



Derleme / Review

KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI VE ETKİLEYEN FAKTÖRLER

SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL AND EFFECTING FACTORS

Serkan İnal^{a,*}, Kerim Aydın^{a,**}

^a Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği, Trabzon, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 16 Temmuz / July 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 01 Nisan / April 2019

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Kömürün kendiliğinden yanması,
 Kömürün oksidasyonu,
 Kömür stokları,
 Kömür-Oksijen birleşimi kuramı,
 Kömür madeni güvenliği.

Kömür yapısı gereği oksijeni adsorplamaya ve oksidasyona yatkındır. Kömürün kendiliğinden yanması oldukça karmaşık ve hala tam olarak açıklanamamış bir mekanizmaya sahipse de günümüzde en yaygın kabul gören kuram kömür oksijen birleşimi kuramıdır. Bu kurama göre kömürün kendiliğinden yanması yavaş oksidasyon, hızlanan oksidasyon ve hızlı oksidasyon aşamalarından oluşmaktadır. Süreç içerisinde oksijenin fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonu ile serbest radikallerin reaksiyonları sırasıyla dominant etkiye sahiptirler. Kömürün ve/veya kömür atıklarının bulunduğu her yerde kendiliğinden yanma herhangi bir dış müdahale olmaksızın meydana gelebilmektedir. Kendiliğinden yanmayı etkileyen parametreler açısından genellemeler sakıncalı olup, bazı yerleşmiş bilgilerin hatalı olabileceği günümüzde ortaya konmuştur. Örneğin; kömürün kendiliğinden yanması sanıldığı üzere sadece rankı düşük kömürlerde gerçekleşmez, yüksek pirit içerikli kömürlerin kendiliğinden yanma eğilimi düşük çıkabilir ya da eğilimi düşük olan ve risk teşkil etmediği düşünülen kömürlerde yıllar sonra kendiliğinden yanma görülebilmektedir. Bu sebeple kömürlerin kendiliğinden yanma eğilimleri belirlenmeli, üretim, stoklama ve nakliye gibi tüm aşamalar detaylı şekilde planlanmalı ve sürekli takip ile kontrol yapılarak acil müdahale planları da hazırlanmalıdır.

ABSTRACT

Keywords:

Spontaneous combustion of coal,
 Oxidation of coal,
 Coal stockpiles,
 Coal-Oxygen complex theory,
 Coal mine safety.

Coal tends to adsorb oxygen and oxidize due to its structure. Spontaneous combustion mechanism of coal is very complicated, and still this mechanism is not completely understood. However, coal-oxygen compound theory is widely accepted by researchers nowadays. According to this theory, spontaneous combustion consists of slow oxidation, accelerating oxidation and rapid oxidation stages. In these stages, the physical oxygen adsorption, chemical oxygen adsorption and free radicals reactions are the dominant mechanisms, respectively. Spontaneous combustion of coal can occur without any external impact anywhere coal and / or coal wastes exist. Nowadays, it revealed that some common thoughts about the effecting parameters on spontaneous combustion of coal are wrong. For example; spontaneous combustion of coal does not occur only in low rank coals, and high pyrite content coals may have low spontaneous combustion tendency or coal mines which were determined as not risky can unexpectedly combust. Therefore, spontaneous combustion tendencies of coals must be determined; all stages such as mining, stockpile design and transportation must be planned in detail; continuous monitoring and emergency response plans must be arranged in case a spontaneous combustion.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: serkan.inal@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5960-013X>

** aydiner@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-4942-3085>

GİRİŞ

İlk kullanımı oldukça eskilere dayanan (yaklaşık 3000 yıl) kömür, sanayi devrimi ile birlikte önemini arttıran, Dünya genelinde rezervlerinin nispeten düzenli dağılımından dolayı stratejik olarak önemli bir enerji kaynağıdır (Ersoy, 2010). Bununla birlikte çevre kaygıları kömürün yerini alternatif enerji kaynaklarına bırakacağı düşüncesini oluştursa da enerji öngörülerine gelecek 35 sene içerisinde kömür kullanımının yataya yakın bir eğilim göstererek 2020 yılında pik yapacağını ortaya koymaktadır (EIA, 2017; BP, 2017). Bu sebeple kömürün kendiliğinden yanması geçmişte ve günümüzde olduğu gibi gelecekte de önemli bir problem olmaya devam edecektir. Kömürün kendiliğinden yanması; kömür stoklarında (Beamish vd., 2002), yeraltında, açık ocaklarda, kömürün nakliyesi sırasında gemilerde (Singh vd., 1984), terkedilmiş madenlerde, madenlerin atık toplama alanlarında (Dias vd., 2014), enerji santrallerinin stok sahalarında ve bunkerlerde (Beamish vd., 2002), kömür zenginleştirme tesislerinin atıklarında ve hatta apartman dairelerinde bile gerçekleşebilen (Ören ve Şensöğüt, 2007), üretim, makine ve donanım kayıplarının yaşanmasına (Singh, 2013), çevresel kirliliklerin ve ciddi gaz salınımının ortaya çıkmasına sebep olan (O'Keefe vd., 2010) ve en önemlisi ciddi yaralanma ve ölümlere neden olabilen bir durumdur (Qi vd., 2014a). Ayrıca kömürün kendiliğinden ısınması kömür yangınlarının da önemli bir sebebidir (Kuenzer ve Stracher, 2012). Öyle ki madencilik yapılmayan bölgelerde (Dias vd., 2014) ve hatta henüz kömürün kullanımının olmadığı dönemlerde dahi bu tip yangınlara rastlanabilmektedir (Heffern ve Coates, 2004; Novikova vd., 2016). Kömür yangınları ise, ortaya çıkan kalıcı organik birleşikler ve zararlı elementler ile ciddi gaz salınımları sebebiyle insan sağlığı için önemli bir problem oluşturmaktadır (Discover, 1999; Querol vd., 2011; Ciesielczuk vd., 2014; Oliveira vd., 2018), asit yağmurlarına, jeomekanik değişikliklere (Stracher ve Taylor, 2004; Cheng vd., 2015), yerleşim bölgelerini etkileyerek ciddi göçlere, kayda değer masraflara, doğal yaşamın tahribine, hava kirliliğinin artmasına sebebiyet vermektedir (Stracher ve Taylor, 2004). 2012 yılı verilerine göre Dünya'da 6,5 milyon insanın hava kirliliğine bağlı sebeplerle (toplam ölümlerin %11,6'sı) yaşamını kaybettiği düşünülmektedir

(WHO, 2017). Bununla birlikte özellikle çocuk ölümleri ile uzun süreli sağlık problemleri de hava kirliliği ve 2,5 mikron altı havada asılı partiküllerle (P.M. 2,5) ilişkilendirilmektedir (Jiang vd., 2015; Malley vd., 2017). Bu bilgilerin de ışığında kömür yangınlarının net bir tespit yapılamasa da insan yaşamı ve sağlığı üzerine tahmin edilenden daha fazla olumsuz etkisi olduğu söylenebilir. Bu derlemede kömürün kendiliğinden yanma mekanizması ve kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörler değerlendirilerek güncel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş böylelikle de bu olayın önüne geçilebilmesi için uygun değerlendirmelerin yapılabilmesine fayda sağlanması amaçlanmıştır.

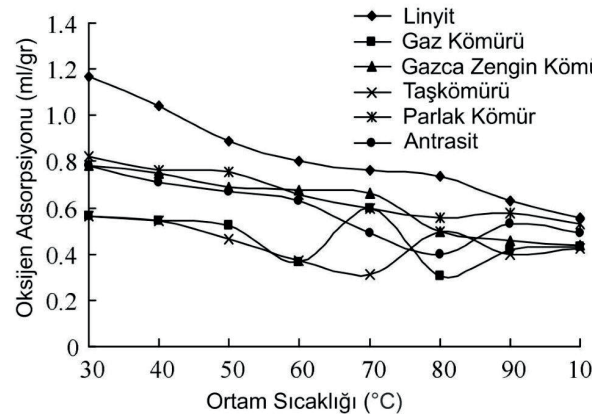
1. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMA MEKANİZMASI

Kömürün kendiliğinden yanması ilk olarak 1604 yılında tespit edilmiş olup, 1686 yılında irdelenmeye başlansa da, meydana gelen reaksiyonların karmaşık yapısından dolayı halen tam olarak aydınlatılamamış bir mekanizmadır. Bununla birlikte, bir noktadan sonra geri döndürülemez oluşu, ısıl sürüklenmenin oluşumu (oksidasyon - ısı artışı - reaksiyon hızı artışı şeklinde devam etmesi) ve gerek yer üstü gerekse de yeraltında tam anlamıyla tespitinin oldukça zor olması gibi sebepler kömürün kendiliğinden yanmasının önemli ve güncelliğini kaybetmeyen bir konu olarak kalmasını sağlamaktadır. Bu sebeplerle bir çok araştırmacı, kendiliğinden yanmanın fiziksel, kimyasal proseslerini (Kam vd., 1976a,b; Karsner ve Perlmutter, 1982; İtay vd., 1989; Arısoy ve Akgün, 1994; Carras ve Young, 1994; Zhu vd., 2012; Li vd., 2016; Zhou vd., 2017) ve farklı parametrelerin kendiliğinden yanma prosesine etkilerini araştırmış (Smith ve Glasser, 2005; Beamish ve Arısoy, 2008; Yuan ve Smith, 2011; Qi vd., 2015) olup konu ile ilgili çalışmalar hala yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Kömürün kendiliğinden yanması, ortam sıcaklığında kömürün oksijen ile teması sonucunda kömürün kızışmasını (ısınması) sağlayan oksidasyon temelli bir olaydır. Oksidasyon kömürün; boşluklardan, çatlaklardan ve kömür iskeletinden oluşan karmaşık ve boşluklu bir yapı oluşu ile doğal bir absorbent olması (Yangdong vd., 2012) sebebiyle oksijen ile temas anında

başlar. Ortamdaki oksijenin kömüre adsorplanarak tüketimi oksidasyonun ilköşareti olarak kabul edildiği (Wang vd., 2003) gibi adsorpsiyon atmosferle temasının ilk günlerinde (özellikle ilk saatlerde) hatırı sayılır derecede fazladır (Kaymakçı ve Didari, 2002). Kömürün kendiliğinden yanma sürecinde oksijen -80°C 'da fiziksel adsorpsiyon, -5°C 'da başlayan kimyasal adsorpsiyon ve 40°C 'da başlayan kimyasal reaksiyonlar bütünü tarafından tüketilir (Demirbilek, 1986). Yaklaşık 40°C 'a kadarki süreçte ortaya çıkan ısı, kömür etrafında birikmeye yol açmadığı sürece bir probleme sebep olmadan oksijen tüketimi azalır ve kendiliğinden yanma oluşmaz (Pis vd., 1996). Fakat yeterli oksijen (hava) var ise ve sıcaklık uzaklaştırılmazsa, kömür kendiliğinden ısınmaya devam eder, sıcaklığı artar, proses daha sonraki aşamalara ulaşabilir ve nihayetinde yangın meydana gelebilir (Kaymakçı ve Didari, 2002; Beamish ve Hamilton, 2005; Yuan ve Smith, 2011, 2012). Kömürün 40°C 'a ulaşmasından sonraki süreç ise, yavaş oksidasyon, hızlanan oksidasyon ve hızlı oksidasyon aşamaları olarak değerlendirilmektedir (Li vd., 2016). Yavaş oksidasyon aşamasında çoğunlukla oksijenin kömüre fiziksel adsorpsiyonu görülürken, sonraki aşamalarda kimyasal adsorpsiyon ve kimyasal reaksiyonlar baskın hale gelmeye başlar (Wang vd., 2003). Oksijenin daha ziyade fiziksel adsorpsiyonun gerçekleştiği düşük sıcaklıklardaki yavaş oksidasyon aşamasında ortaya çıkan ısı sonraki aşamada baskın hale gelen kimyasal adsorpsiyon aşamasından 15-20 kata kadar daha düşük olup (Qi vd., 2010), bu aşama çalışmalarda genellikle ihmal edilse de sürecin bastırılabilmesi için en önemli aşama olarak değerlendirilebilir (Zhang vd., 2016a). Fakat kendiliğinden ısınmanın gerçekleştiği bölgenin ve gerçekleşme zamanının tespiti oldukça zor olduğundan bu ilk aşamada müdahale etmek de güçtür. Bunun sebebi ise yer üstü stokları için kömür miktarının fazla oluşu (Mao vd., 2013), yeraltında ise kendiliğinden ısınmanın çoğunlukla ayna gerisinde kömürün de biriktirildiği kısımda gerçekleşmesi olarak gösterilmektedir (Yuan ve Smith, 2012; Yu vd., 2013). Bu ilk aşama sonrasında ise sıcaklık hızla yükseldiği ve oksidasyon oranı ciddi şekilde arttığı (Morris ve Atkinson, 1988; Yuan ve Smith, 2011, 2012) yani artık hızlanan oksidasyon aşamasına geçildiği için (Kaymakçı ve Didari, 2002) prosesin

kontrolü zorlaşır, ortam güvenliği kademeli şekilde azalmaya başlar (Qi vd., 2015) ve sıcaklığın kömürün tutuşma sıcaklığına ulaşması durumunda da yangınlar meydana gelmektedir (Yuan ve Smith, 2011, 2012; Wang vd., 2017b). Genel olarak oksijen tüketimi bu ilk aşamada sonraki aşamalara göre düşük ve oksijen tüketiminin sıcaklığa bağlı artış hızı yavaş iken 70°C üzerinde bu tüketim oldukça artmakta ve artış hızı oranı da yükselmektedir. Bu noktadan sonra ise oksijenin kömüre adsorplanması azalarak 100°C civarında farklı kömür türleri için benzer bir noktaya doğru yaklaşmaktadır. Artan oksijen tüketiminin büyük kısmı ise kendiliğinden yanmanın kimyasal reaksiyonları tarafından tüketilmeye başlar (Şekil 1). Bu reaksiyonlar sonucunda farklı çalışmalarda çeşitli gaz ürünlerinin salınımı tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda; $30-100^{\circ}\text{C}$ arasında H_2O ve CO_2 , 90°C üzerinde C_2H_6 , 100°C üzerinde C_2H_4 , $105-150^{\circ}\text{C}$ arasında CO , 110°C üzerinde C_3H_8 , $120-170^{\circ}\text{C}$ arasında CH_4 ve C_2H_4 ile 180°C üzerinde C_2H_2 salınımlarının kayda değer seviyelerde olduğu belirlenmiştir (Kaymakçı ve Didari, 2002; Wu ve Wu, 2011; Yuan ve Smith, 2011; Li vd., 2014; Deng vd., 2014). Fakat bu gaz salınım ve sıcaklık değerleri kömürün cinsine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Deng vd., 2014; Xin vd., 2014).



