



**BOR ATIĞI KİL PESTİLLERİNİN MÜHENDİSLİK  
ÖZELLİKLERİ VE YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN  
STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Emrah TURAN**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalı  
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK  
2019  
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BOR ATIĞI KİL PESTİLLERİNİN MÜHENDİSLİK  
ÖZELLİKLERİ VE YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN  
STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Emrah TURAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü  
TEZ ONAY FORMU



**BOR ATIĞI KİL PESTİLLERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE YÜKSEK  
PLASTİSİTELİ KİLİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

**Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK** danışmanlığında, **Emrah TURAN** tarafından hazırlanan bu çalışma, 26/12/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak **oybirliği / oy çokluğu (3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **09.01/2020** tarih ve **.02...../...41.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

  
**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FYL-2019-6785

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **BOR ATIĞI KİL PESTİLLERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE YÜKSEK PLASTİSELİ KİLİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

Emrah TURAN

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK

Bor, endüstriyel alanda kullanılan ve gün geçtikçe kullanım alanlarında artış meydana gelen bir mineraldir. Kullanım alanının çeşitlenmesi bor mineraline olan ihtiyacı da artırmaktadır. Ancak bor mineralinin üretimi esnasında ortaya çıkan atıkların miktarlarında da artış meydana gelmekte ve bu çeşitli problemlere neden olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye’de bulunan Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü’ne bağlı Bigadiç, Kestelek ve Kırka İşletme Müdürlükleri’nde bor üretimi sırasında ortaya çıkan atık kil pestillerinin geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla bor atığı kil pestilleri üzerinde kıvam limitleri, standart proktor, serbest basınç, şişme basıncı ve geçirimsizlik deneyleri ile mineralojik analizler yapılarak bor atığı kil pestillerinin mühendislik özellikleri ortaya konmuştur. Daha sonra atık kil pestilleri, Erzurum-Horasan’dan temin edilen yüksek plastisiteli bir kile farklı oranlarda (%10, %30, %50 ve %70) katılarak bor atığı katkı killeri elde edilmiş ve bu numuneler üzerinde geoteknik deneyler gerçekleştirilerek deney sonuçları doğal kile ait deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda, Kestelek ve Bigadiç bor atıklarının yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabileceği söylenebilir. İlaveten bor atığı katkı killerin düşük geçirimsizlik katsayısına sahip olmaları nedeni ile katı atık depolama alanlarında geçirimsiz şilte olarak kullanılabilirlik bakımından umut vadettiği düşünülmektedir.

**2019, 97 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Bor atık kili, geçirimsizlik, geoteknik özellikler, serbest basınç mukavemeti, zemin stabilizasyonu

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **THE ENGINEERING PROPERTIES OF BORON WASTE CLAYS AND ITS USABILITY IN STABILISATION OF HIGH PLASTICITY CLAY**

Emrah TURAN

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Zeynep Neş e KURT ALBAYRAK

Boron is a mineral that is used in industry and its area of usage shows an increase day by day. The variety of its area of usage raises the demand for the supply of boron, which comes with an increase in the amount of waste that appears as a result of boron production and it causes several issues. In this study, the geotechnical properties of clay paste which occurred as a waste during the producing of boron mineral in Bigadic, Kestelek and Kirka Boron Plants which are affiliated to Eti Mining Operations General Directorate in Turkey has been investigated. For this purpose, consistency limits, standard proctor, unconfined compressive strength, swelling pressure, permeability tests and mineralogical analysis have been performed on the boron waste clay pastes. Then, the boron waste clay pastes have been added in a high plasticity clay which was obtained from Erzurum-Horasan with different proportions (10%, 30%, 50% and 70%) as additive. Geotechnical experiments of these specimens were carried out and the results were compared with that of the natural clay. As a result of the experiments, it has been thought that boron waste clays from Kestelek and Bigadic could be used as an additive in the stabilisation of the high plasticity clay. In addition, it could be mentioned that the high plasticity clay with boron waste clay additives could be used as an impermeable liner in solid waste landfills due to their low permeability coefficient.

**2019, 97 pages**

**Keywords:** Boron waste clay, permeability, geotechnical properties, unconfined compressive strength, soil stabilization

## TEŞEKKÜR

Yaptığım bu tez çalışması esnasında bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında benden yardımını esirgemeyen Mevlüt ALBAYRAK'a ve Dr. Payam MAJEDİ'ye teşekkür ederim.

Çalışmada kullanılan bor atığı kil pestillerinin teminini sağlayan Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne ve Eti Maden Bigadiç, Kestelek ve Kırka İşletme Müdürlükleri'ne teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca rehber ve motivasyon kaynağım olan anne ve babama, çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen çok kıymetli Arş. Gör. Nur SUNAR'a çok teşekkür ederim.

**Emrah TURAN**  
**Aralık, 2019**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Amaç ve Kapsam .....	1
1.2. Kaynak Özetleri .....	3
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>10</b>
2.1. Bor Mineralleri.....	10
2.1.1. Bor bileşiklerinin üretimi.....	12
2.1.2. Türkiye’de Bor cevheri.....	14
2.1.3. Bor atıkları .....	18
2.2. Killer .....	18
2.2.1. Killerin sınıflandırılması.....	19
2.2.2. Killerin elektrokinetik özellikleri.....	20
2.2.3. Killerin fiziksel ve mekanik özellikleri .....	21
2.3. Düzenli Katı Atık Depolama Tesisleri ve İzolasyonları .....	22
2.3.1. Sızıntı suyu yönetimi .....	24
2.3.2. Geçirimsiz tabaka .....	24
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>26</b>
3.1. Materyal .....	26
3.1.1. Kestelek atık kil pestili (KS).....	26
3.1.2. Bigadiç atık kil pestili (BG).....	26
3.1.3. Kırka atık kil pestili (KR) .....	27
3.1.4. Doğal kil (D).....	28

3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. Doğal kil, atık kil pestilleri ve katkılı numunelerin hazırlanışı .....	28
3.2.2. Dane birim hacim ağırlık deneyi .....	31
3.2.3. Kıvam limitleri deneyleri.....	31
3.2.4. Standart proktor deneyi.....	32
3.2.5. Serbest basınç deneyi.....	33
3.2.6. Şişme basıncı deneyi.....	34
3.2.7. Geçirimsizlik deneyi .....	35
3.2.8. X-Işını difraksiyon (XRD) analizi .....	36
3.2.9. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi .....	37
3.2.10. İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) .....	38
3.2.11. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi .....	38
3.2.12. Yüzey alanı ölçüm (BET) analizi .....	39
3.2.13. Elektrokinetik özellikler .....	40
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>43</b>
4.1. Doğal Kil ve Atık Kil Pestilleri Deney Sonuçları.....	43
4.1.1. Dane birim hacim ağırlığı deneyi sonuçları.....	43
4.1.2. Kıvam limitleri deney sonuçları .....	43
4.1.3. Standart proktor deneyi sonuçları.....	44
4.1.4. Serbest basınç deneyi sonuçları .....	47
4.1.5. Şişme basıncı deneyi sonuçları .....	48
4.1.6. Geçirimsizlik deney sonuçları.....	48
4.1.7. XRD analiz sonuçları.....	49
4.1.8. Taramalı eletron mikroskop (SEM) analizi sonuçları .....	52
4.1.9. İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) analiz sonuçları .....	55
4.1.10. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi sonuçları.....	57
4.1.11. Yüzey alanı ölçüm (BET) analizi sonuçları.....	58
4.1.12. Elektrokinetik özellikler .....	58
4.2. Bor Atığı Kil Pestili Katkılı Kil Numunelerine Ait Deney Sonuçları .....	61



4.2.1. Kıvam limitleri deneyleri sonuçları .....	61
4.2.2. Standart proktor deneyi sonuçları .....	67
4.2.3. Serbest basınç deneyi sonuçları .....	71
4.2.4. Şişme basıncı deneyi sonuçları .....	75
4.2.5. Geçirimlilik deney sonuçları .....	78
4.2.6. Eşit oranda bor atık kil pestili ikameli numunelerin kimyasal ve yapısal analizleri .....	80
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>91</b>
KAYNAKLAR .....	94
ÖZGEÇMİŞ .....	98

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>KS</b>	Kestelek atık kil pestili
<b>BG</b>	Bigadiç atık kil pestili
<b>KR</b>	Kırka atık kil pestili
<b>D</b>	Doğal kil
<b>CH</b>	Yüksek plastisiteli kil
<b>DDT</b>	Düzenli depolama tesisleri
<b>USCS</b>	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
<b>XRD</b>	X-Işını difraksiyon
<b>SEM</b>	Taramalı elektron mikroskobu
<b>BET</b>	Yüzey alanı ölçüm
<b>XPS</b>	X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
<b>ICP-MS</b>	İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi
<b>KDK</b>	Katyon değişim kapasitesi
<b>DAYTAM</b>	Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
$\gamma_s$	Dane birim hacim ağırlık
<b>MH</b>	Yüksek plastisiteli silt
$\gamma_k$	Kuru birim hacim ağırlık
$w_{opt}$	Optimum su muhtevası
<b>CL</b>	Düşük plastisiteli kil
<b>ML</b>	Düşük plastisiteli silt
<b>ORP</b>	Oksidasyon İndirgenme Potansiyeli
<b>ADDDY</b>	Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Eti Maden'in yurtiçi bor ürünleri satış miktarları.....	12
Şekil 2.2. Rafine bor üretimi.....	14
Şekil 2.3. Türkiye'de bulunan bor yatakları .....	15
Şekil 2.4. Bigadiç bor yatağı ve üretim tesisi .....	16
Şekil 2.5. Kestelek bor yatağı .....	17
Şekil 2.6. Kırka bor yatağı ve üretim tesisi.....	17
Şekil 2.7. Kili oluşturan minerallerin şematik gösterimi .....	18
Şekil 2.8. Atık yönetimi şeması .....	22
Şekil 2.9. Düzenli depolama alanlarında yapılabilecek sistemler.....	23
Şekil 2.10. Geosentetiklerin sınıflandırılması.....	24
Şekil 3.1. 40 nolu elekten elenen Kestelek atık kil pestili .....	26
Şekil 3.2. 40 nolu elekten elenen Bigadiç atık kil pestili.....	27
Şekil 3.3. 40 nolu elekten elenen Kırka atık kil pestili .....	27
Şekil 3.4. 40 nolu elekten elenen doğal kil .....	28
Şekil 3.5. Numune hazırlamada kullanılan etüv (a), Los Angeles aşındırma cihazı (b).....	29
Şekil 3.6. Elek sarsma cihazı ve 40 nolu elek.....	29
Şekil 3.7. Dane birim hacim ağırlık deneyi .....	31
Şekil 3.8. Likit limit deneyi yapılışı (koni penetrasyon deneyi).....	32
Şekil 3.9. Otomatik kompaksiyon aleti.....	33
Şekil 3.10. Serbest basınç deney aleti.....	34
Şekil 3.11. Ödometre cihazı.....	35
Şekil 3.12. Düşen seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği .....	36
Şekil 3.13. X-Işını difraksiyon (XRD) analiz cihazı.....	37
Şekil 3.14. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analiz cihazı.....	37
Şekil 3.15. İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) cihazı .....	38

<b>Şekil 3.16.</b> X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analiz cihazı.....	39
<b>Şekil 3.17.</b> Yüzey alanı ölçüm (BET) cihazı .....	39
<b>Şekil 3.18.</b> Zeta potansiyeli ölçüm cihazı .....	40
<b>Şekil 3.19.</b> pH metre ve oksidasyon potansiyometre deneyi .....	41
<b>Şekil 4.1.</b> Casagrande Plastisite Grafiği'nde doğal kil ve atık kil pestillerinin zemin sınıfları.....	44
<b>Şekil 4.2.</b> Kestelek atık kil pestiline ait kompaksiyon eğrisi .....	45
<b>Şekil 4.3.</b> Bigadiç atık kil pestiline ait kompaksiyon eğrisi.....	45
<b>Şekil 4.4.</b> Kırka atık kil pestiline ait kompaksiyon eğrisi .....	46
<b>Şekil 4.5.</b> Doğal kile ait kompaksiyon eğrisi .....	46
<b>Şekil 4.6.</b> Doğal kil ve atık kil pestillerinin serbest basınç mukavemetleri.....	47
<b>Şekil 4.7.</b> Doğal kil ve atık kil pestillerinin geçirimsizlik katsayıları.....	49
<b>Şekil 4.8</b> Kestelek atık kil pestilinin XRD grafiği .....	50
<b>Şekil 4.9.</b> Bigadiç atık kil pestilinin XRD grafiği.....	50
<b>Şekil 4.10.</b> Kırka atık kil pestilinin XRD grafiği .....	51
<b>Şekil 4.11.</b> Doğal kile ait XRD grafiği .....	52
<b>Şekil 4.12.</b> Kestelek atık kil pestilinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b) .....	52
<b>Şekil 4.13.</b> Bigadiç atık kil pestilinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b).....	53
<b>Şekil 4.14.</b> Kırka atık kil pestilinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b) .....	54
<b>Şekil 4.15.</b> Doğal kilin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b) .....	54
<b>Şekil 4.16.</b> Atık kil pestilleri ve doğal kile ait denge sıcaklığı, oksidasyon indirgenme potansiyeli ve pH değerleri .....	60
<b>Şekil 4.17.</b> Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin zemin sınıfları.....	62
<b>Şekil 4.18.</b> Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitlerinin değişimi .....	62
<b>Şekil 4.19.</b> Atık kil pestili katkılı numunelerin zemin sınıfları .....	64
<b>Şekil 4.20.</b> Bigadiç atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitlerinin değişimi .....	64
<b>Şekil 4.21.</b> Kırka atık kil pestili katkılı numunelerin zemin sınıfları.....	66
<b>Şekil 4.22.</b> Kırka atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitlerinin değişimi .....	66

<b>Şekil 4.23.</b> Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişim .....	68
<b>Şekil 4.24.</b> Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişim .....	69
<b>Şekil 4.25.</b> Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişim .....	70
<b>Şekil 4.26.</b> Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri .....	72
<b>Şekil 4.27.</b> Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri .....	73
<b>Şekil 4.28.</b> Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri .....	75
<b>Şekil 4.29.</b> Atık kil pestili katkıli numunelerin şişme basınçları .....	77
<b>Şekil 4.30.</b> Atık kil pestili katkıli numunelerin geçirimsizlik katsayısı .....	79
<b>Şekil 4.31.</b> DKS50 numunesine ait XRD grafiği .....	80
<b>Şekil 4.32.</b> D, KS ve DKS50 numunelerine ait XRD grafikleri .....	81
<b>Şekil 4.33.</b> DBG50 numunesinin XRD grafiği .....	81
<b>Şekil 4.34.</b> D, BG ve DBG50 numunelerinin XRD grafikleri .....	82
<b>Şekil 4.35.</b> DKR50 numunesini XRD grafiği .....	82
<b>Şekil 4.36.</b> D, KR ve DKR50 numunelerine ait XRD grafikleri .....	83
<b>Şekil 4.37.</b> DKS50 numunesinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b).....	84
<b>Şekil 4.38.</b> DBG50 numunesinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b) .....	84
<b>Şekil 4.39.</b> DKR50 numunesinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b) .....	85
<b>Şekil 4.40.</b> D, KS ve DKS50 numunelerinin BET analiz sonuçları .....	88
<b>Şekil 4.41.</b> D, BG ve DBG50 numunesine ait BET analizi sonuçları .....	89
<b>Şekil 4.42.</b> D, KR ve DKR50 numunesine ait BET analizi sonuçları .....	89
<b>Şekil 4.43.</b> Doğal kil, atık kil pestilleri ve %50 atık kil pestili katkıli numunelerin zeta potansiyeli değerleri.....	90

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bor rezervlerinin dünya üzerinde dağılımı .....	10
Çizelge 2.2. Dünya Bor rezervleri .....	11
Çizelge 2.3. Eti Maden İşletmeleri rezerv miktarları.....	12
Çizelge 2.4. Türkiye’de bulunan bor tesislerin üretim miktarları.....	16
Çizelge 2.5. Kil gruplarının sınıflandırılması .....	19
Çizelge 2.6. Kil minerallarının tabaka yapıları ve yapısal özellikleri.....	20
Çizelge 2.7. Kil minerallerine ait elektrokinetik özellikler.....	21
Çizelge 2.8. Depolama alanların niteliğine göre geçirimsiz şilte gereklilikleri.....	25
Çizelge 3.1. Atık kil pestili katkılı numuneler .....	30
Çizelge 4.1. Doğal kil ve atık kil pestillerinin dane birim hacim ağırlıkları .....	43
Çizelge 4.2. Doğal kil ve atık kil pestillerine ait kıvam limitleri.....	43
Çizelge 4.3. Atık kil pestillerinin ve doğal kilin kompaksiyon parametreleri.....	44
Çizelge 4.4. Doğal kil ve atık kil pestillerinin serbest basınç mukavemetleri.....	47
Çizelge 4.5. Doğal kil ve atık kil pestillerinin şişme basıncı değerleri.....	48
Çizelge 4.6. Doğal kil ve atık kil pestillerinin geçirimsizlik katsayısı değerleri .....	48
Çizelge 4.7. Kestelek atık kil pestilinin ICP-MS sonuçları .....	55
Çizelge 4.8. Bigadiç atık kil pestilinin ICP-MS sonuçları.....	56
Çizelge 4.9. Kırka atık kil pestilinin ICP-MS sonuçları .....	56
Çizelge 4.10. Doğal kilin ICP-MS sonuçları .....	57
Çizelge 4.11. Doğal kil ve atık kil pestillerinin XPS sonuçları .....	57
Çizelge 4.12. Doğal kil ve atık kil pestillerinin BET analizi sonuçları .....	58
Çizelge 4.13. Doğal kil ve atık kil pestillerine ait zeta potansiyeli değerleri .....	58
Çizelge 4.14. Doğal kil ve atık kil pestillerinin denge sıcaklığı ve pH değerleri .....	59
Çizelge 4.15. Doğal kil ve atık kil pestillerinin ORP değerleri .....	59
Çizelge 4.16. Atık kil pestilleri ve doğal kile ait KDK değerleri .....	60
Çizelge 4.17. Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitleri .....	61
Çizelge 4.18. Bigadiç atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitleri .....	63

<b>Çizelge 4.19.</b> Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitleri.....	65
<b>Çizelge 4.20.</b> Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametreleri.....	67
<b>Çizelge 4.21.</b> Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametreleri.....	69
<b>Çizelge 4.22.</b> Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametreleri.....	70
<b>Çizelge 4.23.</b> Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri .....	71
<b>Çizelge 4.24.</b> Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri .....	73
<b>Çizelge 4.25.</b> Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri .....	74
<b>Çizelge 4.26.</b> Atık kil pestili katkıli numunelerin şişme basınçları .....	76
<b>Çizelge 4.27</b> Atık kil pestili katkıli numunelerin geçirimsizlik katsayıları .....	78
<b>Çizelge 4.28.</b> DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerinin ICP-MS analizi .....	86
<b>Çizelge 4.29.</b> DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerinin XPS sonuçları .....	86
<b>Çizelge 4.30.</b> DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerine ait BET analiz sonuçları .....	87
<b>Çizelge 4.31.</b> DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerine ait zeta potansiyeli değerleri.....	90

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Amaç ve Kapsam

Artan dünya nüfusu, teknolojik gelişmeler ve bir hammaddenin birçok alanda kullanımı küresel kaynakların hızlı bir şekilde tüketilmesine neden olmaktadır. Bu durum hammadde kullanımı ile birlikte meydana gelen atık maddelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Büyük oranda oluşan atık maddeler, insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri yanı sıra çevre sorunlarına ve negatif yönde finansal etkilere sahip olmaktadır. Bu etkilerin ciddi bir şekilde takip edilmesi ve gerekli önlemler alınarak zararlarının en aza indirilmeye çalışılması gerekmektedir.

Atık maddelerin zararlarını ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için geliştirilen yöntemlerden bazıları atıkların toplanması, geri kazanılması veya depolanmasıdır. Bu yöntemlerden en fazla kullanıma sahip olan depolama sistemleridir. Bu sistem genellikle geçirimsiz şilte kullanılarak izolasyonu sağlanmış bir alanda atık maddelerin depolanarak tecrit edilmesi esasına dayanmaktadır. Sistem daha sonra biyolojik dönüşüm ortamına çevrilerek atık maddelerin zararlarından korunmaya çalışılmaktadır. Ancak atık depolama alanlarında en büyük sorun izolasyon sağlayan malzemeler üzerinde atıklardan gelen kimyasal sıvı veya katı maddelerin etkileridir. Bu nedenle depolama alanlarında kimyasal etkiye maruz kalan izolasyon malzemelerinin belirli bir oranda geçirimsiz olması yanı sıra kimyasal etkilere karşı da kullanım özelliğini kaybetmemesi gerekmektedir (ADDDY 2010).

Türkiye Belediyeler Birliği verilerine göre Türkiye’de 76 belediyede düzenli depolama tesisleri (DDT) bulunmakta ve artan nüfusa paralel olarak önümüzdeki yıllarda düzenli depolama tesisi sayısında artış meydana geleceği tahmin edilmektedir. Bu durumun daha fazla geçirimsiz şilte malzemesi ihtiyacı doğurması beklenmektedir. Endüstriyel olarak üretilen geçirimsiz malzemelerin yanı sıra geçirimsiz şilte üretimi ile birlikte yeniden atık maddeler ortaya çıkabileceği düşünülmektedir.



Bor minerallerinin üretimi sırasında gerçekleştirilen cevher zenginleştirilmesi sürecinde ortaya çıkan, içerisinde bor oksit ile birlikte kil mineralleri de içeren katı atıklar kil pestili olarak adlandırılmaktadır (Uğurlu vd 2004). Ülkemizde bor minerallerinin üretimi esnasında yaklaşık 900.000 ton/yıl atık kil pestili oluşmaktadır (Ulutaş 2015). Bu durum atık kil pestillerinin tecritini hem ekonomik, hem çevresel hemde insan sağlığı için önemli hale getirmiştir. İşletme ömürlerinin 250 yıldan az olmadığı varsayıldığında atık depolama alanlarının geçerli ve etkili bir çözüm olamadığı, atık killerinin değerlendirilerek ortadan kaldırılmasının esas olması gerekliliği söz konusudur (Ulutaş 2015).

Doğal kil zeminler geoteknik mühendisliği alanında önemli bir yere sahiptir. Killer uygulamada düzenli atık depolama alanlarında geçirimsiz şilte, toprak dolgu barajlarında geçirimsiz çekirdek, yol dolgusu ve radyasyon önleyici tabaka gibi mühendislik alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kil zeminler, yüksek özgül yüzey alanlarından dolayı oldukça fazla negatif yüklere sahip olup bünyesel karakteristiklerine bağlı olarak, şişme, oturma gibi olumsuz özelliklerinden dolayı yapısal sorunlara neden olabilmektedir. Bu negatif yükler polar yapıdaki suyu çekerek elektriksel yük dengesini sağlamaya çalışmaktadır. Dolayısıyla fazla miktarda su alan kil zeminler şişme, büzülme, oturma gibi mühendislik problemlerine neden olurlar. Killerin geoteknik özelliklerinin değişmesinde önemli parametrelerden birisi hacim değişikliğidir. Killer, kimyasallar atık malzemeler veya diğer tür zeminlerle karıştırılarak zemin özellikleri iyileştirilebilmektedir (Akbulut and Saglamer 2004; Yarbaşı *et al.* 2007).

Tez çalışması kapsamında Erzurum-Horasan mevkiinde bulunan yüksek plastisiteli bir kile, Bigadiç, Kestelek ve Kırka bor işletmelerinden temin edilen atık kil pestilleri %10, %30, %50 ve %70 oranlarında katılarak bor atıklarının doğal kilin geoteknik özellikleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle doğal kil ve atık kil pestillerinin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen oranlarda atık kil pestilleri doğal kile katılarak katkılı kil numuneler elde edilmiştir. Böylece geçirimsiz şilte olarak kullanılmakta olan endüstriyel ürünlerin yerine depolama problemleri meydana getiren bor atıklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 1.2. Kaynak Özetleri

Killer, doğada sıklıkla karşılaşılan ince taneli zeminler olup, geoteknik mühendisliği alanında katı atık depolama sahalarında geçirimsiz şilte veya toprak dolgu barajlarında geçirimsiz çekirdek olarak kullanılmaktadır. Bu amaçlarla kullanılacak olan killerin oldukça geçirimsiz olması yanı sıra mukavemet özelliklerinin de yüksek olması istenmektedir. Ancak killerin su ile teması sonucu şişme eğilimi göstermesi ve bünyesindeki suyu kaybetmesiyle büzülme gibi hacim değişiklikleri meydana gelmesi geoteknik özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu olumsuz özelliği ortadan kaldırmak veya en aza indirebilmek için literatürde birçok çalışma mevcuttur (Akbulut and Saglamer 2004; Yarbaşı *et al.* 2007).

Günümüzde bor minerali oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Dünya bor rezervinin yaklaşık %73'üne sahip olan Türkiye, bor minerali üretiminde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bor minerali üretimi esnasında gerçekleştirilen cevher zenginleştirme işleminde ortaya çıkan içerisinde bor oksit yanı sıra kil mineralleri de bulduran atık kil pestilleri meydana gelmektedir (Uğurlu vd 2004). Cevher zenginleştirme işlemi kilin su ile teması sonucu şişmesi özelliği kullanılarak ayrılması esasına dayanmaktadır (Aytekin vd 1992). Artan bor minareli talebi üretim esnasında meydana gelen atıkların artışı nedeniyle çevre sorunlarına, depolama problemlerine ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu atık malzemelerin inşaat mühendisliği alanında değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur. Boraks atıklarının hafif bir puzolanik karakter taşıdığı bilinmektedir (Uğurlu vd 2004). Bor atıklarının taşıdığı bu özellikten dolayı, yapılan çalışmaların büyük bir kısmı çimento ve tuğla üretimi ile ilgilidir.

Bozkurt (1989) yapmış olduğu çalışmada, bor atıklarından bor minerali kazanımını araştırmış, montmorillonit, kalsit, klorit ve biyotit gibi paramanyetik minerallerin bor atıkların içerisinde bulunduğunu tespit etmiştir. Bunun sonucunda güçlü manyetik ayırıcılarla bu paramanyetik minerallerin ayrılabilceğini ifade etmiştir.

Kavas ve Emrulloğlu (1999) yapmış oldukları çalışmalarında Seydişehir kırmızı çamuruna Kırka işletmesinden temin edilen bor atık killeri belirlenen oranlarda katarak tuğla özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda normal tuğlaya göre daha yüksek dayanımlı ve su emme oranının düşük olduğu tuğla imal etmişlerdir. Böylece oluşturdukları karışımın seramik ve inşaat sektöründe kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Kula (2000) gerçekleştirdiği çalışmasında çimento içerisine belirli oranlarda tinkal, kolemanit atıkları, uçucu ve taban küllerini belirli oranlarda karıştırmıştır. Elde edilen karışımın fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmış ve standartlara uygun olduğu belirlenmiştir.

Boncukcuoğlu *et al.* (2002), bor atıklarını değerlendirme adına bir dizi deney yapmışlardır. Bu amaçla portland çimentosuna Bandırma tesislerinden elde edilen atıkları; kum, cüruf ve çimento ile karıştırmışlardır. Elde edilen numuneler üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen deneysel veriler ile bor atığı karıştırılan çimentonun, normal portland çimentosundan daha yüksek mukavemete sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca katkı oranının %25 olması halinde mukavemet özelliklerinin optimum oranda arttığını belirlemişlerdir.

Demir ve Orhan (2002), yapmış oldukları deneysel çalışmada yapı bloğu üretiminde bor tesislerinden elde edilen atıkların değerlendirilebilirliğini araştırmışlardır. Temin edilen bor atığını belirli oranlarda ponza kumuna katarak en uygun kullanım oranını ve sıcaklığı belirlemişlerdir. Optimum oranı belirlenen numuneler üzerinde basınç dayanımı, donma-çözülme sonrası dayanımı, su emme oranı, birim hacim ağırlığı, porozite belirleme deneyleri yapılmıştır. Ağırlıkça %50 oranında ponza kumu ile karıştırılan bor atık karışımlarının daha poroz ve daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Targan vd (2002) yapmış oldukları çalışmada, Kütahya-Emet Bor üretim tesislerinden temini sağlanan kolemanit atıklarının, çimento üretiminde kullanılabilirliğini

araştırmışlardır. Bor atığı eklenen numuneler üzerinde çimento priz süresi tayini, hacim genişmesi tespiti, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında Kula cürufu ve kolemanit konsantratör atığı karışımları ile birlikte bentonit ve kolemanit konsantratör atığı karışımlarının çimento katkı maddesi olarak değerlendirilebilir olduğu kanısına varılmıştır. Böylece klinker üretiminde enerji tasarrufu ve ekonomiklik sağlanabileceği ortaya konulmuştur.

Uslu and Arol (2004) bor atığının seramik endüstrisinde kırmızı tuğla yapımında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, endüstriyel tuğla kiline % 0, %10, %20, %30, %40 ve %100 oranlarında bor atık kili katılarak %20 su muhtevasında farklı sıcaklıklarda pişirilmiştir. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, su emme, donma dayanımı ve kireç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tuğla üretiminde %30'a kadar atık kil eklenmesinin basınç dayanımı, su emiciliği ve yoğunluğu artırdığı ve böylece tuğla kalitesini yükselttiği belirlenmiştir.

Uğurlu vd (2004) yapmış oldukları çalışmada atık killerin yanı sıra uçucu kül ve volkanik tüflerin çimento katkısı olarak kullanımını araştırmışlardır. Belirlenen oranlarda uçucu kül, volkanif tüf ve atık kil karışımı elde edilen çimento üzerine çeşitli deneyler yapılmıştır. Değerlendirmeler ışığında kil atıklarının çimento içerisine % 10-15 oranında katılabileceği öne sürülmüştür.

