan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme değerleri açısından, en uygun karışımın 0.50 sepiyolit + 0.50 kaolinit karışımı olduğu görülmüştür. Buna göre sepiyolit malzemesinin çöp deponi alanları için alternatif bir kil tabakası malzemesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler:Sepiyolit, Çöp deponi tabakası, Adsorpsiyon,Sızıntı, Permeabilite

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### DETERMINATION OF THE USAGE OF SEPIOLITE IN LANDFILL LINERS

ALİ HİLMİ VOLKAN ÖZDEMİR

Anadolu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Program

Supervisor: Ass.Prof.Dr.Yücel GUNEY  
2004, 227 pages

In this thesis, the usage of sepiolite in landfill areas as a compacted clay liner with lower permeability have been investigated. The motivation behind our research was sepiolite's texture, adsorption physico-chemical properties and its high specific surface areas and crystal morphology. In our research three types of mixtures were prepared:(1) sepiolite, (2) 0,75 sepiolite + 0,25 kaolinite, (3) 0,50 sepiolite + 0,5 kaolinite. Firstly Atterberg consistency limits and grain size distribution of these mixtures were determined. Next the compaction parameters of the mixtures were obtained by applying reduced, standard and modified efforts. For the mixtures compacted using reduced, standard, modified energies, permeability, unconfined compression strength and volumetric shrinkage strain tests were performed. For the mixtures compacted using standard energy however, consolidation and swelling tests were performed. Moreover, using heavy metal and salt solutions that are found with high amounts in landfill areas as contaminant, leachate experiments were done. Copper adsorption izoterms of the mixtures and bentonite were determined. After the leachate tests heavy metal measurements were performed on the mixtures and on the collected leachate waters. The results show that the adsorption capacity of the mixtures were found to be twice that of bentonite. With the application of the above experiments in order, it is seen that for landfill liners, the most proper suitable mixture with respect to some of the important properties such as permeability, unconfined compression strength and volumetric shrinkage strain values, is 0,50 sepiolite + 0,50 kaolinite. It is determined that sepiolite materials can be used as an alternative clay liner material in landfill areas.

**Keywords:** Sepiolite, Landfill liner, Adsorption, Leachate, Permeability

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, değerli bilgi, deneyim ve tecrübelerini benden esirgemeyen Danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Yücel GÜNEY'e, ders aldığım hocalarım Prof. Dr. Ahmet TUNCAN, Yrd. Doç. Dr. Hakan KOYUNCU ve Yrd. Doç. Dr. Gülgün YILMAZ'a ve İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a, Tekniker Adnan KILIÇ, Orman Bakanlığı çalışanı Teknisyen Salim TÜRKER ve deneysel çalışmalarında kullandığım sepiyolit malzemesini temin ettiğimiz Fikret DOĞANCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bütün eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme en içten şükranlarımı sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş .....	1
1.2. Önceki Çalışmalar .....	4
1.3. Çalışmanın Amacı .....	13
<b>2. ÇÖP DEPONİ TABAKALARI.....</b>	<b>16</b>
2.1. Genel Olarak Çöp Deponi Alanı Tabakaları .....	16
2.1.1. Çöp Deponi Alanlarının Gerekliğinin Sebepleri .....	16
2.1.2. Temel Çöp Deponi Alanları Gereklikleri.....	17
2.1.3. Çöp Deponi Alanları Bileşenleri ve Konfigürasyonu .....	19
2.1.4. Çöp Deponi Alanı Zarfı .....	22
2.1.4.1. Tabaka Sistemi.....	23
2.1.4.2. Sızıntı Toplama ve Uzaklaştırma Sistemi .....	23
2.1.4.3. Gaz Toplama ve Kontrol Sistemi .....	23
2.1.4.4. Nihai Örtü Sistemi.....	24
2.1.5. Kompozit Tabakalar .....	24
2.1.6. Double Kompozit Tabakaların Yararları .....	28
2.2. Sıkıştırılmış Kil Tabakalar.....	30
2.2.1. Sıkıştırılmış Kil Tabakalarının Gözden Geçirilmesi.....	30
2.2.2. Kompaksiyon ve Permeabilite Faktörleri.....	34

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
2.2.2.1. Kompaksiyon Deneyi .....	35
2.2.2.2. Permeabilite Deneyi .....	38
2.2.3. Sıkıştırılmış Kil Tabakalarının Tasarımı .....	42
2.2.3.1. Düşük Permeabilite .....	42
2.2.3.2. Yeterli Kayma Mukavemeti.....	46
2.2.3.3. Minimum Rötire (Büzülme) Potansiyeli .....	48
2.2.3.4. Tüm Tasarım Kriterlerini Karşılıyan Kabul Edilebilir Bölge.....	53
2.2.4. Topakların Permeabilite Üzerindeki Etkisi .....	54
2.2.4.1. Topak Boyutunun Kompaksiyon Eğrisi Üzerindeki Etkisi.....	55
2.2.4.2. Topak Boyutunun Permeabilite Üzerindeki Etkisi .....	55
2.2.4.3. Topak Yapısına Karşın Parçacık Uyumu .....	57
2.2.4.4. Laboratuar Testleri ve Tasarım İçeriği.....	58
2.2.5. Çakıl Muhtevasının Permeabilite Üzerindeki Etkisi.....	60
2.2.6. Donma - Çözülmenin Permeabilite Üzerindeki Etkisi.....	63
2.2.6.1. Zeminin Donması Sırasında Görülen Olaylar .....	64
2.2.6.2. Donma - Çözülmenin Permeabilite Üzerindeki Etkisi	65
2.2.6.3. Donma - Çözülme Sırasında Permeabiliteye Etki Eden Faktörler .....	67
<b>3. KULLANILAN MALZEMELER.....</b>	<b>72</b>
3.1. Sepiyolit.....	72
3.1.1. Giriş .....	72
3.1.2. Tanımı ve Oluşumu .....	73
3.1.3. Kristal Yapısı .....	76
3.1.4. Mineralojik Özellikleri .....	83
3.1.5. Scanning (Tarama) Elektron Mikroskobu (SEM) Fotoğrafları .	84
3.1.6. Fiziksel Özellikleri .....	85

## İÇİNDEKİLER

	<u>Savfa</u>
3.1.7. Fiziko-Kimyasal Özellikleri .....	85
3.1.7.1. Sorptif Özellikleri.....	86
3.1.7.2. Yüzey Alanı Modifikasyonları.....	87
3.1.7.3. Kolloidal Özellikleri.....	89
3.1.8. Kullanım Alanları.....	89
3.1.8.1. Sorptif Amaçlı Kullanım Alanları.....	90
3.2. Kaolinit .....	92
3.3. Kirleticiler.....	96
3.3.1. Ağır Metaller.....	96
3.3.1.1. Bakır (Cu) .....	97
3.3.1.1. Krom (Cr).....	99
3.3.1.1. Kurşun (Pb).....	100
3.3.2. Potasyum Klorür (KCl) .....	101
<b>4. DENEY YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>102</b>
4.1. Geoteknik Özellikler .....	102
4.1.1. Fiziksel (İndeks) Özellikler .....	102
4.1.1.1. Su Muhtevası.....	102
4.1.1.2. Dane Özgül Ağırlığı .....	102
4.1.1.3. Dane Çapı Dağılımı.....	103
4.1.1.4. Atterberg Kıvam Limitleri .....	103
4.1.1.5. Rötire limiti ve Hacimsel Rötire (Büzülme).....	103
4.1.2. Mekanik Özellikler.....	104
4.1.2.1. Kompaksiyon Deneyi .....	104
4.1.2.2. Serbest Basınç Deneyi.....	105
4.1.2.3. Permeabilite Deneyi .....	105
4.1.2.4. Konsolidasyon Deneyi.....	105
4.1.2.5. Şişme Basıncı Deneyi.....	106
4.1.2.6. Serbest Şişme Deneyi .....	106

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4.2. Fiziko-Kimyasal Özellikler.....	107
4.2.1. Adsorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi .....	107
4.2.1.1. Adsorpsiyon .....	107
4.2.1.2. Freundlich Denklemi.....	108
4.2.1.3. Langmuir Denklemi.....	109
4.2.1.4. Deney Numunelerinin Hazırlanışı ve Adsorpsiyon Okumaları .....	110
4.2.2. Çökeltme (Sedimentasyon) Deneyi.....	110
4.2.3. pH.....	110
4.2.4. Elektriksel İletkenlik .....	111
4.2.5. Ateşte Kayıp Miktarı (Organik Madde Miktarı).....	111
4.3. Çevresel Şartlara Ait Özellikler .....	112
4.3.1. Sızıntı (Leachate) Deneyi .....	112
4.3.2. Donma-Çözülme Çevrimleri.....	113
4.3.3. Sızıntı Deneyi ve Donma-Çözülme Çevrimleri Sonrası Mekanik Deney Yöntemleri .....	114
4.3.3.1. Serbest Basınç Deneyi.....	115
4.3.3.2. Konsolidasyon Deneyi.....	115
4.3.3.2. Serbest Şişme Deneyi .....	115
4.3.4. Sızıntı Deneyi ve Donma-Çözülme Çevrimleri Sonrası Fiziko-Kimyasal Deney Yöntemleri .....	116
4.3.4.1. pH .....	116
4.3.4.2. Elektriksel İletkenlik .....	116
4.3.4.3. Toplam Metal ve Potasyum (K) Miktarı .....	117
4.4. Mikro-Yapısal Özellikler.....	117
4.4.1. Scanning (Tarama) Elektron Mikroskobu (SEM) Fotoğrafları .	117
4.4.2. X-ışınları Difraksiyonu (XRD) Analizi.....	117

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>5. DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>119</b>
5.1. Hazırlanan Karışımlar .....	119
5.2. Geoteknik Özellikler .....	119
5.2.1. Fiziksel (İndeks) Özellikler .....	119
5.2.1.1. Dane Özgül Ağırlığı .....	119
5.2.1.2. Dane Çapı Dağılımı .....	120
5.2.1.3. Atterberg Kıvam Limitleri .....	121
5.2.1.4. Hacimsel Büzülme (Rötre) Şekil Değiştirmesi .....	121
5.2.1.5. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne Göre Sınıflandırma .....	122
5.2.2. Mekanik Özellikler .....	124
5.2.2.1. Kompaksiyon Deneyi .....	124
5.2.2.2. Serbest Basınç Deneyi .....	127
5.2.2.3. Permeabilite Deneyi .....	133
5.2.2.4. Konsolidasyon Deneyi .....	135
5.2.2.5. Şişme Basıncı Deneyi .....	135
5.2.2.6. Serbest şişme Deneyi .....	136
5.3. Fiziko-Kimyasal Özellikler .....	137
5.3.1. Adsorpsiyon İzotermi .....	137
5.3.2. Çökeltme (Sedimentasyon) Deneyi .....	140
5.3.3. pH .....	147
5.3.4. Elektriksel İletkenlik (EC) .....	148
5.3.5. Ateşte Kayıp Miktarı (Organik Madde Miktarı) .....	148
5.4. Çevresel Şartlara Ait Özellikler .....	149
5.4.1. Sızıntı (Leachate) Deneyi .....	149
5.4.2. Sızıntı Deneyi Sonrası Yapılan Mekanik Deneyler .....	150
5.4.2.1. Serbest Basınç Deneyi .....	150
5.4.2.2. Konsolidasyon Deneyi .....	151
5.4.2.3. Serbest Şişme Deneyi .....	154
5.4.3. Sızıntı Deneyi Sonrası Belirlenen Fiziko-Kimyasal Özellikler .....	156

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
5.4.3.1. pH .....	156
5.4.3.2. Elektriksel İletkenlik (EC).....	158
5.4.3.3. Toplam Metal ve Potasyum (K) Miktarı .....	160
5.4.4. Donma-Çözülme Çevrimleri ve Sızıntı Deneyi Sonrası	
Yapılan Mekanik Deneyler .....	161
5.4.4.1. Serbest Basınç Deneyi.....	161
5.4.4.2. Konsolidasyon Deneyi.....	163
5.4.4.3. Serbest Şişme Deneyi.....	174
5.4.5. Donma-Çözülme Çevrimleri ve Sızıntı Deneyi Sonrası	
Belirlenen Fiziko-Kimyasal Özellikler .....	183
5.4.5.1. pH .....	183
5.4.5.2. Elektriksel İletkenlik (EC).....	187
5.4.5.3. Toplam Metal ve Potasyum (K) Miktarı .....	191
5.5. Mikro-Yapısal Özellikler.....	194
5.5.1. Scanning (Tarama) Elektron Mikroskobu (SEM) Fotoğrafları	194
5.5.2. X-ışınları Difraksiyonu (XRD) Analizi.....	197
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>198</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>206</b>
<b>7. EKLER .....</b>	<b>216</b>
EK-1. Sivrihisar'da bulunan geniş sedimanter sepiyolit yatakları .....	217
EK-2. Karışımlara ait donma sonrası fotoğraflar .....	218
EK-3. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar.....	219
EK-4. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar .....	220
EK-5. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar .....	221

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
EK-6. Bakır ve Krom çözeltileriyle sızıntı sonrası zeminde kirleticinin tutulduğu üst bölge.....	222
EK-7. Sepiyolit için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri .....	223
EK-8. 25K75S karışımı için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri.....	224
EK-9. 50K50S karışımı için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri.....	225
EK-10. Literatürde içme suyunda bulunmasına müsaade edilen maksimum kirleticiler miktarları .....	226
EK-11. Literatürde çöp deponi alanı sızıntı suyunda bulunmasına müsaade edilen maksimum kirleticiler miktarları.....	227

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Bir kentsel çöp deponi alanı toplama sisteminin şematik görünümü (Qian ve ark., 2001).....	18
2.2. (a) Ünite temeli ve sızıntı toplama sistemi (b) Katı atığın çöp deponi alanına yerleştirilmesi (c) Son Örtü tabakası ile kapatılmış çöp deponi alanı (Qian ve ark., 2001).....	20
2.3. (a) Alan dolgusu, (b) Hendek dolgusu, çöp deponi alanı tipleri.....	21
2.4. (a) Yukarı ve aşağı yer dolgusu, (b) Vadi dolgusu, çöp deponi alanı tipleri.....	22
2.5. (a) tek kil tabaka, (b) tek geomembran tabaka, (c) duble geomembran tabaka .....	25
2.6. (a) tek kompozit tabaka, (b) birincil ve ikincil sızıntı toplama sistemlerini içeren duble kompozit tabaka .....	26
2.7. Geomembran, zemin ve kompozit tabakalardaki sızma modelleri.....	27
2.8. Geomembran ve sıkıştırılmış kil arasında yeterli hidrolik temasın sağlanması için uygun kompozit tabaka tasarımı (Daniel, 1993).....	28
2.9. Sıkıştırılmış kil tabakalarda, kabul edilebilir su muhtevaları ve kuru yoğunlukları özelliği için geleneksel metot (Daniel ve Benson, 1990).....	30
2.10. Kuru birim hacim ağırlık-kalıp su muhtevası ilişkisi (Daniel ve Benson, 1990).....	31
2.11. Su muhtevasına karşılık permeabilite ile sıkıştırılma enerjisinin permeabilite üzerindeki etkisi görülüyor (Daniel ve Benson, 1990).....	32
2.12. Permeabilite $\leq$ maksimum kabul edilebilir değere göre sıkıştırılmış numuneler için kompaksiyon eğrileri, yeniden içi dolu sembollerle çizilmiştir (Daniel ve Benson, 1990) .....	32
2.13. Sabit permeabilite ve kayma mukavemeti (kPa) düzey çizgileri (Boutwell ve Hedges, 1989) .....	33
2.14. Modifiye, standart ve indirgenmiş kompaksiyon enerjileriyle oluşturulmuş kompaksiyon eğrileri (Daniel ve Benson, 1990).....	37
2.15. Rijit-duvarlı, kompaksiyon kalıplı permeametre (Daniel, 1994).....	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.16. Esnek-duvarlı permeametre (Daniel, 1994).....	41
2.17. Kalıp su muhtevasına karşılık permeabilite (Daniel ve Wu, 1993).....	43
2.18. Permeabilite hususlarının esas alındığı kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller permeabilitesi $1 \times 10^{-7}$ cm / s' den az yada ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993).....	44
2.19. Permeabilite hususları esas alınarak ayarlanmış kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller permeabilitesi $1 \times 10^{-7}$ cm/s den küçük veya ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993'dan itibaren değiştirilmiş).....	45
2.20. Serbest basınç mukavemetine karşılık kalıp su muhtevası (Daniel ve Wu, 1993).....	47
2.21. Serbest basınç mukavemeti hususlarını esas alan kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller serbest basınç mukavemeti 200 kPa 'dan büyük yada ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993).....	48
2.22. Kalıp su muhtevasına karşı kuruma sebebiyle oluşan hacimsel şekil değiştirme (Daniel ve Wu, 1993).....	52
2.23. Hacimsel büzülme (rötre) hususlarının esas alındığı kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller kurutmayla eyleme geçirilmiş hacimsel büzülmeleri %4'den küçük yada ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993).....	52
2.24. Permeabilite, hacimsel büzülme ve serbest basınç mukavemeti için tasarım amaçlarını esas alan kabul edilebilir bölge (Daniel ve Wu, 1993'den itibaren değiştirilmiş).....	53
2.25. Standart ve modifiye proktor kompaksiyon eğrileri (Benson ve Daniel, 1990).....	55
2.26. Permeabiliteye karşı kalıp su muhtevası (Benson ve Daniel, 1990).....	56
2.27. Suyun zeminin toprakları arasındaki nispeten büyük boşluklardan akışı	57
2.28. Permeabiliteye karşı kuru birim hacim ağırlık (Benson ve Daniel, 1990).....	59

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.29. Kaolinit/çakıl ve maden ocağı molozu/çakıl karışımlarının permeabilitesiyle çakıl yüzdesinin fonksiyonu (Shelley ve Daniel, 1993) .....	62
2.30. Birkaç laboratuvar çalışmasından elde edilen permeabilite oranına karşı donma çözülme öncesi permeabilite ilişkisi (Othman ve ark., 1994'ten itibaren değiştirilmiş).....	66
2.31. Laboratuvar ve arazide donmuş -çözülmüş zeminlerde ölçülmüş permeabilite değerleri (Benson ve ark., 1995) .....	68
2.32. Yayılma sırasında uygulanan efektif gerilmenin 21 kil zeminine ait permeabilite oranı üzerindeki etkinliği ( Othman ve ark., 1994 den itibaren değiştirilmiş).....	69
2.33. Bir Wisconsin Kili'nin permeabilitesinde, donma-çözülme sırasında ve sonrasında toprak yükü basıncının etkinliği (Othman ve ark., 1994) .....	70
3.1. Diyajenetik yer değiştirme modeline göre sepiyolit oluşumu (Ece ve Çoban, 1994) .....	75
3.2. Dolomit-sepiyolit birim çökellerinin fasiyes gelişimleri (Gençoğlu ve İrkeç, 1994) .....	76
3.3. Sepiyolit kristalinin şematik görünüşü (Jones ve Galan, 1988).....	77
3.4. Tetrahedral ve Oktahedral tabakaların Dizilişi (Martin ve ark., 1971'den sonra) (http-1) .....	79
3.5. Sepiyolit'in 001 birim hücre yüzeyine paralel yapısal şeması (Nagy ve Bradley, 1955).....	80
3.6. Brauner ve Preisinger, (1956)'a ait sepiyolit'in 001 birim hücre yüzeyine paralel yapısal şemasının Bailey (1980) tarafından değiştirilmiş hali (http-2) .....	80
3.7. Deneyleerde kullanılan Sivrihisar-Ayvalı sepiyolitinin lif yapısının SEM'de görünümü.....	84
3.7. Eskişehir sepiyolitinin lifli yapısının SEM'de görünümü (http-3).....	84
3.9. Kaolinit kilinin kristal yapısı (Lambe, 1953).....	93

## ŞEKİLLER DİZİNİ

3.10. Kaolinit kilinin atomik yapısı (Grim, 1959) .....	94
3.11. Kaolinit kiline ait X-Ray analizi (Güney, 1998).....	95
4.1. (a) 22 mm çap ve 25 mm yüksekliğindeki altı kapalı rötrelimiti kabı (b) 22 mm çap ve 25 mm yüksekliğindeki altı açık hacimsel rötrelimiti (büzülme) kabı .....	104
4.2. Esnek-duvarlı permeabilite hücreleri ve kontrol panelleri .....	106
4.3. Sızıntı deneylerinin yapılması için oluşturulan sistemin, (a) (soldan sağa) üst plaka, alt plaka ve kompaksiyon kalıbı, (b) kirletici çözeltilerin, sisteme aktarılmasında kullanılan çözelti haznesi .....	114
4.4. Sızıntı deneylerinin yapılması için oluşturulan sistem.....	115
5.1. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait dane çapı dağılımları.....	120
5.2. Sepiyolit, karışımlar ve bentonite (Kleppe ve Olson, 1985) ait hacimsel büzülme (rötrelimit) birim hacim şekil değıştirmesi değerleri .....	122
5.3. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerlerinin plastisite kartı üzerinde gösterimi.....	123
5.4. Sepiyolite ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiğı .....	125
5.5. 25K75S karışımına ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiğı.....	125
5.6. 50K50S karışımına ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiğı.....	126
5.7. (a) Sepiyolit, (b) 25K75S ve (c) 50K50S karışımlarına ait serbest basınç mukavemeti-su muhtevası ilişkileri .....	127
5.8. Sepiyolit numunelerine ait gerilme-birim şekil değıştirme ilişkileri ....	129
5.9. Sepiyolit numunelerine ait permeabilite sonrası (p.s.) gerilme-birim şekil değıştirme ilişkileri .....	129
5.10. 25K75S numunelerine ait gerilme-birim şekil değıştirme ilişkileri.....	130
5.11. 25K75S numunelerine ait permeabilite sonrası (p.s.) gerilme-birim şekil değıştirme ilişkileri .....	131
5.12. 50K50S numunelerine ait gerilme-birim şekil değıştirme ilişkileri.....	132

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.13. 50K50S numunelerine ait permeabilite sonrası (p.s.) gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri .....	132
5.14. (a) sepiyolit, (b) 25K75S ve (c) 50K50S karışımlarına ait permeabilite-su muhtevası grafikleri.....	134
5.15. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait e-logP' grafikleri.....	135
5.16. Sepiyolit, karışımlar ve bentonite ait şişme basıncı değerleri .....	136
5.17. Sepiyolit, bentonit ve karışımlara ait logaritma şişme oranı-zaman ilişkileri.....	137
5.18. 25K75S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi.....	138
5.19. 50K50S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi.....	139
5.20. Bentonite ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi .....	139
5.21. Sepiyolite ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi.....	140
5.22. Sepiyolitin 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrası çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.) .....	141
5.23. Sepiyolitin sedimentasyon deneyinden 12 saat sonra çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.) .....	141
5.24. 25K75S karışımına ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi .....	142
5.25. 25K75S karışımının 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrası çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.) .....	143
5.26. 25K75S karışımının sedimentasyon deneyinden 12 saat sonra çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.) .....	143
5.27. 50K50S karışımına ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi .....	144

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.28. 50K50S karışımının 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrası çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.) .....	144
5.29. 50K50S karışımının sedimentasyon deneyinden 12 saat sonra çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.) .....	145
5.30. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi .....	145
5.31. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi.....	146
5.32. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe- zaman ilişkisi .....	146
5.33. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi .....	147
5.34. Sızıntı deneylerinde elde edilen permeabilite – kirletici çözelti ilişkisi.....	150
5.35. Sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi .....	151
5.36. Sepiyolitte sızıntı deneyi sonrası konsolidasyon deneyi ile elde edilen e-logP' ilişkisi .....	152
5.37. 25K75S karışımında sızıntı deneyi sonrası konsolidasyon deneyi ile elde edilen e-logP' ilişkisi .....	153
5.38. 50K50S karışımında sızıntı deneyi sonrası konsolidasyon deneyi ile elde edilen e-logP' ilişkisi .....	153
5.39. Sepiyolitte sızıntı sonrası serbest şişme ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkisi .....	154

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.40. 25K75S karışımında sızıntı deneyi sonrası serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkisi.....	155
5.41. 50K50S karışımında sızıntı deneyi sonrası serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkisi.....	155
5.42. Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı sularının pH okumalarından elde edilen pH-zaman ilişkileri .....	156
5.43. Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyi sonrası zemin numunelerinin pH-zaman ilişkileri .....	157
5.44. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu, Cr ve Pb çözeltileri kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri.....	158
5.45. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri.....	159
5.46. Sızıntı deneylerinde KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen, sepiyolit ve karışımlara ait zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri.....	159
5.47. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu, Cr, ve Pb çözeltileri kullanılarak elde edilen sızıntı sularının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri.....	160
5.48. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının potasyum (K) miktarı-zaman ilişkileri .....	161
5.49. Sepiyolit için donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi .....	162
5.50. 25K75S karışımı için donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi .....	162
5.51. 50K50S karışımı için donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi.....	163
5.52. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen e-logP' ilişkileri .....	164
5.53. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen e-logP' ilişkileri .....	165

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.54. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen e-logP' ilişkisi.....	165
5.55. Sepiyolit 1. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri .....	166
5.56. Sepiyolit 3. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri .....	167
5.57. Sepiyolit 5. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri .....	168
5.58. 25K75S 1. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri.....	169
5.59. 25K75S 3. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri.....	170
5.60. 25K75S 5. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri.....	171
5.61. 50K50S 1. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri.....	172
5.62. 50K50S 3. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri.....	172
5.63. 50K50S 5. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri.....	173
5.64. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri .....	174
5.65. 25K75S karışımında donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri .....	175
5.66. 50K50S karışımında donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri .....	175
5.67. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cu çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	176
5.68. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cr çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	177
5.69. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Pb çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	177

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.70. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası KCl çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	178
5.71. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cu çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	179
5.72. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cr çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	179
5.73. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Pb çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	180
5.74. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası KCl çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	180
5.75. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cu çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	181
5.76. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cr çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	181
5.77. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Pb çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	182
5.78. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası KCl çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri.....	182
5.79. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri.....	183
5.80. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri.....	184

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.81. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri.....	184
5.82. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri.....	184
5.83. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin pH-zaman ilişkileri.....	185
5.84. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri.....	186
5.85. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri.....	186
5.86. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri.....	187
5.87. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri.....	188
5.88. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri.....	188
5.89. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri.....	189
5.90. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri.....	190
5.91. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri.....	190
5.92. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri.....	191
5.93. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının Ağır metal miktarı-zaman ilişkileri.....	192
5.94. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının Ağır metal miktarı-zaman ilişkileri.....	192
5.95. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözültisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının Ağır metal miktarı-zaman ilişkileri.....	193

## ŞEKİLLER DİZİNİ

5.96. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının Potasyum (K) miktarı-zaman ilişkileri .....	193
5.97. Standart enerji ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmış sepiyolit numunesine ait SEM fotoğrafı .....	195
5.98. Sızıntı sonrası sepiyolit numunesine ait SEM fotoğrafı .....	195
5.99. Sızıntı sonrası 25K75S karışımı numunesine ait SEM fotoğrafı .....	196
5.100. Sızıntı sonrası 50K50S karışımı numunesine ait SEM fotoğrafları .....	196
5.101. Karışımlara ait x-ışınları difraksiyonu analizi sonuçları .....	197
6.1. Sepiyolit için tanımlanan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgelerinin üst üste bindirilmesi ile oluşan bölge .....	199
6.2. 25K75S karışımı için tanımlanan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgelerinin üst üste bindirilmesi ile oluşan bölge .....	200
6.3. 50K50S karışımı için tanımlanan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgelerinin üst üste bindirilmesi ile oluşan bölge .....	200

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. ABD'deki kentsel katı atık üretimi (USEPA, 1999) .....	17
2.2. Geoteknik sıkıştırılmış kil ile çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakalarının karşılaştırılması .....	35
2.3. Proktor deneylerinin üç tipi .....	36
2.4. Topak boyutunun sıkıştırılmış kilin permeabilitesi üzerindeki etkisi (Daniel, 1984) .....	56
3.1. Eskişehir-Sepetçi (Sarıkaya ve ark., 1985); 2. Konya (Stoessel ve Hay, 1978); 3. Eskişehir-Sivrihisar (ITIT, 1993); 4. İspanya-Vallecas (Singer ve Galan, 1984); 5. Japonya-Kuzuu District (Imsi, ve ark., 1969); 6. Madagaskar (Caillere, 1951); 7. Bolu-Kıbrısık (İrkeç, 1995); 8. Avustralya- Tintinara (Rogers, ve ark., 1956); 9. USA-Wyoming (Fahey, ve ark., 1960) .....	74
3.2. Sepiyolite ait bazı kristallografik veriler (Sabah ve Çelik, 1998) .....	79
3.3. Sepiyolite ait bazı katyon değişim kapasitesi (KDK) değerleri (Sabah ve Çelik, 1998) .....	82
3.4. Tipik kil minerallerinin pH=7'deki KDK değerleri (Çokça, 1993; Breck, 1974) .....	83
3.5. Sepiyolitin değişik absorbatlar ile belirlenmiş yüzey alanı değerleri .....	88
3.6. ASTM standartlarına göre boyutlandırılmış sepiyolitin absorpsiyon özellikleri (Singer ve Galan, 1984) .....	90
3.7. Kullanılan kirlenici çözeltilere ait derişim ve molarite değerleri .....	101
5.1. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait dane özgül ağırlıkları .....	120
5.2. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait silt ve kil yüzdeleri .....	121
5.3. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait Atterberg kıvam limitleri değerleri	121
5.4. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait USCS'e göre yapılmış sınıflandırma .....	123
5.5. Sepiyolit ve karışımlara ait kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevaları .....	124

## ÇİZELGELER DİZİNİ

5.6. 25K75S karışımına ait kullanılan malzeme ağırlığı ve derişim ilişkisi .	138
5.7. 50K50S karışımına ait kullanılan malzeme ağırlığı ve derişim ilişkisi .	138
5.8. Bentonite ait kullanılan malzeme ağırlığı ve derişim ilişkisi .....	139
5.9. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait pH değerleri .....	147
5.10. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait EC değerleri .....	148
5.11. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait ateşte kayıp miktarları .....	148
5.12. Deneylerde kullanılan çözelti derişimleri ve pH değerleri .....	156
5.13. Deneylerde kullanılan çözelti derişimleri ve EC değerleri .....	158
5.14. Sepiyolit ve karışımlara ait kirletici kullanılmadan yapılan donma-çözölme çevrimli sızıntı deneyleri sonucu elde edilmiş ağır metal miktarları .....	194

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- CIF : Çatlak yoğunluk faktörü  
EC : Elektriksel iletkenlik  
k : Permeabilite katsayısı cm/s  
KDK : Katyon değişim kapasitesi  
p.s. : Permeabilite sonrası  
25K75S : %25 kaolinit + %75 sepiyolit  
50K50S : %50 kaolinit + %50 sepiyolit  
 $\gamma_d$  : Kuru birim hacim ağırlık  
 $\gamma_w$  : Suyun birim hacim ağırlığı  
 $c_c$  : Sıkışma katsayısı  
cr : Şişme veya kabarma indisi  
e : Boşluk oranı  
ms/cm : miliSiemens /cm

## ALT VE ÜST İNDİSLER

- d : Kuru  
w : Su

# 1.GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Katı atıklar hiçbir amaca hizmet etmeyen, tüketici için bir değer taşımayan, gereksiz oldukları için atılan, evsel, ticari ve endüstriyel aktiviteler sonucu oluşan maddeler olarak tanımlanabilir. ABD’de üretilen yıllık katı atık miktarı 300 milyon tonu aşmaktadır. Türkiye’de de 1960’lı yıllarda yıllık 3 – 4 milyon ton olan katı atık miktarı günümüzde yıllık 20 - 25 milyon tona ulaşmaktadır. Kimi atıklar zamanla zararsız bileşenlerine ayrılabilirken, kimileri ise çok tehlikeli, zararlı bileşenler içermekte ayrışmaları mümkün olmamaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde genel olarak atıkların %15-25’ini tehlikeli atıklar oluşturmaktadır. Bu atıklar insan ve çevre sağlığı açısından büyük tehlikedir.

Çevreye duyarlı katı atık bertaraf yöntemleri, yaklaşık 150 yıl önce uygulanmaya başlanmıştır. Günümüzde katı atıkların bertarafında yakma ve kompostlama gibi teknikler kullanılmaktadır. Yakma organik bileşikli atıkların bertarafı için kullanılan bir yöntemdir. Organik fraksiyonların yanma işlemi sırasında hacimleri önemli ölçüde indirgenmekte ve zehirli madde bulunan organik içerikli atıklar tehlikesiz bileşiklere dönüştürülerek bunların çevreye zararı da minimuma indirgenmektedir. Kompostlama, katı atık kompozisyonu içinde % 65’lik bir oranla ilk sırayı alan organik maddelerin çok yoğun nem ve ısıya tabi tutularak çürütülmesidir. Ancak sözü edilen yakma ve kompostlama bertaraf yöntemleri de nihai çözüm sağlayamamakta ve geriye depolanması gereken bir miktar atık kalmaktadır. Bu yüzden çöp deponi alanları büyük önem taşımaktadır.

Ancak sıhhi olmayan çöp deponi alanları çevreye pek çok açıdan zarar vermektedir. Birçok sahanın yeri, hakim rüzgar yönleri hesaba katılmadan seçildiği için rüzgarlar vasıtasıyla yayılan kokulardan yakınlardaki yerleşim yerleri kadar, uzağındaki büyük yerleşim yerleri de etkilenmektedir. Sahalarda evsel atıklarla birlikte dökülen tehlikeli atıkların bulunması, ayrıca içsel yanmadan kaynaklanan duman, canlıları ve etraftaki yerleşim yerlerini etkilemektedir. Sahaların çoğunda yüzey suları için drenaj hendekleri

bulunmadığından, yağmur sularının sahaya düşmesi neticesinde saha üzerinden akan sular yüzey sularına karışmaktadır. Bunun sonucu olarak saha etrafında suni göllenmeler ve etraftaki derelerde kirlilik meydana gelmektedir. Sahalarda drenaj tabakası ve saha tabanında geçirimsizlik amaçlı tabaka olmamasından dolayı, yağışlar sonucunda saha içerisine süzülen suların, daha derinlere inerek, yeraltı sularına karışmaları, saha etrafındaki yerleşimler kadar uzaklarındaki yerleşimleri de etkilemektedir. Sahaya depolanan atıklar vasıtasıyla kirlenen bu sular, etrafındaki düşük gelir seviyeli sakinlerce arıtmaya tabi tutulmadan kullanılmaktadır. Kapasitelerini doldurmuş veya aşmış sahalarda, kütle içerisinde mikroorganizma faaliyetleri neticesinde oluşan gazın sahanın belirli bölgelerinde yüzeye çıkması yangın ve patlamalar gibi potansiyel tehlikeleri beraberinde getirmektedir (DPT, 1997).

Sıhhi çöp deponi alanları geçirimsizlik amaçlı tabakaların teşkilinde kil tabakalar, geosentetik kil tabakalar ve geomembran tabakalar kullanılabilir. Kil tabakalar, doğal kil tabakalar veya sıkıştırılmış kil tabakalar şeklinde kullanılmaktadır. Bunlardan doğal kil tabakaların sürekli ortamlar olmamaları, kırıklık düzlemleri, çatlaklar ve boşluklar içermeleri nedeniyle, permeabilitelerini üniform tutamamaları oldukça kritik durumlar meydana getirebilmektedir. Bu tabakaların homojenliğinin ve üniformluğunun sürekliliği, yerel ve bölgesel hidrojeolojik koşulları içeren bir seri araştırma yapılarak tartışılmalı ve permeabiliteleri laboratuvar ve arazi permeabilite deneylerinin kombinasyonu olan bir çalışmayla belirlenmelidir. Çalışma sonuçları zeminin gerçek permeabilitesi hakkında hidrolik kusurlar açıkça belirlenmeden sağlıklı bir fikir verememektedir. Çatlaklar, fisürler ve sürtünme boşlukları gibi kusurlar, ölçülmüş permeabilite değerinin artmasına neden olabilmektedir. Doğal kil tabakaların düzenli jeolojik yapıları olduğunu ve permeabilitelerinin tüm doğrultularda üniformluk gösterdiğini ispatlamak çok pahalıya mal olmakta ve çeşitli zorlukları bulunmaktadır. Bu nedenle doğal tabakaların, katı atık depolama tesislerinden ve diğer atık yığınlarından kaynaklanacak kirliliğin yayılmasını engellemek için yalnız başlarına kullanılmaları önerilmemektedir.

Sıkıştırılmış kil tabakalar ince tabaka parçaları halinde inşa edilmektedirler. Yamaç şevleri, şeve paralel yada yatay tabakalardan oluşturulmaktadır.

Kompaksiyonla yapılan sıkıştırma zemin dokusundaki boşlukları gidererek homojen ve sürekli bir yapı oluşturulmasını amaçlamaktadır. Bu şekilde uygun zemin birimlerinin sıkıştırılmasıyla gerekli olan düşük permeabilite değeri elde edilebilmektedir. İstenilen permeabilitenin sağlanmasında, zeminin doğal su muhtevası, kompaksiyon yöntemi ve uygulanan enerji ana faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıkıştırılmış kil tabakalarda da bazı problemlerle karşılaşılabilir. Kuruma kilde kırıklar ve çatlaklar oluşturabilmektedir. Donma – çözülme döngüsü dokuyu ve yapıyı bozarak, permeabiliteyi artırabilmektedir. Kuruma etkisi tabakaya plastik örtüler serilerek engellenebilir ancak plastik örtünün aşırı ısınmamış olmasına dikkat edilmeli, yüzey gerekirse ıslatılarak belirli sıcaklıkta tutulmalıdır. Don durumunda da sıkıştırılmış kil tabaka doğal etkilere karşı korunmalıdır.

Yeni bir malzeme sayılabilecek geosentetik kil tabakalar özel yöntemlerle fabrikalarda üretilmektedir. Son yıllarda katı atık depolama tesislerinin geçirimsizlik amaçlı tabakaları ve örtü kısımlarında tecrit ve hidrolik engel olarak yaygın kullanılmaya başlanmışlardır. Geosentetik kil tabakanın yapısı iki geotekstil arasına veya tek geomembranın bir yüzüne sıkıştırılarak yapılandırılmış kilden oluşmaktadır. Bu kil özellikle bentonit olmaktadır. Uygulama da geosentetik kil tabaka panelleri, uçlarından birbirlerine bindirilerek alan kaplanmaktadır. Paneller birbirlerine doğal olarak yapışabilmektedir. Tabaka uygulandıktan sonra su, binme noktalarından sızmaya çalışırsa geosentetik kil tabakada bulunan doğal bileşen kil şişerek tabakaların birbiri üzerine bindiği ek yerlerini kapatarak geçişi engellemektedir. Hiçbir mekanik bağlantı yapılmasına gerek olmadığından dolayı geosentetik kil tabakaların çok pratik ve hızlı bir şekilde uygulanabildikleri belirtilmektedir. Geosentetik kil tabakalar yerleştirilirken sudan korunmaları zorunludur. Çünkü alanda katı atık biriktirilmeye başlandıktan sonra meydana gelebilecek sızmalara karşı şişerek geçirimsizliği sağlamayı amaçlayan sistem, yerleştirildikten sonra üzeri açıkken ıslandığında, istenmeyen biçimde şişerek kendiliğinden yapışmayı sağlayan mekanizmanın işlemini engelleyebilecektir. Yağmurlu havalarda yerleştirilmemeli ve malzemelerde açıkta bırakılmamalıdır. Geosentetik kil tabakalar, sıkıştırılarak hazırlanmış kil tabakaların alternatifi olarak ortaya

çıkılmışlardır. Geosentetik kil tabakaların, en önemli avantajları; hafif olmaları, basit ekipmanlar ve iş gücüyle kolay uygulanabilirlikleri, kuru uygulanmaları nedeniyle kurumunun neden olabileceği olumsuzluklardan uzak bulunmaları, konsolidasyon oturması yapmadıkları için bünyelerinden ortama su yaymamaları olarak sayılabilir. Bununla birlikte geosentetik kil tabakaların, bilinen en önemli dezavantajları ise yeni olan bu konudaki tecrübe birikiminin yetersizliği, ince olanların delinme sonucu kolay yaralanabilir olması, kompozit çalışma ortamlarında belirsiz davranışlar göstermeleri, kalın doğal tabakalara kıyasla çok daha az çöp suyu sızıntısını bünyelerine çekebilmeleri ve doymuş bentonitin stabilitesindeki belirsizlikler olarak sayılabilir. Sıkıştırılmış kil tabakalar ve geosentetik kil tabakaların kullanımının birbirlerine karşı çeşitli avantaj ve dezavantajları olduğu bilinmektedir.

Sihhi çöp deponi alanlarının yapımından beklenen, tasarımcı mühendis açısından yeterli ve sağlıklı bir atık depolamayı uygun maliyetle gerçekleştirmek iken, böyle bir sahaya yakın yaşayan kimse için tesisin çevresine hiçbir zarar vermemesi olabilmektedir. Böylece farklı bakış açılarından, değişen bir amaçlar yığını ile karşılaşılabilir. Geoteknik mühendisinden beklenen, problemlere pratik, etkin – maliyetli, güvenilir ve yeterli çözümler getirmesidir. Çöp deponi alanlarında geçirimsizlik amaçlı tabakalar ve örtü sistemlerinin imalinde kullanılacak olan malzeme ve tekniğin seçimi, mühendisler tarafından karşılaşılan problemler ve özgün şartların değerlendirilmesiyle yapılabilecektir.

## 1.2. Önceki Çalışmalar

Çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakaları ve bu tabakalarda kullanılacak alternatif malzemeler üzerine günümüze kadar bir çok çalışma yapılmıştır.

Edil ve Berthouex, (1990) atık depolanması için sihhi çöp deponi alanlarında oluşan sızıntı, kentsel ve endüstriyel atık sularında kullanılan birçok toprak bariyerin performans verilerini göstermişlerdir. Permeabilitenin belirlenmesinde kullanılan bilinen laboratuvar testlerinin zorluklarından bahsetmişlerdir. Yaptıkları uçucu kül – kum ve bentonit – kum karışımlarının

laboratuar permeabilite deneylerinde çöp deponi alanları için gerekli olan performansı elde etmişlerdir. Hazırlanan tabakanın laboratuar permeabilite değerlerini inceleyerek kritik faktörleri tartışmışlardır. Böylece günümüzdeki pratik uygulamalar ve tecrübelerine dayanarak düşük permeabiliteli bariyer elde etmek için çeşitli öneriler sunmuşlardır.

Czurda ve Wagner, (1991) kil kayalarındaki toksik atık depolanması sorunu açısından katyon iletim ve kil tabakası kapsüllenmesini incelemişlerdir. Bunun için farklı metaller için kil kayalarının su tutma kapasitesini, bir dizi enjeksiyon dozu ve kolon deneyleri ile analiz etmişlerdir. Süzülme (farklı hidrolik eğimler) deneyleri ile de farklı üçüncül ve dördüncül çağ kil ve siltlerden doğal kaya numunelerinin içine doğru olan metal klorit çözeltisi sızıntı davranışını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonunda katyon iletim işlemlerinin çözelti parametreleri ve özel kaya parametrelerinden (tanecik boyutu, mineralojik karışım, katyon değişim kapasitesi, ilk katyon bağlılığı) etkilendiğini tespit etmişlerdir. Adsorpsiyon izotermine bakarak iki farklı su tutma mekanizması önermişlerdir.

Smith ve Fey, (1996) çöp deponi alanlarının su geçirmezliği için kimyasal işleme konusunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, masraflı kil tabakaları ve geomembranlar yerine, kimyasal bir şekilde arazide düşük permeabilite gösteren çöp deponi alanlarında sızıntı etkisini azaltan uygun maliyetli bir metodu araştırmayı amaçlamışlardır. Zeminin kimyasal davranışının, humik bileşiklerinin taşınabilirliği ve çökmesinin olduğu kadar kil minerallerinin dağılma ve topaklaşmasına da bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Birbirine zıt bir çok zeminle yaptıkları ilk deneylerde, dağılma ve topaklaşmayı kimyasal uygulama ile başarmışlardır ve sırasıyla  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve alçıtaşını en etkili dağıtıcı ve topaklaştırıcı olarak seçmişlerdir. Bu çalışmayla araştırmacılar, kimyasal işleme yönteminin, çöp deponi alanlarında şu anda kullanılan metotların yerini alabilmek için uygun bir teknik olduğunu kanıtlamamışlardır. Ancak geleneksel metotların maliyet açısından kullanılamaz olduğu durumlarda bu yöntemin çok daha ucuz bir alternatif sağladığını belirtmektedirler.

Kayabalı, (1997) çalışmasında sıhhi çöp deponi alanlarında geçirimsiz tabaka olarak hizmet etmek üzere önerilen alışılmışın dışında bir maddenin belirli

özelliklerini araştırmayı amaçlamıştır. Balıkesir-Gördes'in doğal zeolitleri ve ticari öğütölmüş bentonitler kompaksiyon, permeabilite ve mukavemet gibi çok sayıda deneylerde kullanılmıştır. Farklı oranlardaki optimum su muhtevasında sıkıştırılmış bentonit ve zeolitler mukavemet parametrelerini belirlemek amacıyla test edilmiştir. Optimum ve az üzerindeki su muhtevalarında sıkıştırılmış laboratuvar örneklere permeabilite için test edilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında bentonit oranının %5'den büyük olduğu durumlarda elde edilen ortalama permeabilite değerleri  $2 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-8}$  cm/s aralığındadır. Araştırmacı kation değişim kapasitesinin çöp deponi tabakaları için önemli bir kimyasal özellik olduğunu belirtmiş ve sırasıyla bentonit ve zeolit için 60 ve 95 meq/100g olarak tespit etmiştir. Araştırmacı karışımların düşük permeabilitesi ve yüksek kation değişim kapasitesine bakarak 0,05 - 0,10 B/Z aralığındaki karışımları ideal karışım olarak belirlemiştir.

Al-Tabbaa ve Aravinthan, (1998) doğal bir aşırı konsolide fisürlü kil olan, Keuper Marl'a, ağırlıkça %6 - %15 arasında oranlarda, köşeli ve 1-4 ve 4-8 mm ebatlarında ince şeritler halindeki lastik parçacıkları karıştırarak karışımlar hazırlamışlardır. Bir çöp deponi alanının tasarımında temel olan kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti, gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, su ve parafinle permeabilite, sızıntı özelliği, serbest şişme davranışı ve şişme basıncı özelliklerini belirlemişlerdir. Sonuçlar sıkıştırılmış kuru yoğunluğun yalnızca lastik miktarı azaldıkça düştüğünü ve karışımın serbest basınç mukavemetinin, tek başına kilin serbest basınç mukavemetinden %40 daha düşük olduğunu göstermiştir. Kil-lastik karışımının, gerilme - birim şekil değiştirme davranışına bakıldığında birim şekil değiştirme aralığının tek başına kilden elde edilene göre kabaca iki kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Parafinle yapılan permeabilite deneyinde suya kıyasla 50 kattan daha düşük permeabilite değerleri elde etmişler ve sızıntı deneyi sonuçlarıyla, bakır ve nikelin NRA ve TCLP sızıntı deneylerindeki farklı sızma seviyeleri için uygun standartlarla ilgi kurarak değerlendirme yapılmasına ihtiyaç olduğunu göstermişlerdir. Kil-lastik karışımında parafinin, yalnız kile göre dikkate değer bir şişmeye sebep olduğunu ve şişme basınçlarını 600 kPa değerinin üzerine geliştirdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, tasarım için özgün çöp deponi alanı tabakası tasarım

gereksinimleri ile farklı test sonuçlarının kombinasyonları arasında bir ilişki kurularak değerlendirme yapılmasına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Sheu ve ark., (1998) Tayvan'ın güneydoğusundan elde edilen çamurtaşı maddesinin fiziksel özelliklerini ve permeabilite davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan deneylerin sonuçlarıyla kıvam limitleri ve dane boyutu dağılımı analizlerinin  $LL = 34,1$ ,  $PI = 15,2$  ve 200 nolu elek altı malzemenin %95,1'den büyük olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca malzemenin  $2\mu$ 'dan küçük madde miktarının %30'dan çok olduğunu ve aktivitenin 0,5 olduğunu belirtmektedirler. Bu karakteristiklerle çöp deponi alanı tabakalarının zemin özellikleri için istenen koşulların tam olarak sağlandığını belirtmişlerdir.

Roehl ve Czurda, (1998) kirliliğe karşı, çöp deponi alanlarının uzun dönem sorpsiyon davranışının değerlendirmesi için gecikim faktörleri ve dağılım katsayıları ile edinilen bilginin yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada difüzyon yoluyla bir illitik/smektitik lös kum içine geçen Pb ve Cd'nin katı tür gelişimi ve gecikimini analiz etmeyi amaçlamışlardır. 0,001 M Cd ya da Pb klorit içeren ağır metal çözeltilere sahip sıkıştırılmış lös kili üzerindeki difüzyon deneylerinden Cd için,  $4,9-6,7 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  ve Pb için,  $3,6-7,4 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  değer aralığındaki difüzyon katsayılarını elde etmişlerdir. Sonuç olarak ağır metallerin bir çöp deponi alanı kil tabakası malzemesinin bileşenlerine hangi yollar ile bağlanacağı konusunda önemli göstergeler verebileceğini tespit etmişlerdir.

Miller ve Lee, (1999) uzatılmış donma sürelerine konu olan çöp deponi alanlarının kil örtü tabakaları performansının bir fiziksel model çalışmasını yapmışlardır. Modelde, bir yüksek sınır şartı olarak verilen alt donma sıcaklıklarına bağlı sonuçların donma penetrasyonunun belirlenmesi ilke edinilerek, bir prototip örtü tabakası için önerilmiş üç tasarımı değerlendirmişlerdir. Üç tabaka tasarımını, son performanslar, donma penetrasyonu, tabaka içine sızıntı ve kabarma temelinde karşılaştırmışlardır. Bir termodinamik problemin basitleştirilmiş analitik çözümünü kullanılarak yapılan tahminler ile, donma penetrasyonunun baştan aşağıya incelenmesi ile çıkan değerleri karşılaştırmışlardır ( ölçülmüş arazi davranışına ek olarak). Laboratuar deneyinde 2,1m derinliğinde ve  $1,8 \text{ m}^2$ 'lik tank kullanmışlar ve tankı, çöp deponi

alanları katmanlarının gerektirdiği özelliklere bağlı olarak kille yüklemişlerdir. Deneysel tankta üç farklı çöp deponi alanı örtü katman tasarımını modellemişler ve bir çok gözlem sonunda, ölçüm yaparak üç farklı tasarım performansını karşılaştırmışlardır. Her bir tasarımın don kabarmasını ölçmüş ve 3,8 ile 4,3 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Zemin drenaj katmanını içeren tasarımlarıyla daha iyi bir sızıntı performansı elde ettikleri halde, sonuçların, donma penetrasyonu derinliğinin tüm tasarımlar için benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Palmer ve ark., (2000) atık depolama için F ve C sınıfı uçucu-külleri ile yapılan, tabakalar üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada artık organik karbon içeren F sınıfı uçucu-külün permeabilitesini laboratuvar ve arazi deneylerini kullanarak belirlemişlerdir. Çeşitli malzemeler (kum, C sınıfı uçucu külü ve taban külü) ile karıştırılmış F sınıfı uçucu-külün sıkıştırılmış numunelerini laboratuvar da çeşitli su muhtevaları ve farklı kompaksiyon enerjilerinde hazırlamışlardır. Çalışma sonuçlarıyla, büyük agrega ile birlikte F ve C sınıfı uçucu-kül karışımlarının, kompaksiyonun optimum su muhtevasının ıslak tarafında sağlandığı çöp deponi alanı tabakaları için gerekli permeabiliteelerde sıkıştırılabileceğini göstermişlerdir. Arazi permeabilitesinin yükselmesine yol açan, tabakalar arası geçirgen bölgeler ve çatlaklarla sonuçlanan faktörlere özel olarak dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Yesiller ve ark., (2000) üç sıkıştırılmış çöp deponi alanı tabakasının kuruma ve çatlama davranışlarını incelemişlerdir. Deneyleri güneydoğu Michigan'ın bölgesel çöp deponi alanlarından elde edilen üç sıkıştırılmış tabakaya ait zeminlerin kuruma çatlaklarını araştırmak üzere yürütmüşlerdir. Zeminlerin düşük plastisite ile birlikte değişen oranlarda ince malzeme içeriğine sahip olduğunu belirtmektedirler. Büyük ölçekli zemin numunelerini, ıslanma ve kuruma çevrimlerine tabi tutmuşlardır. Çatlakların yüzey alanının, zeminin toplam yüzey alanına oranıyla, çatlak yoğunluk faktörü (CIF) kullanılarak çatlakların yüzeyel boyutlarını incelemişlerdir. Bütün zeminleri bir kompaksiyon-kuru çevrim (zeminlerin kompaksiyon sonrası kurumasına izin verilerek) ve sonrasında ıslak-kuru çevrime tabi tutmuşlardır. Zeminlerin birinin ilave bir numunesi de kompaksiyon-kuru çevrim ve üç ıslak-kuru çevrime tabi tutmuşlardır.

Deneylemlerden elde edilen maksimum CIF değerinin %7 olduğunu ve emme kuvvetlerinin de 6000 kPa değerini aştığı tespit etmişlerdir. Zeminlerin ince malzeme içeriğinin de çatlamayı etkilediğini belirtmektedirler. Genelde yüksek emme kuvvetleri, emme kuvvetlerindeki hızlı artış ve yüksek miktarda çatlamaların, zeminlerin yüksek ince malzeme içeriğiyle elde edildiğini belirtmektedirler. Zeminin ince malzeme içeriği düşük olduğunda çatlamaların da daha düşük olduğunu, ilaveten zeminlere katılan suyun da çatlamalarda önemli derecede artışa sebep olduğunu belirtmektedirler. Islak-kuru çevrimler için elde ettikleri CIF değeri, kompaksiyon-kuru çevrimler için elde ettikleri CIF değerinden oldukça büyüktür. Zeminlere su ilave edildikten sonra kuruma çevrimleri sırasında kritik emme kuvvetleri CIF'te önemli bir değişime sebep olmaktadır. Bu, emme kuvvetleri tüm zeminler için < 1000 kPa'dır. Deneylemlerde uygulanan çoklu ıslak-kuru çevrimlerin ikinci çevrimden sonra çatlama miktarının değişiminde etkisiz kaldığını tespit etmişlerdir.

Muñoz-Meléndez ve ark., (2000) bir çöp deponi alanından katı fazdaki Cu, Cr ve Zn' nin parçalanması üzerine zemin pH'inin etkisini incelemişlerdir. Weathered Oxford Kili için zemin pH'inin değişkenliğini doldurulmuş alanda yeralan yeni bir hücrenin tabanından toplanan 35 örneği kullanarak tanımlamışlardır. Zemin pH değişkenliğinin alandaki Cr, Cu, Zn reaktivitesine etkidiğini belirtmişlerdir. Sonuçlarla katman tabanındaki pirit (sülfürlü demir) zenginliğine bağlı olarak zemin pH'ını 2,7 gibi düşük değerde üretebilecek doğal bir asitlenmenin oluşabileceğini göstermişlerdir.

Prashanth ve ark., (2001) puzolanik uçucu külün çöp deponi alanlarında bir hidrölik bariyer olarak potansiyelini incelemişlerdir. Rapor edilmiş üç farklı tip uçucu külün davranışının, üç farklı kaynaktan gelen fiziksel özelliklerin ve kimyasal bileşiminin bir oranı olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu küllerin bariyerler olarak kullanımını değerlendirmek için gerekli rötre, kompaksiyon, permeabilite, konsolidasyon ve mukavemet gibi geoteknik özellikleri raporlamışlar ve sonuçta uçucu küllerin düşük rötreye sahip olduğunu ve bu yüzden çatlamasının olmadığını göstermişlerdir. Sıkıştırılmış uçucu küllerin çok küçük hacim değişikliklerine uğradığını, ayrıca zamanla puzolanik uçucu küllerin mukavemet özelliklerini iyi yönde geliştirdiklerini belirtmektedirler. Araştırmacılar tarafından alkalın

karakterli sızıntıları içeren tabakaların yapımı için puzolanik uçucu küller uygun görülmüştür.

Tay ve ark., (2001) bentonit-kum (BES) çöp deponi tabakalarında büzülme ve kuruma çatlaklarını incelemişlerdir. Havada kurutmaya BES'de görülen kuruma ve büzülme hakkında verileri raporlamışlardır. Kuru birim hacim ağırlığı yönünden %10 ve %20 bentonit içeren karışımların, %8'den %32'ye değişen aralıkta su muhtevalarında sıkıştırılmasını araştırmışlardır. Kompaksiyon sonrasında test edilmiş doymuş BES numuneleri için permeabilite verilerini ve hava kuruması sonrası belirgin değişim olmayan benzer numuneleri sunmuşlardır. Sıkıştırma sırasında artan su muhtevası sonucunda artan büzülme miktarlarıyla tüm karışımların hava kuruması karşısında hacimsel büzülme gösterdiğini ve %20 bentonit içeren her su muhtevası karışımlarında %10 bentonit içerenlere göre büzülmenin daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Test edilen karışımların aralığı için, çatlamanın sadece, BES'in %4 civarında hacimsel büzülme uğradığı zaman olduğunu göstermişlerdir. Test öncesi kuruyan bölümlerin zarar görmemiş BES numunelerinin doymuş permeabilitesi üzerinde etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

Łuczak-Wilamowska, (2002) çöp deponi alanları için geçirimsizlik sağlayan mineral bariyer olarak kullanılan polonya neojen killeri üzerinde bir deneysel çalışma yapmıştır. Polonya neojen killerin mineralojik ve kimyasal bileşimleri ve de fiziksel özelliklerinin atık bertaraf alanlarında mineral katmanları için kullanılabileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte bu killerin mukavemet parametrelerinin düşük olmasının, doğal haldeki malzemeler olarak bu killeri uygulanamaz kıldığını göstermiştir. Ancak daha yüksek değerdeki mekanik parametrelere sahip diğer bir zemin ile karıştırılarak kullanımlarının uygun olabileceğini belirtmiştir. Farklı ağırlık oranlarında kumul-kum ve Budy Mszczonowskie kilinden yapılan zemin karışımlarının doğal haldeki kille karıştırıldığında, daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiğini ve sadece izolasyon parametreleri değerlerinde hafif bir düşme olduğunu belirtmiştir.

Kugler, (2002) kentsel çöp deponi alanlarının kil esaslı sızdırmazlık tabakalarında organik kirleticilerin tutulmasını incelemiştir. Bohemian Massif'in Avusturya bölümünde yer alan Horn yakınlarındaki kentsel atık depolama

alanının 10 yıllık zemin sızdırmazlık amaçlı tabakasını, mineralojik ve geokimyasal metotlarla incelemiştir. Bu çalışmayla, seçilmiş inorganik kirleticilere bakarak özellikle ağır metallerle karşı, zeminin sızdırmazlık tabakasının tutma kapasitesini ölçmeyi amaçlamıştır. Burada permeabilite çok düşüktür ( $k_f \approx 1 \times 10^{-11}$  m/s). Geokimyasal analizler Pb, Cu ve Zn gibi ağır metallerin, sızdırmazlığın en çok üst bölümlerinde yoğunlaştığını göstermiştir. Sadece birkaç cm aşağıda, bu elementlerin konsantrasyonlarının, geokimyasal artalan seviyesinde olduğunu belirtmiştir. Cu, Pb, Zn ve Cd davranışlarının ayrıntılı araştırmalarını sorpsiyon deneyleri (difüzyon ve yığın deneyleri) ve bir dizi ayırma metotları kullanarak belirlemiş ve difüzyon deneylerinden, sızdırmazlık tabakasının gerçek kalınlığı için bazı ağır metal iyonlarının etki zamanlarını tespit etmiştir.

Tuncan ve ark., (2003) bir çöp deponi alanı tabakası olarak doğal zeolitlerin kullanılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın amacı yeni bir malzemenin belirli özelliklerini araştırarak çöp deponi alanlarında geçirimsiz tabaka olarak hizmet etmek üzere önermektir. Farklı oranlardaki bentonit ve zeolitleri (B/Z) optimum su muhtevalarında sıkıştırarak mukavemet parametreleri, permeabilite, pH, ağır metaller ve diğer özelliklerine bakmışlardır. Düşük permeabilite ve yüksek katyon değişim kapasitesi göz önünde bulundurularak B/Z karışımının 0,10 oranının ideal çöp deponi alanı tabaka malzemesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir.

Kaya ve Durukan, (2003) bentonitli zeolitten kil tabakası olarak faydalanma konusunda çalışmışlardır. Na-bentonit, Ca-bentonit ve doğal zeolitin adsorpsiyon özellikleri, Na-bentonit ve doğal zeolitin katyon değişim kapasitesi, hacimsel büzülme, kompaksiyon karakteristikleri ve karışımların permeabilitelerini araştırmışlardır. Yaptıkları Adsorpsiyon izotermi ve katyon değişim kapasitesi (KDK) çalışmalarıyla doğal zeolitin kurşun (Pb) adsorpsiyon kapasitesinin neredeyse Na-bentonitinkinin üçte biri olduğunu göstermişlerdir. Kumun sahip olduğu sıfır adsorpsiyon kapasitesi dikkate alındığında, zeolitin sahip olduğu yüksek katyon değişim kapasitesiyle bentonit ve zeolitin birlikte, çöplerin depolandığı koşullarda önemli ve dikkate değer kazanımlar sağlayacağını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, hacimsel büzülme ve kompaksiyon sonuçlarıyla

da BEZ'in optimum su muhtevasının malzemelerin üst limiti olan %4 büzülme yaratan su muhtevasından çok daha az olduğunu göstermişlerdir. %10 ve %20 bentonit içeren BEZ'lerin permeabilite deneyi sonuçlarının, karışımların permeabilite gerekliliği olan  $1 \times 10^{-9}$  m/s'den düşük seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca deney sonuçlarına dayanılarak farklı gerilme durumları altında karışımların permeabilitelerindeki değişikliklerin pratik amaçlar için ihmal edilebilir düzeyde kaldığını da göstermişlerdir.

Ebina ve ark., (2004) sıkıştırılmış kil-kum numuneleri permeabilitesinin kil özellikleri ile yakın ilişkisini incelemişlerdir. 16 kil numunesinden biri ve silisli doğal, kum zeminleri içeren sıkıştırılmış numunelerin permeabilitesini, esnek-duvarlı permeametre kullanarak ölçmüşlerdir. Kil örneği olarak, biri saflaştırılmış montmorillonit, 5'i standart kil örneği, biri sentetik hektorit ve ikisi katyon değişimli bentonit olmak üzere 8 adet doğal bentoniti araştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında Ca/Na kil oranındaki artış ile daha yüksek değerlerde bir permeabilite gözlemlenmiştir. Mineral muhtevası ve killerin bentonit muhtevası ile permeabilitenin ayrıca etkilendiğini belirlemişlerdir. Metilen mavi adsorpsiyonu, kimyasal konsantrasyon gibi killerin karakteristik indeks özellikleri ile permeabilite arasında bir ilişki kurmuşlardır. Daha sonra ölçülen permeabilite verilerini yeniden hesaplamak için polinomik bir ifade elde etmişler ve bu ilişkiyi daha sonra, sıkıştırılmış bentonitlerin permeabilitesini, bentonitlerin karakteristik özelliklerinden tahmin etmek üzere kullanmışlardır.

Kalkan ve Akbulut, (2004) bir hidrolik bariyer olarak sıkıştırılmış kil tabakalarının permeabilite, şişme basıncı ve basınç dayanımında uçucu külün etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Deney sonuçları sıkıştırılmış kil numunelerle birlikte uçucu kül kullanımının, ham kil numunelerin kullanımına göre kıyasla düşük permeabilite, şişme basıncı ve kayda değer yüksek basınç mukavemetiyle her yönüyle bir bütünlük sergilediğini göstermiştir. Böylece uçucu kül kullanımının katı atık kirlilik sistemlerinde sızıntıya maruz kalan yapım malzemeleri için umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

### 1.3. Çalışmanın Amacı

Geosentetik ve geomembranların kullanımının stabilite ve sızıntı açısından uzun süreli olarak kontrolünde kil tabakalardan daha başarılı olacağını gösteren kesin veriler bulunmamaktadır. Sıkıştırılmış kil tabakalar etkin maliyetleri, yüksek kirlilik tutma kapasiteleri, hasara, delinmeye karşı dirençlerinden dolayı geniş kullanıma sahiptirler. Düşük permeabiliteleri ve sorpsiyon kapasiteleriyle kirlilik geçiş oranını düşürürler. Düşük permeabilite ve yüksek katyon değiştirme kapasitesine sahip olmalarından dolayı kil tabakaların yapımında en yaygın kullanılan mineral bentonittir. Bununla beraber bentonit kurduğunda, sahip olduğu yüksek şişme potansiyelinden dolayı bünyesinde, çatlaklar oluşur ve buda permeabiliteyi artırır (Prashanth ve ark.,2001). Buna karşın sepiyolit dokusal özellikleri, kristal yapılarındaki süreksizliklere bağlı kanallar tarafından sağlanan yüksek özgül yüzey alanları, ortalama katyon değişim kapasiteleri, adsorpsiyon özellikleri, poroziteleri ve elektrolit ortamlardaki topaklanma direnci gibi uygun fiziko-kimyasal özelliklerinden dolayı çöp deponi tabakalarında kullanılabilirliği araştırılabilecek bir malzemedir.

Literatürde, çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakaları için arazide arzu edilen kompaksiyon enerjisini elde edebilmek için, laboratuarda pek çok kompaksiyon enerjisini uygulayarak, arazi ve laboratuvar şartları arasında doğru bir yaklaşımın yakalanabileceği belirtilmektedir. Çözüm bu yolla gerçekleştirilirse, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık kriteri, her ara derecedeki kompaksiyon enerjisi için uygulanacaktır.

Daniel ve Benson, (1990)'dan sonra sıkıştırılmış numunelerin permeabilitelerinin  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s veya daha düşük değerde olduğundaki su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralıklarını sağlamak için bir prosedür tanımlanmıştır. Bu prosedürde modifiye, standart ve indirgenmiş proktor kompaksiyon deneylerini yaparak her enerji için yaklaşık 5-6 farklı numune sıkıştırılarak kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkilerinin belirlenmesi sonrasında sıkıştırılmış numunelerin permeabilitelerinin belirlenerek permeabilite-kalıp su muhtevası ilişkilerinin kurulması ve permeabilitesi  $\leq 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s olan

numunelerin belirlenerek bir kabul edilebilir bölgenin oluşturulması istenmektedir.

Daniel ve Wu, (1993) tarafından bir çöp deponi alanı projesi için maksimum taşıma kapasitesini destekleyen bir kil tabakası için istenen mukavemet 200 kPa olarak hesaplanmıştır. Sıkıştırılmış zemin numunelerinin sahip olması istenen kayma mukavemetinin, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralığını sağlama amacıyla bir prosedür izlenmektedir. Daniel ve Benson, (1990)'da olduğu gibi kompaksiyon deneyleri yapılmış ve serbest basınç mukavemeti  $\geq 200$  kPa olan numuneler belirlenerek bir kabul edilebilir bölgenin oluşturulması önerilmiştir.

Ayrıca Daniel ve Wu, (1993) batı Teksas'da killi zemini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, bu zemin için kurumayı önleme amacıyla hacimsel şekil değiştirmenin kabul edilebilir limit değerinin, %4'e eşit yada daha düşük olması gerektiğini bulmuşlardır. Sıkıştırılmış zemin numunelerinin hacimsel şekil değiştirmesinin sınır değerine ulaştığı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralığını, elde etmek bir prosedür önermişlerdir. Bu prosedürde de permeabilite ve serbest basınç mukavemeti için önerilen adımlar gerçekleştirilip sonrasında hacimsel şekil değiştirme-kalıp su muhtevası ilişkileri kurularak hacimsel şekil değiştirmesi  $\leq 4$  olan numuneler belirlenip bir kabul edilebilir bölgenin oluşturulmasını önermişlerdir.

Bu çalışmada literatürde verilen tasarım kriterleri, önceki çalışmalar ve sepiyolit çöp deponi tabakaları açısından sahip olduğu uygun özellikler dikkate alınarak sepiyolit malzemesinin çöp deponi tabakalarında kullanılabilirliği belirlenmeye çalışılmıştır. Sepiyolit malzemesiyle birlikte kaolinit kili kullanılmıştır. Böylece çöp deponi tabakalarında kullanılacak olan sepiyolit malzemesinin, çöp depolama alanının inşa edileceği çevre de bulunan yerel bir kille birlikte karıştırılarak kullanımına ilişkin bir fikir edinilmesi planlanmıştır. Bunun için sepiyolit, 0,75 sepiyolit + 0,25 kaolin, 0,50 sepiyolit + 0,50 kaolin karışımları hazırlanmış ve daha sonra bu karışımlar üzerinde özgül ağırlık deneyi, kıvam limitleri, rötre (büzülme) limiti, hacimsel rötre (büzülme) şekil değiştirmesi, granülometri analizi gibi indeks deneyleri yapılmıştır. Ayrıca mekanik deneyleri uygulayabilmek için, indirgenmiş, standart ve modifiye enerji

uygulanmış kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Değişik enerjilerde sıkıştırılmış numuneler üzerinde permeabilite ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Standart enerji ile sıkıştırılmış numunelerle bir boyutlu konsolidasyon, serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kirletici olarak çöp deponi alanlarında yüksek miktarda bulunan ağır metal ve tuz çözeltileri kullanılarak normal ve 1, 3, 5 çevrim donma-çözülme uygulanmış numunelerle sızıntı deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda 1, 3, 5 çevrim donma-çözülme uygulanmış numunelerle kirletici kullanılmadan da sızıntı deneyleri yapılmıştır. Sızıntı deneyleri sonrası kirli ve kirli olmayan sepiyolit ve sepiyolit + kaolin karışımlarından konsolidasyon, serbest şişme ve serbest basınç numuneleri alınarak deneyleri yapılmıştır. Kirleticilerin karışımlar üzerindeki flokülasyon etkilerini görmek amacıyla sedimentasyon deneyleri yapılmıştır. Karışımlar ve bentonite ait bakır adsorpsiyon izotermeleri belirlenmiştir. Karışımların pH ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri belirlenmiştir. Ayrıca sızıntı deneyleri sonrası numunelerinde ve toplanan sızıntı sularında pH, elektriksel iletkenlik ve ağır metal ölçümleri yapılmıştır.

## 2. ÇÖP DEPONİ TABAKALARI

### 2.1. Genel Olarak Çöp Deponi Alanı Tabakaları

#### 2.1.1. Çöp deponi alanlarının gerekliliğinin sebepleri

ABD her yıl 180 milyon metrik tonun üzerinde katı atık üretmektedir. ABD'deki 1996 yılından itibaren kentlere ait katı atık üretimleri Çizelge 2.1'de listelenmiştir. Bu atıkları işlemek yada bertaraf etmek için üç temel seçenek vardır.

1. Gömmek
2. Yakmak
3. Yeniden kullanmak

Muhtemel seçeneklerin en iyisinde bile atık miktarını azaltmak için, yeniden kullanım ve çevrim içine sokma üzerine odaklanmış tasarım ve uygulama programları uygulanmalı yada atıklar çöp deponi alanlarında depolanarak bertaraf edilmelidir. Bu şekilde atık miktarı mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Bu doğrultuda son 10 yıl zarfındaki etkin çabalara rağmen ABD'de katı atığın %75'ine yakını hala çöp deponi alanlarında bertaraf edilmektedir. Her halükarda katı atık çöp deponi alanlarının gerekliliği bir sıra sebepten dolayı devam edecektir. Yakma işlemi geniş çeşitlilikte atıklar bıraktığından bertaraf için uygulanabilir bir metot değildir (Maden ve öğütülmüş atıklar ve diğer inorganik maddeler). Aynı zamanda yakma hava kirliliği problemlerine yol açabilmekte ve depolanması gereken kül kalıntıları bırakmaktadır. Yeniden çevrim çabaları ise ilerde başarılması zor olan, karada bertaraf için programlama, çöp atık zincirinde daha ileri derecede azaltmalar yapan pratik sınırlarla karşı karşıya kalmaktadır. ABD'deki 150.000 nüfuslu Ann Arbor Michigan, toplum katılımı ve aktif desteği ile etkin ve iyi yönetilen bir yeniden çevrim programını işleten, tipik orta büyüklükteki bir şehir ve bu iş için iyi bir tecrübedir. Şehir kalıcı fonlara yeniden çevrim, toplama ve işleme olanakları için hem özel hem de kamu kuruluşlarına hizmet etmek amacıyla para aktarmaktadır. Ann Arbor ayrıca ülkedeki en başarılı düzenleme çalışmalarından birini gerçekleştirmektedir. Bu çalışma halka açık

alanların atıklarını ve şehir caddelerindeki ağaç yapraklarını kapsamaktadır. Yeniden çevrim ve düzenlemeye olan bu düzeydeki ilgiye rağmen şehir atıklarının %20'si yeniden çevrimle, %25'i kompostlama ile ve %55 civarındaki oranı da hala çöp deponi alanları kullanılarak bertaraf edilmektedir. Son olarak biyoreaktör ve zemin içindeki şevli çöp deponi alanları gibi teknolojik gelişmelere bakıldığında gelecekte bugün kullanımda olan çöp deponi alanlarının değişime uğraması muhtemeldir (Qian ve ark., 2001).

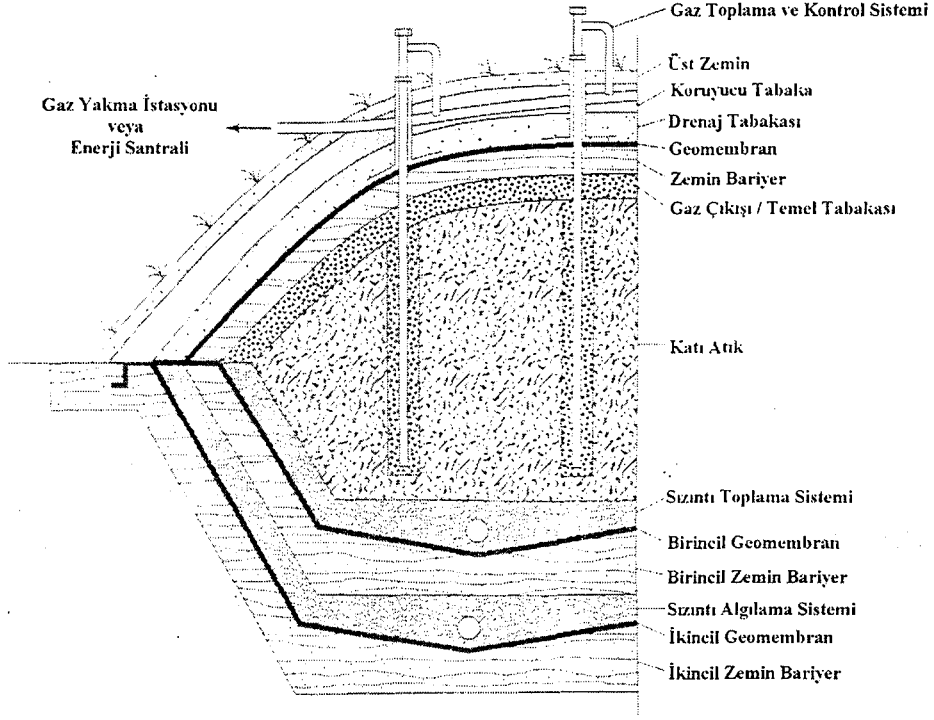
**Çizelge 2.1** ABD'deki kentsel katı atık üretimi (USEPA, 1999)

Yıllar	Kentsel Katı Atık Üretimi
1960	79,92
1970	109,8
1980	137,54
1990	186,13
1994	194,26
1995	191,7
1996	189,74
1997	196,79
2000	202,470*
2005	217,260*
*Öngörülen	

### 2.1.2. Temel çöp deponi alanları gereklilikleri

İnşa edilmiş bir çöp deponi alanı, atık bertaraf etmenin kontrollü bir metodudur. Çöp deponi alanının yeri jeolojik, hidrolojik ve çevresel olarak, uygun olmalıdır. Bir çöp deponi alanı gelişigüzel bir çöp yığını değildir. Açık bir yığında karşılaşılan duman, böcek, martı ve diğer kuş problemleri iyi tasarlanmış ve işletilmiş sıhhi çöp deponi alanlarında yer almaz. Bu konuda profesyonel planlama ve yapım denetimleri gerekmektedir. Bir çöp deponi alanı, dikkatlice tasarlanmış ve yapılmış bir zarfa sahiptir. Bu zarf atığı kapsüller ve sızıntının çevreye kaçışını engeller. Zarf, temel olarak bir üst ve alt astardan oluşur. Bu iki bileşenin her biri sırayla bariyer ve drenaj katmanlarından oluşur. Bu yapı Şekil 2.1'de görülmektedir. Bir çöp deponi alanının en önemli gerekliliği çevresini kirletmemesi ve doğaya zarar vermemesidir. Bu gereklilik hem dikkatli yerleşim hem de düzgün tasarım ve yapım ile yerine getirilir. Yerleşim izni, hidrojeolojik

araştırma ve federal düzenleyici otoriteler tarafından, başvuranların, sahip ve işleticilerin gerekli raporları tamamlaması ile verilir. Kompleks ve bazen pahalı olmasına rağmen uygun yerleşim, halk sağlığı için gelecekteki tehditleri en aza indirir. İyi yerleşim ayrıca ekonomik olarak iyi sonuçlar verir. Tasarım ve yapım maliyetlerini, işletme, bakım ve potansiyel sızıntı işletim yenilemelerindeki uzun dönem harcamalarını azaltır (Qian ve ark., 2001).