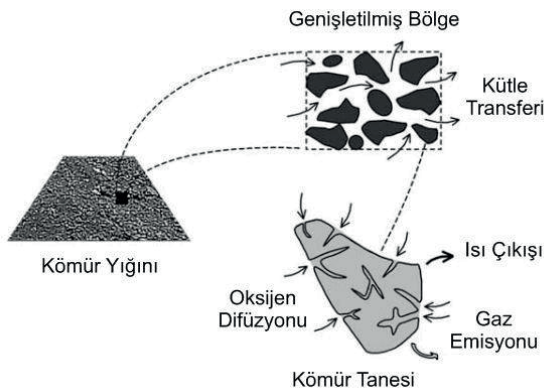
Şekil 1. Farklı sıcaklıklarda farklı kömürlerin oksijen adsorpsiyonu (Qi vd., 2010)

Bununla birlikte özellikle yeraltı kömür sahalarındaki kömürün kendiliğinden yanması ile ilgili değerlendirmeler CO dahil çeşitli gazların kömürün transformasyonu ve daha önceki reaksiyonlara bağlı olarak barındırdığı

gaz miktarına göre de salındığı düşünülerek yapılmalıdır (Kuchta vd., 1975; Qi vd., 2012; Tang, 2015). Bu duruma örnek olarak yüksek CO oranlarının görüldüğü yeraltı kömür işletmelerinin birçoğunda kendiliğinden yanmanın gerçekleşmiyor olması verilebilir (Yangdong vd., 2012).

17. yüzyıldan beri kömürün kendiliğinden yanması ile ilgili pirit kuramı, bakteri etkisi, fenil kuramı, serbest radikaller reaksiyonu, hidrojen reaksiyonu, nem kuramı (Eroğlu ve Gouws, 1993) aktivasyon grubu reaksiyonu ve kömür oksijen etkileşim kuramı gibi birçok kuram ortaya konmuştur (Cliff, 2009; Qi vd., 2010, 2014b). Günümüzde ise kömür-oksijen etkileşimi kuramı bilim adamları tarafından en çok kabul gören yaklaşımdır (Qi vd., 2010; Zhu vd., 2012). Bu etkileşim, oksijenin kömür içerisine nüfus etmesi ile gerçekleşmektedir (Şekil 2).

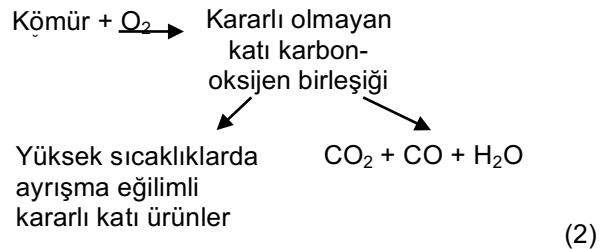
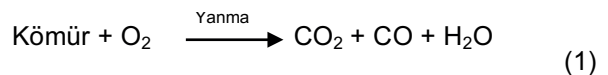
Kömür-oksijen birleşimi kuramına göre oksidasyon prosesinin eş zamanlı (Zhu vd., 2012) meydana gelmekle birlikte sıcaklığa bağlı olarak etki oranları değişen oksijenin fiziksel adsorpsiyonu, kömür - oksijen birleşikleri ile oksijenleşmiş karbon parçacıklı yapıların oluşmasına yol açan kimyasal adsorpsiyon ve O₂ ve kömürün etkileşimi ile tipik olarak CO, CO₂ gaz ürünleri ve H₂O salınımlarıyla sonuçlanan yanma reaksiyonundan oluştuğu düşünülmektedir (Carras ve Young, 1994).

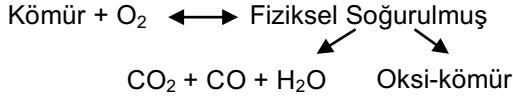
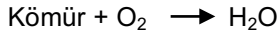
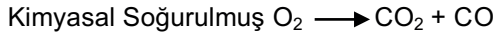
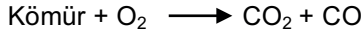


Şekil 2. Oksidasyon aşamaları (Wang vd., 2003)

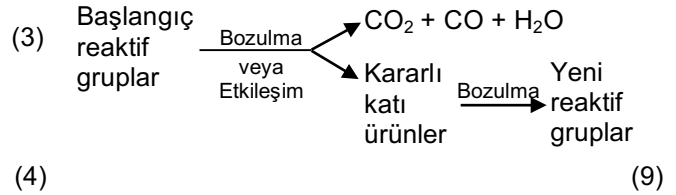
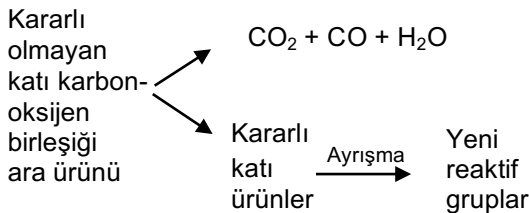
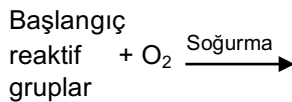
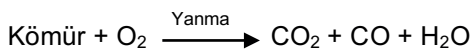
Kömür türüne göre farklılık göstermekle birlikte kömürün kendiliğinden yanma süreci; 70-100°C'a kadarki kısım (kimyasal adsorpsiyon özellikle 40-50 °C civarında etkisini arttırmaya başlamaktadır)

kimyasal adsorpsiyonun etkin olduğu yavaş ya da başka bir tabirle erken oksidasyon aşaması, buradan sonra sıcaklığın 140-150°C'a kadar çıktığı aralık hızlanan oksidasyon aşaması ve 140-150°C sonrasında ise daha ziyade serbest radikallerin etkisi altında gerçekleşen hızlı oksidasyon aşaması olarak aşamalara ayrılmaktadır (Wang vd., 2009; Li vd., 2016). Bu aşamalar sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonları ortaya koyabilmek amacıyla da birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Kam ve arkadaşları (1976a,b) birbirini takip eden direk yanma ve kimyasal sorpsiyon reaksiyonları olan Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'yi önermiş, Krishnaswamy ve arkadaşları (1996a,b) ise bu reaksiyonlarda asıl ürünün CO₂ olduğunu ve CO ve H₂O ürünlerinin ihmal edilebilecek seviyelerde kaldığını iddia etmişlerdir. Karsner ve Perlmutter (1982) ise benzer 3 reaksiyon önermekle birlikte (Eşitlik 3-5) H₂O ve karbon-oksijen ürünlerinin sırası ile üretildiklerini öne sürerek, oksijenin fiziksel tutunmasını da ayrıca değerlendirmişlerdir (Eşitlik 6). İtay ve arkadaşları ise (1989) direk yanma reaksiyonunun düşük sıcaklıklarda gerçekleşmediğini öne sürerek sorpsiyon temelli Eşitlik 4'e benzer bir yaklaşım ortaya koymuşlar fakat H₂O ve karbon-oksijen ürünlerinin aynı reaksiyon sırasında gerçekleştiğini öne sürmüşlerdir. Fakat kömürün kendiliğinden ısınma prosesi genellikle direkt yanma ve sorpsiyon temelli iki paralel reaksiyon ile tanımlansa da bu reaksiyonları kömürün kendiliğinden ısınması sürecini tam olarak açıklayamaz (Qi vd., 2012). Çünkü karbon oksitlerin salınımı da sadece kömürün oksidasyonunun sonucu değil, aynı zamanda oksijen içeren türlerin termal ayrışmasının da sonucudur. Ayrıca kimyasal adsorpsiyon ile ara birleşikler ve kararlı olmayan oksijenleşmiş ara ürünler de gaz içerikli olan ve olmayan diğer ürünlere ayrışır (Zhang vd., 2015).





Bu sebeple kömürün yapısındaki aromatik ve alifatik gruplar ile yüksek oranda oksijen içeren türlerinde (karboksiller, karboniller, aldehitler, kinonlar vb. gibi) reaksiyon modeli içerisinde değerlendirilmesi gerekir (Speight, 2013). Zaten aynı gaz oranına sahip kömürlerde bile gaz salınım oranlarının fonksiyonel gruplardan kaynaklı olarak farklı olduğu ve artan sıcaklığa bağlı olarak değişen CO₂ ve CO salınımları ile fonksiyonel grupların sayıları arasında ilişki olduğu bilinmektedir (Yangdong vd., 2012; Wojtacha-Rychter ve Smolinski, 2018). Dolayısıyla fonksiyonel grupların kendiliğinden yanma prosesine önemli etkilerinden dolayı iki paralel reaksiyon modeline ilaveten aktif grupların reaksiyonlarını da içeren üçüncü bir reaksiyonun da olduğu bir model kendiliğinden yanmanın irdelenmesi açısından daha doğrudur (Eşitlik 7-9) (Qi vd., 2012).



Bununla birlikte fonksiyonel grupların etkileri ayrı ayrı ve sıcaklığa bağlı olarak değerlendirilmelidir. Çünkü örneğin; özellikle karboksil ve karbonil formları kaynaklı olarak CO salınımı gerçekleşmekte iken, CO₂ salınımı ise bu gruplara ilaveten kömürün bünyesine adsorbe ettiği CO₂ miktarıyla alakalı olarak da gerçekleşmektedir (Qi vd., 2012). Bununla birlikte hidroksil gruplarının dehidrojenerasyonu oksidasyonun başlangıç seviyesinde gerçekleşmekte olduğundan oksidasyon sırasında karbonil gruplarının konsantrasyonu zamanla artış gösterir. Yani hidroksil grubunda CO oluşumuna dolaylı katkısı olmaktadır (Zhong vd., 2015). Yine alifatik hidro karbonlar havadaki oksijen ile reaksiyona girdikleri anda azalmaya başlamakta fonksiyonel gruplar oluşmaktadır (Zhou vd., 2017). Düşük aktivasyon enerjisi ve yüksek ısı salınımına sahip alifatik gruplar bu sebeple başlangıç seviyesinde kilit rol oynarlar (Wang vd., 2016). Bununla birlikte sıcaklığın artışı ile serbest radikallerin etkileri de artar. 100°C sıcaklığa gelindiğinde serbest radikallerin değişimleri 3 katına kadar artmış olur (Xu vd., 2017a). Bu noktada artan sıcaklık ile birlikte değişen kömürün boşluk yapısı da artan iç yüzey alanı ve boşluk alanları ile reaksiyonları hızlandırır (Qi vd., 2010). Ayrıca fonksiyonel gruplarda sadece oksidasyon temelli reaksiyonlar değil sıcaklığa bağlı içsel reaksiyonlar da gerçekleşmektedir (Qi vd., 2014b). Bu iki durumun ayrımı için ise oksijenli ortam ve inert ortam deneyleri gerçekleştirilmektedir (Li vd., 2016; Zhou vd., 2017; Xin vd., 2018). Bu değerlendirmelere göre diğer gruplar miktar olarak azalırken sıcaklık etkisi ile her iki durumda da (oksijen ve nitrojen altında) karboksilik ester ve karboksil artış göstermektedir. Oksijen etkisi ise alifatik hidrokarbonların, hidroksil gruplarının tüketimini arttırmakta, ayrıca da hidroksil grupları hariç oksijen içeren grupların oluşmasına yol açmaktadır. (Xin vd., 2018). Kömürün oksidasyonunda termal kırılma mertebeleri ise genel olarak alifatik gruplar > karboksilat ve aromatik gruplar > değişmiş aromatik gruplar

= polimerleşmiş eterler ve ketonlar olarak sıralanabilir (Parsa ve Chaffee, 2018). Dolayısıyla kömürün kimyasal yapısını oluşturan gruplar detaylı bir şekilde incelenmelidir.

2. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kömürlerin kendiliğinden yanması; müdahale edilemez olan içsel faktörler (kömür özellikleri) ve müdahale edilebilir ya da kısmen müdahale edilebilir dışsal faktörlerin etkisi altındadır.

