

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LİNYİTLERİN KAREKTERİZASYONU VE MİKRODALGA İLE KÜKÜRT**  
**GİDERİMİ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**CEMİL EMRE YILMAZ**

**OCAK 2017**

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LİNYİTLERİN KAREKTERİZASYONU VE MİKRODALGA İLE KÜKÜRT  
GİDERİMİ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Cemil Emre YILMAZ**

**DANIŞMAN : Doç. Dr. A. Dilek CUHADAROĞLU**

**ZONGULDAK  
Ocak 2017**

**KABUL:**

Cemil Emre YILMAZ tarafından hazırlanan “Linyitlerin Karakterizasyonu ve Mikrodalga İle Kükürt Giderimi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/01/2017

**Danışman:** Doç. Dr. A. Dilek ÇUHADAROĞLU

Bülent Ecevit Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Sait KIZGUT

Bülent Ecevit Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Ayhan Ali SİRKECİ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Müh. Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../2017

Prof. Dr. Baki HAZER  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Cemil Emre YILMAZ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **LİNYİTLERİN KAREKTERİZASYONU VE MİKRODALGA İLE KÜKÜRT GİDERİMİ**

**Cemil Emre YILMAZ**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. A. Dilek CUHADAROĞLU**

**Ocak 2017, 111 sayfa**

Bu tez kapsamında Türkiye'nin 10 farklı kömür sahasından alınan kömür numuneleri ile çalışılmıştır. Numunelerin karakterizasyonu için; kimyasal analizleri (nem, kül, uçucu madde, sabit karbon, üst ısıl değer ve alt ısıl değer), elementel analizleri (C, H, O ve N) yapılmıştır. Kükürt (S) çeşitleri (toplam kükürt, pritik kükürt, sülfat kükürdü, yanabilir kükürt ve organik kükürt) belirlenmiştir. Numunelerin öğütülebilirlikleri, HGI değerleri belirlenerek incelenmiştir. 1,40 gr/cm<sup>3</sup> ve 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ağır ortamlarda Yüzdürme-Batırma Testleri yapılmıştır. 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin elementel analizleri, toplam kükürt içerikleri, HGI değerleri belirlenmiştir. Hem tüvenan kömür örneklerinde, hem de 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerde petrografik çalışmalar yapılmıştır. Yüzen ürünlerin küllerinin kül ergime dereceleri ve mineralojik bileşimleri belirlenerek, Slagging İndeksleri ve Fouling İndeksleri tespit edilmiştir.

## **ÖZET (devam ediyor)**

Mikrodalga uygulamalarında; mikrodalga enerjisinin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin toplam kükürt içeriğine etkisi incelenmiştir. Mikrodalga çalışmaları sonunda Çayırhan numunesinin toplam kükürdü %5,30'dan %2.31'e düştüğü, %6,50 toplam kükürt içerikli Milas-Ekizköy numunesinin mikrodalga uygulaması sonrası toplam kükürdünün %3,18'e indiği, mikrodalga uygulaması ile Çayırhan ve Milas-Ekizköy numunelerinin toplam kükürt içeriklerinde %52,64 ve %51,08 kükürt giderimi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Linyit, Piritik Kükürt, Toplam Kükürt, Mikrodalga, Kükürt giderme

**Bilim Kodu:** 607.02.03.

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **CHARACTERIZATION OF LIGNITES AND REMOVAL OF SULPHUR WITH MICROWAVE**

**Cemil Emre YILMAZ**

**Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mining Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. A. Dilek CUHADAROĞLU**

**January 2017, 111 pages**

In this thesis study, coal samples from different 10 locations in Turkey were investigated. In order to characterize the coal samples, they were analyzed in terms of chemical analysis (moisture, ash, volatile matter, fixed carbon, gross and ultimate calorific value) and elemental analysis (C,H and N). Coal samples were investigated in terms of sulphur content and sulphur types (total sulphur, pyritic sulphur, combustible sulphur and organic sulphur). Coal samples were also analyzed in terms of their grindability (HGI). In the first step of this study, float and sink analysis with 1.40 and 1.60 g/cm<sup>3</sup> density medium was carried out on the coal samples. Floated coal samples were analyzed in terms of their total sulphur content, elemental analysis and HGI grindability measurements. Beside these, petrographic studies were carried out on the run of mine and cleaned coal samples. Ash samples of floated coal samples were obtained and their ash melting degrees and mineralogic compositions were analyzed. With the help of these abovementioned ash melting degrees and mineralogic composition analysis, Slagging and Fouling indices of the samples were determined. In the scope of this study, also

## **ABSTRACT (continued)**

microwave application was realized on the floated coal samples. The aim of the microwave application was to observe the effect of microwave on total sulphur content within the 1.60 g/cm<sup>3</sup> density floated coal samples.

Microwave studies resulted as total sulphur content of Çayırhan coal sample decreased down from 5.3 % to 2.31 % while total sulphur content of Milas-Ekizköy coal sample decreased from 6.5 % to 3.18 %. Removal percentages of total sulphur content of Çayırhan and Milas-Ekizköy coal samples were 52.64% and 51.08, respectively.

**Keywords:** Lignite, Pritic sulfur, Total sulfur, Microwave, Desulfurization

**Science Code:** 607.02.03.



## TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi, kapsamının ayrıntılandırılması, sonuçların yorumlanmasında çok değerli katkı ve yönlendirmeleri için tez danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. A. Dilek CUHADAROĞLU'na,

Çalışmalarım süresince değerli katkılarını esirgemeyen, ayrıca mikrodalga uygulamalarında çalışmalarımı yönlendiren Sayın Hocam Prof. Dr. İhsan TOROĞLU'na,

Çalışmalarım süresince değerli katkılarını esirgemeyen, ayrıca petrografik analizlerin yapılmasındaki yoğun emek ve çabaları için Sayın Hocam Prof. Dr. Sait KİZGUT'a,

Tezimi değerlendirerek değerli katkılarıyla çalışmamı yönlendiren Sayın Hocam Prof. Dr. Ayhan Ali SİRKECİ'ye,

Çalışmanın tüm aşamalarında destek ve yardımları için Uzm. Serdar YILMAZ'a,

Çalışmanın tüm aşamalarında destek ve yardımları için Arş. Gör. Mehmet BİLEN ve Arş. Gör. Barış AKKAYA'ya,

Laboratuvar çalışmalarını beraber yürüttüğümüz meslektaşım Maden Mühendisi Erman KIRAN'a,

Tez yazım aşamasında desteğinden ötürü çocukluk arkadaşım Uzm. Veteriner Hekim Ahmet KÜNYELİ'ye,

Yaşamım boyunca maddi ve manevi her konuda desteklerini gördüğüm aileme,

en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL: .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 AMAÇ VE YÖNTEM .....	2
BÖLÜM 2 KÖMÜRÜN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ .....	3
2.1 KÖMÜRÜN TANIMI.....	3
2.2 KÖMÜR OLUŞUMU .....	4
2.2.1. Turbalaşma .....	4
2.2.2. Kömürleşme .....	6
2.3 TÜRKİYE’DE KÖMÜR.....	7
2.3.1 Rezervler .....	7
2.3.2 Üretimler .....	10
2.4 DÜNYA’DA KÖMÜR .....	19
2.4.1 Rezervler .....	20
2.4.2 Üretimler .....	21
2.5 KÖMÜRÜN PETROGRAFİK, FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ .....	23
2.5.1 Kömürün Petrografik Özellikleri .....	23
2.5.1.1 Litotipler.....	23

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.5.1.2 Maseraller.....	24
2.5.2 Kömürün Fiziksel Özellikleri.....	24
2.5.3 Kömürün Kimyasal Özellikleri.....	27
2.6 KÖMÜRÜN EKONOMİDEKİ YERİ .....	31
<b>BÖLÜM 3 KÖMÜRDEKİ KÜKÜRT TÜRLERİ VE KÜKÜRT GİDERME YÖNTEMLERİ..</b>	<b>33</b>
3.1 KÖMÜRDEKİ KÜKÜRT TÜRLERİ.....	33
3.1.1. İnorganik Küçükrt .....	33
3.1.1.1 Sülfat Küçükrdü .....	34
3.1.1.2 Piritik Küçükrt.....	34
3.1.2. Organik Küçükrt .....	36
3.2 KÜKÜRT GİDERME YÖNTEMLERİ.....	36
3.2.1 Küçükrt Gidermede Fiziksel Yöntemler .....	36
3.2.1.1 Elektrostatik ve manyetik yöntemler .....	37
3.2.1.2 Özgül Ağırlık Farkından Yararlanarak Ayırma Yöntemleri .....	38
3.2.1.3 Yüzey Özelliklerine Göre Yöntemler .....	38
3.2.2 Küçükrt Gidermede Kimyasal Yöntemler .....	40
3.2.2.1 Meyers Prosesi .....	41
3.2.2.2 Ledgemont Prosesi .....	41
3.2.2.3 Batelle Yöntemi.....	42
3.2.2.4 PETC Yöntemi .....	42
3.2.3 Küçükrt Gidermede Biyokimyasal Yöntemler .....	43
3.2.4 Kömürden Küçükrt Giderme Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	44
3.2.5 Mikrodalga Enerjisinin Küçükrt Giderimine Etkisi .....	45
3.2.5.1 Mikrodalga Enerjisi İle Desülfürizasyon .....	48
3.2.5.2 Mikrodalga İle Kömür Üzerinde Yapılan Çalışmalar .....	50
<b>BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>55</b>
4.1 MALZEME VE YÖNTEM.....	55

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.1.1 Malzeme .....	56
4.1.1.1 Kimyasal Analizler.....	58
4.1.1.2 Elementel Analizler.....	63
4.1.2 Yöntem .....	65
4.1.2.1 Yüzdürme-Batırma Testleri.....	65
4.1.2.2 Numunelerin Öğütülebilirliği.....	74
4.1.2.3 Petrografik Analizler .....	75
4.1.2.4 Kül Ergime Derecesi Ve Külün Mineralojik Özellikleri .....	90
4.1.2.5 Mikrodalga Çalışmaları.....	94
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	99
KAYNAKLAR.....	103
BİBLİYOGRAFYA .....	109
ÖZGEÇMİŞ .....	111



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Türkiye linyit rezervlerinin dağılımı.....	10
Şekil 2.2 Türkiye Taşkömürü üretimleri 2011-2015.....	11
Şekil 2.3 Türkiye Linyit üretimleri 2011-2015 .....	12
Şekil 2.4 Yıllar itibariyle linyit üretimlerinin kuruluşlara dağılımı .....	14
Şekil 2.5 Dünya kömür rezerv payları .....	20
Şekil 2.6 Dünya linyit rezervlerinde ülkelerin payları .....	21
Şekil 2.7 Dünya kömür üretimleri.....	22
Şekil 2.8 Ülkelere göre 2014 yılı kömür üretimleri-milyon ton .....	22
Şekil 2.9 2014 Yılı Dünya kömür ticareti .....	32
Şekil 3.1 Pritin kristal yapısı .....	35
Şekil 3.2 Mikrodalga ile ısınmanın şema halı .....	47
Şekil 3.3 Malzeme ile mikrodalgaın etkileşimi a) geçirimli b) iletken c) soğurucu d) karma	47
Şekil 3.4 Mikrodalga radyasyonu ile desülfürizasyon için reaksiyon şeması .....	49
Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan numunelerin bölgelerini gösterir harita.....	56
Şekil 4.2 Deneysel çalışmalarda uygulanan akım şeması.....	57
Şekil 4.3 Dursunbey numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.....	67
Şekil 4.4 Çayırhan numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.....	69
Şekil 4.5 Ilgın numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.....	70
Şekil 4.6 Ermenek numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.....	71
Şekil 4.7 Gürmin-Merzifon numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.....	73
Şekil 4.8 Saray 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	81
Şekil 4.9 Dursunbey 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	82
Şekil 4.10 Milas-Ekizköy 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	83
Şekil 4.11 Yatağan 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	84
Şekil 4.12 Çayırhan 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	85
Şekil 4.13 Ilgın 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	86
Şekil 4.14 Ermenek 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	87
Şekil 4.15 Sorgun 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.....	88
Şekil 4.16 Gürmin-Merzifon 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları...	89
Şekil 4.17 Mikrodalga uygulaması akım şeması.....	95
Şekil 4.18 Numunelerin toplam kükürt içeriklerinde mikrodalga etkisi.....	96





## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Türkiye Taşkömürü Kurumu Ruhsatlı Kömür Sahalarına Ait Rezervler .....	8
Çizelge 2.2 2015 Yılı Sonu İtibarıyla Kurumlara Ait Linyit Rezervleri.....	9
Çizelge 2.3 100.000 tonun üzerinde linyit üretimi yapılan işletme, havza ya da illeri .....	13
Çizelge 3.1 En yaygın olarak uygulanan kimyasal kükürt giderme yöntemleri .....	40
Çizelge 4.1 Saray numunesi kimyasal analiz sonuçları. ....	58
Çizelge 4.2 Orhaneli numunesi kimyasal analiz sonuçları. ....	59
Çizelge 4.3 Dursunbey numunesi kimyasal analiz sonuçları. ....	59
Çizelge 4.4 Milas-Ekizköy numunesi kimyasal analiz sonuçları.....	60
Çizelge 4.5 Yatağan numunesi kimyasal analiz sonuçları. ....	60
Çizelge 4.6 Çayırhan numunesi kimyasal analiz sonuçları.....	61
Çizelge 4.7 Ilgın numunesi kimyasal analiz sonuçları.....	61
Çizelge 4.8 Ermenek numunesi kimyasal analiz sonuçları. ....	62
Çizelge 4.9 Sorgun numunesi kimyasal analiz sonuçları. ....	62
Çizelge 4.10 Gürmin-Merzifon numunesi kimyasal analiz sonuçları.....	63
Çizelge 4.11 Tüvenan numunelerin ve 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin elementel analiz sonuçları.....	64
Çizelge 4.12 Saray numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları. ....	66
Çizelge 4.13 Orhaneli numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları. ....	66
Çizelge 4.14 Dursunbey numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları. ....	66
Çizelge 4.15 Milas-Ekizköy numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.....	68
Çizelge 4.16 Yatağan numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları. ....	68
Çizelge 4.17 Çayırhan numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.....	69
Çizelge 4.18 Ilgın numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları. ....	70
Çizelge 4.19 Ermenek numunesi Yüzdürme-Batırma test sonuçları. ....	71
Çizelge 4.20 Sorgun numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.....	72
Çizelge 4.21 Gürmin-Merzifon numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.....	72
Çizelge 4.22 Tüvenan numunelerin ve 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin HGI değerleri. ....	74

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.23 Saray numunesi petrografik analiz sonuçları. ....	76
Çizelge 4.24 Dursunbey numunesi petrografik analiz sonuçları.....	76
Çizelge 4.25 Milas-Ekizköy numunesi petrografik analiz sonuçları. ....	77
Çizelge 4.26 Yatağan numunesi petrografik analiz sonuçları.....	77
Çizelge 4.27 Çayırhan numunesi petrografik analiz sonuçları. ....	78
Çizelge 4.28 Ilgın tüvenan numunesi petrografik analiz sonuçları. ....	78
Çizelge 4.29 Ermenek numunesi petrografik analiz sonuçları.....	79
Çizelge 4.30 Sorgun numunesi petrografik analiz sonuçları.....	79
Çizelge 4.31 Gürmin-Merzifon numunesi petrografik analiz sonuçları. ....	80
Çizelge 4.32 Numunelerin kül ergime derecesi sonuçları.....	90
Çizelge 4.33 1,60 gr/cm <sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürünlerinin küllerinin minerolojik analizi. ....	91
Çizelge 4.34 Numunelerin Slagging İndeks sonuçları. ....	92
Çizelge 4.35 Numunelerin Fouling İndeks sonuçları.....	93
Çizelge 4.36 Mikrodalga öncesi ve sonrası toplam kükürt içerikleri ve kükürt giderimi sonuçları. ....	96

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

g	: Gram
cm <sup>3</sup>	: Santimetreküp
cm	: Santimetre
M	: Molar
kcal	: Kilokalori
kg	: Kilogram
km <sup>2</sup>	: Kilometrekare
MW	: Megawatt
%	: Yüzde
TWh	: Terawatt-Saat
h	: Saat
°C	: Derece Celsius
MPa	: Megapascal
dk	: Dakika
mL	: Mililitre
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
µm	: Mikrometre
Mhz	: Megahertz
Ghz	: Gigahertz
d50	: Numunenin %50'sinin geçtiği boyut
d80	: Numunenin %80'nin geçtiği boyut
sn	: saniye
kW	: Kilowatt
mm	: Milimetre
m <sup>3</sup>	: Metreküp
t	: Ton

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

### KISALTMALAR

ASTM	: Uluslararası Standartlar
DBT	: Dibenzotiyofen
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EHF	: Aşırı Yüksek Frekans
EÜAŞ	: Türkiye Elektrik Üretim Anonim Şirketi
HGI	: Hardgrove İndeksi
HGMS	: Yüksek Alan Şiddetli Manyetik Ayırıcı
MİGEM	: Maden İşleri Genel Müdürlüğü
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
PCI	: Pülverize Kömür Enjeksiyonu
PETC	: Pittsburg Energy Technology Center
Rf	: Fouling İndeks
Rs	: Slagging İndeks
SHF	: Süper Yüksek Frekans
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
TUİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UHF	: Ultra Yüksek Frekans
UHP	: Üre Hidrojen Peroksit
XRF	: X-ray Fluorescence

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Kömür, orijinal özelliklerinin bazılarını koruyarak dikkate değer bir değişim altında bitki artıklarından oluşan, birçok safsızlık içeren, başlıca karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin bileşiminden oluşmuş yanabilir bir kayaçtır. Diğer kaya tabakalarının arasında milyonlarca yıl ısı, basınç ve mikrobiyolojik etkilerin sonucunda meydana gelmektedir.

Endüstriyel devrimden bu yana insanoğlunun refahı ve gelişmişliği, toplumun teknik düzeyine bağlı olarak bol ve ucuz enerji temini ile mümkün olmaktadır. Devrimin ilk dönemlerinde birincil hammadde olarak kömür üretilmekteydi. Doğal kaynakları zengin ve teknik gelişmeye elverişli olan ülkeler, bu kaynakları en yüksek düzeylerde üreterek, kalkınmalarını çabuk bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Endüstriyel üretimin artması, bilim ve teknolojinin gelişmesi, yaşam standartlarının yükselmesi ile birlikte enerji talebi büyük artışlar göstermektedir.

Kömür günümüzün en önemli enerji kaynağıdır ve yakın gelecekte de bu özelliğini sürdürmeye devam edecektir. Enerji çeşitliliği içerisinde diğer enerji kaynakları da muhakkak kullanılmalıdır. Ancak kömür, özellikle ülkemiz için önemli bir öz kaynak varlığı olması nedeniyle, dışa bağımlılığı azaltmak ve enerji güvenliğini artırmak için muhakkak ön planda tutulmalıdır. Kömürün doğrudan kullanımını çeşitli çevre problemlerine neden olmaktadır. Bu sorunların önlenmesi için kömür hazırlama işlemleri ile iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır.

Ülkemizdeki linyitlerin % 96'sı yüksek kül, % 97'si yüksek kükürtlü kömürler sınıfına girmektedir. Son yıllarda çevre duyarlılığının artması nedeniyle; yüksek ısı değere sahip ithal kömürlere olan ilgi artmıştır. Bu durum yerli kömürlerin temizlenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Ülkemiz linyit kaynaklarının gerekli ve yeterli iyileştirmeler yapılarak enerji üretiminde kullanılması kaçınılmaz bir zorunluluktur.

## 1.1 AMAÇ VE YÖNTEM

Ülkemiz linyitlerini termik santrallerde kullanarak elektrik üretilmesi, enerji potansiyelimizi yerli kaynaklara dayalı olarak artırma imkanı sağlamaktadır. Yerli linyitlerimizin kullanımında en önemli sorunlar; yüksek kükürt içeriği ve kül yapıcı mineral madde miktarıdır. Ülkemizin önemli linyit yataklarının kullanımının iyileştirilmesine yönelik bu çalışmada; yüksek kükürt içerikli linyit sahalarından alınan 10 farklı numunenin karakterizasyonu yapılmıştır ve mikrodalga uygulaması ile kükürt giderimi amaçlanmıştır. Bu amaçla; alınan tüvenan numunelerde ve tüvenan numunelere 1,60 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yapılan Yüzdürme-Batırma Testleri sonucunda elde edilen temiz ürünlerde aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

- Öncelikle kimyasal ve elementel analizleri yapılmış, kükürt tipleri belirlenmiştir,
- Yüzdürme-Batırma Testleri yapılarak, planlanan çalışmalar için temiz ürünler elde edilmiştir,
- HGI değerleri belirlenerek öğütebilebilirlikleri incelenmiştir.
- Mikroskobik çalışmalarla petrografik analizleri yapılmıştır.
- 1,60 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta elde edilen yüzen ürünlerin kül ergime dereceleri belirlenmiştir ve küllerin minerolojik bileşimleri belirlenerek Slagging İndeks ve Fouling İndeksleri tayin edilmiştir.
- 1,60 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk da alınan yüzen ürünlerin mikrodalga uygulaması ile kükürt giderimi incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### KÖMÜRÜN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde kömürün; tanımı, oluşumu, Dünya ve Türkiye enerji sektöründeki rezerv ve üretim miktarları ile petrografik, fiziksel ve kimyasal özellikleri, numunelerin sağlandığı kömür üretim bölgeleri hakkında genel bilgiler bulunmaktadır.

#### 2.1 KÖMÜRÜN TANIMI

Yeterli miktarlarda yanıcı organik bileşikler ihtiva eden, doğal halde veya bazı değişimlerden sonra yakacak olarak kullanılabilen kayalara “mineral yakıtlar” adı verilir. Mineral bir yakıt olan kömür, değişik oranlarda organik ve inorganik maddeler içeren tortul bir kayadır (Ateşok 1986).

Kömür, çoğunlukla lignoselülozik esaslı, değişik oranlarda organik ve inorganik bileşenler içeren, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, biyolojik ve jeolojik süreçler sonucu meydana gelen tortul bir kayadır. Temel yapısı organik ve inorganik olmak üzere iki ana kısımdan oluşur (Uzun 2002, Hayta'dan 2010). Organik yapısı C, H, O ve az miktarda da kükürt ve azottan oluşmakta iken inorganik yapısı, nem ve mineraller ihtiva etmektedir (Çit 2007, Hayta'dan 2010).

Kömür, petrol gibi yoğun olarak karbon ve hidrojen oluşmasına karşın petrole kıyasla daha düşük hidrojen ve daha yüksek karbon içeriğinden dolayı katı halde bulunmaktadır (Anderson 1995, Hayta'dan 2010). Kömürler yakıt hammaddesi olarak kullanılabilirler gibi çeşitli kimyasalların üretiminde ve kok yapımında da kullanılabilirler (Çit 2007, Hayta'dan 2010).

## 2.2 KÖMÜR OLUŞUMU

Kömürü meydana getiren ana eleman karbondur ve kömürün oluşumu karbon çevrimiyle yakından ilişkilidir (Torun ve Tamzok 2007, Taşdemir'den 2007). Kömür; uygun ortamlarda, bataklıklarda bozunma ve çürümeden kurtulan bitki kalıntı birikimlerinin, zamanla biyokimyasal ve fiziksel etkilerle değişimi sonucu oluşur. Kömürleşmede genelde iki evre benimsenir. Biyokimyasal evre, turbalaşma; dinamo kimyasal veya başkalaşma evresi ise kömürleşmedir (Kural 1991).

### 2.2.1. Turbalaşma

Kömürleşmenin ilk evresini oluşturan biyokimyasal süreçleri kapsar. Kavram olarak birincil bitkisel materyalin asidik ve indirgeyici koşullarda biyolojik etkinlik vasıtası ile karbondioksit, su ve hümik asitlere dönüşmesine karşılık gelir. Bu süreç tamamen oksijenli ortamında (suüstünde) gerçekleşirse bitki tamamen karbondioksit, amonyak ve suya dönüşerek ortadan kalkar. Ancak bitki su tablası altında kalırsa veya hızlı bir bitki gelişimi mevcutsa aerobik organizmalar ve oksidasyon süreci tarafından yok edilemez. Birincil bitkisel malzemenin başlıca yapıtaşları yandaki açıklama kutusunda verilmiştir. Turbalaşmanın erken sürecinde turbalıkta en şiddetli bozunma, oksijenin sınırlı ölçüde nüfuz edebildiği turbanın hemen yüzeyinde veya en çok 50 cm derinliğine kadar bir zonda gerçekleşir (Ocakoglu 2015). Bu zonda aerobik bakteriler ve mantarlar aktiftir. Bozunma bunlar sayesinde hücre duvarlarından önce (ki buralar dirençli olan lignin ve selülozdan ibarettir) bitki hücresinin yumuşak kısımlarından itibaren başlar. Dokulardan hidrokarbonlar çıkarılır, geriye oksijen ve karbonca zengin bölümler kalır. Bozunma sonucu ortaya çıkan organik bileşikler (monomerler, polimerler ve organometaller) oldukça kompleks moleküler yapılara sahiptirler. Bunların içinde hümik asit denen organik moleküler kompleksin, kömürleşmenin sonraki evrelerinde oldukça belirleyici bir rolü olduğuna inanılır. Ayrıca hüminitler bataklık ortamındaki organik maddelerin homojenizasyonunu sağladıklarından önemlidirler. Bu süreçte organik bileşiklerde serbest karbonhidrat ve serbest aminoasitlerce önemli derecede bir farklılaşma gerçekleşir. Gerçekten Brown (1972) bir turbanın ilk 10 cm'lik kısmında %28 oranında bulunan şeker ve aminoasitlerin 120 cm derinlikte %12'ye indiğini; proteinlerdeki azot açısından bu oranın %40'tan %15'e çekildiğini belirtmektedir. Ortaya çıkan nitrat ise yeraltı suyu dolaşımı sayesinde turbadan uzaklaştırılmaktadır. Turbanın üstteki 1 m'si içinde gerçekleşen bu süreç denitrifikasyon olarak anılır. Bu evreyi demetanizasyon evresi izler ki,



bu evrede turba hidrojenle çok daha fazla fakirleşip karbonca zenginleştiğinden turbanın organik madde içeriği oransal olarak giderek zenginleşir. Yine bu evrede ortasında var olan kükürt bakterilerinin etkisi ile bir miktar kükürt de ortasından uzaklaştırılır (desülfürizasyon). Turbalaşmanın bu erken evrelerinde dayanıklı moleküler yapıları nedeniyle serbest selüloz hala varlığını korur. Derinliğin artmasıyla birlikte bu organizmalar yerlerini aneorobik bakterilere bırakırlar. Bu kesimde organizmalar bitki dokularındaki oksijeni kullanırlar. Derinlere doğru kolayca asimile edilebilecek maddeler artık pek kalmadığından mikrobiyal yaşam azalır ve 10 m derinlikten sonra büsbütün ortadan kalkar. Artık daha derinlerde yalnızca kimyasal değişimler (başlıca kondenzasyon, polimerizasyon ve indirgeyici reaksiyonlar) gerçekleşir. Turbalaşma sırasındaki en önemli süreç hümik maddelerin oluşumudur. Hümfikasyon, oksijenin varlığı, artan turba sıcaklığı ve alkalın ortamlarda daha etkin gerçekleşir. Turbalaşma sırasındaki en önemli süreç hümik maddelerin oluşumudur. Hümfikasyon denen bu süreç oksijenin varlığı, artan turba sıcaklığı ve alkalın ortamlarda daha etkin gerçekleşir. Turbanın en üst kesimindeki 50 cm'lik zonda karbon içeriği en üstte %40'den altta %50'a kadar yükselir. Fakat daha derinlere doğru çok belirgin bir artış gözlenmez. Buna karşın daha derinlere doğru gidildikçe turbanın kendi ağırlığı nedeniyle nem içeriği hızla düşer. Nem içeriğindeki bu düşüş turba diyajenezinin iyi bir göstergesidir (Ocakoglu 2015).

Turba birikim hızı önemli jeolojik parametrelerden biridir ve birçok etmene bağlıdır. Turbanın içinde bulunduğu jeolojik ortamın çökme hızı bunlardan biridir. Bitki bolluğu ve organik malzemenin bozunma hızı gibi büyük oranda iklim tarafından kontrol edilen parametreler de birikim hızında önemlidir. Şöyle ki; tropikal bölgelerde sıcak ve nemli iklim yüzünden biyokimyasal bozunma oldukça hızlı gerçekleşir (Ocakoglu 2015).

Ancak, bu iklimsel koşullarda bitki gelişimi de hızlı olduğundan birikim hızı dengelenmiş olur. Soğuk iklimlerde ise bakteri ve mantarların gelişimi ve dolayısı ile bozunma sınırlıdır. Biyokimyasal bozunma, artık bütün hümik maddelerin polimerleştiği (organik moleküller halinde yeniden düzenlendiği) kahverengi kömür evresinde son bulur (Ocakoglu 2015).

### 2.2.2. Kömürleşme

Mikrobiyal aktivitenin izlenmediği evre olarak bilinen, turbalaşmayı izleyen bu ikinci evredir. Kömürleşme; linyit, alt bitümlü, bitümlü, bitümlü kömür evreleri sonrasında antrasit ve meta antrasite kadar uzanan dönüşümede denmektedir. Kömürleşmenin temelini kimyasal ve fiziksel bozunmalar oluşturmaktadır. Yumuşak linyit kömürlerinin oluşumuna kadar geçen süre bir diyajenetik süreç olarak düşünülebilir. Metamorfizma; bir diyajenetik süreç geçtikten hemen sonrasında, şiddetli gerçekleşen organik malzemenin bozunması ile sert kahverengi kömür (alt bitümlü kömür) evresi başlamıştır. Bundan sonraki evreler artık metamorfizma olarak algılanmalıdır. Kömürde muazzam değişikliklerin ortaya çıktığı bu evrede kömürün hemen altındaki ve üstündeki diğer sedimanter kayalarda neredeyse hiç bir ciddi mineralojik kimyasal dönüşüm olmaz. Bu, organik yapıların mineral yapılara göre sıcaklık ve basınca karşı çok daha duyarlı olduklarının iyi bir göstergesidir. Sedimanter kayaçların diyajenez şartlarına kömürün bu özellikleri yol gösterici olmaktadır (Ocakoglu 2015).

Kömürleşme sürecinde fiziksel yapısal dönemler ile kimyasal dönemleri birbirinden ayırmak önemli bir durumdur. İkinci grup dönemlerde porozite azalması ve tabakalaşma düzlemine paralel optik anizotropi artışı gömülmeye paralel olarak derinlikle birlikte örtü yükü basıncının artmasıyla ilişkilidir (Ocakoglu 2015).

Porozite normalde, kömürleşmenin erken evrelerinde çok hızlı bir şekilde azalır (bu, kısmen nem içeriğindeki azalmaya karşılık gelir), bu yüzden porozite turbayı kahverengi kömürden ayırmak için yararlı bir parametredir. Kömürleşmenin daha sonraki evreleri ise büyük ölçüde kimyasal parametrelerle (C, H, O içerikleri gibi) veya optik özelliklerle (vitrit yansıtması gibi) tahmin edilebilir. Kimyasal bozunma farklı kömür evrelerinde farklı derecelerde gerçekleştiğinden belirli kömür rütbelерinde (rank) belirli rütbe göstergelerini kullanmak daha uygun düşer. Kömürdeki farklı maserallerin kömürleşme sürecindeki davranışları birbirinden farklı olduklarından karşılaştırmalı çalışmalar tüm kömür analizleri üzerinden yapılmaz; yalnızca hüminitritler veya bunların konsantreleri kullanılır. Kahverengi kömürde rütbenin artması başlıca toplam nem içeriğindeki azalışla karakterize edilir. Buna “Schürınarın Kuralı” denir. Yumuşak kahverengi kömür (liniyit) evresinde bu azalış her 100m derinlikte %4 nem bulur. Mat kahverengi kömür evresinde (liniyit bitümlü C) bu değer %1 nem 100 m derinlik ve parlak linyit evresinde %1 nem 1000 m derinlik kadardır. Nem içeriği azaldıkça kömürün

kalorifik değeri de (orijinal bazda) aynı derecede artar. Porozitenin azalması ciddi ölçüde nem kaybına neden olmaktadır. (Ocakoglu 2015).

## **2.3 TÜRKİYE'DE KÖMÜR**

### **2.3.1 Rezervler**

Dünya kanıtlanmış işletilebilir taşkömürü rezervlerinin %1,7'sini oluşturan ülkemiz taşkömürleri ve dünya linyit rezervlerinin %7,1'i oluşturan linyit rezervlerimiz; taşkömürü görünür rezervi 506 milyon ton olmak üzere yaklaşık 1,3 milyar ton, linyit rezervi ise büyük bölümü görünür rezerv niteliğinde toplam 15,6 milyar ton olarak belirlenmiştir (TTK 2015, TKİ'den 2016).

Maden Tetkik ve Arama Kurumu öncülüğünde yapılan yeni sahaların keşfedilmesi ve rezerv artışlarının belirlenmesi çalışmalar mevcuttur. Önemli bir rezerv artışına, son yıllardaki yoğun ve ciddi sürdürülen arama ve rezerv geliştirme çalışmaları neden olmuştur (TKİ 2016).

Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) taşkömürü rezervlerimizin tamamının ruhsatını elinde tutmaktadır (Çizelge 2.1). Zonguldak Taşkömürü Havza'sında bulunan rezervin genel olarak, 6.200 kcal/kg-7.200kcal/kg alt ısıl değerleri arasında değişmektedir. Kozlu, Üzülmez ve Karadon bölgelerinde bulunan havzadaki koklaşabilir kömürler toplam rezervin yaklaşık %67'sini oluşturmaktadır. Yarı-koklaşma özelliği gösteren Armutçuk bölgesindeki rezervleride mevcuttur. Bu bölge kömürleri düşük bünye külü içeriği ve yüksek ısıl değer ile hem koklaşabilir kömürlerle karıştırılarak hem de pülverize kömür enjeksiyonu (PCI) olarak demir-çelik fabrikalarında kullanıma uygun niteliktedir. (TTK 2015, TKİ'den 2016).

**Çizelge 2.1** Türkiye Taşkömürü Kurumu Ruhsatlı Kömür Sahalarına Ait Rezervler (ton) (TKİ 2016).

Müessese	Hazır	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Armutçuk	1.763.675	6.874.821	15.859.636	7.883.164	32.381.296
Kozlu	3.146.786	64.347.317	40.539.000	47.975.000	156.008.103
Üzülmez	521.183	134.785.309	94.342.000	74.020.000	303.668.492
Karadon	2.825.324	131.194.211	159.162.000	117.034.000	410.215.535
Amasra	400.060	169.268.317	115.055.000	121.535.000	406.255.377
TOPLAM	8.657.028	506.469.975	424.954.636	368.447.164	1.308.528.803

Linyit rezervlerimizin çoğunluğu 1976–1990 yılları arasında yapılan çalışmalar ışığında 2005 yılına kadar 8,3 milyar ton olarak hesaplanarak bulunmuş, daha sonrası dönemde ciddi, etkili ve geniş bir rezerv geliştirme etüt ve sondajları yapılamamıştır. “Linyit Rezervlerimizin Geliştirilmesi ve Yeni Sahalarda Linyit Aranması Projesi” kapsamında 2005 yılında, TKİ koordinatörlüğünde, MTA’nın sorumluluğunda ve ETİ Maden, TPAO, EÜAŞ, TTK ve DSİ’nin de katılımıyla başlatılan yapılan çalışmalar neticesinde; 2005-2012 yıllarını kapsayan dönem içinde önemli rezerv artışları sağlanmıştır (TKİ 2016).

Daha sonra kapsamı genişletilen ve MTA Genel Müdürlüğü koordinatörlüğüne verilerek başlığı “Türkiye Maden ve Jeotermal Kaynak Rezervlerinin Geliştirilmesi ve Yeni Sahaların Bulunması Projesi” olarak değiştirilen çalışma kapsamında; Trakya, Manisa-Soma-Eynez, Eskişehir-Alpu, Afşin-Elbistan ve Konya-Karapınar’da ilave linyit rezervleri tespit edilmiştir. Böylelikle; MTA’nın resmi açıklamasına göre uzun yıllardır 8,3 milyar ton olarak bilinen linyit rezervlerimiz 2015 yılsonu itibariyle toplam 15,6 milyar tona ulaşmıştır (TKİ 2016).

Linyit rezervlerimizin %80’si Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) olmak üzere üç kamu kuruluşunda, geriye kalan %20’si özel sektör ruhsat sınırları içinde bulunmaktadır. Ülkemiz linyit rezervlerinin %54,6 ile en büyük kısmı EÜAŞ’nin ruhsatındadır. Bu kurumu %23,5 ile TKİ izlemektedir (TKİ 2016).

**Çizelge 2.2** 2015 Yılı Sonu İtibarıyla Kurumlara Ait Linyit Rezervleri (ton) (TKİ 2016).

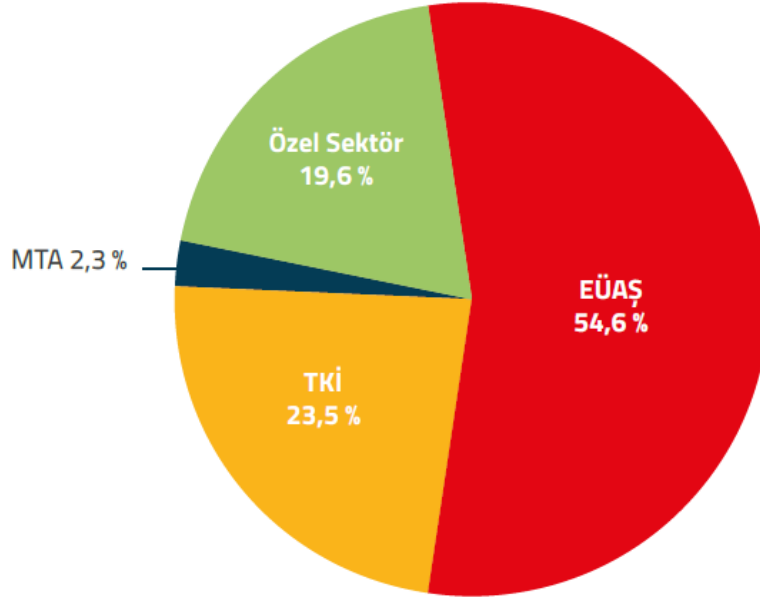
<b>Kurumlar</b>	<b>Görünür</b>	<b>Muhtemel</b>	<b>Mümkün</b>	<b>Toplam</b>
<b>EÜAŞ</b>	8.373.613.000	139.335.000	2.964.000	8.515.912.000
<b>TKİ</b>	3.462.614.000	211.727.000	8.139.000	3.682.480.000
<b>MTA</b>	358.400.000	-	-	358.400.000
<b>Özel Sektör</b>	v.y	v.y	v.y	v.y
<b>TOPLAM</b>	-	-	-	15.600.000.000

- v.y.:veri yok

Özel sektörün elinde bulunan rezervlere ilişkin kesin bilgilere ulaşılamamıştır. Ayrıca, beyan usulüne göre kaydı tutulan özel sektör rezervlerinin güvenilirlik derecesi düşüktür. TKİ rezerv miktarları içerisinde; 18,5 milyon ton bitümlü şeyl ve 70 milyon ton asfaltit rezervi de bulunmaktadır. MTA'nın elindeki rezervler; İsparta Şarkikaraağaç, Denizli Çivril ve Denizli Şarkikaraağaç'ta bulunmaktadır (TKİ 2016).