Şekil 2.1. Bir kentsel çöp deponi alanı toplama sisteminin şematik görünümü (Qian ve ark., 2001)

Tasarım, yapım ve işletme, çöp deponi alanlarının işletmecileri ve sahiplerinin gerekli bir rapor ve mühendislik araştırmasında adreslenmiştir. Çevresel geoteknoloji, kusursuz tasarım prensipleri ve yapım prosedürleri, kısa ve uzun dönem kararlılığı ve çöp deponi alanlarının bileşenlerinin performansını sağlamak için kullanılır. Tabakalama sisteminin mukavemeti, stabilitesi ve dayanıklılığı en önemli unsurlardır. İnşanın uygun kalite kontrolü ve tasarım gereksinimlerine göre seçilen malzemeler eşit oranda önem taşımaktadır.

Yer araştırması sırasında toplanan güvenilir bilgiye dayalı çöp deponi alanı ve kanıtlanmış bilimsel metod kullanımı oluşabilecek çevre riskini belirgin bir şekilde azaltır. ABD Çevre Koruma Kurumu (EPA) ve ABD'deki çeşitli eyaletler 30 yıldır çöp deponi alanı yerleşimi, tasarımı, imarı, işletmesi, yeraltı suyu, gaz izleme, bakım ve yakından görüntüleme işlemlerini yönetmek için ayrıntılı düzenlemeler yapmaktadır. Bu durum dünya çapında ilgi ve dikkat çekmektedir. 28 ülkede performans yada talimatname özellikleri ile ilgili çeşitli düzenlemeler mevcuttur (Koerner and Koerner, 1999).

### 2.1.3. Çöp deponi alanları bileşenleri ve konfigürasyonu

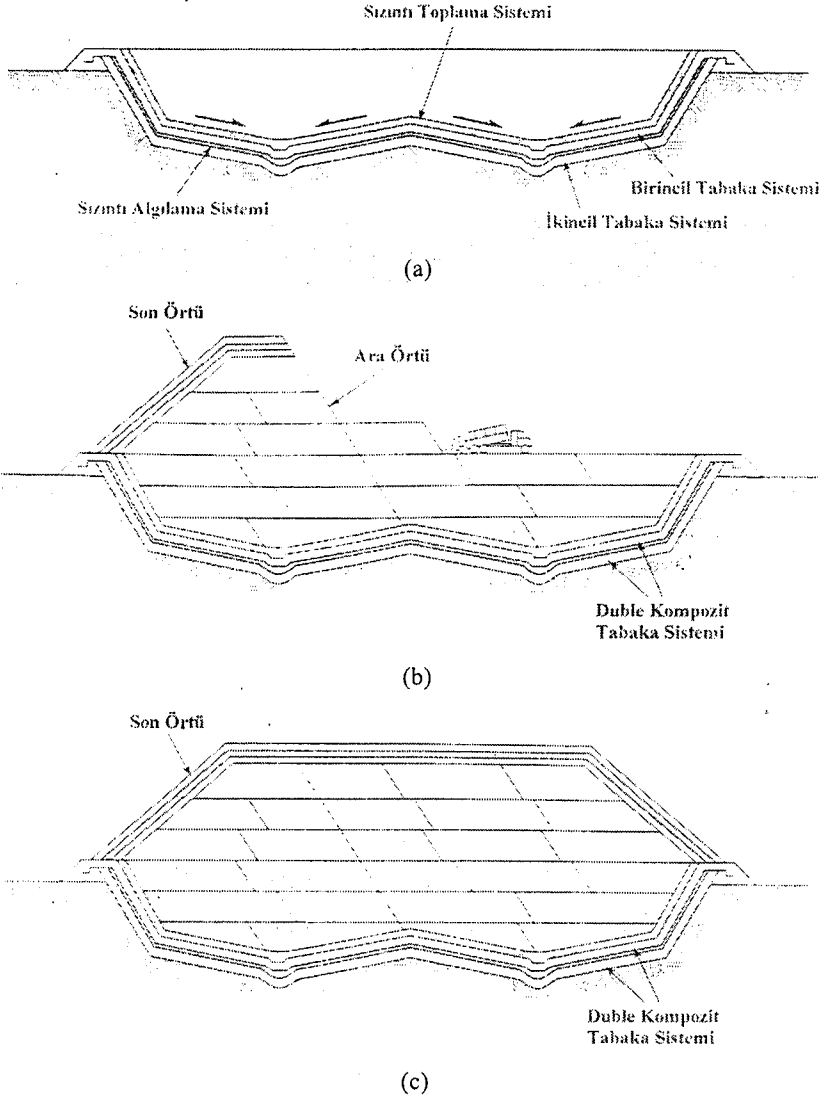
Çoğu kentsel katı atık çöp deponi alanları aşağıdaki elemanlardan ve sistemlerden oluşmuştur.

1. Taban ve yan duvar tabakaları sistemleri
2. Sızıntı toplama ve bertaraf edilmesi sistemi
3. Gaz toplama ve kontrol sistemi
4. Örtü kaplama sistemi
5. Sel suları yönetimi sistemi
6. Yeraltı suyu görüntüleme sistemi
7. Gaz görüntüleme sistemi

Bir çöp deponi alanının yapımı ve tasarımı aşağıdaki önemli faaliyetlerin yapılmasını gerektirir.

1. Çöp deponi alanının yerleşim planı
2. Alt temel derecelemesi
3. Hücre planı ve dolumu
4. Geçici örtü seçimi
5. Nihai örtü derecelemesi
6. Nihai örtü seçimi

Katı atık Çöp deponi alanının gelişiminin şematik diyagramı ve tamamlanışı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



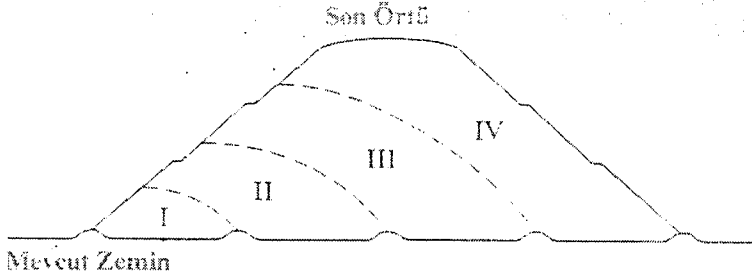
Şekil 2.2. (a)Çöp deponi alanı ünite temeli ve sızıntı toplama sistemi (b) katı atığın çöp deponi alanına yerleştirilmesi (c) son örtü tabakası ile kapatılmış çöp deponi alanı (Qian ve ark., 2001)

Çeşitli çöp deponi elemanlarının ve dizi arasındaki bağımlılığın çöp deponi dizaynında önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir. Bu elemanlar geometrik konfigürasyonlar ve uzamsal diziler çeşitliliğinde birleştirilebilir. En önemli yaygın çöp deponi alanları tipleri ve geometrik konfigürasyonları aşağıda belirtilen hususları içerir.

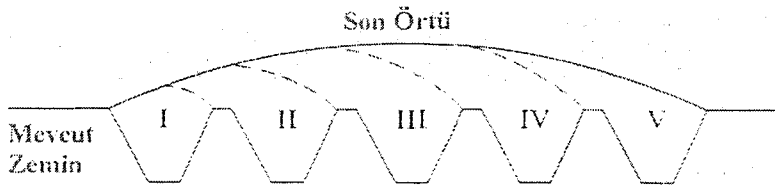
- **Alan Dolgusu:** Hiç kazı yapılmadan veya minimum kazı yapılarak çöp deponi alanı ilerleme kaydeder. Normal olarak çöp deponi alanının bu tipi

yüksek yer altı suyuna sahip yada bölgenin kazı için elverişsiz olduğu alanlarda kullanılır. Şekil 2.3a'da bu tip bir çöp deponi alanının tamamlanmış hali görülmektedir.

- **Hendek dolgusu:** Genellikle az miktarlardaki atıklar için kullanılır. Bazı yerlerde bu metot hala zararlı atıklar için kullanılmaktadır. Şekil 2.3b'de derin ve dar hendekleri olan bu tip bir çöp deponi alanının dolumu tamamlanmış hali görülmektedir.
- **Yukarı ve aşağı yer dolgusu:** Çöp deponi alanının bu tipi daha önce değinilen alan dolgusu ve hendek dolgusunun bir kombinasyonuna benzemektedir. Bununla birlikte kazı alanı, hendek dolgusu çöp deponi alanından çok daha geniştir. Kazı derinliği doğal kil tabakası ve yer altı suyu düzeyi derinliklerine göre değişir. Şekil 2.4a'da bu tip bir çöp deponi alanının tamamlanmış hali görülmektedir.
- **Kanyon dolgusu:** Ayrıca vadi dolgusu olarak ta adlandırılan kanyon dolgusunda, katı atık tepeler ve inişli araziler arasında doldurulur. Şekil 2.4b'de bu tip bir çöp deponi alanının tamamlanmış hali görülmektedir.

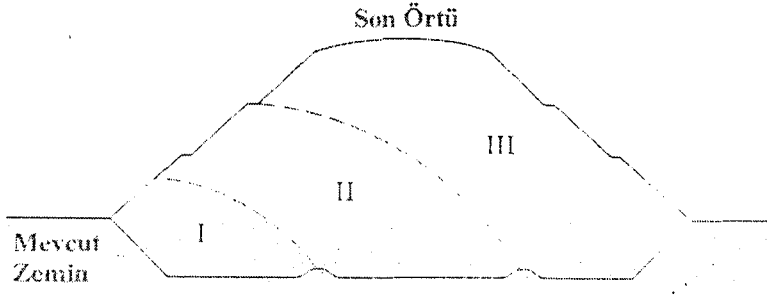


(a)

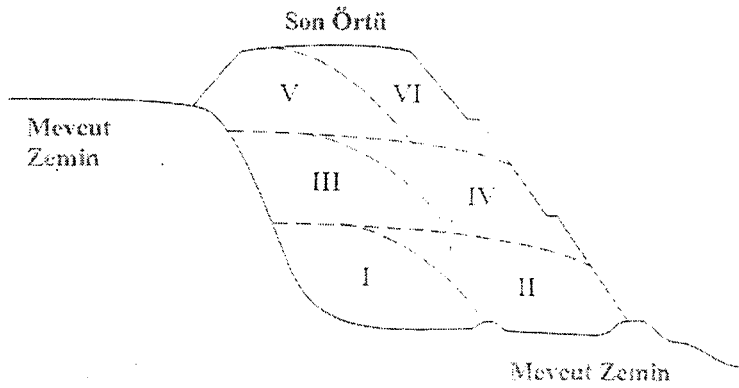


(b)

Şekil 2.3. (a) Alan dolgusu ve (b) hendek dolgusu çöp deponi alanı tipleri



(a)



(b)

Şekil 2.4. (a) Yukarı ve aşağı yer dolgusu, (b) vadi dolgusu çöp depöni alanı tipleri

#### 2.1.4. Çöp deponi alanı zarfı

Zararlı atık çöp deponi alanı yada modern kentsel katı atık çöp deponi alanı tasarımında en önemli husus çöp deponi alanı zarfıdır. Zarf, atığı kapsüller ve çevreden ayırır. Çöp deponi alanı zarfı, meydana gelen sızıntıların kaçışını engellemeli, yağmursuyu filtrelemesini sınırlamalı, ve gaz üretimini sağlamalıdır. Zarfın temel bileşenleri, tabaka sistemi, sızıntı toplama ve uzaklaştırma sistemi, gaz toplama ve kontrolü sistemi, ve örtü kaplama sistemidir. Bu sistemlerin her birinin rolü ve işlevi takip eden alt bölümlerde açıkça özetlenmiştir.

#### **2.1.4.1. Tabaka sistemi**

Tabaka sistemi bir çöp deponi alanının tabanı ve yan duvarları üzerine yerleştirilmiştir. Tabaka sistemi sızıntı çözünenlerinin dağılım ve advektif (hidrolik) iletimi karşısında bir bariyer gibi davranır. Asıl amacı katı atığın izole edilmesini sağlamak ve çöp deponi alanını çevreleyen zemin ve yer altı suyunun kirlenmesini önlemektir. Bir tabaka bir çok bariyer ve drenaj tabakalarından oluşur. Bariyer sıkıştırılmış kil tabakası geomembran, geosentetik kil tabakası yada bunların kombinasyonundan oluşabilir. Tabaka sistemi bir çöp deponi alanının en önemli ögesidir.

#### **2.1.4.2. Sızıntı toplama ve uzaklaştırma sistemi**

Sızıntı bir çöp deponi alanında katı atığın hareketli bileşenidir. Sızıntı ilk olarak atığın kendisinden ve ikincil olarak da filtreleme dışında kalan ve atığa geçen sıvıdan kaynaklanır. Sızıntı bir taşıyıcı sıvı ve çözünmemiş maddelerden oluşur. Bir sızıntı toplama ve uzaklaştırma sistemi, tabaka üzerindeki sızıntının başlangıcını engellemek, sızıntıyı bertaraf etmek ve sızıntıyı işlenmek üzere sihi kanalizasyon tabakası yada sızıntı depolama tankı yardımıyla bir atık su işleyişine aktarmak yani sızıntıyı toplamak amacıyla kullanılır.

#### **2.1.4.3. Gaz toplama ve kontrol sistemi**

Kentsel katı atıklar, ayrışma sırasında büyük miktarlarda gaz üretmektedir. Bir çöp deponi alanındaki iki önemli gaz bileşeni metan ve karbondioksittir. Gaz toplama ve kontrol sistemi, katı atığın organik bileşenlerinin ayrışması sırasında oluşan çöp deponi alanı gazının toplanması için kullanılır. Toplanan çöp deponi alanı gazı enerji üretmek yada kontrol altında yakmak amacıyla kullanılabilir.

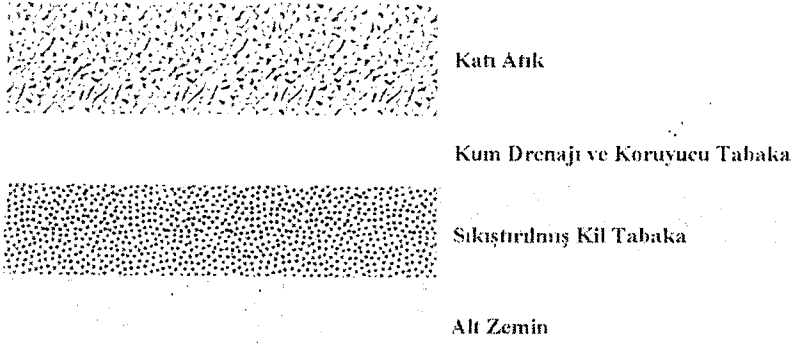
#### 2.1.4.4. Nihai örtü sistemi

Nihai örtü sistemi, bariyer ve drenaj tabakalarından oluşur. Ayrıca bu sisteme, alt tabakaları çevreden gelen etmenlere, hasara ve donma etkilerine karşı koruyan bir zemin tabakası da dahil edilmiştir. Bir çöp deponi alanı nihai örtüsünün temel görevi, alanın kapanmasından sonraki sızıntı üretiminin miktarını azaltmak amacıyla, çöp deponi alanının içine doğru gerçekleşen su sızmasını en aza indirmektir. Örtü tabakası da taban tabakasına gösterilen derecede dikkat ve özenle tasarlanmalıdır. Bir taban tabakasıyla karşılaştırıldığında bir örtü tabakası sadece filtreleme dışında kalan suya karşı bir hidrolik bariyer gibi davranmaz, aynı zamanda kombine adveksiyon ve difüzyon altında sızıntı çözünenlerinin akıntısı karşısında bir bariyer gibi davranması da gerekmez.

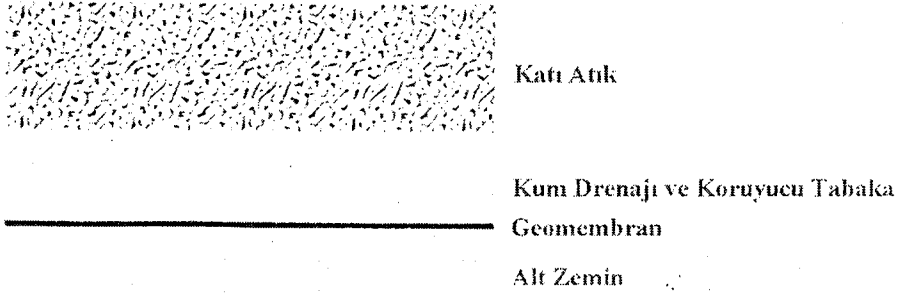
#### 2.1.5. Kompozit tabakalar

Bir tabaka sisteminin uygun işlevselliği, bir çöp deponi alanının depolanma etkinliğine bağlıdır. Bugüne kadar farklı tabaka sistemlerinin tasarımı ve gelişimi için büyük uğraşlar verilmiştir. Önceki tabakalar bir sentetik polimerik membran yada kil tabakasından oluşmuş bir tek tabakadan oluşmaktaydı. Geçmiş on yıllar zarfında, drenaj tabakalarının kil ve sentetik geomembranların arasına yerleştirilmesini kapsayan kompozit tabaka sistemlerinin kullanıldığı bir akım yaşanmıştır. Bu yaklaşımların her biri için yaklaşık bir başlangıç tarihini gösteren bir kronoloji izlenirse; Şekil 2.5a'da görüldüğü gibi 1982 öncesinde tek kil tabaka, Şekil 2.5b'de görüldüğü gibi 1982'de tek geomembran tabaka, Şekil 2.5c'de görüldüğü gibi 1983'de double geomembran tabaka, Şekil 2.6a'de görüldüğü gibi 1984'de tek kompozit tabaka ve Şekil 2.6b'de görüldüğü gibi 1987'de birincil ve ikincil sızıntı toplama sistemlerini içeren double kompozit tabaka verilebilir.

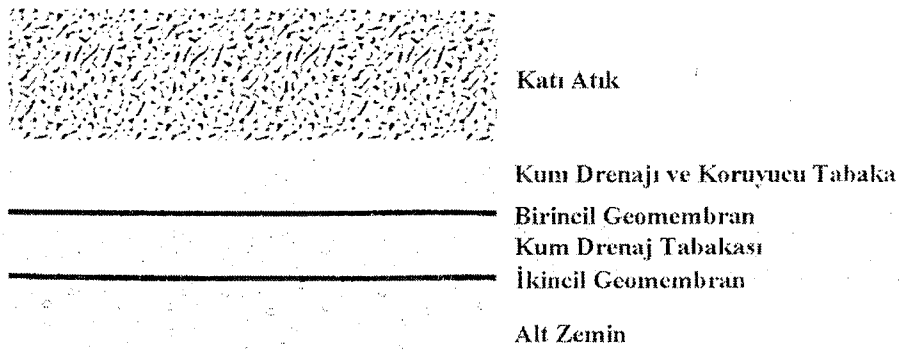
Birincil ve ikincil sızıntı toplama sistemlerini birlikte içeren double kompozit tabakalar, ABD'de katı atık çöp deponi alanlarında yaygın bir şekilde adapte edilmiştir. Bu tip tabaka sistemleri, tehlikeli atıklar için, federal ve eyalet düzenlemeleriyle, evsel ve zararsız atıklar için de en az 10 eyaletin düzenleyici kurumları tarafından öngörülmüştür.



(a)

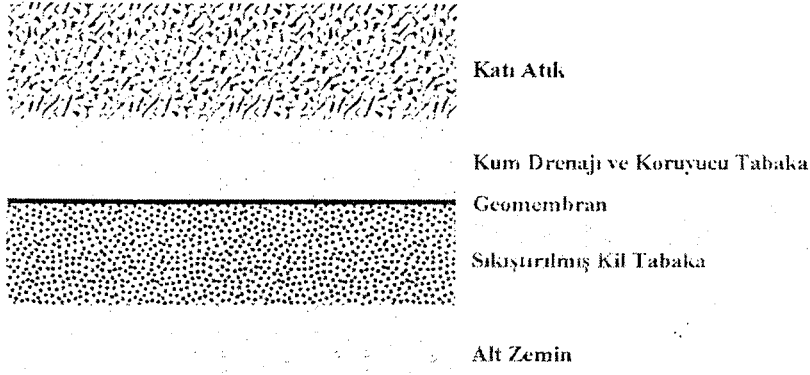


(b)

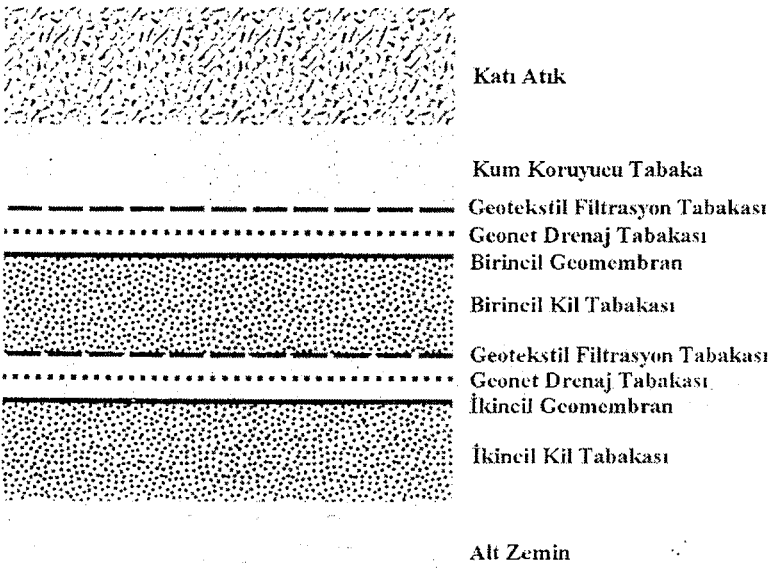


(c)

Şekil 2.5. (a) tek kil tabaka, (b) tek geomembran tabaka, c) duple geomembran tabaka



(a)

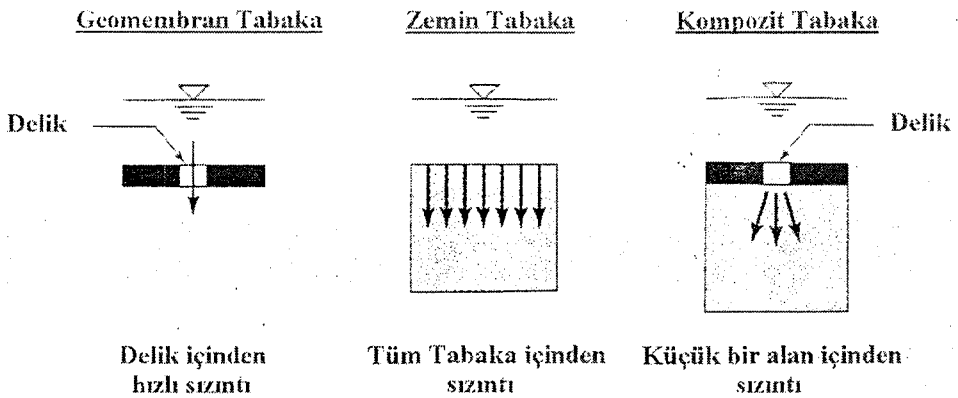


(b)

**şekil 2.6.** (a) tek kompozit tabaka, (b) birincil ve ikincil sızıntı toplama sistemlerini içeren duble kompozit tabaka

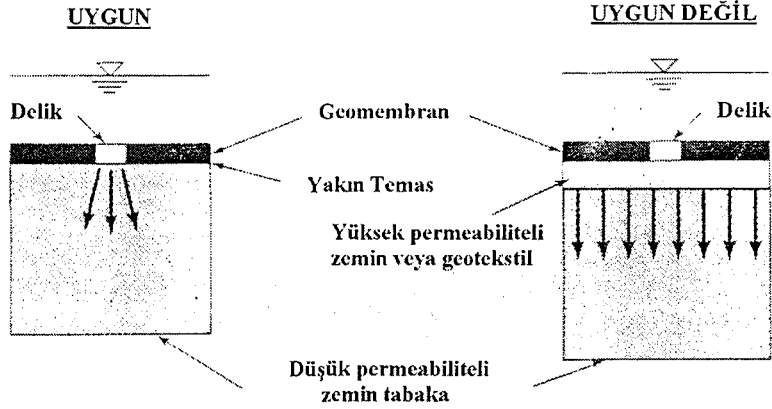
ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) evsel kıatı atık çöp deponi alanları için sızıntı toplama sistemlerini içeren kompozit tabaka sistemlerini yada bunun dengi performansı gösteren zararlı atık çöp deponi alanları için sızıntı toplama ve ayırma sistemleri içeren duble kompozit tabakaları istemektedir. Bazı eyaletler evsel kıatı atık çöp deponi alanları için de duble kompozit tabaka sistemlerini koşul saymaktadır.

Tabandan başlayarak bir duble kompozit tabaka, ikincil geomembran, ikincil sızıntı toplama tabakası, minimum 2 ft (0,6m) kalınlığındaki birincil sıkıştırılmış kil tabakası, birincil geomembran ve birincil sızıntı toplama sistemi tarafından izlenen minimum 2 ft (0,6m) kalınlığındaki sıkıştırılmış kil tabakasından oluşmaktadır. Bu sıra 2 ft (0,6 m) kalınlığındaki koruyucu kum örtüsü de eklenerek yükseltilmiştir. Sızıntı toplama sistemi sentetik geonet ve geotekstilden oluşan bir tabakadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki sızıntının drenaj sistemine düzgün bir şekilde aktarılmasını ikincisi ise sızıntı suyunu filtre ederek sistemin tıkanmamasını sağlar. Geomembran en az 1,5 mm kalınlığında olmalıdır. Alt tabaka ve sıkıştırılmış kil tabakasının permeabilitesi  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerini aşmamalıdır. Bir kompozit tabaka, tekil tabaka sistemiyle ortak sınırları dengelemek ve en aza indirmek için ortaklaşa ve destekleyici bir şekilde çalışır. Bir kompozit tabakanın çalışmasındaki yöntem Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Geomembranda bir delik varsa zemin alt tabakasının sızıntıya engel olmadığı varsayılarak sıvının deliğin içine doğru kolayca hareket edeceği söylenebilir. Bu halde sızıntı sadece bir zemin tabakası ile sızıntı tabakasının tüm alanında yer alacaktır. Diğer taraftan bir kompozit tabaka ile birlikte, sadece sınırlı miktarda sıvı, geomembran içindeki delikten geçecek fakat daha sonra düşük permeabiliteli kil ile karşılaşacaktır. Düşük permeabiliteli kil deliklerin içinden sınırlı miktardaki sıvı geçişini engelleyecektir.



Şekil 2.7. Geomembran, zemin ve kompozit tabakalardaki sızma modelleri

İyi kompozit davranışı, geomembran ve altındaki kil zemini arasında düzgün bir hidrolik teması gerektirir. Geomembran Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, kum yatağı yada kalın geotekstil gibi geçirimli malzemeli kilden ayrılmalıdır. Çünkü bu, hidrolik temasın engellenmesini tehlikeye atar. Kil zemin katmanında yer alabilecek geomembranı delebilen büyüklükteki ve şekildeki taşlar kaldırılmalıdır. Temasın engellenmesini önlemek için geomembranın yerleştirildiği sıkıştırılmış kil tabakasının yüzeyi, çelik tamburlu silindir tarafından düzeltilmelidir. Ayrıca geomembran meydana gelebilecek kırışıklıkların, minimuma indirgenmesi amacıyla uygun olarak yerleştirilmeli ve altı doldurulmalıdır.



Şekil 2.8. Geomembran ve sıkıştırılmış kil arasında yeterli hidrolik temasın sağlanması için uygun kompozit tabaka tasarımı (Daniel, 1993)

### 2.1.6. Duple kompozit tabakaların yararları

Başından belirtmelidir ki tek tabakalı kompozit sistemlere göre, sızıntı algılama kabiliyetli duple-tabakalı kompozit çöp deponi sistemleri, açıkça tercih edilebilir bulunmaktadır. Duple tabakalı sistemlerin, başlangıçta tek tabaka sistemlerinden daha maliyetli olduğu doğrudur. Fakat birincil tabaka içine doğru meydana gelen sızıntı, önceki tasarımda çöp deponi alanı için hala acil sayılmaktadır. Bununla birlikte böyle bir sızıntı bir duple tabakalı sistemde toplanabilir ve uygun bir şekilde bertaraf edilebilir. Diğer taraftan, bir tek tabakalı

sistem için yapımdan sonraki tek sızıntı algılama seçeneği, aşağı akım görüntüleme kuyularıdır. Bu şekilde bir sızıntı algılansa bile zaten alan ileri derecede kirlenmiş olmaktadır. Bu senaryo şu soruyu akla getirmektedir “ Eğer bir duble tabakalı alanın yapımı ve tasarımının maliyetinden çekinilirse aşağı akım görüntüleme kuyularına nasıl güvenilebilir” gerçekte soru şudur, “neden bu kuyulara ihtiyaç vardır”. Aşağı akım görüntüleme kuyularının tasarım ve yapım maliyeti, duble tabakalı çöp deponi alanlarının ilave sızıntı algılama tabakası maliyetlerini aşmaktadır. Daha da ilerisi, aşağı akım görüntüleme kuyularının süregelen işlemsel maliyetleri (örnekleme, test ve analiz içeren) dikkate alınır, maliyet karşılaştırmaları ağır bir şekilde duble tabaka sistemlerini öne çıkarmaktadır. Daha da önemlisi araziyi bütünüyle kaplayan duble tabakalı çöp deponi alanları, çevresel koruma ve emniyet açısından, aralıklı olarak boşluklu görüntüleme kuyularına kıyasla daha iyidir.

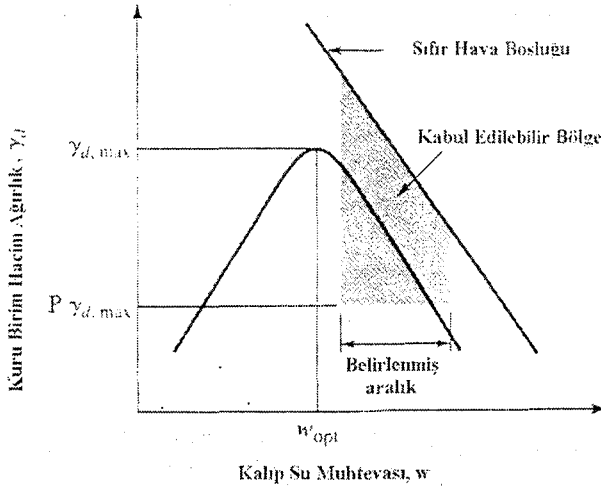
Bir sızıntı algılama tabakası ile sızıntı oranı, litre/hektar/gün birimlerinde sonuçlanan zamana göre hesaplanabilmekte ve sıvı birimi görüntülenebilmektedir. Kritik sızıntı oran değerleri, tasarım ve izin alınma sürecinde, belirli yardımlarla kararlaştırılabilir. Alan-özel durumlarına ve sızıntı oranının büyüklüğüne bağlı olarak pek çok faaliyet uygulanabilir. Bir duble tabakalı kompozit tabaka sisteminin, tek tabakalı kompozit tabaka sistemine göre seçimindeki karar hem mal sahiplerini hem de düzenleyicileri ilgilendiren bir konudur. Daha ilerisinde, duble tabakalı sistemlerin yerine kullanılan, Aşağı akım görüntüleme kuyularının eksikliği, çoğu düzenlemelerde adresleme gerektirmektedir. Yapılan bu düzenlemeler canlı dökümanlar olarak görülmelidir. Zaman sistemlerin etkinliklerini gösterecektir. İşlem, hem maliyet perspektifi olduğu kadar, hem de çevresel sağlık ve halk sağlığı düşünülerek, duble tabakalı çöp deponi sistemleri ile başlamalıdır( Aşağı akım görüntüleme kuyuları üzerinden ). Kirlenmiş aşağı akım kuyulu bir alan bir çöp deponi alanının kapladığı alana göre potansiyel olarak daha tehlikeli ve daha kirlidir (Qian ve ark., 2001).

## 2.2. Sıkıştırılmış Kil Tabakalar

Sıkıştırılmış kil zemini, eski atık bertaraf alanlarını kapatmak, yeni atık bertaraf birimlerini örtmek amacıyla, çöp deponi ve atık alanlarını tabakalamak için geniş şekilde kullanılmaktadır. Çoğu düzenleyici kurumlar, sıkıştırılmış kil tabakalarının ve örtülerinin belirli maksimum değere eşit yada daha düşük değerde olan permeabiliteye sahip olma amacıyla tasarlanmasını gerekli kılarlar. Tipik olarak zararlı atık, endüstriyel atık ve evsel katı atık içeren kil tabakaları  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s veya daha düşük permeabiliteye sahip olmalıdır.

### 2.2.1. Sıkıştırılmış kil tabakalarının gözden geçirilmesi

Daha önceki uygulamalarda zemin tabakalarının, belirli orandaki su muhtevasıyla minimum kuru birim hacim ağırlığına sıkıştırılması gerekmekteydi., 1990 öncesi uygulamalara dayanılarak, kabul edilebilir sınır, kabul edilebilir su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığının sınırını göstermektedir. Bu yaklaşım Şekil 2.9'da görülmektedir.

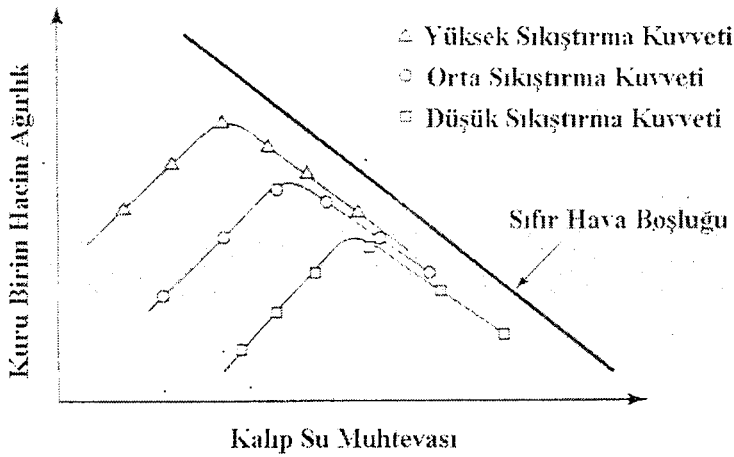


Şekil 2.9. Sıkıştırılmış kil tabakalarda, kabul edilebilir su muhtevaları ve kuru yoğunlukları özelliği için geleneksel metot (Daniel ve Benson, 1990)

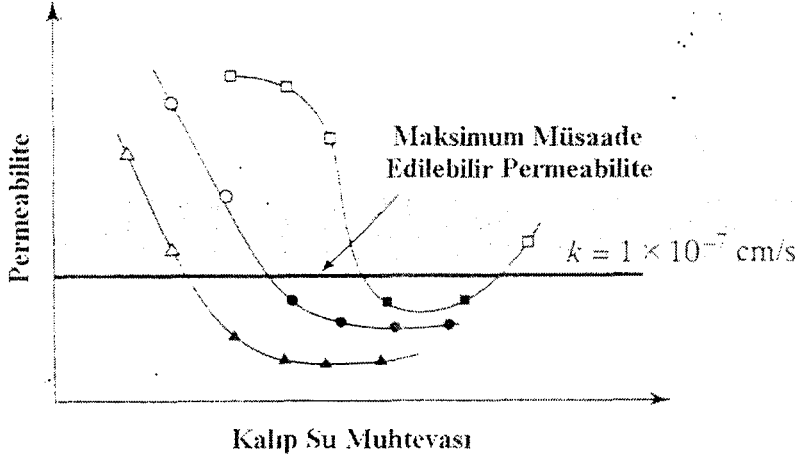
Genellikle tasarımcı, bir laboratuvar kompaksiyon testinden, sıkıştırılmış zeminin kuru birim hacim ağırlığının, maksimum kuru birim hacim ağırlığının  $P$

yüzdesine eşit yada daha yüksek değerde olmasını isterdi. Herrmann ve Elsbury (1987)'e göre standart proktor kompaksiyon (ASTM D698)'a dayanarak genellikle P yüzdesi maksimum kuru birim hacim ağırlığının %95'idi. Yada modifiye proktor kompaksiyon (ASTM D1557)'a dayanarak maksimum kuru birim hacim ağırlığının %90'ıydı. Kabul edilebilir su muhtevası oranı zemin karakteristikleriyle değişmektedir. Zemin tabakaları ve örtüleri için oran, tipik olarak standart veya modifiye proktor optimum su muhtevasının %0-4 arasında ıslak tarafındadır. Yapımdan pratiğe, ampirik bir şekilde geliştirilmiş Şekil 2.9'deki kabul edilebilir bölge, karayolu temellerine, yapısal dolgulara, toprak dolgulara ve toprak barajlara uygulanmıştır. Bu özelliğin asıl amacı yeterli mukavemet ve sınırlı sıkışabilirlik için minimum kuru birim hacim ağırlığa ulaşmaktır. Zemin tabakaları optimum su muhtevasında sıkıştırılır çünkü ıslak taraf sıkıştırılması permeabiliteyi minimuma indirger (Lambe.1958;Mitchell ve ark., 1965; Boynton ve Daniel, 1985).

Kuru birim hacim ağırlığı ve kalıp su muhtevasının, sıkıştırılmış kilin permeabilitesine etkisini gösteren önceki ve detaylı çalışma, Mitchell ve ark. tarafından 1965 yılında yayınlanmıştır. Enerji ve kompaksiyon metodunun, sıkıştırılmış kilin permeabilitesine olan açık etkisini göstermişlerdir. Kompaksiyon metodu verilerek, sıkıştırma enerjisi artırılarak, zeminin permeabilitesi azaltılır. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11 bu durumu göstermektedir.

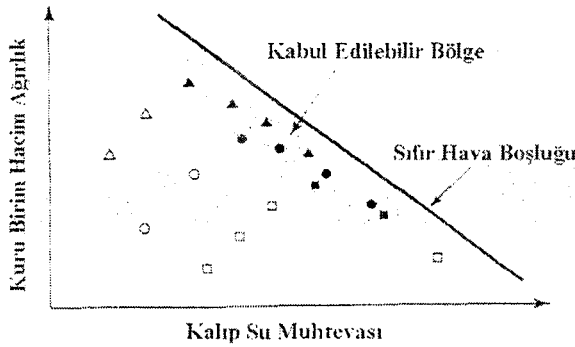


Şekil 2.10. Kuru birim hacim ağırlık-kalıp su muhtevası ilişkisi (Daniel ve Benson, 1990)



Şekil 2.11. Su muhtevasına karşılık permeabilite ile sıkıştırılma enerjisinin permeabilite üzerindeki etkisi görülüyor (Daniel ve Benson, 1990)

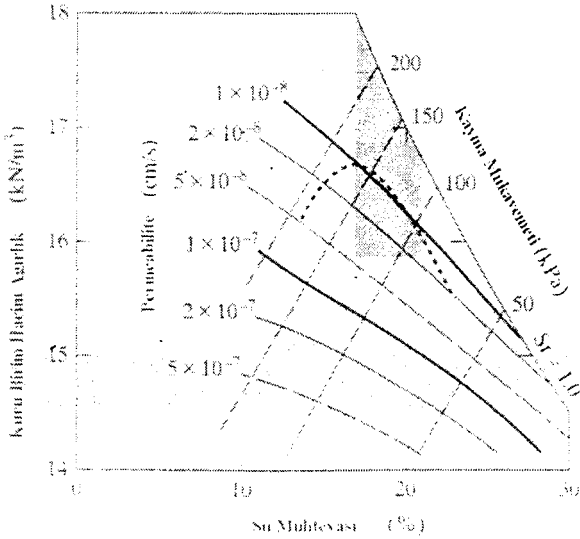
Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'deki kompaksiyon verileri Daniel ve Benson tarafından Şekil 2.12'de yeniden çizilmiştir. İçi boş semboller, permeabilitesi  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s' den yüksek olan değerlere sahip, sıkıştırılmış numuneleri göstermek için ve içi dolu semboller, permeabilitesi  $1,0 \times 10^{-7}$ 'ye eşit yada düşük olan sıkıştırılmış numuneleri, göstermek için kullanılmıştır. Şekil 2.12'deki kabul edilebilir sınır, içi dolu sembolleri kapsamaktadır. Şekil 2.12'deki kabul edilebilir alanın şekli, Şekil 2.9'da gösterilene çok az benzemekte yada benzerlik göstermemektedir.



Şekil 2.12. Permeabilite  $\leq$  maksimum kabul edilebilir değere göre sıkıştırılmış numuneler için kompaksiyon eğrileri yeniden içi dolu sembollerle çizilmiştir (Daniel ve Benson, 1990)

Boutwell ve Hedges, (1989) Şekil 2.12’de gösterilen kil zemini için permeabilite ve kayma mukavemetinin ilişkisini göstermişlerdir. Şekil 2.12’deki geleneksel kabul edilebilir alan, standart proktor kompaksiyon testindeki  $P=95$ ’i ve kabul edilebilir optimum su muhtevasının %0-4 ıslak tarafını uygulamaktadır. Kabul edilebilir alan içeren tüm su muhtevası-kuru birim hacim ağırlığı noktaları ( $w-\gamma_d$ ), permeabilitesi  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerine eşit veya daha düşük çıkan deney numunelerine denk gelir. Fakat Şekil 2.13’deki kabul edilebilir alan sınırları ve şekli ne permeabilite ne de kayma mukavemeti ile ilişkilidir. Yukarıdaki araştırma sonuçları, geleneksel geoteknik yaklaşımın,  $w-\gamma_d$  noktaları arasındaki ayrımı başaramadığını göstermektedir.

Kayma mukavemeti ve permeabilite, çöp deponi alanları ve atık depolama olanakları için sıkıştırılmış kil tabakaları ve örtüleri tasarlayan bir mühendisin ilgili olduğu tek parametreler değildir. Düşünülmesi gereken diğer parametreler; kuruma potansiyeli, kimyasal atağa karşı direnç, geomembranların üstüne gelen tabakayla arasındaki sürtünme ve oturma sırasındaki çatlaksız deformasyonu sağlama kabiliyetini içerir. Uygun veya kapsamlı bir kabul edilebilir bölgeyi tespit etmek için, sıkıştırılmış numuneleri ilgilendiren parametreleri ölçmek ve daha sonra o parametreleri su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığına uygulamak iyi bir yöntemdir.



Şekil 2.13. Sabit permeabilite ve kayma mukavemeti (kPa) düzey çizgileri  
(Boutwell ve Hedges, 1989)

Yukarıdaki araştırma sonuçları, geleneksel geoteknik yaklaşımın, w- $\gamma$ d noktaları arasındaki ayrımı başaramadığını göstermektedir.

Kayma mukavemeti ve permeabilite, çöp deponi alanları ve atık depolama olanakları için, sıkıştırılmış kil tabakaları ve örtüleri tasarlayan bir mühendisin, ilgili olduğu tek parametreler değildir. Düşünülmesi gereken diğer parametreler; kuruma potansiyeli, kimyasal atağa karşı direnç, geomembranların üstüne gelen tabakayla arasındaki sürtünme ve oturma sırasındaki çatlaksız deformasyonu sağlama kabiliyetini içerir. Uygun veya kapsamlı bir kabul edilebilir bölgeyi tespit etmek için, sıkıştırılmış numuneleri ilgilendiren parametreleri ölçmek ve daha sonra o parametreleri su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığına uygulamak iyi bir yöntemdir. Permeabilite, çoğu sıkıştırılmış kil tabakaları ve örtüleri için anahtar parametredir ve buna düşük bir permeabilite elde etmek amacıyla genellikle büyük önem verilir. Permeabilite esas alınarak oluşturulan kabul edilebilir su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı belirlendikten sonra, dikkatlice diğer ilgili parametreleri de göz önünde bulundurmalı ve bu faktörlerin de hesaba katılması için kabul edilebilir su muhtevası-kuru birim hacim ağırlığı ilişkisini ayarlamalıdır. Çizelge 2.2 geoteknik sıkıştırılmış kil ve çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakaları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.

### **2.2.2. Kompaksiyon ve permeabilite faktörleri**

Düşük permeabiliteli sıkıştırılmış kil tabakaları yapımının en önemli yönlerinden birisi, uygun kalıplama ve uygun zemin sıkıştırılmasıdır. Bundan dolayı, kabul edilebilir bir çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakası tasarımı için anahtar gereklilik: seçilmiş killi zemin için kuru yoğunluk, su muhtevası ve permeabilite ilişkilerini kurmaktır. Bu ilişkiyi geliştirmek için kullanılan en önemli laboratuvar testleri, kompaksiyon ve permeabilite testleridir.

**Çizelge 2.2.** Geoteknik sıkıştırılmış kil ile çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakalarının karşılaştırılması

Geoteknik Sıkıştırılmış Kil	Çöp Deponi Alanı Sıkıştırılmış Kili
<b>Tasarım Kriterleri</b>	
Taşıma Kapasitesi (kayma mukavemeti), sıkışabilirlik	Permeabilite ( $\leq 1,0 \times 10^{-7}$ cm/s), kayma mukavemeti, rötre potansiyeli, kimyasal direnç ve kimyasal uyum.
<b>Yapım Gereksinimleri</b>	
%90-%95 maksimum kuru yoğunluk (optimum su muhtevasının her iki tarafında). Sıkıştırılan tabaka kalınlığı 230 ile 300 mm arasında.	%90-%95 maksimum kuru yoğunluk (optimum su muhtevasının ıslak tarafında). Sıkıştırılan tabaka kalınlığı 150 mm arasında.

### 2.2.2.1. Kompaksiyon deneyi

Sıkıştırılmış kil tabakalarının rasyonel tasarımı, göz önünde bulunan her zemin için geliştirilmiş deney verileri üzerine esas alınmalıdır. Arazi deney verileri, laboratuvar verilerine göre tercih edilir fakat bir dizi deney seçimleri sonucunda, alandaki kompaksiyon kriterlerinin belirlenmesi çok pahalıya mal olabilmektedir. Bu sebepten dolayı tasarım mühendisleri normal olarak en uygun kompaksiyon metodunu kullanan laboratuvar deneylerine güvenirler (Arazi kompaksiyonuna mümkün olduğu kadar yaklaşmak için). Bunu kabul etmek önemlidir. Yalnız bununla birlikte, laboratuvar ölçekli kompaksiyon, arazideki zeminin, ağır kompaksiyon ekipmanlarının tekrarlı geçişleriyle tamamlanmasını, mükemmel bir şekilde yansıtamaz. Laboratuvar kompaksiyon metotları, arazi kompaksiyonunu iyi bir şekilde canlandırabilir fakat arazideki kompaksiyon enerjisinin tam olarak belirlenmesi mümkün değildir ve hiç şüphesiz bu enerji noktadan noktaya da değişmektedir. Bu gerçeklerin temelinde laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere herhangi tek bir kompaksiyon enerjisinin tavsiye edilmesi zordur.

Arazideki umulan kompaksiyon enerjisini kapsayan, laboratuvardaki pek çok kompaksiyon enerjisini seçmek, bu çıkmaz için bir mantıksal çözümdür. Çözüm bu yolla gerçekleştirilirse, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık kriteri, her

ara derecedeki kompaksiyon enerjisi için uygulanacaktır. Bu yaklaşım Mundell ve Bailey (1985) tarafından tarif edilen yaklaşıma benzemektedir.

Standart proktor deneyi (ASTM D698) ve Modifiye proktor deneyi (ASTM D1557), laboratuarda en yaygın kullanılan iki kompaksiyon deneyidir. Bu testlerin her ikisi de 100 mm çapında ve 120 mm yüksekliğinde yada  $9,5 \times 10^5 \text{ mm}^3$  hacmindeki aynı büyüklükteki kalıbı kullanırlar. Standart ve modifiye proktor deneyleri arasındaki temel fark kompaksiyon enerjisidir. Standart proktor deneyinde (24-N)-tokmak, 300 mm düşüş mesafesi ve üç tabakadan oluşan zemin vardır ve her tabakaya 25 düşüş uygulanır. Diğer taraftan modifiye proktor deneyinde (45\_N)-tokmak, 460 mm düşüş mesafesi ve 5 tabakadan oluşan zemin vardır ve her tabakaya 25 düşüş uygulanır. Böylece modifiye proktor deneyinin kompaksiyon enerjisi yaklaşık olarak standart proktor'un 4 katıdır.

Mümkün olan kompaksiyon enerjilerinin oranlarını daha geniş bir şekilde kapsamak amacıyla, indirgenmiş proktor deneyi isimli yeni bir kompaksiyon deneyi metodu Daniel ve Benson (1990) tarafından geliştirilmiştir. İndirgenmiş proktor deneyi için kullanılan prosedür tabaka başına 25 düşüş yerine kullanılan, tabaka başına 15 düşüş haricinde standart proktor testiyle neredeyse aynıdır. Bu indirgenmiş proktor deneyinin kompaksiyon enerjisinin, standart proktor deneyinden daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Bu üç tip proktor deneyinin karşılaştırılması Çizelge 2.3'de sunulmuştur.

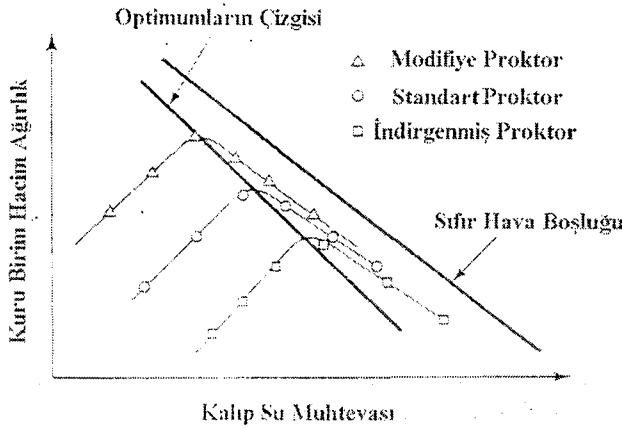
Çizelge 2.3. Proktor deneylerinin üç tipi

Deney Tipi	Tokmak Ağırlığı	Düşme Yüksekliği	Tabaka Sayısı	Tabaka Başına Vuruş Sayısı	Özgül Enerji
	N	mm			kN-m/m <sup>3</sup>
İndirgenmiş Proktor	24	300	3	15	360
Standart Proktor	24	300	3	25	590
Modifiye Proktor	45	450	5	25	2690

Çoğu geoteknik çöp deponi alanı zemin çalışmaları için modifiye proktor enerjisi, arazideki kompaksiyon enerjisi üzerinde daha yüksek bir sınır göstermektedir. Standart proktor enerjisi, arazide orta ölçekli kompaksiyon enerjisini göstermektedir. İndirgenmiş proktor enerjisi ise tipik bir sıkıştırılmış kil

tabakası ve örtü için minimum ölçekli kompaksiyon enerjisini göstermektedir. Bu üç tip proktor deneyinin kullanılmasının arkasındaki temel anlayış, arazide umulan kompaksiyon enerjisi aralığını kapsamaktır.

Şekil 2.14'deki üç kompaksiyon eğrisi sırayla modifiye, standart ve indirgenmiş proktor deneylerinden elde edilen kuru yoğunluk ve su muhtevası arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İndirgenmiş proktor deneyinin dahil edilmesindeki temel sebep, kompaksiyon eğrilerini çizmek için kullanılan eşlenmiş yoğunluk su noktalarının daha iyi bir dağılımını başarmaktır.



Şekil 2.14. Modifiye, standart ve indirgenmiş kompaksiyon enerjileriyle oluşturulmuş kompaksiyon eğrileri (Daniel ve Benson, 1990)

Farklı su muhtevalarındaki pek çok zemin örneklerini hazırlayarak ve aynı kompaksiyon prosedürünü kullanan bilinen hacimli kalıptaki örneklerin her birinin sıkıştırılması sonucunda, kompaksiyon eğrisi geliştirilir. Her sıkıştırılmış örneğin kuru yoğunluk ve su muhtevası sonradan ölçülür ve kaydedilir. Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık noktaları, kuru birim hacim ağırlığının dik eksen ve su muhtevasının yatay eksen olduğu bir grafikte çizilir. Düz bir kompaksiyon eğrisi oluşturmak için genellikle 4-5 noktaya ihtiyaç vardır. Bu noktalar pik değerinin her iki tarafında yer almalıdır.

Kuru yoğunluğun pik değeri, maksimum kuru yoğunluk olarak adlandırılır. Maksimum kuru birim hacim ağırlığına denk gelen su muhtevası, optimum su muhtevası olarak adlandırılır. Bir kompaksiyon eğrisini geliştirmekteki temel

amaç, özel bir kompaksiyon enerjisi altındaki seçilmiş bir zemin için maksimum kuru birim hacim ağırlık elde etmek ve optimum su muhtevasını belirlemektir.

Ayrıca %100 doygunluk eğrisi olarak da bilinen sıfır hava boşluğu eğrisi, hava içermeyen doygun bir zemin için kuru birim hacim ağırlığının, suyla ilişkisini veren bir eğridir.

Sıfır hava boşluğu eğrisi

$$\gamma_d = \gamma_w / [ w + ( 1 / G_s ) ] \quad (2.1)$$

denklemleri verilmiştir.

Burada  $G_s$  katıların özgül ağırlığı

$\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığıdır.

Eğer zeminin katı özgül ağırlığı değişirse, sıfır hava boşluk eğrisi de değişecektir. Kompaksiyon eğrisinin sağ tarafı aşağıya uzanır ve sıfır hava boşluk eğrisine yaklaşık olarak paralel hale gelir. Teorik olarak, su muhtevasına karşın kuru birim hacim ağırlığı çizimindeki hiçbir nokta sıfır hava boşluk eğrisinin üzerine çıkmamalıdır. Fakat pratikte bazı noktalar, zemin değişkenlerinin su muhtevası ve birim hacim ağırlığının doğrulanmasındaki, yapılarında var olan sınırların sonucu olarak, sıfır hava boşluk eğrisinin üzerini genellikle aşmaktadır.

Benson ve Boutwell, (1992) 26 zemin tabaka projesindeki, zemin tabaka malzemelerinden ölçülmüş olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasını özetlemişlerdir. Optimum su muhtevası noktası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı noktasındaki doygunluk derecesini de %71 ve %98 aralığında bulmuşlardır ( $G_s$  değerinin 2,75 olduğu farzedilerek). Optimum noktadaki ortalama doygunluk derecesi olarak da tipik bir sıkıştırılmış kil tabakasının tamamen doymuş konuma çok yakın olduğu anlamına gelen %85 bulmuşlardır.

#### 2.2.2.2. Permeabilite deneyi

Hidrolik iletkenlik yada permeabilite, Darcy kanunlarına göre akış oranı ve hidrolik eğim arasındaki oran katsayısıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot (\Delta H / L) \cdot A; \quad (2.2)$$

$$q = \text{Akım debisi, cm}^3/\text{s};$$

$k$  = permeabilite katsayısı (hidrolik iletkenlik), cm/s;

$i$  = hidrolik eğim =  $\Delta H / L$ ;

$\Delta H$  = Düşü kaybı, cm;

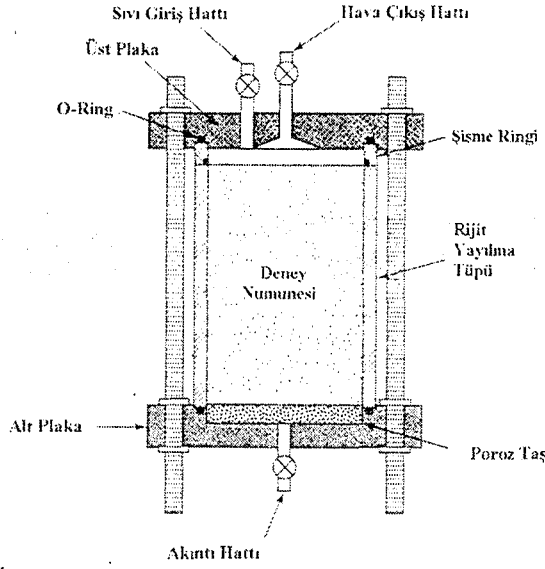
$L$  = Numunenin uzunluğu, cm;

$A$  = Numunenin Akıma dik doğrultudaki kesit alanı, cm<sup>2</sup>.

Hedeflenmiş kompaksiyon durumlarının tamamlanması hususunda, her zemin numunesinin permeabilitesi ölçülmelidir. Sıkıştırılmış bir kil örneğinin permeabilitesi, laboratuarda rijit-duvarlı permeametrede ya sabit seviyeli yada düşen seviyeli olarak belirlenebilir. Bir sıkıştırılmış kil örneğinin permeabilitesi, ayrıca bir esnek duvarlı permeametrede sabit seviyeli permeabilite deneyi ile belirlenebilir. Zeminin permeabilitesi daha önceden tarif edilen şekilde arazi deneyleriyle belirlenebilir.

Bir rijit-duvarlı permeametrenin şematik grafiği Şekil 2.15'de görülmektedir. Bir rijit-duvarlı permeametre, permeabilitesi ölçülecek numuneyi içeren bir rijit tüp yada kutudan oluşmaktadır. Tüp daima daireseldir ve metal yada plastikten yapılmaz. Dairesel cam tüp, ayrıca kimyasal ve atık akışkanlarını test ederken de kullanılabilir. Permeabilite sıvısı, dairesel deney numunesinin eksenini boyunca akar. Akış, yukarıdan aşağıya yada aşağıdan yukarı doğru olabilir. Yukarıya doğru akış durumunda, sistem içinde kalan ve permeabilite deneyinin sağlıklı olarak yapılmasını engelleyen hava, sistemden atılabilir fakat numune sistemde sabit bir konumda değilse numunenin örselenmemesi yada sıvılaşmamasına dikkat edilmelidir. Esnek-duvarlı permeametreye göre rijit-duvarlı permeametrenin en önemli avantajları:

1. Daha ucuzdur.
2. Kullanımı daha kolaydır.
3. Geniş aralıktaki kimyasal direnç malzemelerinden üretilebilir.



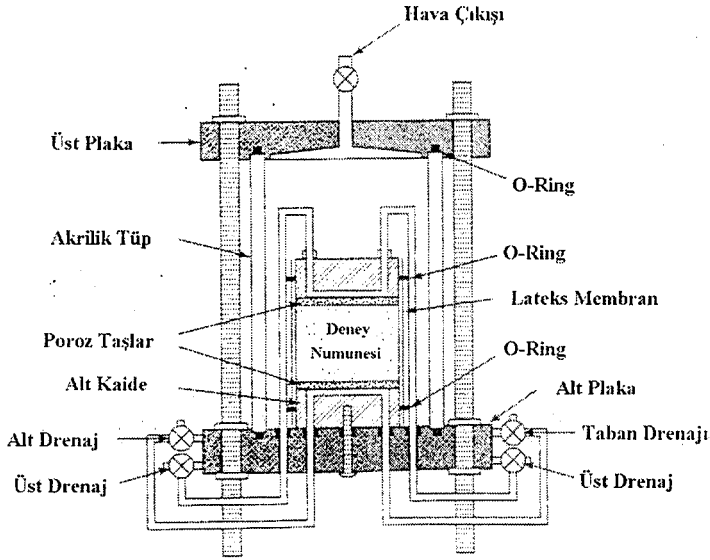
Şekil 2.15. Rijit-duvarlı, kompaksiyon kalıplı permeametre (Daniel, 1994)

Bununla birlikte permeabilite sıvısından örnek kirlenmesi sonucu yan duvar sızıntısı her zaman muhtemeldir ve uygulanan gerilme rijit-duvarlı permeametrelerin çoğu tipi ile kontrol edilebilmektedir. Temel olarak geri basınçlı rijit-duvarlı hücrede, gaz kabarcıkları elimine edilebilir. Test numunesindeki suyun basınçlanması, hava kabarcıklarının sıkıştırılması, havayı boşluk suyunun içine çözerek bulunan havanın hacmini azaltır. Bununla birlikte geri basınç sisteminin rijit-duvarlı hücrelerde iyi sonuç vermediği tespit edilmiştir (Edil ve Erickson, 1985).

Bir esnek duvarlı permeametreinin şematik grafiği Şekil 2.16'da görülmektedir. Bu deney konfigürasyonunda, deney için hazırlanmış numuneler 72 mm çapa ve 50-72 mm arasında uzunluğa sahiptir. Kil zemin numunesi, basınçlı bir hücrede yerleştirilmiş ve yan taraflardaki esnek membran tarafından sarılmış, üst ve altta son başlıklar ve poroz taşları arasında hapsedilmiştir. Numunenin her iki ucundaki duble drenaj yolları, sistemden havayı temizlemek ve zemin örneğini doyurmak için bir geri basınç uygulama yada örneğin doygunluğunu kontrol etmek için zemin örneğindeki boşluk suyu basıncını ölçmek amacıyla kullanılabilir. Hücre suyla doludur ve deney numunesinin

çevresindeki esnek membranı sıkıştırmak için basınçlanır. Böylece yan duvar sızıntısı en aza indirgenir yada ortadan kaldırılır.

Numune tamamen doymuş hale getirildikten sonra, arzu edilen bir basınç altında konsolide edilmelidir. Konsolidasyon basıncı, numunenin arazide üstünde bulunan veya bulunması gereken basınca incelenerek ayarlanabilir. Konsolidasyon fazının sonunda, bir hidrolik eğim numunenin üstünden altına farklı bir basınç uygulanarak zemine yüklenir. Akış oranı, verilen bir zaman periyodu içinde sisteme giren ve sistemden çıkan sıvı miktarı ile belirlenir.



Şekil 2.16. Esnek-duvarlı permeametre (Daniel, 1994)

Esnek-duvarlı permeametre, genellikle rijit-duvarlı hücreden çok daha kullanışlıdır ve yan duvar sızıntısı ile ilgili problemleri ortadan kaldırır. Arazide tecrübe edilerek tanımlanmış basınçlar, esnek-duvarlı permeametre setinde uygulanabilir. Tüm ince-daneli siltler ve killer bir esnek duvarlı hücre içinde permeabilite deneyine tabi tutulabilir. Çünkü zemin bir esnek-duvarlı hücrede geri basınç ile hızlı bir şekilde doymuş hale getirilebilir. Deney süresi, esnek duvarlı hücrelerde daha azdır. Daha da ilerisi deney numunesinin doymuşluğu, permeabilite deneyi öncesinde doğrulanabilir (Daniel, 1994). Esnek-duvarlı permeametre, araziden elde edilen örselenmemiş örneklerin test edilmesi ve

laboratuara geri getirilmesini içeren durumlarda genellikle tercih edilen permeametre tipidir.

Esnek-duvarlı permeametreler, çoğu açıdan rijit-duvarlı permeametrelere göre daha üstündür. Fakat daha maliyetlidir, işletimi daha karışıktır, çok düşük, tanımlanmış efektif gerilmelerde kullanımı daha zordur ve membran bütünlük problemlerine karşı savunmasızdır. Bu problem belirli kimyasalların kullanımında ve atık akışkanlı deney numunesinin permeabilite deneyleri sırasında oluşabilir. Düşük efektif tanımlanmış gerilmeyle deney yapmak bir problemdir. Fakat yeterli tanımlanmış gerilme daima, zemini saran membrana sıkı bir şekilde basınç yapmak için uygulanmalıdır. Esnek-duvarlı permeametre ile yapılan güvenilir, deney yan duvar sızıntısını önlemek için minimum 2 PSI yada 14 kPa'lık efektif tanımlanmış gerilme gerekmektedir.

### **2.2.3. Sıkıştırılmış kil tabakalarının tasarımı**

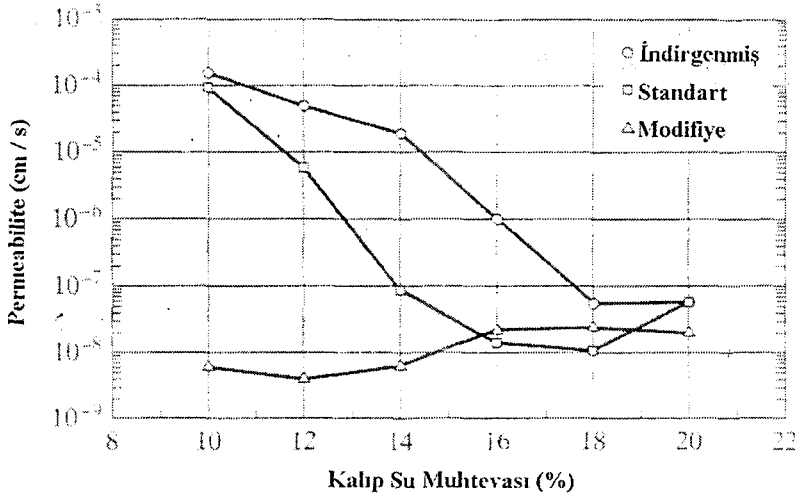
İyi tasarlanmış bir sıkıştırılmış kil tabakası, sızıntı geçişini engellemek yada en aza indirmek için düşük permeabilite, kayma mukavemeti için stabilite ve kuruma çatlaklarını önlemek için de minimum rötire potansiyeline sahip olmalıdır. Buna göre sıkıştırılmış bir zemin tabakası için tasarım amacı, sıkıştırılmış deney numunelerinin düşük permeabilite, yeterli kayma mukavemeti ve kurumayla minimum rötreye sahip olacağı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralığını belirlemektir.

#### **2.2.3.1. Düşük permeabilite**

Sıkıştırılmış numunelerin permeabilitelerinin  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s veya daha düşük değerlerde olduğundaki su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralıklarını sağlamak için prosedür aşağıdaki gibidir (Daniel ve Benson, 1990'dan sonra).

1. Şekil 2.14'de gösterilene benzer kompaksiyon eğrileri geliştirmek için, modifiye, standart ve indirgenmiş proktor kompaksiyon prosedürlerini izleyerek laboratuarda zemin sıkıştırılır ve her enerji için yaklaşık 5-6 farklı numune sıkıştırılarak bu eğriler oluşturulur.

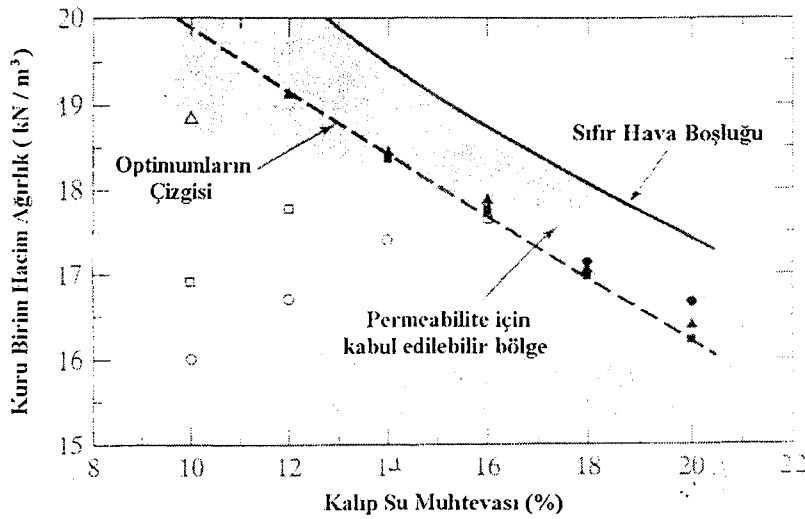
2. Sıkıştırılmış numunelerin permeabilitelerini belirlemek için permeabilite deneyi yapılmalıdır. Doymunluk derecesi, geri basınç ve efektif olarak tanımlanmış basıncın, dikkatli seçilmesi gerektiği gibi önemli ayrıntılar ile permeabilite prosedürlerinin hatasızlığını sağlamak için de dikkat edilmelidir. Ölçülmüş permeabilite değerleri Şekil 2.17'da gösterilene benzeyen kalıp su muhtevasının bir fonksiyonu olarak çizilmelidir.
3. Belirlenmiş permeabilite gereksinimlerini karşılayan sıkıştırılmış örnekleri, göstermek için kullanılan farklı semboller ile çizilmiş Şekil 2.18'de gösterilene benzer kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevası noktaları yeniden çizilmelidir. Şekil 2.18'deki içi boş semboller, permeabilitesi maksimum kabul edilebilir değerden ( $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s) büyük olan numuneleri göstermektedir. İçi dolu semboller ise permeabilitesi maksimum kabul edilebilir değere eşit veya ondan küçük olan numuneleri göstermektedir. Kabul edilebilir bölge, deney sonuçlarını gösteren veya tasarım kriterini aşan değer noktalarını kapsamak için çizilmelidir.



Şekil 2.17. Kalıp su muhtevasına karşılık permeabilite (Daniel ve Wu, 1993).

Yukarıdaki üç adımlı prosedürün önemini göstermek için 85 tam-ölçekli sıkıştırılmış kil tabakadan oluşan bir veri tabanı, arazi permeabilitesi esaslı arazi performansını değerlendirmek için birleştirilmiştir (Benson ve ark., 1999).

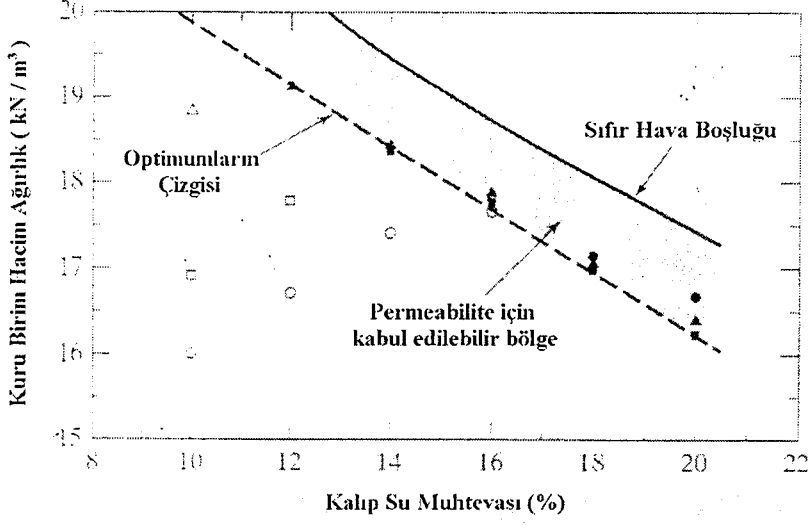
Her bir tabaka üzerinde, geniş-ölçekli arazi permeabilite deneyleri yürütülmüştür. Tüm kil tabakalarının kesin olarak düşük permeabilite değerini elde etmek amacıyla yapılmış olmasına karşın, veri tabanı, kil tabakalarının %26'sının  $k_f \geq 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerini sağladığını göstermiştir.  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerine eşit veya ondan küçük olan permeabilite değerini elde etmenin rutin olduğu inancına karşın, veri tabanı dörtte bir hata oranı ile durumun farklı olduğunu göstermiştir. Çoğu durumda  $k_f \geq 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinin elde edilmesinin sebebi, optimumlar çizgisinin kuru tarafında kompaksiyonun başarılı olmasıdır.



Şekil 2.18. Permeabilite hususlarının esas alındığı kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller permeabilitesi  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s' den az yada ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993)

Optimumlar çizgisinin üzerine ve üstüne düşen noktalar ile sıkıştırılmış hiçbir tabaka  $k_f > 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerine sahip değildir. Bu bulunanların ışığında çoğu kil tabakası yapım özellikleri, hala bir su muhtevası aralığının ve bir minimum yüzde kompaksiyonunun belirlendiği, bir yüzde kompaksiyon özelliğini hesaba katmaktadır. Yüzde kompaksiyon özelliklerinin, kompaksiyon optimumlarının kuru tarafında sonuç verebileceğini, laboratuvar verileri gösterdiği halde, bu özellik tipinin kullanımı uygun değildir. İncelenen kompaksiyonun açık avantajı, veri tabanı noktalarındaki bilgi analizinin, sadece optimum yada yüzde

kompaksiyona bağılı su muhtevası şartlarında olması değil ayrıca, optimum tabakaya bağılı zemin kompaksiyon verilerinin pozisyon koşullarını da sonuçlandırmasıdır. Çoğu arazi kompaksiyon veri noktaları, optimumlar çizgisinin üzerinde veya yukarısında yer aldığı zaman  $k_f \leq 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s olması yüksek olasılıktadır (Benson ve ark., 1999). Böylece permeabilite kriterini karşılayan kabul edilebilir bölge Şekil 2.19’da görüldüğü gibi ayarlanmalıdır.



Şekil 2.19. Permeabilite hususları esas alınarak ayarlanmış kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller permeabilitesi  $1 \times 10^{-7}$  cm/s den küçük veya ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993’den itibaren değiştirilmiş)

Önerilen prosedür, 3 farklı kompaksiyon enerjisinde yaklaşık 5-6 zemin örneğinin yada araştırılan her bir zemin için toplam 15 – 18 arası numunenin permeabilite ve kompaksiyon deneyine tabi tutulmasını içerir. Tipik bir geoteknik mühendisliği laboratuvarı, bu ölçekli bir testi birkaç haftada tamamlayabilmelidir. İstenen deneylerin sayısı, verileri geliştirmek için harcanan zaman, verileri geliştirme maliyeti, önemli bir zemin tabakası veya örtü projesi için engelleyici bir etken olmamalıdır.

Kimyasal atıklar ile uyumluluğun belirlenmesi için yapılan deneylerin, laboratuvarında sıkıştırılmış zeminler üzerinde yapılması bazen daha iyi olmaktadır. Uyumluluk testlerinin amacı, eğer varsa, kimyasalların permeabilite ve

sıkıştırılmış kilin diğer mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir. Kimyasal atıktan kaynaklanan sızıntının göstergesi olan bir permeabilite sıvısı kullanılan permeabilite deneyleri için, kimyasal uyumluluk deneyi yapmak amacıyla kabul edilebilir alanın alçak sınırına yakın olan bir veya iki deney numunesinin seçilmesi gerekmektedir.

Son olarak, iyi bir yapım için su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı kontrolünden daha fazlasına ihtiyaç vardır. Zeminin iyi karıştırılması, uygun kompaksiyon ekipmanı kullanımı, tabakaların birbirine efektif bir şekilde bağlanması, sıkıştırılmış tabakaların kuruma ve donmadan uygun bir şekilde korunması ve yetiştirilmiş personel tarafından dikkatli bir şekilde denetlenmesi, ayrıca zemin tabakalarının ve örtülerinin kaliteli bir şekilde güvence altına alınması, gerekli önemli hususlardır.

### 2.2.3.2. Yeterli kayma mukavemeti

Çoğu modern sıhhi çöp deponi alanları, yeterli çöp deponi alanı hacmini sağlamak amacıyla oldukça yüksek inşa edilmiştir. Bazı çöp deponi alanlarının yüksekliği 60 m'yi aşabilmektedir. Bu çöp deponi alanlarının zemin katmanları, yüksek toprak basınçları ve kayma gerilmelerine karşı yeterli mukavemeti sağlamalıdır. Eğer bir evsel katı atık çöp deponi alanının yüksekliği 75 m ise ortalama katı atık birim ağırlığı  $10 \text{ kN/m}^3$  ve altındaki sıkıştırılmış kil tabakasına etki eden taşıma kapasitesi  $750 \text{ kN/m}^2$  olacaktır.

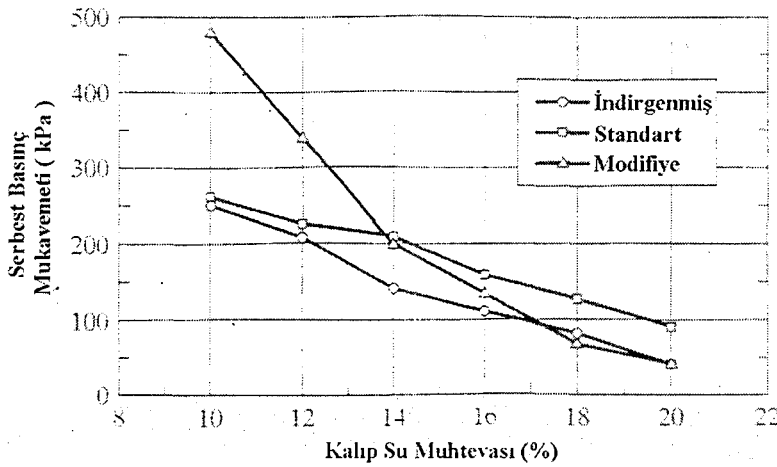
Aşağıdaki örnek, kayma mukavemeti gereksinimlerinin nasıl karşılanabileceğini göstermektedir. Bir çöp deponi alanı projesi için maksimum taşıma kapasitesini destekleyen bir kil tabakası için istenen mukavemet 200 kPa olarak hesaplanmıştır (Daniel ve Wu, 1993).

Sıkıştırılmış zemin numunelerinin sahip olması istenen kayma mukavemetinin, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralığını sağlama amacıyla izlenen prosedürü aşağıdaki gibidir.

Kompaksiyon eğrilerini geliştirmek için modifiye, standart ve indirgenmiş proktor kompaksiyon prosedürlerini kullanan, laboratuardaki sıkıştırılmış zemin

Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Her enerjiyi ayrı ayrı kullanarak yaklaşık 5-6 farklı numune sıkıştırılmalıdır.