Olgun *et al.* (2005) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, bor atığının ve uçucu kül katkısının seramik duvar karosu üretiminde kullanımını araştırmışlardır. Üretilen numuneler üzerine pişme mukavemeti, pişirmedeki kayıp, su emiciliği ve mikroyapı özellikleri belirlenmiştir. Fayans içeriğinde bulunan potasyum feldispat yerine kil ve uçucu kül % 2-10 oranında karışıma katılmıştır. Katkı oranlarının % 10'a kadar uçucu kül ve % 5'e kadar atık kil olması halinde, endüstriyel fayansa kıyasla mineralojik ve reolojik özelliklerin iyileştiği daha iyi bir ürün elde edildiği belirlenmiştir.

Özdemir ve Uğurlu (2007) yapmış oldukları çalışmada bor atıklarının hafif bir puzolanik karakter taşıdığını belirtmiştir. Bor atığının bu özelliğinden dolayı söz konusu atık malzemenin çimento içerisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada, kil pestili atıkları katkı maddesi olarak Portland çimentosuna katılmış ve kil pestili oranının çimento yapısı üzerindeki etkisi taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Türk Standartları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kil pestili atık malzemesinin sırasıyla % 5 ve % 7 oranlarında çimento içerisinde katkı maddesi olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.

Batar ve Köksal (2009) tarafından yapılan araştırmada, sıva malzemesi üretiminde katkı malzemesi olarak % 0-5 perlit, % 0-2,5 atık kağıt, % 0-5 kalsine tinkal (boraks) ve % 3,5-17,7 atık kalsine tinkal kullanımını araştırmışlardır. Numuneler üzerinde mukavemet ve ısı geçirgenlik direnci deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sıva malzemesi üretiminde optimum karışım oranlarının % 3 perlit, % 1,5 atık kağıt, % 7,1 atık kalsine tinkal olduğu tespit edilmiştir.

Akyıldız (2012) yapmış olduğu çalışmada, Kütahya-Emet-Espey yöresindeki kolemanit konsantratör atıkları ve zeolit gibi zengin yer altı kaynaklarına sahip olduğumuz minerallerin beton üretiminde değerlendirilmesi ve betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla çimento, bor atığı, zeolit üzerinde kimyasal, fiziksel, mekanik, mineralojik analizler gerçekleştirmiştir. Üretilen her bir beton türü üzerinde taze beton deneyleri yapılmış, betonda ve hafif betonda bor atığı katkısının etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre normal betonda %3 katkının 7 günlük basınç dayanımı 13,69 MPa iken 56 günlük basınç dayanımı 25,73 MPa olarak bulunmuştur. 56 günlük basınç dayanımında % 88 artış görülmüştür. Hafif agregalı betonda ise %3 katkının 7 günlük basınç dayanımı değeri 9,40 MPa iken 56 günlük basınç dayanımı 15.02 MPa olarak bulunmuştur. Basınç ve yarma dayanımı sonuçları %3 bor atığı katkısının betonun dayanım özelliklerini uzun vadede iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca %3 katkılı betonların su emme yüzdesinin şahit numuneye yakın değer aldığı görülmüştür. Özellikle bor atığı katkılı betonların uzun vadede dayanımının arttığı ve bor atığı katkısının

puzzolonik materyal olarak kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak; bor atığının betona katkı olarak kullanılabilceği görülmüştür.

Eyyüpoğlu (2013) yapmış olduğu çalışmada, Bigadiç bor atık killeri ile klinker ve alçı taşı kullanarak 12 çeşit bor katkılı çimento ve bir adet CEM I grubu çimento olmak üzere 13 çeşit çimento üretmiştir. Yapılan deneyler sonucunda bazı tür bor katkılı çimento türlerinin CEM I grubu çimentoya göre daha iyi performans gösterdiği ortaya koyulmuştur.

Morova and Terzi (2015) çalışmalarında, Bigadiç bor atık agregalarının asfalt betonunda agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda bor atık agregasının taşıma maliyetinin düşük olması halinde kireçtaşı agregası yerine kullanılabilceği kanısına varmışlardır.

Koumpouri and Angelopoulos (2016) çalışmalarında düşük enerjili belit içeren çimento üretiminde bor oksit ve bor atığı ilavesinin etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonuçları bor oksitin kontrollü miktarlarda ilavesinin belit çimentosu üretiminde faydalı olabildiğini göstermiştir.

Bideci ve Bideci (2018) yapmış oldukları çalışmada, öğütölmüş kolemanit katkısının çimento harç özelliklerine etkisi araştırmışlardır. Öncelikle öğütölmüş kolemanitin puzolanik aktivite özelliği belirlenmiştir. Daha sonra farklı oranlarda (%0, %1, %3, %5, %7) öğütölmüş kolemanit katkılı çimento harçlarının; özgül ağırlık, özgül yüzey, priz başlama ve sona erme süreleri tayini, kıvam ve genleşme deneylerinin yapılmasının yanı sıra harç numunelerin basınç dayanımı (2, 7 ve 28 günlük) belirlenerek referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, öğütölmüş kolemanit ikame oranının artışıyla priz başlangıç ve priz sona erme sürelerinin uzadığı, tüm çimento harçlarının TS EN 197-1 standardında istenilen en düşük mekanik özelliği sağladığı ( $\geq 42,5$  MPa ve  $\leq 62,5$ MPa) ve %1, %3 ve %5 oranında kolemanitin çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Bor atıklarının geoteknik mühendisliği alanında değerlendirilmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Gündüz (2008) çalışmasında, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüs alanında yer alan yüksek şişme potansiyeline sahip Meşelik killerin Eskişehir Kırka'da bulunan tesiste meydana gelen tinkal atığı ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Araştırmada Tinkal atığı-şişme yüzdesi, Tinkal atığı-serbest basınç değerlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Deney sonuçları, Tinkal atığının killerin şişme potansiyelinin kontrolünde başarı ile kullanılamayacağını, taşıma gücüne de katkısının olmadığını göstermiştir. Bu aşamada Tinkal atığının bünyesinde kil mineralleri bulunduğu ve dolomitin kil mineralleriyle herhangi bir reaksiyon vermediği sonucu elde edilmiştir.

Zaimoğlu (2011) yapmış olduğu çalışmada, %10 ile %40 değişen oranlarda bir bor atığı olan borojips kullanılarak borojips katkılı kötü derecelenmiş kum zemin numuneler üzerinde standart proktor, serbest basınç, California taşıma oranı (CBR), kesme kutusu, donma-çözülme ve geçirimsizlik deneyleri yapmıştır. Deney sonuçlarına göre kuma borojips eklenmesinin optimum su içeriğinde ve maksimum kuru yoğunluğunda artışa neden olduğunu göstermiştir. Çalışmada, serbest basınç mukavemeti, CBR ve kohezyon değerlerinin artan borojips içeriği ile arttığı bulunmuştur. Bununla birlikte, içsel sürtünme açısı ve geçirimsizlik katsayısı, artan borojips içeriği ile azalmıştır. Donma-çözülme döngülerinden sonraki kütle kaybı değerlerinin genel olarak kum-borojips karışımları için istenen bir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Ulutas *et al.* (2014) çalışmalarında, Kırka Bor İşletmesinden temin ettikleri bor atığı kilinin geoteknik, kimyasal ve yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan araştırma sonucunda kilin CH kili olduğu ve permeabilite katsayısının  $3,5 \times 10^{-11}$  m/s olduğu belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında Kırka bor atığı kilinin katı atık depolama alanlarında kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır.

Bayrakçı (2015) Eskişehir Kırka Bor İşletme Müdürlüğü bünyesinde faaliyetine devam eden ocaklardan temin edilen bor atık kilin ve atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik karışım hallerinin geoteknik özelliklerini belirlemiştir. Değişen karışım oranlarında elde edilen atık kil/bentonit ve atık kil/atık lastik numunelerinden optimum fayda sağlayan

numuneler belirlenerek bunlar üzerinde sızıntı suyu çalışmaları yapılmıştır. Sızıntı suyu çalışmaları bu numunelerin geçirimsiz kil tabakası olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Okur and Akinci (2018) yapmış oldukları çalışmada kaolinit ve montmorollinit killерinin Kırka bor atığı ilavesi ile dinamik özelliklerinde meydana gelen değişimi incelemiştir. Bor atığı katkısının iki kilin dinamik özelliklerini de iyileştirdiği görülmüştür. Karışımındaki bor atığı miktarının artırılması, montmorillonit kilinin başlangıç kesme modülünü katkısız numunelere kıyasla % 300 oranında artırmıştır. Kaolinit kiline bor atık katkısı da olumlu sonuçlar meydana getirmiştir. Artan bor atık miktarı ile kesme modülü ve sönüm oranlarında meydana gelen değişimlerin her iki kilde de belirgin olduğu görülmüştür.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Bor Mineralleri

Bor,  $2190\pm 20$  °C ergime sıcaklığına sahip, yarı iletken özellikte, metalle ametal arasında bir elementtir. Bor elementinin Amerika Birleşik Devletleri'nin batı kısımları ile Akdeniz'den Kazakistan'a kadar olan kısımlarda çok miktarda var olduğu bilinmektedir (Yiğitbaşıoğlu 2004). Ekonomik ve yüksek konsantrasyona sahip Bor yatakları, Türkiye'nin ve Amerika'nın hidrotermal etkinliğinin yüksek olduğu, volkanik ve kurak kısımlarında bulunmaktadır (DPT 2001).

250'yi aşkın mineral yapısında bulunan bor elementinin, ticari değeri olan şekli sodyum, magnezyum ve kalsiyum ile hidrat halinde bulunanlardır. Bor mineralinin bünyesinde farklı oranlarda  $B_2O_3$  (bor oksit) içermesi ticari değerini ortaya koymaktadır. Ekonomik anlamda değerli sayılabilecek mineraller ve bunların yanı sıra bileşiklerinin dünya üzerinde bulunduğu yerlerin bilgisi Çizelge 2.1'de verilmektedir (Demir 2006).

**Çizelge 2.1.** Bor rezervlerinin dünya üzerinde dağılımı (Demir 2006; DPT 2001)

Yapı	Mineral	% $B_2O_3$	Bulunduğu yerler
<b>Sodyum Borat</b>	Tinkal	36,5	Kırka, Emet, Bigadiç, ABD
	Kernit	51,0	Kırka, ABD, Arjantin
<b>Kalsiyum Borat</b>	Kolemanit	50,8	Emet, Bigadiç, ABD
	Pandermit	49,8	Sultançayır, Bigadiç
<b>Sodyum-Kalsiyum Borat</b>	Üleksit	43,0	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
	Probertit	49,6	Kestelek, Emet, ABD
<b>Magnezyum-Kalsiyum Borat</b>	Hidroborasit	50,5	Emet

Çizelge 2.2'de Dünya bor rezervleri görülmektedir. Dünya bor rezervlerinin %73,4'ü Türkiye'de bulunmaktadır (Bor Sektör Raporu 2018)

**Çizelge 2.2.** Dünya bor rezervleri (Bor Sektör Raporu 2018)

Ülkeler	Toplam Rezerv (Bin ton B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Dağılım (%)
<b>Türkiye</b>	948 712	73,4
<b>Rusya</b>	100 000	7,7
<b>A.B.D.</b>	80 000	6,2
<b>Peru</b>	22 000	1,7
<b>Arjantin</b>	9 000	0,7
<b>Çin</b>	36 000	2,8
<b>Bolivya</b>	19 000	1,5
<b>Şili</b>	41 000	3,2
<b>Kazakistan</b>	15 000	1,2
<b>Sırbistan</b>	21 000	1,6
<b>Toplam</b>	1 291 712	100

Ülkemizde Bor konsantresi üretimi; Eti Maden Genel Müdürlüğü bünyesinde bulunan Kütahya-Emet, Bursa-Kestelek, Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bigadiç ve Balıkesir-Bandırma işletmelerinde yıkama sonucu dağıtma ve sınıflandırma yöntemi ile gerçekleştirilmektedir (Eyyüpoğlu 2013). Ülkemizde bulunan Bor mineralleri sodyum, kalsiyum ve sodyum-kalsiyum kökenlidir. Bor minerallerinden içeriğinde sodyum bulunanlar Tinkal, içeriğinde kalsiyum bulunanlar Kolemanit, içeriğinde sodyum-kalsiyum bulunanlar Üleksit olarak isimlendirilmektedir (Yiğitbaşıoğlu 2004). Çizelge 2.3’de ülkemizde bulunan bor yataklarının mineral bazında dağılımları görülmektedir. Şekil 2.1’de ise ülkemizde bor minerallerinden elde edilen ürünlerin satış miktarları verilmiştir.

**Çizelge 2.3.** Eti Maden İşletmeleri rezerv miktarları (Bor Sektör Raporu 2018)

Havza Adı	Bor Mineralleri	Miktar (ton)
Emet	Kolemanit-Üleksit-Probertit	1 811 072 520
Kırka	Tinkal	824 720 950
Bigadiç	Kolemanit-Üleksit	628 350 480
Kestelek	Kolemanit	5 254 920
Toplam		3 269 398 870

**Şekil 2.1.** Eti Maden'in yurtiçi bor ürünleri satış miktarları (Bor Sektör Raporu 2018)

### 2.1.1. Bor bileşiklerinin üretimi

Günümüz bor üretim tesislerinde üç çeşit üretim yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemler, kapalı ocak yöntemi, açık ocak yöntemi ve çözelti madenciliğidir. Çıkarılması planlanan cevherin üzerinde bulunan tabakanın patlatma, kazma gibi işlemlerle kaldırılması açık ocak, tabakanın kaldırılmasının tercih edilmemesi haline ise kapalı ocak yöntemi denilmektedir. Kolemanit üretimi için su yataklarında hidroklorik asit ve kalsiyum karbonat kullanılması ise çözelti madenciliği adını almaktadır. Ülkemizde kapalı ve açık ocak yöntemi kullanılarak bor üretimi yapılmaktadır (Demir 2006). Bazı bor bileşiklerinin üretimi aşağıda yer almaktadır;

**Boraks Pentahidrat:** Nemli boraksın (boraks dekahidrat) belirli bir sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra, çöktürme, filtreleme, kristalizasyon, kurutma işlemleri uygulanmasıyla bünyesinde en az %47,8 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunan boraks pentahidrat ürünü elde edilir (Eti Maden 2018).

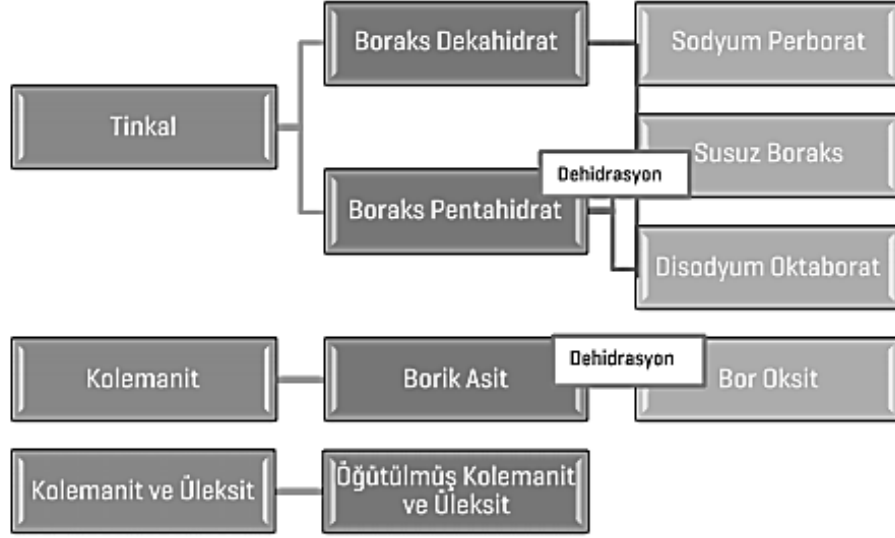
**Borik Asit:** Kolemanit cevherinin sülfirik asit ile reaksiyonu sonucunda gerekli işlemlerin uygulanmasıyla bünyesinde en az %56 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunan borik asit elde edilir (Eti Maden 2018).

**Bor Oksit:** Borik asitin bünyesinde bulunan kristal suyun uzaklaştırılması esasına dayanarak elde edilmektedir. Borik asitin kurutucular yardımıyla bünyesel suyunu kaybetmesinden sonra gerekli işlemlerin uygulanmasıyla bor oksit elde edilir (Bor Sektör Raporu 2012).

**Kalsine Tinkal:** Tinkal cevherinin fırınlarda kalsinasyon işlemine tabi tutulması ile elde edilmektedir. Yapısal suyun uzaklaştırılması ile bünyesinde %45-62 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren kalsine tinkal elde edilir (Bor Sektör Raporu 2012).

**Susuz Boraks:** Kalsine olmuş boraksın 980 °C'de eritilmesi sonucunda elde edilmektedir. Eritilen boraksın daha sonra soğutulup öğütülmesi ile pazarlamaya hazır susuz boraks üretilmiş olur (Bor Sektör Raporu 2012).

Şekil 2.2'de rafine bor üretimi şeması görülmektedir.



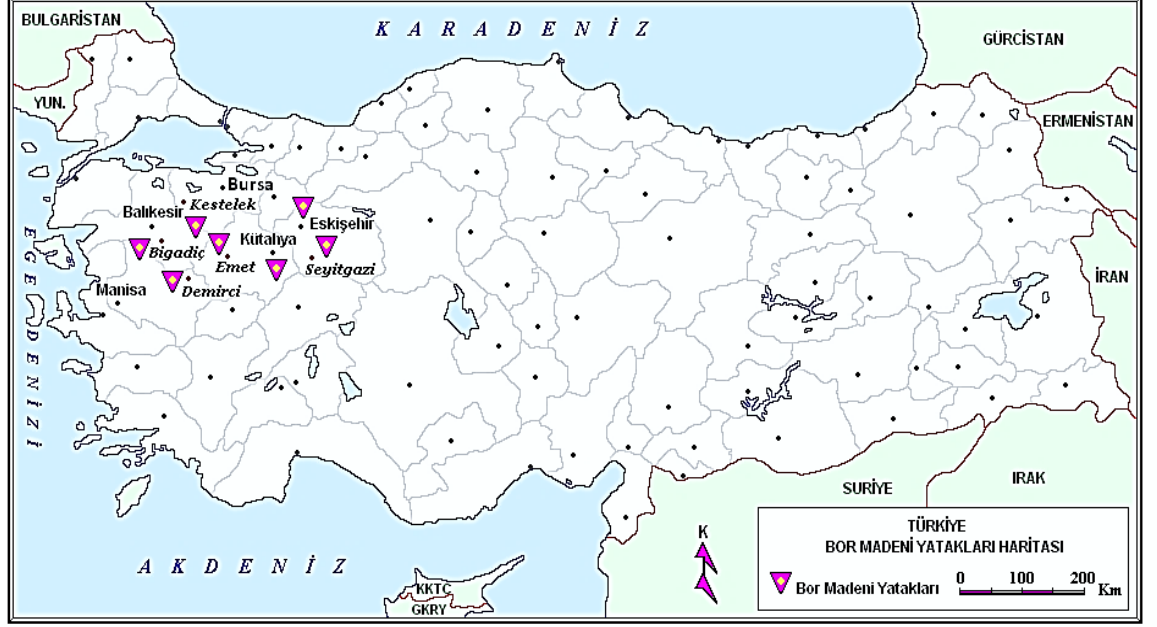
Şekil 2.2. Rafine bor üretimi (Bor Sektör Raporu 2018)

### 2.1.2. Türkiye’de Bor cevheri

Genellikle toprağın bor içeriği ortalama 10-20 ppm olmakla birlikte, ABD’nin Batı bölgelerinde ve Akdeniz’den Kazakistan’a kadar uzanan bölgede yüksek konsantrasyonlarda bulunur (DPT 2001). Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit ( $B_2O_3$ ) içeren doğal bileşiklerdir. Türkiye’de yaygın olarak bulunan bor mineralleri ise; tinkal, kolemanit ve üleksittir. Bu mineralleri içeren cevherlere uygulanan fiziksel zenginleştirme işlemleri sonucunda konsantre bor ürünleri elde edilmektedir. Konsantre bor ürünleri de rafinasyon ile çeşitli rafine bor ürünlerine dönüştürülmektedir (Eti Maden 2018).

Türkiye’nin orta ve batı bölgeleri dünyanın en zengin boraks yataklarına sahiptir. Öncelikle Kırka-Eskişehir, Bigadiç-Balıkesir, Kestelek-Bursa ve Emet-Kütahya’da Türkiye’nin bilinen bor yatakları bulunmaktadır. Türkiye’de en yaygın bor cevheri rezervi tinkal ( $Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 10H_2O$ ) ve kolemanittir ( $2CaO \cdot 3B_2O_3 \cdot 5H_2O$ ). Türkiye’nin önemli yatakları Kırka’da, büyük kolemanit yatakları ise Emet ve Bigadiç civarındadır. Buna ek olarak, Bigadiç’de küçük bir üleksit rezervi bulunur ve bazen Kestelek’te üleksit

verimi yan ürün olarak ortaya çıkar (Eti Maden 2019). Türkiye’de bulunan bor yatakları Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Türkiye’de bulunan bor yatakları (Anonim 2019a)

Türkiye bor yatakları yakınında bulunan önemli beş tesisin üretim kapasiteleri Çizelge 2.4’de verilmiştir. Kapasiteler incelendiğinde en fazla üretim kapasitesinin Kırka bor üretim tesisinde olduğu görülmektedir. Bu durumda üretim sonucunda oluşan atıkların en fazla Kırka tesisinde meydana geleceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Ülkemizin bor varlığı Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından ekonomiye kazandırılmaktadır. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü ile Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü arasında 2002 yılında yapılan protokol ile hayata geçirilen Bor Master Arama Projesi kapsamında 2002-2013 yıllarında yapılan sondajlar neticesinde, 2 milyar ton olan %24-35 ( $B_2O_3$ ) içerikli bor rezervlerimiz 1,3 milyar ton artarak 3,3 milyar ton’a çıkartılmıştır (Anonim 2019a)

**Çizelge 2.4.** Türkiye’de bulunan bor tesislerin üretim miktarları (Durmuş 2016)

Üretim Yapılan İşletme	Mineraller	Üretim miktarı (ton/yıl)
Bandırma	Boraks dekahidrat	115 000
	Sodyum Perborat	35 000
	Bor Oksit	2 000
	Borik Asit	95 000
Emet		240 000
Kırka	Boraks Pentahidrat	840 000
	Boraks Dekahidrat	80 000
	Kalsine Tinkal	5 000
Kestelek	Konsantre Kolemanit	100 000
Bigadiç	Öğütülmüş kolemanit	300 000

### 2.1.2.a. Bigadiç tesisi

Balıkesir’in Bigadiç ilçesi sınırları içerisinde bor üretimi yapmak amacıyla 1976 yılında Eti Maden Bigadiç Tesisi kurulmuştur (Şekil 2.4). Gerekli tesislerin inşaatı ile 1980 yılında ilk bor minerali üretimi gerçekleştirmiştir. Ticari öneme sahip öğütme esasına dayanan bor minerali üretimi yapan Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü, kolemanit ve üleksit mineralleri üretimini gerçekleştirmektedir (Eti Maden 2019).

**Şekil 2.4.** Bigadiç bor yatağı ve üretim tesisi (Eti Maden 2019)

### 2.1.2.b. Kestelek tesisi

Bursa ilinin Mustafa Kemal Paşa ilçesi sınırları içerisinde ilçe merkezinin güneydoğusunda yer alan Kestelek Bor yataklarında (Şekil 2.5), çoğunlukla kolemanit mineralinin yanı sıra eser miktarda hidroborasit, probertit ve üleksit bulunmaktadır. Yatağın bünyesinde %29,4 oranında  $B_2O_3$  bulunmaktadır (Özpeker 2002; Güyagüler 2001; DPT 1995). İşletme açık ocak olarak üretim sistemini kullanmakla birlikte yataktan elde edilen cevherin öğütülmesi ile ticari ürün elde edilmektedir (Eti Maden 2019).



Şekil 2.5. Kestelek bor yatağı (Anonim 2019b)

### 2.1.2.c. Kırka tesisi

Kırka Bor İşletmesi, Eti Maden Holding'e bağlı Eskişehir ili sınırlarında bulunan işletmedir. İşletmede ticari bor üretimi için üç bölüm kurulmuştur. Bunlar; çözme, kristallendirme ve kurutma-ergitme kısımlarıdır. Şekil 2.6'de işletmeye ait tesisler görülmektedir.



Şekil 2.6. Kırka bor yatağı ve üretim tesisi (Eti Maden 2019)

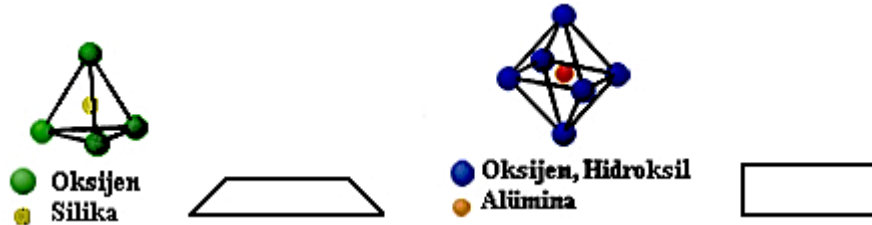


### 2.1.3. Bor atıkları

Ülkemizde bor üretimi esnasında her yıl ortalama 600 bin ton atık malzeme oluşmaktadır (Demir ve Orhan 2002). Bor üretim tesislerinde çoğunlukla şlam ve atık kil pestili olarak adlandırılan iki tür atık oluşmaktadır. Bor üretimi esnasında yıkama işlemi sonucunda kil malzemenin hakim olduğu atık maddeler bünyesinde yaklaşık %13-15 oranlarında değişen  $B_2O_3$  içermektedir (Kurttepli 2006). Her iki atık türünün içeriklerinde bu kadar yüksek  $B_2O_3$  bulunmasına karşın,  $MgO$ ,  $CaO$  ve  $SiO_2$  ile birlikte çok az miktarda  $SrO$ ,  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$ 'da mevcuttur. Bu atıklar daha önce çevresel sorunlar göz ardı edilerek doğaya bırakılmakta iken günümüzde gerekli önlemler alınarak atıklardan yararlanma yoluna gidilmiş, bunun mümkün olmadığı durumlarda ise uygun yöntemlerle bertaraf edilmesi üzerinde durulmuştur (Bentli vd 2002).

### 2.2. Killer

Jeotermal etkiler sonucunda kayaçların kimyasal olarak ayrışması ile oluşan killer yeryüzünde geniş bir alanda yer almaktadır. Genellikle kil daneleri  $2\ \mu m$ 'den daha küçük olduklarından ancak elektron mikroskobu ile görülebilmektedir.  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  bileşiklerin önemli oranda barındıran killer, geoteknik mühendisliği alanında düşük geçirimsizlik ve yüksek adsorbsiyon özelliklerinden dolayı sıkça kullanılmaktadır. Daha çok düzenli atık depolama alanlarında geçirimsiz şilte olarak, baraj çekirdeklerinde ve yol dolgularında kullanılabilir.



Şekil 2.7. Kili oluşturan minerallerin şemantik gösterimi (Mitchell and Soga 2005)

### 2.2.1. Killerin sınıflandırılması

Killerin, mineral yapısının çok çeşitli ve kompleks olması, bünyelerinde diğer maddelerin varlığı, oluşum yeri ve sürecinin farklı olması nedeniyle birçok sınıflandırma sistemi kullanılmaktadır. Killerin sınıflandırma şekli ve bu sınıflandırmaya giren kil grupları Çizelge 2.5’de belirtilmektedir.

**Çizelge 2.5.** Kil gruplarının sınıflandırılması (Malayoğlu ve Akar 1995)

Sınıflandırma Özelliği	Kil grupları
<b>Mineroloji</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaolin</li> <li>• Smektit (Montmorillonit)</li> <li>• Mika</li> <li>• Klorit</li> <li>• İllit</li> <li>• Attapulgit</li> </ul>
<b>Kimyasal Yapı</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amorf</li> <li>• Kristal</li> </ul>
<b>Kimyasal İçerik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek alüminyum</li> <li>• Boksit</li> <li>• Silikat</li> <li>• Demir</li> <li>• Kalsit</li> <li>• Karbonat</li> </ul>
<b>Fiziksel Özellik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plastik özelliğine</li> <li>• Tane boyutuna</li> <li>• Refrakter özelliğine</li> <li>• Renk özelliğine</li> </ul>

Kil mineralleri temel olarak 4 gruba ayrılmaktadır. Bunlar illit, montmorillonit, kaolinit ve klorittir. Tabaka yapılarına göre bazı kil mineralleri ve yapısal özellikleri Çizelge 2.6’da verilmiştir.

**Çizelge 2.6.** Kil minerallarının tabaka yapıları ve yapısal özellikleri (Cernica 1995; Mitchell and Soga 2005)

Kil Minerali	Tabaka Sayısı	Yapısal Gösterimi	Kimyasal Formülü
<b>Kaolinit</b>	1:1		$(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$
<b>İllit</b>	2:1		$(OH)_4Ky(Al_4Fe_4Mg_4)$ $(Si_8-yAl_y)O_{20}$ (y:1'den 1,5'e kadar değer alabilir)
<b>Montmorillonit Smektit</b>	2:1		$(OH)_4Al_4Si_8O_{20}.nH_2O$
<b>Klorit</b>	2:1:1		2:1 tabakası: $(OH)_4(SiAl)_8(Mg.Fe)_6O_{20}$ Aratabaka: $(MgAl)_6(OH)_{12}$

### 2.2.2. Killerin elektrokinetik özellikleri

Killer, elektrokinetik aktiviteleri olan maddelerdir (Önalp 2013). Yüzeylerinde bulunan yüklerden dolayı oluşan kuvvetler (Van der Waals) etkisinde hareketlerini sağlamaktadırlar. Su ile etkileşime giren kil danelerinin sahip oldukları elektriksel yükler

nedeniyle su molekülleri danelerin yüzeyine yapışmaktadır. Değişen elektriksel yüklerin yeniden dengeye gelebilmesi amacıyla katyonlar yüzeyden birbirlerinden ayrılma eğilimine girmektedir. Bu durum yüzeysel katyonların sıvı içerisine doğru hacimsel büyüme gerçekleştirir. Bu alana çiftli tabaka yada double layer adı verilmektedir. Yük değiştirme kapasiteleri incelenirse kaolinler, düşük yük değiştirme kapasitesine sahipken, smektitler yüksek yük değiştirme kapasitesine sahiptir (Çelik 2004). Çizelge 2.7’de kil minerallerine ait bazı elektrokinetik özellikler görülmektedir.

