



Bu proje Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti tarafından finanse edilmektedir.

MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIĞI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA TEKNİK REHBERLER

YERALTI
KÖMÜR
OCAKLARINDA
KENDİLİĞİNDEN
YANMA VE
YANGIN
YÖNETİMİ

2023





MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIĞI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA
TEKNİK REHBERLER DİZİSİ

CİLT 1:
YERALTI
KÖMÜR
OCAKLARINDA
KENDİLİĞİNDEN
YANMA
VE YANGIN YÖNETİMİ

Türkiye Cumhuriyeti Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü

Emek Mahallesi Naci AYVALIOĞLU Caddesi No: 13 Pk: 06520
Emek / ANKARA
0 312 296 60 00
isggm@csgb.gov.tr
www.csgb.gov.tr/isggm
www.isginfo.org





MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIĞI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

ÖNSÖZ

Bu teknik rehber, Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti tarafından finanse edilen, Sözleşme Makamı ÇSGB Avrupa Birliği ve Mali Yardımlar Dairesi Başkanlığı olan ve İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen, “**Madencilikte İş Sağlığı ve Güvenliğinin Geliştirilmesi Projesi (MİSGEP)**” tarafından maden işyerlerindeki İSG koşullarının iyileştirilmesi kapsamında “*Yeraltı kömür ocaklarında kendiliğinden yanma ve yangın yönetimi*” konu başlığı özelinde hazırlanmıştır. Bu teknik rehber, aşağıda listelendiği gibi MİSGEP Teknik Yardım Bileşeni kapsamında hazırlanan beş ciltlik teknik rehber serisinden ilkidir.

- Cilt 1. Yeraltı kömür ocaklarında kendiliğinden yanma ve yangın yönetimi
- Cilt 2. Yeraltı madenciliğinde havalandırma tasarımı ve uygulama yöntemleri
- Cilt 3. Yeraltı kömür madenciliğinde metan drenajı
- Cilt 4. Kaza/olay inceleme ve kök neden analizi
- Cilt 5. Davranış odaklı güvenlik yönetimi

MİSGEP ile özellikle madencilik sektöründe proaktif yaklaşıma dayalı iyileştirilmiş çalışma koşullarının desteklenmesi, toplumsal farkındalığın artırılması ve tüm paydaşların konuyla ilgili bilgi seviyelerinin geliştirilmesi yoluyla daha iyi çalışma koşullarının oluşturulması hedeflenmektedir.

Bu hedef çerçevesinde hazırlanan bu rehber, hava (ve dolayısıyla oksijen) ile temasa geçen kömürün oksidasyonu, kendiliğinden yanma ve yangın yönetimi olgusunu konu almaktadır. Kendiliğinden yanma olayına yol açan etmenler, kömürlerin kendiliğinden yanma yatkinliklerinin değerlendirilmesi, ocaklarda alınacak tedbirler, tasarım yaklaşımları, izleme ve kontrol yöntemleri ile bu istenmeyen olgunun nihayetinde bir ocak yangınına dönüşebilme olasılığı nedeniyle doğabilecek sonuçları yönetmek için geliştirilecek eylem planları da bu rehberde ele alınmıştır.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER DİZİNİ	5
ÇİZELGELER DİZİNİ	6
KISALTMALAR	7
1. GİRİŞ	9
2. KÖMÜRÜN DÜŞÜK SICAKLIKTA OKSİDASYONU VE KENDİLİĞİNDEN YANMASI İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER	11
2.1 Kömürün Oksidasyonu ve Kendiliğinden Yanmasının Mekanizması	12
2.2 Kömürün Oksidasyonu Sonucu Açığa Çıkan Gaz Ürünler	13
2.3 Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlığın Tespiti ve Sonuçların Yorumlanması	14
3. KENDİLİĞİNDEN YANMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	19
3.1 Kontrol Edilemeyen Faktörler	20
3.2 Kontrol Edilebilir Faktörler	22
3.2.1 Üretim Kalınlığı	22
3.2.2 Havalandırma	22
4. KENDİLİĞİNDEN YANMA AÇISINDAN OCAK PLANLAMASI VE TASARIMI	27
4.1 Metan Drenajının Etkisi	28
5. KENDİLİĞİNDEN YANMANIN TESPİTİ	30
5.1 Telemetri Sistemleri	31
5.2 Hortum Demeti Yöntemi	32
5.3 Gaz Kromatografi (GC)	33
5.4 Kendiliğinden Yanmanın Tespiti ve İzlenmesinde Kullanılan İndeksler	34
5.4.1 Graham İndeksi (Oranı)	35
5.4.2 Young Oranı	35
5.4.3 CO Oluşum Miktarı (CO Make)	36
5.4.4 CO/CO ₂ Oranı	37
5.4.5 Willet Oranı	37
5.4.6 Jones-Trickett Oranı	37
5.4.7 Partington Oranı	37
5.4.8 Litton Oranı	38
5.4.9 Hidrokarbon Oranı	38
5.4.10 İndekslerle İlgili Genel Değerlendirme	38
6. KENDİLİĞİNDEN YANMA/AKTİF YANGINLA MÜCADELE VE KONTROL TEKNİKLERİ	39
6.1 Kazarak Uzaklaştırma	40
6.2 Su ile Doldurma	40
6.3 Enjeksiyon	40
6.4 İnertizasyon	41
6.4.1 Yapay İnertizasyon - Karbondioksit (CO ₂) Kullanımı	42
6.4.2 Yapay İnertizasyon - Azot Kullanımı	42
6.4.3 Yapay İnertizasyon - Yanma Ürünü Gazların Kullanımı	42
6.5 Barajlama	43
6.5.1 Baraj Yerinin Belirlenmesi	44
6.5.2 Barajların İnşası ve Kapatılması	45
6.5.3 Sıkılama ve Basınç Dengeleme	46
7. PANO RİSK SINIFLAMASI VE KENDİLİĞİNDEN YANMA İLE MÜCADELE EYLEM PLANI	47
7.1 Pano Risk Sınıflama Teknikleri	47
7.1.1 Risk İndeksi (Ri)	47
7.1.2 Değiştirilmiş Bystron-Urbanski İndeksi (BU İndeksi)	48
7.1.3 Önerilen Yöntem	49
7.2 Kendiliğinden Yanma Eylem Planı	51
7.2.1 Normal ve Anormal Koşulların Belirlenmesi	53
7.2.2 Kendiliğinden Yanma Eylem Planının Uygulanması	53
KAYNAKLAR	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	İki farklı kömürleşme derecesine sahip kömürün iki boyutlu moleküler modeli (a) Linyit (Hu vd., 2017) (b) Yüksek uçuculu bitümlü (Shinn, 1984).	11
Şekil 2.2	Adyabatik (sıcaklığın artırıldığı) koşullarda test edilen ülkemize ait bir linyit örneğine ait kömür sıcaklığı-zaman grafiği.	12
Şekil 2.3	Kömürün oksidasyonu sırasında ortaya çıkan reaksiyon serileri (Wang vd., 2003a).	13
Şekil 2.4	No.80-2 kömürünün kendiliğinden yanma deneyinde elde edilen oksijen tüketimi ve CO oluşum karakteristikleri (Smith ve Lazzara, 1987).	13
Şekil 2.5	-425 +212 µm boyutlu GLİ Tunçbilek – 7C/2 panosu kömürüne ait CO ve CO ₂ yayılımları (Baris, 2010'dan uyarlanmıştır).	14
Şekil 2.6	-425 +212 µm boyutlu TTK Amasra - Kalın Damar kömürüne ait CO ve CO ₂ yayılımları (Baris, 2010'dan uyarlanmıştır).	14
Şekil 2.7	Huntly East ocağı (Yeni Zelanda) kömürlerine ait kendiliğinden yanma profilleri (Beamish vd., 2000).	15
Şekil 2.8	Huntly East ocağı (Yeni Zelanda) kömürlerine ait kendiliğinden yanma profilleri (Beamish vd., 2000).	15
Şekil 2.9	Kesişme noktası sıcaklığını gösteren tipik bir eğri.	16
Şekil 2.10	Adyabatik ısıtma, düşük ve yüksek sıcaklıkta ulaşılan denge koşulları (Cliff vd., 2015'dan değiştirilerek).	17
Şekil 2.11	Amasra kalın damar örneği (-150+106 µm) için izotermal deney sonuçlarından elde edilen CO konsantrasyonları (Baris, 2010'dan uyarlanmıştır)	17
Şekil 3.1	Tabaka ayrılması nedeniyle oluşan alternatif akış hattı (Cliff vd., 2015'den değiştirilerek).	23
Şekil 3.2	Bir yeraltı kömür ocağına ait temiz havayolu ve buna bağlı havayollarının şematik görünümü.	24
Şekil 3.3	Tavandaki boşluğun doldurulması sonrasında ana yol güzergahında meydana gelen bir kendiliğinden yanma olayının şematik gösterimi.	25
Şekil 3.4	Tek girişli ilerletimli çalışan bir uzunayak göçüğünde kendiliğinden yanmaya en yatkın bölgeler (McPherson, 1993'den değiştirilerek).	25
Şekil 3.5	Tek girişli, dönümlü-göçertmeli uzun ayak göçüğünde hava kaçak güzergahları ve kritik hız bölgesi.	26
Şekil 4.1	Dönümlü bir uzunayak panosunda U-havalandırma sistemi.	28
Şekil 4.2	U-havalandırma sisteminin kullanıldığı, iki girişli, arka nefesliğe sahip tipik bir pano.	28
Şekil 4.3	U-havalandırma sisteminde göçükte metan dağılımı (Krzystolik, 1991'den değiştirilerek).	28
Şekil 5.1	Kendiliğinden yanma olayı sırasında açığa koku ve çıkan gazlar (McPherson, 1993'den değiştirilerek).	31
Şekil 5.2	Hortum demeti yönteminin bileşenleri (a) izleme odası, (b) yedili hortum demeti (c) selenoid valf manifold sistemi ve (d) vakum pompaları (Brake, 2013).	33
Şekil 5.3	Bir (a) sabit gaz kromatografı ve (b) Mikro GC.	34
Şekil 6.1	Taban yolları ve galerilerde oluşabilecek tavan boşluklarının kül ramblesi ile doldurulması. (a) dolgudan önce ve (b) dolgudan sonra.	41
Şekil 6.2	Bir maden sahasında kurulu Mineshield inertizasyon tesisi (Gillies ve Wu, 2007).	42
Şekil 6.3	Loveridge ocağında kullanılan GAG inertizasyon birimi (Gillies ve Wu, 2007).	43
Şekil 6.4	Patlamaya dayanıklı bir baraj (seal) kesitine örnek (McPherson, 1993).	44
Şekil 6.5	Barajlanan bir alandaki atmosfer değişiminin Coward-Jones üçgeni üzerinde gösterimi (Zipf vd., 2007'den değiştirilerek).	44
Şekil 6.6	Pasif basınç odalarının oluşturulması ve basınç dengeleme.	46
Şekil 6.7	Bir aktif basınç denge odası (McPherson, 1993'ten değiştirilerek).	46
Şekil 7.1	Tehlike yönetim planı akım şeması.	52
Şekil 7.2	Kendiliğinden Yanma Eylem Planı'nın temel öğeleri.	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	FCC indeksine göre risk sınıflandırması.	16
Çizelge 3.1	Singh (2013) ve Cliff vd. (2015)'e göre kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler.	20
Çizelge 5.1	Graham İndeksi değerleri ve yorumu.	35
Çizelge 5.2	Baraj arkasından alınan gaz örneklerine ait analiz sonuçları ve hesaplanan Graham indeksi değerleri.	35
Çizelge 5.3	Young Oranı değerleri.	36
Çizelge 5.4	CO Oluşum Miktarı değerleri ve yorumu (MDG-1006, 2011).	36
Çizelge 5.5	Ülkemizden bir ocak yangınına ait CO/CO ₂ değerleri.	37
Çizelge 5.6	Jones-Trickett Oranı değerleri ve değerlendirilmesi (Strang ve MacKenzie-Wood, 1985'ten değiştirilerek).	37
Çizelge 5.7	Hidrokarbon Oranı değerleri ve yorumu.	38
Çizelge 7.1	FCC indeksine göre risk sınıflandırması.	47
Çizelge 7.2	Çevre İndeksi (Ç.İ).	48
Çizelge 7.3	Risk İndeksi (Rİ).	48
Çizelge 7.4	Değiştirilmiş Bystron-Urbanski İndeksinde parametreler ve atanan değerler.	48
Çizelge 7.5	Değiştirilmiş Bystron-Urbanski (BU) İndeksi'nde risk değerlendirmesi.	49
Çizelge 7.6	Önerilen risk değerlendirme yöntemi (Didari, 2015).	49
Çizelge 7.7	Önerilen yöntemde risk sınıflaması.	50
Çizelge 7.8	Önerilen yöntemde göre örnek bir risk değerlendirmesi.	50
Çizelge 7.9	Çoklu girişe sahip bir uzunayak panolarına sahip bir yeraltı kömür ocağından yangın, patlama, zehirli ya da boğucu atmosfere neden olacak kendiliğinden yanma olayına karşı hazırlanmış Kendiliğinden Yanma Eylem Planı (Anglo American, 2022'den değiştirilerek).	55

MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIĞI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BU	: Bystron-Urbanski
CPT	: Kesişme Noktası Sıcaklığı (Crossing Point Temperature)
CO	: Karbonmonoksit (Carbon Monoxide)
Çİ	: Çevre İndeksi
ÇSGB	: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz (Differential Thermal Analysis)
ERZ	: Patlama Risk Bölgesi (Explosion Risk Zone)
FCC	: Feng, Chakravorty, Cochrane
GAG birimi	: Jet Motorlu Mobil İnertizasyon (Nötrleştirme) Ünitesi (Lehçe; Gorniczy Agregat Gasniczy)
GC	: Gaz Kromatografı (Gas Chromatography)
GI	: Graham İndeksi (Graham Index)
GLİ	: Garp Linyitleri İşletmesi
ICCP	: Uluslararası Kömür Petrografisi Komitesi (International Committee of Coal Petrography)
İSG	: İş Sağlığı ve Güvenliği
İSGGM	: İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization)
LTCC	: Göçertmeli Uzunayak Yöntemi (Longwall Top Coal Caving)
MİSGEP	: Madencilikte İş Sağlığı ve Güvenliğinin Geliştirilmesi Projesi
MSA	: Maden Güvenlik Cihazları Firması (Mine Safety Appliances Company)
MSHA	: Madenlerde Sağlık ve Güvenlik İdaresi Yönetimi (Mine Safety and Health Administration)
NIOSH	: Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü (National Institute of Occupational Safety and Health)
NSW	: New South Wales (Avustralya'da bir eyalet)
ppm	: milyonda bir birim (parts per million)
Rİ	: Risk İndeksi
THC	: Toplam Hidrokarbon Konsantrasyonu (Total Hydrocarbon Concentration)
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
WITS-EHAC	: Witwatersrand Patlama Tehlikeleri Danışma Komitesi (Witwatersrand Explosion Hazards Advisory Committee)



1. GİRİŞ

Kömür, özellikle 20 yy. başında tüm dünyada elektrik üretimi, metalürji ve kimya endüstrisi gibi önemli sanayi kollarında kullanılan ve günümüzde de halen önemini yitirmemiş temel fosil yakıtlardan biridir. Kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanması ise yeraltı kömür ocaklarında ciddi iş sağlığı ve güvenliği zafiyetleri yaratmasının yanı sıra ciddi ekonomik kayıplara sebep olması nedeniyle hem geçmişte hem de özellikle son yıllarda tüm dünyada artan enerji verimliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliği endişelerinin artmasıyla büyük önem kazanmıştır.

Kömürün kendiliğinden yanması kömür madenciliğinde, kömürün depolanması ve taşınması sırasında sıklıkla yaşanan bir olaydır. Kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanması can kayıplarının yanı sıra, yeraltı kömür ocaklarında yangınlara, gaz ve toz patlamalarına, hem ocak atmosferine hem de atmosfere zehirli gazların yayılmasına, kömür rezervlerinde kayıplara ve kömür kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle kömürün kendiliğinden yanmasının özellikle Çin, Hindistan, ABD, Avustralya, Güney Afrika ve Polonya gibi önemli kömür üreticisi ülkelerde uzun yıllardır ciddi sorunlara yol açtığı bilinmektedir (Li vd., 2019; Danish ve Onder, 2020). Gangopadhyay (2007) Hindistan'ın Jharia bölgesindeki yangınların bölgenin sıcaklığını arttıracak, tarıma engel olacak boyutlara ulaştığını, Çin'in özellikle kuzey yarısındaki kömür yangınları nedeniyle her sene 200 milyon tondan fazla yüksek kalite kömürün kaybedildiğinin tahmin edildiğini bildirmiştir. Avustralya'da yeraltı kömür ocağında kendiliğinden yanma nedeniyle yaşanan son ölümlü kazanın Moura 2 No'lu ocakta 1994 yılında yaşandığı ancak yine de ortalama olarak her yıl bir yeraltı ocağında kendiliğinden yanma riski nedeniyle bir ocağın tahliye edildiğine dikkat çekilmiştir (Cliff vd., 2015). Ülkede son yıllarda kendiliğinden yanma olaylarının sıklığı ve sayısının azaldığı ve oluşan kendiliğinden yanma olaylarının risk yönetimi uygulamalarında yapılan hatalardan kaynaklandığı belirtilmiştir (Ham, 2005). Amerikan İş Sağlığı ve Güvenliği Ulusal Enstitüsü (NIOSH, 2022) verilerine göre 1978-1990 arasında rapor edilen 164 yangının %15'inin kendiliğinden yanma nedeniyle çıktığını, 1990-2006 arası 20'den fazla yeraltı kömür ocağının kendiliğinden yanma olayına maruz kaldığını ve toplam 25 yangının kendiliğinden yanma nedeniyle çıktığını rapor etmiştir. Enstitü ayrıca düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin üretildiği ocakların ve daha yüksek metan içeriğine sahip derin kömür ocaklarında madenciliğin artması nedeniyle bu ocaklarda kendiliğinden yanma olaylarının ve sonucunda oluşabilecek patlama tehlikesinin artacağı tahmininde bulunmuştur.

Ülkemizde ise kendiliğinden yanma olaylarının kayıt altına alındığı bir veri tabanı bulunmamasına rağmen yeraltı kömür ocaklarımızda kendiliğinden yanma olaylarının olduğu bilinmektedir. Bu rehberin hazırlandığı Haziran 2022 itibarıyla Zonguldak taşkömürü havzasında iki yeraltı kömür ocağında aktif kendiliğinden yanma olayı bulunmaktadır.

Kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanma ile ilgili çalışmalar 1900'lü yılların başlarında yapılmaya başlanmıştır (Parr ve Kressman, 1911; Winmill, 1913/14, 1914/15, 1916a, 1916b; Parr ve Milner, 1924). Bu tarihlerden sonra yapılan sayısız çalışmalar kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanma mekanizmasını ortaya koymaya, olay üzerinde etkili faktörleri saptamaya ve çeşitli aletlerin kullanıldığı yöntemler kullanarak olayı tespit etmeye ve etkilerini anlamaya yönelik olmuştur.

100 yılı aşkın bir süredir yapılan çok sayıda araştırmaya rağmen konunun halen tam anlaşılammış olması ve yeraltı ocaklarında kendiliğinden yanma olaylarının günümüzde de sıklıkla yaşanıyor



Bu rehber kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanma mekanizmasının ve bu olaylara neden olan öğelerin daha iyi anlaşılmasını sağlamayı hedeflemektedir.

olması konuya olan ilginin artarak devam etmesine neden olmuştur. Bunun temel nedeni kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanmasının kömürün yapısıyla, jeolojik koşullar ve madencilik koşullarının yanı sıra ocak havalandırmasıyla yakından ilişkili oluşudur. Bu nedenlerle, kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanması olayları işletilen kömür damarına ve ocağa özel olarak nitelendirilmeli ve bu olayların tespiti ve önlenmesine ilişkin olarak temel bilgiler yanında özel koşullar dikkatle değerlendirilmelidir.

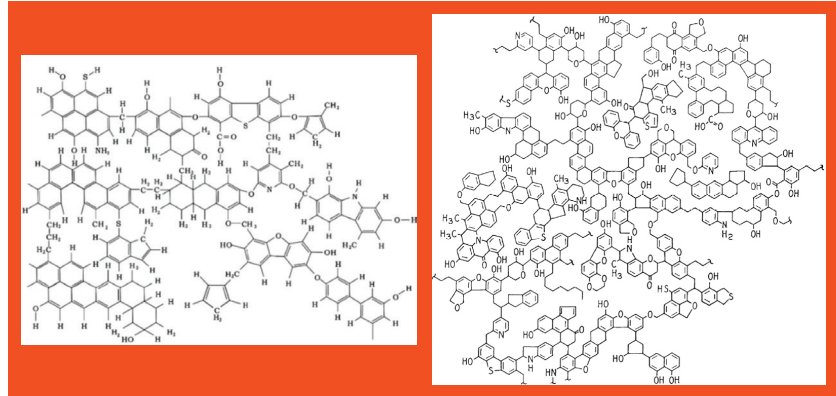
Bu kapsamda bu rehber; kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanma mekanizmasının ve bu olaylara neden olan öğelerin daha iyi anlaşılmasını, oksidasyon ve kendiliğinden yanma olaylarının tespitinde kullanılan yöntemlerin/indekslerin önemini ve nasıl yorumlanması gerektiğini, ocak planlama ve tasarımında dikkat edilmesi gereken konuların tartışılmasını, oksidasyon/kendiliğinden yanma olayları ve aktif yangınlarla mücadele yöntemlerinin anlatılmasını ve yeraltı üretim panolarındaki kendiliğinden yanma risklerini belirlemek için pratikte uygulanacak risk sınıflandırma tekniklerinin sunulmasını hedeflemektedir.

2. KÖMÜRÜN DÜŞÜK SICAKLIKTA OKSİDASYONU VE KENDİLİĞİNDEN YANMASI İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER

Kömür, çok farklı özelliklere fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, oldukça heterojen yapıda bir malzemedir. Genel olarak kömürün kimyasal kompozisyonu; uçucu madde, sabit karbon, nem ve mineral madde içeriği ile karakterize edilirken, kömürü oluşturan temel elementler C, H, O, N ve S'dir. Ayrıca, kömürler "maseral" olarak adlandırılan mikroskobik bileşenlere sahiptir. Aynı kömürleşme derecesine sahip olsalar bile kömürler oluşumları itibarıyla maseraller ve kimyasal kompozisyon açısından büyük farklılıklar gösterebilmektedirler. Bunun yanı sıra, heterojen yapısı nedeniyle kömürlerin özellikle oksidasyon ve kendiliğinden yanmasında rol oynayan gözeneklilik ve iç yüzey alan özellikleri de çok değişken olabilmektedir. Temel olarak düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin yüksek kömürleşme derecesine sahip kömürlere göre kendiliğinden yanmaya daha yatkın olduğu bilinmekle birlikte yukarıda sayılan özellikleri nedeniyle kendiliğinden yanma gibi özel olaylarda linyitten antrasite kadar farklı kömürleşme derecesine sahip kömürlerin davranışlarının anlaşılması oldukça karmaşık olabilmektedir. Şekil 2.1'de bir linyitin ($C_{184}H_{155}O_{20}N_3S_3$) ve yüksek uçuculu bitümlü bir kömürün ($C_{661}H_{561}O_{74}N_{11}S_8$) iki boyutlu moleküler yapıları görülmektedir. Elementel kompozisyonadaki farklılıkların yanı sıra iki kömüre ait moleküler yapı incelendiğinde fonksiyonel gruplardaki (hidroksil, karbonil, eter ve karboksilik) farklılıklar da dikkat çekmektedir. Kimyasal ve moleküler yapı açısından böylesi farklılıkları olan iki kömürün oksidasyon potansiyellerinin de farklı olacağı açıktır.



Kendi kömürünün oksidasyon/kendiliğinden yanma karakteristiklerini belirle ve "ocağına özel" koşulları tespit et!



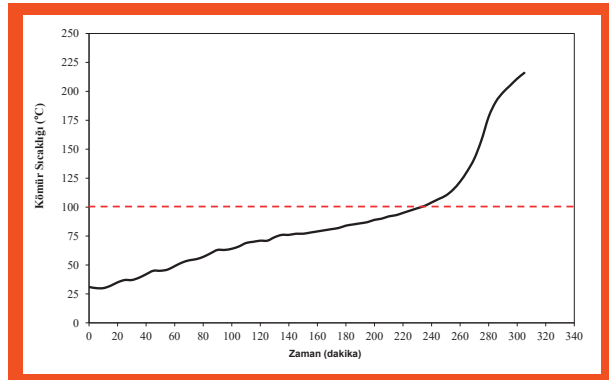
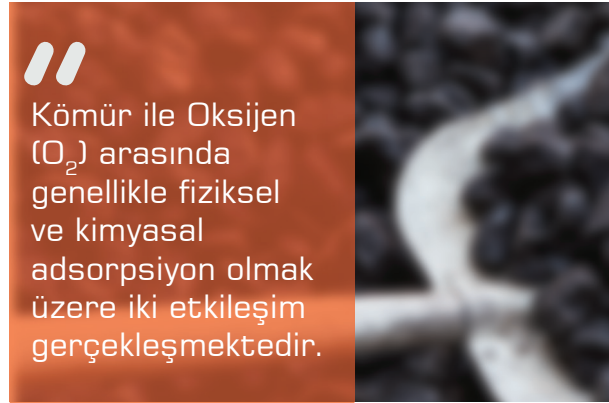
Şekil 2.1 İki farklı kömürleşme derecesine sahip kömürün iki boyutlu moleküler modeli (a) Linyit (Hu vd., 2017) (b) Yüksek uçuculu bitümlü (Shinn, 1984).

Kömürler kendiliğinden yanma açısından minimum kendiliğinden ısınma sıcaklığı olarak bilinen kritik bir sıcaklığa sahiptir (McPherson, 1993). Bu kritik sıcaklık, ekzotermik reaksiyonun sürdüğü ya da ısının reaksiyonu hızlandırmaya başladığı en düşük sıcaklıktır. Bu nedenle, eğer ısı dengeye erişilmeden önce sıcaklık kendiliğinden ısınma sıcaklığına erişirse oksidasyon hızlanacaktır. Bu durumda, sıcaklık hızlıca artmaya başlayacak, reaksiyon daha da hızlanacak ve kömür alevli bir şekilde yanana kadar bu durum sürecektir.

Kömürün havadaki oksijenle teması geçmesinden hemen sonra kömürün oksidasyona maruz kalması, doğal olarak, kendiliğinden yanma ile ilgili yapılacak çalışmalar ve çıkarımlarda kömürün oksidasyon mekanizmasının çok iyi anlaşılmasını gerektirmektedir. Zira düşük sıcaklık koşullarında basit bir oksidasyonla başlayan bu olay, kömür ve oksijenin kimyasal olarak

reaksiyona girmesi nedeniyle ortaya çıkan ısının ortamdaki uzaklaştırılmaması ve bu ısının katalizör görevi görmesi nedeniyle kendiliğinden yanmaya neden olabilmekte ve buna bağlı olarak yeraltı kömür ocaklarında ciddi tehlikeler ortaya çıkabilmektedir. Bunun yanı sıra, kendiliğinden yanma olayına yol açamasa bile oksidasyon, kömürün moleküler yapısını bozabilmekte, kütlesini etkilemekte ve elementel kompozisyonunun değişmesine neden olabilmektedir.

100°C üzerindeki sıcaklıklarda kömürün bünyesinde meydana gelen kimyasal bozunmalar ve değişimlerin yanı sıra oldukça yüksek oksijen tüketimi nedeniyle, kömürün düşük sıcaklıklarda oksidasyonu genel itibarıyla 0 – 100°C arasındaki sıcaklıkları kapsamaktadır (Carpenter ve Giddings, 1964; Wang vd., 2003a). Ayrıca, yeraltı kömür ocaklarında kömür sıcaklığının 100°C üzerinde olmasının kendiliğinden yanma olayının kontrolden çıkmış olduğunu göstereceği bir gerçektir. Zira böylesi sıcaklıklarda yapısal bozunmaların yanı sıra kömürün bünye nemi de kömürü terk etmeye başlamakta ve kömür sıcaklığı oldukça hızlı şekilde artmaya başlamaktadır. Kendiliğinden yanmaya yatkınlığı yüksek olarak tespit edilen ülkemize ait bir linyit damarına ait deney sonucu incelendiğinde kömür sıcaklığının 30°C'den 100°C'ye yaklaşık 235 dakikada ulaştığı ve bu noktadan sonra ise 45 dakikada 180°C'ye çıktığı ve ekspanansiyel bir artış sergilediği görülmektedir (Şekil 2.2). Dolayısıyla yeraltı kömür ocaklarında bu aşamaya ulaşmış bir kendiliğinden yanma olayını kontrol altına almak oldukça zor olacaktır.



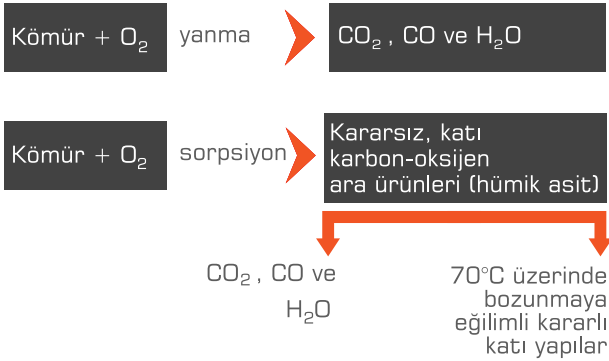
Şekil 2.2 Adyabatik (sıcaklığın artırıldığı) koşullarda test edilen ülkemize ait bir linyit örneğine ait kömür sıcaklığı-zaman grafiği.

2.1 Kömürün Oksidasyonu ve Kendiliğinden Yanmasının Mekanizması

Kömür oksijenle temas ettiğinde kömürün oksidasyona maruz kaldığının ilk göstergesi oksijen tüketimidir. Oksijen (O_2) tüketimi ise O_2 'nin adsorpsiyonu ile ortaya çıkmaktadır. Adsorpsiyon, bir katı ile temas eden gaz moleküllerinin katının yüzeyine bağlanması olarak tanımlanır. Eğer gaz molekülleri katının bünyesine katılıyorsa bu durumda bu olay ise absorpsiyon olarak adlandırılır.

Kömür ile O_2 arasında genellikle fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon olmak üzere iki etkileşim gerçekleşmektedir (Ponec vd., 1974). Fiziksel adsorpsiyonda gaz molekülleri ile katı yüzeyi arasındaki kuvvetler zayıftır. Bu nedenle adsorbe olmuş gaz moleküllerinin katı yüzeyinden ayrılması daha kolaydır. Kimyasal adsorpsiyonda ise katı yüzeyi ve gaz molekülleri arasındaki kuvvetler daha büyüktür. Fiziksel adsorpsiyon tek ya da çoklu katmanlar halinde meydana gelirken kimyasal adsorpsiyon tek katman ile sınırlı olmaktadır (Wang vd., 2003a). Sevenster (1961) ve Jakab vd. (1989) 0°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda O_2 'nin kömüre adsorpsiyonu sırasında baskın işlemin kimyasal adsorpsiyon olduğunu tespit etmişlerdir. O_2 'nin kömür yüzeylerine adsorpsiyonu (oksidasyonu) ekzotermik bir etkileşimdir. Kömür tipine ve tüketilen oksijen miktarına bağlı olarak O_2 'nin kömüre kimyasal olarak adsorpsiyonu sonucunda fiziksel adsorpsiyondan daha fazla ısı açığa çıkmaktadır. Adsorpsiyonun kömür yüzeylerinde oluşması nedeniyle yüzey alanı büyük olan kömürlerde oksidasyon hızı ve ısınma daha fazla olacaktır. Dolayısıyla, ezilmiş, kırılmış, parçalanmış kömürlerin bulunduğu ocak kesimlerinde oksidasyon ve kendiliğinden yanma potansiyelinde artış olacaktır. Tane boyutu küçülmemiş, sağlam bir kömür kütlesi için ise oksidasyon ve kızışma potansiyeli, O_2 'nin adsorbe olabileceği yüzey alanını artırması nedeniyle ancak geçirgenliğin artmasıyla sağlanacaktır.

Günümüze kadar kömürün oksidasyon mekanizması tam olarak anlaşılamamış olsa da mevcut durumda kabul gören teoriye göre doğrudan yanma ve sorpsiyon (adsorpsiyon ve desorpsiyon) olmak üzere iki reaksiyon serisi öngörülmektedir (Şekil 2.3). Bu reaksiyon serilerinden doğrudan yanma ile ilgili herhangi bir kanıt elde edilememiştir. Bunun yanı sıra, sorpsiyon reaksiyonunda (bir maddenin diğerine bağlandığı fiziksel ve kimyasal bir süreç) ise; (i) O_2 'nin kömür yüzeylerinde kimyasal olarak adsorpsiyonu sonucu kararsız karbon-oksijen yapılarının oluşumu (peroksitler, hidroperoksitler gibi), (ii) ortaya çıkan kararsız katı oksijenli ara ürünlerin gaz ürünlere ve hidroksil, karbonil ve karboksil gruplarını da içeren katı ürünlere kararlı ürünlere ayrılması ve (iii) bu kararlı yapıların bozunması ve bunu takiben kömürde oksidasyon için yeni yüzeylerin ortaya çıkması söz konusudur.



Şekil 2.3 Kömürün oksidasyonu sırasında ortaya çıkan reaksiyon serileri (Wang vd., 2003a).