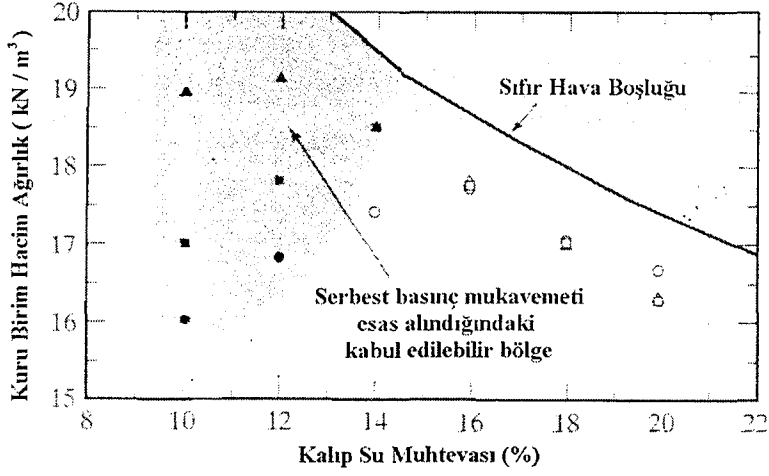
1. Bağlı kayma mukavemetlerine karar vermek için her numune üzerinde serbest basınç mukavemeti veya konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyleri yapılmalıdır. Ölçülen kayma mukavemetleri daha sonra Şekil 2.20'da gösterildiği gibi kalıp su muhtevasının bir fonksiyonu olarak çizilmelidir.
2. Kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası ilişkisi, belirtilmiş kayma mukavemeti gereksinimlerini sağlayan sıkıştırılmış numuneleri gösteren farklı sembollerle Şekil 2.21'de gösterildiği gibi yeniden çizilmelidir. İçi boş semboller kayma mukavemetlerinin maksimum kabul edilebilir değer (200 kPa)'dan daha düşük olduğu değerli numuneleri göstermekte ve içi dolu sembollerde maksimum kabul edilebilir değere eşit yada daha büyük değerlerde kayma mukavemetlerine sahip olan numuneleri göstermektedir. Kayma mukavemeti kriteri tasarımını aşan yada karşılayan deney sonuçlarını gösteren veri noktalarının kapsanması için kabul edilebilir bölge çizilmelidir.



Şekil 2.20. Serbest basınç mukavemetine karşılık kalıp su muhtevası (Daniel ve Wu, 1993)

Bu prosedür, üç farklı kompaksiyon enerjisinde, yaklaşık 5-6 zemin numunesinin mukavemet ve kompaksiyon deneylerini yada her zemin için

araştırılan, toplamda 15-18 arası kompaksiyon ve kayma mukavemeti deneylerini gerektirmektedir.



Şekil 2.21. Serbest basınç mukavemeti hususlarını esas alan kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller serbest basınç mukavemeti 200 kPa'dan büyük yada ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993)

### 2.2.3.3. Minimum rötre (büzülme) potansiyeli

Katı atık çöp deponi alanları için düşük permeabiliteli tabakalar ve örtülerin yapımında kullanılan, kil yönünden zengin zeminler genellikle optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılmış ve yerleştirilmiştir. Bu uygulama, yapım süresince sıkıştırılmış zeminin permeabilitesini en aza indirger. Bununla birlikte kilin mevsimsel kurumaya tabi olduğu kurak bölgelerde bu uygulama yapılırsa tabaka tamamen kuruyabileceğinden, tabakanın yapım amacına uygun olmayan durumlar ortaya çıkabilmektedir. Islak sıkıştırılmış killerin kurumasına izin verildiğinde geniş çatlaklar oluşabilir. Sıkıştırılmış kil zemindeki çatlaklar, sağlam durumdaki aynı kil ile karşılaştırıldığında permeabilitenin büyüklüğünü birkaç kat artırabilmektedir.

Rötre probleminin hassas noktası, sıkıştırılmış bir zeminin kalıp su muhtevası artırıldığı zaman zeminin rötre potansiyelinin de artmasıdır. Sıkıştırılma süresince, kalıplama ve kayma şekil değiştirmesi miktarının

artırılması, rötire potansiyelinin de yüksek olacağı anlamına gelir. Zemin tabakaları, sıkıştırılmış zeminin permeabilitesinin  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerini aşmaması gerekliliği ile uyum sağlamak için neredeyse sürekli optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılmaktadır. Permeabilite esas alınarak, optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırma yapılsa bile, su muhtevası dağılımının düzenli olduğu bölgelerde bu koşul sağlanır. Ancak kil tabakanın yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinde, meydana gelebilecek kurumadan dolayı problemler yaşanabilir. Eğer oluşturulan tabakalar, sıcak havada uzun süre üstü örtülmeden bırakılırsa tabakanın yerleştirilmesi sırasında, kuruma ve rötire çatlama ayrıca görülebilir. Bu açıdan düşük permeabilite ve rötire potansiyeline sahip kil zemininin sıkıştırılması için bir çözüm bulmak çok önemlidir.

Bir çok grubun araştırma sonuçlarına dayanılarak, bir çok sebepten dolayı kurumanın beklenildiği yerlerde yada kuru bölgelerde, araziler için düşük permeabilite ile sıkıştırılmış kil tabakası ve örtüleri tasarlamak üzere elde edilmiş elverişli tasarım prensipleri aşağıdadır (Daniel ve Wu, 1993).

- **Kum bakımından zengin zeminlerin kullanımı:** Dejong ve Warkentin (1965) ve Kleppe ve Olson (1984) kil muhtevasının artmasıyla, kuruma rötiresinin arttığını göstermektedir. Tersine kil kumu (SC), kuruma sırasında yer alan rötirenin miktarını en aza indirmek için düşük permeabilite ve düşük sıkışabilirlik özelliklerini birleştirebilir. Eğer killi kumlar elverişsiz ise işlenmiş kil ile karıştırılmış yerel elverişli kum malzemeleri dikkate alınmalıdır (kaolinit gibi genişlemeyen killer). Bunlar iyileştirilmiş kil tabakası olarak adlandırılır.
- **Zeminin en düşük pratik su muhtevasında yerleştirilmesi:** Daniel ve Wu, (1993)'ün araştırma sonuçları, bazı zeminlerin yüksek kompaksiyon enerjisiyle, kuru olarak sıkıştırılabildiğini ve hem düşük permeabilite hem de düşük rötire potansiyelinin sağlanabildiğini göstermektedir. Bazı zemin kurumaları görüldüğü halde, zemin bu yolla sıkıştırıldığında en az rötire ve kuruma çatlaklarına uğramaktadır.
- **Özellikle örtü sistemleri konusunda tedbirli olunması:** Boynton ve Daniel (1985), kurumuş kilin ıslandığında şiştiğini göstermişlerdir. Eğer kurumuş kilin üstündeki zeminden kaynaklanan sıkıştırma gerilmesi düşük

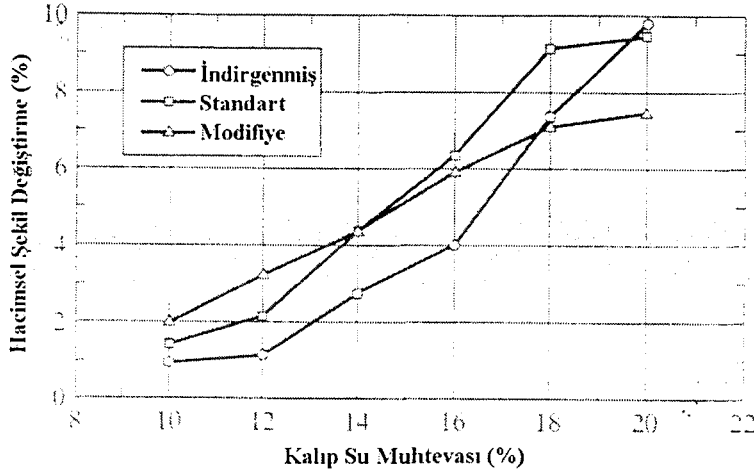
ise orijinal düşük permeabilitesini yeniden kazanamaz. Kil bariyerlerine zarar veren kurumayla örtü sistemleri, taban tabakası üzerine gelecek atık tarafından sağlanacak yükten elde edilen büyük sıkıştırma gerilmesine maruz kalan tabaka sistemlerinden daha büyük bir potansiyele sahiptir.

- **Zemin bariyerinin korunması:** Ne üst zeminin bir ince tabakası (Hawkins ve Horton, 1965; Montgomery ve Parsons, 1989) ne de örtülmemiş geomembran (Corser ve Cranston, 1991) üzerinde yer alan sıkıştırılmış zemin bariyerinin kuruma ve çatlamasını önlemeyi hesaba katmamışlardır. Diğer taraftan nemli bölgedeki yeterli kalınlıktaki bir zemin (Hawkins ve Horton, 1965), yada alternatif olarak kuru bir bölgedeki üst zeminin üzerine gelen koruyucu geomembran ( Corser ve Cranston, 1991) altındaki sıkıştırılmış zemin tabakasının kurummasını etkin bir şekilde durduramamışlardır. Tasarımcılar tarafından, örtü sistemlerinde bariyer tabakasının kurummasını en aza indirmek için kompozit bir geomembran/koruyucu zemin tabakası düşünülmelidir. Sıkıştırılmış tabakadan, çok daha büyük emiş kuvvetli çok kuru zeminlerde yer alan düşük permeabiliteli zemin katmanları tarafından özel bir problem yaratılmıştır. Bir geomembran ile zemin katmanını, kuru alt zeminden ayırmak için bir şeyler yapılmalıdır. Kuru bölgelerdeki, kil bakımından zengin düşük permeabiliteye sahip bariyer zeminini tamamen kurumadan kurtarmak için tek pratik yol geomembranların zemin bariyerinin altına yada üstüne yerleştirilmesidir (Daniel ve Wu, 1993). Çöp deponi alanındaki yan şevlerde bile, daha sonra şevlerin yukarisından aşağısına doğru gerçekleşen nem transferine dikkat edilmelidir.
- **Yüksek plastisiteli killerin kullanımından kaçınılması:** Yüksek plastisite indislerine yada likit limitlerine sahip kil zeminleri, düşük hacim stabilitesine ve yüksek rötire potansiyeline sahiptir. Buna ek olarak bu kil zeminlerin, arazide sıkıştırılması zordur. Genel bir kural olarak  $PI > 50$  olan kil zeminleri, bir çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil örtüsü yada tabakasında kullanılmamalıdır.

Temel olarak düşük permeabiliteli ve düşük rötre potansiyeline sahip sıkıştırılmış kil tabakası tasarımı için en iyi yaklaşım, zemini en düşük uygulanabilir su muhtevasında sıkıştırmak ve yerleştirmektir. Her bir olayda, kil tabakasının sonuçlanan permeabilitesi  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinden küçük olmalıdır. Bu işte püf noktası, seçilmiş bir zemin için uygulanabilir su muhtevasının nasıl belirlenmesi gerektiğidir.

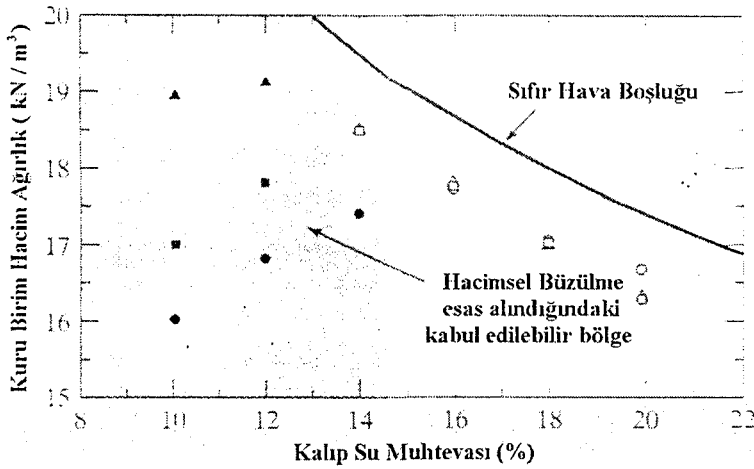
Daniel ve Wu, (1993) batı Teksas'da killi zemini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, bu zemin için kurumayı nleme amacıyla hacimsel Şekil değiştirmenin kabul edilebilir limit değerinin, %4'e eşit yada daha düşük olması gerektiğini bulmuşlardır. Sıkıştırılmış zemin numunelerinin hacimsel Şekil değiştirmesinin sınır değerine ulaştığı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı aralığını, elde etmedeki önerilen prosedür daha önce permeabilite ve kayma mukavemeti için sunulan prosedürlere benzerdir.

- Şekil 2.14'de gösterilen kompaksiyon eğrilerini geliştirmek için, modifiye standart ve indirgenmiş proktor kompaksiyon prosedürleri ile laboratuarda her bir enerjiyi kullanarak yaklaşık 5-6 numune sıkıştırılmalıdır.
- Her bir sıkıştırılmış numune için hacimsel Şekil değiştirmesini belirlemek amacıyla, hacimsel büzülme (rötre) deneyleri yapılmalıdır (ASTM D427). llmş hacimsel Şekil değiştirmeleri Şekil 2.22'de görüldüğü gibi kalıp su muhtevasının bir fonksiyonu olarak çizilmelidir.
- Farklı hacimsel Şekil değiştirmelere sahip, sıkıştırılmış numuneleri göstermek için kullanılan farklı semboller ile Şekil 2.23'de görüldüğü gibi kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevası noktaları yeniden çizilmelidir. Şekil 2.23'de içi boş semboller, hacimsel Şekil değiştirmesi maksimum kabul edilebilir değer olan %4'den daha büyük değere sahip numuneleri göstermektedir. İçi dolu semboller ise hacimsel Şekil değiştirmesi maksimum kabul edilebilir değere eşit yada daha düşük değerde olan numuneleri göstermektedir. Tasarım kriterini karşılayan yada aşan deney sonuçlarını gösteren veri noktalarını kapsamak için kabul edilebilir bölge çizilmelidir.



Şekil 2.22. Kalıp su muhtevasına karşı kuruma sebebiyle oluşan hacimsel şekil değişirme (Daniel ve Wu, 1993)

Bu prosedür, üç farklı kompaksiyon enerjisinde, yaklaşık 5-6 zemin numunesinin hacimsel büzülme(rötre) ve kompaksiyon deneylerini yada her zemin için toplamda 15-18 arası kompaksiyon ve hacimsel büzülme (rötre) deneyi gerektirir. Düşünülen her bir zemin için kurumayı önleme amacıyla hacimsel şekil değiştirmeleri bir an önce belirlenmelidir.



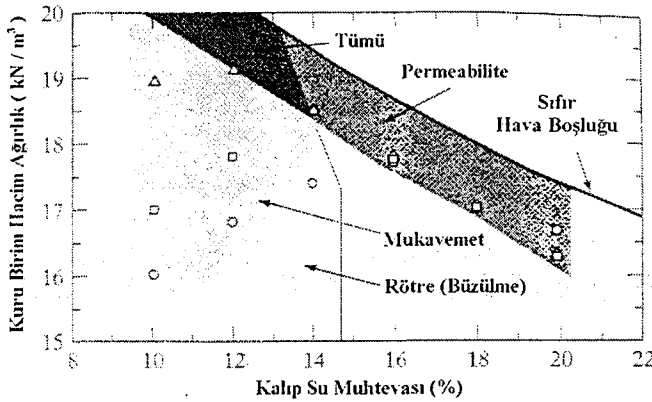
Şekil 2.23. Hacimsel büzülme (rötre) hususlarının esas alındığı kabul edilebilir bölge (İçi dolu semboller kurutmayla eyleme geçirilmiş hacimsel büzülmeleri %4'den küçük yada ona eşit olan sıkıştırılmış numunelere karşılık gelmektedir.) (Daniel ve Wu, 1993)

#### 2.2.3.4. Tüm tasarım kriterlerini karşılayan kabul edilebilir bölge

Bütün amaç, kompaksiyon kriterini permeabilite, serbest basınç mukavemeti ve kuruma karşısındaki hacimsel büzülmeyle ilişkilendirmektir. Daniel ve Wu, (1993)'yu izleyen tüm kriterleri karşılayan kabul edilebilir bir bölge üst üste bindirme ile oluşturulmuştur.

Permeabilite, Şekil 2.14'de kalıp su muhtevası ve kompaksiyon metodunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. İstenen,  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerine eşit yada daha düşük değerde olan permeabiliteyi sağlayan su muhtevalarının ve kuru birim hacim ağırlıklarının kabul edilebilir bölgesi, Şekil 2.19'da gösterilmiştir.

Serbest basınç mukavemeti 45-480 kPa arasında değişmiştir. 200 kPa değerini geçen serbest basınç mukavemetleri ile sıkıştırılmış numuneleri sağlayan kalıp su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıklarının aralığı, Şekil 2.20'de görülmektedir. Kuruma endeksi, hacimsel büzülme birim Şekil değiştirme ile kalıp su muhtevası arasındaki ilişki, üç kompaksiyon enerjisi için Şekil 2.22'de sunulmuştur. Hacimsel büzülme birim Şekil değiştirme eşiği olan %4 değerine dayanılarak kabul edilebilir su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlığı aralığı Şekil 2.23'de görülmektedir. Böylece permeabilite, hacimsel büzülme birim Şekil değiştirme ve serbest basınç mukavemetine dayanan kabul edilebilir bölgeler Şekil 2.24'de tümüyle üst üste bindirilerek verilmiştir.



Şekil 2.24. Permeabilite, hacimsel büzülme ve serbest basınç mukavemeti için tasarım amaçlarını esas alan kabul edilebilir bölge (Daniel ve Wu, 1993'den itibaren değiştirilmiş)

Bu çalışmanın sonuçları, killi zeminin düşük permeabilite ve yeterli mukavemet için sıkıştırılmasının mümkün olduğunu ve aynı zamanda minimum büzülme potansiyeline sahip sıkıştırılmış bir malzemenin üretebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte çalışma, ayrıca bu bilginin laboratuarda geliştirilmesinin ve araziye yansıtılmasının pek kolay olmadığını göstermektedir.

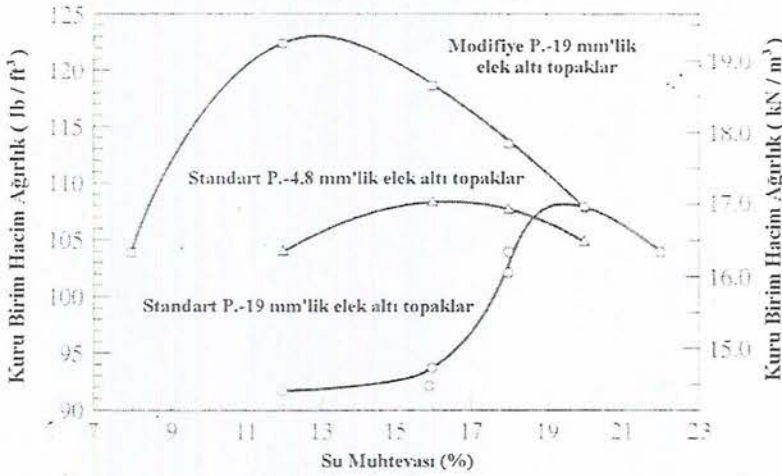
#### 2.2.4. Topakların permeabilite üzerindeki etkisi

Geoteknik mühendisleri, belirlenen laboratuvar ölçekli zemin özelliklerinin, arazi ölçekli uygulamalara aktarılması için mücadele etmektedirler. Mesela, sıkıştırılmış zeminin arazi permeabilitesi, laboratuvar deneylerinin sonuçlarından genellikle farklı çıkmaktadır. Bu farklılığa neden olan bir faktör, arazide bulunan hacim boşluğu kusurlarının var olmasıdır (çatlak, fisür, makroporlar). Fakat küçük ölçekli laboratuvar deney numuneleri ile bu etki yakalanamayabilir. Bir başka faktör, arazideki sıkıştırılmış zeminin yapısı ile karşılaştırıldığında laboratuarda sıkıştırılmış zeminin yapısıdır. Arazideki ve laboratuvardaki zemin, aynı sıkıştırma halinde bulunmadığı sürece permeabilite gözle görülür şekilde farklı olacaktır. Birbirine benzer zemin şartları yaratmak için sıkıştırılmış zeminin yapısına etki eden değişkenler, dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

Sıkıştırılmış zeminlerin arazi permeabilitesi hakkında pek çok araştırma, (Daniel, 1984; Daniel, 1987) gerçekleştirilmiştir. Laboratuarda ölçülen permeabilitenin, sık sık arazide elde edilen permeabilite değerinin bir yada birkaç katı büyüklükte olması, bu çalışmanın en önemli sonucudur. Daniel, laboratuvar ile arazideki sıkıştırılmış zeminin permeabilitesi arasındaki uyumsuzlukların, laboratuvar ve arazide kullanılan toprak boyutundaki farklılıklara bağlı olduğunu belirtmiştir. Benson ve Daniel (1990) tarafından yapılan ilave çalışmayla, yüksek plastisiteli sıkıştırılmış kil zeminin permeabilitesinin, kompaksiyon için zemini hazırlamada kullanılan toprak boyutundan etkilendiğini açıkça gösterilmiştir.

### 2.2.4.1. Topak boyutunun kompaksiyon eğrisi üzerindeki etkisi

Küçük (4,8 mm yada 4'nolu elek altı) yada büyük (19 mm yada 3/4 inç'lik elek altı) topraklar ile hazırlanmış zeminler için iki standart proktor kompaksiyon eğrisi Şekil 2.25'de görülmektedir (Benson ve Daniel, 1990). Topak boyutu açıkça kompaksiyon eğrilerini etkilemiştir. İki eğrinin, Şekil ve optimum su muhtevası farklıdır. Fakat maksimum kuru birim hacim ağırlıkları neredeyse aynıdır. Başlangıçta daha küçük topraklı zemin, kalıp su muhtevasına daha az hassasiyet gösteren çok düzgün bir pikli kompaksiyon eğrisine sahiptir. Küçük topraklı zemin, ayrıca büyük topraklı zeminden %3 kadar daha düşük optimum su muhtevası sergilemiştir. Optimumun kuru tarafındaki su muhtevaları için başlangıçtaki küçük topraklı zemin büyük topraklı zemine göre daha etkili sıkıştırılmıştır. Bu sonuç küçük topraklı zemin için optimumun kuru tarafındaki daha yüksek kuru yoğunluk ile desteklenmiştir. Her iki zemindeki topraklar su muhtevasının optimumundan düşük olduğu durumdan sıktır (Benson ve Daniel, 1990).



Şekil 2.25. Standart ve modifiye proktor kompaksiyon eğrileri (Benson ve Daniel, 1990)

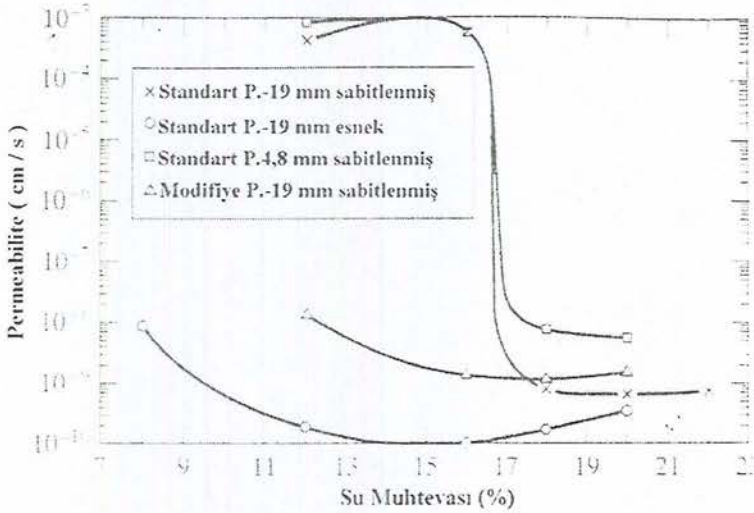
### 2.2.4.2. Topak boyutunun permeabilite üzerindeki etkisi

Daniel, (1984) farklı boyutlardaki topraklar ile sıkıştırılmış kil zemini üzerinde yaptığı deneylerle, toprak boyutunun sıkıştırılmış kil permeabilitesi

üzerindeki etkisinin ilk dökümantasyonunu sağlamıştır. Deneylerin sonuçları, Çizelge 2.4’de görülmektedir. Daha sonraki bir çalışmada Benson ve Daniel, (1990) standart proktor enerjisi kullanarak, toprak boyutunun, optimumun kuru tarafında sıkıştırılmış zeminlerin üzerinde açık bir etkisi olduğunu raporlamıştır. Bu ilişki Şekil 2.26’da görülmüyor. %12-%16 arasındaki kalıp su muhtevalarında küçük topraklı zeminlerin permeabilitesi büyük topraklı zemin ile karşılaştırıldığında 4 yada 6 kat daha düşük çıkmaktadır.

Çizelge 2.4. Toprak boyutunun sıkıştırılmış kilin permeabilitesi üzerindeki etkisi (Daniel, 1984)

Ortalama Toprak Çapı		Permeabilite ( cm / s )
9,5 mm	3/8 inç	$3,0 \times 10^{-5}$
4,8 mm	3/16 inç	$2,0 \times 10^{-5}$
1,6 mm	1/16 inç	$9,0 \times 10^{-6}$



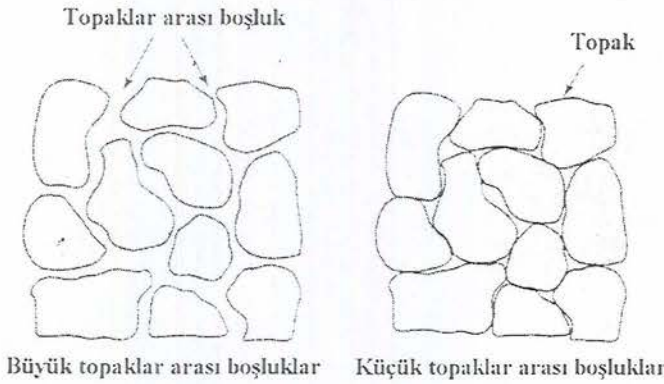
Şekil 2.26. Permeabiliteye karşı kalıp su muhtevası (Benson ve Daniel, 1990)

%18 ve %20 arasındaki kalıp su muhtevalarında, topraklar nemli, yumuşak ve yapışkandır (Benson ve Daniel, 1990). Toprakların boyutunun, bu kalıp su muhtevalarında numunelerin permeabilitesi üzerinde, çok az bir etkisi vardır. Görülen, toprak boyutuna bakılmaksızın göreceli bir yüksek su muhtevasının toprakları yumuşatabileceğidir. Böylece kolayca düşük permeabiliteli zeminin

homojen kütlesi içine sıkıştırılabilir. Böylece sıkıştırma sonundaki permeabiliteye bakıldığında, su muhtevası aralığındaki toprak boyutları önemsizdir.

### 2.2.4.3. Toprak yapısına karşın parçacık uyumu

Olsen (1962) tarafından önerilmiş toprak kavramlarına dayanılarak, sıkıştırılmış kildeki suyun akışının çoğunun, topraklar içindeki kil parçacıklarının aralığına göre daha çok kil topraklarının arasında yer alan gözenek boşluklarında olduğu söylenebilir. Bu model Şekil 2.27'de görülmektedir. Yumuşak ve ıslak topraklı zemin, sert ve kuru topraklara göre daha iyi kalıplanabilir (Benson ve Daniel, 1990). Böylece optimumun ıslak tarafında bir zemin sıkıştırıldığı zaman, topraklar kolaylıkla yeniden kalıplanabilir. Bu da daha düşük topraklar arası boşluk ve düşük permeabilite ile sonuçlanır.



Şekil 2.27. Suyun zeminin toprakları arasındaki nispeten büyük boşluklardan akışı

Benson ve Daniel, (1990) çeşitli su muhtevalarında, standart ve modifiye prosedürleri ile sıkıştırılmış zemin numunelerinin fotoğraflarını inceledikten sonra, topraklar ve topraklar arası boşlukların durumunun permeabiliteyi kontrol ettiğini belirlemişlerdir. Standart proktor enerjisi ile sıkıştırılmış en kuru numunelerin, (%12 su muhtevasında) kil zemininden çok granüler malzemelere benzediklerini gözlemlemişlerdir. Standart proktor enerjisi, kuru ve sert toprakları yeniden oluşturmaya ve kalıplamaya yeterli değildir ve geniş topraklar arası boşlukları

ortadan kaldırmaktadır. Bu numuneler yüksek permeabiliteye sahiptir. Şekil 2.26'da görüldüğü gibi aynı su muhtevsındaki zeminlerin sıkıştırılması, modifiye proktor enerjisiyle toprakların daha fazla deformasyonu, büyük boşlukların azalımı ve düşük permeabilite ile sonuçlanmıştır. Modifiye proktor tarafından verilen enerji, kuru ve sert toprakları kırmak ve yeniden oluşturmak için yeterliydi. Dahası standart veya modifiye proktor enerjisi tarafından, optimumun ıslak tarafında sıkıştırılmış zeminler, toprak yada toprak boşluklarını ortadan kaldırmışlardır. Optimumun ıslak tarafında sıkıştırılmış tüm numunelerin permeabilitesi, bu uygulamada çok düşük olmuştur.

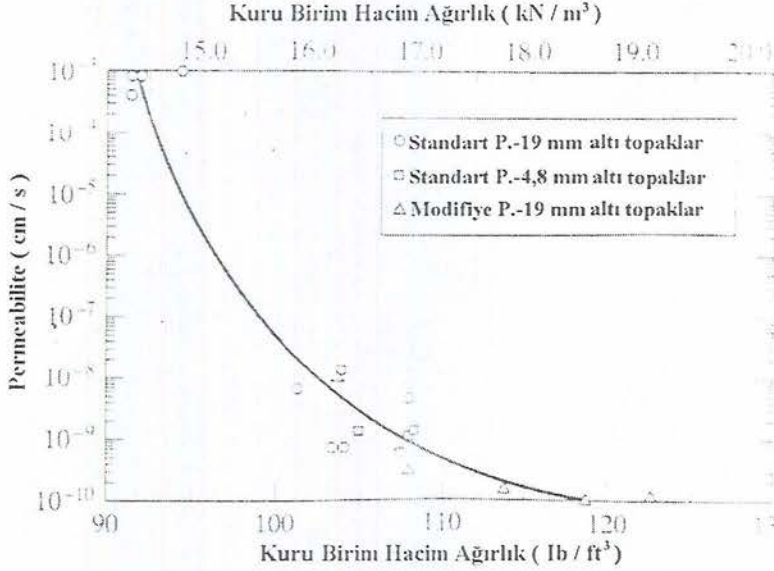
Sıkıştırma sırasındaki zeminin kuru birim hacim ağırlığı, topraklar arası geniş boşlukların varlığının göstergesidir. Düşük kuru birim hacim ağırlığı, porlar arasında büyük ve görülebilir boşluklara sahip olan zeminlerle ilgilidir, büyük olmayan görülebilir topraklar arası porlara sahip zeminler ise çok daha yüksek kuru birim hacim ağırlığına sahiptir.

Benson ve Daniel, (1990), deney numunelerinin permeabilitesini, sıkıştırma sırasında kuru birim hacim ağırlığının bir fonksiyonu olarak çizmişlerdir. Bu Şekil 2.28'de görülmektedir. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığı,  $16,0 \text{ kN/m}^3$  değerinden büyük olan deney numuneleri,  $1,0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  değerinden daha küçük permeabiliteye sahiptiler.  $16,0 \text{ kN/m}^3$  değerindeki bir kuru birim hacim ağırlığı, standart proktor kompaksiyonuna dayanılarak maksimum kuru birim hacim ağırlığının %93'üne denk gelmektedir ve modifiye proktor kompaksiyonuna dayanılarak, maksimum kuru birim hacim ağırlığının %82'sine denk gelmektedir. Toprakları oluşturan yüksek plastisiteli zeminlerde, düşük permeabiliteyi gerçekleştirmek için topraklar ve topraklar arası büyük boşluklar ortadan kaldırılmalıdır. Sıkıştırılmış zeminin kuru birim hacim ağırlığı, büyük boşlukların ortadan kaldırıldığı doğrudan olmayan bir derecenin ölçümünü sağlar.

#### 2.2.4.4. Laboratuvar Testleri ve Tasarım İçeriği

Zemin, laboratuvarında nasıl işlenmelidir ki arazi şartlarını yeterli derecede yansıtılsın. Zemin önceden kurutulmalı ve 4'nolu elekten geçirilmek için ezilmelidir yada arazide beklenenlere yakın su muhtevalarında ve arazide

beklenen toprak boyutlarına yakın büyüklükte toprak boyutları ile mi hazırlanmalıdır. Mantıksal cevap, eğer laboratuvar testleri arazi sonuçlarını gösterebilen veri üretmek için amaçlanmışsa toprak boyutları, kuruma şartları ve laboratuvar da sıkıştırmanın diğer ayrıntıları arazi şartlarına olabildiğince yakın olmalıdır.



Şekil 2.28. Permeabiliteye karşı kuru birim hacim ağırlık (Benson ve Daniel, 1990)

Arazi yapım uygulamaları, kil topraklarının tamamen kalıplandığının ve topraklar arası büyük boşlukların ortadan kaldırıldığına garantisini vermelidir. Daniel, (1987) sıkıştırma sırasında zemini kalıplayan ağır ekipmanlar ile sıkıştırmanın başarılabilirliğini önermiştir. Benson ve Daniel, (1990) toprakların iki yöntemle yok edilebileceğini önermişlerdir.

- Topraklar arası büyük boşluklardan yoksun bir kütle için kolayca kalıplanabilen yumuşak ve zayıf topraklar üretmek için zeminin yüksek kalıp su muhtevasında ıslatılması
- Zemin, toprakları ezen ve topraklar arası büyük boşlukları böylece ortadan kaldıran, aşırı derecede ağır bir silindir ile düşük su muhtevasında sıkıştırılabilir. Zeminin su muhtevası, arazi yapımında yada tersinde kullanılan kompaksiyon enerjisi ile dikkatli bir şekilde eşlenmelidir. Eğer

zemin göreceli bir şekilde kuru ise düşük permeabiliteyi sağlamak için benzer bir şekilde aşırı yüksek kompaksiyon enerjisi gerekecektir. Diğer açıdan göreceli ıslak zemine, daha düşük kompaksiyon enerjisi gereklidir. Kalıp su muhtevasının seçimi, ayrıca diğer faktörlere de bağlıdır (örneğin, uzun dönem kuruması yada şişme ve kayma mukavemeti).

#### 2.2.5. Çakıl muhtevasının permeabilite üzerindeki etkisi

Sıkıştırılmış bir kil tabakasının permeabilitesi, düzenli atık depolama birimlerinin çoğu için  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinden daha düşük olmalıdır. Ekonomik nedenlerden dolayı, yerel olarak uygun olan sıkıştırılmış kil tabakasının yapımı için kil bakımından zengin zeminler, tercih edilen malzemelerdir. Ne yazık ki killi zeminin, bir çok depozitleri çakıllıdır. Birleştirilmiş sınıflandırma sistemine (UCS) göre çakıl 4'nolu elekten geçmeyen bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Daniel, (1990) zemin tabaka malzemelerinin, %10 ile %20 aralığından küçük çakıl boyutunda parçacıklar içeren zeminlerden oluşturulmasını önermiştir. Bir çok eyalet düzenleyici kuruluşları, bir tabaka malzemesinin içerdiği çakıl miktarı ile ilgili katı sınırlamalar getirmiştir.

Eğer bir zeminin çakıl muhtevası çok yüksek ise zeminin taşları yerinden kaldırdığı görülebilir yada zeminin gevşek bir tabasından taşları ayırmak için özel bir araç gerekebilir. Islak ve yapışkan malzemeler ile mekanik işlemciler, killi malzeme tarafından etkisiz hale getirilebilirler. Shelly ve Daniel, (1993) bazı projelerinde işçi takımlarının taşları, zeminin gevşek bir kısmından el ile ortadan kaldırdıklarını raporlamışlardır. Her bir olayda, çakıl parçacıklarının ortadan kaldırılması zor ve pahalıdır. Ne miktarda çakılın uygulamalar için fazla olduğu konusu, önemli ekonomik ve lojistik kollara sahiptir.

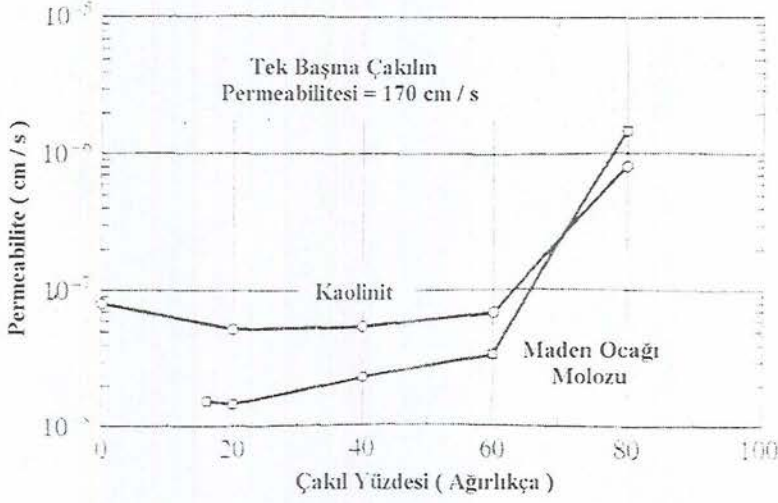
Holtz ve Lowitz, (1957) çeşitli miktarda çakıl içeren kumlu, siltli ve killi zeminler üzerinde, kompaksiyon deneylerini uygulamışlardır. Çakıl muhtevası, toplam malzemenin üçte birine yaklaştığında, çakılın ince daneli kısımlarının sıkıştırılmasını engellemeye başladığını bulmuşlardır. Ayrıca çakıl muhtevası, toplam malzemenin üçte ikisine yaklaştığında büyük parçacıklar arasındaki boşlukları tamamen doldurmak için genellikle yeterli miktarda ince daneli

malzeme bulunmadığı görülmüştür. Holtz ve Lowitz, ayrıca çakıl zemin karışımının optimum su muhtevasında sıkıştırıldığı halde çakıl muhtevaları %40 ile %50 aralığını aştığı zaman, ince daneli kısımların boşluk oranının arttığını bulmuşlardır. İnce daneli kısımların boşluk oranı, karışımın permeabilitesini etkileyebilir çünkü ince danelerin matrisinin permeabilitesi, boşluk oranına genellikle çok duyarlıdır.

Shakoor ve Cook, (1990) %10 artımlarla, %10'dan %80'e varan ağırlıktaki çakıl oranında, 13 – 19 mm çap aralığındaki çakıl parçacıkları ile karıştırılmış, buzul dönemi oluşumu olan siltli kil üzerinde permeabilite deneyleri yapmışlardır. Su muhtevası optimumun %2'sinden düşük yada yüksek olmayan, minimum %95 maksimum kuru yoğunluğu olan standart proktor kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmış numuneler üzerinde, deneyler gerçekleştirilmiştir. Permeabilite sıfır ile %50 arasında çakıl muhtevası için  $1,0 \times 10^{-7}$  ile  $2,0 \times 10^{-7}$  cm/s arasında değişmiştir. Çakıl muhtevası %50'ye ulaştığı zaman, permeabilite belirgin bir şekilde artmıştır. Çakıl muhtevasının bu değerinde, kaba daneler sıkıştırmayı açıkça engeller ve çakıl parçacıkları arasındaki boşluklar, ince daneli malzemeler ile tamamen doldurulamaz.

Shelly ve Daniel, (1993) değişken yüzdelerdeki çakıl ile karıştırılmış iki killi zemin üzerinde, kompaksiyon ve permeabilite deneyleri yapmışlardır. Çakıl kendi başına 170 cm/s değerinde permeabiliteye sahipti. Sıkıştırılmış çakıl zemin karışımlarının permeabilitesi, %60 oranındaki yükseklikte çakıl muhtevaları için  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinden daha düşüktü. %60 değerinden daha düşük oranda olan karışımlar için çakıl muhtevası önemli değildi. Çakıl muhtevası %60 oranından büyük olan karışımlar için killi zemin çakıl parçacıkları arasındaki boşlukları doldurmamış ve Şekil 2.29'da görüldüğü gibi çok daha yüksek permeabilite gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, Shakoor ve Cook, (1990)'un çalışmaları ile uyuşmaktadır. Çakılsız kısımların su muhtevasının, kil çakıl karışımlarının permeabilitesini belirleme konusunda faydaları olmuştur. Çakılsız kısmın kalıp su muhtevası, yalnız çakılsız kısım üzerinde gerçekleştirilen ayrı kompaksiyon testleri yoluyla belirlenen optimum su muhtevasından, yaklaşık %4 kadar daha yüksek değerde olduğu zaman, iki zemin çakıl karışımının minimum permeabilitesi elde edilmiştir. Ayrıca yapım kalite kontrolü amacıyla, toplam

çakıl zemin karışımının su muhtevsından daha çok, çakılsız kısmın su muhtevası üzerinde odaklanmak daha iyidir (Shelly ve Daniel, 1993).



Şekil 2.29. Kaolinit/çakıl ve maden ocağı molozu/çakıl karışımlarının permeabilitesiyle çakıl yüzdesinin fonksiyonu (Shelley ve Daniel, 1993)

Shelly ve Daniel, (1993) tarafından sunulmuş sonuçlar, dikkatli kontrol edilmiş laboratuvar şartları arasında, %60 oranına kadar çakıl içeren killi zeminlerin permeabilitesinin,  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinden daha küçük değeri sağlamak amacıyla sıkıştırılabildiğini göstermektedir. Shakoov ve Cook, (1990), %50 oranındaki çakılın varlığının, çakıl ile karıştırılmış buzul toprağını olumsuz bir şekilde etkilemediğini bulmuşlardır. Böylece üç farklı zemin üzerinde gerçekleştirilmiş iki bağımsız araştırma, %50'den %60 oranına kadar çakıl içeren killi zeminlerin  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinden daha düşük permeabiliteyi elde etmek için sıkıştırılabildiğini gösterir. Bu sonuçlara dayanarak, Shelly ve Daniel, (1993) bir zemin tabakası malzemesinde çakıl miktarının yaklaşık olarak %50 oranını, geçmemesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Dikkatli bir şekilde kontrol edilmiş laboratuvar şartları altında geliştirilen, bu çalışmaların yorumlanmasında dikkat etmek gerekir. Laboratuvar deneyleri, çakıl parçacıklarının segregasyonuna müsaade etmemişlerdir. Boşlukları, killi malzeme ile dolmamış segregasyona uğramış çakıl parçacıklarının, yüzeylerindeki izole edilmiş girintiler, zemin tabakasının toplam permeabilitesini artırmaya eğilim

gösterirler. Böylece %50 oranına kadar çakıllı zemin kullanan,  $1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinden daha düşük permeabiliteyi elde etmek, teorik olarak mümkün olduğu halde yapım sırasındaki çakıl segregasyonu olasılığı dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır. Neyse ki malzemeleri, tamamen karıştırabilecek ekipmanlar mevcuttur ve çakıl segregasyonunun ortadan kaldırılması mümkün olmasa bile en aza indirgenmesi için arazi prosedürleri geliştirilebilmektedir. Ayrıca bazı malzemeler, çakıl parçacıklarının segregasyonuna karşı diğerlerine göre daha duyarlıdır. Çakıl zemin karışımının birleştirilme derecesi ne kadar yüksek ise daha fazla miktarda çakıl tolere edilebilir. Çakıl parçacıklarının segregasyon olasılığı, da daha düşüktür (Shelly ve Daniel, 1993). Sonuçta, bir kil tabakasında, ne miktarda çakıla müsaade edileceği hakkındaki karar, verilen projenin özel şartlarına dayanmalıdır.

#### **2.2.6. Donma - çözülmenin permeabilite üzerindeki Etkisi**

Bir çok laboratuvar ve arazi çalışması, çöp deponi alanlarında tabaka ve örtülerin yapımı için kullanılan sıkıştırılmış killerin, donmaya ve çözülmeye maruz kaldığında kötü bir şekilde etkilendiğini göstermiştir (Zimmie ve LaPlante, 1990; Chamberlain ve ark., 1990; Wong ve Haug, 1991; Kim ve Daniel, 1992; Zimmie ve ark., 1992). Bu çalışmalar, donma - çözülme çevrimleri sırasında buz mercekleri çatlak ağlarıyla sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak permeabilite artmaktadır. Permeabilitenin bir yada birkaç kat büyüklüğünde artması, tek bir donma - çözülme çevrimi ve 3-5 arası çevrim sonrasında geçirimsizliğin 1-3 kat büyüklüğünde artması ile sonuçlanabilir (Benson ve Othman, 1993; Benson ve ark., 1995; Chamberlain ve ark., 1995).

ABD'nin kuzey bölümünde yer alan bazı eyaletler için çevresel düzenlemeler, zemin tabakalarının permeabiliteye etkisi sebebiyle don olayından korunması gerektiğini belirtmektedir. Genel bir koruyucu önlem, son örtünün hidrolik bariyeri üzerindeki koruyucu tabakanın kalınlığını artırmaktır ve böylece yerel donma penetrasyon derinliği geçilir.

### 2.2.6.1. Zeminin donması sırasında görülen olaylar

Zemin suyunun doğası ve dağılımı donduğu zaman oldukça değişir. Islak zemindeki sıcaklık  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düşer. su aşırı soğur ve buz kristalleri geniş boşluklarda oluşur. Su fazı, buza dönüştüğü zaman hegzagonal kristal yapısının gelişmesine bağlı olarak hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Kristaller, su elverdiği ve sıcaklık çekildiği sürece buz merceklere oluşturmak için büyürler. Buz merceklere kalınlığı ve boyutu, don oranı, sıcaklık gradyanı, basınç ve suyun mevcudiyeti gibi göreceli büyüklüklere bağlıdır (Penner, 1960). Büyüyen buz kristalleri, etrafındaki zemin parçacıkları ve diğerleriyle etkileşim içine girer (Andersland ve Anderson, 1978). Büyüyen buz merceklere bitişik bölgede, donmamış zeminden su, donma bölgesine çekilerek, büyük boşluk suyu emme kuvvetleri oluşur (Benson ve Othman, 1993; Williams, 1966; Konrad ve Morgenstern, 1980; Chamberlain ve Gow, 1979). 500 kPa büyüklüğünde, etkili boşluk suyu emme kuvvetleri gözlenmiştir (Chamberlain, 1981). Bu olay, büyüyen buz merceklere bitişik alanda aşırı yüksek etkili gerilimler oluşturur ve bu da kurumaya ve bölgedeki donmamış zeminin konsolidasyonuna sebep olur. Kuruma ve konsolidasyon, zemin yapısında değişiklikler yaratır. Bilhassa donma bölgesine dik büzülme çatlakları oluşur (Benson ve Othman, 1993; Chamberlain ve Gow, 1993). Don bölgesi, donmamış zemin kütesine doğru ilerlediği zaman bu çatlaklar buzla dolar ve buz merceklere ile buzla dolmuş çatlaklar tarafından sınırlanmış kümelerle, zemin kümelene bir yapı geliştirir (Othman, 1994).

Donmamış zeminden su akışı, öndeki buz tabakası tarafından kesildiği zaman bile buz, donmuş bölgede büyümeye devam eder. Bu görülür, çünkü; sıcaklık azaldığı zaman su ilerleyerek donar (Andersland ve Anderson, 1978). Zemin parçacıklarına bitişik bazı film suyu, çok düşük sıcaklıklarda bile donmamış şekilde kalır. Donma bölgesindeki bu donmamış haldeki suyun genişmesi, zeminin yapısını bozan bir baskı uygular (Andersland ve Anderson, 1978; Chamberlain, 1981). Sonuç olarak buz merceklere kalınlığı artar.

Zemin suyunun donması, zeminde çatlaklara ve diğer yapısal modifikasyonlara sebep olur. Bu çatlaklar ve diğer yapısal değişiklikler, çözülme

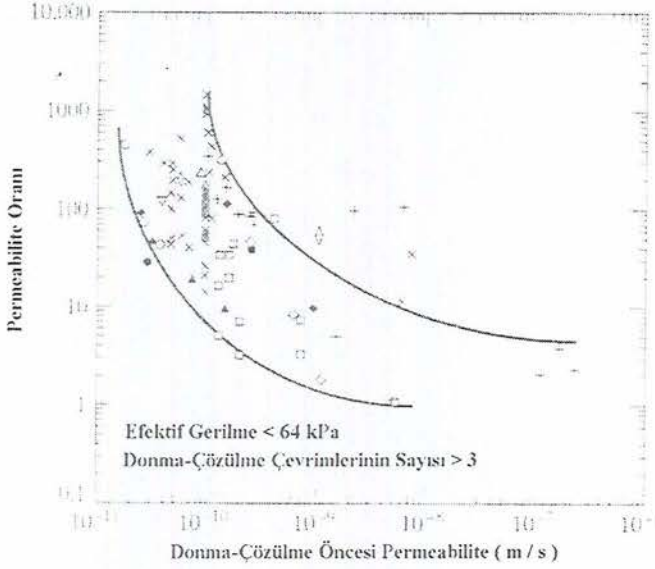
sonrasında çıplak gözle görülmeyebilir. Fakat taramalı elektron mikroskobu (SEM) büyütmesiyle gözlemlenmişlerdir (Hunsicker, 1987). Düşük büyütmede 0,5 mm'de yer almış ayrı çatlaklar kil zemin numunelerinde gözlemlenmiştir. Daha yüksek büyütmelelerde 0.005 mm gibi küçük boşluklar, donma işlemi sırasında oluşturulan kümeler içinde gözlemlenmiştir. Böylece donma, görülebilir makro yapı ve mikro yapıda değişikliklere sebep olur. Bununla birlikte makro yapıdaki değişiklikler, donma ve çözülme sonrasındaki killi zeminlerde görülen permeabilitedeki büyük artışların sebeplerine benzer.

Donma sırasında zeminde, oluşan çatlaklar ve boşluklar, zeminin toplam hacmi tarafından bölünmüş sıvı-geçirim boşluklarının, hacmi olarak ifade edilen efektif porozitesini değiştirir. Kim ve Daniel, (1992) donma - çözülme öncesi ve sonrasında sıkıştırılmış kil numunelerinin efektif porozitesini hesaplamak için izleyici deneyler kullanmışlardır. Kontrol numuneleri için 0,18 ve 0,22 aralığında ve donma çözülmenin 5 çevrimine maruz kalan numuneler için 0,23 ve 0,33 aralığında değişen efektif poroziteleri bulmuşlardır. Donma çözülme sonrası, zeminde görülen artan sıvı geçirim boşluklarının yereldiğini belirtmişlerdir. Bu da permeabilitenin artmasına sebep olmaktadır.

#### **2.2.6.2. Donma - çözülmenin permeabilite üzerindeki etkisi**

Çoğu araştırmacı, donma - çözülme olayının, sıkıştırılmış killerin permeabilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere laboratuvar çalışmaları yapmışlardır. Donma - çözülme olayından sonraki permeabilite değerinin, donma -çözülme olayından önceki permeabiliteye bölünmesi şeklinde ifade edilen permeabilite oranı, kullanılarak her bir çalışmada ölçülen permeabilitedeki değişim Şekil 2.30' da özetlenmektedir (Chamberlain ve ark., 1990). Grafik permeabilite oranını, başlangıç permeabilitesinin bir fonksiyonu olarak göstermektedir (donma öncesi permeabilite). Şekil 2.27'de gösterildiği gibi permeabilite oranı 1 ile 400 arasında değişmektedir. Oran genellikle, başlangıç permeabilitesi en düşük olduğu zaman, en yüksek değeri almaktadır ve başlangıç permeabilitesi arttıkça azalmaktadır.

Düşük permeabiliteli killi zeminler genellikle optimumun ıslak tarafındaki su muhtevasında sıkıştırılır. Bu durumda çok küçük daneli boşluk boyutuna sahip olan kısmen homojen kütle ve yoğunlukta sonuçlanan sıkıştırma sırasında toprakların yapısı kolaylıkla bozulur. İnce (belki de mikroskobik) boyuttaki boşluk, sıvının geçirimini sınırlar. Böylece donma sırasında oluşan büyük boşluklar ve çatlaklar, efektif boşluk boyutunu açıkça artırır. Sonuç olarak permeabilite istenmeyen bir şekilde artar.



Şekil 2.30. Birkaç laboratuvar çalışmasından elde edilen permeabilite oranına karşı donma çözülme öncesi permeabilite ilişkisi (Othman ve ark., 1994'ten itibaren değiştirilmiş)

Diğer taraftan başlangıç permeabilitesi kısmen yüksek olan numuneler genellikle, optimumun kuru tarafında yada düşük bir kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılır. Daha kuru kil agregaları, yüksek mukavemete sahiptir ve böylece sıkıştırma sırasında deformasyona daha dirençlidir. Sonuç olarak optimumun kuru tarafındaki sıkıştırma, yüksek permeabilite ve makroskopik boşlukların, heterojen bir ağı ile sonuçlanır (Lambe, 1962; Benson ve Daniel, 1990). Bu durumda donma çözülme, daha büyük agrega formasyonu ve muhtemelen çatlak formasyonunda bile sonuçlanabilir. Fakat donma sırasında oluşan boşlukların boyutu, donma öncesinde var olan boşlukların boyutundan olumsuz yönde farklılık taşımaz.

Böylece yüksek başlangıç permeabiliteli numuneler için permeabilite değişmemiş kalır yada donma - çözülme olayı sonrasında sadece hafif bir şekilde artar (Othman ve ark., 1994).

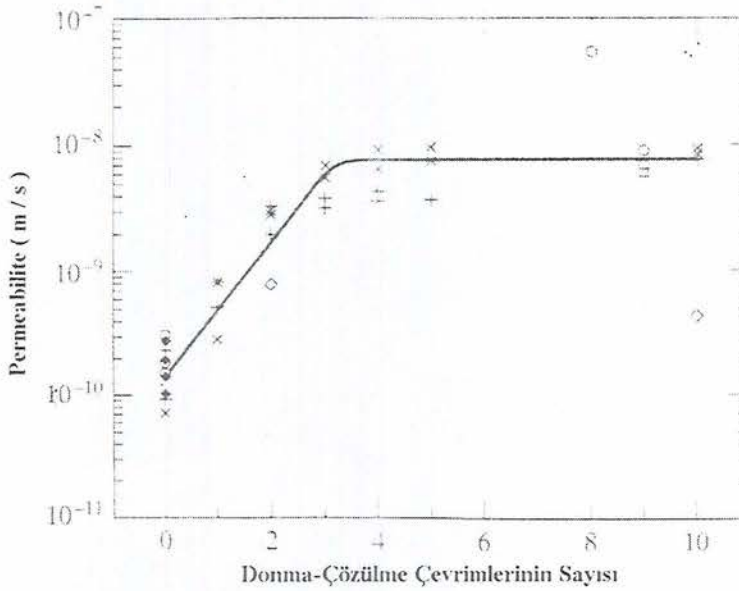
### 2.2.6.3. Donma - çözülme sırasında permeabiliteye etki eden faktörler

Laboratuar ve arazi çalışmaları, donma - çözülme çevrim sayısı, donma oranı ve gerilim durumunun, permeabilitedeki değişim üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu gösterir. Permeabilite donma - çözülme çevrimlerinin sayısı ve donma oranı arttığı zaman artar ve üzerindeki toprak basıncı azalır. Son sıcaklık, donma yönü ve dış kaynaklı sular gibi diğer faktörlerin, permeabilitede değişim üzerinde açık bir etkiye sahip olduğu görülmez.

- **Donma - çözülme çevrim sayısı :** Sıkıştırılmış bir kil tabakasında, donma - çözülme çevrim sayısı, yerel iklime bağlıdır. Sıcaklığın açıkça değiştiği bölgelerde, donma - çözülme çevrimi beklenebilir. Alternatif olarak kış sezonunun açık bir bölümü için sıcaklık, donma derecesi altında kalır. Zemin daha az donma - çözülme çevrim sayısına maruz kalacaktır. Çevrim sayısı ayrıca, bariyerin derinliğine bağlıdır. Bir çöp deponi alanı örtüsü gibi yüzeye yakın yerleştirilmiş bariyerler için zemin sıcaklığı, hava sıcaklığındaki değişikliklere daha duyarlıdır ve böylece daha çok sayıda donma - çözülme görülür. Zeminde daha derine inildikçe yüzeyde varolan sıcaklıktaki değişiklikler azalır ve böylece daha az sayıda çevrim görülür. Deneyler, permeabilitenin bir yada birkaç kat büyüklükte artmasının, donma çözülmenin ilk çevrimlerinde olduğunu gösterir. Şekil 2.31 ve permeabilitedeki çoğu değişiklikler ilk birkaç çevrim sırasında görülür. Permeabilitedeki artışların, 3-10 donma - çözülme çevrimi sonundaki artışları genellikle belirgin değildir (Chamberlain ve ark., 1990; Zimmie ve La Plante, 1990; Wong ve Haug, 1991; Benson ve Othman, 1993; Benson ve ark., 1995; Chamberlain ve ark., 1995). Permeabilitedeki en belirgin artış, ilk çevrimde görülür. Çünkü zemin yapısındaki köklü değişiklik, başlangıçtaki donma sırasında oluşur. Donma - çözülmenin ilk çevrimi sırasında oluşan çatlaklar ağı, zeminin yapısında en büyük

değişikliğe sebep olur. İzleyen çevrimler sırasında, daha çok sayıda çatlak oluşur fakat bu ilave çatlaklar permeabilite üzerinde daha düşük etkiye sahiptir. Ayrıca bir noktada zemin öylesine kümelenmiş hale gelir ki daha

- **Donma Oranı :** Donma oranı, donma kabarmasının oranını ve büyüklüğünü etkiler. Donmanın büyük oranlarında daha büyük boşluk suyu emme kuvvetleri gelişir ve daha çok sayıda buz merceği oluşur. Othman ve Benson, (1992) üç boyutlu donma - çözölmeye maruz kalan sıkıştırılmış killerin permeabilitesi üzerindeki donma oranının, bu etkisini araştırmışlardır.

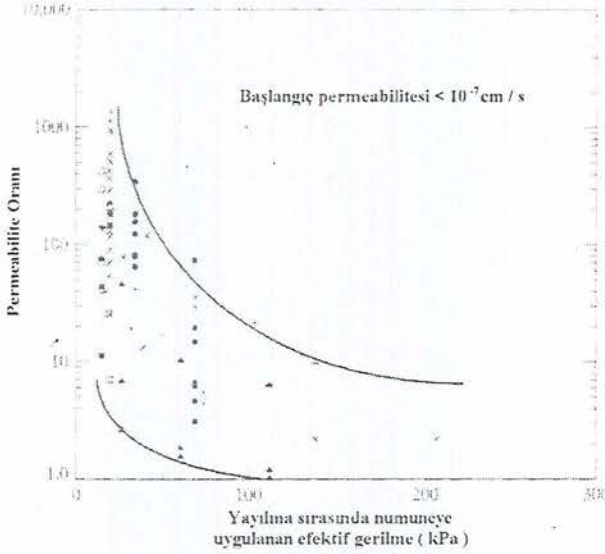


Şekil 2.31. Laboratuarda ve arazide donmuş - çözölmüş zeminlerde ölçölmüş permeabilite değerleri (Benson ve ark., 1995)

Free-standing metodunu kullanmışlar ve numuneyi çevreleyen fiberglas yalıtımın kalınlığını değiştirerek donma oranını kontrol etmişlerdir. Yapılan çalışmada numuneler,  $2,0 \times 10^{-6}$  m/s (hızlı),  $4,0 \times 10^{-7}$  m/s (orta hızda), ve  $2,6 \times 10^{-7}$  m/s (yavaş) değerlerinde donma oranlarına maruz kalmışlardır. Donma oranı, donma ön dolaşımalarının bir noktanın sıcaklığını  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den, soğuk çevrenin istenen sıcaklığına değiştirmek için geçen zamana bölündüğü en uzak noktaya mesafesi olarak ifade edilmiştir (Othman ve ark., 1994). Hızlı donma sırasındaki permeabilite, en büyükte numunelerin incelenmesi, yavaş donma sırasında görölen daha yüksek

sayıdaki buz mercikleri formasyonunda hızlı donmanın sonuçlandığını göstermiştir. Permeabilitenin yükselmeye devam edeceği yada donma oranının maksimum değerini ötesine geçeceği bildirilmektedir ( Othman ve Benson, 1992).

- **Gerilim Hali :** Donma - çözülme sonrasındaki tabaka üzerindeki zemin yükünden kaynaklanan basınç. Donma - çözülme tarafından yaratılan permeabilite artışları, tabakaya yüksek toprak yükü basıncı uygulanırsa tersine dönebilir. Toprak yükü basıncı, çatlakların ve boşlukların boyutlarını azaltır. Böylece permeabilite azalır. Şekil 2.32, 21 adet kilin permeabilitesi üzerindeki donma - çözülme sonrasında uygulanan etkin gerilimin etkisini göstermektedir. Etkin gerilim arttığı zaman permeabilite oranı belirgin olarak azalmaktadır. Bununla birlikte 200 kPa'dan çok büyük olan gerilimler, permeabilite oranlarını bire ulaştırmak için gereklidir.



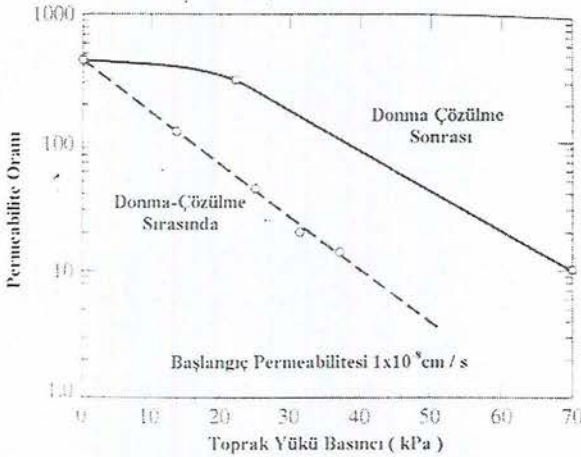
Şekil 2.32. Yayılma sırasında uygulanan efektif gerilmenin 21 kil zeminine ait permeabilite oranı üzerindeki etkinliği ( Othman ve ark., 1994 den itibaren değiştirilmiş)

Efektif gerilme ve permeabilite duyarlılığı önemli dallanmalara sahiptir. Kentsel ve tehlikeli atık çöp deponi alanlarında kullanılan sıkıştırılmış kil tabakaları için donma - çözülme olayının, tabaka için yeterli derinlik sağlandığında, permeabilitede sadece anlık artışlara yol açtığı ortaya çıkmıştır.

Bununla birlikte son örtü veya yüzeye yakın bölgeler gibi toprak yükü basıncının düşük olduğu yerlerde, permeabilitedeki değişiklikler kalıcı olabilir (Othman ve ark., 1994).

Donma - çözülme olayı sırasındaki toprak yükü basıncı, Donma - çözülme olayı sırasındaki uygulanan toprak yükü basıncının üç bölümden oluşan etkisi vardır. İlki, formasyonu ve buz merccklerinin büyümesini engeller. Çünkü büyüyen buz merccklerinin aşağısındaki emiş kuvvetlerini azaltır (Konrad ve Morgenstern, 1992). Toprak yükü basıncının ikinci etkisi, donmamış zeminden donmuş zemini ayıran, kısmi donmuş bölgenin permeabilitesini azaltmasıdır (Penner ve Ueda, 1977; Konrad ve Morgenstern, 1982). Bu faktörlerin her ikisi de donmuş zemine suyun geçişini engeller. Üçüncü etkisi, toprak yükü basıncı uygulandığında çözülme sırasındaki donma - çözülme sıkışması sırasında geniş çatlaklar ve boşluklar oluşmasıdır. Böylece bir sonraki donma çevrimi sırasında suyun ilk donmaya hareketi sınırlanmıştır.

Othman ve Benson (1993) donma çözülme sırasında uygulanan toprak yükü basıncının, sıkıştırılmış kilin permeabilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Numuneleri farklı hücre basınçları altında esnek-duvarlı permeabilite setinde üç boyutlu olarak dondurmuşlardır. Şekil 2.33'de donma-çözülme sonrasındaki permeabilitenin, sıfır basınçta en yüksek olduğunu ve artan basınçla belirgin bir şekilde azaldığını bulmuşlardır.



Şekil 2.33. Bir Wisconsin Kili'nin permeabilitesinde, donma - çözülme sırasında ve sonrasında toprak yükü basıncının etkinliği (Othman ve ark., 1994)

Bununla birlikte donma sırasında uygulanan basınç tarafından, permeabilitedeki azalma, büyüktür permeabilitedeki indirgeme, basınç donma sonrasında da uygulanırsa benzer sonuçlar Chamberlain ve ark., (1990) tarafından da elde edilmiştir.

### 3. KULLANILAN MALZEMELER

#### 3.1. Sepiyolit

##### 3.1.1. Giriş

Sepiyolit fillosilikatlar (tabakalı silikatlar) grubuna mensup magnezyum hidrosilikattan ibaret doğal, lifli bir kil mineralidir.  $Si_{12}Mg_8O_{30}(OH)_4(H_2O)_4 \cdot 8H_2O$  formülü ile ifade edilir. Tetrahedral ve oktahedral oksit tabakalarının istiflenmesi sonucunda oluşmuş lifsi bir yapısı vardır. Lif eksenine boyunca uzanan kanal boşluklarına sahiptir (Vicente Rodriguez ve ark., 1994). Sepiyolit basit olarak sulu magnezyum silikat bileşimli bir kil minerali olarak ifade edilebilir. Tabiatla ortorombik yapıda kristalleşen sepiyolit genel olarak iki tip oluşumu görülmektedir. Birinci tip sepiyolit oluşumu, ülkemizde özellikle Eskişehir yöresinde ve Konya-Yunak civarında bulunan lületaşı'dır. Diğer sepiyolit oluşumu ise, "sanayi sepiyoliti" veya "tabakalı sepiyolit" olarak da adlandırılan "sedimanter sepiyolit" lerdir. Bu tip sepiyolite daha çok Eskişehir-Sivrihisar ve Mihaliççık-Yunussemre yörelerinde rastlanmaktadır. Ayrıca volkanosedimanter kökenli malzemelerin (vitrik tuf-kül tufü) diyajenetik süreçler içerisinde, yeraltı ve yerüstü sularının da etkisi ile değişimi sonucu oluşmuş sepiyolit ve özellikle de Eskişehir-Mihaliççık-Koyunağılı yörelerinde yataklanmalar gösteren Na-sepiyolit (loughlinit)'de önemli bir yer tutar. Ayrıca ekonomik yataklanmalar oluşturmamasına rağmen, dünyada ve ülkemizde tanımlanmış pek çok farklı oluşum şekillerine sahip sepiyolit türleri mevcuttur. Bunlardan bazıları; Fe-sepiyolit, ksilit, Ni-sepiyolit, Mn-sepiyolit, Al-sepiyolit ve Bolu- Kıbrısık, Çankırı-Orta yörelerinde görülen volkanosedimanter malzemelerin hidrotermal alterasyon ürünü olan Al, Fe-sepiyolitlerdir (DPT, 1996).

Maden Tetkik Arama Enstitüsü (M.T.A)'nın değişik projeler kapsamında yaptığı çalışmalarda, İspanya'dan sonra dünyanın en büyük sepiyolit rezervlerinin Türkiye'de bulunduğu tespit edilmiştir. Türkiye'nin 100 milyon tonu aşan sedimanter sepiyolit rezervlerinden Sivrihisar'da bulunan yataklara ait bir fotoğraf EK-1'de verilmiştir. MTA'nın çalışmaları üç ayrı kalitede sedimanter kökenli

sepiyolit varlığını göstermektedir. Birinci kalite sepiyolit, sepiyolit içeriği %90'ın üzerindedir. İkinci kalite sepiyolit, sepiyolit içeriği %70 ile %89 aralığında değişmektedir. Üçüncü kalite sepiyolit ise %50 ile %69 aralığında değişmektedir. Yine yapılan çalışmalarda Türk sepiyolitinin, yüksek kalitesi ve lif boylarının kısa olması (2-5  $\mu$ ), dolayısıyla kanserojen etkisinin olmaması nedeniyle, emsallerine nazaran daha avantajlı olduğu belirtilmiştir (Sabah ve Çelik, 1998).

Günümüzde sepiyolit, kristal yapılarındaki süreksizliklere bağlı kanallar tarafından sağlanan yüksek özgül yüzey alanları, yüzey aktivitesi, kristal morfolojisi ve kompozisyonu, porozitesi, lifsi yapısı, düşük konsantrasyonlarda yüksek viskoziteli duraylı süspansiyonlar oluşturması ve bunun gibi birçok teknolojik uygulamalara esas teşkil eden sorptif, katalitik ve reolojik özelliklerinden dolayı sayısız kullanım alanına sahip bir kil mineralidir. Sepiyolit kullanımı, ilaç sanayinden seramik sektörüne, tarım sektöründen hayvan ve besicilik sektörüne, katalitik uygulamalardan lif takviyeli çimento üretimine, kauçuk sanayinden biyoreaktörlere, endüstriyel atık suların arıtılmasından atık baca gazlarının temizlenmesine kadar bir çok alanda denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Zeolitik ve adsorbe su molekülleri, ısı derecesi yükseldikçe kaybedilir. Sepiyolit ayrıca asitle muameleye karşı da duyarlıdır. Asitle muamele sonucunda kristal yapısı kısmen tahrip olabilir. Hem ısı hem de asit muameleleri, sepiyolit yüzey özellikleri ve porozitesini değiştirebilir. Böylece mineralin en önemli özelliklerinden (örneğin absorptif, kolloidal ve katalitik özellikler) bazılarını bu işlemlerle değiştirmek mümkün olabilmektedir (Sabah ve Çelik, 1998).

### 3.1.2. Tanımı ve oluşumu

Sepiyolit, magnezyum hidrosilikat ( $\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )' tan ibaret Sepiyolit-Paligorskit grubuna ait doğal bir kil mineralidir (Nagy ve Bradley, 1955). Sepiyolit tetrahedral ve oktahedral oksit tabakalarının istiflenmesiyle oluşan lifsi bir yapısı vardır. Bu yapı lif boyunca devam eden kanal boşluklarına sahiptir (Vicente Rodriguez, ve ark., 1994). Sepiyolit tabiatta iki farklı polifonik

yapıda çökelmektedir. Bunların birincisi; şekilsiz, sıkı halde ve masif yumrular şeklinde olan sepiyolittir. Sanayi sepiyoliti olarak bilinen ve süs eşyası yapımına uygun olmayan  $\beta$ -sepiyolit, tabakalı bir sepiyolit türü olarak, oluşumu, bileşimi, özellikleri ve kullanım alanları itibarıyla  $\alpha$ -sepiyolitten ayrılır. Ülkemizde sanayi sepiyolitine, daha çok Eskişehir-Sivrihisar ve Yunusemre, Çanakkale, Bursa, Kütahya ve Isparta yörelerinde, rastlanmaktadır. Özellikle Eskişehir yöresine özgü bir sepiyolit türü olan ve Konya-Yunak civarında da bulunan lületaşı,  $\alpha$ -sepiyolitin kullanımına ilişkin bir adlandırma şeklidir. Diğer bir ifadeyle, pratik ve ticari anlamda işlenmeğe elverişli, yumru biçimli  $\alpha$ -sepiyolit türüne lületaşı adı verilmektedir (Sarız ve Ayverdi, 1991). Ülkemizde bulunan bazı lületaşı ve sedimanter sepiyolitler ile dünyadaki bazı sepiyolitlerin kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1’de görülmektedir (İrkeç, 1995; Jones ve Galan, 1988). Sepiyolit serpantinlerin ayrışması ile ortaya çıkan ikincil bir mineraldir ve oluşumu için özel şartlar gereklidir (Temur, 1994). Sepiyolitle ilgili olarak yapılan çalışmalar ve sepiyolitin sentezini amaçlayan araştırmalar, sepiyolitin oluşması için gerekli olan pH değerinin 8-8.5 olduğunu göstermiştir (Yeniyol, 1992).

**Çizelge 3.1.** Eskişehir - Sepetçi (Sarıkaya ve ark., 1985 ); 2. Konya (Stoessel ve Hay, 1978 ); 3. Eskişehir - Sivrihisar (ITIT, 1993 ); 4. İspanya – Vallecas (Singer ve Galan, 1984); 5. Japonya – Kuzuu District (Imsi, ve ark., 1969 ); 6. Madagaskar (Caillere, 1951 ); 7. Bolu - Kıbrısık (İrkeç, 1995 ); 8. Avustralya - Tintinara (Rogers, ve ark., 1956 ); 9. USA-Wyoming (Fahey, ve ark., 1960)

Bileşim	Lületaşı	Sedimanter sepiyolit (Sanayi sepiyoliti)					Hidrotermal sepiyolit	Alüminyumlu sepiyolit	Laflinit
		1	2	3	4	5			
(%)									
SiO <sub>2</sub>	52,9	53,7	55,97	60,6	52,05	52,5	57	52,43	50,8
MgO	25,89	23,31	22,81	22,45	23,74	21,31	10,1	15,08	16,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	1,15	1,56	1,73	1,03	0,6	8,5	7,05	0,66
Na <sub>2</sub> O	-	0,67	0,12	0,16	-	-	3,7	-	8,16
K <sub>2</sub> O	-	0,61	0,27	0,58	-	-	1,2	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36	0,64	0,77	0,62	0,04	2,99	2,5	2,24	1,05
FeO		0,02	-		0,01	0,7	-	2,4	1,51
MnO	-	-	0,02	-	-	-	0,2	-	
TiO <sub>2</sub>	-	-	0,12	-			0,3	-	-
CaO	0,01	0,03	0,57	0,4	0,51	0,47	2	-	0,2
A.Z.	20,55	19,59	17,75	13,22	21,71	21,27	13,35	19,97	22,6

Sepiyolit oluşumu ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmalarda farklı oluşum modelleri ileri sürülmüştür. Bunlardan diyajenetik yer değiştirme diye adlandırılan bir modelde; serpantinleşmiş ultrabazik kayaların, muhtemelen volkanik faaliyetlerden kaynaklanarak açığa çıkan termal sulardan etkilenmesi veya tortullaşma havzasındaki çakıl ve bloklarla birlikte bulunan manyezit parçalarının, diyajenetik evrede yeraltı sularına bağlı gelişen silisçe zengin alkalin ortam şartlarındaki yan kayalardan etkilenerek oluştuğu görüşü kabul edilmektedir (Sabah ve Çelik, 1998). Şekil 3.1’de sepiyolit bu görüşe göre oluşumunu gösteren bir çizim görülmektedir (Ece ve Çoban, 1994).

Buna göre;

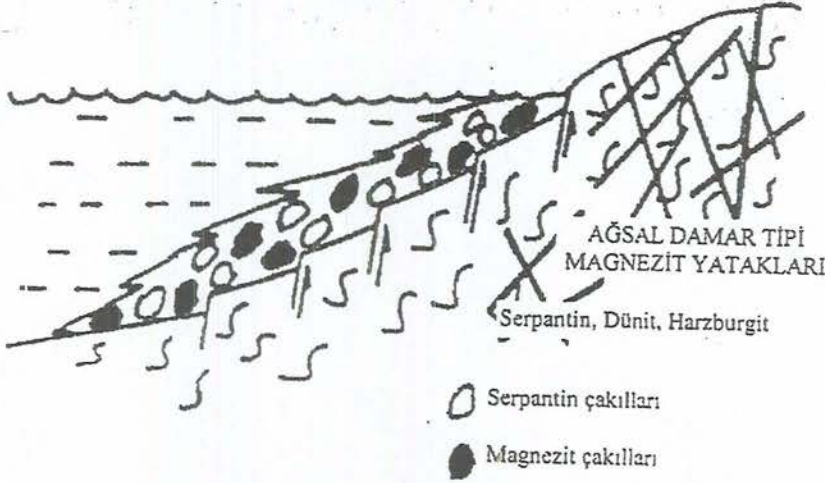


pH>8

Manyezit

Sepiyolit

OLİGOSEN (?) - MİYOSEN



Şekil 3.1. Diyajenetik yer değiştirme modeline göre sepiyolit oluşumu (Ece ve Çoban, 1994)

Doğrudan çökeltme modeli olarak bilinen ve özellikle tabakalı yataklanma gösteren sepiyolitler için geçerli olan diğer bir oluşum modelinde ise; sığ denizel çökeller, ekonomik boyutlu yataklar için ise daha ziyade kapalı göl havzaları, silisçe zengin alkali ortam ve şartlar, yağışlı kurak veya yarı kurak iklim ve benzeri ortamlar, bir paleoiklim indikatörü olan sepiyolit çöktüğü ortamlar

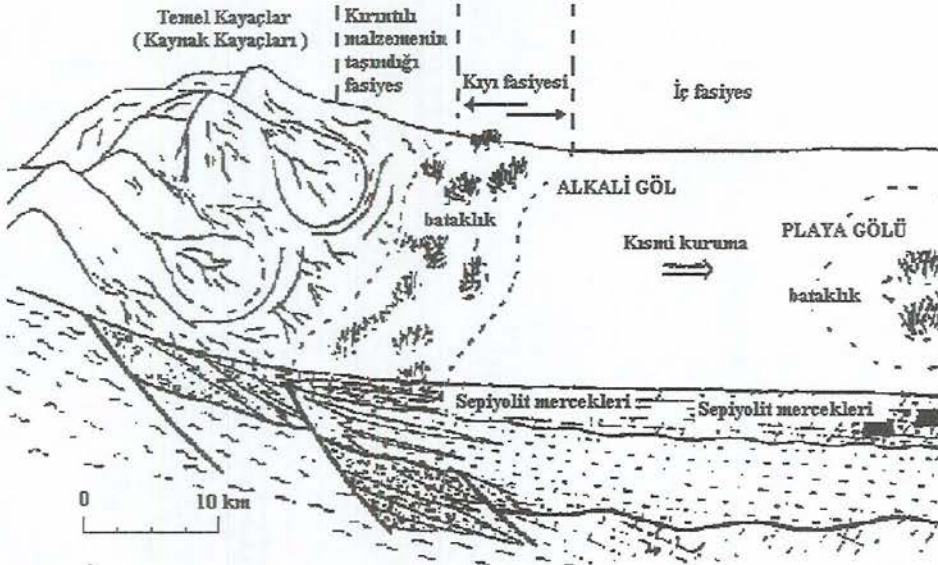
olarak belirtilmiştir. Bunların bileşimlerine az çok dolomit de girebilmektedir (Sabah ve Çelik, 1998).

