

SEYİTÖMER, BURSA VE AFŞİN-ELBİSTAN BÖLGESİNE AİT KÖMÜR
DAMARLARININ KENDİLİĞİNDEN YANMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ

Abbas Sagban Mohammed ALMUSLEHİ

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özer ÖREN

Ocak - 2022

KABUL VE ONAY SAYFASI

Abbas Sagban Mohammed ALMUSLEHİ tarafından hazırlanan “SEYİTÖMER, BURSA VE AFŞİN-ELBİSTAN BÖLGESİ'NE AİT KÖMÜR DAMARLARININ KENDİLİĞİNDEN YANMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek OY BİRLİĞİ ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

20/01/2022

Prof. Dr. Şahmurat ARIK
Enstitü Müdürü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Prof. Dr. Ali UÇAR
Anabilim Dalı Başkanı, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Özer ÖREN
Danışman, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Sınav Komitesi Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Özer ÖREN (Danışman)
Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şahin YUVKA
Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim ÇINAR
Maden Mühendisliği Bölümü, Konya Teknik Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %19 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Dr. Öğr. Üyesi Özer ÖREN

Abbas Sagban Mohammed ALMUSLEHİ

SEYİTÖMER, BURSA VE AFŞİN-ELBİSTAN BÖLGESİ'NE AİT KÖMÜR DAMARLARININ KENDİLİĞİNDEN YANMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ

Abbas Sagban Mohammed ALMUSLEHİ
Maden Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2022
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Özer ÖREN

ÖZET

Kendiliğinden yanma olayı madencilikte sıklıkla rastlanan ve madencilik faaliyetlerini zorlaştıran önemli bir doğa olayıdır. Birçok farklı faktörün etkisinde gerçekleşen kendiliğinden yanma prosesi yalnızca yeraltı madenciliğinde değil aynı zamanda açık ocaklarda, stok sahalarında ve kömürün kara yolu ya da deniz yoluyla uzun mesafeli taşınmasında da ortaya çıkmaktadır. Madencilik alanında işçi sağlığı ve iş güvenliğini tehdit eden bu olay, gerekli önlemlerin alınamaması durumunda çalışanların hayatını kaybetmesine neden olabilmektedir. Öte yandan işletmelerde ekonomik açıdan üretim kayıplarına ve makine-ekipmanların hasar görmesine neden olmaktadır. Telafisi olmayan bu gibi zararların önüne geçebilmek adına kendiliğinden yanma ile ilgili alınacak önlemlerin henüz üretim planlama aşamasında ortaya konması oldukça önemlidir. Bu önlemlerin en başında da kömürün kendiliğinden yanma davranışının belirlenmesi gelmektedir.

Bu tez çalışmasında Çelikler Holding A.Ş. bünyesinde faaliyet gösteren Seyitömer Linyit İşletmesi, Bursa Linyit İşletmesi ve Afşin Elbistan Linyit İşletmesinden alınan kömür numunelerinin kendiliğinden yanma yatkınlıklarının tespit edilmesine yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu maden ocaklarından temin edilen toplam 20 adet numunenin kendiliğinden yanma karakteristiği kesişim noktası metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Her işletme kömürüne ait tutuşma sıcaklıkları ve yanma risk indeksi değerleri de ortaya konmuştur. Buna göre; Seyitömer linyit işletmesi S-49 panosu 164-166°C, Höyük panosu 162-176°C, Bursa Linyit İşletmesi A panosu 154-160°C ve Afşin Elbistan Linyit İşletmesi 63 no'lu panonun tutuşma sıcaklıkları ise 155-161°C arasında değerler almıştır. Elde edilen sonuçlardan hareketle Seyitömer Linyit İşletmesi ve Bursa Linyit İşletmesi'ne ait kömürler kendiliğinden yanma riski açısından "yüksek" riskli olarak belirlenirken Afşin Elbistan Linyit İşletmesi kömürlerinin kendiliğinden yanma riski ise "orta- yüksek" olarak saptanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çelikler Holding, Kendiliğinden Yanma, Kesişim Noktası Metodu, Kömür Oksidasyonu, Yatkınlık İndeksi

DETERMINATION OF SPONTANEOUS COMBUSTION CHARACTERISTICS OF COAL SEAMS OF SEYİTÖMER, BURSA AND AFŞİN-ELBİSTAN REGIONS

Abbas Sagban Mohammed ALMUSLEHİ

Mining Engineering, M.Sc Thesis, 2022

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Özer ÖREN

SUMMARY

Spontaneous combustion is an important natural phenomenon that is frequently encountered in mining and makes mining activities difficult. The spontaneous combustion process, which occurs under the influence of many different factors, occurs not only in underground mining, but also in open pits, stockpiles and long-distance transport of coal by road or sea. This event, which threatens the health and safety of workers in the mining field, can cause the death of employees if the necessary precautions are not taken. On the other hand, it causes economic production losses and damage to machinery-equipment in enterprises. In order to prevent such irreparable damages, it is very important that the measures to be taken regarding spontaneous combustion are put forward at the production planning stage. At the forefront of these measures is the determination of the spontaneous combustion behavior of coal.

In this thesis, experimental studies have been carried out to determine the spontaneous combustion susceptibility of coal samples taken from Seyitömer Lignite Enterprise, Bursa Lignite Enterprise and Afşin Elbistan Lignite Enterprise operating within the Çelikler Corporation. The spontaneous combustion characteristics of a total of 20 samples obtained from the mentioned mines were analyzed using the crossing point method. Ignition temperatures and liability risk index values of each operating coal are also revealed. According to this, ignition temperatures of Seyitömer Lignite Enterprise S-49 panel 164-166°C, Höyük panel 162-176°C, Bursa Lignite Enterprise A panel 154-160°C and Afşin Elbistan Lignite Enterprise panel no 63 have ignition temperatures between 155-161°C got values. Based on the results obtained, coals belonging to Seyitömer Lignite Enterprise and Bursa Lignite Enterprise are determined as "high" risk in terms of spontaneous combustion risk, while the risk of spontaneous combustion of Afşin Elbistan Lignite Enterprise coals is determined as "medium-high".

Keywords: Crossing point method, Çelikler Corporation, Liability Index, Oxidation Of Coal, Spontaneous Combustion.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmasının gerçekleştirilmesinde, değerli bilgisi benimle paylaşılan ve benim yanımda hissettiren, bilgilerine yararlandığım ve her zaman desteğini esirgemeyen sayın danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özer ÖREN hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar maddi ve manevi destek olan, her zaman yanımda olup bana yol gösteren AİLEME başta babam Sagban ALMUSLEHİ ve annem Suhailah ALMUSLEHİ olmak üzere sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca destek veren ve her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşim Maryam ALMUSLEHİ ve Allah bana verdiği en değerli mücevher kızım Ruya ALMUSLEHİ'ye teşekkür ederim.

Numunelerin sağlanmasında yardımlarını esirgemeyen Maden Mühendisi Sayın Enes KARAKAYA ve Harita Mühendisi Sayın Fahrettin MERCİMEK ve Çelikler Holding A.Ş. Yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar ortamında hem lisans hem de yüksek lisans döneminde bana yardımcı olan Maden Teknikeri Sayın Murat ÖZKAN ve Maden Mühendisi Sayın Berkay SAĞDIÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KÖMÜRÜN OLUŞUM MEKANİZMASI VE KLASİFİKASYONU	4
2.1. Kömür.....	4
2.2. Kömürün Oluşumu	4
2.3. Kömürlerin Sınıflandırılması	5
3. KÖMÜRÜN ÖZELLİKLERİ.....	8
3.1. Kömürün Fiziksel Özellikleri.....	8
3.1.1. Nem.....	8
3.1.2. Gözeneklilik	9
3.1.3. Yoğunluk.....	9
3.1.4. Gaz absorpsiyon özelliği	9
3.1.5. Sertlik.....	9
3.1.6. Öğütülebilirlik	10
3.1.7. Ufalanabilirlik.....	10
3.1.8. Mukavemet.....	10
3.1.9. Renk ve çizgi rengi	11
3.1.10. Parlaklık	11
3.1.11. Elektrik iletkenliği.....	11
3.1.12. Isıl iletim özelliği	11
3.2. Kömürün Petrografik Özellikleri	12
3.2.1. Litotipler.....	13
3.2.2. Maseraller.....	13
3.2.3. Mikrolitotipler	14
4. KÖMÜRLERDE OKSİDASYON VE KENDİLİĞİNDEN YANMA	16
4.1. Kömürlerde Kendiliğinden Yanma Mekanizması.....	16

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.2. Kendiliğinden Yanma Teorileri	18
4.2.1. Pirit teorisi	19
4.2.2. Bakteri teorisi	19
4.2.3. Oksidasyon teorisi.....	19
4.2.4. Nem teorisi	20
4.3. Kendiliğinden Yanma Olayını Tespit Etmek İçin Kullanılan Yaklaşımlar	20
4.3.1. Laboratuvar teknikleri	20
4.3.2. Pratik yöntemler.....	30
4.4. Kömürün Kendiliğinden Yanmasını Etkileyen Faktörler	31
4.4.1. İç faktörler	31
4.4.2. Dış faktörler.....	34
4.5. Geçmiş Dönemde Yapılan Kendiliğinden Yanma Çalışmaları.....	35
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	38
5.1. Numunelerinin Alındığı Kömür Damarlarının Özellikleri	38
5.1.1. Seyitömer Linyit İşletmesi (SLİ)	38
5.1.2. Bursa Linyit işletmesi (BLİ).....	41
5.1.3. Afşin Elbistan Linyit işletmesi	41
5.2. Numunelerin Alınması	44
5.3. Numunelerin Hazırlanması	45
5.4. Deneylerde Kullanılan Kömürlerin Kimyasal Analizleri	46
5.5. Kendiliğinden Yanma Testleri	47
5.5.1. Deney düzeneği ve metot	47
5.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	52
6. SONUÇLAR.....	58
KAYNAKLAR DİZİNİ	59
EKLER	

Ek-1. Kütahya Seyitömer Linyit İşletmesi Panosuna Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

Ek-1.1. SLİ S-49 panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Ek-1.2. SLİ S-49 panosu (2) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Ek-1.3. SLİ S-49 panosu (3) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Ek-1.4. SLİ S-49 panosu (4) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Ek- 1.5. SLİ S-49 panosu (5) no'lu deneye ait analiz sonuçları

İÇİNDEKİLER (devam)

Ek- 2. Kütahya Seyitömer Linyit İşletmesi Panosuna Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

- Ek- 2.1. SLİ-Höyük panosu (1) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 2.2. SLİ-Höyük panosu (2) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 2.3. SLİ-Höyük panosu (3) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 2.4. SLİ-Höyük panosu (4) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 2.5. SLİ-Höyük panosu (5) no’lu deneye ait analiz sonuçları

Ek- 3. Bursa Linyit İşletmesi A Panosuna Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

- Ek- 3.1. BLİ A panosu (1) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 3.2. BLİ A panosu (2) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek-3.3. BLİ A panosu (3) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek-3.4. BLİ A panosu (4) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek-3.5. BLİ A panosu (5) no’lu deneye ait analiz sonuçları

Ek- 4. Afşin Elbistan Açık Ocak Linyit İşletmesi Damar 63 No’lu Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

- Ek- 4.1. Afşin Elbistan 63 pano (1) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 4.2. Afşin Elbistan 63 pano (2) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 4.3. Afşin Elbistan 63 pano (3) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 4.4. Afşin Elbistan 63 pano (4) no’lu deneye ait analiz sonuçları
- Ek- 4.5. Afşin Elbistan 63 pano (5) no’lu deneye ait analiz sonuçları

ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1. Farklı kömür türlerinin zamana bağlı değişimi.....	4
3.1. Kömürlerde nem bulunuş şekilleri	8
3.2. Kömür mikrolitotipleri	14
4.1. Kömür oksidasyonunda gerçekleşen reaksiyon aşamaları.....	17
4.2. Sıcaklığa bağlı olarak kömür oksidasyonunda meydana gelen değişimler.....	17
4.3. Kömür oksidasyonunda gelişen olaylar.....	18
4.4. Tipik olarak bir DTA termogramı.....	25
4.5. Kesişim noktası grafiği	28
5.1. SLİ S-49 üst kömür damarı stampı.	39
5.2. SLİ höyük panosu “ÜST” kömür damarı stampı.	40
5.3. Orhaneli Havzası litolojik dizilimi.....	41
5.4. Afşin – Elbistan kömür havzası genelleştirilmiş stratigrafik kesiti.....	43
5.5. Numune alınması (a) SLİ Höyük panosu numunesi, (b) SLİ S-49 panosu numunesi, (c) Afşin Elbistan 63 no’lu pano, (d) BLİ A panosu.....	44
5.6. Halkalı değirmen ve çeneli kırıcı.	45
5.7. (a) Konileme - dörtleme, (b) Karelaj yöntemi ve (c) 200 mesh elek.....	46
5.8. Kendiliğinden yanma testleri için kullanılan deney seti.....	48
5.9. Deney için kullanılan Carbolite markası programlanabilen etüv.....	49
5.10. Etüvün programı ayarlanması için ekran kumandası.	49
5.11. Etüv içinde yerleştirilmiş reaktör.	50
5.12. Deneyde kullanılan kaydedici.....	51
5.13. (a) Deney için kullanılan oksijen tüpü, (b) Akış ölçümü.....	52
5.14. SLİ S-49 (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.	54
5.15. SLİ-Höyük (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.	55
5.16. BLİ- A (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.....	56
5.17. Afşin Elbistan 63 (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlere ait tanımlayıcı özellikler.	5
2.2. Kömürlerin ASTM sınıflandırması	7
3.1. Kömürlerdeki petrografik bileşenler	12
3.2. Maseraller ve maseral grupları.....	14
3.3. Kömür mikrolitotiplerin sınıflanması.....	15
4.1. Çeşitli parametrelerin kömür oksidasyon oranı üzerine etkisi.	20
4.2. Adyabatik test tekniğine göre kömürlerin risk sınıflaması.	22
4.3. Modifiye edilmiş adyabatik yöntemle göre kömürlerin risk sınıflaması.	22
4.4. Olpinski yöntemine göre kömürün risk sınıflaması.	24
4.5. I _{FCC} indeksine göre kömür yatkinlık sınıflaması.	29
4.6. Kuluçka dönemine göre risklerin sınıflandırılması.	30
4.7. Kendiliğinden yanma üzerinde etkili olan faktörler.	31
5.1. Afşin-Elbistan havzasının üretilebilir kömür rezervi.	42
5.2. Deneylerde kullanılan kömür numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.....	47
5.3. Tüm kömür örneklerine ait kendiliğinden yanma deney sonuçları.	53
5.4. SLİ S-49 panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.....	54
5.5. SLİ-Höyük panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.	55
5.6. BLİ A panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.....	56
5.7. Afşin Elbistan 63 pano (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μm	Mikron
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
kcal/kg	Kilokalori/kilogram
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

Açıklamalar

BLİ	Bursa Linyit İşletmesi
CPT	Tutuşma veya Kesişim Noktası (Crossing Point Temperature)
ÇLİ	Çan Linyit İşletmesi
I _{FCC}	Yatkınlık İndeksi
LKD, ABD	Linyit Kuzey Dakota, Amerika Birleşik Devletleri
OSA	Ortalama Sıcaklık Artışı
SLİ	Seyitömer Linyit İşletmesi
°C/dk	Santigrat derece/Dakika

1. GİRİŞ

Ocak yangınları, işçilerin sağlığı ve güvenliği açısından büyük sorunlar yaratmasının yanı sıra üretimin kesintiye uğramasına ve büyük rezervlerin terk edilmesine neden olan en büyük madencilik problemlerinden biri olarak görülmektedir. Genel olarak kişisel hatalar haricinde kömürün doğal mekanizmasının bir sonucu olarak bu yangınlar meydana gelmektedir. Kömür havanın oksijeni ile temas ettiğinde oksitlenmekte ve bu oksidasyon sonucunda ekzotermik bir reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonun ürettiği ısı ortamdan uzaklaştırılmazsa, ortam sıcaklığı kademeli olarak yükselmekte ve bunun sonucunda kömürün sıcaklığı artmaktadır. Kömürün tutuşma sıcaklığına ulaşması ile birlikte de kendiliğinden yanma olayı meydana gelmektedir (Ören, 2006).

Kömürün kendiliğinden yanması nedeniyle özellikle yeraltı madenciliğinde ciddi sorunlar yaşanabilmektedir. Kendiliğinden yanma ile birlikte oluşacak patlama ve yangın neticesinde ortama zehirli gazların salınımı gerçekleşmekte ve bu durum da yeraltı yangınlarıyla mücadelede güçlüğe ve yeraltında temiz hava akımının aniden tehlikeli bir şekilde azalarak insan ölümlerine neden olmaktadır. Ayrıca oluşacak açık alevli yangın söndürülemezse mevcut üretim yeri terkedilmekte ve hem kömür üretimi hem de makine-ekipman kayıpları açısından olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır (Şensöğüt ve Çınar, 2000).

Kendiliğinden yanma neticesinde oluşan yangınlar; ayrıntılı olarak Çin, Amerika, Hindistan, Avustralya ve Almanya gibi ülkelerde büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Muduli, 2018). Geçmişten günümüze kömürün tutuşmasından kaynaklı birçok yangın vakası kayıt altına alınmıştır. 1947-1966 yılları arasında Polanya'da kömür ocak yangınlarının yaklaşık olarak %80'i kendiliğinden yanma sonucu meydana gelmektedir (Wachowicz, 2008). Çin'deki maden ocaklarında açığa çıkan gazların %40-60'ı ile yeraltı yangınlarının %60'ından fazlası kendiliğinden yanma neticesinde meydana gelmektedir (Xia vd., 2016). Yine aynı ülkede kömür madenlerinin %56'sının kendiliğinden yanma açısından risk içerdiği belirtilirken meydana gelen yangınlar sonucunda senelik yaklaşık 20 milyon ton olarak kömür kaybı meydana gelmektedir (Kong vd., 2017). Benzer şekilde Almanya'nın Ruhr havzasında her yıl 10'dan daha fazla kendiliğinden yanma orijinli yangın vakası olduğu belirtilmiştir (Singh, 2013). Dünyada maden açısından önemli ülkelerden birisi olan Hindistan'da meydana gelen ocak yangınları çoğunlukla Karanpura, Bokaro, Ib-valley, Talcher, Chirimiri, Singrauli, Singareni ve özellikle Jharia ve Raniganj bölgelerinde vuku bulmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen kömür yangınlarının %70'inin kendiliğinden yanma merkezli olduğu bildirilmiştir (Mohalik vd., 2016; Nimaje & Tripathy, 2016). 1960-1991 seneleri içerisinde Avustralya New South Wales eyaletinde 100'ün

üzerinde kendiliğinden yanma olayı meydana gelmiştir (Wang vd., 2015a). 1970-1990 yılları arasında Güney Afrika'da meydana gelen 254 yangının önemli bir bölümünün kendiliğinden yanma sonucu ortaya çıktığı ifade edilmiştir (Liang vd., 2017). Özellikle Witbank ve Sasolburg kömür sahalarının kendiliğinden yanmaya yatkın oldukları yapılan araştırmalarda dile getirilmiştir (Pone vd., 2007; Onifade & Genc, 2019). 1995-2002 yılları arasında Çek Cumhuriyeti'nin Ostrava-Karvina kömür maden sahasında yaklaşık 105 kendiliğinden yanma vakası meydana gelmiş ve yine 2004-2006 yılları arasında 54 yangın vakası kayıtlara geçmiştir (Taraba & Michalec, 2011; Taraba vd., 2014). Dünyada en fazla kömür üretimi yapan ülkelerden biri olan Amerika Birleşik Devletleri'nde, 1990-1999 yıllarında açık işletme, yeraltı ve kömür hazırlama tesislerinde kendiliğinden yanma sonucu tespit edilen toplam 71 adet yangın meydana gelmiştir. Verilen değerlere göre bu değer bahsi geçen yıllar arasında meydana gelen tüm ocak yangınlarının %16'sını oluşturmaktadır (De Rosa, 2004). 1997 yılında Endonezya'da turba stoklarında gerçekleşmiş olan kendiliğinden yanma olayı, geniş boyutta orman yangınına neden olmuştur (Nugroho vd, 1998).

Kömürün kendiliğinden yanmasının yarattığı etki sadece yeraltı madenciliği ile sınırlı değildir. Çünkü kendiliğinden yanma prosesi kömür ve oksijenin bulunduğu her ortamda gerçekleşebilen bir reaksiyondur. Açık ocak madenciliğinde, kömür silolarında, uzun mesafeli nakliye operasyonlarında ve hatta apartmanlarda bulunan kömür depolarında dahi kendiliğinden yanma olayı ile karşı karşıya kalmak mümkündür (Saraç, 1992).

Hem laboratuvarında hem de sahada kömürünün kendiliğinden yanması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Genel olarak bu çalışmaların çerçevesini kömürün yanma mekanizmasının açıklanması, kömürün kendiliğinden yanma yönünün belirlenmesi, yanma sırasında oluşan kimyasal reaksiyonların araştırılması, mevcut indekslere ek olarak yeni göstergelerin geliştirilmesi ve erken aşamalarda oksidasyon sürecini tanımlanması ve kontrolü gibi konular oluşturmaktadır (Şahin ve Didari, 2002). Bu çalışmaların gerçekleştirilmesinde en önemli çıkış noktası kömürün kendiliğinden yanmasını sağlayan koşulların belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması olarak özetlenebilir. Bu bağlamda bir maden mühendisi tarafından kömürün kendiliğinden yanma yatkınlığının belirlenerek gerçekleştirilecek üretim faaliyetlerinin tasarlanması daha önemli bir temel oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında Çelikler Holding A.Ş.'ye ait kömür ocaklarından alınan numuneler vasıtasıyla bu sahalarla ait kömürlerin kendiliğinden yanma karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır. Seyitömer Linyit İşletmesi (Kütahya), Bursa Linyit İşletmesi (Bursa) ve Afşin Elbistan Linyit İşletmelerinden (Kahramanmaraş) temin edilen kömürler üzerinde daha önce

herhangi bir yatkınlık tespitine yönelik çalışma yapılmadığı görülmekle birlikte kömürlerin kendiliğinden yanma yatkınlıkları literatürde kesişim noktası metodu adı verilen bir yöntem ile belirlenmiştir.

Bu amaçla, bahsi geçen maden işletmelerinden temin edilen kömürler öncelikle Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarlarına getirilmiş ve kırma öğütme işlemi sonrası $-75\text{ }\mu\text{m}$ (mikron) boyutuna indirilmiştir. Deneylerin başlangıcına kadar oksidasyonu engellemek adına kilitli poşetler içerisinde derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. Daha sonra numunelerin kısa analizleri yapılarak kömürlerin genel karakteristiği ortaya konmuştur. Seyitömer Linyit İşletmesi S-49 pano için 5 ve Höyük pano için 5, Bursa Linyit İşletmesi Orhaneli A pano için 5 ve Afşin Elbistan Linyit İşletmesi 63 no'lu pano için 5 adet olmak üzere toplamda 20 adet kesişim noktası deneyi gerçekleştirilmiş ve detayları ile tez çalışması kapsamında değerlendirilmiştir.

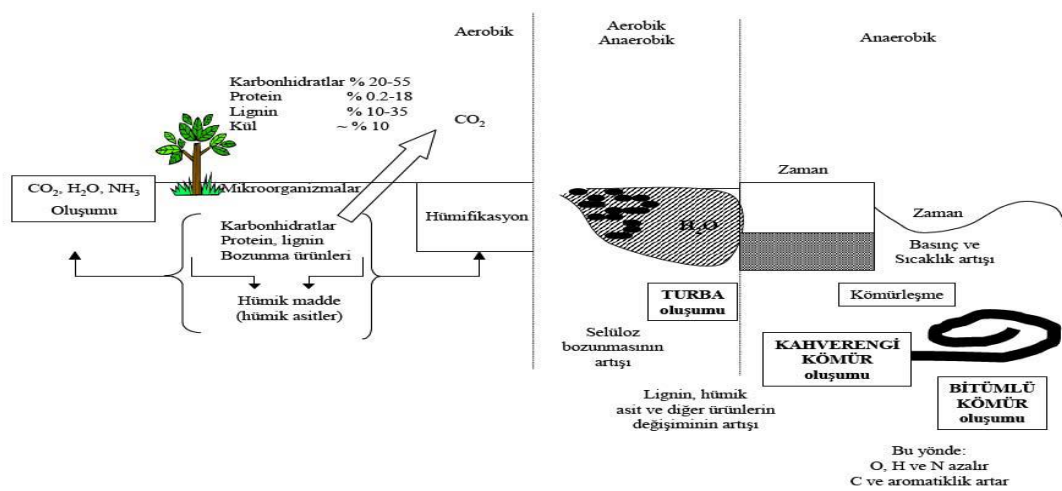
2. KÖMÜRÜN OLUŞUM MEKANİZMASI VE KLASİFİKASYONU

2.1. Kömür

Kömür; farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, değişik organik ve inorganik içeriklerden oluşan siyah ve kahverengi renge sahip olup, havanın oksijeni ile doğrudan yanıcı olarak %55 ile %95 arasında karbon içeren, serbest veya birleşik halinde, yandığında değişen oranlarda ve bileşimlerde kül bırakabilecek organik kökenli tortul bir kayadır (Ilıca, 2020; Kukul, 2019).

2.2. Kömürün Oluşumu

Kömürün oluşumunda birincil faktör olan farklı organik ve inorganik içeriğe sahip bitkilerin bozunması için çoğunlukla yağmurlu bir iklim koşulu ve belirli bir zaman dilimine yayılarak meydana gelen bir bataklık ortamının oluşması gerekmektedir. Bu prosesin ilk aşamasını oluşturan "turba", çökmekte olan bitkilerin ve bitki kalıntılarının biyokimyasal olarak ayrıştırılmasıyla üretilir. Atmosferdeki oksijenin etkisiyle bitki artıkları hızla ayrışır ve yok olur. Geri kalan miktarı eğer oksijen olmayan su altı ortamda ise ayrışma tam olarak gerçekleşmemektedir. Bu durumlara organik atıktaki oksijen ve hidrojen miktarının azalması neden olmaktadır. Bu nedenler ile karbon düzeyi az da olsa artmaktadır (Nakoman, 1998). Şekil 2.1.'de bitki kalıntılarının belirli bir süreç içerisinde turbadan başlayarak farklı kömür türlerine dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Farklı kömür türlerinin zamana bağlı değişimi.

Kaya turbasının yapısı bu etkilerle oluşur. Turba, jeokimyasal sürecin etkisi altında linyit, yarı bitümlü, antrasit, meta antrasite ve son olarak grafit haline dönüşmektedir. Söz konusu bu prosesin tümüne kömürleşme adı verilmektedir. Isı ve basınç jeokimyasal kömürleşme sürecinde etkilidir. Kömür türleri basınç ve sıcaklığın sonucuna göre farklılıklar göstermektedir. Linyit düşük seviyedeki basınç ve sıcaklık altında oluşurken, basınç ve sıcaklık değerleri fazla olduğunda antrasit olduğu bilinmektedir. Diğer kömür çeşitlerinin fiziksel ve kimyasal birçok özellikleri bu basınç ve sıcaklığın miktarına göre şekillenmektedir. Kömür damarları tarafından ısı ve basınç oluşmaktadır. Benzer kömür tabakasında boşluk arttıkça karbonizasyon daha ileri bir seviyeye gelir ve bu karbonizasyon derecesine rank denir (Vankrevelen, 1961).

2.3. Kömürlerin Sınıflandırılması

1957 yılında kömürlerin sınıflandırılması adına Uluslararası Kömür Konseyi tarafından, Uluslararası Standartlar Organizasyonu desteği ile genel bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırmada kömürler; kalorifik değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma ve kekleşme özelliklerine göre sert kömür (taşkömür) ve kahverengi kömür (alt-bitümlü ve linyit) olarak ikiye ayrılmaktadır (IEA/OECD Coal Information Report, 1983). Söz konusu sınıflandırmaya konu olan bu kömürlere ait belli başlı fiziksel özellikler Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlere ait tanımlayıcı özellikler.