Son yıllarda gelişen ve artan özel sektör madenciliği kömür içinde önemli bir işletmeci konumundadır. Özel sektör ülkemiz linyit rezervlerinin %14'ünü elinde bulundurmaktadır. Güncel bilgiler kapsamında özel sektörde 420 adetten fazla ruhsat bulunmaktadır. Ancak, söz konusu sahaların önemli bir kısmının rezervi 30 milyon tonun altındadır (TKİ 2016).

Linyit rezervlerimizin %80'si Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) olmak üzere üç kamu kuruluşunda, geriye kalan %20'si özel sektör ruhsat sınırları içinde bulunmaktadır. Ülkemiz linyit rezervlerinin %54,6 ile en büyük kısmı EÜAŞ'nin ruhsatındadır. Bu kurumu %23,5 ile TKİ izlemektedir (TKİ 2016).



**Şekil 2.1** Türkiye linyit rezervlerinin dağılımı (TKİ 2016).

### 2.3.2 Üretimler

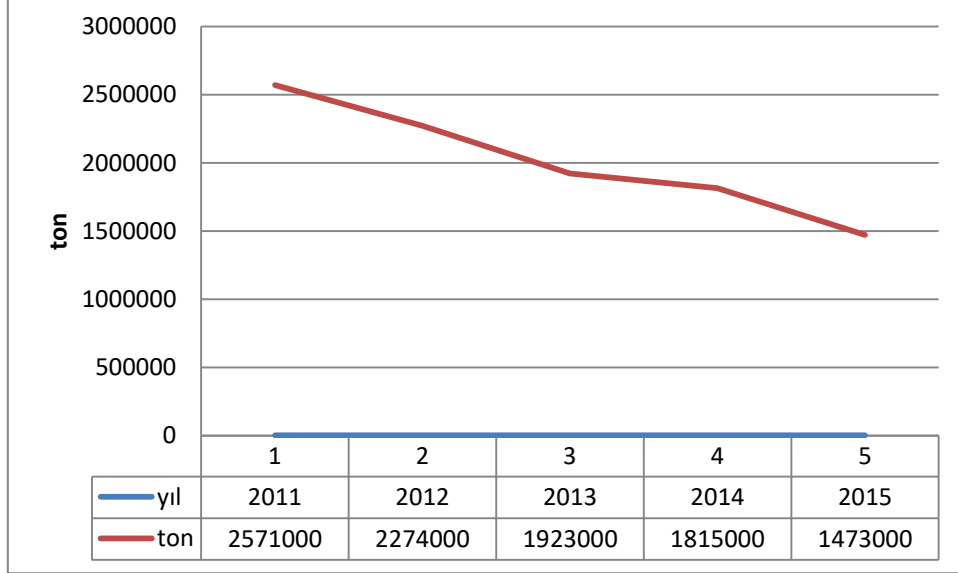
Bir önceki yıla göre 2014 yılında %8 artış ile toplam ülkemizin kömür üretimi 65,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Üretilen kömürün önemli bir bölümünü 62,6 milyon tonla linyit oluşturmaktadır. 1,8 milyon ton taşkömürü ve 0,8 milyon ton asfaltit ile 2014 yılı üretimleridir (TKİ 2016).

1980'li yıllardan itibaren sürekli bir düşme eğilimine giren taşkömürü üretimleri 2004 yılında 1,9 milyon tona kadar gerilemiştir. Bu tarihten sonra tekrar hareketlenen satılabilir taşkömürü üretimi 2012 yılında 2,3 milyon ton düzeyindedir. 2013 yılında 1,9 milyon ton ve 2014 yılında ise bir önceki yıla göre %5 oranında gerileyerek 1,8 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (TTK 2016).

2014 yılında 1,8 milyon ton olan taşkömürü üretimi yıllardır süren düşüşünü devam ettirmiş ve satılabilir taşkömürü üretimi ise 2015 yılında 1,4 milyon ton düzeyinde kalmıştır (TTK 2016).

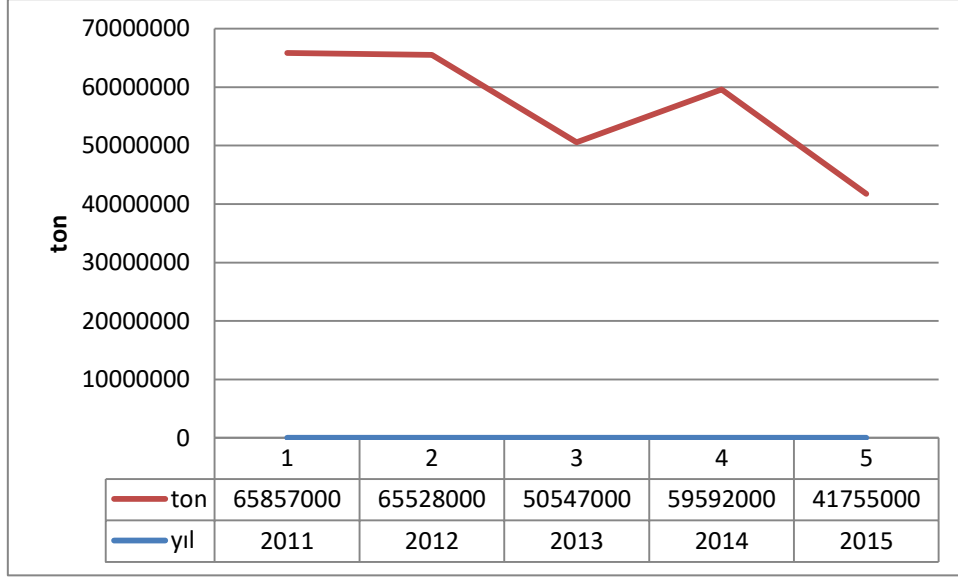
2015 yılı itibariyle Dünya'nın önemli taşkömürü havzalarından olan Zonguldak Havzası'nın, Türkiye enerji talebine olan katkısı binde 7-8 düzeyine kadar gerilemiştir. Havzada, zaten ciddi bir maliyet baskısı altında olan ve ithal kömür rekabeti karşısında bıçak sırtında çalışan işletmelerin maliyetleri, son yasal düzenlemeler neticesinde sürdürülebilir olmaktan tamamen

çıkılmıştır. Zonguldak Havzası'nda 2004 yılından itibaren TTK tarafından rödevans karşılığı özel firmalara kömür üretimi uygulaması başlatılmıştır. 2015 yılında özel sektör tarafından üretilen taşkömürü toplam üretimin yaklaşık %34'ü oranındadır (TTK 2016).



**Şekil 2.2** Türkiye Taşkömürü üretimleri 2011-2015 (TUİK 2015).

Benzer bir gelişim çizgisi linyit üretimleri için de söz konusudur. Linyit üretimleri ise, özellikle 1970'li yılların başlarından itibaren, petrol krizlerine bağlı olarak elektrik üretimine yönelik linyit işletmeleri yatırımlarının başlaması ile hızlanmıştır. 1970 yılında 5,8 milyon ton olan linyit üretimi 1998 yılında yaklaşık 65 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Ancak, bu tarihten itibaren, özellikle doğal gaz alım anlaşmaları nedeniyle linyit üretimi sürekli azalmış, 2004 yılında 43,7 milyon ton ile en düşük seviyesini görmüştür. Bu tarihten sonra tekrar yükselen linyit üretimleri 2008 yılında 76 milyon tonu görmüş, ancak daha sonra tekrar gerileyerek 2013 yılında 57,5 milyon ton, 2014 yılında ise bir önceki yıla göre %8,9 artarak 62,6 milyon ton olmuştur (TKİ 2016).



**Şekil 2.3** Türkiye Linyit üretimleri 2011-2015 (TUİK 2015).

TKİ 14,9 milyon ton, EÜAŞ ve bağlı ortaklıkları 19 milyon ton ve özel sektör 28,7 milyon ton olarak 2014 yılı satılabilir linyit üretimlerinin kuruluşlara dağılımını verebiliriz (EÜAŞ 2015, TKİ'den 2016).

2014 yılına göre 2015 yılı linyit üretimlerinin önemli ölçüde gerilediği üretimler sonucunda ortaya çıkmaktadır. %45,8 düzeyine yükselen özel sektörün linyit üretimindeki payı önemli bir durumdur. 2015 yılında TKİ'nin satılabilir linyit üretimi 12,9 milyon ton ve EÜAŞ'ın satılabilir üretimi ise 11,1 milyon ton olmuştur. 2015 yılı toplam Türkiye linyit üretimini kesin olarak verebilmek özel sektör üretimlerine ilişkin veriler sağlıklı çıkarılmadığından mümkün değildir (TKİ 2016).

Ülkemiz linyit üretimlerinin 2008 yılı sonrası gerileme eğilimine girdiği anlaşılmaktadır. Söz konusu gerilemenin nedenleri arasında; Afşin-Elbistan Linyit Havzası'nda işletilmekte olan Çöllolar Açık Kömür Ocağı'nda Şubat 2011 tarihinde meydana gelen heyelanlar nedeniyle söz konusu ocakta üretimin durdurulmak zorunda kalınması ve sektörde yeni yatırımların gerek kamu gerekse özel sektör tarafından yeterince yapılamaması öne çıkmaktadır (TKİ 2016).



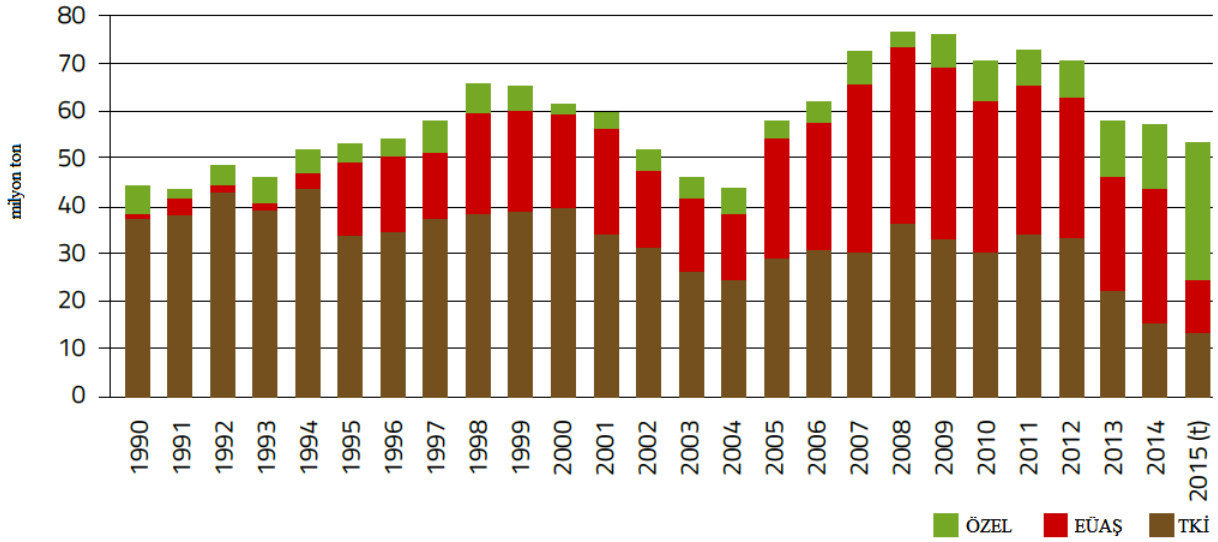
**Çizelge 2.3** 100.000 tonun üzerinde linyit üretimi yapılan işletme, havza ya da illeri(TKİ 2016).

İşletme/Havza/İl	Ruhsat Sahibi	Satılabilir Üretim milyon ton (2014)	Üretim Şekli	Dekapaj milyon m <sup>3</sup> (2014)
Ege Linyitleri İşletmesi	TKİ	8,8	Açık/yeraltı	24,2
Çan Linyitleri İşletmesi	TKİ	1,9	Açık ocak	5,1
Garp Linyitleri İşletmesi	TKİ	3,7	Açık/yeraltı	42,9
Bursa Linyitleri İşletmesi	TKİ	0,4	Açık ocak	11,8
Güney Ege Linyitleri İşletmesi	YEAŞ	2,8	Açık ocak	v.y.
Yeniköy Linyitleri İşletmesi	KEAŞ	7,5	Açık ocak	v.y.
Afşin-Elbistan Linyitleri İşletmesi	EÜAŞ	13,5	Açık ocak	28,2
Elbistan-Çöllolar İşletmesi*	EÜAŞ	0,0	Açık ocak	0,0
Sivas-Kangal İşletmesi	EÜAŞ	2,4	Açık ocak	v.y.
Çayırhan Kömür İşletmesi	EÜAŞ	5,5	Yeraltı	-
Koyunağılı Kömür İşletmesi	EÜAŞ	0,0	Açık/yeraltı	-
Seyitömer Linyitleri İşletmesi	EÜAŞ	5,5	Açık ocak	v.y.
Adıyaman Gölbaşı**	Özel Sektör	0,14	Açık ocak	v.y.
Amasya İli**	Özel Sektör	0,35	Açık/yeraltı	v.y.
Aydın İli**	Özel Sektör	0,7	Açık/yeraltı	v.y.
Balıkesir İli**	Özel Sektör	0,6	Açık/yeraltı	v.y.
Edirne İli**	Özel Sektör	0,3	Açık/yeraltı	v.y.
Karaman Ermenek **	Özel Sektör	0,3	Açık/yeraltı	v.y.
Konya Beyşehir**	Özel Sektör	0,45	Açık ocak	v.y.
Manisa İli**	Özel Sektör	0,6	Açık/yeraltı	v.y.
Tekirdağ İli **	Özel Sektör	1,6	Açık ocak	v.y.

\* Elbistan Çöllolar İşletmesi'nden yaklaşık 20 milyon ton kömür üretimi ve 60 milyon m<sup>3</sup> dekapaj yapılması planlanmış, ancak Şubat 2011 tarihinde meydana gelen heyelan nedeniyle ocaktaki üretim durdurulmuştur.

\*\* Sadece özel sektörün yaptığı üretimler, 2013 verisi, Kaynak: MİGEM

v.y.: veri yok



**Şekil 2.4** Yıllar itibariyle linyit üretimlerinin kuruluşlara dağılımı (TKİ 2016).

Bu çalışma kapsamında 10 farklı bölgeden alınan linyit numunelerine ait kömür oluşumları ile ilgili genel bilgiler aşağıda yer almaktadır.

**Ermenek Linyit Havzası;** Batı Toroslarda bulunan Ermenek linyit havzası yaklaşık 620 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsamaktadır. Ermenek havzasında farklı yörelerde, birbirinden bağımsız ve ekonomik olarak işletilen ocaklar dört bölgeye ayrılır Bu bölgeler, Ermenek havzasının orta kesiminde yer alan Asar dağı baz alınmak üzere Asar dağı'nın doğusundaki Çanakçı çukuru ve Keşirlik bölgesi ile Asar dağı'nın kuzeybatısında yer alan Pamuklu-Tepebaşı yöresi ile Asar dağı'nın batısındaki Boyalık mevkiidir. Ermenek linyit havzasında Miyosen başında oluşan göllerin kıyılarında kumtaşı ve konglomeralar ile akarsu vadilerinde kumtaşı-konglomera, taşkın alanlarında ise silttaşı ve kiltası oluşmuştur. Kiltası ve silttaşlarının arasında yer yer 15 ile 20 cm'lik kömür bandları bulunmaktadır (MTA 2010).

Ermenek havzasındaki Çanakçı çukurunda yaklaşık 500 000 ton rezerv tahmin edilmektedir. Keşirlik yöresinde, daha önceki çalışmalar ve günümüz şartlarına göre ekonomik bir kömür oluşumu söz konusu değildir Boyalık yöresinde arşivlenmiş herhangi bir sondaj çalışması bulunmamaktadır Daha önceki çalışan ocakların konumuna göre 300 000 ton kömür olasılığı söz konusudur Pamuklu-Tepebaşı yöresinde yaklaşık 2 milyon ton rezerv tahmin edilmektedir. Ermenek linyit havzasında toplam 2.8 milyon ton kömür rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Bu kömürlerin %90'ı kapalı ocak yöntemiyle işletmeye müsait durumdadır (MTA 2010).

**Yatağan Linyit Oluşumu;** Muğla ilinin kuzeybatısında bulunan ve küçük işletmeler tarafından işlenen kömür üst Miosen yaşta olup ince tabakalı, ksilitik ve hafif killi olan yumuşak bir linyitten oluşur. Yatağan ilçesi civarında; kuzeyden itibaren Turgut, Eskihisar, Tınaz, Bağyaka ve Bayır yatakları, Milas ilçesi güneyinde; sırasıyla Karacahisar, İkizköy, Sekköy, Belentepe, Hüsamlar ve Alatepe yatakları yer almaktadır (MTA 2010).

Kurulu gücü 630 MW olan yatağan termik santralinin yıllık kömür tüketim kapasitesi 5 350 000 ton'dur. 2012 yılı itibariyle yatağan rezerv durumu 160 651 000 ton ve ısı değeri 1903-2692 kcal/kg dır (MTA 2012).

**Saray Linyit Oluşumu;** Trakya Bölgesinin kuzey kesiminde yer alan Tekirdağ Saray linyit havzası, Edirköy, Küçükyoncalı ve Safaalan sektörlerinden oluşmaktadır. Havza, doğuda Sinekli, batıda ise vize sektörleriyle devamlılık göstermektedir. Saray ilçesi asfalt yollarla İstanbul, Tekirdağ, Kırklareli ve Edirne'ye bağlıdır. Safaalan ve Edirköy Kırklareli İstanbul asfaltı üzerindedir. Küçükyoncalı ise Saray ilçesine asfalt yolla bağlıdır. Tekirdağ-Saray-Edirköy-Küçükyoncalı-Safaalanı sektörleri linyit havzasının temelini palezoik yaşlı Gnays, sist, kuvarsit, fillit ve granitler oluşturur. Tersiyer oluşumların en alt seviyesini sahana Eosen kireçtaşları temsil eder. Eosen kireç taşlarının üzerinde oligosen birimleri vardır. Oligosen tabanında kireç taşları ve kumtaşları görülür. Üzerinde marn katmanları bulunan bu oluşumun üstünde kömürlü serinin kumtaşı marn-kil, kumları yer alır. Linyit damarınının tavan ve tabanı kil, kumlu killer ve şistli kum taşlarıdır (MTA 2010).

Tekirdağ-Saray Havzasındaki 105.570.000 ton muhtemel, 23.581.000 ton görünür toplam 129.151.000 ton kömürün 65.588.929 tonu işletilebilir rezerv olarak tespit edilmiştir. Muhtemel rezervi görünür hale getirmek için yapılacak ilave sondajlarla (yaklaşık 9.500 m.) işletilebilir rezerv miktarı daha da artabilecektir. Tekirdağ-Saray havzasının işletilebilir kömür rezervi 65.588.929 ton olarak saptanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, yaklaşık 300 MW'lık bir santral beslenebilmektedir. Yıllık 2.486.000 ton tüketim yapılacağı öngörülmüştür. Kurulacak Termik Santralin daha düşük kalorili kömürleri yakma kapasiteli seçilmesi halinde (örneğin akışkan yataklı) rezervin ve santral üretiminin ve ömrünün artacağı kesindir (MTA 2010).

**Çayırhan Linyit Oluşumu;** sahasında görünür rezerv 260 milyon ton, muhtemel rezerv 105 milyon ton olmak üzere toplam rezerv 365 milyon tondur. 1.saha rezervi mevcut santrallerin ekonomik ömrüne eşdeğer olup imtiyaz kapsamında özel sektör tarafından işletilmektedir.

2.sahada rezerv ve kalitesinin belirlenmesine yönelik çalışmalar MTA tarafından sürdürülmektedir (MTA 2010).

Koyunağılı sahası 28 milyon ton işletilebilir rezerve sahip olup TKİ" ye rödevans karşılığı verilmiştir. Çayırhan kömürlerinde alt ısıl değer 2000-2800 kcal/kg, nem (%) 20-27, kül (%) 26-42 ve kükürt (%) 2,7-4,1 arasında değişmektedir. Ancak 1982 yılında Orta Anadolu Linyitleri İşletmesi tarafından yeraltı maden galerilerinin açılması sırasında rastlantı sonucu keşfedilmiştir. Alt linyit düzeyi, işletilmekte olan üst linyit düzeyinin 150 m altında olup, dar sayılabilecek bir alanda yayılım gösterir. Alt linyit düzeyini oluşturan kömürler genellikle siyahımsı, yersel düzenli bantlı olup yumuşak linyit özelliğinde ve mat renklidir. İkincil mineraller çok seyrek olarak bulunur. Alt linyit düzeyi Çoraklar Formasyonunun en alt bölümünde yer alır. Alt linyit düzeyi genellikle iki veya üç kömür katmanından yapılı olup, bunlar ince taneli kumtaşı ve silttaşından oluşan ara katkılarla birbirlerinden ayrılır. Alt linyit düzeyine ait kömür katmanları kısa sayılabilecek uzaklıklar içinde yanal yönde silttaşı, ince taneli kumtaşı ve çamur taşına derecelenir. Alt linyit düzeyi genellikle Orta Miyosen'e ait spor ve pollen toplulukları içerir (MTA 2010).

Üst linyit düzeyi Çoraklar Formasyonunun en üst bölümünde yer alır. Üst linyit düzeyine ait kömürler genellikle koyu kahve ile siyahımsı, düzensiz bantlı, yarı parlak ve orta düzeyde serttir. Bu kömürler çoğunlukla disemine halde saçınmış pirit ve markasit ile çatlak dolgusu şeklinde bulunabilen jips, kalsit, epsomit ve hexahydrat mineralleri içerir. Üst linyitlerin toplam kalınlığı 3.40 ile 5.50 m arasında değişir ve genellikle iki ayrı katmandan oluşur. Alt ve Üst kömür katmanları, Çayırhan sahasının hemen her yerinde silt taşından oluşan bir ara düzeyle birbirinden ayrılır. Üst linyit düzeyine ait kömür katmanlarının kalınlığı, sondaj ve yüzey verilerine göre, 1.40 ile 2.10 arasında değişmektedir (MTA 2010).

**Gürmin-Merzifon Linyit Oluşumu;** çalışma alanında çok küçük mostra veren Çeltek Formasyonu; Merzifon-Yeni çeltek ile Suluova Eski çeltek dolaylarında izlenir. Ekonomik linyit yatakları içeren formasyon kanallı, çapraz tabakalı kumtaşı, çakıllı kumtaşı, çakıl taşı, kumlu çakıl taşı ile ince paralel laminah, ince tabakalı, bitki izli, yaprak, gastropod, balık ve omurgalı fosilli linyitli marn, kiltası ve silttaşı araldanmasından oluşmuştur. Merzifon Kaya düzü mevkiindeki Yeni Çelteğe ait kömür sahalarında sondaj çalışmaları yapılmış, yaklaşık 1 yıldır süren sondaj çalışmaları sonunda sahanın tamamının sondajı yapılmasa da yapılan

mevcut alandaki verilere göre 850 metre derinlikte 5 bin ile 5 bin 500 kaloriye sahip yaklaşık 50 milyon ton civarında bir kömür rezervi tespit edilmiştir (MTA 2010).

Soma Holding, 2013 yılında aldığı bir stratejik kararla, 30 yılı aşkın kömür madenciliği tecrübesini kullanarak enerji sektöründeki entegrasyonunu arttırmaya karar verdi. Bu meyanda, kömüre dayalı termik santral yatırımı yapmayı hedefleyen Soma Holding, Amasya'nın Merzifon ilçesinde bulunan Yeni Çeltek A.Ş.' ye ait iki adet maden ruhsatıyla ilgili olarak Nisan 2013'te 35 yıllık bir rödovans sözleşmesi imzaladı. 2013 itibariyle Soma Holding'in bir iştiraki olan Gürmin Enerji ve Madencilik A.Ş.' ye geçmiştir. Türkiye'nin bilinen kömür havzalarından olan Amasya-Çorum bölgesinde yer alan Yeni Çeltek Kömür İşletmesi'nde 1955 yılından beri yer altı kömür madenciliği yapılmaktadır. Ancak 2012 yılı itibariyle yaklaşık 70.000 ton satılabilir kömür imalatı yapılmaktadır. İşletmede 2014 yılı 2. çeyreğinden itibaren ilk etapta yıllık 500.000 ton tüvenan üretimi hedeflenmektedir. Söz konusu maden alanında, rezerv belirleme çalışmaları devam etmektedir. Yeni Çeltek'e ait IR1666'da halihazırda var olduğu bilinen 4 milyon ton civarındaki rezerve ek olarak, 201201117 nolu ikinci ruhsatta yapılan ilk sondaj çalışmalarında çok daha yüksek miktarda bir rezervin varlığı anlaşılmıştır. Rezerv belirleme ve kesinleştirme çalışmalarının 2013 yılı boyunca devam ettirilmesi planlanmaktadır. Sondaj endikasyonları, rezerv miktarının daha da artacağı yönündedir (MTA 2010).

**Dursunbey Linyit Oluşumu;** Balıkesir-Dursunbey sahası linyitleri Odaköy sektöründe ortalama olarak 3000 kcal/kg, Hamzacık sektöründe 2600 kcal/kg, Çakırca sektöründe 2400 kcal/kg ısıl değere sahiptir. Sahada 34.6 milyon ton görünür linyit rezervi belirlenmiştir. Balıkesir-Balya Değirmendere Mancılık sahasında 1762 kcal/kg ısıl değere sahip 7.2 milyon ton mümkün, Balıkesir Gönen Sebepi sahasında 1000-2500 kcal/kg arasında değişen ısıl değerinde 570 000 ton muhtemel, Balıkesir-Balya-Bengiler sahasında 3900 kcal/kg ısıl değere sahip 300 000 ton muhtemel, Balıkesir-Gönen-Şaroluk sahasında 2900 kcal/kg ısıl değere sahip 600 000 ton muhtemel linyit rezervi bulunmaktadır. Bunun dışında Gönen-Ayvacık, Gönen-Küpçiktı ve Gönen Köteyli' de ekonomik yayılım göstermeyen kömür damarları vardır (MTA 2012).

**İlgin Linyit Oluşumu;** 1978 yılında kurulan ve 1989 yılına kadar müessese olarak ve 2004 yılına kadar da doğrudan genel müdürlüğe bağlı bir işletme olarak faaliyetlerini sürdürmüştür. En son, Nisan 2004'de de Garp Linyitleri İşletmesi Müessesesi'ne bağlı işletme müdürlüğüne dönüştürülen bu işletmenin merkezi, Ilgın'a 24 km, Konya'ya 112 km mesafededir (MTA 2010).

İşletmenin faaliyetlerini sürdürdüğü, ruhsatı TKİ'ye ait yaklaşık 5,6 bin hektarlık alanda, alt ısıl değeri 2180 kcal/kg olan toplam 20 milyon ton linyit rezervi bulunmaktadır.2012 yılında yaklaşık 127 bin ton kömür üretilerek yörenin kömür talebi karşılanmıştır. Halen üretim çalışmalarının yapıldığı alanda açık ocak işletmeciliği ile üretim gerçekleştirilmekte, üretim çalışmalarında ekskavatör ve ağır kamyon gibi büyük kapasiteli iş makineleri kullanılmaktadır (TKİ 2012).

Çalışma alanının, temeli Paleozoik yaşlı şistler ve kuvarsitlerden oluşmuştur. Jura-Kretase yaşlı kireçtaşları havzanın kuzeyini boydan boya çevreleyerek bölgenin yüksekliklerini teşkil ederler. Sahada Neojen kumlu, killi, marnlı, linyitli formasyonlarla temsil edilmiştir. Pliyosen üç formasyona ayrılmıştır. Kömürün tabanında genellikle temeldeki şistlerin ayrışması sonucu oluşan mavi-grirenkli plastik killer bulunmaktadır. Linyitli formasyon; kil, kumtaşı, marn-killimarn, kireçtaşı ar dalanması şeklinde görülmektedir. Bunlar taban killeri ile diskurdandır. Tavan formasyonu ise gevşek çimentolu çakıltaşı, kumtaşı, killi tabakalar topluluğudur. Bu kömürlü seri ile diskurdandır (TKİ 2012).

**Sorgun Linyit Oluşumu;** havzanın temelinde eosen öncesine ait granodiyoritler yer almaktadır. Bu temel üzerine eosen yaşlı çeltek ve çekerek formasyonları gelir. Çeltek formasyonu kömürlüdür. Çekerek formasyonu üzerinde, tektonik dokanaklı olarak Artovaofiyolitlimelanji yer almakta; Neojen yaşlı karasal çökeller ise diğer birimleri açısız uyumsuzlukla örtmektedir. Kömür, Erken Eosen yaşlı ve göl-akarsu ortamında çökelmiş Çeltek formasyonunun alt kesiminde yer almakta ve bir bitümlü şeyl seviyesi tarafından örtülmektedir. Yeni çeltek açık işletme sahasında kömür seviyesi kalınlığı 6m'ye kadar çıkmaktadır (MTA 2010).

Küçüköhone ve Ayrıdam işletmelerindeki kalınlıklar sırasıyla 1,5 ve 2 m 'dir. Yozgat ili linyit yataklarının oluşumu açısından zengin yer altı doğal kaynaklarına sahiptir. Özellikle Sorgun içerisinde Çeltek ve Ayrıdam olmak üzere iki ayrı noktadan çıkarılmaktadır. Sorgun Çeltek kömür işletmesinde bulunan linyit yataklarının toplam rezervi 1,25 milyon tondur. İlimizde çıkarılan linyit kömürlerinin havada kuru numunede Min. 4000Kcal/kg, ısı değerine sahip olup Yozgat ve çevre illerde ısınma amaçlı olarak kullanılmaktadır (MTA 2010).

**Milas-Ekizköy Linyit Oluşumu;** 1984 yılından 1993 yılına kadar "Milas İstihsal Başmühendisliği" olarak Güney Ege Linyitleri İşletmesi Müessesesi'ne bağlı iken o yıldan

itibaren ayrılarak işletme müdürlüğü olarak, sonraki yıllarda ise sırasıyla; bölge müdürlüğü ve yeniden işletme müdürlüğü olarak faaliyetlerini sürdürmüştür. En son olarak da Nisan 2004'de Güney Ege Linyitleri İşletmesi Müessesesi'ne bağlanan bu işletmenin merkezi Milas'a 23 km mesafededir. İşletmenin 22,1 bin hektarlık alana yayılan ve ruhsatları TKİ'ye ait, %12'si yeraltı işletmeciliği ile alınabilecek, alt ısıl değeri 1860-4200 kcal/kg arasında olan toplam 250 milyon ton linyit rezervi bulunmaktadır. Üretilen kömürlerin tamamına yakını 2x210 MW gücündeki Yeniköy Termik Santrali ile 3x210 MW gücündeki Kemerköy Termik Santrali'ne verilmektedir. Üretimlerin tamamı açık ocak işletmeciliği yöntemiyle yapılmakta, üretim çalışmalarında dragline, ekskavatör ve ağır kamyon gibi büyük kapasiteli iş makineleri kullanılmaktadır (TKİ 2012).

**Orhaneli Linyit Oluşumu;** 1979 yılına kadar Garp Linyitleri'ne bağlı bir işletme iken o yıldan itibaren ayrılıp doğrudan genel müdürlüğe bağlanarak sırasıyla; müessese, işletme, bölge müdürlüğü ve işletme müdürlüğü olarak faaliyetlerini sürdürmüştür. En son, Nisan 2004 de işletme müdürlüğü olarak Seyitömer Linyitleri İşletmesi Müessesesi'ne bağlanmıştır. İşletmenin merkezi Orhaneli'ye 18 km, Bursa'ya 55 km mesafededir. İşletme, ruhsatı TKİ'ye ait, yaklaşık 15,8 bin hektarlık alanı kapsayan Orhaneli- Gümüşpınar ile Keles-Harmanalanı linyit sahalarında üretim çalışmalarını sürdürmektedir. Bu alanlarda, alt ısıl değeri Harmanalanı 1900 kcal/kg, Gümüşpınar 2500 kcal/kg olan 60 milyon ton rezerv bulunmaktadır. Halen işletilmesi ekonomik olmayan Davutlar sahası ile rezerv miktarı 99 milyon ton olmaktadır (MTA 2010).

Yıllık üretim kapasitesi 2,3 milyon ton olan bu işletme, 210 MW gücündeki akışkan yataklı Orhaneli Termik Santrali'ne yakıt temin etmekte ve piyasa (sanayi ve ısınma sektörü) talebini karşılamaktadır. Üretimlerin tamamı açık ocak işletmeciliği yöntemiyle yapılmakta, üretim çalışmalarında dragline, ekskavatör ve ağır kamyon gibi büyük kapasiteli iş makineleri kullanılmaktadır (TKİ 2008).

## **2.4 DÜNYA'DA KÖMÜR**

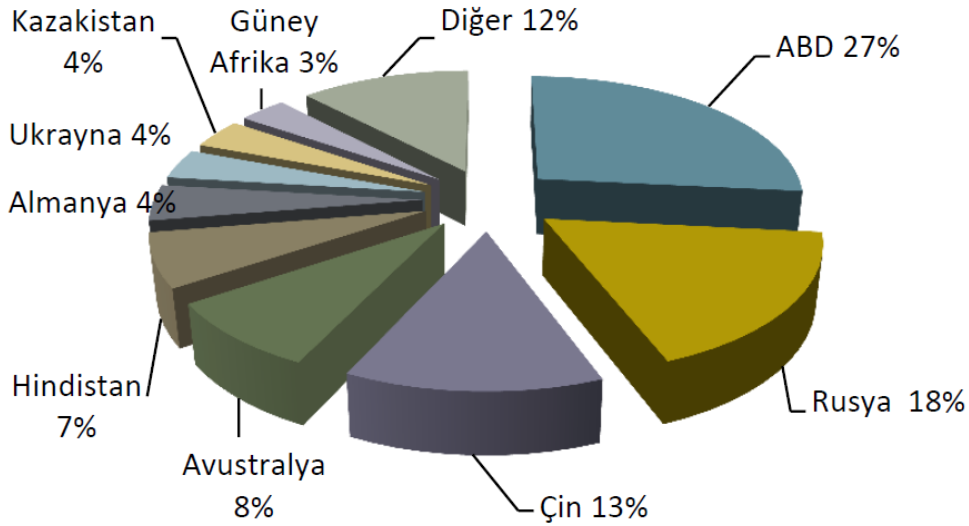
Enerji kaynaklarının kalan ömürleri dikkate alındığında, kömürün, özellikle 2030 yılından sonra çok daha büyük önem kazanacağı anlaşılmaktadır. Mevcut üretim seviyeleri ile dünya görünür kömür rezervlerinin 100 yılı aşkın bir sürede tüketileceği tahmin edilmektedir. Buna

karşılık görünür petrol ve doğal gaz rezervlerinin tükenme ömürlerinin mevcut üretim seviyeleri ile sırasıyla yaklaşık 45 ve 60 yıl süreceği tahmin edilmektedir (TKİ 2016).

#### 2.4.1 Rezervler

Dünya Enerji Konseyi'nin araştırmalarına göre; 2011 yılı sonu itibariyle Dünya kanıtlanmış işletilebilir kömür rezervi toplam 892 milyar ton büyüklüğündedir. Söz konusu rezervin; 403 milyar tonu antrasit ve bitümlü kömür, 287 milyar tonu alt bitümlü kömür ve 201 milyar tonu ise linyit kategorisindedir (TKİ 2016)

Dünya Enerji Konseyi tarafından 80 civarında ülkede bulunduğu raporlanan dünya kömür rezervlerinin en büyük kısmı (237,3 milyar ton) ABD'de yer almaktadır. ABD'yi 157 milyar ton ile Rusya Federasyonu ve 114,5 milyar ton ile Çin izlemektedir. Diğer kömür zengini ülkeler arasında; Avustralya (76,4 milyar ton), Hindistan (60,6 milyar ton), Almanya (40,5 milyar ton), Ukrayna (33,9 milyar ton), Kazakistan (33,6 milyar ton) ve Güney Afrika Cumhuriyeti (30,2 milyar ton) bulunmaktadır. Dolayısıyla, dünya kömür rezervlerinin %90'a yakını bu 9 ülkenin elindedir. (TKİ 2016).

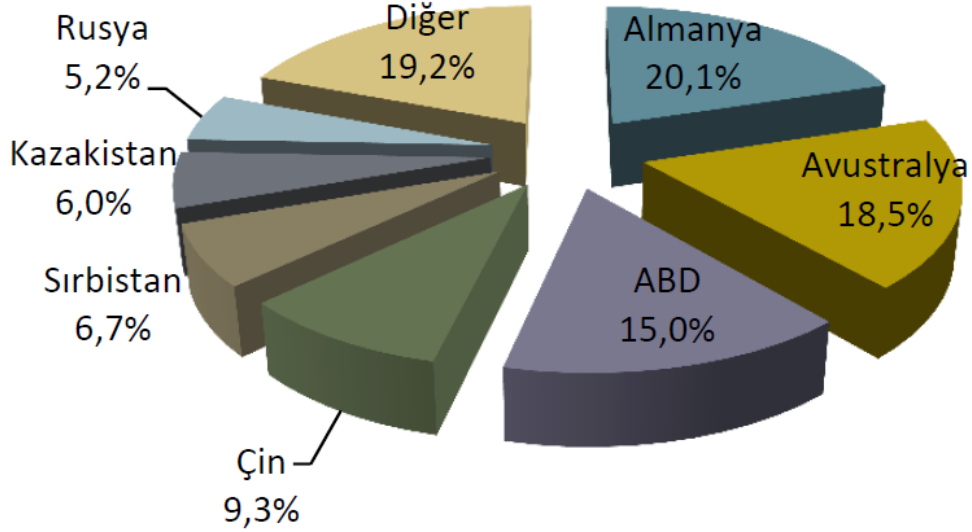


Şekil 2.5 Dünya kömür rezerv payları (TKİ 2016).