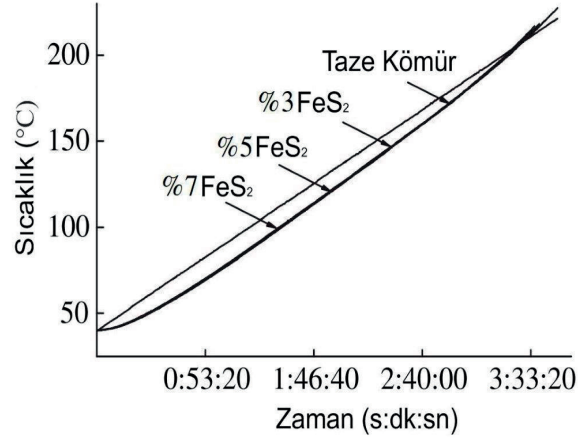
2.1. İçsel Faktörler

2.1.1. Sülfür İçeriği

Kömürün kendiliğinden yanması üzerine pirit içeriğinin etkisi uzun yıllar en önemli faktör olarak görülmüştür. Fakat günümüzde pirit içeriği yüksek kömürlerin dahi kendiliğinden yanma eğilimlerinin düşük çıkabildiği bilinmektedir (Özdeniz, 2003). Çünkü pirit daha ziyade nemce ve oksijence zengin ortamlarda (Qi vd., 2011), eğer küçük taneler şeklinde ise ve %5-10'u geçen miktarda kömür içerisinde bulunuyorsa kendiliğinden yanmayı düşük sıcaklık (yaklaşık 50°C) aşamasında (Braun, 1987) hızlandırabilmektedir (Münzer, 1975; Ghosh, 1986). En reaktif sülfid olan ve kömür içerisinde mikrometre boyutlarına kadar ince taneler şeklinde bulunan fromboidal pirit varlığı bu açıdan oldukça etkili olabilmektedir (Jendrus vd., 2016). Bununla birlikte piritteki kükürdün oksidasyonu sonucu açığa çıkan ısı kendiliğinden yanma reaksiyonları sonucu açığa çıkan ısının %10 kadarına tekabül etmektedir. Çoğu kömürde pirit içeriğinin %1'in de altında olması ise ısıl katkıyı ihmal edilebilir düzeye getirebilmektedir (Wang vd., 2003). Hatta pirit ilave edilen kömürlerde ısı artış oranının azaldığı ve kesişme noktası sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3).

Piritin reaktifliği az olup, düşük sıcaklık altında kuru ortamlarda neredeyse inerttir. Bu şartlar altında kömürün oksidasyonu sırasında pirit kömür yüzeyini koruyan bir tabaka oluşturarak boşluk ve çatlakları kapatarak ısı transferini ve kömür ile O₂ etkileşimini engelleyebilmektedir (Qi vd., 2011). Fakat pirit içeriğinin lineer olmayan bir şekilde kendiliğinden yanmayı hızlandırdığını öne süren çalışmalar da bulunmaktadır (Deng

vd., 2015a). Organik kükürt içeriğinin etkisinin ise oldukça düşük ya da hiç olmadığı yine araştırmacılar tarafından iddia edilmekte, kendiliğinden yanmanın S içeriğinden ziyade C ve N oranlarıyla ilişkili olduğu öne sürülmektedir (Xiao vd., 2018; Zhang vd., 2018).



Şekil 3. Pirit miktarına göre sıcaklık (Qi vd., 2011)

2.1.2. Kömürleşme Derecesi (Rank)

Kömür rankı arttıkça kömürün karbon yüzdesi, ısıl değeri, içsel yüzey alanı ve hava geçirgenliği artmakta, buna karşılık oksijen, hidrojen, uçucu madde, nem oranı ve aktif gruplar azalmaktadır (Qi vd., 2011; Speight, 2013; Gürdal vd., 2015). Bu özelliklerin tamamı kendiliğinden yanma üzerine etkili parametrelerdir. Bu sebeple düşük ranklı kömürler yüksek ranklı kömürlere göre kendiliğinden yanmaya daha yatkın olmaktadır (Beamish vd., 2001; Qi vd., 2011; Gürdal vd., 2015). Ancak antrasitler de dahil tüm kömür madenlerinde kendiliğinden yanma görülmektedir (Tuyen vd., 2016, 2017).

2.1.3 Kömürün Nem İçeriği

Kömürün neminin kendiliğinden yanması üzerine etkisi oldukça ihtilafli bir konudur. Bazı araştırmacılar kömürün nem içeriği arttıkça kendiliğinden yanmanın da arttığını ileri sürerken (Mahidin vd., 2002; Zhou vd., 2013; Ray vd., 2014; Nimaje ve Tripathy, 2016; Mohalik vd., 2017), bazı araştırmacılar ise aksini iddia etmektedir (Li ve Skinner, 1986; Qi vd., 2011). Bir diğer düşünceye göre ise kritik bir nem değerinden bahsetmek

gereklidir. Kömürde bulunan nemin de bu kritik değere oranına bağlı olarak nemin kendiliğinden yanmaya etkisi değişken olmaktadır (Nandy vd., 1972; Chen ve Stott, 1993; Vance vd., 1996; Beamish ve Hamilton, 2005; Xu vd., 2013). Nemin kendiliğinden yanmayı pozitif etkilediğini iddia eden görüşlere göre; su kimyasal reaksiyonlara dahil olarak yüksek reaktivitedeki hidroksil ve hidroperoksi üretimi sağlamakta, böylelikle sıcaklık artmakta, kendiliğinden yanma süreci hızlanmaktadır (Ford, 1981; Özdeniz, 2003).

Kömürün önce nemini kaybetmesi ve sonra tekrar nemlenmesi de kömürün kendiliğinden yanma eğilimini arttırmaktadır (Zapletal vd., 2018). Bununla birlikte kömürde nem kaybı ile yüzey çekimleri sonucu çatlaklar meydana gelerek oksijenin geçişi hızlanmaktadır (Çakır, 2003). Nemin kendiliğinden yanma üzerine negatif etkisi olduğunu iddia eden görüşlere göre ise; nem, miktarına bağlı olarak yüzey kaplayıcı tabaka oluşturarak ısı transferini zayıflatmakta ve kömür-oksijen temasını engellemektedir (Wang vd., 2003). Aynı zamanda da nemin buharlaşması ile uzaklaşan ısı sebebiyle oksidasyon hızı düşerek sıcaklık artışı için geçen süre uzamaktadır (Arısoy ve Akgün, 1994; Pone vd., 2007; Qi vd., 2011). Hatta bazı durumlarda (özellikle düşük sıcaklıklarda) nemin buharlaşması ile kaybedilen ısı oksidasyon ile kazanılan ısınının üstesinden gelebilmektedir (Stott, 1960; Beamish ve Theiler, 2015; Choudhury vd., 2016).

Nemin etkisinin değişken olduğunu iddia eden araştırmalara göre ise; kendiliğinden ısınma oranı kuru kömüre göre belli oranda nem artışıyla ciddi şekilde azalmakta, fakat kömürün neminin, nem tutma kapasitesinin % 40-50'si civarına düşürülmesi durumunda ise önemli derecede artmaktadır (Beamish ve Hamilton, 2005). Bu sebeple kritik bir değerden bahsedilebilir. Bu değer in altında veya üstündeki nem oranlarında kömür tarafından salınan ısı düşük seviyelerde olabilmektedir (Xu vd., 2013). Ancak kömürün neminin kendiliğinden yanma sürecine etkisini havadaki nem ile birlikte değerlendirmek daha doğru olabilir. Çünkü havadaki su buharı da kömüre adsorplanarak kömür sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Net etkinin ise hangi prosesin dominant olduğu ile alakalı olduğu düşünülmektedir (Pone vd., 2007).

2.1.4. Uçucu Madde, Kül ve Mineral İçeriği

Kömürün kül içeriğine bağlı yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bunun başlıca sebebinin etkiyi asıl belirleyenin külün mineral içeriği olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Beamish ve Blazak, 2005). Bu içeriklerden alkali maddelerin, kireç, soda ve demir bileşiklerinin oksidasyonu hızlandıracağı, alüminyum, silis, borat ve kalsiyum klorit in ise yavaşlatacağı düşünülmektedir (Didari, 1986; Morris ve Atkinson, 1988; Spiliä, 2012). Kömürün mineral içeriğinin kendiliğinden yanma sürecine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada ise; kuvars ve siderit ile birlikte kaolinit bulunduran kömürlerin kül ile karıştırılması durumunda mineral içeriğinin ısı tutan bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Mineral içeriğinin oksijenin karbon yüzeylerine ulaşımını engelleyerek kimyasal reaksiyon mekanizmasına etki ettiği düşünülmektedir. Fakat minerallerin doğal yollarla bulunması durumunda bu etkinin görülemediği belirtilmektedir (Beamish ve Arısoy, 2008). Kömürde uçucu madde artışı ise kendiliğinden yanmayı arttırdığını belirten birçok çalışma bulunmaktadır (Nandy vd., 1972; Mahidin vd., 2002; Ray vd., 2014; Nimaje ve Tripathy, 2016; Mohalik vd., 2017; Kataka vd., 2018). Uçucu külün bu etkisinin kömürde bulunan C-H ve C=O fonksiyonel gruplarının varlığını (metan, metil, etilen, asetilen, ester, karboksilat vb. gibi) artırıyor olmasından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir (Mahidin vd., 2002).

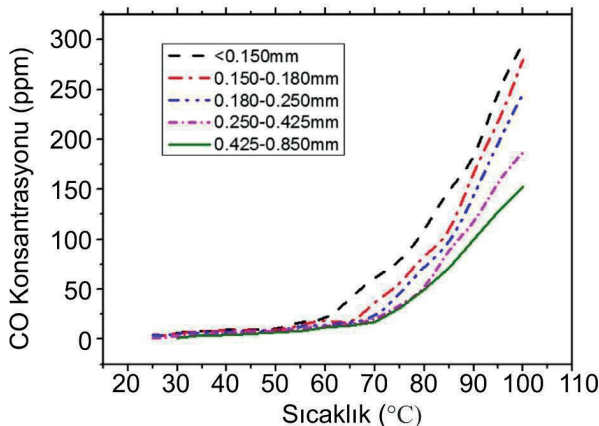
2.1.5. Kömürün Petrografik Bileşenleri

Kömürün petrografik birleşenlerinin kendiliğinden yanma üzerine etkisi tam olarak netlik kazanmamıştır. Kömürün ana yapısını oluşturan makro bileşenler olan litotiplerden; vitren, klaren ve düren, füsene oranla daha kolay yanmakta, yüksek ısıya ulaşıldığında ise füsene de aynı kolaylıkta yanabildiği bilinmektedir (Feng vd., 1973). Kömürün mikro bileşenleri olan maserallerin kendiliğinden yanma üzerine etkileri ise farklı iddiaları barındırmaktadır. Maserallerin reaktif gruplar olduğunu ve özellikle vitrinit ve liptinitin kendiliğinden yanmaya daha yatkın olduğunu öne süren (Mastalerz vd., 2010), 74°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise eksinitin oksidasyon hızının vitrinit ve inertinite göre daha yüksek olduğunu belirten (Morris ve Atkinson, 1988), düşük ranklı kömürler başta olmak üzere

tüm kömürlerde oksidasyon ile birlikte vitrinit yansıma değerlerinin arttığını ortaya koyan ve bunun da oksidasyonun önemli bir işareti olduğunu öne süren (Avila vd., 2014) çalışmalar olduğu gibi maserallerin kendiliğinden yanma üzerine herhangi bir etkisinin bulunmadığını belirten (Ray vd., 2014) araştırmacılar da bulunmaktadır. Farklı görüşlerden yola çıkarak maserallerin etkisi ile ilgili genel bir yargı ortaya konmadığı değerlendirilmesi de yapılmaktadır (Querol vd., 2008). Bu konuda daha detaylı araştırmalara ihtiyaç vardır.

2.1.6. Tane Boyutu

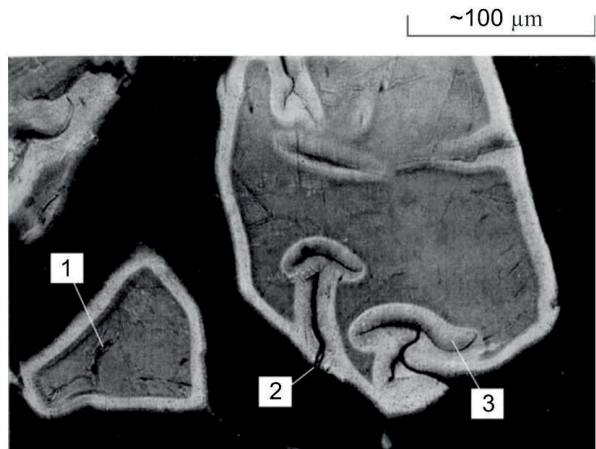
Kömürün tane boyutunun azalmasıyla birlikte temas yüzeyinin büyümesi kendiliğinden yanma eğilimini arttırmaktadır (Kaymakçı ve Didari, 2002; Kadioğlu ve Varamaz, 2003; Küçük vd., 2003; Özdeniz, 2010; Spiliä, 2012; Yuan ve Smith, 2012; Qin vd., 2012; Gürdal vd., 2015; Ören ve Şensöğüt, 2016; Zhang vd., 2016b). Bu etki sıcaklığa bağlı CO salınım miktarlarından da görülebilmektedir (Şekil 4). Bazı çalışmalara göre ise tane boyutunun bir noktaya kadar oksidasyonu hızlandırıcı etkisi olduğu, fakat kritik bir boyuttan sonra ise bu etkinin kaybolduğu öne sürülmektedir. Bu kritik değer farklı araştırmacılar tarafından 140 µm'den 5 mm'ye geniş bir aralıkta verilmektedir (Özdeniz, 2003). Çok küçük tane boyutlarına inildiğinde ise oksijenin hızlı bir şekilde tanelerin içerisine teneffüs etmesi maksimuma yaklaştığından artık daha fazla pozitif etki görülememektedir (Wang vd., 2003).



