

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZUNAYAK GÖÇÜK BÖLGESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASININ
DENEYSEL YÖNTEMLE ARAŞTIRILMASI

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEFA KUKUL

ARALIK 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UZUNAYAK GÖÇÜK BÖLGESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASININ
DENEYSEL YÖNTEMLE ARAŞTIRILMASI**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sefa KUKUL

DANIŞMAN: Doç. Dr. Kemal BARIŞ

ZONGULDAK

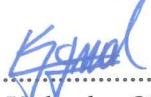
Aralık 2019

KABUL:

Sefa KUKUL tarafından hazırlanan “Uzunayak Göçük Bölgesinde Kömürün Kendiliğinden Yanmasının Deneysel Yöntemle Araştırılması” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
26/12/2019

Danışman: Doç. Dr. Kemal BARIŞ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksek Okulu,
Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan KAYMAKÇI

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği
Bölümü



Üye: Doç. Dr. Abdullah FIŞNE

İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./..../20....



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
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.”


Sefa KUKUL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UZUNAYAK GÖÇÜK BÖLGESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDE YANMASININ DENEYSEL YÖNTEMLE ARAŞTIRILMASI

Sefa KUKUL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kemal BARIŞ

Aralık 2019, 73 sayfa

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK), Karadon Müessesesi Karadon İşletmesi Acılık damarından (-360/-460) ve Gelik İşletmesi Kurul damarından (-160/-260) kömür, tavan ve taban taşı örnekleri alınmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler tasarlanırken deney koşullarının bir uzunayak göçük bölgesindeki koşulları temsil etmesine çalışılmıştır. Ayaklardan alınan kömür örnekleri ve tavan-taban taşı örnekleri kullanılarak göçük bölgesinin laboratuvar ortamında modellenmesine çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ZEDEM (Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi) Kömür Oksidasyonu ve Havalandırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılan deney seti bir reaktör, ona bağlı bir termoçift, kömür sıcaklığının kaydedilmesi için bir dijital termometre, reaktöre hava sağlayacak bir mini pompa, akış miktarını ayarlamak için bir akış ölçer ve sıcaklık kontrollü bir fırından oluşmaktadır.

ÖZET (devam ediyor)

Laboratuvarda yapılacak deneylerin bir uzunayak arkasındaki göçük bölgesini temsil edebilmesi amacıyla kömür örnekleri $-2,36+1,70$ mm, $-1,70+1,00$ mm, $-1,00+0,50$ mm, $-0,50+0,075$ mm ve $-0,075$ mm olmak üzere beş farklı boyut gurubunda hazırlanmıştır. Bunun yanı sıra alınan taban taşı örnekleri $+4,75$ mm boyutunda, tavan taşı örnekleri ise $-1,00+0,50$ mm, $-0,50+0,075$ mm ve $-0,075$ mm boyutlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan taban taşı, kömür ve tavan taşı örnekleri paslanmaz krom-nikel reaktör içerisine; reaktör tabanına 25 gr taban taşı, üzerine farklı boyutlarda kömür örneği ve en üste farklı boyutlarda kömür ve tavan taşı karışımı olacak şekilde yerleştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında reaktörün içine yerleştirildiği sıcaklık kontrollü fırının sıcaklık artış hızı tek boyutlu kömür örnekleri için 15°C/saat , karışım kömür örnekleri için ise 30°C/saat olarak ayarlanmıştır.

Deneyler sonucunda genel itibariyle Gelik İşletmesi Kurul damarına ait örneklerin Karadon İşletmesi Acılık damarına ait örneklere göre kendiliğinden yanma açısından daha aktif olduğu söylenebilir.

Kurul damarına ait örneklerle yapılan deneylerde bulunan kesişim noktası sıcaklıkları $228-241^{\circ}\text{C}$ arasındayken, Acılık örnekleri ile yapılan deneylerde bulunan kesişim noktası sıcaklıkları $229-243^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Kurul damarı örnekleri ile gerçekleştirilen kendiliğinden yanma deneylerinin beş tanesinde, Acılık damarı örnekleri için gerçekleştirilen deneylerin ise altı tanesinde kesişim noktası sıcaklıkları tespit edilememiş dolayısıyla FCC indeks değerleri de hesaplanamamıştır. Kurul damarı örnekleri için hesaplanan FCC indeksleri $1,02-2,16 \text{ dak}^{-1}$ arasında değişim göstermiş olup bu değerler Acılık damarı örnekleri için $1,13-2,05 \text{ dak}^{-1}$ arasında bulunmuştur.

Tane boyutunun deneylerde en etkili parametre olduğu düşünülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde $-0,075$ mm, $-0,50+0,075$ mm ve $-1,00+0,50$ mm boyut guruplarının daha yüksek miktarlarda kullanıldığı deneylerde kömür sıcaklığı fırın sıcaklığını kesmiş olduğu açıkça görülmektedir.

Fırın sıcaklığındaki artış hızının da deney sonuçlarında etkili olduğu söylenebilir. Sıcaklık artış hızının 30°C/saat olarak ayarlandığı deneylerde kömür örneklerinin $110^{\circ}\text{C}-220^{\circ}\text{C}$ arasındaki ortalama sıcaklık artışları 15°C/saat ile kıyaslandığında 2 kattan fazla artmıştır. Ayrıca, fırın

ÖZET (devam ediyor)

sıcaklık artış hızının 30°C/saat olduğu deneylerde hesaplanan FCC indekslerinin de iki kattan fazla arttığı gözlenmiştir.

Her ne kadar tüm deneylerde kömür örnekleri için hesaplanan FCC değerleri bu kömürlerin kendiliğinden yanmaya hiç yatkın olmadığını (FCC hesaplanamayan deneyler) ya da yatkınlıklarının “düşük” (0-5 dak⁻¹ aralığında) olduğunu işaret ediyor olsa da bu sonuç kömürlerin kendiliğinden yanmayacağı şeklinde yorumlanmamalıdır. Zira, uygun şartlar ve yeterli zaman olması durumlarında tüm kömürlerin kendiliğinden yanma riskine sahip olduğu bir gerçektir. Bu durum FCC değeri hesaplanmayan deneylerdeki kömür sıcaklık profillerinden açık şekilde anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uzunayak, Kendiliğinden yanma, Kömür madenciliği.

Bilim Kodu: 607.01.00



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL IN LONGWALL GOAF

Sefa KUKUL

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

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kemal BARIŞ

December 2019, 73 pages

In this study, coal and rock samples were taken from the mines of the two collieries of Turkish Hardcoal Enterprise, Karadon Mine Acılık (-360/-460) and Gelik Mine Kurul seams (-160/-260) and spontaneous combustion tests were performed. Tests were designed so that they represent the conditions in goaf of a longwall. It was attempted to model the goaf area using the coal samples as well as rock samples taken from the roof and the floor.

The experimental studies conducted within the context of this research were performed in Coal Oxidation and Conditioning Laboratory of the Faculty of Engineering at Zonguldak Bülent Ecevit University. The test set which was used during the experiment consists of a reactor, a thermocouple attached to the reactor, a digital thermometer to record the temperature of the coal, a small pump to supply air to the reactor, a flow meter to adjust the flow rate and a temperature controlled oven.

ABSTRACT (continued)

In order to be tests to represent the goaf area behind a longwall, the coal samples were prepared and classified into five different particle size groups as -2,36+1,70mm, -1,70+1,00 mm, -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm and -0,075mm. Moreover, the rock samples taken from the floor was classified into +4,75 mm size group while the samples taken from the roof were classified into three different size groups as -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm and -0,075 mm. The coal and the rock samples prepared were placed into the chromium-nickel reactor to perform the spontaneous combustion tests in a way that the 25 g of floor rock sample is put on the bottom, coal in different size groups over it and coal and rock sample mixtures in different size groups on the top. During the tests rate of temperature rise in the oven was set to 15°C/min for single coal samples at the middle while it was set to 30°C for the mixtures of different sizes of coal.

Crossing point temperatures found in the tests performed with Kurul seam samples changed between 228 and 241 °C while they were found between 229 and 243°C for the tests performed with Acılık seam samples. Crossin point temperatures were not observed for some of the tests (five for Kurul samples and six for Acılık samples) and thus related FCC values could not be calculated. The FCC index values were found between 1,02 and 2,16 min⁻¹ for Kurul samples and 1,13-2,05 min⁻¹ for Acılık samples.

In general, the results showed that the samples taken from the Gelik Mine Kurul seam were more active than those taken from the Karadon Mine Acılık seam in terms of spontaneous combustion tendency.

It is considered that the effect of particle size is the most effective parameter in the tests. As the test results are examined it is clearly seen that coal temperature crossed the oven temperature for the tests where coals having particle sizes of -0,075 mm, -0,50+0,075 mm and -1,00+0,50 mm were used more.

It can be said that rate of temperature rise of the oven is also effective on the results. In tests where the rate of temperature rise in the oven is set to 30°C/h, the average temperature rise of coal samples between 110 °C and 220 °C was almost two times more than that of coal samples in tests where the rate of temperature rise in the oven is 15°C/h.

ABSTRACT (continued)

Even though all the FCC index values calculated for the coal samples indicates that the liability of coal samples to spontaneous combustion is either low ($0 < \text{FCC} < 5$) or not liable (for the coal where FCC index values could not be calculated) this result should not be interpreted in a way that no spontaneous combustion event can occur for such coals. Because in cases where there are suitable conditions and enough time it is a fact that a spontaneous combustion event can be encountered for all types of coals. This is clearly understood from the temperature profiles of coals in tests where FCC values could not be calculated.

Keywords: Longwall, Spontaneous combustion, Coal mining.

Science Code: 607.01.00



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tezin hazırlanması sürecinde bana her zaman yol gösteren, değerli katkılarını, zamanını ve birikimini benden esirgemeyen Doç. Dr. Kemal BARIŞ'a, desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan Arş. Gör. Emre GÜNAY'a ve öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olarak maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KÖMÜRÜN OLUŞUMU VE KÖMÜRLEŞME.....	5
2.1 KÖMÜRÜN OLUŞUMU.....	5
2.2 KÖMÜRLEŞME	6
BÖLÜM 3 KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI.....	9
3.1 KENDİLİĞİNDEN YANMA KURAMLARI	9
3.1.1 Pirit Kuramı	10
3.1.2 Bakteri Kuramı.....	10
3.1.3 Oksidasyon Kuramı	11
3.1.4 Nem Teorisi	11
3.2. KENDİLİĞİNDEN YANMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	11
3.2.1 Kömürün Kimyasal, Fiziksel ve Petrografik Özellikleri	13
3.2.2 Atmosferik Koşullar.....	15
3.2.3 Jeolojik Yapı ve Madencilik Tekniği.....	16

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2.3.1 Havalandırma	17
3.3 KENDİLİĞİNDEN YANMA RİSK İNDEKSLERİ	21
3.3.1 Küçük Boyutlu Testler	21
3.3.2 Büyük Boyutlu Testler	25
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
4.1 KÖMÜRÜN KISA ANALİZLERİ	27
4.1.1 Kül İçeriğinin Belirlenmesi.....	28
4.1.2 Uçucu Miktarı ve Sabit Karbonun Belirlenmesi.....	29
4.1.3 Nem içeriğinin belirlenmesi.....	31
4.2 KENDİLİĞİNDEN YANMA DENEYLERİ	33
4.2.1 Yöntem ve Deney Seti	33
4.2.2 Örneklerin Hazırlanması ve Deneilerin Gerçekleştirilmesi	35
4.3 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	41
4.3.1 Kurul Damarına Ait Sonuçlar	41
4.3.2 Acılık Damarına Ait Sonuçlar	50
4.3.3 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	59
BÖLÜM 5 SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	67
BİBLİYOGRAFYA	71
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Turba, linyit ve bitümlü kömür oluşumu	6
Şekil 3.1 Alternatif kaçak hattı.....	19
Şekil 3.2 Uzunayak “U” tipi havalandırmada göçük bölgesindeki akış yolları	20
Şekil 4.1 Taş kömürünün kısa analizinde kullanılan ekipmanlar a) 300 °C kapasiteli kül fırını b) 1300 °C kapasiteli kül fırını	27
Şekil 4.2 Kendiliğinden yanma deney setinin şematik gösterimi.	34
Şekil 4.3 Deneylerde kullanılan reaktörün şematik gösterimi	35
Şekil 4.4 Ocaktan alınan örneklerin boyut küçültmesinde kullanılan laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı.	36
Şekil 4.5 Laboratuvar ölçekli konili kırıcı.	36
Şekil 4.6 Öğütme işleminde kullanılan bilezik değirmen.	36
Şekil 4.7 Laboratuvar çalışmasında sınıflandırma için kullanılan titreşimli elek.	37
Şekil 4.8 Kurul damarı 1 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	42
Şekil 4.9 Kurul damarı 2 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	43
Şekil 4.10 Kurul damarı 3 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	43
Şekil 4.11 Kurul damarı 4 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	44
Şekil 4.12 Kurul damarı 5 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	45
Şekil 4.13 Kurul damarı 6 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	46
Şekil 4.14 Kurul damarı 7 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	47
Şekil 4.15 Kurul damarı 8 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	47
Şekil 4.16 Kurul damarı 9 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	48
Şekil 4.17 Kurul damarı 10 No’lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.....	49
Şekil 4.18 Acılık damarı 1 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	51
Şekil 4.19 Acılık damarı 2 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	51
Şekil 4.20 Acılık damarı 3 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	52
Şekil 4.21 Acılık damarı 4 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	53
Şekil 4.22 Acılık damarı 5 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	54
Şekil 4.23 Acılık damarı 6 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	55
Şekil 4.24 Acılık damarı 7 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	56
Şekil 4.25 Acılık damarı 8 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	56
Şekil 4.26 Acılık damarı 9 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	57
Şekil 4.27 Acılık damarı 9 No’lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.....	58



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Çeşitli parametrelerin kömür oksidasyon oranı üzerine etkisi	11
Çizelge 3.2 Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler	12
Çizelge 3.3 Kendiliğinden yanmanın saptanmasında kullanılan bazı deney yöntemlerinin üstünlük ve sakıncaları	22
Çizelge 3.4 Kendiliğinden yanma ile ilgili kritik faktörler	23
Çizelge 3.5 Çevre indeksi.....	24
Çizelge 3.6 Yanabilirlik, çevre ve risk indeksleri	24
Çizelge 4.1 Karadon Acılık damarı (-360/-460) örneğine ait kül içerikleri.....	28
Çizelge 4.2 Gelik Kurul damarı (-160/-260) örneğine ait kül içerikleri.	29
Çizelge 4.3 Karadon Acılık damarı (-360/-460) örneğine ait uçucu madde içerikleri.....	30
Çizelge 4.4 Gelik Kurul damarı (-160/-260) örneğine ait uçucu madde içerikleri.	30
Çizelge 4.5 İncelenen taşkömürlerine ait sabit karbon (F_c , %) değerleri.....	30
Çizelge 4.6 Karadon Acılık damarı (-360/-460) örneği nem içeriği.	31
Çizelge 4.7 Gelik Kurul damarı (-160/-260) örneği nem içeriği.....	32
Çizelge 4.8 Araştırma konusu olan taşkömürlerine ait kısa analiz sonuçları.....	32
Çizelge 4.9 Kurul damarına ait kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılan boyut dağılımları ve malzeme miktarları.	39
Çizelge 4.10 Acılık damarına ait kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılan boyut dağılımları ve malzeme miktarları.	40
Çizelge 4.11 Gelik İşletmesi -160/-260 Kurul damarı örnekleri için kesişim noktası sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları ve hesaplanan FCC indeksleri.	49
Çizelge 4.12 Karadon İşletmesi -360/-460 Acılık damarı örnekleri için kesişim noktası sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları ve hesaplanan FCC indeksleri.	58
Çizelge 4.13 Deneylere ait toplu sonuçlar.	61



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Q	: Akacak Hava
h	: Basınç Farkı
K_i	: Kül İçeriği
N_i	: Nem İçeriği
V_m	: Uçucu Madde Miktarı

KISALTMALAR

CO	: Karbon Monoksit
DTA	: Diferansiyel Isıl Analiz
FBE	: Fen Bilimleri Enstitüsü
FCC	: Feng, Chakravorty, Cochrane İndeksi
LTCC	: Longwall Top Coal Caving
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
WHITS-EHAC	: University of the Witwatersrand- Energy Hazards Advisory Committee
ZBEÜ	: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
ZDEM	: Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi
ZMYO	: Zonguldak Meslek Yüksek Okulu



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kömürün oksidasyon nedeni ile kendiliğinden ısınması ve ısı birikiminin ortamdaki uzaklaştırılmaması nedeni ile açık alevli yangınlara sebep olabilmesi madencilikte kendiliğinden yanma olarak adlandırılmaktadır. Kömürün kendiliğinden yanması; yeraltı ve açık ocak madenciliğinde hem emniyet hem de ekonomi açısından uzun yıllardır büyük sorunlar yaratmaktadır. Özellikle ülkemizde 2014 yılında yaşanan Soma Maden Faciasından sonra kömürün kendiliğinden yanması olayı tekrar gündemde ilk sıralara yerleşmiştir.

Bir ocakta kendiliğinden yanmanın oluşması için gerekli üç temel şart şunlardır:

Oksitlenmeyi oluşturacak hazır kömür,

Oksitlenme işlemi destekleyecek hazır oksijen,

Isının birikimine yatkın ocak şartları.

Bir ocakta yukarıda belirtilen şartların oluşması kömürün niteliği ve ocak şartlarına bağlıdır. Bu şartlar; kömürün özellikleri, jeolojik yapısı, madencilik pratiği ve ocak çevresidir (Feng vd. 1973, Kuchta vd. 1980).

Kömür, oksitlenmeye yatkın bir madde olup, normal çevre sıcaklıklarında oksijen ile birleşebilmekte, ardışık bir işlemle ısı artışı olmakta ve sonuç olarak da kendiliğinden yanma meydana gelmektedir (Karaçam 1988).

Kömürün kendiliğinden yanmasıyla ilgili olarak, genelde, kabul edilen teori, uygun atmosferik koşullarda kömürün oksijeni absorbe etmesine (oksidasyona) dayanmaktadır. Kömürle oksijen arasında dışarı ısıveren (ekzotermik) bir kimyasal tepkime söz konusudur (Güney 1968).

Kömür yüzeyleri havayla temas eder etmez oksidasyon olayı başlamaktadır. Ocakta, normal koşullar altında, dışa verilen ısı alınmakta ve oksidasyon, yavaş bir biçimde ve bir kızışma tehlikesi doğurmaksızın sürmektedir. Ancak, bazı durumlarda dışa verilen ısı, ortamdan ayrılammakta ve sıcaklık giderek artmaktadır. Sıcaklık arttıkça ortamda yeterli oksijen varsa oksidasyon hızı da artmakta ve buna bağlı olarak kömürün sıcaklığı yükselmektedir. Kömürün tutuşma sıcaklığına (kritik sıcaklık) ulaşıldığında ise, yanma olayı baş göstermektedir (Güney 1968).

Kömürlerde kendiliğinden yanma düşük sıcaklıkta oksitlenmeyle başlayıp artan ısı birikmesi nedeniyle alevli yanmaya kadar varabilen ekzotermik bir olaydır. Wang ve arkadaşlarının (1993) yaptığı çalışmalarda, kömür yüzeylerinin oksijen adsorbe etmesi sonucu ortamdaki oksijen tüketiminin kendiliğinden yanma olayının başlamasının ilk adımı olarak tespit edilmiştir. Oksijen adsorbsiyonunun devam etmesi sonucu, 40°C üzerinde ortam ısısı yükselmektedir. Bu ısı ortamdan uzaklaştırılmadığı takdirde 70°C'den sonra CO ve CO₂ gazlarının hacimce konsantrasyonu artmakta ve 125°C'de su buharı oluşmaktadır. Artan ısıyla beraber kömürün tutuşma sıcaklığına ulaşması sonucu, alevli yanma başlamaktadır. Kendiliğinden yanma genellikle düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerde meydana gelmektedir (Biçer 2011).

Kömür üreticiliği yapan tüm ülkelerin karşılaştığı en önemli sorunlardan birisi, kömürün kendiliğinden yanmasıdır. Kömürün kendiliğinden yanması hem ekonomik açıdan hem de güvenlik açısından kömür işletmecilerinin yüzyıllardır üstesinden gelmeye çalıştığı en büyük sorunlarından birisidir.

Kömürün kendiliğinden yanması sonucunda ortaya çıkan CO (karbon monoksit) gazı zehirlenmesi nedeniyle ölüme yol açabilecek şekilde zarar görme, bırakılan topukların açık alev ya da içten yanması sonucunda tavan göçmeleri, yanma sonucunda kömürün kaybedilmesi ve yangın barajları arkasında ekonomik olarak işletilebilir rezervlerin bırakılmak zorunda kalması, yeraltında olası bir yangının yaratılabileceği başlıca sorunlar arasında gösterilebilir (Eroğlu 1993).

Dünya kömür sanayisi için çok uzun zamandır büyük tehlikeler oluşturan kendiliğinden yanma olayı, dünyada en fazla maden ocaklarının bulunduğu Çin'de sadece yeraltında çıkan yangınlardan dolayı yılda ortalama 200 milyon ton kömürün kullanılamaz hale gelmesine neden

olmaktadır. Kendiliğinden yanma olayı yeraltında oluşabileceği gibi çıkarılan kömürün depolanması ve uzun süreli denizyolu nakliyatı sırasında yani yer üstünde de ortaya çıkabilir. Sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla reaksiyon hızının artışına neden olan, kömür ile oksijen arasındaki ekzotermik reaksiyon bu olaydaki temel işlemi oluşturmaktadır. Kömürün rankı, kömürün oksijen içeriği, havanın akış hızı, tane boyutu, kömürün nem içeriği ve havanın nemliliği gibi faktörler kömür yığınının kendiliğinden yanmasında önemli rol oynamaktadır (Barış 2006).