Toplam 201 milyar ton büyüklüğündeki dünya linyit rezervlerinin en büyük bölümü 40,5 milyar ton ile Almanya'da bulunmaktadır. Bu ülkeyi 37,2 milyar ton ile Avustralya ve 30,2 milyar ton ile ABD izlemektedir. Çin (18,6 milyar ton), Sırbistan (13,4 milyar ton), Kazakistan (12,1 milyar ton) ve Rusya (10,5 milyar ton) geniş linyit rezervlerine sahip diğer



ülkeler arasındadır. Her ne kadar 2013 yılı sonu itibariyle ülkemiz linyit rezervi 14,2 milyar ton olarak hesaplanmaktaysa da, 2011 yılı sonu bilgisini vermesi bakımından Dünya Enerji Konseyi istatistiklerinde Türkiye'nin kanıtlanmış işletilebilir linyit rezervi 8,4 milyar ton olarak yer almaktadır (TKİ 2016).



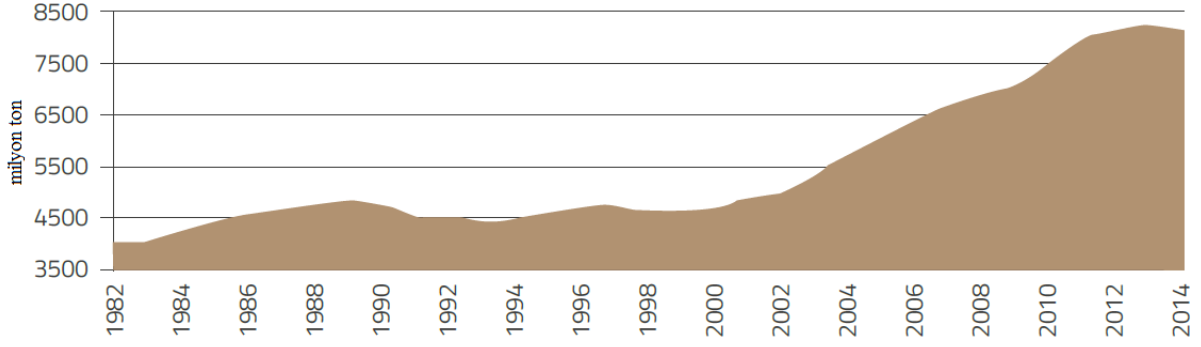
Şekil 2.6 Dünya linyit rezervlerinde ülkelerin payları (TKİ 2016).

#### 2.4.2 Üretimler

Dünya kömür üretimi son otuz yılda iki kat artmıştır. Kömür üretimindeki artış, büyük ölçüde başta Çin olmak üzere Asya kıtasındaki elektrik enerjisi talebinden kaynaklanmaktadır. Bu ülkenin elektrik enerjisi üretimi son on yılda 2,6 kat artarak 2014 yılında yaklaşık 5.650 TWh düzeyine yükselmiş ve söz konusu üretimin %81'i kömüre dayalı termik santrallerden elde edilmiştir. Son on yılda Asya-Pasifik Bölgesi'nin toplamındaki elektrik enerjisi üretim artışı ise yaklaşık 2 kat olup, elektrik üretiminde en yoğun olarak kullanılan kaynak kömür olmuştur (TKİ 2016).

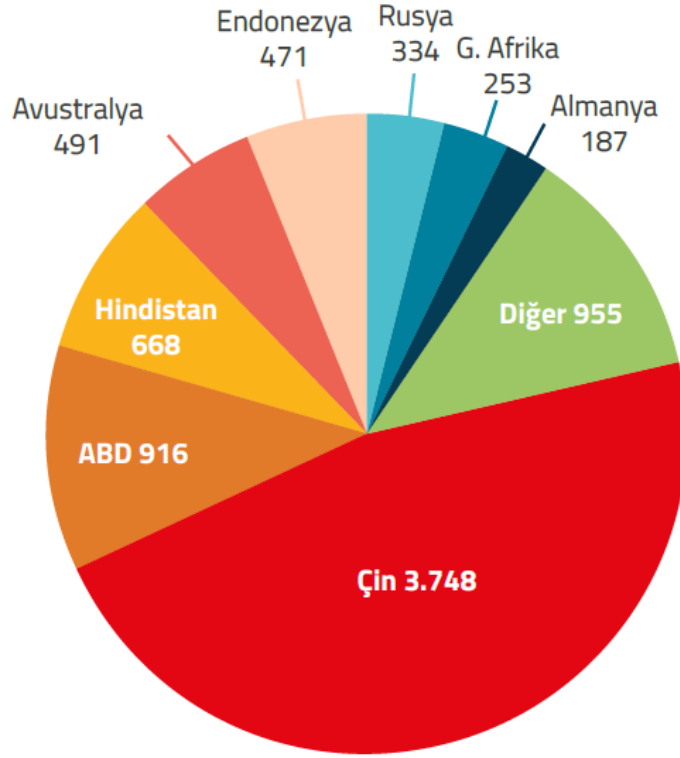
1999 yılından itibaren, yani son 14 yıldır kesintisiz artmakta olan küresel kömür üretimi 2014 yılında bir önceki yıla göre %0,7 oranında artarak 8.023 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (TKİ 2016).

2000-2014 yılları arasındaki üretim artış oranı %73 düzeyindedir. Aynı dönemde buhar kömürü üretimindeki artış oranı %85,4 ve koklaşabilir kömür üretimindeki artış oranı ise %77,7 düzeyinde olmuştur. Linyit üretimi ise %4 oranında düşmüştür (TKİ 2016).



**Şekil 2.7** Dünya kömür üretimleri (TKİ 2016).

2014 yılı dünya kömür üretiminin %46,7'sini (3.748 milyon ton) tek başına Çin gerçekleştirmiştir. ABD'nin payı %11,4 (916 milyon ton), Hindistan'ın payı %8,3 (668 milyon ton) ve Avustralya'nın payı ise %6,1 (491 milyon ton) oranındadır. Bu ülkeleri; Endonezya (471 milyon ton), Rusya Federasyonu (334 milyon ton), Güney Afrika Cumhuriyeti (253 milyon ton) ve Almanya (187 milyon ton) izlemektedir (Şekil 6). Bu sekiz ülkenin küresel kömür üretimi içindeki toplam payları %88 düzeyindedir (TKİ 2016).



**Şekil 2.8** Ülkelere göre 2014 yılı kömür üretimleri-milyon ton (TKİ 2016).

## 2.5 KÖMÜRÜN PETROGRAFİK, FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

### 2.5.1 Kömürün Petrografik Özellikleri

Kömür yapısal olarak heterojen bir yapıya sahiptir. Bunun sebebi, kömürün oluşumu sırasındaki farklı fiziksel ve kimyasal bileşimdeki bitkilerin mevcudiyeti ve kömürleşme sürecinin farklılığıdır (Kural 1998).

Bu oluşumlar genelde bantlı yapıda olup gözle seçilebilir. Kömürün iyi bir şekilde değerlendirilmesi ve kullanılması, bunun içindeki oluşumların (litotiplerin) bilinmesine ve gerektiğinde birbirinden ayrılmasına bağlıdır. Litotipler de gözle seçilmeyen mikroskopik bitki parçalarından oluşmaktadır, bunlara ise maseral denir (Taşdemir 2007).

#### 2.5.1.1 Litotipler

Kömür mikroskopik olarak parlak, yarı parlak, mat veya ince bantlar halinde bulunabilmektedir. Çıplak gözle bantlar halinde görülebilen bu litotipler, karakteristik özelliklerine göre vitrain, klarain, durain, ve fusain' den oluşan dört gruba ayrılır

Vitrain: Kompakt ve homojen bir yapıda ve en parlak kömür tipidir. Camsı görünüşte, konkoidal küpler şeklinde kırılır, eli boyamaz. Bantların kalınlığı genellikle 3-5 mm arasındadır.

Klarain: En yaygın kömür bantı olan klarain, vitraine göre daha az parlaklıktadır. Bu litotiplerin yapısı durain ile vitrain arasında değişmektedir. Klarain içinde genellikle tabakalanmaya dik çok sayıda fakat devamsız ince çatlaklar vardır.

Durain: Mat siyah veya kahverengimsi siyah renkte olan kömürün en donuk bantıdır. Çok serttir ve düzgün yüzeyler içermeyen taneler şeklinde ayrılır.

Fusain: Odun kömürünü andıran ipliksi yapısı, siyah ve grimsi siyah rengi, kırıldığında eli boyayan, çok kırılğan ve toz haline gelebilen bir banttır. İçerdiği minerallerden dolayı sertlik kazanabilmektedir (Taşdemir 2007).

### 2.5.1.2 Maseraller

Mikroskobik boyutlu olan maseraller biçim ve yapıları ile kömürleşme sırasında korunmuş olan kömürleşmiş bitki kalıntılarıdır. Bu maseraller, kömürü oluşturan bitki kalıntılarının fiziksel ve kimyasal yapılarına göre vitrinit, eksinit ve inertinit olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Vitrinit: Parlak kömürlerin en yaygın birimi olup, yansıyan ışıktaki rengi siyahımsı griden beyaza kadar değişir. Kökeni ağaç ve ağaç kabuğu dokusuna dayanır. Karbon yüzdesi kömürleşmeye bağlı olarak değişir. Vitrinit koklaşma yeteneği yüksek olan bir masereldir.

Eksinit: Bu grup maseraller mikro ve makro sporlardan, hücrelerin dış yapılarından, reçine ve yosun artıklarından oluşur. Yansıyan ışıktaki kömürleşme derecesi artışına göre sarı, kahverengi ve siyah renkler gösterir.

İnertinit: Belirgin hücre yapısı gösterir. Kökeni bitkinin ağaç dokusuna dayanır. Yansıyan ışıktaki sarımsı beyaz renkte görülürler. Bu grup maseraller hidrojen fakir, karbonca zengin olduklarından koklaşma sürecinde tepkime göstermezler (Taşdemir 2007).

### 2.5.2 Kömürün Fiziksel Özellikleri

Rutubet: Kömürlerde bünye, yüzey ve molekül suyu olmak üzere üç türlü rutubet bulunmaktadır. Bünye rutubeti kömürün yapısında yer alır ve inorganik maddelere bağlı bulunan sudan meydana gelir. Bünye rutubeti kömürün cinsine göre değişir ve bitümlü kömürlerde %1-3 arasında değişen miktar, linyitlerde %55'e kadar çıkabilmektedir. Bu rutubet, kömürün 105°C'de, belirli bir süreyle (2-4 saat) ısıtılmasından sonra kömürden uzaklaştırılır. Yalnızca bünye nemi içeren kömürler kuru görünümde dirler ve kırıldıkları zaman tozlanma yaparlar (Taşdemir 2007).

Yüzey rutubeti, kömürde serbest halde bulunan, rutubetli havadan ve kömürün su ile temasından meydana gelir. Yüzey rutubeti kömürün tane boyutuna göre de değişmektedir. Bunun sebebi ise toplam yüzey alanının artmasıdır. Kömür havada belirli bir süre (2-4 gün) bekletildiğinde bu rutubet kömürden uzaklaştırılır (Taşdemir 2007).

Molekül suyu ise kömüre kimyasal olarak bağlanmıştır ve kömürün toplam rutubeti içindeki payı oldukça düşüktür.

Kömürler, kömürleşme derecelerine göre, ocak çıkışında belirli oranlarda rutubet içerirler. Ocaktan çıkartılan tüvenan taşkömürü %1-3, sert linyitler %20-30, yumuşak linyitler %40-60 ve turbalar ise %60'ın üzerinde rutubet içerebilmektedir. Görüldüğü gibi, kömürün rutubet içeriği kömürleşme derecesi arttıkça azalmaktadır.

Kömürde rutubet, kullanım bakımından bir safsızlık olarak düşünülebilir. Bu rutubet nakliyyede gereksiz taşımaya sebep olabileceği gibi, kömürün verebileceği enerjiyi buharlaşan su oranında azaltacağı için de zararlıdır (Taşdemir 2007).

**Özgül Ağırlık:** Kömürlerin özgül ağırlıkları diğer katı maddelerde olduğu gibi ağırlık/hacim oranıdır. Tüvenan kömürdeki herhangi bir parçanın özgül ağırlığı bu parçanın külüne, nemine, sabit karbon miktarına ve uçucu madde oranına bağlıdır. Kömürdeki kül yapıcı ve kükürt taşıyıcı (pirit, markasit) unsurların artması kömürün özgül ağırlığını arttırmakta ve gravite ile yıkanmalarını zorlaştırmaktadırlar.

**Strüktür ve Kırılma:** Kömürde madencilik işlemleri sırasındaki kırılmalar sonucu oluşan parçaların büyüklük ve şekilleri uygulanan kazı yöntemi ile birlikte kömür yatağının ana kırık, çatlak ve zayıf yüzeyler sistemine bağlıdır.

Kömürlerin cinslerine göre çeşitli kırılma şekilleri vardır. Antrasit konkoidal bitümlü ve yarı bitümlü kömürler blok veya küp şeklinde, linyitler yassı ve düzensiz bir şekilde kırılırlar.

Kömür ve kömürdeki artık maddelerin kırma ile birbirinden ayrılıp ayrılmaması, kömür hazırlamada büyük önem taşır. Zira, tüvenan kömürdeki artık maddelerin uzaklaştırılarak temiz kömür elde edilmesi için temiz kömür ve artık tanelerinin birbirinden serbest olarak bulunmaları gerekir. Eğer, artık taneleri daha ziyade kömürün kırık ve çatlaklarında yer almış iseler, bunlar kırılma ile kömürden kolaylıkla ayrılıp serbest hale gelebilirler.

**Sertlik:** Kömürün sertliği, ekonomik yönden önem taşıyan ufalanma ve öğünme özelliklerini etkiler. Kömürün sertliği; içinde yer aldığı sınıfa bağlıdır. Karbon ve uçucu madde oranlarına

göre değişiklik gösterir. %85-90 C içeren kömürler en düşük sertliğe sahiptirler. Sertlik ayrıca uçucu madde oranı %5'den %15'e doğru çıktıkça da artar.

**Mukavemet:** Kömürün basınca karşı mukavemeti, madencilikte tahkimat için kullanılan kömür topukları ile kırma ve öğütme işlemlerinde önem taşır. Baskı mukavemeti kömürün türü ve petrografik yapısı ile ilgilidir. En düşük mukavemet uçucu maddenin %20-25 olduğu oranlara rastlar. Ayrıca kömürde vitrain oranı yükseldikçe baskı mukavemeti azalır.

**Aşındırma:** Kömürün aşındırma özelliği de önemli bir ekonomik faktördür. Kömürün bu özelliği, kömürdeki artık maddelerden ileri gelir. Madencilik işlemleri sırasında delme, kesme ve taşıma araçlarında meydana gelen aşınmalar masrafa neden olur. Ayrıca toz yakıt kullanan santrallerde de öğütme araçlarında meydana getirdiği büyük aşınmalardan dolayı önem taşır.

**Ufalanabilirlik:** Ufalanabilirlik, kömürün küçük parçalara ayrılabilme özelliğidir. Kömürün ufalanması yüzey alanının artmasına, oksitlenme ve kendi kendine yanmanın artmasına ve yıkama masraflarının artmasına neden olur.

Kömürün ufalanabilirliği; sertlik, mukavemet, sıklık, elastiklik ve kırılmalık gibi özelliklere bağlıdır.

Kömürlerin ufalanabilirlikleri ile sınıfları arasında genel bir ilişki bulunmaktadır. Linyitler en az ufalanırlar. En fazla ufalanma ise yarı bitümlü (düşük uçucu maddeli) kömürlerde görülür.

**Öğünebilirlik:** Öğünebilme özelliği özellikle kömürün toz yakıt olarak kullanılmak üzere öğütülmesi sırasında önem taşır. Kömürün öğünebilirliği, kömürün sertlik, mukavemet, kırılmalık gibi fiziksel özellikleri ile ilişkilidir.

**Açık Havada Dağılmalık:** Ocaktan çıkartılan kömürler, normal atmosfer şartlarında bırakıldıklarında atmosfer koşullarından etkilenecek dağılırlar. Kömürlerin dağılımı, kömürleşme derecesine bağlı olmaktadır. Linyit açık havada kolaylıkla dağılabilirken, bitümlü kömürler aynı koşullarda çok daha az dağılırlar. Bu olaylar, kömürlerin ıslanması ve kurumması sırasında, kömür yüzeyleri ile iç kısımlar arasında meydana gelen gerilmelerden kaynaklanmaktadır. Islak bir kömür parçası havada kurumaya bırakıldığı zaman, yüzeyinden rutubet kaybetmeye başlar. Parçanın yüzeyi kurudukça, iç kısımlardaki rutubet yüzeye doğru

hareket ederek kaybolan rutubetin yerini almaya çalışır. Eğer yüzeyden rutubet kaybı, iç kısımlardaki rutubetin yüzeye gelişinden daha hızlı olursa, parçanın yüzeyi iç kısımlarına nazaran daha fazla büzülür ve gerilimler oluşur. Bu gerilimler de, kömürün çatlamasına ve dağılmasına yol açar. Aynı şekilde, kuru bir kömür parçası, yağmur vb. nedenlerle ıslandığı zaman, parça yüzeyinin iç kısımlarına nazaran daha hızlı rutubet kazanması durumunda, yüzeyde daha fazla bir genişleme meydana gelir. Böylece kömür kendiliğinden çatlayarak dağılır.

**Gözeneklilik:** Kömürler birkaç mikron ile birkaç milimetre arasında değişen boyutları olan boşluklara sahiptirler. Bunlar kılcal damarlar, küresel veya düzensiz şekilde olabilmektedir. Kömürün fazla gözenekli olması kolayca oksitlenmesine ve yanmasına sebep olur.

Ayrıca koklaştırma işleminde oldukça önemli bir özelliktir. Yüksek rutubete sahip olan kömürler yüksek gözenekliliğe sahiptirler. En fazla turbalarda, daha az olarak linyitlerde rastlanır. Bitümlü kömürlere gidildikçe minimuma iner fakat antrasitte biraz yüksektir.

**Renk ve Çizgi Rengi:** Kömürler, kömürleşme derecelerine bağlı olarak farklı renklere sahip olabilirler. Linyitlerin rengi açık kahverengi ile koyu kahverengi arasında olmaktadır. Bitümlü kömürler ise siyahın çeşitli tonlarına sahiptir. Linyitlerin çizgi rengi sarı ve kahverengi arası, bitümlü kömürlerin ise kahverengi ve siyah arasında değişmektedir.

**Parlaklık:** Kömür ait olduğu sınıfa göre ışığı farklı oranlarda yansıtır. Antrasit genellikle parlak görünüme sahiptir. Linyitler daha ziyade mat ve toprağımsı görünüşlüdür. Bitümlü kömürlerin parlaklığı ise mat ile parlak arasında değişmektedir (Taşdemir 2007).

### 2.5.3 Kömürün Kimyasal Özellikleri

Aşağıda kömürün oksidasyon, çözücülerde erime, hidrojenasyon ve koklaşma gibi kimyasal özellikleri açıklanmıştır (Taşdemir 2007).

**Oksidasyon:** Kömürler havanın oksijeni altında oldukça yavaş gelişen bir oksitlenmeye uğramaktadırlar. Oksidasyon, kömürün uçucu miktarına, sabit karbon miktarına, gözenekliliğe ve içerdiği kükürt miktarına göre değişmektedir. Kömürün uçucu madde ve

karbon miktarı yükseldikçe oksitlenmeye karşı direnci artar. Gözenekliliği yüksek olan ve büyük oranlarda kükürt içeren kömür kolaylıkla oksitlenir.

**Çözücülerde Erime:** Kömürler bazı organik çözücülerde eriyerek değişik kimyasal özellikler gösteren organik bileşiklere ayrılırlar. Bu özellik sayesinde kömürleri meydana getiren maddeler de incelenebilmektedir. Çözücü olarak en çok kullanılan madde piridindir. Çözünme sonucunda, kömürden katı parafinler, doymuş ve doymamış hidrokarbonlar elde edilmektedir.

**Hidrojenasyon:** 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren yapıla gelen çeşitli deneylerde araştırmacılar hidrojenasyon yolu ile kömürleri sıvı hale getirmeyi başarmışlardır. Hidrojenasyon olayının mekanizmasını araştıran yazarlar, bunun kömürün termik olarak parçalara ayrılmasından ibaret olduğunu, bu ayırma işleminde de halojen oksitler gibi katalizörlerin işlemleri kolaylaştırdığını öne sürmüşlerdir.

**Koklaşma:** Kömürlerin hava bulunmayan bir ortamda ısıtılması sonucu yapısında bulunan organik gruplar parçalanarak geriye sert ve iyi pişmiş katı bir ürün bırakır. Bu olaya koklaşma adı verilmektedir. Koklaşma neticesinde kömür gaz ve yoğunlaşabilir katran buharları çıkışına ve neticede karbon yüzdesinin artmasına yol açan bir kimyasal yapı değişikliğine uğrar. Bu elde edilen ürüne kok ismi verilir.

Koklaşma 900°C' in üzerinde yapılırsa yüksek sıcaklık koklaşması, 700°C'de yapılırsa orta sıcaklık koklaşması ve 550°C'de yapılan koklaşmalara da düşük sıcaklık koklaşması olarak adlandırılır (Taşdemir 2007). Dünya kömür ticaretinin yaklaşık tamamı taşkömürüne ilişkindir. Linyit kömürünün ülkeler arasında taşınması ya da ticareti günümüzde ekonomik olmamaktadır. Küresel ölçekte ticareti yapılan taşkömürünün iki ana kullanım amacı bulunmaktadır: Elektrik üretimi (buhar kömürü) ve demir çelik endüstrisinin kullanımı için kok üretimi (koklaşabilir kömür). 2010 yılı rakamlarına göre dünya kömür ticaretinin %75'i buhar kömürü ve %25'i ise kok kömürüdür. Son yıllarda buhar kömürünün payının giderek yükselmekte olduğu gözlenmektedir.

**Kömürün Külü:** Kömür yandığında, mineral bileşenleri temel olarak silisyum, alüminyum, demir, kükürt ve kalsiyum bileşikleri, daha az miktarda ise magnezyum, titan, sodyum, potasyum, fosfor ve mangan bileşiklerinden ibaret bir artık oluşturur. Kül bileşenleri analiz



sonuçlarında oksitler halinde verilmekle birlikte, bunlar kül içerisinde çoğunlukla, yakmanın gerçekleştirildiği koşullara bağlı olarak, silikatların, oksitlerin ve sülfatların karışımları halinde bulunur. Kömür küllerinin yakma sistemlerinde cüruf oluşturma ve kirletme eğilimi araştırma konusudur. Ancak, henüz bu çalışmalardan hiç birisi küllerin kirletme ve cüruf oluşturma eğilimini açıklamakta yeterli olamamıştır. Önceleri bu parametrelerin çoğu külün bileşimi ile ilişkilendirilmişken, günümüzde, yakma kazanlarındaki kirletme, cüruflaşma ve korozyon gibi sorunların ortaya çıkmasında veya önlenmesinde külün mineral madde içeriğinin de önemli bir rol oynadığı anlaşılmıştır (Ural vd. 2002).

Kömür mineral madde içeriğinin, toz kömür yakma kazanlarında görülen, cüruflaşma, kirletme ve korozyon gibi olayların ortaya çıkmasındaki rolü birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur. Kazan kirliliği ve cüruflaşma etkisinin doğrudan doğruya mineral maddenin mineralojik yapısı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Örneğin alkali metaller (sodyum ve potasyum) kazan kirliliği üzerinde etkili olurken yüksek oranda klor içeren kömürler kazandaki donanımların hızla korozyona uğramasına neden olmaktadır (Meriçboyu vd. 1998).

Külün erime sıcaklığı, kimyasal bileşimine bağlıdır, ancak külün bileşimi geniş bir aralıkta değiştiğinden, erime özellikleri de önemli farklılıklar göstermektedir. Linyit kömürlerinin küllerinin erime sıcaklıkları ile bileşimleri arasındaki ilişkiler araştırma konusudur. Bu araştırmalar  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  içeriklerinin artmasının, erime sıcaklığında düşüşe neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Kömürün külündeki bazik oksitlerin toplamının ( $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ) asit oksitlerin toplamına ( $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ ) oranı kömürün kükürt içeriği ile çarparak bir cüruflaşma indisi,  $R_s$  (Slagging Index) geliştirilmiştir (Ural vd. 2002).

Yine kömür külünün kazan kirletme eğilimini kestirmek üzere bitümlü tip kömür külleri için bir kirlilik indisi,  $R_f$  (Fouling Index) ve linyitik tip kömür külleri için ayrı bir kirlilik indisi,  $R_f'$ , geliştirilmiştir. Cüruf oluşumunda külün kimyasal analiz içeriği önemli bir parametredir. Küldeki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriği külün Slagging Index ve Fouling Index değerlerini belirlemektedir (Ural vd. 2002).

❖ **Slagging İndeks (Rs):** Külün kimyasal analizinde (Toroğlu vd. 2012):

1.  $Fe_2O_3 > CaO + MgO$  olması durumunda Slagging İndeksi aşağıda verilen

$$Rs = (Bazik/Acid) \times S$$

$$Rs = ((Fe_2O_3) + (CaO) + (MgO) + (Na_2O) + (K_2O)) / ((SiO_2) + (Al_2O_3) + (TiO_2)) \times S$$

formülünden hesaplanır ve alacağı değere göre Slagging Potansiyeli belirlenir.

$Rs < 2.0$  ..... *düşük-orta Slagging Potansiyeli*

$2 \leq Rs \leq 2.7$  ..... *yüksek Slagging Potansiyeli*

$Rs \geq 2.7$  ..... *çok yüksek Slagging Potansiyeli*

2.  $Fe_2O_3 < CaO + MgO$  olması durumunda Slagging İndeksi aşağıda verilen

$$Rs = ((HT) + (4IT)) / 5$$

formülünden hesaplanır ve alacağı değere göre Slagging Potansiyeli belirlenir.

$Rs > 2450$  ..... *düşük Slagging Potansiyeli*

$2450 \geq Rs \geq 2250$  ..... *orta Slagging Potansiyeli*

$2250 > Rs \geq 2100$  ..... *yüksek Slagging Potansiyeli*

$2100 < Rs$  ..... *çok yüksek Slagging Potansiyeli*

❖ **Fouling İndeks (Rf):** Külün kimyasal analizinde (Toroğlu vd. 2012):

Fouling potansiyeli aşağıda verilen

$$Rf = (base/acid) \times Na_2O$$

$$Rf = ((Fe_2O_3) + (CaO) + (MgO) + (K_2O)) / ((SiO_2) + (Al_2O_3) + (TiO_2)) \times Na_2O$$

formülünden hesaplanır ve alacağı değere göre Fouling Potansiyeli belirlenir.

$Rf < 0,5$  ..... *düşük-orta Fouling Potansiyeli*

$0,5 \leq Rf \leq 1$  ..... *yüksek Fouling Potansiyeli*

$Rf > 1$  ..... *çok yüksek Fouling Potansiyeli*

CaO+MgO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>%20 olması durumunda; Na<sub>2</sub>O içeriğine bağlı olarak Fouling Potansiyeli belirlenir.

$Na_2O < 3$	<i>düşük-orta Fouling Potansiyeli</i>
$3 \leq Na_2O \leq 7$	<i>yüksek Fouling Potansiyeli</i>
$Na_2O > 7$	<i>çok yüksek Fouling Potansiyeli</i>

CaO+MgO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><%20

Base/acid<0.5 and S<1 olması durumunda; Na<sub>2</sub>O içeriğine bağlı olarak Fouling Potansiyeli belirlenir.

$Na_2O < 1.2$	<i>düşük-orta Fouling Potansiyeli</i>
$1.2 \leq Na_2O \leq 3$	<i>yüksek Fouling Potansiyeli</i>
$Na_2O > 3$	<i>çok yüksek Fouling Potansiyeli</i>

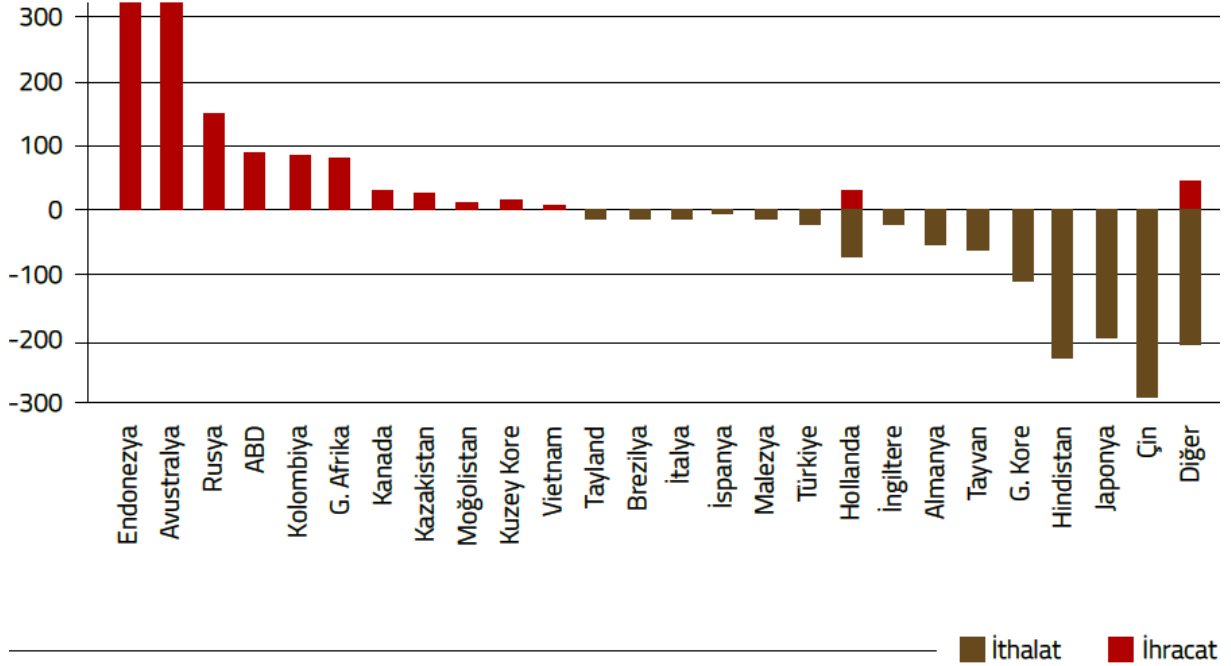
## 2.6 KÖMÜRÜN EKONOMİDEKİ YERİ

Dünya kömür ticaretinin neredeyse tamamı taşkömürüne ilişkindir. Linyit kömürünün ülkeler arasında taşınması ya da ticareti günümüzde ekonomik olmamaktadır. Küresel ölçekte ticareti yapılan taşkömürünün iki ana kullanım amacı bulunmaktadır: Elektrik üretimi (buhar kömürü) ve demir çelik endüstrisinin kullanımı için kok üretimi (koklaşabilir kömür). Dünya kömür ticaret hacmi bir önceki yıla göre %0,7 oranında artarak 2014 yılında 1.384 milyon ton düzeyine ulaşmıştır. Söz konusu ticaretin 1.054 milyon tonluk kısmı (%76,2) buhar kömürü, 322 milyon tonluk kısmı (%23,3) kok kömürü ve 8 milyon tonluk kısmı ise linyite ilişkindir (TKİ 2016).

2014 yılı Dünya kömür ihracatında ilk sıra, 2011 yılından beri olduğu gibi Endonezya'nındır. Bu ülkenin 2014 yılı ihracatı bir önceki yıla göre %4 oranında azalarak 411 milyon ton düzeyinde gerçekleşmiştir. Avustralya, 375 milyon ton ile ikinci sıradadır. Diğer önemli kömür ihracatçıları arasında, sırasıyla; Rusya (155,5 milyon ton), ABD (88,3 milyon ton), Kolombiya (80,3 milyon ton) ve Güney Afrika Cumhuriyeti (76,4 milyon ton) bulunmaktadır (TKİ 2016).

2014 yılı kömür ithalatının lideri, son yıllarda olduğu gibi yine Çin'dir. Bu ülkenin ithalatı, bir önceki yıla göre %11 oranında azalarak 2014 yılında 292 milyon ton olarak

gerçekleşmiştir. 2014 yılında Hindistan ikinci sırayı Japonya'dan devralmıştır. Hindistan'ın ithalatı 239 milyon ton düzeyinde olmuştur. Diğer önemli ithalatçı ülkeler, sırasıyla; Japonya (187,7 milyon ton), Güney Kore (130,9 milyon ton), Tayvan (67,1 milyon ton) ve Almanya (575 milyon ton) şeklindedir (TKİ 2016).



Şekil 2.9 2014 Yılı Dünya kömür ticareti (TKİ 2016).

Dünya buhar kömürü ihracatı 2014 yılında %1,7 oranında gerilemiş ve 1.054 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Buhar kömüründe en büyük ihracatı 408,2 milyon ton ile Endonezya yapmıştır. Bu ülkeyi, sırasıyla; Avustralya, Rusya Federasyonu, Kolombiya ve Güney Afrika Cumhuriyeti izlemektedir. Buhar kömürünün en büyük alıcısı ise 229,1 milyon ton ile Çin'dir. Bu ülkeyi, sırasıyla; Hindistan, Japonya, Güney Kore, Tayvan ve Almanya izlemektedir (TKİ 2016).

Koklaşabilir kömür ticareti ise 2014 yılında bir önceki yıla göre %8,8 oranında artarak 321,8 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Koklaşabilir kömürün en büyük ihracatçısı Avustralya'dır. 2014 yılında yapılan toplam koklaşabilir kömür ihracatının %56,1'ini (180,5 milyon ton) Avustralya yapmıştır. Bu ülkeyi ABD, Kanada, Rusya Federasyonu ve Moğolistan izlemektedir. Koklaşabilir kömür ihracatının %93,2'sini bu beş ülke gerçekleştirmiştir. Bu sınıftaki kömürün en büyük alıcısı 2014 yılında da Çin olmuştur. Bu ülkenin koklaşabilir kömür ithalatı 2014 yılında 62,4 milyon tondur. Çin'i; Hindistan, Japonya ve Güney Kore izlemektedir (TKİ 2016).

## BÖLÜM 3

### KÖMÜRDEKİ KÜKÜRT TÜRLERİ VE KÜKÜRT GİDERME YÖNTEMLERİ

Kömür oldukça kompleks, aromatik bileşiklerden oluşan bir yapıya sahiptir. Kömürdeki kükürt bileşiklerini iki ana grupta toplamak mümkündür. Bunlar organik kükürt ve inorganik kükürt bileşikleridir (Borah 2005).

Kömürden yakma öncesi kükürt giderme işlemleri; fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik yöntemler olmak üzere üç ana grupta toplanır. Genelde fiziksel yöntemler inorganik kükürdü uzaklaştırmada etkili olurken, organik kükürdü gidermede etkili değildirler. Organik kükürdü uzaklaştırmak için kimyasal ve mikrobiyolojik kükürt giderme yöntemleri kullanılmalıdır (Aelst vd. 2000).

#### 3.1 KÖMÜRDEKİ KÜKÜRT TÜRLERİ

Chou (2012) tarafından yapılan çalışmada, kömürdeki kükürt değişiminin kömür damarlarının çökeltme ortamlarıyla yakından ilişkili olduğunu ileri sürmektedir. Düşük kükürtlü kömür ( $\leq\%1$  S) için, sülfür öncelikle ana bitki materyalinden türetilir. Orta-kükürt ( $\%1-3$  S) ve yüksek kükürt ( $\geq\%3$  S) kömür için, iki ana sülfür kaynağı vardır: 1) ana bitki materyali ve 2) turba bataklarını sular altında tutan deniz suyundaki sülfattır (Chou 2012).

Kömürdeki kükürt bileşiklerini organik ve inorganik olarak ayırmak bilimsel olarak kabul edilmiştir.

##### 3.1.1. İnorganik Kükürt

İnorganik kükürt kömürde, sülfat, disülfür ve elementel kükürt şekillerinde bulunmaktadır (Kargı 1997, Eker'den 2007).

FeS<sub>2</sub> bileşiminin iki farklı kristal yapısı inorganik kükürdün büyük bölümünü oluşturmaktadır. Kristal yapısı rombik olan tür markazit, yapısı kübik olan tür ise pirittir. Özgül ağırlıkları birbirinden farklı olan bu iki mineralin; markasitin özgül ağırlığı 4.87, piritin özgül ağırlığı ise 5'dir. Markazite göre pirit daha az reaktif ve kararlıdır. Markazit 450 °C sıcaklığa ısıtıldığında piritte dönüşmektedir (Çinpolat 1998, Eker'den 2007).

### **3.1.1.1 Sülfat Kükürdü**

Sülfat kükürdü, gevsek kristaller halinde kalsiyum, demir, bakır ve magnezyum tuzları halinde kömürün yapısında yer almaktadır. Piritik kükürdün havada kendiliğinden oksitlenmesi sonucu sülfat kükürdü artar. Aslında kömürün ihtiva ettiği sülfat kükürdünün miktarı azdır (Jorjani vd. 2004a, Eker'den 2007).