Sert kömürler		Kahverengi kömürler	
Bitümlü	Antrasit	Linyit	Alt bitümlü
Koyu siyah	Parlak siyah	Kahverengi	Siyah
Blok şeklinde kırılma	Merceksi kırılma	Kırılgan, çabuk toz halinde ufalanma	Oksidasyonla veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz halinde ufalanma
Bantlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı	Masif odunsu veya üniform kilsli doku	Masif
Isıl Değer: 5390-7700 kcal/kg arasında	Isıl Değer: 7.000 kcal/kg'ın üstünde	Isıl Değeri: 4610 kcal/kg'ın altında	Isıl Değeri:4610-6390 kcal/kg arasında
Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek	Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürlerden daha yüksek
Sabit karbon içeriği yüksek	Sabit karbon içeriği yüksek	Düşük karbon içeriği	Sabit karbon içeriği bitümlü kömürlerinden düşük

Buna göre;

- Sert kömür (taş kömür): Islak ve külsüz olarak ısı değeri 24 MJ/kg'dan (5700 kcal/kg) fazla olan kömürlerdir. Uçucu madde içeriği, kalorifik değer ve koklaşma özelliklerine göre sınıflara ayrılmaktadır.
- Kahverengi kömür (alt-bitümlü ve linyit): Yaş, kül olmayan bazda kalorifik değeri 24 MJ/kg'ın (5700 kcal/kg) altında olan kömür türleridir. Toplam nem içerikleri ve kalorifik değerlerine göre sınıflara ayrılmaktadır.

Kömür üretimi ve ticaretinde ise IEA (International Energy Agency-Uluslararası Enerji Ajansı) / OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development-Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü) tarafından kullanılan sınıflandırmaya göre de kömürler ikiye ayrılmaktadır (TMMOB Taş Kömür Raporu, 2010):

1. Sert Kömür:

A. Koklaşabilir kömür: Yüksek fırınlarda kullanılabilecek koklaşma kalitesine sahiptir. Aynı zamanda metalürjik kömür olarak da adlandırılmaktadır.

B. Diğer bitümlü kömür ve antrasit: Koklaşabilir olarak sınıflandırılmayan taşkömürüdür. Bunlara ayrıca buhar kömürü de denir. Şlam, mikst ve diğer düşük kaliteli ürünler de bu kategoriye dahildir.

2. Kahverengi Kömürler:

A. Yarı bitümlü kömür: Isıl değeri 17-24 MJ/kg (4.165-5.700 kcal/kg) arasında değişen kömürdür.

B. Linyit: Isıl değeri 17 MJ/kg'dan (4165 kcal/kg) az olan kömür.

Kömür sınıflandırması, farklı kömür türlerinin ticareti ve tüketimiyle ilgili sorunların üstesinden geçmek için geliştirilen bir sistemdir. Kömürün önem kazanmasıyla birlikte bu kömür sınıflandırma sistemleri de önem kazanmıştır. Uçucu madde içeriği ile kömür sınıflandırılması ilişkisi mevcuttur. Görüldüğü gibi sınıflandırma yöntemleri ülkeden ülkeye değişmektedir. (ASTM- American Society for Testing and Materials) en sık ve en yaygın olarak kullanılan sistemdir (Ekmekçi, 2015). Bu sınıflamaya göre kömürler Çizelge 2.2.'de görüldüğü gibi dört ayrı grupta sınıflandırılmaktadır. Alt bitümlü kömürler ve bitümlü kömürler arasındaki ayırım kömürün kekleşme özelliğinden faydalanılarak yapılmaktadır.

Çizelge 2.2. Kömürlerin ASTM sınıflandırması (Ören, 2015).

Sınıf	Grup	Sabit karbon (%)		Uçucu madde (%)		Üst ısı değeri (% - Btu/lb)		Kekleşme özelliği
		Eşit veya büyük	Daha küçük	Eşit veya büyük	Daha küçük	Eşit veya büyük	Daha küçük	
Antrasit	Meta-antrasit	98			2			Kekleşmez
	Antrasit	92	98	2	8			
	Yarı-antrasit	86	92	8	14			
Bitümlü kömür	Düşük uçuculu	78	86	14	22			İyi kekleşir
	Orta uçuculu	69	78	22	31			
	Yüksek uçuculu-A		69	31		14000		
	Yüksek uçuculu-B					13000	14000	
	Yüksek uçuculu-C					11500 10500	13000 11500	
Alt bitümlü kömür	Alt bitümlü-A					10500	11500	Kekleşmez
	Alt bitümlü-B					9500	10500	
	Alt bitümlü-C					8300	9500	
Linyit	Linyit-A					6300	8300	Kekleşmez
	Linyit-B						6300	

3. KÖMÜRÜN ÖZELLİKLERİ

Kömürün özellikleri bileşimlerine, kömürleşme derecelerine ve oluşum koşullarına göre farklılık göstermeleri nedeniyle aynı yapı ve bileşime sahip iki tür kömürden bahsetmek zordur. Kömürün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri; kömürün üretimi, hazırlık ve nakliye gibi işlemlerde büyük önem taşımaktadır (Kural, 1998).

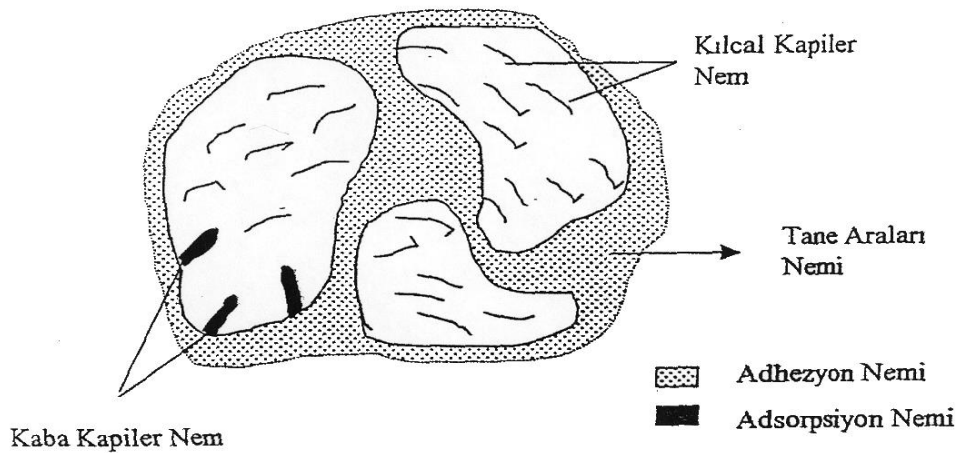
Kömürün sınıflandırılmasındaki amaç, kömürün özelliklerini tanımlamak ve kullanım alanlarını net bir şekilde ortaya koymaktır. Ticari piyasalarda satış ve satın-alma değerinin olup olmadığını belirlemek için kömür özelliklerini bilmek çok önemlidir.

3.1. Kömürün Fiziksel Özellikleri

3.1.1. Nem

Kömür bünyesinde nem, üç şekilde bulunmaktadır. Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi nem çeşitleri kılcal kapiler nem, tane arası nemi ve kaba kapiler nemdir.

1. Bünye nemi: Fiziksel olarak kömüre bağlı olan su, bünye nemini veya higroskopik nemi oluşturur.
2. Kaba nem: Kömür yüzeyinde tutulan suya kaba nem veya yüzey nemi denir ve kömür yüzeyindeki boşlukları doldurur.
3. Molekül suyu: Kömürün içerdiği molekül suyu veya hidrat suyu, kömüre kimyasal olarak bağlıdır. Kömürün toplam nem içeriği içindeki payı düşüktür.



Şekil 3.1. Kömürlerde nem bulunuş şekilleri (Akyüz, 2005).

Turbalar %75'ten fazla, yumuşak linyit kömürler %35-75 ve sert linyit kömürler %10-35 arası nem içermektedir (Kemal ve Arslan, 2014).

Yüzey nemi kömürün tane büyüklüğüne ve nem değerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kömürde tane boyutu azaldıkça yüzey alanı artar ve birim alana düşen yüzey nemi de buna bağlı olarak yükselmektedir. Bu tip kömürlerin yüzeyinden nemin uzaklaştırılması zor olmaktadır (Ateşok, 2004).

3.1.2. Gözeneklilik

Gözenekli bir yapıya sahip kömürün toplam gözenek hacminin büyük bir kısmı çok küçük gözeneklerden oluşur. Yüksek orijinal neme sahip kömürün gözenekliliği de yüksektir. Linyitin gözenekliliği genellikle %27-37 arasında değişmektedir. Yaklaşık %85 karbon içeriğine sahip kömürün gözenekliliği son derece küçüktür ve karbon içeriği arttıkça gözeneklilik tekrar artar (Kural, 1998).

3.1.3. Yoğunluk

Kömürde bulunan uçucu içerik ve nem, kömür yoğunluğunu etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. İçeriğindeki karbon miktarı ne kadar fazla ise yoğunluk o kadar yüksek olmaktadır.

Bazı kömür türlerinin yoğunlukları aşağıdaki gibidir:

1. Linyit :1.20 – 1.30 gr/cm³
2. Bitümlü kömürler :1.15 – 1.50 gr/cm³
3. Antrasit :1.40 – 1.70 gr/cm³

3.1.4. Gaz absorpsiyon özelliği

Kömürün gaz emme özelliği kimyasal yapısına ve özgül yüzeyine bağlıdır. Tanımlanan özgül yüzey arttıkça zaman gaz emme özelliği artar. Linyitin gaz emme kapasitesi, hacminin 1.5 katı hava ve karbondioksiti emebilir. Kömür CO₂ (karbondioksit) ve CH₄'ü (metan) emdiğinde ayrışır ve dağılır. Bu durum, nitrojen, hidrojen ve inert gazların adsorpsiyonun da meydana gelmez (Kemal ve Arslan, 2014).

3.1.5. Sertlik

Kömürün sertliği kömürün cinsine göre değişmekle birlikte içerdiği karbon ve uçucu maddelerin yüzdesine göre değişen bir özelliğe sahiptir. Düşük sertlikte olan kömür %85-90

karbon içerir. Kömürün sertliği, uçucu maddelerin oranı %5'ten %15'e çıkmasıyla azalmaktadır. Ancak uçucu madde içeriğinin %15'ten %40'a ulaşılması sonucunda kömürün sertliği de paralel bir şekilde artmaktadır (Ören, 2006).

Kömür çeşitliliği ne olursa olsun belirli bir sertlik derecesine göre sınıflama yapmak doğru değildir. Çünkü kömürler fiziksel yapı olarak birbirinden farklılık göstermektedir. Ancak genel olarak linyit, en yumuşak kömür türü olarak kabul edilmektedir. En sert kömür antrasit kömürü olarak görülmektedir.

3.1.6. Öğütülebilirlik

Kömürün öğütme yeteneği; sertlik, direnç ve gevreklik gibi özelliklerine bağlıdır. Kömürdeki kül içeriği öğütülebilirliğini etkiler. Linyit, bitümlü ve yarı bitümlü kömürlere göre öğütülmeye karşı daha dayanıklıdır (Özşen, 2003). Öğütme kabiliyeti, kömürün mineralojik bileşenlerine göre değişmektedir. Yapılan çalışmalarda öğütme indeksi; Düren için %16, Klaren için %40, Vitren için %47 ve Füsén için %21 olarak bulunmuştur (Kuzoluk, 2014).

3.1.7. Ufalanabilirlik

Kömürün en önemli özelliklerinden biri olarak ufalanabilirlik gösterilmektedir. Kömürün parça boyutu olarak daha küçük parçalar haline ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, çok ufalanan kömürlerde mevcut yüzey alanı artacağından, oksidasyon diğer kömür türlerine göre daha fazla olacak ve sonuç olarak kendiliğinden yanma riski büyük ölçüde artacaktır.

Linyit kömürü, kömür türleri arasında en az ufalanma özelliğine sahip olan bir kömürdür. Yarı bitümlü kömür ise ufalanma derecesi açısından yüksek olarak gösterilmektedir. Bu iki tür kömür, aynı zamanda bitümlü ve yarı katranlı kömürlere göre çökmeye karşı daha dayanıklıdır.

Kömür ufalanabilirliği kömür çeşidine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Kömürün litotip ve maseral içeriğine bağlı olarak ufalanabilirliğinde değişim olmaktadır. Bu bileşenler arasında Füsén en kolay kırılanabilen içeriktir. Düren ise kırılması en zor bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Vitren, Füsén'den daha büyük ve Klaren de, Vitren'den daha büyük dirence sahiptir (Kuzoluk, 2014).

3.1.8. Mukavemet

Kömürün çeşidi ve petrografisi kömürün mukavemeti ile bağlantılıdır. Kömür yapısında bulunan uçucu maddenin %20-25 arasında bir orana sahip olması durumunda mukavemeti düşük olmaktadır (Ören, 2006).

3.1.9. Renk ve çizgi rengi

Linyit kömürlerinin rengi ve çizgi rengi açık ile koyu kahverengi arasında değişmektedir. Yapılan araştırmalarda siyah ve siyah renge yakın kömür gruplarının daha yüksek kaliteye sahip olduğu ifade edilmiştir. Çizgi rengi, açık kahverengi ile kahverengi arasında değişen daha düşük dereceli kömürler de bitümlü kömür olarak tanımlanmaktadır (Kuzoluk, 2014).

3.1.10. Parlaklık

Kömür türleri kendi arasında değerlendirildiğinde daha mat görünüme sahip olan linyit kömürüdür. Antrasit kömürü ise yüzeyleri daha parlak ve aynı zamanda belirli kısımları mat olan bir kömür çeşididir. Bitümlü kömürlerde ise hem parlak hem de mat yüzeyler ile karşılaşmak olasıdır.

Kömürün kalitesini, kömürün parlaklığı ile ilişkilendirmek doğru değildir. Çünkü parlak olan bir kömür mat olan bir kömürden daha düşük kalorifik değere ve yanma özelliğine sahip olabilmektedir (Özşen, 2003).

3.1.11. Elektrik iletkenliği

Yalıtkan bir malzeme olarak bilinmesinden farklı olarak, karbonizasyon derecesi yüksek dereceye sahip olan kömürlerde özellikle %87'den daha fazla karbon içeren kömürün iletkenliğinin arttığı bilinmektedir (Ateşok, 2004).

Yapılan bir çalışmada, kömürün kendiliğinden yanma eğilimi ile kömür iletkenliği arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Yapılan çalışmaya göre, artan yatkinlık ile kömürün tutuşma riski de artabilmektedir. (Yıldırım vd., 2006).

3.1.12. Isıl iletim özelliği

Isıl iletkenlik bir maddenin ısını bünyesindeki farklı sıcaklık bölgeleri arasında iletebilme özelliği olarak tanımlanabilmektedir. Genel olarak bakıldığında ısı iletkenliği düşük olan kömürlerde ısı birikimi çok daha rahat yaşanabilmekte ve bu durum kömürün bünye sıcaklığını arttırarak kömürün daha düşük sıcaklık eşik değerlerinde tutuşmasına neden olabilmektedir. Ayrıca kömür bünyesindeki uçucu madde, rutubet ve özgül ağırlık gibi değerler kömürün ısı iletkenliğini arttıran fiziksel özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır (Ören, 2006).

3.2. Kömürün Petrografik Özellikleri

Kömürleşmenin gerek biyokimyasal gerekse de jeokimyasal aşamalarında kömür bünyesinde farklı kristal yapıda bazıları gözle dahi görülebilen çeşitli yapılar oluşmaktadır. Bu yapı malzemelerinin görünümü, parlaklığı, yoğunluğu ve diğer temel özellikleri birbirinden farklıdır ve mikro ve/veya makro yöntemlerle tanımlanabilir. Bu malzemeler maseral grubu ve maseral grupları olarak ikiye ayrılmaktadır (Kemal ve Aslan, 2014).

Uluslararası Kömür Petrolojisi Komitesi geliştirilen sınıflandırma sistemindeki kömürlere ait petrografik unsurlar Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir (Stach vd., 1982; Artüz, 1974).

Çizelge 3.1. Kömürlerdeki petrografik bileşenler (Buzkan, 1990).

MAKROSKOBİK BİLEŞENLER		MİKROSKOBİK BİLEŞENLER			
Litotipler		Maseraller	Mikrolitotipler		
Band Bileşenler		Maseral	Maseral Grup ve Semboller	Mikrolitotiplerde Bileşen Maseral ana Grupları	
Vitren (Parlak Kömür)		Kollinit	Vitrinit (V)	Vitrit	V > 95 %
		Telinit			
		Vitrodetrinit			
		Pseudovitrinit			
Füsen (Fosil O.K)		Makrinit	İnertinit (1)	İnertinit	1> 95 %
		Mikrinit			
		Semifusinit			
		Fusinit			
		Sklerotinit			
		İnertodetrinit			
		Kütinit	Eksinit (EV) (Liptinit)	Liptit	E >95 %
		Resinit			
		Eksudatinit			
		Alginit			
		Suberinit			
		Litodetrinit			
Klaren (Yarı Par. K.) Düren (Mat Kömür)	Tüm Maseralleri Kapsar			Klarit	V + E >95 %
				Durit	1 + E >95 %
				Duraklarit (VI)	V + E + I >5%
				Klarodurit (IV)	1+ E+ V > 5 %
				Klarovit (EV)	E+ 1+ V >5 %

3.2.1. Litotipler

Stopes terminolojisine göre kömürde görülebilen makroskopik bileşenlere litotip denir. Bant genişliği 50 μm ' den büyüktür ve görsel olarak ayırt etmek için en az bant kalınlığının genellikle 3-10 mm olduğu kabul edilmektedir (Barış, 2006). Bant genişliği her ülkeye göre değişmekte olup ve birçok ülkede genel olarak bant kalınlığı en az 10 mm olarak alınmaktadır. Litotiplerin 4 ana çeşidi vardır. Bunlar; Vitren, Klaren, Düren ve Füsendir.

Vitren: Homojen bir yapıya sahip olmaktadır. İnce ve siyah camsı, en parlak bantlıdır. Kalınlık olarak yaklaşık 3–10 mm arasında değişmektedir. Eli boyamaz ve yapısal olarak kırılğandır (Özşen, 2003).

Klaren: Parlaklığı Vitrene göre daha azdır. Vitren ve Düren oranına göre kompakt ve parlaklığı değişmektedir. 3-10 mm'den daha az kalınlığa sahiptir. Görünüm olarak çizgisel veya merceksi bir yapı sergilemektedir (Kural, 1991).

Düren: Yapısal olarak sert bir kömürdür ve mat renge sahiptir. 3-10 mm arasında kalınlığı değişmektedir. Vitren ve Klaren kömürlerine göre daha nadir olarak bulunur (Kural, 1998).

Füsen: Toz halinde ve yumuşak bir görünüme sahiptir. Yapı olarak ipliksidir. Siyah ve grimsi renklidir. Çok kırılğan ve toz haline gelebilmektedir. Kırıldığında eli boyayabilen bir banttır. Kavite mineraller içerdiğinden sertlik kazanabilmektedir.

3.2.2. Maseraller

Kayalar birincil minerallerden oluşur. Kömürde buna karşılık gelen yapı taşları maseraldir. Kömürün kaya oluşumu, kömürleşmenin birinci aşaması olarak biyokimyasal karbonizasyon aşamasında oluşur. Bu olay bir sonraki kademelerde devam eder. Biyokimyasal karbonizasyon kademesinde; bitkilerin su altı koşullarına, hava ile temaslarına, oluşum durumuna, ortamdaki asitlik koşullarına ve ortamdaki mantar ve bakteri koşullarına uygun olarak maseral özellikleri değişmektedir. Çizelge 3.2'de önemli maseral ve maseral grupları gösterilmektedir (Kemal ve Arslan, 2014).

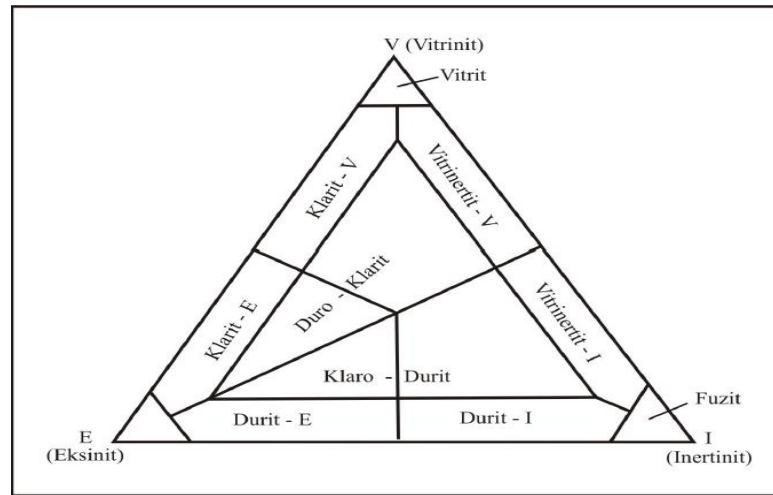
Çizelge 3.2. Maseraller ve maseral grupları.

Vitrinit grubu	Eksinit grubu	İnertinit grubu
Collinit	Sporinit	Mikrinit
Tellinit	Kutinit	Makrinit
Corpovitrinit	Resinit	Semifüsinit
Vitrodetrinit	Alginit	Fusinit
	Liptodetrinit	Sklerotinit
		İnertodetrinit

Maseraller; optik ve kimyasal özellikleri, görünüşleri, sertlikleri ve ilişkili davranışları ile birbirinden ayrılır. Yansıyan ışığa göre en karanlık olanına leptinit denir. Leptinitler, hidrojen açısından zengindir. Orta parlaklıkta olanına vitrin denir. Vitrin linyitlerde hüminit olarak adlandırılır. Vitrinitin oksijen içeriği yüksektir. En parlaklarına ise inertinit denilmektedir. İnertinitler en yüksek karbon içeriğine sahip olanlardır. Leptinitten vitrinite doğru uçucu madde miktarı giderek azalmaktadır (Buzkan, 1987).

3.2.3. Mikrolitotipler

Mikroskobik olarak tanımlanabilen, kalınlığı en az 50 µm olan odun kömürü taşlarının oluşturduğu katmanlar mikrolitotip olarak adlandırılmaktadır. Mikrolitotipleri; Vitrit, Vitrinertit, Klarit, Duro-Klarit, Klaro-Durit, Durit ve Fusit olarak sıralamak mümkündür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kömür mikrolitotipleri (Kemal ve Arslan, 2014).

Çizelge 3.3. Kömür mikrolitotiplerin sınıflanması (Stach vd., 1982).

Mikrolitotipler	Bileşim (%)
Tek maseralli mikrolitotipler	
Vitrit	Vitrinit (V) > %95
Liptit	Liptinit (L) > %95
İnertit	İnertinit (I) > %95
İki maseralli mikrolitotipler	
Klarit	V+L > % 95
Vitrinertit	V+I > %95
Dürit	I+L > %95
Üç maseralli mikrolitotipler	
Düroklarit	V>I+L (her tanesi en düşük $\geq$ %5)
Klarodürit	I>V+L (her tanesi en düşük $\geq$ %5)
Vitrinertoliptit	L>I+V (her tanesi en düşük $\geq$ %5)
Karbomineritler	
Karbarjilit	Kömür + tüm hacim %20-60 kil mineralleri
Karbopirit	Kömür + tüm hacim %5-20 demir sülfat mineralleri
Karbankerit	Kömür + tüm hacim %20-60 karbonat mineralleri
Karbosilisit	Kömür + tüm hacim %20-60 kuvars
Karbopoliminerit	Kömür + tüm hacim %20-60 değişik mineraller

4. KÖMÜRLERDE OKSİDASYON VE KENDİLİĞİNDEN YANMA

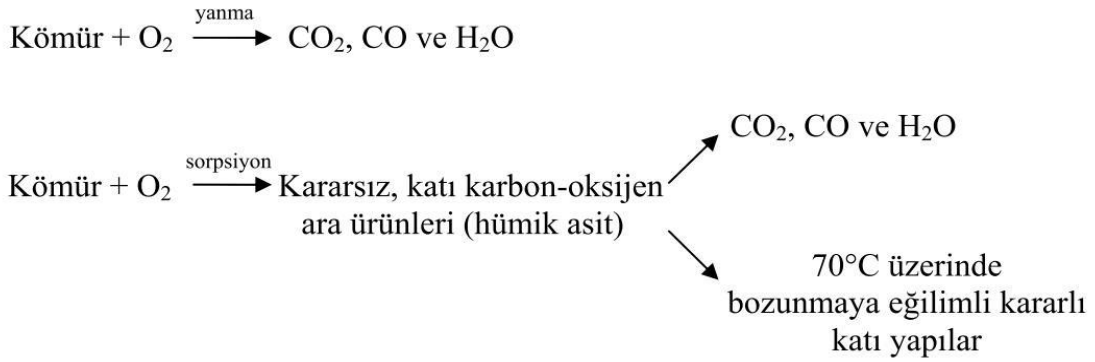
Bu bölümde ilk olarak kömür ve organik kayalarda meydana gelen kendiliğinden yanma olayının ve kömür oksidasyon mekanizmasının nasıl işlediğine dair bilgiler verilmiştir. Daha sonra ise yıllar içerisindeki süreçte bu mekanizmayı açıklayan farklı teoriler üzerinde durulmuştur. Son kısımda ise kömürde kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörlerin neler olduğu detaylıca açıklanmış ve geçmiş dönemlerde ülkemizde yapılan kendiliğinden yanma çalışmalarına değinilmiştir.

4.1. Kömürlerde Kendiliğinden Yanma Mekanizması

17. yüzyıldan itibaren farklı disiplinlerden araştırmacılar tarafından kömürün kendiliğinden yanma mekanizmasını aydınlatmak adına çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu bağlamda birçok farklı teori öne sürülmüştür. pirit teorisi, bakteri teorisi, fenil reaksiyonu, serbest radikal reaksiyonu, hidrojen reaksiyonu, aktivasyon grup reaksiyonu ve kömür – oksijen etkileşimi teorisi bu teorilerin başlıcalarıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda en makul yaklaşımın kömür-oksijen etkileşimi teorisi olduğu ifade edilmiştir (Qi vd., 2010). Bu yaklaşıma göre meydana gelen reaksiyonlar “direk yanma” ve “kemisorpsiyon” olmak üzere 2 ana aşamada gerçekleştirilmektedir. Direk yanma aşamasında; kömür ve oksijen arasında gerçekleşmiş olan reaksiyon sonucunda CO, CO₂ ve H₂O gibi oksidasyon ürünleri ortaya çıkmaktadır (Carras ve Young, 1994; Wang vd., 2003a). Kemisorpsiyon fazı ardı ardına gelişen dört alt kademeden meydana gelmektedir. Bu kademeler;

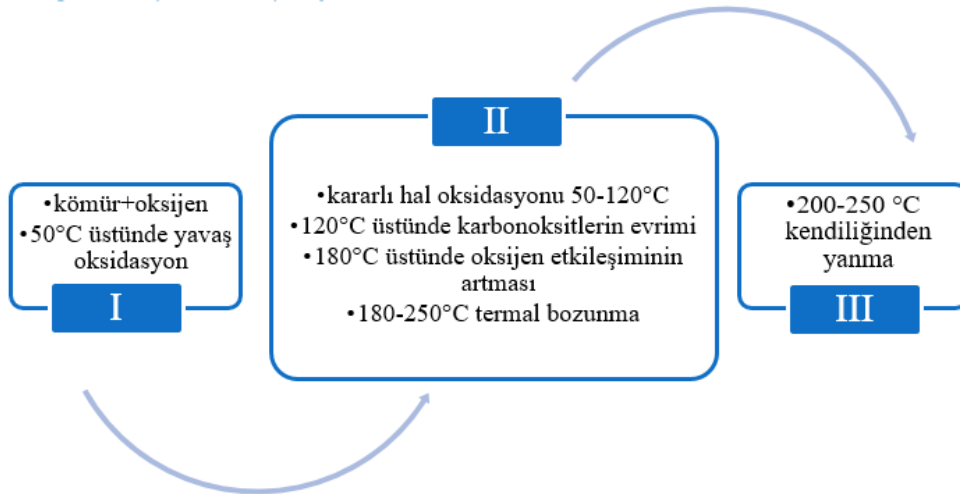
1. Oksijenin fiziksel olarak adsorpsiyonu, sıcaklıkta artış;
2. Kimyasal adsorpsiyon olarak (50°C üzeri), oksijenetik hidrokarbonların ya da peroksi bileşiklerin üretimi;
3. Altere olmamış olan kömürün oksidasyonu ile beraber kendiliğinden yanma sıcaklığına ulaşıldığı zaman (70°C üzeri) oksijenetik hidrokarbonların bozulması ve
4. Önceki üç aşamadaki tüm işlemler, 150°C’den yüksek sıcaklıklara neden olması durumunda kendiliğinden kızışma adı verilen olay oluşmaktadır (Gürdal vd., 2015).