Buna göre;



$\text{pH} > 8,5$

Bu tür havzalarda sık sık fasiyes değişikliği meydana geldiğinden dolayı yatakların kalitesi, çökeltme havzasını çevreleyen kayaçların petrografik ve kimyasal durumu ile yakından ilgilidir. Bunun dışında çökeltme esnasındaki tektonik hareketlerin devamlılığı da önemlidir. Şekil 3.2' de playa gölleri (dolomit gölleri) ve dolomit-sepiyolit birim çökellerinin oluştuğu alkali göller ilişkileri görülmektedir. Birbirlerine bağlantılı, birbirlerinden bağımsız, sığ ve geniş olabilen bu alkali göller, çoğunlukla taze su girişlerine açıktır. Bu ortama özellikle kuzeydeki mermer, yer yer dolomitik, kristalize kireçtaşları ile ofiyolitik serilerden yaygın  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{Si}^{+4}$  taşınmıştır (Gençoğlu ve İrkeç, 1994).



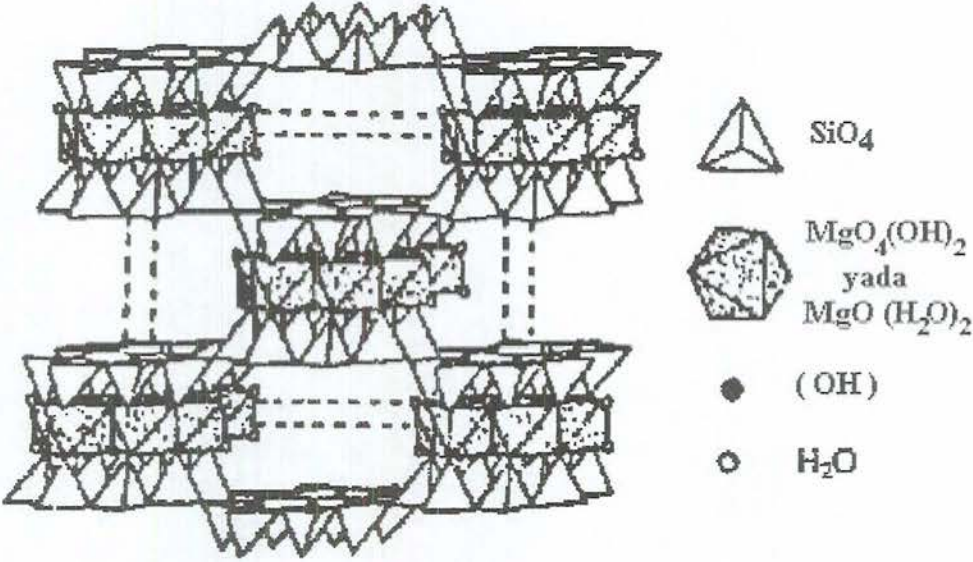
Şekil 3.2. Dolomit-sepiyolit birim çökellerinin fasiyes gelişimleri (Gençoğlu ve İrkeç, 1994)

### 3.1.3. Kristal yapısı

Sepiyolit, kristalize olmuş kil mineralleri arasında önemli bir yere sahip olan fillosilikatlar grubuna dahil bir kil mineralidir. Ancak sahip olduğu amfibol tipi

çift zincir yapısının meydana getirdiği zincir kafes tipi (lifsı yapı) nedeniyle, yine bu grup içinde yer alan, tabaka (düzlem) kafes tipi minerallerden ayrılmaktadır.

Sepiyolit, taban oksijen düzlemlerinden aşağı veya yukarı doğrultuda düzenlenmiş Si-O tetrahedronları ile brusit benzeri oktahedral (sekiz yüzlü) tabakalardan oluşan bir kristal yapısına sahiptir. Bu yapı şekil 3.3'de görülmektedir.



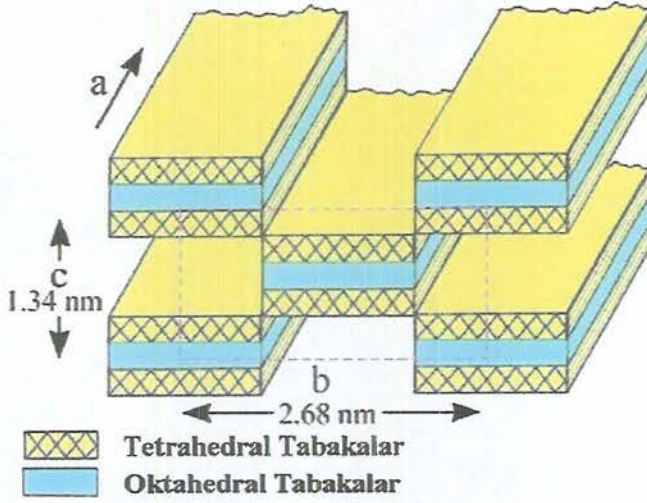
Şekil 3.3. Sepiyolit kristalinin şematik görünüşü (Jones ve Galan, 1988)

Burada, tepe oksijenleri aynı yönde olan tetrahedronlar, X-eksenine paralel olarak uzanan şeritleri meydana getirirken, zıt yönde olanları da oktahedral katyonlara bağlanarak lif doğrultusunda (X-ekseni boyunca) sürekli, dik doğrultuda (Y-ekseni boyunca) sınırlı boyutta 2:1 katmanlı yapı oluştururlar. Şeritler sepiyolitte üç, paligorskitte ise iki piroksen zincirinin birbirine bağlanmasıyla oluşan genişliklere sahiptirler. Şeritler arasındaki dikdörtgen kanallarda, Ca ve Mg iyonları ile değişen miktarlarda zeolitik su bulunur. Yapı formülünde (OH)<sub>2</sub> olarak gösterilen su molekülleri ise şerit kenarlarındaki oktahedral Mg'a koordine olurlar (DPT, 1996).

Sepiyolit, Fersman (1913)'a göre iki değişik poliformik yapıda çökelmektedir. Bunlardan birincisi; uzun lif demetleri şeklinde bulunan  $\alpha$ - ya da parasepiyolit, ikincisi; küçük, yassı, yuvarlak partiküller veya şekilsiz agregalar halinde oluşan  $\beta$ -sepiyolit dir (Alvarez, 1984). Tabiatta ortorombik yapıda

kristalleşen sepiyoliti bir kil minerali olarak tanımlayan Fersman (1913)'dan sonra onun yapısını belirlemeye yönelik ilk çalışmalar, sırasıyla Migeon (1936), Longchambon (1937) ve Caillere (1951) tarafından yapılmış, bunları takiben Nagy ve Bradley (1955), iki piroksen zinciriyle bir amfibol zincir oluşturacak şekilde bağlanmış ekstra tetrahedrler silisin her bir yüzeye düzenli aralıklarla eklenmesinden meydana gelen ilk yapısal modeli oluşturmuşlardır. Kısa bir süre sonra Brauner ve Preisinger (1956), üç piroksen zincirinin birleşerek iki amfibol zinciri oluşturduğu modeli geliştirmişlerdir. Bu iki model, kristal boyutu açısından aynı olmasına karşılık, oktahedral katyon sayısı açısından farklılık taşımaktadır. Buna göre katyon sayısı Brauner ve Preisinger modelinde 8, Nagy ve Bradley modelinde ise 9'dur. Bunun yanında, Brauner ve Preisinger modelinde hidroksil sayısı altıya karşı dört, zeolitik su molekülü sayısı da sekize karşılık altıdır. Buna göre sepiyolitin lifli yapısı, talk ve benzeri zincirlerden kaynaklanmakta olup, iki tabaka silika tetrahedral birimi, oksijen atomları vasıtasıyla, merkezi olarak bulunan bir magnezyumlu oktahedral tabakaya bağlanmaktadır. Böylece tetrahedral silika tabakalar süreklilik gösterirken, her altı tetrahedral birimden sonra bu tabakaların tepe oluşturan yönelimleri tersine dönmektedir. Bu dizilim, lif eksenini boyunca kanal yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Su ve diğer sıvı ve gazların absorp ya da adsorplanmasına uygun olan bu kanalların kesiti  $3.6 \times 10.6 \text{ \AA}$ 'dur (Alvarez, 1984).

Brindley ve Pedro (1972) ise, fillosilikat mineral grubunun tanımına uygun olarak  $T_2O_5$  (T= Si, Al, Be,...) bileşimli, iki yönlü sürekli bir tetrahedral tabaka ve buna karşılık diğer tabaka silikatlarından farklı süreksiz oktahedral tabakalardan oluşan bir yapıdan bahsetmişlerdir. Şekil 3.4'de Bu yapıyla ilgili Martin ve ark., (1971)'den sonra yapılan düzenleme görülmektedir (http-1). Ayrıca Brindley ve Pedro (1972)'e göre bu minerallerin kristal yapısı, 2:1 fillosilikat yapısına ait zincirlerin birbirlerine bağlanmasından meydana gelir. Her bir zincir, bir diğerine ters ardalanmalı  $SiO_4$  tetrahedronları vasıtasıyla Si-O-Si bağları ile tutturulmuştur. Zincir şeklindeki yapı, X-eksenine paralel uzanır ve Y-ekseni boyunca genişliği, sepiyolitte üç adet bağlı piroksen tipi zincir genişliği kadardır.

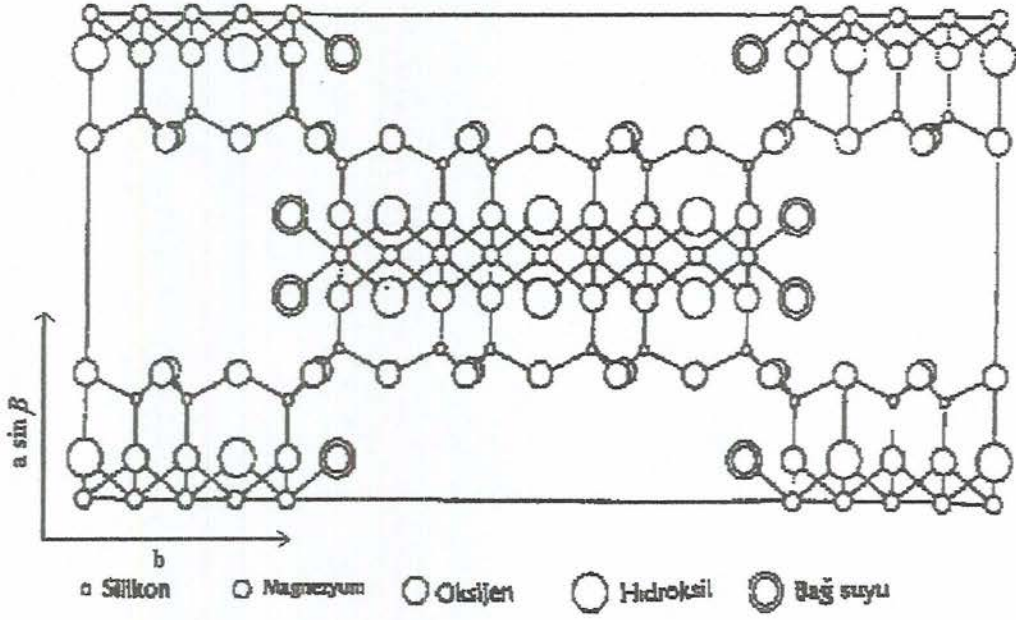


Şekil 3.4. Tetrahedral ve oktahedral tabakaların dizilişi (Martin ve ark., 1971'den sonra) (http-1)

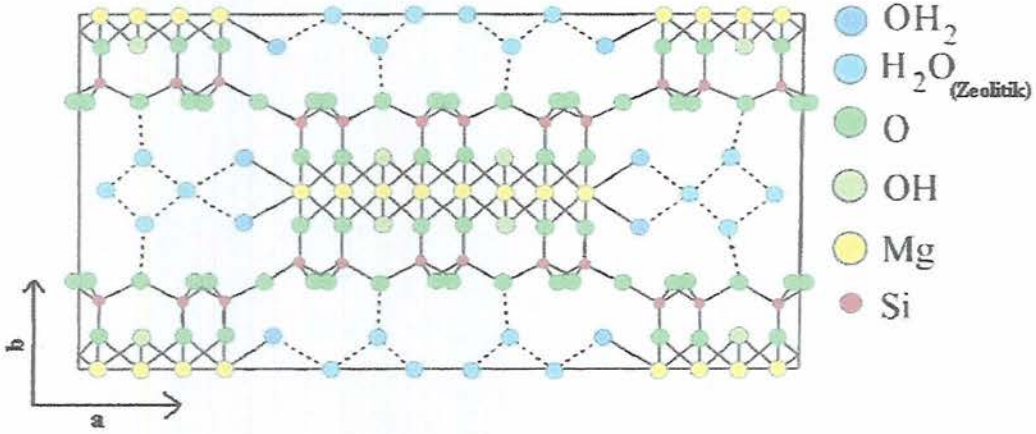
Buna göre, 2:1 tabaka yapısı X-ekseni boyunca sürekli, buna karşılık Y-ekseni boyunca kesiklidir (Jones ve Galan, 1988). Martin Vivaldi ve Cano-Ruiz (1956)'e göre, paligorskit ve sepiyolit mineralleri dioktahedral ve trioktahedral mineraller arasında geçiş sağlamakta ve ara üyeler lifsi bir yapıya sahip bulunmaktadır. Zincir yapısındaki tabakalı (düzlemsel) yapıdan lifsi yapıya geçiş, yapısal boşlukların sayısının artışına bağlıdır. Oktahedral boşluk sayısı 1/9 olduğunda sepiyolit yapısı; 1/5 olduğunda ise paligorskit yapısı ortaya çıkar. Sepiyolitin 001 birim hücre yüzeyine paralel projeksiyonu (Nagy ve Bradley, 1955) Şekil 3.5'de, Şekil 3.6'de ise Brauner ve Preisinger, (1956)'a ait sepiyolitin 001 birim hücre yüzeyine paralel yapısal şemasının Bailey (1980) tarafından değiştirilmiş hali bulunmaktadır (http-2); Çizelge 3.2'de de sepiyolite ait bazı kristallografik veriler verilmiştir (Sabah ve Çelik, 1998).

Çizelge 3.2. Sepiyolite ait bazı kristallografik veriler (Sabah ve Çelik, 1998)

KAYNAK	A	b	c veya c sinβ	β	Uzay Grubu
Nagy ve Bradley (1955)	5.30	27.00	13.40	?	A2/m
Brauner ve Preisinger (1956)	5.28	26.80	13.40	90°	Pnan
Brindley (1959)	5.25	26.96	13.50	90°	-
Zvyagin, ve ark. (1963)	5.24	27.20	13.40	90°	Pnan
Bailey (1980)	5.28	26.95	13.37	90°	Pnan
Galan (yayınlanmamış)	5.23	26.77	13.43	90°	Pnan



Şekil 3.5. Sepiyolit'in 001 birim hücre yüzeyine paralel yapısal şeması (Nagy ve Bradley, 1955)



Şekil 3.6. Brauner ve Preisinger, (1956)'a ait sepiyolit'in 001 birim hücre yüzeyine paralel yapısal şemasının Bailey (1980) tarafından değiştirilmiş hali (http-2)

Sepiyolit'in yapısında değişik kimyasal konumlarda olmak üzere, mevcut dört çeşit su molekülü tanımlanmıştır. Bunlar :

- **Higroskopik su** : Sepiyolit yüzeyine adsorplanmış su molekülü.  
(kaba nem)
- **Zeolitik su** : Kendi aralarında ve bağlı su molekülleri ile hidrojen bağı yaparak kanal içlerinde veya yüzeyde yerleşmiş su molekülü.

- **Bağıl su :** Talk benzeri zincirlerin kenarlarında bulunan ve yapıdaki (kristal suyu) oktahedral tabakanın uç magnezyum koordinasyonunda yer alan su molekülü.
- **Hidroksil suyu :** Yapıdaki oktahedral tabakanın ortasında magnezyum (bünye suyu) koordinasyonunda yer alan hidroksil gruplarının bozunması sonucu oluşan su molekülü.

Nagy ve Bradley (1955) modeline göre sepiyolitın yarım hücre formülü :



Brauner ve Preisinger (1956) modeline göre formül :



Çeşitli sepiyolitler için hesaplanmış olan birçok kimyasal formül, tetrahedral tabakada  $\text{Si}^{+4}$  'in,  $\text{Al}^{+3}$  ve  $\text{Fe}^{+3}$  tarafından az miktarda ornatıldığını göstermektedir. Magnezyum ise, oktahedral  $\text{Fe}^{+3}$  pozisyonların %90 ile %100'ünü doldurmaktadır. Brauner ve Preisinger analiz sonuçlarına göre katyonların yaklaşık 8'i oktehedrali doldurur; oysa Nagy ve Bradley modeline göre 9 pozisyon doldurulmaktadır (Weaver ve Pollard, 1973).

Her ne kadar magnezyum sepiyolit en yaygın bir tür olsa da bunun diğer türleri de belirlenmiştir. Rogers ve ark. (1956), oktahedral pozisyonların %19'unun  $\text{Al}^{+3}$  ile doldurulmuş bulunduğu alüminyumlu sepiyolit tanımlamışlardır (Weaver ve Pollard, 1973). Xylotile (Fe-sepiyolit)' de  $\text{Si}^{+4}$  'in bir kısmı  $\text{Fe}^{+3}$  ile yer değiştirir. Bu esnada oluşan elektriksel yük kaybı  $\text{Mg}^{+2}$ 'nin bir kısmının tetrahedral tabakadaki  $\text{Fe}^{+3}$  ile yer değiştirmesiyle dengelenmektedir (Alvarez, 1984; Calilere ve ark., 1948). Nikelli sepiyolit veya falkondoit, oktahedral tabakada %9.78  $\text{NiO}_2$  içermektedir. Ayrıca sodyumlu sepiyolit olan laflinit de ilk olarak Fahey ve Axelrod (1948) tarafından tanımlanmıştır. Echle (1978), laflinitte, sepiyolitın yapısındaki genel Mg' nin yerini yapının kanalları içindeki suda bulunan 2 Na iyonunun aldığını göstermiştir. Fahey ve arkadaşları (1960), yaptıkları X-Ray analizlerinde, laflinitin sepiyolite çok benzediğini tespit etmişlerdir (Sabah ve Çelik, 1998).

Türkiye'de şimdiye kadar tanımlanmış farklı türler; Eskişehir-Mihalıççık-Killik mevkiindeki laflinit ile Ankara-Beyazarı-Karaşar ve Uşakgöl Yaylası mevkiindeki Al-Fe sepiyolit oluşumlarıdır (İRKEÇ, 1995).

- Sepiyolitın teorik SiO<sub>2</sub>/MgO oranı 2,22 olup,  
SiO<sub>2</sub> = %55,60 ve MgO = %24,99'dur.
- Susuz bazda bu oranlar,  
SiO<sub>2</sub> = %61,70 ve MgO = %27,60'dır.
- Genelde ise,  
SiO<sub>2</sub> = %53,90 ±1,9 ve MgO %21-25  
arasında değişmektedir. Sepiyolitın katyon değişim kapasitesi (KDK)'nin belirlenmesi ile ilgili olarak yapılan bazı çalışmalarda elde edilen değerler çizelge 3.3'de verilmektedir (Sabah ve Çelik, 1998).

Çizelge 3.3. Sepiyolite ait bazı katyon değişim kapasitesi (KDK) değerleri (Sabah ve Çelik, 1998)

Araştırmacı	KDK ( meq / 100g )
Grim (1968)	3 - 1
Weaver ve Pollard (1973)	20 - 45
Otsuka (1973)	31,6
Galan (1979)	26
Caillere (1982)	20 - 30

Araştırmacılar tarafından elde edilen bu değişik veriler, farklı sepiyolitlerin değişen kristal kompozisyonlarına bağlı olabilir. Katyon değişim kapasitesi, Si<sup>+4</sup>'in üç değerlikli katyonlarla yer değiştirmesi sonucu açığa çıkan ve büyük ölçüde kristal içi yer değiştirmelerle dengelenmeye çalışılan elektriksel yükün karşılanması ihtiyacına ve lif kenarlarındaki kırılmış bağların varlığına dayalıdır. Söz konusu kırılmış kimyasal bağlar, özellikle daha iyi kristalin formlar gösteren sepiyolitlerde, katyon değişim kapasitesinin en önemli etkenidir (İrkeç, 1995; Grim, 1968). Sepiyolitın ve diğer kil minerallerinin nötr ortamda belirlenen KDK değerleri Çizelge 3 .4'de görölmektedir (Çokça, 1993; Breck, 1974).

**Çizelge 3.4.** Tipik kil minerallerinin pH=7'deki KDK değerleri (Çokça, 1993; Breck, 1974)

Kil Mineralleri	Kasyon Değişim Kapasitesi Sınırları (meq/100g)
Montmorillonit (Smektit)	80-150
Vermikülit	100-150
Zeolit	170-260
Sepiyolit-Atapulgit	20-30
Halosit.2H <sub>2</sub> O	5-10
Halosit.4H <sub>2</sub> O	10-40
Illit	10-40
Klorit	10-40
Kaolinit	3-15

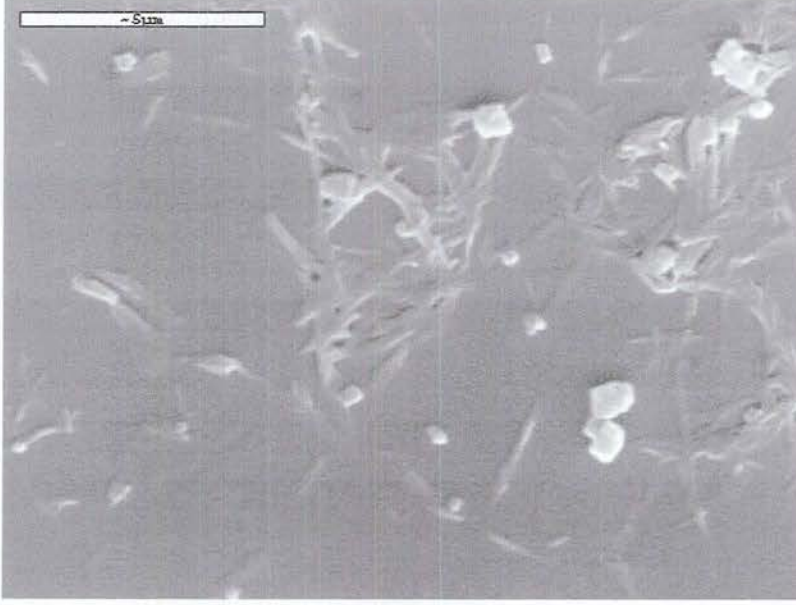
#### 3.1.4. Mineralojik özellikleri

Sedimanter tabakalar halinde çökelen sepiyolitler, genellikle toprağımsı, ince taneli ve kaygan görünümlüdür. Bu tip sepiyolitlerde, bileşimdeki sepiyolit minerali oranı %90'ı aşan değerlerdedir. Buna eşlik eden mineraller de; genelde dolomit ve smektit grubu killer ile manyezit, paligorskit ve detritik minerallerdir. Bunların haricinde kil dışı karbonat mineralleri, kuvars, feldspat ve fosfatlar da olabilmektedir. Ayrıca, bu tipteki sepiyolit kilinin bileşiminde hemen her zaman organik maddeler de bulunmaktadır. Ancak, sepiyolit kiline koyu renk veren organik madde oranı %10'u aşmamaktadır. Masif yapıli sepiyolit kilinde ise gerek intraklastlar, gerekse hamur maddesi sepiyolit mineralinden meydana gelir. Genellikle organik madde içermeyen bu tipteki sepiyolit içeriğı %90'dan fazladır.

Dolomitli sepiyolitler çoğunlukla %50 ve daha fazla oranlarda sepiyolit içerirler. Sepiyolit dışındaki başlıca bileşen, dolomit mineralidir; yer yer değişik oranlarda illit, detritik kuvars ve volkanik cam da bulunur. Sepiyolit içeriğinin %50'nin altına düştüğü durumlarda, malzeme sepiyolitli dolomit niteliğini kazanır. Ancak, ana sepiyolit seviyesindeki malzemede sepiyolit hemen her zaman %10 ve daha fazla oranlarda bileşimde yer alır (Yeniyol, 1992).

### 3.1.5. Scanning (tarama) elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları

Bu çalışmada kullanılan Sivrihisar-Ayvalı sepiyolitine ait lifli yapıyı gösteren tarama elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiş görüntü Şekil 3.7’de verilmiştir. Eskişehir sepiyolitine ait başka bir araştırmacı tarafından çekilmiş SEM fotoğrafı da Şekil 3.8 (http-3)’de yer almaktadır.



Şekil 3.7. Deneilerde kullanılan Sivrihisar-Ayvalı sepiyolitinin lif yapısının SEM’de görünümü



Şekil 3.8. Eskişehir sepiyolitinin lifli yapısının SEM’de görünümü (http-3)

### 3.1.6. Fiziksel özellikleri

Kaygan görünümlü, ince taneli, toprağımsı bir yapıya sahip tabakalı sepiyolit, genellikle beyaz, krem, gri veya pembe renkli olabilmektedir; organik madde içeriğine bağlı olarak, Sivrihisar güneyi Neojen havzasındaki bazı türlerde olduğu gibi, koyu kahverengi ve siyahımsı da olabilir. Ampandrandawa (Madagaskar) ve Çin sepiyolitleri gibi bazı uzun lifsi formlar ise krizotil benzeri beyaz ve açık sarı renklidir.

Sedimanter oluşumlu, uzun lif demetleri şeklinde bulunan ( $\beta$ -sepiyolit (tabakalı sepiyolit) lif uzunluğu 100 Å - 3 ile 5µm, genişliği 100-300 Å ve kalınlığı 50-100 Å arasında değişebilmektedir. Bununla birlikte bu liflerin uzunlukları standart olmayıp, dünyanın pek çok yerinde farklı uzunluklara sahip sepiyolitler bulunmaktadır. Örneğin Çin ve Ampandrandawa (Madagaskar) sepiyolitlerinin lif uzunluğu bir kaç milimetreye hatta santimetreye varmaktadır. Vallecas (İspanya) sepiyolitinin lif boyutları ise 8000x250x40 Å'dur (Jones ve Galan, 1988). Sepiyolit gözenekli (poroz) bir yapıya sahiptir ve ortalama mikropor çapı 15 Å, mezopor yarı çapı ise 15-45 Å arasında değişmektedir. Yoğunluğu 2-2.5 g/cm<sup>3</sup> arasında olup, çok gözenekli olan türlerin yoğunluğu zaman zaman birin altına düşebilmektedir; kuruduğu zaman yoğunluğu düşeceğinden suda yüzme özelliği gösterir. Monoklinik veya psödorombusal sistemde kristalleşen sepiyolit Mohs sertliği 2-2.5 civarında ve ortalama kırma indeksi 1,50 olup, negatif biaksiyal optik işaret verir. Nemli olduğunda tırnakla çizilebilir, dil ile dokunulduğunda kil gibi çeker. Sepiyolit kuruma sıcaklığı 400°C'dir; erime sıcaklığı ise 1400-1450°C arasında değişmektedir (Sabah ve Çelik, 1998).

### 3.1.7. Fiziko-kimyasal özellikleri

Fizikokimyasal özellikler, kil minerallerinin mikro yapısını ve geoteknik özelliklerini etkilemektedir. Bu özelliklerin bilinmesi, kil minerallerinin değişik çevre şartları altındaki davranışlarının tahmininde önemli bir rol oynamakta ve teknolojik uygulamalara baz teşkil etmektedir. Bu amaçla; sepiyolit sorptif

davranışı, yüzey alanı modifikasyonları vs. gibi özellikleri, ayrı başlıklar altında incelenmiş ve detayları verilmiştir.

### 3.1.7.1. Sorptif özellikleri

Kil minerallerinin iç yapıları ve kimyasal bileşimleri baz alınarak yapılan sınıflamaya göre sepiyolit, kristalin killerin zincir yapılı olan grubuna aittir. Zincir yapısına sahip minerallerin kristal yapılarında üç tür aktif soğurma merkezi mevcuttur (Serratos, 1978). Bunlar :

- Tetrahedral silika tabakasındaki oksijen atomları. Bu minerallerin tetrahedral tabakalarındaki düşük izomorf değişim derecelerinden dolayı oksijen atomları zayıf elektron taşıyıcısıdır ve bunların adsorbe türlerle etkileşimi de zayıf olacaktır.
- Yapıdaki zincirlerin kenarlarında magnezyum iyonları ile koordine olmuş su molekülleri (her  $Mg^{+2}$  iyonu için iki  $H_2O$ -molekülü). Bunlar, sorplanan türlerle hidrojen bağları oluşturabilir.
- Lif eksenini boyunca uzanan Si-OH gruplarıdır. Bunlar tetrahedral tabakanın dış yüzeylerinde Si-O-Si bağlarının kırılması sonucu oluşurlar. Söz konusu kırılmadan doğan artık yük, bir proton veya bir hidroksil molekülü ile bağlanarak yükünü nötrleştirir. Bu gruplar, lif eksenini boyunca 5 Å aralıklarla dizilim gösterir ve bunların sıklığı, kristalin doğal yapısı ile liflerin boyutları ile ilişkilidir. Bu Si-OH grupları, sepiyolit dış yüzeyinde adsorplanan moleküllerle etkileşime girebilir ve belirli organik reaktifler ile kovalent bağ oluşturma yeteneğine sahiptir.

Sepiyolit kendine has yapısı itibarıyla son derece yüksek bir sorpsiyon özelliğine sahiptir ve kendi ağırlığının 200 – 250 katı kadar su tutabilir.  $300^{\circ}C$ 'nin üzerine ısıtıldığında, yapısal değişikliklere ve gözeneklerin tahrip olmasına bağlı olarak, sorpsiyon kapasitesi azalır; sepiyolit genleşme özelliği yoktur. Zeolitik su, yapısal zincirlerin kenarlarında magnezyum iyonlarına koordine olmuş su molekülleri ile hidrojen bağları oluşturur. Koordinasyon ve zeolitik su molekülleri, yüksek polariteli küçük moleküller ile yer değiştirebilir. Örneğin kısa zincirli primer alkoller, kanalların içine yayılarak zeolitik su moleküllerinin ve

hatta koordinasyon suyu moleküllerinin yerini alabilirler. Daha fazla zincir uzunluğuna sahip alkollerde ise, sadece dış yüzeylerdeki açık kanallarda zeolitik su ve koordinasyon suyu molekülleri ile yer değiştirilebilir. Yine katyonik reaktifler grubuna giren uzun hidrokarbon zincirine sahip amin türü organik maddelerle yapılan adsorpsiyon çalışmaları, amin moleküllerinin sadece sepiyolit dış yüzeylerinde tutunmayıp aynı zamanda kanal boşluklarına da yerleştiğini ve adsorpsiyon olayının, primer aminlerde, amin moleküllerinin oktahedral tabakada yer alan bağıl ve zeolitik su molekülleri arasında hidrojen bağı oluşturarak (Sabah ve ark., 1997); kuarterner aminlerde ise  $Mg^{+2}$  iyonu ile amonyum iyonu arasındaki iyon değiştirmeden ve Van der Waals güdümlü zincir-zincir etkileşimlerinden kaynaklandığını göstermiştir (Sabah, ve ark., 1998; Kara, ve ark., 1998).

Sepiyolit, genellikle su ve amonyum gibi polar moleküller ile polar olmayan bileşikleri ve nispeten daha az miktarda metil ve etil alkollerini adsorplayabilmektedir. Ancak, polar olmayan bileşiklerin adsorpsiyonu dış yüzeylerle sınırlı olup tutulan molekülün boyutuna ve şekline bağlıdır. Lineer ve dallı-budaklı parafin zincirlerinin adsorpsiyonu için serbest enerji ve entropi değişimleri üzerine yapılan çalışmalar, bu moleküllerin dış yüzeylerdeki açık kanallara yerleştiğini ortaya koymuştur (Alvarez, 1984).

### 3.1.7.2. Yüzey alanı modifikasyonları

Sepiyolit dış yüzey alanı tanımlanmış yapısal modeli dikkate alındığında, kristal yapılarındaki süreksizliklere bağlı kanalların  $3.6 \times 10.6$  Å'luk bir kesiti için belirlenen yüzey alanı, yaklaşık olarak  $800-900 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dir. Teorik olarak bunun  $400 \text{ m}^2/\text{g}$ 'ı dış yüzey,  $500 \text{ m}^2/\text{g}$ 'ı da iç yüzey alanıdır (Alvarez, 1984; Serna ve Van Scoyoc, 1978). Yüzey alanı ölçümleri, kullanılan absorbat molekülün kristal içi kanallara nüfuz edebilme kapasitesine bağlıdır. Müller ve Kolterman (1965)'e göre, absorbatın kristal içi kanallara nüfuz etme kapasitesi esas olarak molekül boyutuna bağlıdır. Buna karşılık Barrer ve ark. (1954), Nederbragt (1949), Martin Vivaldi ve ark. (1958), polar moleküllerin kanallara girebileceğini belirtmektedir. Kullanılan metoda göre yüzey alanı değişmektedir. Bu nedenle, yüzey alanı

ölçümleri ve buna bağlı hesaplamalarda, kristal içi kanallara gönderilen absorbatların (gaz veya sıvı) boyut, şekil ve polaritesi önemli olduğundan, bunların mutlaka belirtilmesi gerekir. Örneğin, hegzan kullanılarak ölçülen 330 m<sup>2</sup>/g yüzey alanı (Alvarez, 1984; Robertson, 1957), setilpiridinyum bromür kullanıldığında 60 m<sup>2</sup>/g (Alvarez, 1984; Greenland ve Quirk, 1964), etilen glikol kullanıldığında 470 m<sup>2</sup>/g (Jones ve Galan, 1988; Fenoll ve Martin Vivaldi, 1968), en yaygın metod olan ve azot absorpsiyonuna dayanan BET metodu kullanıldığında 276 m<sup>2</sup>/g (Alvarez, 1984; Ruiz-Hitzky ve Fripiat, 1976) ve piridin kullanıldığında 275 m<sup>2</sup>/g (Alvarez, 1984; Ruiz-Hitzky ve Fripiat, 1983) bulunmaktadır (Sabah ve Çelik, 1998). Bulunan yüzey alanı değerleri çizelge 3.5’de görülmektedir.

Kil tanelerinin spesifik yüzey alanı tane davranışına etki eden en önemli özelliklerden birisidir. Bunun nedeni; flokulasyon, dispersiyon, ve iyon değişimi gibi olayların spesifik yüzey alanına bağlı olmasıdır. Diğer nedeni ise, spesifik yüzey alanı, kil mineralinin tane çapına ve şekline bağlıdır. Çift tabaka kalınlığı da kil tanesinin yüzey alanına direk olarak bağlıdır. Yüzey alanının artması çift tabaka kalınlığının artmasını sağlar. Bu tez çalışmasında da kullanılan sepiyolit numuneleri üzerinde Gökhan, (2003) tarafından Nova 2200 marka hızlı gaz sorpsiyon cihazı kullanılarak yapılan çalışmada çoklu nokta BET yüzey alanı 94,8 m<sup>2</sup>/g bulunmuştur.

Diğer killerde olduğu gibi, sepiyolitın yüzey alanı ve gözenekliliği ısı aktivasyon, asit aktivasyon veya her ikisi de uygulanarak değiştirilebilmektedir.

**Çizelge 3.5.** Sepiyolitın değişik absorbatlar ile belirlenmiş yüzey alanı değerleri

YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> /g)	ABSORBAT (gaz veya sıvı)
60	Setilpiridinyum bromür
275	Piridin
276	BET
330	Hegzan
470	Etilen glikol

### 3.1.7.3. Kolloidal özellikleri

Sepiyolitın kolloidal davranışını belirleyebilmek için Eskişehir-Sivrihisar kahverengi sepiyoliti ile %10 katı oranında hazırlanan süspansiyonda doğal, asidik ve bazik pH'larda zamana bağlı olarak yapılan ölçümlerde, sepiyolitın kendi tabi denge pH'ına (pH=8,5) yaklaşık 18 dakikada ulaştığı; buna karşılık başlangıç pH'sı 3'e ayarlanan sepiyolit süspansiyonunun 14 dakika içinde, başlangıç pH'sı 11'e ayarlanan süspansiyonun ise 3,5 saat içinde tabi denge pH'sına ulaştığı belirlenmiştir (Sabah ve ark., 1998).

Buradan sepiyolit süspansiyonlarının her ortamda pH=8.5 civarında tampon bir pH oluşturdukları anlaşılmaktadır. Aynı sepiyolitın tampon pH'da ölçülen ve  $3,1 \times 10^{-4}$  M/lit olan Mg çözünürlüğü değeri pH düştükçe artmakta ve pH=2 civarında  $2 \times 10^{-2}$  M/lit'ye yükselmektedir. Bu hızlı çözünürlükten dolayı pH=8'in altında yapılan ölçümlerde sepiyolit süspansiyonlarının sürekli olarak pH kontrolü yapılması gerekmektedir (Sabah, 1998).

Önemli seramik hammaddelerinden biri olan sepiyolit, çeşitli malzemelerin yapımında katkı maddesi olarak kullanılmaktadır

Beyaz ve kahverengi Türk sepiyolitleri ile pH'ya bağlı olarak yapılan zeta potansiyel ölçümlerinde, beyaz sepiyolitın sıfır yük noktasının (syn) pH=4 civarında (Sağlam, 1996); kahverengi sepiyolitın syn'si ise pH=5 civarında bulunmuş ve katyon değişiminden dolayı özellikle çok değerlikli iyonların ( $Ca^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Co^{+2}$ ) magnezyum ile yer değiştirerek yüzeyin yükünü belirlemede önemli rol oynadıkları tespit edilmiştir (Sabah ve ark., 1998).

### 3.1.8. Kullanım Alanları

Sepiyolit, yüksek yüzey alanı, lifsi ve gözenekli yapısı, fiziko-kimyasal aktivitesi ve benzeri özelliklerinden dolayı adsorban killer arasında yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Sepiyolitın teknolojik uygulamalarına yönelik akademik ve teknik düzeyde yürütülen çalışmalar, üniversitelerin ilgili bölümleri, araştırma enstitüleri ve sanayi kuruluşlarında halen yoğunlaşarak devam etmektedir. Önemli sayılabilecek miktarda rezerve sahip olan ülkemizde, sepiyolit kullanımını henüz

yaygın olmamakla birlikte hayvan yaygısı (pet-litter) olarak kullanımını için yurt içi piyasa oluşmaya başlamıştır. Ancak, Japonya ve İspanya'da sepiyolitın teknolojik kullanımını ile ilgili olarak alınmış çok sayıda patent mevcuttur (İrkeç, 1993). Özellikle 1985 yılından itibaren alınan patent sayısındaki artış dikkat çekicidir. Bu gün için sadece Japonya'da, sepiyolitın doğrudan veya dolaylı olarak kullanımına yönelik 2500'ün üzerinde patentin mevcut olduğu bilinmektedir (İrkeç, 1995).

Sepiyolit mineralinin teknolojik uygulamaları, sahip olduğu üç temel özelliğe dayanmaktadır.

Bunlar;

- sorptif özelliğine dayalı sorptif amaçlı uygulamalar,
- katalitik özelliğine dayalı katalitik amaçlı uygulamalar,
- reolojik özelliğine dayalı reolojik amaçlı uygulamalar.

### 3.1.8.1. Sorptif amaçlı kullanım alanları

Yüksek yüzey alanı ve iç yapıyı teşkil eden mikro gözenek ve zeolitik kanallar, sepiyolitın adsorpsiyon ve/veya absorpsiyona dayalı uygulamalarında önemli rol oynarlar. Çizelge 3.6'de ASTM standartlarına göre boyutlandırılmış sepiyolitın absorpsiyon özellikleri görülmektedir (Singer ve Galan, 1984).

Çizelge 3.6. ASTM standartlarına göre boyutlandırılmış sepiyolitın absorpsiyon özellikleri (Singer ve Galan, 1984)

BOYUT GRUBU	(mm)	-3,35 +1,00	-3,35 +0,55	-1,00 +0,55	-0,55 +0,25
Yığın yoğunluğu	(g/l)	450-500	450-750	530-570	550-600
Su absorpsiyonu	(Foord testi)	80-90	95-105	105-115	110-110
Yağ absorpsiyonu	(Foord testi)	65-70	75-80	80-90	90-100
SAE 10 Yağ absorpsiyonu	(Westinghouse testi)	30-65	70-75	75-85	85-95
SAE 20 Yağ absorpsiyonu	(Westinghouse testi)	55-60	65-70	70-80	80-90
Shell index	(kg/cm <sup>2</sup> )	-	3,5-4,0	-	-
Nem içeriği	(%)	12±3	12±3	12±3	12±3

Bu özellikler ısı ve/veya asit aktivasyon ve mekanik olarak değiştirilebilir özelliklerdir. Sepiyolitin sorpsiyon kapasitesi, diğer killerden daha yüksektir. Mekanik direnç ile birlikte bu özellik, su ve yağ absorbanı olarak çok çeşitli alanlarda kullanımına imkan verir. Sepiyolit ayrıca yüksek oranda rutubet ve organik buharı emme kapasitesine sahiptir. Başlangıçta absorpsiyon hızı, silika jel veya aktif alüminaya göre daha düşük olmasına karşın hegzan, benzen ve metil alkol gibi organik sıvıları çok daha yüksek kapasitede absorbe edebilir.

- **Hayvan altlığı (pet-litter) olarak:** İstenmeyen kokuları absorbe etmek konusunda büyük bir kapasiteye sahip olan sepiyolitin en büyük tüketim alanı, evcil ve ahır hayvanlarının artıklarının emilmesinde hayvan altlığı olarak kullanımıdır. Özellikle Avrupa'da kedi toprağı olarak bol miktarda tüketilmektedir
- **Renk giderici madde olarak:** Yüksek renk giderme kapasitesine sahip bir kil, doğal olarak uygulama açısından düşük yağ tutma ve çok yüksek filtrasyon özelliğine sahip olmalıdır. Bu duruma göre sepiyolitin mükemmel bir renk giderme özelliğı vardır ve ayrıca düşük oranda sepiyolit katkısı normal ağartma killerinin renk gidermedeki etkinliğini arttırmaktadır (Chambers, 1959).
- **Tarım ve böcek ilaçları taşıyıcısı olarak:** Birçok tarımsal mücadele ilacı (pestisid), yüksek aktiviteye sahip kimyasal maddeler olup geniş alanlara düşük miktarlarda uygulanır. Kompleks yapıda kimyasal bileşikler içermesi ve böylesine karmaşık problemlere sebebiyet vermesi dolayısıyla bunların atıklarının zararsız hale getirilmesi veya yok edilmesi günümüz modern ziraat tekniğinin en büyük problemlerinden birini teşkil etmektedir. Söz konusu bu problemin ortadan kaldırılması için, katı veya sıvı formdaki bu ilaçlarda taşıyıcı ve seyreltici katkı maddesi kullanmak gerekir. Bu amaca yönelik olarak granüler malzeme kullanılması ilacın taşınmasında ve kullanılmasında kolaylılar sağlar; çünkü rüzgar etkisiyle dahi yayılımı temin edilebilir. Sepiyolit bu sektörde dikim, tohumlama veya gübrelemeyle eş zamanlı olarak uygulanabilir, zira toksik kimyasalları daha uzun bir süre içinde yavaş yavaş salar. Pestisid taşıyıcı

için en önemli özelliklerden bir tanesi, kimyasal duyarlılığını bozmamasıdır.

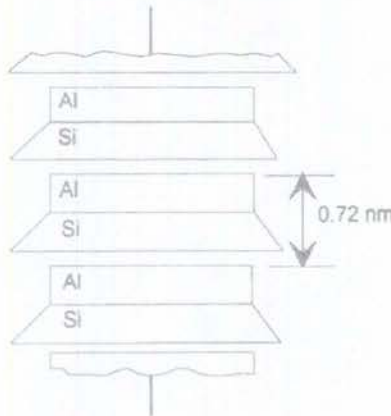
- **İlaç sanayinde:** Geniş aktif yüzey alanından dolayı sepiyolit, ilaç üretim sanayinde dolgu maddesi olarak kullanılır. Buradaki fonksiyonu ilaç aktif maddesini tutma yönündedir.
- **Sigara filtrelerinde:** Sigara dumanı, bir gaz fazı üzerinde süspansiyon halinde bulunan 0,1-1 $\mu$  çapındaki damlacıklardan oluşmaktadır. Yaklaşık 2500 madde içerdiği bilinen duman, nefes çekme sırasında solunum sırasında etkileşmektedir(Sarıkaya ve ark., 1985). Sepiyolit ve aktif karbon kullanılarak sigara dumanı üzerinde yürütülen araştırmalar (İspanyol patenti, No. 352013), sepiyolitın sigara dumanındaki gazları yoğun bir şekilde absorbe etmesinin yanı sıra seçimli absorpsiyon özelliğine de sahip olduğunu göstermiştir.
- **Deterjan ve temizlik maddelerinde:** Fleury-Larsennau ve Andre (1942) yapmış oldukları çalışmada, yağ asidi yerine %30'a kadar değişen oranlarda sepiyolit kullanılması durumunda, yıkama deneylerinde sabunun etkisinin arttığını belirlemişlerdir. Orijinal sepiyolit ve çeşitli organik bileşiklerle yüzey özellikleri değiştirilmiş sepiyolit kullanılarak yapılan deneyler, bu kilin temizleme kapasitesini artırmakla kalmayıp, 0-4 arasında belirlenen ölçek üzerinde 1-2 birim nispetinde nihai beyazlığı da artırdığını da ortaya koymuştur. Kirleri süspansiyonda tutma şeklinde tezahür eden bu etki, sepiyolitın sorptif özeliği ile izah edilebilir. Sahip olduğu bu özellik, kumaş ye yıkama suyunda mevcut bazı bakteri ve mantarların absorbe edilmesini sağlar (Sabah ve Çelik, 1998).

### 3.2. Kaolinit

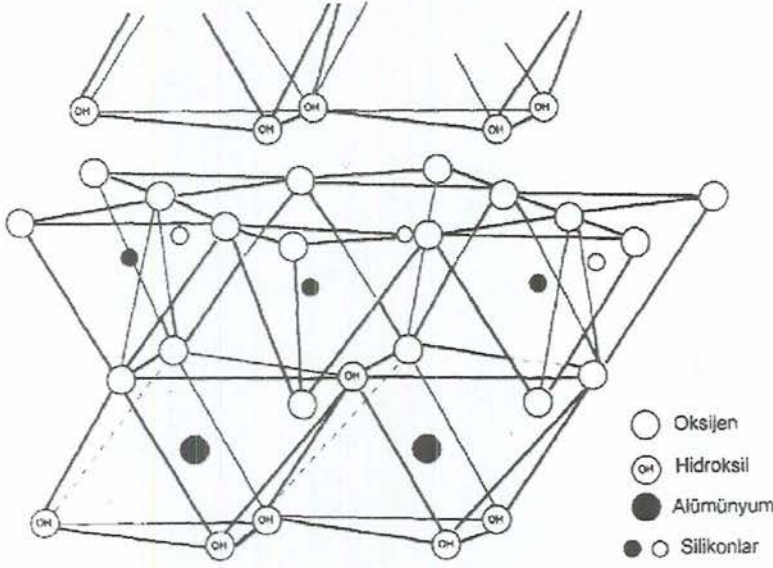
Kaolin ismi, Çince Kauling ( Çin'de Jauchau Fu yakınındaki bir tepenin adı) isminden türemiştir. Bu tepede bulunan killer yüzyıllardan beri üretilerek porselen ve seramik eşya yapımında kullanılmıştır. Kaolin terimi uzun yıllar kaolinit minerallerinin adı olarak da kullanılmıştır.

Molekül formülü  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  veya  $Al_2(OH)_4 \cdot (Si_2O_5)$  olan kaolinit, tüm kil mineralleri gibi bir tabakalı silikattır (Das, 1990). Yüksek sıcaklıkta pişirilerek doğal puzzolan olarak da kullanılmaktadır. Kireç ve kalsiyum bileşenleri ile reaksiyona girdiklerinde Kalsiyum Silikatları (CS) oluştururken, sahip oldukları yüksek alüminyum içeriklerinden dolayı da Kalsiyum Alüminat (CA) bileşenlerini oluştururlar. Kaolinit kili suyla şişmez bu yüzden su muhtevaları arttığında cıvıklaşırlar.

Kaolinit başlıca bir tetrahedral (silika) ve bir oktahedral (alümina veya gibsit) levhasının tekrarlanan katmanlarından oluşmuştur. Bir katmanın iki levhanın birer tanesinden meydana gelmiş olmasından dolayı kaolinit 1:1 kil minerali şeklinde anılır. Kaolinit kiline ait bu yapı (Lambe, 1953) şekil 3.9'da görülmektedir. Silika levhasının uçları ile oktahedral levhanın katmanlarından biri tek katman oluşturur. Kaolinit kiline ait bu atomik yapı (Grim, 1959) şekil 3.10'da görülmektedir. İki levhanın bir araya gelmesi bu şekilde olmaktadır. Bu katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 0,72 nm olup diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir. Böylece kaolinit kristali birkaç katmanın bir araya gelerek oluşturduğu 0,72 nm kalınlığındaki temel bir katmandan oluşmaktadır. Birbirini izleyen bu temel katmanlar oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral levhanın oksijenleri arasındaki hidrojen bağ ile bir arada tutulurlar. Hidrojen bağı çok güçlü bir bağ olduğundan hidrasyonu önler ve katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal oluşturmasını sağlar. Bu yüzden kil ıslandığında kristal üniteleri arasındaki mesafe genişlemez.



Şekil 3.9. Kaolinit kilinin kristal yapısı (Lambe, 1953)

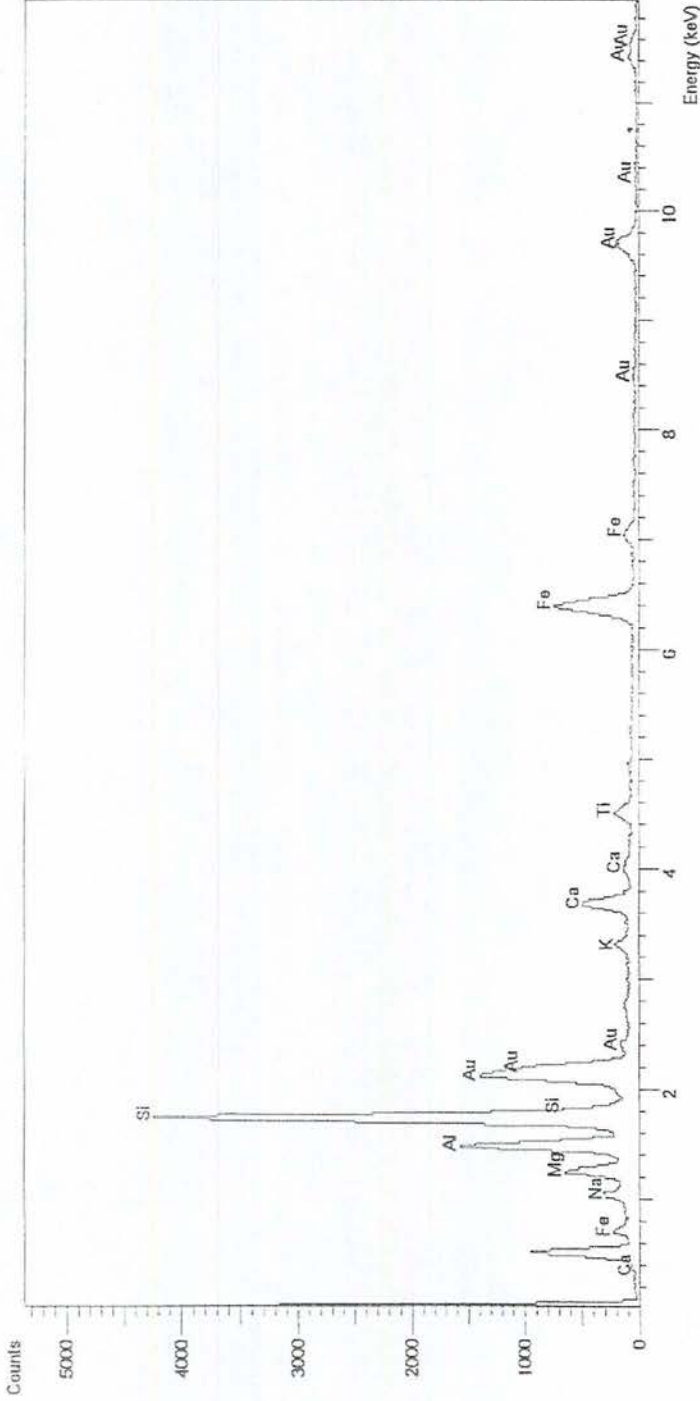


Şekil 3.10. Kaolinit kilinin atomik yapısı (Grim, 1959)

Tipik bir kaolin kristalinde 70 ile 100 arasında katman bulunmaktadır. Kaolin elektriksel olarak nötrdür. Ancak suyla ıslatıldığında hafif negatif yük ile yüklenir. Kristal üniteleri arasına su moleküllerinin ve kationlarının girmesi çok güçtür. Bu sebeple kaolinitin efektif yüzeyi sadece dış yüzeylerdir. Bunun sonucu olarak kaolinitin özgül yüzey alanları düşük ( $10-20 \text{ m}^2/\text{g}$ ) kation değişirme kapasiteleri  $5-15 \text{ meq}/100\text{g}$ 'dır. Özgül ağırlıkları  $2,60-2,68 \text{ gr}/\text{cm}^3$  civarındadır. Diğer silikat kil minerallerinin aksine, kaolinitin plastiklik, kohezyon, büzülme ve şişme özellikleri çok zayıftır. Kaolinit ıslandığı zaman orta derecede bir plastisiteye sahip olurken, diğer kil minerallerinden daha büyük içsel sürtünmeye sahiptir. Oluşum açısından, feldispat içeren granitik veya volkanik kayaçların feldispatlarının alternatifi olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. İdeal kaolin bileşimi  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  şeklindedir (Abdul ve ark., 1990).

Bu çalışmada kullanılan kaolinit kili Eczacıbaşı Karo Seramik A.Ş. Bozüyük fabrikası tarafından sağlanmış olup kil fabrikada K – 322 olarak anılmaktadır. Deneylede karışımların hazırlanmasında kullanılan kaolinit kilinin Katyon Değişim Kapasitesi (KDK)  $25,93 \text{ meq}/100\text{g}$  dir. Kimyasal bileşimi ise  $\%51,52 \text{ SiO}_2$ ,  $\%28,79 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ,  $\%3,13 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\%0,82 \text{ CaO}$ ,  $\%1,23 \text{ MgO}$ ,  $\%0,07 \text{ P}_2\text{O}_5$ ,  $\%2,51 \text{ K}_2\text{O}$ ,  $\%0,09 \text{ Na}_2\text{O}$ ,  $\%0,02 \text{ SO}_3$ ,  $\%0,004 \text{ Cl}$ ,  $\%1,14 \text{ TiO}_2$ ,  $\%0,02 \text{ SrO}_2$ ,

%0,04  $Mn_2O_3$ , %9,60 Kızdırma Kaybı 'dan oluşmaktadır (Güney,1998). Kaolinit kiline ait X-Ray analizi grafiği de Şekil 3.11'de görülmektedir (Güney, 1998).



Şekil 3.11. Kaolinit kiline ait X-Ray analizi (Güney, 1998)

Kaolin kili doğrudan endüstride kullanılabilirdiği gibi, öğütme, zenginleştirme ve beyazlatma işlemlerinden sonra da kullanılır. Zenginleştirme işlemlerine tabi olmuş kaolinlerin tane boyutu, beyazlık derecesi, kimya ve mineral bileşimi, kuruma ve pişme küçülmesi gibi özellikleri belirtilebilir.

Kaolin başlıca seramik, kağıt, çimento, refrakter malzeme üretimi, seramik izolatörler, gübre, yapıştırıcılar, zirai ilaçlar ile böcek ve sinek öldürücüleri, tıbbi ilaçlar, yemler, ağartıcı ve absorbentler, katalizörler, deterjan ve kozmetikler, boyalar, lastik ve plastik malzemeler, tekstil boyaları ve çirişleri, döküm kalıpları, kurşunkalem üretimi gibi birçok imalatta çeşitli şekilde kullanılmaktadır. Su ile zenginleştirilmiş kaolinler yumuşak, yüksek plastik ve düşük aşındırma özelliğindedir. Bir kısım kaolinler organofilik veya hidrofobik hale getirmek üzere bazı kimyasal işlemlere tabi tutularak dış yüzey boyalarında kullanılmaya elverişli hale getirilir.

### **3.3. Kirleticiler**

#### **3.3.1. Ağır metaller**

Çevrenin en büyük kirleticilerinden biri de ağır metallerdir. Ağır metaller çevreye genellikle ticari ve endüstriyel aktivitelerden katılmaktadır. Ni, Mn, Pb, Cr, Cd, Zn, Cu, Fe ve Hg gibi çeşitli metallerin iz miktarları birçok suların önemli bileşenleridir. Bu metallere bazıları belirli miktarda olmak koşuluyla biyolojik yaşamın gelişmesi için gerekli olduğu halde, bunların bir veya birkaçının aşırı miktarda varlığı zararlıdır, özellikle Pb, Cu, Cd, Ağ, Co, Zn, Cr, Ni gibi bazı katyonlar için müsaade edilebilir maksimum sınır 1 ppm'in altındadır (Lund, 1971; Besselièvre ve Schwartz, 1976).

Çeşitli yollarla çevreye salınan ağır metaller yalnızca akuatik yaşama olan zararları ve bitkiler üzerindeki toksik etkileri (phytotoxicity) ile değil, aynı zamanda toprakta birikme potansiyeli ve insan besinlerine girebilmesi ile de önemlidir.

Tüm ağır metaller yeterli derişimlerde bitkiler üzerinde toksik olabilir. iz elementlerin toksisitesi bunların derişimleri, pH ve katyon değişim kapasitesi gibi

bazı toprak karakteristikleri yanında, toprakta bulunan fosfat ve organik maddeler gibi diğer bileşenlere, ayrıca ağır metaller ve diğer iz elementlerin toprakta bulunma süreleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Toprağın katyon değişim kapasitesi ile metal birikiminin ilişkisi yalnızca yaklaşıktır. Çünkü metal sorpsiyonu tam olarak iyon değişiminin bir fonksiyonu değildir (Tchobanoglous, 1982).

Bu tür maddelerin toksisitesinde, değerlik ve bileşiğin yapısı da toksisiteyi değiştirir, örneğin,  $Hg^+$  tuzları,  $Hg^{2+}$  'nin tuzlarından daha toksiktir. Organik metal bileşikleri, anorganik metal tuzlarına göre çok daha toksiktir (Güley ve Vural, 1978).

Ağır metaller ve bileşiklerinin insan sağlığına etkileri kısaca şöyle özetlenebilir: Üst solunum yolu ve nefes darlığı, zatürre ve bronşit gibi akciğer hastalıkları; mide bağırsak ve ishal gibi sindirim sistemi ve idrar yolları, böbrek ve hemorajik nefrit gibi boşaltım sistemi bozuklukları; yüksek tansiyon ve çarpıntı gibi kalp damar ve dolaşım sistemi ve sarılık gibi karaciğer hastalıkları ve çeşitli alerjilere neden olmaktadır. Ayrıca zehirlenmelere ve üst solunum yolları, akciğer, sindirim, karaciğer, kan ve mide kanserlerine de yol açabilmektedirler (Altay, 1988).

### 3.3.1.1. Bakır (Cu)

Bakır elementi genellikle mangan ve demirin hidroksit oksitleri ile meydana gelir. Bakırın adsorpsiyonunda organik madde ve serbest mangan oksitleri önemlidir. Yeryüzündeki ortalama bakır içeriği 2-40 mg/kg, kirlenmiş topraklarda ise 1000 mg/kg'dır. Yüzey sularında bulunan bakır bitkiler için zararlıdır. Bakır elementi sudaki canlılar için kuvvetli toksik nitelik taşıyan bir elementtir. Maksimum bakır miktarları, Almanya temiz toprak içerisinde 100 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 1-190 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 36 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 500 mg/kg'dir. 1991 yılında yayınlanan Resmi Gazetede sudaki maksimum bakır miktarı 0.2 mg/l olarak verilmiştir.

Fazla organik madde içeren zeminlerde bakır miktarı azdır. Bitkiler tarafından iki değerli bakır katyonu olarak alınır. Bakır fazlalığı, bitkilerin demir almasını güçleştirir. Toprakta bakır ile organik madde arasındaki ilişki önemlidir. Topraktaki bakırın önemli bölümü zor çözünebilen veya çözünmeyen organik ve inorganik bileşikler olarak bulunur.

Mangan oksit ve demir oksitlere, ve aynı zamanda organik maddelere bağlı bulunan bakırın büyük kısmı çok kuvvetli bağlı ve zor adsorbe edilir şekildedir. Bunun için değişebilir bakır içeriği  $pH > 5$  için genel olarak %1 civarındadır.

Bakır birçok ürünün elde edilmesinde (bakır telleri, elektrik iletim telleri, elektronik endüstrisinde) kullanılmaktadır ve endüstrilerin atık sularında da yığılan sedimentler üzerindeki değerleri ortalama 530 mg/kg kuru ağırlık, aşırı durumlarda da 5300 mg/kg kuru ağırlığa kadar çıkabilir. Aynı şekilde arıtma çamurlarında bakır içeriği 10.000 mg/kg kuru ağırlık düzeyine kadar çıkabilmektedir.

Çeşitli bitkilerde yaklaşık 20 mg/kg kuru ağırlık üzerine bakır zehirliliği saptanmıştır. Bazı bitkilerin besin çözüntüsünde 0.1 mg/l konsantrasyonu aynı şekilde olabilmektedir.

Bakır çözünebilirliği ve alınabilir duruma geçmesi,  $pH < 5$  olduğu durumlarda daha belirgin olarak yükselir. Eğer toprağın pH değeri 6'nın üzerine çıkarsa, bakırca zengin kuvvetli asit topraklarda Cu toksitesisi azalmaktadır. Aynı zamanda yüksek fosfat da bakır alımını etkilemektedir.

İçerisinde 100 mg/kg'dan fazla bakır içeren atık suların ve arıtma çamurların toprağa verilmesi sınırlandırılmıştır. İçinde 100 mg/kg bulunması halinde bile, mera otlarında bakır içeriği çok yüksek olur (15 mg/kg kuru madde) ve koyunlarda zehirleyici etkiye bulunur (Conner, 1990).

Genel olarak algler, deniz bitkileri ve omurgasızlar için aşırı bakır oldukça toksik, fakat memeliler için daha az toksiktir. Normal bir erişkinin vücudunda 100-150 mg bakır vardır. Sıradan bir diyetin içerdiği günlük bakır miktarı 2-5 mg kadardır. Herhangi bir şekilde aşırı bakır alınması halinde görülen akut bakır zehirlenmesinin belirtileri yanma hissi, metalik tat, bulantı, kusma karın ağrısı, ishal ve yaygın kas ağrılarıdır. Bazı vakalarda koma ve ölüm görülebilir (Berkov, 1982).

Tarımda kullanılan sularda 0,1 ppm kadar bakır derişimlerinde toksisite gözlenmektedir. 0,5 ppm kadar bakır derişimi ile bitkilerin % 35'inin öldüğü belirlenmiştir, istiridyeler için toksik olabilecek derişim 0,1 ppm'in üstündeki değerlerdir. Alüminyum, paslanmaz çelik ve demir tanklarda iki ay sürelerle yaşadıktan sonra bakır kaplı tanklara aktarılan İstakozlar bir gün içinde ölmüştür (Lund, 1971).

### 3.3.1.2. Krom (Cr)

Krom elementi toprakta (zeminde) diğer metallere farklı olarak az miktarda bulunmaktadır. Krom genellikle endüstride kalay (alloys), katalitik, krom oksit ve krom tuzları için kullanılır. Krom tuzları temizlik solüsyonları ve boyalarda kullanılır. Rafineri atıklarında oldukça fazla miktarlarda bulunan bir ağır metaldir. Krom zehirlenmesi deri bozukluklarına yol açmaktadır. Krom inorganik bir kimyasaldır. Zemin içinde taşınabilen ve en fazla çözünebilir metaldir. Kromun zararlı şekli kromat ( $CrO_4^{2-}$ ) gibi kromun hexavalent veya dikromat ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) durumudur.

Kromun toprak içindeki kil minerallerine adsorbe edildiği ve çözünürlüğünün  $pH > 4$  olduğu koşullarda gerçekleştiği ve  $pH = 5.5$  civarında ise çöktüğü bilinmektedir. Maksimum krom miktarları, Almanya temiz toprak içerisinde 100 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 0.5-110 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 100 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 800 mg/kg, EPA değerlerine göre sızıntı suyu içerisinde 5 mg/l, EPA değerlerine içme suyunda 0.05 mg/l'dir. Krom elementinin içme suyundaki maksimum değeri 0.05 mg/l olmalıdır.

Endüstride paslanmaz çelik üretiminde, lehim ve pas önleme üretimlerinde, yapı malzemelerinden boya, cila cam ve seramik malzemelerinde ve deri endüstrisinde kullanılır. Almanya'da 100.000 ton krom üretilmekte ve bunun 25.000 tonu çevrede hava, su ve toprağa verilerek kirlilik meydana getirilmektedir.

### 3.3.1.3. Kurşun (Pb)

Kurşun elementinin çözünebilirliği zemin içinde bulunan organik madde, karbonat, hidroksit, fosfat ve sülfat miktarı ile ilgilidir. Zemin içindeki mevcut fosfor ve pH değeri azalır ise, kurşunun çözünebilirliği artar. Maksimum kurşun miktarları, Almanya temiz toprak içerisinde 100 mg/kg, Çevre Bakanlığı Katı Atık Yönetmeliğine göre toprak içerisinde 100 mg/kg, Yeni Zelanda temiz toprak içerisinde 2-200 mg/kg, Hollanda temiz toprak içinde 85 mg/kg, Hollanda ıslah gerektiren değer 600 mg/kg, EPA değerlerine göre sızıntı suyu içerisinde 5 mg/l, EPA değerlerine göre içme suyunda 0.05 mg/l'dir. 1991 yılında yayımlanan Resmi Gazetede sudaki maksimum kurşun miktarı 1 mg/l olarak verilmiştir.

Kullanım sularının kurşunsuz olması arzu edilir, ancak müsaade edilebilir kriter 0,05 ppm'dir. Hayvanlara verilen içme suları 0,5 ppm'den fazla kurşun içermemelidir. Sulama suları için en üst limit 5 ppm'dir (Lund, 1971). Sularda kurşunun çözünmüş halde veya bir bileşiği halinde bulunması, bu bileşiğin türü, ortamın pH'si, diğer toksik elementlerin varlığı kurşun toksisitesini etkileyen faktörlerdir.

İnorganik bir kimyasaldır. Kurşunun çözünürlüğü, ortamın pH değeri, toplam kurşun içeriği, redoks koşulları ve diğer maddelerin durumu ile etkilenir. Kadmiyum, çinko ve nikelin aksine kurşun toprakta son derece immobil (hareketsiz) bir elementidir. pH değeri 5'den büyükse çok az çözünür. Kurşun, spesifik adsorbsiyon özelliğinden dolayı diğer tüm metallere daha kuvvetli olarak toprağa bağlanır.

Toprakta kurşun taşınması ve yıkanması, çözünürlüğün düşük olması ile çok az olur. Yapılan çalışmalar, kirli ortamlarda kurşunun %80'inin ilk 20 cm'lik üst toprakta tutulduğunu göstermiştir. Asidik topraklarda verilen kurşunun %99'unun 10 yıllık sürede toprağın üst 50 cm'sinde tutulduğu belirlenmiştir.

Kurşun madenciliği ve işlenmesi, ergitme, pirinç malzeme, akümülatör, batarya ve kurşun alkil üretimi, kaynak ve lehim işleri, kurşunlu boya yapımı ve kullanımı, matbaacılık, seramik ve plastik sanayinde kullanımı, yiyecek kaplarının, su borularının, tel kabloların kurşunla kaplanması ve içten yanmalı

motorlarda tetra etil kurşunlu benzinin kullanılması çevrede kurşun kirlenmesine neden olmaktadır. Tetra etil kurşun sağlam deriden vücuda girebilmektedir.

Kurşun; kemik, karaciğer, böbrek ve kaslarda biriken bir metaldir. İnsanlarda gıda maddelerince ve solunum yoluyla alınabilir. Solunan kurşunun % 30'u ciğerde birikir. Zehirlenme sonucu balyalanma, kusma, kabızlık, üşüme ve idrar tutukluğu gibi belirtiler görülür, Sinir sistemi ve nöronlara olan etkisi sinirlilik, felç ve ölümle sonuçlanır. Sinir sistemi ve nöronlara olan etkinin diğer sonuçları zayıflama, kas ve eklem ağrıları ve kramplar, bağırsak koliği (intestinal colic), damarlarda spazm, hemoglobin sentezinde görev alan enzimleri engeller ve anemi oluşur, kansızlık, kadınlarda regl bozuklukları, hipertansiyon ve çocuklarda biyokimyasal anormallikler, zeka gelişimini engelleme, davranış bozuklukları olarak sayılabilir (Altay, 1988).

### 3.3.2. Potasyum Klorür (KCl)

Bitkiler diğer elementlere nazaran topraktan daha fazla potasyum alırlar. Ahır gübresinde potasyum kuru madde esasına göre 3100 ppm ile 23300 ppm arasında değişmektedir. Suni gübre üretimi yapılan fabrikalar, tuz üretimi yapılan tesisler ve elektrolit deşarjı yapılan tesislerin atığı olarak çevreye yayılırlar.

Kullanılan kirleticilerde çözeltilere ait derişim ve molarite değerleri Çizelge 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.7. Kullanılan kirleticilerde çözeltilere ait derişim ve molarite değerleri

Kullanılan Oran (Normalite)	Formül	Kullanılan Oran (Molarite)	Molekül Ağırlığı	Suda çözölen Miktar
1 N	KCl	1000mM=1M	74,55	74,55 g / 1000 ml
2000 ppm	CuCl <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O	13,84 mM=0,00138 M	170,48	5,363 g / 1000 ml
2000 ppm	CrCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	38,44 mM=0,03840 M	266,45	10,241 g / 1000 ml
2000 ppm	PbCl	9,46 mM=0,009460 M	170,48	5,360 g / 1000 ml

## 4. DENEY YÖNTEMLERİ

Bu bölümde, kullanılan geoteknik deney yöntemleri, fiziko-kimyasal deney yöntemleri ve mikro yapı belirleme yöntemleri verilmiştir. Ayrıca çevresel şartlara ait özelliklerden; sızıntı deneyleri, sızıntı deneyi sonrası mekanik deneyler, sızıntı deneyi sonrası fiziko-kimyasal deneyler, donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası mekanik deneyler, donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası fiziko-kimyasal deneylere ait yöntemler verilmiştir.

### 4.1. Geoteknik Özellikler

Su muhtevası, dane özgül ağırlığı, dane çapı dağılımı, Atterberg kıvam limitleri gibi fiziksel (indeks) özellikler belirlenmiştir. Ayrıca mekanik deneyleri uygulayabilmek için, indirgenmiş, standart ve modifiye enerji uygulanmış kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Değişik enerjilerde sıkıştırılmış numuneler üzerinde permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme deneyleri yapılmıştır. Standart enerji kullanılarak sıkıştırılmış numunelerle bir boyutlu konsolidasyon, serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

#### 4.1.1. Fiziksel (indeks) özellikler

##### 4.1.1.1. Su muhtevası

Su muhtevasının tayininde ASTM D2216-80 (1985) belirtilen, "Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock, and Soil Aggregate Mixtures" metod kullanılmıştır. Bu metoda göre numunelerden 100 ila 200 gram alınmış, 105°C'de 24 saat kurutularak su muhtevaları belirlenmiştir.

##### 4.1.1.2. Dane özgül ağırlığı

Deneylerde dane özgül ağırlığı için ASTM D854-83 (1985) belirtilen "Test Method for Specific Gravity of Soil" standardı kullanılmıştır.

#### **4.1.1.3. Dane apı dağılımları**

Dane apı dağılımlarının belirlenebilmesi amacıyla yapılan elek analizi için ASTM D421-58 (1978) belirtilen "Method for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants" metodu ve hidrometre analizi için ASTM D422-63 (1972) belirtilen "Method for Particle-Size Analysis of Soil" metodu kullanılmıştır.

#### **4.1.1.4. Atterberg kıvam limitleri**

Sepiyolit ve 25K75S, 50K50S karışımlarının likit limit ve plastik limitleri için ASTM D4318-84 (1985) belirtilen "Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils" metodu kullanılmıştır.

#### **4.1.1.5. Rotre limiti ve Hacimsel Rotre (Buzlme)**

Sepiyolit ve 25K75S, 50K50S karışımlarının rotre limiti ve hacimsel buzlme değerleri ASTM D427-83 "Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils" metodu kullanılarak belirlenmiştir. Rotre limiti ve hacimsel rotre (buzlme) deneylerinde, standart numune kaplarının yanı sıra sırasıyla Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b'de görülen numune kapları da kullanılmıştır. Bu kaplar bu deneyler için özel olarak imal edilmiştir. Şekil 4.1a'da görülen numune kabı standart numune kaplarıyla yeni numune kaplarını rotre limiti değerini açısından karşılaştırmak için kullanılmıştır. Şekil 4.1b'de görülen numune kabı ise sıkıştırılmış zeminden numune alınması sırasında kap içerisinde boşluk bırakmadan istenen hacimde zemin numunesinin alınmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Hacimsel buzlme numunelerinin hazırlanmasında, standart proktor (ASTM D698-78), modifiye proktor (ASTM D1557-78) ve indirgenmiş proktor (Daniel ve Benson, 1990) metotları kullanılmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 4.1.** (a) 22 mm çap ve 25 mm yüksekliğindeki altı kapalı rötire limiti kabı (b) 22 mm çap ve 25 mm yüksekliğindeki altı açık hacimsel rötire (büzülme) kabı

#### **4.1.2. Mekanik özellikler**

##### **4.1.2.1. Kompaksiyon deneyi**

Sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımları hazırlanarak standart proktor ASTM D698-78 (1985) belirtilen "Test Methods for Moisture-Density Relations of Soils and Soil Aggregate Mixtures, Using 5.5-lb (2.49-kg) Rammer and 12 - in. (305-mm) Drop", modifiye proktor ASTM D1557-78 (1985), "Test Methods for Moisture-Density Relations of Soils and Soil Aggregate Mixtures, Using 10-lb (4.54-kg) Rammer and 18 - in. (457-mm) Drop" metodları ve indirgenmiş proktor ( Daniel ve Benson, 1990) deneyleri yapılmıştır.

#### **4.1.2.2. Serbest basınç deneyi**

Sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımları hazırlanarak standart proktor (ASTM D698-78), modifiye proktor (ASTM D1557-78) ve Daniel ve Benson, (1990) tarafından tanımlanan indirgenmiş proktor deneylerine ait enerjiler ve farklı su muhtevaları uygulanarak numuneler elde edilmiş ve serbest basınç deneyleri ASTM D2166-66 (1979) belirtilen "Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil" metoduna göre yapılmıştır.

#### **4.1.2.3. Permeabilite deneyi**

Sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımları hazırlanarak standart proktor (ASTM D698-78), modifiye proktor (ASTM D1557-78) ve Daniel ve Benson, (1990) tarafından tanımlanan indirgenmiş proktor deneylerine ait enerjiler ve farklı su muhtevaları uygulanarak numuneler elde edilmiş ve düşen seviyeli permeabilite deneyi, esnek duvarlı permeabilite (ASTM D5084) setinde , 20 psi (137,9 kPa) sabit hücre basıncında yapılmıştır.

Numune içerisine giren ve çıkan sular eşit bir seviyeye ulaştığında yani numuneler tamamen doygun hale getirildikten sonra permeabilite katsayısı belirlenmiştir. Permeabilite katsayıları çözelti haznesindeki azalma, toplama haznesindeki artış ve zaman değerlendirilerek hesaplanmıştır. Yapılan deneyler U.S. EPA Method 9100 (1986)'da belirtilen "Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability" adlı deney yöntemine uygundur. Permeabilite deneyinin yapıldığı esnek-duvarlı permeabilite hücresi, uygulanan basıncın ayarlandığı ve çözelti seviyelerinin kontrol edildiği panel Şekil 4.2'de görülmektedir.