Şekil 4. Tane boyutu ve CO salınımı (Tang, 2015)

2.1.7. Boşluk Yapısı ve Oksidasyon Geçmişi

Kömürün yapısından dolayı oksidasyon, düşük sıcaklıklarda kömürün iç yüzey boşluklarında ve kömür tanelerinin dış kısımlarında ortaya çıkmaktadır (Şekil 5). Bununla birlikte oksidasyon daha ziyade iç yüzeylerde meydana gelir (Wang vd., 2003) ve iç yüzey alanı arttıkça oksidasyon eğilimi de artmaktadır (Gürdal vd., 2015). Bu sebeple kömürün boşluk sayısı artışının pozitif etkisinden bahsedilebilir (Choi vd., 2011). Ayrıca kömürlerin oksidasyon geçmişleri de mikro yapılar üzerine etkilidir (Liang vd., 2015; Deng vd., 2016; Meng vd., 2016). Bu etki ise kömürün rankına ve geçmiş oksidasyon şartlarına göre değişkenlik göstermektedir (Wang vd., 2017a).



1-Açık Gözenek 2-Kör Gözenek 3-Oksidasyon Kenarı

Şekil 5. Oksidasyon (275°C) sonrası kömür tanelerin mikroskopik görüntüsü (Krevelen, 1993)

Oksidasyon geçirmiş kömürlerin yüzey alanı artmakta ve önemli miktarda mikro boşluklar oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak da kendiliğinden yanma eğilimi artmaktadır (Deng vd., 2016). Yerinde yapılan çalışmalarda da kendiliğinden yanma geçmişi olan bölgelerdeki kömürlerin kendiliğinden ısınmaya yatkınlıklarının arttığı bilinmektedir (Taraba ve Pavalek, 2016).

2.1.8. Kömürün Gaz İçeriği

Kömürün gaz içeriği; ısınma ile kömürün şişmesi, gazın salınması ile kömürün büzülmesi, metanın matriksten difüzyonu, çatlaklarda birleşen gazların akış değişimleri ile kömür oksijen reaksiyon

kinetikleri ve termal aktarım mekanizmalarını etkilemektedir. Metan salınımı ile kömür büzüşmekte ve geçirgenliği artmakta iken salınım sırasında oksijenin difüzyonu engellenmektedir. Diğer yandan salınan gazın kömürün içerisine difüzyonu ve bu difüzyonun süresi de bir başka etmen olarak göze çarpmaktadır. Difüzyon süresi kısa ise kömürün boşluklu kütlesi gaz ile dolarak dışarıdan oksijenin boşluklara girişini engellemekte ve kömürün okside olabilirliği zayıflamaktadır. Diğer taraftan ise bir kere matriksin metan içeriği azaldığında dışarıdaki hava kömürün içerisine sızmaya başlamaktadır. Metan açısından zengin kömürlerde büyük sızıntı kısmi basıncı, geçirgenlik ve kömür oksijen reaksiyon ısısının etkisi ile artan gaz akış hızı gibi etmenler ise daha şiddetli kömür oksijen reaksiyonu ve daha yüksek kendiliğinden ısınma sıcaklığı oluşturabilmektedir (Xia vd., 2015a). Öte yandan metan içeriği yüksek kömürlerde, kendiliğinden ısınma gaz ürünleri ve salınan ısı ile metan patlama riski artarak madencilik daha zor hale gelmektedir (Qiang vd., 2011; Adamus vd., 2011; Chu vd., 2011; Yu vd., 2013; Zapletal vd., 2018; Li vd., 2018). Bu tip damarlardaki drenaj uygulamalarında da kendiliğinden yanma durumu değerlendirilmeye katılmalıdır. Çünkü aynaya yakın kısımdan yapılan gaz drenajı kendiliğinden ısınma bölgesi genişliğini drenaj deliği civarında daraltsa da aynadaki ilerleme ile birlikte drenaj deliği ile ayna arasındaki mesafenin artışına bağlı olarak kendiliğinden yanma bölgesi genişliği de artmaktadır. Ayrıca drenaj hızının artışı ise kendiliğinden yanma bölgesinin bir miktar büyümesine sebep olabilmektedir (Yang vd., 2018).

2.2. Dışsal Faktörler

2.2.1 Jeolojik Özellikler

Jeolojik özellikler bakımından kalın damarların bulunduğu sahalarda, derin ocaklarda, göçüklerin yeryüzüne erişebildiği sığ ocaklarda, arızaların yoğun olduğu panolarda yangın çıkma olasılığı yüksek olup, derin ocaklarda jeotermal gradyan artışı ve artan arazi basıncı nedeniyle kırılmaların fazlaca görülmesi ve ezilen topukların oluşması sebebiyle kendiliğinden yanmaya ortam hazırlanmaktadır. (Didari,

1986). Kömür damarlarının artan eğimi ile de kayıpların fazlalaşarak geride bırakılan kömür miktarının artması da kendiliğinden yanma riskini arttırmaktadır (Morris ve Atkinson, 1986). Bitişik kömür damarlarının olması durumunda da büyük boşlukların oluşması tekrar tutuşma eğilimini artırır, ısınan bölge daha zor tahmin edilebilir ve aynadaki gaz göstergeleri üst damarın da etkisini içeribildiğinden yanıltıcı olabilir. Bu sebeplerle de kendiliğinden yanmadan kaçınılma olasılığı azalmaktadır (Yu vd., 2018). Bir başka jeolojik unsur ise termal alterasyondur. Mağmatik sızıntılar göreceli olarak kalsit ve CaO içeriğini arttırmakta ve bu tip kömürlerde C-C/C-H oranı yavaşça yükselmekte iken C-O, C=O ve COO- azalma trendi *göstermektedir*. Bununla birlikte termal olarak altere olan kömürler yüzeylerinde daha fazla piroliz makro boşlukları bulunabilmektedir. Bu sebeplerle de O₂'nin difüzyon kapasitesi artmakta ve yüzey aktif kısımlar ile O₂'nin etkileşimi yükselmektedir (Shi vd., 2018).

2.2.2. Madencilik Yöntemi

Kömürün kendiliğinden yanması açısından geri dönümlü ve dolgulu yöntemin tercih edilmesi önerilmektedir (Didari, 1986). Çünkü yeraltı kömür ocaklarında geride bırakılan açıklıklarda kendiliğinden yanma riski daha yüksektir ve madencilik metodu gereği arkada bırakılmak zorunda kalınan kömürler kendiliğinden yanma potansiyeline katkıda bulunmaktadır (Kaymakçı ve Didari, 2002; Tan vd., 2011; Xie vd., 2012a,b; Yu vd., 2013; Qi vd., 2015). Ayrıca ayak arkasında kesilmeden bırakılan ağaç tahkimat ya da alınamayan çelik tahkimat, göçük içinde hava dolaşımına yol açacağından, sakıncalı olmaktadır (Qiang vd., 2011). Bu sebeple ayak arkasının tam oturmuş olması hava kaçaklarını engelleyeceğinden oldukça önemlidir. Yapılacak dolgunun ise boşlukları iyi biçimde dolduracak şekilde yapılması gerekmektedir. (Didari, 1986). Tam mekanize göçertmeli kazı uygulamaları ise yüksek çıkarma yoğunluğu sebebiyle büyük miktarda kömürün geride bırakılmasına sebep olduğundan kendiliğinden yanmanın oluşmasına imkan sağlayabilmekte, ayrıca kömür aynasında büyük derinliklerde ve sert tavan taşlarının olduğu durumda gazın takip edilmesi de zorlaşmaktadır (Xie vd., 2012a,b). Oda topuk

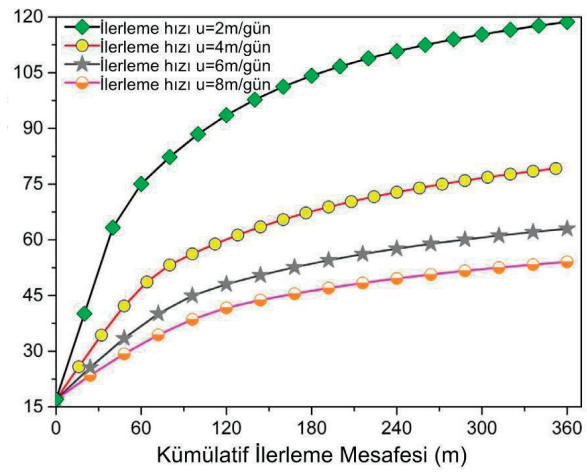
yönteminin kullanıldığı durumlarda ise, topukların yanması ya da zamanla oda-topuk boşluklarının kontrolsüz çöküşü gibi durumlarla karşılaşmak olasıdır. Bu sebeple genellikle çökertme ve dolgu yöntemleri tercih edilmektedir. Bununla birlikte komple dolgu yerine kutu-dolgu (box-filling) yöntemi gibi; yeraltını kısımlara ayırarak olası olumsuz durumlarda bir diğer kısmın etkilenmesini engelleyecek komple dolguya göre daha ekonomik yöntemler de önerilmektedir (Congliang vd., 2013). Ayrıca riskli bulunmayan sahalarda bile kömür yangınlarının meydana gelebildiği ve müdahalelerin uzun süreler aldığı bilinmektedir (Cliff, 2009). Bu sebeple her saha için; inert gaz enjektisi, kaçakları önleyici jel ya da 3 fazlı köpük kullanımı (Qi vd., 2014a), gerekirse bölgenin mühürlenerek oksijenin o bölgede kendini tüketmesi ve havalandırmanın bu bölgeye kaçakları önleyecek şekilde optimize edilmesi (Yu vd., 2013) gibi seçenekler için üretime başlamadan önce gerekli düzenleme ve planlamaların yapılması gerekmektedir.

2.2.3. Üretim (İlerleme) Hızı ve Ayna Genişliği

Yeraltı kömür ocaklarında kömürün üretim hızındaki artış, kömürün oksijenle temas süresini düşürerek kendiliğinden ısınma bölgesini küçültmekte ve ısınmayı azaltmaktadır (Şekil 6). Bu noktada geride bırakılan kısmı soğuma bölgesi (%18 ve üzeri O_2 içeren), oksidasyon bölgesi (%10-18 arası O_2 içeren) ve boğucu bölge (%10'un altında O_2 içeren) olarak değerlendirmek önemlidir. Geride bırakılan kısmın ön tarafında (soğuma bölgesi) kömürün oksijen ile reaksiyonu hızlanmakta ve daha fazla ısı salınmaktadır. Fakat hava sızıntıları da fazla olduğundan ısı buradan uzaklaşmakta, bu sebeple de kömür sıcaklığı yavaş bir şekilde artmaktadır. Belli bir derinliğe gelindiğinde ise (oksidasyon bölgesi) hava sızıntıları az olduğundan iyi bir ısı tutulumu sağlanmakta ve sıcaklık hızlı bir şekilde artabilmektedir. Daha ileri kısımda (boğucu bölge) ise yeterli oksijen bulunmadığından oksidasyon verimi ve kömürün sıcaklığı düşmeye başlamaktadır (Qin vd., 2011; Qi vd., 2014a).

Artan ilerleme hızı oksidasyon bölgesinin boğulma bölgesi haline dönüşmesini hızlandırmaktadır (Xia vd., 2015b). Bu sebeple 3 bölge ayrımı

prensibine dayalı minimum bir kazı hızının belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğu düşünülmektedir (Deng vd., 2018). Fakat ilerleme hızındaki artış açıklıklarda sızıntı akış miktarını ve oksidasyon zonu genişliği ile CH_4 salınımını da arttırabilmektedir. Ayna genişliğindeki artış da yine aynı etkilere sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenlerle havalandırma akış miktarı, ilerleme hızı, ayna genişliği ve kömürün oksidasyon oranı gibi parametreler metan etkisi ile birlikte değerlendirilmelidir (Xia vd., 2016).



Şekil 6. Üretim hızına bağlı olarak aynaya farklı uzaklıklarda sıcaklığın değişimi (Xia vd., 2015b)

2.2.4. Havalandırma

Kömür, ortamdaki havanın yetersizliğinde indirgenir iken yeterli havanın olduğu durumda kendiliğinden ısınma oranı artış göstermektedir (Deng vd., 2015b). Bununla birlikte açık havaya nazaran hava akışının olması da oksidasyonu arttırabilmekte (Yuan ve Smith, 2012), bir taraftan ise ısının uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Qi vd., 2011). Bu sebeple hava akışının etkisi iki yönlüdür. Düşük miktarda hava akışı oksidasyonu oldukça yavaşlatır iken, yüksek miktarda havanın geçişi ise ısının bölgede toplanmasının önüne geçmektedir (Morris ve Atkinson, 1998). Bu iki miktarın arasındaki kömürün oksidasyonu için yeterli ve ortaya çıkan ısının bölgeden uzaklaştırılmasını sağlayamayan optimum bir hava miktarından bahsedilmektedir (Kaymakçı ve Didari, 2002). Bununla birlikte havalandırmanın etkisi oksidasyonun hangi