Tutuşma sıcaklığı kömürleşme derecesine bağlı olarak en düşük ranktaki kömür için 130°C gibi bir değerde olabildiği gibi turba gibi kalitesiz kömürlerde daha düşük değerlerde dahi gözlenebilmektedir. Özellikle 60-80°C arası önemli olarak kabul edilir (Wang vd., 2015b). Şekil 4.1.’de kömür oksidasyonunda oluşan reaksiyon fazları verilmiştir (Wang vd., 2003b).



Şekil 4.1. Kömür oksidasyonunda oluşan reaksiyon kademeleri.

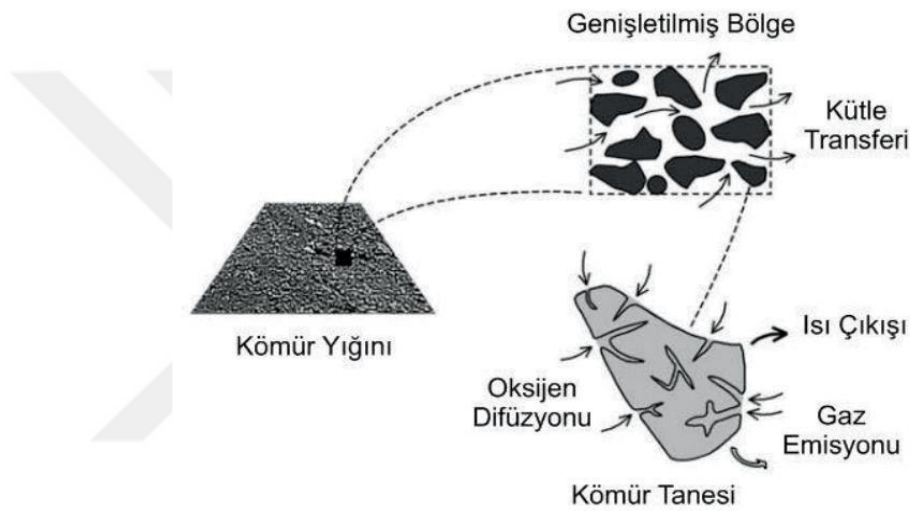
Kömür oksidasyonunun ilk aşamasını, kömürün yüzeyindeki aktif bölgelerde oksijenin kimyasal olarak bağlanması (kemisorpsiyon) oluşturmaktadır. 40°C 'nin altında meydana gelen bu reaksiyon aşamasında, kömür ve oksijen partikülleri arasındaki etkileşim, oksijenin kömürün gözeneklerine fiziksel olarak adsorpsiyonundan kaynaklanır. (Nelson & Chen, 2007). Şekil 4.2.'de kömür oksidasyonunun sıcaklığa göre değişim aşamaları gösterilmiştir (Nalbandian, 2010).



Şekil 4.2. Değişen sıcaklıklarda kömürde oluşan oksidasyon evreleri.

Kömür ve oksijen molekülleri arasında meydana gelen tepkimeler süreç boyunca endotermik olmasına rağmen, daha düşük sıcaklıklarda ekzotermiktirler (Shi vd., 2005). Bu reaksiyon adımları sonucunda farklı özelliklere sahip karbon-oksijen bileşikleri oluşur. Bu bileşikler “kararsız”, “kararlı” ve “reaktif olmayan” olarak üç kategoriye ayrılabilir. Peroksijen,

hidroperoksit ve hidroksil türleri kararsız bileşikler oluştururken; karbonil veya karboksil türleri kararlı bileşiklerdir. Reaktif olmayan bileşikler hümitik asitler olarak da adlandırılmakla beraber anhidritler, eterler veya esterler olarak bilinirler. Sonraki aşamalarda, söz konusu kararsız oksijen bileşikleri, gaz halindeki ürünlere ve kararlı bileşiklere dönüşmektedir. Kararlı bileşiklerin ayrışmasıyla oksidasyon için yeni aktif bölgeler oluşmaktadır. (Wang vd. 2003). Şekil 4.3.'te kömür parçasına oksijen difüzyonu ve sonraki oluşan olaylar görülmektedir (İnal & Aydın, 2019).



Şekil 4.3. Kömür oksidasyonunda gelişen olaylar.

4.2. Kendiliğinden Yanma Teorileri

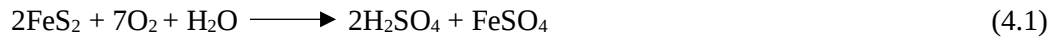
Bazı araştırmacılar kömürün fiziksel özelliklerinin yanı sıra kimyasal özelliklerinin de kömür oksidasyonu üzerindeki etkilerini incelemiş ve kendiliğinden yanma hakkında farklı teoriler ortaya atmıştır. Bu teorilerden bazıları;

- Pirit Teorisi
- Bakteri Teorisi
- Oksidasyon Teorisi
- Nem Teorisi'dir

4.2.1. Pirit teorisi

Temelde piritin oksidasyonunun kömürün sıcaklığını artırdığı varsayımı ile oluşturulmuştur. Piritin büyük miktarlarda ve kömürde ince taneler halinde bulunması dışında, kendiliğinden yanmadaki etkisinin minimum olduğu doğrulanmıştır.

Piritin oksijenle kimyasal reaksiyon denklemi aşağıda verilmiştir (Eroğlu ve Gouws, 1993).



4.2.2. Bakteri teorisi

Kendiliğinden yanmanın nedeninin kömürdeki bakteriler olduğu varsayılmaktadır. Bakteriyel aktivitenin ısınmaya katkısı tam olarak anlaşılamasa da bakterilerin çok zayıf ısınmaya neden olduğu araştırmalardan tespit edilmiştir (Yıldırım, 2002). Bakteri teorisinin kömürün kendiliğinden yanması üzerindeki etkisi tam olarak tanımlanmamıştır (Eroğlu ve Gouws, 1993).

4.2.3. Oksidasyon teorisi

Oksidasyon teorisi, kendiliğinden yanma teorilerinde en çok kabul edilmiş teorilerin başında gelmektedir. Oksidasyon teorisine göre kömür oksijen ile temas ettiğinde kömür oksitlenir ve ısısı yüksek olur (Wade, 1988. Eroğlu ve Gouws, 1993).

Kömür oksidasyonu 3 ana aşamalı olarak belirlenmiştir (Cudnore ve Sanders, 1984; Eroğlu ve Gouws, 1993).

Bunlar;

1. Oksijenin fiziksel emilimi;
2. Kimyasal ayrışma, oksijen içeren aktif bir bileşik oluşumu;
3. Hızlı bir kimyasal reaksiyon sonucu peroksijenin yoluyla CO, CO₂, H₂O ürünlerinin oluşumudur.

Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi Wade ve Eroğlu'nun (Wade, 1988; Eroğlu ve Gouws, 1993) yapmış olduğu çalışmalarda kömür parametrelerinin oksidasyon üzerindeki etkileri net bir şekilde ortaya konmuştur.

Çizelge 4.1. Çeşitli parametrelerin kömür oksidasyon oranı üzerine etkisi.

Parametre	Parametre artışının oksidasyon oranına etkisi
Tane iriliği	Azalır
Sıcaklığı	Artar
Nem	Artar
Ön ısıtma	Artar
Oksijen	Artar
Oksijen kısmi basıncı	Artar
Uçucu madde içeriği	Artar
Kömürleşme rankı	Azalır
Karbon içeriği	Azalır
Oksijen içeriği	Artar
İç nem	Artar

4.2.4. Nem teorisi

Geçmiş çalışmalar, kömürün nemi emmesi sonucu ısının yayıldığını ve bunun oksidasyon reaksiyonunun hızını arttırdığını göstermiştir (Eroğlu ve Gouws, 1993; Wade, 1988).

Isı, nemli havada daha hızlı bir şekilde yayılır ve kendiliğinden yanma için daha müsait bir ortam oluşmaktadır.

4.3. Kendiliğinden Yanma Olayını Tespit Etmek İçin Kullanılan Yaklaşımlar

Geçmiş yıllardan günümüze madenciliğin her alanında büyük kayıplara neden olan kendiliğinden yanma olayını anlayabilme ve sonuçlarını azaltabilme adına bilim insanları ve araştırmacılar hem laboratuvar hem de saha koşullarında birçok uygulama yapmışlardır. Literatürde kendiliğinden yanmanın belirlenmesi için kullanılan yöntemler laboratuvar teknikleri ve pratik yöntemler olmak üzere 2 ana kategoride incelenmiştir (Soytürk, 1992; Şensöğüt, 1997).

4.3.1. Laboratuvar teknikleri

Bu kategori altında yapılan çalışmalarda, kömür numunesini belirli bir debide oksitlemek için tasarlanmış hücre veya reaktöre hava gönderilmekte olup ve sabit veya artan sıcaklıklarda programlanan ısıtma tanklarında kömür numunesinin sıcaklığındaki değişimler gözlemlenmektedir. Özellikle yöntemin ve uygulamanın basitliği, ekonomik açısından avantajlı olması ve yapılan deneylerin kısa sürede sonuçlanması, bu tekniklerin popülerliğinin yıllarca sürmesine neden olmuştur.

İzotermal ve adyabatik kalorimetreler

Kalorimetre, bir kömür örneğinden deney esnasında açığa çıkmış olan ısıyı ölçmek için tasarlanmış bir cihazdır. Bu cihazlar zaman içinde birçok araştırmacı için farklı tasarımlara sahip olsa da cihazın genel yapısı numunenin yerleştirildiği bir kalorimetre kabı, bu kabı çevreleyen bir kalkan ve bir termostattan oluşmaktadır. İzotermal kalorimetri yöntemlerinde, kömür numunesi sabit bir sıcaklıkta ısıtılan büyük bir yatağa yerleştirilmekte ve reaksiyon sonucunda numuneden çıkan ısı, ortama salınan ısı ölçülerek belirlenmektedir. Adyabatik kalorimetre yöntemlerinde reaksiyon sonucunda oluşan ısının ortamda dolaşmasına izin verilmez. Açığa çıkan ısı, kalorimetre kabındaki sıcaklık artışı ile belirlenir. Bu şekilde numunenin en yüksek sıcaklık artışını belirlemek mümkündür (Wang vd., 2003). Endotermik oksidasyon yöntemi, kömürün reaksiyonu ve çevresel ısınma etkilerinin neden olduğu ısı kaybını azaltan bir yöntem olduğundan kendiliğinden yanmanın belirlenmesinde yaygın kullanım bulmuştur (Wang vd., 2009).

Kalorimetrele cihazları ile kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanma konusunda yapılmış olan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Wang vd., (2002); izotermal ölçüm ile yaptıkları deneylerde, 60-110°C sıcaklık aralığında saf nitrojen altında kömür numunelerinin oksidasyon ürünlerini incelemişler ve oksidasyon sonucu açığa çıkan karbondioksitin sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini doğrulamışlardır. Ayrıca bu çalışmada parçacık boyutunun karbonmonoksit üzerinde hiçbir etkisi olmadığı da vurgulanmaktadır. Ren vd., (1999); adyabatik koşullar altında 18 farklı kömür numunesi üzerinde kendiliğinden yanma için yatkınlık testleri yapmışlardır. 40 ve 60°C sabit sıcaklıklar altında yapılan deneylerde; kömür daha yüksek sıcaklıklara ve ısıtma hızlarına göre kendiliğinden yanmaya yatkınlığına göre sınıflandırılmış ve bu çalışmada daha düşük tane boyutuna sahip numunelerin yatkınlık açısından daha reaktif olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmaların dışında Avustralyalı araştırmacılar tarafından adyabatik koşullar altında R70 adlı bir kendiliğinden yanma risk indeksi geliştirilmiştir. Bu gösterge genellikle kömürün 40°C'den 70 °C'ye kadar ısınma hızını dikkate alarak bir derecelendirme yapmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre; R70 değeri 0,5°C/sa'ın altında ise kömür tehlikesi düşük, 0,5-0,8°C/sa arası orta tehlike, 0,8°C/sa'ın üzerinde ise yanma tehlikesi yüksektir ve bu şekilde üç farklı grupta incelenmektedir. (Humphreys, 1979; Beamish vd., 2000).

Ayrıca, kömür kuluçka süresi ile kalorimetre yöntemlerinin birlikte ele alınması sonucunda yapılan çalışmalar da vardır. Kuluçka süresinin belirlenmesinde; kömür numunesi, kalorimetre içinde önceden belirlenmiş bir sıcaklığa ısıtılır. Hava numuneden geçerek kalorimetreyi bu sıcaklıkta sabit tutar. Kalorimetrenin sıcaklığındaki artış numunenin

sıcaklığındaki artışla karşılaştırılır (Kaymakçı, 1998). Sabit sıcaklıkta oksidasyon teknolojisine göre kömürün yanma risk sınıflandırılması Çizelge 4.2’te verilmiştir (Demirbilek, 1986).

Çizelge 4.2. Adyabatik test tekniğine göre kömürlerin risk sınıflaması.

Risk İndeksi sınıflaması	İlk sıcaklık değeri (°C)	Toplam sıcaklık artışı (°C/sa)	Risk İndeksi Oranı
Düşük risk	<0,6	<2,5	1
Orta risk	0,6 – 1,2	2,5 – 4,5	2
Yüksek risk	1,2 – 2,0	4,5 – 7,0	4
Çok yüksek risk	>2,0	>7,0	8

Son zamanlarda mevcut ısı test koşulları ayarlanarak daha doğru ve kesin sonuçları elde etmek ve test sürelerini kısaltmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Janusz Cygankiewicz kömürlerin kendiliğinden yanma yatkınlıklarını adyabatik metot kullanarak belirlemiştir. Ölçümler 40°C başlangıç sıcaklığından 185°C’ye kadar gerçekleştirilmiştir. Adyabatik kalorimetredeki sıcaklık artışı ve 185°C’ye ulaşma süresine göre kömürler sınıflamaya tabi tutulmuştur. Buna göre; kömürler 500 saatten az bir süre zarfında 185°C sıcaklığa ulaşmışlarsa “düşük” yatkınlıkta kabul edilirken, 200-500 saat arasında “orta”, 100-200 saat arasında “yüksek” ve 100 saatten daha az sürede ulaşmışlar ise “çok yüksek” yatkınlıkta olmak üzere 4 ayrı sınıfa ayrılmaktadır (Panigrahi & Ray, 2014). Zubíček & Adamus (2013); adyabatik koşullar altında kömürün ilk 60 dakikadaki ısınma hızını (Δt_{60}) göz önünde bulundurarak kömür üzerinde kendiliğinden yanma deneyleri gerçekleştirmişler ve kömürü Çizelge 4.3.’te gösterildiği gibi üç farklı risk sınıfına ayırmışlardır.

Çizelge 4.3. Modifiye edilmiş adyabatik yöntemle göre kömürlerin risk sınıflaması.

Risk sınıfı	Kategori	Δt_{60} (°C/sa)
Düşük	1	0-19
Orta	2	19-30
Yüksek	3	>30

Dinamik oksidasyon yöntemi

Bu yöntem, sabit sıcaklıkta kömürün oksidasyonu sonucu açığa çıkan gazların değişimini belirlemek için kullanılır. 100 gr’lık kömür numunesi içeren bir reaksiyon tüpü; sabit sıcaklıktaki bir yağ banyosuna daldırılır. Sıcaklık kontrolörü cihazı, kömür numunesinin sıcaklığını ortam sıcaklığı ile aynı seviyede sabit tutmak için kullanılır. Numunenin sıcaklığı kullanılan termoçiftler ile ölçülür. Isıtılmış hava, numunenin üzerinden 15 ml/dk’lık bir akış hızında geçirilir. Yaklaşık

bir saat sonra, karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂), gazlarının değişimi izlenmekte ve karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) gazlarındaki değişim sabit bir noktaya ulaştıktan sonra gaz ölçümü yapılmaktadır (Beamish vd., 2000; Feng, 1985).

Ayvazoglu'nun (1978) bu yöntemi kullanarak yaptığı çalışmada, çelik bir kaba konan 50 gr'lık bir kömür örneği üzerinden hava veya nitrojen gazı geçirilmiş ve kömür örneğinin yerleştirildiği etüvün sıcaklığı 30°C'den başlamak üzere 200°C'ye kadar ısıtılarak başlatılmıştır. Deney sonunda sıcaklığa bağlı olarak CO, H₂ ve diğer yanma ürünü gazların konsantrasyonlarındaki değişimler grafiksel olarak değerlendirilmiştir (Kaymakçı, 1998'den).

Pota ısıtma metodu

Bu yöntem ilk olarak Bowes & Cameron (1971) tarafından uygulanmıştır. Katıların ateşlenmesi için Frank-Kamentskii (FK) teorik modeline dayalı olarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde, kömür örneği "pota" adı verilen belirli bir boyut ve şekildeki bir kaba yerleştirilir. Bu potadan sonrası, daha önceden ayarlanmış sıcaklık fırınının içine yerleştirilmektedir. Kömür numunesinin sıcaklığındaki değişiklikleri tespit etmek için numunenin ortasına bir termocift daldırılır. Kömür örneğinde bir reaksiyonun başladığına dair herhangi bir belirti yoksa etüv daha yüksek bir sıcaklıkta çalıştırılarak deney tekrarlanmaktadır. Testler sonucunda numunelerin kritik tutuşma sıcaklığı, pota boyutunun bir fonksiyonu olarak belirlenir. Deneysel analiz vasıtası ile stok yığınları için güvenli boyut aralıkları, Kamentskii güç denklemleri kullanılarak belirlenmektedir (Wang vd., 2003 ve Sen vd., 2009'dan).

Genel olarak literatürde bir katının ekzotermik reaktivitesini ölçmek için üç farklı pota ısıtma yöntemi vardır (Chen, 1999):

1. İlk yaklaşım, yukarıda ayrıntıları olarak verilen geleneksel Frank-Kamenitskii (FK) modeline dayalı olarak çeşitli geometrik şekillerdeki (levha, silindir, küp vb.) potalar aracılığıyla numunelerin kritik tutuşma sıcaklıklarının belirlendiği yaklaşımdır.
2. Chen ve Chong (1998), tarafından geliştirilen ve örneğin potadaki geçici ısınma davranışını inceleyen bir diğer yöntem ise "kesişim yöntemi" olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde deneyler için sadece bir pota gerekmektedir. Araştırmacılar, bu yöntemin geleneksel olarak Frank-Kamenetskii modelinden daha basit ve anlaşılır olduğunu iddia etmektedir. Yaklaşımına göre, sürekli olarak dışarıdan oksidasyona maruz kalan kömür numunesinin merkez noktası yakınında ısı akışının durduğu kesin bir zaman vardır. Merkez noktasının bulunduğu hat üzerindeki sıcaklıkları ölçerek belirli bir zamandaki ısı çıkış hızı; entalpi değişimi ve ısı dağılımından hesaplanmış olmaktadır. Sonradan takiben

kinetik modelde kullanılarak hesaplanan bu değer kömürün oksidasyon kinetiğini belirlemek için kullanılmaktadır. (Wang vd., 2003; Sen vd., 2009; Fei et al., 2009).

3. Jones ve diğerleri (1998) tarafından önerilen son yaklaşım; “ısı çıkış hız oran yöntemi”dir. Bu yöntemin deney düzeneği 1. yöntem ile aynı özelliklere sahiptir. Uygulama açısından 2 no'lu yaklaşıma benzese de temel prensipler açısından farklılıkları vardır. Bu yaklaşımda, 2 numaralı yöntemde kullanılan kinetik modeldeki “kesişim nokta sıcaklığı” yerine “etüv sıcaklığı” dikkate alınmaktadır. Numune sıcaklığının değeri etüv sıcaklığına ulaştığı anda ihmal edilir (Chen, 1999’dan).

Olpinski yöntemi

Bu yaklaşımda Polonyalı araştırmacılar tarafından geliştirilen; pelet şeklinde hazırlanan kömür örnekleri, sıcaklığı sürekli artan bir kinolin buhar banyosunda 4-5 ml/s hava akışında oksidasyona tabi tutulmaktadır. Deney, kinolin kaynama noktası 235°C olana kadar devam ettirilmekte ve deney sırasında kömür ve ortam sıcaklıkları sürekli olarak kayıt altında tutulmaktadır. 235°C sıcaklıkta eğri üzerine çizilen tanjant yardımıyla ısıtma hızının değeri (Sza) belirlenmektedir. Deney sonunda yanan kömürün kül değerinden Szb değeri hesaplanmakta olup ve bu değere göre kendiliğinden yanma risk indeksi sınıflandırması yapılmaktadır. Çizelge 4.4.’te Sza ve Szb değerlerine göre risk indeksi derecelendirmeleri gösterilmiştir (Banerjee, 1985; Zubíček, 2008; Sen vd., 2009).

Çizelge 4.4. Olpinski yöntemine göre kömürün risk sınıflaması.

Risk sınıfı	Kendiliğinden yanmaya yatkınlık	Sza (°C/dk)	Szb (°C/dk)
1	Düşük riskli	0-40	<80
2	Orta Riskli	40-80	80-100
3	Yüksek riskli	80-180	100-120
4	Aşırı yüksek riskli	>180	>120

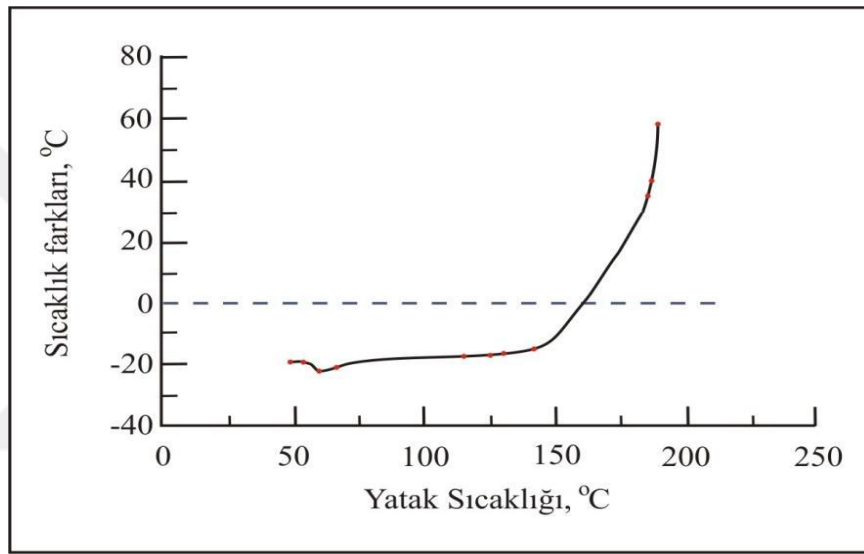
Bu yaklaşımda, kömürün kinolin buharından şişmesi, testlerin doğruluğunun tartışılmasına ve kendiliğinden yanma davranışını gerçekçi bir şekilde yansıtamayacağı şüphesine yol açabilmektedir (Sen vd., 2009).

Diferansiyel termal analiz (DTA) yöntemi

Bu yaklaşımda, az miktarda olsa da bir kömür numunesi, sabit bir ısıtma oranında nötr bir referans malzeme ile ısıtılır ve kömür ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkı (Δt),

sıcaklığın (T) bir fonksiyonu olarak sürekli olarak kaydedilir (Gouws ve Wade, 1990; Banerjee, 2000).

Bu sıcaklık farkı değeri kullanılarak test sıcaklık değişimlerini belirlemek mümkündür. Test sıcaklık değişimleri ile ekzotermik ve endotermik reaksiyon sıcaklıkları da tespit edilir. Daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek tepe değerlerine sahip noktalar, kendiliğinden yanmaya çok daha yatkın olan kömürler olarak yorumlanır (Özdeniz, 2003). Tipik bir DTA eğrisi Şekil 4.4.'te gösterilmektedir (Kaymakçı, 1998).



Şekil 4.4. Tipik olarak bir DTA termogramı (Kaymakçı, 1998).

Marinov (1977) kömürün hava oksijeni ile etkileşiminin mekanizmasını DTA yöntemini kullanarak araştırırken, Banerjee ve Chakravorty (1967) aynı şekilde kömürün kendiliğinden yanma eğilimini belirlemiştir. Banerjee ve Chakravorty (1967), 300°C'ye kadar yaptıkları çalışmada termogramın üç farklı bölgesini tanımlamışlardır. Birinci bölgede meydana gelen reaksiyonlar endotermiktir ve bunun nedeni kömürden nemin uzaklaşmasıdır. İkincisi ve üçüncü bölgedeki reaksiyonların ekzotermik olduğunu ve artan sıcaklıkla belirli bir tepe değerine ulaşıldığını gözlemişlerdir (Sen vd., 2009'dan). İkincisi aşamadan üçüncü aşamaya geçişte eğrinin eğimi ne kadar yüksek olursa ve üçüncü geçişteki sıcaklık ne kadar düşük ise, kömür o kadar kendiliğinden yanmaya yatkın olarak yorumlanmaktadır (Kaymakçı, 1998).

Pis ve diğerleri (1996), farklı rank derecelerine sahip numuneler üzerinde DTA yöntemini uygulanarak kendiliğinden yanma tutuşma testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada oksitlenmemiş kömür ile oksitlenmiş numuneler arasındaki kendiliğinden yanma davranışları incelenmektedir.

Numune üzerinde yapılan deneyler 200-800°C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiş ve DTA eğrilerinden kömürün kendiliğinden yanma sıcaklıkları ve yanma bitiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu iki sıcaklık arasında oluşan eğrinin altında kalan alan toplam ısı kaybı olarak tanımlanmakta ve artan kömürleşme derecesi ile kendiliğinden yanma ve bitiş sıcaklığının paralel olarak arttığı belirtilmektedir. Kömürün oksidasyonu sonucunda kendiliğinden yanma sıcaklığının arttığı, yanma bitiş sıcaklığının ve toplam ısı akışının azaldığı bu çalışmanın yüne bulguları arasındadır.

Marinov vd., (2010) yılında benzer bir çalışmayı biyolojik olarak farklı mikroorganizma kültürlerine maruz kalan kömür örnekleri üzerinde gerçekleştirmiştir. TGA ve DTA eğrileri yardımıyla kömürün yanma davranışının mikrobiyolojik faaliyetlerden nasıl etkilendiği belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda; mikroorganizmalar ile muamele edilen kömürlerin kendiliğinden yanma sıcaklıklarının azaldığı ve yanma açısından daha riskli bir yapıya ulaştığı sonucuna varmışlardır.

Şentorun vd., (1996) yılında yapılan bir başka çalışmada; metalik malzemelerin kömür yanma davranışı üzerindeki etkisini DTA eğrileri yardımıyla belirlemişlerdir. Bu çalışmada 25 çeşit linyit kömürü üzerinde testler yapılmış ve demineralize kömürün ortaya çıkan ısı oranlarının ve yanma sürelerinin orijinal kömürden çok daha yüksek olduğu rapor edilmiştir.

Diferansiyel taramalı kalorimetri

Diferansiyel taramalı kalorimetri (DTK), malzemelerin ısı analizinde kullanılan termoanalitik bir yöntemdir. Bu cihaz, bir numune ısıtılırken, soğutulurken veya sabit bir sıcaklıkta tutulurken açığa çıkan enerji miktarını ölçer ve referans malzeme ile numune arasındaki farkı sıcaklık veya zamanın bir fonksiyonu olarak gösterir. DTA'dan farklı olarak uygulama sırasında referans malzeme ve numune sıcaklıkları aynı seviyede tutulmaktadır. Uygulama sırasında referans ile numune arasında bir sıcaklık farkı oluşur ise, sıcaklığı aynı tutacak şekilde numuneye verilen güç miktarı değiştirilmekte ve bu verilen güce bağlı olarak bir yorum yapılmaktadır.

Standart örnekler ile kalibre etmek için taramalı kalorimetre deneyler yapılmalıdır. Kalibrasyon işleminden hemen sonra yaklaşık olarak 10 mg ağırlığında olan örnek alüminyum kroze içerisine konularak kapatılır. İğne yardımıyla tek delik açılan kroze kapağına karşılık, referans malzeme için kullanılacak boş alüminyum kapağına yine iğne yardımıyla iki adet delik açılır. Tek delik açılan örnek malzemeler ile iki delik açılan referans malzemeler numune tutucusuna konur ve deneyler azot ortamında 80 cc/dk akış hızında 20°C ısıtma hızında

gerçekleştirilmektedir. Deneysel sürecin ilerleyen aşamalarında oksidasyon işlemi ve süreci gerçekleşir. Elde edilen sonuçlarda ekzotermik reaksiyonun başladığı sıcaklık “başlangıç sıcaklığı” olarak bilinir ve kömürün kendiliğinden yanma yatkınlığı bu sıcaklık değerlerine göre yorumlanabilmektedir (Singh, 2013).