Kalsiyum ve demire bağlı olan sülfat kükürtlerinden hidratlı kalsiyum sülfat (jips) genellikle kömürün çatlaklarında rastlanan ikincil bir mineral oluşumudur. Bir kömürdeki sülfat kükürt içeriği yüzeysel bozunmayla artmaktadır, örneğin demir sülfürlerin oksitlenmesi Fe(II) ve Fe(III) sülfatların oluşmasına neden olur. Kömürde yarım düzineye yakın demir sülfat minerali bulunmaktaysa da bunlardan en önemlisi melanterit (FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O) ve jarosit (Na,K) Fe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub> dir. Demir sülfatlar yalnızca bozunmuş kömürlerde önem taşımaktadırlar. Nadiren yüksek miktarlarda bulunurlar. Kömürdeki sülfat kükürtü suda eridiğinden, kömürün artırılması açısından herhangi bir sorun yaratmamaktadır (Eker 2007). Kömür yakıldığında, sülfat kükürdünün külde kaldığı kabul edilir (Ateşok 1986, Eker'den 2007).

### **3.1.1.2 Piritik Kükürt**

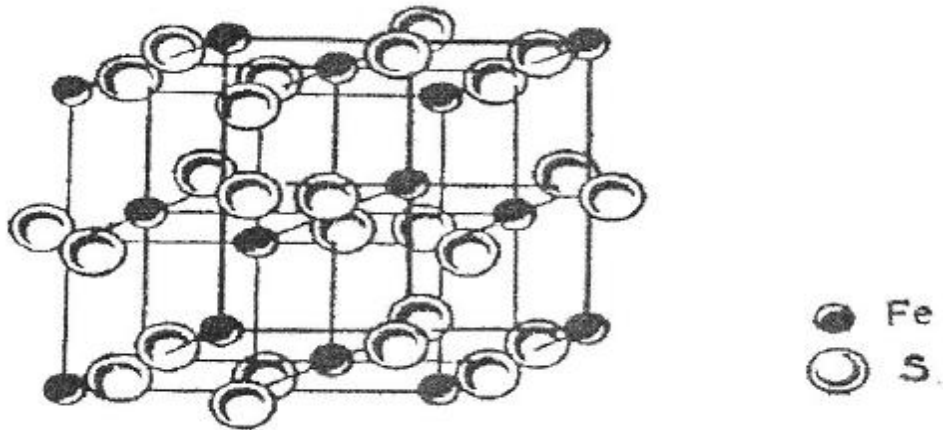
Piritik kükürt terimi, kömürün pirit ve markazit içeriğini ifade etmek için kullanılır. Bu iki mineralin kimyasal kompozisyonları aynı olduğu halde kristal yapıları farklıdır. Pirit kübik, markazit ise ortorombiktir. Pirit hemen hemen her kömürde bulunduğu halde, markazit seyrek olarak görülmektedir. Bu nedenle piritik kükürt terimi yaygın olarak kullanılmaktadır. Kükürt içeren organik maddelerin bozunmasında ortaya çıkan H<sub>2</sub>S, kömür formasyonlarındaki sularda bulunan demir karbonatlarla reaksiyona girerek demir sülfürün oluşumuna neden olur. Reaksiyon sonucu çöken demir sülfür sonuçta piritte dönüşür. Piritler aynı zamanda, sulardaki demir sülfatların, organik maddelerin faaliyetiyle indirgenmesinden meydana gelirler. Kükürt

ve demir bakterilerinin de özellikle ince piritlerin oluşumundaki katkıları büyüktür. Makroskopik piritler kömürde dört şekilde bulunurlar;

- ❖ Damarlar: Kömür yatağı içindeki dikey eklemler boyunca bazen ince ve film gibi, bazen da birkaç cm'yi bulan uzantılar seklindedir. İçlerinde iri kristaller de bulunabilir.
- ❖ Mercekler: Şekil ve büyüklük itibarı ile çok değişken olup, genellikle yassı ve kesiti uzamış şekilde bulunurlar. Kalınlıkları ve enleri birkaç cm'ye kadar çıkabilen bu merceklerin uzunluğu bazen metrelerce olabilmektedir.
- ❖ Yumrular ve Küreler: Küresel şekilli olup çapları birkaç cm'den bir m'ye kadar değişebilir. Bu kükürt küreleri, çoğunlukla saf pirit olmayıp, kalsit, siderit, kil mineralleri ve organik maddelerden bir veya birkaçını içerirler.
- ❖ Piritleşmiş bitki dokusu: Bitkisel maddenin kömürleşmeye uğrayıp, inorganik maddeyle yer değiştirmesi sonucunda meydana gelir.

Mikroskopik pirit bitkisel maddeyle yer değiştirmiş ve hücre dolgusu şeklinde, kömür içine dağılmış kürecikler, damarcıklar ve toz halindeki kristaller olarak görülürler (Şahinoğlu 2006).

Piritte Fe(II) iyonu, disülfür iyonları ( $S^{2-}$ ) ile sarılmış halde NaCl tuzundaki yapıya benzemektedir. Her bir demir iyonu, altı kükürt atomuna koordine olmuştur. S-S bağının merkezi, NaCl'deki klor karşılık gelmektedir.  $FeS_2$ 'nin kristal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir Anorganik kükürt, kömürün yapısına fiziksel olarak bağlı olduğundan uzaklaştırılması nispeten daha kolaydır (Açışlı 2002, Eker'den 2007).



Şekil 3.1 Pritin kristal yapısı (Açışlı 2002, Eker'den 2007).

### 3.1.2. Organik Kükürt

Karbonlu gruplara kovalent bağı olarak bulunan kömürün makromoleküler yapısının bir bileşeni olarak bulunan organik kükürt bileşikleridir. Bu bilgi ışında diyebilirizki; kömürün makromoleküler yapısını parçalayarak organik kükürt bileşiklerini ayırmak ve analiz etmek gerekir (Jorjani vd. 2004b). Organik kükürt bileşikleri alifatik ve aromatik kükürt bileşikleri olmak üzere ikiye ayrılır. Organik kükürt bileşikleri tiyofenler en kararlı olmaları ile birlikte bu bileşiklerin giderimi oldukça zor ve yavaştır. Alifatik kükürt bileşikleri genelde termal olarak dayanıksızdırlar. Isıtma veya piroliz sırasında H<sub>2</sub>S ve daha kararlı heterosiklik bileşikler oluştururlar (Sönmez 2000).

Tiyoller, linyitlerde ve uçucu madde içeriği yüksek olan bitümlü kömürlerde, düşük uçucu madde içerikli kömürlere oranla daha fazla bulunmaktadır. Organik kükürt bileşiklerinin kökeni kömürü oluşturan bitkilerin yapısında yer alan kükürtlü bileşiklerdir. Bu bileşikler; sistein, sistin, glutatyon, tiyoin ve metionindir (Çubuk 1999, Eker'den 2007).

## 3.2 KÜKÜRT GİDERME YÖNTEMLERİ

Fiziksel yöntemler inorganik kükürdü uzaklaştırmada etkili olurken, organik kükürdü gidermede etkili değildirler. Organik kükürdü uzaklaştırmak için kimyasal ve mikrobiyolojik kükürt giderme yöntemleri kullanılmalıdır (Aelst vd. 2000, Eker'den 2007).

### 3.2.1 Kükürt Gidermede Fiziksel Yöntemler

Birinden farklı fiziksel özellikleri bulunduran kömürün organik ve inorganik kısımları vardır. Kömürün organik bileşenlerinden exinit 1.00-1.28, mikrinit 1.35-1.45, vitrinit 1.27-1.43 arasında değişen özgül ağırlıklara sahiptir. Fusinitin özgül ağırlığı ise 1.5'in üzerine çıkabilir. Kömürün inorganik kısmının özgül ağırlığı 2-5 arasında değişmektedir. Yüzey özellikleri açısından pirit dışında kalan inorganik kısmı çok güçlü hidrofilik, kömürün organik kısmı ise hidrofobiktir (Yaman vd. 1998, Eker'den 2007).

Kömürün organik ve inorganik kısımlarının magnetik özellikleri de birbirinden farklıdır; organik kısım diyamagnetik özellikle demir içeren inorganik kısım ise paramanyetiktir. Fiziksel yöntemlerle kükürdün giderilmesinde, kömürün organik ve inorganik kısımları



arasındaki bu farklı özelliklerden yararlanılmaktadır. Fiziksel yöntemler ile kömürün sadece inorganik kükürt içeriğinde belli oranlarda azalma sağlanabilmektedir. En yaygın olarak kullanılan fiziksel kükürt giderme yöntemleri; yüzdürme-batırma yöntemleri, hidrolik yöntemler, yüzey özelliklerini esas alan yöntemler, magnetik yöntemler ve elektrostatik yöntemlerdir. Bu yöntemlerin etkinliği kömürün tane boyutunun küçültülmesi ile artmaktadır (Uslu 2002).

### **3.2.1.1 Elektrostatik ve manyetik yöntemler**

Kömürün organik kısmı ile içerdiği piritin manyetik hassasiyetleri arasındaki farkın az olması nedeniyle sıradan manyetik ayırıcılar ile birbirinden ayrılabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, pirit taneciklerinin manyetik hassasiyetlerini arttırmak için çeşitli işlemler uygulanmaktadır. İlk yapılan çalışmalarda, toz haldeki kömürün istim ve hava ortamlarında ısıtılması ile pirit taneciklerin yüzeyi daha büyük manyetik hassasiyet gösteren demir oksit bileşiklerine dönüştürülmüştür. Daha sonraki çalışmalarda ise, mikrodalga enerjisinden yararlanılarak pirit taneciklerinin manyetik özellikleri artırılmıştır (Çubuk 1999, Eker'den 2007).

Kömüre 170 °C'de demir pentakarbonilin uygulanması sonucunda, pirit taneciklerinin yüzeyinde yüksek manyetik özellik gösteren pirotin oluşturulmakta ve manyetik ayırıcılar ile kömürden uzaklaştırılabilmektedir (Çelik ve Somasundaran 1994, Eker'den 2007).

Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı (HGMS) kullanılan teknikte, ince flamanlar halindeki bir ferromanyetik malzeme bir elektromanyetik alana bırakılır. Bu işlem, mikrometre boyutunda bulunan ve zayıf özellik gösteren tanecikleri bile manyetik yolla ayırabileceği ölçüde manyetik hale getirebilen çok güçlü manyetik alanlı bölgeler oluşturur. Manyetik alan şiddeti her noktada aynı olmaktadır. Belirli manyetik şiddete sahip olan alandan geçen bir taneciğin, hangi ölçüde manyetik hale geçeceği taneciğin hacmine bağlı olduğundan, HGMS tekniğini uygulayarak kömürden kükürt giderilmesinin etkinliği taneciğin boyutunun küçültülmesi ile artmaktadır. HGMS tekniği, zayıf manyetik özellik gösteren pirit ve diğer minerallerin, diyamanyetik özellik gösteren kömürün organik kısmından ayrılabilmesinde laboratuvar ölçeğinde uygulanabilmektedir (Yaman 1996, Eker'den 2007).

### 3.2.1.2 Özgül Ağırlık Farkından Yararlanarak Ayırma Yöntemleri

Özgül ağırlığı, kömürün organik kısmının özgül ağırlığı ile piritin özgül ağırlığı arasında olan bir sıvıya küçük tane boyutuna indirilmiş kömür tozu bırakıldığında sıvıdan hafif olan organik kısım yüzerken, ağır olan pirit tanecikleri batmaktadır. Bu amaçla en yaygın olarak kullanılan sıvı ince boyutlu manyetit taneciklerinin sudaki süspansiyonudur. Süspansiyonda bulunan manyetitin derişiminin ayarlanması ile süspansiyonun özgül ağırlığı 1,3-2,0 arasında değiştirilebilmektedir. Süspansiyondaki manyetit taneciklerinin çökmesi, karıştırmak suretiyle engellenmektedir. İyi bir ayırımın sağlanabilmesi için pirit taneciklerinin batma hızının manyetit taneciklerinininkinden büyük olması gerekmektedir. Kömür ve pirit taneciklerinin eleme ve manyetik ayırma yoluyla manyetit süspansiyonunda geri kazanılmak zorunda olması, küçük tane boyutundaki kömürün kullanılmasını sınırlamaktadır (Çelik ve Somasundaran 1994, Eker'den 2007).

Halen, uygulamada, kömürlerin yaklaşık 1/3'ü jig kullanılarak zenginleştirilebilmektedir. Batak jigi kullanılarak düşük mineral madde ve kükürt içerikli bir ürün elde edilmiştir. Güney Afrika ve Avustralya'da en çok tercih edilen ayırma cihazları olan Huphrey spirali ve Reicherd konisinin, kömür hazırlama endüstrisinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Jigler, yas zenginleştirme masaları ve hidrosiklon teknikleri, kömüre göre daha fazla özgül ağırlığa sahip olan piritin, kömürden daha hızlı çökmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanması ile kömür ve pirit taneciklerinin birbirinden ayrılması, yüzdürme-batırma yöntemleri kadar iyi sonuç vermemektedir. Hidrolik yöntemlerin yatırım ve işletme maliyetleri düşüktür. Çok ince taneciklerin hidrolik yöntemlerin uygulanması ile etkin bir şekilde ayrılması zordur (Çelik ve Somasundaran 1994, Eker'den 2007).

### 3.2.1.3 Yüzey Özelliklerine Göre Yöntemler

Yüzey özelliklerini esas alan yöntemler seçimli yağ aglomerasyonu, çözücü ile ayırma ve flotasyon yöntemleridir.

#### Seçimli Yağ Aglomerasyonu Yöntemi

Seçimli yağ aglomerasyonu yönteminde kömür taneciklerinin sudaki süspansiyonuna az miktarda yağ ilave edilerek hidrofilik taneciklerin yüzeyinin seçimli olarak kaplanması

sağlanmaktadır. Yağ ile kaplanmış taneciklerin birbirine yapışması ile büyük topaklar ve aglomerantlar oluşmaktadır. Bu topaklar, aglomere olmamış hidrofobik kömür taneciklerinden eleme yoluyla ayrılmaktadır. Bu yöntem, birkaç mikrondan milimetre mertebelerine değişen boyuttaki kömürlere uygulanabilmektedir. Piritin kömürden ayrılmasını kolaylaştırmak amacıyla bazı ön işlemler yapılmaktadır. Bu işlemler arasında, demiri oksitleyen bakterilerin veya sıcak alkali çözeltilerin kömüre uygulanması ve sodyum metafosfat'ın kömüre ilave edilmesi sonucunda pirit yüzeyinin daha hidrofilik hale getirilmesi sayılabilir (Çinpolat 1998, Eker'den 2007).

## **Flotasyon**

Uzun yıllardır endüstriyel ölçekte uygulanmakta olan flotasyon yönteminde, ince tanecik boyutunda bulunan kömürün sudaki süspansiyonundan hava kabarcıkları geçirilmekte ve hidrofobik kömür taneciklerinin bu hava kabarcıklarına tutunarak süspansiyonun yüzeyine doğru hareket etmesi sağlanmaktadır. Yüzeyle ulaşılmış olan tanecikler köpük kullanılarak süspansiyondan ayrılmaktadır. Hidrofilik mineraller ise süspansiyonda kalmaktadır (Çubuk 1999, Eker'den 2007).

Bazı durumlarda, iki kademeli flotasyon işlemi uygulanmaktadır. Kömür birinci kademede yüzdürülmekte, ikinci kademede ise bir kömür bastırıcısı kullanılarak bastırılmaktadır. Kömürün içine çok ince boyutta dağılmamış olan pirit ile bir miktar mineral madde birinci kademe sonunda uzaklaştırılmaktadır. Geriye kalan piritin büyük bölümü ikinci kademede yüzdürülürken kısmen temizlenmiş olan kömür süspansiyonda kalmaktadır (Yaman, 1996).

Kömürün, piritin veya minerallerin yüzey özelliklerinin değiştirilmesi, çalışma koşullarının (dispersiyon, flokülasyon, pH vb.) kontrol altında tutulabilmesi ve dayanıklı köpük elde edilebilmesi amacıyla bazı reaktifler kullanılmaktadır. Bu reaktifler, köpük yapıcılar (frothers), toplayıcılar (collectors ), bastırıcılar (depressants ), pH ayarlayıcıları ve dispersiyon sağlayıcılarıdır. Linyitlerin flotasyon yöntemi ile değerlendirilmesi zor, tas kömürlerinin değerlendirilmesi daha kolaydır. Kolon flotasyonu gibi gelişmekte olan yöntemler daha önem kazanmaktadır (Yamık vd. 1994, Eker'den 2007).

### 3.2.2 Kükürt Gidermede Kimyasal Yöntemler

Kömürün kükürt içeriği ile seçimli olarak tepkimeye girebilme özelliğine sahip olan kimyasal maddelerin kullanıldığı kükürt giderme yöntemleridir. Bu yöntemlerin uygulanmasının amacı öncelikle kömürdeki kükürtdün direk kömürden ayrılması ya da kömürden kolayca uzaklaştırılabilen bir yapıya dönüştürmektedir. En yaygın olarak uygulanan kimyasal kükürt giderme yöntemleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** En yaygın olarak uygulanan kimyasal kükürt giderme yöntemleri (Çinpolat 1998,Eker’den 2007)

YÖNTEMİN ADI	REAKTİFLER	ÇALIŞMA KOŞULLARI			
		Ortam	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Zaman (dk)
PETC-Oksitleme	CaCO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	150-200	5.5-6.9	60
AMES-Yaş Oksitleme	O <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	150	1.5	60
LEDGEMONT-Oksitleme	O <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> OH	O <sub>2</sub>	150-200	1.5	60
TRW MEYERS	O <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , aseton, CaCO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	100-130	0.3-0.6	300-480
JPL-Klorlama	Cl <sub>2</sub> , 1,1,1-trikloreten	Cl <sub>2</sub>	60-130	0.1-0.5	4-5
KVB-Oksitleme ve yerdeğiştirme	NO <sub>2</sub> , NaOH	NO <sub>2</sub>	100	0.1	3-6
BATELLE Hidrotermal yerdeğiştirme	NaOH, Ca(OH) <sub>2</sub> , CaCO <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	250-350	0.4-1.7	10-30
IGT- Hidrojenleme	H <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	800	0.1	60

Kimyasal yöntemin başarılı olabilmesi için; reaktifin kömürün içerdiği piritik ve/veya organik kükürtdde seçici olarak etkimesi, kömürün diğer kısımlarına etkimemesi, kolayca geri kazanabilmesi ve ucuz olması gerekir. Kullanılan kimyasal maddeler; asitler, bazlar, metaller, metal tuzları, indirgeyiciler, yükseltgeyiciler olarak sıralanabilir. Uygulanan kimyasal yöntemlerden bazıları kısaca açıklanmıştır.

### 3.2.2.1 Meyers Prosesi

Meyers prosesinde, piritik kükürt,  $Fe^{+3}$  iyonlarını içeren çözeltiler yardımıyla kömürden uzaklaştırılmaktadır. İnce öğütülmüş kömür tozu,  $Fe^{+3}$  iyonlarını içeren bir çözeltiyle tepkimeye sokulduğunda,  $Fe^{+3}$  iyonları  $Fe^{+2}$  iyonlarına indirgenmekte ve elementel kükürt oluşmaktadır. Kömür filtre edilerek çözeltiden ayrılmakta, yıkanmakta ve vakum altında ısıtılarak elementel kükürdünün büyük bölümünün bu işlem sırasında buharlaşması sağlanmaktadır. Bu amaçla demir (III) klorür, sülfat, asetat, nitrat, oksit ve amonyum sülfat tuzları kullanılmaktadır (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

Meyers prosesinin uygulanması sonucu oluşan ürünlerin atılması soruna neden olmaktadır. Ayrıca, gaz-katı siklon ayırıcısından geçirilen su ve kükürt buharının içinde kömür tanecikleri bulunmaktadır. Bu kömür tanecikleri su-kükürt faz ayırma işlemine olumsuz etki yapmaktadır (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

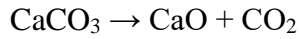
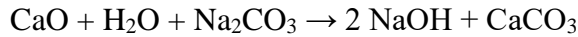
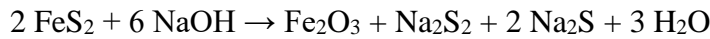
### 3.2.2.2 Ledgemont Prosesi

Bu yöntem iki şekilde uygulanmaktadır. Bunlardan birincisinde kömür su karışımının bulunduğu otoklava oksijen beslenerek gerekli atmosfer oluşturulmakta ve sistem ısıtılmaktadır. Bu yöntemin PETC yönteminden farkı, hava yerine oksijen kullanılmasıdır. İkinci uygulama şekli ise, kömürün amonyaklı bir çözelti ile benzer şekilde ekstraksiyona uğratılmasıdır. Tane boyutu  $150\ \mu m$ 'nin altına indirilmiş olan kömürün  $150-200\ ^\circ C$ 'de 1,5 saat süre ile 1,5 MPa'lık Oksijen basıncı altında ekstraksiyonu sonucunda piritin suda çözünebilir sülfatlara ve sülfürik aside dönüştüğü saptanmıştır. Amonyak kullanıldığında organik kükürdün bir kısmı da suda çözünebilir sülfatlara dönüşmektedir. Kömür filtre edilerek çözeltiden ayrıldıktan sonra, kireç kullanılarak çözeltideki sülfatlar ve demir bileşikler çöktürülmektedir. Kullanılan amonyağın derişimi arttıkça, giderilen organik kükürt miktarı da artmaktadır. Bu yöntemin uygulanması sırasında ortaya çıkan en önemli sorun uygulanan sıcaklıkta oldukça korozif olan seyreltik sülfürik asitten kaynaklanmaktadır (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

### 3.2.2.3 Battelle Yöntemi

Battelle hidrotermal yöntemi, kömürdeki inorganik ve organik kükürt bileşiklerinin hidrotermal alkali ekstraksiyonu yoluyla kömürden uzaklaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemde sodyum ve kalsiyum hidroksitler, yüksek sıcaklık ve basınç altında kömüre uygulanmaktadır. Bu işlemden geçirilmiş kömür, filtrasyon ve yıkama işlemleri ile ekstrakte edilen kısımdan ayrıldıktan sonra kurutulmakta ve briketlenmektedir. Battelle yöntemi 5 asamadan oluşmaktadır. Bu asamalar kömür hazırlama, hidrotermal işlem, ayırma, kurutma ve aglomerasyon, ekstraksiyon çözeltisinin rejenerasyonu (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993). Oksijen içeren kükürt bileşiklerinin oluşumunu en aza indirmek için hidrotermal işlem ve sonraki işlemler oksijensiz ortamda gerçekleştirilmektedir (Eker 2009).

Bu yöntem sırasında gerçekleşen tepkimeler aşağıda görülmektedir (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

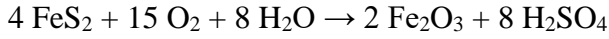


Bu yöntemin uygulanmasında iki önemli sorunla karşılaşmaktadır:

- ❖ Alkali kullanılarak ekstrakte edilen kısmın yeniden kullanılabilir hale getirilmesi henüz başılamamıştır.
- ❖ Kükürt giderme işlemi sırasında önemli korozyon sorunları oluşmaktadır; çünkü alkaliler yüksek sıcaklıklarda ortamda su bulunması halinde oldukça korozif etki göstermektedir (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

### 3.2.2.4 PETC Yöntemi

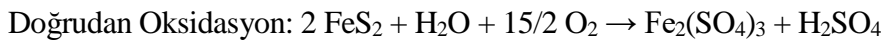
PETC (Pittsburg Energy Technology Center) tarafından geliştirilmiş olan bu yöntem, kömürdeki kükürtlü bileşiklerin hava ile oksitlenmesine ve oluşan sülfürik asidin kireç ile nötrale edilmesine dayanmaktadır (Uslu, 2002). Piritik kükürdün büyük bir bölümü ile organik kükürdün bir kısmının bu yöntemle kömürden uzaklaştırılabildiği saptanmıştır.



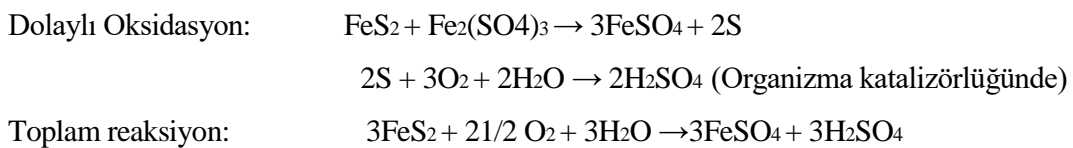
Kömür-su karışımının bulunduğu otoklava oda sıcaklığında, gerekli oksijen kısmi basıncı sağlanana kadar hava beslenmekte ve sistem ısıtılmaktadır. Belirli bir süre sonunda da kömür yıkılarak sülfatlar uzaklaştırıldıktan sonra kömür kurutulmaktadır. Bu yıkama işlemi kömürün mineral madde içeriğinde de önemli ölçüde azalmaya neden olmaktadır. 150-200 °C'de ve 5.5-6.9 MPa'lık basınç altında 1 saatlik işlem sonucu oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. En önemli sorun, otoklav malzemesinin seçiminde yaşanmaktadır. Bu yöntem uygulandığında ortaya çıkan sülfürik asit oldukça koroziftir. Bu nedenle, asitle temas edecek malzemenin iyi seçilmesi gerekmektedir. Bu malzemelerin kullanılacağı belli başlı yerler şunlardır: ön ısıtıcılar, basınç düşürücü ekipmanlar ve gaz yıkama sistemleridir (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

### 3.2.3 Kükürt Gidermede Biyokimyasal Yöntemler

Son yıllarda yapılan araştırmalarda bazı bakterilerin, kömürdeki kükürdün giderilmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Bazı bakteriler yaşamları için gerekli olan enerjiyi kükürtlü bileşikler oksitleyerek sağlarlar. Böylece kükürtlü bileşikler oksitlenerek suda çözünen sülfatlara dönüşürler. Bu amaçla kullanılan bazı bakteriler; Ferrobacillus Ferrooxidans, Thiobacillus Ferrooxidans, Thiobacillus Thiooxidans, Rodococcus, Rhodochrous, Brevibacterium, Pseudomonas aeruginosa'dır. Mikrobiyolojik olarak kükürdün giderilmesinde piritik kükürt doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki ayrı mekanizma ile oksitlenir. Piritik Kükürt gideriminde % 90'lara varan oranda giderim görülebilmektedir. Doğrudan oksidasyonda bakteriler, piritik kükürdü sülfata ve Fe (II) iyonlarını Fe (III)'e yükseltir (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).



Dolaylı oksidasyonda piritik kükürt Fe (III) iyonları tarafından sülfata yükseltgenir. Dolaylı oksidasyonda bakteriler Fe (III) oluşturur fakat doğrudan piritik kükürdü yükseltmeyebilirler.



Dibenzotiyofen (DBT) üzerinde yapılan çalışmalar, DBT'nin önce hidroksillendiği ve daha sonraki basamaklarda ise kükürdün, sülfat ve daha basit bir bileşiğe dönüştüğü varsayılmaktadır (Kargı, 1997). Biyokimyasal yöntemlerin avantajları çok az mineral ve oksijen kullanımı düşük sıcaklık ve düşük pH'dır. Fakat bu avantajlar yanında, uzun fermentasyon zamanı, kömür örneklerinin oldukça iyi öğütülmüş olmaları gibi dezavantajları da vardır (Çuhadaroğlu ve Toroğlu 1993).

### 3.2.4 Kömürden Kükürt Giderme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Çağlayan (2016) yaptığı çalışmada, uygulama, maliyet ve işletim açısından uygun ve yenilik getirebilecek meşe külü kullanılarak kömürden kükürt giderimi amaçlanmıştır. Bu amaçla kükürt içeriği farklı olan dört adet kömürde farklı miktarlarda meşe külü kullanılarak kükürt giderim verimleri tespit edilmiştir. Çalışmada organik kükürt, karbon ve kalori değerlerinde çok fazla bir değişimin olmadığı gözlemlenmiştir. İki farklı miktardaki meşe külü uygulamasında kükürt giderim veriminin meşe külünün miktarı ile arttığı belirlenmiştir. Bir diğer yönden ilave edilen potasyum hidroksitinin kükürt giderim verimi üzerinde daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle potasyum hidroksitinin meşe külü ile birlikte uygulamasının kükürt giderimini arttırdığı sonucuna varmıştır.

Hacıfazlıoğlu vd. (2016) yaptıkları çalışma kapsamında, borik asit ile Kastamonu-Tosya linyit kömüründen kül ve kükürdün giderilmesi için liç deneyleri yapmışlardır. Kül ve kükürtün liç yöntemiyle giderilmesinde genelde HCL, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HNO<sub>3</sub> gibi kuvvetli ve çevresel yönden önemli sakıncaları olan asitler kullanılmaktadır. Bu bilgi ışığında ekonomik olması şartı ile zayıf asitlerle liç önem kazanmıştır. Borik asit liçinin, kül ve kükürt gideriminde en az sülfürik asit liçi kadar verimli olduğu ancak HF liçine göre daha düşük verim sağlandığı görülmüştür. Optimum şartlarda ise borik asit liçi ile kömürdeki kül içeriği % 14,62'den % 8,60'a, kükürt değeri ise % 8,77'den % 5,95'e düşmüştür. HF liçi ise, kömürdeki kül içeriğini % 3,02'ye kükürt içeriği % 4,27'ye düşürmüştür.

Tosun (2012) yaptığı çalışmada, 3 farklı kömürde pratik olarak kullanılan Ergiyik Kostik Liç yöntemi ile kömürlerin kükürdünden ve külünden arındırılması incelenmiştir. Kükürt giderme işleminde toplam kükürdün büyük kısmı ve yanabilir kükürdün tamamına yakın bir kısmı yaklaşık olarak % 90 oranında giderebilmiştir. Linyitlerimizin toplam kükürdü mermer atık tozu ile 350°C de yapılan kısmi ergiyik kostik liçi ile yaklaşık olarak % 50-52 oranında (Soma ve



Aydın Şahinali linyitlerinde) giderebilmektedir. Kısmi ergiyik kostik liç işleminde değişik alkali kaynaklar değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle mermer fabrikalarının 10 mikron boyutunun altındaki mermer atık tozunu içeren fabrika çamur atığı önemli bir kükürt arındırma sorbenti olarak değerlendirebildiğini ifade etmiştir. Ergiyik kostik ile katı alkali sorbentlerin kömürden yıkanması liç işlemi sonrasında herhangi bir sorun teşkil etmediği gibi bunların geri tekrar kullanımı da mümkündür. Ayrıca NaCl, KCl gibi tuzların kısmi ergiyik liçte mermer atık tozu kadar etkili olmadığı belirlemiştir. Özellikle 350 °C'lik sıcaklıkta uygulanan kısmi ergiyik kostik liçi etkili kükürt tutmayı sağladığını tespit etmiştir.

Levent vd. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonu ile yüksek kükürt içerikli Artvin Yusufeli Linyitinden kükürt uzaklaştırılması incelenmiştir. Deneylerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 0.25-6 M, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> konsantrasyonu 0.25-4 M, reaksiyon sıcaklığı 10-60 °C, katı/sıvı oranı 0.01-0.08 g/mL, 200-300 rpm karıştırma hızı, 710-120 µm partikül boyutu ve 15-120 dakika süre değişkenleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, toplam kükürt % 97.85, piritik kükürt % 56.54, organik kükürt % 21.33, kül % 61.52 oranlarında giderilmiştir.

Huang ve Rawson (2002) tarafından yapılan bir çalışmada pirit ve markasitin hidrometalurjik ayrışması incelenmiştir. Bu çalışmada; 20-63, 90-125, 180-250 µm boyutlarındaki pirit ve markasit numuneleri kullanılmıştır. Bu numuneler 600 W, 2.45 GHz frekansta mikrodalga fırında HNO<sub>3</sub> çözücü ortamında mikrodalga enerjisi ile muamele edilmiştir. Değişken olarak HNO<sub>3</sub> konsantrasyonu (0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 M), sıcaklık (70, 80, 90, 100, 110 °C) seçilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda HNO<sub>3</sub> konsantrasyonu arttıkça liç zamanı daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Konsantrasyon azaldıkça liç zamanı artmış ve 3 M dan sonra verim çok düşük gerçekleşmiştir. Sıcaklık arttıkça liç zamanı kısalmıştır. 90 °C'den sonra liç zamanı artmış verim düşmüştür. 20-63 µm tane boyutunda liç zamanı artmış ve tane boyutu küçüldükçe liç zamanı kısalmıştır.

### **3.2.5 Mikrodalga Enerjisinin Kükürt Giderimine Etkisi**

Mikrodalga enerjisi; frekansı 300 Mhz ile 300 Ghz arasında değişen iyonlaştırıcı özelliği olmayan elektromagnetik radyasyondur. Mikrodalga frekansları üç bandın içinde yer alır. Ultra Yüksek Frekans (UHF: 300 Mhz ile 3 Ghz), Süper Yüksek Frekans (SHF: 3Ghz ile 30 Ghz), ve Aşırı Yüksek Frekans (EHF: 30 Ghz'den 300 Ghz'e kadar) (Uslu 2002).

Metalik bir levha benzeri aynadan yansıyan mikrodalgalar, dielektrik arayüzeyinde kırılır ve parabolik yansıtıcı ile odaklanır. Mikrodalga enerji belirli bir frekansta elektrik enerjisinden elde edilir. Mikrodalgalar, görünür, ultraviyole gibi elektromagnetik enerji şekillerinden daha yüksek dalga boylarına ve daha düşük enerji miktarına sahiptirler (Yıldız ve Alp 2000).

Mikrodalga enerjisinden yararlanılan alanları şu şekilde sıralayabiliriz;

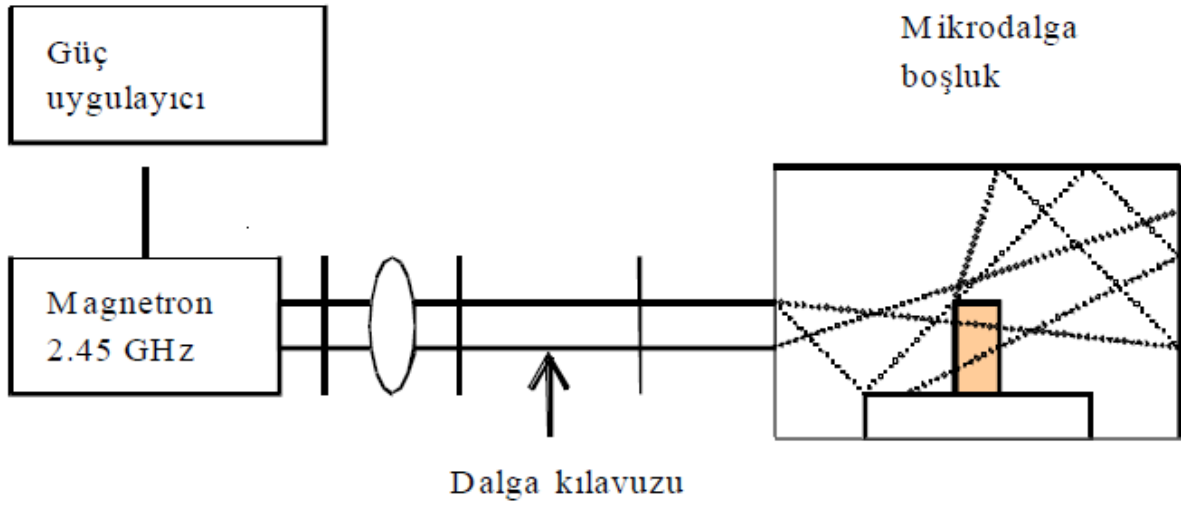
- ❖ Isıtma
- ❖ Kavurma
- ❖ Kurutma
- ❖ Liç işleri
- ❖ Seramik endüstrisi
- ❖ Kömür sıvılaştırma
- ❖ Oksitli minarellerin karbotermik redüksiyonu

Birçok endüstride proses kademelerinde atık malzeme oluşmaktadır. Atık malzemenin içerdiği bileşenlerin ortaya koyduğu tehlikeyi azaltmak amacıyla, üretilen atığı minimuma indirmek ve zehirli atıkların emniyetli şekilde tutulması, taşınması, depolanması, imhası giderilmesi ve bertaraf edilmesi işlemleri için teknolojiler araştırılmaktadır. Günümüzde geniş miktarlardaki gaz, katı ve sıvı atıkların yönetiminde mikrodalga enerjisi dikkate değer bir potansiyel ortaya koymaktadır (Uslu ve Atalay 2003).

Mikrodalga enerjisi ile ısıtmanın avantajları (Uslu 2002);

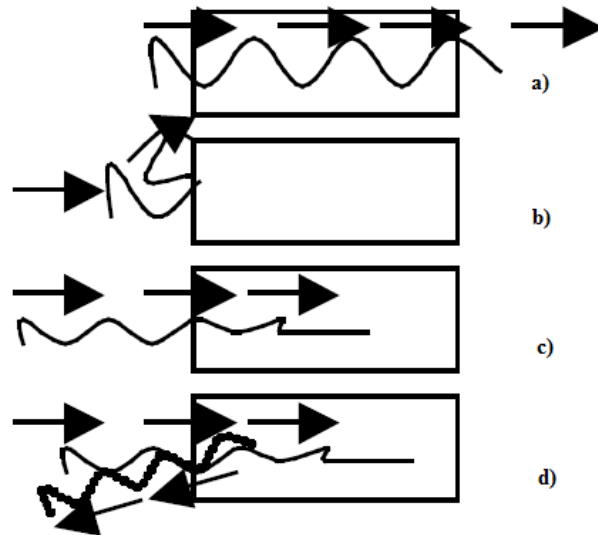
- ❖ Düşük enerji maliyeti
- ❖ Uniform sıcaklık dağılımı
- ❖ İşlem sıcaklığına hızlı ısıtma
- ❖ Çevre dostu
- ❖ Daha kaliteli son ürün
- ❖ Hızlı proses ve yüksek control
- ❖ Numunenin ısıtılması iç kısımda sağlandığı için ısıtılan numunenin sıcaklık nüvesi daha yüksektir.

Mikrodalga ile ısınmanın şematize edilmiş hali aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Mikrodalga ile ısınmanın şema hali (Toraman ve Depçi 2007)

Mikrodalgalar iyonik parçacıkların göçü veya dipolar parçacıkların rotasyonu ile molekülde harekete neden olurlar. Mikrodalgalar numune tipine bağlı olarak yansıma, absorbe etme veya geçirimli olabilirler ve optik kurallara uyum gösterirler. Metaller saydam olmadıkları için mikrodalgalar yüzeyden yansıma yaparlar. Bu nedenle metaller mikrodalga ile ısıtılamaz. Genel olarak metaller yüksek iletkenliğe sahiptir ve iyi yansıtıcıdırlar. Dielektrik özelliğe sahip seramik malzemelerden mikrodalgalar geçirimli olarak geçer. Bu nedenle seramikler yalıtıkandırlar ve mikrodalga fırında malzemenin ısıtılmasını desteklemek için kullanılırlar (Kutbay ve Kuşkonmaz 2004).