**Çizelge 2.7.** Kil minerallerine ait elektrokinetik özellikler (Önalp 2013)

<b>Kil Minerali</b>	<b>Özgül Yüzey</b>	<b>Katyon Değişim Kapasitesi (meq/100g)</b>
<b>Kaolinit</b>	10,0 - 20,0	3,0 - 10,0
<b>İllit</b>	80,0 - 100,0	20,0 - 30,0
<b>Montmorillonit</b>	800,0	80,0 – 120,0
<b>Klorit</b>	80,0	20,0 – 30,0

### 2.2.3. Killerin fiziksel ve mekanik özellikleri

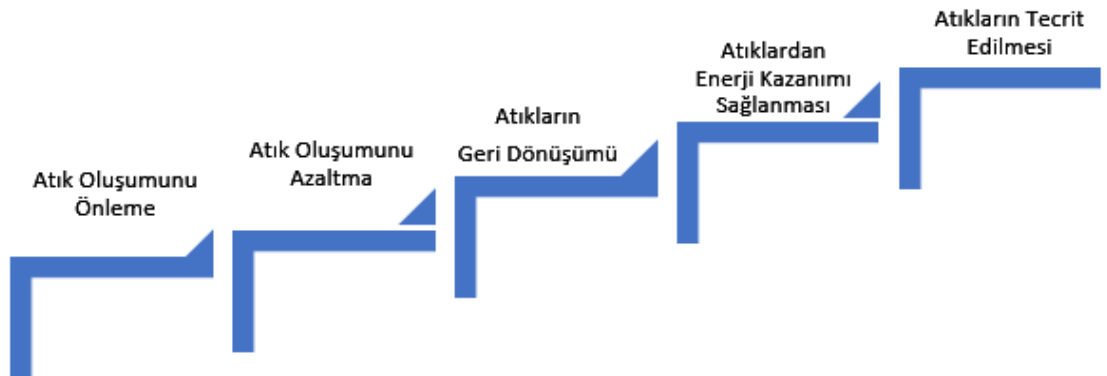
Zeminde kil oranı artıkça daha yüksek plastisite, şişme kapasitesi ve büzülme artışı meydana gelir. Bu nedenle incelemeye tabi tutulan zeminin sınıfının belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Bu durumda ince taneli zeminleri tanımlamak ve sınıflandırmak için Atterberg limitleri kullanılmaktadır. Böylece incelenmekte olan zeminin mekanik özellikleri üzerine tahminde bulunulabilmektedir (Mitchell and Soga 2005).

Mühendislik faaliyetleri sırasında kil minerali grubu büyük önem taşımaktadır. Uygulanması planlanan kimi faaliyetlerde kil minerali çok iyi özellik taşıırken bazı durumlarda bu durum tam tersi olarak ortaya çıkabilmektedir. Partikül boyutu, kristalleşme derecesi, pH değeri, adsorbe edilen katyonların türü, organik maddelerin varlığı ve boşluk suyunda yer alan serbest elektrolitlerin yüzdesi önemli parametrelerdir (Mitchell and Soga 2005).

### 2.3. Düzenli Katı Atık Depolama Tesisleri ve İzolasyonları

Tüzel veya gerçek kişilerin üretim ve tüketim sonrası ortaya çıkan, düzenli bir şekilde tecrit edilmesi gereken katı veya katıya dönük maddeler katı atık olarak adlandırılmaktadır. Teknolojik gelişmeler neticesinde endüstriyel alanlarda hızlı üretim yapılması ve nüfus artışına bağlı olarak atık miktarları gün geçtikçe katlanarak artmaktadır. Bu artış sadece miktar olarak değil atıkların cinsi, fiziki yapısı ve kimyasal yapılarında da meydana gelmektedir. Bu durum katı atıkların izole edilerek tecrit edilmesi hususunda önem arz etmektedir. Olumsuz çevresel etkilerin ortadan kaldırılması için dikkatli, düzenli ve uzun süre dayanıklılık gösterecek izolasyon işlemi büyük önem taşımaktadır. Bu işlem için en çok tercih edileni depolama alanları kurmaktır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2014).

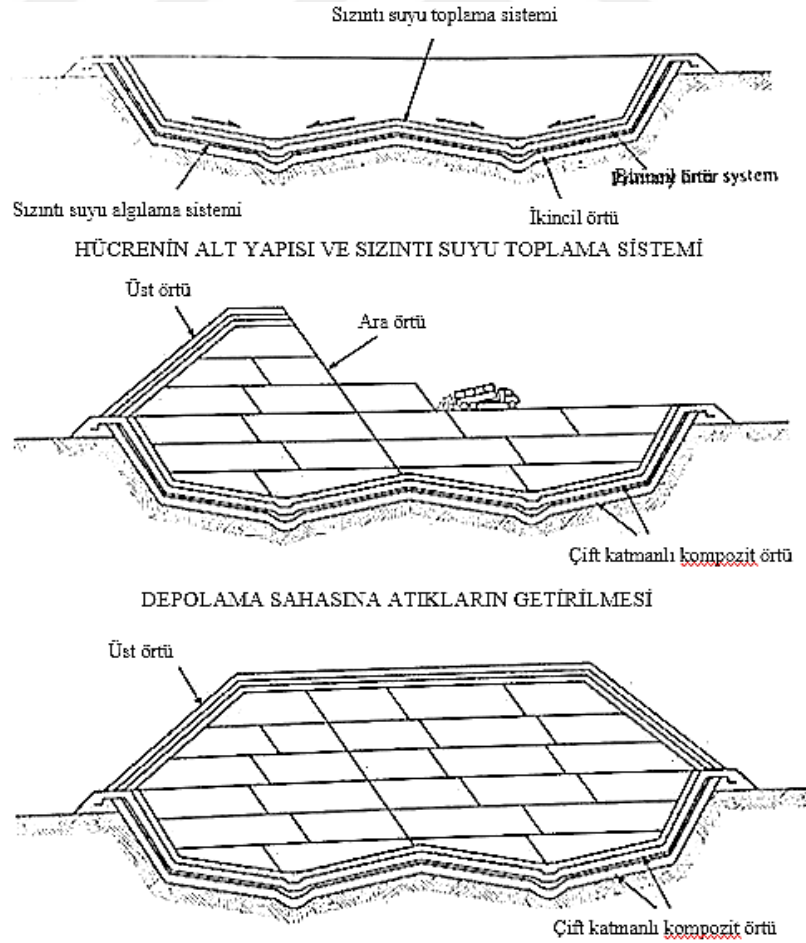
Atık malzemelerin değerlendirilmesi veya tecrit edilmesi hususunda öncelikli istek atıkların oluşumunu engellemek veya azaltılmasını hedef edinmektir. Eğer atıkların oluşumu önlenemiyor ise yeniden kullanılma olanağının araştırılması, bunun mümkün olmaması halinde geri dönüşümünün sağlanması, bu durum da mümkün değil ise atıktan başka yollarla fayda sağlanması düşünülmelidir. Bahsi geçen değerlendirme imkanlarının hiçbiri mümkün değilse depolama alanlarında tecritinin sağlanması gerekmektedir (Ulutaş 2015). Atıklar üzerinde planlamaların sistemsel olarak düşünülmesi gereken basamaklar Şekil 2.8’de belirtilmektedir.



Şekil 2.8. Atık yönetimi şeması (Parker 2010)

Ülkemizde her yıl yaklaşık 9,3 milyon ton atık oluşmaktadır. Bu atıklar çeşitli yöntemler kullanılarak çevreye zararsız hale getirilmektedir. Bu berteraf yöntemlerinden en yaygın kullanılan depolama yöntemi, bir dizi sorunu da beraberinde getirmektedir. Depolama alanlarının en önemli problemlerden biri izolasyon problemleridir. İzolasyonun iyi yapılmaması halinde depolama alanlarında oluşan farklı kimyasal özelliklere sahip sızıntı sularının dolaylı veya doğrudan yeraltı ve yerüstü sularına karışması tehlikesi doğmaktadır ( T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2010).

Katı atık depolama tesislerinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlar, geçirimsiz temel, oluşan sızıntı suyunun uygun yollarla uzaklaştırılması, oluşan gazların kontrolü olarak sayılabilir (Tahtasızoğlu 2010). Şekil 2.9’da verilen görselde depolama alanlarına ait yapılabilecek sistemlerin şematik görünümü verilmektedir.



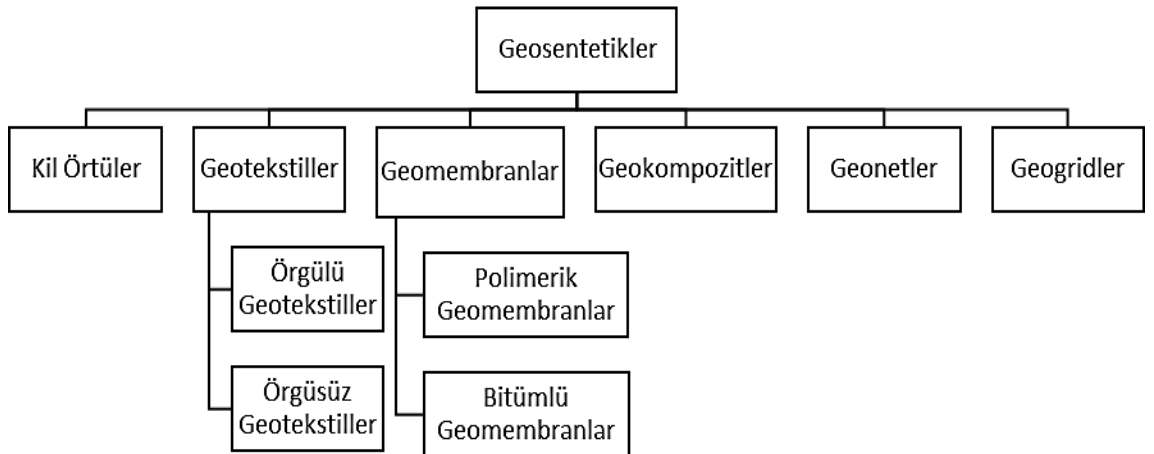
**Şekil 2.9.** Düzenli depolama alanlarında yapılabilecek sistemler (Qian *et al.* 2002)

### 2.3.1. Sızıntı suyu yönetimi

Katı atık depolama alanlarında çeşitli inorganik ve organik kimyaya sahip maddelerin bulunduğu sızıntı suyu oluşmaktadır. Oluşan bu sızıntı sularının doğal su kaynaklarına veya çevreye karışması halinde ortaya çok ciddi sorunlar çıkabilmektedir. Bu nedenle büyük oranda çevresel kirlilik riski barındıran sızıntı sularının depolama alanlarından çevreye sızmasının önlenmesi gerekmektedir. Katı atık depolama alanlarında gerçekleştirilen geçirimsiz şilte uygulamaları ile sızıntı sularının yeraltı sularına karışması ve çevreye zarar vermesi önlenebilmektedir.

### 2.3.2. Geçirimsiz tabaka

Günümüz katı atık depolama alanları, atıkların izolasyonu sağlanarak çevresel etkilerinin minimuma indirilmesi amaçlanarak tasarlanmaktadır. Bu durumda geçirimsiz tabaka özellikleri büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle depolama alanı planlanan sahalarda öncelikli olarak yapılması gereken bölüm geçirimsiz tabakanın ve drenaj sisteminin oluşturulmasıdır. Geçirimsiz tabakalar belirli özellikte kil, geomembran, geosentetik kil ve/veya bunların kombinasyonlarından oluşmaktadır. Kullanılmakta olan geçirimsiz tabakaların genel adı geosentetik bariyerlerdir (Ulutaş 2015). Şekil 2.10'da geosentetiklerin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.10. Geosentetiklerin sınıflandırılması (Rawal *et al.* 2010)

Geosentetik kil örtüler (GCL) sandviç modeli uygulanarak iki geotekstil arasına bentonit sıkıştırılması esasına dayanmaktadır. Geosentetik kil örtülerde kullanılan bentonit çeşitleri; kalsiyum bentonit ve sodyum bentonit, toz veya granül halinde kullanılabilir.

Ülkemizde 5393 sayılı ve 03.07.2005 tarihli Belediye Kanunu'na ek 14 maddesi uyarınca katı atıkların bertaraf edilmesi hususları belirtilmektedir. ADDDY (2010) uyarınca katı atıkların türüne göre uygun depo tabanı teknik tasarımlarının yapılması gibi birçok tekniklerin uygulanması üzerine kurallar bulunmaktadır.

Yönetmeliğe göre geçirimsiz tabakanın özellikleri Çizelge 2.8'de belirtilen kalınlık ve geçirimsizlik özelliklerine sahip olması istenmektedir.

**Çizelge 2.8.** Depolama alanların niteliğine göre geçirimsiz şilte gereklilikleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2010)

Düzenli Depolama Tesis Sınıfı	Nitelik	Olması Gereken Geçirimsiz Tabaka Özellikleri	
		Minimum Geçirimsizlik katsayısı (m/s)	Minimum Kalınlık (m)
I. sınıf	Tehlikeli atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis	$1,0 \times 10^{-9}$	5,00
II. sınıf	Belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis	$1,0 \times 10^{-9}$	1,00
III. sınıf	İnert atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis	$1,0 \times 10^{-7}$	1,00



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında deneylere tabi tutulan materyaller bu bölümde verilmiştir. Çalışma kapsamında, Bigadiç, Kırka ve Kestelek bor yataklarındaki cevherlerin işlenmesi sonucunda ortaya çıkan bor atığı kil pestilleri ve Erzurum-Horasan'dan temin edilen doğal kil kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Kestelek atık kil pestili (KS)

Tez çalışması kapsamında kullanılan atık pestillerden ilki Eti Maden Kestelek Bor İşletmesi Müdürlüğü bünyesindeki bor maden ocaklarından getirilmiştir. Kestelek atık kil pestilinin (KS) dane birim hacim ağırlığı  $24,82 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir (ASTM D 854). Şekil 3.1'de Kestelek atık kil pestili görülmektedir.

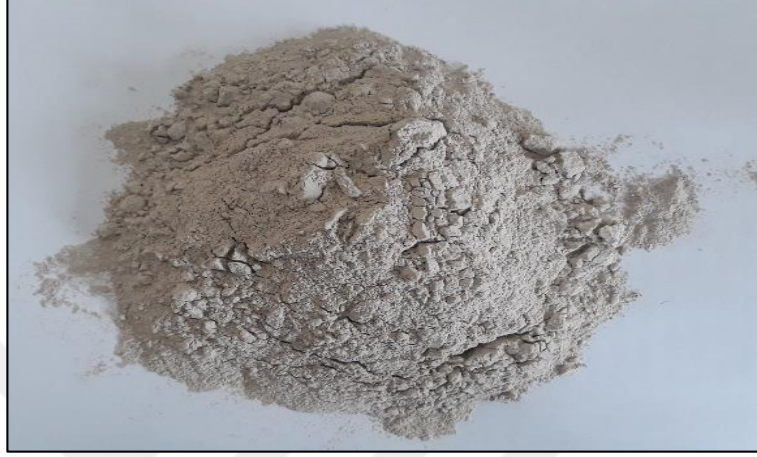


Şekil 3.1. 40 nolu elekten elenen Kestelek atık kil pestili

##### 3.1.2. Bigadiç atık kil pestili (BG)

Çalışmada kullanılan olan diğer atık kil pestili Eti Maden Bigadiç Bor İşletmesi Müdürlüğü'ne bağlı faaliyetini sürdüren ocaktan getirilmiştir. Yapılan piknometre

deneyi ile dane birim hacim ağırlığı  $25,80 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Şekil 3.2’de 40 no’lu elekten elenen Bigadiç atık kil pestili (BG) görülmektedir.



**Şekil 3.2.** 40 nolu elekten elenen Bigadiç atık kil pestili

### **3.1.3. Kırka atık kil pestili (KR)**

Çalışma kapsamında kullanılan üçüncü bor atık kil pestili, Eti Maden Kırka Bor İşletmesi Müdürlüğü ocaklarından temin edilmiştir. Kırka bor atık kil pestilinin (KR) dane birim hacim ağırlığı ASTM D 854’e göre  $24,33 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. 40 no’lu elekten elenen Kırka atık kil pestili Şekil 3.3’de görülmektedir.



**Şekil 3.3.** 40 nolu elekten elenen Kırka atık kil pestili

### 3.1.4. Doğal kil (D)

Çalışma kapsamında deneylere tabi tutulan doğal kil numunesi (D) Erzurum-Horasan Kırkgözeler köyü mevkiinden temin edilmiştir. Doğal kil etüvde (105°C) kurutulup Los Angeles Aşındırma Cihazı'nda öğütülmüş, 40 nolu elekten elenerek deneylerde kullanılmıştır. Dane birim hacim ağırlık değerleri ASTM D 854'e göre belirlenmiştir. Doğal kilin dane birim hacim ağırlığı 28,35 kN/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4'de doğal kil görülmektedir.



Şekil 3.4. 40 nolu elekten elenen doğal kil

## 3.2. Yöntem

Deneyler ve analizlere tabii tutulacak numunelerin hazırlanışı, deney prosedürü ve analizler bu bölümde sunulmuştur.

### 3.2.1. Doğal kil, atık kil pestilleri ve katkılı numunelerin hazırlanışı

Çalışma kapsamında doğal kil ve atık kil pestilleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda etüvde (105 °C) kurutularak Los Angeles aşındırma cihazında öğütülmüştür (Şekil 3.5).



a



b

**Şekil 3.5.** Numune hazırlamada kullanılan etüv (a), Los Angeles aşındırma cihazı (b)

Öğütülen numuneler elek sarsma cihazı yardımıyla 40 nolu elekten elenerek hazırlanmıştır (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6.** Elek sarsma cihazı ve 40 nolu elek

Atık kil pestili katkılı kil numuneler elde edilirken ağırlıkça belirli yüzdelerde atık kil pestili, doğal kile kuru halde karıştırılmıştır. Katkılı numuneler elde edilirken kullanılan yüzdeler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Atık kil pestili katkılı numuneler

Numune Kodu	Numune İçeriği	Kullanılan Oranlar			
		Kestelek atık kil pestili (%)	Bigadiç atık kil pestili (%)	Kırka atık kil pestili (%)	Doğal Kil (%)
<b>D</b>	Doğal kil	-	-	-	100
<b>DKS10</b>	Doğal kil+% 10 Kestelek atık kil pestili	10	-	-	90
<b>DKS30</b>	Doğal kil+% 30 Kestelek atık kil pestili	30	-	-	70
<b>DKS50</b>	Doğal kil+% 50 Kestelek atık kil pestili	50	-	-	50
<b>DKS70</b>	Doğal kil+% 70 Kestelek atık kil pestili	70	-	-	30
<b>KS</b>	Kestelek atık kil pestili	100	-	-	-
<b>DBG10</b>	Doğal kil+% 10 Bigadiç atık kil pestili	-	10	-	90
<b>DBG30</b>	Doğal kil+% 30 Bigadiç atık kil pestili	-	30	-	70
<b>DBG50</b>	Doğal kil+% 50 Bigadiç atık kil pestili	-	50	-	50
<b>DBG70</b>	Doğal kil+% 70 Bigadiç atık kil pestili	-	70	-	30
<b>BG</b>	Bigadiç atık kil pestili	-	100	-	-
<b>DKR10</b>	Doğal kil+%10 Kırka atık kil pestili	-	-	10	90
<b>DKR30</b>	Doğal kil+%30 Kırka atık kil pestili	-	-	30	70
<b>DKR50</b>	Doğal kil+%50 Kırka atık kil pestili	-	-	50	50
<b>DKR70</b>	Doğal kil+%70 Kırka atık kil pestili	-	-	70	30
<b>DKR</b>	Kırka atık kil pestili	-	-	100	-

### 3.2.2. Dane birim hacim ağırlık deneyi

Numunelerin dane birim hacim ağırlıkları ASTM D 854'e göre belirlenmiştir. Yöntemde, piknometre adı verilen cam şişe damıtık su ile içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde doldurularak 0,001 gr hassaslıktaki terazide tartılmakta ( $M_1$ ), daha sonra bir miktar zemin numunesi tartılarak ( $M_k$ ), piknometre şişesine kayıpsız bir şekilde aktarılıp karışımın içerisinde hava boşluğu kalmayana dek vakum, karıştırma, sallama gibi işlemler yoluyla karışımındaki hava boşlukları dışarı atılmaktadır. İçerisinden hava boşlukları uzaklaştırılmış karışım hassas terazide tartılarak ( $M_2$ ),

$$\gamma_s = M_k / [(M_k - (M_2 - M_1))] \quad (3.1)$$

bağıntısından zeminin dane birim hacim ağırlığı hesaplanmaktadır (Uzuner 2014). Şekil 3.7'de dane birim hacim ağırlığı deneyinin yapılışı görülmektedir.

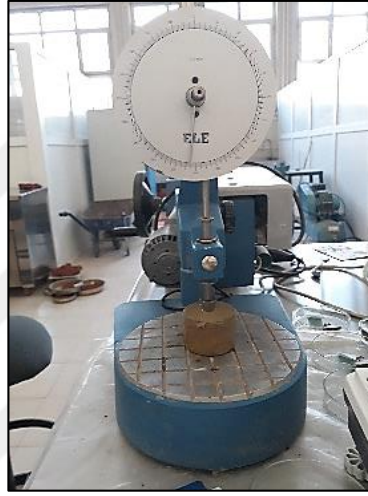


Şekil 3.7. Dane birim hacim ağırlık deneyi

### 3.2.3. Kıvam limitleri deneyleri

Doğal kil, atık kil pestilleri ve atık kil pestili katkılı kil numuneler üzerinde düşen koni penetrometre metodu ile likit limit (BS 1377), ve plastik limit (ASTM D 4318) deneyleri gerçekleştirilmiştir. 40'nolu elekten elenen numuneler üzerinde önce su ile karıştırılarak yoğurulmuştur. Daha sonra penetrasyon kalıbına yerleştirilip düşen konik uç 5 s boyunca

tutularak batma miktarı ölçülmüştür. Bu işlem 5 kere tekrarlanmıştır. Batma miktarı belirlenen numuneler üzerinde su muhtevası tayini için numuneler alınmış ve bu numuneler etüvde kurutularak su içerikleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler ışığında yatayda su içeriği düşeyde batma miktarı olacak şekilde grafik çizilmiştir. Çizilen grafikte 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.8’de likit limit deneyinin yapılışı görülmektedir.



**Şekil 3.8.** Likit limit deneyi yapılışı (koni penetrasyon deneyi)

Plastik limit için suyla yoğrularak cam bir yüzey üzerinde el ayası ile silindir haline getirilen numuneler, 3 mm çapında yuvarlanmıştır. Silindir numuneler üzerinde kılcal çatlakların oluşumu gözlenmiş ve bu esnadaki su muhtevası numunelerin plastik limiti olarak alınmıştır.

#### **3.2.4. Standart proktor deneyi**

Numunelere ait kompaksiyon parametreleri olan optimum su muhtevası ( $w_{pot}$ ) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) değerleri, ASTM D 698’e göre yapılan standart proktor deneyi ile belirlenmiştir. Kil numunesine su ilave edilerek yoğrulmuş, 10,2 cm yüksekliğinde ve 11,7 cm çapında metal silindir kompaksiyon kalıbı içerisine her tabakaya 25’er vuruş yapılmak suretiyle üç tabaka halinde sıkıştırma yapılmıştır. Bu işlem kil numunesine su ilave edilerek farklı su içeriklerinde tekrarlanmıştır. Deney

sonucunda yatay ekseninde su muhtevaları, düşey ekseninde kuru birim hacim ağırlıkları yer almak suretiyle çizilen kompaksiyon eğrilerinden numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.9’da Standart proktor deneyi için kullanılan otomatik kompaksiyon aleti görülmektedir.



**Şekil 3.9.** Otomatik kompaksiyon aleti

### **3.2.5. Serbest basınç deneyi**

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan doğal kil, atık kil pestilleri ve atık kil pestili katkılı numunelerden 35 mm çapında 70 mm yüksekliğinde 9’ar adet silindirik numuneler alınmıştır. Numunelerden 3 tanesi hemen kırılırken 3 tanesi 7. gün ve diğer üçü ise 28. günde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. 7. ve 28. gün kırılacak olan numuneler laboratuvar sıcaklığında su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde desikatörde bekletilmiştir. Şekil 3.10’da görülen ELE marka serbest basınç düzeneği kullanılarak düşey yönde 0,8 mm/s hızla yükleme gerçekleştirilmiştir. Yük halkası ile yük ölçülürken, LVDT yardımıyla düşey deplasman değerleri alınmıştır. Serbest basınç deneyi ASTM D 2166 esas alınarak gerçekleştirilmiştir.





**Şekil 3.10.** Serbest basınç deney aleti

### 3.2.6. Şişme basıncı deneyi

Şişme basıncı deneyleri ASTM D 4546 standartına göre zemin numunelerinin bir boyutlu şişme ve oturma potansiyellerini belirlemek için yapılmıştır. Zemin numunesinin şişmesini engellemek amacıyla uygulanan basınç şişme basıncı olup şişme basıncı deneyi aşağıda anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Deneyler ödometre deney aletinde 50 mm çaplı konsolidasyon halkaları kullanılarak yapılmıştır.

Çalışma kapsamında şişme basıncı tayini yapılacak numuneler standart proktor deneyi ile elde edilen optimum su muhtevasında otomatik kompaksiyon aleti kullanılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler ekstra sıkışma ve su muhtevası kaybı olmamasına özen gösterilerek 50 mm çap, 20 mm yüksekliğe sahip ödometre halkasına alınmıştır. Alınan numuneler alt ve üst yüzeylerine süzgeç kağıdı ve poroz taş yerleştirilip okuma saati ve deney aletinin gerekli düzenlemeleri yapılmıştır. Okuma saati değeri sıfırlanarak hücreye su ilavesi yapılmıştır. Deneye tabii tutulan numunenin şişmesini engelleyecek şekilde yükler konularak okuma saatinin sıfır olarak kalması sağlanmıştır. Düşey şekil değiştirmenin sıfır olacağı yük miktarına kadar deneye devam edilerek deney sonucunda belirlenen yükün 12 saat boyunca takibi yapılarak şişme basıncı kontrol edilmiştir. Şekil 3.11’de ödometre deney aletinde şişme basıncı deneyinin yapılışı görülmektedir.



**Şekil 3.11.** Ödometre cihazı

### 3.2.7. Geçirimlilik deneyi

Geçirimlilik deneyleri düşen seviyeli geçirimlilik deney düzeneği kullanılarak ASTM D 5856' ya göre gerçekleştirilmiştir. Bir zeminin geçirimliliği, içinden sıvı geçebilme kapasitesinin ölçümüdür. Numunelerin geçirimlilik katsayılarının belirlenmesi için standart kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen optimum su muhtevaları değerlerinde geçirimlilik kalıbına sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Zemin numuneleri doygun hale geldikten sonra çeşitli zaman aralıklarında okumalar alınmıştır. Zeminin geçirimlilik (permeabilite ) katsayısı (k); Eşitlik 3.2 ile bulunmuştur.

$$k = \frac{axL}{Axt} \ln \frac{H_0}{H_1} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de, a; cam borunun kesit alanı, L; zemin içinden geçen suyun akış yolu uzunluğu, A; zemin numunesinin enine kesit alanı,  $H_0$ ; deney başlangıcında cam tüpteki su yüksekliği,  $H_1$ ; deney sonunda cam tüpteki su yüksekliğidir (Uzuner 2014). Şekil 3.12'de geçirimlilik deneyinin yapılışı görülmektedir.



**Şekil 3.12.** Düşen seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği

### 3.2.8. X-Işını diffraksiyon (XRD) analizi

Bir kil mineralinin türü, kilin kristal yapısı ve kil kütlesinin mineralojik yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle inceleme kapsamındaki zeminlerin kimyasal ve mineralojik yapısı X-ray diffraksiyon (XRD) yöntemi ile belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan XRD analizlerinde 0,074 mm'den küçük dane boyutunda öğütülerek 0,6 g olarak tartılarak pellet haline getirilmiş numuneler üzerinde analizler yaptırılmıştır. Analiz sonuçları incelenerek zeminlere ait mineral içerikleri ve kimyasal bileşim yüzdeleri tespit edilmeye çalışılmıştır. XRD Analizleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) Laboratuvarları'nda yaptırılmıştır. Şekil 3.13'de XRD cihazı görülmektedir.



**Şekil 3.13.** X-Işını diffraksiyon (XRD) analiz cihazı

### 3.2.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Doğal kil, atık kil pestilleri ve katkılı kil numunelerin yapısal özelliklerini tespit etmek amacıyla Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) Laboratuvarları'nda taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yaptırılmıştır. Analiz öncesi numuneler uygun prosedür kullanılarak altın kaplanarak iletkenlik özelliği kazandırılmıştır. Şekil 3.14'de SEM analiz cihazı görülmektedir.