#### **4.1.2.4. Konsolidasyon deneyi**

Deneylerde standart proktor (ASTM D698-78) testine ait enerji ve kalıp takımları kullanılmış ve sıkıştırılan numuneler ASTM (D2435)'e uygun olarak konsolide edilmiştir.



Şekil 4.2. Esnek-duvarlı permeabilite hücreleri ve kontrol panelleri

#### 4.1.2.5. Şişme basıncı deneyi

Konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi şişme basıncı deneylerinde de numunelerin hazırlanmasında standart proktor (ASTM D698-78) testine ait enerji kullanılmıştır. Şişme basıncı deneyleri ASTM (D4546-85) 'ya göre yapılmıştır.

#### 4.1.2.6. Serbest şişme deneyi

Konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi serbest şişme deneylerinde de numunelerin hazırlanmasında standart proktor (ASTM D698-78) testine ait enerji kullanılmıştır. Serbest şişme deneyleri ASTM (D4546-85) 'ya göre ve  $0.07 \text{ kg / cm}^2$  (1 PSI) yüklemeyle yapılmıştır.

## 4.2. Fiziko-Kimyasal Özellikler

Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları ve bentonite ait bakır (Cu), kurşun (Pb) ve potasyum klorür (KCl) adsorpsiyon izotermeleri belirlenmiştir. Kirleticilerin Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları üzerindeki topaklanma etkilerini görmek amacıyla çöktürme (sedimentasyon) deneyleri yapılmıştır. Sepiyolit ve karışımlara ait pH, Elektriksel iletkenlik (EC), ateşte kayıp miktarı (veya organik madde miktarı) fiziko-kimyasal özellikleri de belirlenmiştir.

### 4.2.1. Adsorpsiyon İzotermelerinin Belirlenmesi

#### 4.2.1.1. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, sabit basınç altında bir gaz, buhar veya çözeltinin bir katı yüzey ile temas ederek hacminin veya derişiminin değişmesi ve bu değişimin de katı yüzey tarafından gerçekleştirilmesidir. Adsorpsiyon, fiziksel ve kimyasal olmak üzere ikiye ayrılır. Fiziksel adsorpsiyon tüm gaz, buhar ve katılar arasında gözlenir. Adsorpsiyona neden olan kuvvet, dipol dipol etkileşmesi veya Van der Waals kuvvetleridir. Fiziksel adsorpsiyondan yararlanarak, gözenekli katıların yüzey alanını, gözenek büyüklüğünü ve gözenek dağılımını tayin etmede kullanılan yöntemler geliştirilmiştir. Kimyasal adsorpsiyonda ise kirletici bileşen molekülü adsorbana kimyasal bağla bağlanmıştır ve katı yüzey üzerinde birleşme kuvvetleri tarafından tutulmuştur. Adsorpsiyonda, adsorban olarak başta aktif karbon olmak üzere alümina, boksit, bone char, magnezit, silikajel, stronsiyum sülfat vb. maddeler kullanılabilir.

Bu proses, çevre mühendisliği uygulamalarında özellikle atıksu arıtım tesislerinde, ileri ve son arıtım tekniği olarak kullanılmaktadır. Klasik arıtma ile arıtılması güç olan ve zehirlilik, renk, koku kirliliği yaratan kimyasal maddelerin adsorplayıcı bir katı madde (adsorban) yüzeyinde kimyasal ve fiziksel bağlarla tutunması ilkesinden yararlanır. Genelde bu tür uygulamalarda aktif karbon kullanılır.

Bir adsorpsiyon dengesi kurulduğunda, adsorban maddenin birim kütlesinin adsorpladığı gaz, buhar veya madde miktarı sıcaklık (T), derişim (C) ve basınç (P) veya denge basıncının ( $P_e$ ) bir fonksiyonudur. Sıcaklığın sabit tutulduğu durumda,

$$(x/m)_T = f(P \text{ veya } C) \quad (4.1)$$

Bu şekilde elde edilen eğrilere adsorpsiyon izotermi denir. Deneysel olarak belirlenen adsorpsiyon izotermelerini ve diğer adsorpsiyon verilerini değerlendirmek için çok sayıda denklem üretilmiştir. Adsorplanan veya adsorplayıcı için bu eşitliklerden biri ya da birkaçı daha uygun olmaktadır.

#### 4.2.1.2. Freundlich denklemi

Çözültideki madde derişimi ile adsorplanmış madde arasındaki ilişki için ilk eşitlik Freundlich tarafından üretilmiştir. Burada düşünülen ideal olarak temiz ve homojen olmayan katı yüzeylerindeki adsorpsiyonlardır.

Ampirik Freundlich izotermi deneysel olarak bulunur, sınırlı çözünen derişim aralıklarındaki adsorpsiyon dengeleri gösterir.

$$(x/m)_T = X = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (4.2)$$

x = Adsorplanan çözünen kütlesi

m = Adsorban kütlesi

X = Katı fazın kütle oranı (Adsorbanın kütlesi başına adsorplanan çözünen kütlesi)

$C_e$  = Çözünenin denge derişimi (Kütle/Hacim)

$K_f, n$  = Ampirik sabitler

Bir log- log grafik kağıdına  $C_e$ 'e karşı (x / m) çizilirse, doğrunun eğimi 1, kayması da K olacaktır.

$$\log (x / m) = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad (4.3)$$

İyonik katılardaki adsorpsiyonlarda, fiziksel adsorpsiyon nicel olarak tanımlanan iyon değişimi gibi bir kimyasal olaydan sonra başlar. Kimyasal adsorpsiyondan katyon değişim kapasitesi gibi bazı kimyasal özelliklere, fiziksel adsorpsiyondan ise özgül yüzey alanına geçilebilmektedir.

### 4.2.1.3. Langmuir denklemi

Tek tabakalı fiziksel adsorpsiyon ve çözültiden adsorpsiyon için Langmuir denklemi kullanılabilir. Gaz katı aralığında her basınç aralığında sınırlı çözünen derişimler için geçerlidir.

Langmuir izotermi için kabuller;

1. Adsorpsiyon için mevcut alan sınırlıdır.
2. Yüzeyde adsorplanan çözünen materyal yalnızca tek bir molekül kalınlığındadır.
3. Adsorpsiyon tersinirdir ve bir denge koşuluna ulaşılır.

Adsorban, bir çözültiye konduğunda, çözünen adsorplanır ve desorpsiyonda gerçekleşir. Fakat adsorpsiyon hızı, desorpsiyon hızından büyüktür. Sonuçta adsorpsiyon hızının desorpsiyon hızına eşit olduğu bir denge koşuluna ulaşılır.

Langmuir adsopsiyon denklemi aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$(x/m) = (abC_e)/(1+bC_e) \quad (4.4)$$

$(x / m)$  = Adsorbanın birim ağırlığı başına adsorplanan miktarı

$a$  = Birim adsorban kütesinin tamamen doyması için gerekli adsorplanan çözünen kütesi,

$b$  = Deneysel sabit

$C_e$  = Çözültideki adsorplananın adsorpsiyondan sonraki denge derişimi

$$C_e/(x/m) = (1/ab) + (C_e/a) \quad (4.5)$$

$C_e$ 'ye karşı  $C_e / x / m$  değerleri grafiğe geçirilir. Eğim  $(1/a)$  y1, kayması da  $(1/ab)$  yi verir. Buradan  $a$  ve  $b$  değerleri bulunur. Langmuir denklemlerinde adsopsiyon hızı;

1. Çözünenin çözülti içinden, adsorban katıyı çevreleyen sıvı filmi ya da sınır tabakasına hareketi,
2. Çözünenin sıvı filminden difüzyonu,
3. Çözünenin adsorban katı içinde kapiler ya da gözeneklere difüzyonu,
4. Çözünenin, kapiler duvarları ya da yüzeylerine adsorpsiyonu ile belirlenen çeşitli kütle aktarım mekanizmalarından biri ile sınırlıdır.

#### 4.2.1.4. Deney Numunelerinin Hazırlanışı ve Adsorpsiyon Okumaları

Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları ve bentonit kilinden sızıntı deneylerinde de kullanılan 2000 ppm'lik bakır (Cu), kurşun (Pb) ve 1N potasyum klorür (KCl) çözeltileri için 0,25, 0,5, 1, 2 ve 3'er gram hazırlanmıştır. 500 ml'lik ölçekli cam kap içinde teker teker aynı karıştırıcı cihaz ve karıştırıcı miktatıs kullanılarak 250 ml çözelti ve 0,25, 0,5, 1, 2 ve 3'er gramlık numuneler 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Karışan çözeltilerden, 2 saat sonunda numuneler alınarak, çözeltideki zemin süzme yoluyla ayrıldıktan sonra, ağır metal ve potasyum tesbiti için saklanmıştır. Sonrasında Atomik Adsorpsiyon (AA), Perkin Elmer Atomic Absorbtion Spectrometer 3110 cihazı ile metal okumaları, Petracourt PFP1 Rame Photometer cihazı ile de potasyum okumaları gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.2. Çökeltme (sedimentasyon) deneyi

Killerin topaklanmasında (flokülasyonunda) distile su, 2000 ppm bakır (Cu), krom (Cr), kurşun (Pb) ve 1N potasyum klorür (KCl) çözeltilerinin etkisini incelemek amacıyla sedimentasyon deneyleri yapıldı. Bu amaçla etüvde kurutulmuş 200 no'lu elek altı sepiyolit ve 25K75S, 50K50S karışımlarından 50'er gr alınarak, distile su ile hazırlanmış potasyum hegzafosfat içerikli bir miktar çözücü ilave edildi. Daha sonra hazırlanan numuneler 1000'er ml'lik distile su, 2000 ppm'lik bakır (Cu), krom (Cr), kurşun (Pb) ve 1N potasyum klorür (KCl) çözeltileriyle karıştırılarak 1 litrelik cam silindirde çökeltmeleri sağlandı. Sedimentasyon hızını belirlemek amacıyla sıvı ile süspansiyon arasında oluşan ara yüzeyin sıvı üst yüzeyinden aşağıya doğru olan çökmesi 150 dakikalık süre içerisinde her 5 dakikada bir ölçüldü (Yıldız, 1998).

#### 4.2.3. pH

Sepiyolit ve karışımlara ait pH değerleri belirlenmiştir. Laboratuarda oda sıcaklığında (18-21°C) üzeri açık olarak kurumaya bırakılan numuneler tamamen hava kurusu normuna (yani %3-5 su muhtevasına) ulaştıktan sonra 40 nolu (0.425

mm) elekten elenerek 20 gr alındı ve 50 ml ASTM Type H'ye uygun saf su ile bir beher içinde zaman zaman 30 dakika karıştırıldı. Karıştırılan karışımların üzeri kapatılarak 1 saat sonra pH değerleri ölçüldü. pH deneyi için U.S. EPA Method 9045 (1986)'da belirtilen "Soil pH" metodu kullanıldı. Mukayese yapılabilmesi için, aynı karışımların, üzeri kapatıldıktan bir gün sonra tekrar pH değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerde zemin çözeltilisinin üzerindeki berrak kısmın içerisine cam elektrotlu pH metre (Orion Model 420A) daldırıldı ve numunelerin pH değerleri belirlendi.

#### **4.2.4. Elektriksel iletkenlik**

Sepiyolit ve karışımlara ait elektriksel iletkenlik (EC) değerleri belirlenmiştir. Laboratuarda oda sıcaklığında (18-21°C) üzeri açık olarak kurumaya bırakılan numuneler tamamen hava kurusu normuna (yani %3-5 su muhtevasına) ulaştıktan sonra 16 nolu (1.31 mm) elekten elendi. Daha sonra bu numunelerden 150-250 gr arasında alınarak saf su ile bir beher içinde doymuş hale getirildi. Doymuşluk, zeminin su ile doymuş hale gelmesi durumunda çamurun yüzeyinin ışığı yansıttığı için parıldaması ve kap eğilince çamurun yavaşça akması gözlenerek ayarlandı. Karıştırma işi bitince doymuş hale getirilmiş çamurun üzeri kapatılarak 1 gün bekletildi. Elektriksel iletkenliği ölçülecek çözeltilerin içerisine Omega CDB-70 Conductivity Meter cihazının cam elektrotu daldırılarak numunenin elektriksel iletkenliği belirlendi (Wilcox,1946; Karakouzian et al., 1996).

#### **4.2.5. Ateşte kayıp miktarı (organik madde miktarı)**

Ateşte kayıp (veya organik madde miktarı) kuru yakma yöntemi ile belirlenmiştir. Bu metod organik maddenin kaba bir ölçüsünü vermektedir. Metotta numuneler önce 105°C'de 24 saat kurutuldu. Bu numuneler daha sonra 550°C'de 2 saat yüksek fırında yakıldı (Standard Methods, 1993, Horaek et al., 1989).

### 4.3.Çevresel Şartlara Ait Özellikler

Çöp deponi alanlarında, çöpün kendi su muhtevassından, meydana gelen biyokimyasal faaliyetlerden ve yağmur, civardan gelebilecek taşkın suları, alana sızabilecek yeraltı suları gibi çevresel etkenlerden kaynaklanabilen yüksek miktarda kirliliğe sahip sızıntı suları her zaman için asıl tehlike unsuru olmaktadır. Bu yüksek kirliliğe sahip sızıntı suları geçirimsizlik amaçlı çöp deponi alanı tabakaları tarafından tutulmaya çalışılmakta ve sızıntı olayı da bu noktada gerçekleşmektedir. Donma-çözülme olayı da çöp deponi alanı tabakalarının kış aylarında yoğun bir şekilde maruz kaldıkları ve yapılarını oldukça bozan bir etkidir. Donma sırasında sıkıştırılmış kilin yapısında, makro ve mikro boyutta çatlaklar oluşarak bu bir çatlaklar ağına dönüşmekte ve çözülme gerçekleşikten sonra permeabilite de büyük artışlar gerçekleşmektedir. Othman ve ark., (1994) yaptıkları çalışmalarda bu değişimin yaklaşık 1 - 400 kat civarında olduğunu tespit etmişlerdir.

Çöp deponi alanı geçirimsizlik amaçlı tabakalarının maruz kaldığı sızıntı olayını ve kış aylarında geçirdikleri donma-çözülme çevrimlerini laboratuvar deneylerine yansıtmak üzere sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımlarına ait standart proktor (ASTM D698-78) prosedürü ve kalıp takımları kullanılarak optimum su muhtevassında sıkıştırılmış numunelere, kirletici olarak çöp deponi alanlarında yüksek miktarda bulunan ağır metal ve tuz çözeltileri kullanılarak normal ve 1, 3, 5 çevrim donma – çözülme uygulanarak sızıntı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 1, 3, 5 çevrim donma-çözölmeye tabi tutulmuş bir kısım numuneye de kirletici kullanılmadan sızıntı deneyleri yapılmıştır.

#### 4.3.1. Sızıntı (leachate) deneyi

Numuneler deney öncesi laboratuvarında standart proktor deneyi ASTM D698-78 (1985), metodu ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı kalıplardan çıkarılmadan direk rijit-duvarlı permeametre (ASTM D5856) düzeneğine yerleştirilerek, ağır metal ve tuz çözeltileri ile sızma deneyine tabi tutulmuştur. Bir kısmı da donma-çözölme çevrimleri sonrası düzeneğe

yerleştirilip, ağır metal ve tuz çözeltileri ile sızıntı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 1, 3, 5 çevrim donma-çözülme uygulanmış bir kısım numune de kirletici kullanılmadan sızıntı deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerden, 3., 5., 8. ve 10. günlerde ortalama olarak 50'şer ml sızıntı suyu toplanmıştır. Sızıntı deneyi U.S. EPA Method 9100 (1986) belirtilen "Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability" metoduna uygun olarak yapılmıştır. Sızıntı deneyleri tamamlanan karışımlardan bir boyutlu konsolidasyon, serbest şişme ve serbest basınç numuneleri alınarak deneyleri yapılmıştır. Ayrıca sızıntı deneylerinde permeabilite katsayıları da hesaplanmıştır. Sızıntı deneylerinde kullanılan ve bu çalışma için özel olarak oluşturulan sistemin (soldan sağa) üst plaka, alt plaka ve kompaksiyon kalıbı Şekil 4.4'de, kirletici çözeltilerinin içine doldurularak sisteme verildiği çözelti haznesi Şekil 4.5'de ve kurulmuş hali ise Şekil 4.6'da görülmektedir.

#### **4.3.2. Donma-çözülme çevrimleri**

Donma-çözülme çevrimlerine tabi tutulan numuneler, laboratuarda standart proktor deneyi ASTM D698-78 (1985), metodu ile hazırlanmıştır. Sepiyolit ve 25K75S, 50K50S karışımlarına ait sıkıştırılmış numuneler, proktor kalıbından çıkarılmadan, 2 kat poşet içine yerleştirilip poşetteki hava vakumla alınarak nem kaybı önlenmiştir. Bu numuneler (-20°C)'de 24 saat bekletilip daha sonra 24 saat oda sıcaklığındaki nemli bir ortam içinde bırakılmıştır. Bu bir çevrim olarak adlandırılmıştır. Numunelere 1, 3 ve 5 çevrim donma-çözülme uygulanarak, çevrimler sonunda numuneler direk olarak rijit duvarlı permeametre (ASTM D5856) düzeneğine yerleştirilip sızma deneyleri yapılmıştır. Sızma deneyleri sonrası serbest basınç, serbest şişme ve konsolidasyon deneyleri için numuneler alınarak deneyleri yapılmıştır.

### 4.3.3. Sızıntı deneyi ve donma-çözülme çevrimleri sonrası mekanik deney yöntemleri

Ağır metal ve tuz çözeltileri kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimli ve donma-çözülmesiz sızıntı deneyleri sonrası karışımlarla kirleticiler arasındaki etkileşimin mekanik özelliklere olan etkisini tespit etmek amacıyla aşağıda verilen mekanik deneyler yapılmıştır. Ayrıca kirletici kullanılmadan yapılan donma-çözülme çevrimli sızıntı deneyleri sonrası da aynı mekanik deneyler yapılmıştır.

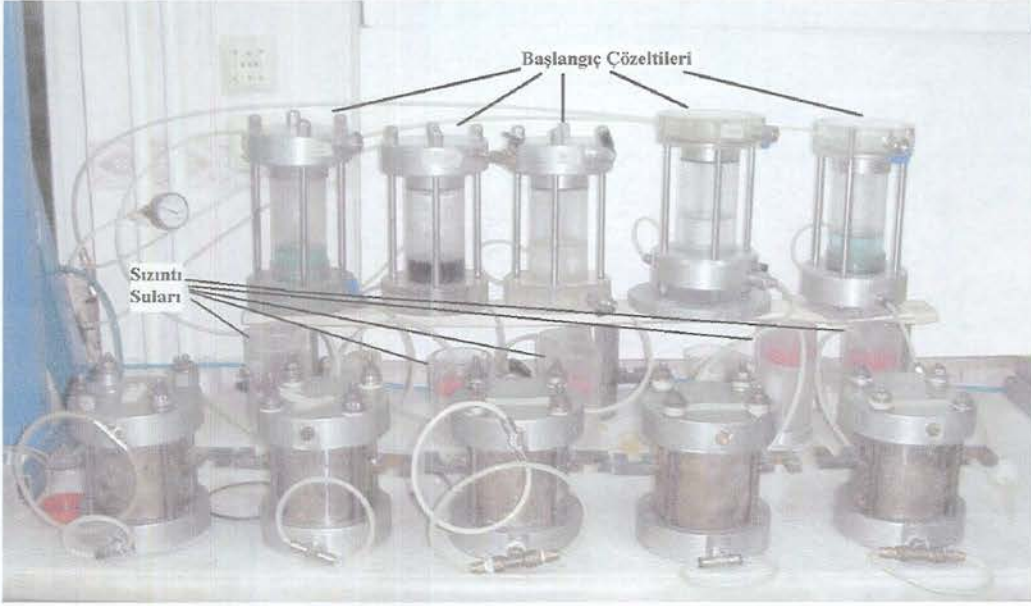


(a)



(b)

**Şekil 4.3.** Sızıntı deneylerinin yapılması için oluşturulan sistemin,(a) (soldan sağa) üst plaka, alt plaka ve kompaksiyon kalıbı, (b) kirletici çözeltilerin, sisteme aktarılmasında kullanılan çözelti haznesi



Şekil 4.4. Sızıntı deneylerinin yapılması için oluşturulan sistem

#### 4.3.3.1. Serbest basınç deneyi

Sızıntı deneyleri sonrası alınan 36 mm çap ve 72 mm yüksekliğindeki numuneler ASTM D2166-66 (1979) belirtilen "Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil" metoduna göre kırılmıştır.

#### 4.3.3.2. Konsolidasyon deneyi

Sızıntı deneyleri sonrası konsolidasyon ringleri kullanılarak alınan numuneler ASTM (D2435)'e uygun olarak ve sızıntı deneylerinde kullanılan kirletici çözeltilerin içinde konsolide edilmiştir.

#### 4.3.3.3. Serbest Şişme Deneyi

Sızıntı deneyleri sonrası konsolidasyon ringleri kullanılarak alınan numuneler ASTM (D4546-85) 'ye göre ve  $0.07 \text{ kg / cm}^2$  (1 PSI ) yüklemeyle, sızıntı deneylerinde kullanılan kirletici çözeltilerin içinde serbest şişmeye bırakılmıştır.

#### **4.3.4. Sızıntı deneyi ve donma-çözülme çevrimleri sonrası fiziko-kimyasal deney yöntemleri**

Ağır metal ve tuz çözeltileri kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimli ve donma-çözülmesiz sızıntı deneyleri sonrası karışımlarla kirleticiler arasındaki etkileşimin fiziko-kimyasal açıdan etkisini tespit etmek amacıyla aşağıda verilen fiziko-kimyasal deneyler yapılmıştır. Ayrıca kirletici kullanılmadan yapılan donma-çözülme çevrimli sızıntı deneyleri sonrası da aynı fiziko-kimyasal deneyler yapılmıştır.

Kullanılan kirletici çözeltilerin ve donma-çözülme çevrimlerinin karışımlar üzerindeki absorpsiyon ve adsorpsiyon özelliklerini etkileyen, pH ve elektriksel iletkenlik (EC) değişimleri tespit edilmiştir. Aynı zamanda sızıntı deneyleri sırasında toplanan sızıntı sularının pH, elektriksel iletkenlik (EC), ağır metal ve potasyum (K) değerleri de tespit edilmiştir.

##### **4.3.4.1. pH**

Sızıntı deneyi sonrası alınan zemin numunelerine ait pH değerleri, U.S. EPA Method 9045 (1986)'da belirtilen "Soil pH" metoduna göre ve daha önce bölüm 4.2.3'de açıklandığı gibi yapılmıştır. Sızıntı deneyleri sırasında toplanan sızıntı sularının pH değerleri de sulara cam elektrotlu pH metre (Orion Model 420A) daldırılarak belirlenmiştir.

##### **4.3.4.2. Elektriksel iletkenlik**

Numunelere ait elektriksel iletkenlik (EC) değerleri, Wilcox,1946; Karakouzian ve ark., (1996)'nın belirttiği şekilde ve daha önce bölüm 4.2.4'de açıklandığı gibi yapılmıştır. Sızıntı deneyleri sırasında toplanan sızıntı sularının pH değerleri de sulara Omega CDB-70 Conductivity Meter cihazının cam elektrotu daldırılarak belirlenmiştir.

#### **4.3.4.3. Toplam metal ve potasyum (K) miktarı**

Sızıntı deneyleri ve donma-çözülme çevrimleri sonrası sızıntı deneyleriyle toplanan sızıntı sularının ağır metal içeriklerini belirlemek amacıyla bakır (Cu), krom (Cr), kurşun Pb ve potasyum (K) miktarları tespit edilmiştir. Ayrıca 1, 3, 5 çevrim donma-çözülme uygulanan karışımların sızıntı deneyleri sonunda toplanan sızıntı suları için ilaveten nikel (Ni), kadmiyum (Cd), demir (Fe), alüminyum (Al) ve çinko (Zn) miktarları da tespit edilmiştir.

Metal miktarları Atomik Absorpsiyon (AA), Perkin Elmer Atomic Absorbtion Spectrometer 3110 cihazı ile, Potasyum miktarları, Petracourt PFP1 Rame Photometer ile yapılmıştır. Uygulanan metod U.S. EPA Method 3050, Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, 1986 metoduna uygun bir yöntemdir.

#### **4.4. Mikro-Yapısal Özellikler**

##### **4.4.1. Scanning (tarama) elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları**

Deneylemler sonucunda, Tarama Elektron Fotoğrafları Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Seramik Malzeme Laboratuvarlarında çekilmiştir. SEM için etüvde kurutulmuş hazırlanan numunelerin yüzeyleri yüzey şarjlanmasını engellemek ve yüzeyi daha iletken bir duruma getirmek için vakum ortamında Au-Pd alaşımı ile kaplanmıştır. Hazırlanan numunelerin mikroyapı analizlerinde Camscan S4 series SEM ve buna bağlı Oxford Instruments firmasına ait 5108 model EDX cihazı kullanılmıştır.

##### **4.4.2. X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi**

X-ışınları difraksiyonu analizi elde edilen malzemelerin faz kompozisyonunun tayininde kullanılan en önemli yöntemlerinden biridir. Bragg kanununa göre çalışan bu sistemde açı sapmaları dolayısı ile hatalı veriler toplamamak için XRD analizi öncesinde numunelerin yüzeyleri SiC zımpara kağıtları ile kaba parlatma işlemine tabi tutularak numune yüzeyleri

düzenleştirilmiştir. Zemin numunesinin kristal yapısının tanınması için X\_ışını kırınımı analizi (XRD) yapılır. X-ışınları günlük yaşamın bir çok alanında kullanılmaktadır. Elektromanyetik spektrumda yer alan x-ışınlarının dalga uzunlukları 0,01-100 Å dur. Bakır ışınımından elde edilen dalgaların uzunluğu 1,54 Å olup tabakalar arası uzaklıkları 1Å civarında olan kil mineralleri için uygundur. Bu dalgalar normal ışığın yansıyıp kırılmasına benzer olarak çarptıkları kristalde absorplanmadan kristal yüzeyinden içeriye birkaç atom tabakasını geçerler. Bu sırada atom tabakaları titreşerek ışınları her yöne saçar. Belirli yönlerdeki ışınım uygun fazda olursa bunların çakışmasıyla beliren ışın, fotoğraf filmi üzerine düşürülür. Böylece ışın şiddeti ve yönü belirlenir. Numunelerin faz analizleri daha sonra Rigaku Rint 2000 Series (Japonya) XRD cihazında 2°/dak. tarama hızında 30°-50° arasında gerçekleştirilmiştir.

## 5. DENEY SONUÇLARI

### 5.1. Hazırlanan Karışımlar

Deneylerde sepiyolit malzemesiyle birlikte kaolinit kili kullanılmıştır. Böylece çöp deponi tabakalarında kullanılacak olan sepiyolit malzemesinin, çöp depolama alanının inşa edileceği çevre de bulunan yerel bir kille birlikte karıştırılarak kullanımına ilişkin bir fikir edinilmesi planlanmıştır. Sepiyolit ve kaolinit kili etüvde 24 saat süreyle 105 C° de bekletildikten sonra kullanılmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere sepiyolit, %75 sepiyolit + %25 kaolinit (25K75S), %50 sepiyolit + %50 kaolinit (50K50S) karışımları hazırlanmıştır. Karışım oranları ağırlık esas alınarak ayarlanmıştır.

Serbest basınç, permeabilite ve hacimsel büzülme deneyi numunelerinin hazırlanmasında standart proktor (ASTM D698-78), modifiye proktor (ASTM D1557-78) ve Daniel ve Benson, (1990) tarafından tanımlanan indirgenmiş proktor testlerine ait enerjiler ve standart proktor kalıpları kullanılmıştır. Konsolidasyon, serbest şişme ve serbest basınç deneylerine ait numunelerin hazırlanmasında standart proktor (ASTM D698-78) testine ait enerji ve kalıp takımları kullanılmıştır.

### 5.2. Geoteknik Özellikler

#### 5.2.1. Fiziksel (indeks) özellikler

##### 5.2.1.1. Dane özgül ağırlığı

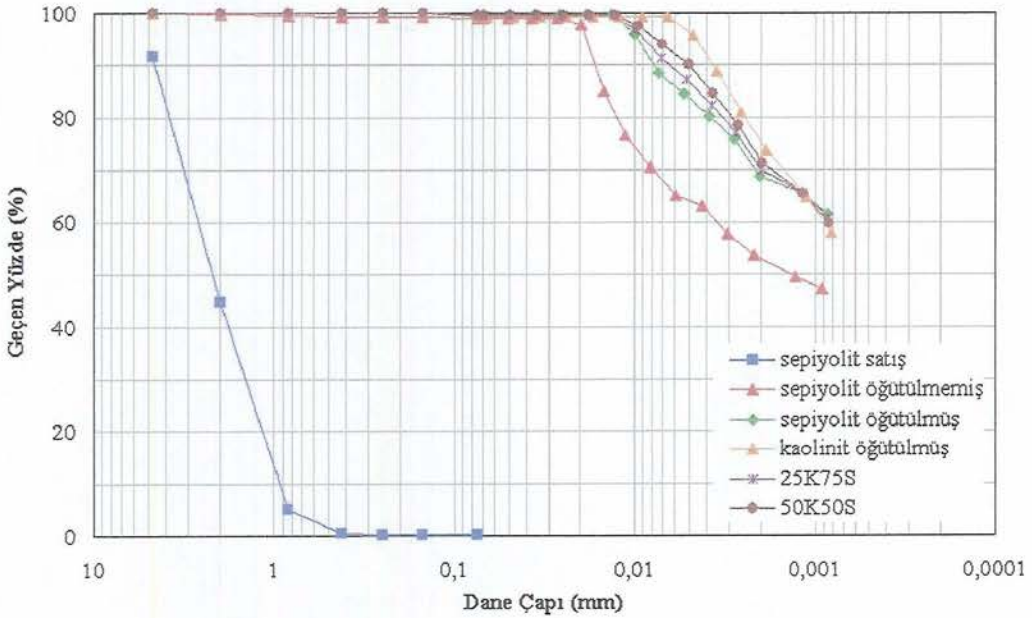
Sepiyolit, kaolinit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait belirlenmiş dane özgül ağırlık değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde elde değerlerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Sepiyolitin öğütüldükten sonra daha yüksek bir dane özgül ağırlığı sergilediği görülmüştür.

Çizelge 5.1. Sepiyolit, kaolin ve karışımlara ait dane özgül ağırlıkları

Malzeme	Dane Özgül Ağırlığı
Sepiyolit	2,44
Kaolinit	2,64
KS2575	2,54
KS5050	2,57

### 5.2.1.2. Dane çapı dağılımı

Üretici tarafından satışa sunulan granüle hale getirilmiş sepiyolit ve kaolinit öğütülmüştür. Satışa sunulan granüle sepiyolitın kuru metotla dane çapı dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca sepiyolitın granüle haldeki ve öğütüldükten sonraki dane çapı dağılımları ıslak metotla belirlenmiştir. Kaolinit kilinin dane çapı dağılımı da ıslak metotla belirlenmiştir. Sepiyolitın dane çapı dağılımları incelendiğinde, sepiyolitın ıslak metotla 200'nolu elekten geçen miktarının öğütüldükten sonra arttığı bununda kil yüzdesini artırdığı görülmüştür. Sepiyolit ve kaolinit killerine ait dane çapı dağılımları Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait dane çapı dağılımları

Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait silt ve kil yüzdeleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Sepiyolitin öğütülmesiyle kil yüzdesi yaklaşık %16 artmıştır.

Çizelge 5.2. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait silt ve kil yüzdeleri

Malzemeler	silt	kil
Sepiyolit	31,3	68,7
Kaolinit	24,5	75,5
25K75S	30	70
50K50S	28,5	71,5

### 5.2.1.3. Atterberg kıvam limitleri

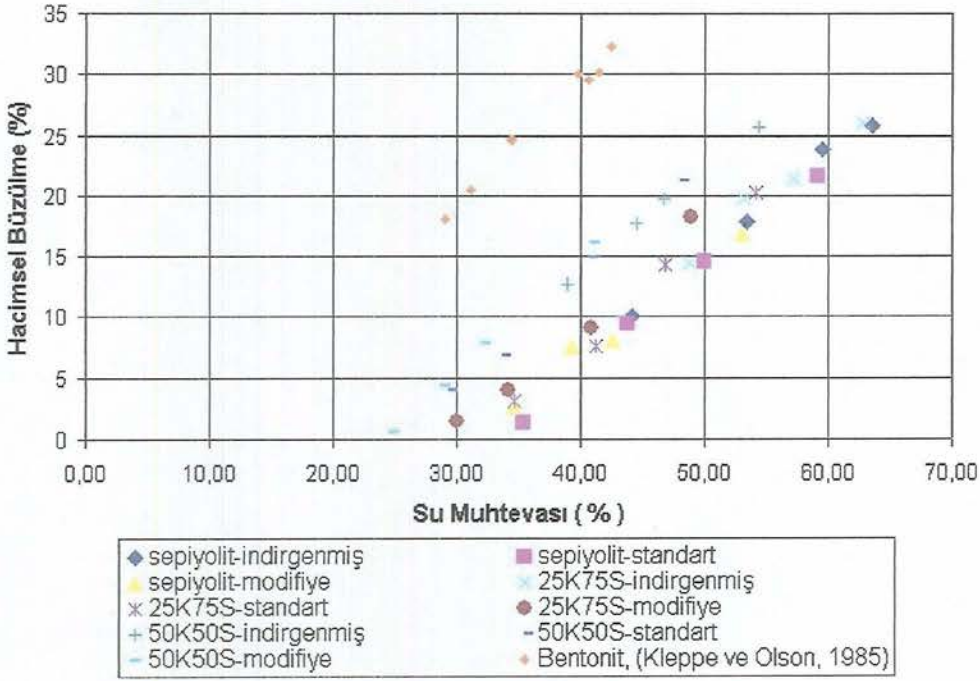
Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait atterberg kıvam limitleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. Sepiyolit, kaolinit ve karışımların kıvam limitleri belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sepiyolit ve karışımların kaolinite göre daha yüksek kıvam limitlerine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.3. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait Atterberg kıvam limitleri değerleri

Malzeme	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi	Rötre Limiti
Sepiyolit	132	85	47	39,2
Kaolinit	52,2	31	21,2	24,7
KS2575	113,6	74,5	39,1	35,3
KS5050	94	57,5	36,5	32,5

### 5.2.1.4. Hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi

Sepiyolit, karışımlar ve bentonite (Kleppe ve Olson, 1984) ait farklı kompaksiyon enerjileri ve kalıp su muhtevalarındaki hacimsel büzülme şekil değiştirme değerleri Şekil 5.2’de verilmiştir.

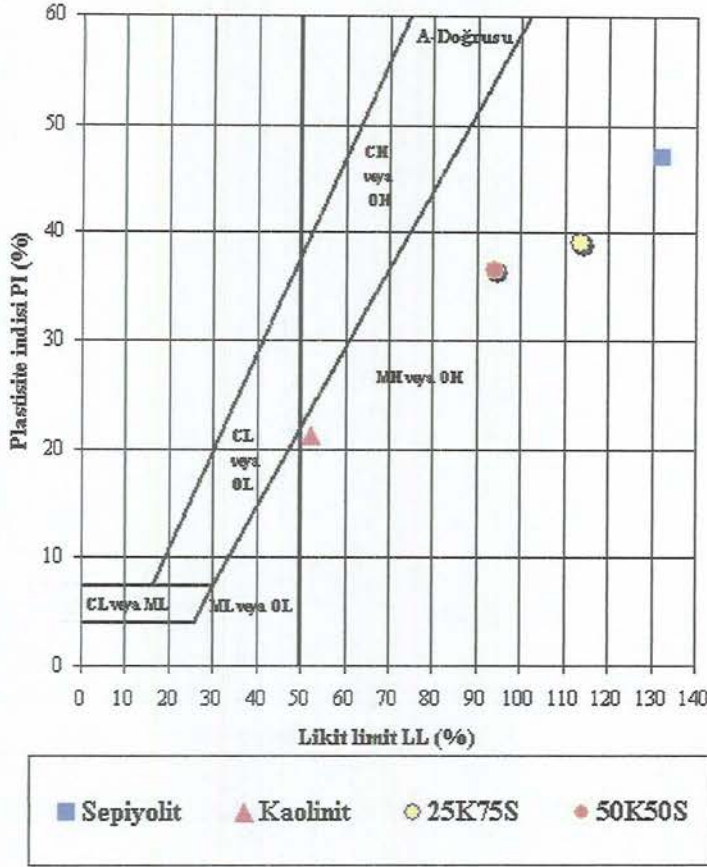


Şekil 5.2. Sepiyolit, karışımlar ve bentonite (Kleppe ve Olson, 1984) ait hacimsel büzülme birim hacim şekil değiştirmesi değerleri (rötre) değerleri

Sepiyolit, karışımlar ve bentonite (Kleppe ve Olson, 1984) ait hacimsel büzülme birim şekil değiştirmesi – su muhtevası ilişkileri incelendiğinde, sepiyolit ve karışımlara ait hacimsel büzülme özelliklerinin kullanılan kompaksiyon enerjisine pek fazla bağlı olmadığı görülmüştür. Hacimsel büzülme özelliği daha çok kalıp su muhtevası ve kilin özellikleriyle ilişkilidir. Kleppe ve Olson (1984) tarafından kullanılan bentonit sepiyolite kıyasla yüksek rötre ve kuruma çatlakları potansiyeline sahiptir.

#### 5.2.1.5. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)'ne göre sınıflandırma

Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerlerinin plastisite kartı üzerinde gösterilerek birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)'ne göre sınıflandırılması Şekil 5.3 'de ve sınıflandırmalara ait çizelge, Çizelge 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.3. sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait likit limit (LL) ve plastisite indisi (PI) değerlerinin plastisite kartı üzerinde gösterimi

Oluşturulan plastisite kartı incelendiğinde sepiyolit, kaolinit ve karışımların, U ve A doğrularının altında ve sağ tarafta kaldığı görülmüştür. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlar, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli silt sınıfına girmektedirler.

Çizelge 5.4. Sepiyolit ve karışımlara ait USCS'e göre yapılmış sınıflandırma

Malzeme	USCS
Sepiyolit	MH
Kaolinit	MH
KS2575	MH
KS5050	MH

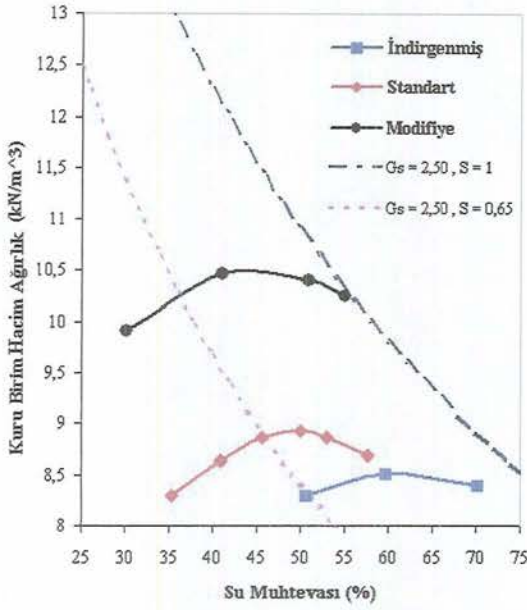
## 5.2.2. Mekanik özellikler

### 5.2.2.1. Kompaksiyon deneyi

Literatürde, çöp deponi alanı sıkıştırılmış kil tabakaları için arazide arzu edilen kompaksiyon enerjisini elde edebilmek için, laboratuarda pek çok kompaksiyon enerjisini uygulayarak, arazi ve laboratuvar şartları arasında doğru bir yaklaşımın yakalanabileceği belirtilmiş ve standart proktor (ASTM D698), modifiye proktor (ASTM D1557) ve Daniel ve Benson, (1990) tarafından tanımlanan indirgenmiş proktor deneylerinin yapılarak kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkilerinin belirlenmesi önerilmiştir. Bu yüzden sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımları hazırlanarak standart proktor, modifiye proktor ve indirgenmiş proktor deneyleri yapılmıştır. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait standart, modifiye ve indirgenmiş enerjiyle sıkıştırılan numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları Çizelge 5.5’de, kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası ilişkileri de sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 ’da verilmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonucunda en yüksek kuru birim hacim ağırlığının modifiye enerjiyle sıkıştırılmış numunelerde elde edildiği görülmüştür. En yüksek kuru birim hacim ağırlık değerleri ise 50K50S karışımında elde edilmiştir.

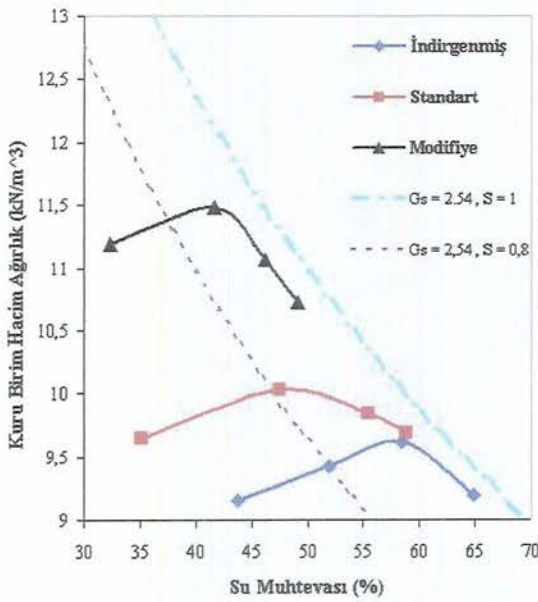
Çizelge 5.5. Sepiyolit ve karışımlara ait kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevaları

Malzemeler	Uygulanan Kompaksiyon Enerjisi	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Optimum Su Muhtevası wopt (%)
Sepiyolit	İndirgenmiş Proktor	8,49	61,5
	Standart Proktor	8,82	51
	Modifiye Proktor	10,28	43,5
25K75S	İndirgenmiş Proktor	9,76	58,5
	Standart Proktor	10,22	47,5
	Modifiye Proktor	11,64	41,5
50K50S	İndirgenmiş Proktor	10,93	48,5
	Standart Proktor	11,47	41,5
	Modifiye Proktor	12,91	33,5



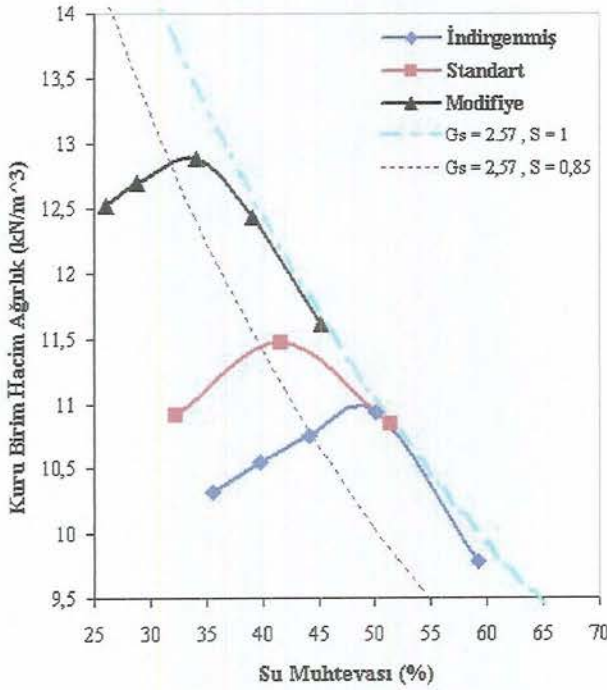
Şekil 5.4. Sepiyolite ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

Sepiyolite ait Şekil 5.4’de bulunan kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkileri incelendiğinde, kullanılan kompaksiyon enerjisinin artışıyla kuru birim hacim ağırlıklarının arttığı ve daha düşük kalıp su muhtevalarında daha yüksek kuru birim hacim ağırlıkları elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5.5. 25K75S karışımına ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

25K75S karışımına ait Şekil 5.5’de bulunan kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkilerinde de sepiyolitte olduğu gibi kullanılan kompaksiyon enerjisinin artışıyla kuru birim hacim ağırlıklarının arttığı ve daha düşük kalıp su muhtevalarında daha yüksek kuru birim hacim ağırlıkları elde edildiği görülmüştür. Sepiyolitte kullanılan %25 oranındaki kaolinit kili optimum su muhtevaları ve farklı enerjilerde hazırlanmış zeminlerin kuru birim hacim ağırlıklarında yaklaşık olarak  $1 \text{ kN} / \text{m}^3$  ‘lük artış meydana getirmektedir.

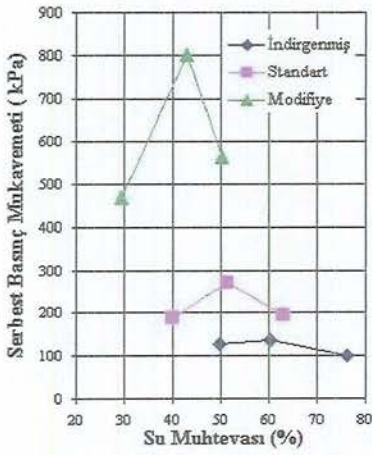


Şekil 5.6. 50K50S karışımına ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

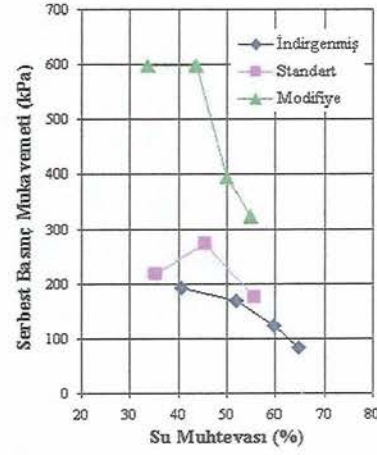
50K50S karışımına ait Şekil 5.6’da bulunan kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası ilişkilerinde de sepiyolitte olduğu gibi kullanılan kompaksiyon enerjisinin artışıyla kuru birim hacim ağırlıklarının arttığı ve daha düşük kalıp su muhtevalarında daha yüksek kuru birim hacim ağırlıkları elde edildiği görülmüştür. Sepiyolitte kullanılan %50 oranındaki kaolinit kili optimum su muhtevaları ve farklı enerjilerde hazırlanmış zeminlerin kuru birim hacim ağırlıklarında yaklaşık olarak  $2,5 \text{ kN} / \text{m}^3$  ‘lük bir artış meydana getirmektedir.

### 5.2.2.2. Serbest basınç deneyi

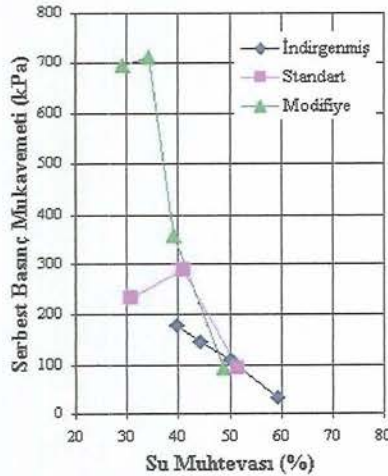
Sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımları hazırlanarak standart proktor (ASTM D698), modifiye proktor (ASTM D1557) ve Daniel ve Benson, (1990) tarafından tanımlanan indirgenmiş proktor Testlerine ait enerjiler ve farklı su muhtevaları uygulanarak numuneler elde edilmiş ve ASTM (D2166) 'ya göre deneyler yapılmıştır. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait serbest basınç mukavemeti – su muhtevası grafikleri sırasıyla Şekil 5.7a, Şekil 5.7b ve Şekil 5.7c 'de verilmiştir.



(a)



(b)



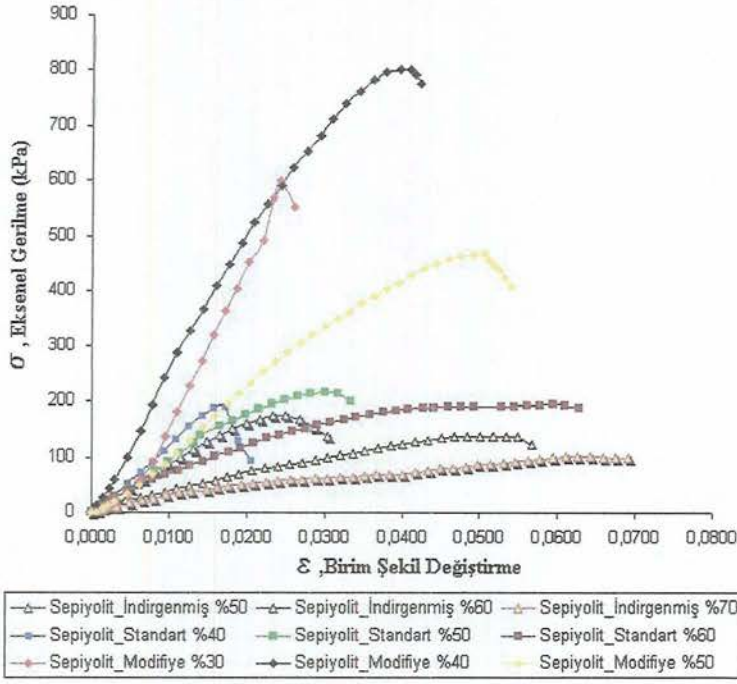
(c)

Şekil 5.7. (a) sepiyolit, (b) 25K75S ve (c) 50K50S karışımlarına ait serbest basınç mukavemeti-su muhtevası ilişkileri

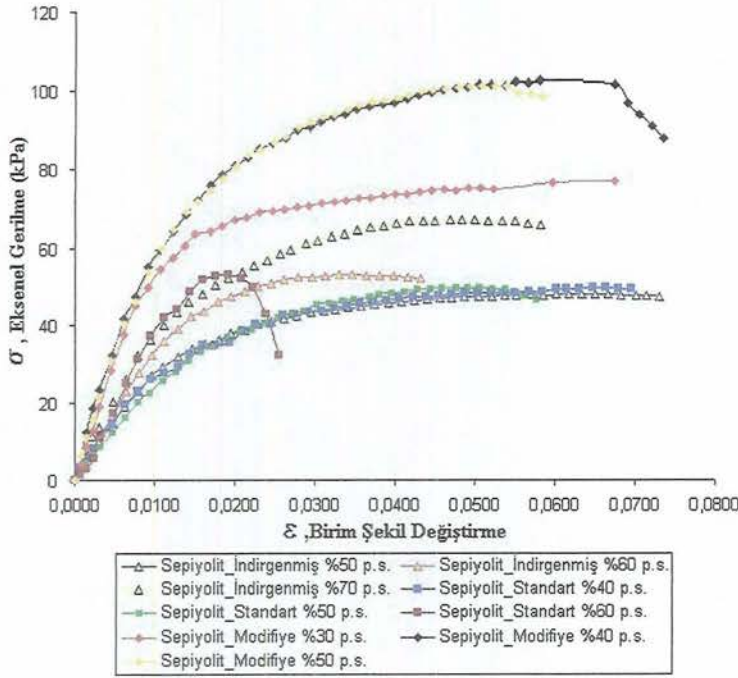
Şekil 5.7a'da görülen sepiyolite ait serbest basınç mukavemeti – su muhtevası ilişkileri incelendiğinde optimum su muhtevaları için serbest basınç mukavemetleri indirgenmiş enerjide 100 – 200 kPa , standart enerjide 200-300 kPa ve modifiye enerjide ise 700-800 kPa aralığındadır. Burada görülen ise sepiyolite uygulanan enerjilerin yaklaşık olarak aynı oranlarda serbest basınç mukavemetlerine yansımadır. Şekil 5.7b'de görülen 25K75S karışımına ait serbest basınç mukavemeti – su muhtevası ilişkileri incelendiğinde optimum su muhtevaları için serbest basınç mukavemetleri indirgenmiş enerjide 100-200 kPa , standart enerjide 200-300 kPa ve modifiye enerjide ise 500-600 kPa aralığındadır. Şekil 5.7c'de görülen 50K50S karışımına ait serbest basınç mukavemeti – su muhtevası ilişkileri incelendiğinde optimum su muhtevaları için serbest basınç mukavemetleri indirgenmiş enerjide 100 – 200 kPa , standart enerjide 200-300 kPa ve modifiye enerjide ise 600-700 kPa aralığındadır. Burada görülen sepiyolit ve karışımlara uygulanan enerjilerin yaklaşık olarak aynı oranlarda serbest basınç mukavemetlerine yansımadır.

Serbest basınç deneyleri açısından en yüksek serbest basınç mukavemetleri modifiye enerjide sıkıştırılmış numunelerde elde edilmiştir. Modifiye enerjide elde edilen serbest basınç mukavemetleri indirgenmiş enerjide elde edilenlere göre 3-4 kat daha fazla çıkmıştır. Deneylerde optimum su muhtevalarında, standart ve modifiye kompaksiyon enerjilerinde elde edilen serbest basınç mukavemetleri değerleri tasarım kriterlerini sağlamaktadır. Çöp deponi alanı tabakaları için Daniel ve Wu, (1993) maksimum taşıma kapasitesini destekleyen bir kil tabakası için istenen mukavemeti 200 kPa olarak hesaplanmışlardır. Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde karışımlara standart ve modifiye proktor prosedürleri uygulandığında serbest basınç mukavemeti koşulunun sağlandığı görülmüştür.

Sepiyolite ait farklı enerjiler ve su muhtevalarındaki gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.8'de verilmiştir. Sepiyolit numunelerinin kalıp su muhtevaları arttığında kırılma gerçekleşene kadar yapılan deformasyonda artarak daha sünek bir davranış sergilemektedir. Sepiyolit numunelerinin permeabilite deneyi sonrası kırılmasıyla elde edilen gerilme-birim şekil değiştirmesi ilişkileri Şekil 5.9'da verilmiştir. Permeabilite sonrası doygun numunelerde 40-100 kPa'lık serbest basınç mukavemetleri elde edilmiştir.

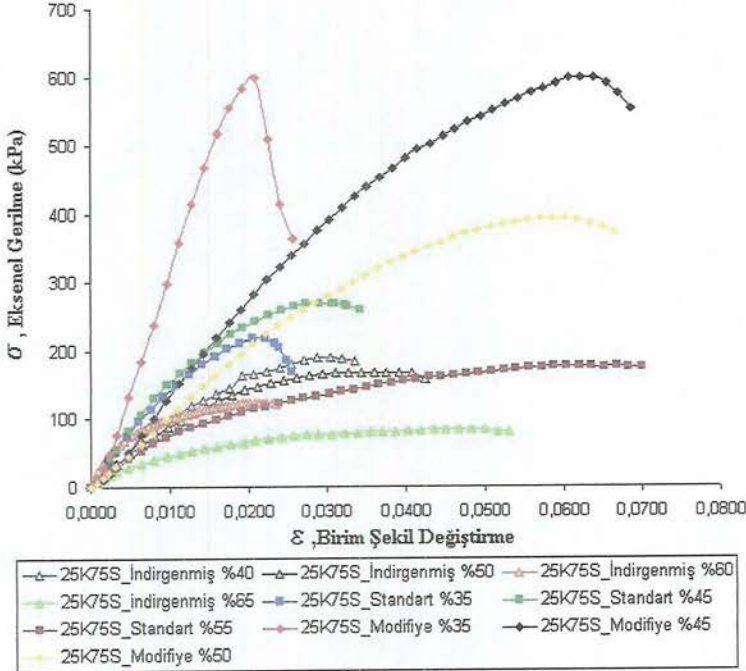


Şekil 5.8. Sepiyolit numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

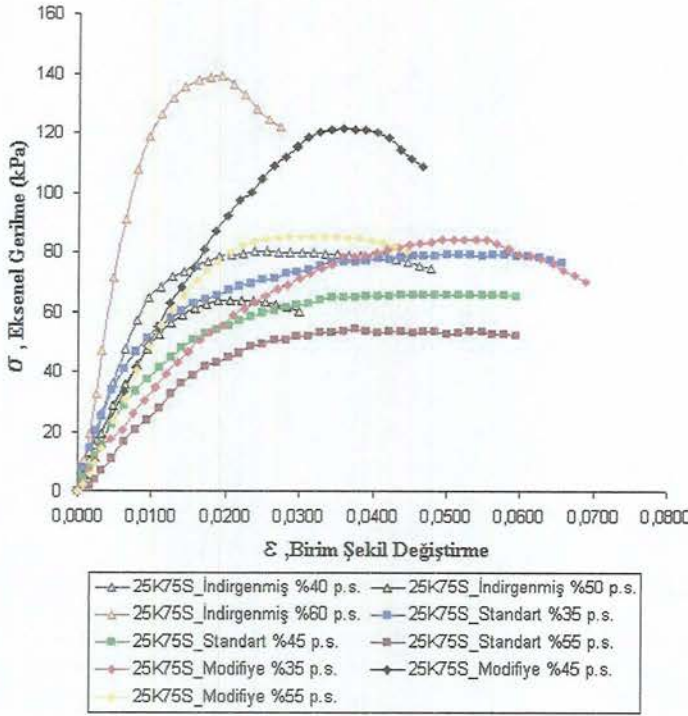


Şekil 5.9. Sepiyolit numunelerine ait permeabilite sonrası (p.s.) gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Ancak mukavemetler değerlendirilirken numunelerin sahip oldukları yaklaşık %75 'lik su muhtevaları dikkate alınmalıdır. Permeabilite öncesi modifiye enerji ile sıkıştırılmış numunelerin permeabilite sonrası serbest basınç mukavemetleri standart ve indirgenmiş enerji ile sıkıştırılmış numunelerin permeabilite sonrası mukavemetlerinden büyüktür. Sepiyolitin indirgenmiş, standart ve modifiye enerjilerde sıkıştırılan numunelerinin permeabilite sonrası serbest basınç mukavemetleri sırasıyla yaklaşık %60, %73 ve %83 oranlarında azalmaktadır. 25K75S karışımına ait farklı enerjiler ve su muhtevalarındaki gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.10'da verilmiştir. 25K75S karışımı numunelerinde de kalıp su muhtevaları arttığında, kırılma gerçekleşene kadar yapılan deformasyon artarak daha sünek bir davranış sergilemektedir. 25K75S karışımında modifiye enerjiyle elde edilen serbest basınç mukavemetleri ile standart enerjide elde edilen mukavemetler arasında daha az fark bulunmaktadır. 25K75S karışımı numunelerinin permeabilite deneyi sonrası kırılmasıyla elde edilen gerilme-birim şekil değiştirmesi ilişkileri Şekil 5.11'de verilmiştir.



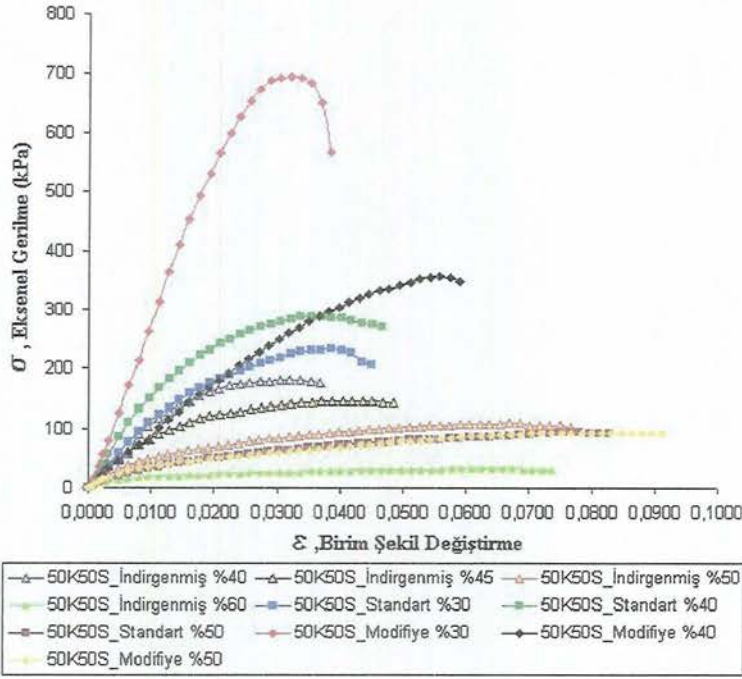
Şekil 5.10. 25K75S numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri



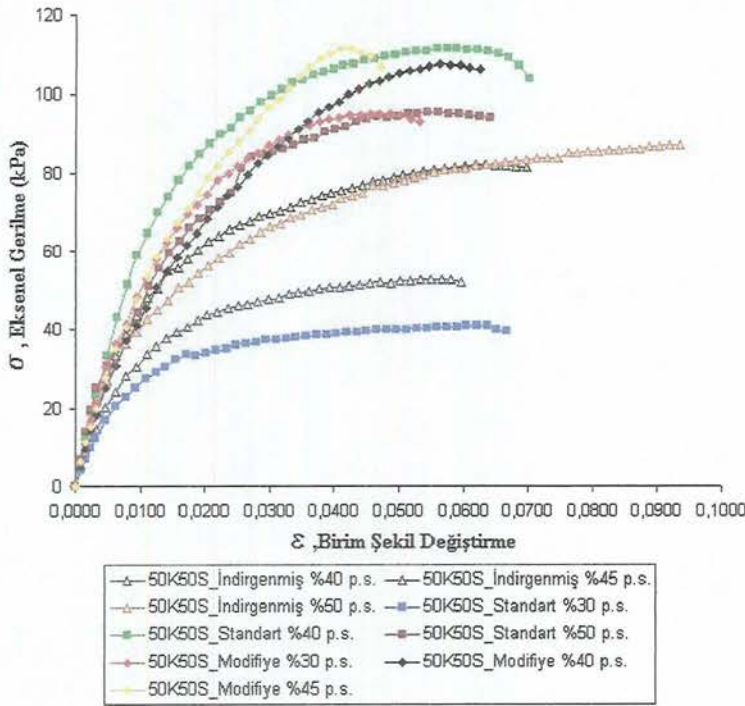
Şekil 5.11. 25K75S numunelerine ait permeabilite sonrası (p.s.) gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Permeabilite sonrası doymun numunelerde de 50-140 kPa'lık serbest basınç mukavemetleri elde edilmiştir. 25K75S karışımı doymun numuneleri de yaklaşık %60 'lık su muhtevalarına sahiptirler. 25K75S karışımı doymun numunelerinde de permeabilite öncesi modifiye enerji ile sıkıştırılmış numunelerin serbest basınç mukavemetleri standart ve indirgenmiş enerji ile sıkıştırılmış numunelerin mukavemetlerinden büyüktür ve enerji farkı daha belirginleşmiştir. 25K75S karışımının indirgenmiş, standart ve modifiye enerjilerde sıkıştırılan numunelerinin permeabilite sonrası serbest basınç mukavemetleri sırasıyla yaklaşık %40, %68 ve %83 oranlarında azalmaktadır.

50K50S karışımına ait farklı enerjiler ve su muhtevalarındaki gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.12'de verilmiştir. 50K50S karışımı numunelerinde de kalıp su muhtevaları arttığında, kırılma gerçekleşene kadar yapılan deformasyon artarak daha sünek bir davranış sergilemektedir. 50K50S karışımı numunelerinin permeabilite deneyi sonrası kırılmasıyla elde edilen gerilme-birim şekil değiştirmesi ilişkileri Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.12. 50K50S numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri



Şekil 5.13. 50K50S numunelerine ait permeabilite sonrası (p.s.) gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

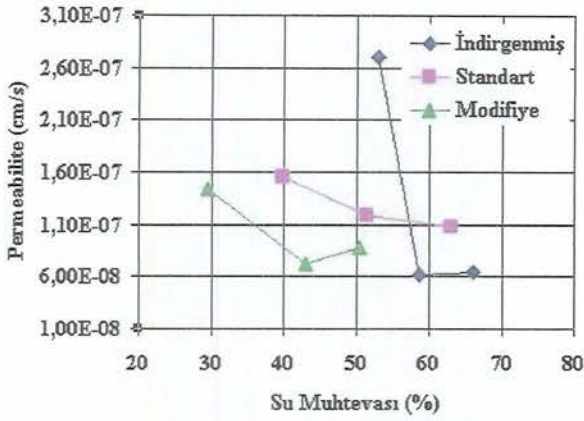
50K50S karışımı numunelerinde modifiye enerji ve standart enerjilerde sıkıştırılan numune eğrileri birbirine yaklaşırken, indirgenmiş enerjiyle sıkıştırılmış numune eğrileri onlardan ayrılarak daha yataya yakın bir konum almışlardır. Permeabilite sonrası doygun numunelerde de 30-110 kPa'lık serbest basınç mukavemetleri elde edilmiştir. 50K50S karışımı doygun numuneleri de yaklaşık %50 'lik su muhtevalarına sahiplerdir. 25K75S karışımı doygun numunelerinde, enerji farkıyla belirginleşen mukavemet farklılıkları 50K50S karışımında daha azalmıştır.

50K50S karışımının indirgenmiş, standart ve modifiye enerjilerde sıkıştırılan numunelerinin permeabilite sonrası serbest basınç mukavemetleri sırasıyla yaklaşık %50, %60 ve %75 oranlarında azalmaktadır.

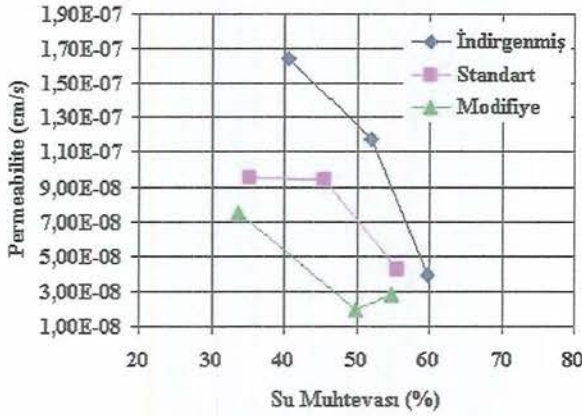
### **5.2.2.3. Permeabilite deneyi**

Sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımları hazırlanarak standart proktor (ASTM D698), modifiye proktor (ASTM D1557) ve Daniel ve Benson, (1990) tarafından tanımlanan indirgenmiş proktor testlerine ait enerjiler ve farklı su muhtevaları uygulanarak numuneler elde edilmiş ve esnek duvarlı permeabilite (ASTM D5084) deney setlerine yerleştirilip deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait permeabilite – su muhtevası grafikleri sırasıyla Şekil 5.14a, Şekil 5.14b ve Şekil.5.14c 'de verilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere sepiyolit ve karışımların farklı enerjilerde ve optimum su muhtevalarındaki permeabilite değerleri arasındaki fark, sepiyolitte  $6 \times 10^{-8}$  cm/s, 25K75S karışımında  $4 \times 10^{-8}$  cm/s ve 50K50S karışımında ise  $0,5 \times 10^{-8}$  cm/s mertebesindedir. Aynı zamanda optimum su muhtevasının ıslak tarafında daha düşük permeabilite değerleri elde edilmiştir. Optimum su muhtevalarındaki permeabilite değerleri enerji değişimiyle oldukça az değişim göstermiştir. Değerler arasındaki fark ise tüm karışımlar için ihmal edilecek düzeydedir. Sonuçlar incelendiğinde sepiyolit ve karışımlar için literatürde geçirgenlik için geçerli olan  $1 \times 10^{-7}$  cm/s koşulunun sağlandığı görülmüştür. Elde edilen permeabilite değerlerinin arasındaki ihmal edilebilecek düzeydeki farklılıklardan

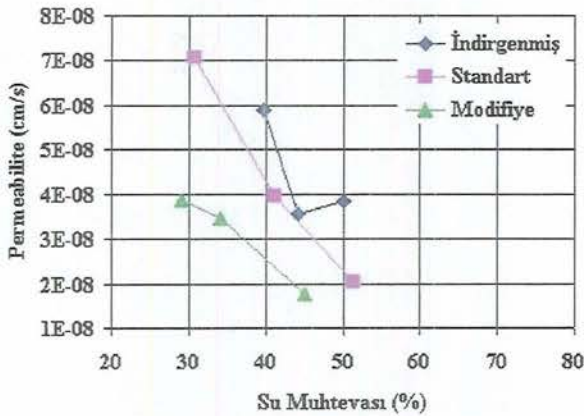
dolayı sonra yapılan deneylerde sadece standart enerji ve bu enerjideki optimum su muhtevası kullanılmıştır.



(a)



(b)

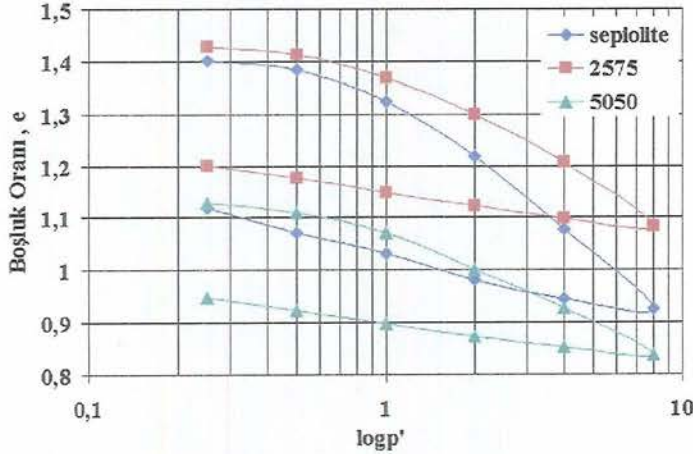


(c)

Şekil 5.14. (a) sepiyolit, (b) 25K75S ve (c) 50K50S karışımlarına ait permeabilite-su muhtevası grafikleri

#### 5.2.2.4. Konsolidasyon deneyi

Permeabilite deneyi sonuçları incelendiğinde kullanılan kompaksiyon enerjilerinin permeabilite şartı olan  $k \leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s değerinin sağlanmasında yeterli olduğu görülmüştür. Ancak elde edilen permeabilite değerleri arasında ihmal edilebilecek düzeyde farklılıklar olduğu için geoteknik uygulamalarında da yoğun olarak kullanılan standart kompaksiyon enerjisi konsolidasyon deneylerinde de kullanılmıştır. Sepiyolit ve karışımlara ait konsolidasyon deneylerinin Şekil 5.15'deki e-logp' ilişkileri incelendiğinde sepiyolit, 25K75S, 50K50S karışımlarının başlangıç boşluk oranlarının sırasıyla 1,4, 1,43, 1,12 olduğu ve oluşan boşluk oranı, (e) değişimlerinin de 0,28, 0,23, 0,18 olarak azalma gösterdiği görülmüştür. Aynı zamanda  $c_c$  değerleri de sırasıyla 0,44, 0,32, 0,26 şeklinde ve  $c_r$  değerleri de 0,09, 0,07, 0,06 şeklindedir. Sepiyolitteki kaolinit oranı arttıkça  $c_c$  ve  $c_r$  değerleri de düşmektedir.

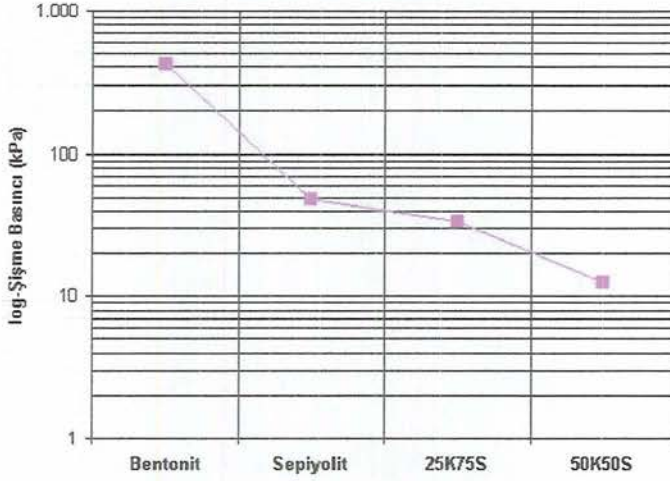


Şekil 5.15. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait e-logp' grafikleri

#### 5.2.2.5. Şişme basıncı deneyi

Konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi şişme basıncı deneylerinde de numunelerin hazırlanmasında standart kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları için şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca sepiyolitle arasındaki şişme basıncı farkının belirlenmesi amacıyla

bentonitle de şişme basıncı deneyi yapılmıştır. Sepiyolit, karışımlar ve bentonite ait şişme basıncı değerleri Şekil 5.16’da verilmiştir. Şişme basıncı değerleri incelendiğinde sepiyolite katılan kaolinitin oranı arttıkça şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerlerinin de azaldığı ve bentonitin yaklaşık sepiyolitin 9 katı şişme basıncına sahip olduğu görülmüştür.

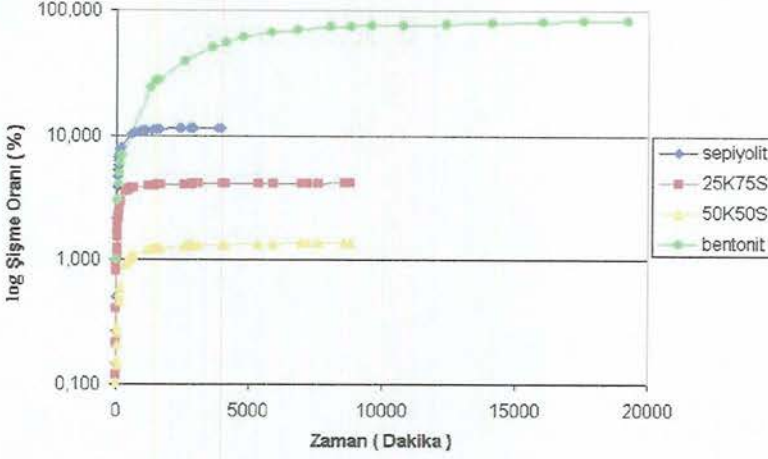


Şekil 5.16. Sepiyolit, karışımlar ve bentonite ait şişme basıncı değerleri

#### 5.2.2.6. Serbest şişme deneyi

Konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi serbest şişme ve şişme basıncı deneylerinde de numunelerin hazırlanmasında standart kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları ile serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Sepiyolite bentonitin şişme oranlarını karşılaştırmak amacıyla bentonitle de serbest şişme deneyi yapılmıştır. Sepiyolit, bentonit ve karışımlara ait Şişme Oranı – Zaman ilişkileri Şekil 5.17’ de verilmiştir.

Bu grafik incelendiğinde bentonitin serbest şişme oranının sepiyolitin yaklaşık 8 katı olduğu görülmüştür. Ayrıca sepiyolite katılan kaolinitin, sepiyolitin zaten düşük olan şişme oranını 25K75S karışımında %4’e, 50K50S karışımında ise %1,8’e düşürdüğü görülmüştür. Karışımdaki kaolinit oranı arttıkça şişme potansiyelinde de önemli azalma olmuştur.



Şekil 5.17. Sepiyolit, bentonit ve karışımlara ait logaritma şişme oranı-zaman ilişkileri

### 5.3. Fiziko-Kimyasal Özellikler

#### 5.3.1. Adsorpsiyon izotermeleri

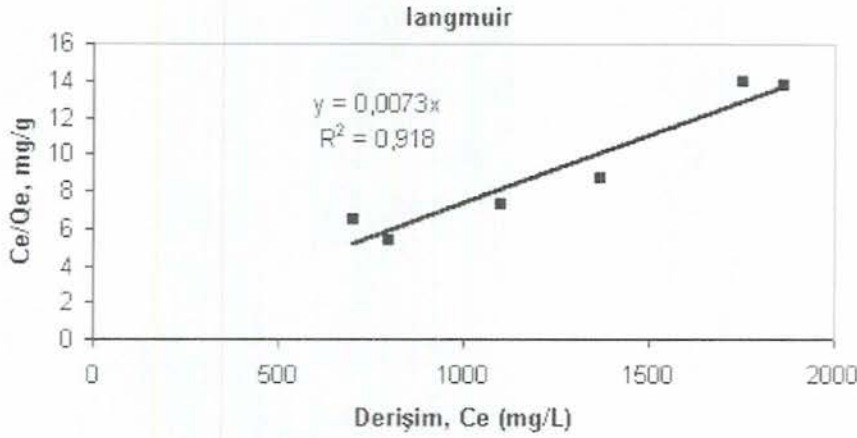
25K75S, 50K50S karışımları ve bentonite ait bakır (Cu) adsorpsiyon izotermeleri belirlenmiştir. 25K75S karışımına ait kullanılan malzeme ağırlığına karşılık karıştırma sonunda çözeltideki zemin süzöldükten sonra atomik adsorpsiyon cihazında okunan derişimleri gösteren tablo Çizelge 5.6'da yer almaktadır. 25K75S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi Şekil 5.18'de verilmiştir.

25K75S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi ilişkisinden  $Ce/Q_e = 0,0073 Ce$  bağıntısı elde edilmiş ve  $Q_e \max = 136,98 \text{mg/g}$  olarak hesaplanmıştır.