BÖLÜM 2

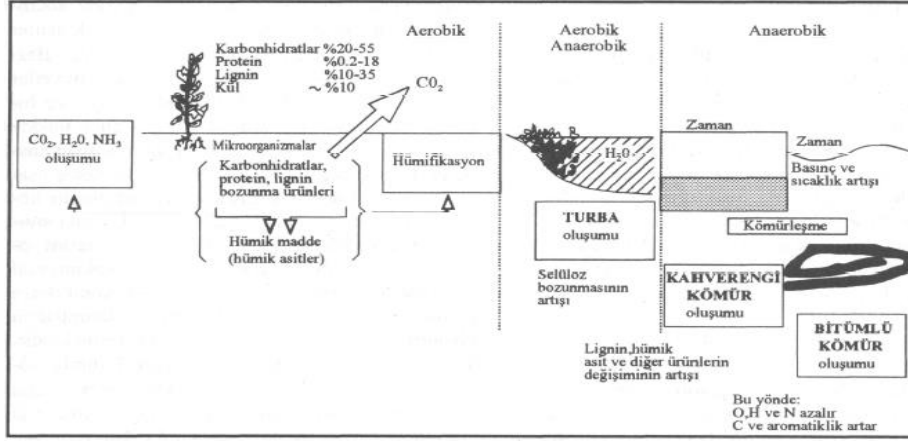
KÖMÜRÜN OLUŞUMU VE KÖMÜRLEŞME

Kömür, havanın oksijeni ile doğrudan doğruya yanabilen %55 ile %95 arasında değişen oranlarda, serbest veya bileşim halinde karbon içeren, yandığında değişik miktar ve bileşimde kül bırakan organik kökenli tortul bir kayadır (Nakoman 1971).

2.1 KÖMÜRÜN OLUŞUMU

Kömürün ana bileşeni karbondur. Bu nedenle oluşum karbon çevrimine bağlıdır. Kömür oluşumlarının başlıca kaynakları bitkiler ile havadan veya yüzeysel sulardan alınan CO₂'dir. Hava ve sudaki CO₂'in önemli bir bölümünü bitkiler özümlemekte ve yaşamları için gerekli olan miktarı yapılarında tutmakta, artanı da solunum yoluyla geriye vermektedirler. Bu çevrimde kömür, uygun ortamlarda, bataklıklarda bozunma ve çürümeden kurtulan bitki kalıntı birikimlerinin, zamanla biyokimyasal ve fiziksel etkilerle değişimi sonucu oluşmaktadır. Kömürleşme genelde iki evrede meydana gelmektedir. Bunlar Biyokimyasal Evre (Turbalaşma) ve Jeokimyasal Evre (Kömürleşme)'dir (Özpeker 1991).

Kömür oluşumunun ilk evresini bir kömür olmamakla birlikte turba oluşturmaktadır. Turba, belirli bir jeolojik zaman içerisinde, artan sıcaklık ve basınç etkisiyle bir dizi fiziksel ve kimyasal değişiklikler geçirir ve en son aşamada antrasit ve meta antrasite dönüşür. Bu süreçte kömürleşme denmektedir. Şekil 2.1'de kömürleşme süreci görülmektedir.



Şekil 2.1 Turba, linyit ve bitümlü kömür oluşumu (Flaig 1968, Karayigit'den 1998).

Kömürlerin oluşumunu kabaca, günümüzde turbalıklarda devam eden oluşum ile karşılaştırmak mümkün olmaktadır. Kömürler, günümüzde küçük, sığ göllerde, bataklıklarda ve su altındaki ormanlarda var olan turbalar gibi, doğal şartlar altında çökelen bitkisel artıkların, yükseltgenme, indirgenme, hidroliz ve yoğunlaşma gibi fiziksel olayların etkisinde kalmasından oluşmaktadır (Nakoman 1971).

2.2 KÖMÜRLEŞME

Kömürleşme, turbanın jeolojik ve kimyasal etmenlerin etkisi ile çeşitli derecedeki kömürlere (liniyit, yarı bitümlü ve bitümlü kömürlere, antrasit ve metaantrasitlere) dönüşmesi olayıdır (Buzkan 1990).

Çoğunlukla bitkisel maddeler veya bitki parçaları, uygun bataklık ortamında birikmekte, çökelmekte ve jeolojik işlevler ile birlikte yer altına gömülmektedirler. Yerin altında bu organik kütleler, gömüldükten sonra, önceleri gömülmenin oluşturduğu basınç şartları daha sonra da ortamın ısısal şartlarından etkilenmektedir. Bu etkilenme sonucu organik maddenin bünyesinde fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir (Spackman 1958). Önceleri turba olarak adlandırılan ve kömürlerin ataları olarak bilinen bu organik maddeler, yavaş yavaş daha koyu renklere ve daha sert yapıya sahip olmaktadır. Sıcaklık ve basınç şartlarının bu kütlelere etkimesi sonucu, bu ortamdan, sırasıyla önceleri (turba-taşkömürü aşamasına kadar) su ve su buharı, CO₂, CO, taşkömürü aşamasında CH₄, O₂ ve en ileri aşamalarda (antrasit aşamasında) H₂ uzaklaşmaktadır. Bu süreçte ideal şartlar ve ortamın ısısal şartlarının uzun bir dönem içerisinde (binlerce yıl) baskın olması ve artması gerekmektedir. Yerin ısısı artıkça önceleri

“Turba” olarak adlandırılan ama kömür sayılamayan bu organik madde, önce “Linyit”, daha sonra “Alt Bitümlü Kömür”, sonra “Taşkömürü”, “Antrasit” ve en sonunda şartlar uygun olursa “Grafit”e dönüşmektedir. Bu ilerleyen olgunlaşma sürecine “Kömürleşme” denilmekte, her seviyede “Kömürleşme Derecesi-Rank” adını almaktadır (Toprak 2000).

Kömür türlerinde, kömürleşme derecesi arttıkça kömürler koyulaşmakta ve parlaklıkları giderek artmaktadır. Bu artış, elementer karbon içeriğinin artışı ile doğru orantılıdır. Kalorifik değer ise nem, uçucu madde ve oksijen içeriğinin artışı ile azalmaktadır. Hidrojen oranı antrasit ve semiantrasit’e kadar sabit kalırken son iki grupta artacak şekilde değişmektedir (Nakoman 1971).

Kömürleri meydana getiren makroskobik ve mikroskobik organik yapı bileşenleri Stach ve ark. (1982) tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

- Litotipler; makroskobik olarak görülebilen mikrolitotiplerin birleşmesinden meydana gelen tabaka veya kısımlara denilmektedir.
- Maseraller; kömürlerin elementer petrografik organik bileşenleridir. Başka bir tanımlama ile kömürlerin mikropetrografik organik bileşenleridir. Bunları kayaçları oluşturan minerallere benzetmek mümkündür.
- Maseral grupları; petrografik özellikleri birbirine benzeyen maseraller, maseral grupları altında toplanmaktadır.
- Mikrolitotipler; kömürlerde mikroskobik gözlemlerle teşhis edilen maserallerin tipik bileşimlerinden meydana gelmiş kalınlığı en az 50 mikron olan tabakalar mikrolitotip olarak adlandırılmaktadır.



BÖLÜM 3

KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI

Kömür, oksitlenmeye meyilli bir madde olup, normal çevre sıcaklıklarında oksijen ile birleşebilmekte, ardışık bir işlemle ısı artışı olmakta ve sonuç olarak kendiliğinden yanma meydana gelmektedir (Karaçam 1988). Kömürün kendiliğinden yanması; madencilik çalışmaları ve kömürün stok alanlarında karşılaşılan en büyük iş güvenliği sorunlarından biridir.

Bu olayda temel işlem, sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla reaksiyon hızının artışına neden olan, kömür ile oksijen arasındaki ekzotermik reaksiyondur. Bir kömür yığınının kendiliğinden yanmasında; kömürün rankı, kömürün oksijen içeriği, havanın akış hızı, tane boyutu, kömürün nem içeriği ve havanın nemliliği gibi faktörler rol oynamaktadır. Bu bağlamda, kömürün tek başına oksijenle reaksiyonu olayın gerçekleşmesi için yeterli değildir. Kendiliğinden yanma olayının başlaması için fiziksel şartların da uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle, kendiliğinden yanma; havalandırmanın kömür-oksijen reaksiyonunu sınırlandıramayacak kadar çok olduğu ya da oluşan ısının tümünü uzaklaştıramayacak kadar az olduğu durumlarda oluşur. Böyle durumlarda, belli bir zaman geçtikten sonra bir miktar kömür kütlesi ısınarak yanma sınırına gelir (Barış 2006).

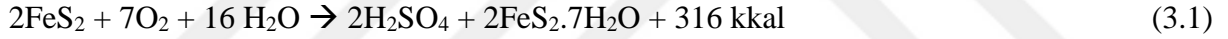
3.1 KENDİLİĞİNDEN YANMA KURAMLARI

Kömürün kendiliğinden yanmasına ait ilk resmi kayıtlara 1604 yılında Griff kömür madeninde rastlanmış olup (Morris 1896), eski madenciler yeraltında göçüklerde oluşan yangın ve patlamaları olağanüstü nedenlere bağlamışlardır.

Kömürün kendiliğinden yanmasıyla ilgili 4 kuram mevcuttur. Bunlar; Pirit Kuramı, Bakteri Kuramı, Oksidasyon Kuramı, Nem Kuramıdır.

3.1.1 Pirit Kuramı

Piritin oksidasyonundan kaynaklanan ısı genellikle pirit madenlerinde bilinen bir olaydır. Kömür içeriğinde de zaman zaman %12'lere varan miktarlarda, genellikle demir piritler halinde, pirit bulunabilir (Wilfrid 1961). Pirit oksidasyonu önceleri kendiliğinden yanmanın asıl sebebi olarak bilinse de daha sonraları pirit oksidasyonunun kömürün küçük parçalara ayrılmasına ve böylece daha büyük yüzey alanının oluşmasına yol açtığı kanıtlanmıştır (Coward 1957). Ancak, Schmal (1989) kömür-pirit etkileşiminden meydana gelen ısının kömür-oksijen etkileşiminden meydana gelen ısının %10'u olduğunu ve pirit içeriğinin çoğu kömürler için %1'in altında olduğunu ifade etmiştir. Bu nedenle, normal şartlar altında çoğu kömür için kömürün oksidasyonu sırasında pirit reaksiyonlarından açığa çıkan ısı küçüktür ve çoğu zaman hesaplamalarda kullanılmaz (Wang 2003a). Winmill (1915), kömürün ısınmasına piritin etkilerini araştırmış ve piritin sadece belli miktarlarda ve ince boyutlarda olduğunda ısınmaya yol açtığını göstermiştir (Banerjee 1985). Graham (1923) da Winmill'in çalışmalarını iletmiş ve piritin ince boyutlarda 11 bulunduğu hızla oksijeni absorbe ettiğini gözlemlemiştir (Banerjee 1985). Piritin oksidasyon reaksiyonu genel olarak aşağıdaki gibidir.



Bu reaksiyon ekzotermiktir ve görüldüğü gibi reaksiyonun ürünler kısmında piritin hacmi büyümekte ve bu da kömürün parçalara ayrılmasına dolayısıyla yüzey alanının büyümesine neden olmaktadır.

3.1.2 Bakteri Kuramı

Bakteriyel işlemlerin kömürün ısınmasına katkısı henüz kesin olarak açıklık kazanmamıştır. Aslında, odundaki kendiliğinden yanmanın büyük ölçüde bakteriyel işlemlerden dolayı meydana geldiği bilinmektedir. Potter (1908), diplococcus kültürü ile yaptığı araştırmalarda kömürde bakteriyel işlemlerden dolayı bir ısınma gözlemlemiştir (Banerjee 1985). Başka birçok araştırmacı da bu konuyu araştırmış ve bunlardan Fuchs (1927) bakterilerin önemli bir etki yapmayacak kadar düşük bir ısınmaya yol açtığı sonucuna varmıştır (Banerjee 1985).

3.1.3 Oksidasyon Kuramı

Kendiliğinde yanma teorileri arasında en çok kabul gören bu teoride oksijenle temas eden kömür oksitlenmekte ve ısısı yükselmektedir. Birçok araştırmacı da kömürün havayla temasından çeşitli sonuçlar bulmuşlardır.

Wade ve Eroğlu'nun (Wade 1988; Eroğlu ve Gouws 1993) yaptığı kömür parametrelerinin oksidasyon üzerindeki etkileri araştırılmış ve Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çeşitli parametrelerin kömür oksidasyon oranı üzerine etkisi.

Parametre	Parametre Artışının Oksidasyon Oranına Etkisi
Tane İriliği	Azalı
Sıcaklık	Artar
Nem	Artar
Ön ısıtma	Artar
Oksijen	Artar
Oksijen kısmi basıncı	Artar
Uçucu madde içeriği	Artar
Kömürleşme rankı	Azalı
Karbon içeriği	Azalı
Oksijen içeriği	Artar
İç nem	Artar

3.1.4 Nem Teorisi

Kömürün sıcaklığının nem sebebi ile artması ile ilgili kaynaklarda iki mekanizmadan bahsedilmiş olup bunlar; kömürün ıslanması ile bir ısının açığa çıkması ve kömür oksidasyon tepkime hızının artışıdır (Wade 1988). Nemli havada ısının yayılması daha hızlı gerçekleştiğinden kendiliğinden yanmaya daha müsait bir ortam oluşmaktadır.

3.2 KENDİLİĞİNDEN YANMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kömürün kendiliğinden yanmasının gerçekleşmesi için, çevre sıcaklığında, oksijenle kömürün tepkimeye girmesi ve açığa çıkan ısı enerjisinin ortamda birikmesi yeterlidir. Banarjee (1982) kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörleri:

- Kömür ile oksijenin etkileşimini hızlandıran faktörler (nem, oksitlenmeye açık yüzey alanı vb.),
- Etkileşim sonucu çıkan ısının birikimine yardımcı olan faktörler (ısı iletkenliği, zaman, yan kayaç özellikleri vb.) olarak, gruplandırılmıştır.

Kömürün kendiliğinden yanması ve bu olayı etkileyen faktörler üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olmasına karşın, konu henüz tam anlamıyla aydınlatılamamıştır. Bunun başlıca nedeni, kömürün karmaşık yapısı ve etkenlerin çokluğudur (Ökten 1988).

Olaylar üzerinde etkili olan faktörlerle ilgili en geniş kapsamlı derlemelerden biri olan çalışmada Güney; oksidasyon ve kendiliğinden yanmayı etkileyen çok sayıda faktörü, "iç (Endojen)" ve "dış (Ekzojen)" faktörler olarak gruplandırmaktadır. İç faktörler, kömürün özellikleri ile ilgili olup dış faktörler ise jeolojik ve atmosferik koşullar ile işletme koşullarından oluşmaktadır (Didari 1986). Çizelge 3.2'de kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler belirtilmiştir.

Çizelge 3.2 Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler (Güney 1971'den değiştirilerek).

İç (Endojen) Faktörler	Dış (Ekzojen) Faktörler	
Kömürün Kimyasal, Fiziksel ve Petrografik Özellikleri	Atmosferik koşullar	Madencilik Tekniği ve Jeolojik Yapı
Kömürleşme derecesi	Sıcaklık	Damar ve yan taş özellikleri
Petrografik bileşim	Nem	İşletme koşulları
Nem içeriği	Oksijen konsantrasyonu	Havalandırma koşulları
Kül içeriği		
Tane boyutu		
Pirit içeriği		
Damar gaz içeriği		
Kömür dayanımı		
Gevreklik		
Geçirgenlik		

3.2.1 Kömürün Kimyasal, Fiziksel ve Petrografik Özellikleri

Kendiliğinden yanma esasta karbon malzemesi ile ilgili bir yüzey oksidasyonu olayıdır. Doğası; oksidasyon süresine, sıcaklığa ve kömür türüne bağlıdır (Banarjee 1985). Kendiliğinden yanma kömürlerin rankları (kömürleşme dereceleri) ile yakından ilgilidir (Didari, 1986). Düşük kaliteli kömürler kendiliğinden yanmaya çok daha yatkın olmaktadır (Durucan ve Güyagüler, 1985). Bu nedenle linyitler ve kahverengi kömürlerin özellikle depolanmaları sırasında büyük sorunlar çıkmaktadır.

Feng ve arkadaşları (1973), petrografik bileşenlerden vitrenin, diğer bileşenlere göre daha kolay oksitlendiğini ileri sürmüşlerdir. Chamberlain ve Hall (1973), aynı ranklı kömürlerde exinitin, vitrinit veya inertinite göre daha hızlı oksitlendiğini belirtmişlerdir. Kömür damarının petrografik bileşenleri kendiliğinden yanma çalışmalarında bazı komplikasyonlara işaret etmektedir. Mikrolitotipler olarak bilinen kömürdeki ince bantlar maseral ve mineral maddelerin çeşitli karışımlarından oluşmaktadır. Bu bantlar kömürleşme derecesindeki değişimlerle fiziksel ve kimyasal değişimler göstermektedir. Yüzey kimyası ve yüzey alanındaki değişim nedeniyle herhangi bir kömürleşme derecesi için maserallerin oksijen absorpsiyon yoğunlukları ve üretecekleri ısı değişmektedir. Ayrıca, maserallerin ateşlenme sıcaklıkları da farklılık göstermektedir. Vitren, klaren, düren ve füzenin oksijen absorplama kapasitesi hakkında çok çelişkili bilgiler bulunmaktadır. Bu bilgilerin elde edildiği çoğu çalışmada öğütülmüş kömürler kullanılmış ve farklı atmosferlerde çalışmalar yapılmıştır. Böylesi koşullar, örneğin, füzenin oksijen adsorpsiyonu için dürenden daha fazla yüzey alanı sağlaması gibi gerçek koşulları yok etmektedir. Halbuki oksijene olan ilgisinden dolayı dürendeki kimyasal adsorpsiyon birim alanda daha fazla ısı yaymaktadır. Bu nedenle her bir yeraltı koşulu kömür damarının petrografik yapısından, madencilik ve atmosferik koşullardan dolayı kendine özgüdür.

Kömür damarının yerinde nem içeriği damarın geçirgenlik ve doygunluk derecesi ile değişmektedir. Eğer nem bir kömür damarında boşalırsa ortaya çıkan gözenek boşlukları adsorbe ya da desorbe gazlarla dolacaktır. Bu durumda eğer oksijen adsorbe olursa ortaya çıkan ısı sıcaklıktaki artışı ya da potansiyel bir ısınmayı engellemek üzere ortamdan uzaklaştırılmalıdır. Su eğer bir yüzeyden buharlaşırsa buharlaşma ısısı katı yüzeyinden uzaklaşır ve bu nedenle yüzey sıcaklığında bir azalma olur. Ters bir durum olur ve katı yüzeyinde su yoğunlaşırsa bu sefer buharlaşma ısısı katıya iletilir ve sıcaklıkta yükselmeye

neden olur. Havadaki nem miktarının yüksek olması, su buharının kömür tarafından adsorplanmasını kolaylaştırır. Bu olay sonucu açığa çıkan ısı, oksidasyon hızını arttırmaktadır (Ökten 1988). Clarkson vd. (2007)'nin gerçekleştirdiği kesişme noktası deneylerinde nemin oksidasyon işlemini geciktirdiği ve oksidasyon ısısının bünye neminin buharlaşmasında tüketildiğini göstermiştir. Beamish ve Beamish (2010) oksidasyonun eksponansiyel fazının bünye neminin %50'si gittiğinde başladığını iddia etmiştir. Ayrıca, Beamish ve Hamilton (2005) Callide kömürünün R_{70} değerinin nem içeriği arttıkça ciddi oranda azaldığını bulmuştur.

Güney (1968), kömürlerdeki yüksek kül içeriğinin, karbon miktarını azaltmasından dolayı, kendiliğinden yanmayı azaltacağını belirtmiştir. Ayrıca, kül içindeki kireç, soda, demir bileşikler vb. malzemelerin oksidasyonu hızlandırıcı, alüminyum ve silis gibi malzemelerin ise yavaşlatıcı etkisi olabileceğini ileri sürmüştür. Sujanti ve Zhang (1999) inorganik maddenin Victoria kahverengi kömürünün kendiliğinden yanması üzerindeki etkisini incelemek için bir izotermal reaktör kullanmıştır. Bu araştırmacılar bünyedeki inorganik maddenin kömürün kendiliğinden ısınma potansiyelini azaltmada yardımcı olduğunu bulmuşlardır. Kullandıkları 11 katkı maddesinden dördü, FeS_2 , KAc , $NaAc$ ve $CaCO_3$, kendiliğinden yanmayı hızlandırmıştır. İki tanesi etki yapmazken beş tanesi ise, $CaCl_2$, $Mg(Ac)_2$, KCl , $NaCl$ ve Montan Tozu, kendiliğinden yanmayı engellemiştir.

Kömürdeki pirit, özellikle rutubetli ortamda kolayca oksitlenebilmekte (Durucan ve Güyagüler 1985), fazla miktarda ve çok ince taneli olarak bulunması halinde tepkime hız kazanmaktadır (Ökten, 1988). Ayrıca, pirit oksitlendiğinde şişerek kömürün parçalanmasına, diğer bir deyimle yüzey alanının artmasına neden olmaktadır (Feng et al. 1973). Reaktif olmayan bir kömürün üretildiği bir kömür ocağında tabanda bir dizi ısınma olayının yaşanmasının ardından Miron vd. (1992) laboratuvarında yaptıkları çalışmada, olayın ciddi miktarlardaki pirit varlığından kaynaklandığını ve çatlaklara yol açan taban kabarması sonucunda pirit havayla temas geçtiğinde oksidasyonun oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Geçirgen kömür damarlarının iç yüzeylerindeki oksidasyon normalde metan ve karbon dioksit gibi damar gazlarının ocak atmosferine desorpsiyonu ile gecikmektedir. Bu durum gaz basıncının ocak atmosferik basıncından yüksek olduğu durumlarda bu şekilde devam etmektedir. Hatta desorbe olan gaz barajlanmış alanlarda ya da göçüklerde inert atmosferler oluşturmak için kullanılabilir. Ancak, negatif basınçlar kullanarak madencilik sonrası drenaj yapıldığında bu durum değişebilmekte ve göçük bölgelerine hava çekilebilmektedir.