**Şekil 3.14.** Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analiz cihazı

### 3.2.10. İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS)

İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS), birden fazla elementin aynı zamanda analiz edebildiği için nitel analiz ve izotop oranlarının ortaya konmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, periyodik cetveldeki elementlerin çoğunun nicel ve yarı-nitel tespitlerinde kullanılmaktadır. Periyodik cetvelde birçok element için, pg-mg/L arasında kalibrasyon grafikleri çizilebilmektedir. Bu farklı derişime sahip birçok elementin aynı anda analizine olanak sağlamaktadır. Söz konusu analiz DAYTAM Laboratuvarları'nda yaptırılmıştır. Şekil 3.15'de ICP-MS cihazı görülmektedir.



Şekil 3.15. İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) cihazı

### 3.2.11. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi

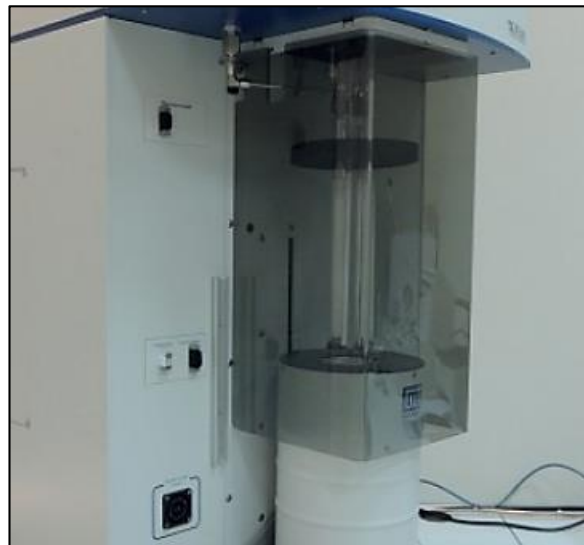
XPS analizi yüzeydeki atomlardan X-ışınına maruz bırakılarak elektron koparılması esasına dayanmaktadır. Elde edilen fotoelektronlar, elektron analizöründe ölçülerek bağlanma enerjileri saptanır. Bu enerji, elementin türüne, koparıldığı orbitale ve elementin kimyasal özelliğine göre değişiklik göstermektedir. XPS analizi ile; metallerin oksidasyon seviyelerinin tespiti, polimerlerin organik, inorganik, malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tespiti yapılabilmektedir. Numunelerin bahsi geçen özelliklerini tespiti için XPS Analizi, DAYTAM Laboratuvarları'nda yaptırılmıştır. Şekil 3.16'da XPS cihazı görülmektedir.



**Şekil 3.16.** X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analiz cihazı

### **3.2.12. Yüzey alanı ölçüm (BET) analizi**

Yüzey alanı ölçüm analizi ile katı veya toz halindeki maddelerin fiziki adsorpsiyon yöntemi esasına dayanarak dane yüzey alanı ölçümü, gözenek boyutu ve dağılımı tespit edilmektedir. Söz konusu analiz, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) Laboratuvarları'nda yaptırılmıştır. Şekil 3.17'de BET cihazı görülmektedir.

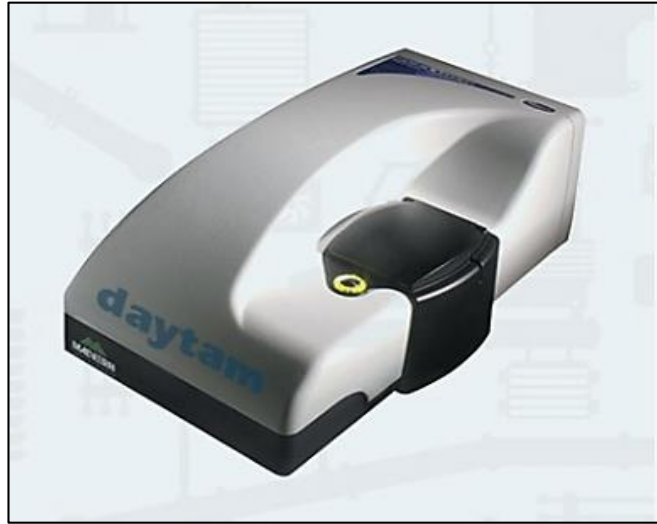


**Şekil 3.17.** Yüzey alanı ölçüm (BET) cihazı

### 3.2.13. Elektrokinetik özellikler

#### Zeta potansiyeli deneyi

Elektriksel çift tabaka ile ilgili bir kavram olan zeta potansiyeli ( $\zeta$ ), daneler arasında etkilenme değerinin ölçümüdür. Belli bir yüke sahip olan dane, karşı yüklü olan iyonları çekerek yüzeyinde güçlü bir bağ oluşturur. Yüklü tanenin yüzeyinden başlayarak dışa doğru yayılmış bir yüzey oluşur. Bu yüzeyin barındırdığı, kayma yüzeyi olarak belirtilen bir hat bulunmaktadır. Yüklü dane ve etrafındaki iyonlar kayma yüzeyi hattına kadar olan kısmı tek bir parça olarak hareket eder. Kayma yüzeyindeki bu potansiyele zeta potansiyeli denilmektedir. Zeta potansiyel dane yüzey yapısı ve içerisinde bulunduğu sıvıdan etkilenmektedir. Danelerin sıvılar içerisindeki davranışı elektriksel yüklerine değil, zeta potansiyeline bağlıdır (Akbulut 2008). Partiküllerin zeta potansiyelleri, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) Laboratuvarları'nda yaptırılmıştır. Şekil 3.18'de Zeta potansiyeli ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 3.18. Zeta potansiyeli ölçüm cihazı

### pH metre ve oksidasyon potansiyometre deneyi

pH, bir çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini 1-14 kadar değer skalası ile belirten ölçü birimidir. pH bir çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini tarif eder. Sulu ortamlarda asitlik ve bazıklığın bir ölçüsü olarak pH'ın kullanımı, bütün bilim dallarında potansiyometrik pH ölçümünü belki de en yaygın analitik teknik haline getirmiştir (Skoog *et al.* 1991). Kil ile katkıların muameleleri sonrasında katkılı ve katkısız numunelerin sulu çözeltilerinin pH'larının bilinmesi kil özelliklerinin değişik pH değerlerinde değişik değerler aldıklarından dolayı önem arz etmektedir. Ayrıca pH'ın yüksek olması zemin bünyesindeki (OH)<sup>-</sup> hidroksitinde bulunan H<sup>+</sup> kationunun zemin suyuna geçişini artırır. Bunun sonucunda da danelerin negatif yükü artar (Mitchell 1976; Akbulut 2008). Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan pH deneyi, Thermo markalı pH metre ile yapılmıştır (Şekil 3.19). Deneyde 0,2 g 200 no'lu elekten elenmiş numune 100 ml damıtık su ile 30 dk boyunca çalkalanarak süspansiyon hazırlanmıştır. Süspansiyon sabit bir pH değerine ulaşmaya kadar okumalar alınmıştır. Aynı okunan pH değeri denge pH olarak kaydedilmiştir. Denge pH'sına ulaşan numune için aynı anda oksidasyon potansiyeli değerleri okunmuştur. Şekil 3.19'da pH metre ve oksidasyon potansiyometre cihazı görülmektedir.



Şekil 3.19. pH metre ve oksidasyon potansiyometre deneyi



### **Katyon değişim kapasitesi (KDK) deneyi**

Bir katyonun aynı değerlikteki başka bir katyon ile veya orijinal katyonun değerliğinin yarısı değerlikte olan iki katyon ile yer değiştirmesine değişebilir katyon denmektedir. Kalsiyum ve Magnezyum, zeminlerdeki en baskın değişebilir katyonlardır. Katyonların değişme kolaylığı başta katyon değerliği olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Yüksek değerlikli katyonlar daha düşük değerlikli katyonların yerini daha kolay almaktadır. Aynı değerlikteki katyonlar için hidratlı katyonların boyutu önem kazanmaktadır (Holtz and Kovaks 1981). Katyonların nicel olarak değişebilirliği, katyon değişim kapasitesi olarak adlandırılır ve genelde 100 gram kuru kildeki miliekivalent (meq) cinsinden ifade edilir (Mitchell 1976).

Numunelerin katyon değişim kapasitesi değerleri, soydum asetatla (1 N, pH=8, 2) muamele edilmesinin ardından amonyum asetatla (1 N, pH=7, 0) ekstrakte edilen örneklerin İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ile belirlenmiştir (Rhoades 1982).

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez kapsamında doğal kil, atık kil pestilleri ve atık kil pestili katkılı kil numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir.

### 4.1. Doğal Kil ve Atık Kil Pestilleri Deney Sonuçları

#### 4.1.1. Dane birim hacim ağırlığı deneyi sonuçları

Doğal kil ve atık kil pestillerinin dane birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin dane birim hacim ağırlıkları

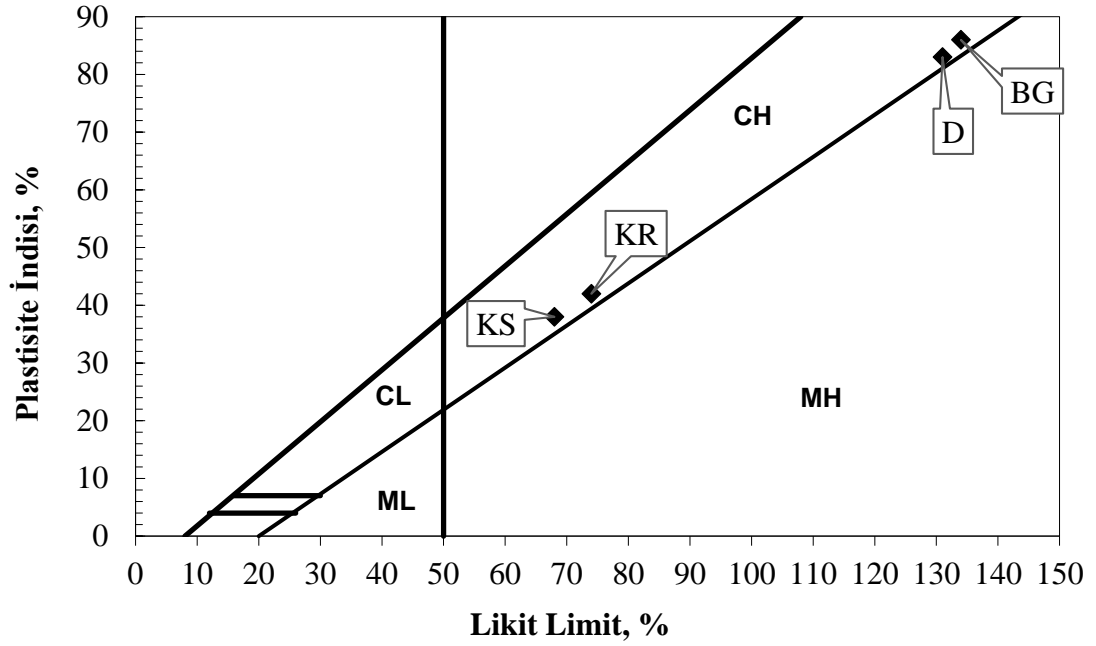
Numune	KS	BG	KR	D
$\gamma_s, \text{kN/m}^3$	24,82	25,80	24,33	28,35

#### 4.1.2. Kıvam limitleri deney sonuçları

Katkısız kil ve atık kil pestilleri üzerinde yapılan kıvam limitleri deney sonuçları Çizelge 4.2’de, numunelerin Casagrande plastisite abağı üzerinde gösterimi ise Şekil 4.1’de verilmiştir. Doğal kil ve atık kil pestillerinin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) zemin sınıfına girdiği görülmüştür.

**Çizelge 4.2.** Doğal kil ve atık kil pestillerine ait kıvam limitleri

Numune	KS	BG	KR	D
Likit limit (%)	68	134	74	131
Plastik limit (%)	30	48	32	48
Plastisite indisi (%)	38	86	42	83
Zemin sınıfı (USCS)	CH	CH	CH	CH



**Şekil 4.1.** Casagrande Plastisite Grafiği'nde doğal kil ve atık kil pestillerinin zemin sınıfları

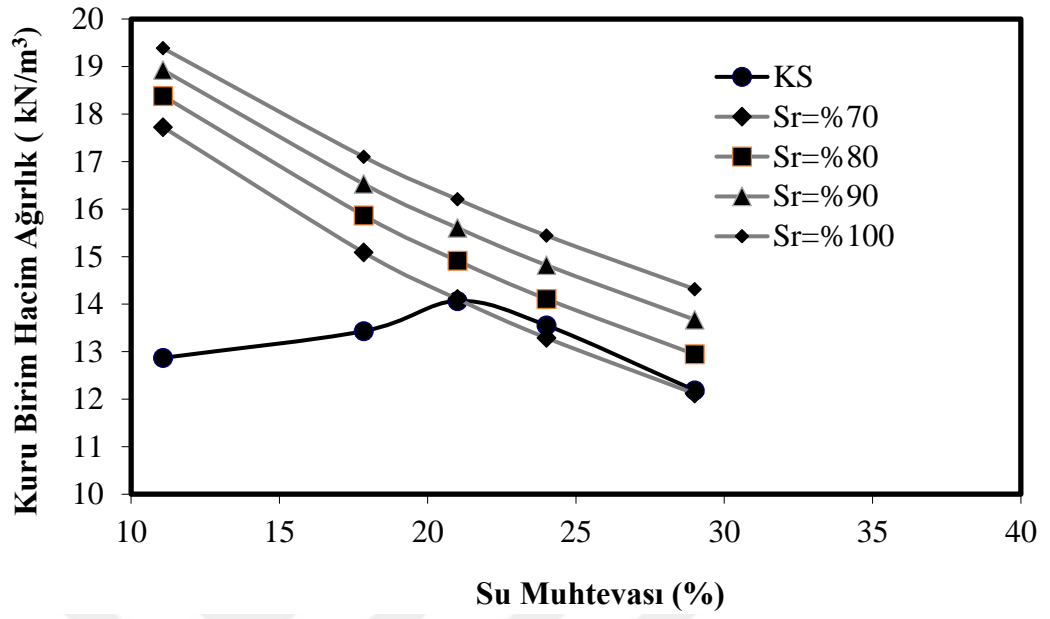
#### 4.1.3. Standart proktor deneyi sonuçları

Doğal kil ve atık kil pestillerinin, standart proktor deneyi sonucunda elde edilmiş olan kompaksiyon parametreleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

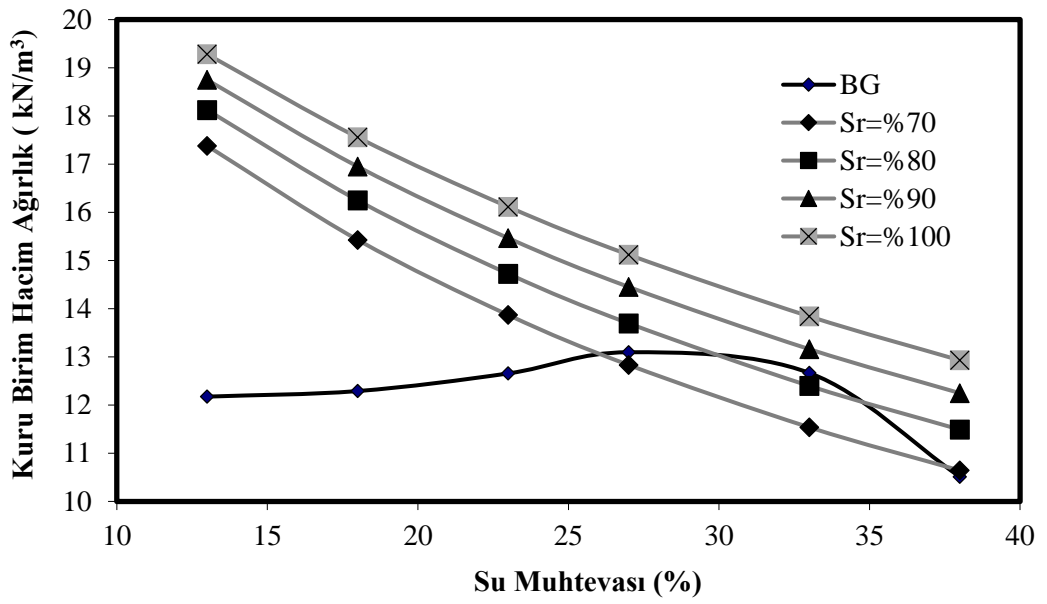
**Çizelge 4.3.** Atık kil pestillerinin ve doğal kilin kompaksiyon parametreleri

Numune	KS	BG	KR	D
$w_{opt}$ , %	21,5	28,0	29,0	30,0
$\gamma_{kmax}$ , $kN/m^3$	14,1	13,2	13,3	13,9

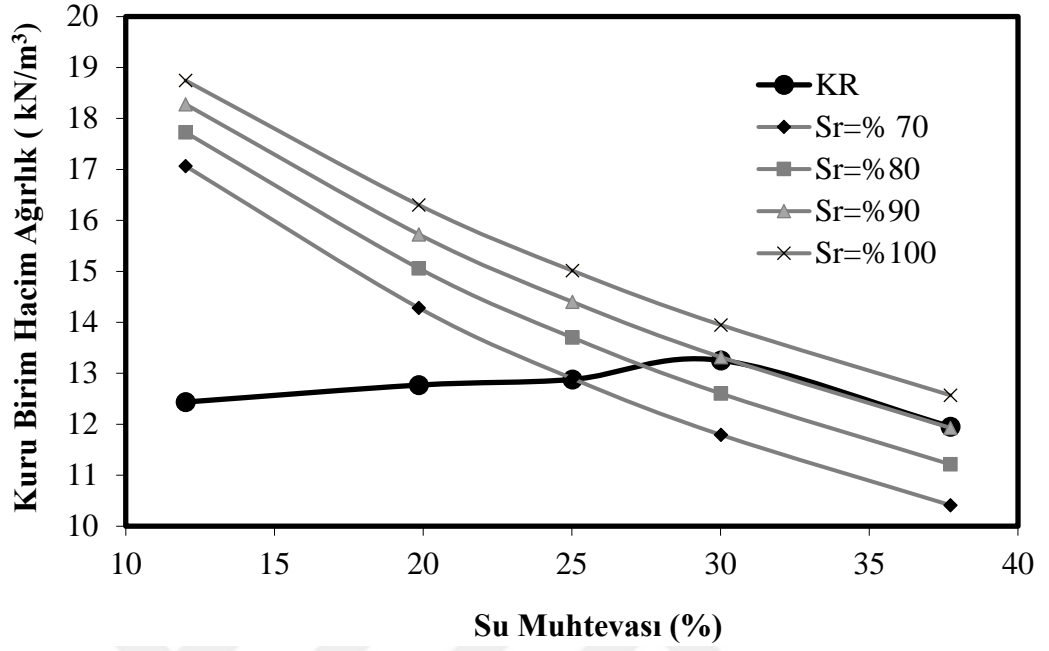
Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de KS, BG, KR ve D numunelerine ait kompaksiyon eğrileri ve doygunluk çizgileri verilmiştir.



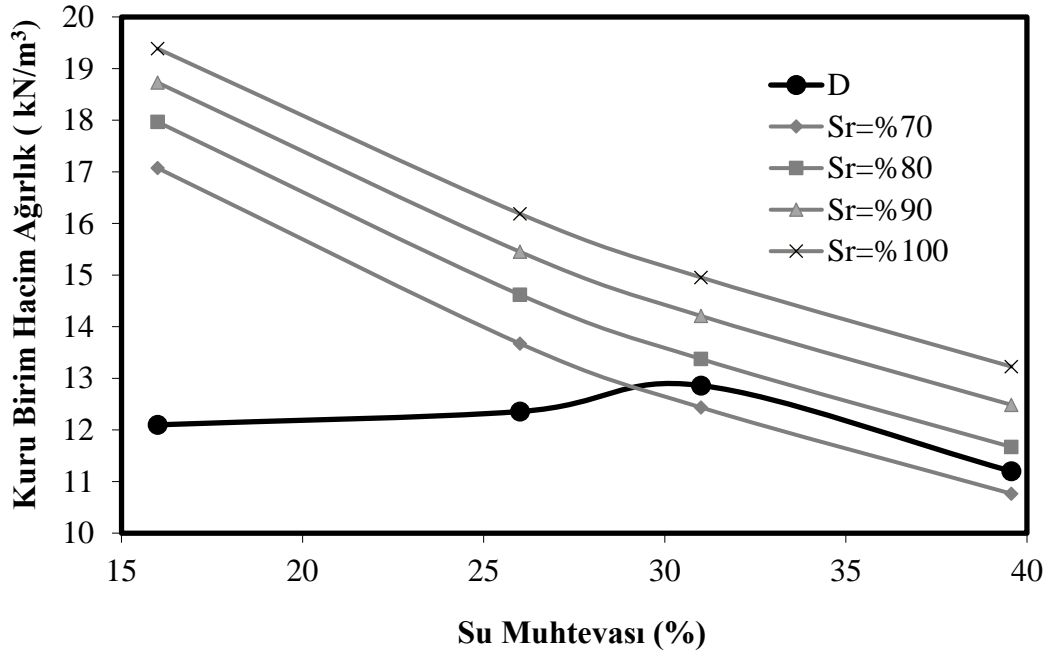
Şekil 4.2. Kestelek atık kil pestiline ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 4.3. Bigadiç atık kil pestiline ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 4.4. Kırka atık kil pestiline ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 4.5. Doğal kile ait kompaksiyon eğrisi

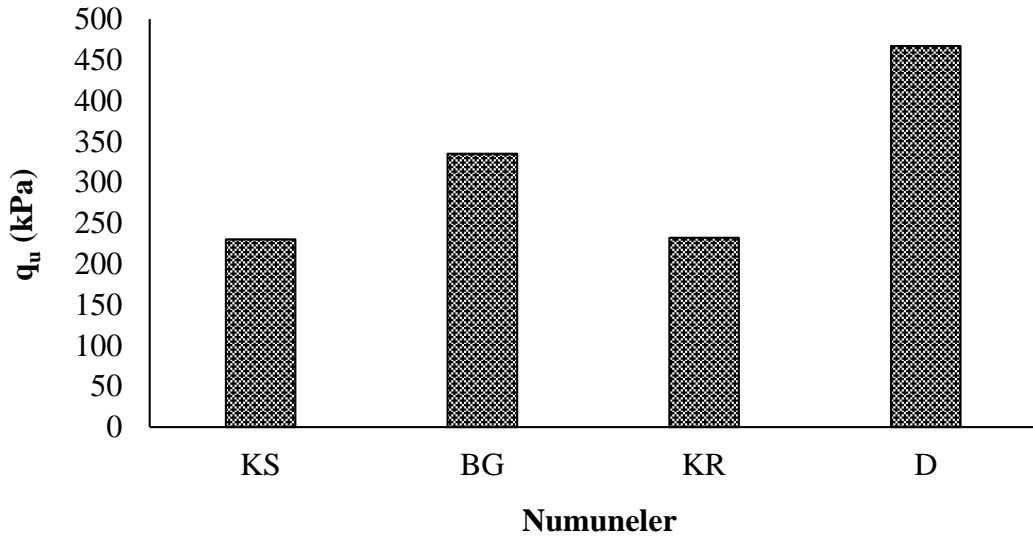
#### 4.1.4. Serbest basınç deneyi sonuçları

Doğal kilin ve atık kil pestillerinin, serbest basınç deneyleri, standart proktor enerjisinde sıkıştırılarak kalıplar yardımıyla çıkarılan örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) değerleri Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3’de verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin serbest basınç mukavemetleri

Numune	KS	BG	KR	D
$q_u$ , kPa	230	335	232	467

Elde edilen veriler incelendiğinde deneye tabi tutulan atık kil pestillerin içerisinde serbest basınç mukavemeti en yüksek olan numunenin Bigadiç atık kil pestiline ait olduğu belirlenmiştir. Doğal kilin atık kil pestillerinden daha yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.6).



**Şekil 4.6.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin serbest basınç mukavemetleri

#### 4.1.5. Şişme basıncı deneyi sonuçları

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen şişme basıncı deney sonuçları Çizelge 4.5'te görülmektedir.

**Çizelge 4.5.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin şişme basıncı değerleri

Numune	KS	BG	KR	D
Şişme Basıncı, kPa	150	443	61	342

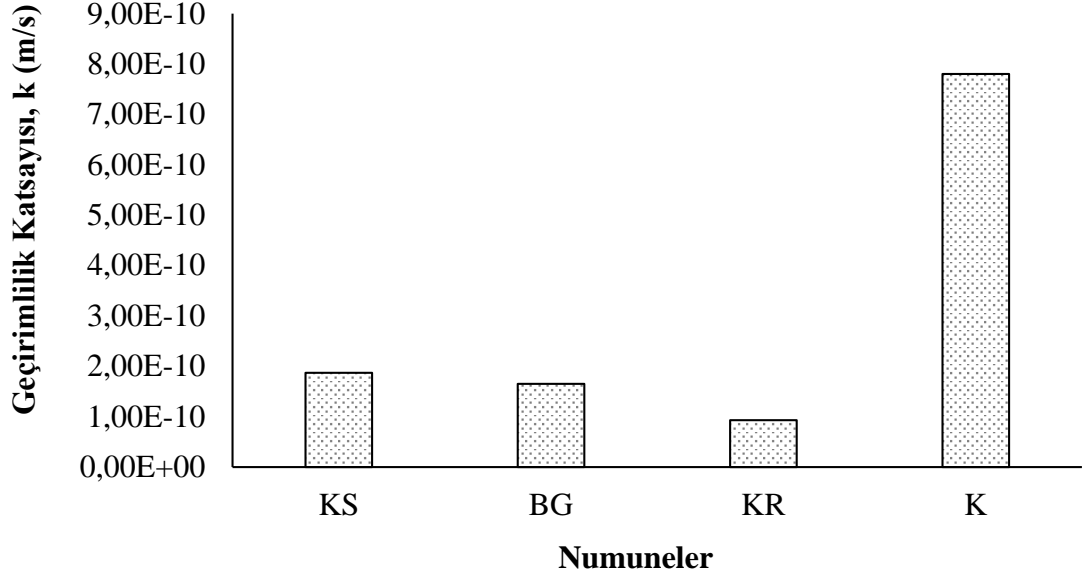
Çizelge 4.5 incelendiğinde atık kil pestilleri arasında en yüksek şişme basıncının Bigadiç atık kil pestilinde olduğu görülmektedir. Doğal kil ise Bigadiç atık kil pestilinin ardından en yüksek şişme basıncına sahip numunedir.

#### 4.1.6. Geçirimsizlik deney sonuçları

Atık kil pestilleri ve doğal kil numunelerinin geçirimsizlik deneyleri optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Doğal kil ve atık kil pestillerinin geçirimsizlik katsayıları Çizelge 4.6 ve Şekil 4.7'de görülmektedir.

**Çizelge 4.6.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin geçirimsizlik katsayısı değerleri

Numune	KS	BG	KR	D
Geçirimsizlik katsayısı, m/s	$1,87 \times 10^{-10}$	$1,65 \times 10^{-10}$	$9,29 \times 10^{-11}$	$7,80 \times 10^{-10}$



**Şekil 4.7.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin geçirimsizlik katsayıları

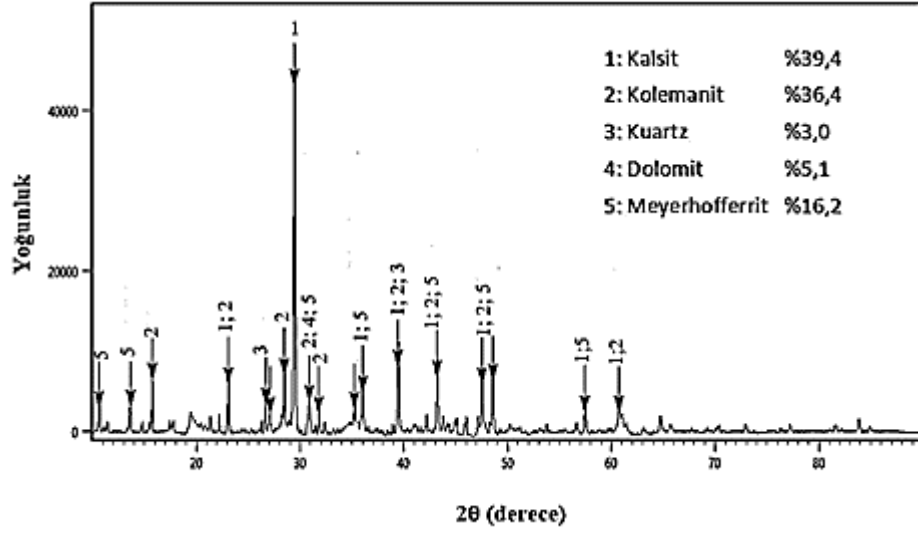
Şekil 4.7 incelendiğinde en az geçirimsizliğe sahip numunenin Kırka atık kil pestili olduğu görülmektedir.

#### 4.1.7. XRD analiz sonuçları

##### 4.1.7.a. Kestelek kil pestilinin (KS) XRD analizi

Kestelek atık kil pestili üzerinde yapılan XRD analizi sonuçlarına göre, baskın mineralin Kalsit olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Kestelek atık kil pestili içerisinde kolemanit, meyerhofferrit, dolomit ve kuartz olduğu tespit edilmiştir. Bu minerallerin yaklaşık bulunma oranları ve XRD grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir.