Şekil 3.3 Malzeme ile mikrodalganın etkileşimi a) geçirimli b) iletken c) soğurucu d) karma (Toraman ve Depçi 2007).

Mikrodalga enerji kaybının iki önemli mekanizması; iyonik iletim ve polar rotasyondur. Buna göre dielektrik sabiti ve dielektrik kaybının oranı malzemenin harcanma faktörünü verir. Dielektrik sabiti, malzemenin mikrodalga enerjisinin iç kısmından geçmesi sırasında absorbe etme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Kayıp faktörü ise giren mikrodalga enerjinin malzeme içerisinde ısı olarak tüketilmesi ile kayıp olma miktarını verir. Bu nedenle yüksek kayıp faktörlü bir malzeme mikrodalga enerjisiyle kolaylıkla ısıtılabilir (Yıldız ve Alp 2000).

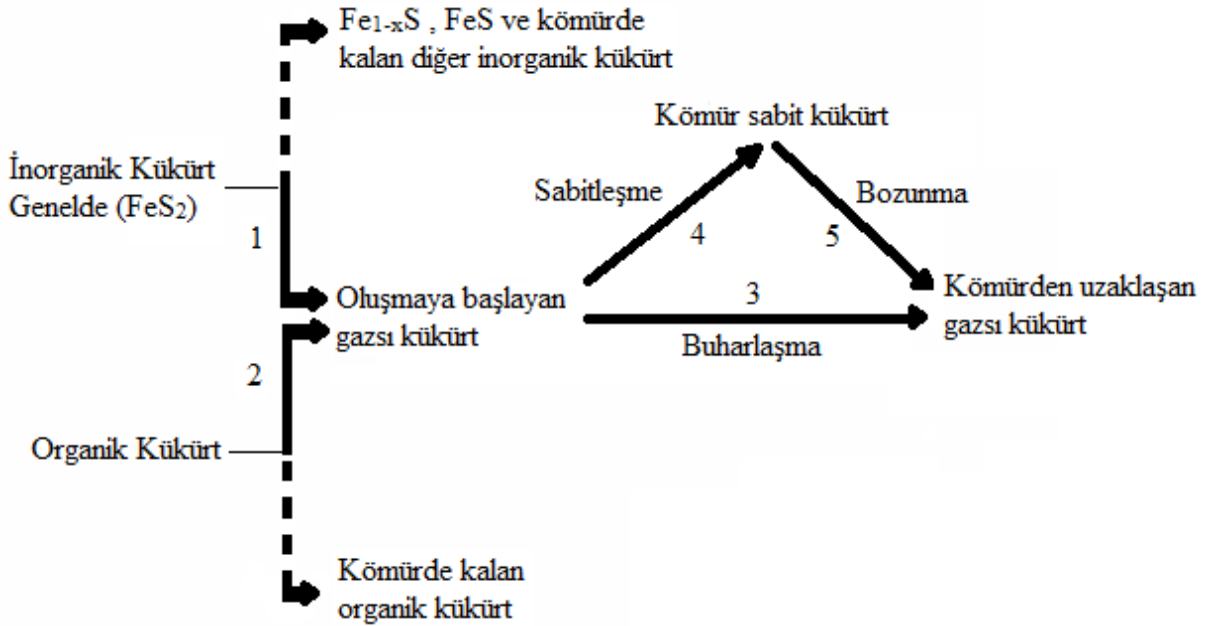
### 3.2.5.1 Mikrodalga Enerjisi İle Desülfürizasyon

Mikrodalga radyasyonu ile kömürün desülfürizasyonda çok çalışma yapılmıştır fakat sadece mikrodalga ile kömürün pirolizinin desülfürizasyonu hakkında çok az bilgi vardır. Buna ek olarak, dış ısıtma ile karşılaştırıldığında, mikrodalga enerjimi yoksa dış ısıtma mı daha avantajlı olduğu konusunda belirsiz görüşler vardır. Wang ve Yang (1994) yapmış olduğu ilk çalışmada, kömürün mikrodalga ile pirolizinin desülfürizasyonuna karşı davranışında odaklanmıştır.

Azot atmosferinde mikrodalga radyasyonu ile kömürün pirolizi ile desülfürizasyon davranışları üzerinde yapılan bu çalışmada; mikrodalga yöntemiyle uçucu madde kaybı azalmakta ve dış ısıtma pirolizi ile karşılaştırıldığında daha belirgin desülfürizasyon sağlanmıştır. Desülfürizasyon sırasında oluşan gazlı kükürt bileşikler sabitleşme reaksiyonlarına maruz bırakılıp, daha az kükürt kaybıyla sonuçlanmaktadır. Kükürt uzaklaşması % 5'lik HCl ile yıkama sonucunda az miktarda yükselmiştir. Diğer yandan % 5'lik HCl asitle yıkama sonrasında örnek çift ışınlamaya maruz bırakıldığında kükürt uzaklaştırması daha fazla olmuştur (Wang ve Wang 1992).

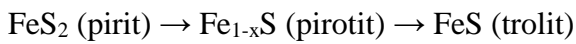
Kömürden kükürdün uzaklaştırılmasında üç asama belirlenmiştir. Birinci asama, kömür örneğinin suyunun uzaklaştırılması olup desülfürizasyon reaksiyonları belirgin değildir. İkinci asama olarak kömürün organik matriksinin ayrılmasıyla beraber desülfürizasyon belirgin miktardadır. Kükürt uzaklaşması artan radyasyon zamanı ile hızla artar. Üçüncü asama olarak desülfürizasyonun derecesi radyasyon zamanının uzamasıyla değişmemektedir (Wang ve Wang 1992). Mikrodalga radyasyonu ile desülfürizasyon reaksiyonları kısa zamanda tam olarak yapılabilir. Mikrodalga alanda aktivasyon enerjisi azalırken, reaksiyonların

moleküler polarizasyonunun yükselmesine izin vermektedir. Bu nedenle şekil 3.4’de görüldüğü gibi desülfürizasyon reaksiyonları hızlanmıştır.



**Şekil 3.4** Mikrodalga radyasyonu ile desülfürizasyon için reaksiyon şeması (Wang and Wang 1992).

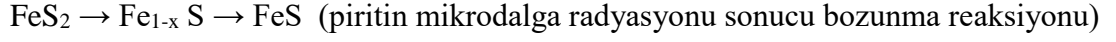
Kömürde temel olarak demir-sülfür safhası olan piritin (FeS<sub>2</sub>) olabileceği bulunmuştur. Diğer safha ferrous’dur. 30 saniyede piritin ayrılması, trolitden ziyade pirotit yapısındadır. 100 saniyede, piritin neredeyse tamamı trolite dönüşürken, çok az miktarda pirotit kalmaktadır. Mikrodalga radyasyon sırasında, inorganik kükürt bileşiklerinde temel değişimler olmaktadır.



Bu reaksiyon artan radyasyon zamanı ile sağa doğru kaymaktadır. Aynı durum radyasyon akısında Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> yok olmaktadır. Her nasılsa FeS ve Fe<sub>1-x</sub>S için başka demir safhalarının oluşmadığı kabul edilir. Demir sülfat piritte indirgenebilir (Wang ve Wang, 1992).

**Kömürde FeS bileşiminin dönüşümü:** Eker (2007) bahsettiği üzere piritin kendiliğinden bozunması 700 °C nin üzerinde yüksek sıcaklıklar gerektirmektedir. İnert atmosferde (N<sub>2</sub>), 57 Fe – Mössbauer spektroskopisini kullanarak, kömürde piritin bozunmasını araştırmıştır ve kömürde piritin pirotite (Fe<sub>1-x</sub>S)’e dönüşümü 300 °C de başlamıştır. Bu da kömürde

$FeS_2/Fe_{1-x}S$  bu sıcaklığın yukarısında kömür parçacıklarıyla reaksiyona girdiğini göstermektedir.



Artan radyasyon zamanı ile süreç sağ tarafa doğru artarda ilerlemektedir. Demir sülfat ( $FeSO_4$ ), pirit parçacıklarında piritin oksidasyonu ile oluşmaktadır. Mikrodalga radyasyonu sırasında  $FeSO_4$  ilk olarak oksitlenir ve sonra oldukça yüksek reaktif kükürt atomlarıyla  $Fe_{1-x}S$  veya  $FeS$  yapılarına ardı ardına sülfürlenir. Bu kükürt atomları, pirit moleküllerinin Fe-S bağlarını kırdığı zaman  $FeSO_4$  piritten ayrılır (Eker 2007).

### 3.2.5.2 Mikrodalga İle Kömür Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Geçmişte yapılan araştırmalar aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Toraman ve Depçi 2007).

**Çizelge 3.2** Mikrodalga ile kömür üzerinde yapılan bazı çalışmalar (Eker 2007).

Mikrodalga araştırma konusu	Kömür türü	Deneysel şartlar	Elde edilen sonuçlar	Kaynak
Öğütülebilirlik	Yarı-bitümlü İngiliz kömürleri (termik santral) (%5 nem içerikli)	0,65 kW; 2,45 GHz; 1-8 dk.	İş indeksinde %50'ye varan düşüş, bünye neminin %55'ini uzaklaştırma	Marland vd, 2000
Kükürt giderimi	Linyit kömürü (Aşkale)	0,85 kW; 2,45 GHz; 20 dk.	Manyetit ilavesiyle mikrodalga ısınma ve piritik kükürdün uzaklaştırılması, %5'lik bir manyetit ilavesiyle birlikte piritik kükürtte %55 azalma	Uslu ve Atalay, 2003
Kömürün yapısına etkisi	Çeşitli ülkelerden farklı kömürler (farklı kimyasal ve petrografik özellikte)	3-15 kW; 2,45 GHz; 0,1 sn.	Mikrodalga ile etkileşimin kömürün türüne/nem-yakıt ve petrografik vb. özelliklerine göre değiştiği, uygulama süresinin etkili olduğu	Lester ve Kingman, 2004
Kömürün yapısına etkisi, Öğütülebilirlik	Çeşitli ülkelerden farklı kömürler	3-15 kW; 2,45 GHz; 0,1 sn.	Özgül kırılma hızlarında artış, ekonomik güç seviyelerinde kömürlerin öğütülebilirliğinde belirgin artış	Lester vd, 2005
Öğütülebilirlik	Bitümlü kömür (%10 nem içerikli)	0,90 kW; 2,45 GHz; 15-60 sn.	HGI değerlerinde %125, 74 $\mu$ m altı fraksiyonda üretilen ince ürün miktarında %118 artış	Özbayoğlu ve Depci, 2006
Susuzlaştırma	İnce kömür pülpu (%52 su içerikli) (ABD)	0,80 kW; 2,45 GHz; 10-30 sn.	%80'in üzerinde susuzlaştırma verimi	Seehra vd, 2007

Güngören vd. (2016) yaptıkları çalışmada, Kastamonu-Tosya bölgesinden linyit kömürü numuneleri etüvde ve mikrodalga fırında ayrı ayrı kurutulmuş ve ardından laboratuvar tipi çubuklu değirmen kullanılarak 10, 20, 30 ve 60 dakika olarak çeşitli sürelerde öğütülmüş numunelerin tane boyut analizi gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga kurutmada, etüvde kurutmaya kıyasla her öğütme süresinde daha küçük d50 ve d80 tane boyutları elde edilmiştir. Mikrodalga ile kurutma esnasında kömürün yapısında oluşan çatlaklar kısa sürede iyi öğütmeyi sağlamaktadır. Etüvde kurutulan malzemenin aynı tane boyutlara ufalanabilmesi için daha uzun öğütme sürelerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

Ma vd. (2015) yaptıkları çalışmada, farklı organik kükürt bileşiklerinin dielektrik özellikleri, transmisyon yansıma yöntemi kullanılarak 100 MHz ila 3000 MHz aralığında yurtdışı frekans aralığında incelenmiştir. Organik kükürt bileşiklerinin 915 MHz frekansında mikrodalga ısıtma etkisinin 2450 MHz'den daha iyi olduğu bulundu. Xinyang kömürünün kükürt giderme deneyleri, desülfürizasyon oranının 915 MHz'de % 6.9'a, ancak 2450 MHz'de sadece % 1.1'e ulaşabileceği farklı mikrodalga frekansları kullanılarak gerçekleştirildi. Eşsiz selektif ve hacimsel ısıtma kapasitesi nedeniyle kömürden organik kükürtün mikrodalga radyasyonu ile uzaklaştırılması için bazı teori referansları verilebilir.

Tosun (2015) tarafından yapılan çalışmada, mikrodalga enerjisinin kömür (Soma linyit, Tunçbilek linyit, Kütahya-Gediz linyit, Şırnak asfaltit) ve yan kayalara (Şırnak kömür marn ve kömür şeyli) öğütülebilirlik, kül ve toplam kükürt içeriğine etkisi incelenmiştir. -50 mm hazırlanmış numune 50 gr olarak 900 W güçte mikrodalga fırında 30-480 saniye mikrodalga ısıya maruz kalmıştır. Mikrodalga sonrası -4 mm'ye kırılmış ve Bond Değirmeni'nde öğütülmüştür. Şırnak asfaltiti için Hardgrove değeri %43'lük bir artış ile mikrodalga aktif öğütme sağlamıştır. Öncesinde Mikrodalga işlemi görmüş öğütülmüş numuneler flotasyon-on işlemine tabi tutulduğunda toplam kükürtte %56 kül içeriğinde %33 düşüş görülmüştür. Sonuç olarak mikrodalga enerjisi kolay öğütme, etkili flotasyon ve temiz kömür eldesini sağlamıştır.

Ma vd. (2014) yaptıkları çalışmada, mikrodalga öncesi sülfür fazını parçalamak için nitrik asitle oksidasyon işlemi yapmıştır. Bu çalışmada, üre hidrojen peroksit (UHP) çözeltisinin, yüksek kükürtlü ve yüksek külü kömürdeki kükürt giderme ve demineralize etme üzerine HNO<sub>3</sub> ve mikrodalga ön-muamele yöntemi ile etkisi araştırılmıştır. Yalnızca UHP ile karşılaştırıldığında, HNO<sub>3</sub> ve mikrodalga ön işleme tabi tutulan ardışık muamele, toplam

kükürt ve mineral maddenin kömürden önemli ölçüde çıkarılmasına neden olmuştur. Önerilen deneysel yöntem, kömürü kükürt gidermek ve mikrodalgayla atmak için pratik rehber anlamındadır.

Hacıfazlıoğlu (2014) tarafından yapılan çalışmada, kurutma deneylerinde kullanılan disk filtre ürünü şlam kömürün nem içeriği %26, ortalama tane boyutu ~30 mikrondur. Şlam kömür mikrodalga ve konvansiyonel ısıtmalı fırında ayrı ayrı kurutulmuştur. Şlam kömür, 700 W güçte mikrodalga fırında, 150 °C'de yapılan konvansiyel kurutmaya göre 10 kat daha hızlı kurutmuştur. Aynı sürelerde benzer enerji tüketimlerinde yapılan deneyler mikrodalga kurutmasının elektrik tüketim maliyeti açısından da avantajlı olduğu görülmüştür. Mikrodalga ile kurutma selektif ısıtma özelliğinden dolayı ürün çok fazla ısınmadan nem kaybetmektedir. Mikrodalga kurutması sonrası ürün sıcaklığının, konvansiyonel ısıtma sonrası ürün sıcaklığından düşüktür. Mikrodalga kurutmanın sakıncası ise şlam kömüründe termal gerilmelerle ve ani buhar çıkışıyla meydana gelen mikro ve makro çatlaklardır. Bu çatlaklar kolay parçalanmayı sağlayacaktır. En ekonomik ve etkili kurutma sonrası atık diye nitelendirilen şlam kömürlerden yüksek kalorili yakıtlar elde edilebilecektir.

Samanlı (2010) tarafından yapılan çalışmada, piritik kükürtlü ve %25 yapısal nem içeren linyit kömür numuneleri Russel eleği ile üç farklı tek tane boyut grubuna ayrılmıştır. Linyit kömüründen yapısal nemin tamamen giderilmesi için, 600 W ve 850 W mikrodalga uygulanmıştır. Mikrodalga ile muamele edilmemiş kömür örnekleri ve 850W'lık mikrodalga ile muamele edilmiş olanlar, 5, 15, 30, 60, 120 s karıştırılmalı bir ortam değirmeninde öğütülmüştür. Mikrodalga ile işleme tabi tutulan kömürün kırılma oranları artmıştır. Ayrıca, 850 W lık mikrodalga işleminden sonra HGI indeks değeri yaklaşık% 23 arttığı belirlenmiştir.

Uslu (2002) yaptığı çalışmada, pirit minerallerinin mikrodalga ısınma karakteristikleri ve Aşkale linyitinden mikrodalga ısıtma sonrası manyetik ayırma ile kükürt uzaklaştırılmasını araştırmıştır. Yüksek pirit içerikli linyitlerin kükürt uzaklaştırma olanaklarını araştırmak için, tüvenan Aşkale linyiti -19 mm'ye kırılmış ve Yüzdürme-Batırma işlemiyle temizlenmiştir. Kül, toplam kükürt ve piritik kükürt içerikleri sırasıyla %14,35, %5,11 ve %7,71 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Ön temizlenmiş kömür 2 Tesla'da, farklı boyutlarda manyetik ayırmaya tabi tutulmuş ve en iyi sonuç -0,15 mm tane boyu için elde edilmiştir. Çeşitli boyutlardaki ön temizlenmiş kömür mikrodalga fırında farklı sürelerde ısıtılmış ve ısıtılan numuneler manyetik ayırmaya tabi tutmuştur. 850 W ve 2,45 GHz'da ısıtılan piritin manyetik



özelliğindeki artış, 2 Tesla manyetik alan şiddetinde önemli miktarda pirit uzaklaştırma için yeterli olmamıştır. Mükemmel bir mikrodalga emici mineral olan manyetit ilave edilmiştir. % 7,5 manyetit ilavesiyle, -0,15 mm tane boyutundaki ön temizlenmiş kömürün toplam kükürt ve piritik kükürt içerikleri, mikrodalga ısıtma sonrası 2 Tesla'daki manyetik ayırma ile sırasıyla % 52,05 ve % 58,20 oranında düşürülmüştür.

Elsamak vd. (2003) yaptığı çalışmada, Çayırhan linyit kömürünün mikrodalga ve termal enerji kullanılarak HI ile kimyasal desülfürizasyonu gerçekleştirilmiştir. 65 mesh altı boyutundaki linyit kömürü, saf, 1:1, 1:2, 1:4 oranlarında HI kullanılarak termal ve mikrodalga enerji kullanılarak kükürt giderimi incelenmiştir. 0, 25, 50, 75, 100, 125 dakikalık termal ısıtma deneylerinde sonucunda saf HI ile 50 dakikada saf linyitte toplam kükürt % 5.3'ten % 4'e düşürülmüştür. Saf HI ile HCl/HF ile yıkanmış linyitte 50 dakika da toplam kükürt % 5.3'ten % 3,6'ya düşürülmüştür. Mikrodalga ısıtma ile yapılan deneylerde 1330 W mikrodalga gücü ve saf HI' ün kullanıldığı deneyin kükürt gideriminde en etkili olduğu belirlenmiştir. Saf linyit örneğinde ilk iki dakikada toplam kükürt % 5.3' ten % 3'e düşürülmüştür. HCl/HF ile yıkanmış kömür örneğinde toplam kükürt % 5'ten % 2'ye düşürülmüştür.

Eker (2007) yaptığı çalışmada; piritik kükürt içeriği yüksek olan Balıkesir-Dursunbey ve Çorum-İskilip Linyitleri kullanılmıştır. Bu linyitlerin kükürt içeriklerinin azaltılması deneylerinde; trona ile hazırlanmış çözeltiler kullanılmıştır. Kükürt giderimi deneyleri, ısısal ve mikrodalga ortamda yürütülmüştür. Isısal ortamda yapılan deneylerde; 20 °C, 50 °C ve 90 °C sıcaklıklarında; konsantrasyonları % 2.50-% 15.00 arasında değişen trona çözeltisi kullanılarak, 15-180 dakika arasında değişen sürelerde ön deneyler yapılmış ve optimum kükürt giderim koşulları belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullarda; sıcaklık 20 °C, 50 °C, 90 °C, saf su (% 0), trona çözeltisi konsantrasyonu % 1.25-% 15.00 ve deney süresi 15-180 dakika değişkenlerinin kükürt giderimi üzerine etkisi incelenmiştir. Deneylerin sonucunda Dursunbey ve İskilip linyitlerinin toplam kükürt içerikleri sırasıyla % 41 ve % 38 oranında; piritik kükürt içerikleri ise sırası ile % 41 ve % 31 oranında azaltılmıştır. Mikrodalga ortamında yapılan deneylerde; 90 W, 180 W ve 360 Watt mikrodalga radyasyon gücünde konsantrasyonları % 2.50-%15.00 arasında değişen trona çözeltisi kullanılarak, 30-480 saniye arasında değişen mikrodalga radyasyon sürelerinde ön deneyler yapılmış ve optimum koşullar belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullarda, kükürt giderimi üzerine saf su (% 0), trona çözeltisi konsantrasyonu (% 1.25-% 15.00), mikrodalga radyasyon gücü (90 W, 180 W, 360 W) ve mikrodalga radyasyon süresi (30-480 saniye) gibi değişkenlerinin etkisi incelenmiştir.

Mikrodalga ortamında yapılan deneylerin sonucunda Dursunbey ve İskilip linyitlerinin toplam kükürt içerikleri sırasıyla % 38 ve % 32 oranında azaltılırken, piritik kükürt içerikleri ise sırası ile; % 48 ve % 38 oranında giderilmiştir.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ülkemiz linyitlerinin çoğunda kül, nem ve kükürt içerikleri yüksektir, termik santrallerde elektrik üretiminde kullanımlarında bu yüksek kükürt içeriği ve kül yapıcı miktarları önemli sorunlara neden olmaktadır.

Ülkemiz linyit yataklarının kullanımlarının iyileştirilmesine yönelik olarak hazırlanan bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların birinci bölümünde; ülkemizde halen üretim yapılan 10 ayrı ocaktan alınan numuneler üzerinde öncelikle karakterizasyon çalışmalarına yönelik olarak kimyasal analizleri, elementel analizleri yapılmış, öğütülebilirlikleri incelenmiş ve petrografik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde temiz kömür elde etmek amacı ile Yüzdürme-Batırma Testleri yapılmış, alınan temiz ürünlerin elementel analizleri, öğütülebilirlikleri, petrografik analizleri yapılarak, mikrodalga uygulaması ile kükürt giderimi incelenmiştir.

#### 4.1 MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalarda; ülkemizde halen üretim yapılan ve Şekil 4.1'de ülkemiz haritası üzerinde yerleri belirtilen

- Saray,
- Orhaneli,
- Dursunbey,
- Milas-Ekizköy,
- Yatağan,
- Çayırhan,
- Ilgın,
- Ermenek,

- Sorgun ve
- Gürmin-Merzifon

kömür işletmeleri olmak üzere 10 ayrı ocaktan alınan numuneler üzerinde çalışılmıştır.



**Şekil 4.1** Çalışmada kullanılan numunelerin bölgelerini gösterir harita.

#### 4.1.1 Malzeme

Numuneler konileme-dörtleme yöntemi ile azaltılmıştır. Numunelerin yarısı stok olarak ayrılmış, diğer yarısına boyut küçültme uygulanmıştır. Boyut küçültme için çeneli kırıcı ve konili kırıcı kullanılmıştır.

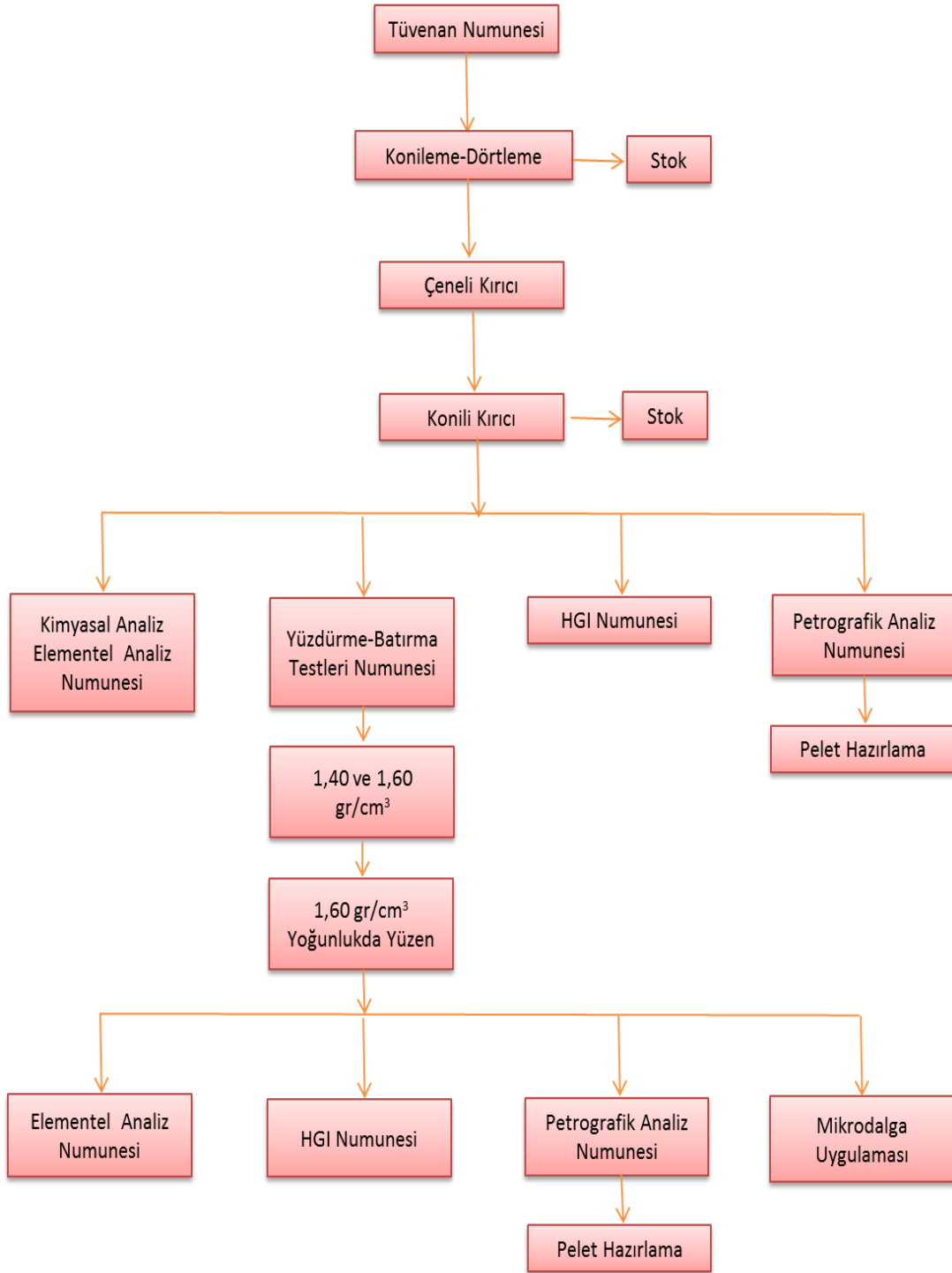
Kimyasal analiz ve elementel analizler için; Numunelerin konili kırıcı çıkışından numune alınmış ve bilezikli değirmende öğütülerek bu analizler için hazırlanmıştır. .

Yüzdürme-Batırma Testleri için; Numunelerin konili kırıcı ürünleri 0,5 mm'lik elekten elenerek +0,5 mm boyut grubu Yüzdürme-Batırma Test numuneleri olarak hazırlanmıştır.

HGI deneyleri için; konili kırıcı çıkışından alınan numuneler -1,18+0,60 boyut grubunda boyutlandırılarak HGI numuneleri hazırlanmıştır.

Petrografik çalışmalar için; konili kırıcı çıkışından alınan numuneler kademeli bir şekilde-el merdanesi ile kırılarak 1 mm'lik elekten elenerek elek üstünde kalan malzemeye bu işlem tekrarlanarak tamamının 1mm altına geçmesi sağlanmıştır.

Deneyisel çalışmalar için uygulanan akım şeması Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2 Deneyisel çalışmalarda uygulanan akım şeması.

#### 4.1.1.1 Kimyasal Analizler

Kömür numunelerine yapılan kimyasal analizler ve standartları;

- ❖ nem tayini (ASTM D3173)
- ❖ kül tayini (ASTM D3175)
- ❖ uçucu madde tayini ( ASTM D3173)
- ❖ sabit karbon miktarının tayini
- ❖ toplam kükürt analizi (ASTM D3177)
- ❖ piritik kükürt analizi (ASTM D2492)
- ❖ organik kükürt analizi (ASTM D2492)
- ❖ sülfatik kükürt analizi (ASTM D2492)
- ❖ kalori/ısıl değer analizi (ASTM D5865)'dir.

Numunelerin kimyasal analiz sonuçları çizelgeler halinde aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 4.1** Saray numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Saray	Toplam Nem (%)	43,52	-
	Kül (%)	8,21	14,53
	Uçucu Madde (%)	27,09	47,96
	Sabit Karbon (%)	21,19	37,51
	Toplam Kükürt (%)	2,26	4,01
	Piritik Kükürt (%)	0,88	1,56
	Organik Kükürt (%)	1,30	2,30
	Sülfat Kükürdü (%)	0,08	0,15
	Külde Kükürt (%)	4,04	4,40
	Yanabilir Kükürt (%)	1,90	3,37
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	2936	5198
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	2801	4960

Çizelge 4.1'e göre Saray numunesinin toplam nemi %43,52, kuru kömürde kül içeriği %14,53'dur. Numunenin uçucu madde içeriği %47,96, toplam kükürt %4,01, piritik kükürt %1,56'dır. Numunenin üst ısıl değeri 5198 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.2** Orhaneli numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Orhaneli	Toplam Nem (%)	6,30	-
	Kül (%)	8,62	9,20
	Uçucu Madde (%)	47,32	50,50
	Sabit Karbon (%)	37,76	40,30
	Toplam Kükürt (%)	2,21	2,36
	Piritik Kükürt (%)	0,52	0,55
	Organik Kükürt (%)	1,54	1,64
	Sülfat Kükürdü (%)	0,16	0,17
	Külde Kükürt (%)	9,48	10,37
	Yanabilir Kükürt (%)	1,32	1,41
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	5373	5734
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	5094	5437

Çizelge 4.2'e göre Orhaneli numunesinin toplam nemi %6,30, kuru kömürde kül içeriği %9,20'dir. Numunenin toplam kükürtü %2,36, piritik kükürt %0,55'dur. Numunenin üst ısıl değeri 5734 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.3** Dursunbey numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Dursunbey	Toplam Nem (%)	8,76	-
	Kül (%)	22,68	24,86
	Uçucu Madde (%)	33,02	36,19
	Sabit Karbon (%)	35,54	38,95
	Toplam Kükürt (%)	5,47	6,00
	Piritik Kükürt (%)	2,38	2,61
	Organik Kükürt (%)	1,95	2,65
	Sülfat Kükürdü (%)	0,09	0,12
	Külde Kükürt (%)	0,90	1,17
	Yanabilir Kükürt (%)	4,67	5,12
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	4731	5185
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	4551	4988

Çizelge 5.3'e göre Dursunbey numunesinin toplam nemi %8,76, kuru kömürde kül içeriği %24,86'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %36,19, toplam kükürt %6,0, piritik kükürt %2,61'dir. Numunenin üst ısıl değeri 5185 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.4** Milas-Ekizköy numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Milas-Ekizköy	Toplam Nem (%)	30,92	-
	Kül (%)	9,03	13,07
	Uçucu Madde (%)	34,89	50,51
	Sabit Karbon (%)	25,16	36,42
	Toplam Kükürt (%)	3,18	4,60
	Piritik Kükürt (%)	0,95	1,38
	Organik Kükürt (%)	2,13	3,08
	Sülfat Kükürdü (%)	0,10	0,14
	Külde Kükürt (%)	5,03	5,53
	Yanabilir Kükürt (%)	2,52	3,88
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	3614	5231
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3438	4978

Çizelge 4.4'e göre Milas-Ekizköy numunesinin toplam nemi %30,92, kuru kömürde kül içeriği %13,07'dir. Toplam kükürt %4,60, piritik kükürt %1,38'dur. Numunenin üst ısıl değeri 5231 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.5** Yatağan numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Yatağan	Toplam Nem (%)	26,32	-
	Kül (%)	11,77	15,97
	Uçucu Madde (%)	38,78	52,63
	Sabit Karbon (%)	23,14	31,40
	Toplam Kükürt (%)	2,58	3,50
	Piritik Kükürt (%)	0,54	0,73
	Organik Kükürt (%)	1,95	2,65
	Sülfat Kükürdü (%)	0,09	0,12
	Külde Kükürt (%)	3,13	3,55
	Yanabilir Kükürt (%)	2,16	2,93
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	3657	4963
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3466	4705

Çizelge 4.5'e göre Yatağan numunesinin toplam nemi %26,32, kuru kömürde kül içeriği %15,97'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %52,63, toplam kükürt %3,50, piritik kükürt %0,73'dur. Numunenin üst ısıl değeri 4963 kcal/kg'dır.



**Çizelge 4.6** Çayırhan numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Çayırhan	Toplam Nem (%)	26,74	-
	Kül (%)	19,52	26,64
	Uçucu Madde (%)	28,29	38,62
	Sabit Karbon (%)	28,38	38,74
	Toplam Kükürt (%)	3,41	4,66
	Piritik Kükürt (%)	1,34	1,83
	Organik Kükürt (%)	1,98	2,70
	Sülfat Kükürdü (%)	0,10	0,13
	Külde Kükürt (%)	3,44	4,27
	Yanabilir Kükürt (%)	2,58	3,52
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	3601	4915
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3449	4708

Çizelge 4.6'ya göre Çayırhan numunesinin toplam nemi %26,74, kuru kömürde kül içeriği %26,64'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %38,62, toplam kükürt %4,66, piritik kükürt %1,83'dur.

**Çizelge 4.7** Ilgın numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Ilgın	Toplam Nem (%)	38,32	-
	Kül (%)	23,91	38,77
	Uçucu Madde (%)	30,06	48,73
	Sabit Karbon (%)	7,71	12,50
	Toplam Kükürt (%)	3,48	5,65
	Piritik Kükürt (%)	1,57	2,54
	Organik Kükürt (%)	1,80	2,92
	Sülfat Kükürdü (%)	0,12	0,19
	Külde Kükürt (%)	5,93	7,80
	Yanabilir Kükürt (%)	1,62	2,63
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	2024	3282
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	1894	3071

Çizelge 4.7'e göre Ilgın numunesinin toplam nemi %38,32, kuru kömürde kül içeriği %38,77'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %48,73, toplam kükürt %5,65, piritik kükürt %2,54'dur. Numunenin üst ısıl değeri 3282 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.8** Ermenek numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Ermenek	Toplam Nem (%)	16,32	-
	Kül (%)	22,07	26,37
	Uçucu Madde (%)	33,04	39,48
	Sabit Karbon (%)	28,58	34,15
	Toplam Kükürt (%)	3,86	4,61
	Piritik Kükürt (%)	1,92	2,30
	Organik Kükürt (%)	1,80	2,15
	Sülfat Kükürdü (%)	0,13	0,16
	Külde Kükürt (%)	3,79	4,86
	Yanabilir Kükürt (%)	2,79	3,33
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	3867	4621
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3703	3703

Çizelge 4.8'e göre Ermenek numunesinin toplam nemi %16,32, kuru kömürde kül içeriği %26,37'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %39,48, toplam kükürt %4,61, piritik kükürt %2,30'dur. Numunenin üst ısıl değeri 4621 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.9** Sorgun numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Sorgun	Toplam Nem (%)	8,70	-
	Kül (%)	5,19	5,68
	Uçucu Madde (%)	36,79	40,30
	Sabit Karbon (%)	49,32	54,02
	Toplam Kükürt (%)	1,69	1,85
	Piritik Kükürt (%)	1,21	1,32
	Organik Kükürt (%)	0,40	0,44
	Sülfat Kükürdü (%)	0,08	0,09
	Kül Kükürt (%)	0,56	0,59
	Yanabilir Kükürt (%)	1,66	1,82
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	6037	6612
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	5814	6368

Çizelge 4.9'a göre Sorgun numunesinin toplam nemi %8,70, kuru kömürde kül içeriği %5,68'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %40,30, toplam kükürt %1,85, piritik kükürt %1,32'dur. Numunenin üst ısıl değeri 6612 kcal/kg'dır.

**Çizelge 4.10** Gürmin-Merzifon numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Numune	Analiz	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Gürmin-Merzifon	Toplam Nem (%)	2,14	-
	Kül (%)	44,06	45,02
	Uçucu Madde (%)	28,29	28,91
	Sabit Karbon (%)	25,51	26,07
	Toplam Kükürt (%)	2,65	2,71
	Piritik Kükürt (%)	1,89	1,93
	Organik Kükürt (%)	0,67	0,68
	Sülfat Kükürdü (%)	0,10	0,10
	Kül Kükürt (%)	0,32	0,57
	Yanabilir Kükürt (%)	2,40	2,45
	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	3521	3598
	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3361	3435

Çizelge 4.10'a göre Gürmin-Merzifon numunesinin toplam nemi %2,14, kuru kömürde kül içeriği %45,02'dir. Numunenin uçucu madde içeriği ise %28,91, toplam kükürt %2,71, piritik kükürt %1,93'dur. Numunenin üst ısıl değeri 3598 kcal/kg'dır.

#### 4.1.1.2 Elementel Analizler

Elementel analiz için hazırlanan numunelerin bölümümüz laboratuvarında bulunan LECO CHN-600 cihazında elementel analizleri yapılmıştır.

10 farklı linyit tüvenan numunesinin ve bunların 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürünlerinin C, H, N içerikleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

**Çizelge 4.11** Tüvenan numunelerin ve 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin elementel analiz sonuçları.