İdeal olarak gaz üretim hızı desorpsiyon hızını aşmamalıdır. Eğer uygun şekilde kapatılmazlarsa gaz drenaj delikleri topluklarda kaçak yolları haline dönüşmektedir.

Kömürün dayanımı kömür parçacıklarının ne kadar kolay kırıldığını ve daha büyük yüzey alanına yol açan daha küçük parçalar oluşturduğunu etkilemektedir. Yüksek dayanımlı kömürler özellikle göçükte daha küçük yüzey alanına sahip olacakları için kendiliğinden yanma işlemini geciktirebilmektedir. Bu tür kömürlerde özellikle kömürün oldukça küçük tanelere parçalanabileceği fay bölgelerinde dikkatli olunmalıdır.

Kömürün gevrekliği kömürün daha küçük tanelere ne kadar kolay kırılabilceğinin bir ölçüsüdür ve direk olarak dayanımla alakalı olmak zorunda değildir. Küçük tane boyutları reaksiyonlar için daha büyük yüzey alanları sağlamaktadır.

Kömürün permeabilitesi, kömürün gazı ne kadar yayacağı ve tersi şekilde oksijenin kömür gözeneklerine ne kadar gireceğinin bir ölçüsüdür. Tanım olarak yüksek permeabiliteye sahip kömürler gazların gözenek ve çatlaklardan hareketine izin vermekte ve bünyelerindeki gazı ocak atmosferine kolaylıkla salmaktadır. Metan drenajı ya da ocak havalandırma sistemlerince bir basınç farkı yaratılırsa havanın kömür içine çekilmesi olasılığı bulunmakta ve bu da bir kendiliğinden yanmanın gelişmesine yol açabilmektedir.

3.2.2 Atmosferik Koşullar

Ortam sıcaklığının önemli bir faktör olduğu kabul edilmektedir. Genel olarak, 30-100 °C arasında, her 10 °C sıcaklık yükselmesi sonucu oksidasyon hızının 2.2 defa arttığı saptanmıştır (Erkan 1964, Ökten'den 1988).

Gerek kömürün higroskopik nem içeriği gerekse de ocak havasının nemliliği ve nem basıncı, kömürün oksitlenme hızı ve kendiliğinden yanma karakteri üzerinde büyük bir etki yaratmaktadır (Durucan ve Güyagüler 1985).

Feng (1985), Kanada kömürleri üzerinde yaptığı bir çalışmada yüksek metan içeriğine sahip olan damarların oksidasyona daha az yatkın olduğunu saptamıştır.

Oksidasyon hızının, ortamdaki oksijen konsantrasyonu %20'ye ulaşmaya kadar arttığı, daha sonra önemli ölçüde yavaşladığı belirlenmiştir (Ökten 1988).

3.2.3 Jeolojik Yapı ve Madencilik Tekniği

Kendiliğinden yanmanın oluşması riskinde temel etken kömür damarı ve üretim kalınlığını ilişkilendirmesi açısından çalışma işyerlerinin arkasında bırakılan parçalanmış kömürdür. Eğer kömür damarı %100 üretilebilirse kendiliğinden yanma riskinin asgari olacağı açıktır. Bir kesimde kömür damarının tamamı alınabilirse göçükte kalacak parçalanmış kömür miktarı en az olacağından kendiliğinden yanmanın oluşma riski de en az olacaktır. Kömür damarının kalınlığı arttıkça potansiyel kömür kayıpları da artmaktadır. Kalın kömür damarlarının üretilmesi göçükte kalacak kömür miktarını arttırmaktadır. Arkadan Göçertmeli UzunAyak (Longwall Top Coal Caving –LTCC) yöntemiyle kalın kömür damarlarında geri kazanım oranları önemli ölçüde arttırılmıştır. Ancak bu yöntemin uygulanmasında özellikle tavan kontrolü, arında toz kontrolü konularında sorunlar oluşmaktadır. Kalın damarların çalışılmasında kırılmış kömür oluşumu madencilik yöntemlerinin yanında jeolojik faktörlere de bağlıdır. Kömür dayanımı, çatlak yoğunluğu ve yönü, yerinde gerilme koşulları ve faylanma çalışma alanları arkasında kalacak parçalanmış kömür miktarını arttırmaktadır.

Dönümlü ve dolgulu çalışmaların, kendiliğinden yanma olasılığını azalttığı bilinmektedir. Ayrıca, uzun süre bekleyen ayaklarda göçük yangınlarının daha çok oluşması, yüksek arın ilerleme hızının olayı engelleyebilecek bir unsur olduğunu göstermektedir (Güney 1968). Ayak arkasının tam oturmuş olması, hava kaçaklarını engelleyeceğinden, önem taşımaktadır. Dolgunun, boşlukları iyi dolduracak bir biçimde (örneğin pnömatik dolgu) yapılması gerekmektedir (Didari 1986).

Kalın damarların bulunduğu sahalarda, derin ocaklarda, göçüklerin yeryüzüne erişebildiği sığ ocaklarda, jeolojik arızaların çok sık yer aldığı panolarda, yangın çıkması olasılığının daha yüksek olduğu uygulamadan bilinmektedir. Derin ocaklarda jeotermik gradyanın artışı ve artan arazi basıncı nedeniyle kırılan ve ezilen topuklar kendiliğinden yanmaya zemin hazırlamaktadır. Ayağın düzgünlüğünü korumakta güçlük doğuran, göçüklere yol açarak havanın akışına engel olup kaçakların artmasına yol açan arızalar ile çok sayıda damarın çalışıldığı ocaklarda komşu damarlara hava kaçaklarına yol açan arızalı yan taşlar kendiliğinden yanmayı kolaylaştırıcı faktörlerdir (Didari 1986).

Bir ocak kesiminde yüksek basınç farkları, kırılmış topuklara, damar kısımları içine ve göçük sahasına fazla oranda hava kaçağına yol açacaktır. Hava miktarının artırılması amacıyla, ocak vantilatörünün değiştirildiği ya da kollara vantilatör eklenmesi vb. değişikliklerin yapıldığı yerlerde, kendiliğinden yanma olaylarının arttığı gözlenmiştir (Feng et al. 1973).

3.2.3.1 Havalandırma

Kendiliğinden yanmaya neden oluşan koşullar arasında havalandırmaya ayrı bir önem atfetmek kaçınılmazdır. Bir kömür ocağında kendiliğinden yanmanın oluşabilmesi için üç koşul aynı anda bulunmalıdır:

- i. Okside olabilecek bir malzeme
- ii. Malzemenin üzerinde oksidasyona yol açacak ve onu sürdürecektir yeterli miktarda oksijeni sağlayan bir hava akımı ve
- iii. Isı kaybı hızını aşan ısı kazanım hızının bulunduğu bir ortam

Ocakta havalandırmanın önemi ve kendiliğinden yanmanın kontrolündeki etkisi yukarıda sayılan son iki koşuldan açık şekilde görülmektedir. Havalandırma, ya da havalandırma kontrolündeki yetersizlik, madencilik koşullarında kendiliğinden yanma oluşumunda çok önemli bir rol oynamaktadır.

Bir ocakta havalandırmanın temel amacı

- i. Yeraltındaki işgücüne temiz, kirlenmemiş hava sağlamak
- ii. Operasyonlar sırasında ortaya çıkan zehirli ve yanıcı gazları seyreltmek ve ortamdaki uzaklaştırmak,
- iii. Operasyonlar sırasında oluşan tozu seyreltmek ve ortamdaki uzaklaştırmak ve
- iv. Çalışma işyerlerinde sıcaklık ve nem standartlarını sağlamak.

Maalesef, havalandırmanın temel amaçları büyük oranda kendiliğinden yanmayı kontrol etmek için gereken koşulların tersinedir zira okside olabilecek malzemenin bulunduğu ortama büyük miktarda oksijen sağlamaktadır. Ocak işyerlerinde havalandırma amaçlı hava akımı basınç farkları yaratılarak sağlanmaktadır. Yeryüzündeki ana emici vantilatörlerce yeraltında yaratılan negatif basınç havanın hava yollarında akmasına neden olacak gerekli basınç farkını

sağlamaktadır. Hava akımının miktarı; akışa karşı olan direnç ve uygulanan basınç farkı ile belirlenmektedir.

Türbülanslı akışın mevcut olduğu belirli bir basınç farkının olduğu bir durumda bu yoldan akacak hava (Q) basınç farkının (h) karekökü ile doğru orantılıdır ($Q \propto \sqrt{h}$). Laminer akışın olduğu durumda ise yoldan geçecek hava basınç farkı ile doğru orantılıdır ($Q \propto h$). Ocakta laminer akışın oluşabilmesi için:

- i. Basınç farkının ve hava hızlarının çok düşük olması ya da
- ii. Düşük hava hızlarına neden olacak şekilde hava yolu direncinin yüksek olması gerekmektedir.

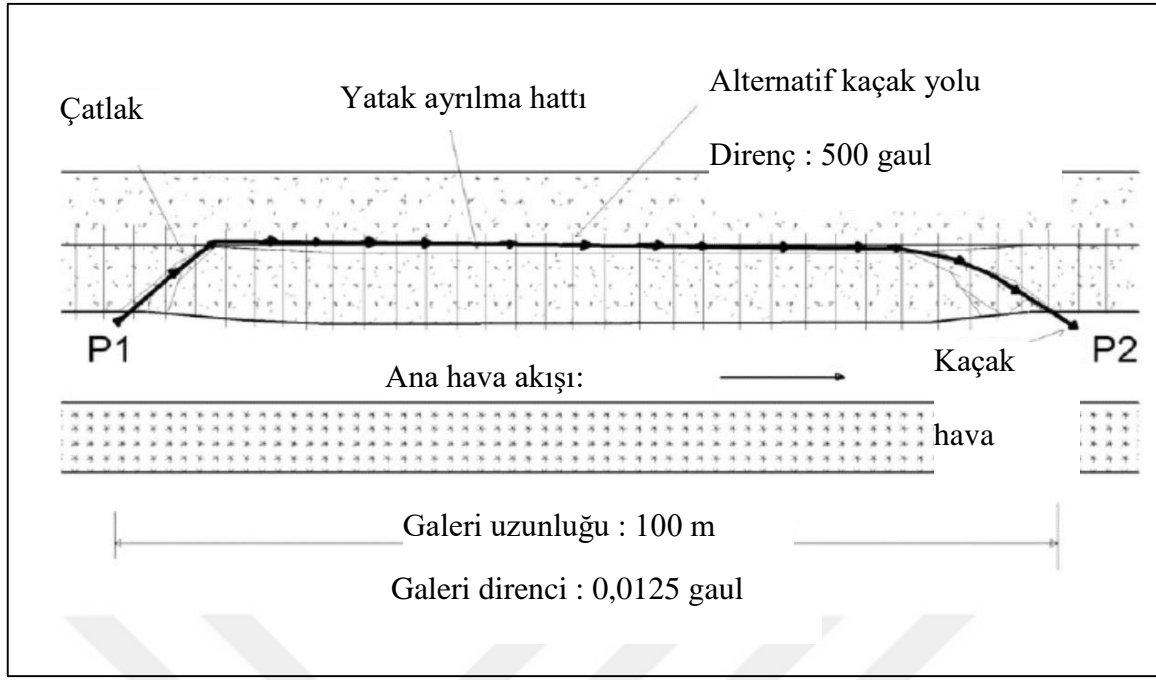
Yeraltı kömür ocaklarında yukarıdaki koşulların bulunabileceği yerler:

- i. Çok düşük seviyede hava geçmesine izin verilen aktif olmayan ya da eski ve terkedilmiş ocak kesimleri
- ii. Ciddi basınç farklarına maruz kalan yüksek dirençli alternatif akış yollarıdır.

Yukarıdaki koşulların oluşabileceği yerler ise:

- Hava dönüş yolları ve giriş yolları arasındaki ezilmiş topuklar
- Ana yollardaki parçalanmış ama duraylı kömürler
- Yeterince tahkim edilmemiş tavan malzemesindeki yatak ayrılmasıyla oluşan pasajlar
- Etrafında kömür bulunan kötü kapatılmış baraj, hava köprüsü, regülatör yapıları kenarları
- Kısmi olarak oturmuş göçük pasajları (özellikle taban yolu tarafı ve ayak başlangıç hattı)

Laminer akım nedeniyle bu tür alternatif yollarda ciddi hava akışları oluşabilmekte ve bu da kendiliğinden yanma olaylarına neden olabilmektedir. Eğer yatak ayrılma hattı kömür ya da okside olabilir başka bir malzemede oluşursa bu kaçak hattındaki laminer hava akımı yeterli miktarda oksijen sağlarken sıcaklık artışını engelleyecek ısıyı ortamdan uzaklaştırılabilmektedir (Şekil 3.1). Bu da kontrol edilemeyen bir kendiliğinden ısınmanın başlamasına yol açabilmektedir.



Şekil 3.1 Alternatif kaçak hattı (Cliff vd. (2015)'den değiştirilerek).

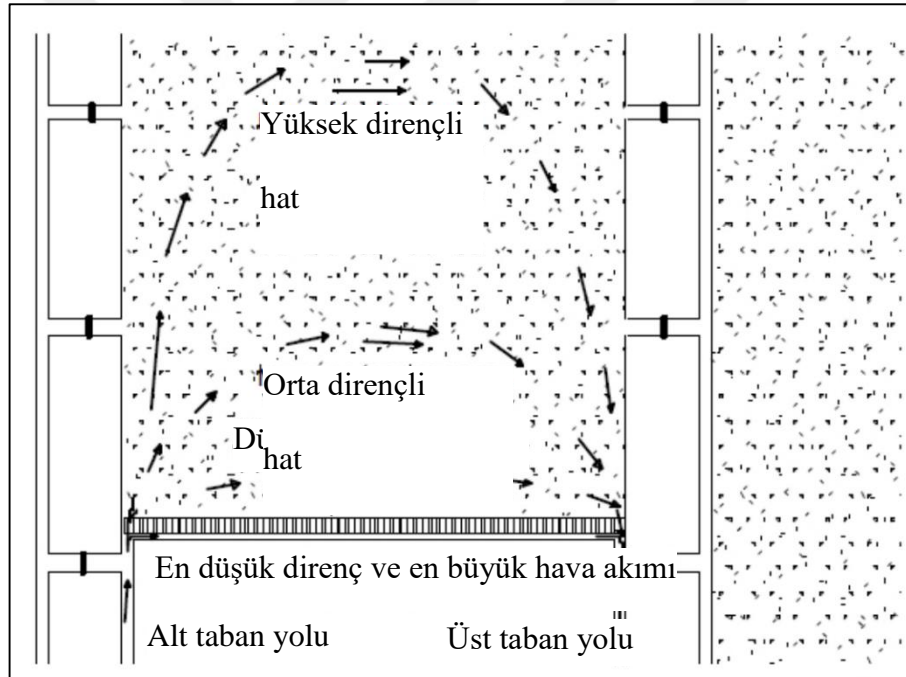
Şekil 3.1'de görülen durumda yatak ayrılma hattına kaçacak hava kömürün kendiliğinden yanmasına yol açacak miktarda olmayabilir ancak galeri üzerinde basınç farkını arttıracak bir değişiklik yapılırsa (regülatör, ek tahkimat vb.) bu durumda kaçak hattına gidecek hava artacağından tehlikeli durumlar yaşanabilecektir.

Yukarıda verilen örneğin yanı sıra, barometrik basınç değişimleri nedeniyle barajlanmış alanlar ya da göçüklerde havanın içeri dışarı hareketi de laminar akış koşullarının oluşabileceği durumlardandır.

Alternatif kaçak hatlarının yanı sıra nadiren de olsa ana hava yollarında kendiliğinden yanma olaylarıyla karşılaşılabilir. Ana hava yollarında yüksek hava hızlarının soğutma etkileri mevcut yüksek oksijen varlığının etkilerini yenmektedir. Regülatörle ayarlama gibi durumlarda daha düşük hava akış miktarları oluşabilmekte bu durumda oksidasyon nedeniyle ortaya çıkan ısı ortamdaki uzaklaştırılmamakta ve ısınmalar yaşanabilmektedir. Ancak belirtilmelidir ki ana hava yollarında oluşan kendiliğinden yanma olayları büyük oranda alternatif kaçak yollar nedeniyle oluşmaktadır.

Kendiliğinden yanma riski bulunan potansiyel alanlardan en kritiği ise göçüklerdir. Göçük içinde havanın akışını tam doğru olarak tahmin etmek imkansızdır. Bazı durumlarda akış modelleri geliştirilebilse de bunlar son derece sınırlı kalmaktadır.

Bir ya da daha fazla kenarında basınç farkı olan bir uzunayağın arkasındaki bir göçükte havanın akışı göçük içerisinde her yerde olabilmektedir. Şekil 3.2’de bu alternatif yollardan birkaçı gösterilmektedir. Bir göçükte hava akışının en yüksek olduğu yer düşük dirençli yollar olacaktır. Doğal olarak bu yollar aynı zamanda en yüksek basınç farkına yol açacak en kısa yollar olacaktır. Çoğu durumda bu hava giriş ve dönüş yolu arasında aktif göçük hattına yakın ve ona paralel kısımlar olacaktır. Ancak daha küçük miktarlarda olmasına rağmen hava akışı göçük içinde daha uzaklara da ulaşabilmektedir. Bu yüksek dirençli yollarda inertleme ile hava akımlarını sınırlandırmak mümkün olabilmektedir.



Şekil 3.2 Uzunayak “U” tipi havalandırmada göçük bölgesindeki akış yolları (Cliff vd. (2015)’den değiştirilerek).

Kömürün oksijenle en fazla temasta olabileceği kısımlar aktif göçük kenarları yakınındaki alanlar olmaktadır. Eğer üretim hızı yüksekse bu alanlar hızlı bir şekilde geride bırakılabilmekte ve göçüğün iyice oturması ve hava akışının kendiliğinden yanma yaratamayacak seviyelere düşmesi nedeniyle bu alanlardaki tehlike bertaraf edilebilmektedir. Ancak eğer üretim hızı yavaşsa bu durumda sorunlar ortaya çıkmaktadır. Üretim bittikten sonra pano sınırında ayağın

sökümü aşaması ya da ayaktaki aksaklıklar nedeniyle uzun duruşlar özel olarak tehlike arz edebilmektedir. Böylesi durumlarda göçüğün ayağa yakın kısmı sürekli olarak havalandırılacaktır. Bu süreç uzadığında kendiliğinden yanma gelişebilmektedir.

Uzunayaklarda göçükte kendiliğinden yanmanın gelişimini engellemek için göçük ya Azot gibi reaktif olmayan bir gazla inertleştirilmekte bazı durumlarda kömürden açığa çıkan gazların yayılmasıyla kendi kendine inertizasyon sağlanması yoluna gidilmekte ya da kül+su karışımı gibi bir malzeme ile oksijen ve kömür arasındaki temas kesilmeye çalışılmaktadır.

3.3 KENDİLİĞİNDEN YANMA RİSK İNDEKSLERİ

Kömürün kendiliğinden yanmasına etki eden çok sayıda faktör vardır. Stok alanlarında, nakliyatta ve madencilikte, kendiliğinden yanmayı önlemek, yüksek riskli damarlarda uygun önlemleri almak ve risk indekslerine göre kömür damarlarını sınıflandırmak sorunlar ile sistematik olarak mücadele etmek için gerekli olmaktadır.

Kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının belirlenmesi uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir konu olmuştur. Bu çalışmaları yöntem olarak aşağıdaki gibi gruplamak mümkündür:

- Küçük Boyutlu Testler
 - o Tek İndeks Testleri
 - o Komposit İndeks Testleri
 - o Regresyon Analizi
 - o Uzman Sistemler
- Büyük Boyutlu Testler

3.3.1 Küçük Boyutlu Testler

Tek indeks testleri kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının belirlenmesi için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler; adyabatik ısınma, izotermal ısınma, kesişim noktası sıcaklığı, diferansiyel ısı analiz (DTA), oksijen adsorpsiyonu ve mikrokaloremetre testleridir. Bu yöntemler genellikle kömürün tane boyutu, kül içeriği, nem içeriği, kömürleşme derecesi, yerinde gaz içeriği gibi parametreleri araştırmak için

kullanılmıştır. Ancak çoğu zaman bu yöntemlerce bulunan değerler bir yaklaşım sağlasa da iyi bir değerlendirme yapabilmek için daha detaylı analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde kendiliğinden yanmanın saptanmasında kullanılan bazı deney yöntemlerinin üstünlük ve sakıncaları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Kendiliğinden yanmanın saptanmasında kullanılan bazı deney yöntemlerinin üstünlük ve sakıncaları (Wade et al. 1986).

Yöntem	Üstünlükler	Sakıncalar
Doğrudan Gözlemler	Gerçek koşullara uygulanmaktadır	Değişkenler kontrol edilemez. Deneyler çok uzun sürelidir. Örnekler büyük hacimli olduğundan deneyden önce okside olabilirler.
Tutuşma Sıcaklığı	Hızlı deneyler, Basit ve ucuz düzenekler,	Kesişme noktasının yapaylığı, Tutuşma zorlukla tanınmakta, Yalıtım karakteristikleri gerçek duruma benzemez.
Kimyasal Yöntemler	Basit ve hızlı deneyler,	Doğruluğu şüpheli
Adyabatik Oksidasyon Yöntemi	Pratikteki yalıtım karakteristikleri ile gerçekleştirilebilir	Uzun deneyler, Pahalı düzenekler, kalibrasyon ve yapım zorluğu söz konusudur.
İzotermal Kalorimetre	Reaksiyon hızının sıcaklıkla değiştiğini kabul etmemekte	Gerçek izotermal şartları sağlamak zordur.
Oksijen Tüketimi Yöntemi	Basit, ucuz düzenekler, Çok yönlü ve eş zamanlı deneyler, Hızlı deneyler,	Oksijen tüketimi ısı oluşumunun göstergesi olmaktadır.