50K50S karışımına ait kullanılan malzeme ağırlığına karşılık karıştırma sonunda çözeltideki zemin süzöldükten sonra atomik adsorpsiyon cihazında okunan derişimleri gösteren tablo Çizelge 5.7'de yer almaktadır. 50K50S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi Şekil 5.19'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. 25K75S karışımına ait kullanılan malzeme ağırlığı ve derişim ilişkisi

25K75S (g)	Derişim (mg/L)
0,25	1865
0,5	1750
1	1370
1,5	1100
2	800
3	700



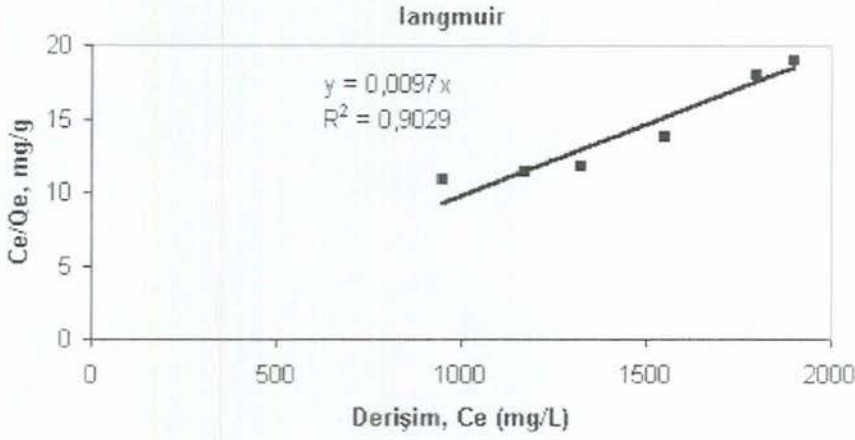
Şekil 5.18. 25K75S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi

50K50S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi ilişkisinden  $Ce/Qe = 0,0097 Ce$  bağıntısı elde edilmiş ve  $Q_e \max = 103,09 \text{ mg/g}$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.7. 50K50S karışımına ait kullanılan malzeme ağırlığı ve derişim ilişkisi

50K50S (g)	Derişim (mg/L)
0,25	1900
0,5	1800
1	1550
1,5	1323
2	1173
3	950

Bentonite ait kullanılan malzeme ağırlığına karşılık karıştırma sonunda çözeltideki zemin süzöldükten sonra atomik adsorpsiyon cihazında okunan derişimleri gösteren tablo Çizelge 5.8'de yer almaktadır.

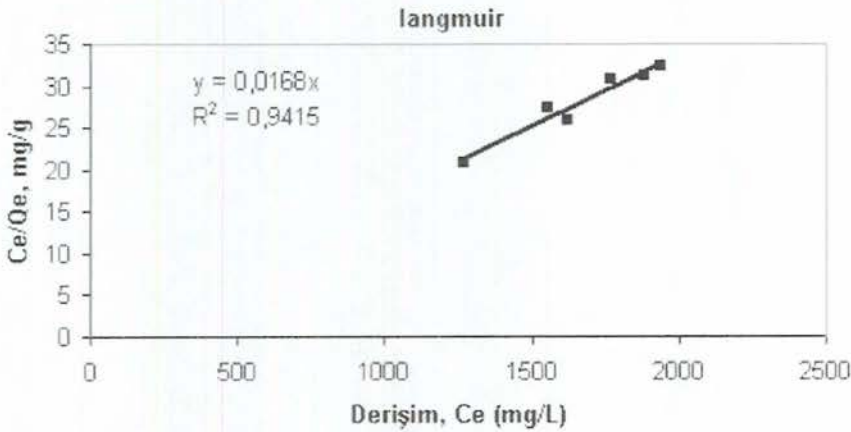


Şekil 5.19. 50K50S karışımına ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi

Bentonite ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi Şekil 5.20’de verilmiştir. Bentonite ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi ilişkisinden  $Ce/Q_e = 0,0163 Ce$  bağıntısı elde edilmiş ve  $Q_e \max = 61,35 \text{ mg/g}$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.8. Bentonite ait kullanılan malzeme ağırlığı ve derişim ilişkisi

Bentonit (g)	Derişim (mg/L)
0,25	1940
0,5	1880
1	1770
1,5	1625
2	1550
3	1270

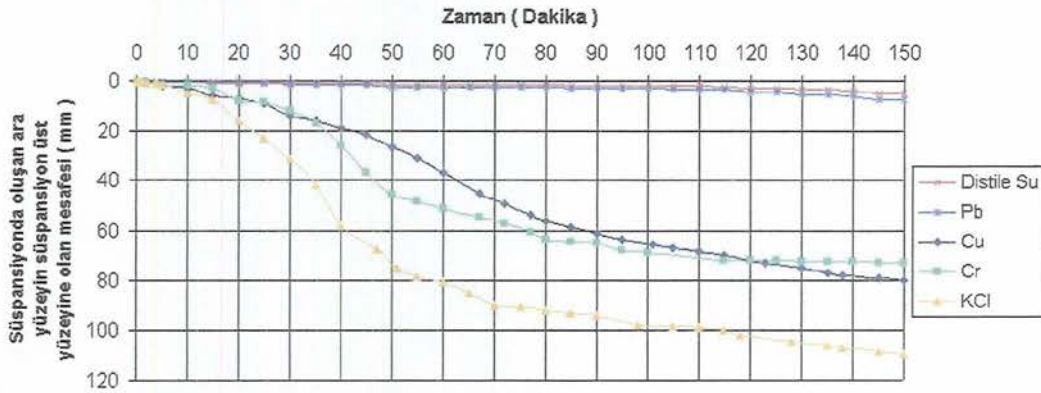


Şekil 5.20. Bentonite ait langmuir Cu adsorpsiyon izotermi

Karışımların ve bentonitin adsorpsiyon izotermeleri incelendiğinde bakır (Cu) adsorpsiyon kapasitelerinin 25K75S (136,98mg/g) > 50K50S (103,09mg/g) > bentonit (61,35mg /g) şeklinde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar incelenerek sepiyolitın Cu adsorpsiyon kapasitesinin yaklaşık 156,6 mg/g olduğu belirlenmiştir. Sepiyolite ait Cu adsorpsiyon kapasitesi, bentonitin yaklaşık 2,5 katıdır.

### 5.3.2. Çökeltme (sedimentasyon) deneyi

Sepiyolit ve karışımların topaklanmasında (flokülasyonunda) distile su, 2000 ppm bakır (Cu), krom (Cr), kurşun (Pb) ve 1N potasyum klorür (KCl) çözeltilerinin etkisini incelemek amacıyla sedimentasyon deneyleri yapıldı. Bir litrelik cam silindirde çökeltmeleri sağlandı. Sedimentasyon hızını belirlemek amacıyla sıvı ile süspansiyon arasında oluşan ara yüzeyin sıvı üst yüzeyinden aşağıya doğru olan çökmesi 150 dakikalık süre içerisinde her 5 dakikada bir ölçüldü (Yıldız, 1998). Sepiyolite ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Sepiyolite ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

Şekil 5.21 incelendiğinde sepiyolitın süspansiyonda oluşan ara yüzeyinin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafesinin distile su, Pb, Cr, Cu ve KCl sıralamasıyla arttığı görülmüştür. Sepiyolit en fazla KCl çözeltisinde topaklanma

göstermiştir. Sepiyolit KCl çözeltisine karşı diğer çözeltilerde olduğundan daha hassastır. Sepiyolit Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileri ile yapılan 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrasında çekilmiş fotoğrafı Şekil 5.22’de ve 12 saat sonra çekilen fotoğrafı Şekil 5.23’de verilmiştir. Deneyden 12 saat sonraki mesafeler incelendiğinde sıralama küçükten büyüğe distile su, Pb, Cr, Cu ve KCl şeklinde olup Cr ve Cu mesafeleri birbirlerine oldukça yaklaşmıştır.



**Şekil 5.22.** Sepiyolit'in 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrası çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.)



**Şekil 5.23.** Sepiyolit'in sedimentasyon deneyinden 12 saat sonra çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.)

25K75S karışımına ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi Şekil 5.24’de verilmiştir. Şekil 5.24 incelendiğinde 25K75S karışımının süspansiyonda oluşan ara yüzeyinin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafesinin distile su, Pb, Cu, KCl ve Cr sıralamasıyla arttığı görülmüştür.



Şekil 5.24. 25K75S karışımına ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

25K75S karışımı en fazla Cr çözeltisinde topaklanma göstermiştir. 25K75S karışımı Cr çözeltisine karşı diğer çözeltilerde olduğundan daha hassastır. 25K75S karışımının Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileri ile yapılan 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrasında çekilmiş fotoğrafı Şekil 5.25’de ve 12 saat sonrası çekilen fotoğrafı Şekil 5.26’de verilmiştir.

Deneyden 12 saat sonraki mesafeler incelendiğinde sıralama yine küçükten büyüğe distile su, Pb, Cu, KCl, Cr şeklindedir. Deneyden 24 saat sonra da sıralamanın aynı olduğu tespit edilmiştir. Ancak Cu, Cr ve KCl çözeltileri mesafelerinin birbirine oldukça yaklaştığı görülmüştür.

50K50S karışımına ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi Şekil 5.27’de verilmiştir. Şekil 5.27 incelendiğinde, 50K50S karışımının süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafesinin distile su, Pb, Cu, KCl ve Cr sıralamasıyla arttığı görülmüştür. 50K50S karışımında da en fazla Cr çözeltisinde topaklanma görülmüştür.

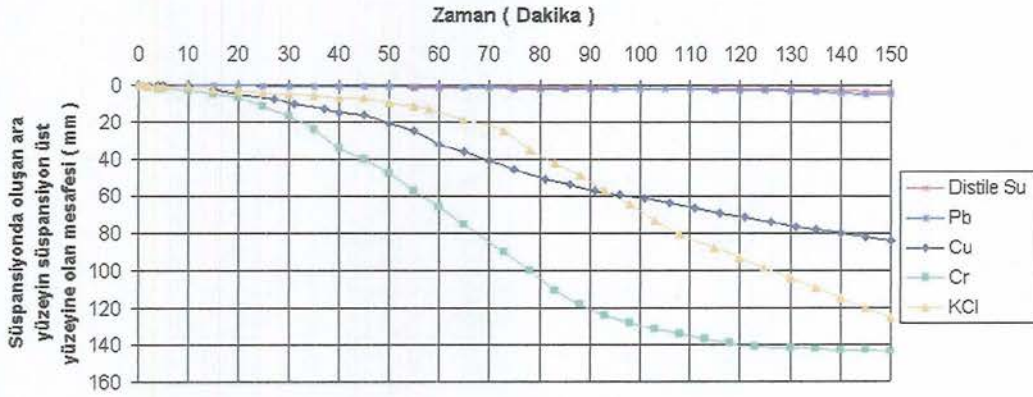


**Şekil 5.25.** 25K75S karışımının 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrası çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.)



**Şekil 5.26.** 25K75S karışımının sedimentasyon deneyinden 12 saat sonra çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.)

50K50S karışımının Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileri ile yapılan 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrasında çekilmiş fotoğrafı Şekil 5.28’de ve 12 saat sonrası çekilen fotoğrafı Şekil 5.29’da verilmiştir.

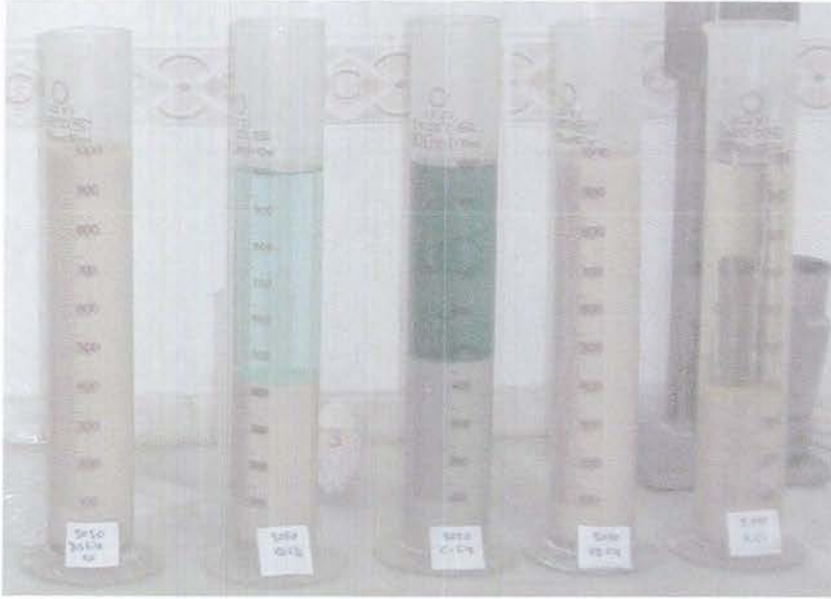


Şekil 5.27. 50K50S karışımına ait süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

Deneyden 12 saat sonraki mesafeler incelendiğinde sıralama küçükten büyüğe distile su, Pb, Cr, Cu, KCl şeklinde değişmiştir. Cu ve KCl çözeltileri mesafelerinin de birbirlerine oldukça yaklaştığı görülmüştür.

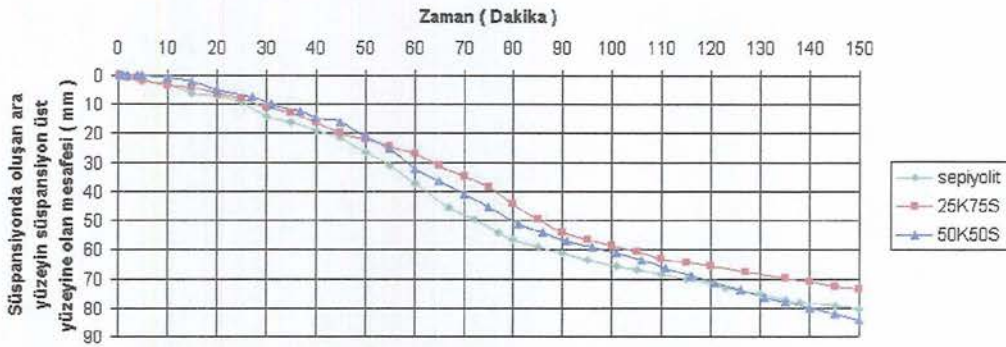


Şekil 5.28. 50K50S karışımının 150 dakikalık sedimentasyon deneyi sonrası çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.)



Şekil 5.29. 50K50S karışımının sedimentasyon deneyinden 12 saat sonra çekilmiş bir fotoğrafı (soldan sağa; distile su, Cu, Cr, Pb ve KCl ile hazırlanmış çözeltiler verilmiştir.)

Aynı zamanda kullanılan kirletici çözeltilere göre de süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkileri gösterilmiştir. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu için oluşturulan grafik Şekil 5.30'da, Cr için oluşturulan grafik Şekil 5.31'de, Pb için oluşturulan grafik Şekil 5.32'de ve KCl için oluşturulan grafik ise Şekil 5.33'de verilmiştir.



Şekil 5.30. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

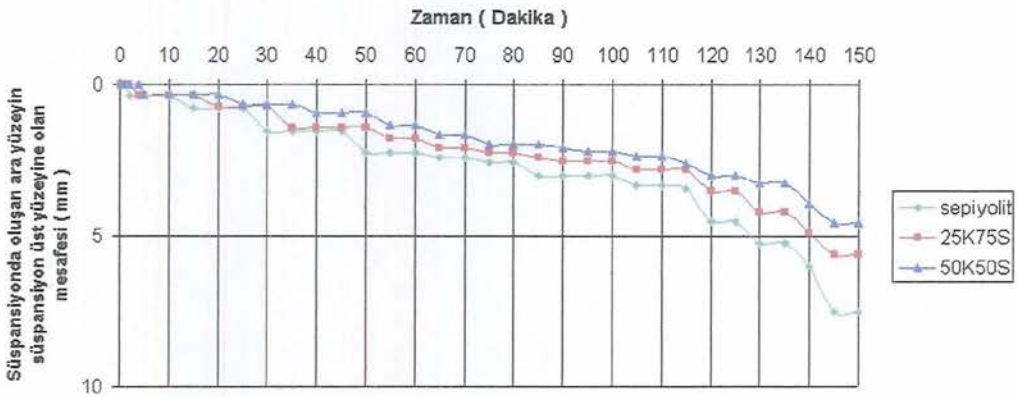
Şekil 5.30'deki sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan

mesafe-zaman ilişkisi incelendiğinde Cu çözeltilisinin en çok sepiyolitte etkin olduğu görülmüştür. Oluşan eğriler birbirlerine yakınlık göstermiştir. Sepiyolit ve karışımların ise Cu hassasiyetleri paralellik göstermiştir.



Şekil 5.31. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

Şekil 5.31’deki sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi incelendiğinde ise Cr çözeltilisinin en çok karışımlarda etkinlik gösterdiği ve sepiyolitin Cu açısından kaolin ve karışımlara göre daha duraylı olduğu görülmüştür. Oluşan eğrilerde sepiyolit ayrılırken karışımlar birbirlerine paralellik göstermişlerdir.



Şekil 5.32. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

Şekil 5.32’deki sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-

zaman ilişkisi incelendiğinde ise Pb çözeltilisinin sepiyolit ve karışımlarda etkinliğinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Oluşan eğrilerde sepiyolit ve karışımların birbirlerine paralellik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.33. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi

Şekil 5.33’de sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilmiş süspansiyonda oluşan ara yüzeyin süspansiyon üst yüzeyine olan mesafe-zaman ilişkisi incelendiğinde ise KCl çözeltisinin sepiyolitte daha hızlı bir çökmeye sebep olduğu ancak 150 dakikalık süre sonunda karışımlara yakın bir çökmenin gerçekleştiği görülmüştür.

### 5.3.3. pH

Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait pH değerleri Çizelge 5.9’da verilmiştir. Sepiyolit ve karışımlara ait pH değerleri birbirlerine yakın ve hafif baziktir.

Çizelge 5.9. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait pH değerleri

Malzemeler	pH
Sepiyolit	7,72
Kaolinit	4,86
25K75S	7,64
50K50S	7,6

### 5.3.4. Elektriksel iletkenlik (EC)

Sepiyolit ve karışımlara ait elektriksel iletkenlik, EC değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir. Sepiyolitin EC değeri kaolinit ve karışımlara göre daha büyüktür. Bu sonuçlar sepiyolitin kaolinite göre daha çok tuz içerdiğini göstermiştir.

Çizelge 5.10. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait EC değerleri

Malzemeler	Elektriksel İletkenlik, EC ( ms/cm)
Sepiyolit	0,30
Kaolinit	0,15
25K75S	0,25
50K50S	0,24

### 5.3.5. Ateşte kayıp miktarı (organik madde miktarı)

Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait ateşte kayıp miktarları Çizelge 5.11'de verilmiştir. Sepiyolite ait %24.4'lük kayıp yapısındaki zeolitik su, zayıf bağlı kristal su ve kuvvetli bağlı kristal suyun yapısından uzaklaşmasıyla gerçekleşmektedir.

Çizelge 5.11. Sepiyolit, kaolinit ve karışımlara ait ateşte kayıp miktarları

Malzemeler	Ateşte Kayıp Miktarı (%)
Sepiyolit	24,4
Kaolinit	8,0
25K75S	20,6
50K50S	16,7

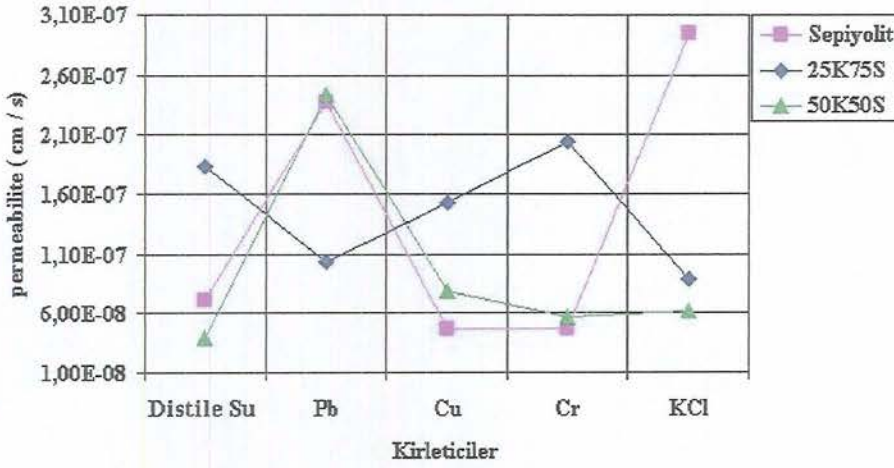
## 5.4. Çevresel Şartlara Ait Özellikler

### 5.4.1. Sızıntı (leachate) deneyi

Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyi numuneleri standart proktor ASTM D698-78 (1985), metodu ile optimum su muhtevalarında hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kalıplardan çıkarılmadan direk rijit-duvarlı permeametre (ASTM D5856) düzeneğine yerleştirilerek, ağır metal ve tuz çözeltileri ile sızma deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerden, 3., 5., 8. ve 10. günlerde ortalama olarak 50'şer ml sızıntı suyu toplanmıştır. Sızıntı deneyleri sırasında çözelti haznesinde bulunan çözelti seviyesindeki düşüş ve toplama kabındaki sızıntı suyu yükselmesi zamana göre takip edilerek, permeabilite katsayıları da hesaplanmıştır.

Sızıntı deneylerinde hesaplanan sepiyolit ve karışımlara ait permeabilite değerleri kullanılan kirletici çözeltilerle ilişkilendirilerek Şekil 5.34'de verilmiştir. Kullanılan kirleticiler ve elde edilen permeabilite değerleri incelendiğinde permeabilitelerin sepiyolit için  $0,5 - 2,9 \times 10^{-7}$  cm/s aralığında olduğu ve en yüksek permeabilitenin de KCl çözeltisi kullanılarak yapılan sızıntı deneyinde elde edildiği görülmüştür. KCl çözeltisi kullanılarak yapılan sızıntı deneyindeki yüksek permeabilite ile KCl çözeltisi ile yapılan sedimentasyon deneyinde elde edilen en büyük flokülasyon değerleri birbiriyle uyum sağlamaktadır. 25K75S karışımında ise permeabilite değerleri  $0,9-2 \times 10^{-7}$  cm/s aralığındadır. 25K75S karışımı için en yüksek permeabilitenin Cr çözeltisi kullanılarak yapılan sızıntı deneyinde elde edildiği görülmüştür. 25K75S karışımı için yapılan sedimentasyon deneyinde en büyük flokülasyonun Cr çözeltisi kullanıldığında elde edildiği görülmüştür. Cr çözeltisi kullanılarak yapılan sızıntı deneyinde elde edilen yüksek permeabilite ile Cr çözeltisi ile yapılan sedimentasyon deneyinde elde edilen en büyük flokülasyon değerleri birbiriyle uyum sağlamaktadır. 50K50S karışımında ise permeabilite değerleri  $0,6-2,4 \times 10^{-7}$  cm/s aralığındadır. 50K50S karışımı için en yüksek permeabilitenin Pb çözeltisi kullanılarak yapılan sızıntı deneyinde elde edildiği görülmüştür. Pb çözeltisi için elde edilen bu değer 50K50S karışımı için yapılan sedimentasyon deneyi sonuçlarıyla örtüşmemektedir. Çünkü sepiyolit ve karışımlar için yapılan sedimentasyon deneylerinde 2000 ppm Pb çözeltisi için

tespit edilen flokülasyon etkisi son derece düşük çıkmıştır. Genel olarak sızıntı deneylerinden elde edilen permeabilite sonuçları incelendiğinde permeabilite için istenen  $\leq 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s değerinin sağlandığı görülmüştür. Ancak ihmal edilebilecek düzeyde de olsa, kullanılan kirletici çözeltilerin permeabilite üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.



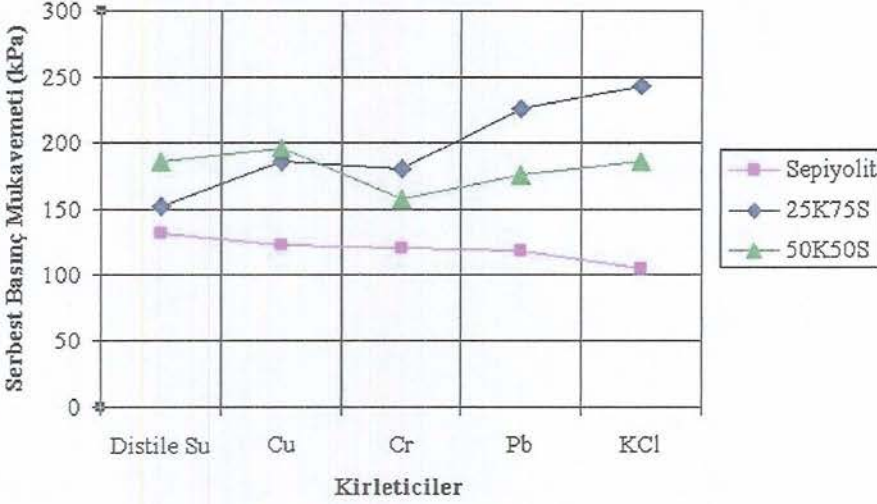
Şekil 5.34. Sızıntı deneylerinde elde edilen permeabilite – kirletici çözelti ilişkisi

## 5.4.2. Sızıntı deneyi sonrası yapılan mekanik deneyler

### 5.4.2.1. Serbest basınç deneyi

Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyine tabi tutulmuş zeminlerden 36 mm çapında ve 72 mm yüksekliğinde numuneler alınarak serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Elde edilen serbest basınç mukavemetleri ile kullanılan kirleticiler arasındaki ilişki Şekil 5.35’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin 100-250 kPa arasında değiştiği görülmüştür. Sepiyolit için 100-150 kPa arasında mukavemetler elde edilirken bu 25K75S karışımında 150-250 kPa ve 50K50S karışımında 150-200 kPa aralığında gerçekleşmiştir. Sepiyolite ait serbest basınç mukavemeti değerleri Cu, Cr, Pb ve KCl sırasıyla azalma göstermiştir. En düşük mukavemet KCl çözeltilisinde elde edilmiştir. Bu da sedimentasyon deneyinde KCl çözeltilisinde elde

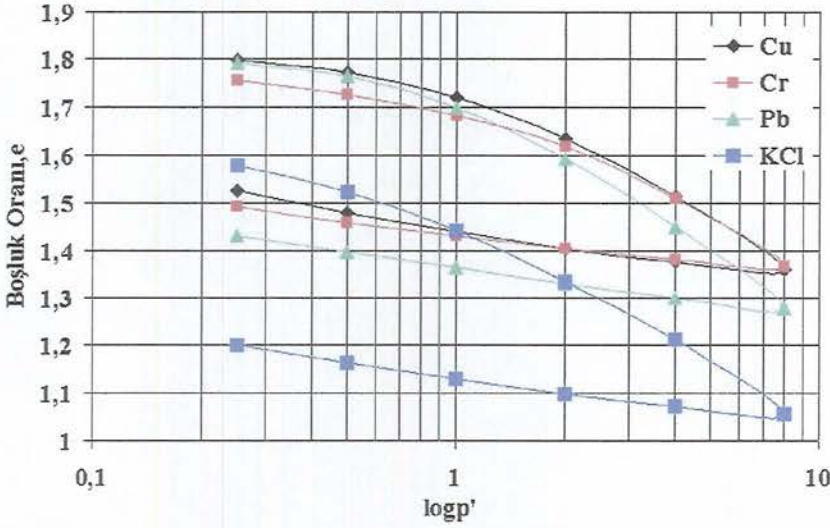
edilen yüksek flokülasyon çökmesiyle örtüşmektedir. Karışımlarda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleriyle sedimentasyon deneyi sonuçları arasında bir ilişki kurulamamıştır.



Şekil 5.35. Sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi

#### 5.4.2.2. Konsolidasyon deneyi

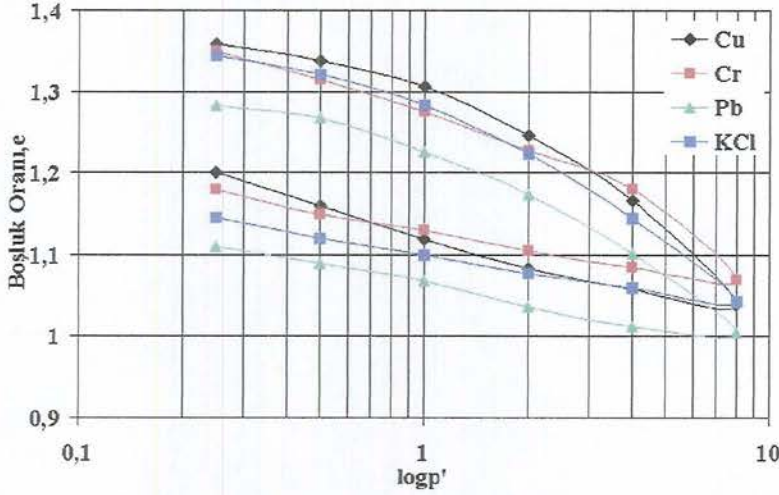
Kirletici çözeltilerle yapılan sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyleri sonrası aynı kirletici çözeltiler kullanılarak numuneler konsolidasyona tabi tutulmuştur. Sepiyolitin sızıntı deneylerinde kullanılan kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan konsolidasyon deneylerinin  $e$ - $\log p'$  ilişkileri Şekil 5.36'da verilmiştir. Şekil 5.36'daki  $e$ - $\log p'$  ilişkileri incelendiğinde sepiyolitin Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileriyle sızıntı deneyinden sonraki başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,8, 1,79, 1,77 ve 1,58 şeklinde olup konsolidasyondan sonra elde edilen boşluk oranı, ( $e$ ) değişimleri ise sırasıyla 0,28, 0,28, 0,37 ve 0,40 olarak artış göstermiştir. Sepiyolitin Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileriyle elde edilen  $c_c$  değerleri ise sırasıyla 0,40, 0,35, 0,47, 0,43 olup  $c_r$  değerleri de 0,07, 0,06, 0,08 ve 0,07 şeklindedir. Sepiyolitle ilgili sonuçlar değerlendirildiğinde Pb ve KCl çözeltilerinin kullanıldığı numunelerin diğerlerine göre daha çok konsolidasyon oturması yapıldığı görülmüştür. Ayrıca  $c_r$  değerleri incelendiğinde yüklemeler kaldırıldığında numunelerin hemen hemen aynı davranışı gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.36. Sepiyolitte sızıntı deneyi sonrası konsolidasyon deneyi ile elde edilen e-logP' ilişkisi

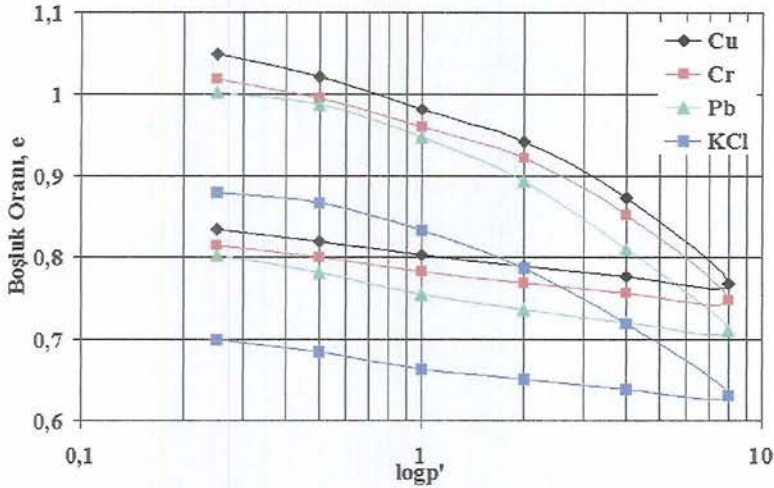
25K75S karışımının sızıntı deneylerinde kullanılan kirlenici çözeltiler kullanılarak yapılan konsolidasyon deneylerinin e-logp' ilişkileri Şekil 5.37'de verilmiştir. Şekil 5.37'deki e-logp' ilişkileri incelendiğinde 25K75S karışımının Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileriyle yapılan sızıntı deneyi sonrası başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,36, 1,35, 1,28 ve 1,34 şeklinde olup konsolidasyondan sonra elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri sırasıyla 0,14, 0,17, 0,18 ve 0,19 olarak artış göstermiştir. 25K75S karışımının Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileriyle elde edilen  $c_c$  değerleri ise sırasıyla 0,29, 0,22, 0,25, 0,27 olup  $c_r$  değerleri de 0,07, 0,06, 0,05 ve 0,06 şeklindedir. 25K75S karışımı ile ilgili sonuçlar değerlendirildiğinde genel olarak KCl çözeltilisinin kullanıldığı numunenin diğerlerine göre daha çok konsolide oturması gerçekleştirdiği görülmüştür. Ayrıca  $c_r$  değerleri incelenerek yüklemeler kaldırıldığında numunelerin hemen hemen aynı davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

50K50S karışımının sızıntı deneylerinde kullanılan kirlenici çözeltiler kullanılarak yapılan konsolidasyon deneylerinin e-logp' ilişkileri Şekil 5.38'de verilmiştir. Şekil 5.38'deki e-logp' ilişkileri incelendiğinde 50K50S karışımının Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileriyle yapılan sızıntı deneyleri sonrası başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,05, 1,02, 1,0, 0,85 şeklinde olup konsolidasyondan sonra elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri sırasıyla 0,22, 0,20, 0,21 ve 0,20 şeklinde olmuştur.



Şekil 5.37. 25K75S karışımında sızıntı deneyi sonrası konsolidasyon deneyi ile elde edilen e-logP' ilişkisi

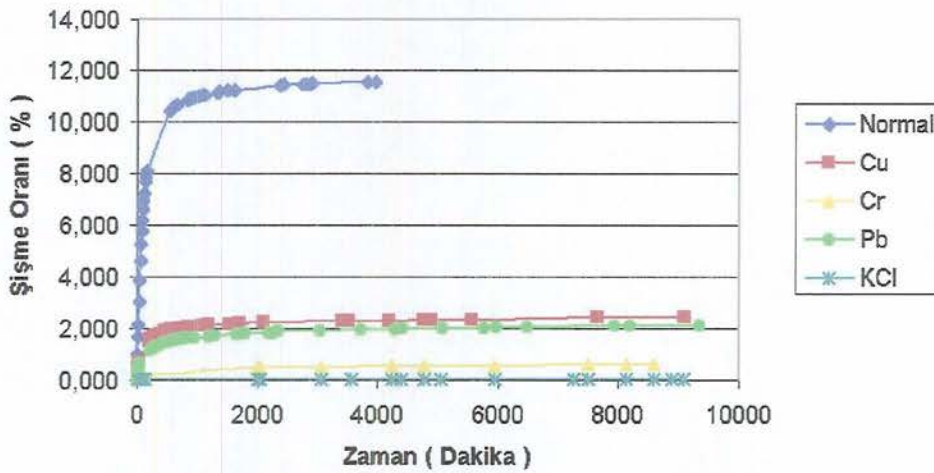
50K50S karışımının Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileriyle elde edilen  $c_c$  değerleri ise sırasıyla 0,23, 0,23, 0,26, 0,22 şeklinde ve  $c_r$  değerleri de 0,04, 0,04, 0,05 ve 0,03 şeklindedir. 50K50S karışımı ile ilgili sonuçlar değerlendirildiğinde genel olarak Pb çözeltilisinin kullanıldığı numunenin diğerlerine göre daha çok konsolidasyon oturması gerçekleştirdiği görülmüştür. Yine  $c_r$  değerleri incelendiğinde yüklenme kaldırıldığında numunelerin hemen hemen aynı davranışı gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.38. 50K50S karışımında sızıntı deneyi sonrası konsolidasyon deneyi ile elde edilen e-logP' ilişkisi

### 5.4.2.3. Serbest şişme deneyi

Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarının sızıntı deneyleri sonrası, sızıntı deneylerinde kullanılan kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan serbest şişme deneylerinin şişme oranı-zaman ilişkileri sırasıyla Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de verilmiştir. Grafiklerde yer alan “ Normal ” ibaresi optimum su muhtevasında sıkıştırıldıktan sonra serbest şişme deneyine tabi tutulan numuneler için kullanılmıştır.

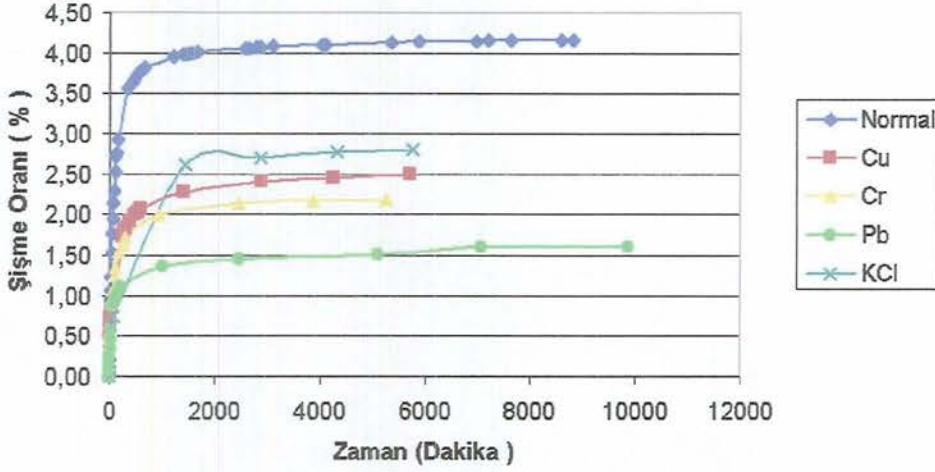


Şekil 5.39. Sepiyolitte sızıntı sonrası serbest şişme ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkisi

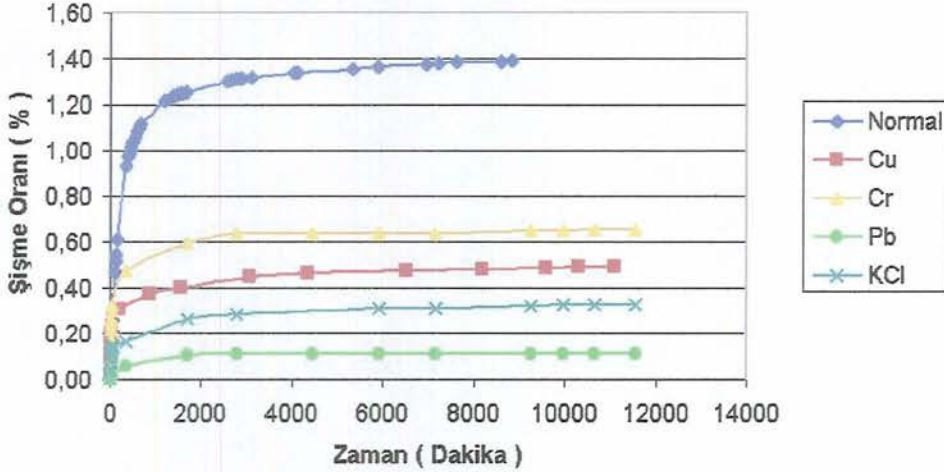
Şekil 5.39’da görülen sepiyolite ait şişme oranı-zaman ilişkisi incelendiğinde Cu, Pb, Cr ve KCl’nin sırasıyla şişme oranında önemli düşmeler gerçekleştirdiği görülmüştür. Normalde yaklaşık %12 olan sepiyolitin şişme oranı, Cu çözeltisi kullanımıyla %2,5'lara, Pb çözeltisi kullanımıyla %2'lere, Cr çözeltisi kullanımıyla %1'lere ve KCl çözeltisi kullanımıyla da %1'in altına gerilemektedir.

Şekil 5.40’da görülen 25K75S karışımına ait şişme oranı-zaman ilişkisi incelendiğinde KCl, Cu, Cr ve Pb’nin sırasıyla şişme oranında önemli düşmeler gerçekleştirdiği görülmüştür. Normalde yaklaşık %4,2 olan 25K75S karışımının şişme oranı, KCl çözeltisi kullanımıyla %2,75'lere, Cu çözeltisi kullanımıyla

%2,5'lere, Cr çözeltisi kullanımıyla %2,2'lere ve KCl çözeltisi kullanımı ile de %1,6'lara gerilemektedir.



Şekil 5.40. 25K75S karışımında sızıntı deneyi sonrası serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkisi



Şekil 5.41. 50K50S karışımında sızıntı deneyi sonrası serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkisi

Şekil 5.41'de görülen 50K50S karışımına ait şişme oranı-zaman ilişkisi incelendiğinde Cr, Cu, KCl ve Pb'nin sırasıyla şişme oranında önemli düşmeler gerçekleştirdiği görülmüştür. Normalde yaklaşık %1,4 olan 50K50S karışımının şişme oranı, Cr çözeltisi kullanımıyla %0,65'lere, Cu çözeltisi kullanımıyla %0,5'lere, KCl çözeltisi kullanımıyla %0,35'lere ve Pb çözeltisi kullanımı ile de %0,1'lere gerilemektedir. Genel olarak elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

incelendiğinde ağır metaller ve KCl tuzunun değişen sıralamalarda sepiyolit ve karışımlara ait şişme oranlarını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür.

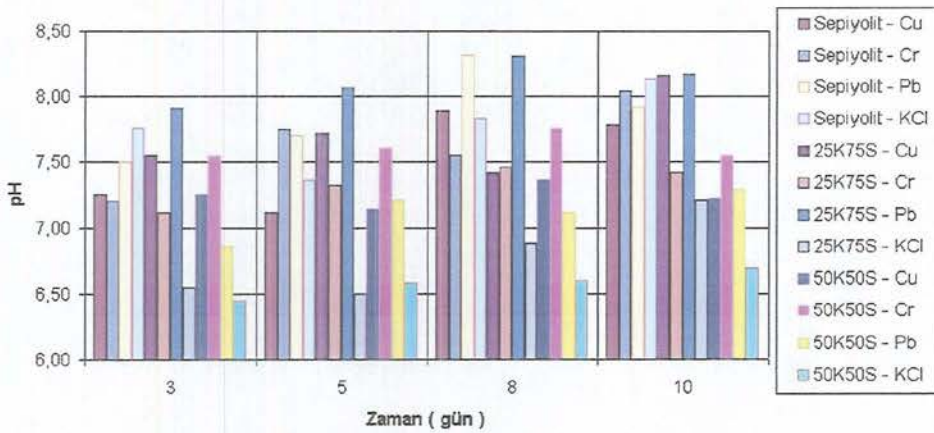
### 5.4.3. Sızıntı deneyi sonrası belirlenen fiziko-kimyasal özellikler

#### 5.4.3.1. pH

Sızıntı deneyleri sırasında sepiyolit ve karışımlara ait toplama kaplarında biriken sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerdeki pH değerleri ölçülerek Şekil 5.42’de görülen pH – zaman ilişkileri oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan çözeltilerin oranları ve pH değerleri Çizelge 5.12’de verilmiştir. Çizelge 5.24’deki pH değerleri incelendiğinde KCl çözeltisi dışında diğer çözeltilerin bir hayli asidik pH değerlerine sahip oldukları görülmüştür.

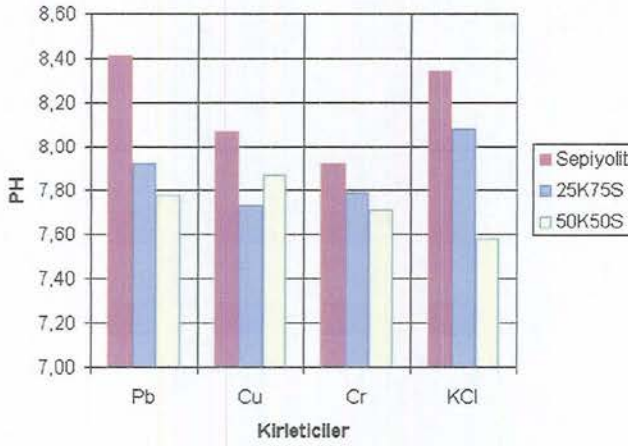
Çizelge 5.12. Deneylerde kullanılan çözelti derişimleri ve pH değerleri

Kullanılan Oran (Normalite)	Formül	pH
1 N	KCl	6,25
2000 ppm	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3,85
2000 ppm	$\text{CrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1,89
2000 ppm	PbCl	3,85



Şekil 5.42. Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı sularının pH okumalarından elde edilen pH-zaman ilişkileri

Şekil 5.42’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait toplama kaplarında biriken sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerdeki pH değerleri ölçülerek oluşturulan pH–zaman ilişkileri incelendiğinde genel olarak sızıntı sularının pH değerlerinin 6,5-8,25 değerleri arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca sızıntı deneylerinin ilerleyen zamanlarında pH değerlerinin giderek yükseldiği görülmüştür. Şekil 5.43’de sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyleri sonrası zeminlerden alınan ve U.S. EPA Method 9045 (1986)’da belirtilen "Soil pH" metoduna uygun olarak hazırlanıp pH değerleri ölçülen numunelerin pH-kirletici çözelti ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.43. Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyi sonrası zemin numunelerinin pH-zaman ilişkileri

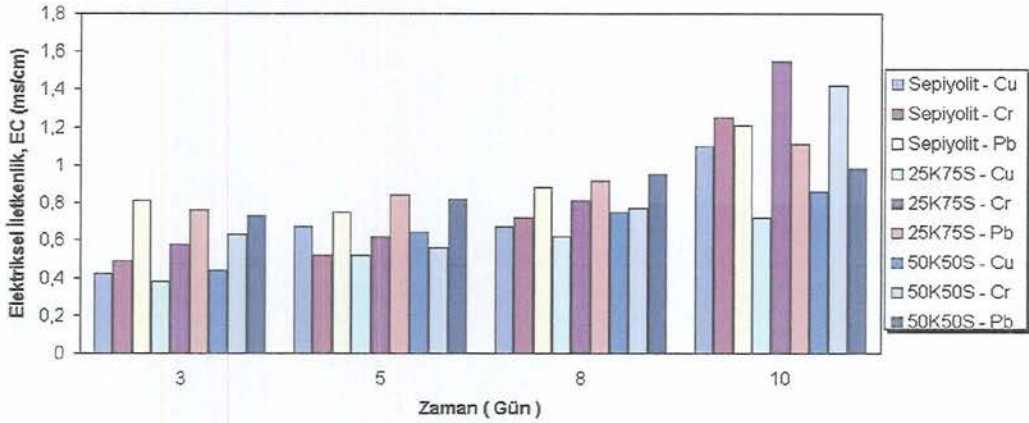
Şekil 5.43’de verilen sonuçlar incelendiğinde sepiyolit için 8-8,5 civarı olan pH değerinin 25K75S karışımında 7,7-8,1 aralığında ve 50K50S karışımı için 7,6-7,8 aralığında olduğu görülmüştür. Sabah, (1998) sepiyolit koloidal davranışını belirleyebilmek için Eskişehir-Sivrihisar kahverengi sepiyoliti ile %10 katı oranında hazırladığı süspansiyonda doğal, asidik bazik pH’larda zamana bağlı olarak yapılan ölçümlerde sepiyolit tabii denge pH’ına (pH=8,5) ulaştığını belirtmektedir. Buradan da sepiyolit süspansiyonlarının her ortamda pH=8,5 civarında tampon bir PH oluşturduklarını çıkarmaktadır. Genel olarak sızıntı olayında yüksek pH değerlerinde ağır metallerin immobilize olduğu bilinmektedir.

### 5.4.3.2. Elektriksel iletkenlik (EC)

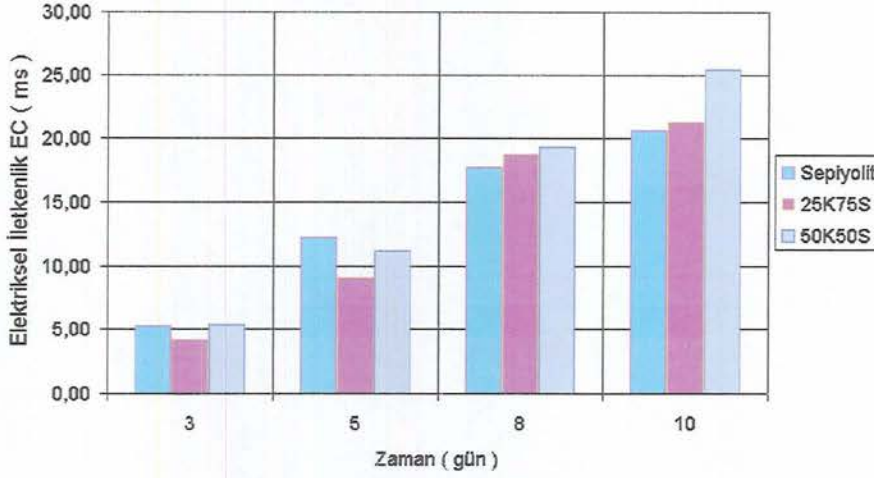
Cu, Cr, Pb çözeltileri kullanılarak yapılan sızıntı deneyleri sırasında sepiyolit ve karışımlara ait toplama kaplarında biriken sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerde ölçülen elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin EC- zaman ilişkileri Şekil 5.44'de, KCl çözeltisi kullanılarak yapılan sızıntı deneyi sonrası belirlenen elektriksel iletkenlik-zaman ilişkileri ise Şekil 5.45'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan çözeltilerin oranları ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri Çizelge 5.13'de verilmiştir. Çizelge 5.13'deki EC değerleri incelendiğinde EC değerlerinin Pb, Cu, Cr ve KCl sırasıyla arttığı görülmüştür.

Çizelge 5.13. Deneylerde kullanılan çözelti derişimleri ve EC değerleri

Kullanılan Oran (Normalite)	Formül	EC
1 N	KCl	121,1
2000 ppm	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5
2000 ppm	$\text{CrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	8,97
2000 ppm	PbCl	1,49

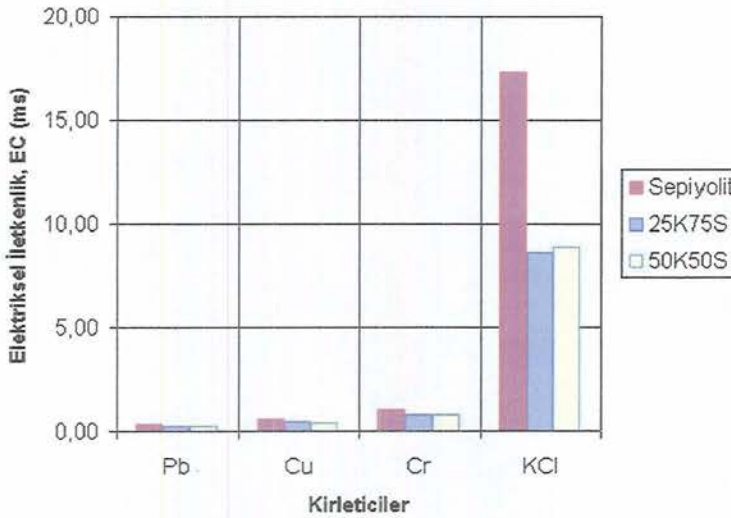


Şekil 5.44. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu, Cr ve Pb çözeltileri kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri



Şekil 5.45. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri

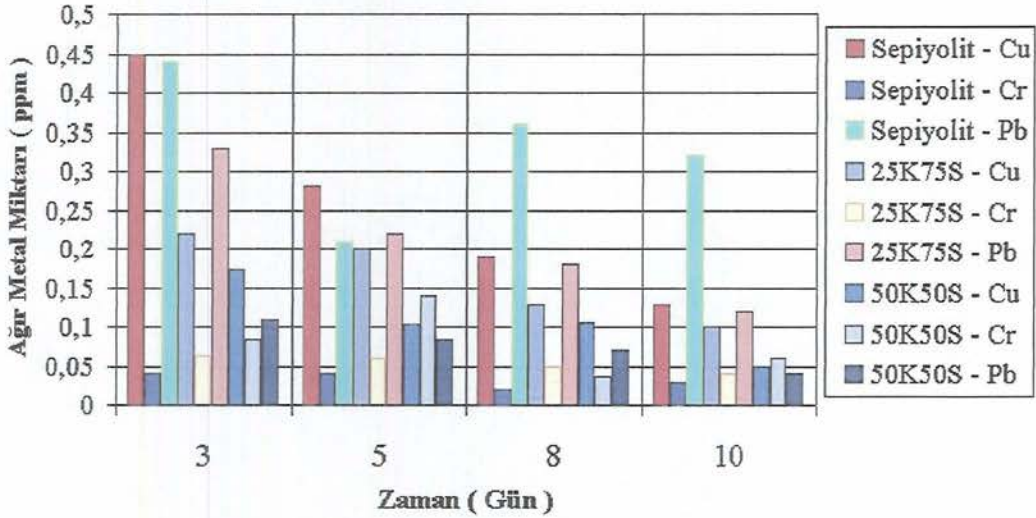
Şekil 5.44’de verilen sonuçlar incelendiğinde EC değerlerinin ilerleyen günlerde bir miktar arttığı görülmüştür. Şekil 5.45’de verilen KCl çözeltisine ait EC değerleri incelendiğinde ise ilerleyen günler süresince EC değerlerinin arttığı görülmüştür. Sızıntı deneyleri sonrası alınan zemin numunelerinin EC değerlerinin belirlenmesi ile oluşturulan EC-zaman ilişkisi Şekil 5.46’da verilmiştir. Şekil 5.46’da verilen sonuçlar incelendiğinde EC değerlerinin Pb, Cu, Cr, KCl sıralamasıyla arttığı görülmüştür. Ayrıca zamanda sepiyolitte tutulan kirletici miktarının karışımlara göre daha fazla olduğu da görülmüştür.



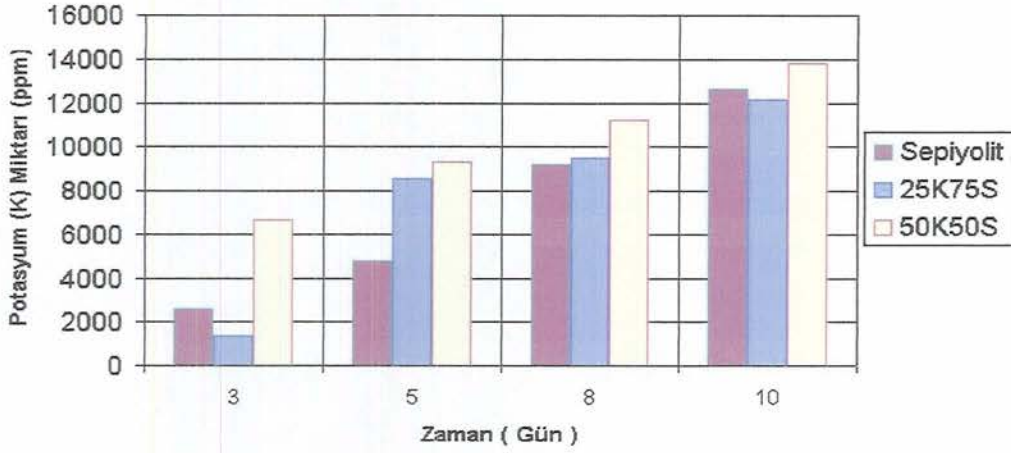
Şekil 5.46. Sızıntı deneylerinde KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen, sepiyolit ve karışımlara ait zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri

### 5.4.3.3. Toplam metal ve potasyum (K) miktarı

Sepiyolit ve karışımlara ait sızıntı deneyleri sonucunda toplama kaplarında biriken sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerdeki çözeltilerinden alınan numunelerin ağır metal miktarlarının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri Şekil 5.47'de ve potasyum (K) miktarı zaman ilişkileri ise Şekil 5.48'de verilmiştir. Şekil 5.47'de verilen sonuçlar incelendiğinde sızıntı deneyinin ilerleyen günlerinde ağır metal miktarlarının azaldığı görülmüştür. Sepiyolit ve karışımlara ait sonuçlar ağır metallerin yaklaşık %100 oranında tutulduğunu göstermiştir. Şekil 5.48'de verilen potasyum (K) okumaları incelendiğinde potasyum (K) miktarının deney süresince yükseldiği görülmüştür. Bu yükselme sepiyolite verilen 74000 ppm mertebesindeki yüksek potasyum derişiminden kaynaklanmıştır. Verilen yüksek potasyum derişimine karşın sepiyolit ve karışımların potasyum miktarının yaklaşık %80'lik kısmını tuttuğu görülmüştür.



Şekil 5.47. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu, Cr, ve Pb çözeltileri kullanılarak elde edilen sızıntı sularının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri

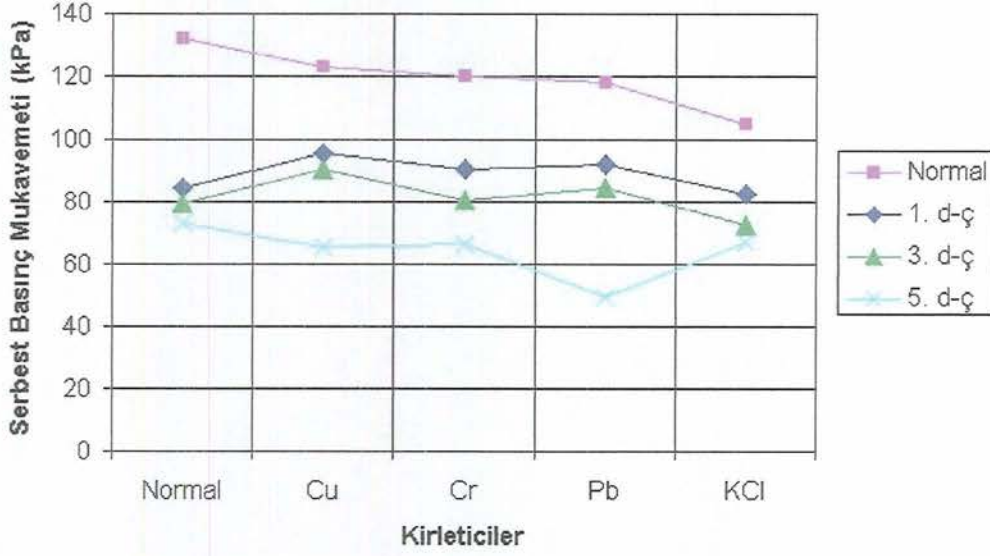


Şekil 5.48. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının potasyum (K) miktarı-zaman ilişkileri

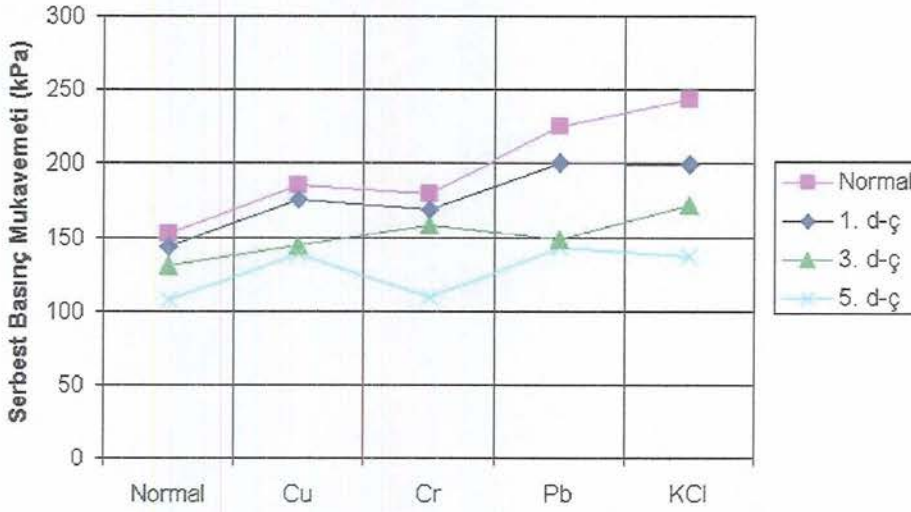
#### 5.4.4. Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan mekanik deneyler

##### 5.4.4.1. Serbest basınç deneyi

Sepiyolit ve karışımlara ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyine tabi tutulmuş zeminlerden 36 mm çapında ve 72 mm yüksekliğinde numuneler alınarak serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları için elde edilen serbest basınç mukavemetleri ile kullanılan kirleticiler arasındaki ilişki sırasıyla verilmiştir. Daha önce Şekil 5.35’de gösterilmiş olan sepiyolit ve karışımlara ait donma-çözülme çevrimsiz sızıntı deneyi sonrası serbest basınç mukavemetleri değerleri donma-çözülme çevrimleri ile ortaya çıkan farklılığı ortaya koymak amacıyla Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de de verilmiştir. Şekil 5.49’da verilen sonuçlar incelendiğinde sepiyolit için elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin 50-140 kPa arasında değiştiği görülmüştür. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimsiz mukavemet değerleri 100-140 kPa arasında değişim gösterirken, donma-çözülme çevrimlerinin etkisiyle mukavemet değerleri 50-100 kPa aralığına düşmüştür. Grafiklerde yer alan “ Normal ” ibaresi optimum su muhtevasında sıkıştırıldıktan sonra serbest basınç deneyine tabi tutulan numuneler için kullanılmıştır.



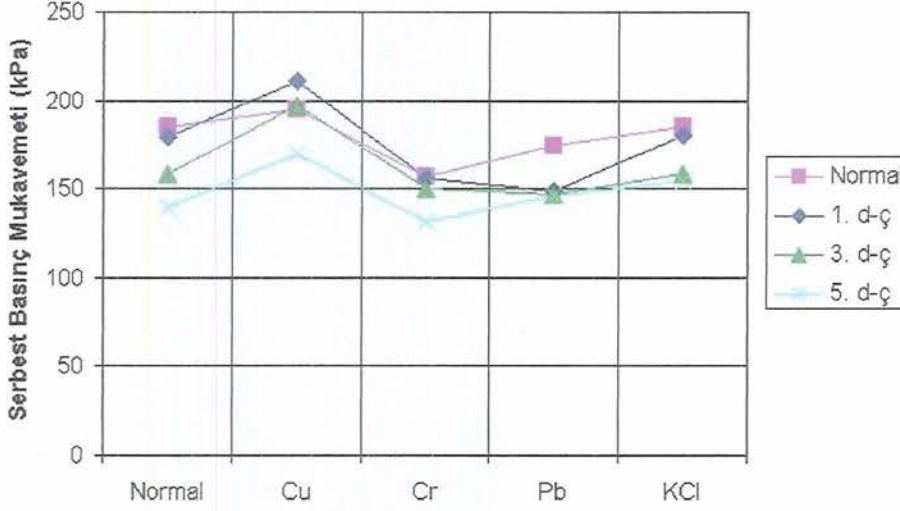
Şekil 5.49. Sepiyolit için donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi



Şekil 5.50. 25K75S karışımı için donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi

Şekil 5.50’de verilen sonuçlar incelendiğinde 25K75S karışımı için elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin 100-250 kPa arasında değiştiği görülmüştür. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimsiz mukavemet değerleri 150-250 kPa arasında değişim gösterirken donma-çözülme çevrimlerinin etkisiyle mukavemet değerleri 100-150 kPa aralığına kadar düşmüştür. Şekil

5.51’de verilen sonuçlar incelendiğinde 50K50S karışımı için elde edilen serbest basınç mukavemetlerinin 140-250 kPa arasında değiştiği görülmüştür.

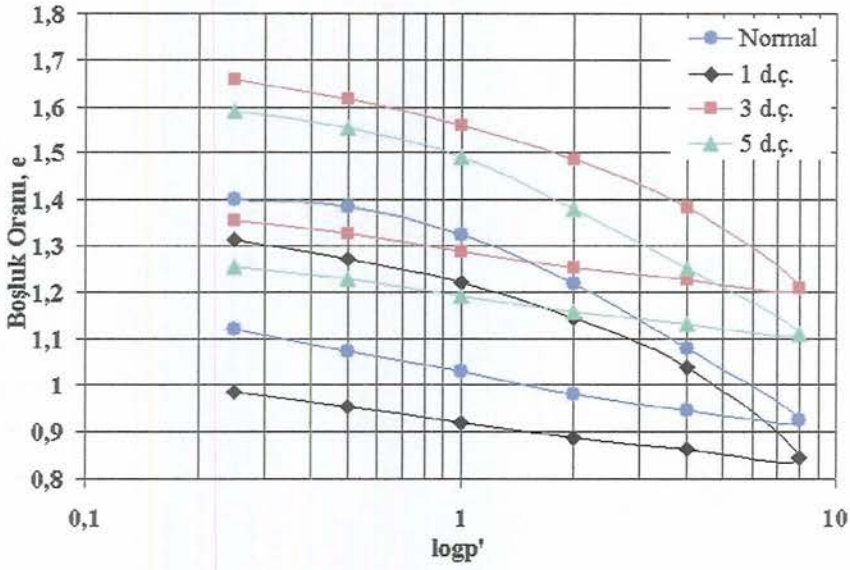


Şekil 5.51. 50K50S karışımı için donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti-kirletici çözelti ilişkisi

50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimsiz mukavemet değerleri 150-200 kPa arasında değişim gösterirken donma-çözülme çevrimlerinin etkisiyle mukavemet değerleri 140-170 kPa aralığına kadar düşmüştür. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, donma-çözülme çevrimlerinin sepiyolit ve karışımların serbest basınç mukavemetleri üzerinde olumsuz etkilerinin bulunduğu belirlenmiştir.

#### 5.4.4.2. Konsolidasyon deneyi

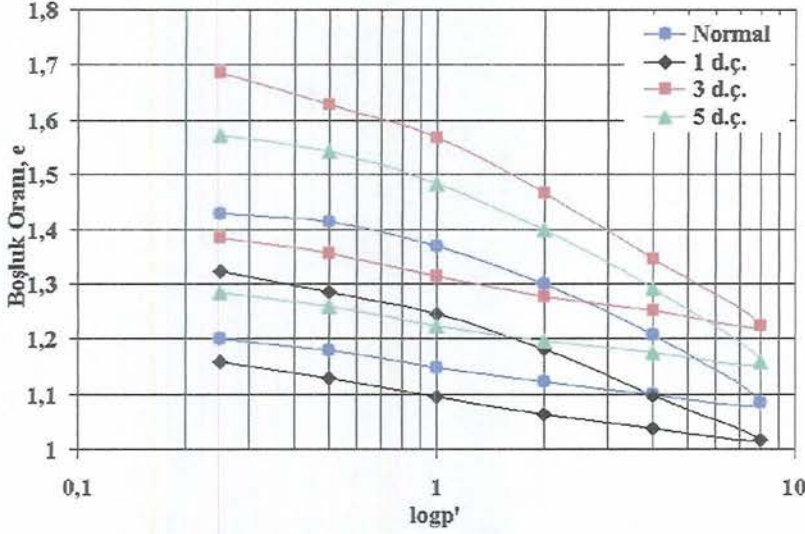
Distile su ve kirletici çözeltilerle yapılan sepiyolit ve karışımlara ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası aynı kirletici çözeltiler kullanılarak numuneler konsolide edilmiştir. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarının kirletici kullanılmadan donma-çözülme çevrimlerinden sonra yapılan sızıntı deneyleri numunelerinin konsolidasyonu ile elde edilen e-logp’ ilişkileri sırasıyla Şekil 5.52, Şekil 5.53 ve Şekil 5.54’de verilmiştir. Grafiklerde yer alan “ Normal ” ibaresi optimum su muhtevasında sıkıştırıldıktan sonra konsolidasyona tabi tutulan numuneler için kullanılmıştır.



Şekil 5.52. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen e-logp' ilişkileri

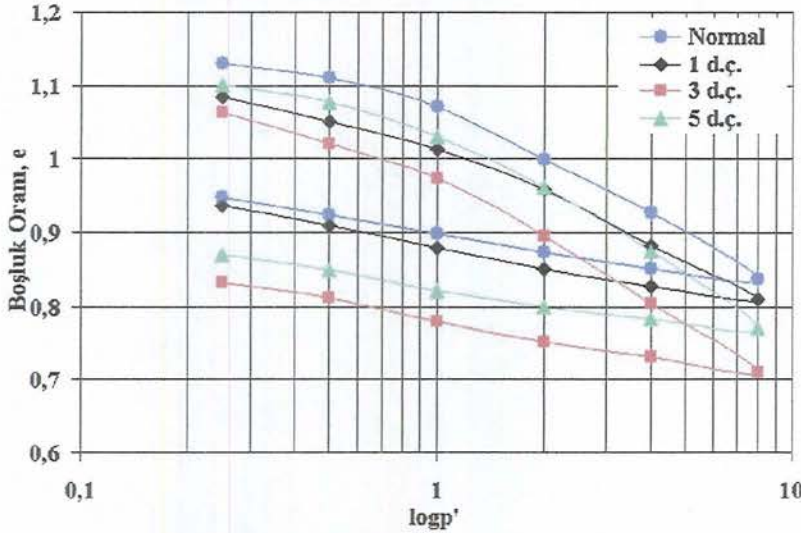
Donma-çözülme çevrimlerinin sepiyolit ve karışımlar üzerindeki etkilerini daha iyi ifade edebilmek amacıyla malzemelerin daha önce yapılan konsolidasyon deneylerinde elde edilen e-logp' ilişkileri de oluşturulan grafiklere eklenmiştir. Şekil 5.52'deki sepiyolitin e-logp' ilişkileri incelendiğinde sepiyolitin normal, 1. d-ç, 3. d-ç ve 5. d-ç ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,4, 1,32, 1,67, 1,59 boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,16, 0,33, 0,32 ve 0,34 olarak artış göstermiştir. Sepiyolitin normal, 1. d-ç, 3. d-ç, 5. d-ç için elde edilen  $c_c$  değerleri sırasıyla 0,44, 0,41, 0,38, 0,42 şeklinde ve  $c_r$  değerleri de 0,09, 0,07, 0,07 ve 0,08 şeklindedir. Sepiyolite ilgili sonuçlar değerlendirildiğinde donma-çözülme çevrimlerinin konsolidasyon oturmasını artırdığı görülmüştür. En büyük konsolidasyon oturması 5. d-ç'ye tabi tutulan numunede gerçekleşmiştir.

Şekil 5.53'deki 25K75S karışımının donma-çözülme-logp' ilişkileri incelendiğinde 25K75S karışımının normal, 1. d-ç, 3. d-ç, 5. d-ç ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,43, 1,32, 1,69, 1,58 şeklinde olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,22, 0,16, 0,29 ve 0,31 olarak artış göstermiştir.



Şekil 5.53. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen  $e$ - $\log p'$  ilişkileri

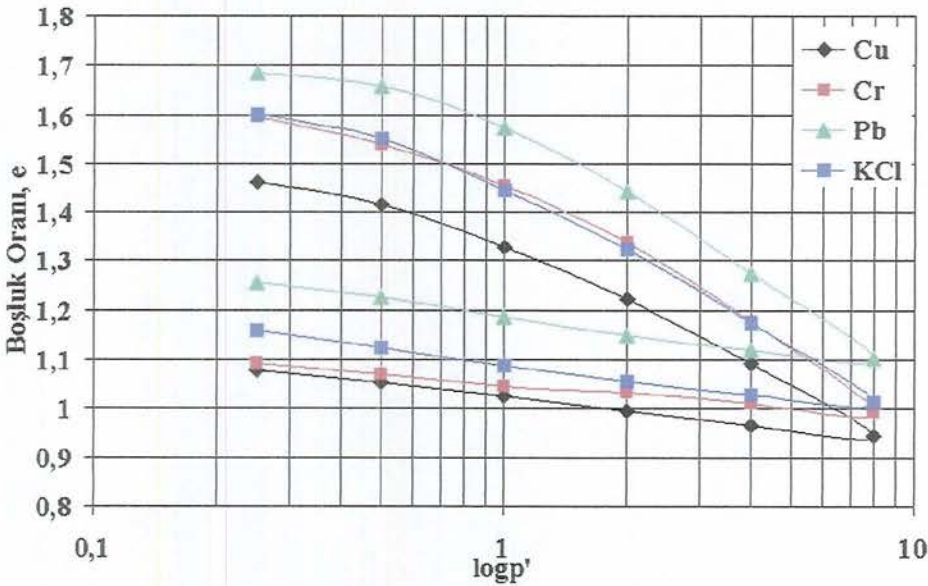
25K75S karışımının normal, 1. d-ç, 3. d-ç, 5. d-ç için elde edilen  $c_c$  değerleri sırasıyla 0,32, 0,25, 0,38, 0,36 ve  $c_r$  değerleri de 0,07, 0,08, 0,09 ve 0,06 şeklindedir. 25K75S karışımı için ilgili sonuçlar değerlendirildiğinde donma-çözülme çevrimlerinin konsolidasyon oturumlarını artırdığı görülmüştür. Donma-çözülme çevrimlerinde 5. d-ç çevrimi konsolidasyon oturumlarının artmasında en büyük etkiyi yapmıştır.



Şekil 5.54. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen  $e$ - $\log p'$  ilişkileri

Şekil 5.54'deki 50K50S karışımının donma-çözülme-logp' ilişkileri incelendiğinde 50K50S karışımının normal, 1. d-ç, 3. d-ç, 5. d-ç ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,13, 1,08, 1,07, 1,1 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,19, 0,14, 0,22 ve 0,25 olarak artış göstermiştir. 50K50S karışımının normal, 1. d-ç, 3. d-ç, 5. d-ç için elde edilen  $c_c$  değerleri sırasıyla 0,26, 0,23, 0,29, 0,29 olup  $c_r$  değerleri de 0,06, 0,07, 0,07 ve 0,05 şeklindedir. 50K50S karışımı ile ilgili sonuçlar değerlendirildiğinde donma-çözülme çevrimlerinin konsolidasyon oturumlarını artırdığı görülmüştür. Donma-çözülme çevrimlerinde 5. d-ç çevrimi konsolidasyon oturumlarının artmasında en büyük etkiyi yapmıştır.

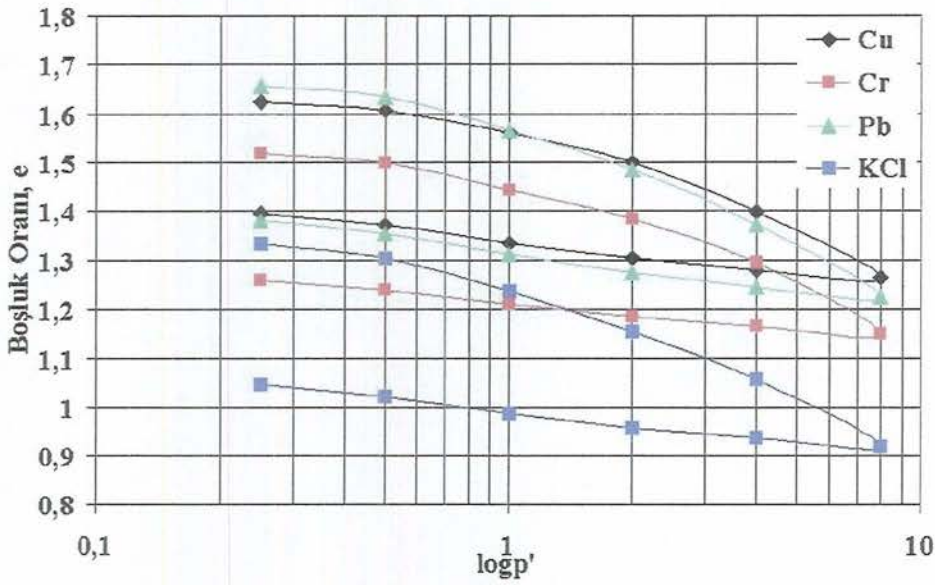
Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarının ağır metaller ve potasyum klorür çözeltisi ile donma-çözülme çevrimlerinden sonra yapılan sızıntı deneyleri numunelerinin konsolidasyonu ile elde edilen e-logp' ilişkileri malzeme ve donma-çözülme çevrimi sırasıyla verilmiştir. Sepiyolit için elde edilen bu ilişkiler 1. d-ç için Şekil 5.55, 3. d-ç için Şekil 5.56, 5. d-ç için de Şekil 5.57 de verilmiştir.



Şekil 5.55. Sepiyolit 1. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri

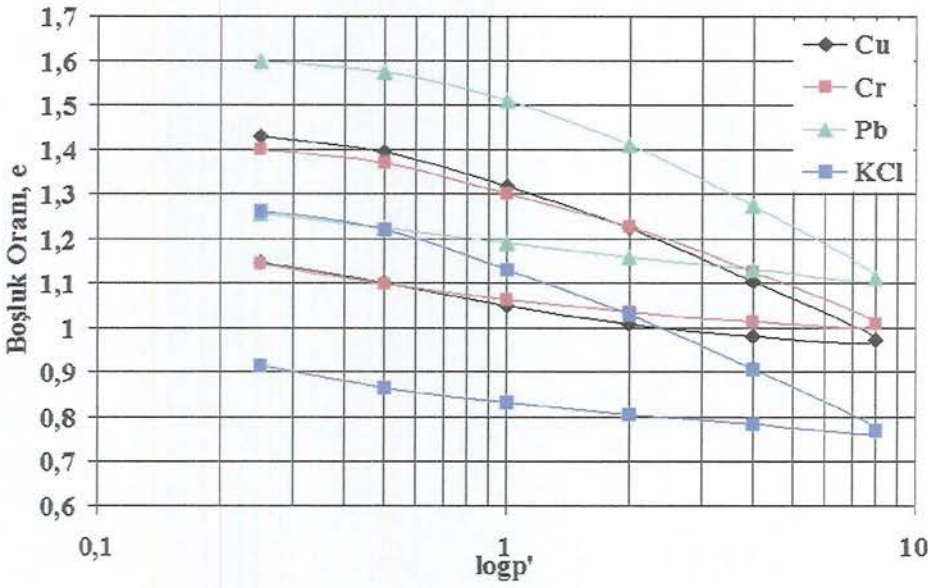
Şekil 5.55'deki sepiyolit 1. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltisiyle yapılan konsolidasyon deneyi

sonucundaki  $e$ - $\log p'$  ilişkileri incelendiğinde Sepiyolitin 1. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,47, 1,60, 1,69 ve 1,60 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, ( $e$ ) değişimleri ise sırasıyla 0,42, 0,52, 0,46 ve 0,47 olarak değişim göstermiştir. Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerleri sırasıyla 0,43, 0,51, 0,53, 0,48 olup  $c_r$  değerlerinin de 0,09, 0,07, 0,08 ve 0,07 olduğu görülmüştür. Sepiyolitin 1. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde Cr çözeltisinin konsolidasyon oturmasına olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 5.56. Sepiyolitin 3. donma-çözülme çevrimine ait  $e$ - $\log p'$  ilişkileri

Şekil 5.56'daki sepiyolitin 3. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki  $e$ - $\log p'$  ilişkileri incelendiğinde Sepiyolitin 3. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,62, 1,52, 1,66 ve 1,33 olup boşluk oranı, ( $e$ ) değişimleri ise sırasıyla 0,23, 0,27, 0,29 ve 0,30 şeklinde artış göstermiştir. Sepiyolitin 3. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,33, 0,32, 0,38, 0,35 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,07, 0,05, 0,08 ve 0,06 şeklinde olduğu görülmüştür. Sepiyolitin 3. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde KCl çözeltisinin konsolidasyon oturmasına olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.