Garcia ve diğerleri (1999), Kolombiya kömürlerinin kendiliğinden yanma yatkınlığı üzerinde diferansiyel kalorimetri tekniğini uygulamış ve yaptıkları çalışmada yöntemin duyarlılık tayini açısından kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada; üç farklı düşük kömür derecesine sahip bölgeden elde edilmiş kömür türleri, 105 günlük bir süre boyunca doğal oksidasyona tabi tutulmuş ve kömürün oksidasyon entalpisi değişimi ve başlangıç sıcaklıkları farklı zaman dilimlerinde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda, oksidasyona maruz kalmaya başlama anından itibaren son güne kadar olan süreçte ilk sıcaklığında (T_0) en büyük değişikliği yaşayan kömür numunesi, kendiliğinden yanmaya en yatkın olarak değerlendirilmiştir.

Panigrahi ve Sahu (2004), 31 farklı Hindistan kömürünün kendiliğinden tutuşabilirliğini belirlemek için DTA, DTK, tutuşma sıcaklığı yöntemi ve yaş oksidasyon yöntemlerini kullanmış ve kömürü sınıflandırmak için yatkınlık indeksleri ile kömürün yapısal özellikleri arasındaki ilişkiyi ayrıntılı olarak belirlemeye çalışmıştır. Bu ilişkiyi ortaya çıkarmak için tanımlanan parametreler, bir yapay sinir ağı modelinde kömür damarlarının yatkınlık sınıflandırması için kullanılmış ve kömür damarı yatkınlık açısından dört farklı kategoriye ayrılmıştır.

Farklı kömürleşme derecelerine sahip olan ülke kömürleri üzerinde DTK ve TG (termogravimetri) deneyler araştırma yapan Kök (2005), kömürde iki ayrı sıcaklık bölgesi olduğunu belirtmiştir. I. kısım sıcaklık bölgesi, nemin kömürden uzaklaştırıldığı alandır ve II. kısım olarak, kömürün içindeki karbonun eğrilerden yandığı alan olarak tespit edilmiştir. Ayrıca deneysel veriler ışığında Arrhenius ve Coats-Redfern kinetik modellerine göre 17 deney kömür numunesine ait aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

Benzer şekilde Elbeyli ve Pişkin (2006), Tunçbilek kömürünün yanma özelliklerini ve piroliz davranışını inceleyen çalışmalarında, Coats-Redfern denklemini kullanarak kömür aktivasyon enerjilerini belirlemişler ve DTK eğrilerinden kömürün yanma reaksiyonunun 300–650°C arasında gerçekleşmiştir. Bu çalışmada Tunçbilek linyitinin kömürü maksimum pik sıcaklığı 558 °C olarak belirlenmiştir.

Ören ve Şensöğüt (2018) farklı depolama şartları altında 16 hafta boyunca depo ettikleri kömür numuneleri üzerinde oksidasyonun etkilerini kesişim noktası metodu, oksijen tüketim oranları ve TG/DTK analizleri ile birlikte incelemişler ve bu süreçte kömürlerin aktivasyon

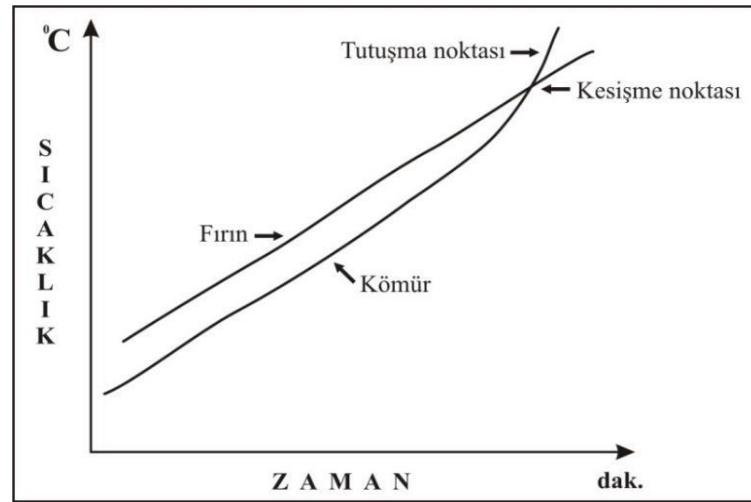
enerjilerini 28.0413 and 39.5839 kJ/mol olarak belirlemişlerdir. Yapılan yorumlarda derin dondurucuda depo edilen kömürlerin diğer depo şartlarına göre oksidasyon açısından avantajlar içerdiğini tespit etmişlerdir.

Kesişim noktası metodu

Kömürün kendiliğinden yanma eğilimini belirlemek için kullanılan “kesişim noktası yöntemi”; uygulamasının kolay oluşu, deneyi hazırlama aşamasındaki düşük maliyeti ve yatkınlık tespitinde istikrarlı sonuçları nedeniyle ülkemizde ve dünyada en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir.

Deneyin temeli, doğrusal olarak ısıtılan bir etüve yerleştirilmiş bir reaktörde kömür numunesi üzerinden hava geçirmek ve zaman ile sıcaklık arasındaki ilişkileri gözlemlemektir. Deney sırasında hem etüvün hem de kömür numunesinin sıcaklıkları kayıt altında tutulmaktadır.

Numune sıcaklığının etüv sıcaklığını aştığı veya kestiği noktaya “kesişim noktası”, bu noktadaki sıcaklığa ise “tutuşma sıcaklığı” denilmektedir (Kaymakçı ve Didari, 1992). Güçlü bir şekilde kendiliğinden yanma eğilimi olan kömür, daha düşük tutuşma sıcaklıklarına sahiptir (Didari vd., 1993). Şekil 4.5.’te tipik bir kesişim noktası göstermektedir (Kaymakçı, 1998).



Şekil 4.5. Kesişim noktası grafiği.

Feng vd., (1973) yılında kömürün kendiliğinden yanma eğilimini belirlemek için “FCC (Feng, Chakravorty, Cochrane) indeksi geliştirilmiştir. Bu indeksin geliştirildiği denklem aşağıdaki verilmektedir:

$$I(FCC) = \frac{\text{Ortalama Sıcaklık Artışı (OSA)}}{\text{Tutuşma sıcaklığı}} \times 1000 \quad (4.2)$$

Burada;

$I_{(FCC)}$: Feng, Chakravorty, Cochrane indeksi, 1/dk

OSA: 110–220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı, °C/dk

Ortalama sıcaklık artışı (OSA) ise;

$$\text{Ortalama sıcaklık artışı} = \frac{110}{t_2 - t_1} \quad (4.3)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde;

t_2 : Numunenin sıcaklığının 220°C'ye ulaştığı zaman dakikasını,

t_1 : Numunenin sıcaklığının 110°C'ye ulaştığı zaman dakikasını temsil etmektedir.

Söz konusu indeksten (I_{FCC}) yararlanılarak kömürün kendiliğinden yanma eğilimi Çizelge 4.5.'te gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadır (Ören ve Şensöğüt, 2010; Ören ve Şensöğüt, 2018).

Çizelge 4.5. I_{FCC} indeksine göre kömür yatkinlik sınıflaması.

Yatkinlik indeksi (I_{FCC})	Kendiliğinden yanmaya yatkinlik riski
0-5	Düşük Risk
5-10	Orta Risk
> 10	Yüksek Risk

Dünya çapında birçok araştırmacı tarafından kesişim noktası yöntemine dayalı çeşitli deney düzenekleri geliştirilmiş ve kömürün tutuşma sıcaklıkları farklı şekillerde belirlenmeye çalışılmıştır.

Sahu vd., (2011) Hindistan kömürü üzerindeki kömür damarlarının kendiliğinden yanabilirliğini tespit etmek için bulanık mantık ve yapay sinir ağı sistemlerini kullanmış ve yaptıkları çalışmada her iki sistemin de olumlu sonuçlar elde edileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, kömürün kesişim noktası ve iç parametreleri (nem, uçucu madde ve kül) sistemin girdileri olarak sunulmuştur.

Xu vd., (2012) kalsiyum klorür, sodyum silikat ve geliştirdikleri özel bir karışımın tutuşma sıcaklıkları, kesişme noktası yöntemine göre kömürün yanabilirliğini, aktivasyon enerjisi ve indeks gazların değişimleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar geliştirdikleri kolloidal karışımın orijinal numuneye ve diğer karışımlara göre daha yüksek tutuşma sıcaklık

değerlerine sahip olduğunu ve bu karışımın kendiliğinden yanmayı önlemek için kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir.

Yine benzer bir çalışmada; Wang vd., (2014) kesişim noktası yöntemini kullanarak polietilen glikolün kendiliğinden yanmayı azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. Üç farklı kömür türü ile yapılan deneylerde, polietilen glikol ile muamele edilen kömürün tutuşma sıcaklıkları daha yüksek değerlere ulaşmış; 40 ile 70°C arasındaki oksijen tüketim özellikleri de önemli ölçüde azalmıştır.

Mahidin vd., (2002) yılında farklı sıcaklıklarda vakum altında kurutulan ve farklı oranlarda bitüm ile kaplanan kömürün kendiliğinden yanma davranışını kesişim noktası yöntemini kullanarak belirlemişler ve bu çalışmada kurutulmuş kömürün kendiliğinden yanma riskini ortaya çıkarmışlardır. Bu çalışmada; kendiliğinden yanma açısından en düşük risk indeksine sahip durumun, 200°C ve 300°C kurutmada %5 katran oranına sahip olan kömürde ortaya çıktığı bildirilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, oksijen ve uçucu madde içeriğinin artmasıyla birlikte kömür yapısındaki fonksiyonel grupların da arttığını ve FTIR ölçümleri ile kesişim noktası sıcaklıkları arasında anlamlı bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir.

4.3.2. Pratik yöntemler

Bu yöntemler geçmiş deneyimlere, çevresel koşullara ve yanma olaylarının sıklığına göre kategorize edilir. Bu yöntemlerden en ünlüsü kuluçka döneminin sınıflandırılmasıdır. (Yılmaz ve Atalay, 1990) tarafından kuluçka dönemi, bir kömür ocağında kömür kazısının başlangıcından ilk yanma belirtilerinin gözlenmesine kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Düşük kaliteli kömürler için kuluçka süresi 3 ila 6 ay, yüksek kaliteli kömür için 9 ila 18 aydır. Kuluçka dönemine baz alınarak hesaplanan kömürün kendiliğinden yanmasının risk indeksi Çizelge 4.6.'da gösterilmektedir (Singh vd., 1984).

Çizelge 4.6. Kuluçka dönemine göre risklerin sınıflandırılması.

Kuluçka süresi (ay)	Risk göstergesi	Damar sınıflandırma riski
0–3	>40	Çok yüksek
3–9	20–40	Yüksek
9–18	10–20	Orta
>18	1–10	Düşük

Bunun dışında Olpinski'nin madencilikteki üretim ile ilgili yedi farklı temel parametresine göre yapılan başka bir sınıflama vardır. Bu sınıflama metoduna göre kömürün kendi kendine ısınma duyarlılığı (Szb) hesaplanır. Bu hesaplama yönteminde göçük bölgesinde

kalan kömür (S1), çalışma yöntemi (S2), havalandırma yöntemi (S3), hava kaçakları (S4), kömür damar nemi (S5), damar derinliği (S6) ve yoğunluk/havalandırma derecesi (S7) gibi parametreler hesaplamaya dahil edilir. Bu göstergeye göre sistemdeki olası yangın tehlikesi (Ps) Eşitlik 4.4 aracılığıyla hesaplanmakta ve “Ps” değerinin 120'den küçük olması durumunda genel olarak sistemin kendiliğinden yanma ile ilgili herhangi bir riske maruz kalmadığı yorumlanmaktadır (Banerjee, 1985; Şensöğüt, 1997).

$$Ps = Szb + (S1+S2+S3+S4+S5+S6+S7) \quad (4.4)$$

4.4. Kömürün Kendiliğinden Yanmasını Etkileyen Faktörler

Günümüze kadar kömürün kendiliğinden yanmasına etki eden faktörler ilgili birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen bu olayın kendiliğinden yanma üzerindeki etkisi konusunda kesin bir fikir birliği oluşmamıştır. Birçok parametre ve mekanizmanın yanma üzerinde farklı derecede etkileri olduğu iddia edilmektedir.

Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörleri Çizelge 4.7’de gösterildiği gibi iki ana başlık altında sıralamak mümkündür (Allen ve Parry, 1954; Duzy ve Land, 1985; Brooks vd., 1988; Kural, 1990).

Çizelge 4.7. Kendiliğinden yanma üzerinde etkili olan faktörler.

İç (Endojen) Faktörler (Kömürün fiziksel, kimyasal ve petrografik özellikleri)	Dış (Ekzojen) Faktörler (Atmosferik ve harici koşullar)
• Kömürleşme derecesi • Petrografik yapısı • Nem içeriği • Kül içeriği • Kükürt içeriği • Tane boyutu • Depolanan kömür tipi • Kömürün kimyasal reaktiviteleri • Termal iletkenliği • Oksijen kısmi basıncı • Kömürün ilk sıcaklığı	• Sıcaklık (bölgenin iklimi) • Rutubet (ortam nemi) • Oksijen konsantrasyonu • Stoklama şekli • Ortam pH'sı • Hava ile olan etkileşim süresidir

4.4.1. İç faktörler

Her bir kömürün kendine has fiziksel, kimyasal ve petrografik özellikleri bulunmaktadır. Söz konusu bu özellikler kömürlerdeki kendiliğinden yanma karakteristiğini birbirinden farklı

hale getirmektedir. Kömürlerin yapısal özellikleri değiştirmek mümkün olmasa da, dışsal faktörlere müdahale ederek kendiliğinden yanma riski belli oranlarda kısıtlanabilmektedir.

Kömürleşme deresi (rank)

Kömürde rank ifadesi, kömürünü oluşturan orijinal bitki kalıntılarının özellikleri ve oluşumu sırasında içerdiği organik maddenin değişim miktarı olarak tanımlanmıştır.

Kömürleşme derecesinde artış olduğunda ısı değeri, hava geçirgenlik seviyesini artarken kömür içeriğinden O₂ ve nem oranı gibi bazı fonksiyonel gruplarda azalmakta yaşanmaktadır (Qi vd., 2011).

Genelde kömürleşme deresi düşük olan kömürler daha fazla olarak reaksiyon nem, O₂ ve uçucu madde içerdikleri için yüksek kömürleşme derecesi kömürlere göre kendiliğinden yanması daha yatkın olarak kömürdür (Ramlu, 1991).

Petrografik yapısı

Kendiliğinden yanma üzerindeki etkisi tam anlamıyla anlaşılamamasına rağmen vitrin içeriği yüksek kömürler, klarin içeriği yüksek olan kömürlere göre daha kolay yanarken, düren ve füsün içeriği yüksek olanlara oranla daha zor yanar. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında füsünün de aynı kolaylıkla yanabileceği bilinmiştir (Feng vd., 1973).

Nem içeriği

Genel olarak yapılan araştırmalarda, nemin özellikle kömürün düşük sıcaklıktaki oksidasyonunda rol aldığı görülmüştür. Nem konusunda yapılan araştırmalarda farklı görüşler tespit edilmiştir. Nemin kendiliğinden yanmayı nasıl etkilediği ile ilgili olarak, bünye nemi, ortamdaki su buharı, ortam sıcaklığı, geçirgenlik ve termal iletkenlik parametrelerine bağlı olarak yanma mekanizmasının tanımlanması daha yaygındır.

Bazı çalışmalarda kendiliğinden yanmanın oluşabilmesi kritik nem içeriğinin %5-10 arasında olması gerektiği ifade edilmiştir. Yeni Zelanda alt bitümlü kömürleri üzerinde yapılmış olan çalışmalarda oksidasyonun en üst seviyeye ulaştığı nem seviyesinin %7-17 aralığında olduğu bildirilmiştir (Chen ve Stott, 1993; Ören, 2015).

Nem içeriği azaldıkça, kömürün yüzeyinde oksijenin kullanılabileceği yeni bir yüzey ve çatlak oluşmaktadır (Çakır, 2003).

Kül içeriği

Kömürdeki kül miktarı arttıkça karbon miktarında ve dolayısıyla oksijen ile reaksiyona girecek olan bileşen miktarında bir azalma olacağından yanma riskinin azalması beklenmektedir. Ancak kömürle karıştırılan ve çok düşük oranda kömür içeren pasaların bile yangın riskinin yüksek olabileceği yapılmış olan çalışma sonuçlarından anlaşılmıştır (Ünver ve Demirbilek, 1994; Ünver, 1997). Bu nedenle, kül içeriği ile kendiliğinden yanma arasında doğrudan bir ilişki yoktur.

Kükürt içeriği

Kömürün kükürt içeriği hem organik hem de mineral yapıda %0,2-8 arasındaki oranlarda değişebilmektedir. Kükürt çoğunlukla mineral bileşimindeki piritten kaynaklanmaktadır. Kömür yapısında bulunan pirit, uzun süreler boyunca kendiliğinden yanmanın ana nedeni olarak kabul edilmiştir. Ancak yanma özelliklerinin belirlenmesi aşamasında pirit içermeyen kömürlerde de kendiliğinden yanma oluşumu veya daha yüksek oranlarda pirit içeren kömürlerin kendiliğinden yanma riskinin daha düşük olması nedeni ile kömürdeki pirit içeriğinin kendiliğinden yanma açısından belirleyici bir faktör olmadığı anlaşılmıştır (Ünver, 1997).

Pirit özellikle nemli olduğu bir ortam da kolay bir şekilde oksitlenmekte ve daha ince taneler halinde bulunması durumunda ise reaksiyon hızlanmaktadır. Ayrıca pirit oksitlendiğinde şişerek kömür yapısında çatlamalara neden olmakta ve buna bağlı olarak artan yüzey alanı neticesinde oksidasyon riskinin fazlalaşmasına sebebiyet vermektedir (Duzy ve Land, 1985).

Tane boyutu

Kömür ne kadar ince olursa, ortamdaki oksijen ile doğal olarak reaksiyona girdiği yüzey alanı o kadar fazla olur. Örneğin 1 ton taşkömürü yaklaşık 4,46 m² alana sahipken, bu kömür ince toz boyutuna indirildiğinde yüzey alanı 2,8 km²'ye ulaşabilmektedir. Bundan dolayı oksidasyon hızının dış yüzey alanının küp kökü ile orantılı olarak arttığı belirlenmiştir (Sondreal & Ellman, 1974).

Depolanan kömür tipi

Depolama geometrisine, boyutuna ve şekline bağlı olarak kömür yığının maruz kaldığı oksijen miktarı, güneş, rüzgâr ve parçacık boyutu dağılımı kendiliğinden yanmada büyük ölçüde etkili olmaktadır (Erkan, 1964; Duzy ve Land, 1985; Brooks vd., 1988).

Oksijen kısmi basıncı

Kömürün oksidasyon hızının ortamdaki oksijenin kısmi basıncına bağlı olarak arttığına dair bir görüş olsa da bu konuda net bir fikir birliği yoktur (Ökten ve Yazıcı, 1984; Brooks ve Glasser, 1986).

Kömürün ilk sıcaklığı

Sıcaklığın kömürün kendiliğinden yanmasında ana faktör olduğu söylenebilir. Diğer faktörlerin ise alt etkileyiciler olduğunu söylemek mümkündür. Kömürün sıcaklığının artmasının oksijen tüketimini artırarak reaksiyonu hızlandığı ifade edilmektedir.

Oksidasyonda sıcaklık, düşük sıcaklık oksidasyonu adı verilen faz boyunca sabit kalır. Kritik sıcaklık denilen noktadan sonra bu kararlılığın arttığı gözlenmektedir. Genel olarak, bu kritik sıcaklık noktasının oda sıcaklığında, yani 30-40°C ile 150°C arasında başladığı ifade edilmektedir. Bu kritik sıcaklık değerinden sonra her 10°C sıcaklıktaki artışla oksidasyon hızının iki kat arttığı belirtilmiştir (Barış, 2006).

4.4.2. Dış faktörler

Kömürün yapısal özelliklerinden kaynaklanan kendiliğinden yanma problemlerinin yanı sıra, çevresel faktörler ile kömür damarının üretim faaliyetleri de yanma üzerinde etkili olabilmektedir.

Ortam sıcaklığı

Kömürün depo edildiği ortam sıcaklığının oksidasyon hızı ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Kuzey Dakota linyitleri üzerine yapılan uzun süreli çalışmalar sonucunda, 30-100°C arasında sıcaklıktaki her 10°C'lik artış sonucunda oksidasyon hızının 2,2 kat arttığı tespit edilmiştir (Ünver ve Özözen, 1998).

Havadaki nem miktarı

Havada bulunan yüksek miktardaki nem, su buharının kömür yüzeyine tutulumunu kolaylaştırabilmektedir. Özellikle kömür stoklarında yağışlı günlerde daha fazla kendiliğinden yanma sorunuyla karşılaşılmasının bu olayın bir sonucu olduğu belirtilmektedir (Ünver ve Özözen, 1998).

Stoklama şekli

Depolama geometrisine, boyutuna ve şekline bağlı olarak yığının maruz yaşadığı oksijen miktarı, güneş ve rüzgâr ve parçacık boyutu dağılımı kendiliğinden yanmayı büyük ölçüde etkili olmaktadır (Ünver ve Özözen, 1998).

Kömürün sıkıştırılma derecesi

Kömür stokunun basıncı, yığının geçirgenliği üzerindeki etkisinden dolayı kendiliğinden tutuşmayı azaltıcı bir etkiye sahiptir (Ünver ve Özözen, 1998).

4.5. Geçmiş Dönemde Yapılan Kendiliğinden Yanma Çalışmaları

Ülkemizde uzun yıllar boyunca farklı araştırmacılar tarafından kömür oksidasyonu ve kendiliğinden yanma konularında birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların ortak noktalarını çoğunlukla çalışılan kömür ya da organik malzemenin kendiliğinden yanmaya yatkınlığını belirleme ve kömür oksidasyonuna etki eden faktörlerin tanımlanması oluşturmaktadır.

Şensöğüt ve Ören (2020), Çan Linyitleri İşletmesi (ÇLİ) açık ocak ve stoklarından alınan kömür numunelerinin kendiliğinden yanma özelliklerini kesişim noktası yöntemiyle belirlemişlerdir. Yapılan deneylerde numunelerin ortalama sıcaklık artışının 0.92 ile 3.93°C/dk arasında değiştiği görülmüştür. Tutuşma sıcaklıkları 150 ile 182°C ve yatkınlık indeksi ise 5.04 ile 33.33 dk⁻¹ olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareketle 21 tane kömür numunesinin kendiliğinden yanma yatkınlığının “orta–yüksek” risk kategorisinde olduğu tespit edilmiştir.

Ören (2015) tarafından yapılan başka bir çalışmada; laboratuvar ortamında 16 hafta süreyle üç farklı depolama koşulunda (derin dondurucu, azot tankı ve fırın) muhafaza edilen -74 ve -500 µm boyutundaki linyit numunelerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıkları belirlenmiştir. Kömürlerin kendiliğinden yanma eğilimini tespit etmek için kesişim noktası metodu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; derin dondurucuda (-25°C) saklanan kömürlerin tutuşma sıcaklıkları, farklı saklama koşullarına sahip diğer numunelere göre daha yüksek değerlere sahipken, kendiliğinden yanma risk indeksleri de daha düşük tespit edilmiştir. Kömürlerin parça boyutunun kömürlerin kendiliğinden tutuşma seyri üzerinde etkili olduğu da bu çalışma ile ortaya konurken ilave olarak yatkınlık indeksi (I_{FCC}) ile kömür numunelerinin kimyasal özellikleri arasında da istatistiksel bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Ören ve Şensöğüt, 2016).

Özellikle kömür stokları uzun süreler boyunca havanın oksijenine maruz kalmakta ve yığınlarda oluşan kendiliğinden yanma durumlarında ciddi kömür kayıpları meydana

gelebilmektedir. Stoklardaki ısı değişimlerini ve kendiliğinden yanma eğilimlerini tespit etmek için Özdeniz (2003) tarafından bir izleme teknolojisi oluşturulmuştur. Bu çalışmada bilgisayarlı bir ölçüm sisteminde, yığında oluşan sıcaklıkların bilgisayar yardımı ile otomatik olarak ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kömür yığınının daha önce belirlenmiş noktalara 20 adet sıcaklık sensörü yerleştirilmiş ve stok içerisindeki sıcaklık değişimlerinin elektrik sinyaline dönüştürülmesi vasıtası ile ölçümler yapılmıştır. Filtreleme ve amplifikasyon işlemlerinden geçmiş bu bilgiler istenilen zaman aralıklarında bir veri tabanına kaydedilmiştir ve stokların sıcaklık dağılım haritaları çıkarılmıştır.

Kömür, kısmen dünyadaki rezervlerin düzenli dağılımı nedeniyle tüm ülkeler için stratejik bir enerji kaynağıdır. Fakat çevresel kaygılar nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının kömürün yerini alacağına yaygın olarak inanılsa da dünya enerji politikaları 2040 yılına kadar kömür kullanım payının (%27,1) önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle kömürün kendiliğinden yanması geçmişte ve bugün olduğu gibi gelecekte de önemli bir sorun olmaya devam edecektir. Geçmiş dönemlerde Ilgın Linyit İşletmelerinde kendiliğinden yanma ve açık ocak yangınları da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmakta ve bazen stok kömürlerinde meydana gelen yanma sonucu büyük rezervler ve ekonomik kayıplar yaşandığı bilinmektedir. Ilgın linyit ocaklarında üretim noktasından alınan 5 farklı numune üzerinde yapılan kendiliğinden yanma çalışmasında; kesişim noktası testlerinde çok fazla değişkenlik olmadığı görülmüştür. Deney sonuçlarına göre tutuşma sıcaklığı tipik olarak 195-234°C arasında değişmektedir. Laboratuvar deneylerinde yatkınlık indeksinin 2,73 ile 3,73°C/dk arasında değiştiği ve risk indeksinin "düşük ve orta" olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca alınan kömür numunelerinin termogravimetrik (TG) / diferansiyel termal analiz (DTA) deney sonuçlarına göre Ilgın linyitlerinin kendiliğinden yanma aktivitesi belirlenmiştir (Delibalta ve Gündoğar, 2020).

Madencilik operasyonları ile üretilen kömürün birçoğu stoklarda depolanmaktadır. Kömürün yığınlarda depolanması sırasında ekonomik ve çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. En büyük sorun, stoktaki kömürün kendiliğinden yanmasıdır. Bu sorunu önlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Doğan ve Özdeniz (2015) tarafından Konya Çimento Fabrikası kömür stoklarında iki farklı yüzeye sahip kömür yığını üzerinde güneş ışınlarının etkisini belirlemek için testler yapılmıştır. Bu amaçla 4 m genişliğinde, 3 m yüksekliğinde ve 6 m uzunluğunda yığınlar oluşturulmuştur. Dış yüzeyi kireçle kaplı olan kömür stoğuna beyaz (BYK), orijinal versiyonu ile oluşturulan siyah yüzeye ise SYK adı verilmektedir. Beyaz yüzeyin kendiliğinden yanmaya karşı etkisini belirlemek için oluşturulmuş olan BYK yığındır. Mevcut kömür stoklarında 51 gün boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri, coğrafi olarak yüzey sıcaklıkları ve güneş ışığının etkisi ile incelenmiştir.

Kömür yapısı gereği oksijeni adsorbe etme ve oksitlenme eğilimindedir. Kömürün kendiliğinden yanma mekanizması çok karmaşıktır ve bu mekanizma hala tam olarak anlaşılamamıştır. Bununla birlikte, günümüzde araştırmacılar tarafından kömür oksijen teorisi yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu teoriye göre kendiliğinden yanma, yavaş oksidasyon, aşaması, hızlanan oksidasyon aşaması ve hızlı oksidasyon aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalarda sırasıyla fiziksel oksijen adsorpsiyonu, kimyasal oksijen adsorpsiyonu ve serbest radikal reaksiyonları baskın mekanizmalardır. Kömürün ve/veya kömür atıklarının bulunduğu her yerde herhangi bir dış etki olmaksızın kendiliğinden kömür yanması gerçekleşebilir. Günümüzde kömürün kendiliğinden yanmasına etki eden parametreler hakkında bazı yaygın düşüncelerin yanlış olduğu ortaya çıkmıştır. Örneğin; kömürün kendiliğinden yanması sadece düşük dereceli kömürlerde gerçekleşmez ve yüksek pirit içerikli kömürler düşük kendiliğinden yanma eğilimine sahip olabilir veya riskli olmadığı belirlenen kömür madenleri beklenmedik şekilde yanabilir. Bu nedenle kömürlerin kendiliğinden yanma eğilimleri belirlenmeli; madencilik, stok sahası tasarımı ve nakliye gibi tüm aşamalar detaylı olarak planlanmalı; kendiliğinden yanma olması durumunda sürekli izleme ve acil müdahale planları düzenlenmelidir (İnal ve Aydın, 2019).