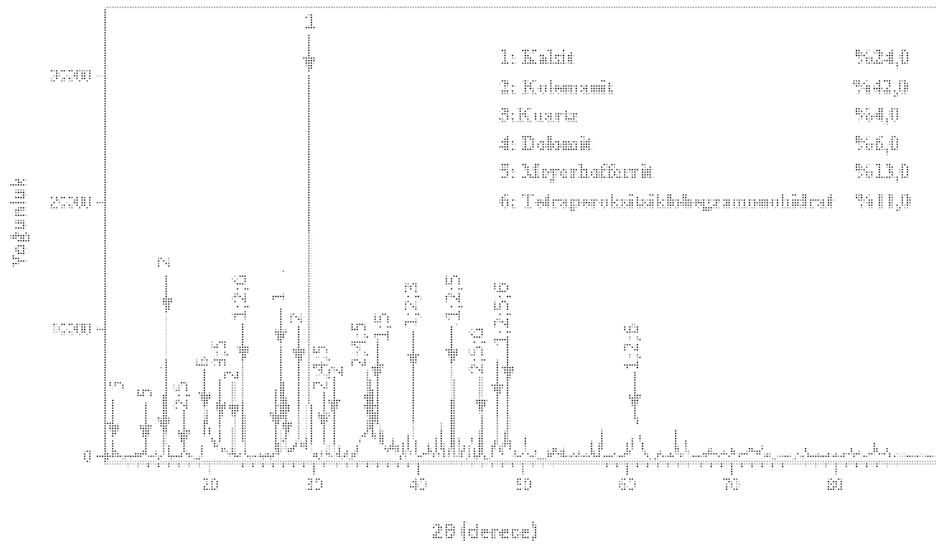




Şekil 4.8 Kestelek atık kil pestilinin XRD grafiği

#### 4.1.7.b. Bigadiç atık kil pestilinin XRD analizi sonuçları

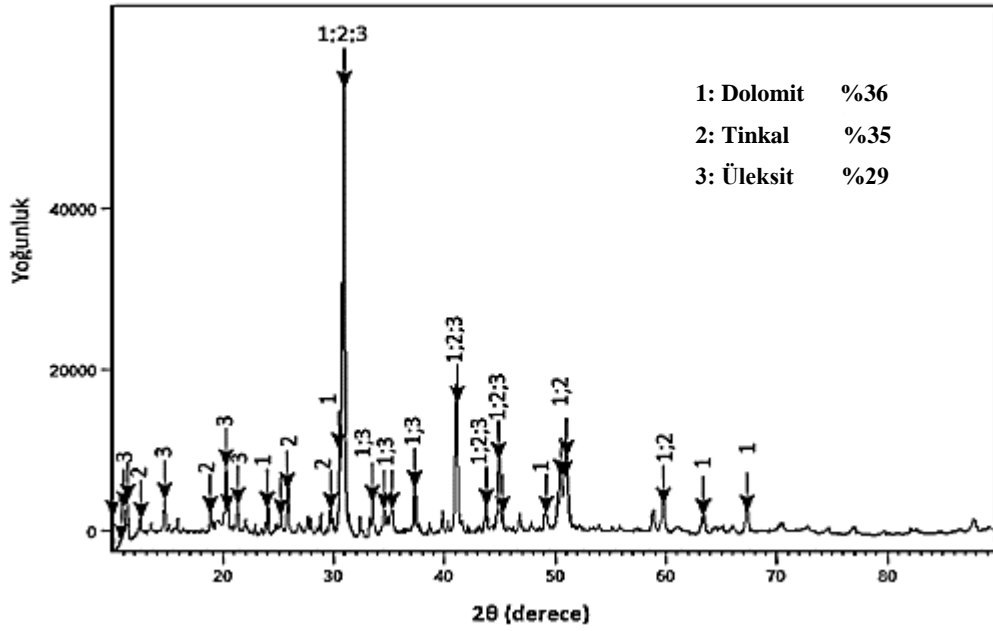
Bigadiç atık kil pestiline yaptırılan XRD analizi ile elde edilen veriler ışığında çizilen pikler ve bu piklerde bulunan mineral oranları Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu bilgiler ile Bigadiç atık kil pestilinin büyük oranda kolemanit içermesinin yanı sıra kalsit, meyerhofferrit, tetraeroksit siklohegzamonohidrat, dolomit ve kuartz minerallerini de içerdiği söylenebilir.



Şekil 4.9. Bigadiç atık kil pestilinin XRD grafiği

#### 4.1.7.c. Kırka atık kil pestilinin XRD analizi

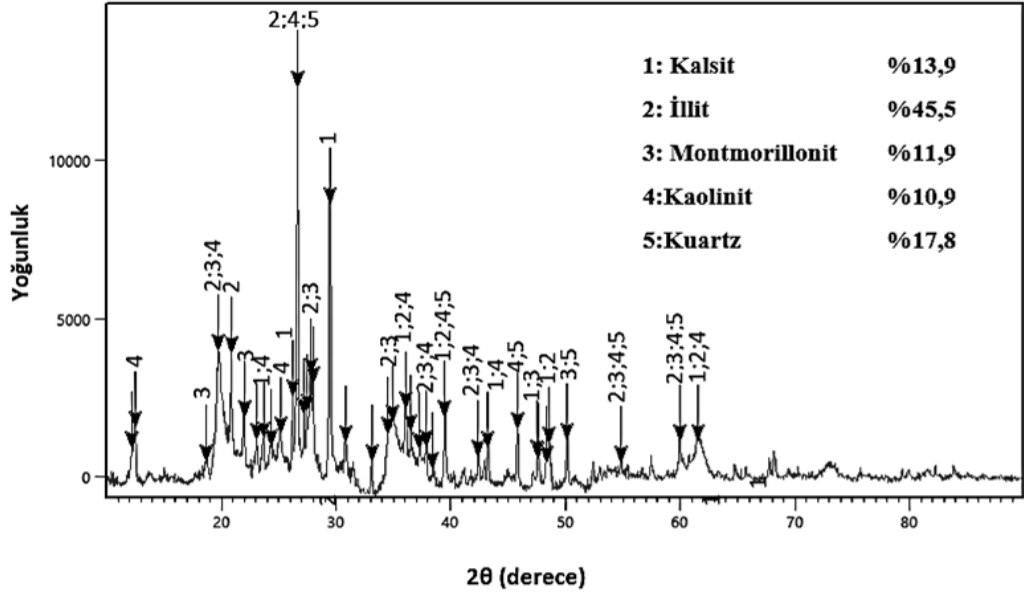
Şekil 4.10'da Kırka atık kil pestilinin XRD analizi sonucu elde edilen pikler görülmektedir. Analiz sonucunda Kırka atık kil pestilinin büyük oranda dolomit içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca; tinkal ve üleksit içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. Kırka atık kil pestilinin XRD grafiği

#### 4.1.3.d. Doğal kilin XRD analizi

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere, deneylerde kullanılan doğal kilin içeriğinde yüksek oranda illit minerali bulunmaktadır. Doğal kilin, illit mineralinin yanı sıra montmorillonit, kuartz, kalsit ve kaolinit minerallerini de içerdiği tespit edilmiştir.

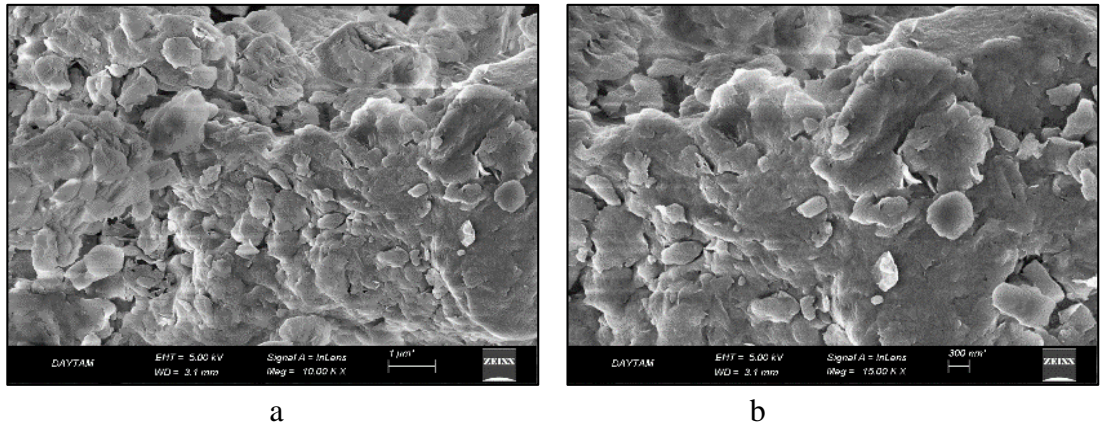


Şekil 4.11. Doğal kile ait XRD grafiği

#### 4.1.8. Taramalı eletron mikroskop (SEM) analizi sonuçları

##### Kestelek atık kil pestilinin SEM analizi

Kestelek atık kil pestilinin 10000X ve 15000X kat yaklaştırılarak elde edilen SEM analiz görüntüleri Şekil 4.12’de verilmiştir.

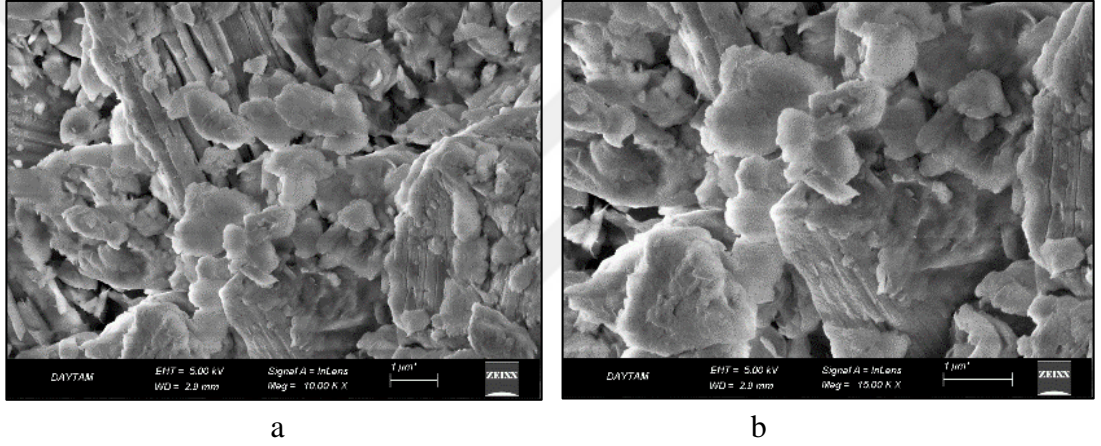


Şekil 4.12. Kestelek atık kil pestilinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

Şekil 4.12’de verilen görüntüler incelendiğinde Kestelek atık kil pestilinin yer yer plaklardan oluştuğu ve küçük taneciklerin büyük oranda var olduğu görülmektedir. Taneciklerin şekil ve boyut bakımından birbirlerinden farklılık gösterdiği görülmektedir.

### Bigadiç atık kil pestilinin SEM analizi

Bigadiç atık kil pestili üzerinde yapılan SEM görüntü analizi ile 10000X ve 15000X büyütülerek çekilen görüntüler Şekil 4.13’da verilmiştir.

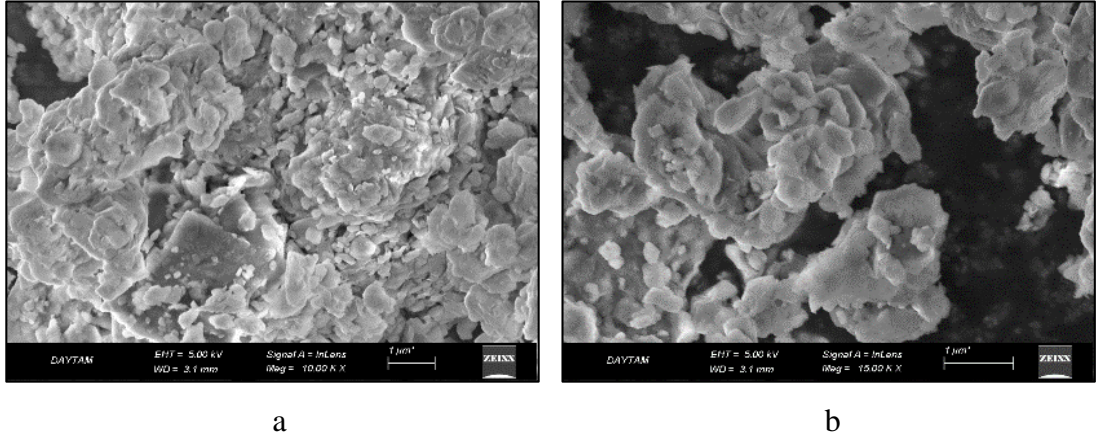


**Şekil 4.13.** Bigadiç atık kil pestilinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

Görüntüler incelendiğinde, yer yer plakaların olduğu ve büyük oranda taneciklerin belirli bir geometriye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun atık kil numunesinin baskın mineralleri olan kolemanit ve kalsitten kaynaklandığı düşünülmektedir.

### Kırka atık kil pestilinin SEM analizi

10000X ve 15000X büyütülerek çekilen Kırka atık kil pestillerinin SEM görüntüleri Şekil 4.14’de verilmiştir.

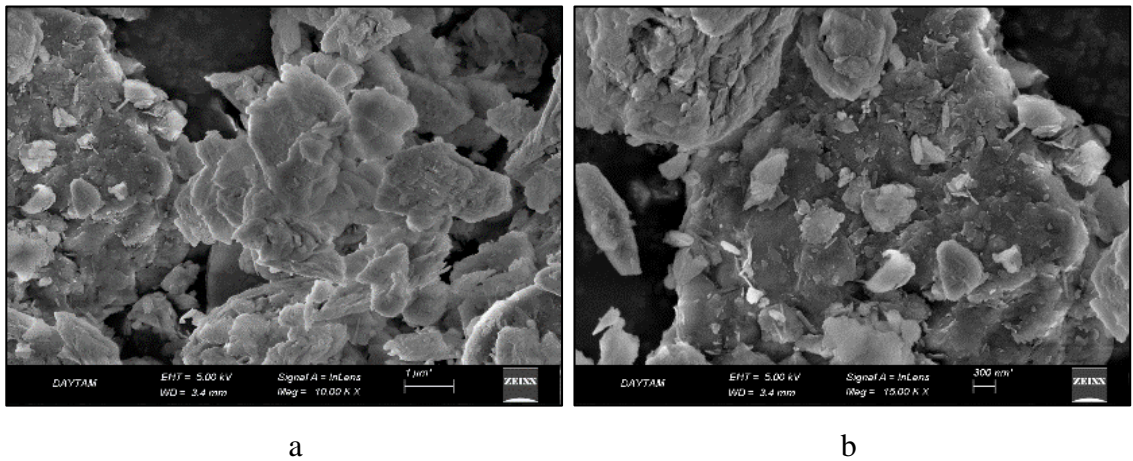


**Şekil 4.14.** Kırka atık kil pestilinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

Şekil 4.14’de verilen SEM görüntülerine bakıldığında numunenin plaka ve tanecik yapısında olduğu görülmektedir. Tanecik yapısında olanların dolomit, plaka yapısına sahip olanın ise tinkal olduğu düşünülmektedir.

#### 4.1.8.d. Doğal kilin SEM analizi

10000X ve 15000X yaklaştırılarak çekilen doğal kilin SEM görüntüleri Şekil 4.15’de verilmiştir.



**Şekil 4.15.** Doğal kilin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

Doğal kile ait SEM görüntüleri incelendiğinde, numunenin çoğunlukla plakalardan oluştuğu görülmektedir. Bu durumun yapısal olarak illit mineraline benzediği görülmektedir. Ayrıca literatürdeki montmorillonit, kalsit ve kuartz mineral yapısına benzeyen partiküllerin olduğu da görülmektedir.

#### 4.1.9. İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) analiz sonuçları

##### Kestelek atık kil pestilinin ICP-MS analizi sonuçları

ICP-MS analiz ile Kestelek atık kil pestilinde Magnezyum (Mg), Bor (B), Kalsiyum (Ca), Sodyum (Na), Stronsiyum (Sr) ve Alüminyum (Al), Demir (Fe), Lityum (Li) ve Potasyum (K) gibi elementlerin bulunduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Kestelek atık kil pestilinde en fazla bulunan element Magnezyum (Mg), en az bulunan ise Potasyum (K) dur. Bu elementlerin Kestelek atık kil pestilinde bulunma oranları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Kestelek atık kil pestilinin ICP-MS sonuçları

Element	Miktar (%)	Element	Miktar (%)
Mg	7,28	Al	0,54
B	5,18	Fe	0,41
Ca	4,26	Li	0,12
Na	0,95	K	0,10
Sr	0,65		

##### Bigadiç atık kil pestilinin ICP-MS analizi sonuçları

Bigadiç atık kil pestiline yaptırılan ICP-MS analiz sonucuna göre, elementlerin atık kil pestilinde bulunma oranları en fazla bulunandan başlayarak Magnezyum (Mg), Bor (B),

Kalsiyum (Ca), Sodyum (Na), Stronsiyum (Sr), Alüminyum (Al), Demir (Fe), Lityum (Li) ve Potasyum (K) olarak sıralanmaktadır (Çizelge 4.8).

**Çizelge 4.8.** Bigadiç atık kil pestilinin ICP-MS sonuçları

Element	Miktar (%)	Element	Miktar (%)
Mg	11,27	Al	0,44
B	4,03	Fe	0,27
Ca	3,38	Li	0,19
Na	0,62	K	0,06
Sr	0,61		

#### **Kırka atık kil pestilinin ICP-MS analizi sonuçları**

Kırka atık kil pestili üzerinde yapılan ICP-MS analizi sonucunda Magnezyum (Mg), Bor (B), Sodyum (Na), Kalsiyum (Ca), Stronsiyum (Sr), Alüminyum (Al), Potasyum (K), Demir (Fe) ve Lityum (Li) minerallerinin bulunma oranları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Kırka atık kil pestilinin ICP-MS sonuçları

Element	Miktar (%)	Element	Miktar (%)
Mg	8,89	Al	0,19
B	6,62	K	0,15
Na	4,69	Fe	0,13
Ca	3,49	Li	0,13
Sr	0,91		

#### **4.1.9.d. Doğal kilin ICP-MS analizi sonuçları**

Doğal kil üzerinde yapılan ICP-MS analizine göre Alüminyum (Al) mineralinin yüksek oranda bulunduğu tespit edilmiştir. Diğer minerallerin bulunma oranları göz önüne

alınarak sırasıyla Demir (Fe), Magnezyum (Mg), Kalsiyum (Ca), Sodyum (Na) olduğu ortaya konmuştur (Çizelge 4.10).

**Çizelge 4.10.** Doğal kilin ICP-MS sonuçları

Element	Miktar (%)	Element	Miktar (%)
Al	6,52	B	0,15
Fe	6,09	K	0,84
Mg	3,88	Sr	0,04
Ca	1,44	Li	0,004
Na	0,16		

#### 4.1.10. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi sonuçları

Atık kil pestilleri ve doğal kil üzerinde Atatürk Üniversitesi DAYTAM Laboratuvarlarında X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizleri yaptırılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.11’de belirtilmiştir.

**Çizelge 4.11.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin XPS sonuçları

Element	Numuneler			
	KS	BG	KR	D
	(atomik % )			
<b>Oksijen (O)</b>	51,82	48,83	47,30	57,42
<b>Karbon (C)</b>	7,62	6,01	10,88	8,21
<b>Flor (F)</b>	-	1,07	2,50	-
<b>Demir (Fe)</b>	-	-	-	1,22
<b>Bor (B)</b>	2,25	3,97	3,86	-
<b>Magnezyum (Mg)</b>	11,33	13,19	8,50	4,58
<b>Silikon (Si)</b>	19,26	19,19	14,48	20,15
<b>Sodyum (Na)</b>	1,37	0,79	3,61	-
<b>Kalsiyum (Ca)</b>	6,37	5,66	5,80	2,77
<b>Alüminyum (Al)</b>	-	1,24	2,27	5,37
<b>Paladyum (Pd)</b>	-	-	0,804	0,27



#### 4.1.11. Yüzey alanı ölçüm (BET) analizi sonuçları

Doğal kile ve atık kil pestillerine ait BET yüzey alanları ve boşluk hacimleri Çizelge 4.12’de görülmektedir.

**Çizelge 4.12.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin BET analizi sonuçları

Numune	KS	BG	KR	D
Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	6,0511	25,3272	6,5318	71,7802
Boşluk hacmi (m <sup>3</sup> /g)	0,0139	0,0333	0,0178	0,0744

BET analiz sonuçları incelendiğinde, en fazla yüzey alanına ve boşluk hacmine sahip olan numunenin doğal kile ait olduğu tespit edilmiştir. Atık kil pestilleri içerisinde en büyük yüzey alanının ve boşluk hacminin ise Bigadiç atık kil pestiline ait olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.12).

#### 4.1.12. Elektrokinetik özellikler

##### Zeta potansiyeli deneyi sonuçları

Doğal kile ait DAYTAM Laboratuvarlarında yapılan Zeta Potansiyeli ölçümleri sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.13’de verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** Doğal kil ve atık kil pestillerine ait zeta potansiyeli değerleri

Numune	KS	BG	KR	D
Zeta Potansiyeli (mV)	-12,2	-14,8	-25,9	-14,1

### pH deneyi sonuçları

pH metre deneyinde kullanılan saf su 19,7 °C sıcaklığa sahip ve pH değeri 7,47'dir. pH deneyleri sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.14 ve Şekil 4.16'da verilmektedir.

**Çizelge 4.14.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin denge sıcaklığı ve pH değerleri

Numune	KS	BG	KR	D
Denge Sıcaklığı, °C	20,4	22,7	25,6	25,3
pH	7,66	7,69	7,68	6,89

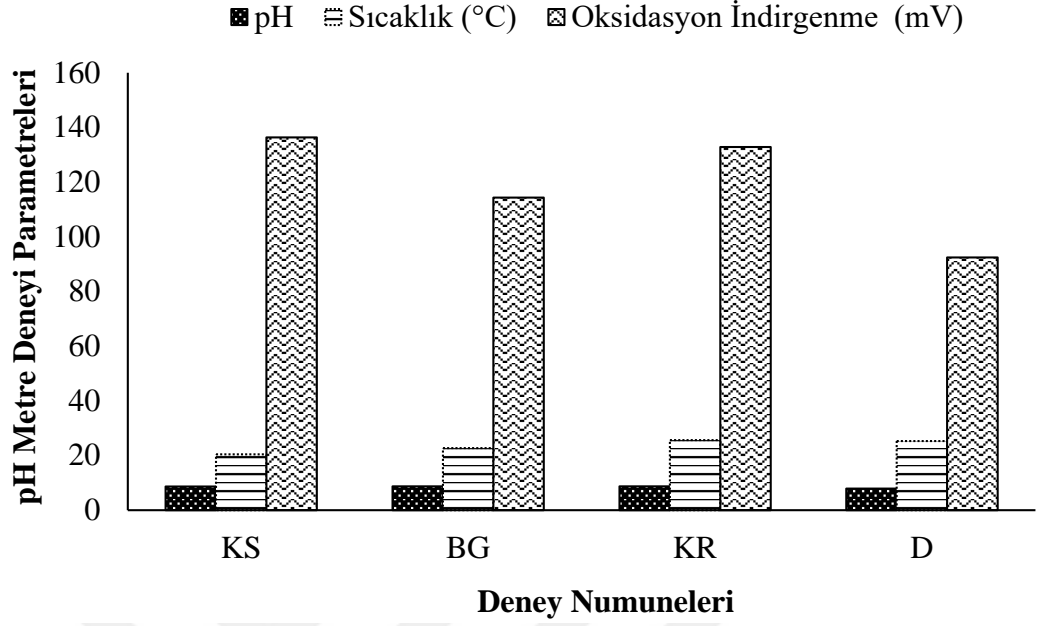
### Oksidasyon İndirgenme Potansiyeli (ORP) deneyi sonuçları

Oksidasyon İndirgenme deneyinde kullanılan saf su 19,7 °C sıcaklığa sahip ve oksidasyon indirgenme değeri 83,2 mV'dur. Deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.15 ve Şekil 4.16'de verilmektedir.

**Çizelge 4.15.** Doğal kil ve atık kil pestillerinin ORP değerleri

Numune	KS	BG	KR	D
ORP (mV)	136,3	114,3	132,8	92,4

Oksidasyon indirgenme potansiyelinin pozitif değer alması oksitlendirme özelliğinin olduğu, negatif olması ise oksitlendirme özelliğinin kaybolduğu ve oksitlenmeyi engelleme özelliğine sahip olduğu anlamına gelmektedir (Anonim 2019c). Numuneler üzerinde yapılan bu analiz ile doğal kilin daha az oksitlenme veya kısmen daha az kimyasal reaksiyona girme özelliğine sahip olduğu söylenebilir.



**Şekil 4.16.** Atık kil pestilleri ve doğal kile ait denge sıcaklığı, oksidasyon indirgenme potansiyeli ve pH değerleri

#### Katyon değişim kapasitesi (KDK)

Doğal kilin ve atık kil pestillerinin katyon değişim kapasitesi ölçüm sonuçları Çizelge 4.16'da verilmiştir. KDK deneyleri her bir numune için üçer kez tekrarlanmış ve sodyum asetat yöntemi kullanılmıştır.

**Çizelge 4.16.** Atık kil pestilleri ve doğal kile ait KDK değerleri

Numune	KS	BG	KR	D
<b>KDK, meq/100g</b>	36,09	51,40	28,61	53,39

Malzemelerin KDK değerinin yüksek olması, bünyesinde kirleticilere karşı tampon olma kapasitesinin artması anlamına gelmektedir (Ünlü 1998). Bu durumda araştırmaya tabii tutulan doğal kil ve Bigadiç atık kil pestilinin diğer atık kil pestillerine oranla daha fazla kirletici maddeleri tutacağı düşünülmektedir.

## 4.2. Bor Atığı Kil Pestili Katkılı Kil Numunelerine Ait Deney Sonuçları

Tez çalışması kapsamında Kestelek, Bigadiç ve Kırka atık kil pestilleri %10, %30, %50 ve %70 oranlarında doğal kile ikame edilmiştir. Elde edilen karışımlara kıvam limitleri, standart proktor deneyi, serbest basınç deneyi, şişme basıncı deneyi ve düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Ayrıca eşit oranda atık kil pestili (%50) ve doğal kilin (%50) karıştırıldığı numuneler üzerinde XRD, XPS, ICP-MS, Zeta potansiyeli, BET ve SEM analizi yaptırılmıştır.

### 4.2.1. Kıvam limitleri deneyleri sonuçları

Doğal kile %10, %30, %50 ve %70 oranlarında ikame edilen Kestelek, Bigadiç ve Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitleri deney sonuçları aşağıda sunulmuştur.

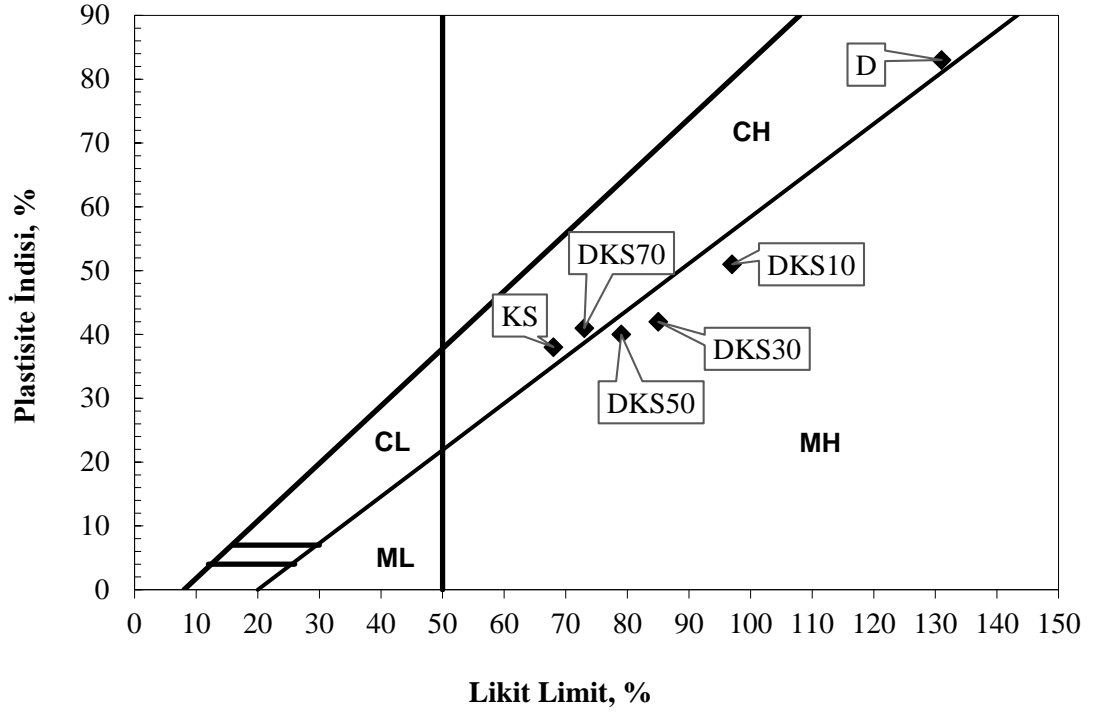
#### Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitleri deney sonuçları

Çizelge 4.17’de Kestelek atık kil pestili katkıli kil numunelerin kıvam limitleri deney sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 4.17.** Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitleri

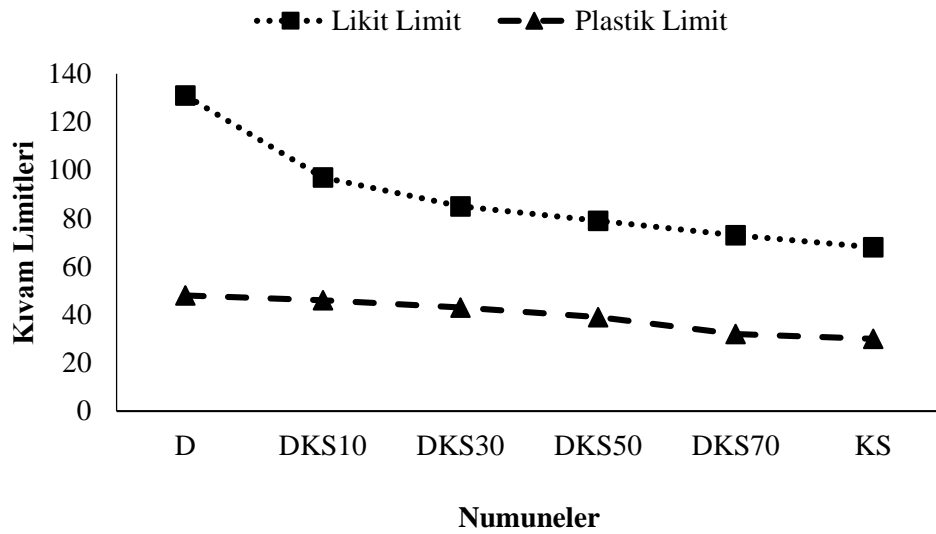
Numune	DKS10	DKS30	DKS50	DKS70
<b>Likit Limit, %</b>	97	85	79	73
<b>Plastik Limit, %</b>	46	43	39	30
<b>Plastisite İndisi, %</b>	51	42	30	45
<b>Zemin Grubu</b>	MH	MH	MH	CH

Kestelek atık kil pestili katkıli kil numuneler ile Kestelek atık kil pestili ve doğal kile ait kıvam limitleri deney sonuçlarının Casagrande plastisite abağı üzerinde gösterimi Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Kestelek atık kil pestili katkı numunelerinin zemin sınıfları

Kestelek atık kil pestilinin doğal kile %70 oranında katıldığı durumda zemin grubu yüksek plastisiteli kil (CH) olurken; %10, %30 ve %50 oranlarında katılması halinde zemin sınıfının yüksek plastisiteli silt (MH) sınıfına dönüştüğü belirlenmiştir (Kurt Albayrak ve Turan 2019).