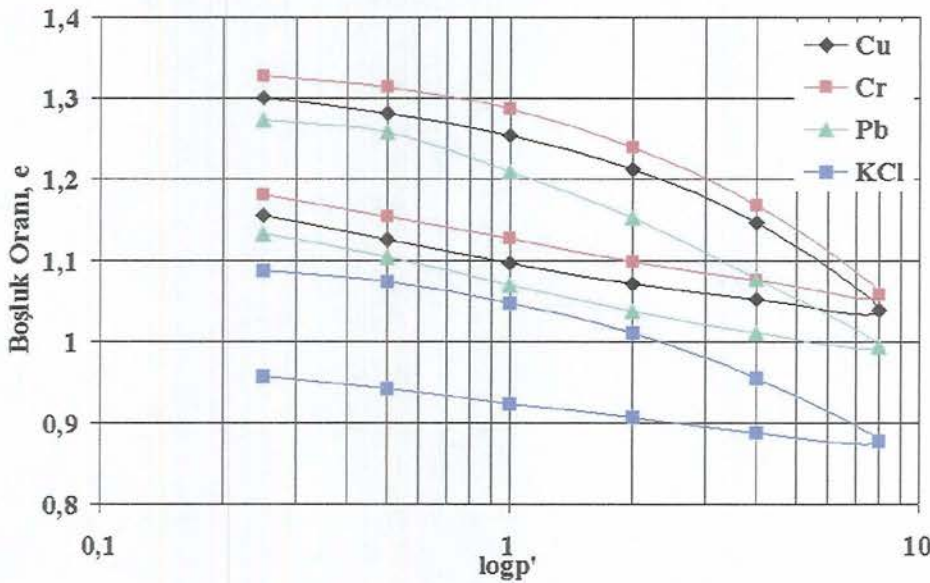
Şekil 5.57. Sepiyolit 5. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri

Şekil 5.57'deki sepiyolit 5. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki e-logp' ilişkileri incelendiğinde Sepiyolit 5. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,43, 1,4, 1,6 ve 1,27 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,30, 0,26, 0,25 ve 0,37 şeklinde artış göstermiştir. Sepiyolit 5. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,39, 0,33, 0,44, 0,40 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,06, 0,05, 0,08 ve 0,06 şeklinde olduğu görülmüştür. Sepiyolit 5. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde KCl çözeltilisinin konsolidasyon oturmasına olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.

25K75S karışımı için donma çözülme çevrimleri ve kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan sızıntı deneyleri sonrası aynı kirletici çözelti kullanılarak numuneler konsolidasyona tabi tutulmuştur. 25K75S karışımı için kirletici çözelti ile e-logp' arasında kurulan ilişkiler sırasıyla 1. d-ç için Şekil 5.58, 3. d-ç için Şekil 5.59 ve 5. d-ç için de Şekil 5.60'da verilmiştir.

Şekil 5.58'deki 25K75S karışımının 1. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi

sonucundaki  $e$ - $\log p'$  ilişkileri incelendiğinde 25K75S karışımının 1. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,3, 1,33, 1,27 ve 1,09 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, ( $e$ ) değişimleri ise sırasıyla 0,140, 0,138, 0,136 ve 0,126 şeklinde gerçekleşmiştir. 25K75S karışımının 1. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,24, 0,25, 0,24, 0,19 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,05, 0,07, 0,07 ve 0,05 şeklinde olduğu görülmüştür. 25K75S karışımının 1. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde optimum su muhtevasında sıkıştırılmış 25K75S karışımının sahip olduğu 1,43'lük başlangıç boşluk oranının KCl çözeltisi kullanımıyla diğer çözeltilere göre daha fazla düşürülerek 1,09 değerine ulaştığı görülmüştür. Bu şekilde kirleticilerle 25K75S karışımının dispers yapısının floküle yapıya geçerek başlangıç boşluk oranlarını düşürdüğü belirlenmiştir.

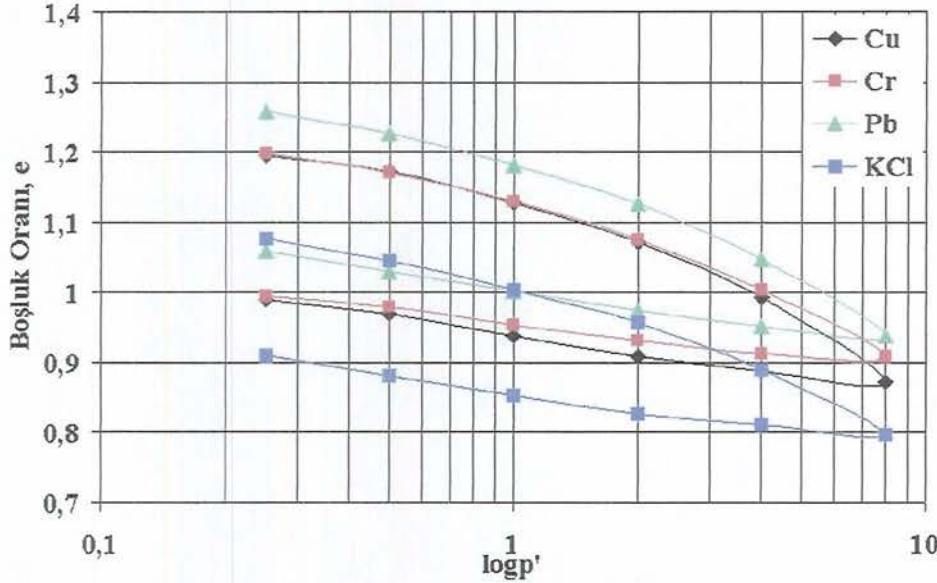


Şekil 5.58. 25K75S 1. donma-çözülme çevrimine ait  $e$ - $\log p'$  ilişkileri

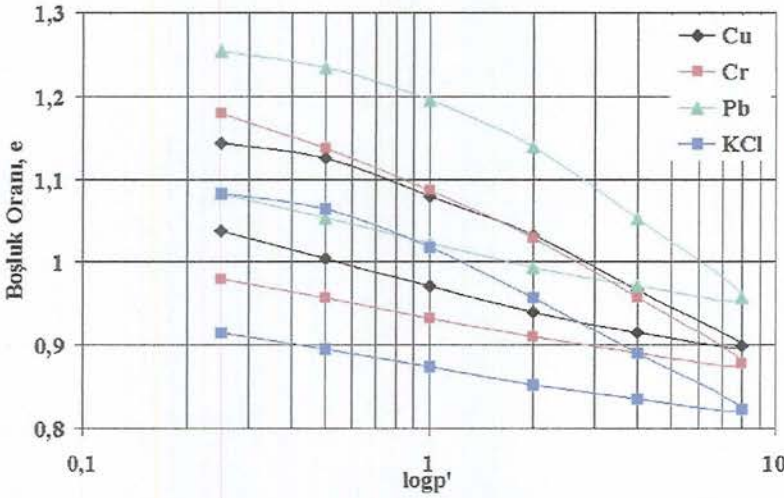
Şekil 5.59'daki 25K75S karışımının 3. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki  $e$ - $\log p'$  ilişkileri incelendiğinde 25K75S karışımının 3. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,2, 1,2, 1,27 ve 1,09 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, ( $e$ )

değişimleri ise sırasıyla 0,21, 0,22, 0,22 ve 0,18 şeklinde gerçekleşmiştir. 25K75S karışımının 3. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,28, 0,25, 0,27, 0,23 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,06, 0,04, 0,06 ve 0,05 şeklinde olduğu görülmüştür.

Şekil 5.60'daki 25K75S karışımının 5. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki e-logp' ilişkileri incelendiğinde 25K75S karışımının 5. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,15, 1,18, 1,26, 1,08 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,11, 0,21, 0,17 ve 0,17 şeklinde gerçekleşmiştir. 25K75S karışımının 5. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,20, 0,23, 0,27, 0,22 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,07, 0,05, 0,06 ve 0,05 şeklinde olduğu görülmüştür. 25K75S karışımının 5. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde Cr çözeltilisinin konsolidasyon oturmasına olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 5.59. 25K75S 3. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri

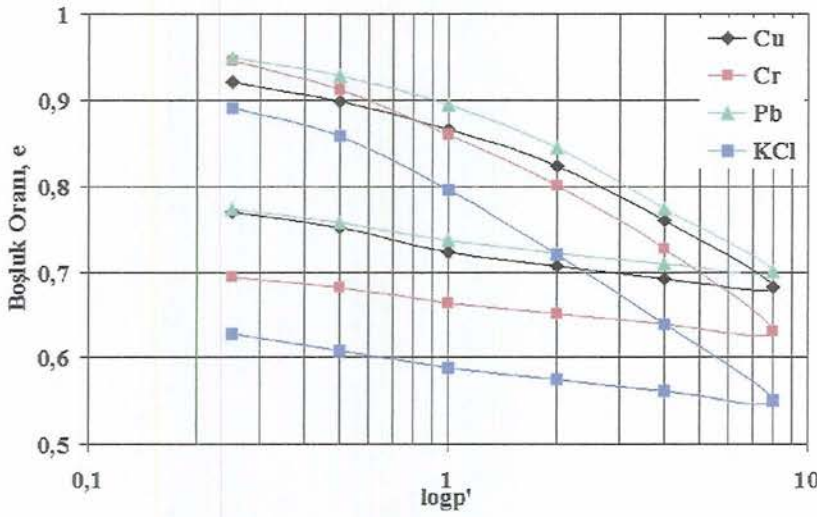


Şekil 5.60. 25K75S 5. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri

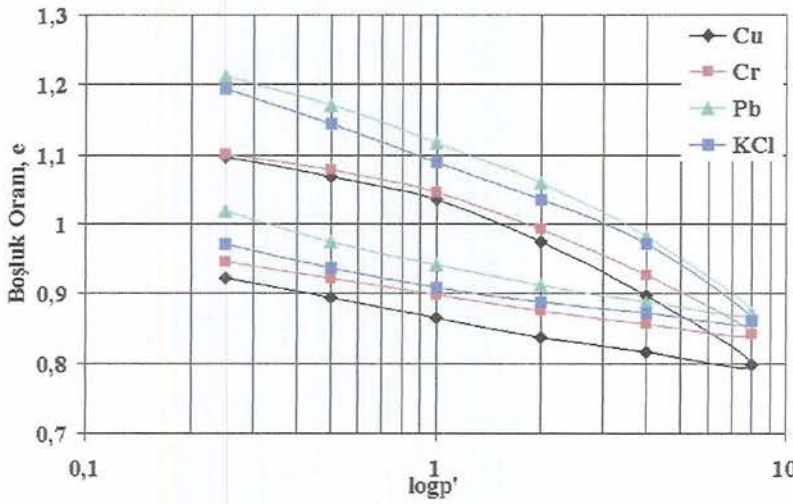
Genel olarak 25K75S karışımı için kirleticilerle birlikte yapılan konsolidasyon deneylerinde ağır metallerin sıralamaları değiştiği halde Cr ve KCl çözeltisiyle en büyük konsolidasyon oturmaları gerçekleşmiştir. Ayrıca KCl çözeltisiyle başlangıç boşluk oranları daha fazla düşerek dispers yapıdan floküle yapıya geçiş belirgin bir şekilde görülmüştür.

50K50S karışımı için donma çözülme çevrimleri ve kirleticilerle yapılan konsolidasyon deneyleri sonrası aynı kirleticilerle yapılan numuneler konsolidasyona tabi tutulmuştur. 50K50S karışımı için kirleticilerle yapılan deneyler ile e-logp' arasında kurulan ilişkiler sırasıyla 1. d-ç için Şekil 5.61, 3. d-ç için Şekil 5.62 ve 5. d-ç için Şekil 5.63 de verilmiştir.

Şekil 5.61'deki 50K50S karışımının 1. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltisiyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki e-logp' ilişkileri incelendiğinde 50K50S karışımının 1. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları 0,92, 0,95, 0,94, 0,89 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,14, 0,25, 0,18 ve 0,28 şeklinde gerçekleşmiştir. 50K50S karışımının 1. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_e$  değerlerinin sırasıyla 0,20, 0,25, 0,22, 0,27 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,041, 0,036, 0,036 ve 0,041 şeklinde olduğu görülmüştür. 25K75S karışımının 1. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde KCl çözeltisinin konsolidasyon oturması miktarını artırdığı görülmüştür.



Şekil 5.61. 50K50S 1. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri

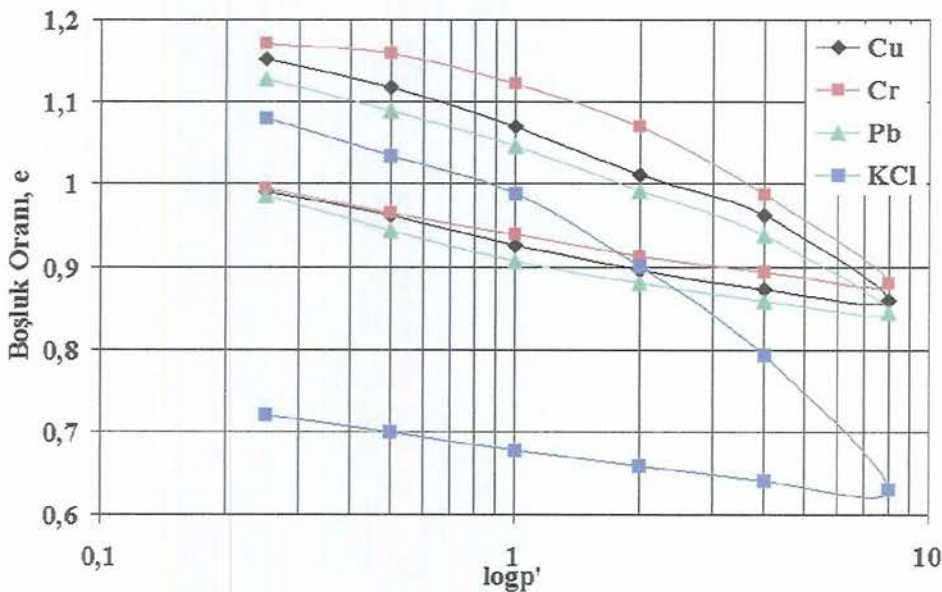


Şekil 5.62. 50K50S 3. donma-çözülme çevrimine ait e-logp' ilişkileri

Şekil 5.62'deki 50K50S karışımının 3. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki e-logp' ilişkileri incelendiğinde 50K50S karışımının 3. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,1, 1,1, 1,21, 1,19 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı, (e) değişimleri ise sırasıyla 0,18, 0,16, 0,20 ve 0,24 şeklinde artış göstermiştir. 50K50S karışımının 3. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,26, 0,23, 0,27, 0,25 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,06,

0,06, 0,07 ve 0,05 şeklinde olduğu görülmüştür. 50K50S karışımının 3. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde ve kirletici çözeltilerin kullanımıyla daha düşük başlangıç boşluk oranlarının elde edildiği ve kullanılan KCl çözeltisiyle diğerlerine kıyasla daha fazla miktarda konsolidasyon oturması gerçekleştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.63'deki 50K50S karışımının 5. donma-çözülme çevrimi ve ardından ağır metaller ve potasyum klorür çözeltileriyle yapılan konsolidasyon deneyi sonucundaki  $e$ - $\log p'$  ilişkileri incelendiğinde 50K50S karışımının 5. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen başlangıç boşluk oranları sırasıyla 1,16, 1,17, 1,13, 1,08 olup konsolidasyon deneyinde elde edilen boşluk oranı,  $(e)$  değişimleri ise sırasıyla 0,16, 0,17, 0,15 ve 0,37 şeklinde gerçekleşmiştir. 50K50S karışımının 5. d-ç çevriminin Cu, Cr, Pb ve KCl ile elde edilen  $c_c$  değerlerinin sırasıyla 0,23, 0,27, 0,22, 0,39 şeklinde ve  $c_r$  değerlerinin de 0,06, 0,06, 0,06 ve 0,05 şeklinde olduğu görülmüştür. 50K50S karışımının 5. d-ç çevrimi ile ilgili sonuçları değerlendirildiğinde en büyük konsolidasyon oturmasının KCl çözeltisi kullanıldığında elde edildiği görülmüştür.



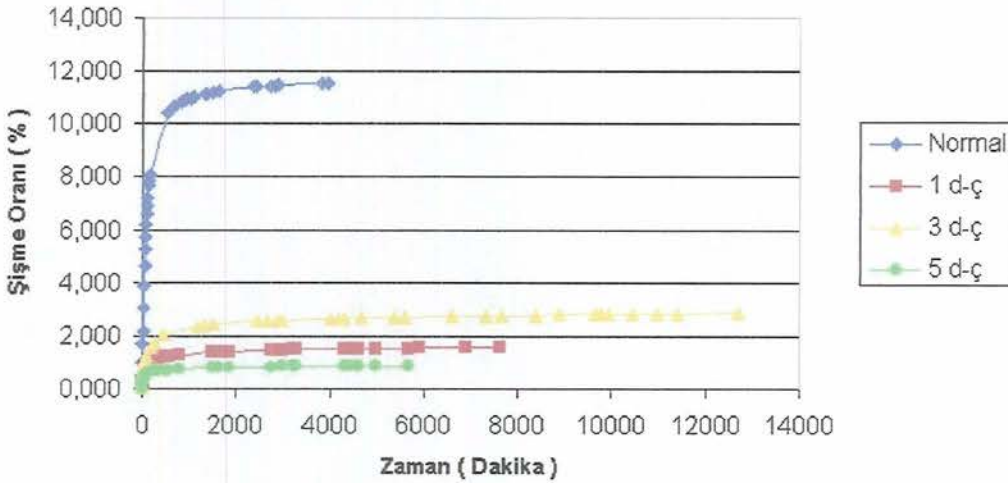
Şekil 5.63. 50K50S 5. donma-çözülme çevrimine ait  $e$ - $\log p'$  ilişkileri

Genel olarak 50K50S karışımı için kirleticilerle birlikte yapılan konsolidasyon deneylerinde KCl çözeltisi için konsolidasyon oturmasını artıran bir tablo çıkarılmaktadır. Bu artış 5. d-ç çevriminde daha da belirginleşmiştir.

#### 5.4.4.3.Serbest şişme deneyi

Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneylerinden sonra kalıplardan konsolidasyon ringiyle alınan numuneler sızıntı deneylerinde kullanılan kirletici çözeltiler ve distile su kullanılarak serbest şişme deneylerine tabi tutulmuştur.

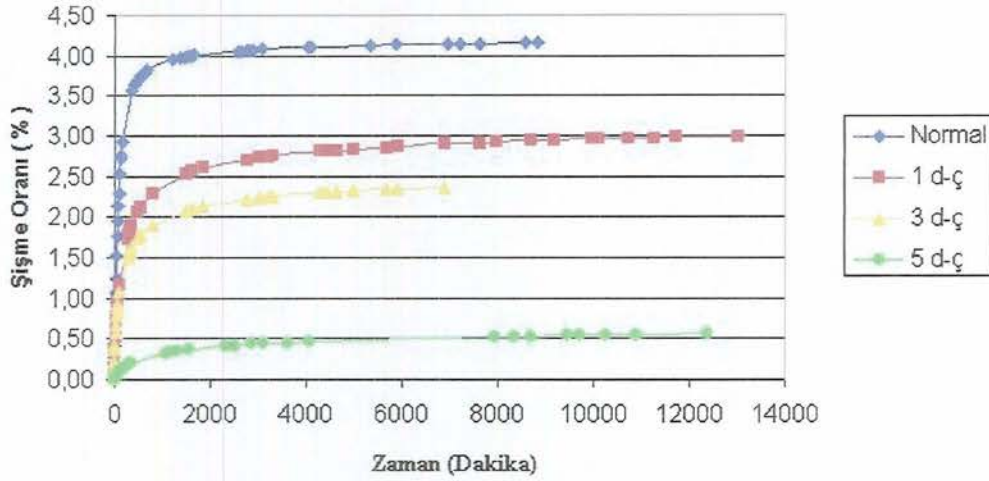
Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait kirletici çözelti kullanılmadan donma-çözülme çevrimi ve sızıntı deneyine tabi tutulduktan sonra serbest şişme deneyi yapılan numunelere ait şişme oranı-zaman ilişkileri sırasıyla Şekil 5.64, Şekil 5.65 ve Şekil 5.66'da verilmiştir. Grafiklerde yer alan "Normal" ibaresi optimum su muhtevasında sıkıştırıldıktan sonra serbest şişme deneyine tabi tutulan numuneler için kullanılmıştır.



Şekil 5.64. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

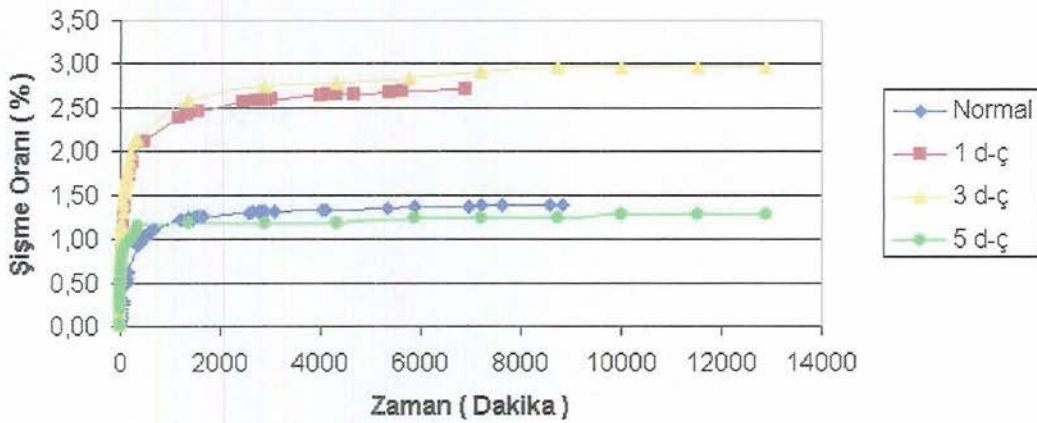
Şekil 5.64'de verilen sonuçlar incelendiğinde, donma-çözülme çevrimlerinin kirletici kullanılmadan da sepiyolitın şişme özelliğini oldukça düşürdüğü açıkça görülmüştür. Normalde yaklaşık %12'lik şişme oranına sahip sepiyolit, donma-çözülme çevrimlerinden sonra %1-%2 civarında şişme oranları

sergilemiştir. Donma-çözülme çevrimlerinin sepiyolitin şişme potansiyelini olumsuz yönde etkilediği açıkça görülmüştür.



Şekil 5.65. 25K75S karışımında donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

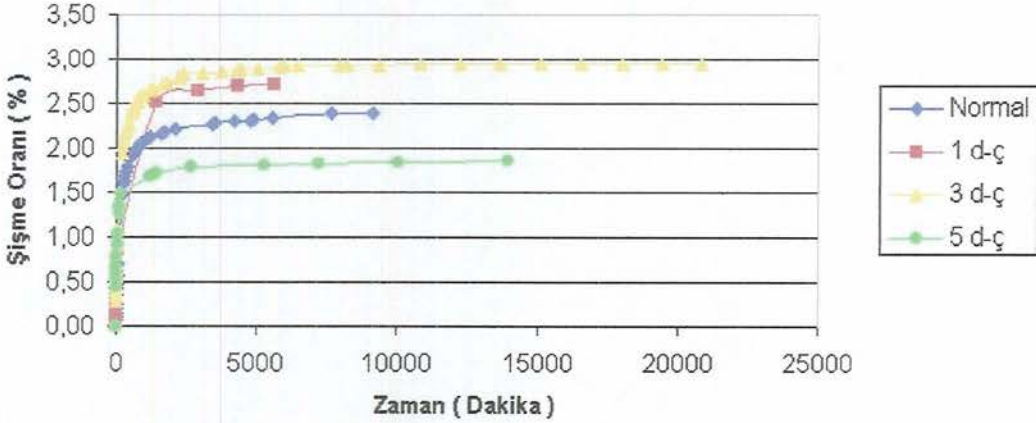
Şekil 5.65’de verilen sonuçlar incelendiğinde, donma-çözülme çevrimlerinin kirletici kullanılmadan da 25K75S karışımının şişme özelliğini düşürdüğü açıkça görülmüştür. Normalde yaklaşık %4’lük şişme oranına sahip 25K75S karışımı, donma-çözülme çevrimlerinden sonra %0,5’lere kadar düşen şişme oranları sergilemiştir. 25K75S karışımının şişme oranında sepiyolitte olduğu kadar düşme olmamıştır. Bu 25K75S karışımının normalde sahip olduğu %4’lük düşük şişme oranı değerinden kaynaklanmıştır.



Şekil 5.66. 50K50S karışımında donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

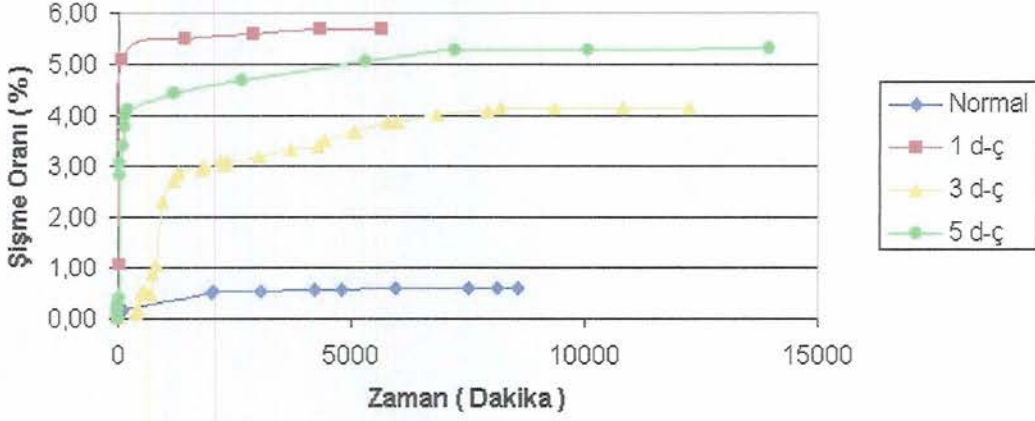
Şekil 5.66’da verilen sonuçlar incelendiğinde, donma-çözülme çevrimlerinin kirletici kullanılmadan da 50K50S karışımının şişme özelliğini düşürdüğü açıkça görülmüştür. Normalde yaklaşık %3’lük şişme oranına sahip 50K50S karışımı, donma-çözülme çevrimlerinden sonra %1,3’lere kadar düşen şişme oranları sergilemiştir. 50K50S karışımının şişme oranında sepiyolit ve 50K50S karışımında olduğu kadar düşme olmamıştır. Bu 50K50S karışımının normalde sahip olduğu %3’lük düşük şişme oranı değerinden kaynaklanmıştır.

Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait ağır metal ve potasyum klorür çözeltisi kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası yine bu çözeltilerle serbest şişme deneyine tabi tutularak elde edilmiş şişme oranı-zaman ilişkileri kullanılan kirletici çözeltilere göre verilmiştir. Sepiyolite ait şişme oranı-zaman ilişkileri Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileri için sırasıyla Şekil 5.67, Şekil 5.68, Şekil 5.69 ve Şekil 5.70 ‘de verilmiştir.



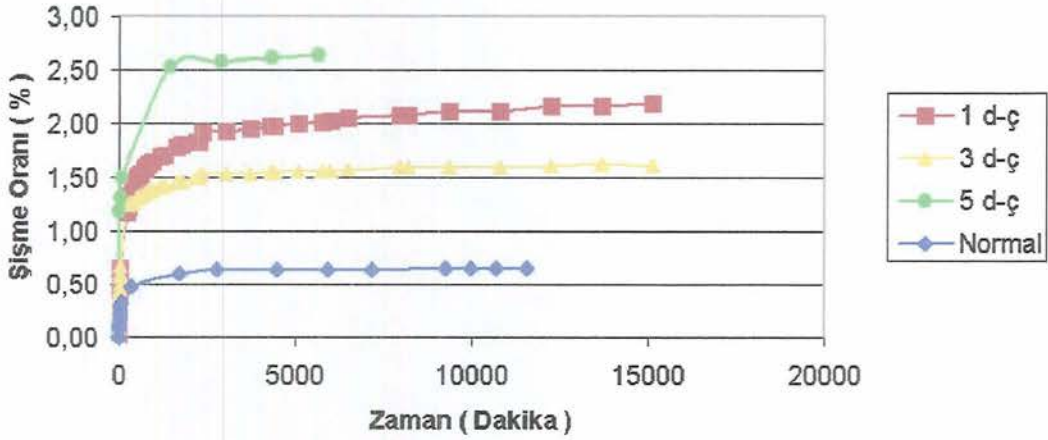
Şekil 5.67. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cu çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

Şekil 5.67’de verilen sonuçlar incelendiğinde, Cu çözeltisi için 5. donma-çözülme çevriminde sepiyolitın şişme oranının düştüğü görülmüştür. Normalde Cu çözeltisiyle yaklaşık %2,5 olan şişme oranı 5. donma-çözülme çevriminde %2’lere gerilemiştir.



Şekil 5.68. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cr çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

Şekil 5.68’de verilen sonuçlar incelendiğinde, Cr çözeltisi için belirgin bir azalma tespit edilememiştir. Normalde Cr çözeltisiyle yaklaşık %1’lik şişme oranı elde edilmişken donma-çözülme çevrimlerinden sonra elde edilen bu düşük değere ulaşamamıştır. Ancak 3. ve 5. donma-çözülme çevrimlerinde 1. donma-çözülme çevrimine göre daha düşük şişme oranı elde edilmiştir.



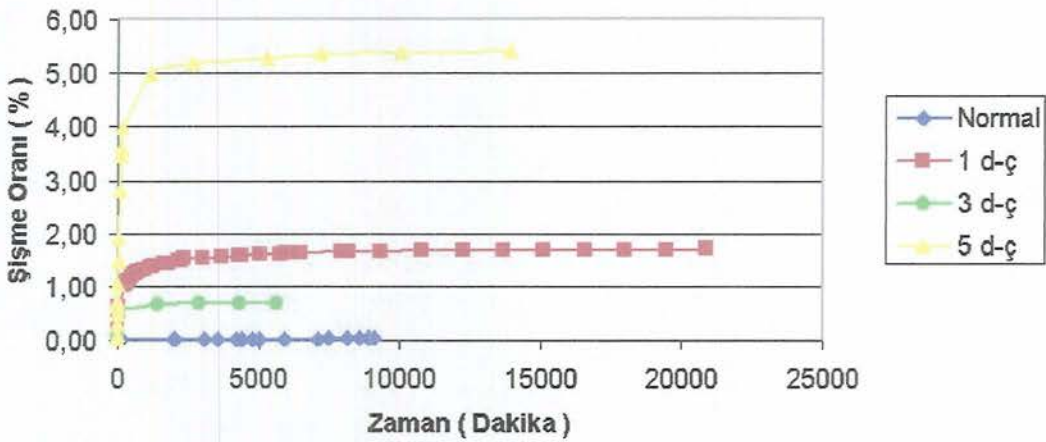
Şekil 5.69. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Pb çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

Şekil 5.69’da verilen sonuçlar incelendiğinde, Pb çözeltisi için 3. donma-çözülme çevriminde diğer çevrimlere göre daha düşük şişme oranı elde edilmiştir.

Normalde Pb çözültüsüyle yaklaşık %0,7 olan düşük şişme oranı donma-çözülme çevrimleriyle yakalanamamıştır.

Şekil 5.70’de verilen sonuçlar incelendiğinde, KCl çözültüsü için 3. donma-çözülme çevriminde diğer çevrimlere göre daha düşük şişme oranı elde edilmiştir. Normalde KCl çözültüsüyle yaklaşık %0,1 olan düşük şişme oranı donma-çözülme çevrimleriyle yakalanamamıştır. Elde edilen bu sonucun donma-çözülme çevrimleriyle kilin ağır metal tutma kapasitesinin azalmasıyla bünyesinde daha az miktarda KCl bulundurabilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

25K75S karışımına ait şişme oranı-zaman ilişkileri Cu, Cr, Pb ve KCl çözültüleri için sırasıyla Şekil 5.71, Şekil 5.72, Şekil 5.73 ve Şekil 5.74 ‘de verilmiştir.

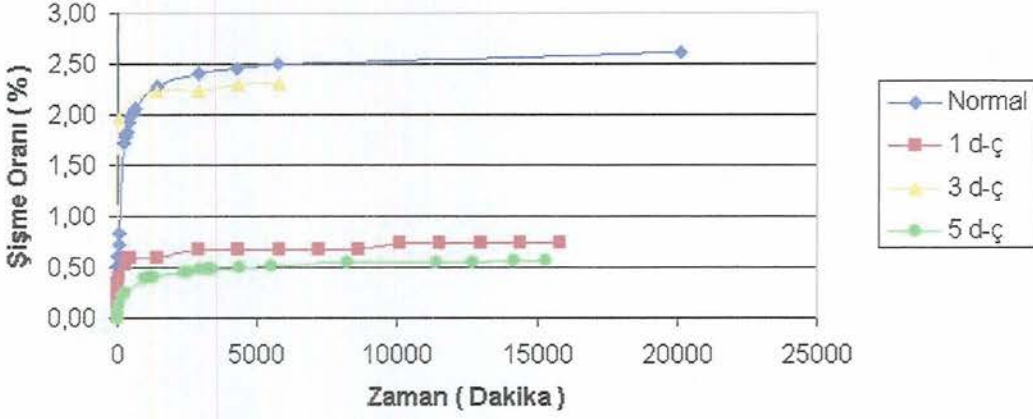


Şekil 5.70. Sepiyolitte donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası KCl çözültüsüyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

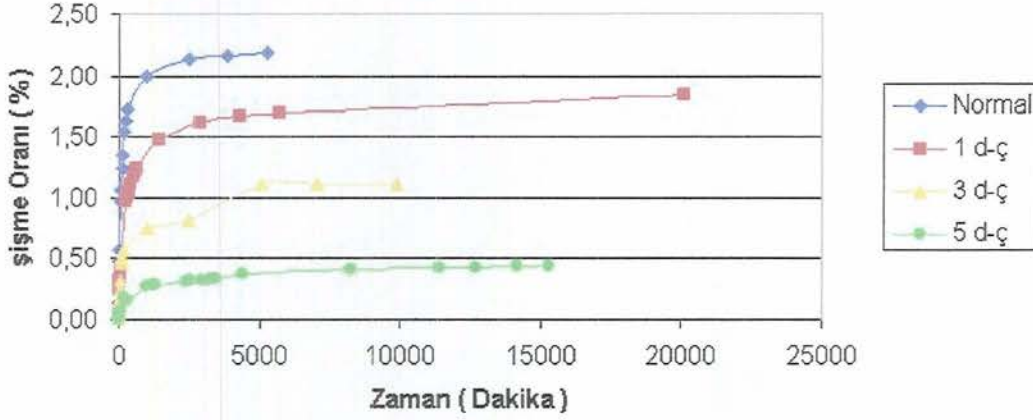
Şekil 5.71’de verilen 25K75S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde, Cu çözültüsü için donma-çözülme çevrimleriyle şişme oranının belirgin bir şekilde düştüğü görülmüştür. Normalde Cu çözültüsü için yaklaşık %2,5’luk bir şişme elde edilirken donma-çözülme çevrimleriyle %0,5’lik şişme oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.72’de verilen 25K75S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde, Cr çözültüsü için donma-çözülme çevrimleriyle şişme oranı için kademeli bir düşmenin sağlandığı görülmüştür. Normalde Cr çözültüsü için yaklaşık %2,3’lük bir şişme elde edilirken donma-çözülme çevrimleriyle bunun 1. d-ç’ye ait

numunede %1,8'e, 3. d-ç'ye ait numunede %1,2'ye ve 5. d-ç'ye ait numunede ise %0,5'e indiği görülmüştür.

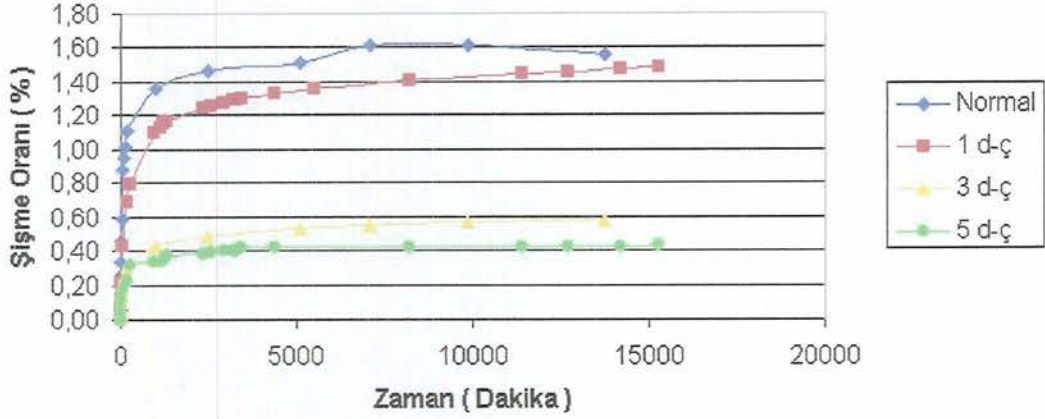


Şekil 5.71. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cu çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

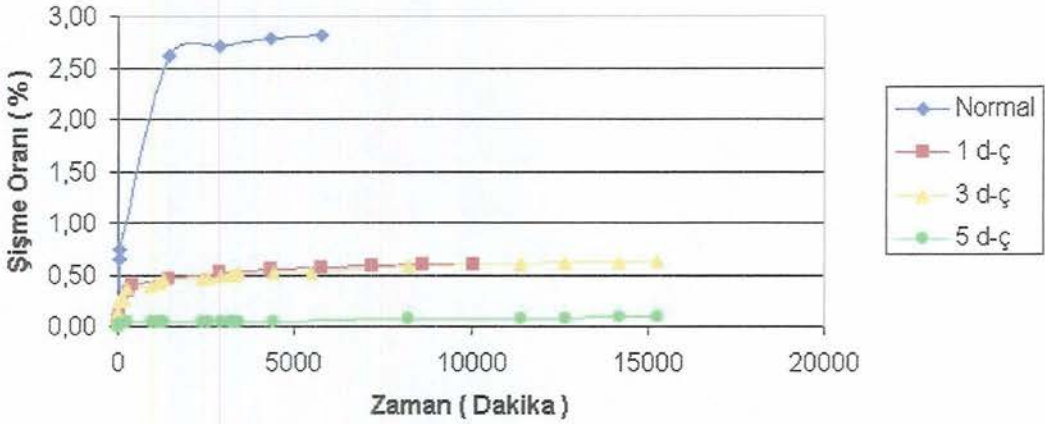


Şekil 5.72. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cr çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

Şekil 5.73'de verilen 25K75S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde, Pb çözeltisi için de donma-çözülme çevrimleriyle şişme oranı için kademeli bir düşmenin sağlandığı görülmüştür. Normalde Pb çözeltisi için yaklaşık %1,6'lık bir şişme elde edilirken donma-çözülme çevrimleriyle bunun 1. d-ç'ye ait numunede %1,5'e, 3. d-ç'ye ait numunede %0,6'ya ve 5. d-ç'ye ait numunede ise %0,4'e indiği görülmüştür.



Şekil 5.73. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Pb çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

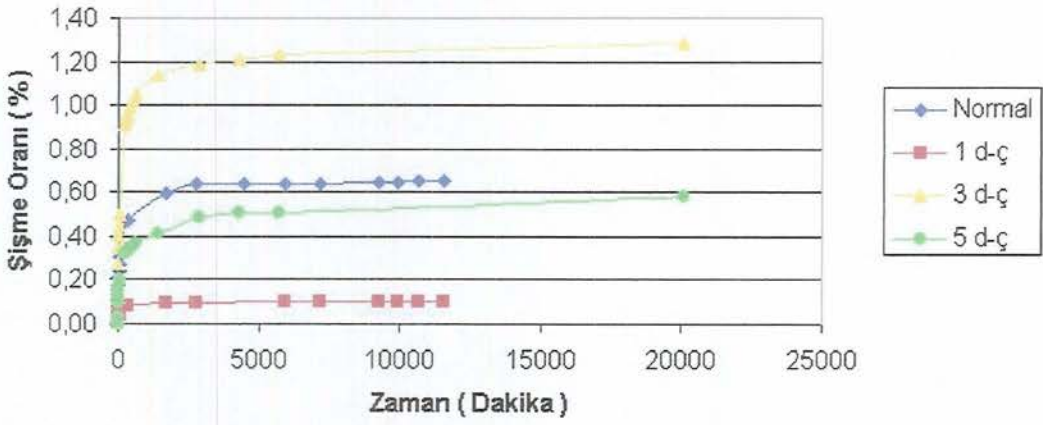


Şekil 5.74. 25K75S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası KCl çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

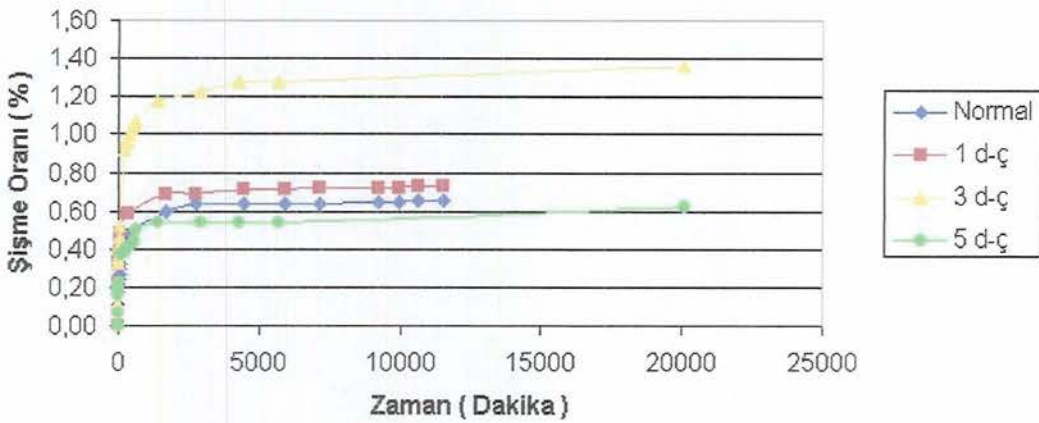
Şekil 5.74'de verilen 25K75S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde, KCl çözeltisi için de donma-çözülme çevrimleriyle şişme oranı için kademeli bir düşmenin sağlandığı görülmüştür. Normalde KCl çözeltisi için yaklaşık %2,7'lik bir şişme elde edilirken donma-çözülme çevrimleriyle bunun 1. d-ç'ye ait numunede %0,5'e, 3. d-ç'ye ait numunede %0,6'ya ve 5. d-ç'ye ait numunede ise %0,1'e indiği görülmüştür.

50K50S karışımına ait şişme oranı-zaman ilişkileri Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileri için sırasıyla Şekil 5.75, Şekil 5.76, Şekil 5.77 ve Şekil 5.78 'de verilmiştir. Şekil 5.75'de verilen 50K50S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde,

Cu çözültisi için 1. ve 3. donma-çözülme çevrimlerinde şişme oranında düşme gerçekleştiği görülmüştür. Normalde Cu çözültisi için yaklaşık %0,65'lik bir şişme elde edilirken donma-çözülme çevrimleriyle bunun 1. d-ç'ye ait numunede %0,1'e, ve 5. d-ç'ye ait numunede %0,6'ya indiği görülmüştür. Şekil 5.76'da verilen 50K50S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde, Cr çözültisi için 5. donma-çözülme çevriminde şişme oranında düşme gerçekleştiği görülmüştür. Normalde Cu çözültisi için yaklaşık %0,65'lik bir şişme elde edilirken 5. donma-çözülme çevrimine ait numunede %0,6'ya indiği görülmüştür.



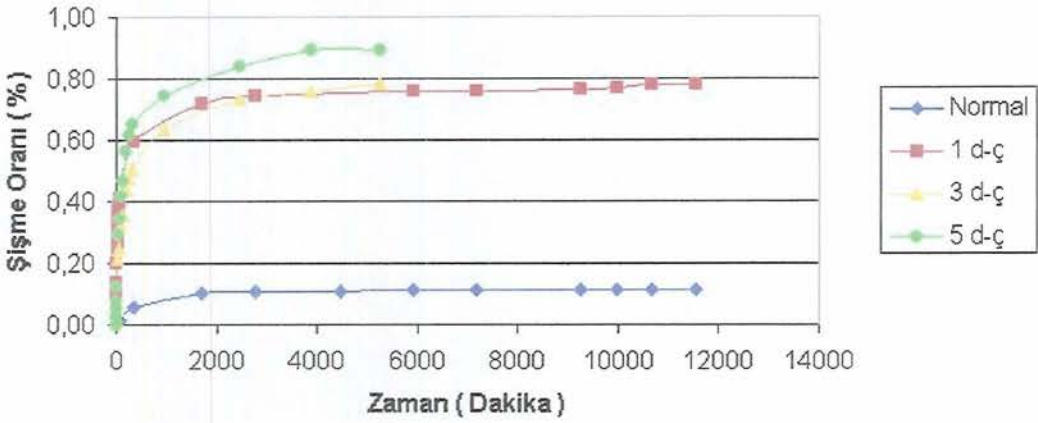
Şekil 5.75. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cu çözültisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri



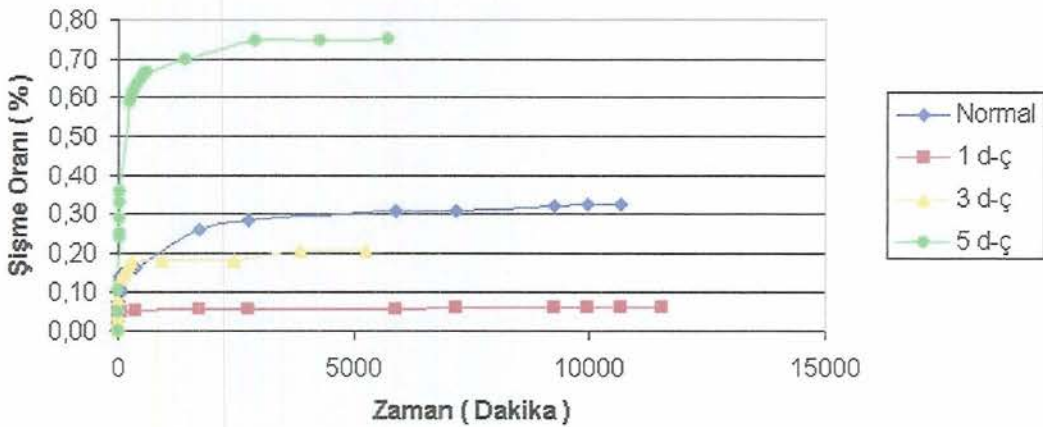
Şekil 5.76. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Cr çözültisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

Şekil 5.77’de verilen 50K50S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde, Pb çözeltisi için donma-çözülme çevrimi sonrası hiçbir numunede normalde Pb çözeltisi için elde edilen yaklaşık %0,35’lik şişme oranının altında değerler elde edilmediği görülmüştür.

Şekil 5.78’de verilen 50K50S karışımına ait sonuçlar incelendiğinde ise, KCl çözeltisi için 1. d-ç ve 3. d-ç çevrimlerinde, normalde KCl çözeltisi için elde edilen yaklaşık %0,30’luk değerın altında değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5.77. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası Pb çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri



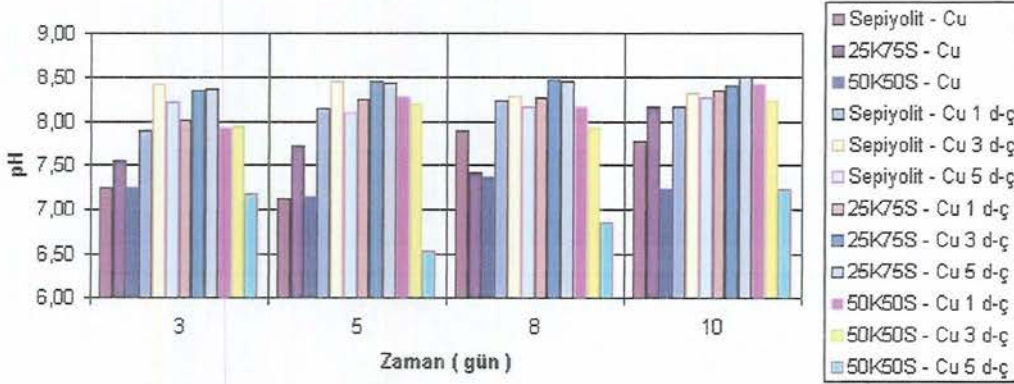
Şekil 5.78. 50K50S karışımında donma çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası KCl çözeltisiyle yapılan serbest şişme deneyi ile elde edilen şişme oranı-zaman ilişkileri

## 5.4.5. Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyi sonrası belirlenen fiziko-kimyasal Özellikler

### 5.4.5.1. pH

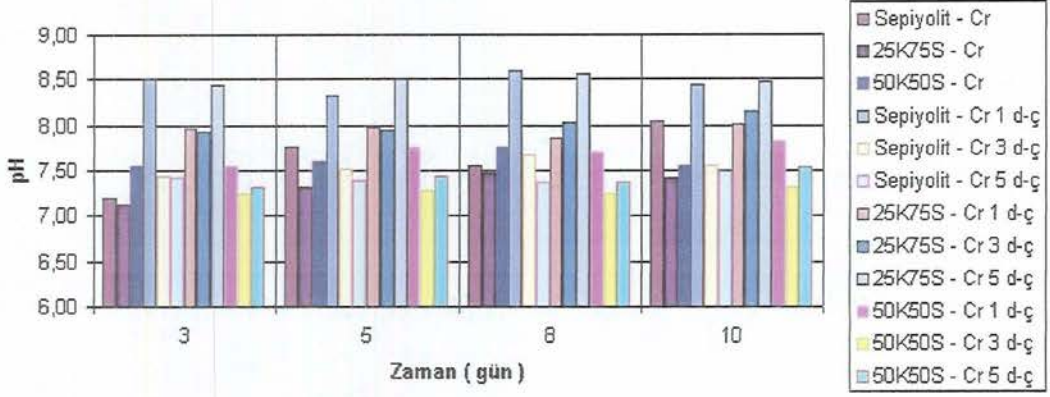
Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası sepiyolit ve karışımlara ait toplama kaplarında biriktirilen sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerdeki pH değerleri ölçülerek Cu için Şekil 5.79'da, Cr için Şekil 5.80'de, Pb için Şekil 5.81'de ve KCl için Şekil 5.82'de görülen pH – zaman ilişkileri verilmiştir.

Şekil 5.79'da verilen sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH değerleri incelendiğinde, genel olarak pH değerlerinin 7-8,5 arasında değiştiği ve donma-çözülme çevrimleriyle elde edilen sızıntı sularının pH değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

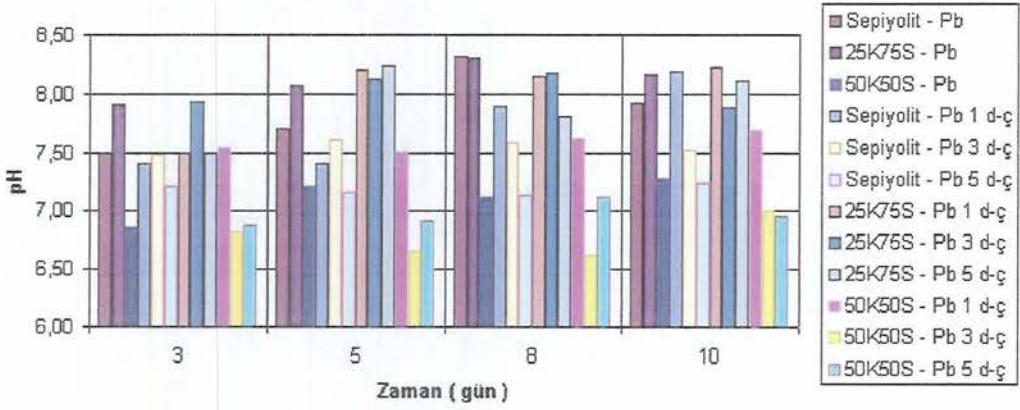


Şekil 5.79. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri

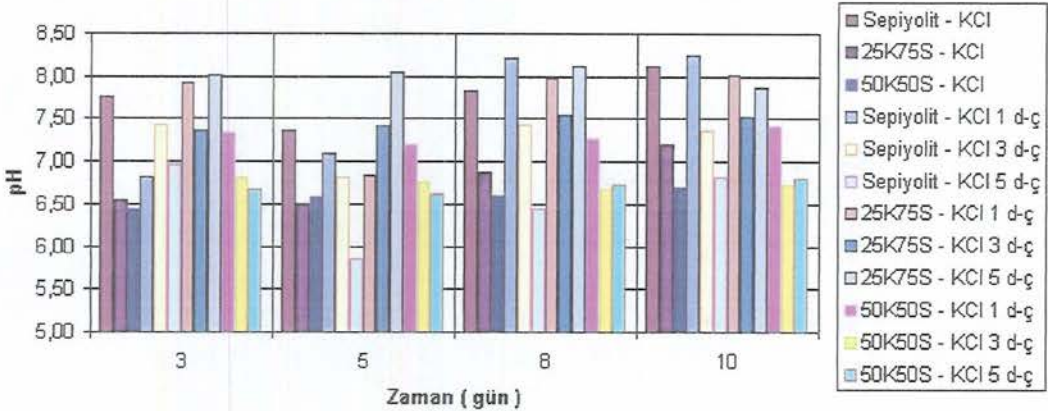
Şekil 5.80'de verilen sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH değerleri incelendiğinde ise pH değerlerinin düzensiz olmakla birlikte genel olarak 7-8,5 arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 5.80. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri



Şekil 5.81. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri

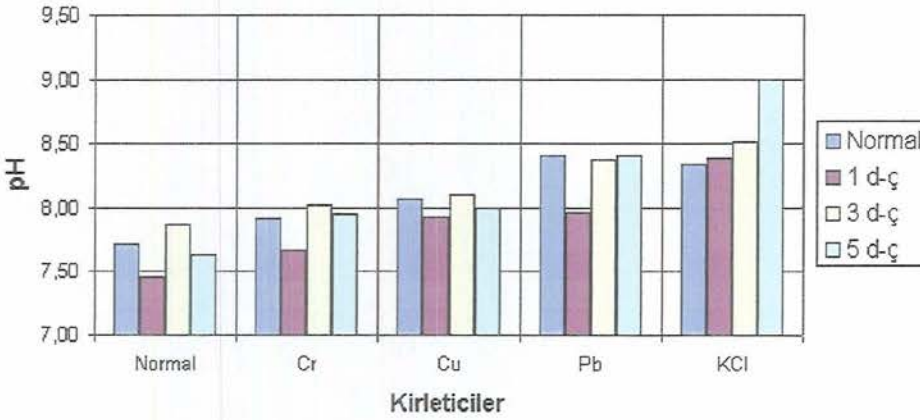


Şekil 5.82. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH-zaman ilişkileri

Şekil 5.81’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH değerleri incelendiğinde pH değerlerinin düzensiz olmakla birlikte genel olarak 6,5-8,3 arasında değiştiği görülmüştür.

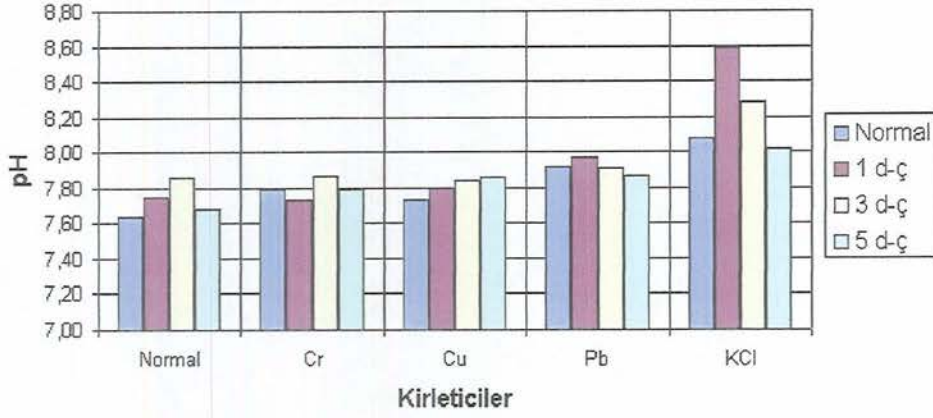
Şekil 5.82’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının pH değerleri incelendiğinde pH değerlerinin düzensiz olmakla birlikte genel olarak 6,5-8,2 arasında değiştiği görülmüştür.

Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrasında sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait zeminlerden alınan ve U.S. EPA Method 9045 (1986)’da belirtilen "Soil pH" metoduna uygun olarak hazırlanıp pH değerleri ölçülen numunelerin pH-kirletici çözelti ilişkileri sırasıyla Şekil 5.83, Şekil 5.84 ve Şekil 5.85’de verilmiştir.



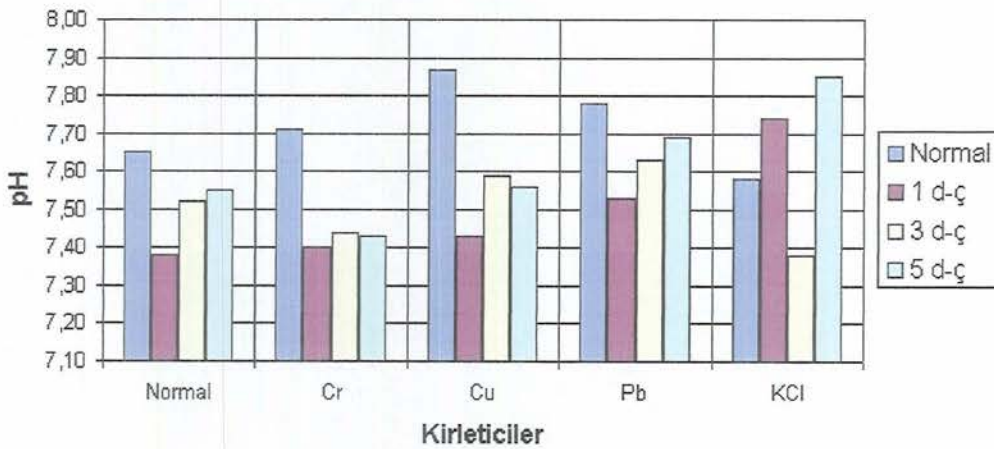
Şekil 5.83. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin pH-zaman ilişkileri

Şekil 5.83’de verilen sepiyolite ait donma-çözülme çevrimlerine göre normal ve kirletici çözeltiler kullanılarak oluşturulmuş pH değerleri ilişkisinde, pH değerlerinin genel olarak 7,5-9 arasında değiştiği ve artışların Cr,Cu,Pb,KCl sıralamasıyla gerçekleştiği görülmüştür. Aynı zamanda donma-çözülme çevrimleriyle de pH değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.84. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin pH-zaman ilişkileri

Şekil 5.84’de verilen 25K75S karışımlarına ait donma-çözülme çevrimlerine göre normal ve kirletici çözeltiler kullanılarak oluşturulmuş pH değerleri ilişkisinde ise pH değerlerinin genel olarak 7,6-8,6 arasında değiştiği ve belirgin artışın KCl çözeltisi kullanılan numunelerde gerçekleştiği görülmüştür. Aynı zamanda donma-çözülme çevrimleriyle de pH değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür.

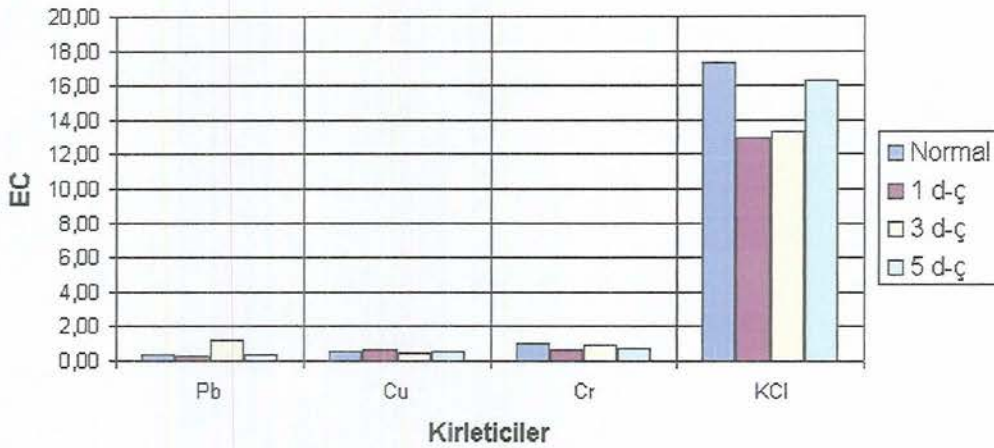


Şekil 5.85. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin pH-zaman ilişkileri

Şekil 5.85’de verilen 50K50S karışımlarına ait donma-çözülme çevrimlerine göre normal ve kirlenici çözeltiler kullanılarak oluşturulmuş pH değerleri ilişkisinde ise pH değerlerinin genel olarak 7,4-7,9 arasında değiştiği görülmüştür. Normal numuneler incelendiğinde en yüksek pH değerinin Cu çözeltilinde, 1. d-ç ve 5. d-ç çevrimlerine tabi tutulan numunelerde ise KCl çözeltilinde gerçekleştiği görülmüştür. Aynı zamanda donma-çözülme çevrimleriyle de pH değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür.

#### 5.4.5.2. Elektriksel iletkenlik (EC)

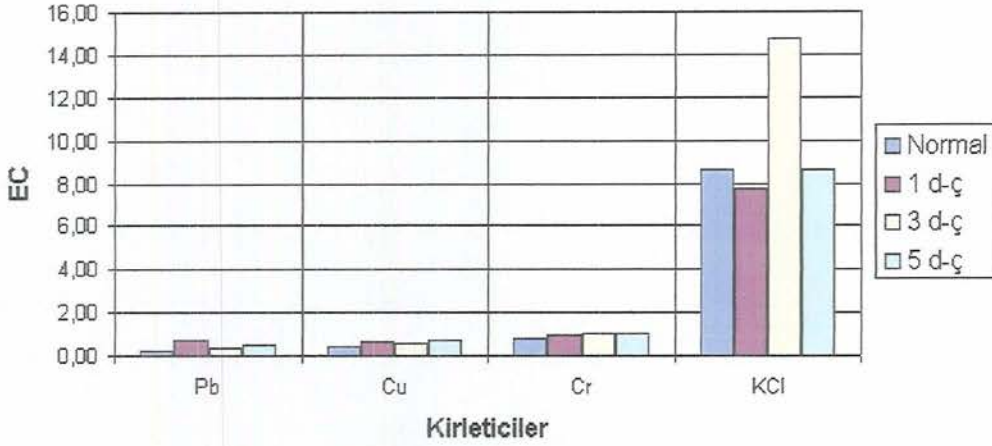
Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrasında sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait zeminlerden alınan numunelerin elektriksel iletkenlikleri belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 5.86, Şekil 5.87 ve Şekil 5.88’de verilmiştir.



Şekil 5.86. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri

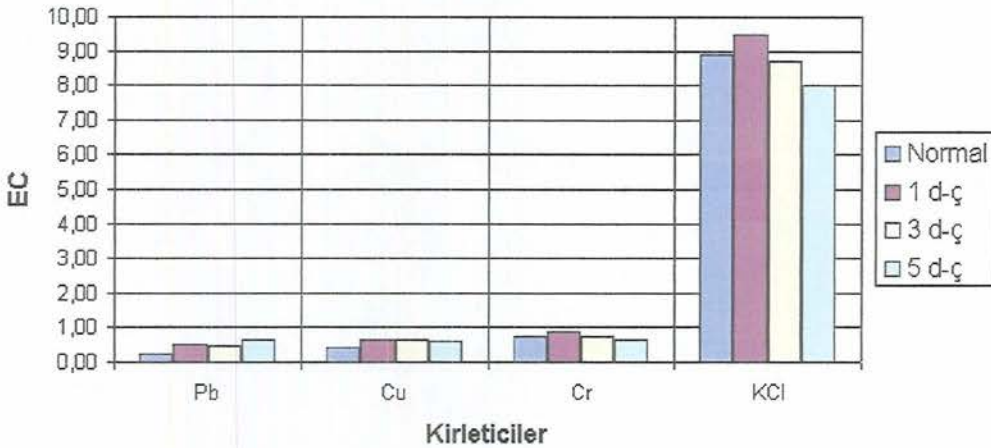
Şekil 5.86’de verilen sepiyolite ait donma-çözülme çevrimlerine göre kirlenici çözeltiler kullanılarak oluşturulmuş EC değerleri ilişkisinde, EC değerlerinin ağır metaller için 2’nin altında kaldığı ve KCl çözeltisi için de 12-17 değerleri arasında değiştiği görülmüştür. KCl çözeltisinin donma-çözülmesiz EC değerinin ise donma-çözülme uygulanmış numunelerin değerlerine göre daha

büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise donma-çözülme çevrimleriyle sepiyolitın KCl tutma oranının düşmesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.87. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri

Şekil 5.87’de verilen 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimlerine göre kirletici çözeltiler kullanılarak oluşturulmuş EC değerleri ilişkisinde, EC değerlerinin ağır metaller için yaklaşık 1’inin altında kaldığı ve KCl çözeltisi için de 8-15 değerleri arasında değiştiği görülmüştür. KCl çözeltisinin donma-çözülmesiz EC değeri donma-çözülme uygulanmış 3. d-ç haricindeki numunelerin değerlerine göre daha büyük olmuştur.

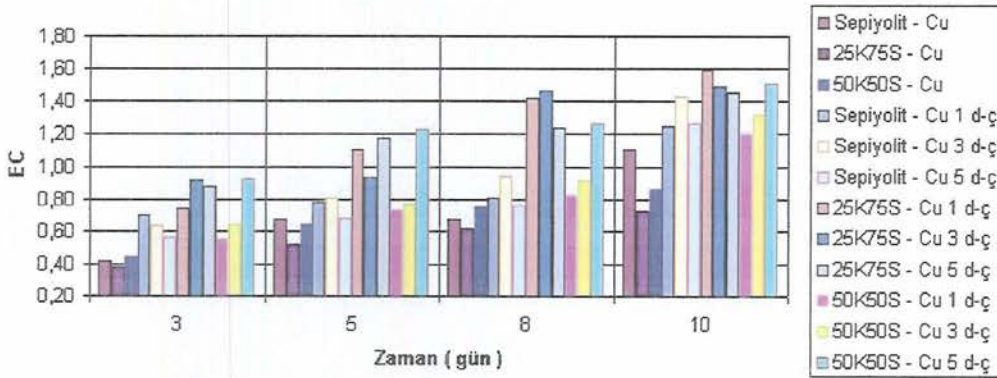


Şekil 5.88. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası zemin numunelerinin EC-zaman ilişkileri

Şekil 5.88’de verilen 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimlerine göre kirletici çözeltiler kullanılarak oluşturulmuş EC değerleri ilişkisinde, EC değerlerinin ağır metaller için yaklaşık 1’inin altında kaldığı ve KCl çözeltisi için de çevrimi dışında 8-9,5 değerleri arasında değişmektedir. KCl çözeltisinin donma-çözülmesiz EC değerinin ise donma-çözülme uygulanmış 1. d-ç haricindeki numunelerin değerlerine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise donma-çözülme çevrimleriyle sepiyolitın KCl tutma oranının düşmesidir.

Donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonrası sepiyolit ve karışımlara ait toplama kaplarında biriktirilen sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerdeki EC değerleri ölçülerek Cu için Şekil 5.89’da, Cr için Şekil 5.90’da, Pb için Şekil 5.91’de ve KCl için Şekil 5.92’de görülen pH – zaman ilişkileri verilmiştir.

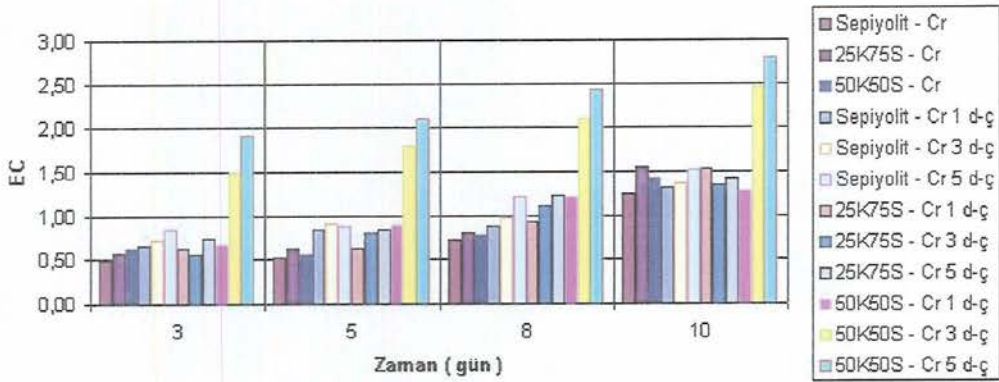
Şekil 5.89’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC değerleri incelendiğinde, EC değerlerinin 0,4-1,6 arasında değiştiği ve donma-çözülme çevrimleriyle elde edilen sızıntı sularının EC değerlerinin donma-çözülme çevrimsiz olanlara göre daha yüksek olmuştur.



Şekil 5.89. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri

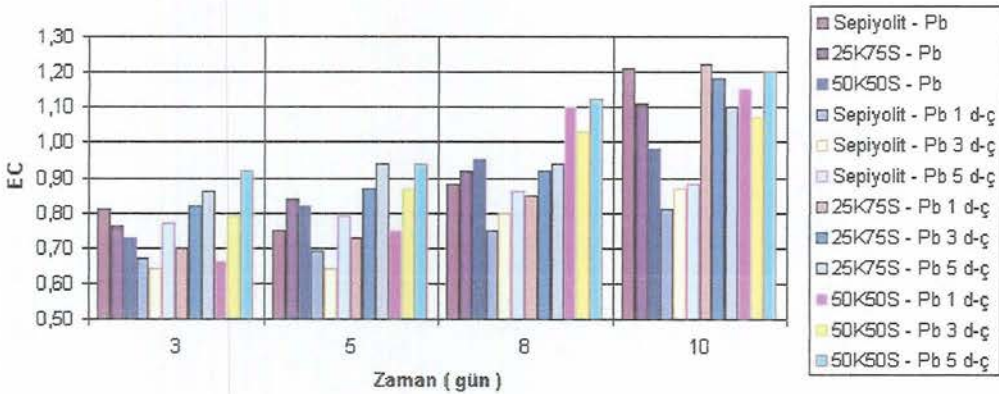
Şekil 5.90’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC değerleri incelendiğinde, EC değerlerinin 0,5-2,7 arasında değiştiği ve donma-çözülme çevrimleriyle elde edilen sızıntı sularının

EC değerlerinin donma-çözülme çevrimsiz olanlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

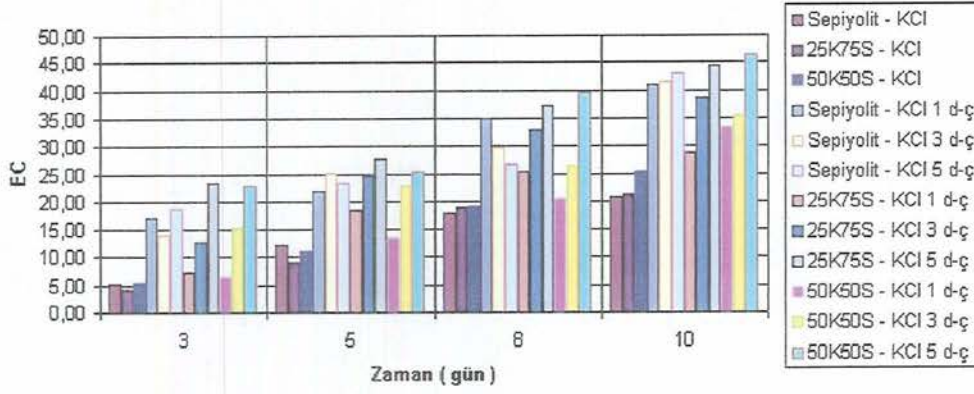


Şekil 5.90. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri

Şekil 5.91’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC değerleri incelendiğinde, EC değerlerinin 0,6-1,2 arasında değiştiği ve donma-çözülme çevrimleriyle elde edilen sızıntı sularının EC değerlerinin donma-çözülme çevrimsiz olanlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.91. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri



Şekil 5.92. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC-zaman ilişkileri

Şekil 5.92’de verilen sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının EC değerleri incelendiğinde, EC değerlerinin yaklaşık 5-45 arasında değiştiği ve donma-çözülme çevrimleriyle elde edilen sızıntı sularının EC değerlerinin donma-çözülme çevrimsiz olanlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

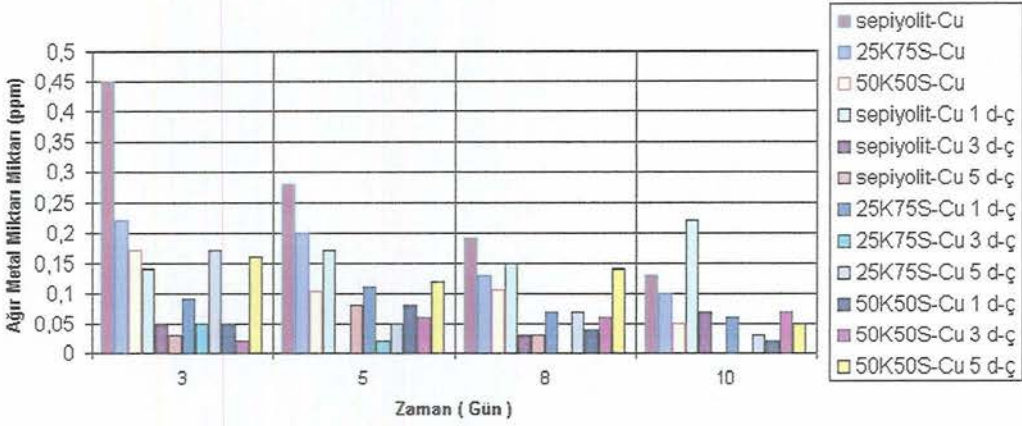
#### 5.4.5.3. Toplam metal ve potasyum (K) miktarı

Sepiyolit ve karışımlara ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonucunda toplama kaplarında biriken sızıntı sularının, 3., 5., 8., ve 10. günlerdeki çözeltilerinden alınan numunelerin ağır metal miktarlarının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri Cu çözeltisi için Şekil 5.93, Cr çözeltisi için Şekil 5.94, ve Pb çözeltisi için Şekil 5.95’de verilmiştir. Potasyum (K) miktarı zaman ilişkileri ise Şekil 5.96’da verilmiştir.

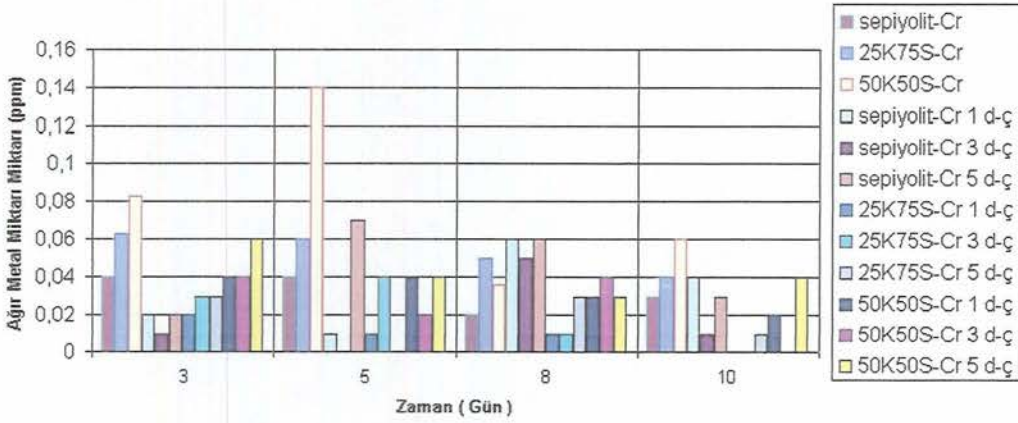
Şekil 5.93’deki Cu çözeltisi için verilen sonuçlar incelendiğinde sızıntı deneyinin ilerleyen günlerinde ve donma-çözülme çevrimi sonrası sızıntı sularında ağır metal miktarlarının azaldığı görülmüştür. Sepiyolit ve karışımlara ait sonuçlar ağır metallerin yaklaşık %100 oranında tutulduğunu göstermiştir.