Kompozit indeks testleri arasında en yaygın kullanılanı kesişim sıcaklığı testinden elde edilen değerleri kullanan Feng, Chakravorty, Cochrane İndeksi’dir (FCC). Bu yöntemde Feng vd. (1973) tarafından kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarına etki eden faktörler; kömür özellikleri, jeolojik koşullar ve üretim koşulları olarak belirlenmiştir.

Feng ve arkadaşları tarafından, kömürlerin içsel özelliklerine dayanan "Yanabilirlik İndeksi" ile jeolojik koşullar ve üretim yönteminden etkilenen "Çevre İndeksi" bir arada düşünülerek bir

"Risk İndeksi" formülü geliştirilmiştir. Yanabilirlik indeksi (FCC, dak⁻¹) şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$FCC = \frac{110 - 220^{\circ}\text{C arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı}}{\text{Tutuşma Sıcaklığı}} \cdot 1000 \quad (3.2)$$

Burada;

Çevre indeksinin belirlenmesinde; üretim yöntemi, jeolojik koşullar ve havalandırmanın etkileri değerlendirilmiştir (Çizelge 3.4 ve 3.5). Yanabilirlik ve çevre indekslerinin bir arada değerlendirilmesi ile kömürlerin kendiliğinden yanma risk indeksi geliştirilmiştir (Çizelge 3.6).

$$\text{Risk İndeksi} = (\text{Yanabilirlik İndeksi}) \times (\text{Çevre İndeksi}) \quad (3.3)$$

Çizelge 3.4 Kendiliğinden yanma ile ilgili kritik faktörler (Feng et al. 1973).

Kömürün Özelliği	Ocak Çevresi	
	Jeolojik Özellikler	Üretim Koşulları
Düşük kalite	Kömür damarındaki faylar	Göçüklerde terk edilen yüksek kömür kayıpları
Yüksek nem	Kırılgan ve bozulmuş tabakalar	Tabaka hareketlerinden dolayı aşırı kırılma
Yüksek pirit	Ara kesmeli kalın damarlar	Yeryüzüne yakın damarlarda göçertme
Yüksek kırılgenlik	Derinde olmayan damarlar	Kalın damarların göçertmeli çalışması
	Birbirine yakın birçok damar	Damarların kısmi çalışması
		Havalandırmada dengesizlik, engeller, yüksek basınç farkları
Doğal	Kontrol edilemez özellikler	Harici-Kontrol edilebilir özellikler

Çizelge 3.5 Çevre indeksi (Feng et al. 1973).

Grup	Kömür Kayıpları	Tabaka Kırılmaları	Havalandırma Basınç Farkı	Çevre İndeksi
A	Normal	Doğal	Normal	1
B	Yüksek	Doğal	Normal	2
	Normal	Yüksek	Normal	
C	Normal	Doğal	Yüksek	3
	Yüksek	Yüksek	Yüksek	
D	Yüksek	Yüksek	Normal	4

Çizelge 3.6 Yanabilirlik, çevre ve risk indeksleri (Feng et al. 1973).

Yanabilirlik İndeksi	
İndeks	Derece
0-5	Düşük
5-10	Orta
>10	Yüksek
Çevre İndeksi	
İndeks	Derece
1	Düşük
2	Orta
3	Yüksek
4	Çok yüksek
Risk İndeksi (Yanabilirlik indeksi x Çevre indeksi)	
İndeks	Derece
0-10	Düşük
10-20	Orta
20-40	Yüksek

FCC indeksinin yanı sıra literatürde kullanılan diğer kompozit risk indeksleri şunlardır:

- Olpinski İndeksi
- Bystron ve Urbanski İndeksi
- MR (Mahadevan ve Ramlu) İndeksi
- WITS-EHAC (University of the Witwatersrand- Energy Hazards Advisory Committee) İndeksi

Kendiliğinden yanmaya yatkınlığın tespiti için kömürün yoğunluk, ısıl değer, nem içeriği, kül içeriği, uçucu madde, sabit karbon, sülfür içeriği vb. özellikleri kullanılarak çoklu regresyon analiz çalışmaları da yapılmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kendiliğinden ısınmaların kontrolü için uzman sistemler geliştirilmiştir (Denby and Ren 1992). Bu türlü sistemler kömürün içsel özelliklerinin yanı sıra, jeoloji ve madencilik faaliyetleri ile ilgili faktörlerin bir arada değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.3.2 Büyük Boyutlu Testler

Bu tür testlerde kullanılan deney aletleri büyük hacimde kömür örneğinin ölçülmesine olanak vermektedir. Böylesi ekipmandan bir tanesi Avustralya'da Queensland Üniversitesinde (2m'lik kolon) bir diğeri ise Simtars'da (16 m³ reaktör) bulunmaktadır.

Queensland Üniversitesi'nde bulunan 2m'lik kolon 57 litrelik bir kapasiteye sahiptir. Bu deney setinde 40-60 kg'lık bir kömür örneği teste tabi tutulabilmektedir. Kömürün kendiliğinden ısınması kolon boyunca eşit olarak yerleştirilmiş sekiz termoçift ile izlenmektedir (Beamish vd. 2002).

Küçük boyutlu reaktörlerin kısıtlarını aşabilmek için Simtars büyük boyutlu bir reaktör geliştirilmiştir (Cliff vd. 2000). Bu test reaktöründe yaklaşık 17 tonluk bir tüvenan kömür ile ocakta göçükte bulunan koşullarda kendiliğinden yanma testleri yapılabilmektedir. Test setinde 100 l/dak hava miktarı sağlanabilmekte ve oksidasyon sonucu açığa çıkan gazlar sabit O₂, CO, CO₂ ve CH₄ analizörleri ile yapılabilmektedir.



BÖLÜM 4

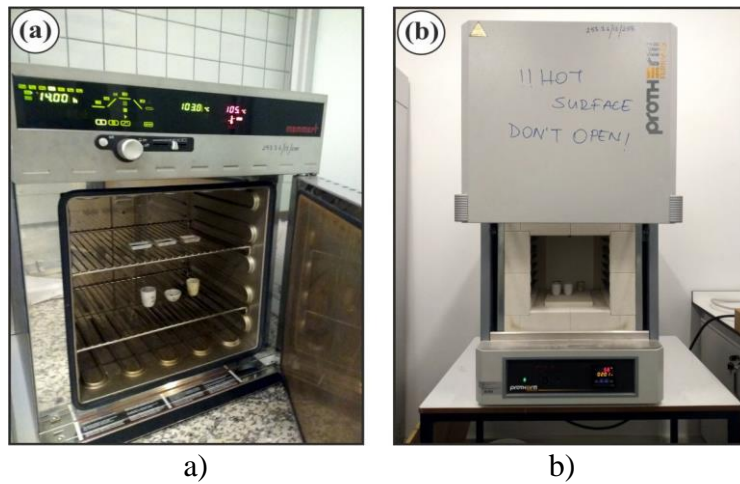
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, öncelikle çalışma kapsamında kullanılan kömür örneklerinin karakteristiklerinin belirlenmesi için kısa analizlerin sonuçları verilmektedir. Daha sonra, kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılan yöntem ve deney seti tanıtılmaktadır.

4.1 KÖMÜRÜN KISA ANALİZLERİ

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan kömür örnekleri Türkiye Taşkömürü Kurumu, Karadon Müessesesi bünyesindeki Karadon ve Gelik İşletmelerinden alınmıştır. Alınan örnekler Karadon İşletmesinde Acılık damarı (-360/-460) ve Gelik İşletmesinde ise Kurul damarlarına (-160/-260) aittir.

Taşkömürlerinin kısa analizleri kül, uçucu madde, sabit karbon ve nem içeriklerinin belirlenmesi şeklindedir. Nem içeriklerinin belirlenmesinde 300 °C kapasiteli programlanabilir bir etüv (Şekil 4.1 a), kül ve uçucu madde içeriklerinin belirlenmesinde ise 1300 °C'ye kadar ısıtma kapasitesine sahip bir kül fırını (Şekil 4.1 b) kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Taş kömürünün kısa analizinde kullanılan ekipmanlar, a) 300 °C kapasiteli kül fırını
b) 1300 °C kapasiteli kül fırını

4.1.1 Kül İçeriğinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan kömür örneklerinin kül analizleri ASTM D3174–12 (2018) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre; -0,075 mm’lik standart elekten geçen kömürler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde $1,00 \pm 0,1$ g ağırlığındaki örnek bir porselen kroze içine konularak 1300 °C’ye kadar ısıtma kapasitesi olan bir kül fırınına yerleştirilmiştir. Oda sıcaklığındaki kül fırını ilk bir saatte 750 °C’ye programlanmış daha sonraki 2 saat içinde ise kül fırını 750 °C’de sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve deneyler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası kül fırınından alınan kroze oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulmuş ve kül içeriği (K_i) Eşitlik 4.1 ile belirlenmiştir.

$$K_i = [(C - A) / B] \times 100 \quad (4.1)$$

Burada A krozenin boş iken olan kütlesi (g), B kömürün ilk kütlesi (g) ve C ise kroze ve yanma sonrasındaki kömürün toplam kütlesi (g) olarak tanımlanmıştır.

Örneklerin kül içeriklerinin belirlenmesi için beş ayrı analiz yapılmış ve analiz sonuçlarına ait ortalama kül içeriği ve standart sapması hesaplanmıştır. Örneklere ait kül içeriği analiz sonuçları Karadon Acılık kömürleri için Çizelge 4.1’de, Gelik Kurul kömürleri için ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Karadon Acılık Damarı (-360/-460) örneğine ait kül içerikleri.

Deney no	Kap ağırlığı (g) A	İlk numune ağırlığı (g) B	A+B	Son numune ağırlığı (g) C	Kül içeriği K_i (%)
1	28,043	1,045	29,088	28,214	16,364
2	28,433	1,010	29,443	28,525	9,109
3	13,399	1,051	14,450	13,590	18,173
4	25,614	1,034	26,648	25,803	18,279
5	12,745	1,072	13,817	12,891	13,619
Ortalama					15,109
Standart Sapma					3,848

Çizelge 4.2 Gelik Kurul Damarı (-160/-260) örneğine ait kül içerikleri.

Deney no	Kap ağırlığı (g) A	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g)		Kül içeriği Ki (%)
		B	A+B	C		
1	25,604	1,009	26,613	25,805	19,907	
2	13,399	0,996	14,395	13,652	25,402	
3	12,745	1,015	13,760	13,015	26,601	
4	28,043	1,027	29,070	28,217	16,974	
5	28,433	1,073	29,506	28,791	33,364	
Ortalama					24,450	
Standart Sapma					6,355	

4.1.2 Uçucu Madde Miktarı ve Sabit Karbonun Belirlenmesi

Çalışma kapsamında kullanılan örneklere ait uçucu madde miktarları ASTM D3175 (2018) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre; daha önceden 950 ± 20 °C aralığına sabitlenmiş kül fırını içerisine $1,0 \pm 0,1$ g ve $-0,075$ mm'lik elekten geçen kömür numunesi koyulmuş ve 7 dakika boyunca bekletilmiştir. Böylece taşkömürü içindeki uçucu bileşenlerin numuneden uzaklaşması sağlanmıştır. Gerçekleştirilen deneylere göre uçucu madde miktarı (V_m , %) aşağıdaki eşitlikle belirlenmiştir.

$$V_m = \left(\frac{B - C}{B - A} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

Burada A krozenin kütlesi (g), (g), B kroze ve kömürün yanmadan önceki ilk kütlesi toplamı (g) ve C ise kroze + yanma sonrası kömürün kütlesi toplamı (g).

Her bir örneğin uçucu madde miktarının belirlenmesi için beş ayrı analiz yapılmış ve analiz sonuçlarına ait ortalama uçucu madde miktarı ve standart sapması hesaplanmıştır. Karadon Acılık kömürleri için uçucu madde içerikleri Çizelge 4.3'de, Gelik Kurul kömürleri için ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Karadon Acılık Damarı (-360/-460) örneğine ait uçucu madde içerikleri.

Deney no	Kap ağırlığı (g)	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g)	Uçucu madde miktarı, V_m (%)
	A	B	A+B	C	
1	21,768	0,985	22,753	22,457	30,101
2	8,450	0,995	9,445	9,233	21,302
3	11,399	1,092	12,491	12,267	20,513
4	8,111	1,065	9,176	8,824	33,052
5	28,043	1,040	29,083	28,735	33,462
Ortalama					27,686
Standart Sapma					6,328

Çizelge 4.4 Gelik Kurul Damarı (-160/-260) örneğine ait uçucu madde içerikleri.

Deney no	Kap ağırlığı (g)	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g)	Uçucu madde miktarı, V_m (%)
		A	B	A+B	
1	12,745	1,003	13,748	13,568	17,946
2	28,043	0,998	29,041	28,892	14,900
3	25,604	1,035	26,639	26,340	28,869
4	28,433	1,022	29,455	29,232	21,834
5	13,399	0,994	14,393	14,128	26,707
Ortalama					22,051
Standart Sapma					5,835

Örneklerin sabit karbon miktarları (F_c , %) ise aşağıdaki eşitlikle belirlenmiştir.

$$F_c = 100 - (K_i + V_m) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3'e göre Karadon Acılık Damarı ve Gelik Kurul Damarına ait örneklere ait sabit karbon değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 İncelenen taşkömürlerine ait sabit karbon (F_c , %) değerleri

Karadon Acılık	Gelik Kurul
57,205	53,499

Not: Sabit karbon değerleri Çizelge 4.3 – 4.4'deki değerlerin ortalamaları kullanılarak hesaplanmıştır.

4.1.3 Nem içeriğinin belirlenmesi

Örneklerin nem içerikleri ASTM D3173/D3173M (2017) standardına göre belirlenmiştir. İki farklı boyut gruplarında gerçekleştirilen (-0,075 mm ve +0,50 – 0,075 mm) boyut gruplarında deneylerde, toplamda $1,0 \pm 0,1$ g kömür numunesi 105 ± 2 °C dereceli etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Deney sonrası numunenin ilk ve son ağırlıkları kullanılarak taşkömürlerinde nem içerikleri belirlenmiştir. Deney sonuçları Karadon Acılık Damarı örneği için Çizelge 4.6’da ve Gelik Kurul Damarı örneği için ise Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Karadon Acılık Damarı (-360/-460) örneği nem içeriği.

-0,075 mm boyut grubu					
Deney no	Kap ağırlığı (g) A	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g) C	Nem içeriği, N _i (%)
		B	A+B		
1	25,604	0,999	26,603	26,487	0,436
2	11,399	1,024	12,423	12,375	0,385
3	12,745	1,017	13,762	13,682	0,585
4	21,768	1,008	22,776	22,558	0,967
5	8,111	0,997	9,108	9,061	0,513
Ortalama: 0,577% Standart Sapma: 0,231					
-0,50 mm + 0,075 mm boyut grubu					
Deney no	Kap ağırlığı (g) A	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g) C	Nem içeriği, N _i (%)
		B	A+B		
1	21,768	1,004	22,772	22,551	0,980
2	8,111	1,021	9,132	9,019	1,253
3	8,450	0,986	9,436	9,286	1,615
4	25,604	1,062	26,666	26,467	0,752
5	11,399	0,988	12,387	12,287	0,814
Ortalama: 1,083 % Standart Sapma: 0,355					

Çizelge 4.7 Gelik Kurul Damarı (-160/-260) örneği nem içeriği.

-0,075 mm boyut grubu					
Deney no	Kap ağırlığı (g) A	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g) C	Nem içeriği, N _i (%)
		B	A+B		
1	8,111	1,015	9,126	9,079	0,518
2	25,604	0,992	26,596	26,471	0,472
3	12,745	0,965	13,710	13,594	0,853
4	8,450	1,025	9,475	9,423	0,552
5	21,768	1,013	22,781	22,59	0,846
Ortalama: 0,648% Standart Sapma: 0,186					
-0,50 mm + 0,075 mm boyut grubu					
Deney no	Kap ağırlığı (g) A	İlk numune ağırlığı (g)		Son numune ağırlığı (g) C	Nem içeriği, N _i (%)
		B	A+B		
1	21,768	1,013	22,781	22,714	0,295
2	8,111	0,995	9,106	9,061	0,497
3	8,450	0,997	9,447	9,435	0,127
4	25,604	1,033	26,637	26,411	0,856
5	11,399	1,071	12,470	12,415	0,443
Ortalama: 0,443% Standart sapma: 0,272					

Gerçekleştirilen kısa analizler sonucunda araştırmanın konusu olan taşkömürlerine ait kısa analiz sonuçları toplu olarak Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Araştırma konusu olan taşkömürlerine ait kısa analiz sonuçları.

Parametre	Acılık	Kurul
Nem içeriği, N _i (%) I	0,830	0,545
Kül İçeriği, K _i (%) II	15,109	24,450
Uçucu madde miktarı, V _m (%) III	27,686	22,051
Sabit karbon miktarı, F _c (%) IV	57,205	53,499

I: Nem içeriği değerleri iki farklı boyut grubunun ortalaması olarak verilmiştir. **II:** Kül içeriği değerleri Çizelge 4.6 ve 4.7’deki değerlerinin ortalaması, **III:** Uçucu madde miktarı Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilerin değerlerinin ortalaması ve **IV:** Sabit karbon miktarı ise Çizelge 4.6-4.7 ve Çizelge 4.6-4.7 değerlerinin ortalaması alınarak Eşitlik 4.3 kullanılarak belirlenmiştir.

4.2 KENDİLİĞİNDEN YANMA DENEYLERİ

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan deneysel yöntem ve deney setine ait detaylı bilgiler verilecektir.

4.2.1 Yöntem ve Deney Seti

Daha önce Bölüm 3.2.3.1’de detaylı olarak bahsedildiği üzere, göçertmeli uzunayak madenciliğinde özellikle göçükte bırakılan/kalan kömürlerin varlığı ve göçük içerisine hava kaçakları nedeniyle göçük bölgelerinde kendiliğinden yanma olaylarıyla karşılaşılabilmekte ve bu durumlarda göçüğe direk müdahale şansı bulunulamaması nedeniyle ayaklar barajlanarak kapatılmaktadır. Buna bağlı olarak da ciddi üretim ve ekipman kayıpları da yaşanabilmektedir.

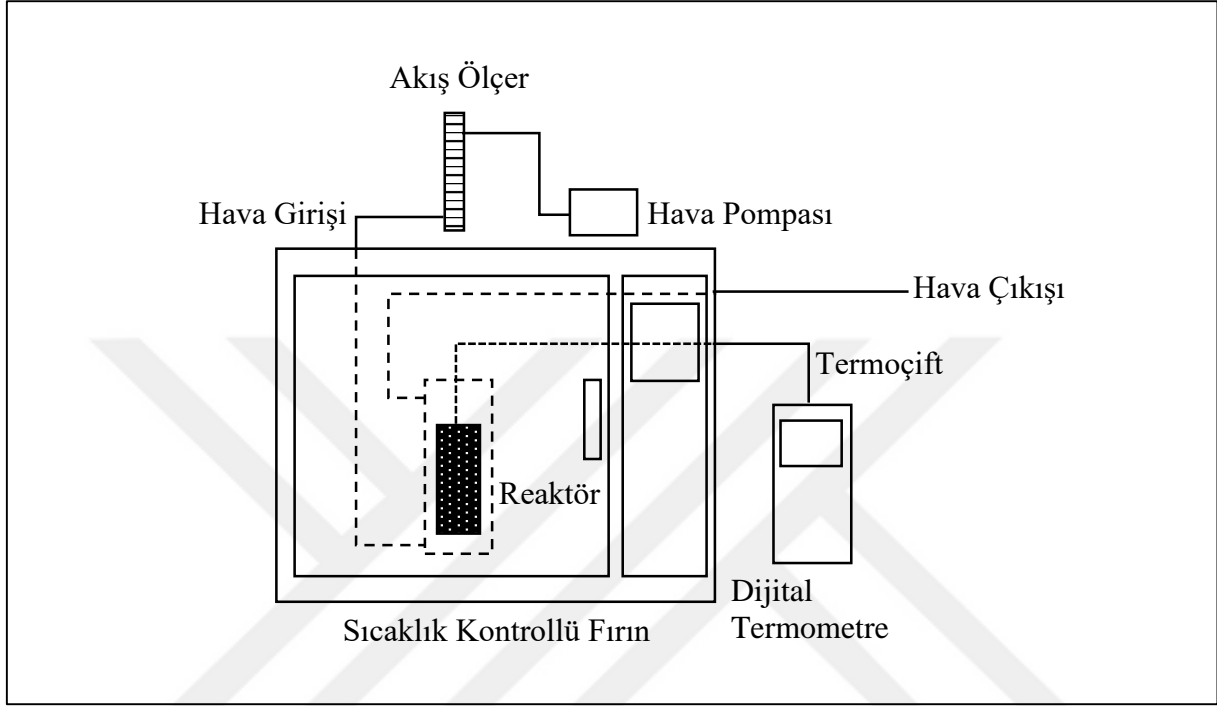
Zonguldak Taşkömürü Havzası’nda yer alan maden ocaklarının büyük çoğunluğunda göçertmeli uzunayak madencilik yöntemini kullanmaktadır. Bu bağlamda çalışma için kullanılan örnekler göçertmeli uzunayak yöntemi uygulanan iki ayaktan seçilmiştir.