Şekil 4.18. Kestelek atık kil pestili katkı numunelerinin kıvam limitlerinin değişimi

Doğal kile katılan Kestelek atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin likit limit ve plastik limit değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.18). Doğal kile göre, DKS10 numunesinin likit limiti %26, plastik limiti ise %4 oranında; DKS30 numunesinin likit limiti %35, plastik limiti %10 oranında; DKS50 numunesinin likit limiti %40, plastik limiti %19; DKS70 numunelerinde ise likit limiti %44, plastik limiti %33 oranında azalmıştır.

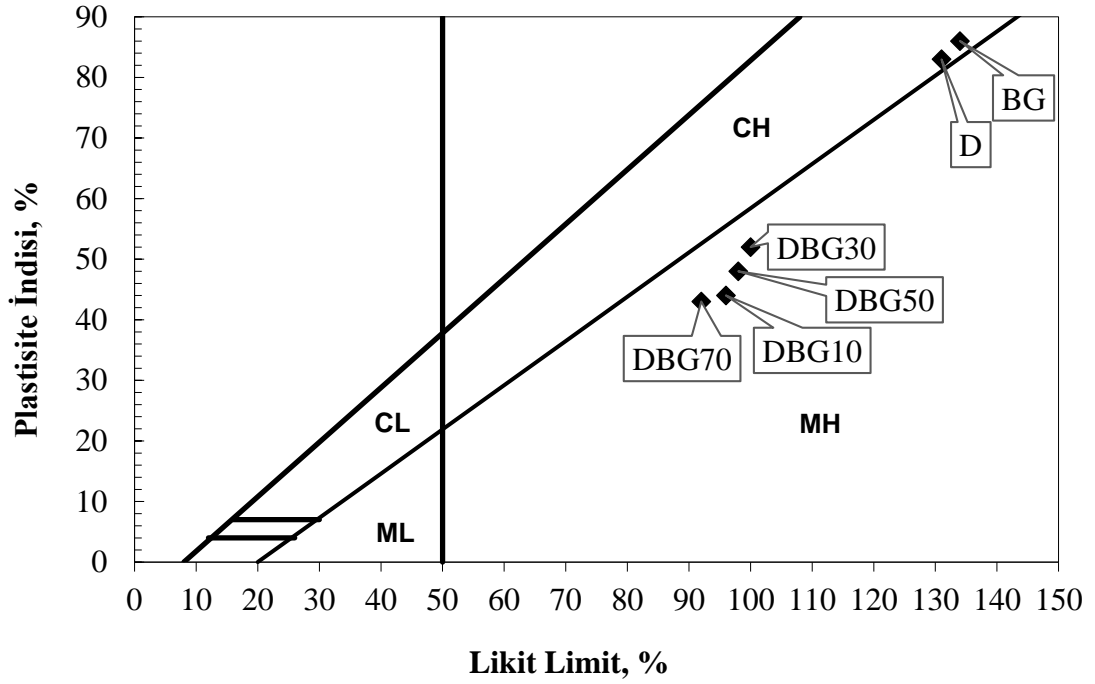
#### **Bigadiç atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitleri deney sonuçları**

Bigadiç atık kil pestili katkılı kil numunelerin kıvam limitleri deney sonuçları Çizelge 4.18'de görülmektedir.

**Çizelge 4.18.** Bigadiç atık kil pestili katkılı numunelerin kıvam limitleri

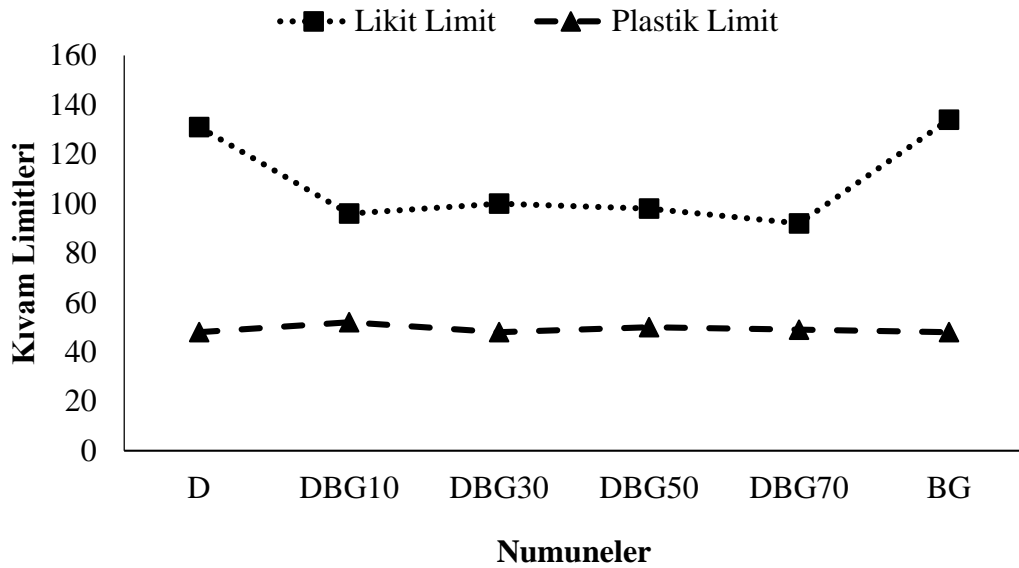
<b>Numune</b>	<b>DBG10</b>	<b>DBG30</b>	<b>DBG50</b>	<b>DBG70</b>
<b>Likit Limit, %</b>	96	100	98	92
<b>Plastik Limit, %</b>	52	48	50	49
<b>Plastisite İndisi, %</b>	44	52	48	43
<b>Zemin Grubu</b>	MH	MH	MH	MH

Bigadiç atık kil pestili katkılı kil numuneler ile Bigadiç atık kil pestili ve doğal kile ait kıvam limitleri deney sonuçlarının Casagrande plastisite abağı üzerinde gösterimi Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin zemin sınıfları

Şekil 4.19'a göre doğal kile Bigadiç atık kil pestili ilevesiyle CH olan zemin sınıfının yüksek plastisiteli silt (MH) olarak değiştiği söylenebilir. Şekil 4.20'de Bigadiç atık kil pestili katkı yüzdesindeki artışla likit limit ve plastik limitlerde meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 4.20. Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitlerinin değişimi

Şekil 4.20'ye göre, doğal kile katılan Bigadiç atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin likit limitinde doğal kile göre azalma meydana gelirken plastik limit değerlerinde belirgin bir değişim meydana gelmediği görülmüştür. Likit limitte doğal kile göre azalma oranları DBG10, DBG30, DBG50 ve DBG70 numuneleri için sırasıyla, %27; %24; %25 ve %30 olarak belirlenmiştir.

#### **Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitleri deney sonuçları**

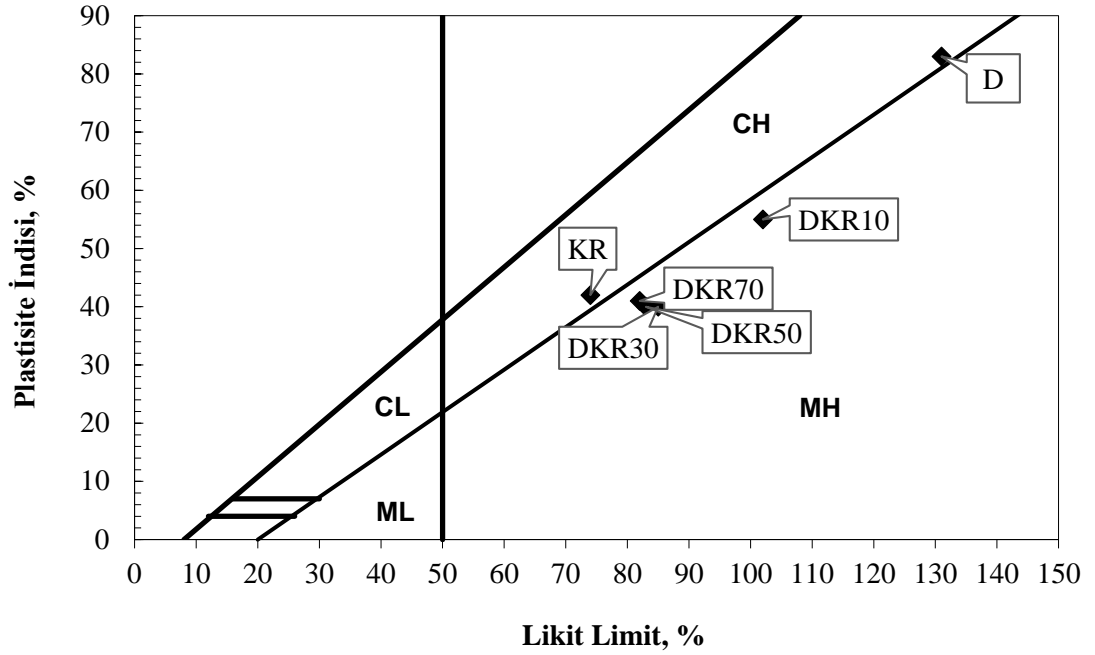
Kırka atık kil pestili katkıli numunelere ait kıvam limitleri deney sonuçları Çizelge 4.19'da görülmektedir.

**Çizelge 4.19.** Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitleri

<b>Numune</b>	<b>DKR10</b>	<b>DKR30</b>	<b>DKR50</b>	<b>DKR70</b>
<b>Likit Limit, %</b>	102	85	83	82
<b>Plastik Limit, %</b>	47	45	43	41
<b>Plastisite İndisi, %</b>	55	40	40	41
<b>Zemin Grubu</b>	MH	MH	MH	MH

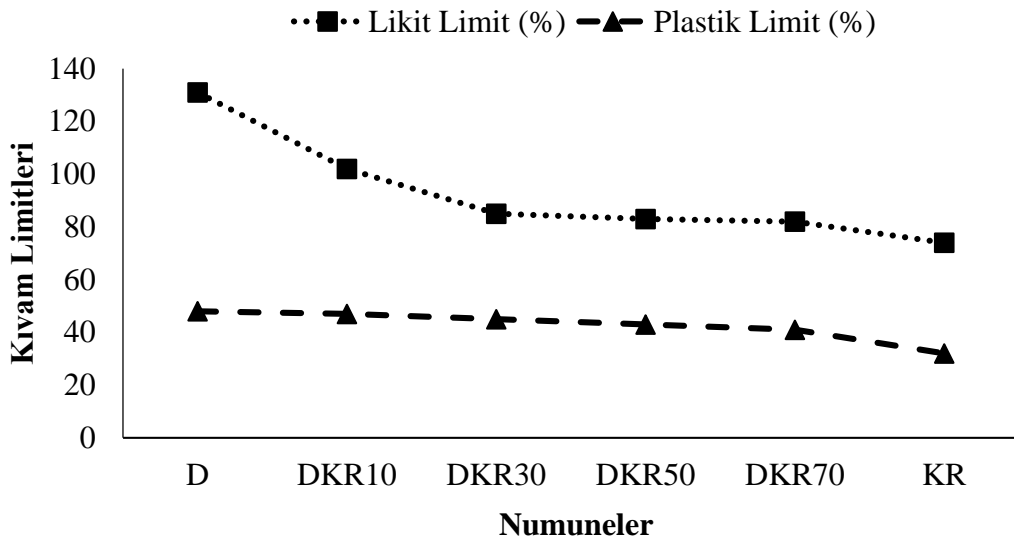
Kırka atık kil pestili katkıli kil numuneler ile Kırka atık kil pestiline ve doğal kile ait kıvam limitleri deney sonuçlarının Casagrande plastisite abağı üzerinde gösterimi Şekil 4.21'de verilmiştir.





Şekil 4.21. Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin zemin sınıfları

Şekil 4.21'e göre CH olan doğal kilin zemin sınıfının, doğal kile Kırka atık kil pestilinin %10, %30, %50 ve %70 oranlarında katılması ile yüksek plastisiteli silt (MH) sınıfına girdiği görülmüştür. Şekil 4.22'de Kırka atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla doğal kilin likit limit ve plastik limitlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 4.22. Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kıvam limitlerinin değişimi

Şekil 4.22'ye göre doğal kile katılan Kırka atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin likit limit ve plastik limit değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. DKR10, DKR30, DKR50 ve DKR70 numunelerinin doğal kile göre likit limitlerinde sırasıyla %22, %35, %37 ve %37 oranlarında, plastik limitinde ise %2, %6, %10 ve %15 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

#### 4.2.2. Standart proktor deneyi sonuçları

%10, %30, %50 ve %70 oranlarında doğal kile ikame edilen Kestelek, Bigadiç ve Kırka atık kil pestili katkılı numunelerin standart proktor deneyi ile belirlenen kompaksiyon parametreleri aşağıda sunulmuştur.

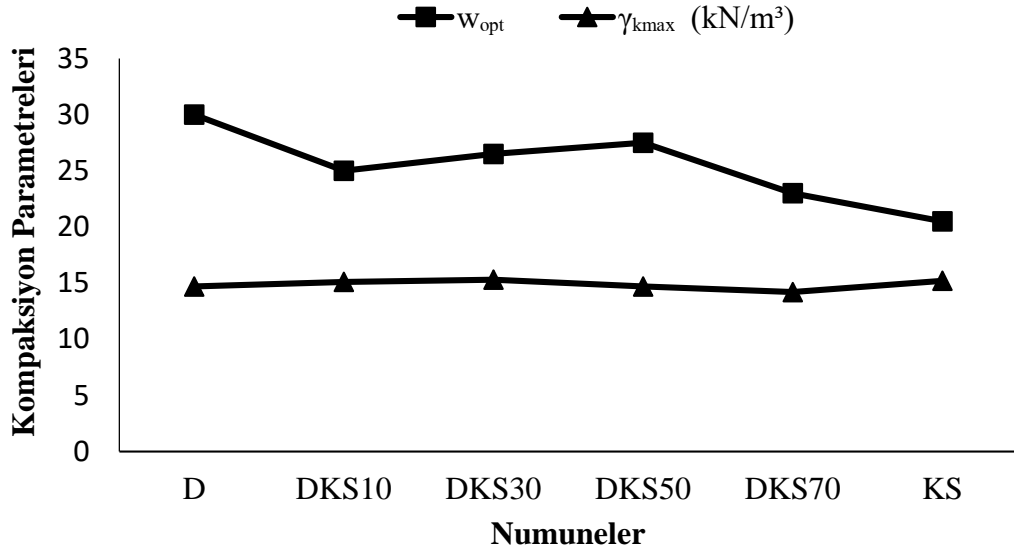
#### Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin standart proktor deneyi sonuçları

Kestelek atık kil pestili katkılı numuneler üzerinde yapılan Standart Proktor deneyi sonucu elde edilen kompaksiyon parametreleri Çizelge 4.20'de verilmiştir.

**Çizelge 4.20.** Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin kompaksiyon parametreleri

Numune	DKS10	DKS30	DKS50	DKS70
$w_{opt}$ , %	25,0	26,5	27,5	23,0
$\gamma_{kmax}$ , kN/m <sup>3</sup>	15,1	15,3	14,7	14,2

Kestelek atık kil pestili yüzdesindeki artışla numunelerin optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında meydana gelen değişim ise Şekil 4.23'de görülmektedir.



**Şekil 4.23.** Kestelek atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişim

Yüksek plastisiteli doğal kile katılan atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin optimum su içeriklerinde doğal kile göre azalma meydana geldiği görülmüştür. %70 atık kil pestili katkıli kilin optimum su içeriği, doğal kilin optimum su içeriğine göre %27 oranında azalmıştır. Atık kil pestili yüzdesindeki artışla maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda önce artış sonra azalış meydana gelmiştir. %30 atık kil pestili katkıli numunenin doğal kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığına göre maksimum kuru birim hacim ağırlığında % 4 oranında artış meydana gelirken, %70 atık kil pestili katkıli numunede ise %3 oranında azalma meydana gelmiştir.

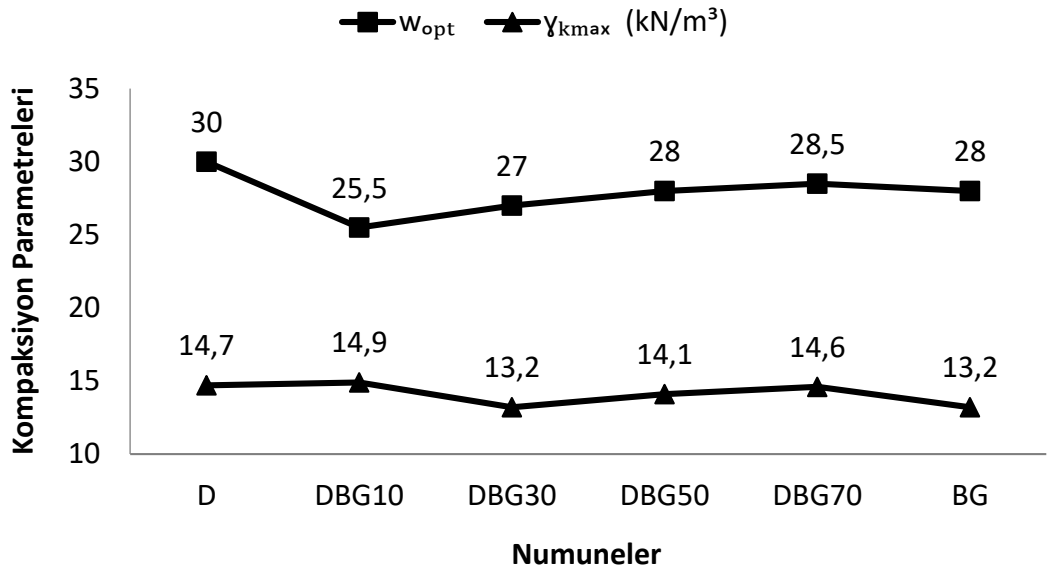
#### **Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin standart proktor deneyi sonuçları**

Bigadiç atık kil pestili katkıli numuneler üzerinde yapılan standart proktor deneyi sonucu elde edilen kompaksiyon parametreleri Çizelge 4.21’de verilmiştir.

**Çizelge 4.21.** Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametreleri

Numune	DBG10	DBG30	DBG50	DBG70
$w_{opt}$ , %	25,5	27,0	28,0	28,5
$\gamma_{kmax}$ , kN/m <sup>3</sup>	14,9	13,2	14,1	14,6

Bigadiç atık kil pestili yüzdesindeki artışla numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.24’de verilmiştir.

**Şekil 4.24.** Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişim

Yüksek plastisiteli özellikte olan doğal kile katılan Bigadiç atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin optimum su içeriklerinde doğal kile göre azalma meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.24). DBG10, DBG30, DBG50 ve DBG70 numunelerinin su muhtevalarında doğal kilin optimum su muhtevasına sırasıyla %15; %10; %7 ve %5 oranlarında azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

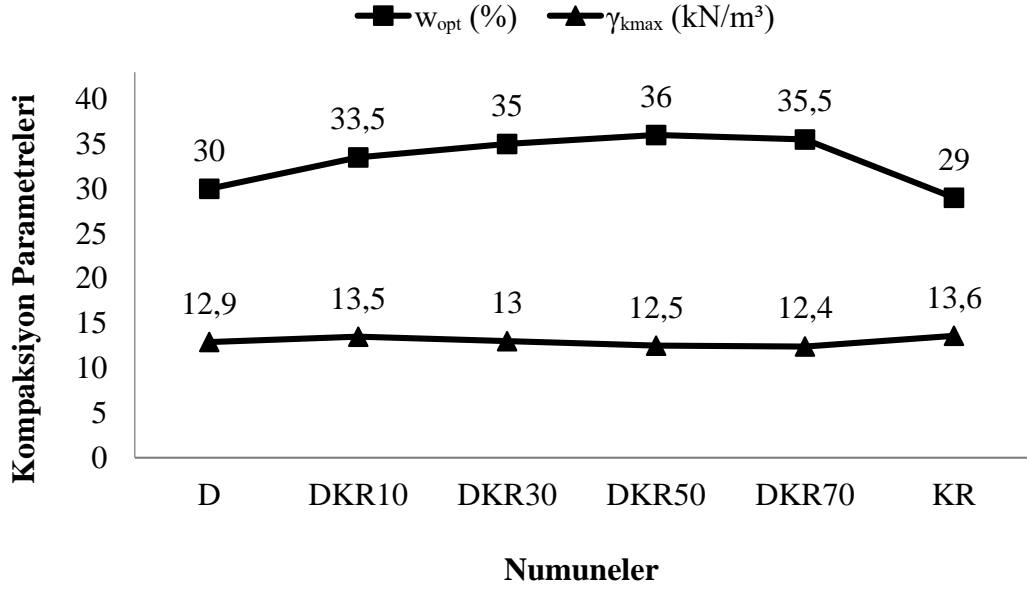
### Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin standart proktor deneyi sonuçları

Kırka atık kil pestili katkıli numuneler üzerinde yapılan Standart Proktor deneyi sonucu elde edilen kompaksiyon parametreleri Çizelge 4.22’de verilmiştir.

**Çizelge 4.22.** Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametreleri

Numune	DKR10	DKR30	DKR50	DKR70
$w_{opt}$ , %	33,5	35,0	36,0	35,5
$\gamma_{kmax}$ , kN/m <sup>3</sup>	13,5	13,0	12,5	12,4

Kırka atık kil pestili yüzdesindeki artışla numunelerin optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında meydana gelen değişim Şekil 4.25’de verilmiştir.



**Şekil 4.25.** Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin kompaksiyon parametrelerinde meydana gelen değişim

Yüksek plastisiteli doğal kile katılan Kırka atık kil pestili yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin optimum su içeriklerinde doğal kile göre artış meydana geldiği

görülmüştür. Atık kil pestili yüzdesindeki artışla maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda belirgin bir değişim meydana gelmemiştir.

#### 4.2.3. Serbest basınç deneyi sonuçları

Kestelek, Bigadiç ve Kırka atık kil pestili katkılı numunelerin serbest basınç mukavemeti deneyleri 0., 7. ve 28. gün olmak üzere üç grup için, standart proktor enerjisinde sıkıştırılan örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri bu bölümde verilmiştir.

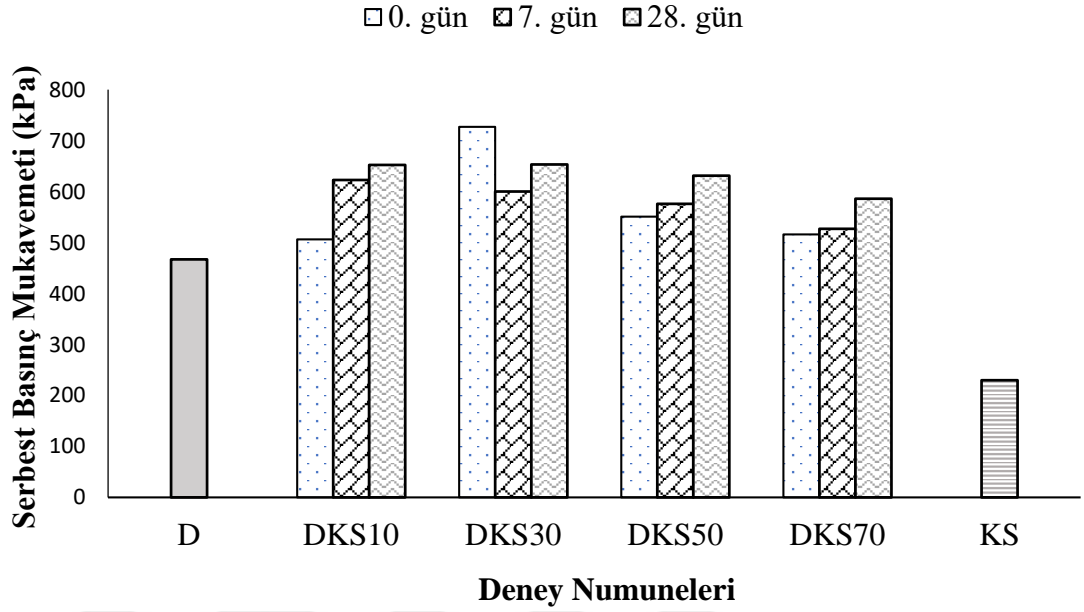
#### Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Doğal kile, %10, %30, %50 ve %70 oranında Kestelek atık kil pestili ikame edilen numunelerin kür süresine bağlı olarak elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.23’de verilmiştir.

**Çizelge 4.23.** Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Numune	0. gün serbest basınç mukavemeti (kPa)	7. gün serbest basınç mukavemeti (kPa)	28. gün serbest basınç mukavemeti (kPa)
<b>DKS10</b>	506	623	652
<b>DKS30</b>	727	600	653
<b>DKS50</b>	551	576	631
<b>DKS70</b>	516	527	586

Kestelek atık kil pestili katkılı doğal kil numunelerde, kil pestili yüzdesindeki artışla serbest basınç mukavemetinde meydana gelen değişim 0., 7. ve 28. günler için Şekil 4.26’da verilmiştir.



**Şekil 4.26.** Kestelek atık kil pestili katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Şekil 4.26’da verilen değerler incelendiğinde genel olarak Kestelek bor atığı katkılı numunelerde serbest basınç mukavemeti değerlerinin zamanla artış gösterdiği görülmektedir. Bor atığı kil pestili katkı oranında meydana gelen artışla doğal kilin serbest basınç mukavemeti artmıştır. Katkılı numuneler hazırlandıktan hemen sonra gerçekleştirilen serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarına göre, atık kil pestili yüzdesi %10, %30, %50 ve %70 için serbest basınç mukavemetleri doğal kile göre sırasıyla, %8, %56, %18, %11 oranlarında artmıştır. Bu sonuçlara göre, serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen en yüksek artışın %30 atık kil pestili yüzdesinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

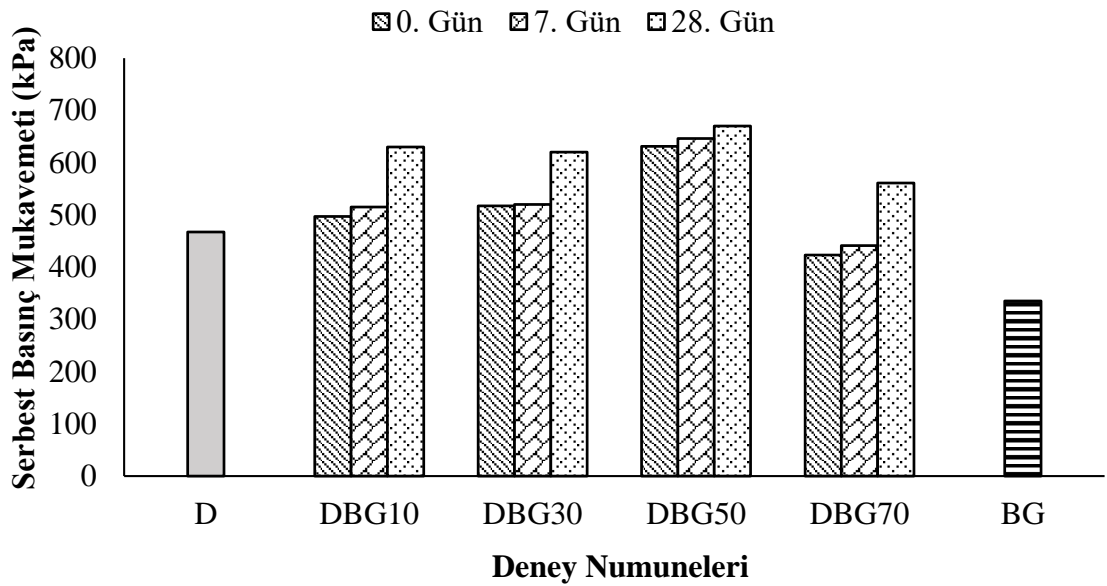
#### **Bigadiç atık kil pestili katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri**

Bigadiç atık kil pestili katkılı numunelerin serbest basınç mukavemeti deneyleri, standart proktor enerjisinde sıkıştırılan örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin 0., 7. ve 28. gün serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.24’de verilmiştir.