2.2 Kömürün Oksidasyonu Sonucu Açığa Çıkan Gaz Ürünler

Kömürün oksidasyonu sonucunda ocak atmosferinde ya da büyük ölçekli testlerde tespit edilen gazlar CO_2 , CO, H_2O , C_xH_y formundaki hidrokarbonlar ve eser miktarda H_2 ve N_2 'dir (Coward, 1957; Miron vd., 1990; Smith vd., 1991; Cliff vd., 1996; Baris vd., 2012). Bu gazlardan C_xH_y formundaki hidrokarbonlar ile N_2 ve H_2 gazlarının laboratuvar deneylerinden nadiren gözlenmesi, bu gazların oksidasyon ürünü olmadıklarını, aksine bu gazların kömürleşme sürecinde oluştuğu, bir kısmının kömürün bünyesinde tutulduğu ve deneyler sırasında öğütülmüş örnekler kullanıldığı için tespit edilememeleri şeklinde açıklanmaktadır (Wang vd., 2003a). Bunun yanı sıra, Davidi vd. (1995) küçük ölçekli deneylerde hidrokarbonların kimyasal olarak oluşmalarından ziyade kömürden desorbe olduklarını belirtmiştir. Ayrıca, etilen (C_2H_4), asetilen (C_2H_2) ve propilen (C_3H_6) gibi gazların varlığı kendiliğinden yanmaya işaret etse de bu gazlar ileri oksidasyon ürünleri olup yüksek sıcaklıklarda ($> 90^\circ\text{C}$) ortaya çıkmaktadırlar (Cliff vd., 2015). Ayrıca bu gazlar, ocaklarda bir kendiliğinden yanma olayında bile ancak ppm (milyonda bir birim) mertebesinde tespit edilebilmektedir. Wei vd. (2020) asetilenin (C_2H_2) kömürün yoğun yanma aşamasına geçtiğini göstermesine rağmen yüksek sıcaklıklarda ($>167^\circ\text{C}$) ortaya çıkması nedeniyle indeks gaz olarak kullanılmayacağını belirtmiştir.

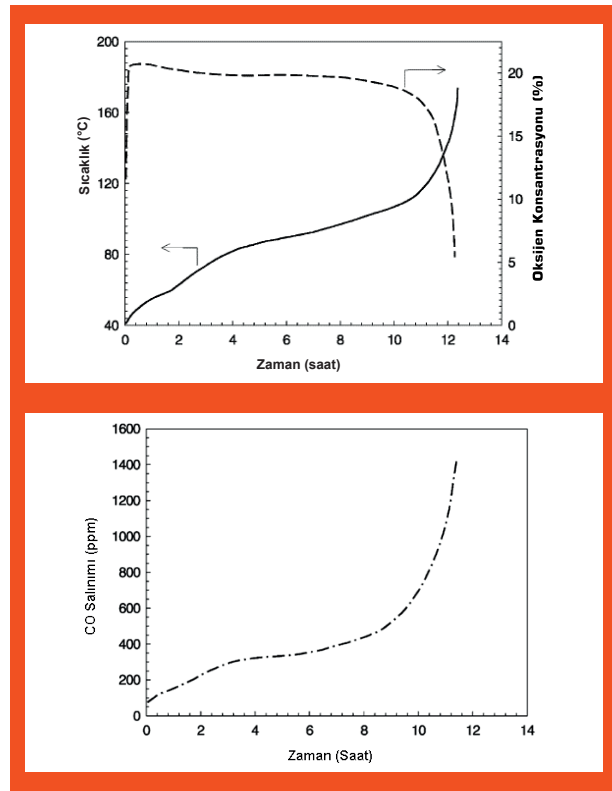
Kömürün oksidasyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan ilk gaz ürünler CO ve CO_2 'dir. Bu gazların yayılımı ise sıcaklıkla yakından ilişkilidir. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere bir adyabatik fırında kendiliğinden yanma deneylerine tabi tutulan bir kömürün oksijen tüketim ve CO oluşum karakteristikleri görülmektedir. Sıcaklığın 40°C 'den 80°C 'ye gelmesiyle oluşan CO miktarının yaklaşık 50 ppm'den 300 ppm'e yükseldiği, artan sıcaklıklarda ise CO salınımının 1000 ppm üzerine çıktığı ve belirli bir andan sonra ekspansiyel olarak arttığı açıkça görülmektedir.

Adyabatik koşullarda test edilen örneklerin yanı sıra sabit sıcaklıkta (izotermal) yapılan deneylerde de ciddi miktarlarda CO ve CO_2 oluşumuna rastlanmaktadır. Özellikle kendiliğinden yanmaya yatkınlığının yüksek olduğu

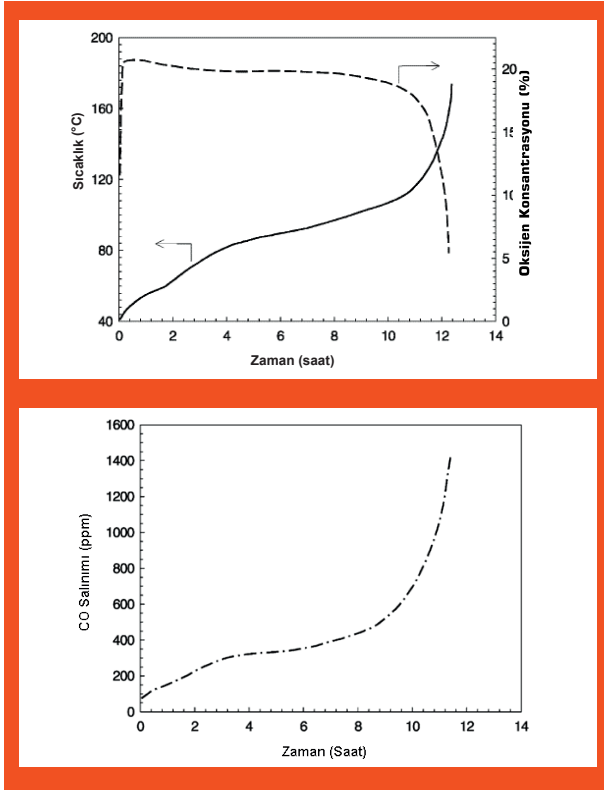
bilinen kömürler düşük sıcaklıklarda dahi ciddi miktarlarda CO ve CO_2 yayılımı gösterebilmektedir. Şekil 2.5 ve 2.6 ülkemizden biri linyit (GLİ Tunçbilek, Kütahya) ve biri de taşkömürü (TTK Amasra Kalın Damar, Zonguldak) olmak üzere izotermal sıcaklıklarda oksidasyon deneylerine tabii tutulan iki farklı kömürün oksidasyonundan kaynaklı CO ve CO_2 yayılımlarını göstermektedir. 40°C gibi düşük bir sıcaklıkta dahi ciddi CO ve CO_2 yayılımlarının tespit edilmiş olması ve özellikle sıcaklığın 90°C artırılmasıyla ortaya çıkan CO ve CO_2 miktarlarındaki artışların büyüklüğü dikkat çekicidir.

Şekil 2.5 ve 2.6'dan da anlaşılacağı gibi kömürün oksidasyonu sonucunda ortaya çıkan ana ürün CO_2 'dir. Bu bulgu birçok araştırmacı tarafından da teyit edilmiştir (Kelemen ve Freund, 1990; Clemens vd., 1991; Krishnaswamy vd., 1996; Wang vd., 2003b; Baris vd., 2012). Ancak, CO_2 'nin havanın bileşiminde bulunuyor olması ve diğer kaynaklardan (nefes, içten yanmalı motorlar, suda çözünme vb.) ocak ortamına yayılabilmesi sebebiyle oksidasyon ve kendiliğinden yanmanın tespiti açısından izlenmesi gereken en uygun gazın CO olduğu değerlendirilmektedir.

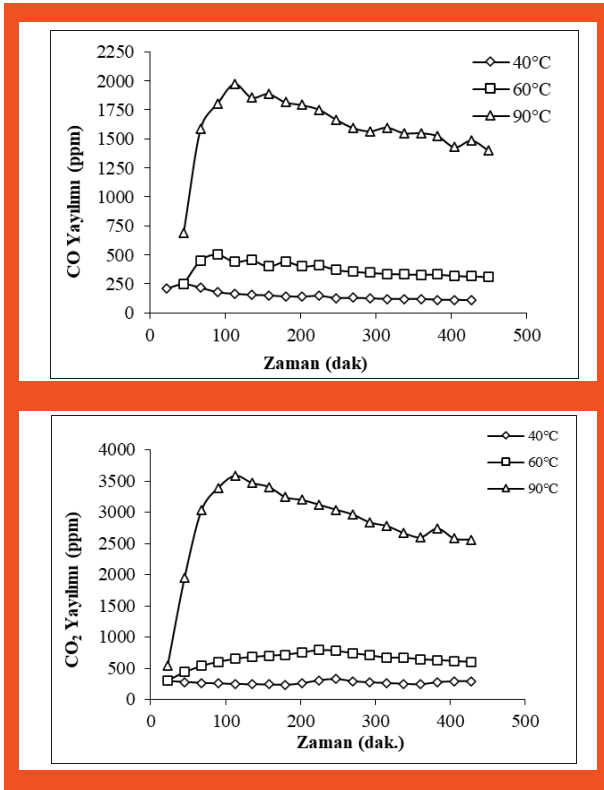
Kendiliğinden yanmanın ilerlemesi ve daha yüksek sıcaklıklara ($>120-130^\circ\text{C}$) ulaşılması durumunda metan (CH_4), hidrojen (H_2), etilen (C_2H_4) ve etan (C_2H_6) gibi yanıcı/patlayıcı gazlar da ortaya çıkabilmekte ve ocaklarda patlayıcı ortam oluşturabilmektedir (Cliff vd., 2015).



Şekil 2.4 No.80-2 kömürünün kendiliğinden yanma deneyinde elde edilen oksijen tüketimi ve CO oluşum karakteristikleri (Smith ve Lazzara, 1987).



Şekil 2.5 -425 +212 µm boyutlu ülkemizden bir linyit örneğine ait CO ve CO₂ yayılımları (Baris, 2010'dan uyarlanmıştır).



Şekil 2.6 -425 +212 µm boyutlu ülkemizden bir taşkömürü örneğine ait CO ve CO₂ yayılımları (Baris, 2010'dan uyarlanmıştır).

“Kendiliğinden yanmanın erken tespiti ve olayla mücadele için “ocağa özel” koşulların ortaya konulması çok önemlidir.”

2.3 Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlığın Tespiti ve Sonuçların Yorumlanması

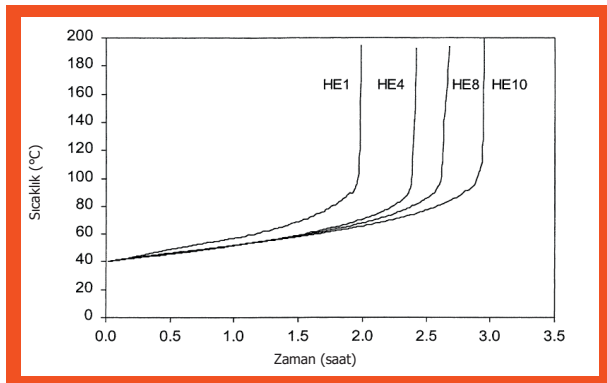
Kömürün oksidasyon ve kendiliğinden yanmaya yatkınlığının tespit edilebilmesi için günümüze kadar çok çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Temel itibarıyla bu yöntemler; kütle değişimi, ısı oluşumu, oksijen tüketimi ve gaz ürünlerin incelenmesini de içeren çok çeşitli amaçlar için geliştirilmiştir. Kendiliğinden yanmaya yatkınlığın belirlenmesi için geliştirilen testler ya da indekslerden hiçbirinin evrensel ölçekte kullanımı bulunmamaktadır. Bunun nedeni, kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığının sadece kömürün kendisine bağlı olmaması, aynı zamanda fiziksel durumuna, ocaklardaki psikrometrik (bağıl nem, sıcaklık) koşullara ve hava kaçakları gibi madencilik yöntemi ve planlamadan kaynaklanan birçok farklı faktöre bağlı olmasıdır. Kömürün oksidasyon ve kendiliğinden yanmasının çok çeşitli faktörlere bağlı olması nedeniyle laboratuvarında uygulanan testlerin evrensel ölçekte başarılı olamaması sürpriz değildir.

Geliştirilen yöntemler arasında yoğunlukla kullanılanlar; adyabatik ısıtma, izotermal ısıtma, diferansiyel termal analiz (DTA) ve kesişme noktası sıcaklığı gibi basit (tekil) indeksler, Feng-Chakravorty-Cochrane (FCC) ve WITS-EHAC gibi çoklu indeksler, kömürün kimyasal özelliklerini kullanarak kendiliğinden yanmaya yatkınlığın belirlenmesi için geliştirilen regresyon analizi çalışmaları, eksper sistemler ve daha büyük boyutlu örneklerin test edilebildiği büyük ölçekli sistemler bulunmaktadır.

Yukarıda sayılan tüm yöntemler dünyada sıklıkla kullanılıyor olsa da bu rehberde Avustralya'da başarılı bir şekilde uygulanan “Adyabatik Isıtma Yöntemi” ele

alınacaktır. Ülkemizde kullanımı diğerlerine göre daha yaygın olan, kurulumunda özel analitik cihazlara daha az ihtiyaç duyulan ve diğer yöntemlere göre daha kolay uygulanabilen “Kesişme Noktası Sıcaklığı Yöntemi” ile sonuçların değerlendirilmesi için kullanılan FCC indeksi üzerinde durulacaktır.

Kendiliğinden yanmaya yatkınlık için Avustralya’da kullanılan ve başarılı sonuçlar üreten adyabatik ısıtma yöntemi, sıcaklığı kontrol edilebilir bir fırın içerisinde bulunan, içine kömür örneği konmuş ve ısı kaybının engellenmesi için tasarlanmış bir reaksiyon kabında gerçekleştirilmektedir. Kömür örneği fırında ön ısıtmaya tabi tutulduktan ve kömür sıcaklığıyla fırın sıcaklığı eşitlendikten sonra reaksiyon kabı içerisine hava (ya da oksijen) verilmektedir. Bu yöntemde fırın sıcaklığı otomatik olarak örnek sıcaklığına eşit olacak şekilde kontrol edilmekte ve böylece ısı kaybı en aza indirilmektedir. Şekil 2.7’de adyabatik ısıtmaya tabi tutulan kömür örneklerinin ısınma eğrileri görülmektedir. Bu eğriler incelendiğinde kömür örneklerinin sıcaklıkla bağlantılı olarak iki farklı eğilim gösterdiği görülmektedir. Kömür örnekleri yaklaşık 70°C’ye erişene kadar doğrusal bir artış eğilimindeyken sıcaklığın 80°C’yi aşmasından sonra ekspanansiyel olarak bir artış eğilimi sergilemektedir. Bu eğilim, daha önce açıklandığı şekilde, bu sıcaklıklarda kömürün yapısında bozulmaların olduğunu doğrular niteliktedir. Adyabatik ısıtma deneyleri, günümüzde özellikle Avustralya’da kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının tespiti için Humphreys vd. (1981) tarafından geliştirilen ve kömürlerin ısınma eğrilerindeki doğrusal kısmın (yaklaşık 70°C’a kadar) eğimini değerlendiren R70 İndeksi ’nin tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

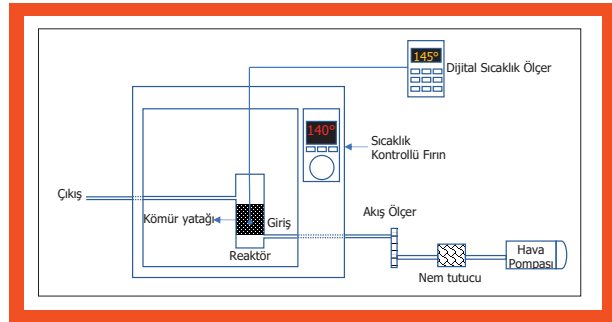


Şekil 2.7 Huntly East ocağı (Yeni Zelanda) kömürlerine ait kendiliğinden yanma profilleri (Beamish vd., 2000).

Kesişme Noktası Yöntemi’nde ise sıcaklık kontrollü bir fırının sıcaklığı dakikada 0,5°C olacak şekilde arttırılmakta, fırın içerisine yerleştirilmiş bir reaktör içindeki 200 mesh altına öğütülmüş 35-70 g miktarda kömür örneğinden 100 ml/dak debide hava geçirilmekte ve böylece kömürün oksidasyonu sağlanmaktadır (Şekil 2.8). Deney sırasında hem fırın hem de örnek sıcaklıkları (bir termopçip yardımıyla) düzenli aralıklarla kaydedilmektedir. Kömür sıcaklığı ile fırın sıcaklığının kesiştiği sıcaklık “Kesişme Noktası

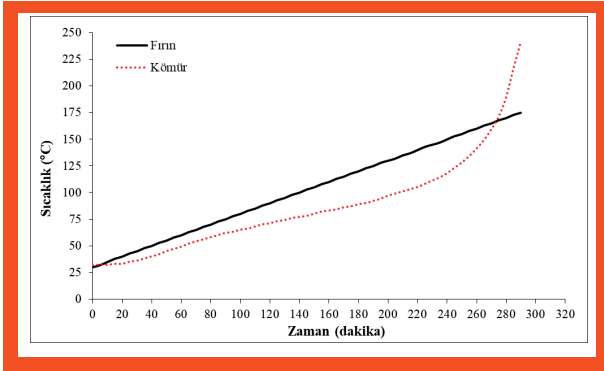
Sıcaklığı (Crossing Point Temperature-CPT)” olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.9). Deneyler kömür sıcaklığı 220°C’yi aşana kadar sürdürülmektedir. Bu yöntemde, düşük kesişme noktası sıcaklıkları test edilen kömürün kendiliğinden yanmaya daha fazla yatkın olduğunun göstergesidir. Yöntem esas itibarıyla adyabatik ısıtma yöntemine benzemektedir ve kömür davranışı R70 indeksinin hesaplandığı eğriye benzer bir profil sergilemektedir. Ülkemizde Ege Bölge’sinde bulunan bir linyit damarına ait kendiliğinden ısınma profilini gösteren Şekil 2.9’dan da görülebildiği üzere kömür sıcaklığı yaklaşık 80°C’ye kadar doğrusal olarak artmaktadır. Bunu takiben kömür bünyesinde yapısal bozulmalar başlamakta, bunu kömürdeki nemin buharlaşması takip etmekte ve kömürde meydana gelen ekzotermik reaksiyon nedeniyle kömürün sıcaklığı ekspanansiyel olarak artmaktadır.

Düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerde risk daha yüksek olmasına karşın tüm kömürlerin potansiyel olarak kendiliğinden yanmaya neden olabileceği unutulmamalıdır.



Şekil 2.8 Huntly East ocağı (Yeni Zelanda) kömürlerine ait kendiliğinden yanma profilleri (Beamish vd., 2000).

Kesişme noktası sıcaklığı gibi basit (tekli) indeksler bazı durumlarda koklaşabilir kömürler ve şeyl gibi düşük nem içeriğine sahip kömürlerde tutarlı sonuçlar vermediğinden Feng, Chakravorty, Cochrane (FCC), Witwatersrand-Explosion Hazards Advisory Committee (WITS-EHAC) ve Mahadevan-Rumlu indeksi gibi çoklu indekslerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur (Feng vd., 1973; Mahadevan ve Rumlu, 1985; Gouws ve Wade, 1989). Kesişme noktası yöntemini kullanarak bir risk sınıflandırması yapması ve ülkemizde yaygın olarak kullanılması nedeniyle bu rehberde FCC indeksi üzerinde durulacaktır.



Şekil 2.9 Kesişme noktası sıcaklığını gösteren tipik bir eğri.

FCC indeksinin hesaplanmasında temel olarak kesişim noktası yönteminden elde edilen veriler kullanılmaktadır. Bu indeks Eşitlik 2.1'e göre hesaplanmaktadır (Feng vd., 1973).

$$FCC_{\text{indeks}} = \frac{110^{\circ}-220^{\circ} \text{ Arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı}}{\text{Kesişme Noktası Sıcaklığı}} \times 1000 \quad (2.1)$$

Yukarıda verilen eşitlikten anlaşılacağı üzere, FCC indeksinin hesaplanabilmesi için kesişim noktası yöntemiyle gerçekleştirilen deneylerde kesişim noktasının belirlenmesi ve kömür sıcaklığının 110°C'den (t1 zamanı) 220°C'ye (t2 zamanı) ne kadar sürede çıktığının $[(110/(t2-t1))]$ hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda ortalama sıcaklık artışının birimi (°C/dak) olmakta ve kesişim noktası sıcaklığının birimi de (°C) olduğundan FCC indeksinin birimi ise (dak⁻¹) olmaktadır. Feng vd. (1973), indeksin nemin buharlaşmasından etkilenmemesi (buharlaşma ısı) için kömürün alt sıcaklığını 110 °C olarak belirlemiş ve yine üst sıcaklık olan 220°C'yi ise uçucu maddenin ortaya çıkacağı sıcaklığın altında olması nedeniyle tercih etmiştir. FCC indeksi hesaplandıktan sonra kömürlerin yatkinliklerinin değerlendirilmesi amacıyla risk sınıflandırması Çizelge 2.1'e göre yapılmaktadır.

Çizelge 2.1 FCC indeksine göre risk sınıflandırması.

FCC Risk İndeksi	Risk Sınıfı
0 - 5	Düşük
5 - 10	Orta
>10	Yüksek

Laboratuvarında gerçekleştirilen kendiliğinden yanmaya yatkinlik testleri doğal olarak test edilen kömürlerin doğal yapısı ile ilişkilidir ve deney koşulları kontrol edilebilir bir konumdadır. Ancak, ocak koşulları gerçekte oldukça karmaşık olabilmekte ve laboratuvarında modellenen koşullar gibi kontrol edilememektedir. Bir kendiliğinden yanma olayının ortaya çıktığı gerçek ocak koşullarında kömür sıcaklığının ortam sıcaklığından kömürün yapısında değişimlerin başladığı kritik sıcaklıklara (70-80°C) yükselmesi için belirli bir zamanın (kuluçka süresi) geçmesi gerekmektedir. Laboratuvar testleri ise genellikle kısa sürelerde sonuçlar elde etmeye yönelik tasarlanmış işlemler olduklarından bu testlerden kuluçka süresi ile ilgili bilgi elde etmek mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bu testler kömürlerin zaman içerisindeki, özellikle düşük sıcaklıklardaki ısınma davranışlarını tespit etmeye de uygun değildir.

Çalışılan saha ve kömür damarlarında meydana gelen kendiliğinden yanma olaylarının ve şartların kayıt altına alınması ve böylece kuluçka süresinin tespiti ve tecrübeler oldukça önemlidir.

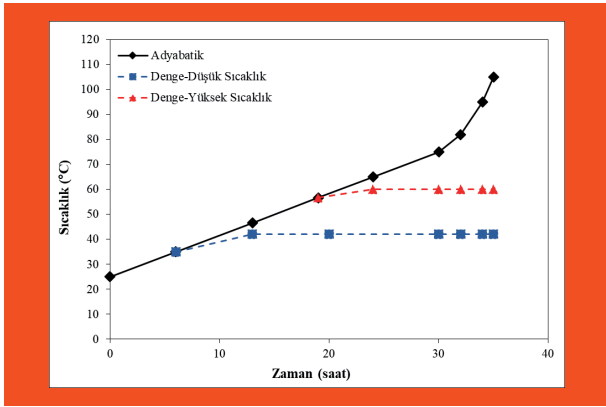
Her kömürün bir kuluçka süresi olduğundan bu sürenin belirlenmesi ile kendiliğinden yanma riskinin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Bu bilgi yeraltında üretim yapılan kömür damarları için kullanılabilir. Bu nedenle kuluçka süresi esasen kullanışlı bir planlama aracı olarak kullanılabilir. Mukherjee vd. (1988) düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin kuluçka sürelerinin 3-6 ay arasında olduğunu ve yüksek kömürleşme derecesine sahip kömürlerin kuluçka sürelerinin ise 6-9 ay arasında olduğunu rapor etmiştir. Buna karşın, Tripathi and Sen (1996) ise pratikte bazı ocaklarda, aynı kömür damarı ve aynı bölge olmasına karşın, kuluçka süresinin günlerden yıla kadar değişen sürelerde olduğunu bildirmiştir. Farklı araştırmacıların rapor ettiği çelişkili gibi görünen bu sonuçlar esas itibarıyla kuluçka sürelerinin kömürle olduğu kadar aynı zamanda ocak koşullarındaki, farklılıklardan etkilenmesi sebebiyledir. Bu nedenle kömürlerin "kuluçka süreleri" genel itibarıyla ocaklarda ve kömür damarında yaşanan kendiliğinden yanma olaylarındaki tecrübelerden daha doğru elde edilen bir bilgidir.

Adyabatik ısıtma yönteminde kömür sıcaklığı yaklaşık 70°C'ye kadar, kesişim noktası sıcaklığı yönteminde ise yaklaşık 90-100°C'ye kadar doğrusal artmakta ve bunu üstel (eksponansiyel) bir artış izlemektedir. Her iki yöntemde de ortam sıcaklığı programlı bir fırınla otomatik olarak kontrol edilmekte ve böylece kömürün ısı kaybetmesine engel olunmaktadır. Bu durumun tersine, eğer oksidasyondan kaynaklı ısı olduğu anda ortamdan uzaklaştırılırsa, böylesi bir durumda denge koşulları oluşacak ve sıcaklık bu noktadan sonra sabit kalacaktır. Ayrıca, sıcaklık sabit kalacağından oksidasyon kaynaklı CO oluşumunun da sabit kalması söz konusu olacaktır.

Daha önce bahsedildiği üzere, ocak koşullarında kömürün ortam sıcaklığından kritik sıcaklıklara (70-100°C) erişmesi için belirli bir zamana ihtiyaç vardır (kuluçka süresi). Bu süre zarfında ocakta oksidasyon sonucu oluşan ısı ile ısı kaybı birbirine eşit olduğu bir durumda yukarıda bahsedilen denge koşulları ortaya çıkabilmektedir. Bir ocakta denge

koşullarına ne kadar düşük sıcaklıklarda ulaşırsa, kendiliğinden yanma riski de o oranda azalacaktır (Cliff vd., 2015).

Eğer bir ocakta denge koşullarına ortam sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ulaşırsa (40-45°C), bu durumda oksidasyon hızı ve CO oluşumu düşük olacak ve denge koşulları devam ettiği sürece sabit kalacaktır. Eğer denge koşullarına kömürün yapısal bozunmaların olduğu 70-75°C'ye yakın sıcaklıklarda ulaşırsa, oksidasyon hızı ve CO oluşumu da çok daha yüksek olacaktır. Bu durumda, üssel (eksponansiyel) ısınmanın başlamasından önce kalan zaman (kuluçka süresi) ilk duruma göre oldukça kısa olacaktır (Şekil 2.10).

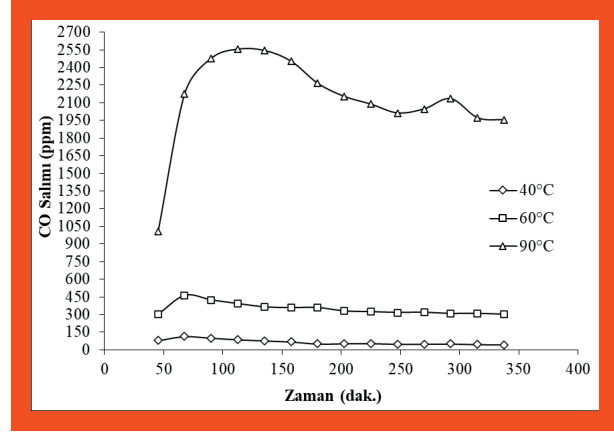


Şekil 2.10 Adyabatik ısıtma, düşük ve yüksek sıcaklıkta ulaşılan denge koşulları (Cliff vd., 2015'dan değiştirilerek).

DeneySEL olarak denge koşulları kömürlerin izotermal sıcaklıklarda (sabit sıcaklıkta) deneylere tabi tutulması aracılığıyla tespit edilebilir. Bu sayede test edilen kömür örneği için denge koşulları değiştiğinde ortaya çıkacak sonuçlar kolaylıkla anlaşılabilir. Şekil 2.11'de ülkemizde kendiliğinden yanmaya yatkınlığı "yüksek" olan bir kömür damarından alınan örnekler (Amasra, Zonguldak) için 40°C, 60°C ve 90°C'de gerçekleştirilmiş izotermal deney sonuçları görülmektedir.

Şekil 2.11'den görüldüğü üzere 40°C sabit sıcaklıkta salınan CO konsantrasyonları zamanla denge koşulların ulaşmakta ve ortalama 50 ppm seviyelerinde dengeye ulaşmaktadır. Sıcaklığın 60°C'ye yükselmesiyle denge koşullarındaki ortalama olarak salınan CO konsantrasyonu yaklaşık 300 ppm'e ve sıcaklık 90°C'ye yükseltildiğinde denge koşullarındaki ortalama CO konsantrasyonu ise 2000 ppm mertebelerine çıkmaktadır. Bu sonuçlardan oldukça net anlaşıldığı üzere bu kömür damarının çalışıldığı bir ocakta denge koşulları 60°C'nin ne kadar altında oluşturulabilirse bir kendiliğinden yanma olayının yaşanması da o kadar zor olacaktır. Ancak aynı ocakta denge koşulları 60°C üzerindeki sıcaklıklarda oluşturulursa oksidasyon reaksiyonları hızlanacak ve açığa çıkan CO konsantrasyonları da artacaktır. Denge koşullarında 2000 ppm'leri bulan CO konsantrasyonları, bu kömür damarının

çalışıldığı ocakta ortam sıcaklığının 90°C ve üzerinde olmasının artık kontrol edilemeyecek kendiliğinden yanma koşullarını beraberinde getirdiğinin açık bir göstergesidir.



Şekil 2.11 Birtaşkömürü örneği (-150+106 µm) için izotermal deney sonuçlarından elde edilen CO konsantrasyonları (Baris, 2010'dan uyarlanmıştır)

Genel olarak kendiliğinden yanmaya yatkın kömür ocaklarında madencilik faaliyetleri denge sıcaklığı koşullarında yapılmaktadır. Tasarımı iyi yapılmış ve faaliyetlerin yakından izlendiği ve kontrol edildiği kömür ocaklarında denge koşullarına düşük sıcaklıklarda ulaşılmakta ve bu nedenle oksidasyon sonucu açığa çıkan CO miktarı da daha düşük olmaktadır. Bu durumda denge koşullarına düşük sıcaklıklarda ulaşmak madencinin temel hedefi olmalıdır. Herhangi bir kendiliğinden yanma olayı ortaya çıkmamışken ocağın ya da bir ocak kesiminin "normal" denge koşulları belirlenmeli ve böylece artışlar tespit edilerek tedbir alınmasına olanak tanınmalıdır. Bunu yapabilmek için ocaklarda üretim bölgeleri/panoları kurulmaz o bölgenin/panoların hava dönüş yolunda CO oluşumu düzenli bir şekilde izlenmeli ve normal şartlarda bölgeye ait CO oluşum miktarı hesaplanmalıdır. Bu hesaplama ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 5.4.3'te verilecektir.

Yeraltı kömür ocaklarında kendiliğinden yanmaya neden olabilecek koşulların farklılığı ve kömürlerin çok farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle, bir kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığı olayı tek başına değerlendirmek için yeterli değildir. Zira kendiliğinden yanmaya yatkın olan kömürlerin üretildiği bazı ocaklarda kendiliğinden yanma olaylarına rastlanmazken, kendiliğinden yanmaya yatkınlığı daha düşük olan kömürlerin işletildiği ocaklarda büyük sorunlar çıkabilmektedir.

3. KENDİLİĞİNDEN YANMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER



Kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörlerin kontrol edilebilenleri üretim kalınlığı, üretim yöntemi ve en önemlisi havalandırmadır.

Kömürün kendiliğinden yanmasında birçok faktör etkili olmaktadır. Bu faktörlerin bir kısmı kömürün doğal yapısıyla alakalı iken bunun yanında jeolojik faktörler ve madencilik ile ilgili faktörler de bulunmakta ve kendiliğinden yanma olayı bu çok sayıda faktörün birleşik etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Çeşitli araştırmacılar kendiliğinden yanmada etkili olan faktörleri farklı kategorilerde ele almışlardır. Güney (1968) bu faktörleri; kömürün doğasından kaynaklanan iç faktörler ve atmosferik, jeolojik ve madencilik ile ilgili dış faktörler olarak ikiye ayırmıştır. Singh (2013) ise daha kapsamlı bir sınıflama yaparak bu faktörleri; damar faktörleri, jeolojik faktörler ve madencilik faktörleri şeklinde üç grupta incelemiştir (Çizelge 3.1). Benzer bir sınıflama Cliff vd. (2015) tarafından da yapılmış ve faktörler jeolojik faktörler, yataklanma ile ilgili faktörler ve madencilik faktörleri şeklinde sınıflandırmıştır (Çizelge 3.1). Her iki sınıflandırmada ele alınan faktörler farklı gruplar altında sınıflandırılmış olsa da faktörlerin büyük bir çoğunluğu birbiriyle örtüşmektedir.

Bu rehberde kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler “kontrol edilemeyen” ve “kontrol edilebilen” olmak üzere iki farklı kategoride sınıflandırılacaktır. Kontrol edilemeyen faktörler jeolojik ve damara/yataklanmaya bağlı faktörlerken, kontrol edilebilen faktörler ise madencilik faktörleri şeklinde ele alınacaktır. Bu rehberin amacı itibarıyla kontrol edilemeyen faktörlerden kısaca bahsedilecek, kontrol edilebilir faktörler üzerinde ise daha fazla durulacaktır.

3.1 Kontrol Edilemeyen Faktörler

Bu grupta bulunan faktörler, müdahale edilemeyen ve kömürün ve çevre kayaçların doğal oluşum süreçleri ile ilgili faktörlerdir. Dolayısıyla bu faktörleri herhangi bir yöntemle değiştirmek/kontrol etmek çok büyük oranda mümkün değildir.

Kömürleşme Derecesi

Literatürde çoğu araştırmacının yaptığı çalışmalardan genel itibarıyla kömürleşme derecesi ile kendiliğinden yanma arasında ters bir ilişki olduğu ve düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin yüksek kömürleşme derecesine sahip kömürlere göre daha fazla kendiliğinden yanmaya yatkın oldukları söylenebilir. Ancak kömürün heterojen yapıda olması ve olayda birçok diğer faktörün etkili olması nedeniyle bu çıkarım her zaman doğru olmayabilmektedir.