Çalışma kapsamında alınan örnekler TTK Karadon Müessesesine ait Karadon ve Gelik İşletmelerinden alınmıştır. Karadon İşletmesinden alınan kömür örnekleri -360/-460 katları arasında çalışan ve Acılık damarında üretim yapan ayaktan alınmıştır. Ayakta ortalama kömür kalınlığı 4m olup, tavan ve taban taşları kil taşından oluşmaktadır. Ayak boyu 240 m ve pano boyu 110 m’dir. Gelik İşletmesinden alınan kömür örnekleri ise -160/-260 katları arasında faaliyet gösteren ayaktan alınmıştır. Ayakta üretimi yapılan Kurul damarının ortalama kalınlığı 4 m olup, tavan taşı konglomera ve taban taşı ise kil taşından oluşmaktadır. Örnek alınan ayağın uzunluğu 140 m, pano boyu ise 200 m’dir.

Ayaklardan alınan kömür ve tavan-taban taşı örnekleri kullanılarak göçük bölgesinin laboratuvar ortamında modellenmesine çalışılmıştır. Bu kapsamda yeraltından alınan kömür ve tavan-taban taşı örnekleri farklı boyutlarda hazırlanmış ve programlanabilir bir fırın içerisine yerleştirilmiş reaktör içerisinde kendiliğinden yanma deneylerine tabi tutulmuştur.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ZEDEM (Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi) Kömür Oksidasyonu ve Havalandırma Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden

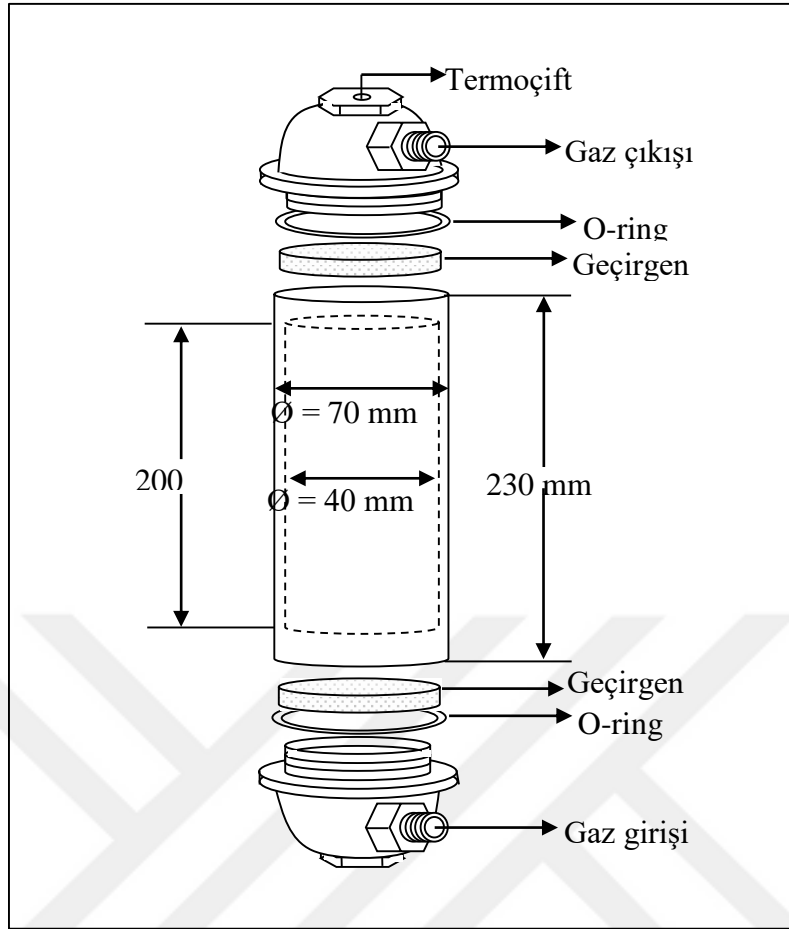
yanma deneylerinde kullanılan deney seti bir reaktör, ona bağlı bir termoçift, kömür sıcaklığının kaydedilmesi için bir dijital termometre, reaktöre hava sağlayacak bir mini pompa, akış miktarını ayarlamak için bir akış ölçer ve sıcaklık kontrollü bir fırından oluşmaktadır. Deney seti Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Kendiliğinden yanma deney setinin şematik gösterimi.

Kendiliğinden yanma deneylerinde reaktör olarak daha önce Barış (2010) tarafından tasarlanan iç çapı 40 mm ve boyu 200 mm olan krom-nikelden imal ettirilmiş bir reaktör kullanılmıştır (Şekil 4.3). Bu reaktörün alt ve üst kısımlarında havanın uniform olarak dağılmasını sağlayan iki adet geçirgen disk bulunmaktadır.

Reaktör Carbolite marka, 300°C’ye kadar ısıtma kapasitesi bulunan sıcaklık kontrollü bir fırın içerisine yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığındaki doğruluk $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ mertebesindedir. Reaktörün üst kısmından yerleştirilen bir adet K-tip termoçift dijital termometreye bağlanmakta ve reaktör içindeki kömür sıcaklığı bu sayede izlenmektedir. Reaktöre verilecek hava, mini bir hava pompasıyla sağlanmakta ve akış miktarı Cole Parmer marka bir akış ölçerle ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.3 Deneylerde kullanılan reaktörün şematik gösterimi (Barış 2010).

4.2.2 Örneklerin Hazırlanması ve Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Yeraltından alınan örnekler; kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılmak üzere, boyut küçültme işlemlerine tabi tutulmuştur. Ocaktan alınan örnekler (kömür ve tavan taşı) ilk aşama olarak Şekil 4.4'deki laboratuvar ölçekli çeneli kırıcıya aktarılmıştır. Çeneli kırıcıdan geçirilen kömür ve tavan taşı örnekleri kırma işleminin ikinci aşaması olan laboratuvar ölçekli konili kırıcıya aktarılmıştır (Şekil 4.5). Kırma işlemi tamamlandıktan sonra boyut küçültme safhasının son aşaması olan öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütme işlemi için laboratuvarda bulunan bilezikli değirmen (Şekil 4.6) kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Ocaktan alınan örneklerin boyut küçültmesinde kullanılan laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı.



Şekil 4.5 Laboratuvar ölçekli konili kırıcı.



Şekil 4.6 Öğütme işleminde kullanılan bilezik değirmen.

Boyut küçülme işleminin tamamlanmasının ardından damarı tam temsil etmesi için konileme-dörtleme işlemi yapılmıştır ve temsili örnekler alınmıştır. Bu aşamalar tamamlandıktan sonra boyutlandırma işlemi için eleme safhasına geçilmiştir. Bu işlem için Şekil 4.7'deki titreşimli elek kullanılmıştır. Titreşimli elekte deneyler için gerekli olan örnek boyutları sınıflandırılıp hazırlanmıştır.



Şekil 4.7 Laboratuvar çalışmasında sınıflandırma için kullanılan titreşimli elek.

Çalışma kapsamında kullanılacak kömür örnekleri $-2,36+1,70$ mm, $-1,70+1,00$ mm, $-1,00+0,50$ mm, $-0,50+0,075$ mm ve $-0,075$ mm tavan taşları ise $-0,50+0,075$ mm, $-1,00+0,50$ mm, $+1,00$ mm olarak sınıflandırılmıştır. Deneylerde kullanılan taban taşının boyutu $+4,75$ mm olarak seçilmiştir.

Kendiliğinden yanma deneylerinin gerçekleştirilmesi için hazırlanacak örneklerin göçük ortamını temsil edebilmesi için reaktörün alt kısmına daha büyük boyutlu ($+4,75$ mm) 25'er gram taban taşı koyulmuştur. Taban taşı üzerine ise farklı boyut ve miktarlarda kömür yerleştirilmiştir. Kömür katmanının üzerine ise farklı boyut ve miktarlarda kömür ve tavan taşları karıştırılarak koyulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada uzunayakların göçük bölgelerindeki tane boyutu dağılımının tam olarak bilinmesi mümkün olmayacağından, deneylerde kullanılacak karışımlar hazırlanırken farklı kömür ve tavan taşı boyutlarından farklı miktarlarda örnekler kullanılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu seçimler yapılırken genel olarak tavan taşının kömür örneklerinden daha sağlam yapıda olması nedeniyle kömür örneklerinden daha büyük boyutlarda olacağı varsayılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan

deneylerde kullanılan boyut gurupları ile kullanılan kömür, tavan ve taban taşı miktarları Çizelge 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Her iki örnek için de toplam 10'ar deney gerçekleştirilmiştir (aynı deney numaraları eş deneyleri temsil etmektedir).

Kendiliğinden yanma deneylerinin gerçekleştirilmesi kesişme noktası sıcaklığına göre yapılmıştır. Bunun için reaktör tabanına öncelikle 25gr tavan taşı yerleştirilmiştir. Daha sonra taban taşı üzerine Çizelge 4.9 ve 4.10'da belirtilen miktar ve boyutlarda kömür örnekleri koyulmuş ve bu katmanın üzerine bir torbada iyice karıştırılan tavan taşı ve kömür karışımı yerleştirilmiştir. Reaktörün hava ve termoçift bağlantıları yapıldıktan ve sızdırmazlık kontrol edildikten sonra fırın açılmış ve deneylerin başlatılabilmesi için sıcaklığın 30°C'de sabitlenmesi beklenmiştir. Bu süre yaklaşık olarak 1 saat civarındadır. Fırın sıcaklığı sabitlendikten sonra hava pompası çalıştırılmış ve 100 ml/dak'lık hava akışı sağlanmıştır. Havanın reaktöre girişini takiben fırının sıcaklık programı çalıştırılmış ve fırın sıcaklığı tek boyut kömür örneği kullanılan deneylerde 15°C/saat karışım kullanılan deneylerde ise 30°C/saat olarak ayarlanmıştır. Deneyler kömür sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği noktaya kadar devam ettirilmiş, kesişmenin olmadığı fırın kapasitesi 300°C olsa da güvenlik kaygıları nedeniyle 250°C'de sonlandırılmıştır. Deneyler süresince fırın ve kömür sıcaklıklarındaki değişimler eş zamanlı olarak bir web kamera ile izlenmiş ve veriler kayıt altına alınmıştır. Daha sonra toplanan verilerden fırın ve kömür sıcaklık profillerini gösteren grafikler oluşturulmuş ve kesişme noktası sıcaklığı tespit edilen örnekler için FCC indeksleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9 Kurul damarına ait kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılan boyut dağılımları ve malzeme miktarları.

Damar	Deney No.	Taban Taşı		Kömür		Tavan Taşı ve Kömür Karışımı				
		Boyut (mm)	Miktarı (gr)	Boyut (mm)	Miktarı (gr)	Tavan Taşı		Kömür		
						Boyut (mm)	Miktarı (gr)	Boyut (mm)	Miktarı (gr)	
Kurul (-160/-260)	1	+4,75	25	-0,075	65					
	2	+4,75	25	-0,50+0,075	45					
	3	+4,75	25	-1,00+0,50	65					
	4	+4,75	25	-1,70+1,00	65					
	5	+4,75	25	-2,36+1,70	50					
	6			25	-1,70+1,00	15				
					-1,00+0,50	15				
	7			25	-0,075	50			-2,36+1,70	5
					-2,36+1,70	10	-1,00+0,50		-1,70+1,00	5
					-0,50+0,075	20	-0,50+0,075	20	-1,00+0,50	5
-0,075					50	-0,075		-0,50+0,075	5	
8			25	-2,36+1,70	25			-0,075	5	
				-0,50+0,075	30					
				-0,075	25					
9			25	-2,36+1,70	20					
				-1,70+1,00	20					
				-1,00+0,50	20					
10			25	-1,00+0,50	20					
				-0,50+0,075	20					
				-0,075	20					

Çizelge 4.10 Acılık damarına ait kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılan boyut dağılımları ve malzeme miktarları.

Damar	Deney No.	Tavan Taşı ve Kömür Karışımı								
		Taban Taşı		Kömür		Tavan Taşı		Kömür		
		Boyut (mm)	Miktarı (gr)	Boyut (mm)	Miktarı (gr)	Boyut (mm)	Miktarı (gr)	Boyut (mm)	Miktarı (gr)	
Acılık (-360/-460)	1	+4,75	25	-0,075	70					
	2	+4,75	25	-0,50+0,075	60					
	3	+4,75	25	-1,00+0,50	50					
	4	+4,75	25	-1,70+1,00	50					
	5	+4,75	25	-2,36+1,70	60					
	6	+4,75	25	-1,70+1,00	25					
					-1,00+0,50	25				
					-0,075	25				
					-2,36+1,70	25			-2,36+1,70	5
	7	+4,75	25	-0,50+0,075	25	-1,00+0,50			-1,70+1,00	5
				-0,075	25	-0,50+0,075	20	-1,00+0,50	5	
				-2,36+1,70	25	-0,075		-0,50+0,075	5	
8	+4,75	25	-0,50+0,075	25				-0,075	5	
				-0,075	25					
				-2,36+1,70	25					
9	+4,75	25	-1,70+1,00	25						
				-1,00+0,50	25					
				-1,00+0,50	25					
10	+4,75	25	-0,50+0,075	25						
				-0,075	25					

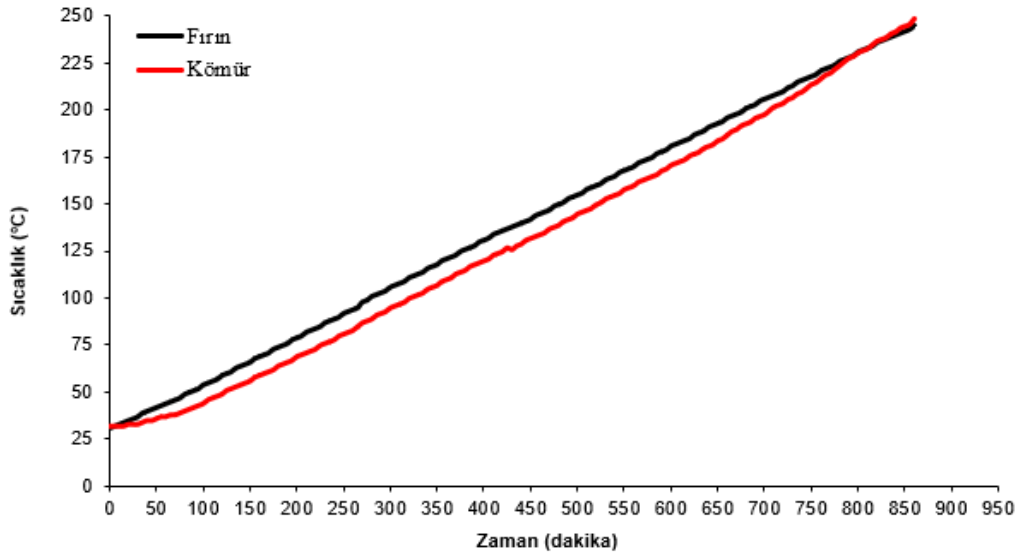
4.3 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kendiliğinden yanma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak her deney için sıcaklık profilleri çizilmiş ve kesişme noktası sıcaklıkları belirlenmiştir. Elde edilen kesişme noktası sıcaklıkları ve örnek sıcaklığın 110-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışları tespit edilmiş ve FCC indeksleri bulunmuştur. Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar Kurul ve Acılık damarları için ayrı ayrı verilecektir.

4.3.1 Kurul Damarına Ait Sonuçlar

Karadon Müessesesi Gelik İşletmesi -160/-260 katları arasında yer alan Kurul Damarına ait kömür ve tavan-taban taşı örnekleriyle toplam 10 adet kendiliğinden yanma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler için kullanılan örnek miktarlarının reaktör içerisinde belirli bir hacim kaplaması hedeflendiğinden örnek ağılıkları değişim göstermiştir. Bu kapsamda yapılan deneylerde kullanılan kömür miktarları 70 gr ile 90 gr arasında değişmektedir. Deneylerde reaktör tabanına koyulan +4,75 mm boyutundaki taban taşı miktarı (25 gr), kömür tabakasının üzerine koyulan tavan taşı-kömür karışımındaki -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm ve -0,075 mm boyutundaki tavan taşı miktarı (20 gr) ve -2,36+1,70 mm, -1,70+1,00 mfm, -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm ve -0,075 mm boyutundaki kömür miktarları (5'er gram) tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Bu gruba ait ilk beş deneyde taban taşı üzerine konulan kömür tek bir boyuttan seçilmiş, sonraki beş deneyde ise çeşitli boyutların karışımı şeklinde kömürler kullanılmıştır.

Bu gruba ait 1 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 65 gr -0,075 mm boyutundaki kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 825 dakika (13,75 saat) sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 228° C, ve 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,25 °C/dak olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 1.03 dak⁻¹ olarak bulunmuştur.

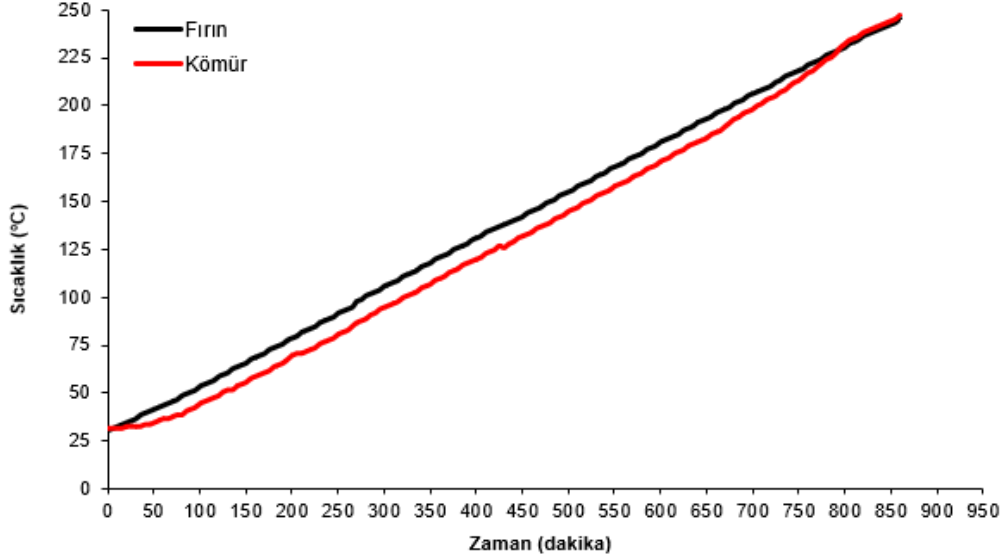


Şekil 4.8 Kurul damarı 1 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

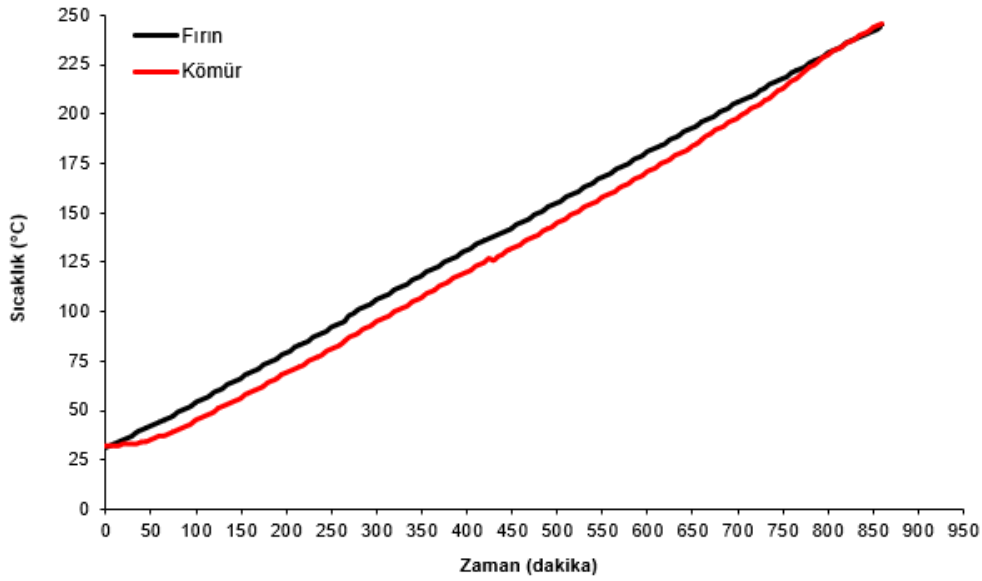
Bu gruba ait 2 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 45 gr $-0,50+0,075$ mm boyutunda kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat 'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 1 No'lu deneyde olduğu gibi, bu deney süresince de kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 825 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 230°C , ve 110° - 220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı $0,23^{\circ}\text{C/dak}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 1.02 dak^{-1} olarak bulunmuştur.

Kurul damarı örneklerine ait 3 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine $-1,00+0,50$ mm boyutunda 65 gr kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat 'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 3 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 1 ve 2 No'lu deneylere benzer şekilde, bu deney süresince de kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 825 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 232°C , ve 110° - 220°C

arasındaki ortalama sıcaklık artışı $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 1.03 dk^{-1} olarak bulunmuştur.