**Çizelge 4.24.** Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Deney grubu	0. gün serbest basınç mukavemeti (kPa)	7. gün serbest basınç mukavemeti (kPa)	28. gün serbest basınç mukavemeti (kPa)
<b>DBG10</b>	497	515	630
<b>DBG30</b>	517	520	620
<b>DBG50</b>	631	646	670
<b>DBG70</b>	423	441	561

Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde atık kil yüzdesinde meydana gelen artış ile birlikte ortaya çıkan değişim Şekil 4.27’de verilmiştir.

**Şekil 4.27.** Bigadiç atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Şekil 4.27’de verilen değerler incelendiğinde Bigadiç bor atığı katkıli numunelerde serbest basınç mukavemeti değerlerinin zamanla artış gösterdiği görülmektedir. Bor atığı kil pestili katkı oranında meydana gelen artışla doğal kilin serbest basınç mukavemeti %50 katkı oranına kadar artmıştır. Bigadiç atık kil pestili oranı %10, %30 ve %50 için 0. gün serbest basınç mukavemetleri doğal kile göre sırasıyla, %6, %11, ve %35 oranlarında



artmıştır. Ancak %70 katkıli numuneye ait serbest basınç mukavemeti değerinin, doğal kilin serbest basınç mukavemeti değerine göre %9 oranında azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre, 0. gün serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen en yüksek artışın %50 atık kil pestili yüzdesinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

#### **Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri**

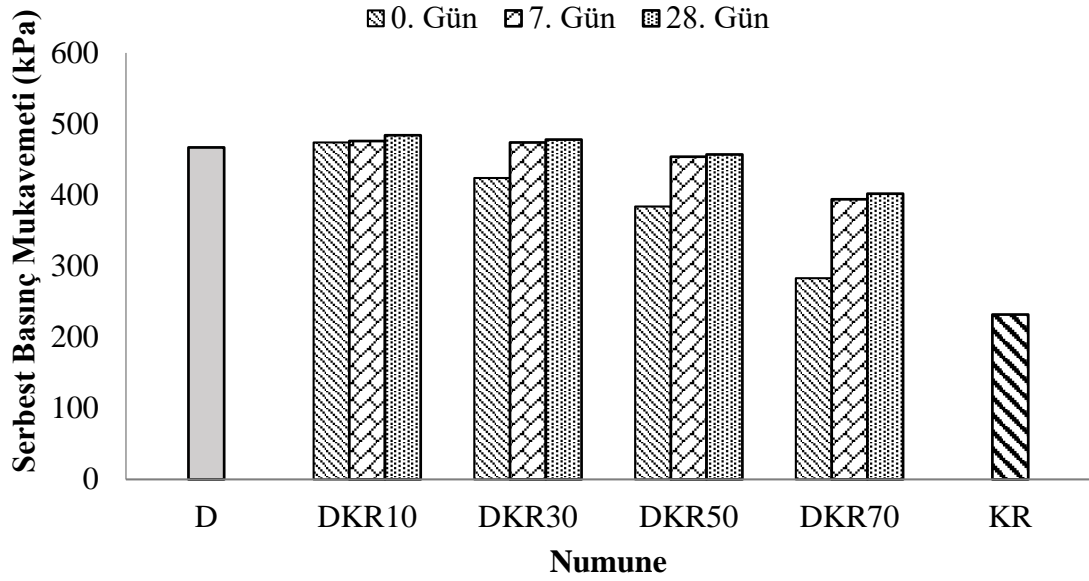
Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin, serbest basınç mukavemetleri 0., 7. ve 28. gün olmak üzere üç grup için, standart proktor enerjisinde sıkıştırılan örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.25 ve Şekil 4.28’de verilmiştir.

**Çizelge 4.25.** Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri

<b>Deney grubu</b>	<b>0. gün Serbest basınç mukavemeti (kPa)</b>	<b>7. gün Serbest basınç mukavemeti (kPa)</b>	<b>28. gün Serbest basınç mukavemeti(kPa)</b>
<b>DKR10</b>	474	476	484
<b>DKR30</b>	424	474	478
<b>DKR50</b>	384	454	457
<b>DKR70</b>	283	394	402

Çizelge 4.25’de verilen değerler incelendiğinde genel olarak katkısız ve bor atığı katkıli numunelerde serbest basınç mukavemeti değerlerinin zamanla artış gösterdiği

görülmektedir.



**Şekil 4.28.** Kırka atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Şekil 4.28'e göre, Kırka bor atığının doğal kilin serbest basınç mukavemeti üzerinde olumlu bir etkisi olmadığı söylenebilir. 0. gün için Kırka atık kil pestili yüzdesi %10 iken doğal kil numunesine göre %2 oranında artış meydana gelirken, %30, %50 ve %70 atık kil pestili katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetleri doğal kilin serbest basınç mukavemetine göre sırasıyla %9, %18 ve %39 oranında azalmıştır.

Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, bor atığı katkıli numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zamanla artmasının, bor atıklarının pozolonik bir karaktere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Uğurlu vd 2004; Akyıldız 2012; Bideci ve Bideci 2018).

#### 4.2.4. Şişme basıncı deneyi sonuçları

Şişme basıncı tayini için doğal kile belirlenen oranlarda atık kil pestili katılan katkıli numuneler optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numunelerden odometre deney halkası kullanılarak numune alınmıştır. Alınan numuneler şişme basıncı tayini

deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler ışığında belirlenen şişme basıncı deneyi sonuçları

Çizelge 4.26 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.

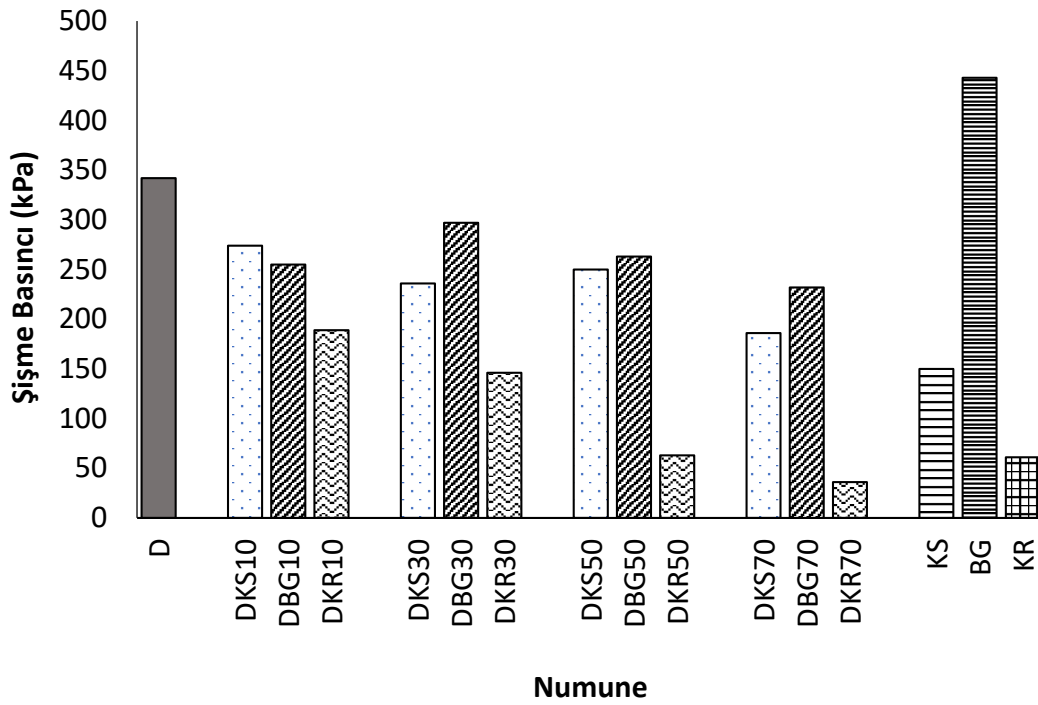
**Çizelge 4.26.** Atık kil pestili katkılı numunelerin şişme basınçları

Numuneler	Şişme Basıncı, kPa
<b>DKS10</b>	274
<b>DKS30</b>	255
<b>DKS50</b>	189
<b>DKS70</b>	236
<b>DBG10</b>	297
<b>DBG30</b>	146
<b>DBG50</b>	250
<b>DBG70</b>	263
<b>DKR10</b>	63
<b>DKR30</b>	186
<b>DKR50</b>	232
<b>DKR70</b>	36

Kestelek, Bigadiç ve Kırka atık kil pestillerinin doğal kile katılması sonucunda şişme basıncının doğal kile göre azaldığı görülmektedir. Doğal kile katılan Kestelek atık pestili %10, %30; %50 ve %70 olduğunda katkılı numunelerin şişme basıncı değerleri doğal kile göre sırasıyla, %20, %31,%27 ve %46 oranlarında azalmıştır.

Bigadiç atık kil pestillerinin doğal kile katılması sonucunda doğal kilin şişme basıncının azaldığı görülmektedir. Şişme basınçları, doğal kile göre %10, %30, %50 ve %70 katkı oranlarında sırasıyla, %25, %13, %23 ve %32 oranlarında azalmıştır.

Kırka atık kil pestillerinin doğal kile katılması sonucunda şişme basıncının azaldığı görülmektedir. Şişme basınçları, doğal kile göre %10, %30, %50 ve %70 numunelerinde sırasıyla, %45, %57 %82 %90 oranlarında azaldığı görülmektedir.



**Şekil 4.29.** Atık kil pestili katkılı numunelerin şişme basınçları

Tüm atık kil pestili katkılı numunelerde %70 katkı oranının doğal kilin şişme basıncını en fazla düşüren oran olduğu söylenebilir. En düşük şişme basıncına sahip numunenin %70 Kırka atık kil pestili katkılı numune olduğu görülmektedir (Şekil 4.29)

#### 4.2.5. Geçirimsizlik deney sonuçları

Geçirimsizlik deneylerine tabi tutulan katkıli numuneler optimum su muhtevasında sıkıştırıldıktan sonra hidrolik iletkenlik katsayısı belirlenmiştir. Belirlenen geçirimsizlik katsayıları Çizelge 4.27 ve Şekil 4.30'de verilmiştir.

**Çizelge 4.27.** Atık kil pestili katkıli numunelerin geçirimsizlik katsayıları

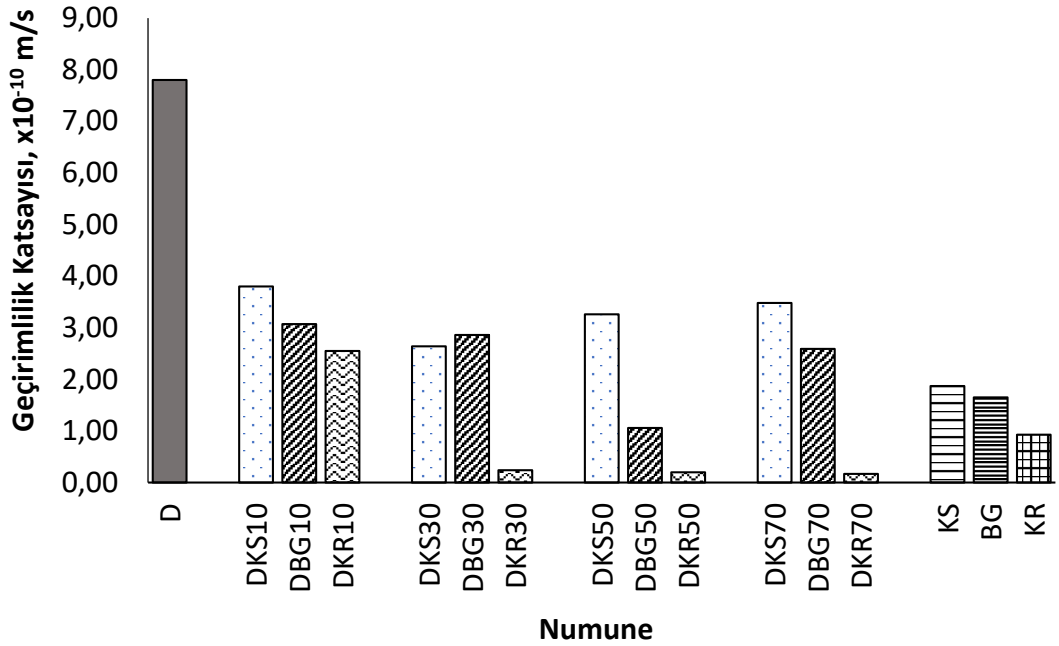
Numuneler	Geçirimsizlik katsayısı, m/s
<b>DKS10</b>	$3,38 \times 10^{-10}$
<b>DKS30</b>	$2,64 \times 10^{-10}$
<b>DKS50</b>	$3,26 \times 10^{-10}$
<b>DKS70</b>	$3,48 \times 10^{-10}$
<b>DBG10</b>	$3,07 \times 10^{-10}$
<b>DBG30</b>	$2,86 \times 10^{-10}$
<b>DBG50</b>	$1,06 \times 10^{-10}$
<b>DBG70</b>	$2,59 \times 10^{-10}$
<b>DKR10</b>	$2,55 \times 10^{-10}$
<b>DKR30</b>	$2,36 \times 10^{-11}$
<b>DKR50</b>	$1,97 \times 10^{-11}$
<b>DKR70</b>	$1,65 \times 10^{-11}$

Şekil 4.30 incelendiğinde, doğal kile katılan atık kil pestillerinin doğal kilin geçirimsizlik katsayısında azalma meydana getirdiği görülmektedir. Doğal kile katılan %10; %30; %50 ve %70 oranlarında Kestelek atık kil pestili katkısının doğal kilin geçirimsizlik katsayısını sırasıyla, % 57; %66; %58 ve %55 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Kestelek atık kil pestili katkıli numuneler içerisinde en az geçirimsizliğe %30 oranında katkıli numunenin sahip olduğu görülmektedir.

Bigadiç atık kil pestillerinin doğal kilin geçirimsizlik katsayısını azalttığı görülmektedir. Doğal kile katılan %10; %30; %50 ve %70 Bigadiç atık kil pestili katkısı doğal kilin

geçirimsizliğini sırasıyla, % 61; %63; %86 ve %67 oranında azaltmıştır. Bigadiç atık kil pestili katkı numuneler içerisinde en az geçirimsizliğe %50 katkı numunenin sahip olduğu görülmektedir.

Kırka atık kil pestillerinin geçirimsizlik katsayısını azalttığı söylenebilir. Doğal kile katılan %10; %30; %50 ve %70 oranlarında Kırka atık kil pestili, doğal kilin geçirimsizlik katsayısını sırasıyla, % 67; %97; %97 ve %98 oranlarında azaltmıştır. Kırka atık kil pestili katkısının geçirimsizlik katsayılarında en büyük düşüş %70 katkı oranında meydana gelmiştir.



**Şekil 4.30.** Atık kil pestili katkı numunelerin geçirimsizlik katsayısı

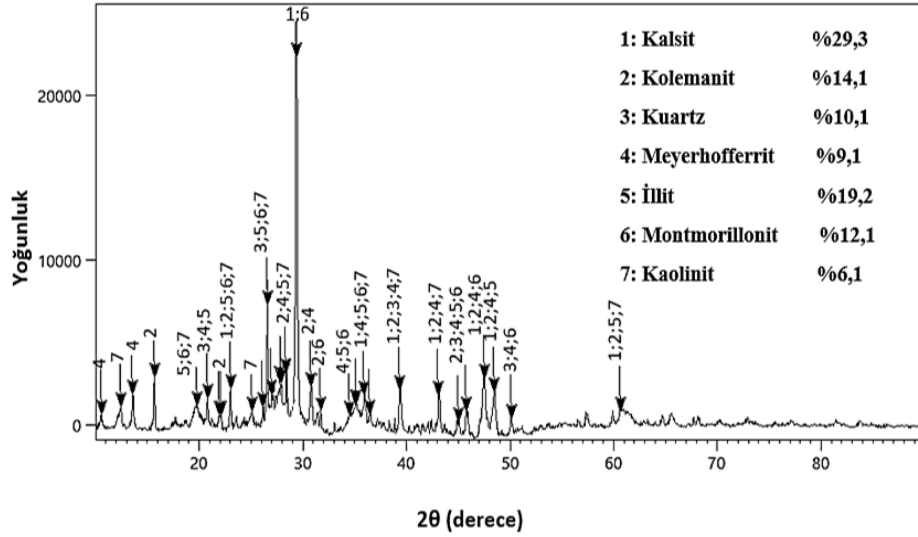
Katkılı numunelerin geçirimsizlik katsayılarında meydana gelen azalmanın atık kil pestili katkısının doğal kilin boşluk haciminin azalmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

#### 4.2.6. Eşit oranda bor atık kil pestili ikameli numunelerin kimyasal ve yapısal analizleri

Attık kil pestili katkısının doğal kilin kimyasal ve yapısal özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikleri ortaya koyabilmek için kile %50 atık kil pestili katkılı numuneler üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen veriler bu bölümde sunulmuştur.

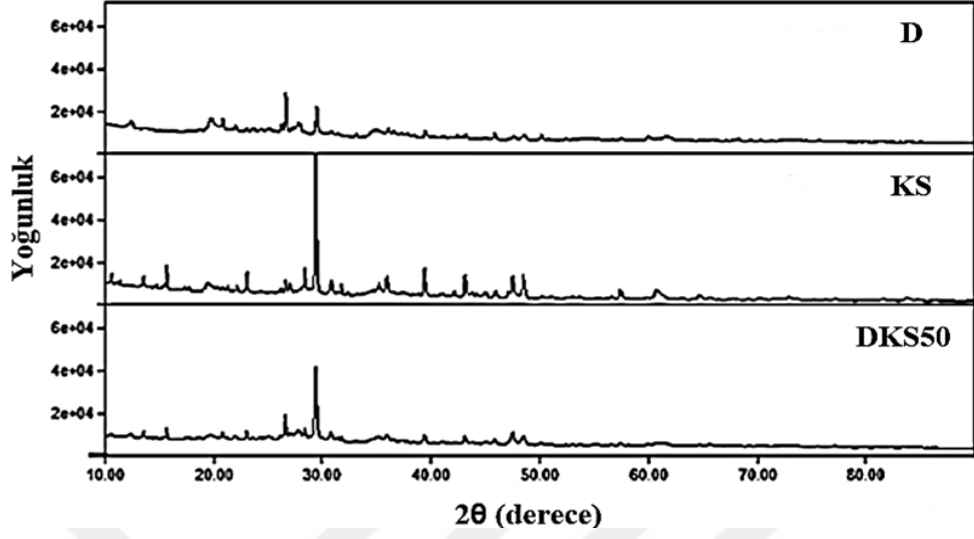
#### XRD analizi

%50 Kestelek atık kil pestili katkılı numuneye yaptırılan XRD analizi sonuçlarına göre, numunenin kimyasal içeriğinde kalsit, kolemanit, illit, kuartz, kaolinit, montmorilonit ve meyerhofferrit minerallerinin bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31. DKS50 numunesine ait XRD grafiği

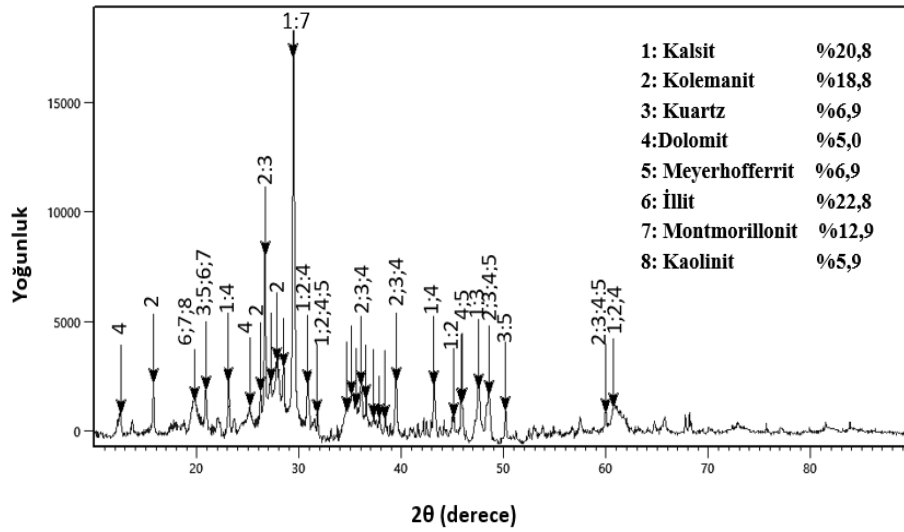
Deneylere tabi tutulan D, KS ve DKS50 numunelerinin karşılaştırmalı XRD sonuçları Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32. D, KS ve DKS50 numunelerine ait XRD grafikleri

DKS50 numunesine ait XRD grafiği incelendiğinde, D ve KS numuneleri ile paralel pikler meydana geldiği görülmüştür.

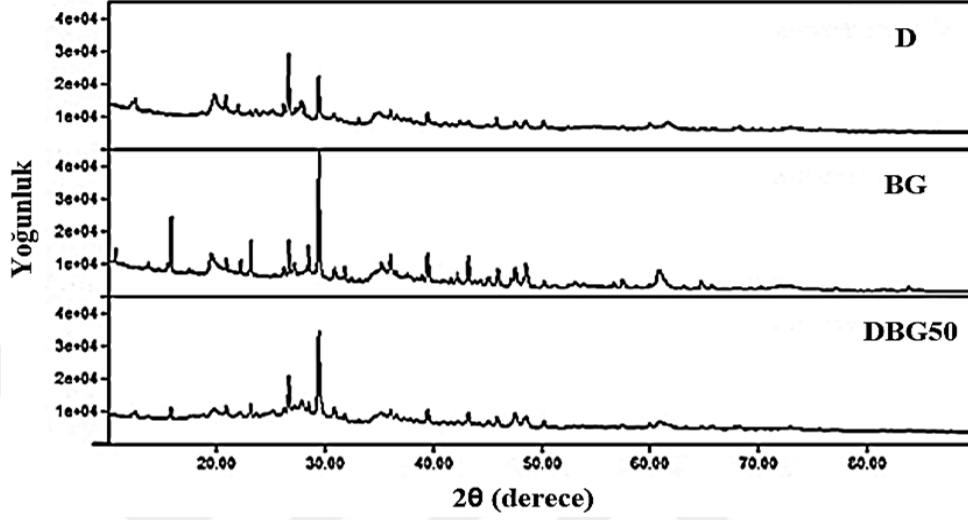
DBG50 numunesine yapılan XRD analizi sonuçlarına göre, numune içerisinde kalsit, kolemanit, illit, kuartz, dolomit, montmorillonit, meyerhofferrit ve kaolinit minerallerinin bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. DBG50 numunesinin XRD grafiği



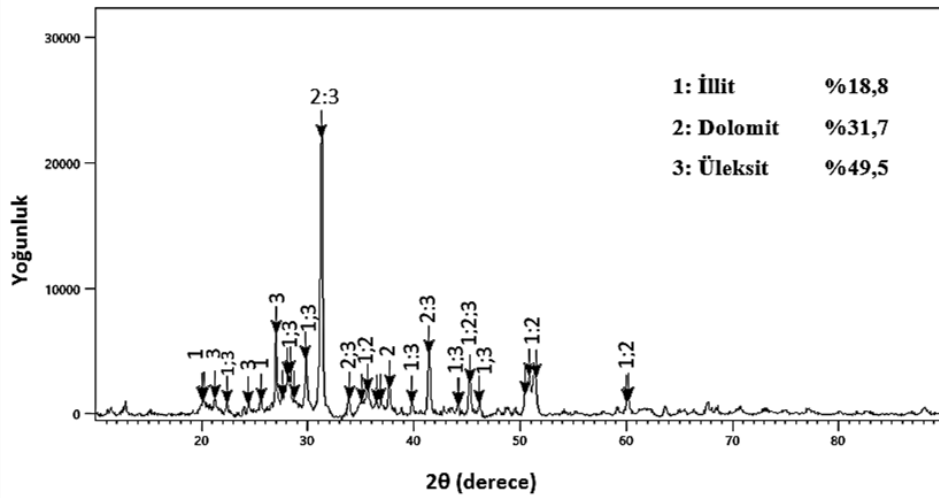
Deneylere tabi tutulan BG, D ve DBG50 numunelerinin karşılaştırmalı XRD sonuçları Şekil 4.34'de verilmiştir.



Şekil 4.34. D, BG ve DBG50 numunelerinin XRD grafikleri

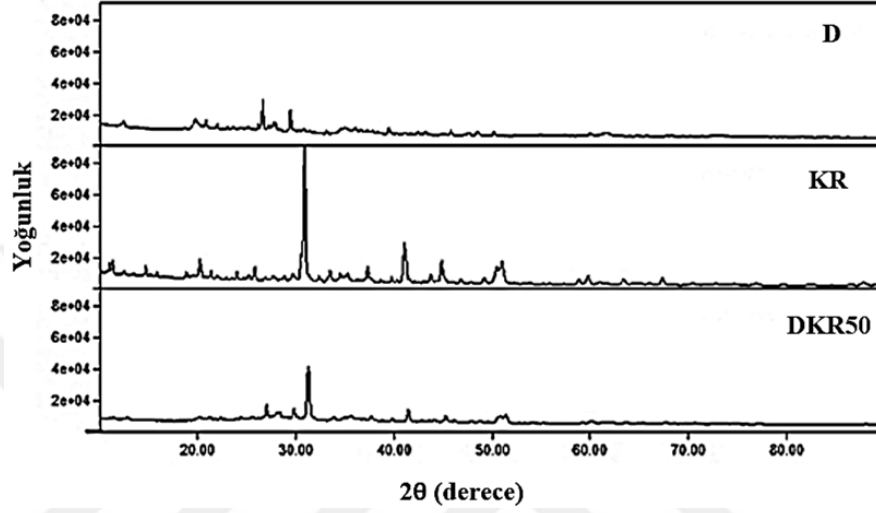
DBG50 numunesine ait XRD sonuçlarının BG ve D numunelerine paralel pikler oluşturduğu görülmüştür.

DKR50 numunesi için yapılan XRD analizi sonuçlarına göre, numunenin kimyasal içeriğinde illit, dolomit ve üleksit minerallerinin bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.35).



Şekil 4.35. DKR50 numunesini XRD grafiği

Deneylere tabi tutulan D, KR ve DKR50 numunelerinin karşılaştırmalı XRD sonuçları Şekil 4.36'da verilmiştir. DKR50 numunesine ait XRD sonuçlarının D ve KR numunelerine paralel pikler oluşturduğu görülmüştür.

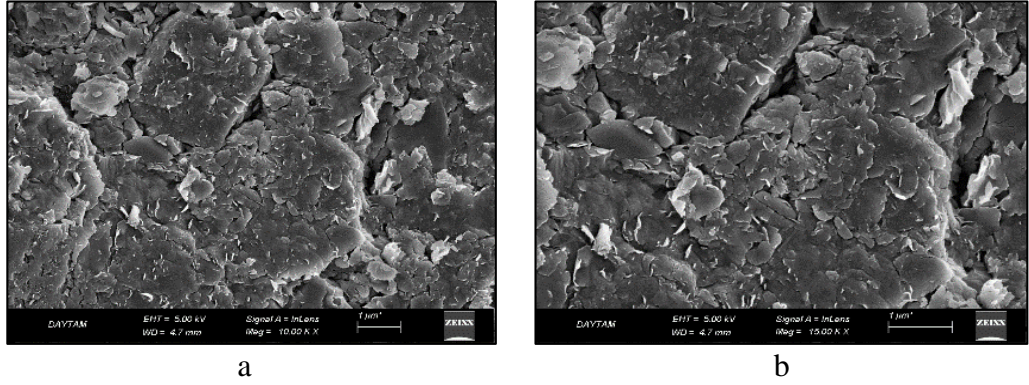


Şekil 4.36. D, KR ve DKR50 numunelerine ait XRD grafikleri

%50 bor atığı kil pestili katkılı numunelerin XRD analizleri incelendiğinde bazı piklerin kaybolduğu ve bazı piklerin ise ortaya çıktığı veya güçlendiği görülmektedir. Bu durumun bor atığı kil pestilleri ile doğal kil arasında meydana gelen kimyasal etkileşimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

### SEM analizi

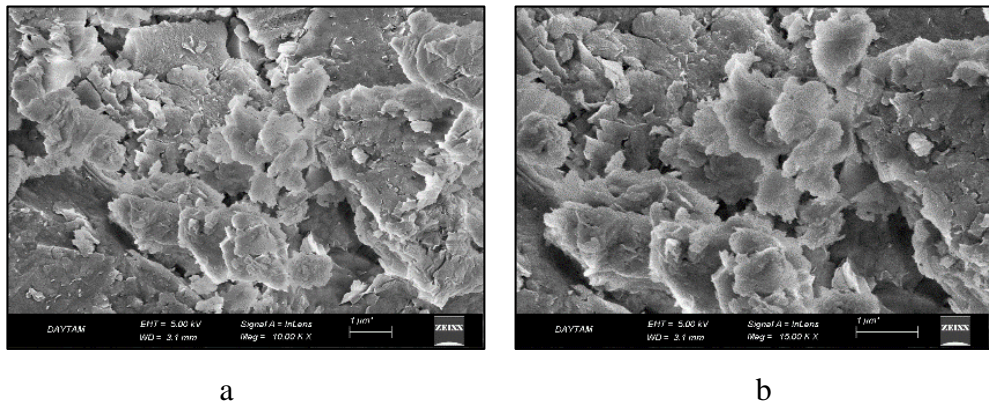
Şekil 4.37'de DKS50 numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. DKS50 numunesi için çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde, yer yer plakaların olduğu ve büyük oranda taneciklerin belirli bir geometriye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun atık kil numunesinin baskın minerallerinin kolemanit ve kalsit olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 4.37.** DKS50 numunesinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

SEM görüntülerine bakılacak olursa tanecik boyutunun Kestelek (Şekil 4.12) ve doğal kil (Şekil 4.15) numunelerinin tanecik boyutundan daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durumun DKS50 numunesinin MH özelliği kazanması yönünde etkili olduğu düşünülmektedir.