Çizelge 3.1 Singh (2013) ve Cliff vd. (2015)'e göre kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler.

	Singh (2013)		Cliff vd. (2015)
Jeolojik Faktörler	Damar kalınlığı Damar eğimi Göçme karakteristikleri Faylar/dayklar Ani püskürme Gevreklik Örtü tabakası kalınlığı		Kömürleşme derecesi Petroloji Nem Kül içeriği Damar gazı Piritler Dayanım Gevreklik Geçirgenlik Kömür sıcaklığı
Damara Bağlı Faktörler	Kömürleşme derecesi Petrografik içerik Kömür sıcaklığı Mevcut hava Tane boyutu Nem Sülfür Oksidasyon geçmişi Fiziksel özellikler Yerküre hareketi sonucu ısınma Bakteri Diğer mineraller	Yataklanma Faktörleri	Damar kalınlığı Faylar ve intrüsifler Çoklu damarlar Eğim Derinlik Jeotermal gradyan
Madencilik Faktörleri	Madencilik yöntemi İlerleme hızı Topuk koşulları Tavan koşulu Ezilme Tahkimat etkisi Kaçak Çok damarlı çalışma Kömür kayıpları Ana yollar Çalışılmış alanlar Dolgu Havalandırma basıncı		Üretim kalınlığı Üretim yöntemi Havalandırma

Kömür Petrografisi

Uluslararası Kömür Petrografisi Komitesi (International Committee of Coal Petrography) kömürün mikroskobik içeriğini; görünüm, kimyasal kompozisyon ve optik özellikler ile karakterize edilebilen ve kömürü oluşturan bitki tiplerinin belirlenebildiği "maseraller" olarak adlandırmıştır (Berkowitz, 1979). Linyit ve bitümlü kömürlerin yapısındaki maseraller ve mikrolitotipler ile ilgili detaylı bilgiye başka bir çalışmadan ulaşılabilir (Stach vd., 1975).

Genel olarak bakıldığında; vitrinitin kendiliğinden yanmaya en yatkın maseral grubu olduğu, inertinit grubu maserallerin gözenekli yapıda olması nedeniyle oksijen ve diğer gazları tutma özelliği olduğu, kömür yapısında bulunan özelliklerle ince taneli piritin kendiliğinden yanmaya yatkınlığı arttırdığı söylenebilir.

Nem

Kömürün yapısında doğal olarak bulunan ve kömür gözeneklerine bağlanmış su kömürün oksidasyonunda önemli bir role sahiptir. Ancak, literatürde kömür bünyesindeki suyun oksidasyon açısından olumlu mu olumsuz mu etki yaptığı konusunda farklı görüşler mevcuttur. Çeşitli araştırmacılar kömür ve oksijenin etkileşimi için minimum bir su içeriğine gereksinim olduğunu bildirmiştir (Berkowitz, 1979; Schmal, 1989; Clemens ve Matheson, 1996). Bunun nedeni, oksidasyon reaksiyonlarında kömür bünyesindeki suyun katalizör ve tepkimeye giren bir madde olarak davranması olarak yorumlanabilir. Bunun yanı sıra Arisoy vd. (2017) farklı bünye nemine sahip aynı kömürün farklı kendiliğinden yanma davranışları sergilediğini, kömürün kendiliğinden yanmasında kritik bir nem seviyesinin bulunduğunu ve yeterince yüksek nem içeriğine sahip kömürlerin kritik sıcaklıklara ulaşamadığını belirtmişlerdir. Beamish and Beamish (2010) oksidasyonun üstel (eksponansiyel) faza geçmesi için bünye neminin en az %50'sinin buharlaşmasının gerektiğini rapor etmiştir.

Kül İçeriği

Kömürün yanmaz içeriğinin artması (inorganik madde) kömür bünyesinde okside olacak aktif alanların azalması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla kömürlerin kül içeriği yükseldikçe oksidasyona ve kendiliğinden yanmaya yatkınlıkları azalmaktadır (Wang vd., 2003b; Beamish ve Blazak, 2005; Baris vd., 2012). Kömürün bünyesindeki yanmaz malzemenin yüzdesinin artması nedeniyle kendiliğinden yanmaya yatkınlığının azalması doğal bir sonuçtur.

Pirit İçeriği

Piritin oksijenle ekzotermik reaksiyona girdiği ve bu reaksiyon sonucunda ısı açığa çıktığı uzun zamandır bilinmektedir (Winmill, 1916a). Dolayısıyla kömür bünyesinde bulunan ince taneli ve dağınık halde bulunan pirit okside olmakta ve dolayısıyla kömürün kendiliğinden yanmasını hızlandırmaktadır (Yang vd., 2019; Wang vd., 2021; Ding vd., 2022).

Geçirgenlik

Geçirgenlik, genel itibarıyla sıvıların ya da gazların katı bir malzeme içinden geçişinin kolaylığının bir ölçüsüdür (Fidjestøl ve Lewis, 1998). Kömürün yapısı düşünüldüğünde; geçirgenlik (permeabilite), kömür içindeki mikro ve makro gözenekler ile kırık ve çatlakların birbirine bağlı olması ile ilişkilidir. Dolayısıyla, geçirgenliği (permeability) yüksek kömürlerde oksijenin birbirine bağlı kırık ve çatlak sistemlerini kullanarak kömür gözeneklerine nüfuz etmesi oksidasyon için aktif alanların artması anlamına gelmekte ve bu da kendiliğinden yanma riskini artırmaktadır. Bunun yanında, havalandırma ya da metan drenajı ile bir basınç farkı yaratıldığında havanın kömür içerisine çekilmesi mümkün olabilmekte ve bu da kendiliğinden yanmaya neden olabilmektedir.

Dayanım ve Gevreklik

Kömürün dayanımı ve gevrekliği kömürün küçük parçalara ayrılıp ayrılamamasıyla yakından ilişkilidir. Dolayısıyla dayanımı düşük ve gevrek olan kömürler çeşitli etkilerle çok daha küçük tane boyutlarına ufalanabilmekte ve bu da okside olacak yüzey alanının artmasına sebep olmakta ve kendiliğinden yanmayı arttırıcı bir etkiye sahip olmaktadır.

Faylar ve İntrüsifler

Faylar ve intrüsifler gibi jeolojik düzensizlikler o bölgelerde kömürün ezilmesine ve boyutunun küçülmesine, tavan tabakalarının ayrışmasına ve genel itibarıyla o kısımlarda jeomekanik olarak zayıf bölgeler oluşmasına neden olmaktadır. Böylesi durumlarda galerilerde ve ayakların taban yollarında ek tahkimat ihtiyaçları ortaya çıkmakta ve bu da ek basınç farkları yaratmakta ve hava kaçaklarını arttıracak bir etki yapmaktadır.

Damar Kalınlığı

Damar kalınlığının kendiliğinden yanma ile ilişkisi esas itibarıyla okside olacak alanın büyüklüğü ile ilintilidir. Kalın damarlarda yüzey alanı daha büyük olacağından oksidasyona maruz kalan alan büyük olacaktır. Ayrıca kalın damarlar üretim yöntemi ile ilişkili olarak kendiliğinden yanma ile ilgili olumsuzlukları beraberinde getirebilmektedir. Üretim yöntemi sebebiyle kömür kalınlığının tamamının üretilmemesi ya da tüm kalınlığın tek seferde kazılamaması nedeniyle özellikle ülkemizde karşılaşılan ve tavanda üretilmeden göçüğe terk edilmek zorunda kalınan ya da bilinçli olarak (ör: Avustralya) tavanda ya da tabanda üretilmeyen kömürler riskleri de beraberinde getirmektedir.

Damar Eğimi

Damar eğiminin kendiliğinden yanma için önemi, özellikle ülkemizde uygulandığı gibi, bir alt taban yolu ve bir üst taban yoluna sahip uzunayaklardaki üretim planlaması ile ilgilidir. Emici havalandırma sistemine sahip ocaklarda pano hazırlıklarının eğim aşağı yapılması ve üretimin de dönümlü olarak eğim yukarı gerçekleştirilmesiyle göçüğe kaçacak hava miktarı azaltılabilmektedir. Cliff vd. (2015) Bunun yanı sıra bu tür çalışmanın kendiliğinden yanma olaylarında panonun su ile doldurulmasında kolaylıklar sağlayacağını belirtmiştir.

Derinlik ve Jeotermal Gradyan

Derinlik arttıkça ayaklarda ve topuklar üzerine etkiyen gerilmeler artmaktadır. Gerilmelerin artması, kömür üzerine etkiyen yüklerin büyüklüğü nedeniyle geçirgenliği (permeability) azalmakta ise de özellikle faylı bölgeler gibi zayıf bölgelerde gerilmelerin etkisi daha büyük olmaktadır. Derinlik arttıkça jeotermal gradyandan dolayı kömür sıcaklıkları artmakta ve bu da oksidasyonu arttırıcı bir etkiye sahip olabilmektedir.

3.2 Kontrol Edilebilir Faktörler

Bu grupta incelenecek faktörler mühendislik ve madencilik uygulamaları açısından değiştirilebilir nitelikte olup kendiliğinden yanma ile ilişkilidir. Bu bölümde incelenecek faktörler ülkemizde yaygın olarak kullanılan uzunayak yöntemi özelinde; üretim kalınlığı ve havalandırma olarak üç alt başlıkta ele alınacaktır.

3.2.1 Üretim Kalınlığı

Üretim yöntemine bağlı olarak yeraltı ocaklarında kömür kazanımı ortalama %40 ile %70 arasında olmakta, kalın damarlarda uygulanan arkadan göçertmeli çok katlı uzun ayak (Longwall Top Coal Caving – LTCC) gibi yeni üretim tekniklerinin kullanımıyla bu rakam günümüzde ancak %80-90'lara ulaşmış durumdadır. Kömür ocaklarında damar kalınlığına ve üretim yöntemine bağlı olarak kömür damarının tamamının üretilmesi pratikte her durumda mümkün olmamakta ve bu nedenle kömürün bir kısmı kazılamamaktadır. Bunun yanı sıra, Avustralya gibi bazı ülkelerde kömür damarlarının en kaliteli kısmı üretilmekte ve damarın geriye kalan kısımları ise ekonomik olmaması nedeniyle üretilmeden göçüğe terk edilmektedir. Ayrıca, Avrupa'da ve yaygın olarak ülkemizde kullanılan ve tek giriş-çıkışlı (bir alt taban yolu ve bir üst taban yoluna sahip) konvansiyonel uzunayak yönteminin aksine Avustralya, Kanada, Amerika Birleşik Devletleri gibi gelişmiş madencilik ülkelerinde üretim iki ve daha fazla alt ve üst taban yolu bulunan panolarda gerçekleştirilmektedir. Bu üretim yönteminde taban yollarının duraylılığının sağlanması için taban yolları arasında topuklar (zincir topuk) bırakılması gerekmektedir. Uygun havalandırma şartları sağlanamaz ve tedbir alınmazsa göçükte bırakılan ezilmiş/parçalanmış kömürlerin yanı sıra topuk olarak bırakılan kömürler de kendiliğinden yanma ile ilgili ciddi riskleri beraberinde getirmektedir.

Ülkemizde ise özellikle konvansiyonel uzunayak yöntemi (ahşap tahkimatlı ya da hidrolik direk-çelik sarma) ile üretim yapan ocaklarda ana hedef olarak kömür damarının tamamının üretilmesi hedeflenmekte, bu maksatla üretim kayıplarının olmaması için taban ve tavanda kömür bırakılmamaya çalışılmaktadır. Tam mekanize çalışan uzunayaklarda ise özellikle kömür damarının kalın olduğu durumlarda ekipman seçiminde (hatalı kesici-yükleyici ve tahkimat seçimi gibi) yapılan hatalar nedeniyle kömür damarının tamamının üretilmediği ve damarın bir kısmının göçükte bırakıldığı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Böylesi durumlarda, eğer üretilen kömür damarının kendiliğinden yanmaya yakınlığı yüksek ve panoda ayak ilerleme hızları da düşük ise özellikle göçük bölgesinde kendiliğinden yanma problemleri yaşanabilmektedir. Bu türlü sorunlarla karşılaşılmasını için üretim planlaması ve ekipman seçiminde oldukça hassas davranmak gerekmektedir.

3.2.2 Havalandırma

Ocak havalandırmasının temel amacı, iş yerlerine temiz hava sağlamak, zehirli, yanıcı ve patlayıcı gaz ve tozları seyreltmek, zararsız hale getirmek ya da çalışma ortamından uzaklaştırmak ve ocakta termal konfor şartlarını

sağlamaktır. Bu özellikleri itibarıyla havalandırmanın temel amaçlarından olan temiz havanın sağlanması kömür ile oksijenin temasını sağlaması açısından oksidasyonu ve kendiliğinden yanmayı destekleyecek niteliktedir.

Yeraltı kömür ocaklarında havalandırma ve kendiliğinden yanma arasındaki ilişki iki türlü ortaya çıkmaktadır. İlk durumda, kömürle temas halinde olan düşük hızlı "kritik hava akımı" oksidasyon ve kendiliğinden yanmaya yakın kömür damarlarında kızışma riskini arttırmaktadır. Kritik hava akımı, oksidasyondan kaynaklı ısıyı ortamdan uzaklaştıramayan ancak oksidasyon işlemini sürdürmeye yeterli miktarda olan hava akımı olarak tanımlanmaktadır (Koening, 1989). Bu durumda ısının oluşumu esasen oksijenin varlığına bağlı olmaktadır. Bu durum ocaklarda uzunayak göçük bölgeleri, barajlanmış bölgeler ya da kaçak hatları gibi yüksek dirençli yerlerde karşımıza çıkmaktadır. İkinci durumda ise hava miktarı yeterince yüksek olduğundan oksidasyon sonucu oluşan ısı ortamdan uzaklaştırılmakta ve bu da sıcaklık artışını engelleyerek oksidasyonun ilerlemesine izin vermemektedir. Bu durum ocaklarda anayollar gibi direncin düşük olduğu ve dolayısıyla hava miktarının yüksek olduğu kısımlarda karşımıza çıkmaktadır.

Birinci durumda oksidasyon oksijenin varlığı ile kontrol edildiğinden bu tür durumlarda denge koşullarına "yüksek sıcaklıklarda" ulaşılmaktadır. İkinci durumda ise hava miktarının yeteri büyüklükte olması nedeniyle ısı ortamdan uzaklaştırıldığından oksidasyon reaksiyonu "düşük sıcaklıklarda" gerçekleşmekte ve denge koşullar düşük sıcaklıklarda oluşmaktadır (bkz. Şekil 2.10). Her iki durumda da denge koşullarında oksidasyon sonucu ortaya çıkan CO seviyesi ocaktaki "arka plan CO" seviyesini oluşturmaktadır.

Birinci durumda denge koşullarının bozulması için hava miktarının artması, ikinci durumda ise hava miktarının azalması gerekmektedir. Denge koşullarının bozulması sonucu her iki durumda da sıcaklık artacak ve sonucunda bir kendiliğinden yanma olayı yaşanabilecektir. Ancak, bir kendiliğinden ısınma durumunda denge sıcaklıklarının daha yüksek olduğu birinci durumdaki oksidasyon hızı ikinci duruma göre daha fazla olacak ve dolayısıyla sıcaklık birinci durumda daha hızlı artacaktır.

Temel Havalandırma Prensipleri ile İlgili Çıkarımlar

Bir yeraltı ocağında havanın ocak içindeki hareketinin sağlanması için ocak girişi ve çıkışı arasında bir basınç farkı yaratılması gerekmektedir. Bu işlem doğal olarak (doğal havalandırma) ya da mekanik olarak fanlarla yapılabilmektedir. Günümüzde çeşitli avantajlar sağlaması nedeniyle kömür ocaklarında yeryüzünde kurulu emici fanlar kullanılmaktadır. Ocak içerisine sağlanacak temiz havanın miktarı, ocağın direnci ve yaratılan basınç farkının bir fonksiyonudur (Eşitlik 3.1).

$$h = RQ^2 \quad (3.1)$$

Burada; h basınç farkını (Pa), R havayolu direncini (Ns²/m⁸) ve Q ise hava miktarını (m³/s) temsil etmektedir.

Bu eşitlikteki havayolu direnci ise eşitlik 3.2 ile tanımlanmaktadır.

$$R = k \frac{CL}{A^3} \quad (3.2)$$

Burada; k havanın yoğunluğuna bağlı sürtünme faktörünü (kg/m^3), C havayolunun çevresini (m), L havayolunun uzunluğunu (m) ve A ise havayolunun kesit alanını (m^2) temsil etmektedir.

Akışkanlar mekaniği prensiplerine göre akışkanların akış durumları laminar, geçiş bölgesi ve türbülanslı olmak üzere üç şekilde olabilmektedir (Munson vd., 2018). Her üç durumda da akışkan farklı karakteristikler sergilemektedir. Akışın hangi durumda olduğu Reynolds sayısı ile belirlenmektedir. Reynolds sayısının 2000'e kadar olduğu durumlarda akış laminar, 4000'den yüksek olduğu durumlarda türbülanslı ve bu iki bölge arasında olduğu durumlarda ise geçiş bölgesindedir (Hartmann vd., 1997).

Aktif olarak havalandırılan ocak kesimlerinde hava türbülanslı olduğundan ocak havalandırma hesaplarında sıklıkla kullanılan Eşitlik 3.1 ve 3.2 akışın her durumda türbülanslı olduğunu varsaymaktadır. Zira ocaklarda hava hızının 0,07 m/s'den yüksek olduğu durumlarda akış türbülanslı olmaktadır. Eşitlik 3.1 esasen $h=RQ^n$ formunda olup, akışın laminar olduğu durumlarda $n=1$ olmakta ve türbülanslı olduğu durumlarda ise $n=2$ olmaktadır (McPherson, 1993). Buna bağlı olarak akışın laminar olduğu durumlarda Eşitlik 3.1 aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$h = RQ \quad (3.3)$$

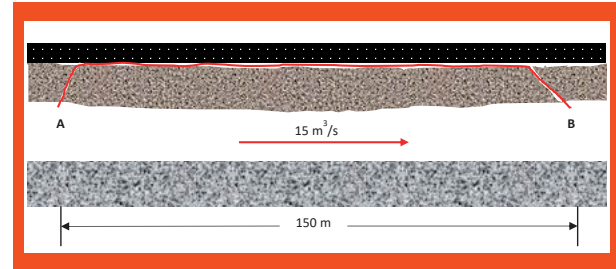
Yeraltı kömür ocaklarında laminar akış koşulların oluşabileceği yerler (a) basınç farklarının ve hava hızlarının düşük olduğu, çalışmaların sonlandırıldığı ancak halen düşük miktarda hava ile havalandırılan bölgeler ve (b) yüksek direnç sebebiyle düşük hava hızlarının olduğu ciddi basınç farklarına maruz kalan alternatif hava akış yollarıdır. Bu türlü yollar her ne kadar yüksek dirençlere sahip olsalar da bu akış güzergahlarından ciddi hava miktarları geçebilmektedir.

Ülkemizdeki yeraltı kömür ocaklarında bu koşulların oluşabileceği yerler ise:

- Yetersiz tahkimat sebebiyle tavandaki tabaka ayrılmasına bağlı olarak oluşan ve kömürlere temas eden alternatif havayollarının olduğu bölgeler (tavanda bulunan kömür damarı, kömür pasajları vb. olan bölgeler),
- Tabaka ayrılmasının olduğu havayollarında regülatör ya da sızdırmaz olmayan hava kapılarının inşa edildiği yerler,
- Çalışmaların sonlandırıldığı ve sızdırmaz bir şekilde barajlanmamış ocak kesimleri
- Özellikle ayağın başlangıcında ya da düşük ayak ilerleme hızları nedeniyle oluşabilecek ve hava kaçakları olabilecek kısmi olarak konsolide olmuş göçük bölgeleridir.

ÖRNEK

Durumun daha iyi anlaşılabilmesi için olayı bir örnek üzerinden anlatmak yerinde olacaktır. Şekil 3.1 bir kömür ocağında çelik bağ tahkimatlı, tahkimat arkasında boşlukların bulunduğu ($k=0,012 \text{ kg/m}^3$) bir havayolunda, içerisinde kömür de bulunan tavan tabakalarının ayrıldığı bir durumu göstermektedir. Tabaka ayrılması nedeniyle A noktası ile B noktası arasında direnci $500 \text{ Ns}^2/\text{m}^8$ olan alternatif bir akış yolu oluşmuştur. At nalı kesitli havayolunun kesit alanı 12 m^2 , çevre uzunluğu $14,5 \text{ m}$ ve anayoldan geçen hava miktarı $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. A noktası ile B noktası arasındaki uzaklık ise 150 m 'dir.



Şekil 3.1 Tabaka ayrılması nedeniyle oluşan alternatif akış hattı (Cliff vd., 2015'den değiştirilerek).

Eşitlik 3.2 kullanılarak bu örnekteki havayolu için direnç:

$$R = (0,012 \text{ kg} / \text{m}^3) \frac{(14,5 \text{ m})(150 \text{ m})}{(12 \text{ m}^2)^3} = 0,015 \text{ Ns}^2 / \text{m}^8$$

olarak bulunur.

Havayolunda hava akımı türbülanslı olacağından, A ve B noktası arasındaki basınç farkı ise Eşitlik 3.1 kullanılarak

$$\Delta h_{AB} = (0,015 \text{ Ns}^2/\text{m}^8)(15 \text{ m}^3/\text{s})^2$$

$$\Delta h_{AB} = 3,375 \text{ Pa} \text{ olarak bulunur.}$$

A ile B noktası arasındaki basınç farkı tavan tabakalarının ayrılması sonucu oluşan alternatif akış yolu için de aynı olacaktır. Alternatif akış yolu direncinin oldukça yüksek olması nedeniyle akışın laminar olması söz konusu olacağından Eşitlik 3.3 kullanılarak alternatif akış yolundaki hava miktarı

$$(3,375 \text{ Pa}) = (500 \text{ Ns}^2/\text{m}^8)(Q)$$

$$Q=0,00675 \text{ m}^3/\text{s} \text{ olarak bulunacaktır.}$$

Alternatif akış yolunda bir kendiliğinden yanma olayının olabilmesi için $0,00675 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bu hava miktarı ile yeterli oksijenin taşınmaya devam etmesi, sıcaklık artışına sebep olması ve bu hava miktarının ısıyı ortamdan uzaklaştırmak için yeterli olmaması gerekmektedir. Ters durumda bu hava miktarı oksidasyon reaksiyonlarının sürmesi ve ısı artışı için yeterli oksijeni sağlayamadığından bir kendiliğinden yanma olayına sebep olmak için yeterli olmayacaktır.

Ancak aynı havayolunda A ile B noktası arasında bir ek tahkimat (orta çatal-dikme gibi) yapılırsa, kesit alanını azaltacak dolayısıyla direnci arttıracak bir engel oluşturulur, mevcut regülatörün ayarında değişiklik yapılırsa ya da bir

hava kapısı inşa edilirse bu durumlarda anayolun direnci ciddi oranda değişecektir. Zira McPherson (1984) pratikte kapı ya da barajların dirençlerinin birkaç bin Ns^2m^{-8} den 1-2 Ns^2m^{-8} e kadar olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca Eşitlik 3.2'den açıkça görüldüğü üzere direncin kesit alanının küpü ile ters orantılı olması nedeniyle, havayolu kesitinin daralması havayolu direncini oldukça fazla etkileyecektir.

Örnekte verilen A ile B noktaları arasına havayolu kesitinin herhangi bir engel, ek tahkimat ya da zaman içinde deformasyon nedeniyle %30 oranında daraldığını varsayarsak bu durumda, A ile B noktası arasındaki havayolu direnci,

$$R = (0,012kg / m^3) \frac{(14,5m)(150m)}{((8,4)m^2)^3} = 0,044Ns^2 / m^8$$

olacak ve A ile B noktası arasındaki basınç farkı ise yaklaşık 3 kat artarak

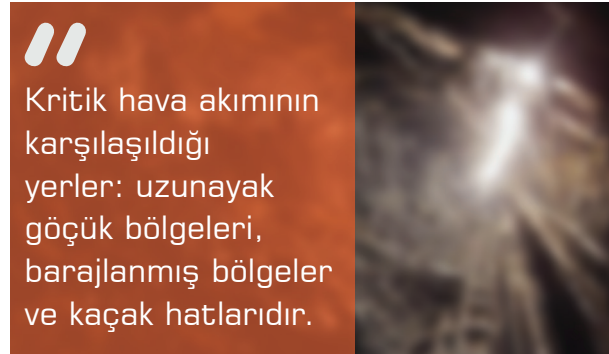
$$\Delta h_{AB} = (0,044 Ns^2/m^8)(15 m^3/s)^2 = 9,9 Pa \text{ olacaktır.}$$

Bu durumda alternatif akış yolundan geçecek hava miktarı ise

$$(9,9 Pa) = (500 Ns^2/m^8)(Q)$$

$$Q = 0,0198 m^3/s \text{ olacaktır.}$$

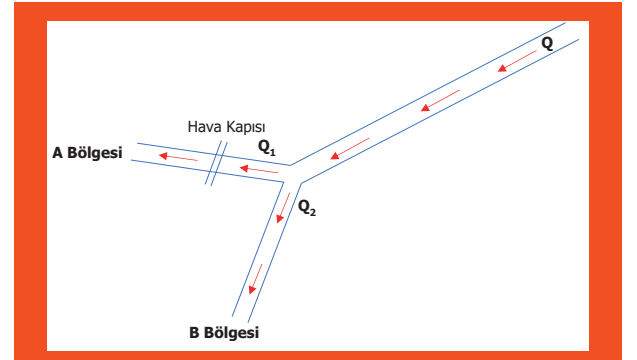
Dikkat edilirse yeni durumda alternatif akış yolundan geçecek hava miktarı ilk duruma göre neredeyse 3 katına çıkmış olacaktır. İlk durumda bir kendiliğinden yanmaya yetecek hava miktarı sağlanamazken anayolun direncinde meydana gelen artış sonucunda alternatif akış yolundan daha fazla hava geçecek ve bu da kendiliğinden yanmaya yetecek bir hava miktarına dönüşebilecektir.



“
Kritik hava akımının karşılaştığı yerler: uzunayak göçük bölgeleri, barajlanmış bölgeler ve kaçak hatlarıdır.

Yukarıda verilen örneği pekiştirmek adına uygulamalardan da örnekler vermek yerinde olacaktır. Şekil 3.2'de ülkemizde bulunan bir yeraltı linyit ocağına ait temiz havayolu ve buna bağlı havayollarının şematik gösterimi verilmektedir. Temiz hava, ana giriş yolundan ikiye ayrılmakta ve iki farklı çalışma bölgesine gönderilmektedir. B bölgesinde temiz hava ihtiyacının artması ve ihtiyaç duyulan hava miktarının doğal ayırma ile sağlanabilmesi mümkün olmadığından, A Bölgesine hava sağlayan kısma bir hava kapısı inşa edilmiştir. Hava kapısının inşasından bir süre sonra A bölgesine giden temiz hava yolu tavanında kendiliğinden yanma belirtileri tespit edilmiştir. Buna istinaden tavana beton enjeksiyonu yapılarak kömürün hava ile temasının

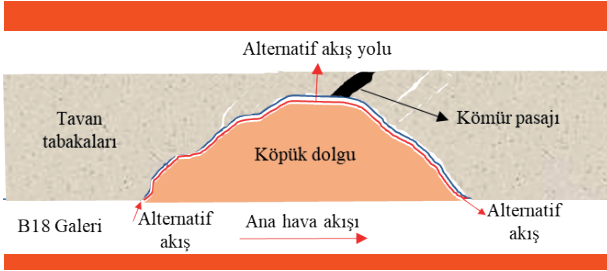
kesilmesine çalışılmış ancak CO konsantrasyonunda herhangi bir azalma görülmemiştir. Bu nedenle inşa edilen kapının sökülmesine karar verilmiştir. Kapının sökülmesini takiben CO konsantrasyonunda azalma olmuş ve olay bir süre sonra sonlanmıştır. Bu örnekten anlaşılacağı üzere, hava kapısının inşa edilmesi A bölgesine giden havayolunun direncinde ciddi bir artışa neden olmuş ve hava, basınç farkının büyüklüğü nedeniyle tavanda bulunan çatlaklardan bir akış yolu olarak tavadaki kömür ile reaksiyona girmiş ve belirli bir süre sonra kendiliğinden yanma olayına neden olmuştur. Hava kapısının kaldırılmasıyla basınç farkı ve dolayısıyla alternatif kaçış yolundan geçen hava miktarı azalmış ve oksidasyonun devam edemeyeceği bir seviyeye gelmiştir.



Şekil 3.2 Bir yeraltı kömür ocağına ait temiz havayolu ve buna bağlı havayollarının şematik görünümü.

Yeraltı kömür ocaklarında anayollardan oldukça fazla hava miktarları geçmektedir. Ayrıca, anayolların genellikle taşa sürülmesi, anayol yüzeylerinin nispeten çatlaksız olması ve tahkimatının daha düzgün yapılması anayollarda kendiliğinden yanma olaylarının nadiren yaşanmasına neden olmaktadır. Ana yollarda hava miktarının yüksek olması nedeniyle oksidasyon sonucu oluşan ısı ortamdan kolaylıkla uzaklaştırılmakta ve sıcaklıkta bir artışa neden olmamaktadır. Bu durumda oksidasyon açısından denge durumu düşük sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır. Bu tür ocak kesimlerinde dengenin bozulması ancak ana havayolundaki hava miktarının azalması ile oluşabilir. Böyle durumlar özellikle havalandırma planlamasının iyi yapılmadığı, dolayısıyla havalandırma kapasitelerinin sınırlı olduğu ve aynı anda birden fazla üretim panosunun bulunduğu ocaklarda karşımıza çıkmaktadır. Zira üretim panolarındaki ayaklara sağlanması gereken hava miktarları iyi hesap edilemediğinden panolara sağlanan hava olması gerekenden az olabilmekte ve anayollardaki denge koşullarını bozabilmektedir. Daha nadiren de olsa benzer durum gaz yayılımlarının düşük olduğu, pano hazırlıklarının erken tamamlandığı ancak üretime geçmemiş panolarda da ortaya çıkabilecektir. Böyle durumlarda, özellikle havalandırma kapasitesinin sınırlı olduğu ocaklarda, panoya verilen hava miktarı azaltılmakta ve dolayısıyla anayoldan geçen hava miktarı da azalmakta ve bu da anayoldaki denge koşullarını bozabilmektedir.

Cliff vd. (2015) ana havayollarında oluşan kendiliğinden yanma vakalarının genellikle havayolunun kendisinden ziyade oluşan alternatif akış yollarından kaynaklandığını belirtmiştir. Bu çıkarımı doğrular nitelikte ülkemizden bir örneğin şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Tavadaki boşluğun doldurulması sonrasında ana yol güzergahında meydana gelen bir kendiliğinden yanma olayının şematik gösterimi.

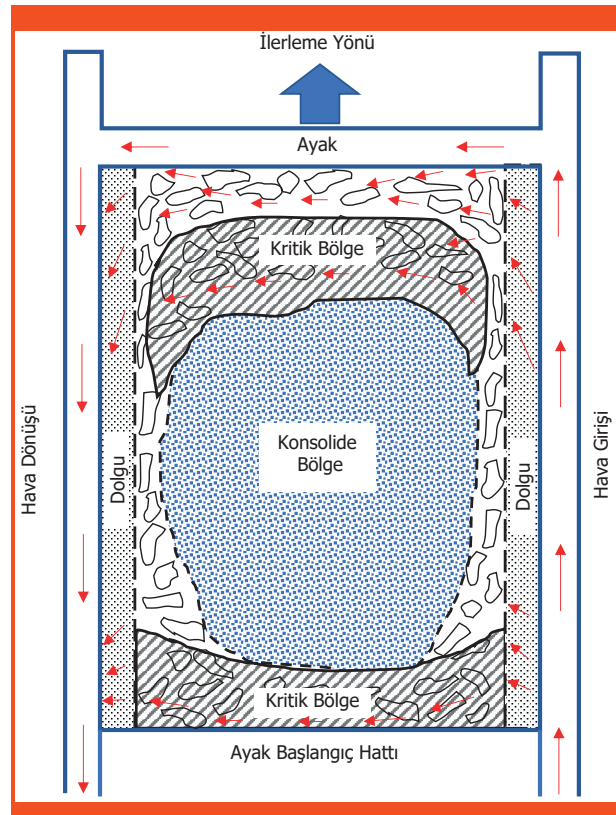
Ülkemizde bulunan bir yeraltı taşkömürü ocağına ait B18 kesitli ana kat galerisinin tavanında zamanla büyüyen yaklaşık 20-30 m³ hacimli bir boşluk oluşmuştur. Tavanda 30-35 cm kalınlığında bir kömür pasajı bulunmasına rağmen normal koşullarda herhangi bir kendiliğinden ısınma işareti görülmemiştir. Boşluğun boyutunun büyümesi nedeniyle dolgu yapılmasına karar verilmiş ve tavanda açılan boşluğun doldurulması için köpük enjeksiyonu yapılmıştır. Bu işlemten bir süre sonra CO konsantrasyonunda artış tespit edilmiş ve köpükle doldurulan boşlukta bulunan kömür pasajında kendiliğinden yanma olayının yaşandığı anlaşılmıştır. Kömür pasajının kendiliğinden yanması sonucu tavanda tekrar bir göçük olmuş ve bu göçük açılarak sondajlarla su enjekte edilmiş ve yangın kontrol altına alınmıştır. Olay dikkatle incelendiğinde, ana kat galerisinde büyük miktarda hava akımının bulunması nedeniyle boşluk doldurulmadan önce kömür pasajının oksidasyonu sonucu açığa çıkan ısının ortamdan uzaklaştırılmış olduğu ve bu nedenle bir kendiliğinden yanma olayının olmadığı anlaşılmaktadır. Boşluğun köpükle doldurulmasından sonra ise köpük ve tavan tabakası arasında Şekil 3.3'te görülen bir alternatif akış güzergahı oluşmuş, oksidasyon nedeniyle oluşan ısı ortamdan uzaklaştırılamamıştır. Ayrıca, kimyasal bazlı köpüğün enjeksiyonundan sonra köpükteki ekzotermik reaksiyonunun da olaya ek katkısı olduğu söylenebilir.