Ören ve Şensöğüt (2007) tarafından Kütahya bölgesi linyitlerinin incelendiği başka bir çalışmada Garp, Seyitömer ve Değirmisaz Linyit İşletmelerinden alınan kömürlerin kendiliğinden yanma eğilimleri tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada kesişim noktası yöntemi kullanılarak toplam 33 adet deney gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre Seyitömer bölgesinden alınan kömür numunelerinde kendiliğinden yanma riski “orta-yüksek”, Garp Linyit İşletmesi’nden alınan kömürler “yüksek” ve Değirmisaz Linyit İşletmesi’ne ait numuneler ”orta risk” grubunda tespit edilmiştir.

Şensöğüt (1999) yılında yaptığı çalışmada ülkemizde Konya bölgesinde faaliyet gösteren Ilgın linyitlerinin kendiliğinden yanma karakteristiklerini ortaya koymuş ve elde edilen sonuçlardan hareketle kömürlerin tutuşma sıcaklıklarının 180-184°C arasında değer aldığını ve yanma riski açısından “orta” yanma riskinde olduğunu ifade etmiştir.

Ilıca vd. (2020) yılında Manisa ili Soma bölgesinde faaliyet gösteren Demir Export, Işıklar ve İmbat Madencilğe ait sahalardan alınan numuneler ile Soma Bölgesi kömürlerinin kendiliğinden yanma eğilimlerini belirlemişlerdir. Soma Bölgesi kömürlerinin kendiliğinden yanma riskini belirlemek için her bir ocaktan alınan 10 numune ile kesişim noktası yöntemi kullanılarak toplam 30 deney yapılmıştır. Elde edilen değerlere göre Soma Bölgesi kömürlerinin kendiliğinden yanmaya "yüksek" bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Numunelerinin Alındığı Kömür Damarlarının Özellikleri

5.1.1. Seyitömer Linyit İşletmesi (SLİ)

Seyitömer Linyit İşletmesi (SLİ) coğrafi olarak Kütahya ili merkezinden 20 km uzaklıkta kuzeybatıda bulunmaktadır (Ören, 2006).

Seyitömer kömür havzası; Aslanlı ve Ayvalı olarak iki bölümden oluşmaktadır. Seyitömer bölgesi içerisinde, S-49 ve Höyük panoları olarak isimlendirilen Gülbektepe ve Bozcahöyük sahaları yer almaktadır. Ayrıca Aslanlı bölümü Aslanlı I ve Aslanlı II olarak iki ayrı sahadan oluşmaktadır. Bu bölgenin kuzeydoğusunda yer alan Ayvalı bölümünde üç ayrı noktada kömür oluşumu tespit edilmiştir.

Türkiye'nin en büyük kömür rezervi olan sahip Kütahya ili Seyitömer ilçesinde olan Bozcahöyük yer almaktadır. Tabanda oldukça kalın iki farklı kömür yatağı ve en üst ise yaklaşık olarak 20 m organik maddesi oldukça zengin bir bölgeye sahiptir. Bu bölgedeki bitüm yatakları çok yüksek miktarda bazik bitüm, kerojen içermekte ve hava oksijen ile tutuşarak kendiliğinden yanma olmaktadır (Sarı ve Arslan, 2019).

Alanda bitümlü kayaçlar, bölgede bitümlü yataklarda bol miktarda bulunan bazik bitüme bağlı olarak çok yaygın olan bu kendiliğinden yanma nedeniyle bölgede seri olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü kayaçlar, bitümlü şeyl, bitümlü kilaşı ve bitümlü marnlardan oluşmaktadır. Şekil 5.1 ve 5.2'de çalışmaya konu olan S-49 ve Höyük panolarına ait kömür damar stampları verilmiştir (Ören, 2006).

Adı	Kalınlık (cm)	(%)	Özellikleri
Kil	10	0.83	Sarı renkli
Kömür	25	2.07	
Sileks	20	1.66	Siyah renkli, mat, sert
Kömür	50	4.15	
Kil	25	2.07	Sarı renkli, yumuşak
Kömür	35	2.90	
Kil	10	0.83	Yeşil-siyah renkli, yumuşak
Kömür	150	12.46	9 adet ince kil bandlı
Kil	10	0.83	Yeşil-siyah renkli, yumuşak
Kömür	50	4.15	
Kil	15	1.24	Açık sarı renkli, yumuşak
Kömür	75	6.22	
Kil	15	1.24	Yeşil-siyah renkli, yumuşak
Kömür	90	7.47	
Kil	15	1.24	Sarı renkli, yumuşak
Kömür	230	16.61	İnce kil bandlı
Kil	25	2.07	Koyu gri renkli, yumuşak
Kömür	120	9.96	
Kil	15	1.24	Gri-beyaz renkli, yumuşak
Kömür	70	5.81	
Kil	20	1.66	Koyu gri-siyah renkli, yumuşak
Kömür	160	13.29	
	1205	100.00	

Şekil 5.1. SLİ S-49 panosu üst kömür damarı stampı.

	Adı	Kalınlık		Özellikleri
		(cm)	(%)	
	Kil	50	6.90	Beyaz renkli
	Kömür	25	3.45	
	Kil	10	1.38	Açık-sarı renkli, yumuşak
				
				
				
				
				
				
				
	Kil	15	2.07	Açık-gri renkli
				
	Kömür	70	9.66	Gri-siyah kil bandlı
	Kil	10	1.38	Gri, yer yer koyu gri renkli
				
	Kömür	60	8.28	
	Kil	10	1.38	Sarı renkli, gevrek
				
	Kömür	50	6.90	
	Kil	15	2.07	Gri renkli, yer yer koyu gri
				
				
				
	Kil	100	13.79	Gri-siyah ezilmiş kil bandlı
				
	Kil	15	2.07	Gri-yeşil, parlak, yumuşak
				
	Kömür	75	10.34	Gri kil bandlı
	Kil	5	0.69	Koyu gri, yumuşak
	Kömür	35	4.83	Yeşil kil bandlı
				
	Kil	40	5.50	Gri renkli (B3 sınırı)
		725	100.00	

Şekil 5.2. SLİ Höyük panosu üst kömür damarı stampı.

5.1.2. Bursa Linyit işletmesi (BLİ)

Bursa Linyit İşletmesi Bursa il merkezinden 55 km de uzaklıkta güney de bulunan Orhaneli kömür havzası Gümüşpınar'da faaliyet göstermektedir. Havzadaki Arkaik Neojen kayaları, altta yatan metamorfik kayalar, mermerler ve ofiyolitler üzerinde bulunur. Neojen birimleri altta çalığtaş, kumtaşı, kil, çamurtaşı ardalı seviyeleri şeklindedir. Üste doğru önce linyit damarları içeren bir marn ve daha üstte ise tekrarlayan kumtaşı çakıltası görülmektedir. Kömür damarı neojenin taban kırıntıları üzerinde oturur. Kömür damarı, 2-17 m arasında değişen kalınlığındaki Neojen tabanının parçaları üzerinde yer almaktadır. Şekil 5.3.'te Orhaneli havzası litolojik dizilimi gösterilmektedir (Uçaku, 2000).

ORT KAL (m)	SÜTÜN KESİTİ	LİTOLOJİK ÖZELLİKLER
30		TÜF TUFİT : Açık renkli, yer yer değişik yapıda, ufalanır özellikli, bazen oldukça sert, dasitik, andezitik riyodasitik özellikli kazıda patlatma zorunlu.
30		KUMTAŞI-ÇAKILTAŞI : Kumtaşı açık yeşil, boz, çok sert, aşındırıcı özellikli, Çakıltası: Kalın katmanlı, blok yapılı, temelden türeme çakıllı, çok sert kazıda patlatma zorunlu.
30		MARN-KİLTAŞI : Açık bej, gri renkli, orta, kalın katmanlı blok yarımaly, sert kırılğan bol yaprak fosilli (Üst Miyosen), kazıda patlatma zorunlu.
8		LİNYİT : Yer yer killi özellikte, koyu kahverengi, mat, sert, kırılğan, bazen şisti yapıda ortalama 2500 Kcal/kg ısı değeri kazıda patlatma zorunlu. Üst Miyosen yaşlı.
20		KİLTAŞI : Yeşil renkli ince taneli, kırılğan, ıslanmışında heyelan oluşturmaya uygun. KUMTAŞI-ÇAKILTAŞI: Yeşil, boz renkli temelden türeme malzemeli.
		KALKŞİST-ŞİST : Kahverengi, boz, ufalanır özellikli, kuvarsit, yeşil şist, MERMER : Beyaz renkli, parlak sert kırılğan sakkaroid dokulu bol çatlaklı. SERPANTİNİT: Yeşil, kahverengi, yer yer altere işletme kenar zonlarında üst formasyonları heyelan yaptırmaya müsait.

Şekil 5.3. Orhaneli Havzası litolojik dizilimi (Uçaku, 2000).

5.1.3. Afşin Elbistan Linyit işletmesi

Türkiye de linyit işletmesi olarak mevcut kömür sahaları ile kıyaslandığında en büyük potansiyel sahip olan Afşin Elbistan Linyit İşletmesidir. Kömür kalitesi düşük olmasına rağmen

yaklaşık olarak ortalama kalori 3896 kcal/kg'dır. Kül değeri %18.42, nem miktarı %55, uçucu miktarı %52.50'dir. 1967 yılından itibaren linyit rezervleri keşfedilen Afşin Elbistan linyit havzasında, 1999 yılında Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) tarafından yapılan rezerv çalışmalarında A sektörüde (Kışlaköy) dahil edildiğinde toplam 3.74 milyar ton kömür olduğu hesaplanmıştır. Çizelge 5.1.'de Afşin-Elbistan havzasının üretilebilir kömür rezervi gösterilmektedir (Koçak vd., 2009).

Çizelge 5.1. Afşin-Elbistan havzasının üretilebilir kömür rezervi.

Rezerv Bölgeleri	Üretilebilir Rezerv (Milyon ton)	Ort. Kömür Kalınlığı (m)	Alt Isıl Değeri (kcal/kg)	Toprak/Kömür Oranı (m ³ /ton)
A İlave	135	35	1.110	2.54
B1	1.090	47	1.148	2.81
C1	1.100	41	1.120	2.38
B2	520 B Santralı: 600	48	1.120	1.87
A (Kışlaköy)	A Santralı: 300	43	1,120	
Toplam	3.745	45	1.128	

MESOZOYİK					S E N O Z İ K					ÜST SİSTEM
		T E R S İ Y E R		K U V A T E R N E R		SİSTEM				SERİ
EOSEN		MİYOSEN		P L İ Y O S E N		HOLESEN - PLEYİSTOSEN		FORMASYON		
</										

5.2. Numunelerin Alınması

Kendiliğinden yanma deneylerinde kullanılmak üzere alınan numuneler Seyitömer Linyit İşletmesi A.Ş. SLİ S-49 ve Höyük panosu, BLİ A panosu Orhaneli ve Afşin Elbistan 63 no'lu panodan temin edilmiştir. Şekil 5.5'te ocaklardan alınan numunelere ait görsellere yer verilmiştir. Numuneler oksitlenmeyi önlemek için hava ile teması minimize edecek şekilde streç film ve alüminyum folyo içinde konularak araziden alınmış ve deneysel sürece kadar derin dondurucuda saklanmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.5. Numune alınması (a) SLİ Höyük panosu numunesi, (b) SLİ S-49 panosu numunesi, (c) Afşin Elbistan 63 no'lu pano, (d) BLİ A panosu.

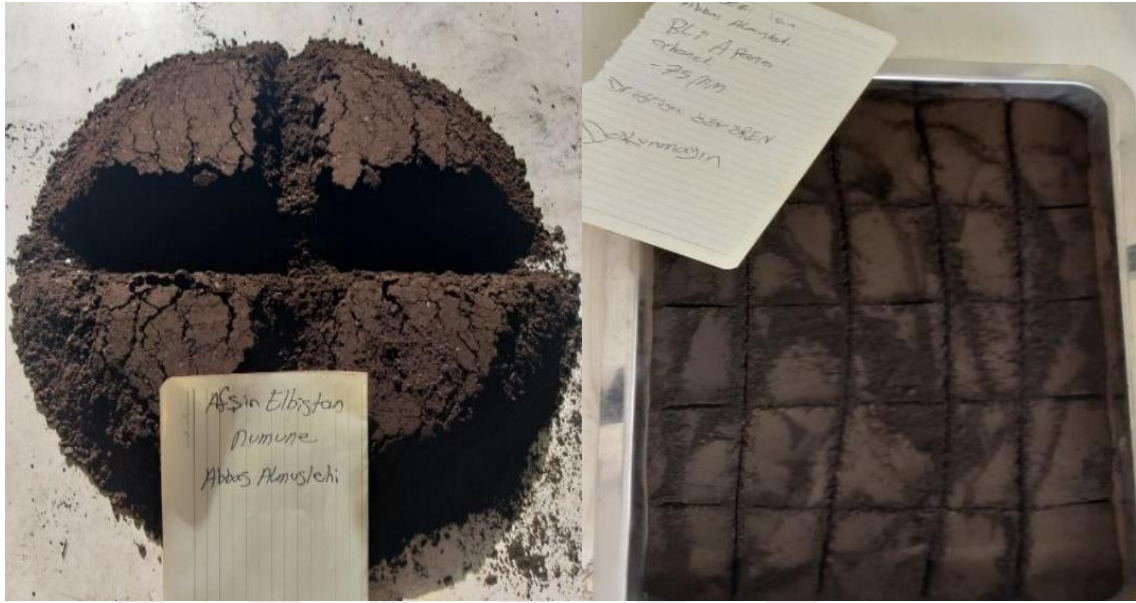
5.3. Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen numunelerin boyut küçültmesi için üç ayrı işlem yapılmıştır. Her panodan yaklaşık olarak 2.5 kg'lık numuneler alınmıştır. Kırma ve öğütme işlemleri KDPÜ Maden Mühendisliği Bölümü kırma ve öğütme laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6.'da kırma ve öğütme işlemi için kullanılan çeneli kırıcı ve halkalı değirmen gösterilmektedir. İlk olarak numuneleri belli bir boyuta indirmek amacıyla çeneli kırıcı kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Halkalı değirmen ve çeneli kırıcı.

İkinci aşama olarak çeneli kırıcıdan alınan numuneler konileme – dörtleme işlemi ile temsili bir şekilde azaltılmış ve azaltılan numuneler yaklaşık olarak 75 mikron boyutuna halkalı değirmen vasıtası ile getirilmiştir. Daha sonra bu numuneler karelej yöntemi ile tekrar azaltılmış ve elekten geçirilerek -75 mikron boyutuna sahip olacak şekilde 35 gr'lık paketler halinde deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.7).



(a)

(b)



(c)

Şekil 5.7. (a) Konileme - dörtleme, (b) Karelaj yöntemi ve (c) 200 mesh elek.

5.4. Deneylerde Kullanılan Kömürlerin Kimyasal Analizleri

Yapılan tez çalışmasında kendiliğinden yanma deneyleri için kullanılan numunelerin kimyasal analizleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü kimyasal analiz laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan kömür numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.

Numune adı	Afşin Elbistan 63	SLİ 49	SLİ Höyük	BLİ A
Nem (%)	10.42	28.32	29.16	25.96
Kül (%)	18.42	21.20	16.25	9.77
Uçucu madde (%)	52.50	59.35	51.81	58.32
Karbon (%)	29.08	19.39	31.94	31.91
Kalorifik Değer (kcal/kg)	4596	4856	5221	5818

5.5. Kendiliğinden Yanma Testleri

-75 µm boyutuna indirilmiş olan kömür numuneleri karelej yöntemi kullanılarak her bir numune için yaklaşık olarak 200 gr hazırlanacak şekilde azaltılmış ve her kömür örneğinden yaklaşık 10 gr'lık bir kısım da kömür numunesinin kısa ve elementel analizlerinin yapılması için ayrılmıştır. Söz konusu deney analizleri KDPÜ Maden Mühendisliği Bölümünde Kendiliğinden Yanma Laboratuvarlarında yapılmıştır.

5.5.1. Deney düzeneği ve metot

Bu tez çalışmasında temin edilmiş olan 20 adet kömür numunesinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının belirleme işlemi literatürde “kesişim noktası metodu (crossing point temperature method)” kullanılarak ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kendiliğinden Yanma laboratuvarında hali hazırda faaliyette olan deney seti aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deney analiz setine ait illüstrasyon Şekil 5.8’de verilmiştir. Kendiliğinden yanma deney analiz seti; program ve rampa ayarlı bir fırın (Carbolite PF120, UK), akış ölçer (Cole Parmer, USA), kömür numunesinin sıcaklığı kaydetmek için kaydedici (Testo 175-T3, DE), oksijen ve azot tüpü ile krom-nikel alaşımlı bir kömür reaktöründen meydana gelmektedir. Deneysel analizlerde yaklaşık olarak 35 gr'lık kömür numunesi kömür reaktörü içine konulup gaz giriş ve çıkış yolları bağlantıları yapıldıktan sonra rampa ayarlı fırın çalıştırılmaktadır. Fırın ve kömür numunesinin sıcaklıkları 30°C’de eşit oluncaya kadar (stabilizasyon zamanı) reaktöre hiç oksijen verilmemiştir. Kömür numunesi 30°C’ye ulaştığı anda reaktöre 100 cc/dk’lık oksijen verilerek deney analizi başlatılmış ve fırın ile kömür numunesinin zamana bağlı sıcaklık değişimleri takip altında tutulmuştur. Deney sırasında elde edilen verilerden literatürde Feng, Chakravorty & Cochrane adı verilen bir indeks vasıtasıyla kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığı tespit edilmektedir. Bahsi geçen indekse ait formülasyon ve formülasyon içinde kullanılan değişkenlere ait açıklamalar aşağıda verilmiştir (Ören ve Şensöğüt, 2007).

$$I_{FCC} = \frac{\text{Ort. Sıc. Artışı (OSA)}}{\text{Kesişim Noktası (Tutuşma) Sıcaklığı}} \times 1000$$

Burada;

I_{FCC} : Feng, Chakravorty, Cochrane indeksi, 1/dk

OSA : 110 – 220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı, °C/dk

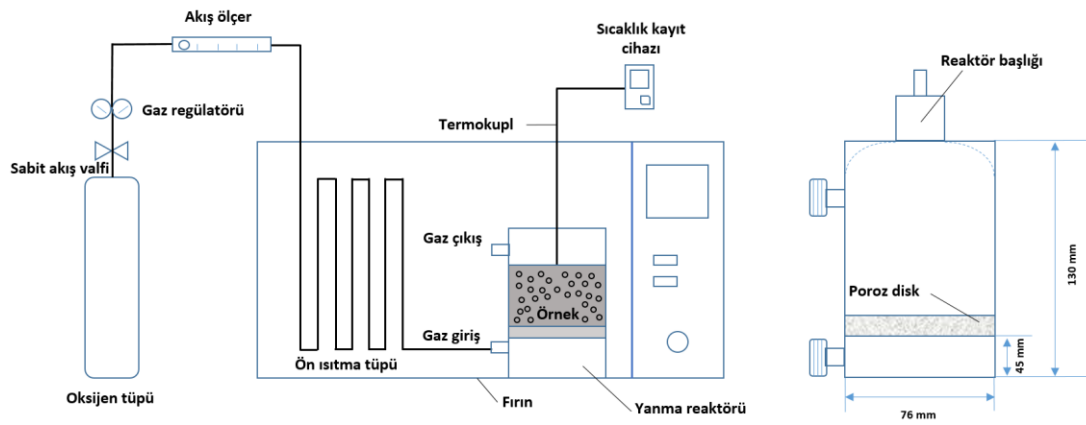
Ortalama sıcaklık artışı (OSA) ise;

$$OSA = \frac{110}{t_2 - t_1}$$

Formülü ile hesaplanmıştır. Bu eşitlikte;

t_2 : Numunenin sıcaklığı 220°C'ye ulaştığı zaman dakikası olarak alınmıştır

t_1 : Numunenin sıcaklığı 110°C'ye ulaştığı zaman dakikası olarak alınmıştır



Şekil 5.8. Kendiliğinden yanma testleri için kullanılan deney seti (Şensöğüt ve Ören, 2020).

Etüv

Kömürlerin kendiliğinden yanma yatkinlıklarının belirlenmesi amacı ile kurulan düzeneğin en önemli bileşenlerinden bir tanesi program ayarlı etüvdür. Carbolite marka PF120 model etüv sayesinde farklı rampa ve sıcaklık ayarları yapılabilmekte ve reaktör içerisindeki kömürün düzenli olarak sıcaklığının artırılması sağlanabilmektedir. Etüv üzerinde bulunan PID kontrolcüsü yardımıyla deneyler üç aşamalı bir program ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre sırasıyla;

1. Etüv çalıştırılmaya başlatıldığından itibaren 10 dk'lık bir süre zarfında ortam sıcaklığından 30°C'ye kadar ısıtılmakta,
2. 30°C'de yaklaşık olarak bir saat bekletilerek numune sıcaklığı ile etüv sıcaklığının dengeye gelmesi sağlanmakta (stabilizasyon zamanı),
3. Son aşama olarak ise stabilizasyon gerçekleşikten sonra etüvün sıcaklığı 0.5°C/dk artacak şekilde 220°C'ye kadar arttırılmaktadır.

Etüvün 1. ve 2. aşamasında kömür reaktörü içerisine herhangi bir şekilde oksijen verilmemiştir. Bu aşamada kömürün okside olmasını engellemek adına kömür reaktörü içerisine azot gazı verilmiştir. 3. aşamada ise etüv sıcaklığı artışa geçtiği anda azot gazı kesilmiş ve bunun yerine reaktör içerisine oksijen gazı gönderilmiştir. Bu süreçten itibaren kömür ve etüv sıcaklıkları kayıt altına alınmaktadır.



Şekil 5.9. Deney için kullanılan Carbolite markası programlanabilen etüv.



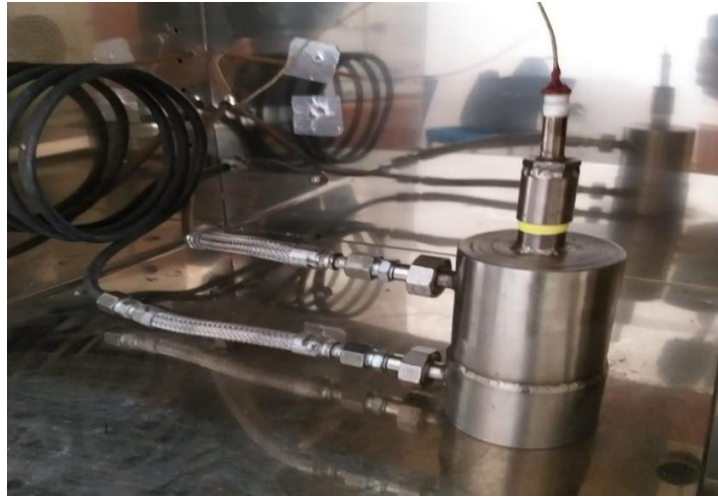
Şekil 5.10. Etüvün programı ayarlanması için ekran kumandası.

Reaktör

Kendiliğinden yanma deney laboratuvarında hali hazırda üç farklı boyut ve kapasiteye sahip olan kömür reaktörü mevcuttur. Bu tez çalışmasında yapılan deneyler için küçük ölçekli reaktör kullanılmıştır (Şekil 5.11). Paslanmaz çelikten yapılan bu reaktör içerisine yaklaşık 35 gr kömür konularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Aşağıda tüm kömür reaktörlerine ait spesifik ölçüler verilmiştir:

- Küçük ölçekli reaktör $\varnothing=76,1$ mm; $h=130$ mm boyutlara sahip
- Orta ölçekli reaktör $\varnothing=88,9$ mm; $h=160$ mm boyutlara sahip
- Büyük ölçekli reaktör $\varnothing=101,2$ mm; $h=200$ mm boyutlara sahip

Reaktörün üst kısmında numune sıcaklığını ölçmek için kullanılan termocuğun yerleştirilmiş olduğu bir adet giriş deliği bulunmaktadır. Reaktörün yan yüzeylerinde ise iki adet delik bulunmaktadır. Bu deliklerden reaktörün alt kısmına yakın olan delik gaz giriş deliğidir. Bu delikten giren hava, azot ya da oksijen reaktörün içerisine yerleştirilmiş olan bir geçirgen disk sonrasında kömür numunesine ulaşmaktadır. Reaktörün üst kısmına yakın olan delik ise gaz çıkış deliği olarak adlandırılmaktadır. Oksidasyon neticesinde oluşan yanma ürünü gazlar bu delik vasıtası ile etüv dışarısına atılmaktadır. Ayrıca reaktörün en üst kısmında kömür numunesinin reaktör içerisine beslenmesini sağlayan numune giriş deliği de bulunmaktadır.



Şekil 5.11. Etüv içinde yerleştirilmiş reaktör.

Kaydedici

Deneylerde kömür numunelerinin sıcaklığını ölçmek amacıyla Şekil 5.12’de gösterildiği gibi Testo marka 175 T3 model sıcaklık kaydedici (data logger) kullanılmıştır. Reaktör içerisinde

bulunan kömür numunesinin sıcaklık ölçüm işlemini sağlamak için termočiftin bir ucu numune içerisine yerleştirilmiş ve diğer ucu kaydediciye bağlanmıştır. Numunenin deneyler esnasındaki sıcaklık değişimleri kaydedici üzerindeki bulunan ekran vasıtası ile her 10 dakikada bir kayıt altına alınmıştır.



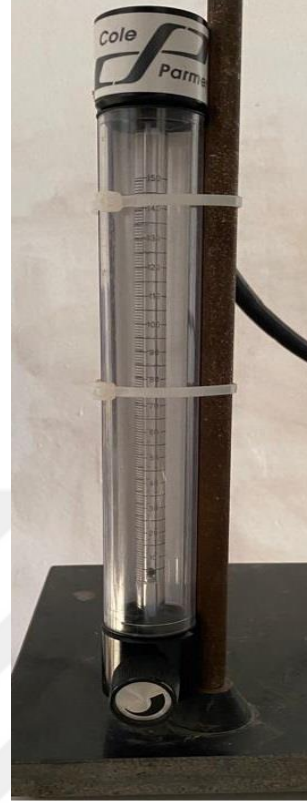
Şekil 5.12. Deneyde kullanılan kaydedici.

Oksijen tüpü ve akış ölçer

Deneyler esnasında kömür numunelerinin oksitlenmesi için %99,5 saflıkta oksijen kullanılmıştır. ColeParmer marka bir flowmetre (akış ölçer) vasıtası ile oksijen tüpünden çıkan oksijen 200 cc/dk hıza ayarlanarak kesintisiz bir şekilde reaktör içerisine gönderilmiştir. Şekil 5.13.'te kullanılan oksijen tüp ve akış ölçümü gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.13. (a) Deney için kullanılan oksijen tüpü, (b) Akış ölçer.

5.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez çalışmasında kullanılan kömür örneklerine ait tüm deney sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Yapılan deneylerde kömürlerin tutuşma sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışı değerleri ile yanma risk indeksleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca tüm kömür numunelerine ait kendiliğinden yanma deney sonuçları ve sıcaklık-zaman eğrileri Ek 1-4'te verilirken örnek olması adına kömür havzalarına ait kömürler üzerinde gerçekleştirilen 1 no'lu deneysel sonuç ve grafikler Çizelge 5.4-5.7 ile Şekil 5.14-5.17 arasında gösterilmiştir.