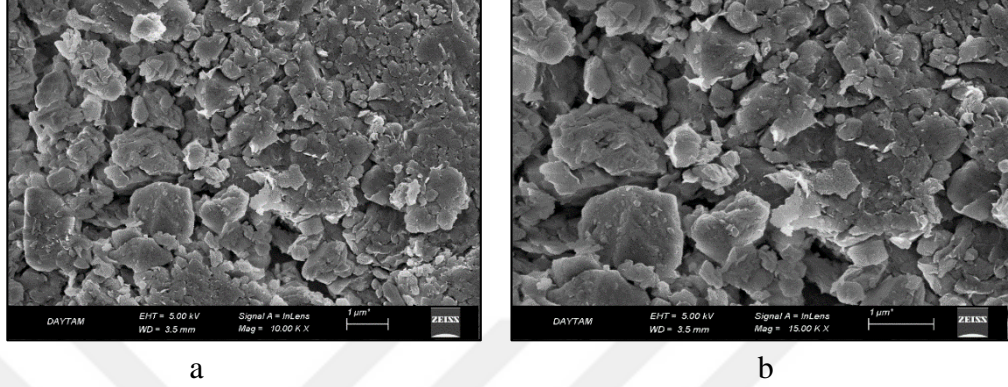
Şekil 4.38’de DBG50 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, yer yer plakaların olduğu ve büyük oranda taneciklerin belirli bir geometriye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun, atık kil numunesinin baskın minerallerinin kolemanit ve kalsit olmasından kaynakladığı düşünülmektedir.



**Şekil 4.38.** DBG50 numunesinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

SEM görüntülerine bakılacak olursa tanecik boyutunun Bigadiç atık kil pestili (Şekil 4.13) ve doğal kil (Şekil 4.15) numunelerinin tanecik boyutundan daha büyük olduğu

görülmektedir. Bu durum DBG50 numunesinin MH özelliği kazanması yönünde etkili olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.39.** DKR50 numunesinin SEM görüntüleri 10000X (a), 15000X(b)

Şekil 4.39’da DKR50 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, yer yer plakaların olduğu ve büyük oranda taneciklerin belirli bir geometriye sahip olduğu görülmektedir. SEM görüntülerine bakılacak olursa tanecik boyutunun Kırka atık kil pestili (Şekil 4.14) ve doğal kil (Şekil 4.15) numunelerin tanecik boyutundan daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum DKR50 numunesinin MH özelliği kazanması yönünde etkili olduğu düşünülmektedir.

### ICP-MS analizi

%50 Kestelek atık kil pestili katkıli DKS50 numunesine yaptırılan ICP-MS analizine göre DKS50 numunesi içinde en fazla Magnezyum (Mg) elementi bulunurken, Alüminyum (Al), Demir (Fe), Kalsiyum (Ca) ve Bor (B) gibi elementlerin de bulunduğu tespit edilmiştir. Bu elementlerin DKS50 içinde bulunma oranları Çizelge 4.28’de verilmiştir.

%50 Bigadiç atık kil pestili katkıli DBG50 numunesi için yapılan ICP-MS analizine göre DBG50 içerisinde en fazla Magnezyum (Mg) elementi bulunurken diğer elementlerin bulunma oranları yüksek orandan başlayarak sırasıyla Alüminyum (Al), Demir (Fe), Kalsiyum (Ca) ve Bor (B)’dur (Çizelge 4.28).

**Çizelge 4.28.** DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerinin ICP-MS anazlizi

Numune	Element								
	Li	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Sr
<b>DKS50</b>	0,06	2,67	0,58	5,86	3,72	0,49	3,08	3,35	0,38
<b>DBG50</b>	0,097	2,16	0,40	7,62	3,60	0,47	2,64	3,20	0,36
<b>DKR50</b>	0,07	3,18	2,39	6,87	3,73	0,53	2,75	3,34	0,52

%50 oranında Kırka atık kil pestili katkı DKR50 numunesine yapılan ICP-MS analizine göre DKR50 içerisinde en fazla Magnezyum (Mg) elementi bulunurken Alimünyum (Al), Demir (Fe), Kalsiyum (Ca) ve Bor (B) gibi elementlerinde bünyesinde bulunduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.28).

#### **XPS analiz sonuçları**

DKS50, DBG50 ve DKR50 numuneleri üzerinde yapılan XPS analiz sonuçları Çizelge 4.29'da verilmiştir.

**Çizelge 4.29.** DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerinin XPS sonuçları

Element	Numuneler		
	DKS50	DBG50	DKR50
	(atomik % )		
<b>Oksijen (O)</b>	45,41	50,26	53,02
<b>Karbon (C)</b>	10,11	7,00	7,42
<b>Azot (N)</b>	-	0,942	-
<b>Potasyum (K)</b>	11,99	2,30	-
<b>Altın (Au)</b>	0,68	-	0,79
<b>Demir (Fe)</b>	0,37	0,39	-
<b>Bor (B)</b>	3,73	1,50	2,53
<b>Magnezyum (Mg)</b>	5,10	9,08	7,82
<b>Kükürt (S)</b>	2,69	1,82	-

Çizelge 4.29. (devam)

Element	Numuneler		
	DKS50	DBG50	DKR50
	(atomik % )		
<b>Silisyum (Si)</b>	12,35	19,38	16,66
<b>Fosfor (P)</b>	-	2,30	-
<b>Sodyum (Na)</b>	1,06	0,62	2,56
<b>Kalsiyum (Ca)</b>	3,32	4,15	4,73
<b>Alüminyum (Al)</b>	3,19	2,56	3,19

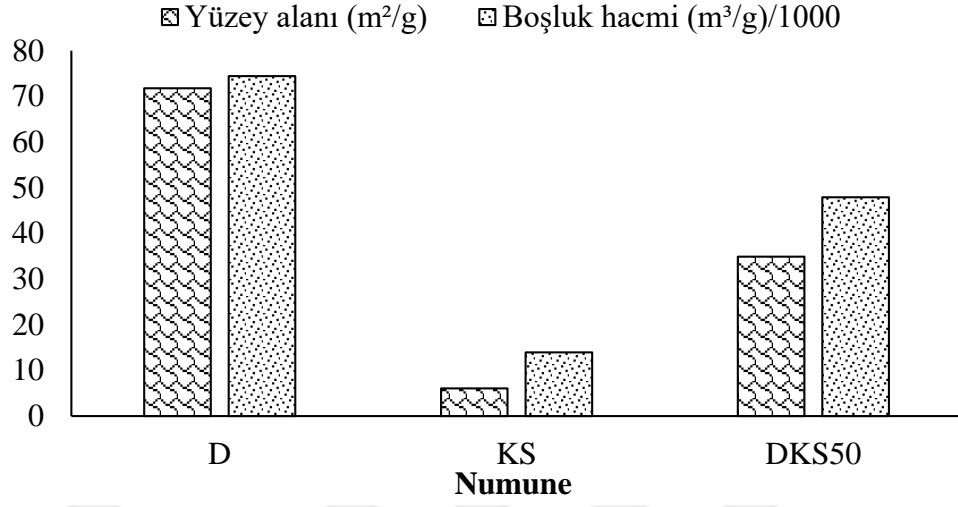
**BET analiz sonuçları**

%50 Kestelek, Bigadiç ve Kırka atık kil pestil katkılı numunelere ait BET analizi sonucunda elde edilen yüzey alanı ve boşluk hacmi değerleri Çizelge 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.30. DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerine ait BET analiz sonuçları

Numune	DKS50	DBG50	DKR50
<b>Yüzey alanı (m<sup>2</sup>/g)</b>	34,91	51,44	9,65
<b>Boşluk hacmi (m<sup>3</sup>/g)</b>	0,048	0,051	0,226

Doğal kil, Kestelek atık kil pestili ve %50 oranında Kestelek katkılı numunelerin BET analizi ile elde edilen yüzey alanları ve boşluk hacimleri Şekil 4.40'de verilmiştir.

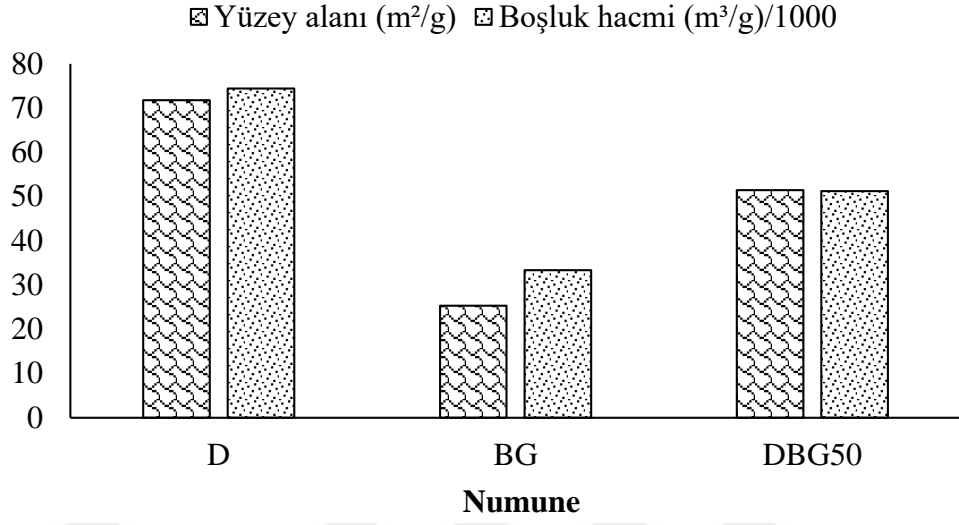


**Şekil 4.40.** D, KS ve DKS50 numunelerinin BET analiz sonuçları

Şekil 4.40 incelendiğinde, %50 Kestelek atık kil pestili katkısının doğal kile ait yüzey alanı ve boşluk hacminde sırasıyla %51 ve %36 oranında azalma meydana geldiği görülmektedir.

Bigadiç atık kil pestilinin doğal kile %50 oranında katılması ile elde edilen DBG50 numunesi ile doğal kil ve Bigadiç atık kil pestili numunelerinin BET analizi sonucunda belirlenen yüzey alanı ve boşluk hacmi

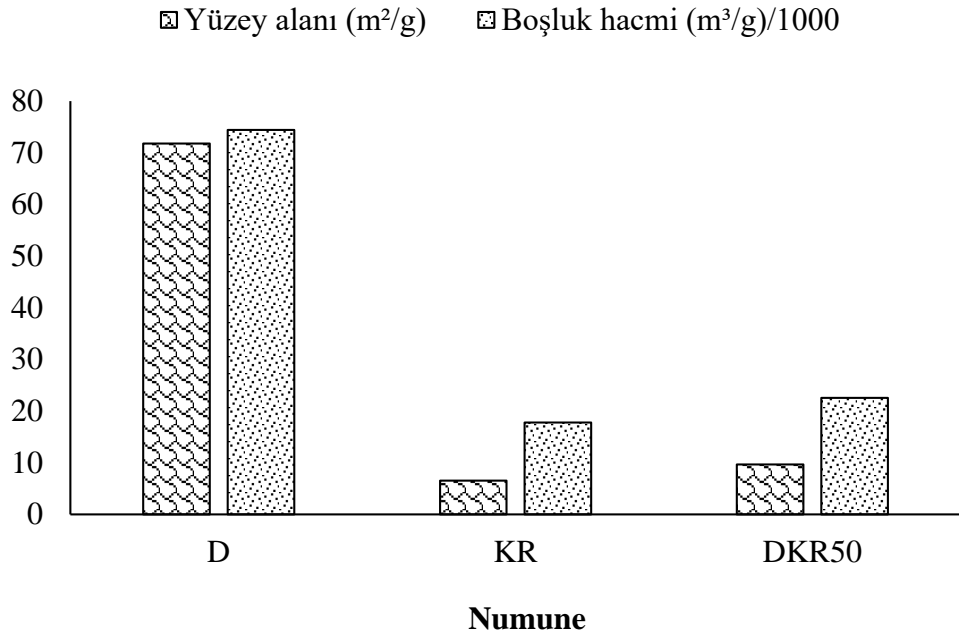
Şekil 4.41’de verilmiştir.



**Şekil 4.41.** D, BG ve DBG50 numunesine ait BET analizi sonuçları

Doğal kile göre %50 Bigadiç atık kil pestili katkısının yüzey alanında %28 ve boşluk hacminde %31 oranında azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir.

%50 oranında Kırka atık kil pestili katkılı numune (DKR50) ile Kırka atık kil pestili ve doğal kilin BET analiz sonuçları Şekil 4.42’de verilmiştir.



**Şekil 4.42.** D, KR ve DKR50 numunesine ait BET analizi sonuçları



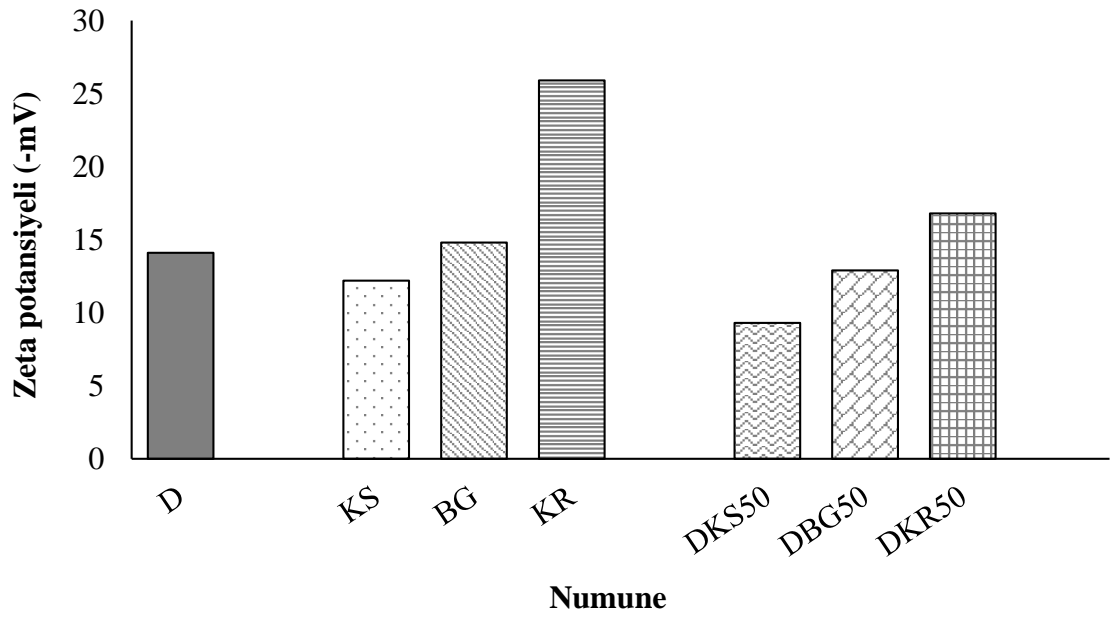
%50 Kırka atık kil pestili katkısının doğal kilin yüzey alanında % 70 ve boşluk hacminde %87 oranında azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir.

### Zeta potansiyeli analizleri

DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerine ait zeta potansiyeli deney sonuçları Çizelge 4.31 ve Şekil 4.43'de görülmektedir.

**Çizelge 4.31.** DKS50, DBG50 ve DKR50 numunelerine ait zeta potansiyeli değerleri

Numune	DKS50	DBG50	DKR50
Zeta potansiyeli (mV)	-9,3	-12,9	-16,8



**Şekil 4.43.** Doğal kil, atık kil pestilleri ve %50 atık kil pestili katkılı numunelerin zeta potansiyeli değerleri

Şekil 4.43 incelendiğinde Kestelek ve Bigadiç atık kil pestili katkısının doğal kilin zeta potansiyelini sıfıra yaklaştırdığı görülmektedir. Doğal kile Kırka atık kil pestili katkısının zeta potansiyelini sıfırdan uzaklaştırdığı tespit edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Erzurum-Horasan Mevkii'nden temin edilen bir doğal kile, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı Bigadiç, Kestelek ve Kırka İşletme Müdürlükleri'nden temin edilen bor atığı killeri belirli yüzdelerde (%10, %30, %50 ve %70) katılmış ve bor atığı killerinin, doğal kilin geoteknik özelliklerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak doğal kilin ve bor atığı kil pestillerinin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Bor atığı katkılı kil numunelere ait deney sonuçları, doğal kile ait deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Doğal kilin ve bor atığı killerin zemin sınıfları, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre CH (yüksek plastisiteli kil) olarak belirlenmiştir. Doğal kile katılan Kestelek ve Kırka atık kil pestillerinin yüzdesinde meydana gelen artışla birlikte likit limit ve plastik limitlerin azaldığı görülmüştür. Doğal kile katılan Bigadiç bor atığı kil pestilinin yüzdesinde meydana gelen artışla numunelerin likit limitlerinde azalma meydana gelirken, plastik limit değerlerinde ise kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Atık kil pestili killi katkılı numunelerin zemin sınıflarının genel olarak MH (yüksek plastisiteli silt) olduğu görülmüştür.

Bor atığı katkılı killeri üzerinde standart proktor deneyleri yapılmıştır. Doğal kile katılan Kestelek bor atığı kili, doğal kilin optimum su muhtevasında azalma meydana getirmiş, maksimum kuru birim hacim ağırlığında önemli bir değişim görülmemiştir. Kırka atık kil pestili katkılı numunelerin optimum su muhtevasında doğal kilin optimum su muhtevasına göre artış meydana gelirken maksimum kuru birim hacim ağırlığında kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Bigadiç bor atığı kil yüzdesi arttıkça doğal kilin optimum su muhtevası doğal kilin optimum su muhtevasına göre kısmen azalmıştır.

Bor atığı katkılı killerin serbest basınç mukavemetleri bor atığı kil pestillerinin hafif puzolonik karakterlerinden dolayı 0, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda belirlenmiştir. Kür süresinde meydana gelen artış genel olarak katkılı numunelerin serbest basınç

mukavemetlerini artırmıştır. Kestelek atık kil pestili katkı oranı arttıkça, numunelerin serbest basınç mukavemetleri doğal kilin serbest basınç mukavemetine göre artış göstermiştir. Bigadiç bor atığı kil pestili katkı oranında meydana gelen artışla doğal kilin serbest basınç mukavemeti %50 katkı oranına kadar artmış, ancak %70 katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri azalmıştır. Kırka bor atığı kil pestili katkılı numunelerde, bor atığı kil pestili katkı oranında meydana gelen artışla, doğal kilin serbest basınç mukavemetinde genel olarak azalma meydana gelmiştir. Kırka bor atığının doğal kilin serbest basınç mukavemeti üzerinde olumlu bir etkisi olmadığı söylenebilir.

Bor atığı katkılı killerin şişme basıncı ve geçirimsizlik deneyler sonuçları incelendiğinde, Kestelek, Kırka ve Bigadiç bor atığı kil pestillerinin, doğal kilin şişme basıncı ve geçirimsizliğini azalttığı belirlenmiştir.

Doğal kil, bor atığı kil pestilleri ve %50 bor atığı kil pestili katkılı numuneler üzerinde kimyasal ve yapısal analizler yaptırılmıştır. XRD analizleri doğal kile katılan bor atığı kil pestillerinin yeni mineraller ortaya çıkardığını, bazı minerallerin katkı ile kaybolduğunu veya yüzdelерinin değiştiğini göstermiştir.

SEM analizleri ile katkılı numunelerin iç yapıları incelenmiştir. ICP-MS ve XPS analizleri katkılı numunelerin içerisinde bulunan element oranlarının doğal kilden ve bor atığı killerden farklı olduğunu ortaya koymuştur.

BET analizleri bor atığı kil pestillerinin doğal kilin yüzey alanını ve boşluk hacimlerini azalttığını göstermiştir. Ayrıca ,numunelerin zeta potansiyeli değerleri değişmiştir.

Tüm bu analiz sonuçları değerlendirildiğinde bor atığı kil pestilleri ile doğal kil arasında kimyasal bir etkileşim meydana geldiği söylenebilir.

Bor üretimindeki artışla birlikte, ortaya çıkan bor atığı kil pestili miktarının da artacağı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, Eti Maden Kestelek ve Bigadiç Bor İşletmeleri'nden temin edilen bor atığı killерinin doğal kilin serbest basınç

mukavemeti üzerinde olumlu bir etkisi olduğu, Kırka Bor İşletmesi'nden temin edilen bor atığı kilinin ise doğal kilin serbest basınç mukavemeti üzerinde olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bigadiç, Kestelek ve Kırka bor atığı killerin, yüksek plastisiteli kilin şişme basıncı ve geçirimsizliği üzerinde ise olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Böylece Bigadiç ve Kestelek bor atığı kil pestillerinin, yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabilceği düşünölmektedir. Bor atığı killerin yüksek plastisiteli kilin geçirimsizliğini azalttığı göz önüne alındığında bor atığı katkılı killerin katı atık depolama alanlarında geçirimsiz şilte olarak kullanılabilirlik bakımından umut vadettiği söylenebilir.

Bor atığı killerin atık depolama alanlarında şilte olarak kullanılabilirliklerinin ortaya konabilmesi için sızıntı suları ile olan etkileşimlerinin belirlenmesinin gerektiği düşünölmektedir. Bu amaçla gelecek çalışmalarda sızıntı suları kullanılarak numunelerin geçirimsizlik ve yapısal özelliklerinin araştırılması önerilmektedir.

**KAYNAKLAR**

- ADDDY, 2010. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Aka, M., 2011. Türkiye’de Maden Atıklarının Yönetimi. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Akbulut, R. K., 2008. Yüzey Aktif Madde ile Muamele Edilen Kilin Bazı Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akbulut, S. and Saglamer, A., 2004. Modification of Hydraulic Conductivity in granular Soils Using Waste Materials. *Waste Management* 24(5), 491-499.
- Akyıldız, A., 2012. Beton Üretiminde Bor Atıklarının Puzzolan Materyal Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Anonim 2019a. Bor'un Kısa Tarihçesi. <https://www.starbor.com.tr/haber/borun-kisa-tarihcesi.html> (17.06.2019).
- Anonim 2019b. Kestelek Madeni. <https://mapio.net/pic/p-11920448/> (23.09.2019)
- Anonim 2019c. Antioksidan Tayini - ORP (Oksitlenme İndirgenme Potansiyeli). <http://www.canlisu.com.tr/antioksidan-ve-serbest-radikal-antioksidan-tayini-orp.asp> (20.09.2019).
- ASTM D 5856. Standard Test Method For Measurement Of Hydraulic Conductivity Of Porous Material Using A Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 854. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4318. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4546. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soil. ASTM West Conshohocken, PA.
- Aytekin, Y., Akdağ, M., Türkmen, Y., Batar, T., Badruk, M., 1992. Tinkal (Boraks) Cevherinin Patlatma Yoluyla Zenginleşebilirliğinin ve Bu Yöntemin Bilinen Mevcut Yöntemler Yerine İkamesinin Araştırılması. TÜBİTAK MAG 838.
- Batar, T. ve Köksal, N. S., 2009. Atık Bor, Atık Kâğıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Ekoloji Dergisi*, 18 (72), 45-53.
- Bayrakçı, E., 2015. Bor Atıklarının Çöp Deponi Tabakalarında Kullanılabilirliğinin Geoteknik Açısından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Bentli, T., Özdemir, O., Çelik, M., Ediz, N., 2002. Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri. 1. Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya, 3-4 Ekim 2002, 250-258
- Bideci, Ö.S. ve Bideci, A., 2018. Öğütülmüş Kolemanit Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 30(1), 133-138.

- Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M. M., Tosunoğlu, V., Yılmaz, M. T., 2002. Utilization of Trommel Sieve Waste As An Additive in Portland Cement Production. *Cement and Concrete Research* 32(1), 35-39.
- Bor Sektör Raporu, 2012. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü.
- Bor Sektör Raporu, 2018. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü.
- Bozkurt, R. J., 1989. Minerolojik İncelemelerin Cevher Zenginleştirmedeki Rolüne İki Örnek. *Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 5, 15-21.
- BS 1377, 1990. Methods of Test for Soils For Civil Engineering Purposes. Classification Tests.
- Cernica, J.N., 1995. *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*. John Wiley & Sons Inc., 450 p, USA.
- Çelik, M.S., 2004. *Electrokinetic Behavior Of Clay Surfaces. Clay Surfaces Fundamentals and Applications*, Ed: F. Wypych, K.G. Satyanarayana. Elsevier Academic Press, Netherlands, 58-8
- Demir, C., 2006. Bor Minerallerinin Enerji Kaynağı Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Demir, İ. ve Orhan, M., 2002. Bor Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Değerlendirilmesi. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, 235-239.
- DPT, 1995. Kimya Sanayi Hammaddeleri, Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu. DPT 2414, Ankara.
- DPT, 2001 Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu
- Durmuş, C., 2016. Bor Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Eti Maden, 2018. Bor Cevherinden Rafine ve Konsantre Ürünlerin Üretimi Sırasında Katı Örneklerin Çeşitli Parametrelerinde Online Analizinin Yapılması Projesi
- Eti Maden, 2019. <http://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor> (10.10.2019).
- Eyyüpoğlu, S., 2013. Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Gündüz, O., 2008. Şişen Zeminlerin Tinkal Atığı ile Stabilizasyonu ve Meşelik Killerine Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Güyağüler, T., 2001. Türkiye Bor Potansiyeli. 4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İzmir.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall Inc., 733 p, New Jersey, USA.
- Kavas, K. ve Emrullaoğlu, Ö., 1999. Seydişehir Kırmızı Çamuru ve Kırka Bor Atıklarının Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanımı. 1. Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 216-225.
- Koumpouri, D. and Angelopoulos, G., 2016. Effect Of Boron Waste and Boric Acid Addition on The Production of Low Energy Belite Cement. *Cement and Concrete Composites* 68, 1-8.
- Kula, İ., 2000. Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

- Kurt Albayrak, Z. N. ve Turan, E., 2019. Kestelek Bor Atık Kili Katkılı Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mukavemet Özelliklerinin Araştırılması. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9(2), 890-899.
- Kurttepe, Y., 2006. Bor Atıklarının Seramik Endüstrisinde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Malayoğlu, U. ve Akar, A., 1995. Killerin Sınıflandırmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Morova, N. and Terzi, S., 2015. Evaluation of Colemanite Waste as Aggregate Hot Mix Asphalt Concrete. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 19(2), 8-15.
- Mitchell, J. K., 1976. Fundamentals of soil behavior. John Wiley and Sons Inc., New York, 422 pp.
- Mitchell, J.K. and Soga, K., 2005. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley&Sons, Inc., Third Edition, 558 p, New Jersey.
- Okur, V. and Akinci, K., 2018. Dynamic Behavior of Soft Subgrade Soils Treated with Boron Waste. Advances in Materials Science and Engineering 2018.
- Olgun, A., Erdogan, Y., Ayhan, Y., Zeybek, B., 2005. Development of Ceramic Tiles From Coal Fly Ash and Tincal Ore Waste. Ceramics International 31(1), 153-158.
- Önalp, A., 2013. Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekanığı Çözümlü Problemlerle. Birsen Yayınevi, 461s.
- Özdemir, M. ve Uğurlu, A. (2007). Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin Çimentoda Değerlendirilmesi”, II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara.
- Özpeker, I., 2002. Borat Yataklarının Değerlendirilmesi, I. Uluslararası Bor Sempozyumu, 3-4.
- Parker, D., 2010. Briefing: Remanufacturing and Reuse–Trends and Prospects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management 163(4), 141-147
- Qian, X., Koerner, R. M., Gray, D. H., 2002. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. 710.
- Rawal, A., Shah, T., Anand, S., 2010. Geotextiles: Production, Properties and Performance. Textile Progress 42(3), 181-226.
- Rhoades, J. D., 1982. Cation Exchange Capacity. Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties Second Edition. Agronomy. No: 9 Part 2. Edition P: 149- 157.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., 1991. Fundamentals of Analytical Chemistry 7th Edition.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2010. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. TC Resmi Gazete No 27533.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2014. Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu.
- Tahtasızoğlu, B., 2010. Katı Atık Depolama Alanlarının Dizayn Kriterlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

- Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., Sevinç, V., 2002. Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, 259-266.
- Uğurlu, A., Özdemir, M., Topçu, İ., 2004. Bor İçeren Kil Atıkların Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül 2004, Eskişehir.
- Ulutaş, D., 2015. Bor Atıklarının Katı Atık Düzenli Depolama Tesislerinde Geomembran Tabaka Olarak Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Ulutaş, D., Bayrakci, E., Cokaygil, Z., Ozkan, A., Guney, Y., Banar, M., 2014. Geotechnical, Chemical and Structural Characterization of Waste Clay From Boron Production. Athens Journal of Technology Engineering 1(3), 171-179.
- Uslu, T. and Arol, A., 2004. Use of Boron Waste as an Additive in Red Bricks. Waste Management 24(2), 217-220.
- Uzuner, B. A., 2014. Temel Zemin Mekaniği. Derya Kitabevi, Trabzon.
- Ünlü, K., 1998. Toprak Kirliliği: Özellikleri, Kontrolü ve Temizlenmesi. Çevre ve Mühendis 16, 20-29.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., 2007. Modification of The Geotechnical Properties, As Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives. Cold Regions Science and Technology 48, 44-54.
- Yiğitbaşoğlu, H., 2004. Türkiye İçin Önemli Bir Maden: Bor. Coğrafi Bilimler Dergisi, 2004, 2.(2), 13-25.
- Zaimoğlu A.Ş., 2011. Engineering Properties of Sand Stabilised with Borogypsum. Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering 164, 277-282.



## ÖZGEÇMİŞ

Emrah TURAN, 1994 yılında Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum 'da tamamladı. 2013 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2016 yılında mezun oldu. Akabinde 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