Uzunayak Göçüklerinde Havanın Akışı ve Kaçaklar

Bir yeraltı kömür ocağında ocağın diğer kesimlerine oranla bir kızışmanın oluşabileceği koşulların daha sık ortaya çıkabileceği yerler genellikle ayak göçükleri olmaktadır. Aktif bir uzunayak göçüğündeki kızışma riski, yetersiz konsolidasyona bağlı olarak bu bölgede oluşacak alternatif kaçak yollarının sayısının fazlalığı nedeniyle daha büyüktür. Ayaktaki havalandırma akımı ya da barometrik değişimler nedeniyle göçüğe hava (dolayısıyla oksijen) girişi olabilmektedir. Bazı durumlarda barometrik değişimler ayaktaki havalandırmaya bağlı basınç farkını aşarak havanın genişleme ve büzülme etkisi nedeniyle havanın göçüğün içine ve dışına doğru hareketinde (nefes alma) önemli etkiye sahip olabilmektedir.

İlerletimli uzunayakların göçüğünde hava kaçaklarının olduğu "kritik bölgeler" ortaya çıkmaktadır. Bu bölgelerde, kömürün oksidasyon reaksiyonlarını sürdürmesi için yeterli miktarda oksijen sağlandığı ancak ortaya çıkan ısının uzaklaştırılma hızının ısı oluşum hızından daha düşük olduğu durumlar ortaya çıkmaktadır.

Şekil 3.4'ten görüldüğü üzere ilerletimli çalışan uzunayaklarda, bir tanesi ayak başlangıç hattında bir diğeri de göçüğün ayağa yakın olduğu bölgelerde olmak üzere iki kritik bölge oluşmaktadır. Bu bölgelerde göçükteki konsolidasyon tam olarak sağlanmadığından havanın kaçak güzergahları bulabileceği alternatif yollar oluşabilmektedir. Bu iki bölgenin arasında, çoğu zaman göçüğün merkezinde bulunan ve tam olarak konsolide olduğundan hava kaçaklarına müsaade etmeyen bir bölge de bulunmaktadır. Ayak ilerledikçe bu bölge de ilerlemektedir. Tam konsolide bölgenin hava kaçaklarına müsaade etmemesi nedeniyle özellikle ayağa yakın olan kritik bölgenin hızlı bir şekilde tam konsolide hale gelebilmesi kendiliğinden yanmaya zaman bırakmayacaktır. Bunun sağlanabilmesi için ayak sürekli olarak ve yeterli bir hızda ilerletilmelidir. Bu noktada, her ocaktaki şartların farklı olması, kömürün kuluçka süresi ve oksidasyon davranışları farklı olduğundan kesin bir ilerleme hızı vermek mümkün değildir. Bu hız, ancak üretilen kömürün özelliklerinin ve kendiliğinden yanmaya yatkınlığının belirlenmesi ve ocakta kendiliğinden yanma açısından edinilen tecrübelerle göre seçilmelidir. McPherson (1993) ilerletimli ayaklarda en büyük tehlikenin hafta sonları ve tatil günlerinde olduğunu ve bu dönemlerde özellikle taban yolu kenarlarındaki dolgu hatlarına yönelik olarak sızdırmazlık sağlayan maddelerin kullanımı, beton enjeksiyonu ya da o ocak kesimine sağlanan temiz hava miktarında kısıntı yapmak gibi özel tedbirlerin alınması gerektiğini belirtmiştir.

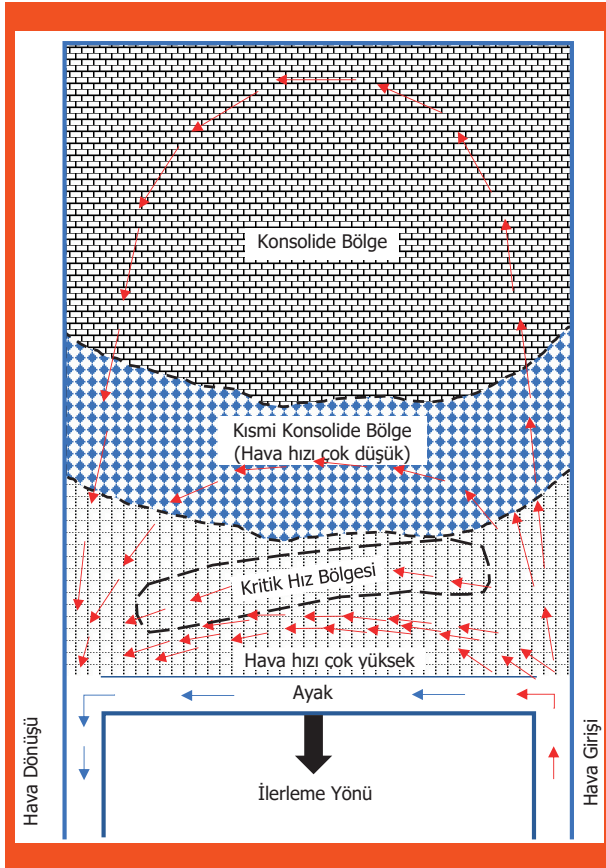


Şekil 3.4 Tek girişli ilerletimli çalışan bir uzunayak göçüğünde kendiliğinden yanmaya en yatkın bölgeler (McPherson, 1993'den değiştirilerek).

Şekil 3.5'te dönümlü-göçertmeli çalışan ve tek girişli bir uzunayak göçüğündeki hava kaçak güzergahları

görülmektedir. Ayağın ilerlemesiyle birlikte belirli bir mesafede kalan göçük tam olarak konsolide olmakta ve dolayısıyla bu bölgede oluşabilecek kaçak güzergahları oldukça daralmakta, havanın bu bölgeye ulaşabilmesi için uzun yol katetmesi gerekmekte ve dolayısıyla kaçak güzergahlarının dirençleri oldukça yüksektir. Ayağa yaklaştıkça göçüğün konsolidasyonu azalacak ve içerisinde orta büyüklükte dirence sahip olan kaçak yolları bulunan ve kısmi olarak konsolide olmuş bir bölge ile karşılaşılacaktır. Ayağa yakın olan aktif göçük bölgesi ile kısmi olarak konsolide bölge arasında kalan konsolide olmamış bölge (kritik hız bölgesi) kendiliğinden yanma için en riskli bölge olmaktadır.

uzaklaşılabilir ve konsolidasyonun da iyi olmasıyla hava akışı kendiliğinden yanmayı hızlandıramayacak seviyelerde tutulabilecektir. Ayrıca, benzer bir durum panolarda üretimin bittiği ve ekipmanın söküldüğü durumlarda da ortaya çıkabilmektedir. Sökümün uzun sürdüğü durumlarda da benzer kendiliğinden yanma açısından benzer riskler bulunmaktadır. Ayrıca, gazlı kömür damarlarında göçükte metanın patlayabileceği konsantrasyonların oluşabileceği kritik bir bölge de bulunmaktadır. Bu durumda kendiliğinden yanmanın önlenmesi, bir patlamaya neden olabileceği olması nedeniyle daha da kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.5 Tek girişli, dönümlü-göçertmeli uzun ayak göçüğünde hava kaçak güzergahları ve kritik hız bölgesi.

Göçüğün ayağa yakın olan bölgelerinde hava hızı oldukça yüksek olduğundan bu bölgede oksidasyon sonucu oluşan ısı ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Kısmi konsolide olmuş ya da tam olarak konsolide olan bölgede ise hava miktarı (ve hızı) oksidasyonu sürdüremeyecek kadar düşük olacaktır. Bu iki bölgenin arasında yer alan "Kritik Hız Bölgesinde" ise oksidasyon reaksiyonlarının sürdürülmesi için hem yeterli oksijen ortamda bulunacak hem de oluşan ısının ortamdaki uzaklaştırılma hızı ısının oluşma hızından düşük olacaktır. Böyle bir durumda ortam sıcaklığı artacak, kendiliğinden yanma hızlanacak ancak yine de bir yangının oluşabilmesi için belirli bir zaman gerekecektir (kuluçka süresi). Bu nedenle, ayaktaki ilerleme hızları kendiliğinden yanma açısından son derece önemlidir. Eğer ayak ilerleme hızları yeterince yüksek olursa kuluçka süresinin tamamlanmasından önce kritik hız bölgesinden hızlıca

4. KENDİLİĞİNDEN YANMA AÇISINDAN OCAK PLANLAMASI VE TASARIMI



Yüksek ocak eş değer
direnci = Daha fazla
kendiliğinden yanma
sorunu!

Üretimlerin yüksek olduğu kömür ocaklarına sahip gelişmiş madencilik ülkelerinde uzunayak planlamalarında, havalandırma ile ilgili avantajlar sağlanması açısından, iki veya daha fazla taban yolu dolayısıyla buna uygun sayıda anayollar kullanılmaktadır. Uzunayak panolarında çoklu taban yolu kullanılmasının temel sebebi, paralel hava devreleri oluşturarak ocak eşdeğer direncini, dolayısıyla havalandırma basıncını azaltmaktır. Ocağa sağlanan hava miktarına karşılık ortaya çıkacak sürtünme ve şok kayıplarının bu yolla azaltılarak havalandırma basıncının azaltılması ise hava kaçaklarını azaltacaktır. Ancak çoklu taban yolu bulunan uzunayak panolarında topukların ve topuklar arasında barajların bulunması paralel galerilere ve komşu panonun göçüğüne hava kaçağı risklerini de beraberinde getirmekte ve bu durum iyi kontrol edilemezse kendiliğinden yanma açısından riskleri arttırmaktadır.

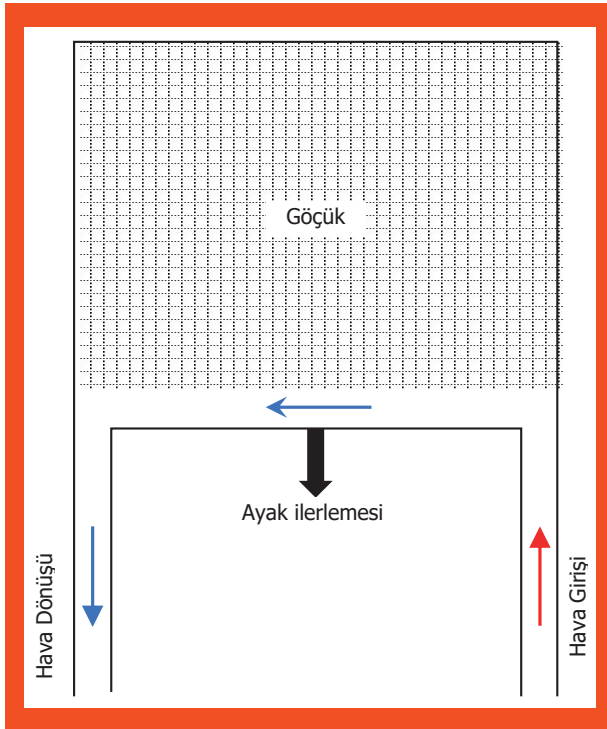
Ülkemizin de içinde bulunduğu Avrupa ve Asya'da bulunan çoğu yeraltı kömür ocağında üretim yöntemi olarak genellikle uzunayak yöntemi uygulanmaktadır. Uzunayak yöntemi ise ilerletimli ya da dönümlü şekilde uygulanabilmektedir (Şekil 3.4 ve 3.5). İlerletimli uzun ayak yöntemi, göçük bölgesinde negatif basınç yaratması nedeniyle metanın özellikle göçük bölgesinden uzaklaştırılması açısından daha avantajlı olabilmektedir. Ancak bu yöntem, kendiliğinden yanmaya yatkın kömür damarlarında göçüğe hava kaçaklarının kontrolü açısından sakıncalara sahiptir. Zira dönümlü uzunayak uygulamalarında göçüğe kaçan hava daha kolay kontrol edilebilmektedir. Eğer göçükte bırakılan kömür nedeniyle göçükte büyük miktarlarda metan yayılımı söz konusu ise bu durumda ocak içi metan drenajı uygulaması ile arındaki havalandırma rahatlatılabilmektedir.

ABD ve Avustralya gibi ülkelerin aksine Avrupa ve Asya'da bulunan ocaklarda genellikle yüksek eğimle yataklanmış birden çok damar bulunmakta ve madencilik daha derin kotlarda yapılmaktadır. Birden fazla damarın üretildiği ocaklarda gerilmeler nedeniyle tabaka kontrolü ve birden çok kaynak olması nedeniyle metan kontrol sorunları oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu nedenle, ülkemizde olduğu gibi, ikincil tahkimat uygulamalarının yaygın olarak uygulandığı tek giriş-çıkışa sahip pano tasarımları tercih edilmektedir.

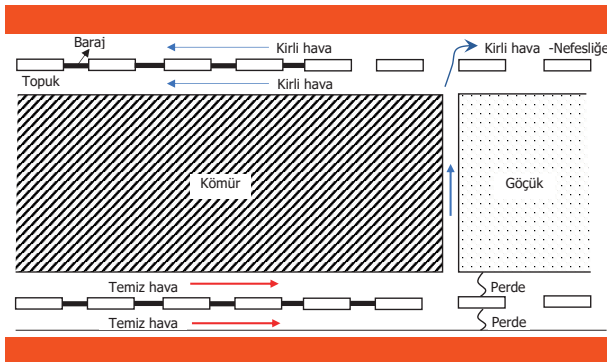
Kendiliğinden yanma açısından bakıldığında, çoklu girişe sahip panolarda taban yollarının kesiştiği noktalarda barajların yapılması gerekmekte ve bu da paralel taban yollarına ya da üretimi tamamlanmış panolara hava kaçağı riskini arttırmaktadır. Ayrıca, taban yolları arasında bulunan zincir topuklar da bazı durumlarda kendiliğinden yanma riskini arttırmaktadır. Tek girişli pano tasarımları ise aktif panoların göçüklerini üretilmiş komşu panolardan izole etmesi nedeniyle avantajlıdır.

Dönümlü çalışmalarda göçüğe hava kaçaklarının engellenmesi açısından en etkin ve etkili yöntem, ülkemizde de yaygın olarak kullanılan "U-havalandırma sistemi"dir. Bu sistemde temiz hava, hava giriş yolundan

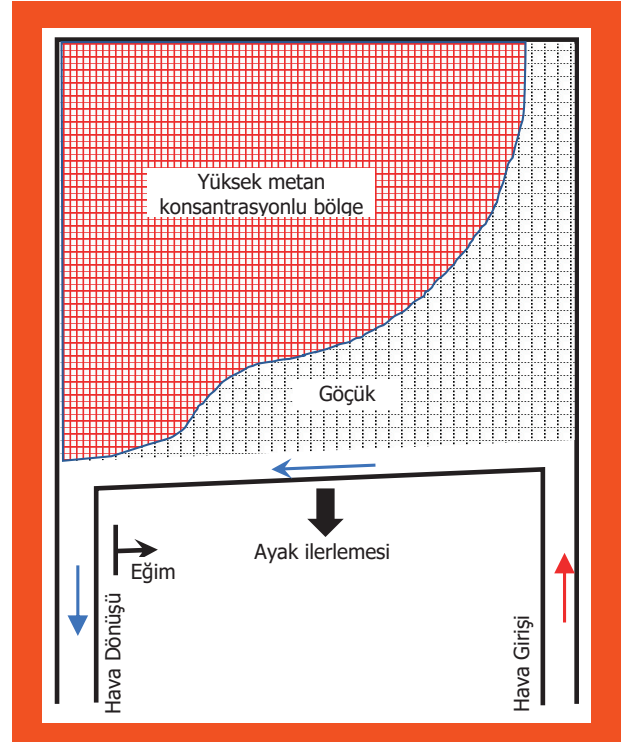
(genellikle alt taban yolu) ayağa gelmekte ve ayakta kirlendikten sonra hava dönüş yolundan (genellikle üst taban yolu) ana hava dönüşüne taşınmaktadır (Şekil 4.1). U-havalandırma sisteminin kullanıldığı çoklu girişe sahip pano tasarımlarının (Şekil 4.2) aksine, tek girişli uzunayak panolarında hava kaçaklarını sınırlandırmak için çok sayıda barajın yapılmasına gerek olmaması sistemin önemli bir avantajıdır. Basit U-havalandırma sisteminde, daha karmaşık diğer havalandırma sistemlerine kıyasla (arka nefeslikli U-havalandırma, Y, W, Z havalandırma), istenen hava miktarının panoya sağlanması için genellikle daha az basınç farkının yaratılması gerekir. U-havalandırma sisteminin temel dezavantajı ise özellikle gazlı ocaklarda yüksek konsantrasyondaki metanın panonun üst taban yolu köşesinde birikmesidir (Şekil 4.3).



Şekil 4.1 Dönümlü bir uzunayak panosunda U-havalandırma sistemi.



Şekil 4.2 U-havalandırma sisteminin kullanıldığı, iki girişli, arka nefesliğe sahip tipik bir pano.



Şekil 4.3 U-havalandırma sisteminde göçükte metan dağılımı (Krzystolik, 1991'den değiştirilerek).

Ülkemizdeki gibi Avrupa ve Asya'da bulunan kömür ocaklarında dik eğimlerde yataklanmış kömür damarlarına erişim için hazırlıklar büyük çoğunlukla taştta yapılmaktadır. Bu nedenle üretimi tamamlanan panolarda barajlar taştta inşa edilmekte ve bu da barajlanan bölgedeki kendiliğinden yanma riskini azaltmaktadır. Ancak, yüksek üretimlerin olduğu ve dolayısıyla metan gelirinin fazla olduğu durumlarda tek girişli pano tasarımlarında metan kontrolü oldukça zor olmakta ve metan drenajı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Kendiliğinden yanmaya yatkın kömürlerin üretileceği yeraltı kömür ocaklarında pano tasarımları önem arz etmektedir. Bu tür ocaklarda ocak planı ve pano tasarımları kendiliğinden yanma risklerini en aza indirecek şekilde yapılmalıdır. Yeraltı kömür ocaklarında havalandırma tasarımı yapılırken temel amaç gerekli havanın en küçük sürtünme ve şok kayıplarıyla panolara ulaştırılması ve panodaki taban yollarının yeterli büyüklükteki kesitlerde seçilmesidir. Zira Eşitlik 3.2 (sayfa 21) dikkatle incelenirse bir havayolunun direncinin, yolun kesit alanının küpü ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu durumda kömür ocaklarında desandrelere, kuyuların, ana yolların ve pano taban yollarının ekonomik sebeplerle küçük kesit alanlı seçilmesi ocak eşdeğer direncini, dolayısıyla ocakta yaratılması gereken basınç farkını arttıracaktır. Bu durumda ayaklarda oluşacak basınç farkları ve hava kaçak riskleri artacaktır.

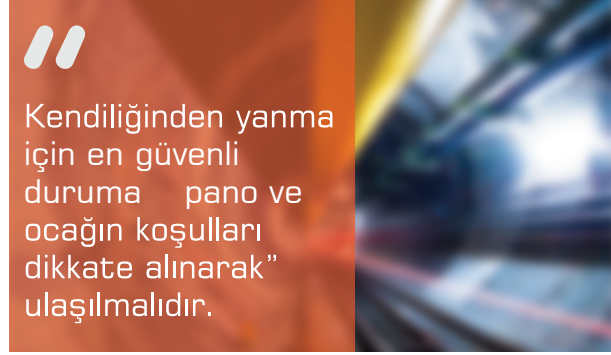
Panoların taban yollarında bulunan engeller havayolunun direncini, dolayısıyla basınç kayıplarını ve ocağa sağlanması gereken basınç farklarını arttıracığından ve bu da kendiliğinden yanmayı tetikleyebileceğinden taban

yolları mümkün olduğu ölçüde temiz tutulmalıdır. Ayrıca, taban yolları üzerine etkiyen gerilmeler nedeniyle taban yollarında oluşacak kesit daralmaları da hava yolu direncini arttıracığından pano tasarımları sırasında, özellikle pano oryantasyonlarının seçilmesi sırasında, asal gerilmelerin yönlerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Havayollarında ahşap tahkimat ve çelik bağ gibi pasif tahkimat elemanlarının kullanılması da tavan tabakalarının birbirinden ayrılmasına neden olabilmekte ve hava yolunun pürüzlülüğünü artırarak direncini de arttırmaktadır. Tavan tabakalarının ayrılması nedeniyle bu kesimlerde tavana hava kaçakları oluşabilmekte ve eğer bu kısımlarda kömür pasajları varsa kendiliğinden yanma olayları yaşanabilmektedir. Mümkün olduğu takdirde ana tahkimat elemanı olarak ya da ikincil tahkimat elemanı olarak kaya saplaması kullanımı bu sorunları büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, pasif tahkimat elemanlarının kullanıldığı durumlarda tahkimat arkasındaki boşluklara hava kaçakları önlenmelidir. Bu bölgelerdeki boşluklar uygun dolgu malzemeleri ile doldurulmalıdır.

Uzunayaklarda aktif ayağın hemen arkasındaki göçük tarafını izole etmek mümkün olmadığından, düşük ayak ilerlemeleri ya da üretimde oluşacak gecikmelerde oluşacak hava kaçaklarından dolayı kendiliğinden yanma riski artmaktadır. Aktif göçük bölgesinin bir an önce geride bırakılarak konsolide hale gelmesinin ve bu sayede havanın bu bölgelerde kaçak yolları bulmasının engellenebilmesi için ayak ilerlemeleri bu riski en aza indirecek şekilde planlanmalıdır. Ayak ilerleme hızları üretilen kömürün özelliklerine, madencilik yöntemine ve havalandırma koşullarına bağlı olacaktır, ayak ilerleme hızları ocağa ve bazı durumlarda ayağa uygun şekilde seçilmelidir. Çeşitli sebeplerle ayak ilerleme hızlarının düştüğü durumlarda sorunların ortadan kaldırılarak normal hızlara en kısa sürede dönülmeye çalışılmalıdır. Ayrıca, göçüğe hava kaçaklarının önlenmesi için hava giriş yolu tarafında göçük bölgesinde perde kullanımı da düşünülmelidir. Ayakta ilerleme hızı bazı durumlarda kızışma/yangınla mücadelede bir araç olarak bile kullanılabilir. Göçükte meydana gelen bir kızışma/yangın durumunun erken tespit edildiği durumlarda, geçici olarak ayak ilerleme hızı artırılarak, böylece kızışma/yangın bölgesi göçükteki konsolide bölge (bkz. Şekil 3.4 ve 3.5) içine sokularak, kızışma/yanğını kontrol altına almak mümkün olabilmektedir.

Ayakların başlangıcı ve pano üretiminin tamamlanmasını takiben ekipmanın sökülmesinin yapılacağı durumlar ekstra dikkat gerektirmektedir. Ayak kurulum ve üretime başlama sürelerinin mümkün olduğu ölçüde kısa tutulması ve havanın göçüğe girişini engellemek için ayağın alt taban yolu tarafında (temiz hava girişi) perde kullanımı önemlidir. Ayrıca, ayak sökülmesi sırasında ayaktaki metan geliriye bağlı olarak ayağa giren hava miktarı ve dolayısıyla ayakta oluşacak basınç farkları azaltılarak kendiliğinden yanma kontrolü açısından olumlu koşullar yaratılabilir. Bunun yanı sıra, ayaktaki sökülme takiben panonun barajlanması için gerekli malzemenin bölgede hazır bulundurulması ve bölgenin bir an önce barajlanması sağlanmalıdır.



4.1 Metan Drenajının Etkisi

Yeraltı kömür ocaklarında havalandırma açısından öncelikli hedef, madencilik faaliyetleri nedeniyle ocak atmosferine karışan metan gazının seyreltilerek ocak dışına atılmasıdır. Kömür damarlarının yüksek miktarda gaz içeriğine sahip, metan gazının kömürden hızlı desorbe olduğu ya da az miktarda gaz içeriğine sahip ancak yüksek miktarlarda üretim olan ocaklarda ocak atmosferindeki metan gazının havalandırma ile seyreltilmesi mümkün olamayabilmektedir. Zira bu durumlarda ortaya çıkan temiz hava ihtiyacı yeraltı açıklıklarında büyük hava hızlarının oluşturulmasını gerektirmekte ve bu da hem konfor hem de iş güvenliği açısından yeni sorunlar (toz oluşumu vb.) ortaya çıkarmaktadır. Havalandırma ile metan miktarının seyreltilmesinin mümkün olmadığı bu durumlarda kömür bünyesindeki metanın bir kısmı drene edilerek havalandırma sisteminin yükü hafifletilmektedir.

Metan drenajı yeraltı kömür damarlarında genel itibarıyla madencilik öncesi ve madencilik sonrası olmak üzere iki türlü yapılmaktadır. Madencilik öncesi metan drenajında, üretilecek damara, bu damarın üstündeki ya da altındaki damarlara genellikle uzun delikler açılarak kömür damarlarının bünyelerindeki gazın boşaltılması hedeflenmektedir. Bu delikler yeraltından ya da yer üstünden açılabilir. Madencilik sonrası metan drenajında ise kömür damarı üretildikten sonra panonun göçük bölgesine, yeryüzünden ya da ocak içinden (tek girişli uzunayaklarda taban yolları göçüğünden mümkün değil) delikler açılarak göçükte biriken gaz drene edilmektedir.

Damarın üretilmesinden önce gerçekleştirilen metan drenajı kömür içindeki gözenek ve çatlaklarda bulunan gazın boşalmasına, dolayısıyla oksijenin bağlanacağı yüzeyleri arttıracığından kendiliğinden yanma için dezavantajlı bir duruma neden olabilecektir. Bunun yanı sıra drenaj nedeniyle kömür bünyesindeki serbest suyun da drenaj deliklerinden tahliyesine neden olacaktır. Serbest haldeki suyun boşalması daha fazla toz oluşumunu beraberinde getirecek ve bu da kömürün yüzey alanını arttıracaktır. Ayrıca, özellikle bağıl nemin yüksek olduğu ocak atmosferlerinde suyun kömür yüzeyine adsorpsiyonu nedeniyle kömür yüzeyindeki sıcaklıkta artış (ıslanma ısı) yaşanmakta ve bu da kendiliğinden yanma riskini artırıcı bir etkiye bulunabilmektedir.

Metan drenajı sırasında vakum pompaları ile negatif basınç yaratıldığı durumlar dikkat gerektirmektedir. Sistemde aşırı basınç uygulandığı durumlarda ocak içinde drenaj deliğinden içeri hava çekilebilecek ve bu da delik etrafındaki kömür kütlelerinde kendiliğinden yanma riskini arttıracaktır. Bu nedenle tüm deliklerin çeperlerinin iyice betonlanması ve oluşabilecek kaçakların önlenmesi oldukça önemlidir.

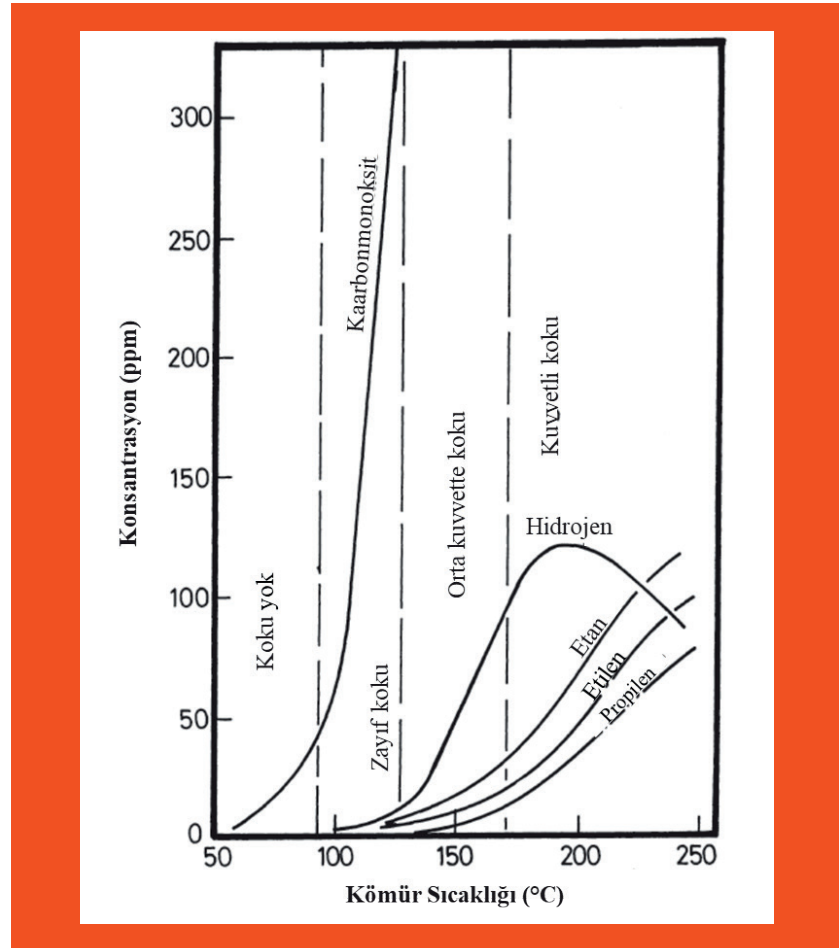
Madencilik sonrası metan drenajı yeryüzünden göçüğe açılan delikler aracılığıyla yapılmaktadır. Eğer ocak havalandırma fanı tarafından yaratılan negatif basınç drenaj göçükteki gaz karışımının batmazlık etkisini (buoyancy effect) aşarsa açılan drenaj deliğinden göçüğe hava çekilebilmesi mümkündür. Bu durumda göçükte kendiliğinden yanma riski artacaktır. Ayrıca, barometrik basınçtaki artışlar ile drenaj deliğindeki akışın yönünün değişmesi mümkündür. Bu nedenle drenaj deliğine bir drenaj pompası monte edilmesi yerinde olacaktır.

5. KENDİLİĞİNDEN YANMANIN TESPİTİ

Kömürün oksidasyonu ve kendiliğinden yanması esas itibariyle kimyasal bir reaksiyon olduğundan, kimyasal reaksiyonun ürünlerinin takibi olayın tespit edilmesi için yeterlidir. Bu rehberin 2. Bölümünde detaylı olarak anlatıldığı üzere, kömürün oksidasyonunun ilk safhalarından itibaren ana ürün olarak CO₂ ve CO oluşmakta ve bunun yanı sıra ileri oksidasyon seviyelerinde ve sıcaklıklarda ise C_xH_y formunda hidrokarbonlar açığa çıkmaktadır. Dolayısıyla ocak atmosferinde oksidasyon ürünlerinin izlenmesi ve bu gazların eğilimlerinin yorumlanması ocakta bir kendiliğinden yanma olayı olup olmadığının tespiti için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Kimyasal ürünlerin yanı sıra kendiliğinden yanma olayının oluşması ile ocakta sıradışı ve kolaylıkla ayırt edilecek özel bir kokunun yanı sıra sıcaklık artışı gibi fiziksel işaretler de bulunmaktadır. Şekil 5.1'de orta uçuculu bitümlü bir kömürün kendiliğinden yanması sonucunda sıcaklığa bağlı olarak açığa çıkan kimyasal ürünler ve fiziksel işaretler görülmektedir. Şekilde görülen gaz ürünlerin çıkış sıcaklıkları, farklı konsantrasyonlarda da olsa farklı tip kömürlerde de benzer sıcaklıklarda gerçekleşmektedir.



Tek başına gaz konsantrasyonlarını değil, yanma indekslerini ve eğilimleri incele!



Şekil 5.1 Kendiliğinden yanma olayı sırasında açığa çıkan koku ve gazlar (McPherson, 1993'den değiştirilerek).

Şekilden görüldüğü üzere bir kendiliğinden yanma olayında ayırt edici olsa da koku, baskın olarak 100°C'ye yakın sıcaklıklarda ortaya çıkmakta ve artan sıcaklıkla kokunun keskinliği artmaktadır. Bu özelliğiyle koku, kendiliğinden yanmanın erken aşamalarda tespiti için uygun değildir. Bu nedenle, özellikle oksidasyonun ilk safhalarından itibaren açığa çıkan ürünler olmaları itibarıyla, kendiliğinden yanmanın erken tespiti için tedbir alınabilmesini sağlayabilmek maksadıyla ocak atmosferinde izlenen ürünler gaz ürünlerdir.

Yeraltı ocaklarında ocak atmosferinin izlenmesi sadece kendiliğinden yanma ile ilgili değil aynı zamanda havalandırma açısından güvenli çalışma şartlarının sağlanması, yangın, barajlama ya da yasal zorunluluklar gibi nedenlerle de yapılmaktadır. Bir yeraltı ocağında ocak atmosferi, sabit ve sürekli izleme sistemleriyle, kişisel izleme ekipmanlarıyla ve ocak atmosferinden örnek alınarak bir analitik cihazda analizler yapılması yollarıyla izlenebilmektedir. Bu rehberde ülkemizde de yasal zorunluluk olması nedeniyle sabit ve sürekli gaz izleme sistemleri üzerine odaklanılacaktır. Bunun yanı sıra bu sistemlere destekleyici olarak gaz kromatografisi kullanımı hakkında da bilgi verilecektir. Yeraltı ocaklarında sabit ve sürekli izleme sistemi olarak "telemetri" ve "tüp demeti" adı verilen iki yöntem kullanılmaktadır.