aşamasında olunduğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Düşük sıcaklık altında (<70-100°C) yüksek havalandırma oranları CO oluşumunun önüne geçer iken yüksek sıcaklık aşamasında ise aynı şartlarda CO oluşumu artmaktadır (Tang, 2015). Fakat hava akışının daha da artırılması durumunda ise kömür kesişme noktası sıcaklığına ulaşmamaktadır (Qi vd., 2011). Ayrıca oksijen konsantrasyonundaki değişim de kendiliğinden yanma üzerine önemli derecede etki etmektedir (Qi vd., 2015; Huangfu vd., 2018). Oksijen konsantrasyonundaki düşüş (%16–11,7) düşük sıcaklıklarda (<95°C) oksidasyon açısından önemli bir değişim göstermez iken bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında ise CO üretimindeki artış görünür seviyelere ulaşmaktadır (Su vd., 2017). Oksijen konsantrasyonunun %5'in altına düştüğü durumda ise kesişme noktası sıcaklığına ulaşamadığı belirtilmektedir (Xu vd., 2017b). Öte yandan yeraltında hava akışına etki edecek farklı parametreler de bulunmaktadır. Çalışma ortamı için gerekli olan hava gönderilirken çeşitli engeller, kesit daralmaları, regülatörler ve kapılar gibi sebeplerle oluşan basınç farklılıkları (Didari, 1986) ile göçük sahası ve kırık topuklardan hava kaçaklarının oluşması (Özdeniz, 2003) kendiliğinden yanmayı ayrıca artırıcı etmenler olarak gösterilmektedir. Bu gibi durumlarda özellikle oksidasyon için yeterli havanın sağlanıp, ısının uzaklaştırılmadığı bir hava akış değerinin olduğu başta oksidasyon bölgesi olmak üzere geride bırakılan kömürlerin olduğu kısımlarda kendiliğinden yanma için optimum şartlar oluşabilmektedir (Tan vd., 2011; Yuan ve Smith, 2012). Ayrıca kömürün gözenekliliğine bağlı olarak değişkenlik gösteren hava akış rejiminin ve kömür ile yan kayacın termal iletkenliklerinin de kendiliğinden yanma üzerine etkili olduğu bilinmektedir (Zhang vd., 2012; Wen vd., 2017). Dolayısıyla kömürün tipi, çalışma şartları, bölgenin özellikleri gibi birçok parametrenin değerlendirildiği hem ortama gerekli oksijenin gönderilmesi, hem oksidasyonun oluşumunun önüne geçilmesi hem de ısının uzaklaştırılması amaçlarını karşılayan her çalışma ortamı için farklı kritik bir hava değeri belirlemek gereklidir. Havalandırma hızının kritik hızın üzerinde seçilmesi durumunda metan problemi olan ocaklarda metan konsantrasyonu düşürülüyorsa da kömürün kendiliğinden ısınmasına katkı

sağlanabilmektedir (Xia vd., 2016). Kritik hızın üzerindeki havalandırma hızlarında oksijen konsantrasyonunda ve sızıntılardaki hava hızında artış olmakta ve oksidasyon bölgesinin genişleyerek, kütle içerisine ilerlemekte (Tan vd., 2011), alt ve üst havalandırma bağlantı galerilerinde oksidasyon bölgesi taban yoluna göre daha geniş hale gelebilmektedir (Hao vd., 2011). Kritik hızın altındaki havalandırma hızlarında ise 3 bölge çalışma aynasına yaklaşabilmektedir. Dolayısıyla kritik hızın altı ya da üstündeki değerler riski arttırabilmektedir (Xia vd., 2016).

2.2.5.Ortam Sıcaklığı ve Nemi

Kömürün kendiliğinden yanması ile ortam sıcaklığı arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Kömürün nem oranı ve özellikle havadaki yüksek orandaki nem kendiliğinden ısınma prosesini hızlandırarak prosesin sonraki aşamalara geçişine yardımcı etki yapmaktadır (Kaymakçı ve Didari, 2002; Ma vd., 2017; Wang vd., 2018). Ancak, kendiliğinden ısınan kömüre müdahale için tercih edilen yöntem zaman zaman kömürün ıslatılmasıdır (Didari, 1986). Bu durum kömürü nemlendirdiği gibi gelişen süreçte de ortam neminin artması sonucunu da doğurabilmektedir. Kömürün kendiliğinden yanmasına etki açısından havadaki nem ile kömürün neminin dengesi önemli bir husus olarak göze çarpmaktadır. Nemli kömür ile kuru hava temasında kömürün neminin buharlaşması sırasında kaybedilen ısı kömürün reaksiyonlarla kazandığı ısıdan fazla olduğunda veya nem oranı yüksek kömürlerde havanın nemi ile denge oluşumu geciktiğinde kendiliğinden yanma olayı gecikebilmekte ya da oluşmayabilmektedir. Fakat havadaki nem, nem oranı düşük kömür tarafından adsorbe edildiğinde ise kömürün ısınmasına sebebiyet verebilmektedir (Wang vd., 2003; Choi vd., 2011). Hava neminin kendiliğinden yanmaya bu pozitif etkisi nemi adsorbe eden fonksiyonel grupları daha fazla olan düşük ranklı kömürlerde daha fazla görülmektedir (Choi vd., 2011). Ortam ısısı kömürün sıcaklığından fazla olduğunda ise daha ciddi bir şekilde kendiliğinden yanma hızlanabilmektedir (Qi vd., 2011; Wen vd., 2017). Öyle ki gerek stoklarda gerekse de havzalarda sadece 10°C'luk bir ortam sıcaklığı farkının; stoklarda termal sürüklenmenin oluşumunu 6-8

güne kadar kısalttığı, havzalarda ise birinde kendiliğinden yanma vakaları görülürken diğerinde görülmemeye durumunu ortaya çıkardığı bilinmektedir (Beamish vd., 2002; Arısoy ve Beamish, 2015). Yeraltında çalışılan derinliklerin artışı ile ortam sıcaklığının yükseleceği ve hava neminin artacağı düşünülürse madenler derinleştikçe kendiliğinden yanma riskinin de artacağı öngörülmektedir (Belle ve Biffi, 2018).

2.2.6. Stok Sahası Özellikleri

Stoklarda kendiliğinden yanma, ısının uzaklaştırılması imkanlarının kısıtlı olması sebebiyle özellikle uzun süreli stoklamalarda sıklıkla karşılaşılan (Li vd., 2014), zaman zaman alevli yangına dönüşebilen, müdahale edilmesi oldukça güç olan ve aylarca süren yangın söndürme çalışmalarına sebebiyet veren (Sipilä vd., 2012) önemli bir problemdir. Ayrıca yangının oluşmadığı durumlarda da ciddi kalori (%10-20) kayıpları (Arısoy ve Akgün, 2000; Şensöğüt ve Özdeniz, 2008) ve tane boyutu küçülmelerine (Şensöğüt ve Özdeniz, 2008) sebebiyet vermesinden dolayı da ekonomik kayıplar artabilmektedir. Bu sebeple stoklarda kendiliğinden yanma üzerine birçok çalışma yapılarak rüzgâr hızı, porozite, yığın eğimi, malzemenin stokta kalma süresi, stok yüksekliği, tane boyutu vb. gibi bazı parametrelerin etkileri incelenmiş ve bazı kritik değerler tespit edilmiştir (Akgün ve Essenhigh, 2001; Özdeniz, 2003; Sipilä vd., 2012; Zhu vd., 2013; Song vd., 2014; Zhang vd., 2016b). Bu parametrelerden yığın yüksekliği, kömürün tipi, alt kısımdan ısı kaybı, stok iç ısı ve rüzgâr hızı parametrelerinin yığının sıcaklık değişimini yüksek oranda etkilediği (Zhu vd., 2013; Zhang vd., 2016a,c; Tang ve Wang, 2018), havadaki nemin ve tane boyutunun ise küçük etkilerinin olduğu (Zhang vd., 2016a) düşünülmektedir. Her bir stok için diğer stok özelliklerine bağlı olarak kritik bir rüzgâr hızından bahsedilmektedir. Rüzgâr hızı bu kritik değer altına düştükçe stokta biriken ısının uzaklaştırılması azalmakta, rüzgâr hızının belli bir değer altına düşmesi durumunda ise ısı uzaklaştırma etkisi tamamen kaybolmaktadır. Bu değerlerin üzerindeki durumlarda ise rüzgâr hızının artışı havanın taneler arasına daha fazla ve yeterli şekilde ulaşmasını sağladığından

oksidasyonu kuvvetlendirmekte sonuç olarak da ısının uzaklaştırılması üzerine etki negatif gibi görülebilmektedir. Bununla birlikte oksijen konsantrasyonunun artması da kendiliğinden yanma sürecini ciddi şekilde hızlandırmaktadır (Zhu vd., 2013). Stoklardaki bir diğer önemli parametre ise stok yüksekliğidir. Stok yüksekliği ile ilgili de yine kritik bir değerden bahsetmek mümkünse de burada da diğer stok özellikleri ve kömürün özellikleri farklı değerlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Örneğin 3 çeşit linyit üzerine yapılan çalışmada 1,5 metre yüksekliğe kadar tutuşma görülmeye başlanmadığı, 2 metre ve üzerinde ise tutuşma görülmeye başladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte stoklardaki sıcaklık artış oranları da yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir (Akgün ve Essenhigh, 2001). Stok yüksekliğinin 9 metre olduğu farklı bir kömür türünde ise bu değer 5 metreye düşmesi tutuşma süresini 10 gün uzatırken, 5 metreden 1 metrelik bir düşüşün etkisi daha büyük olmakta ve stok tutuşma süresinin 18 gün daha uzadığı görülmektedir (Zhu vd., 2013). Bununla birlikte düşük yüksekliklerde stoklara hava girişine karşı dayanımın arttığı ve tutuşmanın da bu sebeple geciktiği söylenebilir. Dolayısıyla özellikle uzun stoklama sürelerinde daha düşük stok yüksekliklerinin seçilmesi tavsiye edilmektedir (Arısoy ve Akgün, 2000). Stoklardaki bir diğer önemli parametre ise porozitedir. Porozitenin azalması ile havaya karşı direnç artmakta ve oksijen eksikliği reaksiyonun baskılanmasını sağlamaktadır. Porozitedeki artış ise hava akış hızını artırarak ısı iletimini arttırmakta böylelikle de sıcaklık artışını azaltsa da bu azalma kendiliğinden tutuşmayı engelleyecek seviyede olamamaktadır (Akgün ve Essenhigh, 2001). Yani porozitenin azalması ile ısının uzaklaştırılmamasına göre reaksiyonun baskılanmasının etkisinin daha fazla olduğu düşünülmektedir (Zhu vd., 2013). Ayrıca stok yığınlarının sıkıştırılması ile porozitenin düşürülmesi her zaman maksimum sıcaklık artışını azaltmasa da okside olmuş kömür hacmini azalttığı bilinmektedir. Uzun süreli saklamalar için ise 0,1'den az, kömürün değer kaybını engellemek için ise 0,2'den az porozite olacak şekilde istifleme yapılması önerilmektedir (Zhang vd., 2016c). Stok dizaynında bir diğer parametre olan stok eğiminin azalması ile kendiliğinden tutuşma sürecinin önemli derecede uzadığını iddia eden araştırmalar

olduğu gibi (Akgün ve Essenhig, 2000), bu parametrenin etkisinin göreceli olarak daha az olduğunu öne süren çalışmalar da bulunmaktadır (Zhu vd., 2013). Çoklu stok dizaynları için ise birbirine daha yakın yığınlar oluşturulması sıcaklık artışını azaltacağından tercih edilebilir. Fakat bu durumda da gaz birikmesi artışı olacağını unutmamak gerekmektedir (Zhang vd., 2016c). Ayrıca stok sahalarında; kontrol edilemez dış etmenlerden (kar, rüzgar yağmur vb. gibi) daha az etkilenen kapalı stok sahalarının tercih edilmesi, meteorolojik durumun ve stoğun sürekli takibi ve uygun müdahale yönteminin hazırda bekletilmesi gibi önlemlerin alınması da önerilmektedir (Sipilä vd., 2012; Zhang vd., 2016a,b).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kömürün kendiliğinden yanması, özellikle yeraltı kömür işletmelerinde işçi sağlığı ve ortam güvenliği açısından ciddi sorunlara yol açabilen bir problemdir. Ayrıca yangına dönüşme durumunda da yakın bölgelerde yolların çökmesi, üst yapıda değişikliklerin oluşması ve salınan gazlar (CO_2 , CO, NO, SO_2 vb.) ile insan sağlığı ve doğal yaşamın ciddi şekilde zarar görmesi de olasıdır. Kendiliğinden ısınma probleminde ısının ortamdaki uzaklaştırılması sağlanamaz ve/veya ilgili bölgeye müdahale edilmez ise (mühürleme, havalandırma ile N_2 gazı gönderilmesi, çeşitli köpüklerin püskürtülmesi vb. gibi) kömürün ısınması ve reaksiyonlar devam eder. İleriki aşamalara geçildiğinde gaz salınım miktarları da artacağından çalışma ortamı daha ciddi şekilde tehlikeye düşebilir. Kendiliğinden yanma vakası görülen ocaklarda müdahale yapılırsa da ciddi müdahale masrafları oluşur ve genellikle müdahale süreleri de uzun olduğundan çalışma günü kaybı, kapatılan bölgedeki kömürlerden ve varsa bölgede kalmış ekipmandan geçici veya sürekli olarak faydalanamama gibi ekstra maliyetler oluşması da oldukça muhtemeldir.

Kömürün kendiliğinden yanması karbon oksijen birleşimi kuramı ile açıklanan ve genellikle 3 aşamaya bölünen bir reaksiyonlar zinciridir. Bu aşamalar erken oksidasyon, hızlanan oksidasyon ve hızlı oksidasyon aşamalarıdır. Erken (yavaş) oksidasyon aşaması oksijenin kömüre fiziksel adsorpsiyonunun baskın olduğu fakat kimyasal adsorpsiyonun da gerçekleştiği özellikle

kömürdeki alifatik C-H grupları ile fonksiyonel gruplardan hidroksilin etkin olduğu aşamadır. Hızlanan oksidasyon aşamasında sıcaklığın da artışı ile birlikte kimyasal adsorpsiyon git gide baskın hale gelmeye başlar, fiziksel adsorpsiyonun etkinliği azalır ve kömür yapısındaki karboksiller, metil, metilen ve aldehid grupları ana aktif gruplar haline gelirler. Hızlı oksidasyon aşamasına gelindiği $150^\circ C$ üzerinde ise reaksiyonlar daha ziyade serbest radikallerin etkisi altına girer ve tüm serbest radikallerin değişim oranları 3 katına kadar artar. Tüm bu süreç içerisinde mümkünse ısı sürüklenmenin başlamadığı ve ortama salınan ısının daha düşük olduğu fiziksel adsorpsiyon yani erken oksidasyon aşamasında mühalale etmek en uygundur. Çünkü sonraki aşamalarda prosesin önüne geçmek gittikçe zorlaşmaktadır.

Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler açısından pirit içeriği uzun yıllar temel sebep olarak görülmüştür. Fakat pirit kendiliğinden yanmayı bir miktar hızlandırabilmeyle birlikte bu etki sadece piritin çok küçük taneler halinde %5-10'u geçen oranda bulunması ve ortamın ya da kömürün yeteri kadar nemli olması durumunda görülebilmektedir. Yine organik sülfür içeriğinin de kendiliğinden yanma üzerine etkisi özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça kısıtlıdır. Kömürün nem içeriğinin kendiliğinden yanma üzerine etkisi ise oldukça itilafli olup, pozitif, negatif ve değişken etkiden söz edilmektedir. Farklı bulguların sebebi ise kömürün nem tutma kapasitesine bağlı olarak değişiklik gösteren kritik bir nem içeriğinin varlığı ve havadaki nem ile kömürün nemi arasındaki ilişki olabilir. Buna göre kritik neme yaklaştıkça kendiliğinden yanma eğiliminin azaldığı, kritik nemin hem altına inildiğinde hem de üstüne çıktığında eğilimin arttığı söylenebilir. Kömürün önemli petrografik özelliklerinden vitrinit yansıması değişimi ile oksidasyon arasında kuvvetli bir ilişki söz konusudur. Bu sebeple özellikle kendiliğinden yanmaya eğilimli kömürlerde vitrinitlerin oksidasyon sürecinde önemli rol oynadığını düşünen araştırmacılar bulunmakta ise de gerek makro gerekse de mikro petrografik bileşenler ile ilgili daha detaylı çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Kömürün tane boyutunun azalması ile ise temas yüzeyi artmakta ve oksijenin etkileşimde olduğu kısımlar çoğalmaktadır. Bu sebeple de tane boyutunun azalması kendiliğinden yanma eğilimini arttırmaktadır. Fakat kömürün türüne göre

değişen kritik bir değerden sonra oksijenin taneler içerisine teneffüsü zaten maksimum seviyelere ulaştığından daha küçük tane boyutlarında bu ilişki gözlenememektedir. Bununla birlikte kömürün boşluk yapısı ve boyutlarının artışı da kendiliğinden yanma eğilimini arttırmaktadır. Kömürün oksidasyon geçmişi de bu özellikler üzerine etkili olduğundan birlikte değerlendirilmesi gerekebilir. Oksidasyon geçmişi olan kömürlerin bu anlamda ilk oksidasyon seviyesine bağlı olmak şartıyla dereceli olarak kendiliğinden yanmaya daha yatkın oldukları bilinmektedir. Kömürün gaz içeriği ise bu gazların salınımı sırasında oksijenin difüzyonunu engellerken, takip eden kömürde kapasitesine bağlı olarak yine bu gazla dolabilmekte ve böylelikle de kömürün okside olabilirliği azalmaktadır. Fakat kömür matriksinin gaz içeriğinin azalması ile de uzun vadede oksijenin difüzyonu için boşluklar artar ve böylelikle de kendiliğinden yanma hızlanır. Jeolojik yapı açısından ise kırık ve çatlak yapılarının fazla olduğu derin, geride bırakılan kömürün fazla olduğu eğimi yüksek ve kendiliğinden yanmanın gerçekleştiği yerin tespitinin zorlaştığı bitişik damarlı madenlerde kendiliğinden yanma eğilimi daha fazla olmaktadır. Kömürün kendiliğinden yanmasının daha ziyade geride bırakılan kısımlarda gerçekleştiği bilindiğinden madencilik yöntemi olarak göçertmeli ve dolgu yöntemlerin seçilmesi tavsiye edilmektedir. Oda-topuk yönteminin kullanıldığı durumlarda ise çökertme ve/veya dolgu yöntemlerinin uygulanması ve kutu-dolgu (box-filling) yöntemi gibi etkileşim alanlarını küçültebilecek yöntemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Üretim hızının ise fazla seçilmesi tavsiye edilmekle birlikte metan içeriği yüksek damarlarda iki durumu da değerlendiren kritik bir hız seçilmesi gerekmektedir. Havalandırma açısından da hem ortamdaki ısıyı uzaklaştıracak, hem de oksidasyon bölgesini genişletmeyecek ya da çalışma aynasına yaklaştırmayacak kritik bir değerin seçilmesi uygun olacaktır. Ocak ortamının nemli olması durumunda kuru kömürlerde oksidasyon artmaktadır. Nemli kömür varlığında ocak havasının kuru olduğu durumda ise nemin buharlaşması ile kaybedilen ısı bazen oksidasyonla kazanılan ısının üstesinden gelebilmektedir. Bu sebeple ortam havasının kuru olması kendiliğinden yanmayı geciktirebilir ya da engelleyebilir. Ortam sıcaklığının yüksek olması ise kendiliğinden yanmayı hızlandırmaktadır.

Stok sahalarında ise kendiliğinden ısınma kaynaklı yangınlar oluşabildiği gibi tane boyutu küçülmeleri ve kalori kayıpları (%20'lere varan) gibi ekonomik zararlarla da karşılaşmaktadır. Bununla birlikte kapalı stok sahaları dış etmenlerden daha az etkilendikleri için tercih sebebidir. Stok sahalarında kendiliğinden yanmanın engellenmesi ya da yavaşlatılması için yüksekliği mümkün olan en az seviyede yığınlar oluşturulması, iyi havalandırma ile birlikte termal iletimi yüksek malzemeden yapılmış yığın altı malzemelerin kullanımı, sürekli kayıt-kontrol sistemlerinin kurulması, birçok noktadan ısının takip edilmesi, bölgesel hava durumunun; yağmurlar, ortam sıcaklığı, rüzgâr durumu ve kar yağışı gibi meteorolojik etkenler açısından sürekli takibi, yangına dayanıklı jel ile kömür üst yüzeyinin kapatılması, ateşe ve suya dayanıklı membran ile silo etrafının çevrilmesi, rüzgâr bariyerlerinin kurulumu, istifleme ve boşaltma işlemlerinin mümkün olduğunca kolay olabilecek şekilde dizaynının yapılması, olası yangınlarda müdahale için her siloda nitrojen müdahale ünitelerinin kurulması ya da kimyasal engelleycilerin hazır tutulması önerilmektedir.

Sonuç olarak kömür var olduğu sürece ve özellikle de kullanımı devam ettikçe kendiliğinden yanma probleminin devam edeceği aşikârdır. Ayrıca eğilimi az olduğu düşünülen ve uzun yıllar herhangi bir sinyal vermeyen kömür damarlarında dahi kendiliğinden yanma görülebilmektedir. Bu sebeplerle; kömür madenlerindeki yangınların sebepleri belirlenmeli, özellikle çoğunluğu kömürleşme derecesine sahip linyitlerden oluşan kömür rezervlerimiz olmak üzere tüm havzalarımızın risk haritaları çıkarılmalı, gerekli tedbirler alınarak müdahale stratejileri belirlenmeli ve sürekli takip sistemleri kurularak anlık kontroller yapılmalıdır. Ancak bu şekilde ciddi önlemler alınır ve uygulanır ise can kayıplarının yaşanmaması ve mali kayıpların azaltılması mümkün olabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu makalenin hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı Maden Yüksek Mühendisi İlker ERKAN ve Kimyager Ebru İNAL'a teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

- Adamus, A., Sancer, J., Guranova, P., Zubicek, V., 2011. An Investigation of the Factors Associated with Interpretation of Mine Atmosphere for Spontaneous Combustion In Coal Mines. *Fuel Processing Technology*, 92, 663-670.
- Akgün, F., Essenhigh, R.H., 2001. Self-ignition Characteristics of Coal Stockpiles: Theoretical Prediction from a Two-dimensional Unsteady-State Model. *Fuel*, 80, 409-415.
- Arisoy, A., Akgün, F., 1994. Modelling of Spontaneous Combustion of Coal with Moisture Content Included. *Fuel*, 73,2, 281-286.
- Arisoy, A., Akgün, F., 2000. Effect of Pile Height on Spontaneous Heating of Coal Stockpiles. *Combustion Science and Technology*, 153, 157-168.
- Arisoy, A., Beamish, B., 2015. Reaction Kinetics of Coal Oxidation at Low Temperatures. *Fuel*, 159, 412-417.
- Avila, C., Wu, T., Lester, E., 2014. Petrographic Characterization of Coal as a Tool to Detect Spontaneous Combustion Potential. *Fuel*, 125, 173-182.
- Beamish, B. B., Arisoy, A., 2008. Effect of Mineral Matter on Coal Self-heating Rate. *Fuel*, 87, 125-130.
- Beamish, B. B., Blazak, D.G., 2005. Relationship Between Ash Content and R70 Self-heating Rate of Callide Coal. *International Journal of Coal Geology*, 64, 126-132.
- Beamish, B.B., Barakat, M.A., George, J.D.St., 2001. Spontaneous-combustion Propensity of New Zealand Coals Under Adiabatic Conditions. *International Journal of Coal Geology*, 45, 217-224.
- Beamish, B.B., Hamilton G.R., 2005. Effect of Moisture Content on the R_{70} Self-Heating Rate of Callide Coal. *International Journal of Coal Geology*, 64, 133-138.
- Beamish, B.B., Lau, A.G., Moodie, A.L., Vallance, T.A., 2002. Assessing The Self-Heating Behaviour of Callide Coal Using a 2-Metre Column. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15, 385-390.
- Beamish, B.B., Theiler, J., 2015. Contrast in Self-Heating Rate Behaviour for Coals of Similar Rank, Coal Operators' Conference, 11-13 Şubat, The University of Wollongong, Sidney-Avustralya.
- Belle, B., Biffi, M., 2018. Cooling Pathways for Deep Australian Longwall Coal Mines of the Future. *International Journal of Mining Science and Technology*, Doi: 10.1016/j.ijmst.2018.02.001.
- Braun, E., 1987. Self Heating Properties of Coal. (N.B.S) National Bureau of Standards, NBSIR 87-3554, 108.
- BP, 2017. BP Energy Outlook 2017 Edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf> 16 Şubat 2018.
- 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, 1-15.
- 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 (6), 787-92.
- Cheng, W., Xin, L., Wang, G., Liu, Z., Nie, W., 2015. Analytical Research on Dynamic Temperature Field of Overburden in Goaf Fire-Area Under Piecewise-Linear Third Boundary Condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 812-824.
- Choi, H., Thirupathiraja, C., Kim, S., Rhim, Y., Lim, J., Lee, S., 2011. Moisture Readsorption and Low Temperature Oxidation Characteristics of Upgraded Low Rank Coal. *Fuel Processing Technology*, 92, 2005-2010.
- Choudhury, D., Sarkar, A. ve Ram, L. C., 2016. An Autopsy of Spontaneous Combustion of Lignite, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 36, 2, 109-123.
- Chu, T., Zhou, S., Xu, Y., Zhao, Z., 2011. Research on the Coupling Effects Between Stereo Gas Extraction and Coal Spontaneous Combustion. *Procedia Engineering*, 26, 218-227.
- Ciesielczuk, J., Misz-Kennan, M., Hower, J.C., Fabianska, M.J., 2014. Mineralogy and Geochemistry of Coal Wastes from the Starzykowiec Coal-Waste Dump (Upper Silesia, Poland). *International Journal of Coal Geology*, 127, 42-55.
- Cliff, D., 2009, Spontaneous Combustion Management - Linking Experiment With Reality, 2009. Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 281-286.
- Congliang, L., Zhixiang, T., Kazhong, D., Peixian, L., 2013. Synergistic Instability of Coal Pillar and Roof

System and Filling Method Based on Plate Model. International Journal of Mining Science and Technology, 23, 145-149.

Çakır, A., 2003. Zonguldak Havzası Kömür Damarlarından Elde Edilecek Kendiliğinden Yanma Verilerinin Bir Uzman Sistem Programı ile Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 186.

Demirbilek, S., 1986, The Development of a Spontaneous Combustion Risk Classification System for Coal Seams, Doktora Tezi, Nothincom Universty.

Deng, J., Lei, C., Xiao, Y., Cao, K., Ma, L., Wang, W., Laiwang, B., 2018. Determination And Prediction on "Three Zones" of Coal Spontaneous Combustion in A Gob of Fully Mechanized Caving Face. Fuel, 211, 458-470.

Deng, J., Ma, X., Zhang, Y., Li, Y., Zhu, W., 2015a. Effects of Pyrite on the Spontaneous Combustion of Coal. International Journal Coal Science Technology, 2(4), 306–311.

Deng, J., Xiao, Y., Li, Q., Lu, J., Wen, H., 2015b. Experimental Studies of Spontaneous Combustion and Anaerobic Cooling of Coal. Fuel, 157, 261-269.

Deng, J., Zhao, J., Zhang, Y., Geng, R., 2014. Study on Coal Spontaneous Combustion Characteristic Temperature of Growth Rate Analysis. Procedia Engineering, 84, 796-805.

Deng, J., Zhao, J., Zhang, Y., Huang, A., Liu, X., Zhai, X., Wang, C., 2016. Thermal Analysis of Spontaneous Combustion Behavior of Partially Oxidized Coal. Process Safety and Environmental Protection, 104, 218-224.

Dias, C.L., Oliveria, M.L.S., Hower, J.C., Taffarel, S.R., Kautzmann, R.M., Silva, L.F.O., 2014. Nanominerals and Ultrafine Particles from Coal Fires from Santa Catarina, South Brazil. International Journal of Coal Geology, 122, 50-60.