Numune	C (Karbon)		H (Hidrojen)		N (Azot)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün	Tüvenan	Yüzen Ürün	Tüvenan	Yüzen Ürün
Saray	48,81	49,88	4,77	5,12	0,30	0,14
Orhaneli	42,83	54,93	5,95	5,31	0,35	0,53
Dursunbey	45,04	53,13	3,95	4,67	0,42	2,27
Milas-Ekizköy	49,18	68,93	5,06	5,35	0,69	1,3
Yatağan	49,37	50,11	5,17	4,66	1,28	0,71
Çayırhan	43,09	46,53	4,14	4,96	1,65	0,81
Ilgın	35,17	52,58	4,23	4,76	0,07	0,52
Ermenek	43,11	46,26	3,92	4,51	0,58	0,48
Sorgun	67,64	66,5	4,89	4,63	1,31	0,65
Gürmin-Merzifon	33,95	45,81	3,26	4,65	1,21	1,71

Çizelge 4.11'in incelenmesi ile görüleceği üzere; deneysel çalışmalara konu olan numunelerin karbon içerikleri tüvenan numuneler için %33,95–%67,64 arasında değişirken, 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin karbon içerikleri %45,81–%68,93 arasında değişmektedir.

Sorgun numunesi C içeriği; tüvenan numune için %67,64, H içeriği %3,26, N içeriği %1,31'dir. Sorgun numunesi 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün C içeriği %66,50, H içeriği 4,63'dir.

Gürmin-Merzifon numunesi C içeriği; tüvenan numune için %33,95, H içeriği %4,89, N içeriği %1,21'dir. Bu numunenin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün C içeriği %45,81, H içeriği %4,65, N içeriği %1,71'dir.

Milas-Ekizköy numunesi C içeriği; tüvenan numune için %49,18, H içeriği %5,06, N içeriği %0,69'dir. Bu numunenin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün C içeriği %68,93, H içeriği %5,35, N içeriği %1,30'dur.

Orhaneli numunesi C içeriği; tüvenan numune için %42,83, H içeriği %5,06, N içeriği %0,35'dir. Milas-Ekizköy numunesinin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün C içeriği %54,93, H içeriği %5,31, N içeriği %0,53'dur.

Yatağan numunesi C içeriği tüvenan numune için %49,37, H içeriği %5,17, N içeriği %1,28'dir. Bu numunenin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün C içeriği %50,11, H içeriği %4,66, N içeriği %0,71'dir.

#### **4.1.2 Yöntem**

##### **4.1.2.1 Yüzdürme-Batırma Testleri**

Kömürlerin yıkanabilme özelliklerinin belirlenmesi, Yüzdürme-Batırma Testleri yapılarak testlerden alınan sonuçların değerlendirilmesi yoluyla yapılır. Yüzdürme-batırma testleri kömürün çeşitli yoğunlukta ki ağır sıvılarda yüzme veya batma durumu incelenir. Bir kömür numunesi herhangi bir ağır sıvı içine bırakıldığında bu numuneyi oluşturan tanelerden, yoğunluğu sıvınıninkinden daha küçük olanlar yüzer, daha yüksek olanlar ise batar.

Çalışılan kömür numunelerine 1.40 gr/cm<sup>3</sup> ve 1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ağır ortamlarda yüzdürme batırma testleri uygulanmıştır. Ağır ortam ZnCl<sub>2</sub> ile hazırlanmıştır.

Çalışılan numunelerin Yüzdürme-Batırma Testlerinin sonuçları sırası ile izelge 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20'de verilmektedir.

Çizelge sonuçlarından çizilen Yüzdürme-Batırma grafikleri ilgili çizelgenin altında yer almaktadır.

**Çizelge 4.12** Saray numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	g/cm <sup>3</sup>	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik
-1,40	100,00	11,18	1118,00	100,00	1118,00	11,18	100,00	1118,00	11,18
+1,40 - 1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	1118,00	11,18	0,00	0,00	0,00
+1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	1118,00	11,18	0,00	0,00	0,00
Toplam	100,00	<b>11,18</b>	<b>1118,00</b>						

Tekirdağ Saray numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; %11,18 kül içerikli numunenin % 100,00' ü 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 100,00' ü 1.40 gr/cm<sup>3</sup> 'den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 11,18' dir.

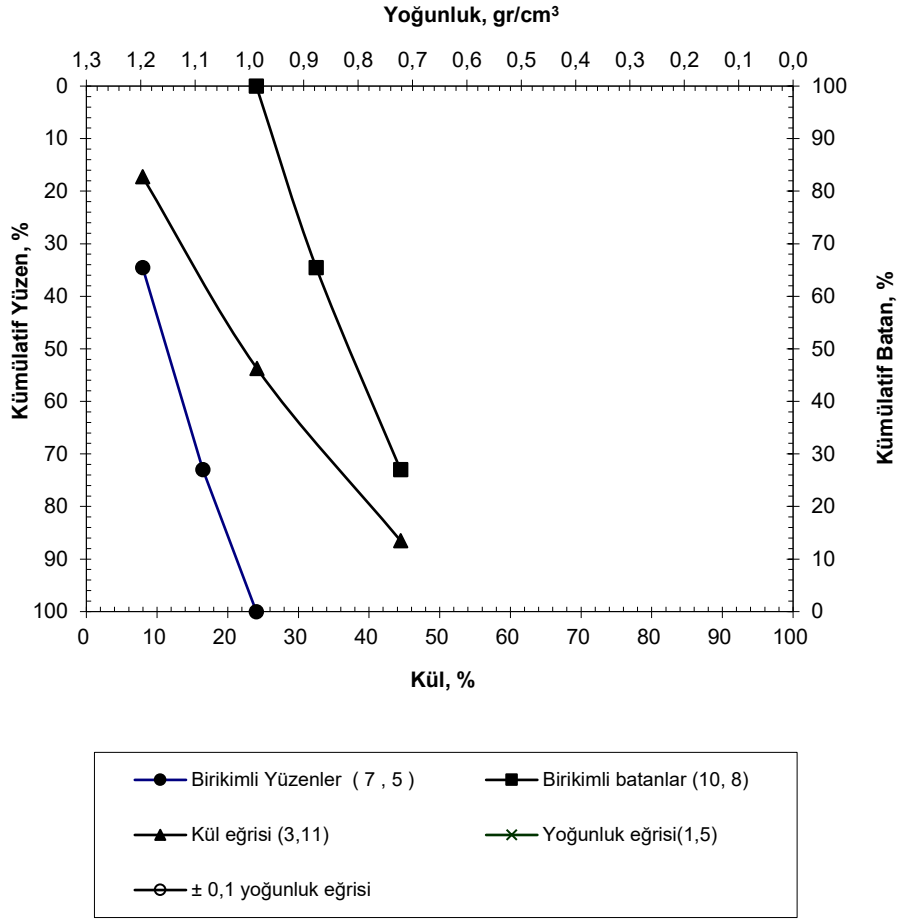
**Çizelge 4.13** Orhaneli numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	g/cm <sup>3</sup>	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik
-1,40	93,66	10,15	950,65	93,66	950,65	10,15	100,00	1044,10	10,44
+1,40-1,60	6,34	14,74	93,45	100,00	1044,10	10,44	6,34	93,45	14,74
+1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	1044,10	10,44	0,00	0,00	0,00
Toplam	100,00	<b>10,44</b>	<b>1044,10</b>						

Orhaneli numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; %10,44 kül içerikli numunenin % 93,66'sı 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Numunede % 6,34 oranında -1.40+1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %14,74'dur.

**Çizelge 4.14** Dursunbey numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	gr/cm <sup>3</sup>	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik
-1,40	34,51	7,96	274,70	34,51	274,70	7,96	100,00	2404,61	24,05
+1,40 - 1,60	38,46	24,14	928,42	72,97	1203,12	16,49	65,49	2129,91	32,52
+1,60	27,03	44,45	1201,48	100,00	2404,61	24,05	27,03	1201,48	44,45
Toplam	100,00	24,05	2404,61						



Şekil 4.3 Dursunbey numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.

Dursunbey numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; % 24,04 kül içerikli numunenin %34,51'i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin %34,51' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği %7,96 dır. Numunede %38,46 oranında +1.40-1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %24,14 dür. Bu kömür numunesinden 1.60gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta % 72,97 oranında %16,49 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir.

**Çizelge 4.15** Milas-Ekizköy numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	g/cm <sup>3</sup>	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik
-1,40	93,66	10,15	950,65	93,66	950,65	10,15	100,00	1044,10	10,44
+1,40-1,60	6,34	14,74	93,45	100,00	1044,10	10,44	6,34	93,45	14,74
+1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	1044,10	10,44	0,00	0,00	0,00
Toplam	100,00	<b>10,44</b>	<b>1044,10</b>						

Milas-Ekizköy numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; %10,44 kül içerikli numunenin % 93,66'ı 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 93,66' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 10,15 dir. Numunede % 6,34 oranında -1.40+1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %14,74dir. Bu kömür numunesi 1.60gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yıkansa, tamamından % 10,44 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir.

**Çizelge 4.16** Yatağan numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

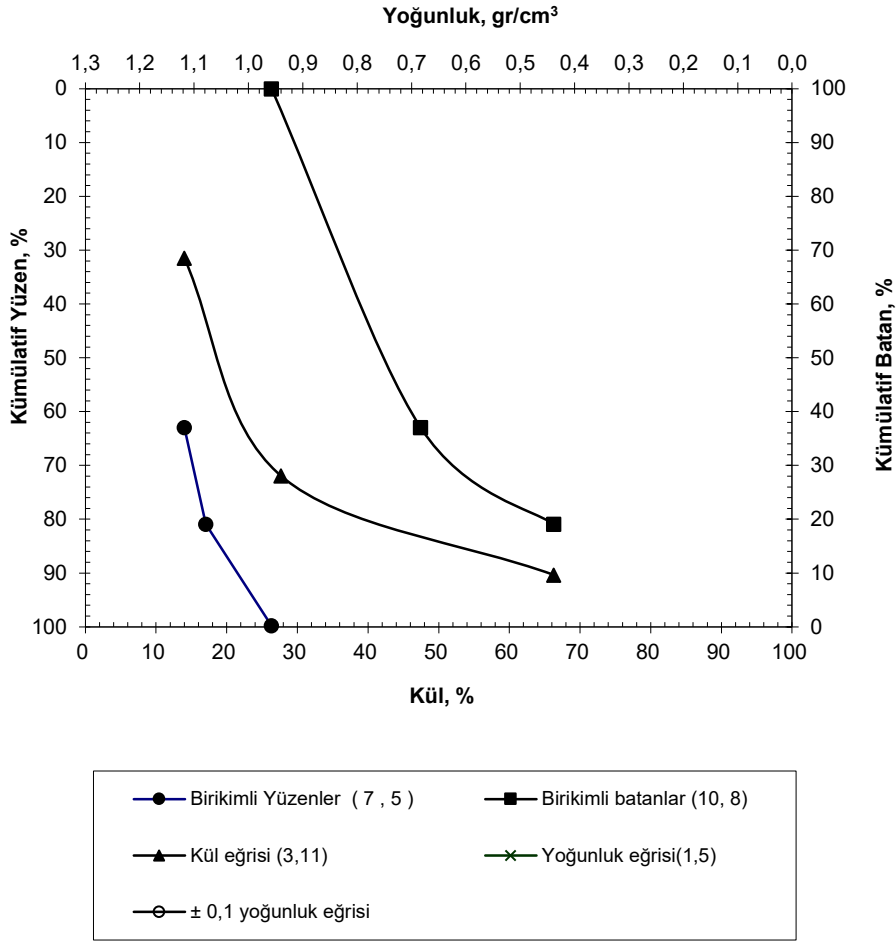
Yoğunluk	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	g/cm <sup>3</sup>	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik
-1,40	94,22	10,84	1021,34	94,22	1021,34	10,84	100,00	1311,79	13,12
+1,40-1,60	5,78	50,25	290,45	100,00	1311,79	13,12	5,78	290,45	50,25
+1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	1311,79	13,12	0,00	0,00	0,00
Toplam	100,00	<b>13,12</b>	<b>1311,79</b>						

Yatağan numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; %13,12 kül içerikli numunenin % 94,22'si 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 94,22'si 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 10,84 dir. Numunede % 5,78 oranında -1.40+1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %50,25' dir. Bu kömür numunesi 1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yıkansa, % 100,00 oranında % 13,12 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir



**Çizelge 4.17** Çayırhan numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik	% Kül
-1,40	62,98	14,02	882,98	62,98	882,98	14,02	99,77	2628,69	26,35
+1,40 - 1,60	17,97	27,71	497,95	80,95	1380,93	17,06	36,79	1745,71	47,45
+1,60	18,82	66,30	1247,77	99,77	2628,69	26,35	18,82	1247,77	66,30
Toplam	100,00	<b>26,29</b>	<b>2628,69</b>						

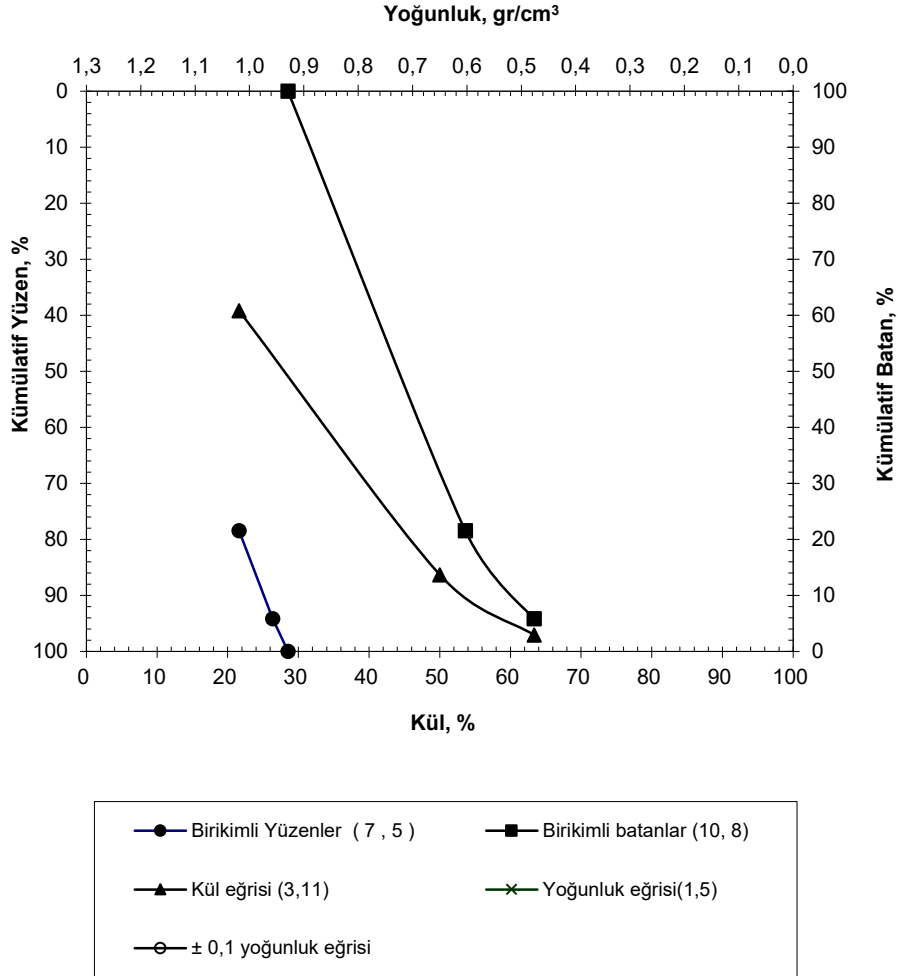


**Şekil 4.4** Çayırhan numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.

Çayırhan numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; %26,29 kül içerikli numunenin % 62,98' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 62,98' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 14,02 dir. Numunede %17,97 oranında +1.40-1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %27,71 dir. Bu kömür numunesi 1.60gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yıkansa, % 80,95 oranında % 17,06 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir.

**Çizelge 4.18** İlgın numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik	% Kül
-1,40	78,45	21,63	1696,87	78,45	1696,87	21,63	100,00	2852,29	28,52
+1,40 -1,60	15,75	50,02	787,82	94,20	2484,69	26,38	21,55	1155,42	53,62
+1,60	5,80	63,38	367,60	100,00	2852,29	28,52	5,80	367,60	63,38
Toplam	100,00	<b>28,52</b>	<b>2852,29</b>						

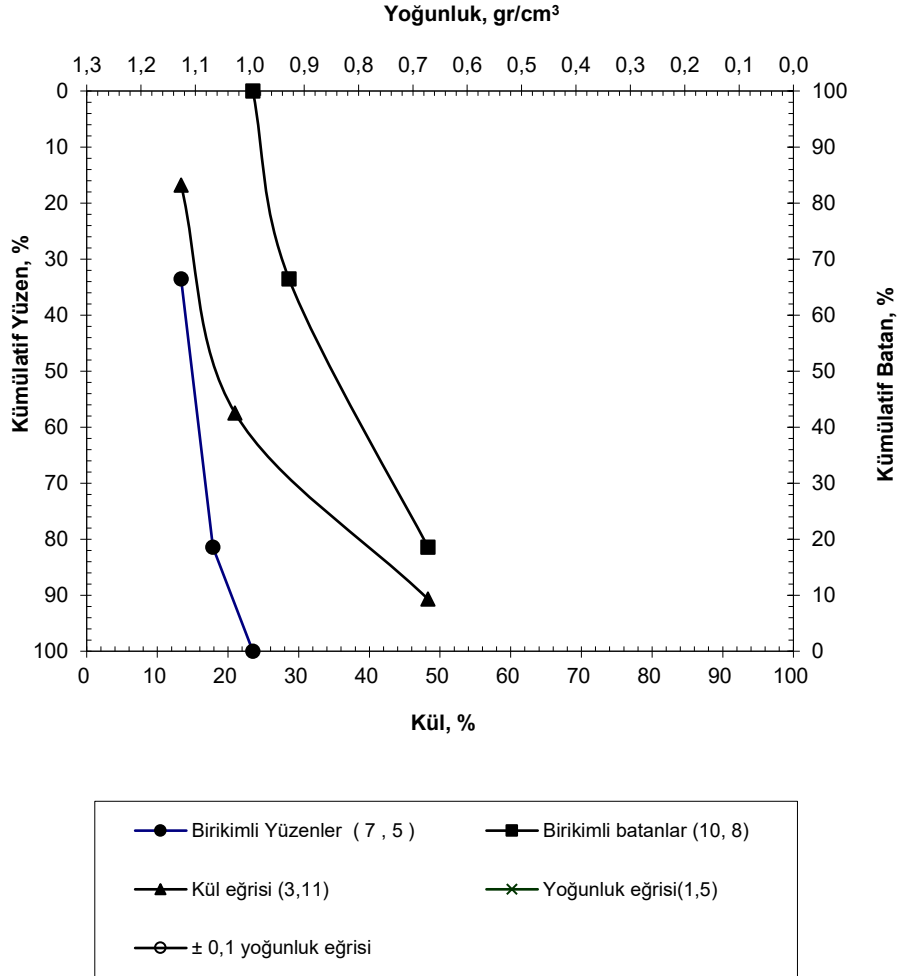


**Şekil 4.5** İlgın numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.

İlgın numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; % 28,52 kül içerikli numunenin %78,45'i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin %78,45' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği %21,63'dır. Numunede %15,75 oranında +1.40-1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %50,02'dir. Bu kömür numunesi 1.60gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yıkansa, % 94,20 oranında %26,38 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir.

**Çizelge 4.19** Ermenek numunesi Yüzdürme-Batırma test sonuçları.

Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik	%Kül
-1,40	33,59	13,36	448,76	33,59	448,76	13,36	100,00	2350,52	23,51
+1,40-1,60	47,84	21,00	1004,64	81,43	1453,40	17,85	66,41	1901,76	28,64
+1,60	18,57	48,31	897,12	100,00	2350,52	23,51	18,57	897,12	48,31
Toplam	100,00	23,50	2350,52						



**Şekil 4.6** Ermenek numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.

Ermenek numunesinin Yüzdürme-Batırma testleri sonucuna göre; %23,50 kül içerikli numunenin % 33,59'u 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 33,59' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 13,36 dir. Numunede %47,84 oranında +1.40-1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %21,00dir.

Bu kömür numunesi 1.60gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yıkansa, % 81,43 oranında % 17,85 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir.

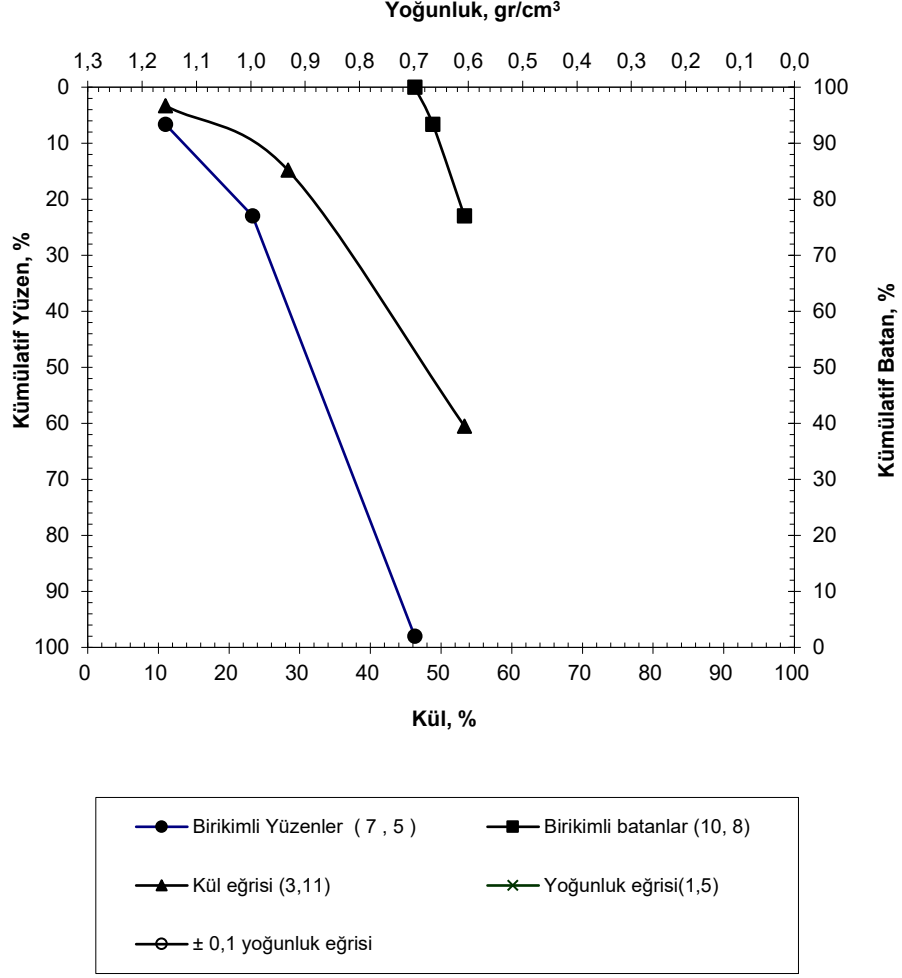
**Çizelge 4.20** Sorgun numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik	% Kül
-1,40	100,00	4,19	419,00	100,00	419,00	4,19	100,00	419,00	4,19
+1,40-1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	419,00	4,19	0,00	0,00	0,00
+1,60	0,00	0,00	0,00	100,00	419,00	4,19	0,00	0,00	0,00
Toplam	100,00	<b>4,19</b>	<b>419,00</b>						

Sorgun numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; % 4,19 kül içerikli numunenin % 100,00' ü 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 100,00' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 4,19 dur. Numunede +1.40-1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmamaktadır.

**Çizelge 4.21** Gürmin-Merzifon numunesi Yüzdürme-Batırma Test sonuçları.

Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Yüzen			Kümülatif Yüzen			Kümülatif Batan		
	%Ağ.	%Kül	İçerik	%Ağ.	İçerik	%Kül	%Ağ.	İçerik	% Kül
-1,40	6,63	11,00	72,93	6,63	72,93	11,00	98,00	4534,19	46,27
+1,40-1,60	16,37	28,33	463,76	23,00	536,69	23,33	91,37	4461,26	48,83
+1,60	75,00	53,30	3997,50	98,00	4534,19	46,27	75,00	3997,50	53,30
Toplam	100,00	<b>45,34</b>	<b>4534,19</b>						



Şekil 4.7 Gürmin-Merzifon numunesi Yüzdürme-Batırma grafiği.

Gürmin-Merzifon numunesinin Yüzdürme-Batırma Testleri sonucuna göre; %45,34 kül içerikli numunenin % 6,63' i 1.40 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yüzmüştür. Yani bu numunenin % 6,63' ü 1.40 gr/cm<sup>3</sup> den daha düşük yoğunluklu olup, kül içeriği % 11,00 dir. Numunede %16,37 oranında +1.40-1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ürün bulunmakta olup, kül içeriği %28,33dir. Bu kömür numunesi 1.60gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yıkansa, % 23,00 oranında % 23,33 kül içerikli temiz kömür elde edilecektir.

#### 4.1.2.2 Numunelerin Öğütülebilirliği

Numunelerin öğütülebilirliği Hardgrove indeksleri (HGI) ile belirlenmiştir. Bölümümüz laboratuvarlarında bulunan Hardgrove cihazı ile ASTM D 409 standardında belirtilen şekilde deneyler yapılmıştır. Buna göre 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm ve 0,60 mm'lik elekler kullanılarak 1 kg numune kademe kademe -1,18 +0,60 mm boyut grubunda hazırlanmıştır. 50 gr numune 20 devir/dk'lık hızla değirmende öğütülmüştür. Öğütülen numune 0,075 mm'lik elekten 20 dk elenmiştir. Bu işlem sonunda 0,075 mm'lik elek altına geçen ürün tartılmış ve Eşitlik 4.1 'de yerine konularak HGI değeri hesaplanmıştır.

$$HGI=13,74+(6,93xW) \quad (4.1)$$

$$W = 0,075 \text{ mm'lik elek} \text{in altına geçen malzeme miktarı (g)}.$$

Kömürler öğütülebilirlikleri bakımından HGI değerlerine göre;

HGI	Öğütülebilirlik Özelliği
<50	Zor öğünen kömür
50<HGI<70	Orta öğünen kömür
>70	Kolay öğünen kömür

olarak sınıflandırılmaktadır.

Çalışılan numunelerin HGI değerleri ve bu değerlere göre öğütülebilirlik özellikleri Çizelge 4.22'de sunulmaktadır.

**Çizelge 4.22** Tüvenan numunelerin ve 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin HGI değerleri.

Numuneler	Tüvenan		1,60 gr/cm <sup>3</sup> Yoğunlukta Yüzen Ürünler	
	HGI	Öğütülebilirlik	HGI	Öğütülebilirlik
Saray	43,54	Zor öğünen	58,79	Orta öğünen
Orhaneli	47,00	Zor öğünen	40,77	Zor öğünen
Dursunbey	45,80	Zor öğünen	44,93	Zor öğünen
Milas-Ekizköy	47,00	Zor öğünen	44,23	Zor öğünen
Yatağan	59,48	Orta öğünen	61,56	Orta öğünen
Çayırhan	49,78	Zor öğünen	58,2	Orta öğünen
İlgın	67,79	Orta öğünen	84,43	Kolay öğünen
Ermenek	47,00	Zor öğünen	44,93	Zor öğünen
Sorgun	50,47	Orta öğünen	56,01	Orta öğünen
Gürmin-Merzifon	68,49	Orta öğünen	55,32	Orta öğünen

Çizelge 4.22'in incelenmesi ile görüleceği üzere; deneysel çalışmalara konu olan numunelerin HGI değerleri tüvenan numuneler için 43,54 – 68,49 arasında değişmektedir.

Saray numunesi HGI değeri tüvenan numune için 43,54 olup, zor öğünen kömür grubundadır. Saray numunesinin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta Yüzdürme-Batırma testleri sonucunda alınan yüzen ürünün HGI değeri 58,79 olup, orta öğünen öğütülebilirlik özelliğine sahiptir.

Gürmin Merzifon numunesi HGI değeri tüvenan numune için 68,79 olup, orta öğünen kömür grubundadır. Bu numunenin yüzen ürünün HGI değeri 55,32 değerine inmiştir. HGI değerindeki azalma, temiz kömürün öğütülebilirliğinin biraz azaldığını ifade etmektedir.

Ilgın numunesi HGI değeri tüvenan numune için 67,79 olup, orta öğünen kömür grubundadır. Bu numunenin yüzen ürünün HGI değeri 84,43 değerine yükselmiş ve kolay öğünen kömür özelliğine sahiptir. HGI değerindeki bu artış, temiz kömürün öğütülebilirliğinin arttığını göstermektedir.

Dursunbey numunesi HGI değeri tüvenan numune için 45,80 olup, zor öğünen kömür grubundadır. Bu numunenin yüzen ürünün HGI değeri 44,93 değerindedir. Bu numune için tüvenan ve temiz kömür için öğütülebilirlik özelliği açısından fazla bir fark yoktur.

#### **4.1.2.3 Petrografik Analizler**

10 farklı linyit numunesinin ve bu numunelerin 1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluk da yüzen ürünlerinin petrografik bileşimini belirlemek için mikroskobik çalışmalar yapılmıştır. Numunelerin konili kırıcı çıkışı ürünleri el merdanesi ile kademeli şekilde kırılarak 1 mm lik elekten elenmiş, elek üstü ürüne tekrar merdane ile kırma işlemi yapılarak, bu işlem malzemenin tamamı 1 mm altına geçecek şekilde tekrarlanmıştır. Hazırlanan bu –1 mm lik ürünlerden blok döküldükten sonra parlatma işlemleri uygulanmış, parlatılmış linyit blokları üzerinde yansıyan ışık altında mikroskobik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan mikroskobik çalışmalar sonucunda 10 farklı bölgenin tüvenan numunesi ve bu kömürlerin 1.60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluk da yüzen ürünlerinin petrografik bileşimleri belirlenmiştir.

Numunelerin vitrinit, liptinit, inertinit, semifüzinit gibi maseralleri, pirit ve mineral madde içerikleri mikroskop ile sayılmış olup, sonuçlar Çizelge 4.23, Çizelge 4.31’de verilmiştir.

**Çizelge 4.23** Saray numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
Vitrinit	74,80	77,20
Liptinit	3,60	3,20
İnertinit	4,40	6,00
Semifüzinit	5,20	5,60
Pirit	3,20	2,80
Mineral madde	8,80	5,20
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	<b>82,13</b>	<b>85,07</b>

Petrografik çalışmalar sonucunda Saray tüvenan numunesinin yaklaşık olarak %82, yüzen ürünün ise yaklaşık %85 oranında reaktif bileşenlerden oluştuğu görülmektedir. Çizelge 4.23’de görülebileceği üzere petrografik analizlerde azınsanmayacak kadar pirit ve serbest mineral görülmüştür. Tüvenan numunede pirit bileşeni %3,20 iken, yüzen üründe %2,80 olarak belirlenmiştir. Yüzdürme-Batırma Testlerinin pirit giderimine önemli ölçüde etkisi olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.24** Dursunbey numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
Vitrinit	84,80	93,60
Liptinit	0,40	1,20
İnertinit	0,00	0,00
Semifüzinit	0,00	1,20
Pirit	4,80	2,80
Mineral madde	10,00	1,20
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	<b>85,07</b>	<b>95,20</b>

Petrografik çalışmalar sonucunda Dursunbey tüvenan numunesinin yaklaşık olarak % 85, yüzen ürünün ise yaklaşık % 95 oranında reaktif bileşenlerden oluştuğu görülmektedir. Tüvenan numunede pirit miktarı % 4,80 iken, yüzen üründe % 2,80 olarak tespit edilmiş olup önemli bir düşüş sağlanmıştır.



**Çizelge 4.25** Milas-Ekizköy numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
<b>Vitrinit</b>	86,40	92,40
<b>Liptinit</b>	4,80	2,00
<b>İnertinit</b>	0,80	0,80
<b>Semifüzinit</b>	0,00	1,60
<b>Pirit</b>	3,20	2,40
<b>Mineral madde</b>	4,80	0,80
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	89,87	95,07

Petrografik çalışmalar sonucunda Milas-Ekizköy tüvenan numunesinin yaklaşık olarak % 90, yüzen ürünün ise yaklaşık % 95 oranında reaktif bileşenlerden oluştuğu görülmektedir. Çizelge 5.25’de tüvenan numunede pirit miktarı % 3,20 olduğu, yüzen üründe % 2,40’a düştüğü, mineral madde miktarının tüvenan numunede %4,80 iken, yüzen üründe ise % 0,80 olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.26** Yatağan numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
<b>Vitrinit</b>	49,60	68,00
<b>Liptinit</b>	3,20	11,60
<b>İnertinit</b>	2,00	6,00
<b>Semifüzinit</b>	2,00	4,40
<b>Pirit</b>	4,40	1,20
<b>Mineral madde</b>	38,80	8,80
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	53,73	80,67

Petrografik çalışmalar sonucunda Yatağan tüvenan numunesinin yaklaşık olarak %49 olan reaktif bileşeni, yüzen üründe ise %68’dir. Mineral madde içeriği tüvenan numunede %38,80, yüzen üründe ise %8,80’dir. Çizelge 4.26’da görülebileceği üzere petrografik analizlerde önemli bir oranda pirit ve mineral madde görülmüştür. Tüvenan numunede pirit bileşeni %4,40 iken, yüzen üründe %1,20 olarak belirlenmiştir. Yüzdürme-Batırma Testlerinin pirit giderimine önemli ölçüde etkisi olduğu görülmektedir. Mineral madde içeriği tüvenan numune için %38,80, yüzen üründe ise %8,80 tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.27** Çayırhan numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
Vitrinit	79,20	88,00
Liptinit	4,40	4,00
İnertinit	1,20	0,80
Semifüzinit	2,80	0,40
Pirit	4,40	4,00
Mineral madde	8,00	2,80
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	<b>84,40</b>	<b>91,20</b>

Petrografik çalışmalar sonucunda Çayırhan tüvenan numunesinin ve yüzen ürününün vitrinit içeriği %79,20 ve %88,00' olup %84 ve %91 oranında reaktif bileşenden oluştuğu görülmektedir. Petrografik analizlerde tüvenan numunede ve yüzen üründe önemli yüzdede pirit ve serbest mineral görülmüştür. Mineral madde içeriği tüvenan numunede %8,00'dir, yüzen üründe ise %2,80'e düşmüştür, pirit %4,40, yüzen üründe %4,00'tür.

**Çizelge 4.28** Ilgın tüvenan numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
Vitrinit	32,80	87,60
Liptinit	3,20	4,40
İnertinit	1,60	0,40
Semifüzinit	0,00	1,60
Pirit	5,60	4,80
Mineral madde	56,80	1,20
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	<b>35,47</b>	<b>91,73</b>

Petrografik çalışmalar sonucunda Ilgın tüvenan numunesinin toplam reaktif bileşenleri %35,47 iken önemli bir artış ile yüzen üründe %91,73'e yükseldiği görülmektedir. Çizelge 4.28'de görülebileceği gibi petrografik analizlerde tüvenan numunede %56,80 olan mineral maddenin yüzen üründe %1,20'e düştüğü gözlemlenmiştir. Tüvenan numunenin %32,80'lik kısmını vitrinit oluştururken, yüzen üründe ise %87,60 oranında vitrinit bulunmaktadır, tüvenan numunede %5,60 olan pirit içeriği yüzen üründe %4,80 olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.29** Ermenek numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
<b>Vitrinit</b>	77,60	87,60
<b>Liptinit</b>	4,80	0,80
<b>İnertinit</b>	2,40	2,00
<b>Semifüzinit</b>	4,00	4,00
<b>Pirit</b>	6,40	1,60
<b>Mineral madde</b>	4,80	1,20
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	84,27	91,47

Petrografik çalışmalar sonucunda Ermenek tüvenan numunesinin % 84, yüzen ürünün ise yaklaşık % 91 oranında reaktif bileşenlerden oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 4.29'da görülebileceği gibi petrografik analizlerde tüvenan numunede pirit ve mineral madde içeriği sırasıyla %6,40 ve %4,80 olup, yüzen üründe pirit içeriği %1,60'a düşerek önemli pirit giderimi sağlandığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.30** Sorgun numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
<b>Vitrinit</b>	90,00	94,40
<b>Liptinit</b>	4,80	3,60
<b>İnertinit</b>	0,00	0,80
<b>Semifüzinit</b>	0,40	0,00
<b>Pirit</b>	1,60	0,40
<b>Mineral madde</b>	3,20	0,80
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	93,47	97,07

Ermenek tüvenan numunesinin organik bileşiminin yaklaşık olarak % 90, yüzen ürünün ise yaklaşık % 97 oranında reaktif bileşenlerden oluştuğu görülmektedir.