Ülkemizde olduğu gibi atmosferik izleme sistemlerinin kullanımı ABD, Avustralya, Almanya, Polonya, Çekya ve Çin gibi ülkelerde kanun ve yönetmelikler ile zorunlu hale getirilmiştir (Griffin vd., 2012). Bilindiği gibi ülkemizde 19 Eylül 2013 tarih ve 28770 sayılı Resmî Gazete'de (10 Mart 2015, 29291 sayılı Resmî Gazete ile değişik) yayımlanan Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği ile yeraltı kömür ocaklarında atmosferik izleme sistemleri zorunlu kılınmıştır. Yönetmeliğe göre; ocakların ana hava giriş ve dönüş yollarına, her üretim bölümünün temiz hava giriş ve dönüş yolları ile hazırlık çalışmalarında O₂, CH₄, CO, H₂S, sıcaklık ve hava hızı sensörlerinin yerleştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.

5.1 Telemetri Sistemleri

Telemetrik sistemler, yeraltında çeşitli noktalara yerleştirilen farklı tipte sensörler aracılığıyla yeraltı atmosferindeki değişimlerin "gerçek zamanlı" olarak izlenmesine olanak veren sistemlerdir. Bu sistemlerin kullanımı, sensör okumalarını kullanarak ocağın havalandırma şebekesindeki beklenmeyen değişikliklerin takibinin yanı sıra ocakta gaz birikmesi ya da kendiliğinden yanma nedeniyle yüksek riskli duruma gelen bölgelerin tespitine olanak vermektedir. Bu sistemler, tüm dünyada yaygın olarak O₂, CH₄, CO ve CO₂ gibi gazların konsantrasyonlarının yanı sıra atmosferik basınç, hava hızı ve sıcaklık gibi parametrelerin izlenmesi için kullanılmaktadır.

Bu sistemlerde kullanılacak sensörlerin seçimi izlenecek gazın ve parametrenin özelliklerine bağlı olarak seçilmektedir. Günümüzde yeraltı ocaklarında kullanılan telemetri sistemlerinde çok farklı tipte sensör kullanılabilmektedir. Bu sensörler arasında elektrokimyasal, katalitik, fotoakustik kızılötesi, yarıiletken ve ısı iletkenlik

gibi teknolojiler bulunmaktadır. Sensörlerle ilgili ayrıntılı bilgi başka çalışmalardan elde edilebilir (MSA, 2007; Kumar vd., 2012).

Sistemde kullanılan ve ocaklarda farklı yerlerde bulunan farklı tipte sensörler kablolar aracılığıyla yeryüzünde kurulu izleme merkezine sinyaller göndermekte ve bu sayede ocak atmosferi çok küçük gecikmelerle izlenebilmektedir. Sensörlerin hızlı tepki süreleri sayesinde yangınların erken tespiti ve ilgili tedbirlerin alınması olanaklıdır. Sistemdeki sensörler ve kabloları istenen ocak kesimine kolaylıkla yerleştirilebilmekte ve istenen sayıda sensörün sisteme bağlanması mümkün olabilmektedir. Sistemde bir sensörün arızalanması sonucu sadece o sensörün ölçtüğü veri dışında bir veri kaybı söz konusu değildir. Tüp demeti sistemi ile karşılaştırıldığında telemetri sistemleri çok daha az maliyetlidir.

Telemetri sistemlerinde kullanılan sensörlerle ilgili temel sorunlardan bir tanesi kurulacak sensörlerin en doğru okumayı yapacak şekilde galeri kesiti içinde nereye yerleştirileceğidir. Bunun yanı sıra, bu sistemlerdeki sensörlerin düzenli olarak kalibre edilmesi ve doğru ölçüm yaptıklarının teyidi de oldukça önemlidir. Zira bu sistemlerde kullanılan sensörler ocak atmosferindeki bağıl nem ve tozdan kolaylıkla etkilenebilmekte, bazı durumlarda ise sensörler aşırı gaz konsantrasyonlarından "zehirlenebilmekte" ve doğru ölçümler alamamaktadır. Kalibrasyon işi yeraltında yapılacağından özellikle büyük ocaklarda kalibrasyon işi işgücü ve zaman açısından zorlayıcıdır. Ancak bu sistemlerdeki sensörlerin kalibrasyonları bozuk olsa dahi yangın başlangıcı, ani gaz geliri ya da bant yangını gibi olaylarda anlık değişikliklerin fark edilmesi anormal veriler nedeniyle mümkün olabilmektedir. Eğer uzun vadeli eğilimlerin incelenmesi isteniyorsa sensörlerin sıklıkla kalibrasyonlarının yapılması önem arz etmektedir. Ayrıca telemetri sistemlerinde göçük bölgeleri, baraj arkası gibi erişimi zor bölgelere sensör yerleştirmek mümkün olmadığı gibi, kızıl ötesi sensörler hariç diğer sensörler ölçüm yapabilmek için belirli bir seviyede oksijene ihtiyaç duymakta ve bu da bu bölgelerde ölçüm almayı neredeyse imkansız hale getirmektedir. Telemetri sistemlerinde diğer bir sorun da sensörlerin bazılarının takip edilen gazdan farklı bir gazdan etkilenecek ölçüm yapmasıdır. Buna bir örnek CO sensörlerinin H₂ ya da H₂S gazlarına da tepki verebilmesidir.

Bu sistemlerde bulunan sensörler bir patlama ya da yangın anında zarar görebilmekte ve yerüstü ile iletişimlerini kesilebilmektedir. Ayrıca, işlev görebilmeleri için yeraltındaki güç kaynaklarına ihtiyaç duyduklarından herhangi bir sebeple oluşan bir güç kesilmesinde işlev görememektedirler.

5.2 Hortum Demeti Yöntemi

Tüp demeti sistemi 1960'larda Almanya'da oksidasyon ve kendiliğinden yanma olaylarını tespit etmek ve ilerlemesini izlemek için geliştirilmiştir. Bu sistemde yeryüzünde bulunan vakum pompaları aracılığıyla yeraltından çeşitli noktalardan çekilen örneklerin her biri yaklaşık 5 km uzunlukta olabilen 20-40 plastik hortumdan (Ryan ve Watkinson, 2018)

geçerek yeryüzündeki analiz odasına gelmektedir (Şekil 5.2). Bu sistemde tipik olarak yeryüzüne ulaşan gaz örneklerindeki CO, CO₂, O₂, CH₄ konsantrasyonları analiz odasında bulunan analizörler kullanılarak ölçülmektedir.



Şekil 5.2 Hortum demeti yönteminin bileşenleri (a) izleme odası, (b) yedili hortum demeti (c) selenoid valf manifoldu sistemi ve (d) vakum pompaları (Brake, 2013).

Sistemdeki izleme odası ocak üzerinde ve yeryüzünde konuşlandırılmakta ve hortumlar izleme odasının yanından bir sondaj deliği içinden yeraltına indirilmektedir. Kullanılan hortumların yaklaşık yarısı aktif madencilik alanlarında kullanılırken diğer yarısı ise barajlı bölgeler için kullanılmaktadır.

Günümüzde oldukça iyi analitik ölçüm cihazlarının mevcut olması ve yeraltından alınan örneklerin analizörlere girmeden önce filtrelerden geçirilip kurutulmasıyla oldukça kaliteli ölçümler yapmak mümkün olduğundan bu sistem uzun vadeli analizler için oldukça uygundur. Sistemin, CO'nun 1 ppm mertebelerinde tespit edebilmesi ve analizörlerin duraylılığı göz önüne alındığında, bir kendiliğinden yanma olayının tespitinde uzun vadeli analiz yapmak için en iyi teknik olduğu söylenebilir. Ayrıca, hortum demeti sistemlerinde kullanılan analizörlerde kızıl ötesi absorpsiyon ve paramanyetik özellikler kullanılması ayak göçüğü gibi oksijensiz ortamlarda ölçüm yapılabilmesine olanak vermektedir.

Yeraltından alınan gaz örnekleri doğrudan yeryüzüne ulaştığından gaz kromatografi gibi cihazlar kullanılarak ocaktaki çeşitli noktadaki durumu değerlendirmek üzere ek gaz analizlerinin yapılabilmesi için tekrar ocağa inilmesine gerek kalmamaktadır. Bu özelliğiyle, özellikle patlama riski bulunan gazlı ocaklarda kendiliğinden yanma gibi tehlikeli olaylar sırasında yeraltına inilmesine gerek olmaması sistemin önemli avantajlarından. Ayrıca, yeraltında bir patlama gerçekleşmesi durumunda sistem fonksiyonlarına devam edebilmekte ve hortumlardaki vakum basınçları izlenebildiği için hortumların zarar görüp görmedikleri anlaşılmaktadır. Gerekliğinde ek sondajlar yapılarak yeni hortumlar ilgili yeraltı lokasyonlarına indirilebilmektedir.

Sistemin avantajlarından bir tanesi de analizörlerin yeryüzünde neredeyse bir laboratuvar ortamında bulunması nedeniyle alev sızdırmaz olmalarına ihtiyaç duyulmaması ve böylece cihazların nemli ve tozlu ocak koşullarına maruz kalmamasıdır.

Hortum demeti sistemleri özellikle tepki süresi anlamında telemetrik sistemlere göre oldukça yavaştır. Pompa vakum kapasiteleri ve hortum uzunluklarına bağlı olarak tepki (analiz için gerekli süre) süreleri 1 saate kadar uzayabilmektedir. Bu süre zarfında ocak atmosferindeki değişiklikleri tespit etmek mümkün değildir. Analizler, ortalama 30 dakikalık aralıklarda alınan örnekler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, hortumlarda meydana gelecek kaçaklar da ölçüm sonuçlarında hatalara neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra izlenen gazlar tek bir analizör ile analiz ediliyorsa bu analizörün arızalanması durumunda ocak atmosferini izlemek mümkün olamamaktadır. Analizörlerin satın alma maliyetleri ise oldukça yüksek olabilmektedir (> 500.000 TL).

Hortum demeti yönteminin ülkemizde uygulama alanı sınırlıdır. ABD ve Avustralya gibi ülkelerdeki yeraltı kömür ocaklarında pano tasarımları çoklu taban yolları şeklinde yapıldığından dönümlü uzun ayaklarda göçüğe komşu olan taban yolları hizmete devam etmektedir (Şekil 4.2). Dolayısıyla ayak arkasındaki göçüğün çeşitli yerlerinden gaz örneği almak için kullanılan hortumlar zincir topuklar arasında bulunan barajlardan göçüğün istenen bölgesine uzatılabilmektedir. Oysa ülkemizdeki gibi taban yollarının ayakta tutulmadığı yöntemlerde hortumları göçükte tutmaya imkan bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra, ülkemizdeki ocak derinlikleri genellikle sığ olmadığından yerüstünden sondaj yapılması da oldukça zahmetli, maliyetli olmakta ve zaman almaktadır.

5.3 Gaz Kromatografi (GC)

Gaz kromatografi karışım halinde olan gazları birbirinden ayırmakta, nitel (kalitatif) ve nicel (kantitatif) analizler yapmak üzere kullanılan bir yöntemdir. Nitel analizlerde analiz sonucunda elde edilen kromatografik piklerin çıkış zamanları kullanılarak piklerin karışımdaki hangi maddelere ait olduğu tespit edilmektedir. Nicel analizlerde ise analiz sonucunda elde edilen kromatografik piklerin altında kalan alanlar integrasyon yöntemiyle hesaplanmakta ve bu alan miktarı bilinen bir kalibrasyon gazından elde edilen alan ile kıyaslanarak karışımdaki maddelerin miktarı bulunabilmektedir. Bu yöntem kullanılarak çok hızlı sonuçlar alınabilmekte, oldukça hassas (1 ppm'e kadar) ve tekrarlanabilir ölçümler yapılabilir.

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak günümüzde sabit olarak kullanılan gaz kromatograflarının yerini Mikro GC olarak adlandırılan son derece küçük boyutlu, çok hızlı analizler yapabilen (~2 dakika) ve taşınabilir cihazlar almıştır (Şekil 5.3). Bu da maden ocakları gibi yerlerde GC kullanımını kolaylaştırmaktadır. Bu cihazlar kullanılarak yeraltı kömür ocaklarından alınan gaz örneklerinin bileşenleri ve miktarları son derece doğru bir şekilde

tespit edilebilmektedir. GC kullanılarak tek bir analizle diğer atmosferik izleme sistemlerinde izlenemeyen tüm hidrokarbonların (C_2H_2 , C_2H_4 , C_3H_8 vb.) yanı sıra H_2 gibi tüm gazlar kolaylıkla tespit edilebilmektedir.



Şekil 5.3 Bir (a) sabit gaz kromatograf ve (b) Mikro GC (www.agilent.com).

Gaz kromatografisi kullanılarak küçük gaz örnekleriyle detaylı analizler yapılabilmektedir. Bu sayede kişisel örnekleme cihazları ya da sabit izleme sistemlerinden alınan ölçümler teyit edilebilmekte, gaz konsantrasyonları belirlenebilmekte ve özellikle kendiliğinden yanma ve yangın durumlarında, baraj arkalarının analizlerinde ocak atmosferinin değerlendirilmesine yönelik olarak kullanılan indeksler hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Ayrıca bu teknik, bir kendiliğinden yanma olayı ya da patlama sonrasında yeraltı atmosferinin patlayabilirliğinin doğru bir şekilde belirlenebileceği tek yöntemdir (Brady, 2008). Bu özellikleriyle yeraltı kömür ocaklarında taşınabilir gaz ölçüm cihazları ve sabit izleme sistemlerinin yanı sıra yerüstünde de bir gaz kromatografisinin bulundurulması ve aktif olarak kullanılması önem arz etmektedir.

Gaz kromatografileri kullanılırken incelenen gazların her birinin dikkatli bir şekilde kalibre edilmesi ve cihazın ehil bir operatör tarafından kullanılması ölçümlerin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Ocak şartlarında bunu başarmak zor olabilmektedir. Ayrıca gaz kromatografilerinin ilk maliyetlerinin yüksek olmasının (> 50.000 USD) yanı sıra bakım-onarım (kolon ve detektör arızası vb.) ve işletme maliyetleri (taşıyıcı gaz, kalibrasyon gazı vb.) de

yüksek olabilmektedir. Ancak bu olumsuzluklar özellikle acil durumlarda gaz kromatografisi kullanımının faydalarının yanında ihmal edilebilir düzeydedir.

5.4 Kendiliğinden Yanmanın Tespiti ve İzlenmesinde Kullanılan İndeksler

Rehberin önceki bölümlerinde bahsedildiği üzere kömürün oksidasyonu sonucunda, oksidasyonun ilerleme durumuna ve kömür sıcaklığına bağlı olarak CO_2 , CO , CH_4 , H_2 ve diğer hidrokarbonlar gibi çok çeşitli gaz ürünler açığa çıkmaktadır. Oksidasyonun ilk ve ana ürünü CO_2 olsa da bu gaz diğer kaynaklardan (dizel egzozlar, insan solunumu, suda çözülmüş halde bulunma vb.) da ocak atmosferine yayıldığından ve ocakta zaten bir arkaplan konsantrasyonu oluşacağından kendiliğinden yanmanın izlenmesi açısından tek başına kullanılamamaktadır. Bunun yanı sıra, CO dışındaki diğer gazlar ise oksidasyonun ilerlediği ve kömür sıcaklıklarının yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Ancak bu sıcaklıklardan sonra kendiliğinden yanmanın çok hızlı ilerlemesi söz konusu olacağından bu gazlar da erken tespit için kullanılamamaktadır. Örneğin C_2H_2 (etilen) iyi bir kendiliğinden yanma indikatörü olmasına rağmen bu gaz ancak kömür sıcaklığı $100^\circ C$ civarında ve üzerinde olduğu durumlarda ocak atmosferinde tespit edilebilecektir. Bu nedenle kömür ocaklarında ısınma ve kendiliğinden yanma olaylarının tespiti ve izlenmesi için en uygun olan ve yaygın olarak kullanılan gaz CO 'dur.

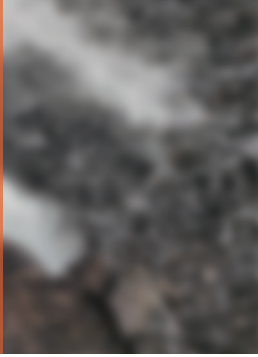
Yukarıda sayılan sebeplerin yanı sıra, gaz konsantrasyonlarının tek başına bir ısınma ya da kendiliğinden yanma belirtisi olarak değerlendirilmesinde de çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin CO oksidasyonunun her aşamasında ortaya çıktığından; sadece CO konsantrasyonunun izlenmesi ile oksidasyonun yaygın ve uzun süreli ve bir oksidasyon mu yoksa küçük bir alanda çok daha yoğun bir oksidasyon mu olduğunu ayırt etmek olanaklı değildir. Dolayısıyla, tek bir gazın izlenmesi kızılgınanın yoğunluğu hakkında bilgi vermemektedir. Ayrıca, çeşitli gazların ortamda bulunması nedeniyle diğer bir gazın konsantrasyonu seyrelmekte ve bazı durumlarda tespit edilebilir seviyelerin altına düşmekte ve bu da kızılgınanın boyutunun tespitini zorlaştırmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı çeşitli gaz konsantrasyonları kullanılarak ocak atmosferinin değerlendirilmesine yönelik olarak çeşitli indeksler geliştirilmiştir. Bu indeksler genel itibarıyla;

- (i) Ocakta bir kızılgına ya da yangının olup olmadığını,
- (ii) Yangın varsa hangi maddenin yandığını,
- (iii) Kızılgına/yangın nedeniyle bir ocak kesimi barajlandıktan sonra kızılgınanın/yanğının devam edip etmediğini,
- (iv) Barajlanan bir bölge açıldığında havalandırma nedeniyle açılan ocak kesiminde patlayıcı bir ortamın oluşup oluşmayacağını tespiti için kullanılmaktadır.



Kendiliğinden yanma/
yangın durumlarında
tek başına gaz
konsantrasyonu/
indeks değerleri
yerine eğilimler daha
önemlidir.



5.4.1 Graham İndeksi (Oranı)

Graham İndeksi, özellikle gaz seyrelme etkisini ortadan kaldırması açısından güvenilir bir indekstir. Bu indeks kömür sıcaklığı ile yakından ilişkilidir ve değeri sıcaklık arttıkça artmaktadır. Graham İndeksi Eşitlik 5.1 ile hesaplanabilir.

$$GI = \frac{CO}{(0,265N_2) - O_2} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada; CO, karbon monoksit konsantrasyonunu (%) ve (0,265N₂)-O₂ ise oksijen azalmasını (%) temsil etmektedir.

Genel itibariyle Graham İndeksi'nin artması bir kızışmaya işaret etmekler birlikte uluslararası tecrübelerle göre indeks değerleri Çizelge 5.1'e göre değerlendirilmektedir.

Çizelge 5.1 Graham İndeksi değerleri ve yorumu.

Graham İndeksi	Yorum
< 0,4	Normal
0,4 – 1,0	İncele
> 1,0	Kızışma
> 2,0	Ciddi Kızışma/Yangın

Graham İndeksinin avantajı kızışma/yangın bölgesindeki atmosferin, hava ya da CH₄ gibi bir gazla seyrelmesinden etkilenmemesidir. Zira böyle bir durumda hem pay hem de payda eşit olarak etkilenmektedir. Ancak bu indeks yangının yoğunluğu hakkında bilgi sağlarken okside olan/yanan malzemenin miktarı ile ilgili bir bilgi sağlamamaktadır (Banerjee, 1985). Bir başka deyişle 1 kg kömürün 200°C'de yanmasıyla, 1000 ton kömürün 200°C'de yanması sonucu aynı Graham indeks değeri elde edilmektedir. Bu indeks oksijen azalmasının % 0,3'ten daha az olduğu durumlarda güvenilir değildir (McPherson, 1993). Esas itibariyle bu durum oksijen azalmasının kullanıldığı tüm indekslerde geçerlidir.

Çoğu uzunayak panosunda fark edilir oranda oksijen azalması olmamasına rağmen panoya ait tüm hava dönüş yollarında Graham İndeksi'nin izlenmesi Queensland, Avustralya'da mecbur tutulmuştur (MDG-1006, 2011). Ülkemizde ise yönetmeliklere göre yeraltı kömür ocaklarında izlenecek gazlar arasında CO₂

bulunmamaktadır. Bu durumda önemli bir indeks olmasına rağmen Graham İndeksi'nin ülkemizde kullanılan telemetri sistemleri ile izlenmesi mümkün değildir. Bu İndeksi izlemek için ülkemizdeki ocaklara opsiyonel olarak CO₂ sensörü yerleştirilmesinin oldukça önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Graham İndeksi'nin hesaplanmasını ve yorumlanmasını ülkemizden gerçek bir örnekle açıklamak yerinde olacaktır. Çizelge 5.1'de ülkemizde bulunan bir yeraltı ocağında oluşan bir yangın sonrası barajlanmış bir bölgede baraj arkasından alınan gaz örneklerinin GC analiz sonuçları görülmektedir. Geçen 1,5 aylık süre sonunda baraj açılmaya karar verilmiş 1, 2 ve 3 no'lu örnekler baraj açılmadan önce, 4 ve 5 no'lu örnekler ise baraj açıldıktan hemen sonra alınmıştır. Alınan gaz örnekleri arasında 8 saat süre bulunmaktadır.

Çizelge 5.2 Baraj arkasından alınan gaz örneklerine ait analiz sonuçları ve hesaplanan Graham İndeksi değerleri.

Örnek	CO (ppm)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	Graham İndeksi (%)
1	1,7	77,97	16,52	0,0041
2	1,3	78,77	17,62	0,0040
3	0,3	79,14	14,46	0,0005
4	313	80,43	12,81	0,0368
5	3285	78,87	12,10	3,7327

Örnek olarak, çizelgede verilen 5 no'lu analiz için Graham oranını hesaplamak için öncelikle ppm'i (milyonda 1) değerlerini yüzdeye çevirmek gerekmektedir.

CO (%) = 3285 ppm / 10000 = % 0,3285 ve Eşitlik 5.1'den Graham İndeksi

$$GI = \frac{0,3285}{[(0,265(78,87)) - 12,10]} \times 100 = 3,7327$$

olarak bulunmaktadır.

Çizelgeden görülebileceği üzere baraj açıldıktan sonra CO değerleri hızlıca artmaya başlamıştır. Graham İndeksi ise baraj açılmadan önceki ilk üç analizde 0,4'ten oldukça küçük değerlere sahipken artmaya başlamış ve baraj açıldıktan 16 saat sonra ise 3,7 değerine ulaşmıştır. Buradan da barajın açılması için uygun şartların oluşmadığı ve baraj açıldıktan sonra yangının tekrar aktive olduğu anlaşılmaktadır.

5.4.2 Young Oranı

Young oranı yapısı itibariyle Graham İndeksi'ne oldukça benzemekte, ancak bu oranda eşitliğin pay kısmında CO yerine CO₂ konsantrasyonu kullanılmaktadır. Oksidasyon/kendiliğinden yanma olaylarında CO₂, CO'ya göre çok daha fazla miktarda oluştuğundan eşitliğin 100 ile çarpılmasına gerek bulunmamaktadır. Bu durumda Young Oranı birimsiz olmaktadır. Ayrıca, normalde atmosferde de

belirli bir miktar (yaklaşık % 0,004) CO₂ bulunduğundan bu miktarın da ölçülen CO₂ konsantrasyonundan çıkarılması gerekmektedir.

$$GI = \frac{CO_2 - 0,004}{(0,265N_2) - O_2} \quad (5.2)$$

Burada; CO₂, oluşan karbondioksit konsantrasyonu (%) ve (0,265N₂)-O₂ ise oksijen azalmasını (%) temsil etmektedir.

Bu oranın yorumlanmasında Graham İndeksi'nde olduğu gibi belirli aralıklar bulunmamaktadır. Bunun nedeni ise oksidasyon/kendiliğinden yanma sonucunda oluşan CO₂ miktarının büyük oranda kömüre bağlı olmasıdır.

Kendiliğinden yanma olayları açısından Young İndeksi'nin yükseldiği ve yükselmeye devam ettiği durumlarda yangının açık alevliye döndüğü ve sıcaklığın ya da yanıcı madde miktarının (kömür miktarının) arttığı söylenebilir. Açık alevli yanma olmayan baraj arkalarında Young oranı önce artacak fakat zamanla sabitlenecektir. Graham Oranı ile ilgili ülkemizden verilen örnekte barajın açılmasının hemen öncesindeki analiz değerleri ve Young Oranı değerleri Çizelge 5.2'de verilmektedir. Görüldüğü üzere baraj açılmadan hemen önce Young oranı neredeyse sabit değerlere erişmiş ve bu da baraj arkasında açık alevli bir yangın olmadığını işaret etmiştir.

Çizelge 5.3 Young Oranı değerleri.

Örnek	CO ₂ (%)	N (%)	O (%)	Young Oranı
1	1,43	77,52	16,40	0,34
2	1,73	77,97	16,52	0,42
3	1,66	77,07	16,29	0,40
4	2,01	78,78	16,35	0,44

5.4.3 CO Oluşum Miktarı (CO Make)

CO oluşum miktarı, sabit bir noktadan birim zamanda geçen CO'nun hacmidir. Bu miktar, ocaktaki hava akımından kaynaklanan ve ölçülen CO konsantrasyonunda oluşacak seyrelmenin etkisini ortadan kaldırmaktadır. Bir diğer ifadeyle, CO oluşum miktarı ocaktaki hava miktarındaki artış ya da azalmadan etkilenmemektedir. Bu miktar Eşitlik 5.3 ile hesaplanmaktadır.

$$CO \text{ Oluşum Miktarı} = (CCO)(Q)(K) \quad (5.3)$$

Burada; CCO, ölçülen CO konsantrasyonunu (ppm), Q hava miktarını (m³/s) ve K ise çevrim faktörünü (0,06) temsil etmektedir. CO Oluşum Miktarının birimi ise (l/dak) olmaktadır. Bu miktar hesaplanırken kullanılan değerler yeraltında aynı noktadan aynı zamanda ölçülmüş değerler olmalıdır. Bu miktar özellikle pano hava dönüş yollarında kullanıldığında oldukça kullanışlıdır.

CO Oluşum Miktarı hava ile reaksiyona giren kömür miktarına bağlı olmakta ve eğer koşullar değişir, örneğin ayağın göçüğünde daha büyük bir alanda oksidasyon

olursa, bu durumda oksidasyonun yoğunluğu artmasa bile CO Oluşum Miktarı da artmaktadır. Böylesi durumlarda oksidasyon yoğunluğunun tespit edilmesi için diğer indekslerin kullanılması gerekmektedir.

CO Oluşum Miktarı değerleri Çizelge 5.3'e göre değerlendirilse de Cliff vd. (2015) bu değerlerin temelde Almanya'daki ilerletimli uzunayaklar için geçerli olduğunu ve Avustralya kömürleri, ocakları ya da madencilik teknikleri için tasarlanmaması nedeniyle karışıklıklar yarattığını ve doğrudan kullanılmaması gerektiğini belirtmiştir. Buna bağlı olarak tüm ocaklarda geçerli olan CO Oluşum Miktarı değerleri vermek gerçekçi olmayacaktır. Bu nedenle, her ocak kesiminin (ya da panonun) "arkaplan CO Oluşum Miktarı" değerleri ve buna bağlı olarak aksiyon alınacak sınır değerler tespit etmelidir. Bunun yapılabilmesi için havalandırma ölçümlerinin yapıldığı zamanlarda indeks değeri de izlenmeli ve alınacak aksiyonların ocak kesimine (ya da panoya) özel olacağı unutulmamalıdır. Zira ocak ana hava dönüş yolundaki CO Oluşum Miktarı tüm ocak kesimlerinde ayrı ayrı oluşacak CO Oluşum Oranlarının toplamı olacak ve bu nedenle bu kesimde alınacak aksiyonlar için daha yüksek sınır değer seviyeleri söz konusu olacaktır.

Çizelge 5.4 CO Oluşum Miktarı değerleri ve yorumu (MDG-1006, 2011).

CO Oluşum Miktarı Değeri (l/dak)	Yorum
> 10	Araştır
> 20	Ciddi bir tehlike mevcut
> 30	Büyük bir tehlike mevcut

CO Oluşum Miktarının hava miktarına bağlı olarak değiştiğini bir örnek ile anlatmak yerinde olacaktır. Dönümlü çalışan bir uzuanayak panosunun hava dönüş yolunda 15 m³/s'lik bir hava akımı bulunmaktadır. Hava dönüş yolunda ölçülen CO konsantrasyonu ise 8 ppm'dir. Daha sonra pano hava dönüş yolundaki hava miktarı çeşitli sebeplerle 10 m³/s'ye düşürülmüş ve CO konsantrasyonu ise 10 ppm olarak ölçülmüştür. Eşitlik 5.3 kullanılarak her iki durumdaki CO Oluşum Miktarları

$$CO \text{ Oluşum Miktarı}_1 = (8 \text{ ppm})(15 \text{ m}^3/\text{s})(0,06) = 7,2 \text{ l/dak}$$

ve

$$CO \text{ Oluşum Miktarı}_2 = (10 \text{ ppm})(10 \text{ m}^3/\text{s})(0,06) = 6 \text{ l/dak}$$

olarak bulunur.

Görüldüğü üzere ikinci durumda CO konsantrasyonu 10 ppm'e yükselmiş olsa da CO oluşum oranı ilk duruma göre azalmıştır.

5.4.4 CO/CO₂ Oranı

Bu oran, bir yangının ilerlemesinin değerlendirilmesinde kullanılan ve diğer çoğu indeks/oranın aksine, özellikle oksijen azalmasına bağımlı olmaması yönünden kullanışlı bir orandır. Oran, yangının ilk aşamalarında yükselme ve alevli yangın durumlarında ise sabit kalma eğilimi

göstermektedir. Ancak CO/CO₂ oranı, yangının yakıtça zengin hale geldiği, dolayısıyla CO'nun ana ürün olduğu ilerleyen evrelerde tekrar yükselişe geçmekte ve bu durumu oldukça iyi gösterebilmektedir. Mitchell (1990) CO/CO₂ oranı değerlerinin 0,5'e yaklaştığında bir alevli yangın beklenebileceğini ifade etmesine rağmen diğer durumlar için evrensel değerler bulunmamaktadır. Dolayısıyla her ocak için kömür sıcaklığına bağlı olarak bu oranın "normal" değerleri ve eğilimleri belirlenmelidir. Böylece bir kendiliğinden yanma/yangın durumunda kömür sıcaklığı bu yolla tahmin edilebilir. Bu oran, yangın dışında ocak atmosferine karışan CO ve CO₂'nin bulunduğu durumlarda hatalı sonuçlar verebilmektedir.

Daha önce Graham İndeksi ve Young Oranı için verilen ve ülkemizden bir yangına ait verilerden bir derleme Çizelge 5.4'te verilmiştir. Çizelgedeki ilk 3 veri yangın barajla izole edilmeden hemen önceki verileri, 4-7 arasındaki veriler bölge barajlandıktan sonraki bazı verileri (çok veri olduğundan veriler arasından seçilmiştir), 8 ve 9. veriler ise yangının söndüğüne karar verilip baraj açıldıktan sonraki iki veriyi göstermektedir. Çizelgeden görüldüğü üzere yangınlı bölge barajlanmadan hemen önce CO/CO₂ oranı artış göstermiş ve yangınlı bölge barajla izole edildikten bir süre sonra azalarak sabite yakın devam etmiş ve baraj açıldıktan sonra ise yanma reaksiyonu sonlanmadığından hemen artışa geçmiştir.

Çizelge 5.5 Ülkemizden bir ocak yangınına ait CO/CO₂ değerleri.

Örnek	CO (ppm)	CO ₂ (%)	CO/CO ₂ *
1	246	0,50	0,054
2	1244	1,53	0,084
3	1314	2,16	0,062
4	963	2,34	0,042
5	695	2,97	0,023
6	530	2,37	0,023
7	517	2,10	0,025
8	312	1,26	0,026
9	3285	2,26	0,15

*Oran hesaplanırken CO ve CO₂ aynı birime dönüştürülmüştür. Bunun için ya ppm değerleri 10000'e bölünmeli ya da % değeri 10000 ile çarpılmalıdır. Ayrıca, havanın içerisinde de CO₂ bulunduğu ölçülen CO₂ konsantrasyonlarından 0,04 çıkarılmıştır.

5.4.5 Willet Oranı

Bu oran Willet tarafından 1951 yılında özellikle düşük sıcaklıkta gelişen oksidasyonlarda normal oluşumdan daha fazla CO oluştuğu durumlar için geliştirilmiştir (McPherson, 1993). Bu durumlarda ikincil reaksiyonlar ya da adsorpsiyon reaksiyonları nedeniyle CO miktarı zamanla azalmamakta ve bu nedenle Graham İndeksi kullanılmamaktadır. Willet Oranı eşitlik 5.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Willet Oran} = \frac{\text{CO}_2}{\text{Kör nefes} + \text{Yanabilirler}} \quad (5.4)$$

Burada; kör nefes, CO₂ ve Azotun toplam değerini, yanabilirler ise tüm yanabilen gazları (CH₄, CO, H₂ ve diğer hidrokarbonları) temsil etmektedir. Oranın değerinde meydana gelen artışlar yanma reaksiyonlarında artmayı, azalma ise yanma reaksiyonlarındaki azalmayı göstermektedir.

5.4.6 Jones-Trickett Oranı

Bu oran, örneklerin güvenilirliğini belirlemek ve yanma reaksiyonlarında hangi yakıtın yandığının tespit edilmesinde kullanılmaktadır (Jones ve Trickett, 1954). Esas itibarıyla bu oran gaz patlamaları ve toz patlamalarının birbirinden ayırt edilebilmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir. Jones-Trickett Oranı Eşitlik 5.5 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\text{Jones Trickett Oranı} = \frac{\text{CO}_2 + (0,75\text{CO}) - (0,25\text{H}_2)}{0,265\text{N}_2 - \text{O}_2} \quad (5.5)$$

Bu oranın temelinde, bir yangında tüketilen malzemenin moleküllerinin açığa çıkan gaz molekülleri ile orantılı olması ve bunun da gazın hacmi ile orantılı olmasında yatmaktadır. Örneğin metanın (CH₄) tam yanma reaksiyonunda, iki molekül oksijen (O₂) tüketilirken bir molekül karbon dioksit (CO₂) ve iki molekül su (H₂O) oluşmaktadır. Bu durumda açığa çıkan her CO₂ molekülüne karşılık iki O₂ molekülü tüketilmekte ve bu da sınır değer olan 0,5'i (1/2) vermektedir. Bu ise, CH₄'ün yandığı durumlarda Jones-Trickett Oranının 0,5'i aşamayacağı anlamına gelmektedir. Diğer malzemeler için de benzer sınır değerler bulunabileceğinden, Jones-Trickett oranı kullanılarak bir yangın esnasında hangi malzemenin yandığı anlaşılabilir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.6 Jones-Trickett Oranı değerleri ve değerlendirilmesi (Strang ve MacKenzie-Wood, 1985'ten değiştirilerek).