Didari, V., 1986, Yeraltı Ocaklarında Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Risk İndeksleri, Madencilik, 25 (4), 29-34.

Discover, 1999. China's on Fire, <http://discovermagazine.com/1999/oct/chinasonfire1697> 19 Şubat 2018.

EIA, 2017. International Energy Outlook, United States Energy Information Administration (E.I.A.), [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) 16 Şubat 2018.

Eroğlu, N., Gouws, M.J., 1993. Kömürün Kendiliğinden Yanmasına Ait Kuramlar. Madencilik, 17 (2), 13-18.

Ersoy, M., 2010. Sürdürülebilir Kalkınmada Avrupa Birliği ve Türkiye Kömür Madenciliği. Türkiye 17. Kömür Kongresi, Haziran 2010, 459-469.

Feng, K.K., Chakravorty, R.N., Cochrane, T.S., 1973. Spontaneous Combustion A Coal Mining Hazard. The Canadian Mining and Metallurgical Journal, 75-84.

Ford, P.C., 1981. The Water Gas Shift Reaction: Homogeneous Catalysis by Ruthenium and Other Metal Carbonyls. Accounts of Chemical Research, 14, 2, 31-37.

Ghosh, R., 1986. Spontaneous Combustion of Certain Indian Coals Some Physico-chemical Considerations. Fuel, 65, 1042-1046.

Gürdal, G., Hoşgörmez, H., Özcan, D., Li, X., Liu, H., Song, W., 2015. The properties of Çan Basın Coals (Çanakale – Turkey): Spontaneous Combustion and Combustion By-products. International Journal of Coal Geology, 138, 1-15.

Hao, S., Shuguang, J., Lanyun, W., Zhengyan, W., 2011. Bulking Factor of the Strata Overlying the Gob and a Three-Dimensional Numerical Simulation of the Air Leakage Flow Field. Mining Science and Technology (China), 21, 261-266.

Heffern, E. L., Coates, D. A., 2004. Geologic History of Natural Coal-bed Fires, Powder River Basin, USA. International Journal of Coal Geology, 59, 25-47.

Huangfu, W., You, F., Shao, Y., Wang, Z., Zhu, Y., 2018. Effects of Oxygen Concentration and Heating Rates on Non-isothermal Combustion Properties of Jet Coal in East China. Procedia Engineering, 211, 262-270.

Itay M., Hill C.R., Glasser D., 1989. A Study of the Low Temperature Oxidation of Coal. Fuel Processing Technology, 21, 81–97.

Jendrus, R., 2016. Chemical and Physical Aspect of Fires on Coal Waste Dumps, ISSN 2082-701+; eISSN 2450-5552, 8, 131-149.

Jiang, M., Qiu, J., Zhou, M., He, X., Cui, H., Lerro, C., Lv, L., Lin, X., Zhang, C., Zhang, H., Xu, R., Dang, Y., Han, X., Chen, Y., Tang, Z., Lin, R., Yao, T., Su, J., Xu, X., Liu, X., Wang, Y., Ma, B., Qiu, W., Zhu, C., Wang, S., Huang, H., Zhao, N., Li, X., Liu, Q., Zhang, Y., 2015. Exposure to Cooking Fuels and Birth Weight in Lanzhou, China: a Birth Cohort Study. BMC Public Health, 15:7 12.

- Kadioğlu, Y., Varamaz, M., 2003. The Effect of Moisture Content and Air-Drying on Spontaneous Combustion Characteristic of Two Turkish Lignites. *Fuel*, 1685-1693.
- Kam, A.Y., Hixson, A.N., Perlmutter, D.D., 1976a. The Oxidation of Bituminous Coal-1. *Chemical Engineering Science*, 31, 815-819.
- Kam, A.Y., Hixson, A.N., Perlmutter, D.D., 1976b. The Oxidation of Bituminous Coal-2. *Chemical Engineering Science*, 31, 821-834.
- Karsner G.G., Perlmutter D.D., 1982. Model for Coal Oxidation Kinetics. 1. Reaction Under Chemical Control. *Fuel*, 61(1):29-34.
- Kataka, M.O., Matiane, A.R., Odhiambo, B.D.O., 2018. Chemical and Mineralogical Characterization of Highly and Less Reactive Coal from Northern Natal and Venda-Pafuri Coalfields in South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 137, 278-285.
- Kaymakçı, E., Didari, V., 2002. Relations between Coal Properties and Spontaneous Combustion Parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 26, Sayfa 59-64.
- Krishnaswamy S., Bhat S., Gunn R.D., Agarwal P.K., 1996a Low-temperature Oxidation of Coal. 1. A Single-Particle Reaction Diffusion Model. *Fuel*, 75(3):333 - 343.
- Krishnaswamy, S., Gunn, R.D., Agarwal, P.K., 1996b. Low-temperature Oxidation of Coal. 2. An Experimental and Modeling Investigation Using a Fixed-bed Isothermal Flow Reactor. *Fuel*, 75(3), 344 - 352.
- Kuchta, J.M., Hertzberg, M., Cato, R., Litton, C.D., Burgess, D., Van Dolah, R.W., 1975. Criteria of Incipient Combustion in Coal Mines. *Symposium (International) on Combustion*, 15, 1, 127-136.
- Kuenzer, C., Stracher, G.B., 2012. Geomorphology of Coal Seam Fires. *Geomorphology*, 138, 209-222.
- Küçük, A., Kadioğlu, Y., Gülaboğlu M.S., 2003. A Study of Spontaneous Combustion Characteristics of a Turkish Lignite: Particle Size, Moisture of Coal, Humidity of Air. *Combustion and Flame*, 133(3), 255-61.
- Li, B., Chen, G., Zhang, H., Sheng, C., 2014. Development of Non-isothermal TGA-DSC for Kinetics Analysis of Low Temperature Coal Oxidation Prior to Ignition. *Fuel*, 118, Sayfa 385-391.
- Li, L., Qin, B., Ma, D., Zhuo, H., Liang, H., Gao, A., 2018. Unique Spatial Methane Distribution Caused by Spontaneous Coal Combustion in Coal Mine Goafs: An Experimental Study. *Process Safety and Environment Protection*, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.014>
- Li, Y. H. ve Skinner, J. L., 1986. Deactivation of Dried Subbituminous Coal. *Chemical Engineering Communications*, 49, 81-98.
- Li, Z., Zhang, Y., Jiang, X., Zhang, Y., Chang, L., 2016. Insight into the Intrinsic Reaction of Brown Coal Oxidation at Low Temperature: Differential Scanning Calorimetry Study. *Fuel Processing Technology*, 147, 64-70.
- Liang, Y., Fuchao, T., Haizhu, L., Hui, T., 2015. Characteristics of Coal Re-Oxidation Based on Microstructural and Spectral Observation. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, 749-754.
- Ma, D., Qin, B., Song, S., Liang, H., Gao, A., 2017. An Experimental Study on the Effects of Air Humidity on the Spontaneous Combustion Characteristics of Coal. *Combustion Science and Technology*, 189 (12), 2209-2219.
- Mahidin U., Hiramoto U., Ishikawa S., 2002. The Evaluation of Spontaneous Combustion Characteristics and Properties of Raw and Upgraded Indonesian Low Rank Coals. *Coal Preparation*, 22, 81-91.
- Malley, C.S., Kuylenstiema, J. C. I., Vallac, H. W., Henze, D. K., Blencowe, H., Ashmore, M. R., 2017. Pretermbirth Associated with Maternal Fine Particulate Matter Exposure: A Global, Regional and National Assessment. *Environment International*, 101, 173-183.
- Mao, Z., Zhu, H., Zhao, X., Sun, J., Wang, Q., 2013. Experimental Study on Characteristic Parameters of Coal Spontaneous Combustion. *Procedia Engineering*, 62, 1081-1086.
- Mastalerz, M., Drobnik, A., Hower, J.C., O'Keefe, J.M.K., 2010. Spontaneous combustion and coal petrology. In: Stracher, G.B., Sokol, E.V., Prakash, A. (Eds.), *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Volume 1: Coal - Geology and Combustion. Elsevier, 47-62.
- Meng, X., Gao, M., Chu, R., Wu, G., Fang, Q., 2016. Multiple Linear Equation of Pore Structure and Coal-Oxygen Diffusion on Low Temperature Oxidation Process of Lignite. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24, 818-823.
- Mohalik, N.K., Lester, E., Lowndes, I.S., 2017. Development of a Petrographic Technique to Assess

the Spontaneous Combustion Susceptibility of Indian Coals. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, doi: 10.1080/19392699.2017.1360874.

Morris, R., Atkinson, T., 1986. Geological and Mining Factors Affecting Spontaneous Heating of Coal. *Mining Science and Technology*, 3, 217-231.

Morris, R., Atkinson, T., 1988. Seam Factor and The Spontaneous Heating of Coal. *Mining Science and Technology*, 7, 149-159.

Münzer H., 1975. Textbook of coal petrology. 2nd ed. Berlin: Gebrüder Borntraeger. In: Stach, E., Mackowsky, M.T., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., Teichmüller, R., 387-388.

Nandy, D.K., Banerjee, D.D., Chakravorty, R.N., 1972. Application of Crossing Point Temperature for Determining the Spontaneous Heating Characteristics of Coals, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 20-41.

Nimaje, D.S., Tripathy, D.P., 2016. Characterization of Some Indian Coals to Assess Their Liability to Spontaneous Combustion. *Fuel*, 163, 139-147.

Novikova, S., Sokol, E., Khvorov, P., 2016. Multiple Combustion Metamorphic Events in the Goose Lake Coal Basin, Transbaikalia, Russia: First Dating Results, *Quaternary Geochronology*, 36, 38-54.

O'Keefe, J.M.K., Henke, K.R., Hower, J.C., Engle, M.A., Stracher, G.B., Stucker, J.D., Drew, J.W., Staggs, W.D., Murray, T.M., Hammon III, M.L., Adkins, K.D., Mullins, B.J., Lemley, E.W., 2010. CO₂, CO, and Hg emissions from the Truman Shepherd and Ruth Mullins Coal Fires, Eastern Kentucky, USA. *Science of the Total Environment*, 408, 1628-1633.

Oliveira, M.L.S., Boit, K., Pacheco, F., Teixeira, E.C., Schneider, I.L., Crissien, T.J., Pinto, D.C., Oyaga, R.M., Silva, L.F.O., 2018. Multifaceted Processes Controlling the Distribution of Hazardous Compounds in the Spontaneous Combustion of Coal and the Effect of these Compounds on Human Health. *Environmental Research*, 160, 562-567.

Ören, Ö., Şensöğüt, C., 2007. Kütahya Bölgesi Linyitlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlıklarının Araştırılması. *Madencilik*, 46 (1), 15-23.

Ören, Ö., Şensöğüt, C., 2016. Determination of Safe Storage Types for Coals with Regard to Their Susceptibility to Spontaneous Combustion – Tuncbilek Coal Case. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Doi: 10.1080/19392699.2016.1252339

Özdeniz, A.E., 2003. Kömür Stoklarındaki Kendiliğinden Yanma Olayının İncelenmesi - Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ) Örneği. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 185 s.

Özdeniz, A.H., 2010. Determination of Spontaneous Combustion in Industrial-Scale Coal Stockpiles. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 32, 665-673.

Parsa, M.R., Chaffee, A.L., 2018. The Effect of Densification with NaOH on Brown Coal Thermal Oxidation Behaviour and Structure. *Fuel*, 216, 548-558.

Pis, J.J., Puente, G.D.L., Moran, A., Rubiera, F., 1996. A Study of the Self-heating of Fresh and Oxidized Coals by Differential Thermal Analysis. *Thermochemic Acta*, 279, 93-101.

Pone, J.D.N., Hein, K.A.A., Stracher, G.B., Annegarn, H.J., Finkelman, 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 Coal Fields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 72, 124-140.

Qi, G., Wang, D., Chen, Y., Xin, H., Qi, X., Zhong, X., 2014a. The Application of Kinetics Based Simulation Method in Thermal Risk Prediction of Coal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 22-29.

Qi, G., Wang, D., Zheng, K., Xu, J., Qi, X., Zhong, X., 2015. Kinetics characteristics of Coal Low-temperature Oxidation in Oxygen-depleted Air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 224-231.

Qi, X., Wang, D., Milke, J.A., Zhong, X., 2011. Crossing Point Temperature of Coal. *Mining Science and Technology (China)*, 21, 255-260.

Qi, X., Wang, D., Milke, J.A., Zhong, X., 2012. Self-reaction of Initial Active Groups in Coal. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22, 169-175.

Qi, X., Wang, D., Xue, H., Jin, L., Su, B., Xin, H., 2014b. Oxidation and Self-Reaction of Carboxyl Groups During Coal Spontaneous Combustion. *Spectroscopy Letters 48: An International Journal of Rapid Communication*, 173-178.

Qi, X., Wang, D., Zhong, X., Gu, J., Xu, T., 2010. Characteristics of Oxygen Consumption of Coal at Programmed Temperatures. *Mining Science and Technology*, 20, 372-377.