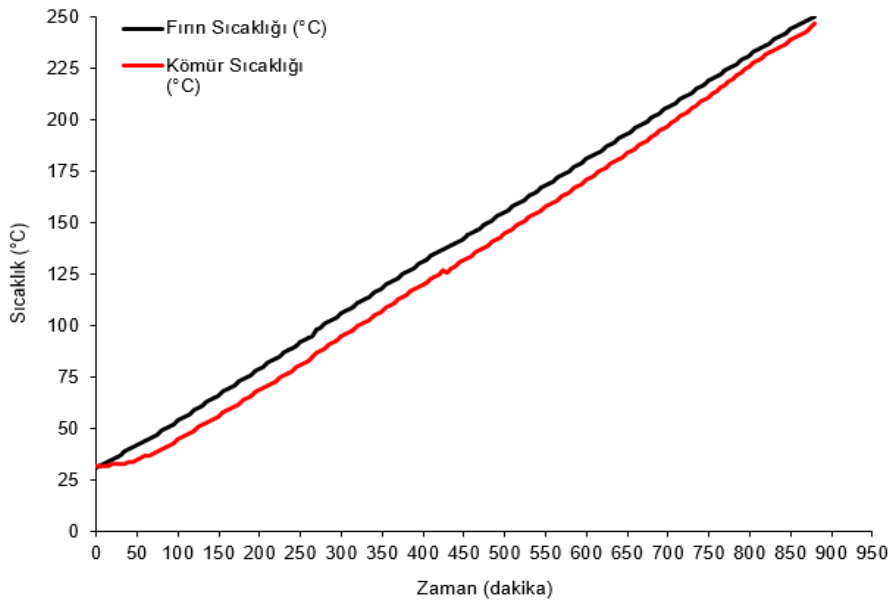
Şekil 4.9 Kurul damarı 2 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.



Şekil 4.10 Kurul damarı 3 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

Kurul damarı örneklerine ait 4 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine $-1,70+1,00\text{ mm}$ boyutunda 65 gr kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı $15^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ 'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü

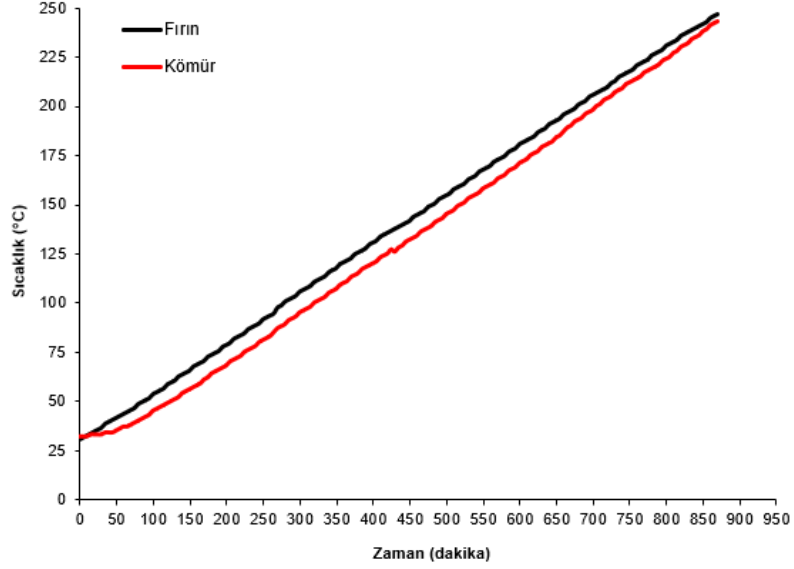
üzere bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 825 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına çok yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesememiştir. Fırınla ilgili güvenlik kaygıları nedeniyle yaklaşık 900 dakika sonunda deney sonlandırılmış ve fırın sıcaklığının 250°C'yi aşmaması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,25 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



Şekil 4.11 Kurul damarı 4 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

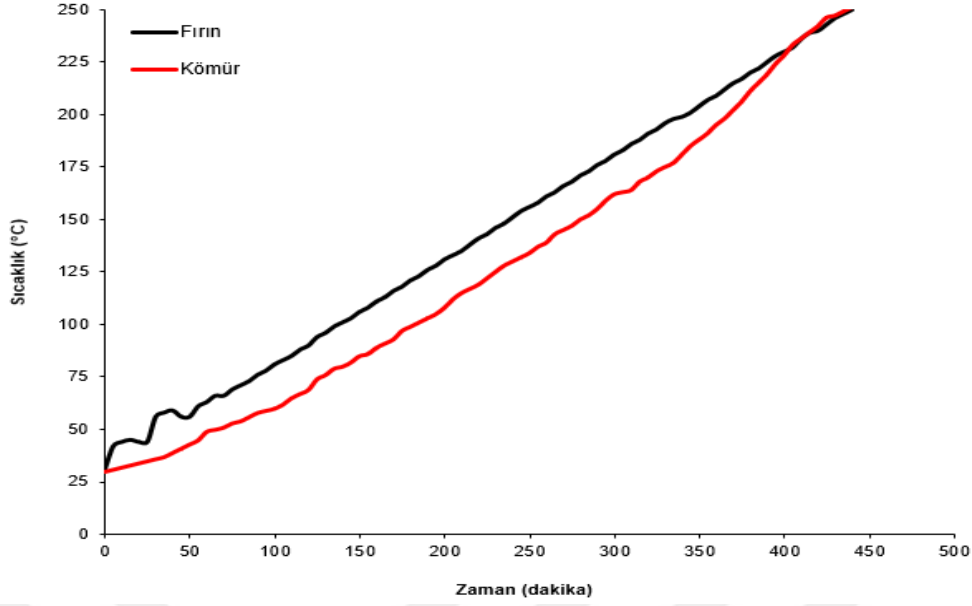
Kurul damarı örneklerine ait 5 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine -2,36+1,70 mm boyutunda 50 gr kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 875 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına çok yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesememiştir. Fırınla ilgili güvenlik kaygıları nedeniyle yaklaşık 900 dakika sonunda deney sonlandırılmış ve fırın sıcaklığının 250°C'yi aşmaması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,24

°C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



Şekil 4.12 Kurul damarı 5 No'lu deney için fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

Kurul damarı örneklerine ait 6 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 15 gr -1,70+1,00 mm boyutunda, 15 gr -1,00+0,50 mm ve 50 gr -0,075 mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. İlk beş deneyde kömür boyutunun irileşmesi nedeniyle kesişme noktası sıcaklıklarının tespit edilemediği ve deney sürelerinin oldukça uzun olması da göz önüne alınarak fırın ısıtma hızı 30°C/saat'e çıkarılmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 6 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.13'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermemiş ancak deney başladıktan yaklaşık 425 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 241° C, ve 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,51 °C/dak olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 2.11 dk⁻¹ olarak bulunmuştur.

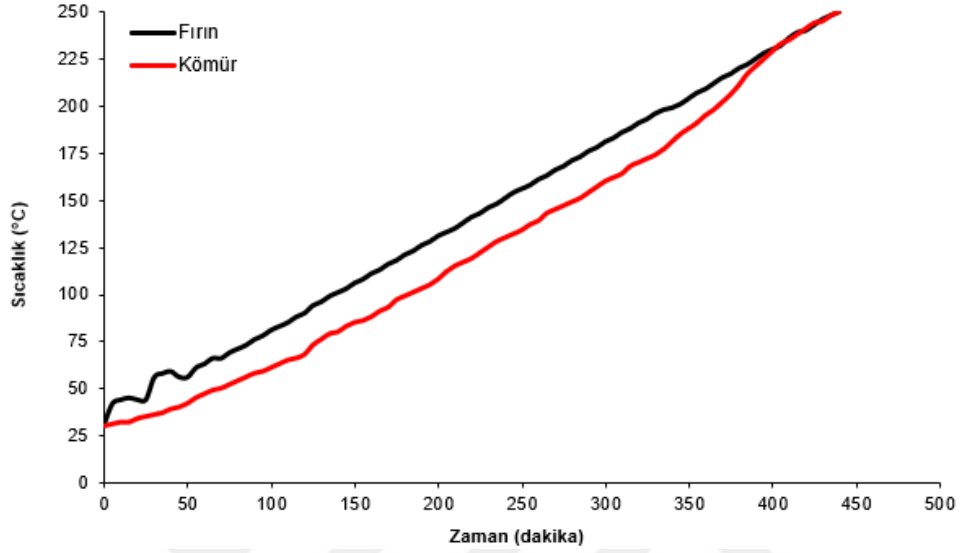


Şekil 4.13 Kurul damarı 6 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

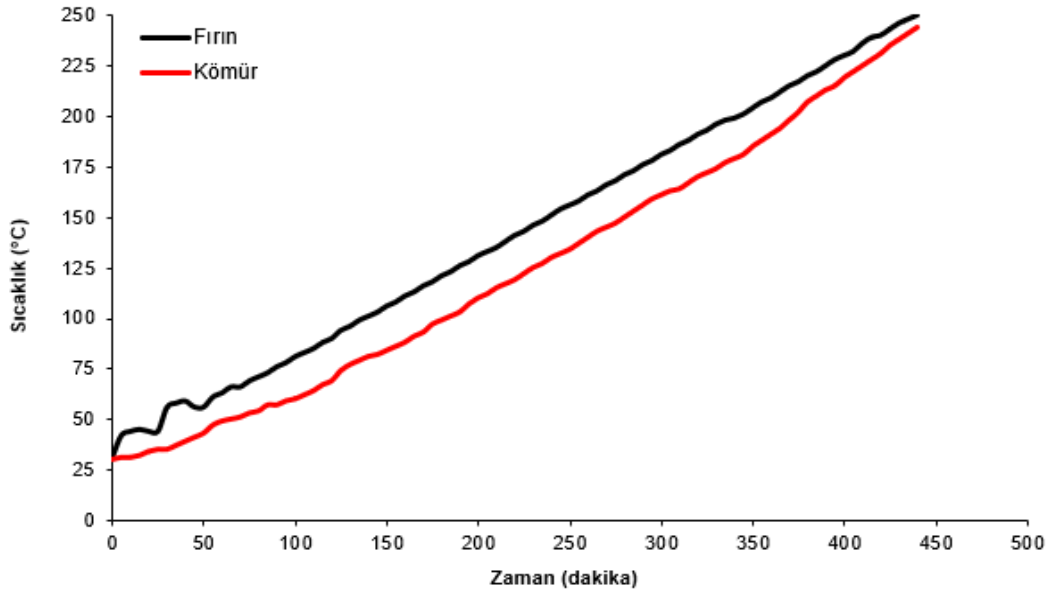
Kurul damarı örneklerine ait 7 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 10 gr $-2,36+1,70$ mm boyutunda, 20 gr $-0,50+0,075$ mm ve 50 gr $-0,075$ mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı $30^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ olarak ayarlanmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 7 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.14'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermemiş ancak deney başladıktan yaklaşık 400 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 233°C , ve 110° - 220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı $0,50^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 2.16 dk^{-1} olarak bulunmuştur.

Bu gruba ait 8 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 25 gr $-2,36+1,70$ mm boyutunda, 30 gr $-0,50+0,075$ mm ve 25 gr $-0,075$ mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı $30^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ olarak ayarlanmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 8 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermemiş ve deney sonlarına doğru reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına çok yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesemediği gözlenmiştir. Fırın sıcaklığının 250°C 'yi geçmemesi istendiğinden yaklaşık 450 dakika sonra deney sonlandırılmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası

sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,46 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



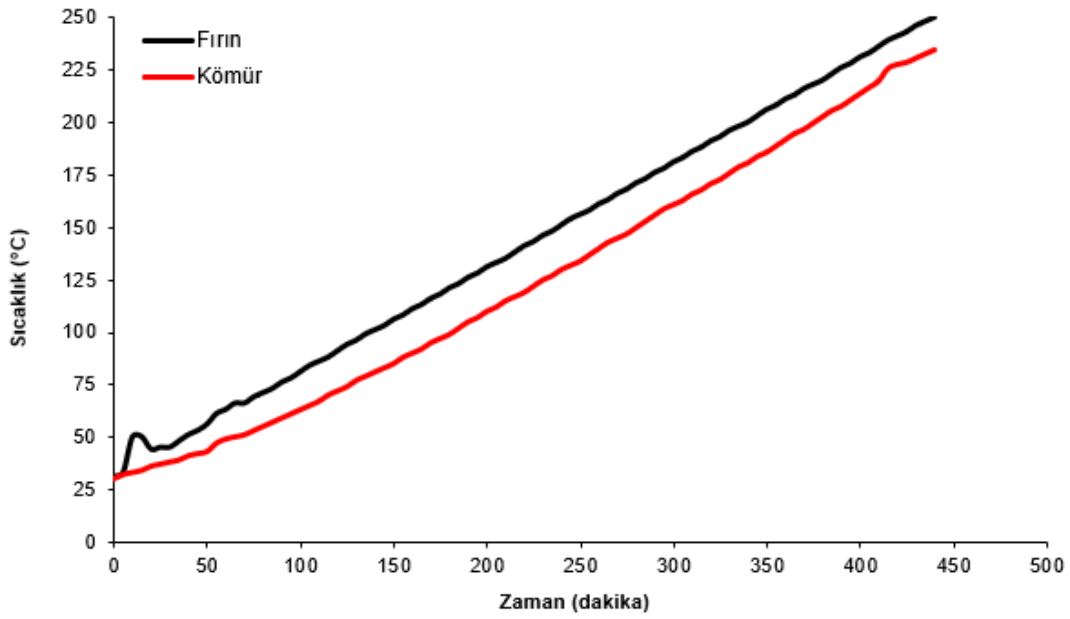
Şekil 4.14 Kurul damarı 7 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.



Şekil 4.15 Kurul damarı 8 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

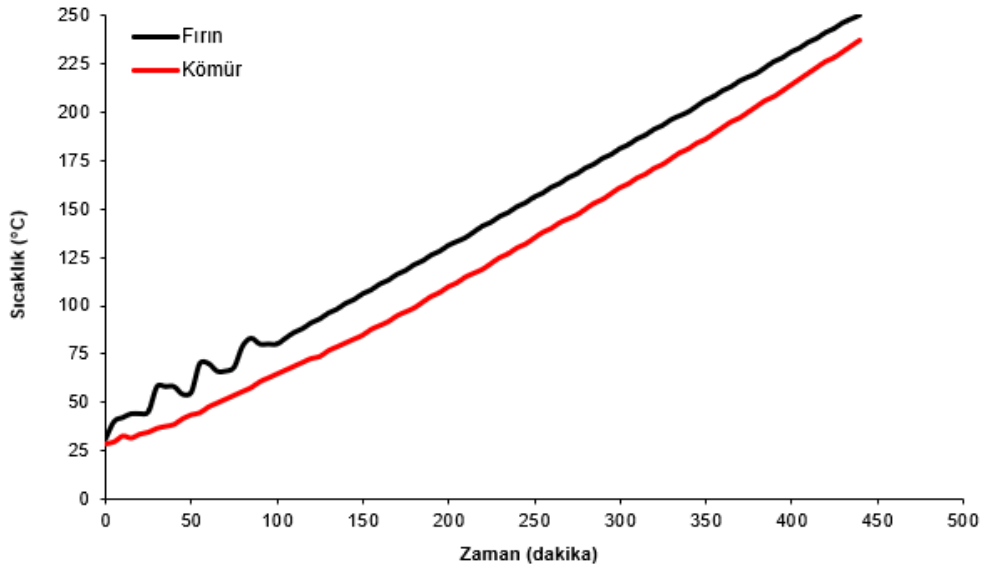
Bu gruba ait 9 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 20 gr -2,36+1,70 mm boyutunda, 20 gr -1,70+1,00 mm ve 20 gr -1,00+0,50 mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı 30°C/saat olarak ayarlanmış ve kendiliğinden yanma deneyleri

gerçekleştirilmiştir. 9 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermemiş ve fırın sıcaklığını kesmemiştir. Fırın sıcaklığının 250°C'yi geçmemesi istendiğinden yaklaşık 450 dakika sonra deney sonlandırılmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,45 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



Şekil 4.16 Kurul damarı 9 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

Kurul damarı örneklerine ait 10 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 20 gr -1,00+0,50 mm boyutunda, 20 gr -0,50+0,075 mm ve 20 gr -0,075 mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı 30°C/saat olarak ayarlanmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 10 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermemiş ve fırın sıcaklığını kesmemiştir. Fırın sıcaklığının 250°C'yi geçmemesi istendiğinden yaklaşık 450 dakika sonra deney sonlandırılmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,46 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



Şekil 4.17 Kurul damarı 10 No'lu deneye ait fırın ve kömür sıcaklık profilleri.

Gelik İşletmesi -160/-260 Kurul damarı örnekleriyle yapılan deney sonuçlarından elde edilen kesişim noktası sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları ve FCC indeksleri Çizelge 4.11'de topluca verilmiştir.

Çizelge 4.11 Gelik İşletmesi -160/-260 Kurul damarı örnekleri için kesişim noktası sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları ve hesaplanan FCC indeksleri.

Deney No	Kesişim Noktası Sıcaklığı (°C)	110-220°C arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı (°C/dak)	FCC İndeksi (dak ⁻¹)
1	228	0,25	1,03
2	230	0,23	1,02
3	232	0,24	1,03
4	-	0,25	Hesaplanamadı
5	-	0,24	Hesaplanamadı
6	241	0,51	2,11
7	233	0,50	2,16
8	-	0,46	Hesaplanamadı
9	-	0,45	Hesaplanamadı
10	-	0,46	Hesaplanamadı

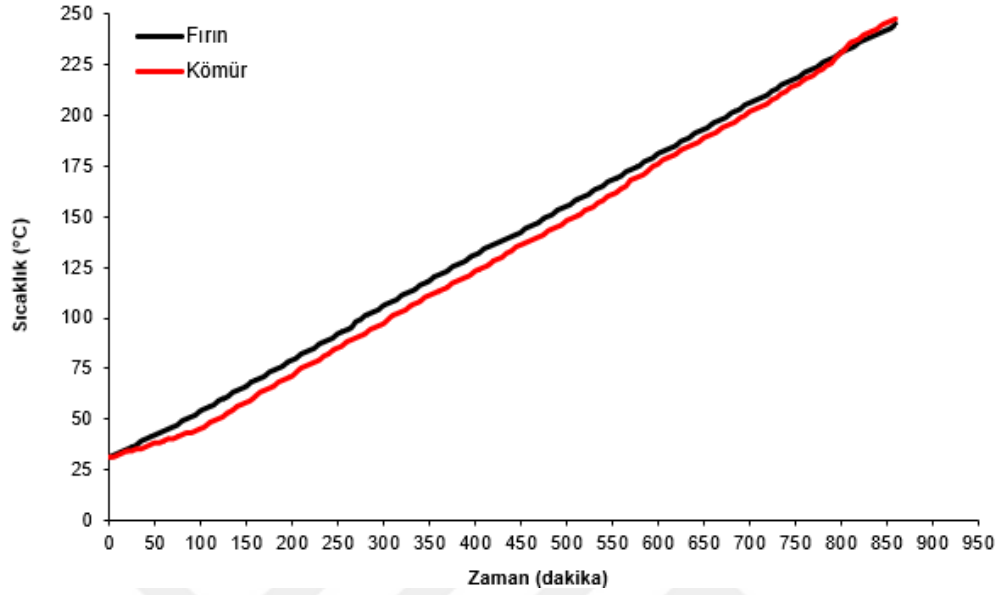
4.3.2 Acılık Damarına Ait Sonuçlar

Karadon Müessesesi Karadon İşletmesi -360/-460 katları arasında yer alan Acılık damarına ait kömür ve tavan-taban taşı örnekleriyle toplam 10 adet kendiliğinden yanma deneyi gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümde sonuçları verilen ve Kurul damarı örnekleriyle gerçekleştirilen deneylere benzer şekilde, deneyler için kullanılan örnek miktarlarının reaktör içerisinde belirli bir hacim kaplaması hedeflendiğinden örnek ağılıkları değişim göstermiştir. Bu kapsamda yapılan deneylerde kullanılan kömür miktarları 50 gr ile 75 gr arasında değişmektedir. Deneylerde reaktör tabanına konulan +4,75 mm boyutundaki taban taşı miktarı (25 gr), kömür tabakasının üzerine konulan tavan taşı-kömür karışımındaki -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm ve -0,075 mm boyutundaki tavan taşı miktarı (20 gr) ve -2,36+1,70 mm, -1,70+1,00 mm, -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm ve -0,075 mm boyutundaki kömür miktarları (5'er gram) tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Bu gruba ait ilk beş deneyde taban taşı üzerine konulan kömür tek bir boyuttan seçilmiş, sonraki beş deneyde ise çeşitli boyutların karışımı şeklinde kömürler kullanılmıştır.

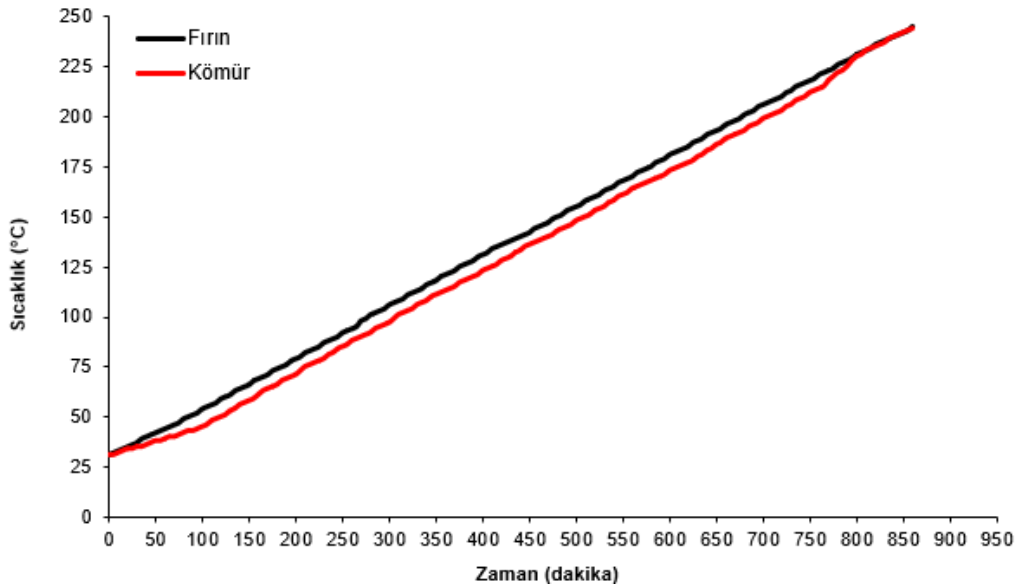
Bu gruba ait 1 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 70 gr -0,075 mm boyutundaki kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 825 dakika (13,75 saat) sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 229° C, ve 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,26 °C/dak olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 1.15 dk⁻¹ olarak bulunmuştur.