	Jones-Trickett Oranı*	Yanan Malzeme
Yangın	< 0,4	Yanma yok
	0,4 – 0,5	Metan
	0,5 – 1,0	Kömür, yağ, bant, yalıtım malzemesi, köpük
	0,9 – 1,6	Ahşap
Patlama	< 0,4	Yanma yok
	0,5	Metan
	0,87	Kömür tozu
	0,5 – 0,87	Metan ve kömür tozu

*Oranın 1,6'dan büyük bulunması gaz kromatografında, örneklemede ya da matematiksel hesaplamalarda hata olduğunu göstermektedir.

5.4.7 Partington Oranı

Bu oran esas itibarıyla CO/CO₂ oranının kısıtlarının giderilmesi için geliştirilen ve artan oksidasyonla artan değerler sergileyen bir orandır. Oranın pik yaptığı durumlarda patlamalar olduğu, sönmümlenerek sabit

hale geldiği durumlarda ise yangının pasif duruma geçtiği anlaşılmaktadır. Partington Oranı Eşitlik 5.6 ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Partington Oranı} = \frac{N_2}{CO + CO_2} \quad (5.6)$$

5.4.8 Litton Oranı

Bu oran, Litton (1986) tarafından barajlanmış ocak atmosferlerini izlemek ve barajlanmış kısım yeniden açıldığında ve havalandırıldığında yeniden yanma potansiyelini değerlendirmek için geliştirilmiş bir orandır. Oranın hesaplanabilmesi için O_2 , CO_2 , CH_4 ve C_2H_6 (etan) konsantrasyonlarının ölçülmesine ihtiyaç vardır. Oranın kullanılabilmesi için O_2 'nin %1'den büyük olması gerekmektedir. Litton Oranı Eşitlik 5.7 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\text{Litton Oranı} = \frac{1}{3} \frac{CO}{\sqrt[3]{[100 - 4,774O_2 - (CH_4 + C_2H_6)]\sqrt{O_2}}} \quad (5.7)$$

Bu eşitlikte; CO konsantrasyonu ppm cinsinden, diğer konsantrasyonlar ise % cinsindedir.

Eğer Litton Oranı değeri 1'den büyükse, bu henüz ortam sıcaklıklarına ulaşılmadığını ve oksidasyon/yanmanın devam ettiğini göstermektedir. Litton (1986) barajlanan bir ocak kesiminin tekrar açılabilmesi için en az 30 gün süreyle oranın 1'in altında seyretmesi gerektiğini belirtmiştir. Kendiliğinden yanma olaylarında ise Litton oranı 1'in altında seyretse bile barajlanan bölge açıldıktan sonra oksijenin tekrar bölgeye girmesiyle yeniden bir kızışmanın olma ihtimali düşünülmelidir (Timko ve Derick, 2006).

5.4.9 Hidrokarbon Oranı

Bu oran, Justin and Kim (1988) tarafından geliştirilmiş ve yeryüzünden açılacak çok sayıda sondajla barajlanmış bir bölgeden alınan gaz örneklerinin incelenmesiyle yangının yeri, durumu ve kızışma durumunun tespitini hedefleyen bir orandır. Yöntemde, sıcaklığa bağlı olarak kömürden yayılan düşük molekül ağırlıklı (C_1 - C_5) hidrokarbonların izlenmesi esastır. Normal ortam sıcaklıklarında kömürden desorbe olan temel gaz bilindiği üzere CH_4 'tür. Ancak kömür sıcaklıkları arttıkça diğer hidrokarbonlar da açığa çıkmaktadır. Bu oran Eşitlik 5.8 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Hidrokarbon Oranı} = \frac{[1,01(THC) - (CH_4)]}{[(THC) + C]} \quad (5.8)$$

Burada; THC toplam hidrokarbon konsantrasyonunu (ppm), CH_4 metan konsantrasyonunu (ppm) ve C ise bir sabiti (0,01 ppm) temsil etmektedir. Toplam hidrokarbon konsantrasyonu (THC) hesaplanırken diğer hidrokarbon konsantrasyonlarına CH_4 'te eklenmelidir. Analizlerden elde edilen Hidrokarbon Oranı değerleri Çizelge 5.6'ya göre değerlendirilmektedir.

Çizelge 5.7 Hidrokarbon Oranı değerleri ve yorumu.

Hidrokarbon Oranı	Yorum
< 50	Normal Oksidasyon koşulları ve sıcaklıklar
50-100	Muhtemel bir kızışma
> 100	Kendiliğinden yanma (değerdeki her artış kızışmanın yoğunluğunun arttığını göstermektedir)

Bu yöntemde yeryüzünden açılan sondajlardan gaz örneklerinin çekilmesiyle yangının yeri hakkında bilgi elde edilebilir. Zira gaz örnekleri açılan sondajlardan vakumlanarak elde edildiği için eğer örnek alınan sondaj kızışma/yangın alanının dışındaysa desorbe olan gazlar analizlerde görünmeyecektir. Ancak, yeryüzünden çok sayıda sondaj yapmak özellikle derin madencilik koşullarında oldukça maliyetli ve zor olacaktır. Bunun yanı sıra, metanın normal yayılımları, barajlanmış bir yangın alanında oluşan metan yayılımları ile birlikte diğer hidrokarbonların yayılımlarını maskeleyebilmekte ve bu da bu oranın hesaplanması için gerekli analizlerde hatalara sebep olmaktadır.

5.4.10 İndekslerle İlgili Genel Değerlendirme

Kendiliğinden yanma/yangın koşullarında gaz konsantrasyonları ya da indeks/oranların tek başlarına izlenmesinde kuvvetli ve zayıf yanlar bulunmaktadır. Genel itibarıyla, gaz konsantrasyonları tek başlarına kızışma ya da yangının yoğunluğunun belirlenmesi açısından iyi indikatörler değildir. Zira artan gaz konsantrasyonları; kızışma/yanğının yoğunluğunun artması, aktif kızışma/yangın alanının genişlemesi ya da diğer atmosferik koşullar nedeniyle olaydan kaynaklı gaz yayılımında daha az seyrelme olduğu anlamlarına gelebilmektedir.

Bir yangın süresince ocağın elde edilen tüm izleme verileri ve analiz sonuçları titizlikle incelenmeli ve saklanmalıdır. Bu iş günümüzde bilgisayarlar yardımıyla rahatlıkla yapılabilmektedir. Tüm gaz konsantrasyonlarının ve kullanılan indeks/oranların grafikleri çizilmeli, eğilimleri değerlendirilmeli ve yeni değerler elde edildikçe veriler ve grafikler güncellenmelidir. Bu noktada tek başına değerler yerine eğilimlerin daha önemli olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, farklı yerlerden çok sayıda örnek almak yerine belirlenen istasyonlardan düzenli olarak örnekler alınması daha faydalı olacaktır. CO/CO_2 oranı dışındaki tüm indeks/oranların azot gazının kullanıldığı inert gaz enjeksiyonundan etkilenmeyeceği unutulmamalıdır.

Bunun yanı sıra, gaz konsantrasyonlarının (H_2/CO ya da C_2H_6/CH_4 vb.) birbirlerine oranlarının incelenmesi de faydalı bilgiler sağlayabilecektir. Özellikle kömürlerin gaz içerikleri ve gaz kompozisyon analizlerinden elde edilmiş orijinal oranlar ile kızışma sırasında elde edilen oranlar karşılaştırılarak ortama yayılan gazların damarın kendisinden mi yoksa başka bir kaynaktan mı yayıldığı tespit etmek mümkündür.

6. KENDİLİĞİNDEN YANMA/AKTİF YANGINLA MÜCADELE VE KONTROL TEKNİKLERİ

Bir yeraltı kömür ocağında kendiliğinden yanma ve yangınla mücadelede alınacak ilk önlem, uygun ocak planlaması ve tasarımıyla kendiliğinden yanmaya yatkın damarların çalışıldığı kömür ocaklarında riskin azaltılmasıdır. Bunun yanı sıra, tüm acil durumlarda olduğu gibi, ocak yönetimi tarafından aktif bir kendiliğinden yanma olayında takip edilecek, ocağa özel bir prosedürün önceden hazırlanmış olması gerekmektedir. Zira her kendiliğinden yanma/kızışma olayı, olayda etkili olan faktörlerin çokluğu ve karmaşıklığı nedeniyle ocağa ve koşullara özel olarak farklı gelişmekte ve seyretmektedir.

Bir yeraltı kömür ocağında meydana gelen kendiliğinden yanma/kızışma olayında öncelikli iş, ocakta bir kendiliğinden yanma/kızışma olayının yaşanıp yaşanmadığının doğrulanmasıdır. Bu da mevcut atmosferik gaz izleme sistemleri kullanılarak gaz konsantrasyonlarının takibi, kullanılacak indeks/oranların oluşturulması ve eğilimlerinin izlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu noktada ocağa ait “normal” koşulların önceden belirlenmiş olması, olayın boyutunun doğru değerlendirilmesine yardımcı olacak olmasının yanı sıra alınacak tedbirlerin ve aksiyonların doğruluğunu arttıracak olması nedeniyle oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra, olay sırasında barometrik basınç mutlaka izlenmeli ve ani düşüşler mutlaka mücadele personeline bildirilmelidir. Atmosferik kontrol sistemlerinden (yanlış sensör yerleşimi, kalibrasyon eksikliği vb.), analizörlerden ve kullanılan gaz kromatografından kaynaklı hataların yanlış yorumlamalara yol açabileceği unutulmamalıdır.

Doğrulanmış bir kendiliğinden yanma/kızışma olayında tüm hava dönüş yollarında bulunan ve olaydan etkilenmesi/zarar görmesi muhtemel personel bu bölgelerden uzaklaştırılmalı, eğer hızlı gelişen bir olay ile karşı karşıya kalındıysa olayla aktif mücadele edecek ekip dışındaki personelin tamamı ocaktan tahliye edilmeye çalışılmalıdır. Bu durum, özellikle kömürün tutuşma sıcaklıklarına eriştiği ve ocakta potansiyel olarak patlayıcı bir ortamın olduğu durumlarda hızlı aksiyon alınmasını gerektirmektedir. Kızışmanın yavaş geliştiği durumlarda (sıcaklıkların düşük ve zehirli/patlayıcı gaz konsantrasyonlarının tehlikeli olmadığı), ocaktaki atmosferik şartların yakından izlenmesi ve ocak yönetiminin sürekli olarak tetikte olması koşuluyla, ocaktaki çalışmalara devam etmek mümkün olabilmektedir. Bu esnada yangının/kızışmanın yeri tespit edilmeye çalışılmalıdır. Ana yollar, taban yolları, bacalar gibi bölgelerde yer tespiti kolay olabilirken, ayak göçükleri ya da terkedilmiş eski çalışma alanları gibi ulaşılması zor bölgelerde tespit işi zor olabilmektedir. Günümüze kullanılan ve sağlıklı çalışan atmosferik izleme sistemleri yer tespitini kolaylaştırmaktadır.

Kendiliğinden yanma/kızışma olaylarına karşı mücadelede alınacak tedbirler esas itibarıyla ocaktaki koşullara bağlı olarak değişebilmektedir. Kendiliğinden yanma olayının olduğu bölgeye erişim, ocağın diğer kesimlerinin olaydan etkilenip etkilenmemesi, CO ve patlayabilir ortam oluşturabilecek gazların konsantrasyonları, patlama riskinin varlığı, ocakta yoğun duman varlığı, yüksek sıcaklıklar gibi koşullar alınacak aksiyonları yakından etkilemektedir.

Özellikle yoğun CO konsantrasyonlarında uygun mücadele ekipmanları bulunan personel dışında hiçbir çalışanın bu bölgelerde bulunmasına izin verilmemelidir. Bilindiği gibi ülkemizde yeraltı kömür ocaklarında izin verilen CO konsantrasyonu 50 ppm'dir. Ancak, ülkemizde meydana gelen olaylarda maden mühendisleri de dahil çalışanların yüksek seviyelerde CO (1000-1500 ppm) bulunan ortamlarda bulunduğu/çalıştığı tecrübelerle sabittir. Bu durum CO'nun oldukça zehirli bir gaz olması nedeniyle oldukça tehlikelidir ve ocak yönetimi tarafından böylesi durumlara hiçbir koşulda izin verilmemelidir.



Kendiliğinden yanmayı
başlamadan engellemeye
çabala!

Kızışma/yanğın yerinin tespitinden sonraki adım kızışmanın/yanğının nasıl kontrol altına alınacağı, mümkünse nasıl söndürüleceğine karar verilmesidir. Bu amaçla dünyada ve ülkemizde kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; kazarak uzaklaştırma; su ile doldurma; enjeksiyon; inertizasyon ve barajlamadır.

6.1 Kazarak Uzaklaştırma

Kazarak uzaklaştırma, kızışma/yanğının galeri yüzeylerine yakın olduğu durumlarda uygulanabilecek bir yöntemdir. Bu tür kızışma/yanğınlar daha önce Şekil 3.1 ve 3.3'te gösterildiği gibi galerilerde tahkimat arkasındaki boşluklarda ya da tavanda ortaya çıkabilmektedir. Yeraltı ocak galerilerinde pasif tahkimat (demir bağ vb.) elemanları kullanılmayan ocaklarda (Avustralya, ABD gibi) bu yöntemin kullanılması mümkün değildir.

Yöntemde kızışma/yanğının yerinin ve büyüklüğünün tam olarak belirlenmesi için sondaj delikleri açmak gerekebilmektedir. Kazı işi, kızışma/yanğın bölgesinin gerisinden (temiz hava tarafından) yapılmalı, böylece personelin CO ve dumana maruziyeti en aza indirilmelidir. Yanğın ya da ısınma kaynaklı olarak tavanda zayıflamalar olabileceği unutulmamalı ve bu yönde tedbirli olunmalıdır. Bölgede sürekli olarak CO ve CH₄ konsantrasyonu ölçümleri sürdürülmelidir. Kızışma/yanğına ulaşıldıktan sonra su jetleriyle yanğın çevresinden başlanarak yavaş yavaş merkeze doğru müdahale edilmelidir. Direkt olarak kızışmanın/yanğının merkezine su ile müdahale sonucunda yanar/ısınmış malzeme püskürebilmekte ve büyük miktarda buhar oluşabilmektedir. Kazılarak çıkarılan malzeme ocak dışına taşınmadan önce ıslatılmalı ve kızışma/yanğın söndürüldükten kısa süre içinde oluşan boşluk soğutulmalı, yanmaz bir malzeme ile doldurulmalı ve bölgeye tekrar hava girişinin engellenmesi için sızdırmazlık sağlanmalıdır.

Bu yöntem uzunayak göçük bölgeleri gibi kızışma/yanğının sınırlandırılmış, erişimin olmadığı ve havalandırmanın zayıf olduğu bölgelerde uygulanamamakta, ancak iyi havalandırma sağlanan bölgelerde (örneğin anayollarda) uygulanabilmektedir.

6.2 Su ile Doldurma

Bu yöntem, kızışma/yanğın bölgenin oksijen ile temasını tamamen kesmesi nedeniyle etkin bir yöntemdir. Bu yöntemde kızışma/yanğın olan bölgenin eğiminin uygun olduğu durumlarda direkt olarak kızışma/yanğın bölgenin su ile doldurulması mümkün olabileği gibi yanğının ilerlediği ve büyüdüğu durumlarda tüm katın ya da tüm ocağın su ile doldurulması mümkün olabilmektedir. Bir ocak kesiminin, katın ya da ocağın tamamen su ile doldurulmasından sonra bölgenin sıcaklıklarının normale dönmesini takiben bölgedeki su pompalarla boşaltılabilmekte ve o bölgedeki ekipman ve kömür rezervine erişim sağlamak mümkün olabilmektedir. Ancak bu yöntem doğası itibariyle, tahkimatta, tavan koşullarında bozulma ve ekipmana zarar verme potansiyeline sahiptir.

Eğimli damarlarda meyil yukarı çalışılarak yeraltı sularının göçükte birikmesi sağlanabilmekte ve bu şekilde göçükte bırakılan kömürün oksijenle teması kesilebilmektedir. Ancak, ayak ilerlemelerinin yavaş olduğu durumlarda, ya da ayakta meydana gelebilecek ve ayak ilerlemesini yavaşlatacak ya da durduracak durumlarda bu şekilde çalışma sakıncalı olabilmektedir. Zira bu durumlarda ayak arkasında biriken su, ayağın ilerlemesinin yavaş olması nedeniyle göçük hattını geçerek ayak içine dolabilmekte, bu durumda ise suyun tahliye edilmesine ihtiyaç duyulmakta ve hatta bazı durumlarda, örneğın tam mekanize çalışan ayaklarda, konveyörün su nedeniyle oluşan şlam içinde kalmasına sebep olarak ekipman kaybı gibi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir.

Vaka Analizi – Gelik Ocak Yanğını 2007(Cakir ve Baris, 2009)

Bu yöntemin uygulanışına ülkemizden bir örnek 2008 yılında Zonguldak'ta yaşanan ocak yanğınır. 11 Kasım 2007'de 41222 lağımında (-150/-260) duman ve koku varlığı bildirilmiş ve inceleme ekibi tarafından ocakta açık alevli bir yanğın olduğu teyit edilmiştir. İlk etapta yanğının çıkış sebebi tam olarak bilinmemekle birlikte sonradan yanğının elektrik kontağından çıktığı anlaşılmıştır. Yanğınla mücadeleye öncelikle iki farklı noktada su ile başlanmış ancak lağımlarda meydana gelen göçükler nedeniyle başarılı olunamamıştır. Bunun üzerine barajların inşa edilmesine karar verilmiş ve ocağın çeşitli kesimlerine toplamda 20 baraj yapılmıştır. İlk yedi barajın yanğın bölgesini havalandırma şebekesinden izole ettiği düşünülse de gaz ölçümleri sonucunda (CO: 2500 ppm, CH₄: %3,6, CO₂: %3,63 ve O₂: %14) barajların etkili olmadığı anlaşılmış ve bunun üzerine ocağa 37 gün boyunca toplam 1057 ton azot gazı basılmıştır. Tüm bu önlemlere rağmen oksijen konsantrasyonunun düşmediği anlaşılmış ve ocağın su ile doldurulmasına karar verilmiş ve 28 gün boyunca ocağa su basılmış ve yanğın kontrol altına alınmıştır.

6.3 Enjeksiyon

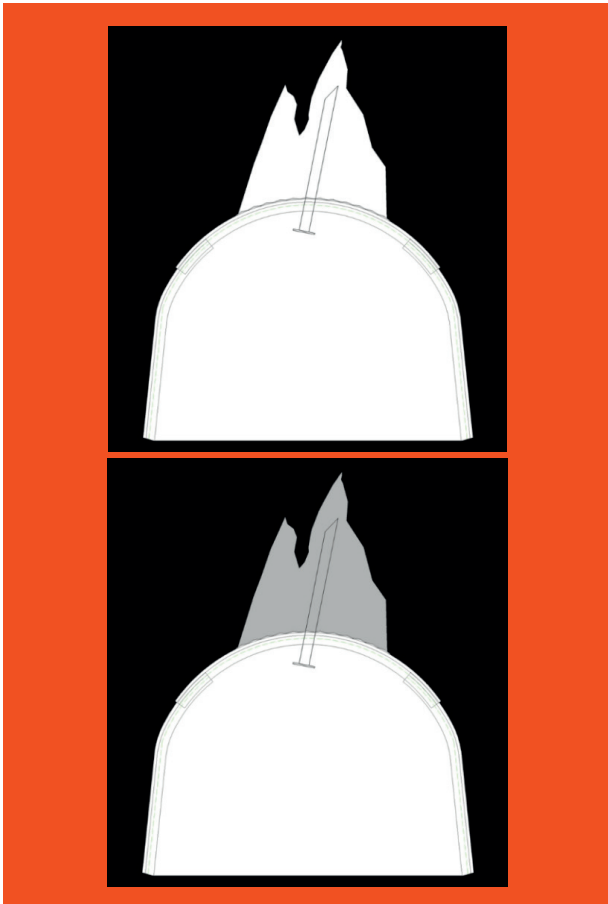
Bu yöntemde çeşitli materyallerin kızışma/yanğın bölgesine ya da potansiyel kızışma olacak bölgelere enjeksiyonu ile havanın bu bölgelere girişinin engellenmesi söz konusudur. Bu amaca yönelik olarak çimento şerbeti, kül-su karışımı, çeşitli inhibitörler, jeller ya da köpükler kullanılmaktadır.

Özellikle anayollar ve galerilerde, çimento şerbeti enjeksiyonu ile kesitte bulunan çatlaklardan hava girişinin engellenmesi, kendiliğinden yanma olaylarının engellenmesinde başarıyla uygulanan bir yöntemdir. Ayrıca, kendiliğinden yanma riski olan ve kömür içinde açılmış galerilerde galeri çerperlerinin betonlanması ya da püskürtme beton uygulamaları da kömürün havayla temasının engellenmesi açaşından etkili bir yöntemdir.

Bunun yanı sıra yeraltı kömür ocaklarında kızışma ve kendiliğinden yanmanın engellenmesi için başarıyla uygulanan bir diğer yöntem ise tavan boşluklarına ve göçüğe çeşitli malzemelerin enjeksiyonudur. Bu yöntem dünyada da yaygın olarak kullanılmaktadır (Yu vd., 2012;

Yuan, 2018). Galeri tavanında ya da yan cidarlarında ortaya çıkan bir kızışmanın enjeksiyon yapılarak izole edilebilmesi için delikler delinmesi gerekmektedir. Deliklerden dökülen sıcak sondaj kırıntıları ya da ısınan sondaj burgularından kızışmanın yoğunluğu ve derinliği anlaşılabilir. Enjekte edilen malzemenin katılaşması/jelleşmesine zaman tanımak için bir delikten kısa süre enjeksiyon yapıldıktan sonra enjeksiyona diğer bir delikten devam edilmelidir. Enjeksiyon bittikten sonra ise tüm deliklerin sızdırmazlığı sağlanmalıdır.

Bu prensibe uygun olarak ülkemizde yeraltı kömür ocaklarında kendiliğinden yanma ile mücadelede başarıyla uygulanan bir yöntem ise taban yollarında ve galerilerde oluşan boşluklar ile ayağın göçük bölgesine uçucu kül+su karışımı enjeksiyonudur. Bu yöntemde, kömür yakan sanayi tesislerinden (özellikle termik santraller) alınan küller kullanılmaktadır. Bu tür küller su ile karıştırıldıklarında kontrollü düşük dayanımlı malzeme olarak davranmakta ve bir sıvı gibi hareket ederken katı gibi davranış göstermektedir. Yöntemde, sanayi tesislerinden alınan kül yerüstündeki kül hazırlama tesislerinde su ile karıştırıldıktan (genellikle 1/3 kül, 2/3 su) sonra uygun borularla yeraltında dolgu yapılacak bölgelere yerçekiminin de yardımıyla kolaylıkla gönderilebilmektedir. Şekil 6.1'de galeri tavanlarında oluşan boşlukların kül ramblesi ile doldurulması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Taban yolları ve galerilerde oluşabilecek tavan boşluklarının kül ramblesi ile doldurulması. (a) dolgudan önce ve (b) dolgudan sonra.

Kül+su karışımı ayak göçüklerinde de başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Bunun için üretim sırasında ayakların göçüklerine sağlam borular yerleştirilmekte ve boruların göçük altında kalmasının ardından bu borular kullanılarak kül+su karışımı göçüğe enjekte edilmektedir. Karışımın suyunu kaybettikten sonra göçük içindeki boşluklarda kendi kendine katılaşması ve boşlukları doldurmasıyla göçüğün hava ile irtibatı kesilmekte ve böylece göçükte oksidasyon/kendiliğinden yanma reaksiyonlarının önüne geçilmektedir.

Günümüz teknolojisinde, kömür yüzeylerinin kaplanarak ya da çatlaklardan enjeksiyon yapılarak yeraltı ocaklarında kömürün kendiliğinden yanmasının engellenmesi için geliştirilen organik/ inorganik jeller ve köpükler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmakta ve başarılı sonuçlar alınmaktadır. (Cheng vd., 2021; Tang vd., 2021; Yan vd., 2022). Fan vd. (2020) geliştirdikleri plastojel malzeme ile üretimi bitmiş ve sökümü yapılan bir uzunayak arınında denemeler yapmış ve plastojelin hem parçalanmış kömürün oksidasyonunu hem de kömür kütlesinin sıcaklığını etkili bir şekilde azaltarak güvenli bir söküm ortam yarattığını bildirmiştir. Qiao vd. (2022) geliştirdikleri jel köpüğün mükemmel bir yangın engelleme kabiliyeti olduğunu, kömürün oksidasyon işlemi sırasında tüketilen hidroksil grubunu ve metil ve metilen gruplarının oluşmasını etkili bir şekilde engellemesinin yanı sıra jel köpüğün 400°C sıcaklıklarda dahi etkisini kaybetmediğini bildirmiştir.

6.4 İnertizasyon

Yeraltı kömür ocaklarında bir kızışma/yangın ile mücadelede temel amaç kömürün oksijenle temasını kesmektir. Bu işlem esas itibarıyla "inertizasyon" olarak adlandırılmaktadır. Yeraltı kömür ocaklarında uzun yıllardır inertizasyon amaçlı olarak kullanılan temel yöntem, kızışma/yangın olan bölgeye hava girişinin engellenmesiyle yanıcı/patlayıcı gazların seyrelerek patlayıcı bir ortamın oluşmasını engellemek ve bir yandan oksidasyon/yanma reaksiyonlarının oksijen tüketilirken bir yandan da bu gazların baraj arkasında birikerek "boğucu" bir atmosfer oluşturmasını sağlamaktır. Bu yöntem "doğal inertizasyon" olarak adlandırılmaktadır.

Doğal inertizasyon temelde dezavantajlara sahiptir. Öncelikle, damardan desorbe olan gazlar her durumda yeterli miktarlarda olamayabilmekte ya da oldukça yavaş bir hızda desorbe olabilmektedir. Bu nedenle göçük bölgesinin inertizasyonu birkaç haftaya kadar uzayabilmekte hatta barajların sızdırmaz olmadığı durumlarda göçük hiçbir zaman inert duruma gelememektedir. Bunun yanı sıra, barajlanan bölgede "yanıcı/patlayıcı" potansiyele sahip gazların birikmesi tehlikeli bir ortam yaratmakta ve barajlanan bölgedeki atmosfer "boğucu" hale gelene kadar patlayıcı bölgeden geçmektedir. Ayrıca, kızışma/yanğını söndürmek için CH_4 gibi yanıcı/patlayıcı özelliği bulunan damar gazlarının kullanımı ciddi patlama risklerini de beraberinde getirmektedir. Zira barajlardaki kaçaklardan ya da formasyondaki çatlaklardan kaynaklı olarak barajlı bölgeye hava girişi olması baraj arkasındaki atmosferi tekrar patlayıcı bir ortam haline getirebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen patlama risklerinin ortadan kaldırılması için modern madencilikte doğal inertizasyon

yerine karbondioksit, azot gazı ve yanma ürünü gazların kullanımının olduğu kontrollü (yapay) inertizasyon tercih edilmektedir. Yapay inertizasyon durumunda barajlanan bölgedeki atmosfer A noktasından E noktasına ve daha sonra da F noktasına hareket etmekte ve patlayıcı bölgeden geçmemektedir.

6.4.1 Yapay İntertizasyon - Karbondioksit (CO₂) Kullanımı

CO₂ kızışma/yanğınların inertizasyonunda özellikle soğutma etkisi nedeniyle yaygın olarak kullanılmış bir gazdır. Yoğunluğunun havaya göre fazla olması özellikle eğimli çalışmalar ve eğimli lağımlarda başarılı sonuçlar alınmasını sağlarken yatay açıklıklarda sorunlar yaratabilmektedir. Sıvı karbondioksitin borularla taşınması ve enjeksiyonu su ve borularda donmaya neden olmakta, karbondioksitin suda çözünmesi ise özellikle nemli koşullarda sorunlar yaratmaktadır.

Cliff vd. (2015) katı haldeki karbondioksitin (kuru buz) bir ocak yangınına söndürmek için kullanıldığını rapor etmiştir. Olayda kuru buz kalıpları bir bant konveyöre yerleştirilmiş ve bant çalıştırılarak kuru buz kalıpları yangının merkezine gönderilmiştir. Ancak kuru buz kalıplarının aniden büyük sıcaklıklara maruz kalmaları nedeniyle CO₂'nin aniden süblimleşmesi ve hızlı bir şekilde katı halden gaza hale geçmesi ile ocakta büyük bir patlama meydana gelmiştir. Yukarıda sayılan dezavantajlarının bulunması ve pahalı olması nedeniyle CO₂ yerini azot gazı gibi daha ucuz muadillerine bırakmıştır.

6.4.2 Yapay İntertizasyon – Azot Kullanımı

Aralık 1974'te Alman kömür endüstrisinde ilk defa sıvı azot yeryüzünde gazlaştırılarak yeraltındaki bir yangına müdahale için kullanılmaya başlanmıştır (Kock, 1983). Daha sonra sıvı azotun kendiliğinden yanma ve yangın olaylarında kullanımı neredeyse bir norm haline gelmiş, yöntem sayısız olayda kullanılmış ve günümüzde de yangın kontrolünde kullanımı artarak devam etmiştir. Azot, kimyasal özelliklerinden dolayı duraylı bir inert gaz olup sıvı halde maden sahalarına özel tankerlerle (kriyojenik) taşınabilmekte, daha sonra gazlaştırılmakta ve borularla ocağa ulaştırılmaktadır. Sıvı azot gazlaştırıldığında hacmi ciddi oranda artmaktadır. McPherson (1993) 20 tonluk sıvı azot taşıyan bir tankerden 16500 m³ gaz elde edilebileceğini bildirmiştir.

Ticari oksijen üretiminin yan ürünü olduğundan sıvı azot, sıvı karbondioksit göre oldukça ucuzdur. Ayrıca zehirli olmayan bir gaz olması avantajdır. Ancak bu gazın ocaklarda kullanılabilmesi için ciddi miktarlarda temin edilmesi ya da sıvı halde kullanıldığı durumlarda ise maden sahalarında uzun süreli tesislerin kurulmasına ihtiyaç vardır.

Kızışma/yanğın durumlarında azot gazı enjeksiyonu ile inert bir ortam oluşturmak her zaman kolay olmamaktadır. Azot enjeksiyonu yapılan bölgenin büyüklüğü, barajların sızdırmazlığı işlemin başarısında büyük rol oynamaktadır. Bir önceki bölümde ülkemizden verilen örnekte olduğu gibi büyük alanlarda ciddi miktarda azot gazı kullanımı ocak şartlarındaki tabaka koşulları (çatlaklar vb.) düşünüldüğünde oldukça zorludur.

Çoklu girişe sahip uzunayak panolarında, azot gazının göçüğe komşu taban yollarında bırakılan zincir topukların arasındaki barajlardan göçüğe basılarak göçüğün inertizasyonu mümkün olabilmektedir. Ülkemizdeki gibi tek girişli uzunayak panolarında, taban yolları göçtüğü için yeraltından göçüğe bir enjeksiyon yapmak mümkün olamamakta, azot enjeksiyonu ancak yeryüzünden yapılan sondajlarla mümkün olabilmektedir. Bu ise maliyetli ve zaman alıcı bir işlemdir. Azot enjeksiyonunun ayak arkasından göçük içinde ayağa yakın mesafelerde yapılmasının ise özellikle barometrik değişimler nedeniyle basılan azot gazının ayağa geri gelmesi durumunda sorunlar yaratacağı unutulmamalıdır.

Vaka analizi – Dartbrook Kömür Ocağı Kızışma İntertizasyonu – 2002 (Gillies ve Wu, 2007)

16 Mayıs 2002'de Dartbrook (Avustralya) kömür ocağında bir kızışma olması üzerine NSW Mines Rescue Board ve CIG tarafından 1985 yılında geliştirilen ve "Mineshield" adı verilen inertizasyon tesisi aktive edilmiştir (Şekil 6.2). Sistem ortalama olarak saatte 4 ton sıvı azot kullanarak ocağa azot enjeksiyonu yapmaya başlamıştır. 30 Eylül'de uzunayak ekipmanı ayaktan sökülümüş, göçük bölgesi barajlanmış ve inertize edilmiştir. Tüm operasyonlar boyunca yaklaşık 10500 ton sıvı azot kullanılmış ve tesis 8 Ekim tarihine kadar sahada bekletilmiştir.

Mineshield tesisinin bu olayda uzun süreli kullanımı, kısa süreli olarak yoğun kullanımda saatte 18 tona kadar sıvı azot kapasitesiyle tasarlanan tesisin pompaları ve elektrik sisteminde ciddi zorlanmalara neden olmuştur. Bunun üzerine tesisin yeni yatırımlarla 15 yıl daha kullanımda tutulmasına karar verilmiş ve güncelleme 2003 yılında tamamlanmıştır.



Şekil 6.2 Bir maden sahasında kurulu Mineshield inertizasyon tesisi (Gillies ve Wu, 2007).

6.4.3 Yapay İntertizasyon - Yanma Ürünü Gazların Kullanımı

Yanma ürünü gazlar çeşitli yöntemlerle kontrollü şekilde yanma reaksiyonlarından üretilmektedir. Bu gazlar tam yanma ürünü gazlar olup, patlayıcı özelliği olmayan karbondioksit (CO₂), azot (N₂) ve su buharı gibi serbest oksijen içermeyen bir içeriğe sahiptir.