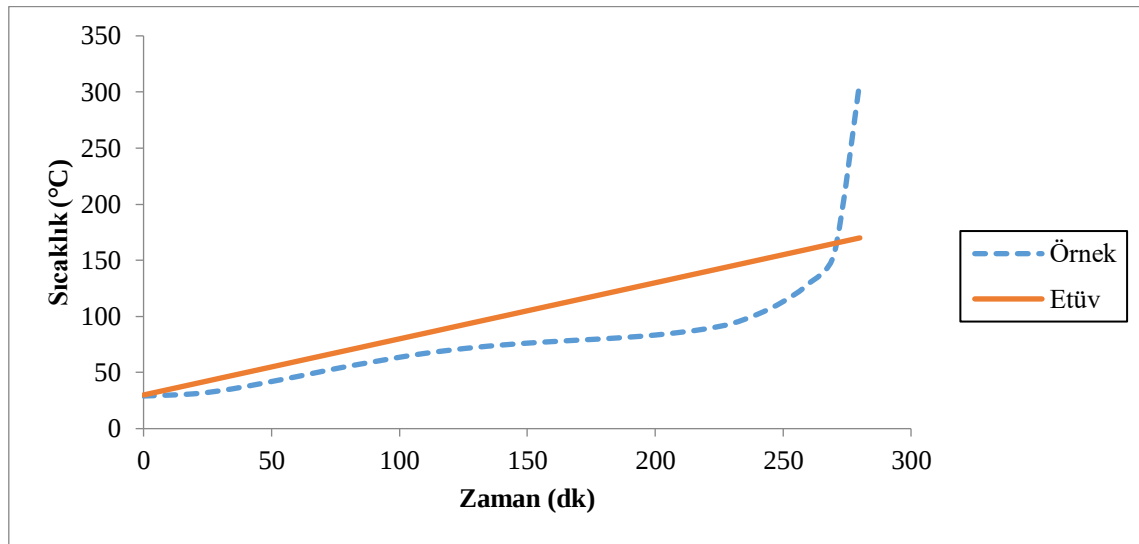
Çizelge 5.3. Tüm kömür örneklerine ait kendiliğinden yanma deney sonuçları.

Numune & deney kodu	Tutuşma Sıcaklığı (°C)	Ortalama Sıcaklık Artışı (°C/dak)	IFCC Yatkinlık İndeksi (dak-1)	Risk Durumu
SLİ S-49 (1)	166	3.93	23.67	YÜKSEK
SLİ S-49 (2)	164	4.23	25.79	YÜKSEK
SLİ S-49 (3)	165	5.50	33.33	YÜKSEK
SLİ S-49 (4)	164	3.24	19.73	YÜKSEK
SLİ S-49 (5)	164	3.79	23.13	YÜKSEK
SLİ HÖYÜK (1)	166	2.89	17.44	YÜKSEK
SLİ HÖYÜK (2)	162	4.58	28.29	YÜKSEK
SLİ HÖYÜK (3)	167	3.67	21.96	YÜKSEK
SLİ HÖYÜK (4)	165	4.23	25.64	YÜKSEK
SLİ HÖYÜK (5)	164	2.68	16.36	YÜKSEK
BLİ A (1)	160	7.33	45.83	YÜKSEK
BLİ A (2)	159	7.33	46.12	YÜKSEK
BLİ A (3)	155	3.79	24.47	YÜKSEK
BLİ A (4)	154	4.23	27.47	YÜKSEK
BLİ A (5)	157	6.47	41.21	YÜKSEK
AFŞİN ELBİSTAN 63(1)	158	1.64	10.39	YÜKSEK
AFŞİN ELBİSTAN 63(2)	157	1.57	10.01	YÜKSEK
AFŞİN ELBİSTAN 63(3)	156	1.55	9.93	ORTA
AFŞİN ELBİSTAN 63(4)	161	1.07	6.33	ORTA
AFŞİN ELBİSTAN 63(5)	155	2.02	11.26	YÜKSEK

Çizelge 5.4. SLİ S-49 panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.1	150	105	76.2
10	35	29.9	160	110	77.6
20	40	31.1	170	115	78.9
30	45	33.8	180	120	80.1
40	50	37.6	190	125	81.6
50	55	42	200	130	83.4
60	60	46.4	210	135	85.9
70	65	51.1	220	140	89
80	70	55.6	230	145	93.7
90	75	59.6	240	150	101.9
100	80	63.6	250	155	113.2
110	85	67.1	260	160	129.2
120	90	70	270	165	156
130	95	72.5	280	170	310
140	100	74.5			

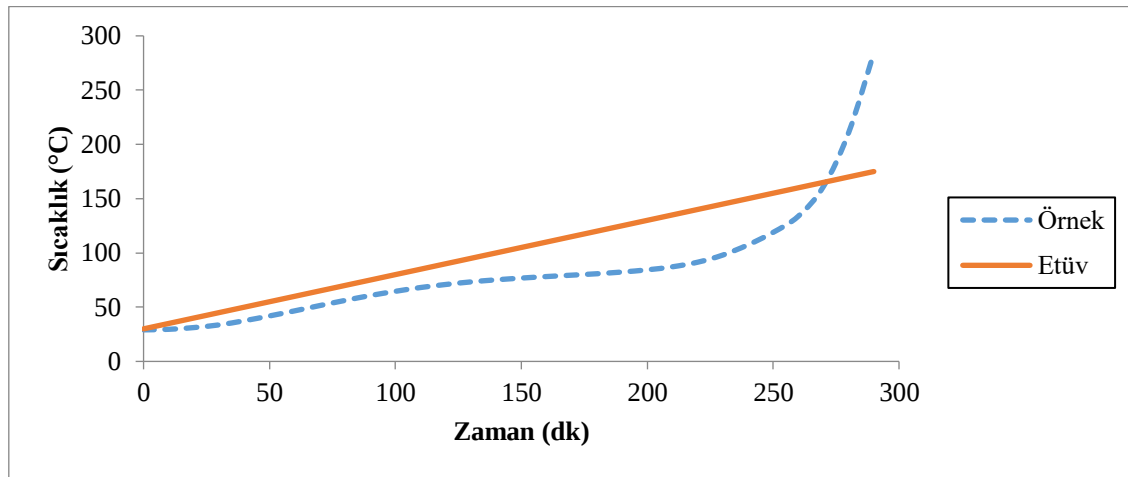
OSA	3.928571429
CPT	166
I(FCC)	23.66609294



Şekil 5.14. SLİ S-49 (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Çizelge 5.5. SLİ-Höyük panosu (1) no’lu deneye ait analiz sonuçları.

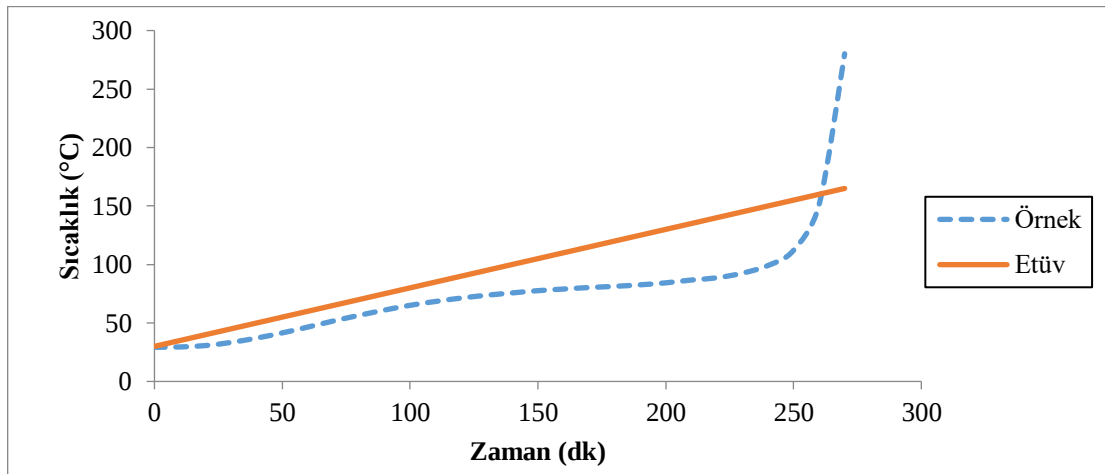
Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.1	150	105	76.8
10	35	29.6	160	110	78.2
20	40	31.2	170	115	79.5
30	45	33.7	180	120	80.8
40	50	37.5	190	125	82.4
50	55	41.9	200	130	84.4
60	60	46.6	210	135	87.2
70	65	51.5	220	140	91.4
80	70	56.2	230	145	98
90	75	60.7	240	150	107.4
100	80	64.6	250	155	118.9
110	85	68.1	260	160	133.8
120	90	70.9	270	165	161.2
130	95	73.3	280	170	210.8
140	100	75.2	290	175	284.4
OSA			2.894736842		
CPT			166		
I(FCC)			17.43817375		



Şekil 5.15. SLİ-Höyük (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Çizelge 5.6. BLİ A panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.2	150	105	77.6
10	35	29.5	160	110	79
20	40	30.7	170	115	80.3
30	45	33.4	180	120	81.3
40	50	37.1	190	125	82.6
50	55	41.5	200	130	84.3
60	60	46.5	210	135	86.7
70	65	51.7	220	140	88.6
80	70	56.5	230	145	92.6
90	75	61	240	150	99.1
100	80	65.1	250	155	112.1
110	85	68.4	260	160	151.1
120	90	71.3	270	165	280.1
130	95	73.7			
140	100	75.7			
OSA			7.333333333		
CPT			160		
I(FCC)			45.83333333		

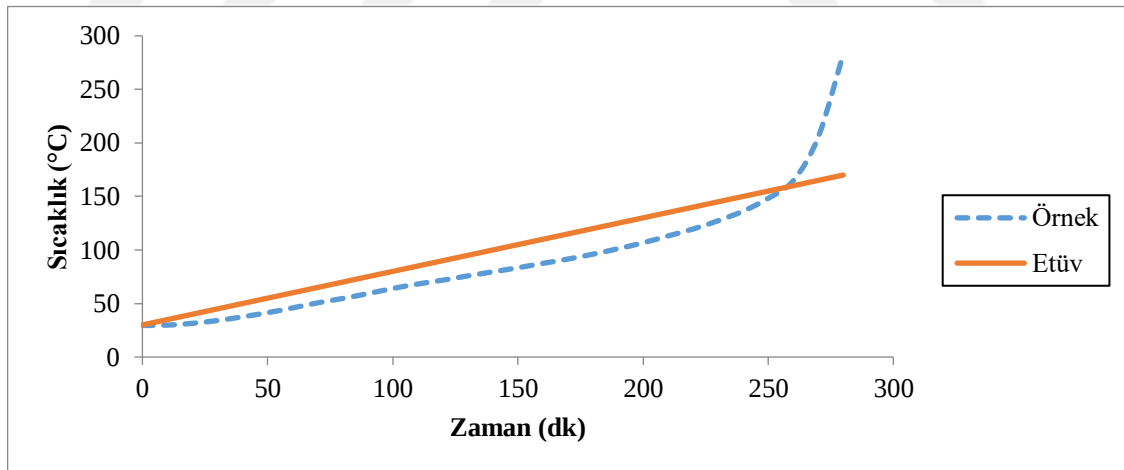


Şekil 5.16. BLİ- A (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Çizelge 5.7. Afşin Elbistan 63 pano (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları.

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.5	150	105	83.4
10	35	29.8	160	110	87.5
20	40	31.5	170	115	91.5
30	45	34.1	180	120	96.1
40	50	37.6	190	125	101.2
50	55	41.4	200	130	106.7
60	60	45.9	210	135	113.1
70	65	50.6	220	140	119.6
80	70	54.7	230	145	127.3
90	75	59.2	240	150	136.3
100	80	64	250	155	148.2
110	85	68.2	260	160	164.7
120	90	71.8	270	165	205.5
130	95	75.8	280	170	283.3
140	100	79.6			

OSA	1.641791045
CPT	158
I(FCC)	10.39108256



Şekil 5.17. Afşin Elbistan 63 (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

6. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, Seyitömer havzası, Bursa havzası ve Afşin Elbistan havzasına ait kömürlerin oksidasyon ile meydana gelen kendiliğinden yanma ve sonucunda oluşması muhtemel yangın riskleri belirlenmiştir.

Bu amaçla Çelikler Holding A.Ş. bünyesinde kömür üretimi yapan ve Kütahya, Bursa ve Kahramanmaraş illerinde faaliyet gösteren Seyitömer Linyit İşletmesi (SLİ) S-49 ve Höyük; Bursa Linyit İşletmesi (BLİ) A ve Afşin Elbistan 63 no'lu panolardan alınmış olan numuneler üzerinde “kesişim noktası metodu” kullanılarak bölgedeki kömür ocaklarının kendiliğinden yanma risklerine ilişkin analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, Seyitömer Linyit İşletmesi S-49 panodan alınan numunelerinin tutuşma sıcaklıkları 164 – 166°C arasında tespit edilmiştir. Ortalama sıcaklık artışı 3.24 – 4.23°C/dk arasında bulunmuştur. Yatkinlik indeksi olarak 19.73 – 33.33 dak⁻¹ arasında hesaplanmıştır.

Seyitömer Linyit İşletmesi Höyük panodan alınan numunelerinin tutuşma sıcaklığı 162 – 167°C arasında ve ortalama sıcaklık artışı 2.68 – 4.58°C/dk arasında bulunmuştur. Yatkinlik indeksi 16.36 – 28.29 dak⁻¹ arasında tespit edilmiştir.

Bursa linyit işletmesi A panodan alınan numunelerinin tutuşma sıcaklığı 154 – 160°C arasındadır. Ortalama sıcaklık artışı 3.79 – 7.33°C/dk arasında belirlenmiştir. Yatkinlik indeksi değeri 24.47 – 46.12 dak⁻¹ arasında değerler almıştır.

Afşin Elbistan 63 no'lu damardan alınan numunelerinin tutuşma sıcaklığı 155 – 161°C arasında bulunmuştur. Ortalama sıcaklık artışı 1.07 – 2.02°C/dk arasında tespit edilmiştir. Yatkinlik indeksi değeri 6.33 – 11.26 dak⁻¹ arasında hesaplanmıştır.

Elde edilen deney sonuçlarından hareketle; Seyitömer Linyit İşletmesine ait kömürler kendiliğinden yanma açısından “yüksek riskli”, Bursa Linyit İşletmesi kömürleri yine aynı şekilde “yüksek riskli” olarak belirlenmiştir. Diğer numunelerden farklı olarak Afşin Elbistan Linyit İşletmesi'ne ait kömürlerin kendiliğinden yanma riskleri “orta – yüksek” olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Allen, R.R., Parry, V.F. (1954). *Storage of low-rank coals*. Bureau of Mines Report, 5034, USA.
- Akyüz, Ş.B. (2005). *Kömürdeki nemin yanmaya etkisinin teorik incelenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Artüz, S. (1974). *Zonguldak Kozlu bölümündeki (Westfaliyen a) Hacıpetro kömür damarının petrografik incelenmesi*. İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Atesok, G. (Ed.). (2004). *Kömür hazırlama ve teknolojisi*. İstanbul: Beril Yayıncılık Matbaacılık Ltd.Sti.
- Banerjee, S.C. (Ed.). (1985). *Spontaneous combustion of coal and mine fires*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Banerjee, S.C. (Ed.). (2000). *Preventing and combating mine fires*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Bariş, K. (2006). *Yüksek uçuculu kömürlerde düşük sıcaklık oksidasyonu* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Beamish, B.B., Barakat, M.A., St. George, J.D. (2000). Adiabatic testing procedures for determining self-heating propensity of coal and sample ageing effects. *Thermochimica Acta*, 362, 79-87.
- Besbelli, B., Evirgen, C., Karaca, K., Gülhan, M., Gökmenoğlu, O. (2008). *Afşin – Elbistan kömür havzası C ve D sektörleri jeoloji ve rezerv raporu hidrojeoloji ön raporu*. MTA Raporu, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Brooks, K., Glasser D. (1986). A simplified model of spontaneous combustion in coal stockpiles. *Fuel*, 65, 1035- 1041.
- Brooks, K., Svanas, N. & Glasser, D. (1988). Evaluating the risk of spontaneous combustion in coal stockpiles. *Fuel*, 67, 651-656.
- Buzkan, İ. (1987). Kömür petrografisi teknikleri ve endüstriyel uygulamaları, *Madencilik*, 4, 31-39.
- Buzkan, İ. (1990). *Zonguldak karadon bölgesinde kozlu formasyonu kömürlerinin petrolojisi ve değerlendirilmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Carras, J.N., Young, B.C. (1994). Self-heating of coal and related materials: Models, application and test methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(1), 1–15.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chen, X.D., Chong, L.V. (1998). Several important issues related to crossing-point temperature (CPT) method for measuring self-ignition kinetics of combustible solid. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(2), 90-93.

Chen, X.D. (1999). On basket heating methods for obtaining exothermic reactivity of solid materials: The extent and impact of the departure of the crossing-point temperature from the oven temperature. *Process Safety and Environmental Protection*, 77(4), 187-192.

Chen, X.D., Stott, J.B. (1993). *The effect of moisture content on the oxidation rate of coal during near-equilibrium drying and wetting at 50 °C. Fuel*, 72, 787-792.

Cudnore, J., Sanders, F. (1984). *Spontaneous combustion of coal, mine fires and interpretation of analysis of mine gasses-a literature review*. Australian Coal Industry Research Laboratories, Report No 84, Australia.

Çakır, A. (2003). *Zonguldak havzası kömür damarlarından elde edilecek kendiliğinden yanma verilerinin bir uzman sistem programı ile değerlendirilmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

De Rosa, M.I. (2004). *Analysis of mine fires for all USA underground and surface coal mining categories:1990-1999*. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety And Health (NIOSH), Pittsburgh Research Laboratory Pittsburgh, USA.

Delibalta, M.S., Gündoğar, M. (2020). Ilgın Linyit İşletmesinde kömürün kendiliğinden yanması ve risk analizi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 1017 – 1025.

Demirbilek, S. (1986). *The development of a spontaneous combustion risk classification system for coal seams* (Unpublished PhD. Thesis). Department of Mining Engineering, University of Nottingham, England.

Didari, V., Kaymakçı, E., Toroğlu, İ. (1993, Mayıs). Kendiliğinden yanmanın araştırılmasında kullanılabilecek bir laboratuvar deney düzeneği. *Türkiye 13. Madencilik Kongresi*, İstanbul.

Doğan, K., Özdeniz, A.H. (2015). Kömür yığınlarında kendiliğinden yanma olayına güneş ışınlarının etkisi, *Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi*, 3(2), 18-24.

Duzy, A.F., Land, G.W. (1985). Hot coal-bulk transport and storage. *Mining Engineering*, 37(2), 139-143.

Ekmekçi, S. (2015). *Amasra A sahasındaki kömür damarlarının kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Elbeyli, İ.Y., Pişkin, S. (2006). Combustion and pyrolysis characteristics of Tunçbilek lignite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 83(3), 721-726.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Erkan, H. (1964). Kömürün depolanması, *Madencilik*, 3, 822-827.
- Eroğlu, N., Gouws, M. J. (1993). Kömürün kendiliğinden yanmasına ait kuramlar, *Madencilik* 2, 14-17.
- Fei, Y., Aziz, A.A., Nasir, S., Jackson, W.R., Marshall, M., Hulston, J., Chaffee, A.L. (2009). The spontaneous combustion behavior of some low rank coals and a range of dried products. *Fuel*, 88(9), 1650–1655.
- Feng, K.K. (1985). Spontaneous combustion of Canadian coals. *CIM Bulletin*, 78(877), 71-75.
- Feng, K.K., Chakravorty, R.N., Cochrane, T.S. (1973). Spontaneous combustion a coal mining hazard. *The Canadian Mining and Metallurgical Journal*, 66, 75-84.
- Garcia, P., Hall, P.J., Mondragon, F. (1999). The use of differential scanning calorimetry to identify coals susceptible to spontaneous combustion. *Thermochimica Acta*, 336, 41-46.
- Gouws, M.J., Wade, L. (1990). Coals liable to self heating. *Colliery Guardian*, 83-84.
- Gürdal, G., Hoşgörmez, H., Özcan, D., Li, X., Liu, H., Song, W. (2015). The properties of Çan Basin coals (Çanakkale—Turkey): Spontaneous combustion and combustion by-products. *International Journal of Coal Geology*, 138, 1–15.
- Humphreys, D.R. (1979). *A study of the propensity of Queensland coals to spontaneous combustion* (Unpublished ME Thesis). The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- IEA/OECD. (1983). Coal Information Report.
- İlica, H.H. (2020). *Soma bölgesi kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlığının araştırılması* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Kütahya.
- İlica, H.H., Ören, Ö., Şensöğüt, C. (2020). Investigation of Soma region coals with respect to spontaneous combustion susceptibility”, *Journal of Scientific Reports-A*, 45, 201-214.
- İnal, S., Aydın, K. (2019). Kömürün kendiliğinden yanması ve etkileyen faktörler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58(2), 145-165.
- Kaymakçı, E. (1998). *Zonguldak havzası kömür damarlarına uygulanabilecek bir kendiliğinden yanmaya doğal yatkınlığı değerlendirme tekniğinin geliştirilmesi* (Yayınlanmış Doktora Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Kaymakçı, E., Didari, V. (1992, Mayıs). Kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığının belirlenmesinde kullanılan indeksler. *Türkiye 8. Kömür Kongresi*, Zonguldak.
- Kemal, M., Arslan, V. (2014). *Kömür teknolojisi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 033, İzmir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Koçak, Ç., Tamzok, N., Yılmaz, S. (2009, Aralık). *Afşin-Elbistan kömür havzasının elektrik üretimi bakımından değerini biliyor muyuz? . TMMOB Türkiye VII. Enerji Sempozyumu*, Ankara.

Kong, B., Li, Z., Yang, Y., Liu, Z., Yan, D., (2017). A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30), 23453-23470.

Kök, M.V. (2005). Temperature-controlled combustion and kinetics of different rank coal samples. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 79(1), 175-180.

Kukul, S. (2019). *Uzunayak göçük bölgesinde kömürün kendiliğinden yanmasının deneysel yöntemle araştırılması* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Kural, O. (Ed.). (1990). *Kömür kimyası ve teknolojisi*. İstanbul: Güney Grafik.

Kural, O. (Ed.). (1991). *Kömür teknolojisi*. İstanbul: Kurtiş Matbaası.

Kural, O. (Ed.). (1998). *Kömür özellikleri, teknolojisi ve çevre ilişkileri*. İstanbul: Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.,

Kuzoluk, E. (2014). *Farklı miktar ve özellikteki kömür yığınlarının kendiliğinden yanma davranışları, önlenmesi ve önceden tespit edilmesine bir örnek; Çayırhan kömür stokları* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Liang, Y., Zhang, J., Ren, T., Wang, Z., Song, S., (2017). Application of ventilation simulation to spontaneous combustion control in underground coal mine: A case study from Bulianta colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 231-242.

Mahidin, U.H., Ishikawa, S. (2002). The evaluation of spontaneous combustion characteristics and properties of raw and upgraded Indian low rank coals. *Coal Preparation*, 22(2), 81-91.

Marinov, S.P., Gonsalvesh, L., Stefanova, M., Yperman, J., Carleer, R., Reggers, G., Yürüm, Y., Groudeva, V., Gadjanov, P. (2010). Combustion behaviour of some biodesulphurized coals assessed by TGA/DTA. *Thermochimica Acta*, 497(1-2), 46-51.

Mohalik, N.K., Lester, E., Lowndes, I.S., Singh, V.K., (2016). Estimation of greenhouse gas emissions from spontaneous combustion/fire of coal in opencast mines-Indian context. *Carbon Management*, 7(5-6), 317-332.

Muduli, L., Jana, P.K., Mishra, D.P., (2018). Wireless sensor network based fire monitoring in underground coal mines: A fuzzy logic approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 435-447.

Nakoman, E. (1998). *Kömür*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nalbandian, H. (2010). *Propensity of coal to self-heat*. International Energy Agency, Clean Coal Centre.
- Nelson, M., Chen, X.D. (2007). Survey of experimental work on the self-heating and spontaneous combustion of coal. Stratcher, G.N. (Ed.), *Geology of coal fires: case studies from around the World*, (31–83). USA: The Geological Society of America Inc.
- Nimaje, D.S., Tripathy, D.P. (2016). Characterization of some Indian coals to assess their liability to spontaneous combustion. *Fuel*, 163, 139–147.
- Nugroho, Y.S., McIntosh, A.C., Gibbs, B.M. (1998). Using the crossing point method to assess the self-heating behavior of Indonesian coals. *The Combustion Institute*, 27(2), 2981–2989.
- Onifade, M., Genc, B. (2019). A review of spontaneous combustion studies – South African context. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(8), 527–547.
- Ökten, G., Yazıcı, S. (1984). Kömür depolanmasında karşılaşılabilecek sorunlar ve alınacak tedbirler. *Madencilik Dergisi*, 23(2), 19-24.
- Ören, Ö. (2006). *Kütahya bölgesi linyitlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Ören, Ö. (2015). *Farklı saklama koşullarında depo edilen kömürlerin kendiliğinden yanma davranışlarının termogravimetrik ve yüzey adsorpsiyon mekanizmaları açısından incelenmesi – Tunçbilek linyitleri örneği* (Yayımlanmamış Doktora Tezi) Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Ören, Ö., Şensöğüt, C. (2010). Spontaneous combustion liability of Kutahya (Turkey) region lignites. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 32(10), 877-885.
- Ören, Ö., Şensöğüt, C. (2018). Determination of safe storage types for coals with regard to their susceptibility to spontaneous combustion – Tunçbilek coals' case. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 38(6), 290-301.
- Ören, Ö., Şensöğüt, C. (2007). Kütahya Bölgesi Linyitlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlıklarının Araştırılması, *Madencilik*, 46(1), 15-23.
- Ören, Ö., Şensöğüt, C. (2016). Kömürlerin kimyasal özelliklerinin kendiliğinden yanma yatkınlığı üzerindeki etkisinin araştırılması, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 69-81.
- Özdeniz, A.H. (2003). *Kömür stoklarındaki kendiliğinden yanma olayının incelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Özşen, H., (2003). *Bazı Türk kömürlerinin termogravimetrik özelliklerinin belirlenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Panigrahi, D.C., Sahu, H.B. (2004). Classification of coal seams with respect to their spontaneous heating susceptibility – a neural network approach. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22, 457-476.
- Panigrahi, D.C., Ray, S.K. (2014). Assessment of self-heating susceptibility of Indian coal seams - A neural network approach. *Archives of Mining Sciences*, 59(4), 1061–1076.
- Pis, J., de la Puente, G., Fuente, E., Morán, A., Rubiera, F. (1996). A study of the self-heating of fresh and oxidized coals by differential thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 279, 93–101.
- Pone, J.D.N., Hein, K.A.A., Stracher, G.B., Annegarn, H.J., Finkleman, R.B., Blake, D.R., McCormack, J.K., Schroeder, P., (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 72(2), 124-140.
- Qi, X., Wang, D., Milke, J.A., Zhong, X., (2011). Crossing point temperature of coal. *Mining Science and Technology*, 21(4), 255 – 260.
- Qi, X., Wang, D., Zhong, X., Gu, J., Xu, T. (2010). Characteristics of oxygen consumption of coal at programmed temperatures. *Mining Science and Technology (China)*, 20(3), 372–377.
- Ramlu, M.A., (Ed.). (1991). *Mine disasters and mine rescue*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Ren, T. X., Edwards, J. S., Clarke, D. (1999). Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion. *Fuel*, 78(14), 1611–1620.
- Sahu, H.B., Padhee, S., Mahapatra, S.S. (2011). Prediction of spontaneous heating susceptibility of Indian coals using fuzzy logic and artificial neural network models. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2271-2282.
- Saraç, S., (1992). Spontaneous combustion tendency of Turkish lignites. *Çukurova Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 22(6), 39 – 43.
- Sarı, A., Arslan, Ç.Ö., (2019). Redoksa duyarlı elementlerin indirgen ortamlardaki jeokimyasal davranışlarına Türkiye’den bir örnek: Bozcahöyük (Seyitömer/Kütahya) sahası bitümlü kayaçlar. *Journal of Engineering and Earth Science*, 4(2), 14-39.
- Sen, R., Srivastava, S.K., Singh, M.M. (2009). Aerial oxidation of coal-analytical methods, instrumental techniques and test methods: A survey. *Indian Journal of Chemical Technology*, 16(2), 103-135.
- Sensogut, C., Cinar, İ., (2000). A research on the tendency of Ermenek district coals to spontaneous combustion. *Mineral Resources Engineering*, 9(4), 421 – 427.
- Shi, T., Wang, X., Deng, J., Wen, Z. (2005). The mechanism at the initial stage of the room-temperature oxidation of coal. *Combustion and Flame*, 140(4), 332–345.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Singh, R.N., Demirbilek, S., Turney, M. (1984, Mayıs). Kömürün kendiliğinden yanma risk indeksinin maden dizaynı, depolama ve deniz nakliyatına uygulanması. *Türkiye 4. Kömür Kongresi*, Zonguldak.
- Singh, R.V. (2013). Spontaneous heating and fire in coal mines. *Procedia Engineering*, 62, 78–90.
- Sondreal, E.A., Ellman, R.C., (1974). *Laboratory determination of factors affecting storage of North Dakota lignite: computer simulation of spontaneous heating*. Bureau of Mines Report, USA.
- Soytürk, T. (1992). *Tunçbilek kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Stach, E., Mackowsky, M.Th., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., Teichmüller, R. (1982). *Stach's textbook of coal petrology*. Stach, E. (Ed.). Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- Şahin, N., Didari, V. (2002). Zonguldak kömürlerinde kendiliğinden yanmanın erken saptanması amacıyla yanma ürünü gazların incelenmesi. *Madencilik*, 41(4), 37–51.
- Şensöğüt, C. (1997). *A general outlook on spontaneous combustion in underground coal mines*. German Academic Exchange Service Report, Germany.
- Şensöğüt, C., (1999). Türk kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlığı – Ilgın linyitleri örneği, *Madencilik*, 38(1), 45-52.
- Şensöğüt, C., Ören, Ö., (2020). Çan linyitlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 593-607.
- Şentorun, Ç., Haykiri-Açma, H., Küçükbayrak, S., (1996). Effect of mineral matter on the combustion curve of chars, *Thermochimica Acta*, 277, 65-73.
- Taraba, B., Michalec, Z., Michalcová, V., Blejchař, T., Bojko, M., Kozubková, M. (2014). CFD simulations of the effect of wind on the spontaneous heating of coal stockpiles. *Fuel*, 118, 107–112.
- Taraba, B., Michalec, Z. (2011). Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area – CFD modelling. *Fuel*, 90(8), 2790–2797.
- Taşkömürü raporu, (2010). Türkiye Maden Mühendisleri Odası (TMMOB), Ankara.
- Uçaku, B., (2000). Orhaneli linyitlerinin enerji alanında kullanılması. *Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni*, 1-2, 32-37.
- Ünver, B. Özözen, A. (1998). Kömür stoklarında meydana gelen kendiliğinden yanma süreci ile ilgili modeller ve alınması gereken tedbirler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 37(3), 29-40.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ünver, B., (1997). Determination of spontaneous combustion risk potential of colliery wastes for the environmental impact assessment, *Mineral Resources Engineering*, 5(3), 229-239.
- Ünver, B., Demirbilek, S., (1994). Kömür karışımli paşaların kendiliğinden yanma riski potansiyelinin analizi. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 38(3), 241-258.
- VanKrevelen, D.W. (Ed.). (1961). *Coal typology-chemistry-physics-constitution*. Netherlands: Elsevier.
- Wachowicz, J., (2008). Analysis of underground fires in Polish hard coal mines. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(3), 332-336.
- Wade, L., (1988). *The propensity of South African coals to spontaneously combust* (Unpublished Ph D.Thesis). University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
- Wang, D., Dou, G., Zhong, X., Xin, H., Qin, B. (2014). An experimental approach to selecting chemical inhibitors to retard the spontaneous combustion of coal. *Fuel*, 117, 218-223.
- Wang, D., Qi, X., Zhong, X. Gu, J. (2009). Test method for the propensity of coal to spontaneous combustion. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 20-26.
- Wang, H., Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M. (2003a). Pathways for production of CO₂ & CO in low-temperature oxidation of coal. *Energy & Fuels*, 17(1), 150–158.
- Wang, H., Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M. (2003b). Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(6), 487–513.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M. (2002). Thermal decomposition of solid oxygenated complexes formed by coal oxidation at low temperatures. *Fuel*, 81(15), 1913-1923.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M. (2003). Analysis of the mechanism of the low-temperature oxidation of coal. *Combustion and Flame*, 134(1–2), 107–117.
- Wang, L., Ren, T., Nie, B., Chen, Y., Lv, C., Tang, H., Zhang, J. (2015a). Development of a spontaneous combustion TARPs system based on BP neural network. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(5), 803–810.
- Wang, Y., Shi, G., Guo, Z. (2015b). Coupled multi-stage oxidation and thermodynamic process in coal-bearing strata under spontaneous combustion condition. International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, Rutgers University, Piscataway, NJ, USA.
- Xia, T., Zhou, F., Wang, X., Zhang, Y., Li, Y., Kang, J., Liu, J. (2016). Controlling factors of symbiotic disaster between coal gas and spontaneous combustion in longwall mining gobs. *Fuel*, 182, 886-896.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Xu, Y., Wang, D., Wang, L., Zhong, X., Chu, T. (2012). Experimental research on inhibition performances of the sand-suspended colloid for coal spontaneous combustion. *Safety Science*, 50(4), 822-827.