Acılık damarı 2 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 60 gr -0,50+0,075 mm boyutundaki kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 1 No'lu deneye benzer şekilde, deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 825 dakika (13,75 saat) sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 233° C, ve 110°-220°C arasındaki

ortalama sıcaklık artışı $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 1.13 dk^{-1} olarak bulunmuştur.



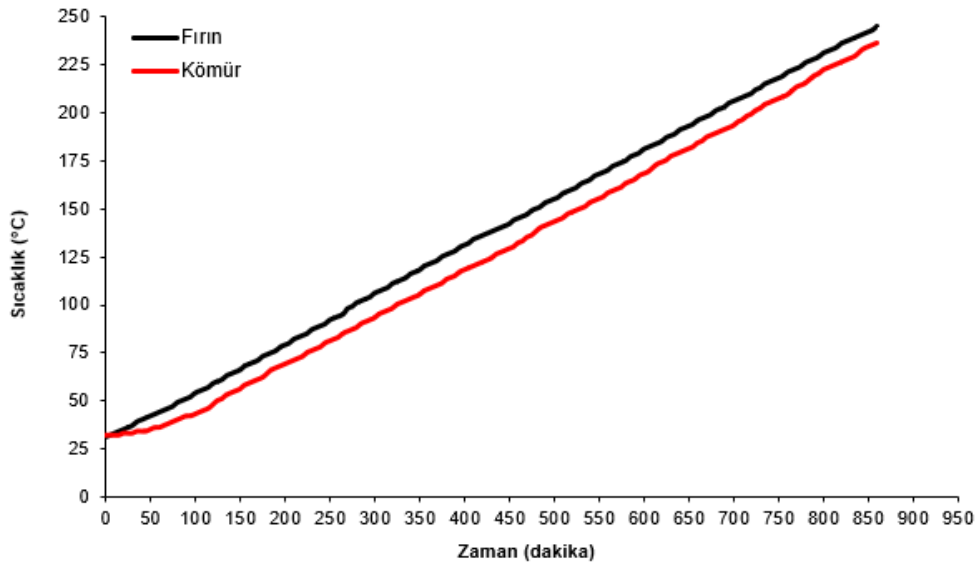
Şekil 4.18 Acılık damarı 1 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.



Şekil 4.19 Acılık damarı 2 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

Kurul damarı örneklerine ait 3 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine $-1,00+0,50\text{ mm}$ boyutunda 50 gr kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı $15^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ 'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü

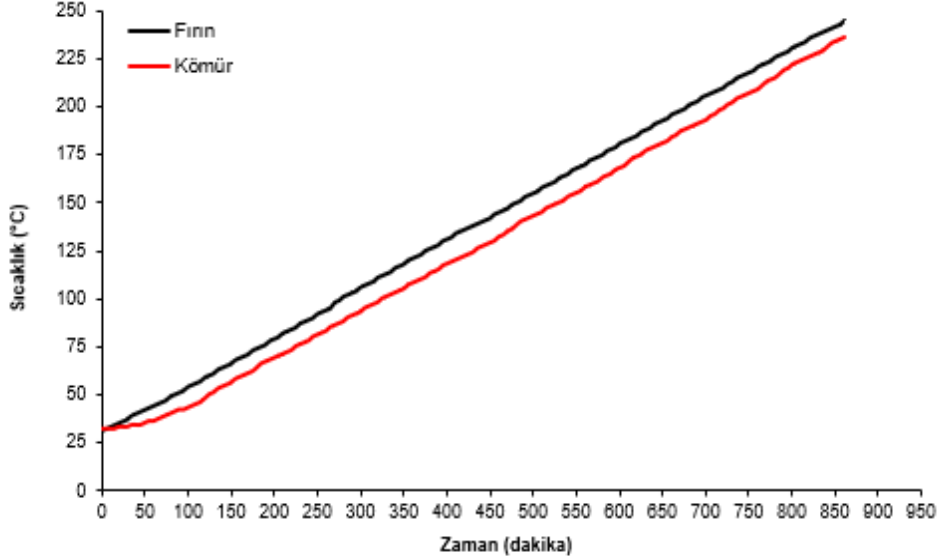
üzere bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 875 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına çok yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesememiştir. Fırınla ilgili güvenlik kaygıları nedeniyle yaklaşık 900 dakika sonunda deney sonlandırılmış ve fırın sıcaklığının 250°C'yi aşmaması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,25 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



Şekil 4.20 Acılık damarı 3 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

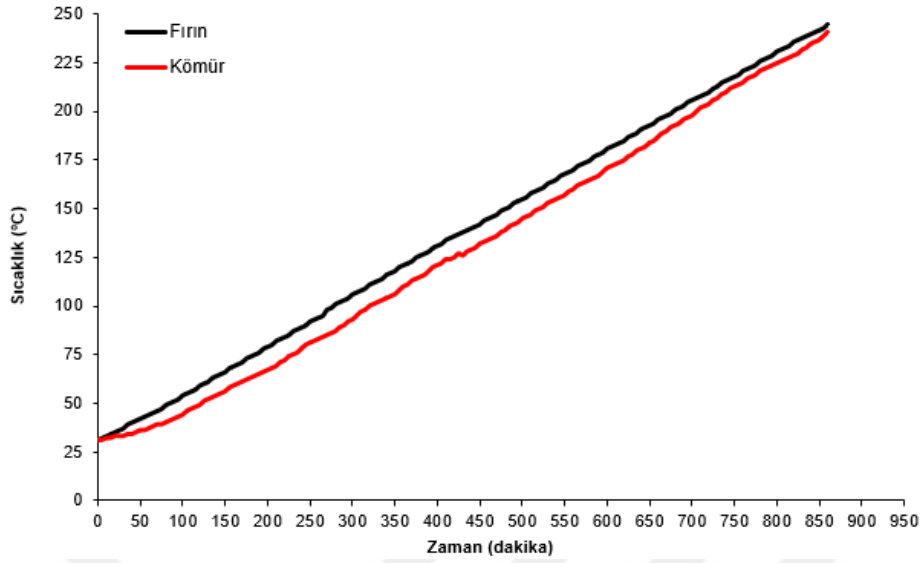
Bu gruba ait 4 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine -1,70+1,00 mm boyutunda 50 gr kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 3 No'lu deneye benzer şekilde, bu deney süresince de kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 875 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına çok yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesememiştir. Fırınla ilgili güvenlik kaygıları nedeniyle yaklaşık 900 dakika sonunda deney sonlandırılmış ve fırın sıcaklığının 250°C'yi aşmaması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık

artışı ise 0,23 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



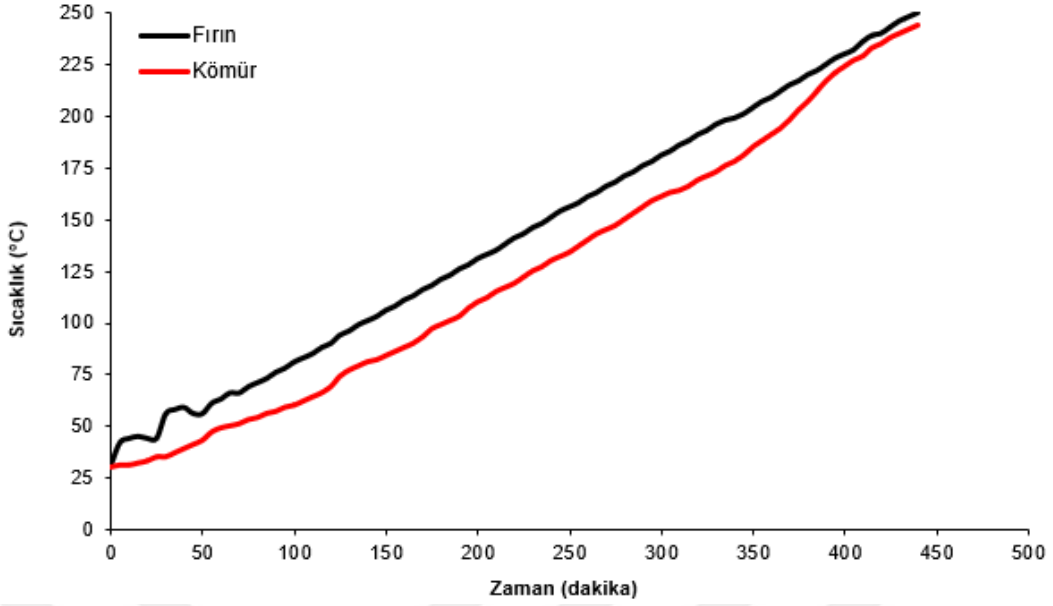
Şekil 4.21 Acılık damarı 4 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

Bu gruba ait 5 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine -1,70+1,00 mm boyutunda 50 gr kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 15°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline oldukça yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 750 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına oldukça yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesememiştir. Fırınla ilgili güvenlik kaygıları nedeniyle yaklaşık 900 dakika sonunda deney sonlandırılmış ve fırın sıcaklığının 250°C'yi aşmaması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu deney için 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı ise 0,22 °C/dak olarak hesaplanmıştır. Kesişme noktası sıcaklığı bulunamadığından bu deney için FCC indeksi değeri hesaplanamamıştır.



Şekil 4.22 Acılık damarı 5 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

Acılık damarı örneklerine ait 6 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 25 gr -1,70+1,00 mm boyutunda, 25 gr -1,00+0,50 mm ve 25 gr -0,075 mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. İlk beş deneyde kömür boyutunun irileşmesi nedeniyle kesişme noktası sıcaklıklarının tespit edilemediği ve deney sürelerinin oldukça uzun olması da göz önüne alınarak fırın ısıtma hızı bu deney ve takip eden deneylerde 30°C/saat'e çıkarılmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 6 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.23'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermemiş ancak deney başladıktan yaklaşık 400 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığına oldukça yaklaştığı ancak fırın sıcaklığını kesemediği gözlenmiştir. Bu nedenle deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiş, dolayısıyla FCC indeks değeri de hesaplanamamıştır. Bu deneyde 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,33 °C/dak olarak tespit edilmiştir.

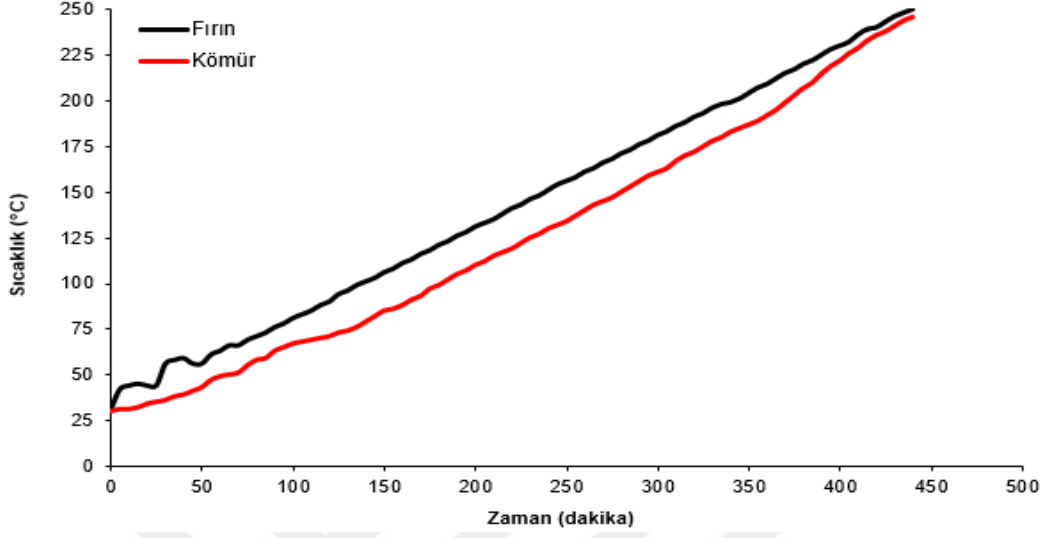


Şekil 4.23 Acılık damarı 6 No'lu deneyde fırın ve sıcaklık profilleri.

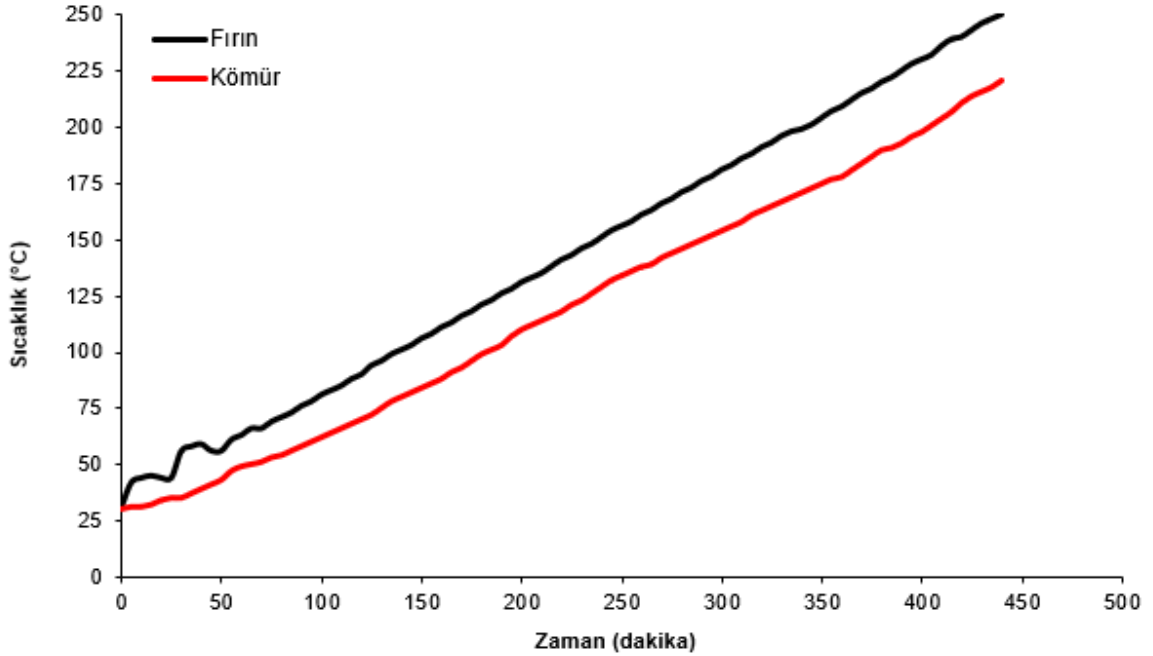
Acılık damarı örneklerine ait 7 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 25 gr -2,36+1,70 mm boyutunda, 25 gr -0,50+0,075 mm ve 25 gr -0,075 mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı 30°C/saat olarak ayarlanmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 7 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.24'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın bir eğilim göstermiş, deney başladıktan yaklaşık 400 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığı fırın sıcaklığına çok yaklaşıp da fırın sıcaklığını kesmediği gözlenmiştir. Bu sebeple bu deney için kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiş ve FCC İndeks değeri hesaplanamamıştır. Deney süresince 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,45 °C/dak olarak tespit edilmiştir.

Bu gruba ait 8 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 25 gr -2,36+1,70 mm boyutunda, 25 gr -0,50+0,075 mm ve 25 gr -0,075 mm boyutunda kömür örneği karışımı yerleştirilmiştir. Fırın ısıtma hızı 30°C/saat olarak ayarlanmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 8 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, bu deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline yakın bir eğilim göstermemiş, deney ilerledikçe fırın sıcaklığı ve kömür sıcaklığı arasındaki fark açılmıştır. Deney başladıktan yaklaşık 450 dakika deney sonlandırılmıştır. Bu sebeple bu deney için kesişme noktası sıcaklığı tespit edilememiş

ve FCC İndeks değeri hesaplanamamıştır. Deney süresince 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,38 °C/dak olarak tespit edilmiştir.

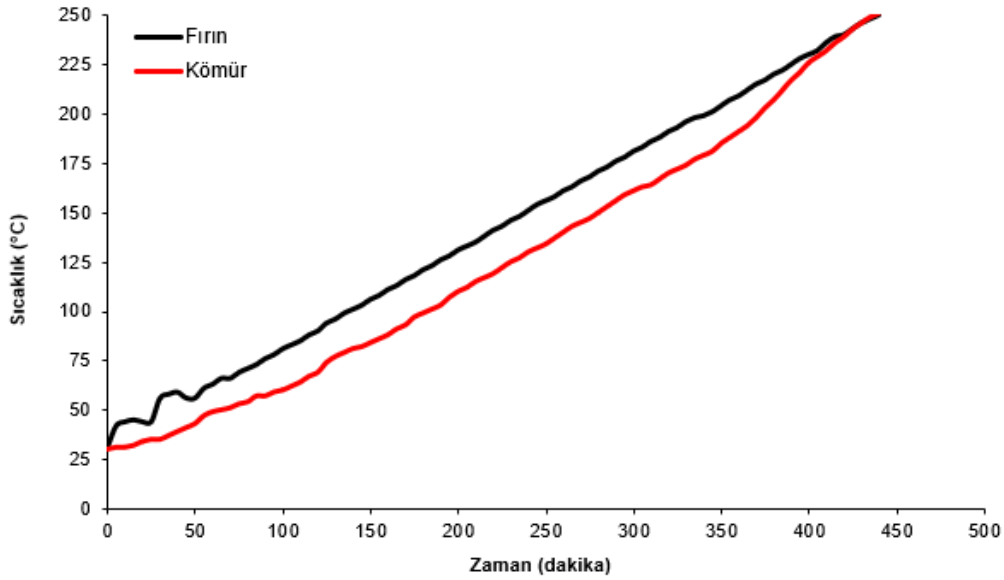


Şekil 4.24 Acılık damarı 7 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.



Şekil 4.25 Acılık damarı 8 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

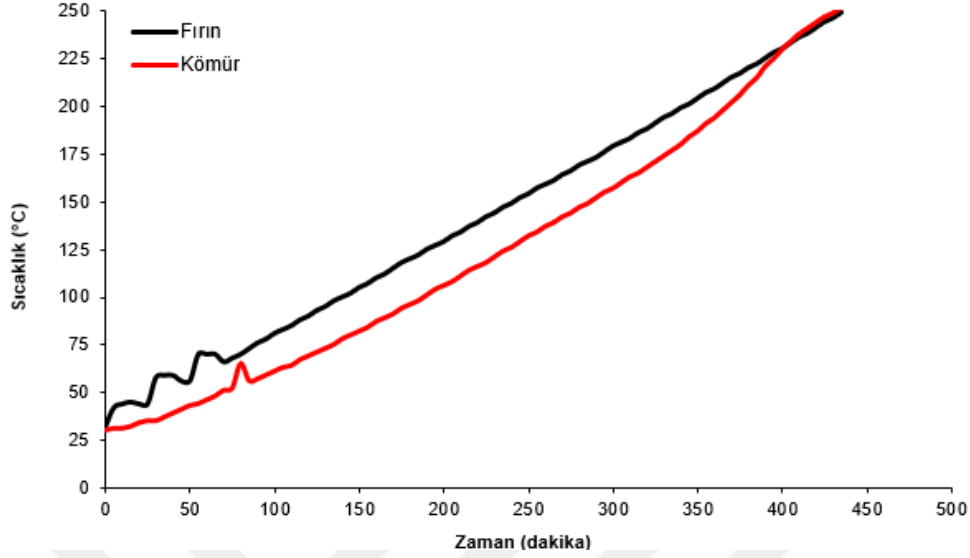
Acılık damarına ait 9 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 25 gr -2,36+1,70 mm, 25 gr -1,70+1,00 mm ve 25 gr -1,00+0,50 mm boyutundaki kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 30°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 9 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline çok yakın ve paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 425 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 243° C, ve 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı 0,43 °C/dak olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 2,06 dk⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.26 Acılık damarı 9 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

Acılık damarına ait 10 No'lu deneyde taban taşı tabakasının üzerine 25 gr -1,00+0,50 mm, 25 gr -0,50+0,075 mm ve 25 gr -0,075 boyutundaki kömür örneği yerleştirilmiş ve fırın ısıtma hızı 30°C/saat'e ayarlanarak kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 9 No'lu deney sonucunda elde edilen ve fırın ve reaktör içindeki kömüre ait sıcaklık profilleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere deney süresince kömür sıcaklığı fırın sıcaklık profiline yakın olmasa da paralel bir eğilim göstermiş ve deney başladıktan yaklaşık 425 dakika sonra reaktör içindeki kömürün sıcaklığının fırın sıcaklığını kestiği ve geçtiği gözlenmiştir. Bu deney sonucunda kesişme noktası sıcaklığı 230° C, ve 110°-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı

0,46 °C/dak olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan FCC indeksi değeri ise 2,05 dk⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.27 Acılık damarı 10 No'lu deneye ait fırın ve sıcaklık profilleri.

Karadon İşletmesi -360/-460 Acılık damarı örnekleriyle yapılan deney sonuçlarından elde edilen kesişim noktası sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları ve FCC indeksleri Çizelge 4.12'de topluca verilmiştir.

Çizelge 4.12 Karadon İşletmesi -360/-460 Acılık damarı örnekleri için kesişim noktası sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları ve hesaplanan FCC indeksleri.