Günümüzde özellikle yerleşim yerlerinden uzakta bulunan ocaklarda kullanılmak üzere inert gaz üreten mobil cihazlarla (jet motorları - Polonya GAG serisi, Rus GIG serisi, Tomlinson Kazanı gibi baca gazı üreten sistemler) su buharı, azot, karbondioksit ve eser miktarda oksijen içeren gaz karışımları üretilmekte ve kızışma/yangınla mücadelede başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Bu tür cihazlar inert gazları kendileri ürettikleri için ticari gazlara ihtiyaç kalmamakta, dolayısıyla CO₂ ve N₂ gazlarına oranla maliyetleri daha düşük olmaktadır. Oldukça yüksek kapasiteye sahip olmaları nedeniyle (örneğin GAG-3A yaklaşık 2000 m³/dak) karbondioksit ve azot enjeksiyonuna üstünlük sağlamaktadır. Ancak bu cihazlar jet motoru gibi özel ekipmanlar gerektirmekte ve bu da maliyetli olabilmektedir. Ayrıca bu cihazların kullanımı, yangın ilerlemesini takip etmek için kullanılan gaz izleme uygulamalarını (indeksleri) etkisiz hale getirmektedir. Örneğin azot ya da yanma ürünü gazların kullanıldığı durumlarda Graham İndeksi hatalı değerler verecektir.

Vaka analizi – Loveridge Kömür Ocağı – 2003 (Mucho vd., 2005)

Şubat 2003 tarihinde Consol Energy Inc. tarafından işletilen Loveridge No.22 ocağında (Batı Virjinya, ABD) çıkan bir yangını sonrası ocak boşaltılarak barajlanmıştır. Kısa süre sonra ocak yönetimi GAG biriminin kullanılmasına karar vermiştir (Şekil 6.3). GAG birimi ocağa getirilmiş ve toplam 17 gün süresince 240 saatlik çalışmayla yangın bölgesi inertize edilmiştir. GAG biriminin 10,5 gün çalışmasından sonra (ocak barajlandıktan 61 gün sonra) tahliye ekipleri ilk defa ocağa inebilmişlerdir. 17 günlük çalışma sonunda GAG sistemi oksijen konsantrasyonlarını düşürerek yangın alanını ve yaklaşık 15 km'lik galeriyi inertize etmiştir. Çalışmalarla ilgili detaylı bilgiye Mucho vd. (2005)'in çalışmasından ulaşılabilir.



Şekil 6.3 Loveridge ocağında kullanılan GAG inertizasyon birimi (Gillies ve Wu, 2007).

6.5 Barajlama

Bir yeraltı kömür ocağında kızışma/kendiliğinden yanma nedeniyle ya da herhangi bir sebeple açık alevli yangın oluşması durumunda ocağın belirli bir kısmının ya da bazı durumlarda tüm ocağın barajlanarak yangının oksijenle irtibatının kesilmesi ve kontrol altına alınması

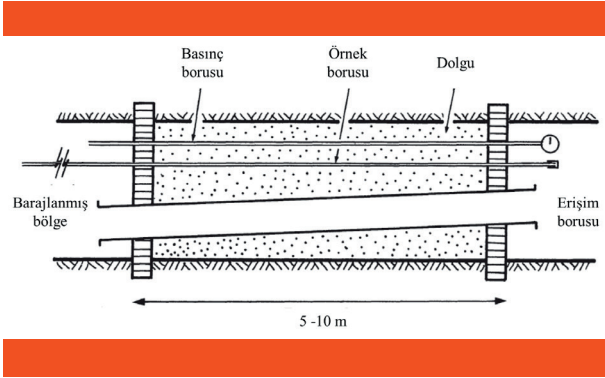
gerekebilmektedir. Genel itibariyle ocaklarda barajların yapılış amaçları;

- Bir kızışma ya da yangın bölgesine oksijen girişini engellemek,
- Gaz, kömür ya da kömür tozu karışımlarının aktif bir yangınla patlama potansiyeli olduğu durumlarda patlamaya dayanıklı bir bariyer oluşturmak,
- Özellikle barometrik basınç değişimleri nedeniyle atmosferin kompozisyonunda meydana gelecek değişiklikleri en aza indirmek,
- Eski açıklıkların mevcut ocakla irtibatını kesmek olarak sayılabilir.

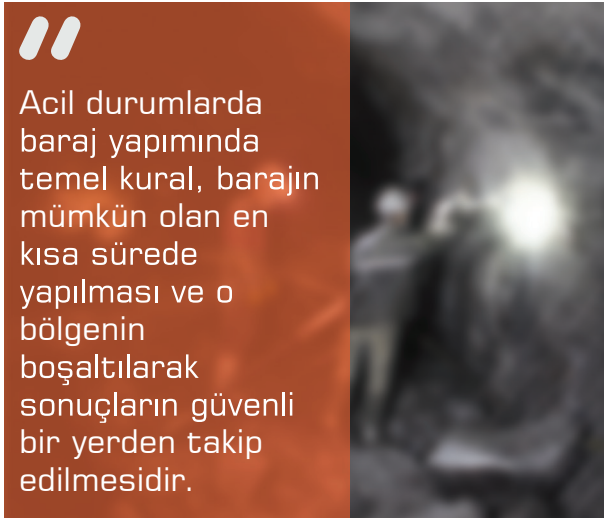
Rehberin amacı itibariyle bu bölümde yeraltı kömür ocaklarının ayaklarında ve göçük bölgelerinde meydana gelen kızışma/yangın gibi acil durumlarda kurulacak barajlar ile ilgili bilgilere yer verilecektir.

Barajlarla ilgili konulara değinilmeden önce ülkemizde kullanılan baraj kavramı ile ABD, Avustralya gibi gelişmiş madencilik ülkelerinde kullanılan baraj kavramı arasındaki farklardan bahsetmek faydalı olacaktır. Ülkemizde yeraltı kömür ocaklarında kullanılan ve kızışma/yangın olaylarıyla mücadele etmek için kullanılan barajlar genellikle belirli bir kalınlıkta beton malzemeden inşa edilmiş tek bir yapıdan oluşmaktadır. Sızdırmanın sağlanamadığı bazı durumlarda ikinci bir baraj da inşa edilebilmektedir. Bunun yanında eski açıklıkları izole etmek için daha zayıf malzemeden (arasında kum, moloz vb. doldurulmuş tahtadan, tuğla-sıvadan oluşan vb.) yapılmış barajlar da kullanılmaktadır. Oysa ABD ve Avustralya gibi ülkelerde "baraj" olarak tabir edilen yapılar kullanılışları itibariyle farklı isimler almaktadır. Çoklu girişe sahip uzunayak panolarında genellikle taban yolları arasında bırakılan zincir topukların arasında yapılan ve tek ya da iki duvarlı, bloklardan, tuğladan, kum torbalarından ve hatta perde olarak hızlı bir şekilde inşa edilen ancak patlamaya dayanıklı olmayan barajlar "stopping" adını almaktadır. Bu tür barajlar sadece havayı düzenlemek ya da yakındaki havayollarında hava basıncını değiştirmek için inşa edilmekte ve ülkemizde eski açıklıkları izole etmek için yapılan barajlarla benzerlik göstermektedir. Ülkemizde kızışma/yangın durumlarında inşa edilen barajlara eşdeğer olacak şekilde galerinin tüm kesit alanını kaplayan, 5-10 m aralıklarla iki ya da daha fazla sayıda inşa edilen ve aralarındaki boşlukların inert bir malzemeyle doldurulduğu barajlar ise "seal" olarak adlandırılmakta ve bu tür barajlar patlamaya dayanıklı olarak inşa edilmektedir (Şekil 6.4).

Yeraltı kömür ocaklarında acil durumlarda barajlama faaliyetleri, sürekli izleme sistemleri ve gaz analizlerinin kızışmanın yoğunluğunun arttığını ya da kızışmanın hızlanarak artık açık alevli bir yangına dönüşeceği evrenin yaklaştığını işaret etmeye başlamasıyla düşünülecek çözümlerdendir. Böyle durumlarda kızışmanın olduğu panoların, eğer daha ciddi risklerin olduğu düşünülüyorsa, tüm kat ya da tüm ocağın barajlanması söz konusu olmaktadır. Ancak, bir yeraltı kömür ocağında uzunayak panolarının barajlanmasına oranla tüm katın ya da ocağın barajlanması nadiren karşılaşılabilecek bir durumdur.



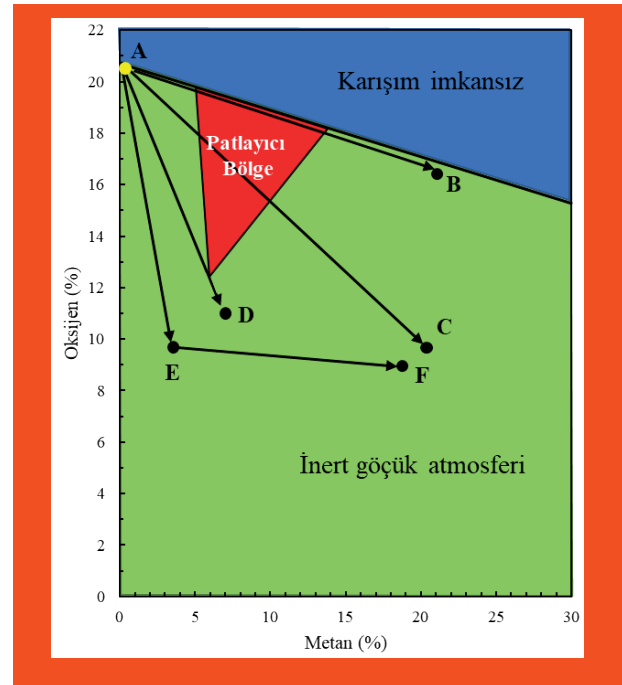
Şekil 6.4 Patlamaya dayanıklı bir baraj (seal) kesitine örnek (McPherson, 1993).



Uzunayak göçüklerinde meydana gelen kızışma/yangın nedeniyle panoların barajlanması, özellikle gazlı kömür damarlarının üretildiği ocaklarda ciddi patlama risklerini de beraberinde getirmektedir. Bu risklerin planlama ve hazırlık aşamasında dikkate alınması oldukça önemlidir. Gazlı kömür damarlarının bulunduğu bir yeraltı kömür ocağının bir kesiminin kızışma/ yangın sebebiyle barajlanması durumunda bu kesimde havalandırma duracak, doğal olarak atmosferdeki metan miktarında bir artış olacaktır. Bunun yan sıra kendiliğinden yanma nedeniyle oksijen de tüketilecektir. Metan konsantrasyonu %4,9'u aştığında yeterli oksijenin de ortamda bulunmasıyla patlayıcı bir karışım ortaya çıkabilecektir. Şekil 6.5'te barajlanan bir bölgenin atmosferinde meydana gelebilecek değişimler Coward-Jones diyagramı üzerinde gösterilmektedir.

Havalandırma sistemi sağlıklı çalışan bir ocakta barajlanan bir ocak kesimindeki atmosfer ilk olarak daima A noktasında bulunacaktır. A noktasında oksijen konsantrasyonu %20 ,95'e çok yakın ve metan konsantrasyonu ise %0'a yakın olacaktır. Güvenlik açısından barajlı bölgede istenen atmosfer, şekilde C ve F noktalarında olduğu gibi, yakıtça zengin oksijence düşük bir atmosferdir (%20'den fazla metan, %10'dan düşük oksijen). Coward-Jones diyagramında inertizasyon sonrası atmosferin takip edeceği güzergah göçükteki oksijen tüketimine ve barajlı bölgedeki metan yayılım hızına bağlı olarak değişecektir.

Metan yayılımı olan ancak oksidasyona yatkınlığı az olan kömür damarlarının bulunduğu durumlarda barajlı bölgedeki atmosfer A noktasından B noktasına doğru hareket edecektir. Zira böyle bir durumda metan yayılımı devam ederken oksijen tüketimi düşük olacaktır. Hem metan yayılımı hem de oksidasyonun olduğu bir durumda ise atmosfer A noktasından C noktasına doğru değişim gösterecektir. Görüldüğü üzere her iki durumda da barajlanan bölgedeki atmosfer patlayıcı bölgeden geçmekte ve bir patlama riski taşımaktadır. Bu iki durumun aksine, oksidasyona yüksek yatkınlığı bulunan bir kömür damarının bulunduğu durumlarda ise barajlanan bölgedeki atmosfer yakıtça ve oksijence fakir bir pozisyonda inert hale gelecek ve A noktasından D noktasına doğru hareket edebilecektir. Şekilden görüldüğü üzere bu durumda atmosfer patlayıcı bölgeden geçmeyecektir. Barajlanan bölgeye bir inert gaz verildiği durumda ise atmosfer A noktasından önce E'ye ve daha sonra ise F noktasına hareket edecek ve sürekli olarak patlama bölgesinin dışında yer alacaktır.



Şekil 6.5 Barajlanan bir alandaki atmosfer değişiminin Coward-Jones üçgeni üzerinde gösterimi (Zipf vd., 2007'den değiştirilerek).

Patlama risklerinin bulunması nedeniyle barajlama sırasında en kritik konu barajlamanın mümkün olan en kısa sürede tamamlanmasıdır. Zira özellikle gazlı ocaklarda patlama tehlikesi zamanla artmaktadır. Bu durum, özellikle patlamaya dayanıklı barajların tamamlanmasına yakın ve havalandırmanın sınırlandırıldığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Morris and Atkinson (1987) madencilik tarihinde baraj inşası sırasında madencilerin yaşamını yitirdiği birçok olayın yaşandığını belirtmiştir.

6.5.1 Baraj Yerinin Belirlenmesi

Pano tasarımları ve ocak planlamalarındaki farklılıklara bağlı olarak yeraltı kömür ocaklarında inşa edilecek

barajların yerleri değişkenlik gösterebilmektedir. Çoklu girişli pano tasarımlarının ülkemizde uygulanmaması nedeniyle bu rehberde tek girişli pano tasarımlarına sahip uzunyak yöntemine yönelik bir inceleme yapılacaktır.

Baraj yerinin seçiminde en önemli kriter kızışma/yanğının olduğu bölgenin bağlantılı olduğu tüm açıklıklarla (eski çalışmalarla bağlantılar ve sondaj delikleri dahil) ilişkisini kesmektir. Özellikle inertizasyon teknikleri uygulanacaksa barajlanan alanın hacminin küçültülmesi ve böylece hızlı sonuçlar alabilmek için barajlar yangına yakın inşa edilmelidir. Ancak, daha küçük hacimlerde potansiyel bir patlayıcı atmosferin gelişmesi çok daha hızlı olacak ve olası bir patlamada barajlar üzerine etkiyecek basınçlar da yüksek olacaktır. Eğer barajlar yangından daha uzağa inşa edilir ve barajlanacak hacim büyük tutulursa bu durumda patlayıcı bir atmosferin gelişmesi için görece olarak daha uzun zaman gerekecek ancak bu sefer de alanın büyük olması nedeniyle barajlanan bölgedeki atmosferik koşulların stabil hale gelmesi de uzun sürecektir. İntertizasyon teknikleri uygulandığı durumlarda inert hale getirilecek hacmin büyük olması hem işlemlerin uzun sürmesine hem de maliyetin artmasına sebep olabilecektir. Ayrıca böylesi durumlarda da patlayıcı bir ortamın oluşması da mümkün olabilmektedir.

Baraj yerinin seçiminde mümkün olan en az sayıda barajın yapılmasına dikkat edilmelidir. Esas itibarıyla iyi planlanmış ve organize çalışan bir ocakta barajların yerleri önceden hazırlanmakta ve baraj inşası için gerekli malzeme bu bölgelere yakın yerlerde bulundurulmaktadır (IME, 1985; McPherson, 1993'ten). Genellikle baraj yeri olarak tavan, taban ve yan cidarların sağlam olduğu ya da düzgün tahkim edilmiş yerlerin seçilmesine özen gösterilmelidir. Bu amaca yönelik olarak mevcut hava kapılarının ya da regülatörlerin bulunduğu yerler uygun olabilmektedir.

Ülkemizde kendiliğinden yanmaya yatkın kömürlerin üretildiği yeraltı kömür ocaklarında acil durumlarda baraj yeri seçiminde ve barajın sıfırdan inşa edilmesinde zaman kaybedilmemesi için, yeri önceden tasarlanmış, tamamlanması için gerekli malzemenin yakın bir yerde hazır bulundurulduğu "bekleme barajları" kullanılmaktadır. Ülkemizdeki madencilik mevzuatı kendiliğinden yanmaya yatkın damarların çalışıldığı tek girişli pano tasarımlarında bekleme/yanğın barajları asgari olarak panonun hava giriş ve dönüş yollarına inşa edilmesini hüküm altına almıştır (ÇSGB, 2015). Bekleme barajlarının yerleri ana kat lağımlarına yeterli mesafede olacak şekilde seçilmelidir.

6.5.2 Barajların İnşası ve Kapatılması

Barajlar, sızdırmazlığın sağlanmasına yönelik olarak barajın ana gövdesi genellikle barajın inşa edileceği galerinin tavan, taban ve yan cidarlarında 50-60 cm derinliğe gömülecek şekilde sağlam bir malzemenin inşa edilmelidir. Gelişmiş madencilik ülkelerinde barajların yapımı için yasa ve yönetmeliklerle belirlenmiş şartlar bulunmaktadır. ABD'de Mine Safety and Health Administration (MSHA) tarafından yayımlanan standarda göre yeraltı kömür ocaklarında inşa edilecek barajlar; baraj arkaları izleniyorsa minimum 345 kPa, izlenmiyorsa minimum 827 kPa patlama basıncına

0,1 s ya da 4 s süreyle dayanacak şekilde ve buna yönelik uygun malzemenin inşa edilmelidir (MSHA, 2008). Benzer şekilde, Avustralya'da ise yeraltı kömür ocaklarında kurulacak barajlar B, C, D ve E tipi olarak dört kategoriye ayrılmış ve bu barajların sırasıyla minimum 35, 140, 345 ve 70 kPa basınçlara dayanacak kapasitede olması zorunlu kılınmıştır (Coal Mining Safety and Health Regulation, 2017). Almanya'da ise patlamaya dayanıklı barajların 500 kPa basınca dayanabilecek şekilde buna uygun malzemenin yapılması gerekmektedir (Addammungs-Richtlinien, 2016). Almanya'da uygulanan yönetmelikte kullanılacak malzemenin cinsine göre bu koşulları sağlayacak baraj kalınlığının bulunması için aşağıda verilen eşitlik verilmektedir.

$$I_D = \frac{0,7a}{\sqrt{\sigma_{bz}}} \quad (6.1)$$

Burada; I_D asgari baraj kalınlığını (m), a kesitin en büyük boyutunu (en ya da yükseklik) ve σ_{bz} ise barajın yapılacağı malzemenin bükülme mukavemetini temsil etmektedir.

Ülkemizde ise 29291 sayılı Resmi Gazete ile 2015 yılında yürürlüğe giren Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'ne göre yangın ve bekleme barajları için herhangi bir basınç dayanımı şartı bulunmamakta ancak bu tür barajların hava sızdırmaz, basınca dayanıklı ve tahrip olmayacak şekilde kurulmaları hüküm altına alınmıştır (ÇSGB, 2015). Yönetmelikte barajların hangi malzemenin yapılması gerektiği de belirtilmemiştir. Bu durumda, yeraltı kömür ocaklarımızda kızışma/yanğın durumlarında, panodaki metan geliri, yangının yeri, toz patlama gibi riskler de dikkate alınarak barajların beton gibi sağlam bir malzemenin yeterli kalınlıklarda inşa edilmesi iş sağlığı güvenliği açısından faydalı olacaktır. Beton kullanıldığı durumlarda çabuk prizlenen çimento kullanılmasına özen gösterilmelidir.

Bekleme barajlarının önü ve arkasındaki tahkimatın sağlam olması, zamanla bozulan tahkimatın düzeltilmesi önemlidir. Ayrıca, baraj çevresindeki tabakalardan hava kaçağı olacağı düşünülüyorsa bu kısımlara çimento, beton enjeksiyonu yapılmalıdır. Bekleme barajlarının kesitleri galerideki nakliyat tütü göz önüne alınarak ve diğer işleri sekteye uğratmayacak büyüklükte seçilmelidir. Kesiti bozulan, çatlayan ya da kabaran bekleme barajları belirli aralıklarla tamir edilmeli ve bir acil durum için hazır halde olmalıdır.

Barajlar, mevcut havalandırma koşullarında en az değişiklik yaratacak şekilde inşa edilmelidir. Patlama tehlikesinin olmadığı, açık alevli olmayan kızışmalarda öncelikle hava giriş yolundaki barajın yapılması kızışma bölgesine havanın ulaşmasını engelleyeceğinden tercih edilmesi mümkündür. Bunu takiben hava dönüş yolu da kısa sürede barajlanmalıdır. Ancak, patlayıcı bir atmosferin bulunduğu durumlarda tüm barajlar aynı anda kapatılmalıdır. Bu noktada, ocakta patlama riski olsun ya da olmasın, gaz

izleme ve değerlendirmedeki hatalardan kaynaklı olarak alınabilecek yanlış kararların da önüne geçmek amacıyla, herhangi bir riske girilmeden hava giriş ve dönüş yolundaki barajların aynı anda kapatılması amaç olmalıdır. Barajların mümkün olduğunca aynı anda kapatılabilmesi ve kızışma/ yangın durumunda beklenmeyen değişimlere neden olma riskini en aza indirmek için baraj ekiplerinin iletişimi oldukça önemlidir. Barajlar kapatıldıktan sonra herhangi bir patlama tehlikesine karşı tüm personel ocak dışına çıkarılmalı ve en az 24 saat süre geçmesi beklenmelidir.

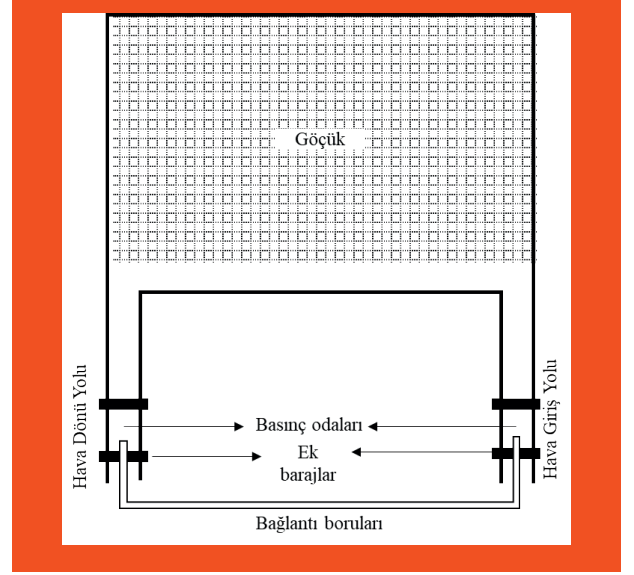
Barajlarda, baraj arkasındaki atmosferin ve su miktarının izlenmesine yönelik olarak yeterli uzunluklarda birer gaz örnekleme borusu ve su boşaltma borusu (deve boynu) kullanılmalıdır. Gaz örnekleme boruları barometrik basınç değişimleri nedeniyle baraj arkasındaki “nefes almayı (havanın içeri dışarı hareketi)” algılayabilecek mesafede olmalıdır. Aynı anda farklı noktalardan (örneğin galerinin tavan, taban ya da kesit ortasından) örnek alabilmek için metal bir boru içine daha küçük çaplı örnek boruları yerleştirilmesi de uygun olacaktır.

Şekil 6.4'teki gibi set halinde yapılan barajlarda çelik erişim borusunun bırakılması barajın yapımı sırasında havalandırmanın sürdürülmesini sağlamaktadır. Barajlar tamamlandıktan sonra erişim boruları aynı anda kuvvetli çelik levhalarla kapatılır ve sızdırmazlıkları sağlanır. Bu erişim borularının bir amacı da panonun tekrar açılması sırasında tahliye ekiplerinin barajlanan bölgede incelemenin sağlanmasını sağlamaktır. Gerekli durumlarda erişim borusunun içi dolguyla doldurulabilmektedir, bu nedenle erişim boruları eğimli olarak yerleştirilmektedir (McPherson, 1993). Erişim borularının kullanılmadığı tek bir baraj inşa edilen durumlarda baraj kapıları kullanılmaktadır.

6.5.3 Sıkılama ve Basınç Dengeleme

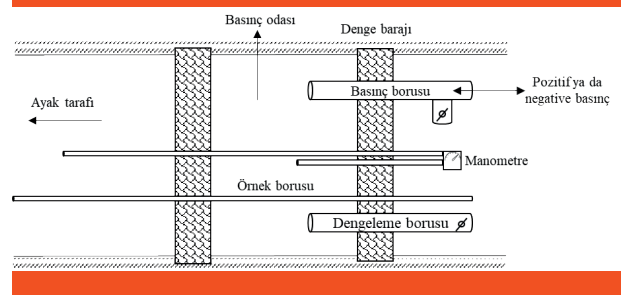
Yeraltı ocak şartlarında inşa edilen herhangi bir barajın tamamen sızdırmaz olması pratik olarak imkansızdır. Barajın kendisi mükemmel inşa edilmiş olsa bile barajın iki tarafındaki basınçların farklarından dolayı tabakalardan kaçak oluşması kaçınılmazdır. Kızışma/ yangın bölgesinin barajlanmasını takiben barajlarda kaçak olduğuna karar verilirse ve ocak yönetimi ortamda bir patlama riskinin bulunmadığına eminse, kurulan barajların yüzeylerini ya da tabakaların sızdırmazlıklarını sağlayacak yüzey kaplama ya da çimento enjeksiyonu gibi uygulamalar yapılabilmekte ya da kurulan barajların önüne yeni barajlar kurularak sızdırmazlık sağlanmaya çalışılabilmektedir. Kızışma/ yangının olduğu bölgeye hava kaçaklarının kesilemediği durumlarda olayın kontrol altına alınması uzayabilmekte hatta bazı durumlarda hiç kontrol altına alınamamaktadır. Kurulan barajların önü ve arkası (pano tarafı) arasındaki basınç farklarının büyük olduğu durumlarda hava kaçakları ancak bu basınç farklarının azaltılması yoluyla giderilebilir.

Kurulan iki baraj arasındaki basınç farklarının eşitlenmesi için iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki “pasif basınç dengeleme”dir. Bu yöntemde panonun hava girişi ve çıkışındaki mevcut barajların 4-5 m önlerine yeni barajlar inşa edilerek barajlar arasında basınç odaları oluşturulmaktadır (Şekil 6.6). Panonun alt taban ve üst taban yolunda oluşturulan bu basınç odaları yaklaşık 0,5 m çapındaki borularla birbirine irtibatlandırılmakta ve böylece her iki odadaki basınçlar belirli bir zaman sonra birbirine eşitlenmektedir.



Şekil 6.6 Pasif basınç odalarının oluşturulması ve basınç dengeleme.

McPherson (1993) pasif basınç dengelemenin, değişen barometrik basınçların olduğu zamanlarda “nefes almayı” engellemediğini, bunun ise ancak aktif basınç dengeleme ile aşılabileceğini belirtmiştir (Şekil 6.7). Aktif basınç dengelemede, kurulan bir barajın önü ve arkasındaki basıncın dengelenmesi söz konusudur. Bu yöntemde barajın 3-5 m önüne kurulan bir denge barajı bulunmakta ve bu denge barajı üzerinde iki boru yerleştirilmektedir. Bu borulardan bir tanesi oluşan basınç odasına basınç sağlamak için kullanılmakta, diğeri ise dengeleme için kullanılmaktadır. Eğer hava giriş yolundaki barajın önü ve arkasındaki basınç eşitlenmek isteniyorsa basınç odasına negatif basınç (emici), hava dönüş yolundaki barajın önü ve arkasındaki basınç dengelenmek isteniyorsa basınç odasına pozitif basınç (üfleyci) sağlanmalıdır. Denge odasına basınç sağlanabilmesi için küçük fanlar kullanılabilir. Basınç ve denge borularında kapaklar bulunmakta ve odadaki basınca ince ayar yapmak mümkün olabilmektedir. Hava basıncının ölçülebilmesi için biri barajın arkasına (ayak tarafına) uzanan diğeri ise basınç odasının içine uzanan için iki boru kullanılmakta ve bu iki boru bir manometreye bağlanarak basınç odası ve baraj arkasındaki basınç farkı ölçülebilmektedir. Basınç odası ve baraj arkasındaki basınç farkı eşit olduğundan manometrede sıfır değeri okunmakta ve sıfır değerinin değiştiği durumlarda borulardaki kapaklar kullanılarak basınç dengelenebilmektedir.



Şekil 6.7 Bir aktif basınç denge odası (McPherson, 1993'ten değiştirilerek).

7. PANO RİSK SINIFLAMASI VE KENDİLİĞİNDEN YANMA İLE MÜCADELE EYLEM PLANI

Kendiliğinden yanmaya yatkın kömür damarlarının üretilmesi için oluşturulan panolarda kızışma/yangın tehlikesi ve risklerin önceden belirlenerek bunlara uygun tedbirlerin alınması ocaklarda yaşanacak felaketlerin önüne geçilebilmesi için oldukça önemlidir. Özellikle birden çok kömür damarının çalışıldığı yeraltı kömür ocaklarında, damarların kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının ve panolardaki kendiliğinden yanma risklerinin önceden tespit edilmesi olayla mücadele açısından avantajlar sağlamaktadır. Bu risklerin tespiti aynı zamanda ocakta acil bir durum olduğunda uygulanacak eylemlerin planlanmasına yardımcı olmakta ve bu amaca uygun olarak hazırlanacak bir "Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Eylem Planı" hazırlıklarına altyapı oluşturacaktır.

7.1 Pano Risk Sınıflama Teknikleri

Yukarıda sayılan amaçlara uygun olarak yeraltı kömür ocaklarında kömür damarlarının kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının ve panolardaki kendiliğinden yanma risklerinin sınıflandırılması için çeşitli indeks teknikleri geliştirilmiştir. Bu indeks tekniklerinin özünde, öncelikle çalışmaya konu olan kömür damarlarının kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının laboratuvar testleriyle belirlenmesi (bkz. Bölüm 2.3) ve sahadaki gözlemlere ve deneyimlere bağlı olarak çevresel koşulların değerlendirilmesi yatmaktadır. Bu bölümde geliştirilen indekslerden popüler olanları hakkında detaylar verilecek ve bir örnek bir uygulama üzerinden bir adaptasyon önerilecektir.

7.1.1 Risk İndeksi (Ri)

Bu indeks, Feng vd. (1973) tarafından geliştirilen risk indeksi (FCC) ile çevresel koşulları belirleyen Çevre İndeksi'nin (Çİ) çarpımından elde edilmektedir. Bölüm 2.3'te de açıklandığı üzere FCC, laboratuvarda gerçekleştirilen kesişme noktası deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen indeks değerleri ise Çizelge 7.1'deki gibi yorumlanmaktadır.

$$FCC_{indeks} = \frac{110^{\circ}-220^{\circ} \text{ Arasındaki Ortalama Sıcaklık Artışı}}{\text{Kesişme Noktası Sıcaklığı}} \times 1000$$

Çizelge 7.1 FCC indeksine göre risk sınıflandırması.

FCC Risk İndeksi	Risk Sınıfı
0 - 5	Düşük
5 - 10	Orta
>10	Yüksek

Çevre İndeksi (Çİ) ise Çizelge 7.2'de verilmiştir. FCC ve Çİ'yi kullanan Risk İndeksi (Rİ) değerleri ve yorumu ise Çizelge 7.3'te sunulmuştur.

Çizelge 7.2 Çevre İndeksi (Çİ).

Grup	Kömür Kayıpları	Jeolojik Arızalar	Havalandırma Basıncı	Çİ	Risk
A	Normal Yüksek	Doğal Doğal	Normal Normal	1	Düşük
B	Normal Normal	Yüksek Doğal	Normal Yüksek	2	Orta
C	Yüksek Yüksek	Doğal Yüksek	Yüksek Yüksek	3	Yüksek
D	Yüksek	Yüksek	Yüksek	4	Çok Yüksek

Çizelge 7.3 Risk İndeksi (Rİ).

Risk İndeksi (FCC) x (Çİ)	Risk Sınıfı
0 - 10	Düşük
10-20	Orta
20-40	Yüksek

7.1.2 Değiştirilmiş Bystron-Urbanski İndeksi (BU İndeksi)

Bu yöntem, kömür stoklarının kendiliğinden yanma risklerinin sınıflandırılması için geliştirilen Bystron-Urbanski tekniğinde değişiklikler yapılarak ocaklara uygun olarak değiştirilmiş bir indekstir (Çizelge 7.4) (Singh vd., 1984). Çizelgede yer alan nümerik değerler bir pano için atanmakta ve kendiliğinden yanma riski oluşan toplam değere göre Çizelge 7.5'e uygun olarak değerlendirilmektedir. Bu yöntemde içsel faktörlerin belirlenebilmesi için adyabatik ısıtma yöntemi ile laboratuvar deneyleri yapılması gerekmektedir (bkz. Bölüm 2.3).

Çizelge 7.4 Değiştirilmiş Bystron-Urbanski İndeksinde parametreler ve atanan değerler.