Yıldırım, O.S., Şensöğüt, C., Gökay, M.K. (2006). Effects of electrical resistance on the spontaneous combustion tendency of coal and interaction matrix concept. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 13(1), 1-6.

Yıldırım, Ö.S. (2002). *Kömürde kendiliğinden yanmaya yatkınlığın, elektriksel, renksel ve termogravimetrik açıdan modellenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Yılmaz, A.O., Atalay, T. (1990, Mayıs). TTK Armutçuk Müessesesinde kendiliğinden yanma olayının araştırılması. *Türkiye 7. Kömür Kongresi*, Zonguldak.

Zubíček, V. Adamus, A. (2013). Susceptibility of coal to spontaneous combustion verified by modified adiabatic method under conditions of Ostrava-Karvina coalfield, Czech Republic. *Fuel Processing Technology*, 113, 63-66.

Zubíček, V. (2008). Assessment of susceptibility of coal to spontaneous combustion in OKR. *Geoscience Engineering*, 4, 1-9.

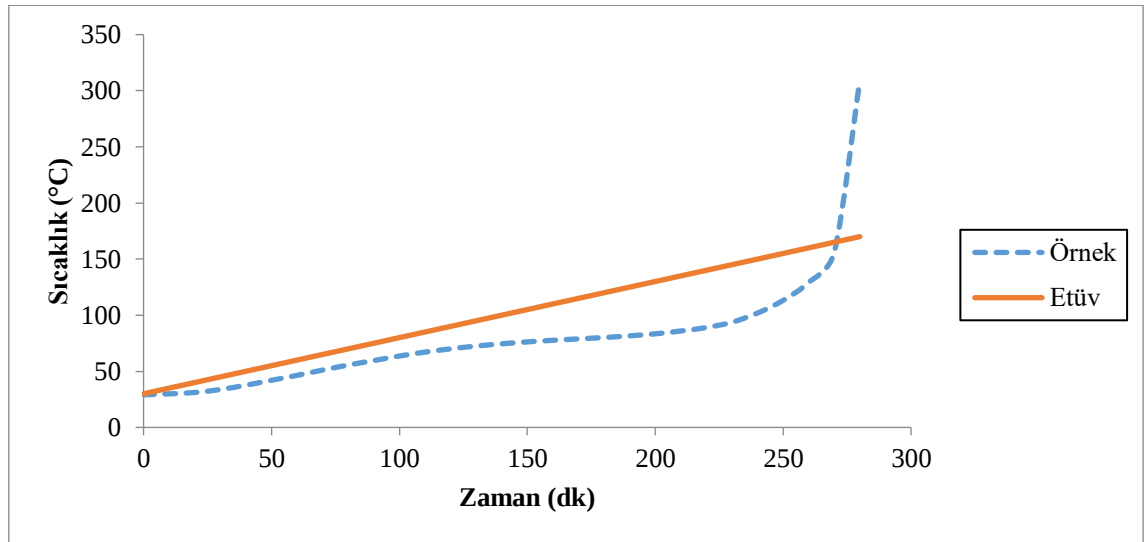
EKLER

Ek-1. Kütahya Seyitömer Linyit İşletmesi Panosuna Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

Ek-1.1. SLİ S-49 panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.1	150	105	76.2
10	35	29.9	160	110	77.6
20	40	31.1	170	115	78.9
30	45	33.8	180	120	80.1
40	50	37.6	190	125	81.6
50	55	42	200	130	83.4
60	60	46.4	210	135	85.9
70	65	51.1	220	140	89
80	70	55.6	230	145	93.7
90	75	59.6	240	150	101.9
100	80	63.6	250	155	113.2
110	85	67.1	260	160	129.2
120	90	70	270	165	156
130	95	72.5	280	170	310
140	100	74.5			

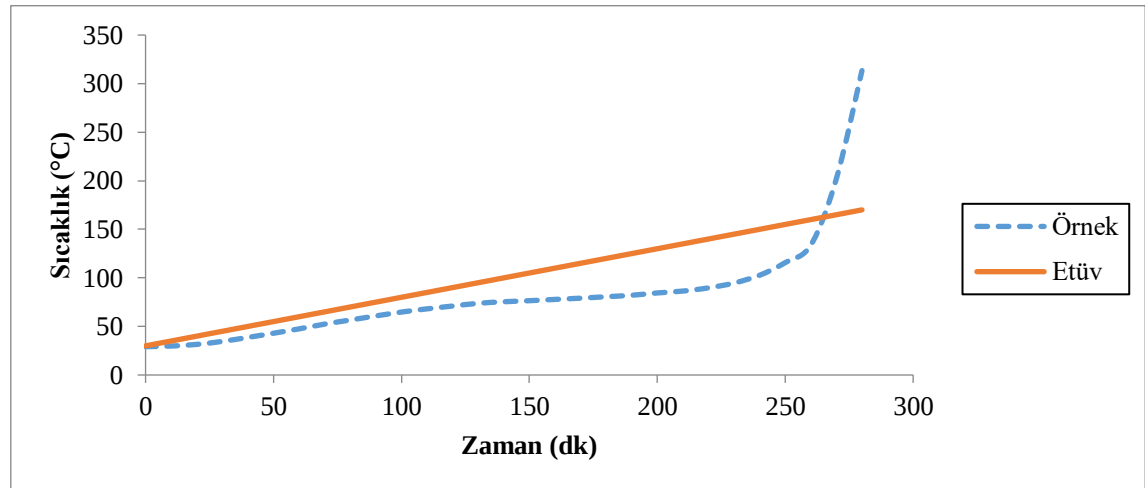
OSA	3.928571429 °C/dk
CPT	166 °C
I(FCC)	23.66609294 1/dk



Şekil 1.1. SLİ S-49 (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek-1.2. SLİ S-49 panosu (2) no'lu deneye ait analiz sonuçları

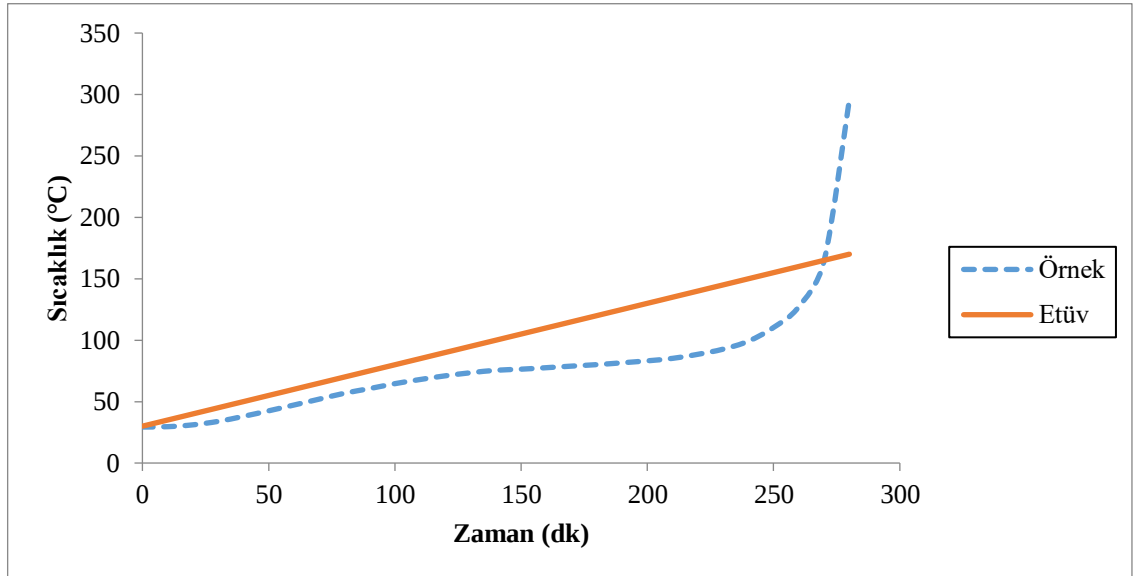
Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.2	150	105	76.5
10	35	29.8	160	110	77.8
20	40	31.5	170	115	79.1
30	45	34.6	180	120	80.6
40	50	38.7	190	125	82.1
50	55	43	200	130	84.5
60	60	47.5	210	135	86.4
70	65	52.4	220	140	89.7
80	70	56.6	230	145	94.7
90	75	60.8	240	150	102.7
100	80	64.8	250	155	115.7
110	85	68.1	260	160	133.7
120	90	71	270	165	202.1
130	95	73.8	280	170	313.4
140	100	75.4			
OSA		4.230769231 °C/dk			
CPT		164 °C			
I(FCC)		25.79737336 1/dk			



Şekil 1.2. SLİ S-49 (2) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek-1.3. SLİ S-49 panosu (3) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.3	150	105	76.4
10	35	29.6	160	110	77.6
20	40	31.1	170	115	78.9
30	45	33.9	180	120	80.1
40	50	38	190	125	81.6
50	55	42.5	200	130	83.2
60	60	47.2	210	135	85.2
70	65	52	220	140	88.5
80	70	56.8	230	145	92.7
90	75	60.6	240	150	99.2
100	80	64.6	250	155	110.4
110	85	68	260	160	127.3
120	90	71	270	165	164.7
130	95	73.5	280	170	296
140	100	75.5			
OSA		5.5 °C/dk			
CPT		165 °C			
I(FCC)		33.33333333 1/dk			

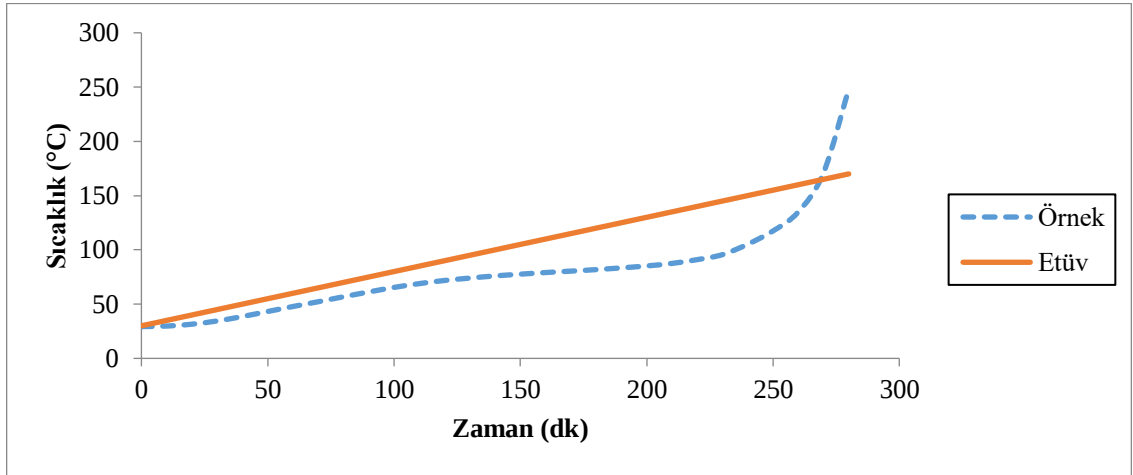


Şekil 1.3. SLİ S-49 (3) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek-1.4. SLİ S-49 panosu (4) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.3	150	105	77.6
10	35	29.8	160	110	79.1
20	40	31.5	170	115	80.4
30	45	34.5	180	120	81.8
40	50	38.6	190	125	83.4
50	55	43.2	200	130	85.2
60	60	47.8	210	135	87.5
70	65	52.2	220	140	91
80	70	56.8	230	145	95.6
90	75	61.2	240	150	105.2
100	80	65.4	250	155	117.4
110	85	68.9	260	160	134.9
120	90	71.8	270	165	170.9
130	95	74	280	170	248.5
140	100	76			

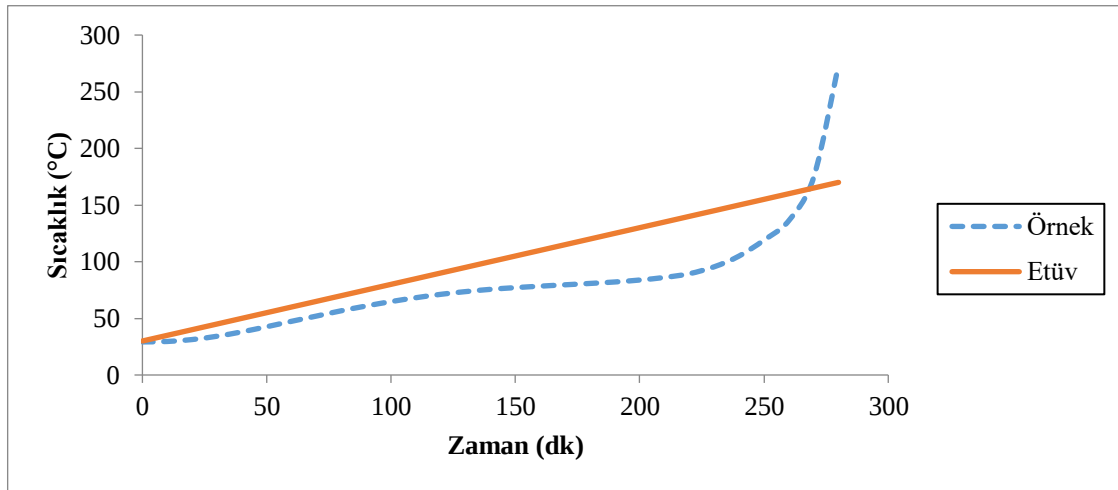
OSA	3.235294118 °C/dk
CPT	164 °C
I(FCC)	19.72740316 1/dk



Şekil 1.4. SLİ S-49 (4) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 1.5. SLİ S-49 panosu (5) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.2	150	105	77.1
10	35	29.6	160	110	78.4
20	40	31.3	170	115	79.6
30	45	34.2	180	120	80.8
40	50	38.1	190	125	82.1
50	55	42.6	200	130	83.8
60	60	47.4	210	135	86.1
70	65	52	220	140	89.4
80	70	56.7	230	145	95.5
90	75	60.9	240	150	105
100	80	64.8	250	155	119
110	85	68.2	260	160	136.2
120	90	71.2	270	165	174.4
130	95	73.6	280	170	273.9
140	100	75.6			
OSA		3.793103448 °C/dk			
CPT		164 °C			
I(FCC)		23.12867956 1/dk			



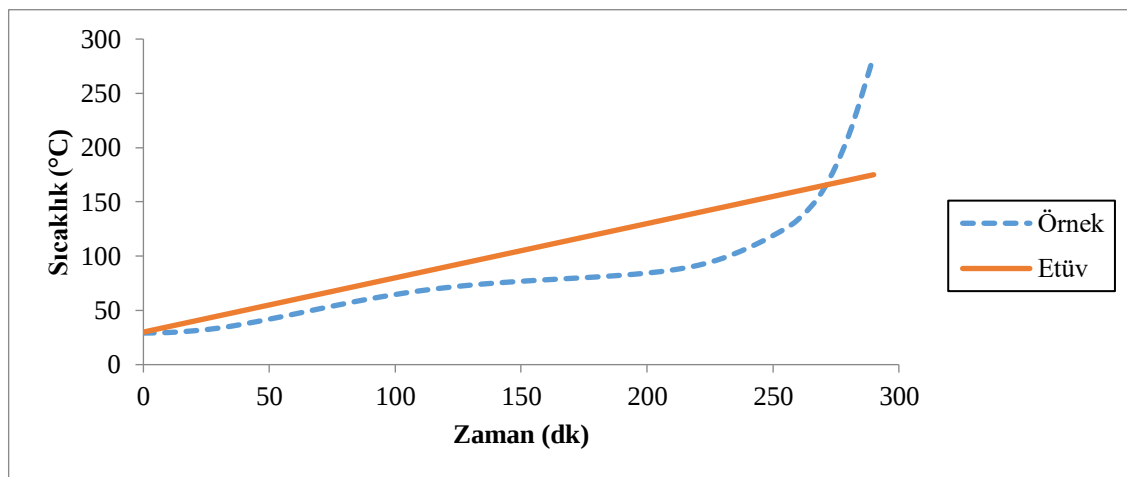
Şekil 1.5. SLİ S-49 (5) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 2. Kütahya Seyitömer Linyit İşletmesi Panosuna Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

Ek- 2.1. SLİ-Höyük panosu (1) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.1	150	105	76.8
10	35	29.6	160	110	78.2
20	40	31.2	170	115	79.5
30	45	33.7	180	120	80.8
40	50	37.5	190	125	82.4
50	55	41.9	200	130	84.4
60	60	46.6	210	135	87.2
70	65	51.5	220	140	91.4
80	70	56.2	230	145	98
90	75	60.7	240	150	107.4
100	80	64.6	250	155	118.9
110	85	68.1	260	160	133.8
120	90	70.9	270	165	161.2
130	95	73.3	280	170	210.8
140	100	75.2	290	175	284.4

OSA	2.894736842 °C/dk
CPT	166 °C
I(FCC)	17.43817375 1/dk

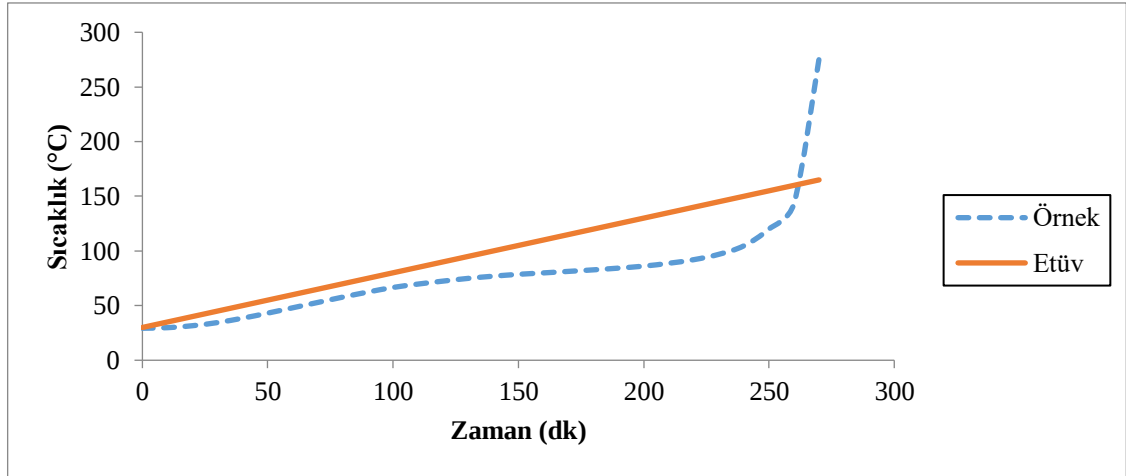


Şekil 2.1. SLİ-Höyük (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 2.2. SLİ-Höyük panosu (2) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.3	150	105	78.6
10	35	29.8	160	110	79.9
20	40	31.6	170	115	81.3
30	45	34.5	180	120	82.7
40	50	38.5	190	125	84.3
50	55	43.1	200	130	86.1
60	60	48	210	135	88.7
70	65	52.9	220	140	92
80	70	57.8	230	145	96.9
90	75	62.4	240	150	104.7
100	80	66.6	250	155	120
110	85	69.7	260	160	143.5
120	90	72.4	270	165	276
130	95	74.9			
140	100	76.9			

OSA	4.583333333 °C/dk
CPT	162 °C
I(FCC)	28.29218107 1/dk

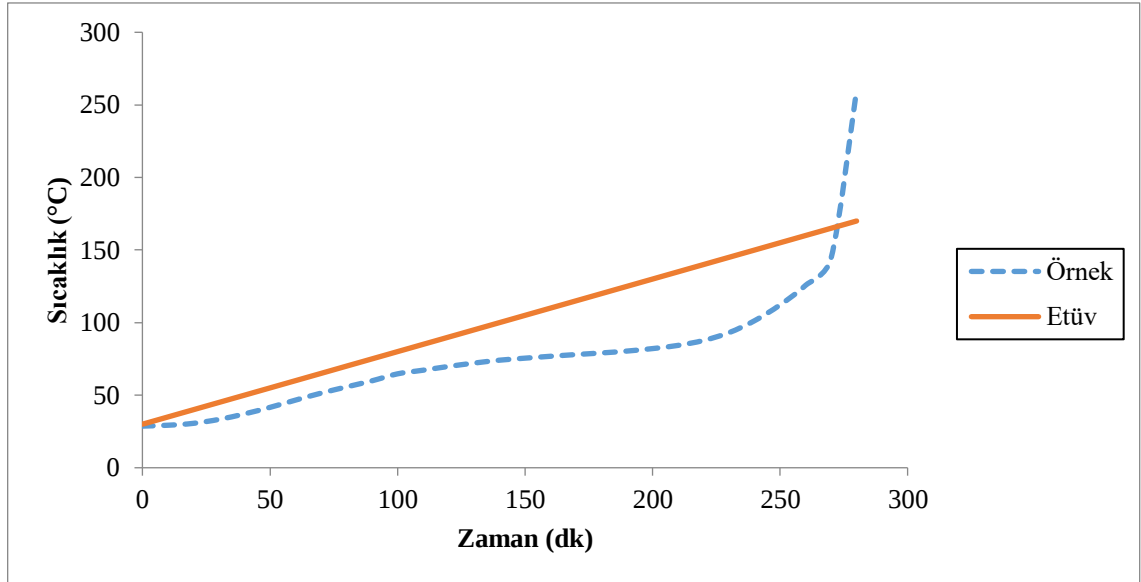


Şekil 2.2. SLİ-Höyük (2) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 2.3. SLİ-Höyük panosu (3) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	28.7	150	105	75.5
10	35	29.3	160	110	76.8
20	40	30.6	170	115	78
30	45	33.3	180	120	79.1
40	50	37.1	190	125	80.4
50	55	41.6	200	130	82.1
60	60	46.6	210	135	84.3
70	65	51.4	220	140	87.7
80	70	55.7	230	145	93.1
90	75	59.9	240	150	101.3
100	80	64.7	250	155	112.2
110	85	67.2	260	160	125.7
120	90	69.8	270	165	144.4
130	95	72.1	280	170	260.3
140	100	74.1			

OSA	3.666666667 °C/dk
CPT	167 °C
I(FCC)	21.95608782 1/dk

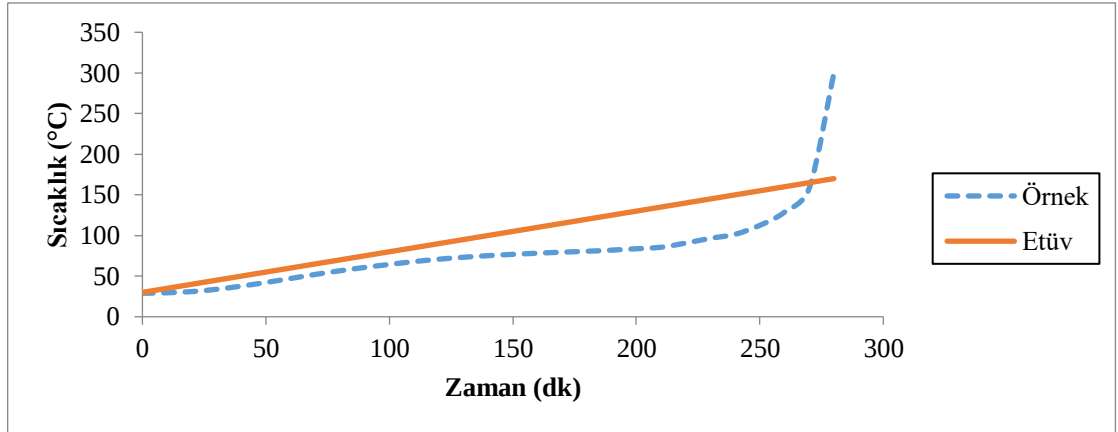


Şekil 2.3. SLİ-Höyük (3) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 2.4. SLİ-Höyük panosu (4) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29	150	105	76.8
10	35	29.5	160	110	78.2
20	40	31	170	115	79.5
30	45	33.8	180	120	80.6
40	50	37.7	190	125	82
50	55	42.2	200	130	83.7
60	60	47.1	210	135	85.5
70	65	52.1	220	140	90.7
80	70	56.6	230	145	96.5
90	75	60.7	240	150	101.5
100	80	64.4	250	155	112.5
110	85	67.9	260	160	128.7
120	90	70.8	270	165	158.1
130	95	73.2	280	170	300.4
140	100	75.2			