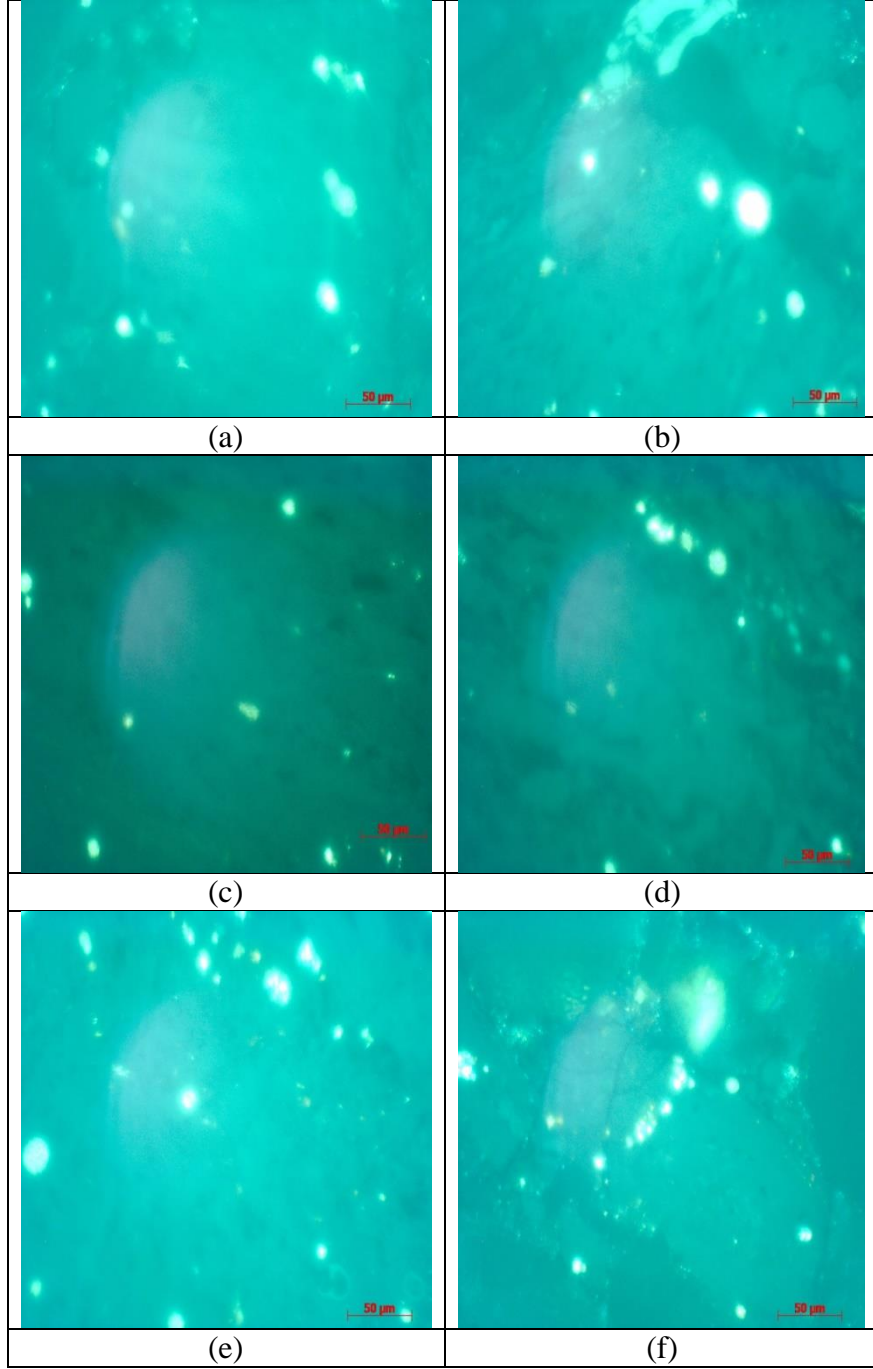
Çizelge 4.30'da görülebileceği gibi petrografik analizlerde tüvenan numunede vitrinit önemli bir miktarda bulunmaktadır. Pirit, tüvenan numunede %1,60, yüzen üründe ise %0,40 olarak görülmüştür.

**Çizelge 4.31** Gürmin-Merzifon numunesi petrografik analiz sonuçları.

Petrografik Bileşen	% Miktar (Hacimce)	
	Tüvenan	Yüzen Ürün
<b>Vitrinit</b>	67,20	94,80
<b>Liptinit</b>	5,60	2,80
<b>İnertinit</b>	1,20	0,40
<b>Semifüzinit</b>	0,40	0,00
<b>Pirit</b>	4,80	0,80
<b>Mineral madde</b>	20,80	1,20
<b>Toplam Reaktif Bileşenler</b>	71,60	96,80

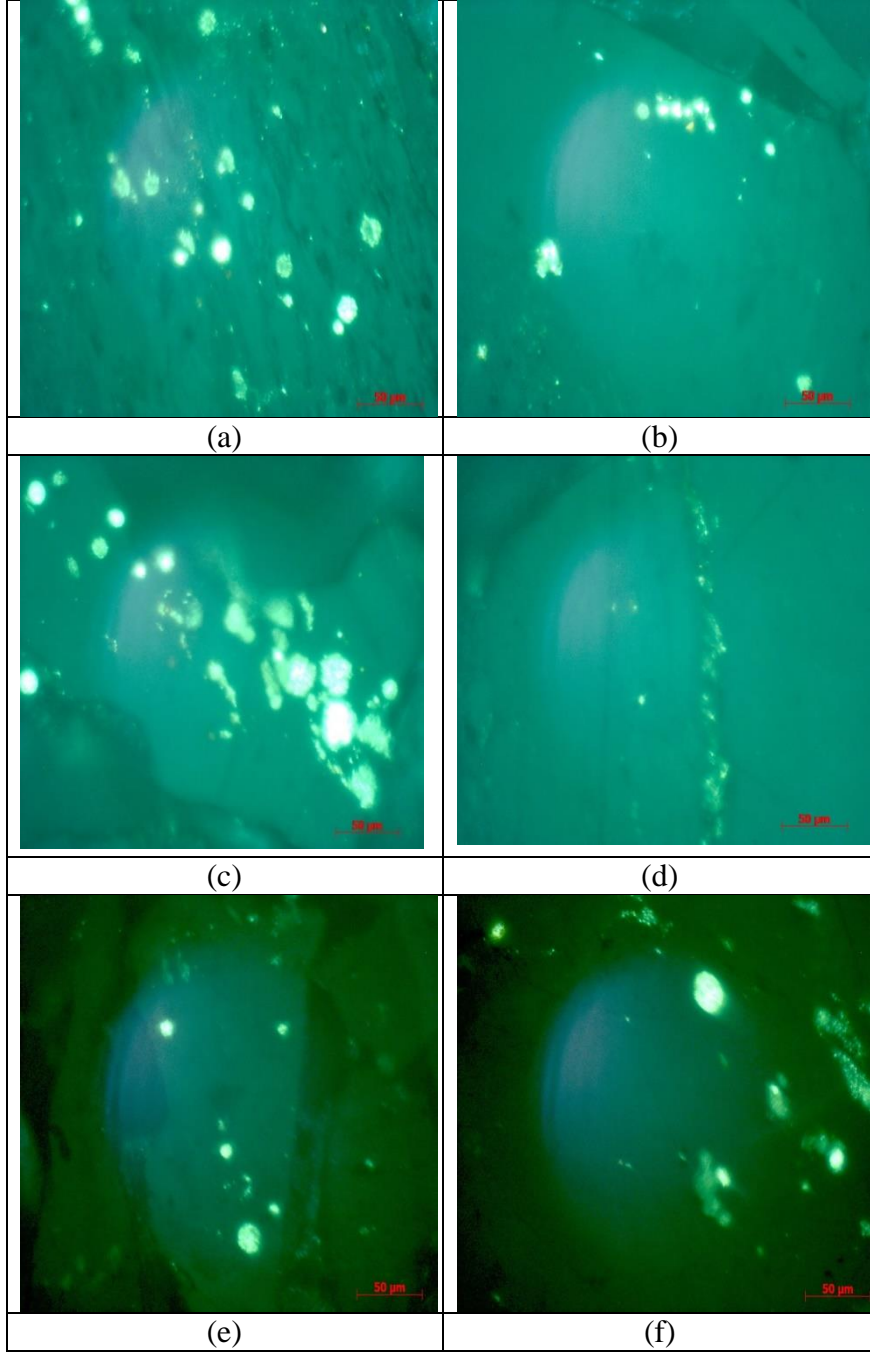
Petrografik çalışmalar sonucunda Gürmin-Merzifon tüvenan numunesinin yaklaşık olarak % 72, yüzen ürünün ise yaklaşık % 97 oranında reaktif bileşenlerden oluştuğu görülmektedir. Tüvenan numunede vitrinit %67,20; yüzen üründe %94,80 olarak önemli bir miktarda bulunmaktadır. Pirit tüvenan numunede %4,80, yüzen üründe ise %0,80'e düşmüştür. Mineral madde tüvenan numunede %20,80; yüzen üründe %1,20 olarak tespit edilmiştir.

Numunelere ait mikro petrografik fotoğraflara ait görüntüler Şekil 4.8 Şekil 4.16'da sunulmaktadır.



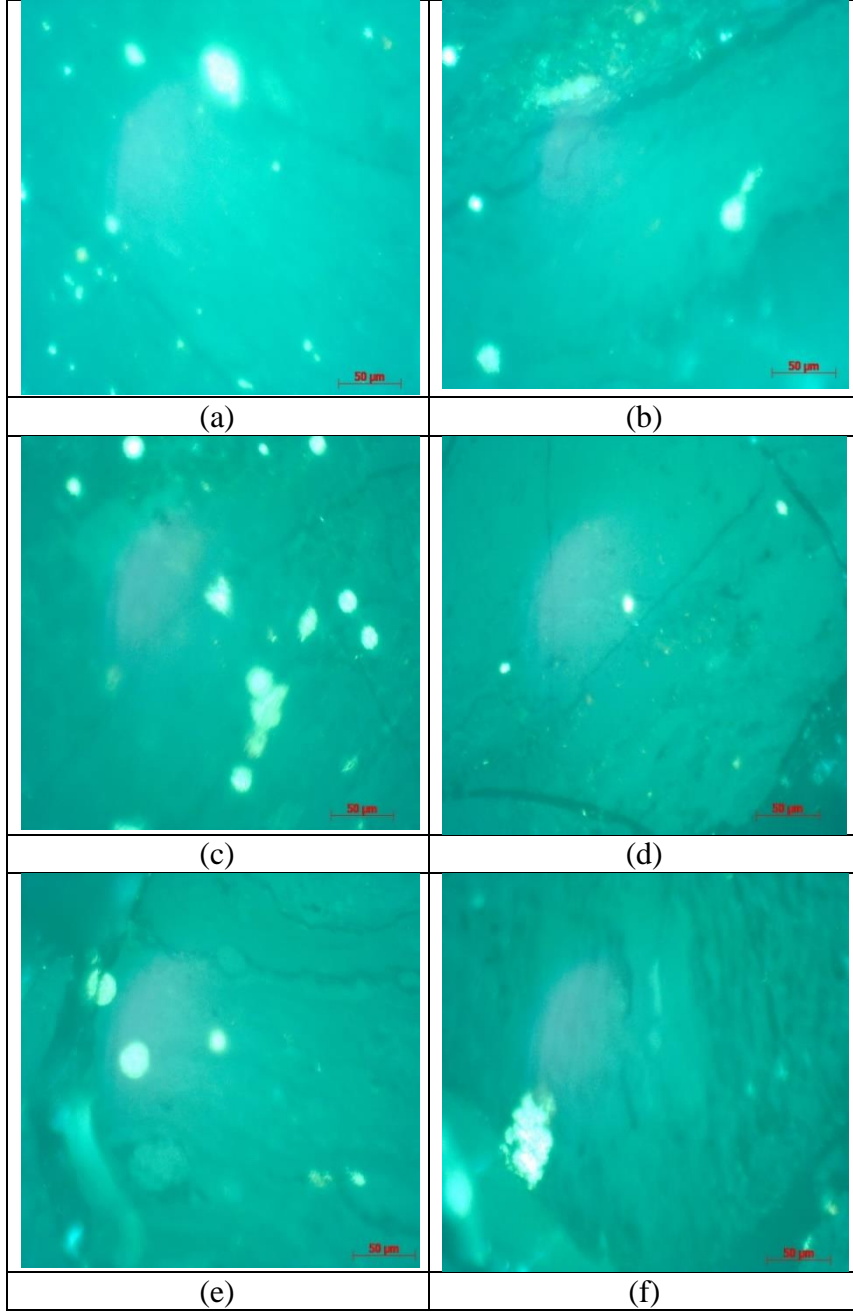
**Şekil 4.8** Saray 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

Şekil 4.8’de, Saray numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde numunenin genelinde fromboidal pirit taneleri ve ince pirit taneleri gözlenmekte olup bu piritlerin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine çatlaklara ve porlara yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal ve dissemine olarak yerleşmiş piritlere mikroskop gözlemlerinde çok nadir olarak karşılaşılmış olsa da daha çok fromboidal tipi piritler gözlemlenmektedir. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna ve vitrinit maserali porları üzerine yerleşmiş fromboidal ve ince pirit taneleriyle de karşılaşılmıştır.



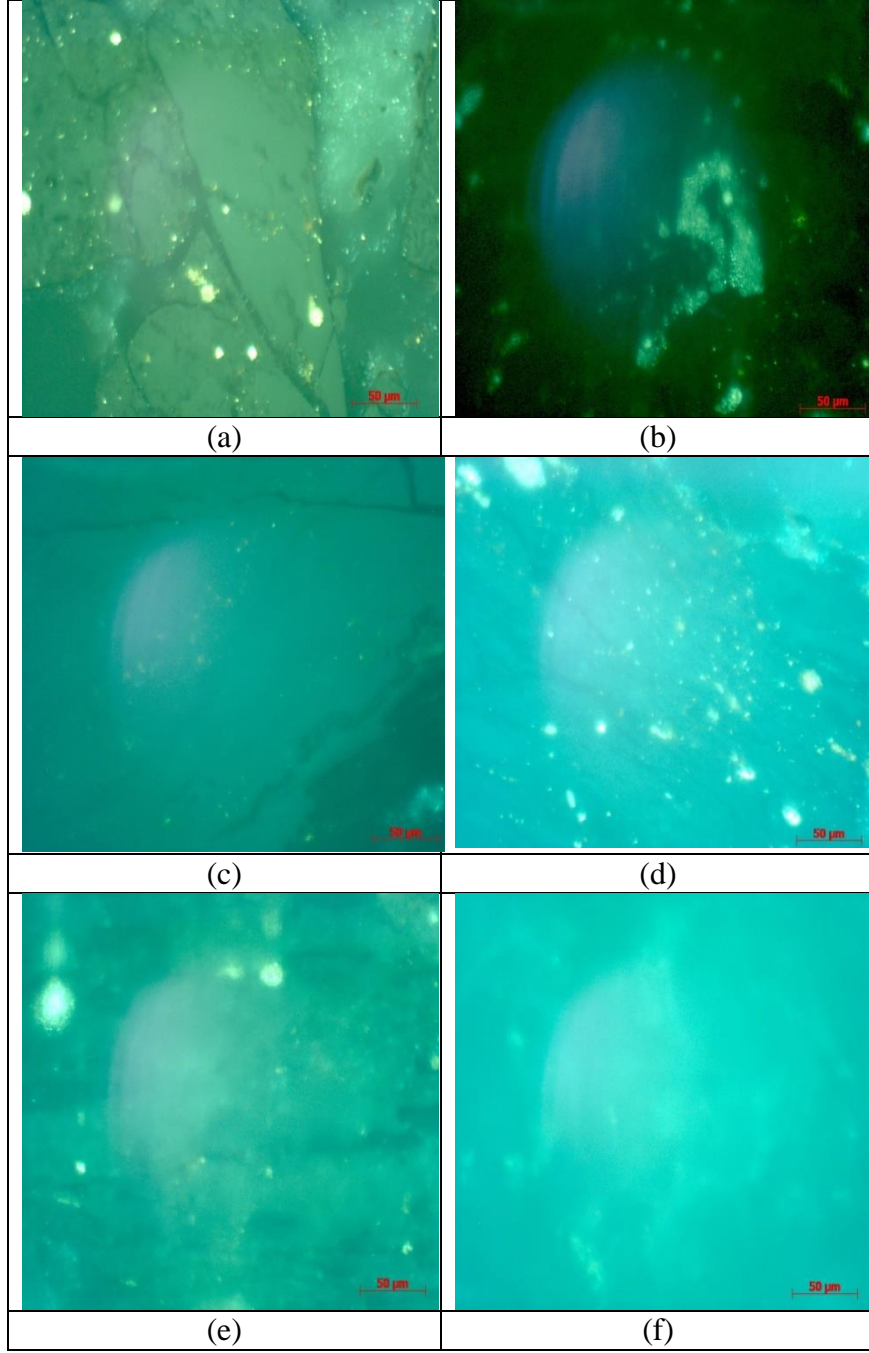
**Şekil 4.9** Dursunbey 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

Şekil 4.9'da, Dursunbey numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde fromboidal pirit taneleri gözlenmekte olup bu pirit tanelerinin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine yerleşmiş bir kısmının da çatlak dolgusuna yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal pirit tipine rastlanılmamış olsa da dissemine olarak yerleşmiş piritlere yer yer rastlanılmış bunlar da vitrinit maserali üzerinde yer almaktadır. Nadir olarak ince ve iri taneli piritler örnek üzerinde göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna ve boşluklara yerleşmiş fromboidal pirit taneleriyle de karşılaşılmıştır.



**Şekil 4.10** Milas-Ekizköy 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

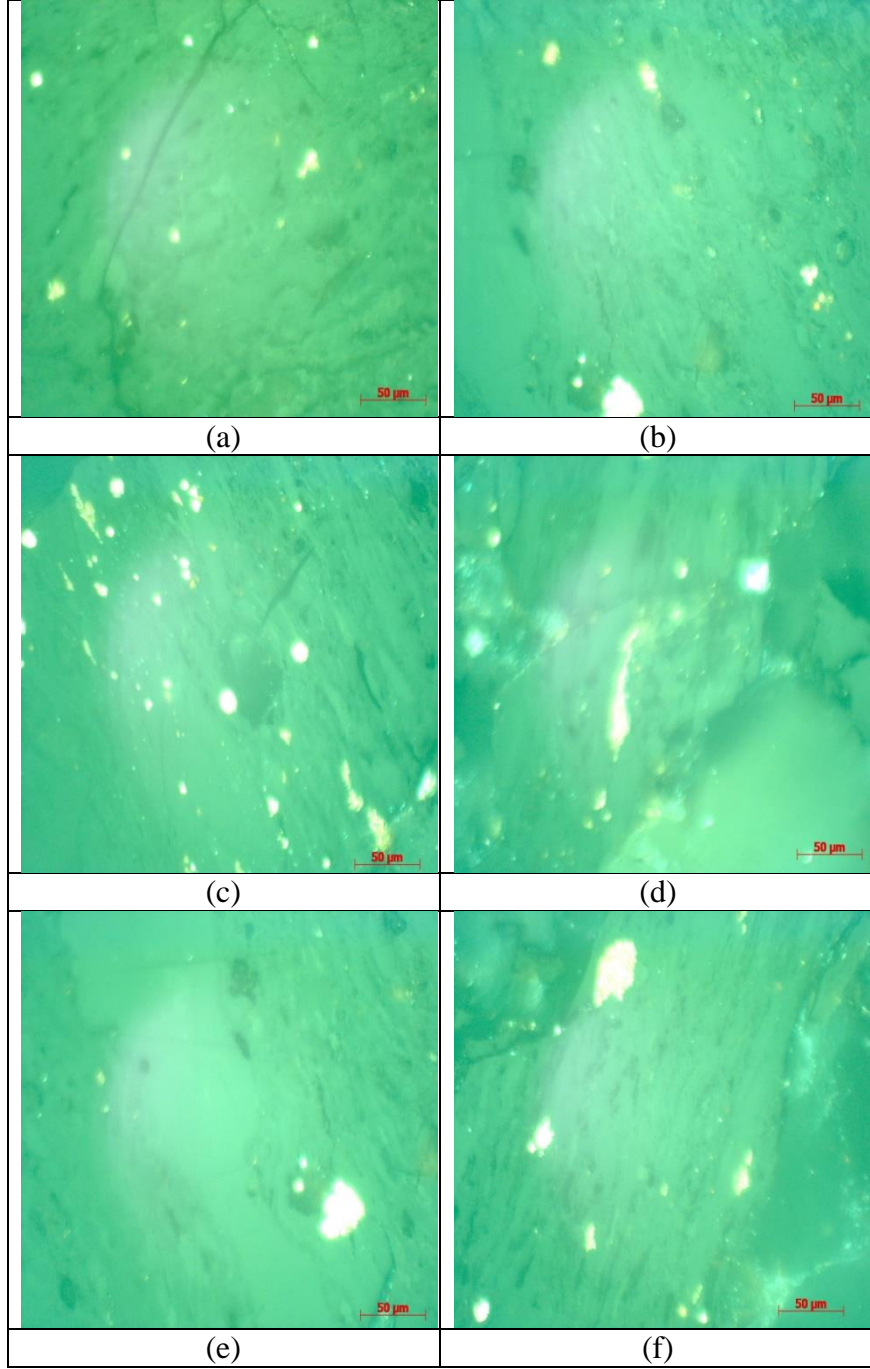
Şekil 4.10'da, Milas-Ekizköy numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde disseminated ve framboidal pirit taneleri gözlenmekte olup bu piritlerin çoğunlukla vitrinit maseralleri ve çatlak dolgusu üzerine yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal pirit tipine bu örnek üzerinde de rastlanılmamıştır. Dissemine olarak yerleşmiş piritlere azımsanmayacak ölçüde rastlanılsa da bunlar da vitrinit maserali üzerinde yer almaktadır. Nadir olarak ince ve iri denebilecek piritler örnek üzerinde göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna yerleşmiş framboidal pirit taneleriyle de karşılaşmıştır.



**Şekil 4.11** Yatağan 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

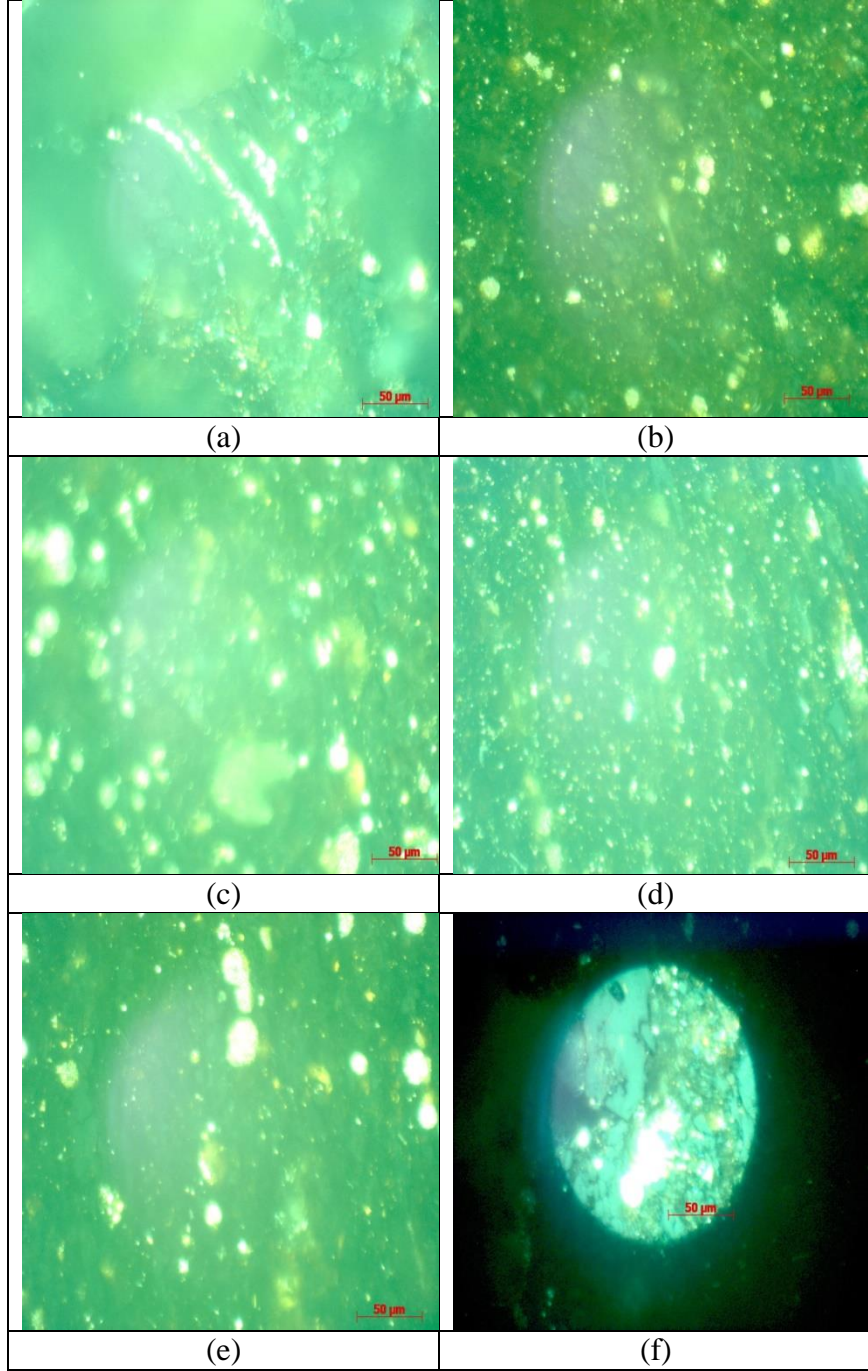
Şekil 4.11’de, Yatağan numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde grain tipi pirit taneleri bolca bulunmakta olup bu pirit tanelerinin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Küçük taneler ve dissemine olarak yerleşmiş piritlere yer yer rastlanılsa da bunlar da vitrinit maserali üzerinde yer almaktadır. Küçük pirit taneleri örnek üzerinde sıkça göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna ve çoğunlukla da vitrinit maserali üzerine yerleşmiş fromboidal pirit taneleriyle azımsanmayacak sayıda karşılaşmıştır.





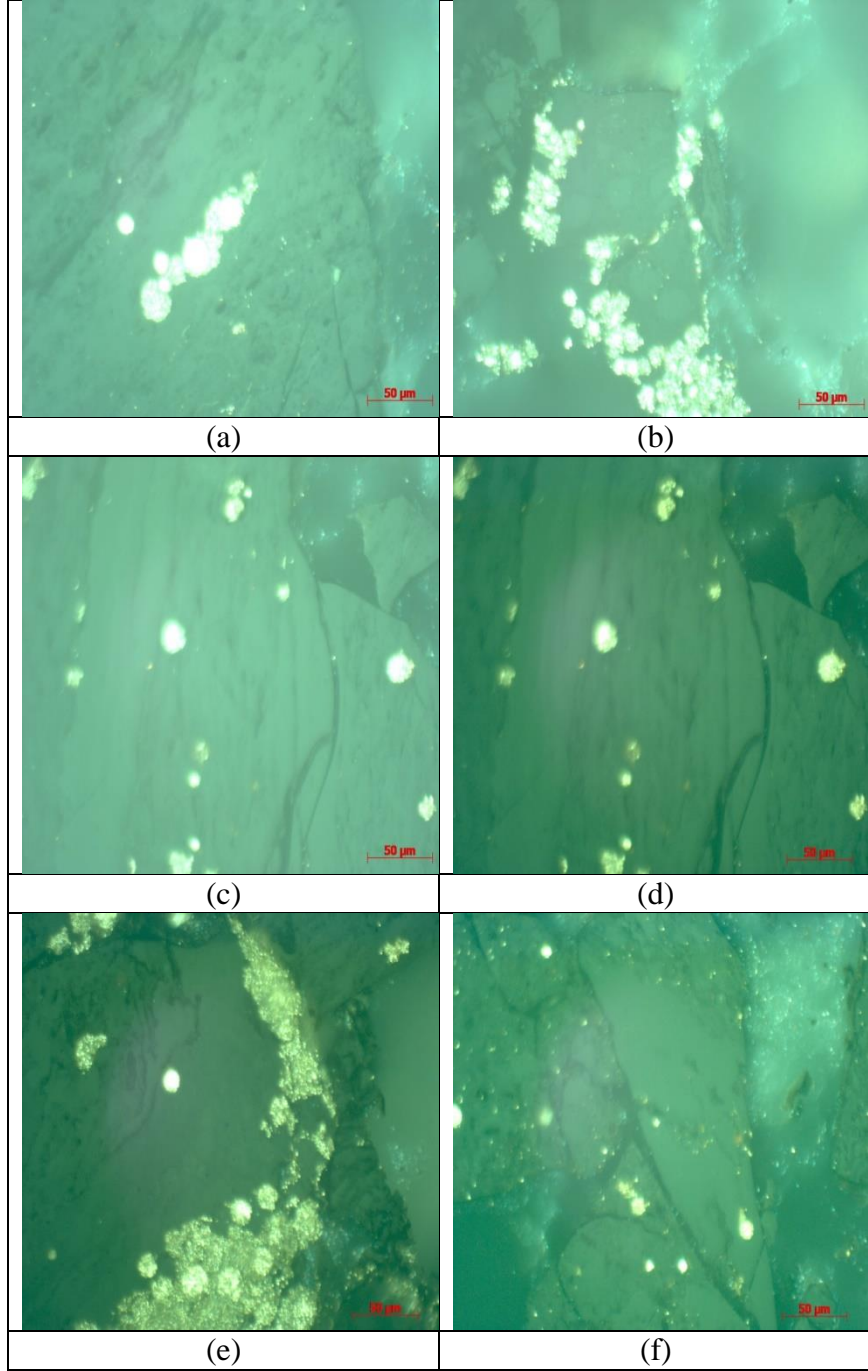
**Şekil 4.12** Çayırhan 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

Şekil 4.12’de, Çayırhan numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde romboidal pirit taneleri gözlenmekte olup bu piritlerin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal ve dissemine olarak yerleşmiş piritlere çok az sayıda rastlanılsa da bunlar da vitrinit maserali üzerinde yer almaktadır. Çok nadir olarak küçük taneli ve dissemine tipi pirit taneleri örnek üzerinde göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna yerleşmiş piritler de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13 Ilgın 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

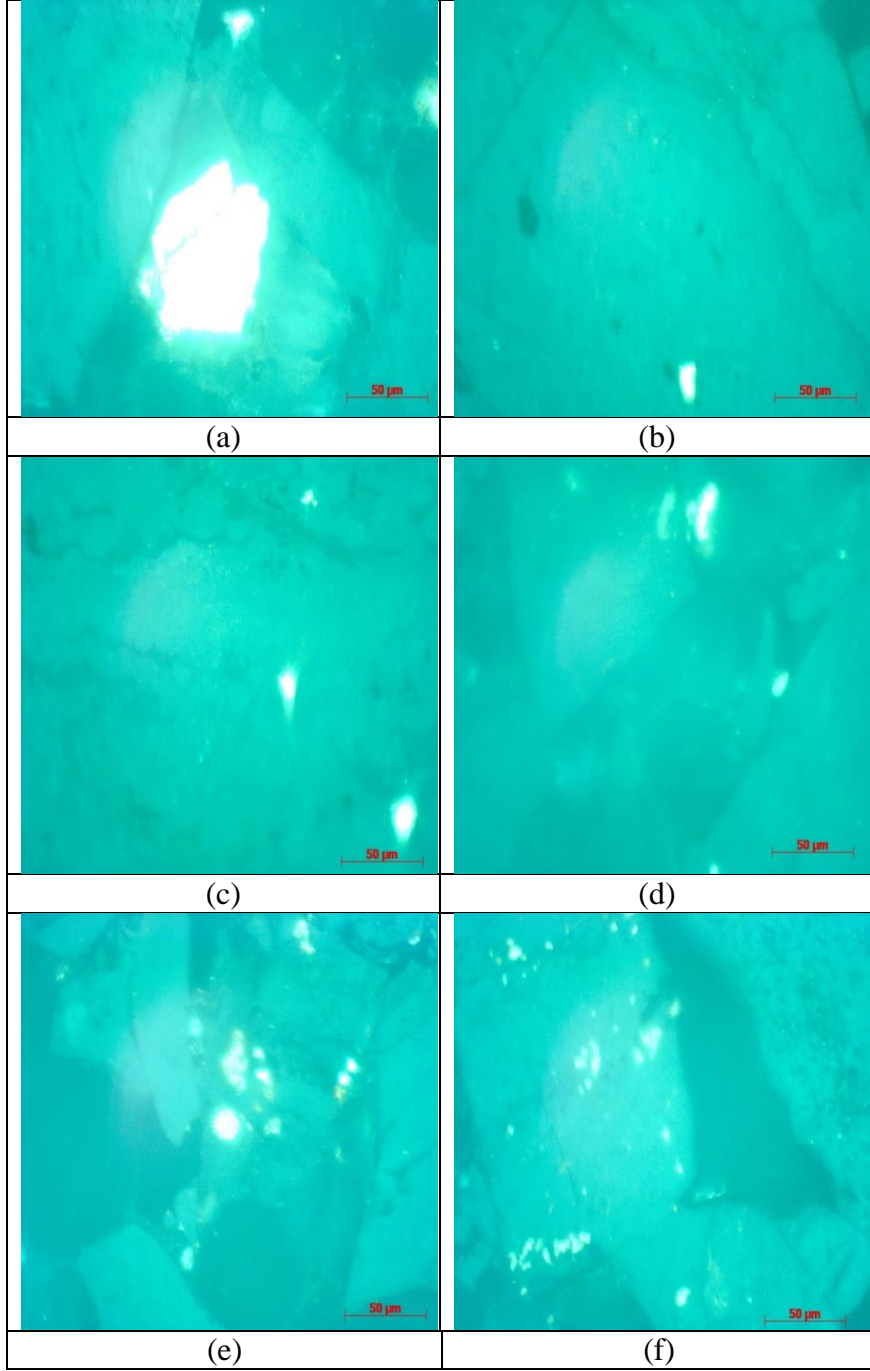
Şekil 4.13'de, Ilgın numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde fromboidal pirit taneleri gözlenmekte olup bu piritlerin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine ve mineral maddelerin üzerine yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal pirit tiplerine rastlanılmamış olsada dissemine olarak yerleşmiş piritlere çoğunlukla rastlanılmış bunlar da vitrinit maserali üzerinde yer almaktadır. Nadir olarak ince taneli piritler örnek üzerinde dissemine olarak göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna yerleşmiş pirit taneleriyle de karşılaşmıştır.



**Şekil 4.14** Ermenek 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

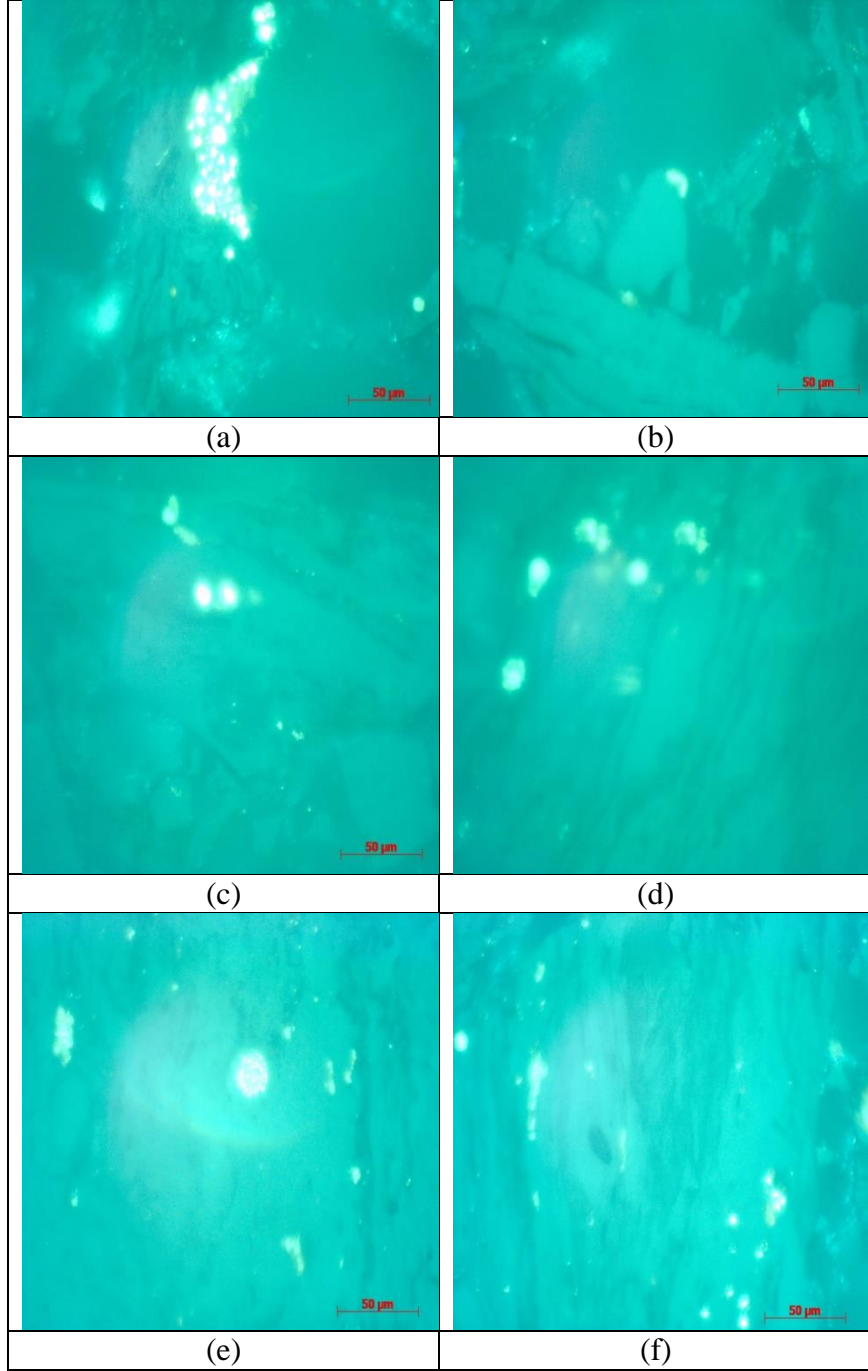
Şekil 4.14'de, Ermenek numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde fromboidal pirit taneleri bulunmakta olup bu pirit tanelerinin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal ve dissemine olarak yerleşmiş piritlere yer yer rastlanılsa da bunlar da vitrinit maserali üzerinde yer almaktadır. Nadir olarak küçük taneli piritler örnek üzerinde göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna yerleşmiş fromboidal pirit taneleriyle de karşılaşmıştır.





**Şekil 4.15** Sorgun 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

Şekil 4.15’de, Sorgun numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde ince ve iri pirit taneleri gözlenmekte olup bu piritlerin çoğunlukla vitrinit maseralleri üzerine ve çatlak dolgularına yerleşmiş olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Rombusal pirit tipine örnek üzerine rastlanılmamış olsa da ve dissemine olarak yerleşmiş piritlere yer yer rastlanılmıştır. Bu dissemine pirit taneleri de vitrinit maseralı üzerinde yer almaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna yerleşmiş ince pirit taneleriyle de karşılaşılmıştır.



**Şekil 4.16** Gürmin-Merzifon 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukda yüzen ürününün mikro fotoğrafları.