- Qiang, C., Zhong-jun, S., Xin-quan, Z., Hai-yan, W., 2011. Multi-field Coupling Laws of Mixed Gas in Goaf. *Procedia Engineering*, 26, 204-210.
- Qin, Y., Liu, W., Yang, C., Fan, Z., Wang, L., Jia, G., 2012. Experimental Study on Oxygen Consumption Rate of Residual Coal in Goaf. *Safety Science*, 50, 787-791.
- Qin, Y., Liu, W., Yang, W., Su, G., 2011. Numerical Simulation Study of Spontaneous Combustion in Goaf Based on Non-Darcy Seepage. *Procedia Engineering*, 26, 486-494.
- Querol, X., Izquierdo, M., Monfort, E., Alvarez, E., Font, O., Moreno, T., Alastuey, A., Zhuang, X., Lu, W., Wang, Y., 2008. Environmental Characterization of Burnt Coal Gangue Banks at Yangquan, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 75, 93-104.
- Querol, X., Zhuang, X., Font, O., Izquierdo, M., Alastuey, A., Castro, I., Van Drooge, B.L., Grimalt, J.O., Elvira, J., Cabanas, M., Bartroli, R., Hower, J.C., Ayora, C., Plana, F., Lopez-Soler, A., 2011. Influence Of Soil Cover on Reducing The Environmental Impact of Spontaneous Coal Combustion in Coal Waste Gobs: A Review and New Experimental Data. *International Journal of Coal Geology*, 85, 2-22.
- Ray, S.K., Panigrahi, D.C., Varma, A.K., 2014. An Electro-Chemical Method for Determining the Susceptibility of Indian coals to Spontaneous Heating. *International Journal of Coal Geology*, 128-129, 68-80.
- Shi, Q., Qin, B., Liang, H., Gao, Y., Qiang, B., Qu, B., 2018. Effects Of Igneous Intrusions on the Structure and Spontaneous Combustion Propensity of Coal: A Case Study of Bituminous Coal in Daxing Mine, China. *Fuel*, 216, 181-189.
- Singh, R.N., Demirbilek, S., Turney, M., 1984. Kömürün Kendiliğinden Yanma Risk İndeksinin Maden Dizayını, Depolama ve Deniz Nakliyatına Uygulanması. *Türkiye 4. Kömür Kongresi, Zonguldak*, 203-221.
- Singh, R.V.K., 2013. Spontaneous Heating and Fire in Coal Mines. *Procedia Engineering*, 62, 78-90.
- Sipilä, J., Auerkari, P., Heikkilä, A.N., Tuominen R., Vela, I., Itkonen J., Rinne, M., Aaltonen, K., 2012. Risk and Mitigation of Self-heating and Spontaneous Combustion in Underground Coal Storage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 617-622.
- Smith, M.A., Glasser, D., 2005. Spontaneous Combustion of Carbonaceous Stockpiles. Part II: Factors Affecting the Rate of the Low-temperature Oxidation Reaction. *Fuel*, 84, 1161-1170.
- Song, Z., Zhu, H., Jia, G., He, C., 2014. Comprehensive Evaluation on Self-Ignition Risks of Coal Stockpiles Using Fuzzy AHP Approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 78-94.
- Speight, J.G., 2013. *The Chemistry and Technology of Coal*, Third Edition, Taylor and Francis Group, U.S.A., 807.
- Stott, J.B., 1960. Influence of Moisture on the Spontaneous Heating of Coal. *Nature*, 188, 54.
- Stracher, G.B., Taylor, T.P., 2004. Coal Fires Burning out of Control Around the World: Thermodynamic Recipe for Environmental Catastrophe. *International Journal of Coal Geology*, 59, 7-17.
- Su, H., Zhou, F., Li, J., Qi, H., 2017. Effects of Oxygen Supply on Low-temperature Oxidation of Coal: A Case Study of Jurassic coal in Yima, China. *Fuel*, 202, 446-454.
- Şensöğüt, C., Özdeniz, A.H., 2008. Decrease of Calorific Value and Particle Size in Coal Stockpiles. *Energy Sources, Part A*, 30:11, 988-993.
- Tan, B., Shen, J., Zuo, D., Guo, X., 2011. Numerical Analysis of Oxidation Zone Variation in Goaf. *Procedia Engineering*, 26, 659-664.
- Tang, Y., 2015. Sources of Underground CO: Crushing and Ambient Temperature Oxidation of Coal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38, 50-57.
- Tang, Y., Wang, H., 2018. Development of a Novel Bentonite-Acrylamide Superabsorbent Hydrogel for Extinguishing Gangue Fire Hazard. *Powder Technology*, 323, 486-494.
- Taraba, B., Pavelek, Z., 2013. Study of Coal Oxidation Behaviour in Re-opened Sealed Heating. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 433-436.
- Tuyen, L.T., Ohga, K. Ve Isei, T., 2017. Susceptibility to Spontaneous Combustion of Vietnamese Anthracite. *Journal of MMIJ*, 133,6, 140-150.
- Tuyen, L.T., Tuan, N.V., Ohga, K., Isei, T., 2016. Characteristics of Spontaneous Combustion of Anthracite in Vietnamese Coal Mines. *Journal of MMIJ*, 132, 11, 167-174.
- Van Krevelen, D.W., 1993. *Coal: Typology-Chemistry-Physics-Constitution*. London: Elsevier, 627-658.

- Vance, W.E., Chen, X.D., Scott, S.C., 1996. The Rate of Temperature Rise of a Subbituminous Coal During Spontaneous Combustion in an Adiabatic Device: the Effect of Moisture Content and Drying Methods. *Combustion and Flame*, 106, 261-270.
- WHO, 2017. *World Health Statistics 2017: monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals*. World Health Organization (W.H.O), Editörler: L'IV Com Sàrl, Villars-sous-Yens, ISBN 978-92-4-156548-6, World Health Organization, France.
- 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, 20-26.
- Wang, D., Xin, H., Qi, X., Dou, G., Qi, G., Ma, L., 2016. Reaction Pathway of Coal Oxidation at Low Temperatures: A Model of Cyclic Chain Reactions and Kinetic Characteristics. *Combustion and Flame*, 163, 447-460.
- Wang, H., Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M., 2003. Coal Oxidation at Low Temperatures: Oxygen Consumption, Oxidation Products, Reaction Mechanism and Kinetic Modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 487-513.
- Wang, K., Zhai, Z., Jiang, S., Ge, H., A., 2017a. Review of Spontaneous Combustibility of Oxidized Coal. *Advances in Engineering Research*, 120, 2055-2059.
- Wang, X., Luo, Y., Vieira, B., 2018. Experimental Technique and Modeling for Evaluating Heat of Rewetting Effect on Coals' Propensity of Spontaneous Combustion Based on Adiabatic Oxidation Method. *International Journal of Coal Geology*, 187, 1-10.
- Wang, Y., Shi, G., Guo, Z., 2017b. Heat Transfer and Thermodynamic Processes in Coal-bearing Strata Under the Spontaneous Combustion Condition. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 71:1, 1-16.
- Wen, H., Yu, Z., Deng, J., Zhai, X., 2017. Spontaneous Ignition Characteristics Of Coal In A Large-Scale Furnace: An Experimental and Numerical Investigation, *Applied Thermal Engineering*. 114, 583–592.
- Wojtacha-Rychter, K., Smolinski, A., 2018. The Interaction Between Coal and Multi-Component Gas Mixtures in the Process of Coal Heating at Various Temperatures: An Experimental Study. *Fuel*, 150-157.
- Wu, Y., Wu, J., 2011. Experimental Study on Significant Gases of Coal Spontaneous Combustion by Temperature Programmed (TP). *Procedia Engineering*, 26, 120-125.
- Xia, T., Wang, X., Zhou, F., Kang, J., Liu, J., Gao, F., 2015b. Evolution of Coal Self-heating Processes in Longwall Gob Areas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 861–868.
- Xia, T., Zhou, F., Gao, F., Kang, J., Liu, J., Wang, J., 2015a. Simulation of Coal Self-heating Processes in Underground Methane-rich Coal Seams. *International Journal of Coal Geology*, 141–142, 1-12.
- 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.
- Xiao, Y., Lü, H., Huang, A., Deng, J., Shu, C., 2018. A New Numerical Method to Predict the Growth Temperature of Spontaneous Combustion of 1/3 Coking Coal. *Applied Thermal Engineering*, 131, 221-229.
- Xie, Z., Cai, J., Zhang, Y., 2012b. Division of Spontaneous Combustion "Three-zone" in Goaf of Fully Mechanized Coal Face with Big Dip and Hard Roof. *Procedia Engineering*, 43, 82-87.
- Xie, Z., Zhang, Y., Jin, C., 2012a. Prediction of Coal Spontaneous Combustion in Goaf Based on the BP Neural Network. *Procedia Engineering*, 43, 88-92.
- Xin, H., Wang, D., Qi, X., Qi, G., Dou, G., 2014. Structural Characteristics of Coal Functional Groups Using Quantum Chemistry for Quantification of Infrared Spectra. *Fuel Processing Technology*, 118, 287-295.
- Xin, H., Wang, D., Qi, X., Zhong, X., Ma, L., Dou, G., Wang, H., 2018. Oxygen Consumption and Chemisorption in Low-temperature Oxidation of Sub-bituminous Pulverized Coal. *Spectroscopy Letters*, 51 (2), 104-111.
- Xu, Q., Yang, S., Tang, Z., Cai, J., Zhong, Y., Zhou, B., 2017a. Free Radical and Functional Group Reaction and Index Gas CO Emission during Coal Spontaneous Combustion. *Combustion Science and Technology*, DOI: 10.1080/00102202.2017.1414203, 1-15.
- Xu, T., Wang, D., He, Q., 2013. The Study of the Critical Moisture Content at Which Coal Has the Most High Tendency to Spontaneous Combustion. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 33, 117-127.
- Xu, Y., Wang, L., Tian, N., Zhang, J., Yu, M., Delichatsios, A., 2017b. Spontaneous combustion Coal Parameters

- for the Crossing-Point Temperature (CPT) Method in a Temperature-Programmed System (TPS). *Fire Safety Journal*, 91, 147–154.
- Yang, S., Hu, X., Liu, W. V., Cai, J., Zhou, X., 2018. Spontaneous Combustion Influenced by Surface Methane Drainage and Its Prediction by Rescaled Range Analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28, 2, 215-221.
- Yangdong, O., Liwen, G., Hongcui, M., 2012. Research on the Influence of Oxygen-containing Functional Group and Gas Emission by Coal Seams. *Energy Procedia*, 17, 1901-1906.
- Yu, T., Lu, P., Wang, Q., Su, J., 2013. Optimization of Ventilating Energy Distribution for Controlling Coal Spontaneous Combustion of Sealed Panel in Underground Coal Mines. *Procedia Engineering*, 62, 972-979.
- Yu, Z., Wen, H., Chen, X., Zhang, C., 2018. Integrated Approaches for Extinguishing the Fire of Coal Pillars in Contiguous Coal Seams. *Procedia Engineering*, 211, 963-971.
- Yuan, L., Smith, A.C., 2012. The Effect of Ventilation on Spontaneous Heating of Coal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 131-137.
- Yuan, L., Smith, A. C., 2011. CO ve CO₂ Emmissions from Spontaneous Heating of Coal Under Different Ventilation Rates. *International Journal of Coal Geology*, 88, 24-30.
- Zapletal, P., Koudelkova, J., Zubicek, V., Kral, T., Mokrosova, A., 2018. A New Method of Gas Drainage as a Solution for Dangerous Phenomena in Underground Coal Mines. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 7-12.
- Zhang, J., Choi, W., Ito, T., Takahashi, K., Fujita, M., 2016a. Modelling and Parametric Investigation on Spontaneous Heating in Coal Pile. *Fuel*, 176, 181-189.
- Zhang, J., Liang, Y., Ren, T., Wang, Z., Wang, G., 2016c. Transient CFD Modelling of Low-Temperature Spontaneous Heating Behaviour in Multiple Coal Stockpiles with Wind Forced Convection. *Fuel Processing Technology*, 149, 55-74.
- Zhang, J., Ren, T., Liang, Y., Wang, Z., 2016b. A Review On Numerical Solutions to Self-Heating of Coal Stockpile: Mechanism, Theoretical Basis, and Variable Study. *Fuel*, 182, 80-109.
- Zhang, L., Li, Z., He, W., Li, J., Qi, X., Zhu, J., Zhao, L., Zhang, X., 2018. Study on the Change of Organic Sulfur Forms in Coal During Low-Temperature Oxidation Process. *Fuel*, 222, 350-361.
- Zhang, Y., Bao, N., Huang, Z., Xue, B., Gao, Y., 2012. Research on Relationship Between Porosity of Coal, Amount of Air Leakage and Gradient of Wind Pressure. *Procedia Engineering*, 45, 774-779.
- Zhang, Y., Wang, J., Wu, J., Xue, S., Li, Z., Chang, L., 2015. Modes and Kinetics of CO₂ and CO Production from Low-temperature Oxidation of Coal. *International Journal of Coal Geology*, 140, 1-8.
- Zhong, X., Wang, M., Dou, G., Wang, D., Chen, Y., Mo, Y., Zhang, Y., 2015. Structural Characterization and Oxidation Study of a Chinese Lignite with the Aid of Ultrasonic Extraction. *Journal of the Energy Institute*, 88, 398-405.
- Zhou, C., Zhang, Y., Wang, J., Xue, S., Wu, J., Chang, L., 2017. Study on the Relationship Between Microscopic Functional Group and Coal Mass Changes During Low-temperature Oxidation of Coal. *International Journal of Coal Geology*, 171, 212–222.
- Zhou, Q., Zou, T., Zhong, M., Zhang, Y., Wu, R., Gao, S., Xu, G., 2013. Lignite Upgrading by Multi-Stage Fluidized Bed Pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 116, 35-43.
- Zhu, H., Song, Z., Tan, B., Hao, Y., 2013. Numerical Investigation and Theoretical Prediction of Self-Ignition Characteristics of Coarse Coal Stockpiles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, Sayfa 236- 244.
- Zhu, J., He, N., Li, D., 2012. The Relationship Between Oxygen Consumption Rate and Temperature During Coal Spontaneous Combustion. *Safety Science*, 50, 842-845.