Deney No	Kesişim Noktası Sıcaklığı (°C)	110-220°C arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı (°C/dak)	FCC İndeksi (dak ⁻¹)
1	229	0,26	1,15
2	233	0,25	1,13
3	-	0,25	Hesaplanamadı
4	-	0,23	Hesaplanamadı
5	-	0,22	Hesaplanamadı
6	-	0,33	Hesaplanamadı
7	-	0,45	Hesaplanamadı
8	-	0,38	Hesaplanamadı
9	243	0,43	2,06
10	230	0,46	2,05

4.3.3 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar karşılaştırmada kolaylık sağlaması amacıyla Çizelge 4.13'te toplu olarak verilmiştir. Gelik İşletmesi Kurul ve Karadon İşletmesi Acılık Damarlarına ait kendiliğinden yanma deney sonuçları incelendiğinde genel olarak Kurul damarı örneklerinin kendiliğinden yanma açısından daha aktif olduğu söylenebilir. Kurul damarına ait örneklerle yapılan ve özellikle ince boyutlu kömür miktarının yüksek olduğu deneylerde (1, 2, 3, 6 ve 7 no'lu deneyler) reaktördeki kömür sıcaklığı fırın sıcaklığını kesmiş ve bu deneyler için kesişim noktası sıcaklıkları ve FCC indeksleri hesaplanabilmiştir. Bu deneyler için kesişim noktası sıcaklıkları 228°C ile 241 °C arasında değişkenlik göstermiştir. Bu gurup örnekler için yapılan kendiliğinden yanma deneylerinde 110-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı değerleri ise 0,23 ile 0,51 °C/dak arasında değişkenlik göstermiştir.

Karadon İşletmesi Acılık Damarından alınan örneklerle gerçekleştirilen kendiliğinden yanma deneylerinde ise reaktör içindeki örnek sıcaklığı sadece 1, 2, 9 ve 10 no'lu deneylerde fırın sıcaklığını kesmiştir. Bu deneylerde kullanılan örnekler için hesaplanan FCC indeks değerleri sırasıyla 1,15, 1,13, 2,06 ve 2,05 dak⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bu gurup örnekler için yapılan kendiliğinden yanma deneylerinde 110-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı değerleri ise 0,22 ile 0,46 °C/dak arasında değişkenlik göstermiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan örneklerin kısa analizleri incelendiğinde nem, kül içeriği, uçucu madde ve sabit karbon miktarları karşılaştırıldığında aralarında büyük farkların bulunmadığı ve dolayısıyla kendiliğinden yanma sonuçlarına etkilerinin çok büyük olmayacağı düşünülmektedir. Hatta, Kurul Damarı örneğinin ortalama kül içeriği (%24,45) Acılık damarı örneğinin ortalama kül içeriğinden (%15,11) yüksek olmasına rağmen kendiliğinden yanma deneylerinde Kurul örneklerinin daha aktif bir profil sergilediği söylenebilir. Bu durumun kömürlerin petrografik yapısındaki farklılıktan kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir.

Deney sonuçları incelendiğinde deneylerde en etkili parametrenin tane boyutu olduğu söylenebilir. Özellikle görece olarak ince boyutlu kömür miktarının yüksek olduğu deneylerde kesişim sıcaklığının elde edilebilmiş olması bunu destekler niteliktedir. Bu bağlamda deneylerde kullanılan boyut grupları arasında -0,075 mm, -0,50+0,075 mm ve -1,00+0,50 mm boyut guruplarının yüksek miktarda kullanıldığı deneylerde kesişim noktası sıcaklıkları tespit edilebilmiş ve FCC indeksleri hesaplanabilmiştir.

Deneyler sırasında etkili olan bir diğere parametre ise fırın sıcaklığındaki artış hızı olarak göze çarpmaktadır. Her iki grup deneyde de ilk beş deney 15°C/saat artış hızı kullanılmış takip eden beş deneyde ise sıcaklık artış hızı 30°C/saat olarak ayarlanmıştır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında hem Kurul hem de Acılık Damarı örnekleriyle yapılan kendiliğinden yanma deneylerinde ilk beş deneyde hesaplanabilen FCC indeks değerleri 1,02-1,15 aralığında iken, fırın sıcaklık artış hızı 30°C/saate çıkarıldığında elde edilen FCC indeks değerlerinin yaklaşık iki kat artarak 2,05-2,16 aralığında olduğu görülmüştür. Deneyler sırasında elde edilen ve kömürlerin 110°C-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışları da bu çıkarımı destekler niteliktedir. Fırın sıcaklık artış hızı 15°C iken elde edilen ortalama sıcaklık artışları 0,23 ile 0,26 arasında iken, fırın sıcaklık artış hızı 30°C/saate yükseltildiğinde ortalama sıcaklık artışları da neredeyse iki kat artarak 0,46 ile 0,51 arasında değişmiştir. Bu sonuçların kendiliğinden yanmada ortam sıcaklığının etkisini göstermesi açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

Kesişim noktası sıcaklığı tespit edilemeyen ve bu nedenle FCC indeksi hesaplanamayan deneyler incelendiğinde (Kurul Damarı 4, 5, 8, 9 ve 10 no'lu örnekler – Acılık Damarı 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 no'lu örnekler), birkaç deney hariç, deneylerin sonuna doğru kömür sıcaklıklarının fırın sıcaklıklarına çok yaklaştığı ancak kesemediği gözlenmiştir. Ancak, bu deneylerde deney süresinin arttırılması ile fırın ısıtma hızından bağımsız olacak şekilde, kömür sıcaklıklarının fırın sıcaklıklarını kesebilecek olması olasılığının çok yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Bu deneylerde her ne kadar FCC indeksi hesaplanamamış olsa da kendiliğinden yanma olaylarında zaman kavramının önemini göstermesi bakımından bu sonuçların da önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.13 Deneylere ait toplu sonuçlar.

Deney No	Kurul Damarı			Acılık Damarı		
	Kesişim Noktası Sıcaklığı (°C)	110-220°C Arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı (°C/dak)	FCC İndeksi (dak ⁻¹)	Kesişim Noktası Sıcaklığı (°C)	110-220°C arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı (°C/dak)	FCC İndeksi (dak ⁻¹)
1	228	0,25	1,03	229	0,26	1,15
2	230	0,23	1,02	233	0,25	1,13
3	232	0,24	1,03	-	0,25	Hesaplanamadı
4	-	0,25	Hesaplanamadı	-	0,23	Hesaplanamadı
5	-	0,24	Hesaplanamadı	-	0,22	Hesaplanamadı
6	241	0,51	2,11	-	0,33	Hesaplanamadı
7	233	0,50	2,16	-	0,45	Hesaplanamadı
8	-	0,46	Hesaplanamadı	-	0,38	Hesaplanamadı
9	-	0,45	Hesaplanamadı	243	0,43	2,06
10	-	0,46	Hesaplanamadı	230	0,46	2,05



BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Türkiye Taşkömürü Kurumu, Karadon Müessesesi Karadon İşletmesi Kurul Damarından (-160/-260) ve Gelik İşletmesi Acılık Damarından (-360/-460) kömür, tavan ve taban taşı örnekleri alınmış ve kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler tasarlanırken deney koşullarının bir uzunayak göçük bölgesindeki koşulları temsil etmesine çalışılmıştır.

Laboratuvarda yapılacak deneylerin bir uzunayak arakasındaki göçük bölgesini temsil edebilmesi amacıyla kömür örnekleri -2,36+1,70mm, -1,70+1,00 mm, -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm ve -0,075 mm olmak üzere beş farklı boyut gurubunda hazırlanmıştır. Bunun yanı sıra alınan taban taşı örnekleri +4,75 mm boyutunda, tavan taşı örnekleri ise -1,00+0,50 mm, -0,50+0,075 mm ve -0,075 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan taban taşı, kömür ve tavan taşı örnekleri paslanmaz krom-nikel reaktör içerisine; reaktör tabanına 25 gr taban taşı, üzerine farklı boyutlarda kömür örneği ve en üste farklı boyutlarda kömür ve tavan taşı karışımı olacak şekilde yerleştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında reaktörün içine yerleştirildiği sıcaklık kontrollü fırının sıcaklık artış hızı tek boyutlu kömür örnekleri için 15°C/saat, karışım kömür örnekleri için ise 30°C/saat olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde genel itibariyle Gelik İşletmesi Kurul Damarına ait örneklerin Karadon İşletmesi Acılık Damarına ait örneklerin kendiliğinden yanma açısından daha aktif olduğu söylenebilir.
- Kurul damarına ait örneklerle yapılan ve özellikle ince boyutlu kömür miktarının yüksek olduğu deneylerde (1, 2, 3, 6 ve 7 no'lu deneyler) kesişim noktası sıcaklıkları 228°C ile 241 °C arasındadır. Bu deneyler için FCC değerleri ise sırasıyla 1,03, 1,02, 1,03, 2,11 ve 2,16 dak⁻¹ olarak hesaplanmıştır. FCC değerlerinden bağımsız olarak, Kurul Damarı

örnekleri ile gerçekleştirilen deneylerde kömürün 110-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı değerleri 0,23 ile 0,51 °C/dak arasında değişkenlik göstermiştir.

- Acılık damarından alınan örneklerle gerçekleştirilen kendiliğinden yanma deneylerinde sadece 1, 2, 9 ve 10 no'lu deneylerde kesişim noktası sıcaklıkları tespit edilebilmiş ve bu deneylere ait FCC indeks değerleri sırasıyla 1,15, 1,13, 2,06 ve 2,05 dak⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Kesişim noktası sıcaklıkları bu grup örnekler için 229-243 °C arasında değişim göstermiştir. FCC indeksinin hesaplanmasından bağımsız olarak, Acılık Damarına ait örneklerle yapılan kendiliğinden yanma deneylerinde 110-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı değerleri ise 0,22 ile 0,46 °C/dak arasında değişkenlik göstermiştir.
- Her iki damara ait ortalama sıcaklık artışları (110-220°C arası) incelendiğinde artışların Kurul Damarına ait örneklerde bir miktar daha yüksek olsa da neredeyse tüm deneylerde benzer şekilde olduğu görülmüştür.
- Her iki damara ait örneklerin kısa analizlerinde önemli farklar bulunmadığı ve dolayısıyla kendiliğinden yanma sonuçlarına etkilerinin çok önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Kendiliğinden yanma deneylerinde eğilimlerdeki farkların kömürlerin petrografik yapısındaki farklılıktan etkilenmiş olabileceği düşünülebilir.
- Tane boyutunun deneylerde en etkili parametre olduğu düşünülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde -0,075 mm, -0,50+0,075 mm ve -1,00+0,50 mm boyut gruplarının daha yüksek miktarlarda kullanıldığı deneylerde kömür sıcaklığı fırın sıcaklığını kesmiş olduğu açıkça görülmektedir. .
- Fırın sıcaklığındaki artış hızının da deney sonuçlarında etkili olduğu söylenebilir. Sıcaklık artış hızının 30°C/saat olarak ayarlandığı deneylerde kömür örneklerinin 110°C-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışları 15°C/saat ile kıyaslandığında 2 kattan fazla artmıştır. Ayrıca, fırın sıcaklık artış hızının 30°C/saat olduğu deneylerde hesaplanan FCC indekslerinin de iki kattan fazla arttığı gözlenmiştir.

- Ortam sıcaklığındaki artışın kendiliğinden yanma deney sonuçlarına olan etkisinin net olarak görülmüş olması, uzun ayak göçük bölgesinde kömürün oksidasyonu nedeniyle açığa çıkan ısının göçüğe kaçan hava ile uzaklaştırılmadığı durumlarda kendiliğinden yanma olayının hızlanarak devam ettiğini açık şekilde göstermektedir.
- Fırın ısıtma hızından bağımsız şekilde toplam deney süresinin kendiliğinden yanma deney sonuçlarında etkili olduğu düşünülmektedir. Kesişim noktası sıcaklığı tespit edilemeyen deneylerde kömür sıcaklık profillerinin birkaç deney haricinde deney süresinin arttırılması ile fırın sıcaklıklarını kesebilecek bir eğilim izlediği gözlenmiştir. Bu sonuç, gerçek şartlarda bir kendiliğinden yanma olayının yaşanabilmesi için gerekli bir “kuluçka” süresine ihtiyaç duyulduğu gerçeğiyle örtüşmektedir.
- Her ne kadar tüm deneylerde kömür örnekleri için hesaplanan FCC değerleri bu kömürlerin kendiliğinden yanmaya hiç yatkın olmadığını (FCC hesaplanamayan deneyler) ya da yatkınlıklarının “düşük” (0-5 dak⁻¹ aralığında) olduğunu işaret ediyor olsa da bu sonuç kömürlerin kendiliğinden yanmayacağı şeklinde yorumlanmamalıdır. Zira, uygun şartlar ve yeterli zaman olması durumlarında tüm kömürlerin kendiliğinden yama riskine sahip olduğu bir gerçektir. Bu durum FCC değeri hesaplanmayan deneylerdeki kömür sıcaklık profillerinden açık şekilde anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması deneyler sırasında açığa çıkan gaz ürünlerin incelenmemiş olması çalışmanın bir eksikliği olarak düşünülmektedir. Kendiliğinden yanma olaylarında gaz ürünlerin, özellikle CO, CO₂ ve CH₄ konsantrasyonlarının izlenmesi önemli çıkarımları beraberinde getirebilmektedir. Ayrıca, farklı akış hızı (özellikle göçük bölgelerini daha iyi temsil edebilmek açısından daha yavaş akış hızları) koşullarında deneyler gerçekleştirilmesinin de faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Uzunayak göçük bölgelerindeki kömür, tavan taşı ve taban taşı koşullarının tam olarak bilinememesi nedeniyle bu tür bölgelerin laboratuvar ortamında modellenmesi oldukça güçtür. Ancak, bu bölgelerdeki kendiliğinden yanma olaylarının daha iyi anlaşılabilmesi açısından bu türlü çalışmaların yapılmasına da gereksinim duyulmaktadır.



KAYNAKLAR

- ASTM D3173/3173M** (2017) Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, West Conshohocken, PA; ASTM International, https://doi.org/10.1520/D3173_D3173M-17A
- ASTM D3174–12** (2018) Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, West Conshohocken, PA; ASTM International, <https://doi.org/10.1520/D3174-12R18>
- ASTM D3175-18** (2018) Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke, West Conshohocken, PA; ASTM International, <https://doi.org/10.1520/D3175-18>
- Banerjee S C** (1982) A theoretical design to the determination of risk index of spontaneous fires in coal mine, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 399-406.
- Banerjee S C** (1985) *Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires*, A.A. Balkema, Rotterdam, 167 pp.
- Barış K** (2006) Yüksek Uçuculu Kömürde Düşük Sıcaklık Oksidasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 112 s.
- Barış K** (2010) Farklı Kömürleşme Derecesine Sahip Kömürlerde Düşük Sıcaklık Oksidasyonu, *Doktora Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 215 s.
- Barış K, Şahin N ve Özarlan A** (2006) Derin kömür damarlarında CO değerlendirme ve depolama olanakları, Türkiye 15. Kömür Kongresi, 7-9 Haziran, Zonguldak, Türkiye, 69- 78.
- Beamish B and Beamish R** (2010) Benchmarking moist coal adiabatic oven testing, *Coal Operators' Conference*, 11-12 February, Wollongong, Australia, 264-268.
- Beamish B B and Hamilton G R** (2005). Effect of moisture content on the R70 self-heating rate of Callide Coal, *International Journal of Coal Geology*, 64: 133-138.
- Beamish B B, Lau A G, Moodie A L and Vallance T A** (2002). Assessing the self-heating behaviour of Callide coal using a 2-metre column, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15: 385-390.
- Biçer İ** (2011) GLİ Tunçbilek kömürlerinde kendiliğinden yanmanın sıkışma etkisine bağlı olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilimdalı, 64 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Buzkan İ** (1990) Zonguldak - Karadon bölgesinde Kozlu Formasyonu kömürlerinin Petrolojisi ve Değerlendirilmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 134 s
- Chamberlain E A and Hall D A** (1973) Practical early detection of spontaneous combustion. *Colliery Guardian* 221, 190–194.
- Clarkson F, Kelly T, Usher D and Rijn V** (2007) Extension to Detection of heating of coal at low temperatures, Australian Coal Association Research Program Project no. C10015, Australian Coal Association Research Program, Brisbane, Qld.
- Cliff D, Clarkson F, Davis R, Bennett T and Smalley M** (2000) *Better Indicators of Spontaneous Combustion, Final Report*, Australian Coal Association Research Program, Project C5031, Sydney, 228 pp.
- Denby B and Ren T X** (1992) A Knowledge-Based Decision Support System for Spontaneous Combustion Control, *The Mining Engineer*, 151(366): 253-258.
- Didari V** (1986) Yeraltı Ocaklarında Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Risk İndeksleri, *Madencilik*, 25 (4): 31-33.
- Erkan H** (1964) Kömürün Depolanması, *Madencilik*, 3: 822-827.
- Eroğlu N ve Gouws M J** (1993) Kömürün Kendiliğinden Yanmasına Ait Kuramlar, *Madencilik*, 22(2): 13-18.
- Feng K K** (1985) Spontaneous Combustion of Canadian Coals, *CIM Bulletin*, 78(877): 71-75.
- Feng K K, Chakravorty R N and Cochrane T S** (1973) Spontaneous Combustion - A Coal Mining Hazard, *CIM Bulletin*, 66: 75-84.
- Güyağüler T ve Durucan Ş** (1985) Ocak tozları, *Yeraltı Kömür Madenciliğinde Çevre Sorunları ve Kontrol Yöntemleri Seminer El Kitabı*, 57-60.
- Karaçam E** (1988) Zonguldak Havzası Kömürlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlıklarının Belirlenmesi, HÜZMF, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak, 47 s.
- Karaçam E, Didari V ve Atalay T** (1992) Zonguldak Kömürlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlıklarının Araştırılması, *Türkiye 8. Kömür Kongresi*, 4-8 Mayıs, Zonguldak, Türkiye, 91-100.
- Karayigit A İ** (1998) Kömür Petrografisi, *Kömür*, Kural O (Ed.), Kurtis Matbaası, İstanbul, 71-85.
- Kuchta J M, Rowe V R and Burgess D S** (1980) Spontaneous Combustion Susceptibility of U.S. Coals, *Bureau of Mines Report of Investigation*, RI8474.
- Miron Y, Lazzara C P and Smith A C** (1992) *Cause of Floor Self-Heatings in an underground Coal Mine, Report of Investigation*, US Bureau of Mines, 24 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Nakoman E** (1971) *Kömür*, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayını, Eğitim Serisi No: 8, 348 s.
- Nugroho Y S, McIntosh A C and Gibbs B M** (2000) Low-temperature oxidation of single and blended coals, *Fuel*, 79: 1951-1961.
- Ökten G** (1988) Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Önlenmesi için Alınacak Tedbirler, *Kömür Kimyası ve Teknolojisi*, Kural O (Ed.), İstanbul, 103-113.
- Özpeker I** (1991) *Kömür Oluşumu Petrografisi ve Sınıflandırılması*, Kurtiş Matbaası, İzmir, 74 s.
- Schmal D** (1989) Spontaneous heating of stored coal, *Chemistry of coal weathering*, Nelson C R (Ed.), Elsevier, Amsterdam, 133-215.
- Stach E, Mackowsky M T, Teichmüller M, Taylor G H, Chandra D and Teichmüller R** (1982) *Stach's Textbook of Coal Petrology*, Gebrüder, Bomtraeger, Berlin, 424 pp.
- Sujanti W and Zhang D** (1999) A Laboratory Study of Spontaneous Combustion of Coal: The Influence of Inorganic Matter and Reactor Size, *Fuel*, 78: 549 -566.
- Toprak S** (2000) Kömür, Kömür Petrografisi ve Kok Teknolojisinde Kullanımı, Seminer Notları, Erdemir Eğitim Müdürlüğü, Karadeniz. Ereğli, 38 s.
- Wade L** (1988) The Propensity of South African Coals to Spontaneously Combustion, *Ph.D. Thesis*, University of Withwaterstrand, Johannesburg.
- Wang H, Dlugogorski B Z and Kennedy E M** (2003) Coal Oxidation at Low Temperatures: Oxygen Consumption, Oxidation Products, Reaction Mechanism And Kinetic Modelling, *Progress in Energy Combustion Science*, 29: 487-513.



BİBLİYOGRAFYA

- Coward H F** (1957) *Research on Spontaneous Combustion of Coal in Mines-A Review*. SMRE Research Report No:142.
- Flaig W** (1968) *Biochemical Factors in Coal Formation*, Coal and Coal-Bearing Strata, Murchison D and Westoll T S (Eds.), Oliver and Boyd, Edinburgh, pp. 197-232.
- Graham J I** (1923) Pyrites as cause spontaneous combustion in coal mines, *Transactions of the Institute of Mining Engineering*, 51: 500.
- Güney M** (1968) Certain factors affecting the oxidation and spontaneous combustion of coal, *University of Nottingham Mining Department Magazine*,: 20-71.
- Güney M** (1971) An adiabatic study of the influence of moisture on spontaneous heating of coal, *C.I.M. Bulletin*, March: 138-146.
- Morris R** (1896) A Historical Note of the Research Into the Causes of Spontaneous Combustion Prior to 1750, *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, 168-170.
- Potter M C** (1908) Bacteria as agents in the oxidation of amorphous carbon, *Proceedings of Royal Society*, 80: 239-259.
- Spackman W** (1958) The Maceral Concept and the Study of Modern Environments As A Means of Understanding the Nature of Coal, *Transactions of the New York Academy of Science Series II*, 20: 411 – 423.
- Wilfrid F** (1961) *Coal:its formation and composition*. Edward Arnold Publication, London, 806 p.
- Winmill T F** (1914/1915) The Adsorption of Oxygen by Coal. II. The Quantity of Oxygen Absorbed, *Trans. Inst. Min. Engrs.*, 48: 503-507.



ÖZGEÇMİŞ

Sefa KUKUL, 1988 yılında Zonguldak'ta doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Zonguldak'ta tamamladı. 2005 yılında liseden mezun oldu. 2016 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2017 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına dâhil oldu.

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Email: sefakukul67@hotmail.com