Şekil 5.94’deki Cr çözeltisi için verilen sonuçlar incelendiğinde sızıntı deneyinin ilerleyen günlerinde ve donma-çözülme çevrimi sonrası sızıntı

sularında ağır metal miktarlarının azaldığı görülmüştür. Sepiyolit ve karışımlara ait sonuçlar ağır metallerin yaklaşık %100 oranında tutulduğunu göstermiştir.

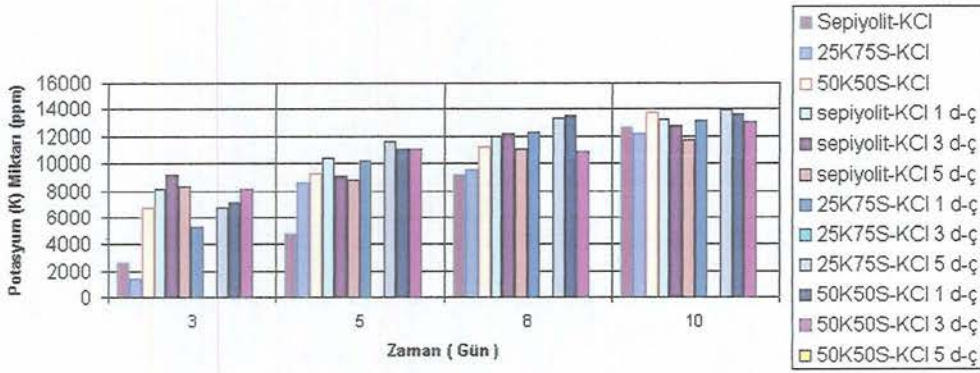


Şekil 5.93. Sepiyolit ve karışımlara ait Cu çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri



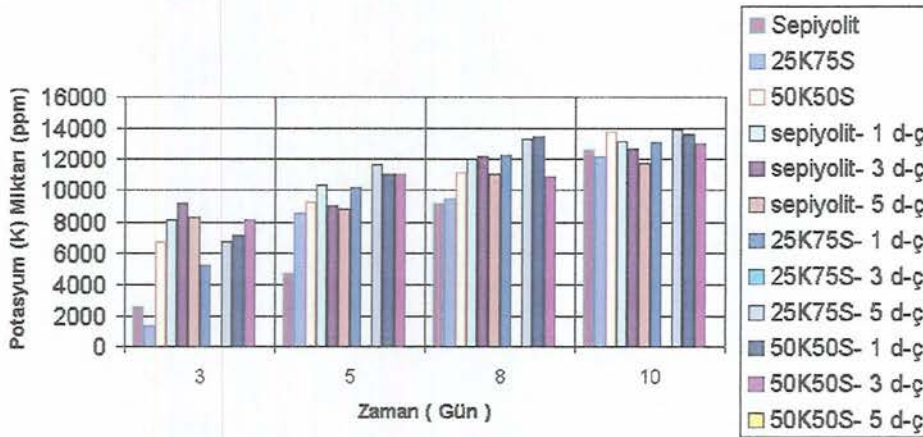
Şekil 5.94. Sepiyolit ve karışımlara ait Cr çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri

Şekil 5.95'deki Pb çözeltisi için verilen sonuçlar incelendiğinde sızıntı deneyinin ilerleyen günlerinde ve donma-çözülme çevrimi sonrası sızıntı sularında ağır metal miktarlarının azaldığı görülmüştür. Sepiyolit ve karışımlara ait sonuçlar ağır metallerin yaklaşık %100 oranında tutulduğunu göstermiştir.



Şekil 5.95. Sepiyolit ve karışımlara ait Pb çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının ağır metal miktarı-zaman ilişkileri

Şekil 5.96'daki verilen potasyum (K) okumalar incelendiğinde potasyum (K) miktarının sızıntı deneyinin ilerleyen günlerinde ve donma-çözülme çevrimi sonrası sızıntı sularında yükseldiği görülmüştür. Bu yükselme sepiyolite verilen 74000 ppm mertebesindeki yüksek potasyum derişiminden kaynaklanmıştır. Verilen yüksek potasyum derişimine karşın sepiyolit ve karışımların potasyum miktarının yaklaşık %80'lik kısmını tuttuğu görülmüştür.



Şekil 5.96. Sepiyolit ve karışımlara ait KCl çözeltisi kullanılarak elde edilen sızıntı sularının Potasyum (K) miktarı-zaman ilişkileri

Sepiyolit ve karışımlara ait donma-çözülme çevrimleri ve sızıntı deneyleri sonucunda kirletici çözelti kullanılmadan elde edilen sızıntı sularının çevreye verebilecekleri kirlilik miktarını belirlemek amacıyla da sızıntı deneylerinde

kullanılan kirleticiler dışındaki çeşitli ağır metal miktarları belirlenmiş ve Çizelge 5.14’de verilmiştir.

**Çizelge 5.14.** Sepiyolit ve karışımlara ait kirletici kullanılmadan yapılan donma-çözülme çevrimli sızıntı deneyleri sonucu elde edilmiş ağır metal miktarları

Malzeme	Çevrim Sayısı	Ağır Metal Değerleri (ppm)				
		Ni	Cd	Fe	Al	Zn
Sepiyolit	1	0,02	0,07	0,02	0,43	0,08
	3	0,03	0,07	0,01	0,51	0,05
	5	0,02	0,06	0,03	0,31	0,1
25K75S	1	0	0,04	0,05	0,34	0,1
	3	0	0,03	0,04	0,37	0,08
	5	0,1	0,02	0,01	0,4	0,02
50K50S	1	0	0,02	0,02	0,25	0
	3	0	0,01	0	0,42	0
	5	0,04	0	0	0,24	0,16

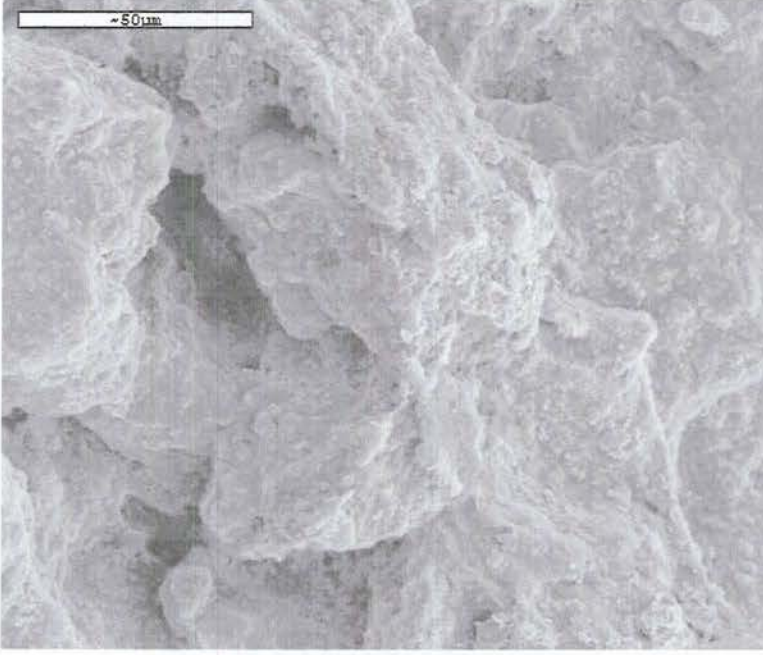
Literatürdeki içme ve çöp deponi alanı sızıntı sularında bulunmasına izin verilen maksimum kirletici miktarları sırasıyla EK-10 ve EK-11’de bulunan çizelgelerde verilmiştir. Sepiyolit ve karışımlara ait kirleticisiz ve kirletici kullanılarak yapılan sızıntı deneylerinden toplanan sulardaki kirletici miktarları maksimum sınır değerlerinin altında çıkmıştır.

## 5.5. Mikro-Yapısal Özellikler

### 5.5.1. Scanning (tarama) elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları

Sepiyolite ait standart enerji ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numunenin mikro-yapısını gösteren tarama elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiş fotoğrafı Şekil 5.97’de verilmiştir. Sepiyolit (Sivrihisar-Ayvalı), 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numunelerinin distile su ile sızıntı deneyi sonrası mikro-yapısını gösteren tarama

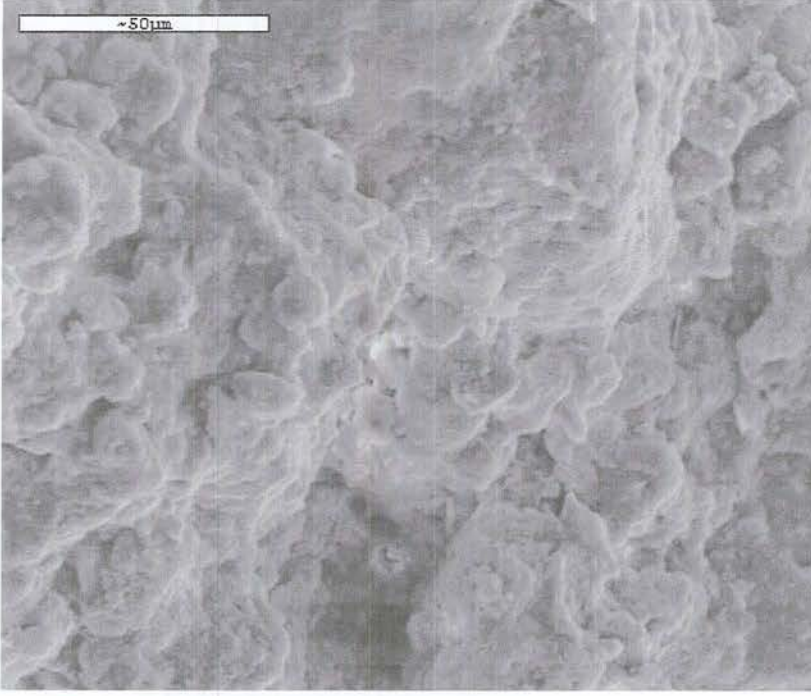
elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiş fotoğrafları ise sırasıyla Şekil 5.98, Şekil 5.98 ve Şekil 5.100'de verilmiştir.



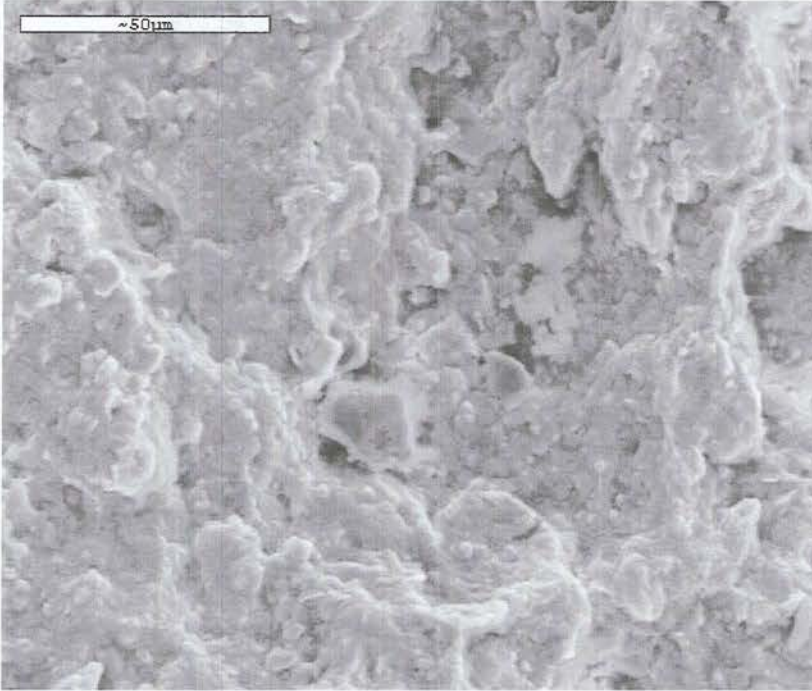
Şekil 5.97. Standart enerji ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmış sepiyolit numunesine ait SEM fotoğrafı



Şekil 5.98. Sızıntı sonrası sepiyolit numunesine ait SEM fotoğrafı



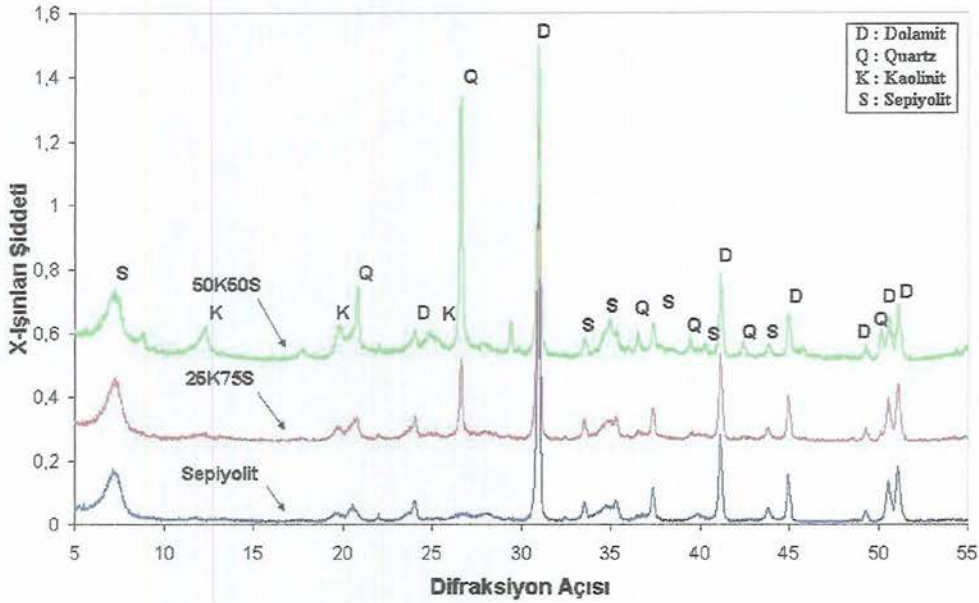
Şekil 5.99. Sızıntı sonrası 25K75S karışımı numunesine ait SEM fotoğrafı



Şekil 5.100. Sızıntı sonrası 50K50S karışımı numunesine ait SEM fotoğrafı

### 5.5.2. X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi

Sepiyolit ve karışımlara ait x-ışınları difraksiyonu analizi sonuçları Şekil 5.101'de verilmiştir.



Şekil 5.101. Sepiyolit ve karışımlara ait x-ışınları difraksiyonu analizi sonuçları

Şekil 5.101'de verilen sepiyolit ve karışımlara ait x-ışınları difraksiyonu analizi incelendiğinde sepiyolitte düşük olan kuvars pikinin karışımdaki kaolinit oranı arttıkça yükseldiği, sepiyolit piklerinin benzer olduğu, sepiyolitte çok düşük olan kaolinit pikinin karışımdaki kaolinit oranı arttıkça yükseldiği ve dolomit piklerinin de benzerlik gösterdiği görülmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sepiyolit kilinin çöp deponi alanı tabakalarında kullanılabilirliğinin incelenmesi planlanmıştır. Sepiyolit malzemesiyle birlikte kaolinit kili de kullanılmıştır. Böylece çöp deponi tabakalarında kullanılacak olan sepiyolit malzemesinin, çöp depolama alanının inşa edileceği çevre de bulunan yerel bir kille birlikte karıştırılarak kullanımına ilişkin bir fikir edinilmesi planlanmıştır. Deneysel çalışmalarda sepiyolit, %25 Kaolinit + %75 Sepiyolit (25K75S) ve %50 Kaolinit + %50 Sepiyolit (50K50S) karışımları hazırlanarak kullanılmıştır. Sepiyolit malzemesinin çöp deponi alanı tabakalarında kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla sepiyolit ve oluşturulan karışımlar için indeks deneyleri, mekanik deneyler ve fizikokimyasal deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler ve elde edilen sonuçların çöp deponi alanı tabakaları tasarım kriterleri açısından değerlendirilmesi maddeler halinde verilmiştir.

1. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları için sırasıyla 47, 39,1 ve 36,5 plastisite indisi değerleri elde edilmiştir. Çöp deponi alanı tabakalarında kullanılacak olan malzemeler için  $PI < 50$  olması istenmektedir (Daniel ve Wu, 1993). Sepiyolit ve karışımlar bu koşulu karşılamıştır.

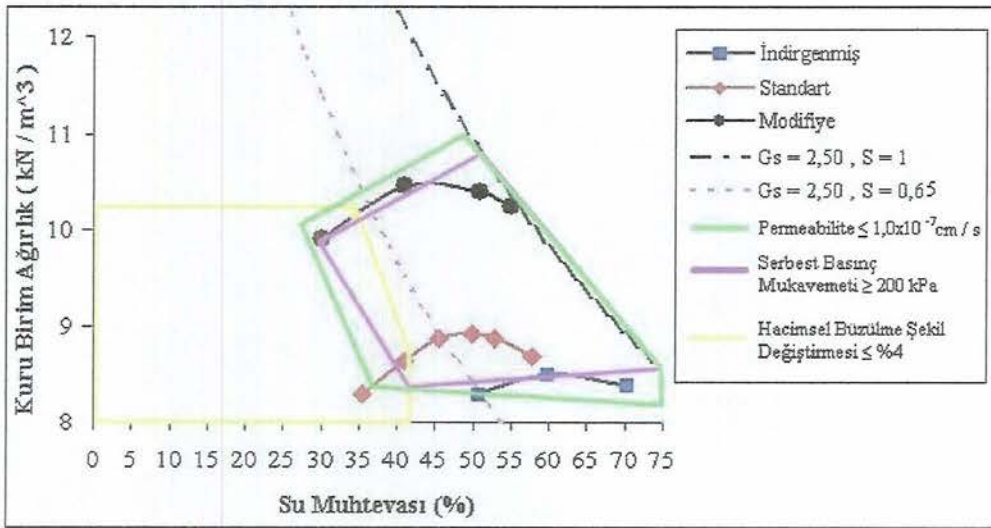
2. Çöp deponi alanı tabakaları için müsaade edilebilir maksimum hacimsel büzülme şekil değiştirmesi değeri %4 tür (Daniel ve Wu, 1993; Kleppe ve Olson, 1984). Sepiyolit ve karışımlara ait Standart ve modifiye enerjilerde sıkıştırılmış numunelerde optimum su muhtevasının yaklaşık %5-%10 kuru tarafında bu koşul sağlanmıştır.

3. Çöp deponi alanı tabakaları için kullanılacak olan malzemelerin 200 kPa değerinden büyük yada ona eşit serbest basınç mukavemetlerine sahip olması gerektiği belirtilmiştir (Daniel ve Wu, 1993). Sepiyolit ve karışımların indirgenmiş, standart ve modifiye enerjilerde ve çeşitli su muhtevalarında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Sepiyolit ve karışımlara ait standart ve modifiye enerji kullanılarak sıkıştırılmış numuneler bu koşulu sağlamıştır.

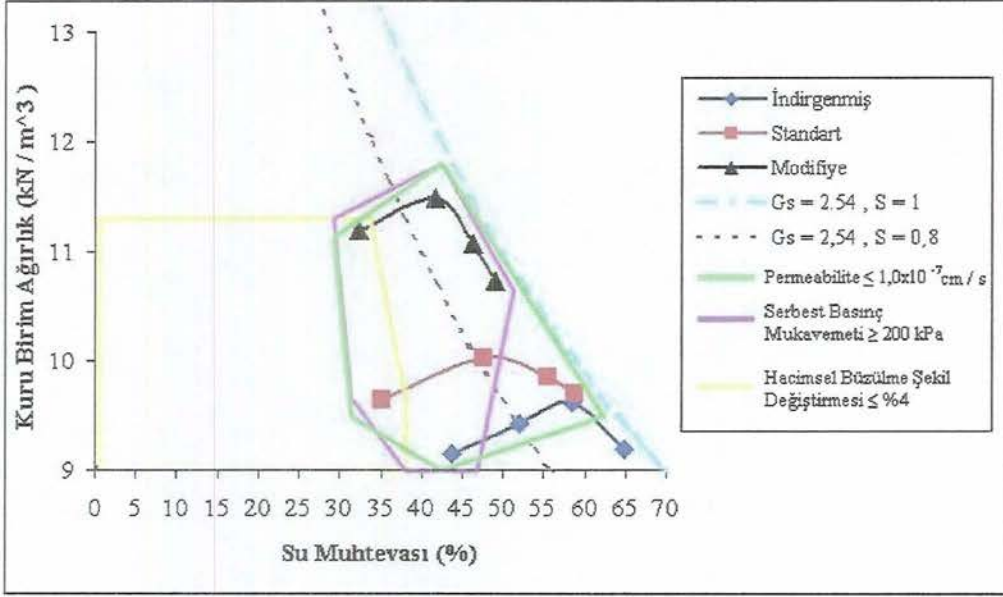
4. Çöp deponi alanı tabakaları için permeabilite değerinin  $\leq 1,0 \times 10^{-7}$  cm/s kriterini sağlaması gerekmektedir (Daniel ve Benson, 1990). İndirgenmiş, standart ve modifiye enerjilerde, sepiyolit için  $0,6-1,1 \times 10^{-7}$  cm/s aralığında, 25K75S

karışımı için  $0,3-1,3 \times 10^{-7}$  cm/s aralığında ve 50K50S karışımı için  $0,2-0,7 \times 10^{-7}$  cm/s aralığında değerler elde edilmiş ve çöp deponi tabakası kriterleri sağlanmıştır.

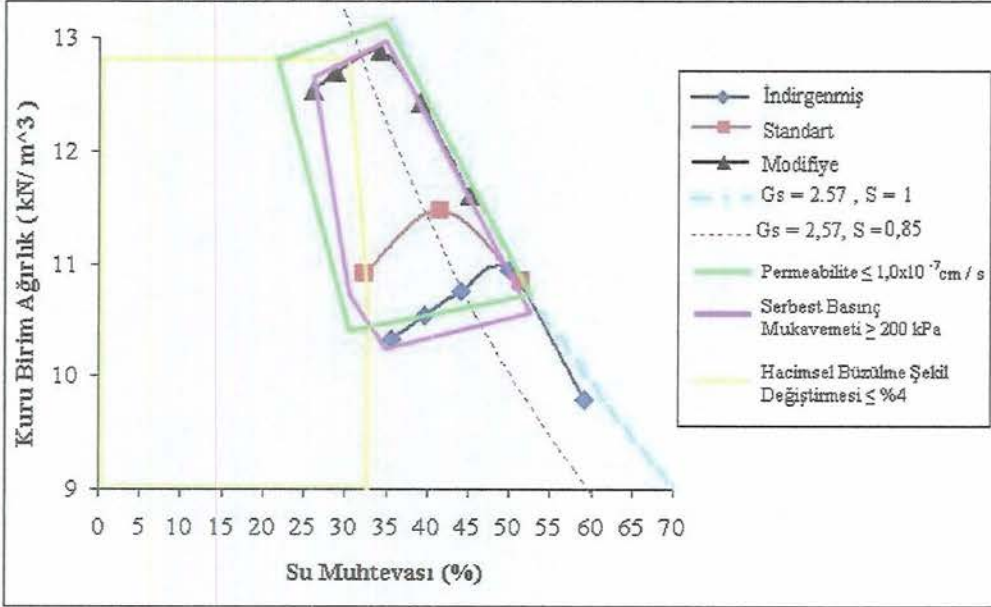
5. Daniel ve Wu, (1993) kompaksiyon kriterini permeabilite, serbest basınç mukavemeti ve kuruma karşısındaki hacimsel büzülmeyle ilişkilendirmek için üst üste bindirme ile tüm kriterleri karşılayan bir kabul edilebilir bölgeyi tanımlamışlardır. Bu çalışmada da sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımları için permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri oluşturulmuş ve bu bölgeler üst üste bindirilerek Daniel ve Wu, (1993)'ün tanımladığı tüm kriterleri karşılayan bir kabul edilebilir bölge tanımlanmaya çalışılmıştır. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait permeabilite, serbest basınç mukavemeti ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi koşulları için oluşturulan grafikler sırasıyla EK-7, EK-8 ve EK-9'da verilmiştir. Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait tüm kriterleri karşılayan kabul edilebilir bölgeleri içeren grafikler ise sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Sepiyolit için tanımlanan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgelerinin üst üste bindirilmesi ile oluşan bölge



Şekil 6.2. 25K75S karışımı için tanımlanan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değıştirmesi kabul edilebilir bölgelerinin üst üste bindirilmesi ile oluşan bölge



Şekil 6.3. 50K50S karışımı için tanımlanan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme şekil değıştirmesi kabul edilebilir bölgelerinin üst üste bindirilmesi ile oluşan bölge

6. Permeabilite deneyine tabi tutulan doygun numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiş ve optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetlerine göre düşme olduğu belirlenmiştir.

7. Kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimsiz sızıntı deneyi numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinde standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin mukavemetlerine göre düşme olduğu belirlenmiştir.

8. Kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimli sızıntı deneyi numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinde ise standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin mukavemetlerine kıyasla düşme olduğu belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimlerinin sepiyolit ve karışımların serbest basınç mukavemetlerini olumsuz yönde etkiledikleri tespit edilmiştir.

9. Sepiyolit ve karışımlar için kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan donma-çözülme ve donma-çözülmesiz sızıntı deneyleri sırasında permeabilite katsayıları da belirlenmiş ve değerlerin  $0,25-3,1 \times 10^{-7}$  cm/s arasında değiştiği görülmüştür. Kirleticilerin ve donma-çözülme çevrimlerinin permeabilite açısından tasarım kriterlerini tehlikeye atacak etkilerinin bulunmadığı tespit edilmiştir. EK-2’de yer alan karışımlara ait donma sonrası buz mercceklerinin ve çatlaklı yapının görüldüğü fotoğraflar ve Sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası çatlaklı yapıyı gösteren sırasıyla EK-3, EK-4 ve EK-5’de yer alan fotoğraflar incelendiğinde donma-çözülme çevrimleriyle zeminde meydana gelen çatlak miktarının arttığı görülmektedir. Buda permeabilite artışının bir sebebidir. Ayrıca bu fotoğraflar incelendiğinde karışımlara göre sepiyolitte donma-çözülme çevrimleriyle daha az çatlak oluştuğu da görülmüştür.

10. Sepiyolit ve karışımlar için konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kirletici olarak Cu, Cr, Pb ve KCl kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimli ve donma-çözülme çevrimsiz sızıntı deneylerinden elde edilen zemin numuneleri de aynı kirletici çözeltiler içerisinde konsolide edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında genel olarak kirleticilerin ve donma-çözülme çevrimlerinin konsolidasyon açısından olumsuz etkilerinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

11. Sepiyolit, bentonit ve karışımlar için serbest şişme deneyleri yapılmış sepiyolit için şişme oranının %12, 25K75S karışımı için %4 ve 50K50S karışımı içinde %1,8 olduğu tespit edilmiştir. Bu oran bentonitte %80 bulunmuştur. Çöp deponi alanı tabakalarında sorunlar yaratan şişme miktarı sepiyolit ve karışımlar için çok düşük değerlerdedir. Ayrıca kirletici çözeltiler kullanılarak yapılan donma-çözülme çevrimli ve donma-çözülme çevrimsiz sepiyolit ve karışımlara ait numunelerden serbest şişme örneği alınarak deneyler yapılmıştır. Sonuçta kirleticilerin ve donma-çözülme çevrimlerinin malzemelerin zaten düşük olan şişme oranlarını %0,1'lere kadar düşürdüğü tespit edilmiştir.

12. Karışımların ve bentonitin bakır adsorpsiyon izotermeleri belirlenmiştir. Sonuç olarak 25K75S ve 50K50S karışımının bakır adsorpsiyon kapasitelerinin sırasıyla bentonitin 2,3 ve 1,7 katı olduğu belirlenmiştir. Çöp deponi alanları sıkıştırılmış kil tabakaları için düşük permeabilite değeri kadar adsorpsiyon kapasitesi de büyük önem taşımaktadır. Bu konuda sepiyolit oldukça iyi bir malzemedir.

13. Sepiyolit ve karışımlar için Cu, Cr, Pb ve KCl çözeltileri kullanılarak sedimentasyon deneyleri yapılmış ve flokülasyon oranları belirlenmiştir. Sepiyolit KCl çözeltisinden daha çok etkilenecek daha fazla flokülasyona uğramıştır. Karışımdaki kaolinit miktarının artmasıyla bu olumsuz etkilenme ağır metallere doğru kaymıştır.

14. Donma-çözülme çevrimli ve donma-çözülme çevrimsiz zemin numunelerinin pH ve EC değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca sızıntı deneyleri sırasında toplanan sızıntı sularının 3., 5., 8. ve 10. günlerinde pH ve EC değerleri tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde zemin numuneleri için pH değerleri ortalamasının 7,9 sızıntı suları için pH değerleri ortalamasının ise 7,6 olduğu belirlenmiştir. Ağır metaller için zemin elektriksel iletkenlik değerleri ortalaması yaklaşık 0,7 ve sızıntı suyu elektriksel iletkenlik değerleri ortalaması ise yaklaşık 1 olarak bulunmuştur. KCl çözeltisi için zemin elektriksel iletkenlik değerleri ortalaması yaklaşık 12 ve sızıntı suyu elektriksel iletkenlik değerleri ortalaması ise yaklaşık 24 olarak bulunmuştur.

15. Donma-çözülme çevrimli ve donma-çözülme çevrimsiz sızıntı deneyleri sırasında toplanan sızıntı sularının 3.,5.,8. ve 10. günlerinde numuneler alınarak

bu numunelerin ağır metal ve K okumaları yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında başlangıç derişimi 2000 ppm olan ağır metaller için donma-çözölme çevrimlerine karşın sızıntı sularında tüm değerlerin 0,5 ppm değerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Sızıntı deneyleri sırasında özellikle Cu ve Cr çözeltilerinde zemin tarafından kirleticinin tutulduğu bir bölge oluştuğu görölmüştür. Sepiyolite ait Cu ve Cr çözeltileriyle oluşan bu bölgeden alınan numunelere ait fotoğraf EK-6'da verilmiştir. Başlangıç derişimi yaklaşık 74450 ppm olan potasyumda ise donma-çözölme çevrimlerine karşın sızıntı sularında tüm değerlerin 14000 ppm değerinin altında kalarak %80 oranında tutulduğu belirlenmiştir.

16. Ayrıca kirletici kullanılmadan sepiyolit ve karışımlar için donma-çözölme çevrimli olarak yapılan sızıntı deneylerinde toplanan sızıntı sularında Ni, Cd, Fe, Al ve Zn için ağır metallere bakılmış ve çevre sağlığı açısından tehlikeli derecede ağır metal değerlerine rastlanılamamıştır.

17. Permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzölme şekil değiştirmeleri açısından en uygun karışımın %50 kaolinit + %50 sepiyolit (50K50S) karışımı olduğu görölmüştür.

Çöp deponi alanlarındaki kil tabakalar zamanla meydana gelen yüksek permeabiliteden ve sahip oldukları şişme kapasitelerinden kaynaklanan stabilite problemlerinden dolayı su basıncına maruz kalırlar. Sıkıştırılmış kil tabakaların düşük permeabilite ve yüksek kirlilik tutma kapasitesi gibi bir çok avantajları vardır. Ancak bununla beraber sahip olunan yüksek rötire ve şişme kapasitesi stabilite problemlerine sebep olabilmektedir (Kalkan ve Akbulut, 2004). Bu yüzden çöp deponi alanı tabakalarında kullanılacak olan malzemelerin düşük permeabilite ve yüksek kirlilik tutma kapasitesiyle birlikte stabilite problemlerine sebep olmayacak şişme ve büzölme özelliklerine sahip olmaları gerekmektedir. Yapılan serbest şişme ve şişme basıncı deneylerinde sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarında sırasıyla %12, %4 ve %1,8 şişme oranları elde edilmiştir. Bentonit için bu oran %80'dir. Ayrıca sepiyolit, 25K75S ve 50K50S karışımlarında sırasıyla 49 kPa, 33kPa ve 13 kPa şişme basınçları elde edilmiştir. Bentonit için elde edilen şişme basıncı 422 kPa'dır. Çöp deponi alanları sıkıştırılmış kil tabakalarında yoğun olarak kullanılan bentonite karşın sepiyolit şişme özellikleri açısından çok daha stabildir.

Hacimsel büzülme Şekil değiştirmesi kompaksiyon su muhtevası optimum su muhtevasına göre arttığında veya azaldığında, plastisite indisinin ve kil yüzdesinin artmasıyla artış gösterir. Hacimsel büzülme Şekil değiştirmesi kompaksiyon enerjisinin artışıyla azalma gösterir. tipik olarak çok sayıda çatlak içeren numuneler büyük hacimsel büzülme Şekil deęiŐtirmelerine sahiptirler. (Albrecht ve Benson, 2001). Kleppe ve Olson (1984) yüksek plastisiteli kil ve kumla, %12-%100 aralığında değişen kil içeriğine sahip karışımlar hazırlamıŐlar ve Silindir numuneler kullanarak kum-kil karışımlarının rötre değerlerini belirlemişlerdir. Kleppe ve Olson (1984) artan kil oranı ve kompaksiyon su muhtevasıyla birlikte rötre Şekil değiştirmesinin de arttığını fakat bu olayın kompaksiyon enerjisinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Daniel ve Wu, (1993) yürüttükleri rötre deneylerinde Daniel ve Benson (1990) 'ın kompaksiyon prosedürünü takip eden kabul edilebilir bir bölge geliştirmişlerdir. Numuneler aşırı plastik olup %10 ile %20 su muhtevası aralığında  farklı kompaksiyon enerjisi kullanılarak hazırlanmıştır. Elde ettikleri sonuçlarla rötrenin artan su muhtevasıyla arttığını fakat uygulanan kompaksiyon enerjisiyle belirgin bir farklılığın oluŐmadıęını bildirmiŐlerdir. Sepiyolit ve bentonit (Kleppe ve Olson, 1984)'in hacimsel büzülme Şekil değiştirmeleri karşılaştırıldığında bentonitle ancak %10-%20 arasında su muhtevalarında, maksimum hacimsel büzülme Şekil değiştirmesi koşulu olan %4 değerinin sağlanabildiği görülmüştür. Kullanılan bentonitin optimum su muhtevası %40'dır. Sepiyolit ve karışımlar ise %25-%35 su muhtevası aralığında ve optimum su muhtevalarının yaklaşık %5-%10 kuru tarafında bu Şartı saęlamıŐlardır. Bu Őart sağlanırken diğer tasarım kriterleri de sağlanmıştır.

Abollino ve ark., (2002) yaptıkları çalışmalarda Na-montmorillonit ile Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb ve Zn kirleticilerini tutma sırasındaki pH deęiŐimlerini incelemişlerdir. Sonuçta tutulan kirletici yüzdesi arttığka pH değerlerinde de artış görüldüğünü ve pH = 8 değerine kadar tutulan metal miktarının arttığını belirlemişlerdir. Sepiyolit ve karışımların sızıntı deneyleri sonrası zemin için pH değerleri ortalama 7,9 ve sızıntı sularındaki pH değerleri ise ortalama 7,6 civarındadır. Sepiyolit ve karışımlar ağır metalleri yüksek miktarda tutmuşlardır.

Karışımların ve bentonitin Cu adsorpsiyon izotermi belirlenmiş ve karışımların Cu adsorpsiyon kapasitelerinin bentonitin Cu adsorpsiyon kapasitesinin yaklaşık iki katı olduğu tespit edilmiştir. Bentonit sağladığı yüksek kirlilik tutma kapasitesi ve düşük permeabilite değerleri açısından çöp deponi alanı tabakalarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak yüksek şişme ve rötre potansiyeline sahip bir kildir. Sepiyolit sahip olduğu yüksek adsorpsiyon kapasitesi, bentonite göre oldukça düşük olan şişme ve rötre potansiyeliyle daha iyi bir çöp deponi alanı tabakası malzemesi olabilecektir.

Tüm bu sonuçlara bakılarak yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip, belirtilen tasarım kriterlerini sağlayan, kirleticiler ve donma-çözülme etkileri karşısında tasarım gereksinimlerini karşılama konusunda verim kaybetmeyen ve yüksek derişimlerdeki ağır metal ve tuz çözeltilerini tutarak çöp deponi alanlarının mevcudiyet sebebi olan gereklilikleri yerine getiren sepiyolit çöp deponi alanı tabakalarında kullanımının uygun olduğu görülmüştür.

Bundan sonra sepiyolitle yapılacak çalışmalarda, sepiyolitle birlikte kum ve zeolitin de kullanılması, kirletici olarak organik çözeltilerin de dikkate alınması, sızıntı deneylerinde sıcaklık etkilerinin de araştırılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- ABDUL, A.S., GIBSON, T.L. ve RAI, D.N., *Laboratory studies of the flow of some organic solvents and their aqueous solutions through bentonite and kaolin clays*, *Ground Water*, **28**, 4, 524-543, (1990).
- ABOLLINO, O., ACETO, M., MALVERINO, M., SARZANINI, C. ve MENTASTI, E., *Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite, Effect of pH and organic substances*, *Water Research*, **37**, 1619-1627, (2003).
- ALBRECHT, B.A. ve BENSON, C.H., *Effect of Desiccation on compacted Natural Clays*, *Journal of Geoenvironmental Engineering* January, 67-75, (2001).
- AL-TABBAA, A. ve ARAVINTHAN, T., *Natural clay-shredded tire mixtures as a fill barrier materials*, *Waste Management*, **18**, 1, 9-16, (1998).
- ALTAY, K., *Bazı metal, metaloit ve tozların hava kalitesine etkileri ve tayin yöntemleri*, Bitirme Ödevi, A.Ü.M.M.F., Eskişehir, **37**, (1988).
- ALVAREZ, A., *Sepiolite: Properties and Uses*, in: A. Singer and E. Galan, eds. *Palygorskite-Sepiolite. Occurrences, Genesis and Uses, Developments in Sedimentology* **37**, Elsevier, Amsterdam, 253-287, (1984).
- ASTM, *Annual book of ASTM standards, Natural building stones; soil and rock.*, **04.08**, ASTM, Philadelphia, Pa., (1985).
- BENSON, C. H. ve BOUTWELL, G. P., "Compaction Control and Scale-Dependent Hydraulic Conductivity of Clay Liners," *Proceedings of Fifth Annual Madison Waste Conference*, University of Wisconsin, Madison, WI, 62-83, (1992).
- BENSON, C. H. ve DANIEL, D. E., "Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **116**, 8, 1231-1248, (1990).
- BENSON, C. H. ve OTHMAN, M. A., "Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Frozen and Thawed In Situ," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **119**, 2, 276-294, (1993).
- BENSON, C. H., ABICHOU, T. H., ve OLSON, M. A., "Winter Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **121**, 1, 69-79, (1995).
- BENSON, C. H., DANIEL, D. E., ve BOUTWELL, G. P., "Field Performance of Compacted Clay Liners," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **125**, 5, 390-403, (1999).

- BERKOW, R. (EDITOR), *The Merck Manual- Teşhis Tedavi El Kitabı, Cilt 1-2*, (Çev. M. Pekus), 14. Baskı, Merk Yayıncılık, İstanbul, 1842, (1982).
- BESSELIEVRE, E.B. ve SCHWARTZ, M., *The treatment of industrial wastes*, Second Ed., McGraw-Hill Kogokusha Ltd., Japan, 386, (1976).
- BOUTWELL, G. P. ve HEDGES, C., "Evaluation of Waste-Retention Liners by Multivariate Statistics," Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janerio, Brazil, **2**, 815-818, (1989).
- BOYNTON, S. S. ve DANIEL, D. E., "Hydraulic Conductivity Test on Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **111**, **4**, 465-478, (1985).
- BRAUNER, K. ve PREISINGER, A., *Struktur und Entstehung des Sepioliths*, *Tschermaks Miner. Petrog. Mitt.*, **6**, 120-140, (1956).
- BRECK, D.W., *Zeolite Molecular Sieves*, Wiley-Interscience, New-York, 771p., (1974).
- CAILLERE, S., Sepiolite. in: G.W. Brindley, *x-Ray Identification and Structures of Clay Minerals*, Mineral Society, London, 224-233, (1951).
- CHAMBERLAIN, E. J., "Overconsolidation Effects of Ground Freezing," *Engineering Geology*, **18**, 97-110, (1981).
- CHAMBERLAIN, E. J., ISKVEER, I., ve HUNSIKER, S. E., "Effect of Freeze-Thaw on the Permeability and Macrostructure of Soils," Proceedings, International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural, Range, and Forest Lands, March 21-22, Spokane, WA, 145-155, (1990).
- CHAMBERLAIN, E. J. ve GOW, A. J., "Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils," *Engineering Geology*, **13**, **1**, 73-92, (1979).
- CHAMBERLAIN, E. J., ERICKSON, A. E., ve BENSON, C. H., "Effects of Frost Action on Compaction on Compacted Clay Barriers," Proceedings of GeoEnvironment 2000, ASCE Geotechnical Special Publication 46, New Orleans, LA, U.S.A., February 24-26, 702-717. (1995).
- CHAMBERS, C.P.C., *Some Industrial Applications of the Clay Mineral Sepiolite*, *Silicates Inds.*, April, 181-189, (1959).
- CONNER, J.R., *Chemical fixation and Solidification of hazardous wastes*. Van Nostrve Reinhold, New York, (1990).
- CORSER, P. ve CRANSTON, M., "Observations on Long-Term Performance of Composite Clay Liners and Covers," *Geosynthetic Design and Performance*, Vancouver Geotechnical Society, Vancouver. British Columbia, Canada, (1991).

- CZURDA, K. A. ve WAGNER, J.-F., *Cation transport and retardation processes in view of the toxic waste deposition problem in clay rocks and clay liner encapsulation*, Engineering Geology, 30, 1, March, 103-113, (1991).
- ÇOKÇA, E., *Metilen Mavisi Deneyi ile Killerin Katyon Değişim Kapasitelerinin Tespiti*, VI. Ulusal Kil Sempozyumu, 335-344, (1993).
- DANIEL, D. E. ve WU, Y.-K., "*Compacted Clay Liners and Covers for Arid Sites*," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119, 2, 223-237, (1993).
- DANIEL, D. E., "*Predicting Hydraulic Conductivity of Clay Liners*," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Volume 110, 4, 285-300, (1984).
- DANIEL, D. E., "*Landfill and Impoundments*," Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapter 5, Edited by David E. Daniel, Chapman & Hall, 97-112, (1993).
- DANIEL, D. E., "*State-of-the-Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils*," Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, Edited by D. E. Daniel and S. J. Trautwein. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 30-78, (1994).
- DANIEL, D. E. ve BENSON, C. H., "*Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners*," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Volume 116, 12, 1811-1830, (1990).
- DANIEL, D. E., "*Earth Liners for Waste Disposal Facilities*," Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, R. D. Woods, ed., ASCE, Ann Arbor, Michigan, 21-39, (1987).
- DANIEL, D. E., "*Summary Review of Construction Quality Control for Compacted Soil Liners*," Waste Containment System: Construction, Regulation, and Performance, ASCE. R. Bonaparte, ed., New York, NY, 175-189. (1990).
- DAS, B., *Principle of Geotechnical Engineering*, Second Edition, 10-16, (1990).
- DEJONG, E. ve WARKENTIN, B. P., "*Shrinkage of Soil Samples with Varying Clay Content*," Canadian Geotechnical Journal, 2, 1, 16-22, (1965).
- DPT, *Lületaşı, Tabakalı Sepiyolit, Atapulgit (Paligorskit), Devlet Planlama Teşkilatı VII. Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu, Diğer Endüstri Mineralleri Çalışma Grubu Raporu*, Cilt I, Yayın No: DPT 2421-ÖİK : 480, Ankara, 5-35, (1996).
- DPT, *Tehlikeli Atıkların Yönetimi*, Ulusal Çevre Eylem Planı, ISBN-975-19-1698-4 (Basılı Nüsha), Mayıs, (1997).
- EBINA, T., MINJA, R.J.A., NAGASE T., ONODERA, Y., ve CHATTERJEE, A., *Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties*, Applied Clay Science, In Press, Corrected Proof, Available online 28 February, (2004).

- ECE, Ö.I. ve ÇOBAN, F., *Geology, Occurrence and Genesis of Eskişehir Sepiolites, Turkey*, *Clays and Clay Minerals*, **42**, 1, 81-92. (1994).
- EDİL, T. B. ve BERTHOUEX, P. M. , *Earthen barriers technology for waste containment*, *Waste Management*, **10**, 2, 147-153, (1990).
- EDİL, T. B. ve ERICKSON. A. E., "*Procedure and Equipment Factors Affecting Permeability Testing of A Bentonite-Sand Liner Material*," *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*, ASTM STP 874. Edited by A. I. Johnson. R. K. FROBEL, N. J. CAVALLI, and C. B. PETTERSSON. American Society for Testing and Materials, Philadelphia. PA, 155-170, (1985).
- FAHEY, J.J., ROSS, M. ve AXELROD, D.J., , *Loughlinite, a New Hydrous Sodium Magnesium Silicate*, *Am. Mineral.*, **45**, 270-281, (1960).
- GENÇOĞLU, H. ve İRKEÇ, T., *Eskişehir-Sivrihisar Civarındaki Sedimanter Sepiyolit Oluşumlarının Ortamsal Yorumu*, *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, Sayı 9, 281-296., (1994).
- GÖKHAN E., *Sepiyolitin adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2003).
- GRIM, R.E. "*Phsico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals*," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **85**, SM2, 1-17, (1959).
- GRIM, R.E., *Clay Mineralogy*, Mc Graw-Hill, New York, 596,(1968).
- GULEY, M. ve VURAL, N., *Toksikoloji*, Ank. Ün. ECZ. Fak., Yay. No: 48, Ankara, 332, (1978).
- GUNEY, Y., *Suya doymun Killerin, Hasarsız Deney Yöntemiyle Konsolidasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1998).
- HAWKINS. R. H. ve HORTON, J. H., "*Bentonite as a Protective Cover for Buried Radioactive Waste*," *Health Physics*, 13. 3, 287-292, (1965).
- HERRMANN, J. G. ve ELSBURY, B. R.. "*Influence Factors in Soil Liners Construction for Waste Disposal Facilities*," *Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE, Ann Arbor, MI*, 522-536, (1987).
- HOLTZ, W. G. ve LOWITZ, C. W., "*Compaction Characteristics of Gravelly Soils*," *Special Technical Publication 232, ASTM, Philadelphia, PA*, 70-83, (1957).
- HORNECK, D.A., HART, J.M., TOPPER, K., ve KOEPESELL, B., *Methods of soil analysis used in the soil testing laboratory at Oregon State University*. SM 89:4-16. Agricultural Experiment Station, Oregon State University, USA, (1989).

HUNSICKER, S. E., "The Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Permeability and Macrostructure of Fort Edwards Clay," *Master of Engineering Thesis. Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, NH, 168, (1987).*

http-1: <http://www.pubs.usgs.gov/of/of01-041/htmldocs/images/sepctl.jpg>

http-2: <http://www.pubs.usgs.gov/of/of01-041/htmldocs/images/septru.jpg>

http-3: <http://www.minersoc.org/pages/gallery/claypix/sepiolite/sepiolite.html>

ITIT, *Utilization of Sepiolite and Mg-Bearing Clays in Turkey: MTA/Turkey - GIRIN/Japan Joint Research Project Final Report, ITIT Project 90-1-5, MTA Kütüphane 400 (U890), Ankara, (1993).*

İRKEÇ, T., *Sepiyolit'in Kullanım Alanları ve MTA-GIRIN Ortak Araştırma Projesinin Sonuçları*, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, Cilt II, sayı 5-6, Ankara, 32-37, (1993).

İRKEÇ, T., *Regresyondaki Türkiye Madencilik Sektörü İçin Yeni Bir Umut: Sepiyolit*, VII. Ulusal Kil Sempozyumu, Ankara, (1995).

JONES, B.F. ve GALAN, E., *Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas)*. in: S.W. Bailey (Editör), *Sepiolite and Palygorskite, Reviews in Mineralogy, 19, Mineralogical Society of America, Ch. 16, 631-667, (1988).*

KALKAN, E. ve AKBULUT, S., *The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners*, *Engineering Geology, 73, 1-2, May, 145-156, (2004).*

KARA, M., SABAH, E., YÜZER, H. ve ÇELİK, M.S., *Sepiolite as an Adsorbent for Elimination of Mine Wastes*, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, Ankara, 717-721, (1998).*

KARAKOUZIAN, M. PITCHFORD., A., LEONARD M. ve JOHNSON. B., 1996, *Measurement of soluble salt content of soils from Arid and Semi-Arid Regions*, *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 19, 4, December, 364-372, (1996).*

KAYA, A. ve DURUKAN, S., *Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner*, *Applied Clay Science, 25, 1-2, April, 83-91, (2004).*

KAYABALI, K., *Engineering aspects of a novel landfill liner material: bentonite-amended natural zeolite*, *Engineering Geology, 46, 2, 23 May, 105-114, (1997).*

KIM, W. H. ve DANIEL, D. E., "Effects of Freezing on the Hydraulic Conductivity of a Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, 118, 7, 1083-1097, (1992).*

- KLEPPE, J. H. ve OLSON, R. E., "*Desiccation Cracking of Soil Barriers*," Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM 874, 263-275, (1984).
- KOERNER, J. R. ve KOERNER, R. M., "*A Survey of Solid Waste Landfill Liner and Cover Regulations: Part II-Worldwide Status*," GRI Report #23. Geosynthetics Institute. Folsom, PA., 177, (1999).
- KONRAD, J.-M. ve MORGENSTERN, N. R., "*Mechanistic Theory of Ice Lense Formation in Fine-Grained Soils*," Canadian Geotechnical Journal, **17**, 4, 473-486, (1980).
- KONRAD, J.-M. ve MORGENSTERN, N. R., "*Effects of Applied Pressure on Freezing Soils*," Canadian Geotechnical Journal, **19**, 4, 494-505, (1982).
- KUGLER, H., OTTNER, F., FROESCHL, H., ADAMCOVA, R., ve SCHWAIGHOFER, B., "*Retention of inorganic pollutants in clayey base sealings of municipal landfills*," Applied Clay Science, **21**, 1-2, April, 45-58, (2002).
- LAMBE, T. W., "*Foundation Engineering*," Leonards, G. A., Editor, Chapter 4, Soil Stabilization, 351-437, (1962).
- LAMBE, T. W., "*The Permeability of Compacted Fine-Grained Soils*," Special Technical Publication 163, ASTM, Philadelphia, PA, 55-67, (1958).
- LAMBE, T.W. "*The Structure of Inorganic Soil*," Proceedings, ASCE, **79**, 315, 49, (1953).
- LUCZAK-WILAMOWSKA, B., "*Neogene clays from Poland as mineral sealing barriers for landfills: experimental study*," Applied Clay Science, **21**, 1-2, April, 33-43, (2002).
- LUND, H. F. (EDITOR), "*Industrial pollution control handbook*," McGraw-Hill Book Co., New York, (1971).
- MILLER, C.J. ve LEE, J.-Y., "*Response of landfill clay liners to extended periods of freezing*," Engineering Geology, **51**, 4, February, 291-302, (1999).
- MITCHELL, J. K., HOPPER, D. R., ve CAMPANELLA, R. G., "*Permeability of Compacted Clay*," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, **91**, 4, 41-65, (1965).
- MONTGOMERY, R. J. ve PARSON, L. J., "*The Omega Hills Final Cover Test Plot Study: Three-Year Data Summary*," Presented at the 1989 Annual Meeting of the National Solid Waste Management Association, Washington, DC, (1989).
- MUNDELL, J. A. ve BAILEY, B., "*The Design and Testing of a Compacted Clay Barrier Layer to Limit Percolation through Landfill Covers*," Hydraulic Barriers in Soil and Rock, Special Technical Publication 874, ASTM, Philadelphia, PA, 246-262, (1985).
- MUÑOZ-MELÉNDEZ, G., KORRE, A. ve PARRY, S. J., "*Influence of soil pH on the fractionation of Cr, Cu and Zn in solid phases from a landfill site*," Environmental Pollution, **110**, 3, December, 497-504, (2000).

- NAGY, B. ve BRADLEY, W.F., The Structural Scheme of Sepiolite, *Am. Mineral.*, **40**, 885-892 (1955).
- OLSEN, H. W, "*Hydraulic Flow through Saturated Clays*," *Clays and Clay Minerals*, **9**, **2**, 131-161, (1962).
- OTHMAN, M. A. ve BENSON, C. H., "*Effect of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity and Morphology of Compacted Clay*," *Canadian Geotechnical Journal*, **30**(2), 236-246, (1993).
- OTHMAN, M. A. ve BENSON, C. H., "*Effect of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity of Three Compacted Clays from Wisconsin*," *Transportation Research Record*, 1369, 118-129, (1992).
- OTHMAN, M. A., BENSON, C. H., ve CHAMBERLAIN, E. J., "*Laboratory Testing to Evaluate Changes in Hydraulic Conductivity of Compacted Clays Caused by Freeze-Thaw: State-of-the-Art*," *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM ATP 1142, David E. Daniel ve Stephen J. Trautwein, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 227-254, (1994).
- PALMER, B. G., EDIL, T. B ve BENSON, C. H., *Liners for waste containment constructed with class F ve C fly ashes*, *Journal of Hazardous Materials*, **76**, **2-3**, 15 September, 193-216. (2000).
- PENNER, E. ve UEDA, T., *Proceedings, Symposium on Frost Action in Soils*, University of Lulea, Lulea, Sweden, **1**, 91-100, (1977).
- PENNER, E., "*The Importance of Freezing Rate in Frost Action in Soils*," *Proceedings of ASTM*, **60**, 1151-1165, (1960).
- PRASHANTH, J. P., SIVAPULLAIAH, P. V., ve SRIDHARAN, A., *Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in landfills*, *Engineering Geology*, **60**, **1-4**, June, Pages 245-252, (2001).
- QIAN, X., KOERNER, R.M., GRAY, D.H., *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*, ISBN 0-13-012506-7, (2001).
- REPETTO. P. C., "*Geo-Environment*," Section III Geotechnical Engineering, *The Civil Engineering Handbook*, Editor-of-Chief: W.F. Chen, CRC Press. Inc.. 2000 Corporate Blvd.. N. W, Boca Raton. FL 33431, 883-902, (1995).
- ROEHL, K. E., ve CZURDA, K., *Diffusion and solid speciation of Cd and Pb in clay liners*, *Applied Clay Science*, **12**, **5**, February, 387-402, (1998).
- Rogers, L.E., Quirk, J. ve Norrish, K., *Occurrence of an Aluminum-Sepiolite in a Soil Having Unusual Water Relationships*, *J. SoilSci.*, **7**, 177-184, (1956).
- SABAH E. ve ÇELİK S., *Sepiyolit*, ISBN: 975-94312-0-3, İNCİ OFSET, Afyon, , (1998).

- SABAH, E., , *Çeşitli Amin Türleri Kullanılarak Sepiyolit AdSORPSİYON Mekanizmasının Açıklanması*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 245, (1998).
- SABAH, E., ÖZDEMİR, O. ve ÇELİK, M.S., *Thermodynamic Treatment of Cationic Surfactant Adsorption onto Clay Adsorbent*, Proceedings of the 7th International Mineral Processing Symposium, İstanbul, 893-898, (1998).
- SABAH, E., SAĞLAM, H., KARA, M. ve ÇELİK, M.S., *Uptake of Cationic Surfactants by Clay Adsorbent: Sepiolite*, 5th Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Buenos Aires, Argentina, 277-280, (1997).
- SARIIZ, K. ve AYVERDİ, O., *Sepiyolit Madencilüğümüz*, Maden, GEMAD, Aralık, Sayı 12-13, (1991).
- SARIKAYA, Y., YÜCEL, A., EĞİLMEZ, Ö., MAKUL, G., ALMAÇ, R., HARMAN, I. ve BOZDOĞAN, İ., *Lületaşı (Sepiolite) Parçacıklarının Sigara Filtresinde Duman Süzgeci Olarak Kullanılması*, II. Ulusal Kil Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 521-527. (1985).
- SERRATOSA, J.M., *Surface Properties of Vibrous Clay Minerals (Palygorskite and Sepiolite)*, Proc. 1979 Int. Clay Conf., Oxford. Elsevier, 99-109, (1978).
- SHAKOOR, A. ve COOK, B. D., "The Effect of Stone Content, Size, and Shape on the Engineering Properties of a Compacted Silty Clay," Bulletin of Association of Engineering Geologists, XXVII(2), 245-253, (1990).
- SHELLEY, T. L. ve DANIEL, D. E., "Effect of Gravel on Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners," Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 119, 1, 54-68. (1993).
- SHEU, C., LIN, T.-T., CHANG, J.-E. ve CHENG, C.-H., *The feasibility of mudstone material as a natural landfill liner*, Journal of Hazardous Materials, 58, 1-3, February, 237-247, (1998).
- SINGER, A. ve GALAN, E., *Palygorskite-Sepiolite, Occurrences Genesis, and Uses*, Developments in Sedimentology 37, Elsevier, New York, 352, (1984).
- SMITH, D. C. ve FEY, M.V., *Chemical manipulation of soil for sealing landfills*, Applied Geochemistry, 11, 1-2, 325-329, January-March (1996).
- STOESSEL, R.K. ve HAY, R.L., *The geochemical origin of sepiolite and kerolite at Amboseli, Kenya*. Contrib. Miner. Petrol., 65, 255-267, (1978).
- TAY, Y.Y., STEWART, D. I., ve COUSENS, T. W., *Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners*, Engineering Geology, 60, 1-4, June, 263-274, (2001).
- TCHOBANOGLIOUS, G., *Wastewater engineering: Treatment disposal reuse*, Second Ed., TATA McGraw-Hill Publishing Co. Ltd, New Delhi, 920, (1982).

- TEMUR, S., *Endüstriyel Hammaddeler*, S.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Konya, (1994).
- TUNCAN A, TUNCAN M, KOYUNCU H, GUNEY Y, *Use of natural zeolites as a landfill liner*, Waste Management & Research, **21**, 1, 54-61, (2003).
- U.S. EPA METHOD 9045, *Physical/chemical methods, soil pH, test methods for evaluating solid waste*, (SW-846), **IA, IB, 1C and II.**, Third Edition, Doc. Control No:955-001-00000-1, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. 20460, Environmental Protection Agency, 9045-1-6, September, (1986).
- U.S. EPA METHOD 9100, 1986, *Physical/chemical methods., saturated hydraulic conductivity, saturated leachate conductivity, and intrinsic permeability. triaxial-cell method with back Pressure, Test Methods for Evaluating Solid Waste*, (SW-846), **IA, IB, 1C and II.**, Third Edition, Doc. Control No:955-001-00000-1, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. 20460, Environmental Protection Agency, 9100-20-24, September, (1986).
- USEPA, "*Characterization of Municipal Solid Waste in the United States: 1998 Update*," EPA530-R-99, U.S. Environmental Protection Agency, Municipal and Industrial Solid Waste Division, Office of Solid Waste, Prepared by Franklin Associates, Prairie Village, KS, July, (1999).
- VEERSLVE, O. B. ve VEERSON, D. M., "*Geotechnical Engineering for Cold Regions*," McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY (1978).
- VICENTE RODRIGUEZ, M.A., LOPEZ GONZALEZ, J.D. ve BANARES MUNOZ, M.A., *Acid Activation of a Spanish Sepiolite*, Physicochemical Karakterizatio, free Silica Content and Surface Area of the Solids obtained, Clay Minerals **29**, 361-367, (1994).
- WEAVER, C.E. ve POLLARD, L., *The Chemistry of Clay Minerals*, Elsevier, Amsterdam. (1973).
- WILCOX, J.C., *Determination of electrical conductivity of soil solution*, Science Agronomy. **32**, 107-117, (1946).
- WILLIAMS, P. J., "*Pore Pressures at a Penetrating Frost Line and Their Prediction*," Geotechnique, London, England, **XVI**, 3, 187-208, (1966).
- WONG, L. C. ve HAUG, M. D., "*Cyclical Closed-System Freeze-Thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials*," Canadian Geotechnical Journal, **28**, 784-793, (1991).
- YENIYOL, M., *Yenidoğan (Sivrihisar) Sepiyolit Yatağının Jeolojisi, Mineralojisi ve Oluşumu*, MTA Dergisi **114**, 71-84, (1992).

- YESILLER, N., MILLER, C.J., INCI, G., YALDO, K., *Desiccation and cracking behaviour of three compacted landfill liner soils*, Engineering Geology **57**, 105 – 121, (2000).
- YILDIZ, M., *Katı Atık Depolarında Taban Malzemesinin Hidrolik ve Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (1998).
- ZIMMIE, T. E, "*Freeze-Thaw Effects on the Permeability of Compacted Clay Liners and Covers*," Geotechnical News, 28-30, (1992).
- ZIMMIE, T. F, LA PLANTE, C. M. ve BRONSON, D., "*The Effects of Freezing and Thawing on the Permeability of Compacted Clay Landfill Covers and Liners*," Environmental Geotechnology, Proceedings of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, A. A. Balkema Publishers, 213-218, (1992).
- ZIMMIE, T. F. ve LA PLANTE, C. M., "*The Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Permeability of a Fine-Grained Soil*," Proceedings, 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, Philadelphia, PA, 580-593, (1990).

## **EKLER**

- EK-1. Sivrihisar'da bulunan geniş sedimanter sepiyolit yatakları**
- EK-2. Karışımlara ait donma sonrası fotoğraflar**
- EK-3. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar**
- EK-4. 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar**
- EK-5. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar**
- EK-6. Bakır ve Krom çözeltileriyle sızıntı sonrası zeminde kirleticinin tutulduğu üst bölge**
- EK-7. Sepiyolit için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri**
- EK-8. 25K75S karışımı için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri**
- EK-9. 50K50S karışımı için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri**
- EK-10. Literatürde içme suyunda bulunmasına müsaade edilen maksimum kirletici miktarları**
- EK-11. Literatürde çöp deponi alanı sızıntı suyu içinde bulunmasına müsaade edilen maksimum kirletici miktarları**

**EK-1.** Sivrihisar'da bulunan geniş sedimanter sepiyolit yatakları



**EK-2. Karışımlara ait donma sonrası fotoğraflar**



25K75S Karışımına ait 1 çevrim donma sonrası



50K50S Karışımına ait 1 çevrim donma sonrası



25K75S Karışımına ait 5 çevrim donma sonrası



50K50S Karışımına ait 5 çevrim donma sonrası

EK-3. Sepiyolite ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar



1. donma-çözülme sonrası



3. donma-çözülme sonrası



5. donma-çözülme sonrası

**EK-4.** 25K75S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar



1. donma-çözülme sonrası



3. donma-çözülme sonrası



5. donma-çözülme sonrası

EK-5. 50K50S karışımına ait donma-çözülme çevrimleri sonrası fotoğraflar



1. donma-çözülme sonrası



3. donma-çözülme sonrası



5. donma-çözülme sonrası

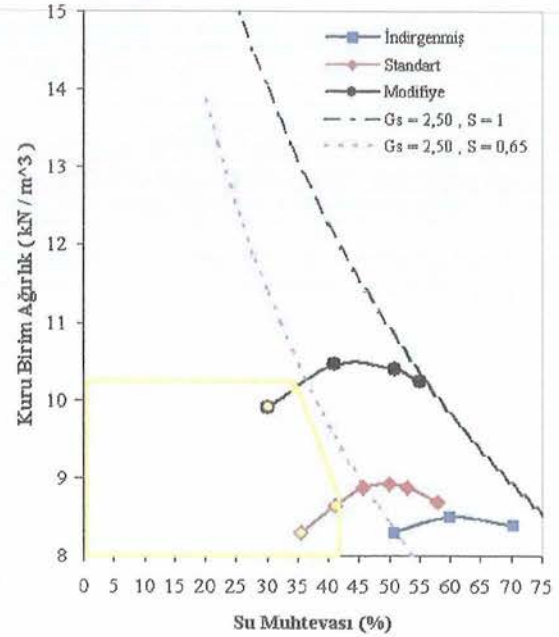
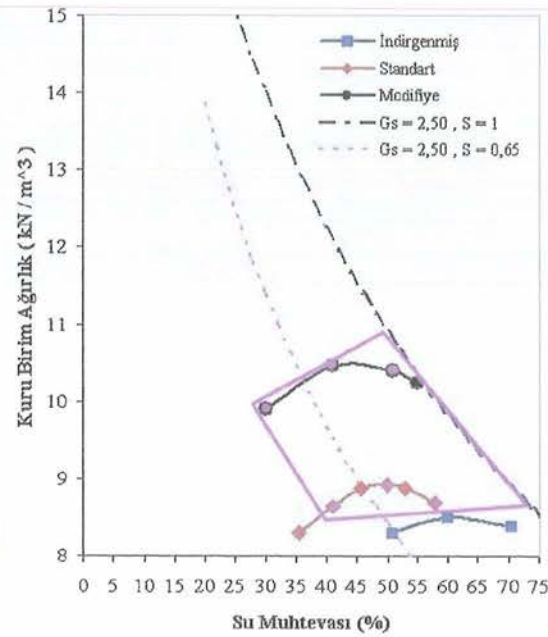
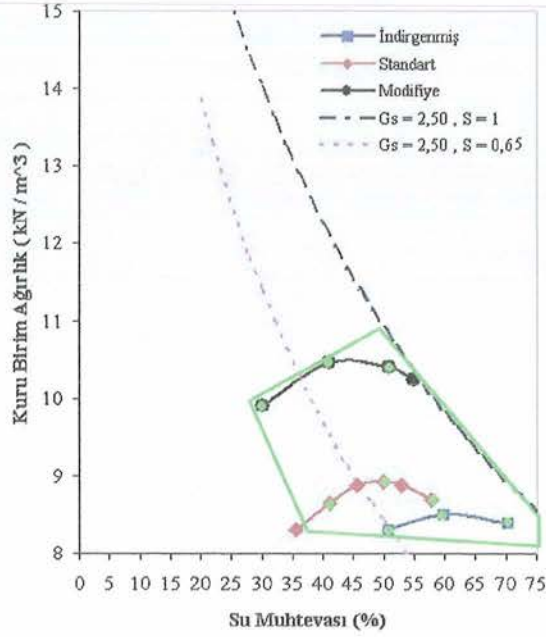
**EK-6.** Bakır ve Krom çözeltileriyle sızıntı sonrası zeminde kirleticinin tutulduğu üst bölge



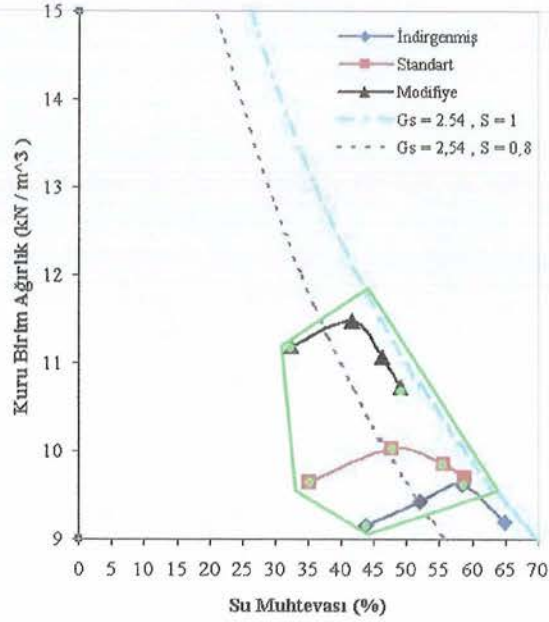
Bakır Çözeltisiyle sızıntı sonrası

Krom çözeltisiyle sızıntı sonrası

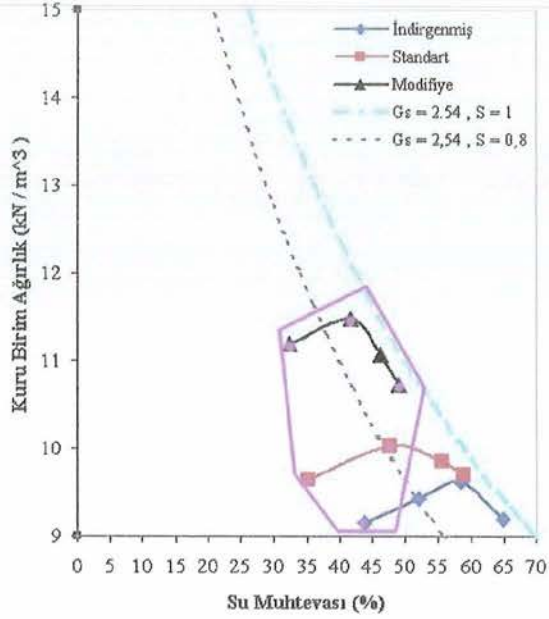
EK-7. Sepiyolit için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri



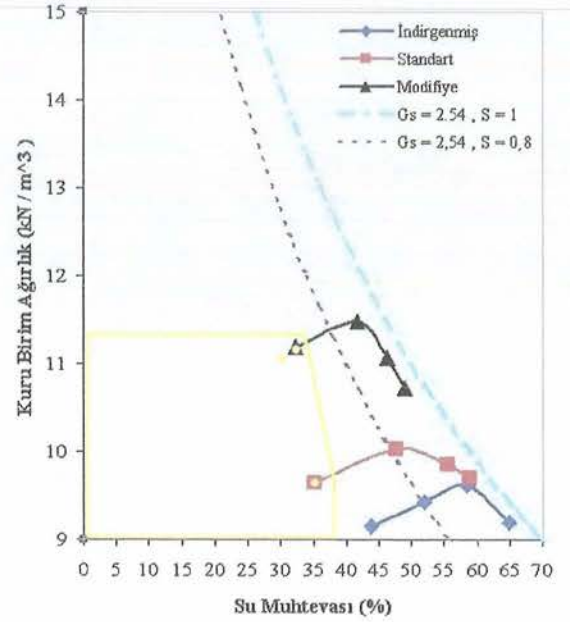
**EK-8.** 25K75S için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri



Permeabilite

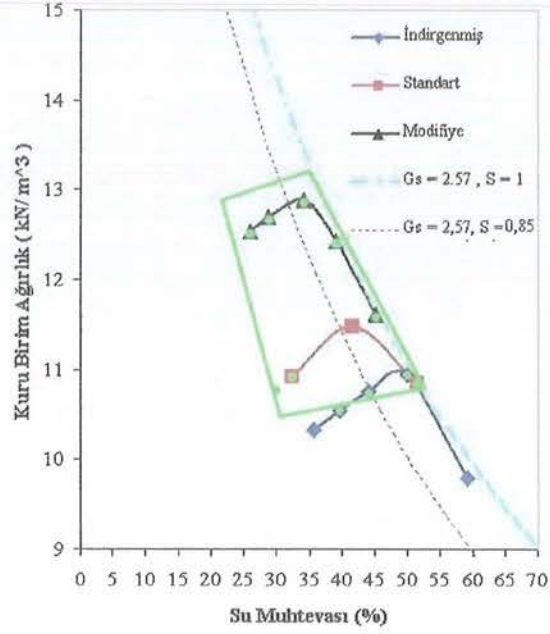


Serbest basınç mukavemeti

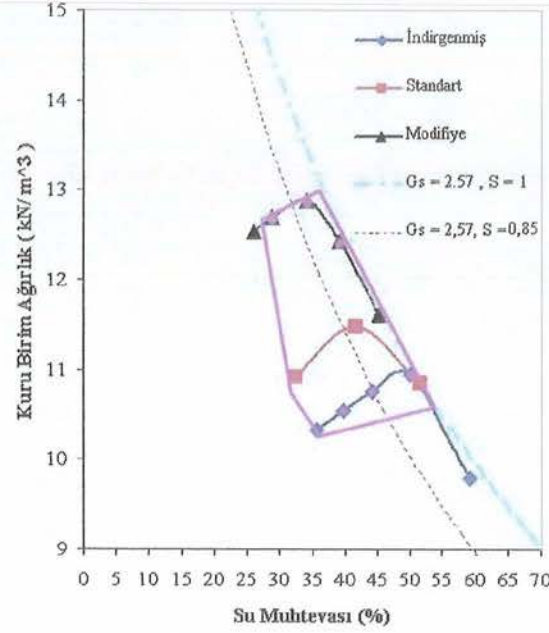


Hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi

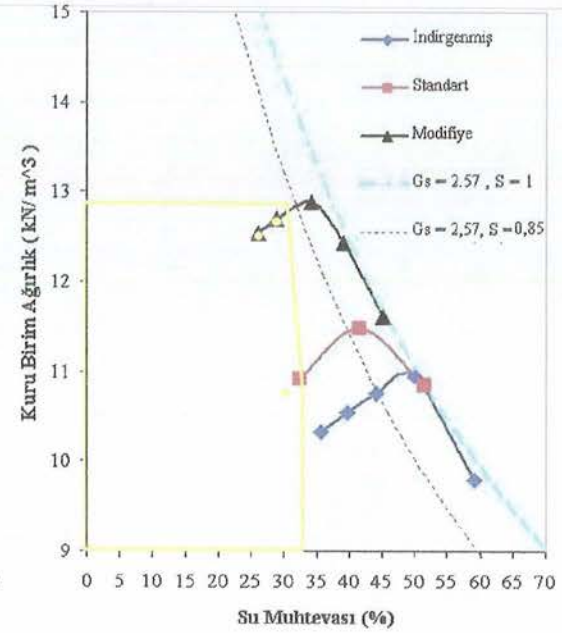
**EK-9. 50K50S için oluşturulan permeabilite, serbest basınç ve hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi kabul edilebilir bölgeleri**



Permeabilite



Serbest basınç mukavemeti



Hacimsel büzülme (rötre) şekil değiştirmesi

**EK.10.** Literatürde içme suyunda bulunmasına müsaade edilen maksimum kirletici miktarları

<sup>1</sup>Kamon, e al. (1991), <sup>2</sup>Kern, et al. (1988), <sup>3</sup> Environment Canada (1979), <sup>4</sup> Pardus (1988),  
<sup>5</sup> Water Environment Federation (WEF) (1993), <sup>6</sup> Resmi Gazete (1991).

Metaller	Japon Temiz Su Kanununa Göre <sup>1</sup> (mg/1)	USEPA İçme Suyu Standardı <sup>2</sup> (mg/1)	İçme Suyu Standardı <sup>3</sup> (mg/1)	İçme Suyu Standardı <sup>4</sup> (mg/1)	Avrupa Topluluğu İçme Suyu Standardı <sup>5</sup> (mg/1)	Kıta İçi Su Kaynakları Kontrolü <sup>6</sup> (ppm)
Arsenik (As)	0.5	0.05	-	<0.01	0.04	1
Bakır (Cu)	3	-	1	<0.2	0.1	0.2
Baryum (Ba)	-	1	-	-	-	-
Demir (Fe)	10	-	17	-	-	1.0
Civa (Hg)	-	-	-	-	0.001	-
Çinko (Zn)	5	-	5	0.1-0.3	0.1	0.5
Kadmiyum (Cd)	0.1	0.01	-	<0.01	0.005	0.01
Krom (Cr)	0.5	0.05	-	<0. 1-0.3	0.05	0.2
Kurşun (Pb)	1	0.05	0.05	<0.1	0.04	0.05
Mangan (Mn)	10	0.05	-	-	-	2.0
Nikel (Ni)	3	-	-	0.35	0.05	0.2
Selenyum (Se)	-	-	-	-	0.01	-
Florür (F)	-	-	-	-	1.5	-
Siyanür (CN)	-	-	-	-	0.05	-
Nitrat (NO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	50	-
Aromatik Hidrokarbon	-	-	-	-	0.0002	-

**EK.11.** Literatürde çöp deponi alanı sızıntı suyu içinde bulunmasına müsaade edilen maksimum kirletici miktarları

Metaller	TCLP <sup>a</sup> (mg/l)	ASTM <sup>a</sup> (mg/l)	EP Toxicity <sup>b</sup> (mg/l)	Literatürde Bulunan Değerler		
				Sızıntı Suyu <sup>c</sup> (mg/l)	Sızıntı Suyu <sup>a</sup> (mg/l)	Sızıntı Suyu <sup>d</sup> (mg/l)
Alüminyum (Al)	—	—	—	...	3.900	...
Arsenik (As)	0.70	0.04	5	...	850	500
Bakır (Cu)	—	—	—	0.005 - 9.9	—	...
Baryum (Ba)	0.44	0.34	100	...	340	...
Civa (Hg)	<0.002	<0.002	0.2	...	<0.3	...
Çinko (Zn)	—	—	—	%60	...	...
Demir (Fe)	—	—	—	4 - 2820	240.000	—
Gümüş (Ağ)	<0.01	<0.01	5	...	10	...
Kadmiyum (Cd)	<0.02	<0.02	1	0.3-17	20	100
Kalsiyum (Ca)	—	247	—	...	304.000	...
Krom (Cr)	<0.01	<0.01	5	0.2- 18	370	500
Kurşun (Pb)	<0.035	<0.035	5	0.001 - 2	330	500
Nikel (Ni)	—	—	—	0.2 - 79	...	134
Magnezyum (Mg)	—	<1.0	—	...	510	...
Potasyum (K)	—	—	...	...	1100	...
Selenyum (Se)	<0.01	<0.01	1	...	14	...
Sodyum (Na)	—	—	—	—	1100	...

<sup>a</sup>Foxworthy, et.al. (1996); <sup>b</sup>Taha (1993) ve Morgan (1984); <sup>c</sup>Ray, et al. (1986); <sup>d</sup>Schurger (1985)  
TCLP: U.S. EPA Toxicity Characteristic Leaching Procedure (SW-846, Method 1330), ASTM: American Society of Testing Materials,  
EP Toxicity: U.S. EPA Extraction Procedure Toxicity Test Method (SW-846, Method 1320).