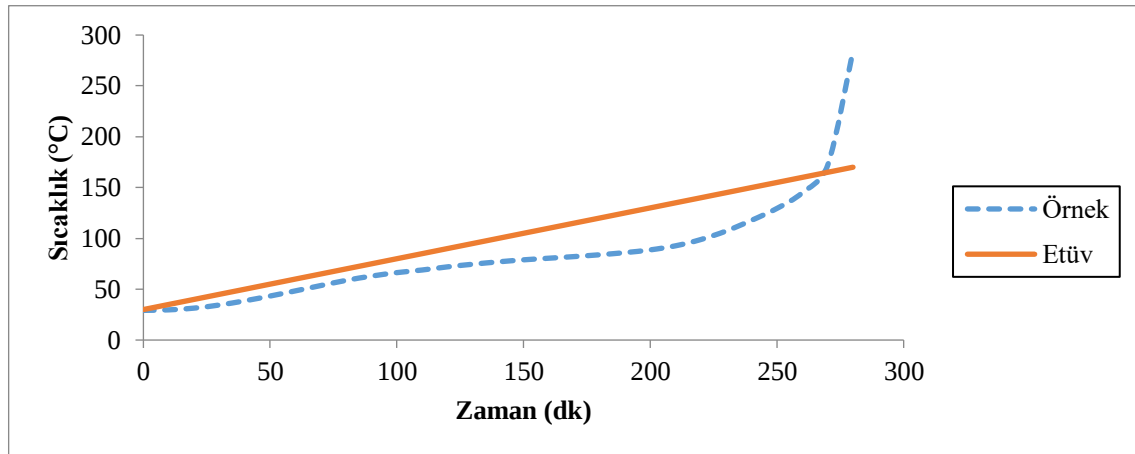
OSA	4.230769231 °C/dk
CPT	165 °C
I(FCC)	25.64102564 1/dk



Şekil 2.4. SLİ-Höyük (4) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 2.5. SLİ-Höyük panosu (5) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.2	150	105	78.9
10	35	29.7	160	110	80.5
20	40	31.4	170	115	82.1
30	45	34.5	180	120	83.9
40	50	38.6	190	125	86
50	55	43.3	200	130	88.7
60	60	48.4	210	135	92.7
70	65	53.6	220	140	98.9
80	70	58.7	230	145	107.3
90	75	62.9	240	150	117.8
100	80	66.3	250	155	129.5
110	85	68.9	260	160	144.9
120	90	72	270	165	171.8
130	95	74.6	280	170	284.5
140	100	76.9			
OSA		2.682926829 °C/dk			
CPT		164 °C			
I(FCC)		16.35930993 1/dk			



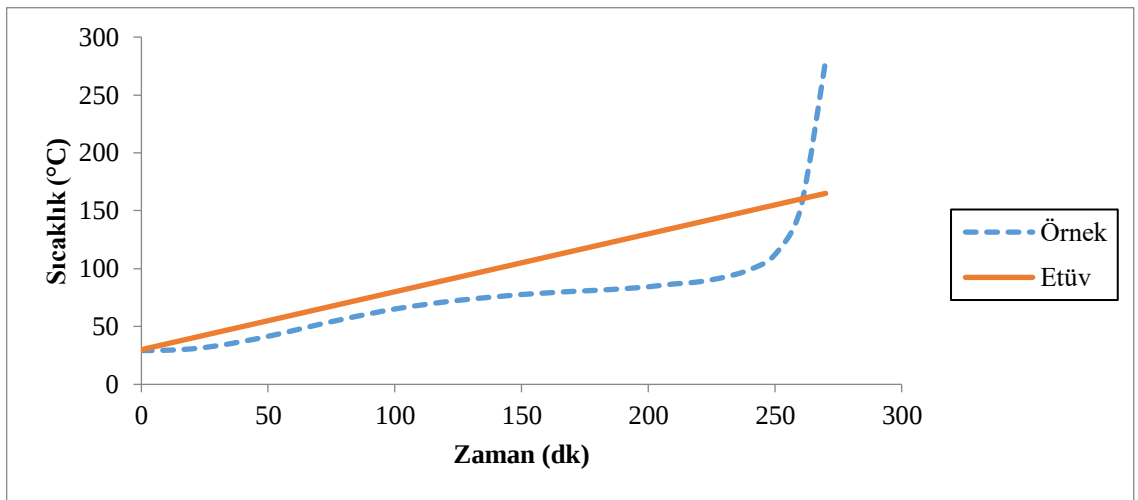
Şekil 2.5. SLİ-Höyük (5) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 3. Bursa Linyit İşletmesi A Panosuna Ait Deneyleri Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği

Ek- 3.1. BLİ A panosu (1) no’lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.2	150	105	77.6
10	35	29.5	160	110	79
20	40	30.7	170	115	80.3
30	45	33.4	180	120	81.3
40	50	37.1	190	125	82.6
50	55	41.5	200	130	84.3
60	60	46.5	210	135	86.7
70	65	51.7	220	140	88.6
80	70	56.5	230	145	92.6
90	75	61	240	150	99.1
100	80	65.1	250	155	112.1
110	85	68.4	260	160	151.1
120	90	71.3	270	165	280.1
130	95	73.7			
140	100	75.7			

OSA	7.333333333 °C/dk
CPT	160 °C
I(FCC)	45.83333333 1/dk

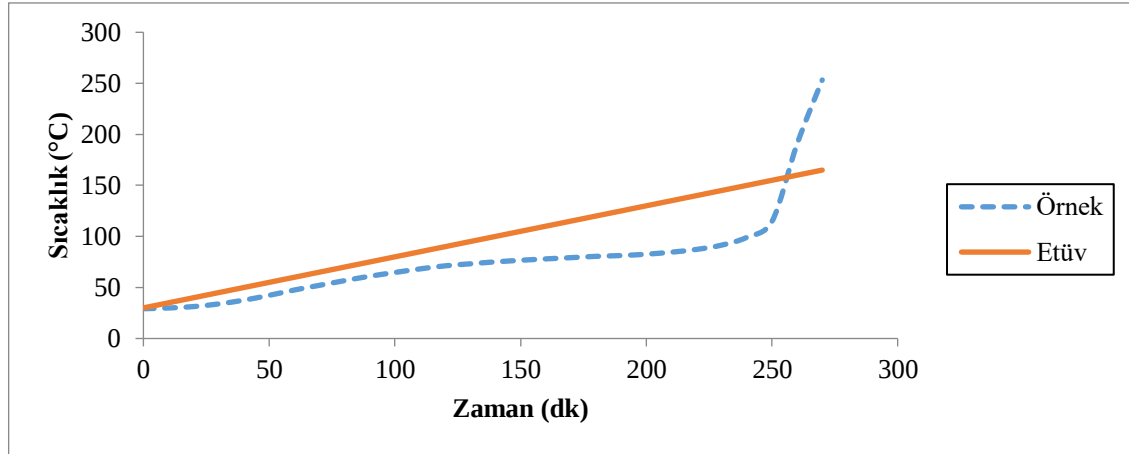


Şekil 3.1. BLİ- A (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 3.2. BLİ A panosu (2) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.2	150	105	76.6
10	35	29.9	160	110	78
20	40	31.3	170	115	79.2
30	45	33.9	180	120	80.5
40	50	37.6	190	125	81.3
50	55	42.3	200	130	82.6
60	60	47.5	210	135	84.6
70	65	52.1	220	140	87.3
80	70	56.7	230	145	91.5
90	75	61	240	150	99.1
100	80	64.7	250	155	114.6
110	85	68.2	260	160	190.6
120	90	71.2	270	165	253.3
130	95	73.2			
140	100	75.1			

OSA	7.333333333 °C/dk
CPT	159 °C
I(FCC)	46.12159329 1/dk

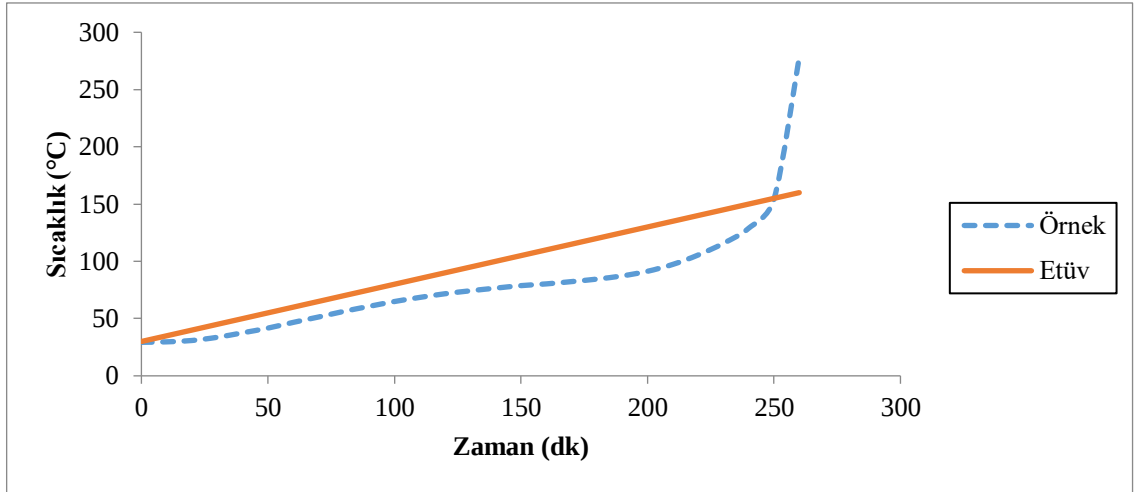


Şekil 3.2. BLİ- A (2) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek-3.3. BLİ A panosu (3) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.3	150	105	78.8
10	35	29.7	160	110	80.3
20	40	30.9	170	115	82.3
30	45	33.7	180	120	84.5
40	50	37.6	190	125	87.3
50	55	41.7	200	130	91.3
60	60	46.7	210	135	97.3
70	65	51.4	220	140	105.5
80	70	56.3	230	145	115.7
90	75	60.7	240	150	128.9
100	80	64.9	250	155	154.2
110	85	68.5	260	160	278.4
120	90	71.7			
130	95	74.3			
140	100	76.6			

OSA	3.793103448 °C/dk
CPT	155 °C
I(FCC)	24.47163515 1/dk

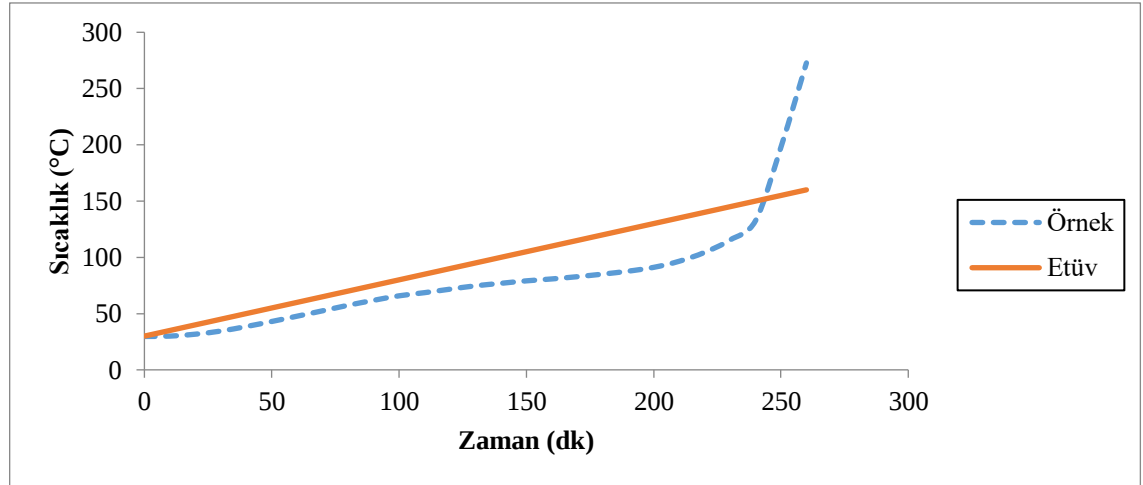


Şekil 3.3. BLİ- A (3) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek-3.4. BLİ A panosu (4) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.7	150	105	79.1
10	35	30	160	110	80.8
20	40	31.7	170	115	82.8
30	45	34.5	180	120	85.1
40	50	38.5	190	125	87.7
50	55	43	200	130	91.1
60	60	47.7	210	135	96.5
70	65	52.5	220	140	104.4
80	70	57.4	230	145	115.4
90	75	61.8	240	150	132.5
100	80	65.8	250	155	198
110	85	68.6	260	160	272.8
120	90	71.7			
130	95	74.7			
140	100	76.9			

OSA	4.230769231 °C/dk
CPT	154 °C
I(FCC)	27.47252747 1/dk

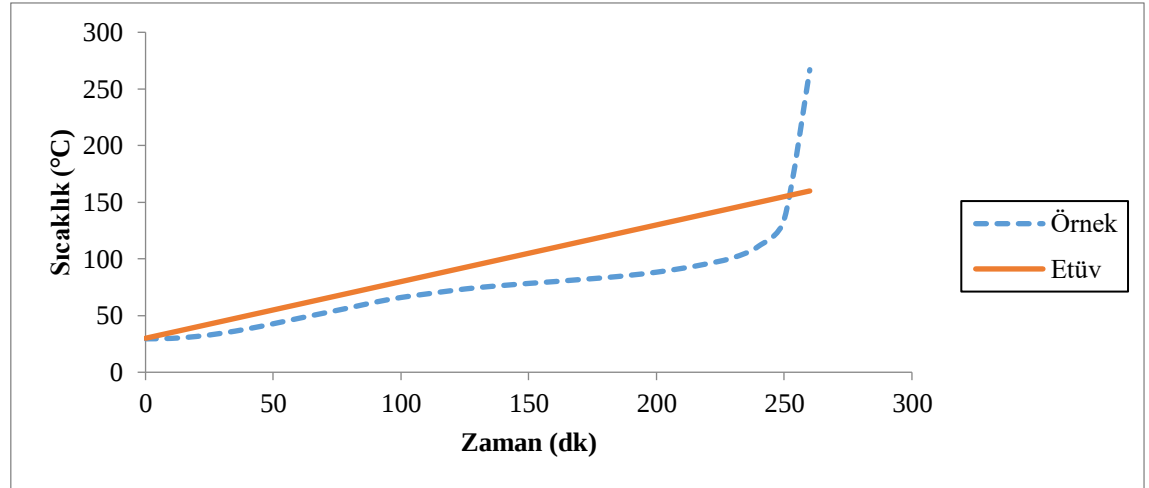


Şekil 3.4. BLİ- A (4) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek-3.5. BLİ A panosu (5) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.5	150	105	78.4
10	35	29.9	160	110	80
20	40	31.6	170	115	81.8
30	45	34.5	180	120	83.5
40	50	38.3	190	125	85.7
50	55	42.8	200	130	88.3
60	60	47.6	210	135	91.7
70	65	52.3	220	140	95.8
80	70	57	230	145	101.1
90	75	61.9	240	150	111.3
100	80	66	250	155	134.9
110	85	69.1	260	160	267
120	90	72.1			
130	95	74.7			
140	100	76.6			

OSA	6.470588235 °C/dk
CPT	157 °C
I(FCC)	41.2139378 1/dk



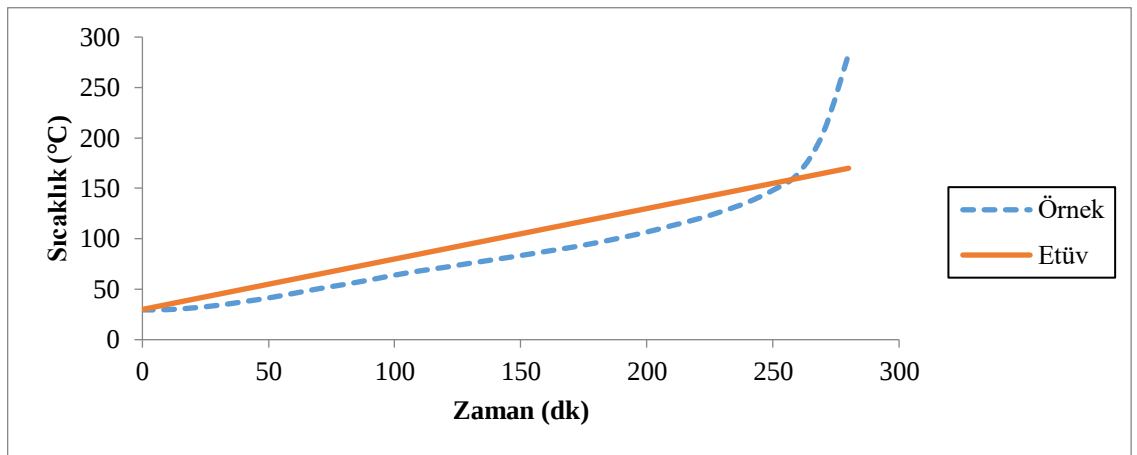
Şekil 3.5. BLİ- A (5) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

**Ek- 4. Afşin Elbistan Açık Ocak Linyit İşletmesi Damar 63 No’lu Ait Deneyleri
Sonuçlarının Analizleri ve Zaman – Sıcaklık Grafiği**

Ek- 4.1. Afşin Elbistan 63 pano (1) no’lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.5	150	105	83.4
10	35	29.8	160	110	87.5
20	40	31.5	170	115	91.5
30	45	34.1	180	120	96.1
40	50	37.6	190	125	101.2
50	55	41.4	200	130	106.7
60	60	45.9	210	135	113.1
70	65	50.6	220	140	119.6
80	70	54.7	230	145	127.3
90	75	59.2	240	150	136.3
100	80	64	250	155	148.2
110	85	68.2	260	160	164.7
120	90	71.8	270	165	205.5
130	95	75.8	280	170	283.3
140	100	79.6			

OSA	1.641791045 °C/dk
CPT	158 °C
I(FCC)	10.39108256 1/dk

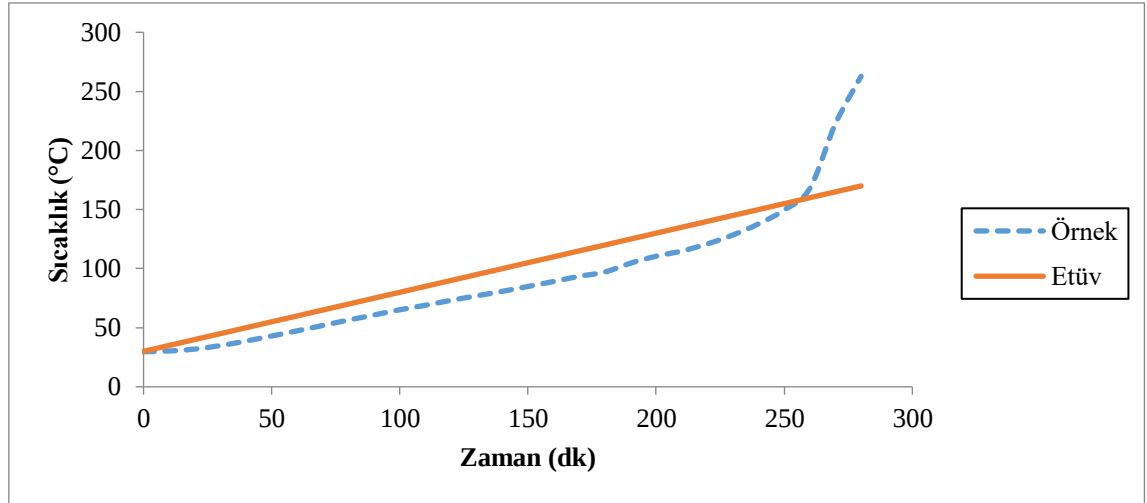


Şekil 4.1. Afşin Elbistan 63 (1) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 4.2. Afşin Elbistan 63 pano (2) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.7	150	105	84.9
10	35	30.3	160	110	89.1
20	40	31.9	170	115	93.5
30	45	34.9	180	120	97.1
40	50	38.7	190	125	104.6
50	55	43	200	130	110.5
60	60	47.4	210	135	114.9
70	65	51.9	220	140	120.9
80	70	56.5	230	145	128.5
90	75	60.8	240	150	137.9
100	80	65.2	250	155	149.6
110	85	69	260	160	167.9
120	90	73.2	270	165	222.6
130	95	77	280	170	262.8
140	100	80.8			

OSA	1.571428571 °C/dk
CPT	157 °C
I(FCC)	10.00909918 1/dk

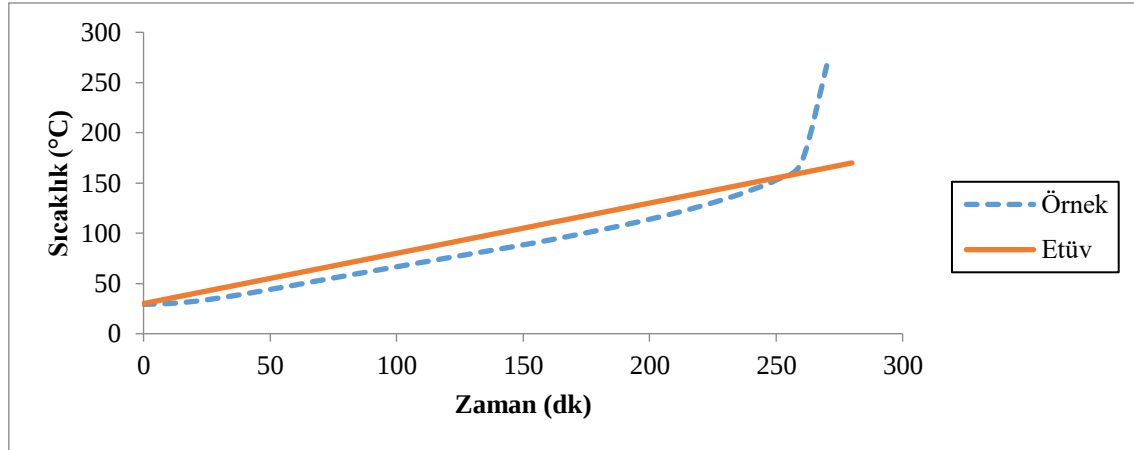


Şekil 4.2. Afşin Elbistan 63 (2) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 4.3. Afşin Elbistan 63 pano (3) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.3	150	105	88.4
10	35	30	160	110	93
20	40	32.2	170	115	97.9
30	45	35.6	180	120	103
40	50	39.6	190	125	108.2
50	55	44	200	130	113.9
60	60	48.5	210	135	120
70	65	53.2	220	140	126.8
80	70	57.7	230	145	134.2
90	75	62.2	240	150	142.8
100	80	66.6	250	155	153
110	85	71	260	160	170.2
120	90	75.4	270	165	266.8
130	95	79.7			
140	100	84			

OSA	1.549295775 °C/dk
CPT	156 °C
I(FCC)	9.931383171 1/dk

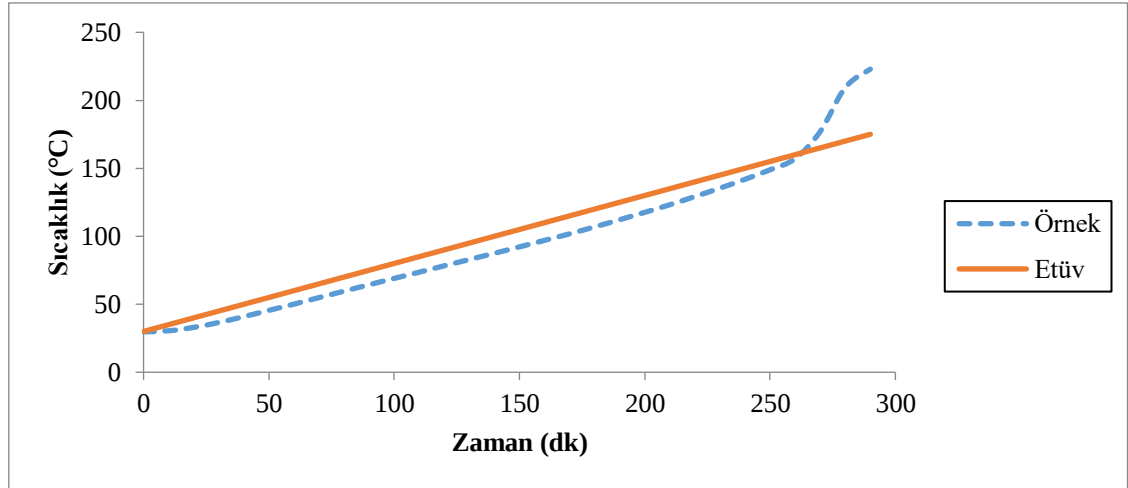


Şekil 4.3. Afşin Elbistan 63 (3) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 4.4. Afşin Elbistan 63 pano (4) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.7	150	105	92.2
10	35	30.5	160	110	97
20	40	33	170	115	101.8
30	45	36.6	180	120	106.9
40	50	40.9	190	125	112.2
50	55	45.5	200	130	117.6
60	60	50.1	210	135	123.2
70	65	54.9	220	140	129.2
80	70	59.6	230	145	135.4
90	75	64.4	240	150	141.9
100	80	69	250	155	148.9
110	85	73.6	260	160	157.1
120	90	78.3	270	165	177
130	95	82.9	280	170	209.4
140	100	87.5	290	175	222.9

OSA	1.067961165 °C/dk
CPT	161 °C
I(FCC)	6.633299162 1/dk

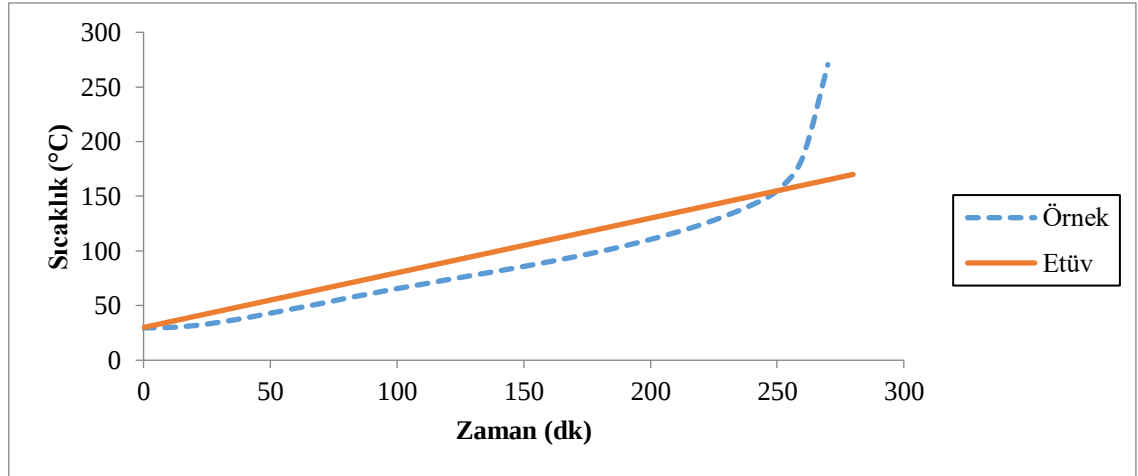


Şekil 4.4. Afşin Elbistan 63 (4) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

Ek- 4.5. Afşin Elbistan 63 pano (5) no'lu deneye ait analiz sonuçları

Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)	Süre (dk)	Etüv (°C)	Örnek (°C)
0	30	29.6	150	105	85.8
10	35	30	160	110	90.1
20	40	31.7	170	115	94.6
30	45	34.8	180	120	99.4
40	50	38.6	190	125	104.7
50	55	43	200	130	110.5
60	60	47.5	210	135	116.9
70	65	51.9	220	140	124
80	70	56.7	230	145	132.4
90	75	61.1	240	150	142
100	80	65.5	250	155	155.3
110	85	69.5	260	160	185
120	90	73.7	270	165	270.4
130	95	77.7			
140	100	81.7			

OSA	2.037037037 °C/dk
CPT	155 °C
I(FCC)	11.26472094 1/dk



Şekil 4.5. Afşin Elbistan 63 (5) numunesine ait zaman – sıcaklık eğrisi.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgileri:

SOYAD, AD:

ALMUSLEHİ, ABBAS

Eğitim:

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	2021-2022
Lisans	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	2018
Lise	Almutanabı Fen Erkek Lisesi	2009

İŞ DENEYİMİ

Yok

YABANCI DİL

Türkçe - ileri

İngilizce – orta