Şekil 4.16'da, Gürmin-Merzifon numunesine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde örneğin genelinde fromboidal, dissemine ve rombusal pirit taneleri gözlenmektedir. Rombusal ve dissemine olarak yerleşmiş piritlere azımsanmayacak miktarda rastlanılsa da bunlar da fromboidal pirit taneleriyle birlikte vitrinit maseralı üzerinde yer almaktadır. Nadir olarak küçük taneli piritler örnek üzerinde göze çarpmaktadır. Örnek üzerinde çatlak dolgusuna yerleşmiş pirit taneleriyle de karşılaşmıştır.

#### 4.1.2.4 Kül Ergime Derecesi Ve Külün Mineralojik Özellikleri

Numunelerin kül ergime dereceleri (ASTM D 1857) belirlenmiş, küllerinin mineralojik analizleri yapılmıştır. Numunelerin kül ergime dereceleri Çizelge 4.32’de, küllerinin mineralojik bileşimleri Çizelge 4.33’de verilmiştir.

Çizelge 4.32 Numunelerin kül ergime derecesi sonuçları.

Numune	Sıcaklık (°C)		
	Yumuşama	Ergime	Akma
Saray	1100	1330	1350
Orhaneli	1225	1240	1250
Dursunbey	1120	1290	1350
Milas-Ekizköy	1110	1410	1435
Yatağan	1140	1270	1300
Çayırhan	1160	1216	1240
İlgın	1245	1284	1295
Ermenek	1230	1255	1265
Sorgun	1105	1020	1222
Gürmin-Merzifon	1280	1295	1305

Çalışılan numunelerden Sorgun numunesi külü ergime sıcaklığı 1020 °C olup, çalışılan numuneler içinde en düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Diğer numunelerin kül ergime sıcaklıkları 1200 °C’nin üzerinde olup, Saray, Dursunbey, Milas ve İlgın kül ergime dereceleri 1250 °C’nin üzerindedir.

Kömür külünün erime sıcaklığı öncelikle kimyasal bileşimine bağlıdır; ancak, külün bileşimi geniş bir aralıkta değiştiğinden erime özelliklerinde önemli farklılıklar göstermektedir. Bu çalışma kapsamında çalışılan 10 değişik linyit numunesinin küllerinin erime sıcaklıkları ile bileşimleri arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla küllerin mineralojik bileşimleri belirlenmiştir.

Küçükbayrak vd. (1993) tarafından yapılan çalışmada külün Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO içeriğinin artmasının erime sıcaklığında düşüşe neden olduğu belirtilmektedir. Küldeki, demir oranı yüksek kömürler toz kömür yakma sistemlerinde şiddetli cüruf oluşumuna neden olurlar.

**Çizelge 4.33** 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerinin küllerinin minerolojik analizi.

Numune	Minareller											
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Saray	6,27	4,33	12,12	21,30	0,19	15,47	0,01	1,05	11,94	0,64	0,08	26,60
Orhaneli	0,61	4,25	6,15	10,15	0,16	30,08	0,01	0,04	28,18	0,18	0,25	19,94
Dursunbey	0,96	2,86	16,51	41,71	0,28	4,65	0,01	1,86	4,94	1,25	0,07	24,90
Milas-Ekizköy	0,00	1,27	13,60	20,38	0,59	20,95	0,01	1,15	16,12	0,72	0,08	25,13
Yatağan	2,19	0,81	4,21	65,33	0,28	9,95	0,01	0,61	9,70	0,21	0,05	6,65
Çayırhan	5,24	5,61	8,96	36,51	0,43	16,76	0,01	0,71	10,91	0,72	0,04	14,10
Ilgın	1,52	0,79	10,14	27,18	0,18	22,36	0,03	0,85	21,13	0,45	0,09	15,28
Ermenek	2,80	3,00	12,66	33,73	0,15	15,33	0,01	1,00	12,45	0,61	0,04	18,22
Sorgun	0,27	0,66	25,40	33,90	0,20	10,75	0,00	0,97	12,05	0,48	0,31	15,01
Gürmin-Merzifon	0,61	1,65	27,95	50,54	0,38	1,21	0,01	3,13	1,67	0,91	0,08	11,86

Özellikle curuf oluşumunda külün minerolojik oluşumları önemli bir parametredir. Küldeki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği külün Slagging İndeks ve Fouling İndeks değerlerini belirlemektedir.

- Çizelge 4.33'e göre; numunelerin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerinin küllerinin XRF ile yapılan analizlerinde farklı oranlarda alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silisyum oksit (SiO<sub>2</sub>), kükürt III oksit (SO<sub>3</sub>), kalsiyum oksit (CaO) ve demir III oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içerdiği görülmektedir.
- SiO<sub>2</sub> içeriği numuneler için %65,33-%10,15 arasında değişmektedir.
- Yatağan numunesinin %65,33 SiO<sub>2</sub> içeriği diğer numunelere göre yüksekken, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub> ve CaO içerikleri düşüktür.
- Gürmin-Merzifon numunesinin SiO<sub>2</sub> içeriği; %50,54, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği; %27,95 ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği; % 11,86'dır.
- Dursunbey numunesinin SiO<sub>2</sub> içeriği; %41,71, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; % 16,51 ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; % 24,90'dır.
- Ermenek numunesinin SiO<sub>2</sub>; %33,73, CaO; % 15,33 ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; % 18,22'dir. Saray numunesinin SiO<sub>2</sub>; %21,30, SO<sub>3</sub>; % 15,47 ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; % 26,60'dır.
- Orhaneli numunesinin SiO<sub>2</sub> içeriği % 10,15 iken SO<sub>3</sub> miktarı; %30,08 CaO; %28,18, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> % 19,94'tür.

## Numunelerin Küllerinin Slagging İndeks ve Fouling İndeks Değerleri

### Slagging İndeksi:

Külün kimyasal analizinde:  $Fe_2O_3 > CaO + MgO$  olması durumunda

$$Rs = ((Fe_2O_3) + (CaO) + (MgO) + (Na_2O) + (K_2O)) / ((SiO_2) + (Al_2O_3) + TiO_2) \times S$$

formülünden hesaplanmış ve alacağı değere göre Slagging potansiyeli;

- $Rs < 2.0$  ..... düşük-orta  
 $2 \leq Rs \leq 2.7$  ..... yüksek  
 $Rs \geq 2.7$  ..... çok yüksek olarak belirlenmiştir.

Külün kimyasal analizinde:  $Fe_2O_3 < CaO + MgO$  olması durumunda Slagging İndeksi

$$Rs = ((HT) + (4IT)) / 5$$

formülünden hesaplanmış ve alacağı değere göre **Slagging potansiyeli**;

- $Rs > 2450$  ..... düşük  
 $2450 \geq Rs \geq 2250$  ..... orta  
 $2250 > Rs \geq 2100$  ..... yüksek  
 $2100 < Rs$  ..... çok yüksek olarak belirlenmiştir.

Numunelerin Slagging İndeks değerleri Çizelge 4.34'de yer almaktadır.

**Çizelge 4.34** Numunelerin Slagging İndeks sonuçları.

Numune	$Fe_2O_3$	$CaO + MgO$		S	Rs	Slagging Potansiyeli
Saray	26,60	16,27	$Fe_2O_3 > CaO + MgO$	3,61	5,32	Çok Yüksek
Orhaneli	19,94	32,43	$Fe_2O_3 < CaO + MgO$	2,67	8,59	Düşük
Dursunbey	24,90	7,80	$Fe_2O_3 > CaO + MgO$	5,00	2,99	Çok Yüksek
Milas-Ekizköy	25,13	17,39	$Fe_2O_3 > CaO + MgO$	6,50	8,18	Çok Yüksek
Yatağan	6,65	10,51	$Fe_2O_3 < CaO + MgO$	3,49	1,00	Düşük
Çayırhan	14,10	16,52	$Fe_2O_3 < CaO + MgO$	5,30	4,20	Düşük
İlgin	15,28	21,92	$Fe_2O_3 < CaO + MgO$	5,15	5,40	Düşük
Ermenek	18,22	15,45	$Fe_2O_3 > CaO + MgO$	5,17	4,12	Çok Yüksek
Sorgun	15,01	12,71	$Fe_2O_3 > CaO + MgO$	1,93	0,93	Düşük-Orta
Gürmin-Merzifon	11,86	3,32	$Fe_2O_3 > CaO + MgO$	2,44	0,58	Düşük-Orta



- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve kükürt içerikleri yüksek olan Saray, Dursunbey, Milas-Ekizköy ve Ermenek numunelerinin Slagging Potansiyelleri çok yüksek çıkması beklenen bir durumdur.
- Çayırhan ve Ilgın numunelerinin kükürt içerikleri %5'den büyük olmasına rağmen, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerinin %15 civarında olması Slagging Potansiyellerini düşük olmasına neden olmuştur.
- Yatağan ve Gürmin numunelerinin de Slagging Potansiyelleri düşük olarak belirlenmiştir.

### **Fouling İndeksi:**

$$Rf = \frac{(Fe_2O_3) + (CaO) + (MgO) + (K_2O)}{(SiO_2) + (Al_2O_3) + (TiO_2)} \times Na_2O$$

formülünden hesaplanmış ve alacağı değere göre **Fouling potansiyeli**

- Rf < 0,5**      düşük-orta  
**0.5 ≤ Rf ≤ 1**      yüksek  
**Rf > 1**      çok yüksek olarak belirlenmiştir.

Numunelerin Fouling İndeks değerleri Çizelge 4.35'de yer almaktadır.

**Çizelge 4.35** Numunelerin Fouling İndeks sonuçları.

Numune	Na <sub>2</sub> O	Rf		Fouling Potansiyeli
Saray	6,27	8,09		Çok Yüksek
Orhaneli	0,61	1,94		Çok Yüksek
Dursunbey	0,96	0,56		Yüksek
Milas-Ekizköy	0,00	0,00	Rf < 0,5 düşük-orta fouling potansiyeli	Düşük-Orta
Yatağan	2,19	0,56	0.5 ≤ Rf ≤ 1 yüksek fouling potansiyeli	Yüksek
Çayırhan	5,24	3,55	Rf > 1 çok yüksek fouling potansiyeli	Çok Yüksek
Ilgın	1,52	1,53		Çok Yüksek
Ermenek	2,80	2,07		Çok Yüksek
Sorgun	0,27	0,13		Düşük-Orta
Gürmin-Merzifon	0,61	0,14		Düşük-Orta

- Çizelge 4.35'de görüldüğü üzere Saray, Orhaneli, Çayırhan, Ilgın Ermenek numunelerine ait küller; Çok Yüksek Fouling Potansiyeline sahiptir.

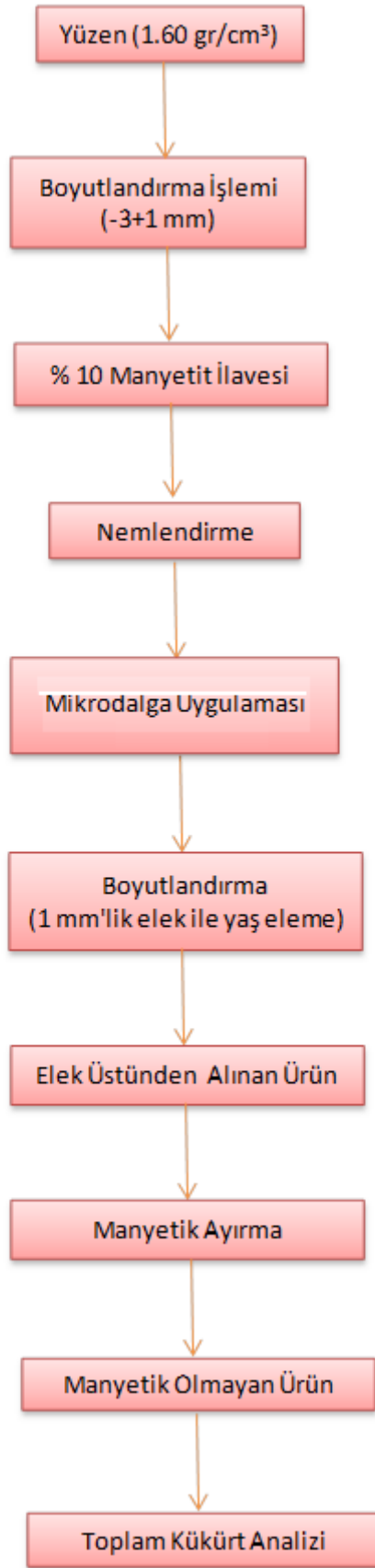
- Dursunbey ve Yatağan kömürleri Yüksek Fouling Potansiyelli küller vermekte olup, çalışılan diğer kömür numunelerinin külleri Düşük-Orta Fouling Potansiyellidirler.

#### 4.1.2.5 Mikrodalga Çalışmaları

Mikrodalga uygulamasının, kömürün kükürt içeriğindeki etkisini belirlemek üzere mikrodalga deneyleri yapılmıştır. Mikrodalga deneyleri akım şeması Şekil 4.17’de verilmiştir.

Kullanılan mikrodalga fırının frekansı 2,45 GHz, gücü max. 800 W’tır.

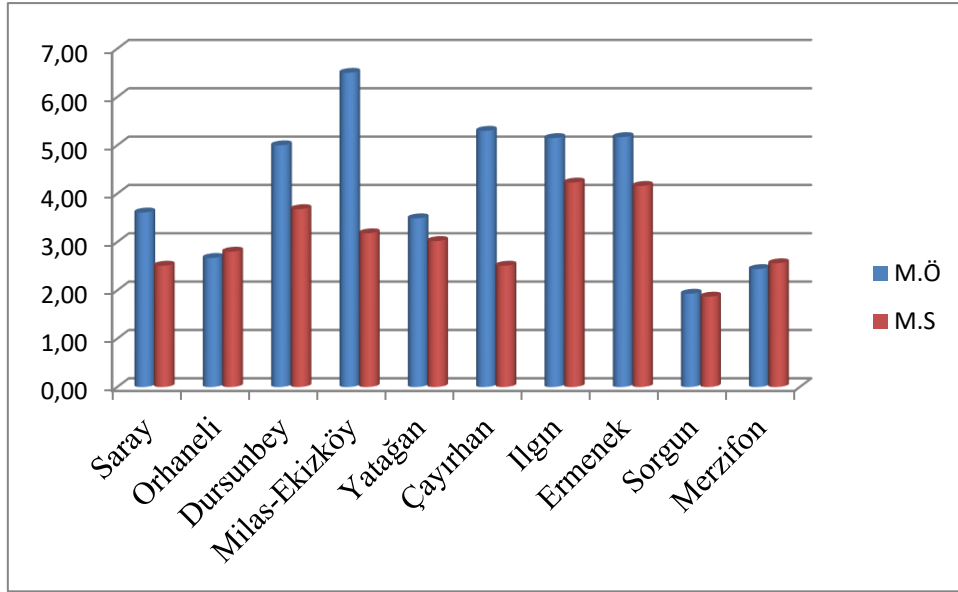
- Mikrodalga deneyleri Saray, Orhaneli, Dursunbey, Milas-Ekizköy, Yatağan, Çayırhan, Ilgın, Ermenek, Sorgun ve Gürmin-Merzifon bölgelerinden alınan linyit numunelerinin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta elde edilen yüzen ürünlerinde yapılmıştır. Bu ürünlerin toplam kükürt içerikleri belirlenmiştir. Deneyler için bu ürünler; -3+1 mm boyut grubunda sınıflandırılarak kullanılmıştır.
- Hazırlanan numunelere kömür içindeki piritin mikrodalgada ısınma özelliğini artırmak için, mükemmel bir mikrodalga emici mineral olan manyetit ilave edilmiştir. Mikrodalga çalışmalarında numunelere ağırlıkça %10 manyetit ve %3 nem sağlayacak şekilde su ilave edilerek karıştırılmıştır.
- Silika kroze içinde mikrodalga döner tablasının üzerine yerleştirilen numunelere 600 W gücünde 2,45 GHz frekansında mikrodalga uygulanmıştır.
- Mikrodalga fırınından dışarı alınan numunelere 1 mm’lik elekten geçirilmiş, elek üstü su ile iyice yıkanmış ve kurutulmuştur.
- Kurutulan bu ürünlere küçük el mıknatısı ile manyetik ayırma yapılarak, ürün içindeki manyetik kısım uzaklaştırılmıştır. Geriye kalan ve “manyetik olmayan ürün” olarak adlandırılan kısmın toplam kükürt analizleri yapılmıştır.
- Numunelerin mikrodalga uygulaması öncesi toplam kükürt içerikleri ve mikrodalga uygulama sonrası kükürt içerikleri ile kükürt giderimleri Çizelge 4.36’da verilmiştir.



Şekil 4.17 Mikrodalga uygulaması akım şeması

**Çizelge 4.36** Mikrodalga öncesi ve sonrası toplam kükürt içerikleri ve kükürt giderimi sonuçları.

Numune	Toplam Kükürt (%)		Kükürt Giderimi (%)
	Mikrodalga Uygulaması Öncesi (M.Ö)	Mikrodalga Uygulaması Sonrası (M.S)	
Saray	3,61	2,51	30,47
Orhaneli	2,80	2,67	4,64
Dursunbey	5,00	3,68	26,40
Milas-Ekizköy	6,50	3,18	51,08
Yatağan	3,49	3,02	13,47
Çayırhan	5,30	2,51	52,64
Ilgın	5,15	4,23	17,86
Ermenek	5,17	4,16	19,54
Sorgun	1,93	1,87	3,11
Merzifon	2,56	2,44	4,69



**Şekil 4.18** Numunelerin toplam kükürt içeriklerinde mikrodalga etkisi.

Çizelge 4.36 ve Şekil 4.18’de görüldüğü üzere;

En yüksek toplam kükürt içerikli numuneler sırasıyla Milas-Ekizköy, Çayırhan, Ilgın, Ermenek ve Dursunbey numuneleridir.

Çayırhan numunesinin toplam kükürdü %5,30’dan %2,31’e düşmüştür. %6,50 toplam kükürt içerikli Milas-Ekizköy numunesinin mikrodalga uygulaması sonrası toplam kükürdü %3,18’e

inmiştir. Mikrodalga uygulaması ile Çayırhan ve Milas-Ekizköy numunelerinin toplam kükürt içeriklerinde %52,64 ve %51,08 azalma olmuştur.

Dursunbey, Ilgın ve Ermenek numunelerinde toplam kükürt giderimleri yaklaşık %26-17 arasında değişmektedir.

Orhaneli, Sorgun, Merzifon numunelerinin kükürt içeriklerindeki değişim sınırlı olup,%4 civarındadır.

Yatağan ve Orhaneli tüvenan numunelerinin piritik kkrtleri sırasıyla %0,73, %0,55 olup, mikrodalga sonrası kükürt gideriminin sınırlı olması beklenen bir durumdur.



## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Türkiye'nin 10 farklı kömür sahasından alınan kömür numuneleri ile çalışılmıştır. Numunelerin karakterizasyonu için:

- Kimyasal analizleri (nem, kül, uçucu madde, sabit karbon, üst ısıl değer ve alt ısıl değer), elementel analizleri (C, H, O ve N) yapılmıştır.
- Kükürt (S) çeşitleri (toplam kükürt, pritik kükürt, sülfat kükürdü, yanabilir kükürt ve organik kükürt) belirlenmiştir.
- Numunelerin öğütülebilirlikleri, HGI değerleri belirlenerek incelenmiştir.
- 1,40 gr/cm<sup>3</sup> ve 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ağır ortamlarda Yüzdürme-Batırma Testleri yapılmıştır.
- 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin elementel analizleri, toplam kükürt içerikleri, HGI değerleri belirlenmiştir.
- Hem tüvenan kömür örneklerinde, hem de 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerde petrografik çalışmalar yapılmıştır.
- Yüzen ürünlerin küllerinin kül ergime dereceleri ve mineralojik bileşimleri belirlenerek, Slagging İndeksleri ve Fouling İndeksleri tespit edilmiştir.
- Mikrodalga uygulamalarında; mikrodalga enerjisinin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin toplam kükürt içeriğine etkisi incelenmiştir.

#### **Temiz kömür elde etme amacı ile yapılan Yüzdürme-Batırma Testleri sonunda;**

- 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünlerin elementel analizleri ve toplam kükürt içeriklerinde, tüvenan haldeki değerlerine göre iyileşme sağlanmıştır.

#### **Öğütülebilirliği belirlemek amacı ile yapılan HGI deneyleri sonunda;**

- Deneysel çalışmalara konu olan numunelerin HGI değerlerinin tüvenan numuneler için 43,54-68,49 arasında değiştiği,

- Saray numunesi HGI değerinin tüvenan numune için 43,54 olup, “zor öğünen” kömür grubunda olduğu, Saray numunesinin 1,60 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta Yüzdürme-Batırma testleri sonucunda alınan yüzen ürünün HGI değerinin 58,79 ve “orta öğünen” öğütülebilirlik özelliğine sahip olduğu,
- Gürmin Merzifon numunesinin HGI değerinin tüvenan numune için 68,79 ile “orta öğünen” kömür grubunda olduğu, bu numunenin yüzen ürününün HGI değerinin 55,32 değeri ile yine “orta öğünen” özellikte olduğu, HGI değerindeki azalmanın, temiz kömürün daha zor öğütülebileceğini gösterdiği,
- Ilgın numunesi HGI değerinin tüvenan numune için 67,79 olarak belirlendiği ve “orta öğünen” kömür grubunda bulunduğu, bu numunenin yüzen ürününün HGI değerinin 84,43 değerine yükselerek “kolay öğünen” kömür özelliğine geçtiği, HGI değerindeki bu artışın, temiz kömürün daha kolay öğütülebileceğini gösterdiği,
- Dursunbey numunesi HGI değerinin tüvenan numune için 45,80 ile “zor öğünen” özellikte olduğu, yüzen ürününün HGI değerinin ise 44,93 olup, bu numune için tüvenan ve temiz kömür için öğütülebilirlik özelliği açısından fazla bir değişimin olmadığı,
- Orhaneli, Dursunbey, Milas-Ekizköy ve Ermenek numunelerinin hem tüvenan halde hem de yüzen ürünlerinde HGI değerleri 50’den küçük olup, her iki durumda da “zor öğünen” özellikte oldukları

belirlenmiştir.

#### **Petrografik çalışmalar sonucunda;**

- Milas-Ekizköy, Sorgun numunelerinin tüvenan halde toplam reaktif bileşenlerinin %90’nın üzerinde olduğu,
- Saray, Dursunbey, Çayırhan, Ermenek numunelerinin tüvenan halde toplam reaktif bileşenlerinin %80’nin üstünde olduğu,
- Gürmin-Merzifon numunesinin %71,60, Yatağan numunesinin %53,73, Ilgın numunesinin %35,47 toplam reaktif bileşen içerdiği, bu durumu açıklık getirmek için numunelerin kimyasal analizlerine bakıldığında Gürmin-Merzifon numunesinin %45,02 külü ve %26,07 sabit karbon, Yatağan numunesinin %26,32 nem, %15,97 kül ve %31,40 sabit karbon, Ilgın numunesinin %38,32 nem, %38,77 kül ve %52,50 sabit karbon içerdikleri göz önüne alındığında toplam reaktif bileşen miktarlarının düşük olmasının beklenen bir durum olduğu,

belirlenmiştir.



## **Kül ergime derecesi ve külün minerolojik özelliklerine göre varılan sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:**

Kömür külünün erime sıcaklığı öncelikle kimyasal bileşimine bağlıdır; ancak, külün bileşimi geniş bir aralıkta değiştiğinden erime özelliklerinde önemli farklılıklar göstermektedir. Bu çalışma kapsamında çalışılan 10 değişik linyit numunesinin küllerinin erime sıcaklıkları ile bileşimleri arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla küllerin minerolojik bileşimleri belirlenmiştir. Külün Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO içeriğinin artmasının erime sıcaklığında düşüşe neden olduğu belirtilmektedir. Küldeki, demir oranı yüksek kömürler toz kömür yakma sistemlerinde şiddetli cüruf oluşumuna neden olurlar. Küldeki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği külün Slagging İndeks ve Fouling İndeks değerlerini belirlemektedir.

- Çalışılan numunelerden Sorgun numunesi külü ergime sıcaklığı 1020 °C olup, çalışılan numuneler içinde en düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Sorgun numunesinin Cao içeriği %12,05, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %15,01 iken kül ergime değerinin bu kadar düşük olması beklenen bir durum değildir. Diğer numunelerin kül ergime sıcaklıkları 1200 °C'nin üzerinde olup, Saray, Dursunbey, Milas ve Ilgın kül ergime dereceleri 1250 °C'nin üzerindedir.
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve kükürt içerikleri yüksek olan Saray, Dursunbey, Milas-Ekizköy ve Ermenek numunelerinin Slagging Potansiyelleri çok yüksek çıkması beklenen bir durumdur. Çayırhan ve Ilgın numunelerinin kükürt içerikleri %5'den büyük olmasına rağmen, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerinin %15 civarında olması Slagging Potansiyellerini düşük olmasına neden olmuştur. Yatağan ve Gürmin-Merzifon numunelerinin de Slagging Potansiyelleri düşük olarak belirlenmiştir.
- Saray, Orhaneli, Çayırhan, Ilgın Ermenek numunelerine ait küller; Çok Yüksek Fouling Potansiyeline sahiptir. Dursunbey ve Yatağan kömürleri Yüksek Fouling Potansiyelli küller vermekte olup, çalışılan diğer kömür numunelerinin külleri Düşük-Orta Fouling Potansiyellidirler.

## **Mikrodalga çalışmaları sonucunda;**

Çayırhan numunesinin toplam kükürdü %5,30'dan %2,31'e düştüğü, %6,50 toplam kükürt içerikli Milas-Ekizköy numunesinin mikrodalga uygulaması sonrası toplam kükürdünün %3,18'e indiği, mikrodalga uygulaması ile Çayırhan ve Milas-Ekizköy numunelerinin toplam kükürt içeriklerinde %52,64 ve %51,08 azalma olduğu,

Dursunbey, Ilgın ve Ermenek numunelerinde toplam kükürt giderimleri yaklaşık %26-17 arasında değiştiği,

Orhaneli, Sorgun, Merzifon numunelerinin kükürt içeriklerindeki değişimin sınırlı olup,%4 civarında kaldığı,

Yatağan ve Orhaneli tüvenan numunelerinin piritik kükürtlerinin sırasıyla %0,73, %0,55 olup, mikrodalga sonrası kükürt gideriminin sınırlı olması beklenen bir durum olarak açıklanabileceği,

belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- ASTM** (2007) D3177, Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, Sections 6-9, <https://compass.astm.org/download/D3177-WITHDRAWN.32194.pdf>.
- ASTM** (2011) D3173, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D3173-11>.
- ASTM** (2011) D3175, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D3175-11>
- ASTM** (2012) D3174, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D3174-12>.
- ASTM** (2012) D2492, Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D2492-02R12>
- ASTM** (2013) D5865, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, <https://doi.org/10.1520/D5865>
- ASTM** (2016) D409, Standard Test Method for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, [https://doi.org/10.1520/D0409\\_D0409M-16](https://doi.org/10.1520/D0409_D0409M-16)
- ASTM** (2016) D1857, Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash, ASTM International, West Conshohocken, PA, [https://doi.org/10.1520/D1857\\_D1857M-16](https://doi.org/10.1520/D1857_D1857M-16)
- ASTM** (2016) D5373, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://doi.org/10.1520/D5373-16>
- Açışlı Ö** (2002) Değişik Gaz Atmosferlerinde Balkaya Linyitinin Desülfürizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Erzurum, 50 s.
- Aelst V J, Rodriguez A R and Yperman J** (2000) A.p.-t.r.p. Investigation of the Effect of Nitric Acid Leaching on the Sulphur Distribution in Coal, *Fuel*, 79: 537-544.
- Anderson L L** (1995) Coal Liquefaction. *Encyclopedia Of Energy Tecnology And The Environment*, John Wiley&Sons, 792 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ateşok G** (1986) *Kömür Hazırlama*. İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, 190 s.
- Ateşok G** (2004) *Kömür Hazırlama ve Teknolojisi*, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, 375 s.
- Borah D** (2005) Desulphurization of organic sulphur from coal by electron transfer process with  $Co^{+2}$  Ion, *Fuel Processing Technology*, 86:509-522.
- Chou C** (2012) Sulfur In Coals: A Review Of Geochemistry And Origins. *International Journal of Coal Geology*, 100:1-13.
- Çağlayan G H** (2016) Kömürden Kükürt Giderimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 49 s.
- Çinpolat E** (1998) Oksitleyici Kükürt Giderme Yöntemlerinin Bazı Türk Linyitlerinin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, *Yüksek Mühendislik Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 71 s.
- Çit İ** (2007) Polimerlerin kömür pirolizine etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Ankara, 107 s.
- Çelik M S ve Somasundaran P** (1994) Kömürün Desülfürizasyonu. *Kömür*, O. Kural (Ed.), Özgüb Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul. 785 s.
- Çubuk M** (1999) Biyokimyasal Yöntemle Kömürdeki Yanabilir Kükürdün Giderilmesi. *Yüksek Mühendislik Tezi*, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, 95s.
- Çuhadaroğlu D ve Toroğlu İ** (1993) *Kömürdeki Kükürtlü Bileşiklerin Giderilmesi*. Meslek İçi Eğitim Kursu Ders Notları (yayımlanmamış), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 95 s.
- Elsamak G, Öztas A N, and Yürüm Y** (2003) Chemical Desulphurisation of Turkish Cayırhan Lignite with HI using microwave and thermal energy, *Fuel*, 82: 531–537.
- Eker Y** (2007) Kömürdeki Piritik Kükürdün Giderilmesinde Çeşitli Yöntemlerin Kıyaslanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Zonguldak, 87 s.
- Güngören C, Özkan G ve Hacifazlıoğlu H** (2016) Mikrodalga Kurutmanın Linyit Kömürünün Öğütülebilirliğine Etkisi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 55-4: 15-22
- Hacifazlıoğlu H, Uçkan D and Şahin M** (2016) Demineralization Of Turkish Tosya Lignite Coal By Boric Acid. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects* 38 18: 2777–2781 <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2015.1109008>.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Huang H and Rowson N** (2002) Hydrometallurgical Decomposition Of Pyrite And Marcasite In A Microwave Field. *Hydrometallurgical*, Vol.64, pp. 169-179.
- Jorjani E, Rezai B, Vossoughi M and Osanloo M** (2004a) Desulphurization of Tabas Coal with Microwave Irradiation/Peroxy Acedic Acid Washing at 25, 55 and 85 °C, *Fuel*, 83: 943-949.
- Jorjani E, Rezai B and Vossoughi M** (2004b) Oxidation Pretreatment for Enhancing Desulphurization of Coal with Sodium Butoxide, *Minerals Engineering*, 17: 545-552.
- Kargı F** (1997) Kömürün Desülfürizasyonunda Biyoteknolojik Yöntemler, *Bilim ve Teknik Dergisi*, Ocak, s. 36-39.
- Keskin Y** (1988) Kömür Hazırlama Yöntemleri, İnsan Gücü-Eğitim Şube Müdürlüğü Yayınları, No:50, Zonguldak, 8 s.
- Kutbay I ve Kuskonmaz N** (2004) Mikrodalga Isıtmanın Seramik Üretiminde Kullanımı. *Metalurji*, 137: 52-56.
- Kural O** (1991) *Linyit ve Kullanım Alanları*, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Kurşit Matbaası, 975 s.
- Kural O** (Ed.) (1998) *Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre ilişkileri*, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 785 s.
- Levent M, Kaya Ö and Kocakerim M** (2007) Optimization of Desulphurization of Artvin-Yusufeli Lignite with Acidic Hydrogen Peroxide Solutions. *Fuel*, Vol.86, pp. 983-992.
- Ma X, Zhang M and Min F** (2014) Study of enhanced low-quality coal oxidative desulphurization and deashing by using HNO<sub>3</sub> and microwave pretreatment. *Environmental Technology*, 35:1, 36-41.
- MTA** (2010) *Türkiye Linyit Envanteri*, ISBN: 978-605-4075-76-8, Ares Basım, Ankara, 18 Ekim 2010.
- Ocakoğlu F** (2015) *Kömür Jeolojisi Ders Notları* (yayımlanmamış), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.
- Samanlı S** (2010) A Comparison Of The Results Obtained From Grinding In A Stirred Media Millignite Coal Samples Treated With Microwave And Untreated Samples. *Fuel*, 90: 659-664
- Sönmez Ö** (2000) Seçici Oksidasyon Yöntemiyle Yüksek Kükürt içerikli Linyitlerin Kimyasal Olarak Temizlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Mersin, 45 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Şimşek E H** (1997) Türk Kömürlerinin Mikrodalga Enerji Etkisiyle Tetralindeki Hidrojenasyonu, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- TKİ** (2016) *Linyit Sektör Raporu 2015*, Hazırlayan: Stratejik Planlama Koordinasyon Birimi, Mayıs 2016
- TTK** (2015) *Taşkömürü Sektör Raporu*, <http://www.taskomuru.gov.tr/file/2015pdf>
- TTK** (2016) (Türkiye Taşkömürü Kurumu). *TTK İstatistik Yıllığı 2015*. TTK Web Sitesi: <<http://www.taskomuru.gov.tr/>>
- TKİ** (2016) Türkiye Taşkömürü Kurumu. Adres: <http://www.tki.gov.tr/tr/Komur-Sektor-Raporu-2015/Dosya/215>
- TÜİK** (03.03.2016) Basın Odası Haberleri, [http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2016\\_26\\_20160303.pdf](http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2016_26_20160303.pdf)
- Taşdemir A** (2010) Kömür Flotasyonunda Yeni Tekniklerin Uygulanabilirliğinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 162 s.
- Toraman O Y ve Depçi T** (2007) Kömürde mikrodalga ile önışlem uygulamaları. *Madencilik*, 46 (3): 43-53.
- Tosun Y İ** (2012) Kısmi Ergiyik Kostik Liç Yöntemi İle Türk Linyitlerinin Kükürtsüzleştirilmesi-Mermer Atık Tozu Kullanımı. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, 16-1: 103-108.
- Tosun Y İ** (2015) Microwave Activated Crushing And Grinding Of Turkish Coals And Shale For Cleaning And Desulfurization. *XVI Balkan Mineral Processing Congress*, 2: 622-629
- Toroğlu İ, Kizgut S ve Çuhadaroğlu D.** Kompozit Kodlu Numunenin Petrografik Özellikleri, *Aksa Akrilik Kimya Sanayi A.Ş. Kömüre Dayalı Enerji Santralında Yakılacak Kömürlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Depolama Koşullarının Düzenlenmesi Teknik Raporu* (yayımlanmamış), Zonguldak, 6-9 s.
- Torun M ve Tamzok N** (2007) *Türkiye Enerji Politikaları İçerisinde Kömürün Önemi*, [http://www.geocities.com/ceteris\\_tr3/n\\_tamzok3.pdf](http://www.geocities.com/ceteris_tr3/n_tamzok3.pdf)
- Uslu T** (2002) Microwave Heating Characteristics of Pyrite and Microwave Assisted Coal Desulphurization. *Doktora Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, 153 s.
- Uslu T and Atalay U** (2003) Microwave Heating of Coal for Enhanced Magnetic Removal of Pyrite, *Fuel Processing Technology*, 85: 21-29.
- Uzun D** (2002) Linyit Özellikleri, Piroliz ve Yakma Koşullarının Kükürlü Bileşiklerin Davranışlarına Etkisi, *Doktora tezi*. Marmara Üniversitesi, İstanbul, 202 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ural S, Yıldırım M ve Anıl M** (2002) Kömürün Mineral Madde İçeriğinin Toz Kömür Yakma Sistemindeki Rolü. *Türkiye 13. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı* 29-31 Mayıs 2002, Zonguldak, Türkiye, 151-160.
- Wang S and Wang J** (1992) Exploration on the Mechanism of Coal Desulphurization Using Microwave Irradiation/Acid Washing Method. *Fuel Processing Technology*, 31: 233-240.
- Wang J and Yang J** (1994) Behaviour Of Coal Pyrolysis Desulfurization With Microwave Energy, *Fuel*, 73: 155-159.
- Yaman S ve Küçükbayrak S** (1998) Kömürün İçerdiği Mineral Maddelerin Kömürün Kullanımına Etkisi. *Kömür Özellikleri, Teknolojileri ve Çevre İlişkileri*, Kural O. (Ed.), 1. Baskı, Özgün Ofset, İstanbul,140-147
- Yamık A, Tosun İ Y ve Güneş N** (1994) Kömürden Külün ve Kükürdün Arındırılması. *Türkiye 9. Kömür Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, Türkiye, 201–211
- Yıldız K ve Alp A** (2000) Metalurjik Proseslerde Mikrodalga Kullanımı. *Metalurji*, 125: 24-29





## BİBLİYOGRAFYA

- Eker Y** (2007) Kömürdeki Piritik Kükürdün Giderilmesinde Çeşitli Yöntemlerin Kıyaslanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Zonguldak, 87 s.
- Hayta U** (2010) Linyit – Bitümlü Şist Karışımlarının Pirolizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara, 77 s.
- Taşdemir A** (2010) Kömür Flotasyonunda Yeni Tekniklerin Uygulanabilirliğinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 162 s.
- TKİ** (2016) Türkiye Taşkömürü Kurumu. Adres: [http:// www.tki.gov.tr/tr/Komur-Sektor-Raporu-2015/Dosya/215](http://www.tki.gov.tr/tr/Komur-Sektor-Raporu-2015/Dosya/215)



## ÖZGEÇMİŞ

Cemil Emre YILMAZ 1989'da KAYSERİ/Develi'de doğdu; ilk ve orta öğrenimini Develi'de; lise öğrenimini ise Develi Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında Z.K.Ü Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümüne girdi. 2012 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. İş hayatında ise 1 yıl süreyle Tübitak projesi kapsamında Karbomet Madencilik'de Ar-Ge Sorumluluğu görevi aldı. Daha sonra kısa süreliğine Arslantürk Madencilik Lavuar Tesisi'nde maden mühendisi olarak çalıştı. Son olarak ise Kasım-2014'den itibaren Oreks Madencilik Kalkım Kurşun-Çinko-Bakır Hazırlama ve Zenginleştirme Tesisi'nde vardiya sorumlusu olarak halen görev yapmaktadır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : İbrahimağa Mah. Lider Sok. No:12/8  
38400 Develi/KAYSERİ

Tel : (507) 030 58 28

E-posta : cemilemreyilmaz@gmail.com