	Parametreler	Değer	
İçsel Faktörler	1. Grup: düşük yatkinlik (antrasit-yarı antrasit) ısınma hızı < 0,4°C/h	+1	
	2. Grup: orta yatkinlik (kok ve kuru buhar kömürü) ısınma hızı < 0,4-0,8°C/h	+2	
	3. Grup: yüksek yatkinlik (taşkömürü) ısınma hızı 0,8-1,5°C/h	+4	
	4. Grup: çok yüksek yatkinlik (linyit, alt bitümlü) >1,5°C/h	+8	
Çevresel Faktörler	Çevredeki damarlar	Tavanda terk edilen ince damar Tavanda terk edilen kalın damar	+2 +5
	Kül (%)	21-30 >30	-1 -2
	Göçüğün kalitesi	İyi göçmüş tavan Askıda tavan	0 +4
	İşletme yöntemi	Dolgulu/tabanyolu kenar dolgulu ilerletimli uzun ayak Dönümlü uzun ayak	+8 +1
	Tavanda kalan kömür	Hepsi alınıyor 0,2-0,5m > 0,5m	0 +5 +8
	Damar Kalınlığı	< 1,5m 1,5-3,0m >3,0m Dilimli çalışan kalın damar	-1 +2 +3 +8
	Havalandırma	Klasik Üst taban yolunda vantilatörle metan denetimi	0 +4
	Günlük ilerleme	<1,0m 1,5-2,5m >2,5m	+5 +2 0
	İzleme	Yok Klasik Sürekli izleme	+5 -2 -7

Çizelge 7.5 Değiştirilmiş Bystron-Urbanski (BU) İndeksi'nde risk değerlendirilmesi.

BU İndeks Değeri	Risk Sınıfı
1 - 10	Düşük
11 - 20	Orta
21 - 40	Yüksek
> 40	Çok Yüksek

7.1.3 Önerilen Yöntem

Bystron-Urbanski tekniğinin geliştirildiği ve uygulandığı ülkelerdeki madencilik koşullarının ülkemizdeki koşullardan oldukça farklı olduğu düşünüldüğünde bu tekniğin doğrudan ülkemiz yeraltı kömür ocaklarına uygulanmasında zorluklar çıkabilmektedir. Özellikle, ülkemizdeki çoğu kömür ocağının tam mekanize çalışmıyor olması dolayısıyla ayak ilerleme hızlarının düşük olması, çalışılan kömür damarlarının kalınlıklarının düşük ve damarların oldukça eğimli olabilmesi ya da damarların kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının belirlenmesi için kullanılan laboratuvar tekniklerindeki farklılıklar gibi sebeplerle Bystron-Urbanski tekniğinin bir uyarlamasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Önerilen yöntemdeki faktörler ve atanacak değerler Çizelge 7.6'da sunulmuştur Bu çizelgede A sütunu,

faktörlere atanacak nümerik değerlerin (B sütunu) çarpılacağı katsayıları göstermektedir. 1'den 10'a kadar sıralanan katsayılar esas olarak faktörlerin kendiliğinden yanma olayındaki önemine göre belirlenmiştir. Her katsayı (A sütunu) için faktörlere atanacak değerlerin (B sütunu) belirlenmesinde kullanılan faktörler ve alt seçenekleri asıl olarak o panoda olası maden işletme ve tavan kontrolü yöntemleridir. Faktörlere atanacak değerler (B sütunu) belirlendikten sonra (A)x(B) çarpım değerleri çizelgeye yerleştirilir. Tüm çarpım değerleri tespit edildiğinde (A)x(B) sütunundaki değerler alt alta toplanır ve toplam Risk Sonucu $\Sigma[(A)x(B)]$ bulunmuş olur bulunur. Elde edilen sonuç Çizelge 7.7'ye göre değerlendirilir. Seçenekler sütunundaki [(A)x(B) sütunu] 1, 2 ve 3 farklı üretim yöntemi ve tavan kontrolü yöntemlerinin ayrı ayrı değerlendirilebilmesi içindir (ilerletimli-göçertmeli, ilerletimli-dolgu, dönümlü-göçertmeli, topuklu-göçertmeli vb.).

Önerilen yöntemde en büyük değer 550 olabilmektedir. Çizelge 7.6 incelendiğinde A katsayılarının en yüksek olduğu faktörler, hava kaçaklarına karşı önlemler (8), ayak başlama topuğunda önlemler (9) ve hava kaçaklarına (10) atanacak nümerik değerlerin "dönümlü çalışma" durumunda "0" olması dikkat çekmektedir. Dönümlü çalışma haricindeki bir yöntem uygulandığında bu üç katsayının en yüksek değerlerinin toplamı 270 etmekte ve bu da toplam risk indeksi değeri olan 550'nin neredeyse yarısına denk gelmektedir.

Çizelge 7.6 Önerilen risk değerlendirme yöntemi (Didari, 2015).

KATSAYI (A)	FAKTÖRLER	DEĞER (B)	SEÇENEKLER (AxB)		
			1	2	3
1	Laboratuvar bulguları	İÇ FAKTÖRLER GRUBU	0-10		
		0° - 36°	1-3		
2	Eğim	36° - 54°	4-6		
		54° - 90°	7-10		
		< 1.4 m	1-2		
3	Kalınlık	1.4 - 2.0 m	3-4		
		2.0 - 3.0 m	5-7		
		> 3.0 m	8-10		
		- Yok	0		
4	Pirit	- Yer yer (damarın belli kısımlarında)	1-3		
		- Her yerde (tüm damarda dağılmış olarak)	4-6		
		- Çok fazla (yoğun biçimde)	7-10		
		- Yok	0		
5	Damar içi arızalar (ataklar)	- Az (1-2 adet)	1-3		
		- Orta (2-3 adet)	4-6		
		- Yüksek (3'den fazla)	7-10		
	- Tavanda kalan kömür	- Yok	0		
6	- Ayak içinde topuk	- Az (kalınlığın %5-10'u kadar)	1-3		
		- Orta (%10-20)	4-6		
		- Yüksek (%20'den fazla)	7-10		

		≥ 1 m/gün	0
7	Arın ilerleme hızı	0.5 - 1 m/gün	1-5
		< 0.5 m/gün	6-10
		- Gerekmiyor	0
8	Hava kaçaklarına karşı önlemler	- Hidrolik dolgu, köpük (alt tb. yolu kenarı)	1-2
		- Diğer (keson vb.)	3-5
		- Önlem alınmamış	6-10
9	Ayak başlama topuğunda önlemler	- Gerekmiyor	0
		- Hidrolik dolgu, köpük vb.	1-2
		- Diğer (keson vb.)	3-5
		- Önlem alınmamış	6-10
10	Hava kaçakları	- Yok	0
		- Önemsiz	1-5
		- Önemli	6-10
			İNDEKS
MÜESSESE:			Σ (AxB)
OCAK:			
DAMAR:			
PANO NO:			

Çizelge 7.7 Önerilen yöntemde risk sınıflaması.

Σ AxB	Risk Sınıfı
< 100	Düşük
100-200	Orta
200-400	Yüksek
> 400	Çok yüksek

Hesaplamalara örnek olması amacıyla; kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığı yüksek olan (FCC indeksi 12), dönümlü-göçertmeli uzun ayak tekniğiyle çalışan, damar kalınlığı 4m ve damar eğimi 12° olan, kömür damarında yer yer pirit bulunan, çok sayıda damar içi arızaya sahip, tavanda 75-80 cm kömür bırakılan ve ayak ilerlemesi 0,5 m/günden küçük olan bir taşkömürü panosundaki risk değerlendirilmesinin hesaplaması Çizelge 7.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.8 Önerilen yöntemde göre örnek bir risk değerlendirmesi.

KATSAYI (A)	FAKTÖRLER	DEĞER (B)	SEÇENEKLER (AxB)		
			1	2	3
1	Laboratuvar bulguları	İÇ FAKTÖRLER GRUBU	0-10	10	
		0° - 36°	1-3		
2	Eğim	36° - 54°	4-6	4	
		54° - 90°	7-10		
		< 1.4 m	1-2		
3	Kalınlık	1.4 - 2.0 m	3-4	27	
		2.0 - 3.0 m	5-7		
		> 3.0 m	8-10		
		- Yok	0		
4	Pirit	- Yer yer (damarın belli kısımlarında)	1-3	8	
		- Her yerde (tüm damarda dağılmış olarak)	4-6		
		- Çok fazla (yoğun biçimde)	7-10		

		- Yok	0	
5	Damar içi arızalar (ataklar)	- Az (1-2 adet)	1-3	40
		- Orta (2-3 adet)	4-6	
		- Yüksek (3'den fazla)	7-10	
	- Tavanda kalan kömür	- Yok	0	
6	- Ayak içinde topuk	- Az (kalınlığın %5-10'u kadar)	1-3	60
		- Orta (%10-20)	4-6	
		- Yüksek (%20'den fazla)	7-10	
		≥ 1 m/gün	0	
7	Arın ilerleme hızı	0.5 - 1 m/gün	1-5	56
		< 0.5 m/gün	6-10	
		- Gerekmiyor	0	
8	Hava kaçaklarına karşı önlemler	- Hidrolik dolgu, köpük (alt tb. yolu kenarı)	1-2	0
		- Diğer (keson vb.)	3-5	
		- Önlem alınmamış	6-10	
		- Gerekmiyor	0	
9	Ayak başlama topuğunda önlemler	- Hidrolik dolgu, köpük vb.	1-2	0
		- Diğer (keson vb.)	3-5	
		- Önlem alınmamış	6-10	
		- Yok	0	
10	Hava kaçakları	- Önemsiz	1-5	0
		- Önemli	6-10	

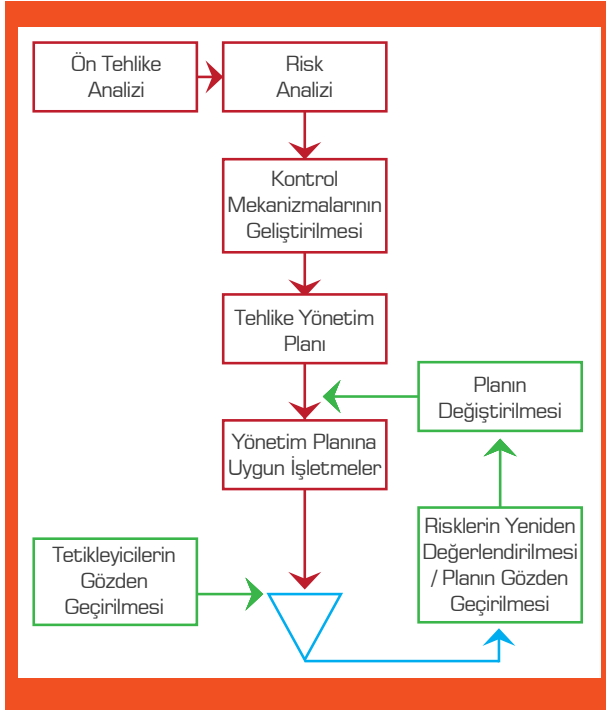
**İNDEKS
Σ (AxB) 205**

MÜESSESE: Örnek
OCAK: Örnek
DAMAR: Örnek
PANO NO: Örnek

Görüldüğü üzere verilen bilgilere göre örnek panodaki İndeks ($\Sigma(A) \times (B)$) değeri 205 olarak bulunmakta ve bu değer Çizelge 7.7'ye göre değerlendirildiğinden bu panodaki kendiliğinden yanma riski ise "yüksek" olarak değerlendirilmektedir. Çizelgede faktörlere atanan nümerik değerler (B sütunu), ocak ve damarın gerçek koşullarının iç faktörler grubunda belirtilen değerlere yakınlığına göre tespit edilmiştir. Örneğin bu panoda damar eğimi 12° olduğundan iç faktörler grubunda belirtilen $0-36^\circ$ aralığının neredeyse tam ortasında yer almaktadır. Bu durumda bu faktöre atanacak değer de $0-36^\circ$ için verilmesi gereken 1-3 değerinin (B sütunu) ortasındaki değer olan 2 olarak alınmış ve $(A) \times (B)$ değeri $2 \times 2 = 4$ olarak belirlenmiştir.

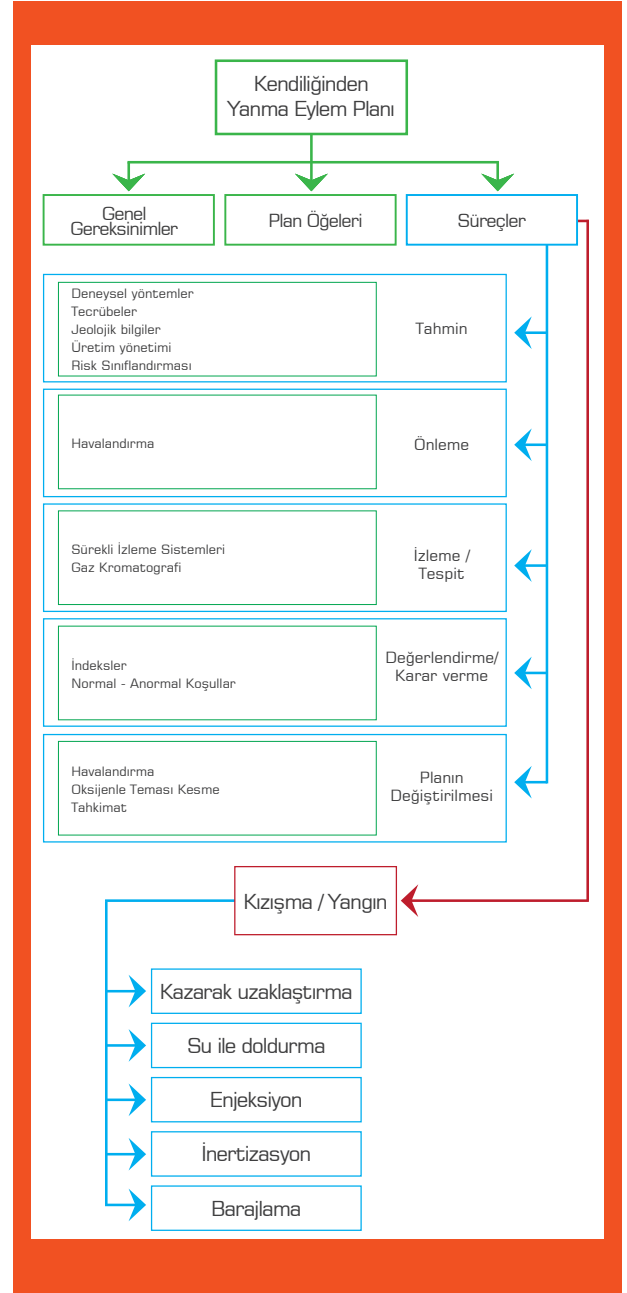
7.2 Kendiliğinden Yanma Eylem Planı

Kendiliğinden yanma riski bulunan yeraltı kömür ocaklarında, diğer tüm tehlikelerde olduğu gibi, kendiliğinden yanma/ yangın durumlarında yürütülecek bir "Tehlike Yönetim Planı"nın önceden hazırlanması; olayın değerlendirilmesi, tehlike ve risklerin bertarafı için önceden belirlenmiş aksiyonların alınabilmesi açısından oldukça önemlidir (Şekil 7.1). Bu tür planlar ocakta can ve mal kaybına yol açabilecek anormal koşulların oluştuğunu gösteren tetikleyicileri açık ve öz şekilde işaret eden araçlardır. Böyle durumlarda en alt seviye eylemler, değişikliğin tespit edilmesi ve personelin riske maruz kalmasından önce olumsuzlukların düzeltilmesidir. Bu planlar, olayın ve riskin seviyesine göre farklı seviyede uygulanacak eylemleri kapsamaktadır.



Şekil 7.1 Tehlike yönetim planı akım şeması.

Bu kapsamda bir Kendiliğinden Yanma Eylem Planı ise kendiliğinden yanma olaylarında ocak koşullarının normalden saptığı durumlarda ocak personelinin uygulayacağı eylemleri tanımlayan bir plan olmalıdır. Temel bir Kendiliğinden Yanma Eylem Planının aşamalarını gösteren akış şeması Şekil 7.2'de verilmiştir. Eylem planının amacı, normal işletme koşullarındaki bir değişimi, tehlikenin ocak personeli için ciddi bir risk oluşturmadan önce tespit edilmesi olmalıdır. "Normal" ocak koşullarında araştırma gerektiren bir değişim (Seviye 1), düzeltilmesi için bir eylem gerektiren ve kontrolün kaybedildiğini gösteren bir kanıt (Seviye 2) ve personelin bölgeden ya da ocaktan tahliye edilmesini gerektirecek bir risk (Seviye 3) bir Kendiliğinden Yanma Eylem Planı'nda olması gereken üç temel eylem seviyesidir. Bu plan öncelikle basit ve etkili olmalı ve normal koşulların değiştiğini gösteren açık değerler ya da gözlemler içermelidir. Zira personelin kanaatlerine ve tecrübelerine bırakılan durumlarda personelin değerlendirmeleri ve alacağı kararlar hatalı ya da yetersiz olabilmektedir. Bu planların amacı erken tespit yoluyla olayın önlenmesi ya da kontrol etmesi olduğundan, bu planda belirtilen normal olmayan değerler önceden test edilmiş, doğruluğu onaylanmış ve bu durumda alınacak önlemler önceden belirlenmiş olmalıdır. Bunun kolay bir iş olmadığı, bilgi ve tecrübe gerektirdiği unutulmamalıdır. Kendiliğinden Yanma Eylem Planı yeni bilgiler ve tecrübelerle göre zaman zaman gözden geçirilmeli ve güncellenmelidir. Bir kendiliğinden yanma olayında Kendiliğinden Yanma Eylem Planı'nda bir eylemin uygulanması gerekiyorsa bu eylem mutlaka uygulanmalıdır.



Şekil 7.2 Kendiliğinden Yanma Eylem Planının temel öğeleri.

Bir Kendiliğinden Yanma Eylem Planı; sadece kendiliğinden yanmayı tespit etmekle kalmamalı, kendiliğinden yanma olaylarının başlamadan engellenmesi amacıyla normal olmayan hava kaçaklarının ortadan kaldırılmasını, jeolojik arızaların olduğu durumlarda izleme ve gözlem faaliyetlerinin yoğunlaştırılmasını, havalandırma koşullarını sekteye uğratan nedenlerin giderilmesini, ayak ilerleme hızında düşüş gibi durumlarda izleme ve gözlemlerin sıklaştırılmasını ve kömür kalitesindeki farklılıklardan kaynaklanabilecek durumları da kapsamalıdır.

MDG-1006 (2011), Kendiliğinden Yanma Eylem Planı'nın devreye girmesini tetikleyen olayların; baraj bölgelerine girişin imkansızlaşması, barajlarda meydana gelen hasarlar,

havalandırma basıncında meydana gelen, plansız ancak ciddi artış ya da azalmalar, anormal CO konsantrasyonları, inert durumdaki bir göçükte oksijen konsantrasyonunun artması, bir uzunayak panosunun hava dönüş yolunda CO oluşum miktarının giderek artması, Graham İndeksi'nin ya da ocakta kullanılan diğer indeks/göstergelerin giderek artması, koku ya da diğer fiziksel göstergelerin ortaya çıkması gibi olaylar olduğunu rapor etmiştir.

7.2.1 Normal ve Anormal Koşulların Belirlenmesi

Kendiliğinden Yanma Eylem Planı için öncelikli konu "normal" koşulların tanımlanmasıdır. Zira bu rehberde detaylı olarak anlatıldığı üzere yeraltı kömür ocaklarında kömür damarının, jeolojik koşulların, madencilik faktörlerinin büyük farklılıklar gösterebiliyor olması nedeniyle her ocağın farklı koşulları ve normalleri olabilmektedir (bkz Bölüm 2 ve 3). Ayrıca, ocağın farklı bölgelerinde meydana gelebilecek kendiliğinden yanma olayları farklı davranışlar sergileyecek ve farklı oksidasyon/yanma ürünlerinin açığa çıkmasına neden olabilecektir. Örneğin, bir uzunayak göçüğünde hava kaçağından kaynaklı bir kızışma ile normal olarak havalandırılan bir havayolundaki kızışma birbirinden oldukça farklı olacaktır. Bu kapsamda, barajlanmış eski çalışma alanları, aktif ayaklar ve göçükleri, panoların hava dönüş yolları ve hazırlık galerilerinde meydana gelebilecek kendiliğinden yanma olayları ayrı ayrı düşünülmelidir.

Kendiliğinden yanmanın tespiti açısından aktif uzunayaklarda en azından izlenmesi gereken noktalar ayağın hemen arkası (göçük tarafı), ayak ve taban yollarıdır. Ülkemizde atmosferik izleme sistemlerinin yeraltı ocaklarında kurulu olması mecburi tutulmuş ve sensörlerin asgari olarak panoların hava giriş ve dönüş yollarına konması zorunlu hale getirilmiştir. Kendiliğinden yanmadan şüphelenilen durumlarda bu bölgelerde ocak atmosferinden alınacak örneklerin bir gaz kromatografisi ile analiz edilmesi atmosferik izleme sistemlerinin ölçmediği gaz ürünlerin tespiti açısından yerinde olacaktır.

Hali hazırda çalışan bir ocakta "normal" koşulların belirlenmesi için genel olarak çok sayıda göstergeye gerek bulunmamaktadır. Kesit içinde doğru yerlere yerleştirilmiş ve uygun aralıklarla kalibrasyonları yapılan sensörlere sahip atmosferik izleme sistemleri aracılığıyla elde edilen veriler ve bu veriler kullanılarak Bölüm 5.4'te anlatılan indekslerin tercih edilenlerinin takibi ocaklarda normal koşulların belirlenmesi için çoğu zaman yeterlidir. Bunun yanı sıra belirli zamanlarda potansiyel kendiliğinden yanma sorunu olabilecek noktalardan gaz örnekleri alınarak bir gaz kromatografisinde analiz edilmesi de oldukça faydalı olacaktır. Yeni kurulmuş ocaklarda ise "normal" koşulların belirlenebilmesi için gerekli veriler ancak ilk panonun üretime alınmasından sonra oluşacaktır. Bu durumda, ocaktaki göstergeler oluşturulan veri seti kullanarak belirlenmeli ve ocakta çalışmalar ilerledikçe güncellenmelidir.

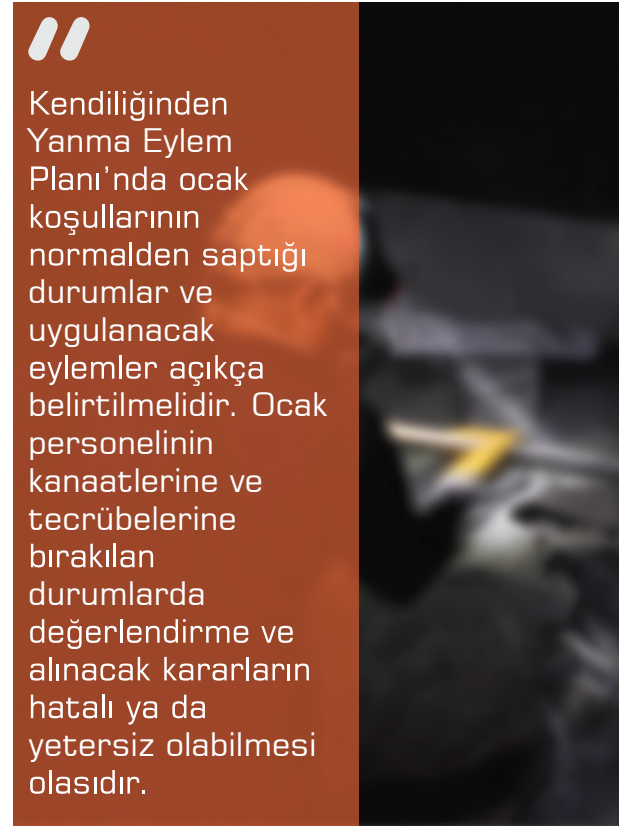
Ocaktaki normal koşulların belirlenmesinde izlenecek yöntem kendiliğinden yanma olaylarının potansiyel olarak oluşabileceği yerlere göre değişkenlik gösterebilir. Oksijen azalmasının yaşanacağı ayak göçüklerindeki kızışmalarda

Graham İndeksi anlamlı olabilirken hava miktarının fazla olduğu galerilerde oksijen azalması iyi bir gösterge olmayacağından bu indeks çalışmayabilmektedir.

Bir ocaktaki "normal" koşulların belirlenmesinden sonra anormal koşulların belirlenmesi oldukça kolay olacaktır. Burada artık önemli olan hangi seviyelerin hangi tehlike ve risklere işaret ettiğinin belirlenmesi ve buna göre uygulanacak eylemlerin Kendiliğinden Yanma Eylem Planı'nda belirtilmesidir. Bu noktada ocak atmosferi çok dikkatli şekilde incelenmelidir. Örneğin bir ocaktaki uzunayak göçüğünde meydana gelen bir kızışma durumunda göçükte bırakılan kömürden yayılan gazlar nedeniyle bir patlama riskinin olması ya da olmaması durumunda Kendiliğinden Yanma Eylem Planındaki tetikleyici değerler farklı olacaktır.

7.2.2 Kendiliğinden Yanma Eylem Planının Uygulanması

Bir kendiliğinden Yanma Eylem Planının uygulanmasında ilk seviye eylemler "normal" ocak koşullarında araştırma gerektiren bir değişim durumudur (Seviye 1). Böyle durumlarda ilk olarak yapılması gereken durumun teyit edilmesi olmalıdır. Özellikle telemetrik izleme sistemlerinden elde edilen verilerde çoğu zaman hata olabileceğinden verilerin teyit edilmesi önem arz etmektedir. Bu hatalar genellikle sensörlerin kesit içinde doğru yerlere yerleştirilmemesi (CH₄ sensörünün kesitin ağırlık merkezine ve tavana yakın yerlere değil galeri yan cidarına yerleştirilmesi gibi), sensör kalibrasyonlarının yapılmamış olması, sensör zehirlenmesi olan sensörlerin yenilenmemesi gibi sebeplerden ortaya çıkmaktadır. Tüp demeti sistemlerinin ve gaz kromatografların ölçülecek



konsantrasyon seviyelerinde kalibrasyonlarının yapılması önem arz etmektedir. Aksi durumlarda tüp demeti sisteminden analizörlerle elde edilen veriler Seviye 1 durumunu işaret ederken gaz kromatografından elde edilen veriler bunu teyit etmeyebilmekte ya da tersi gerçekleşebilmektedir. Bunun yanı sıra verilerin teyidi için o bölgelerde manuel olarak ölçümler yapılmalı ve durum yerinde kontrol edilmelidir. Özellikle bir kendiliğinden yanma olayı sırasına ocakta veri ve göstergelerin değerlendirilmesi konusunda yetkin ve tecrübeli çalışanların bulunmadığı durumlarda mutlaka dışardan yardım alınması düşünülmelidir.

Ocakta “anormal” koşulların olduğu teyit edildiğinde Kendiliğinden Yanma Eylem Planında Seviye 2 eylemlere geçilmelidir. Bu seviyede inertizasyon ve olayın olduğu ocak kesiminin barajlanması, ekstra örnek noktalarının ayarlanması ve eğer tahliye düşünülüyorsa önemli ekipmanların alandan çıkarılması gibi eylemlerin planlanmasını gerektirmektedir.

Kızışma/kendiliğinden yanma olayı bir yangın ya da patlama oluşturacak bir seviyeye ilerlediyse bu durumda Kendiliğinden Yanma Eylem Planı son eylem olarak ocakta çalışanların tahliyesini ve ekipmanların güvenli bir durumda bırakılmasını gerektirmektedir (Seviye 3). Ocak tahliye edilirken tüm eylemler, kendiliğinden yanma olayı sonlandıktan sonra ocağa ya da panoya hızlı şekilde yeniden giriş düşünülerek gerçekleştirilmelidir.

Rehberin önceki bölümlerinde anlatıldığı üzere, kızışma bölgesinin tam olarak tespit edilmesindeki ve kendiliğinden yanma aşamasının doğru olarak belirlemesindeki zorluklar, ocak personelinin risklere maruziyetinden çok önce ocaktan tahliyesinin sağlanması için tutucu bir yaklaşım sergilenmesini gerektirmektedir. Bu noktada tutucu yaklaşımdan kasıt, ocakta ciddi bir tehlike varken verilerin ve göstergelerin doğru değerlendirilememesi ve “nasıl olsa bir şey olmaz” düşüncesiyle ocakta rutin faaliyetlere devam edilmesinin önüne geçilmesidir.

Kendiliğinden Yanma Eylem Planı'na bir örnek Çizelge 7.9'da verilmiştir. Bu plan; çoklu girişe sahip uzunayak panolarına sahip, inertizasyon için sahada kurulu bir azot tesisi bulunan, göçük bölgesinde metan drenajı yapılan bir ocakta, aktif bir uzunayak göçüğünde oluşacak bir kendiliğinden yanma olayında Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 alarm seviyelerini, alınacak tedbirleri ve uygulanacak eylemleri detaylı olarak göstermektedir.

Çizelge 7.9 Çoklu girişe sahip bir uzunayak panolarına sahip bir yeraltı kömür ocağından yangın, patlama, zehirlili ya da boğucu atmosfere neden olacak kendliliğinden yanma olayına karşı hazırlanmış Kendliliğinden Yanma Eylem Planı (Anglo American, 2022'den değiştirilerek).

Tetikleyici ve Eylem		Normal	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Yer	Uzunayak Hava Dönüşü	CO Oluşum Miktarı < 42 l/dak VE Graham indeksi < 0.3 VE CO/CO ₂ < 0.2	CO Oluşum Miktarı > 42 l/dak < 0.53 l/dak VEYA 0,3 ≤ Graham indeksi < 0,5 VEYA CO/CO ₂ > 0.2	CO Oluşum Miktarı > 54 l/dak < 93 l/dak VE Graham indeksi < 1 VEYA Terleme, koku, ısı (ERZ Kontrolörünce teyit edilmiş)	CO Oluşum Miktarı ≥ 93 l/dak VE Graham indeksi ≥ 1 VEYA Koku (göçükten geliyor)
	Aktif Göçük Barajı	CO < 130 ppm VE Etilen yok VE Hidrojen Yok	130 ppm ≤ CO ≤ 200 ppm	200 ppm ≤ CO ≤ 800 ppm VEYA 1 ppm ≤ Etilen ≤ 3 ppm VEYA Terleme, koku ısı (ERZ Kontrolörünce teyit edilmiş)	CO ≥ 800 ppm VEYA Etilen ≥ 3 ppm VE CO ≥ 200 ppm
EYLEM	Göçük Kuyusu	Gaz Drenaj Yönetim Planına Bakınız			
	Balon Örnekleme ve GC Analizi	1. Her vardiyada balon örnekleme (16:0pm/04:00) 2. Her 24 saatte bir üst taban yolu balon örneği (14:00 – 17:00 arası)	1. Normalde olduğu gibi rutin devam et. 2. Teyit balon örneği 3. Etkilenen göçükten her vardiyada balon örnek 4. Arka arkaya alınan 3 örnek (günlük örnekler) düşük seviyeler işaret edene kadar Seviye 1 durumu sürdürülür	1. Etkilenen göçükten 4 saatlik balon örnek (eğer tüp demeti baraja bağlı ise 12 saatlik). Üst taban yolu hava istasyonunda 4 saatlik balon örnek (eğer tüp demeti yerleştirilmişe 12 saatlik) 2. Arka arkaya alınan 3 örnek (günlük örnekler) düşük seviyeler işaret edene kadar Seviye durumu sürdürülür	1. Yeraltı Ocak Müdürü ya da Kendliliğinden Yanma ile Mücadele Takımına uyulacak
	Balon Örnekleme ve GC Teyidi	-	1. Yeraltı Ocak Müdürü ya da Kendliliğinden Yanma Yönetim Takımına uyulacak	1. Etkilenen göçük barajı teyit örneği mümkün olan en kısa sürede alınır (1 saat içinde)	1. Etkilenen barajdan hemen balon örnek alınır 2. Yeni örnekler farklı gösterene kadar teyit edilmiş olarak kabul edilir
	Tüp Demeti Alarm Teyidi	-	1. Sonucun mevcut eğilimle uyumlu olduğu teyit et	1. Seviye 1'e uygun davran 2. Teyit okuması alana kadar etkilenen hortumu beklemeye al	1. Seviye 2'ye uygun davran
	Tüm Personel	1. Standart prosedürler ve iş talimatlarına göre işi sürdür	1. Kömürün kızışmasına bağlı herhangi bir normal olmayan koşulu/fiziksel işareti bildir	1. Kömürün kızışmasına bağlı herhangi bir normal olmayan koşulu/fiziksel işareti bildir ERZ kontrolörüne bildir	1. ERZ Kontrolörünce yönlendirildiği şekilde ocağı terket

YERALTI KÖMÜR OCAKLARINDA KENDİLİĞİNDEN YANMA VE YANGIN YÖNETİMİ

<p>Patlama Risk Bölgesi (ERZ) Kontrolörü</p>	<p>1. Barajları izle ve her 24 saatte bir göçük ve üst tabanyolundan balon örneklerin alındığına emin ol.</p>	<p>1. Etkilenen baraj bölgesine 12 saatte bir örnekleme yapıldığı ya da tüp demeti yerleştirilmesini ayarla</p> <p>2. Kontrol Odası Operatörü ile iletişime geç</p> <p>3. Uygun ekipmanla etkilenen alana detaylı bir inceleme ayarla ve hava akış desenlerini, basınç farklarını, sıcak bölgelerin büyüklüğünü, oksidasyonun durumunu, sıcak noktaları ve kaçak hatlarını tespit et</p> <p>4. Barajlardan kaçakları yok et ya da minimize et</p> <p>5. Kontrol Odası Operatörünü bulgulardan haberdar et</p> <p>6. Uygulanan eylemleri raporuna yaz</p> <p>7. Kaçak hatlarının ortadan kaldırılması ya da minimize edilmesini için eyleme geç</p>	<p>1. Seviye 1'e uygun davran</p> <p>2. Etkilenen göçük bölgesine 4 saatte bir balon örnekleme yap (tüp demeti bağlarsa 12 saatte bir)</p> <p>3. Üst taban yolu havalandırma istasyonundan 4 saatte bir balon örnek al (tüp demeti bağlarsa 121 saatte bir)</p> <p>4. Personele izahat ver ve tahliye hazırlık için nakliyatı organize et</p> <p>5. Kendiliğinden Yanma Yönetim Takımı tarafından verilen talimatları yerine getir</p>	<p>1. Mümkün olduğunda tüm personele izahat ver ve ocağı boşalt</p> <p>2. Yeraltı Ocak Müdürü ya da Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımının talimatlarını yerine getir</p>
<p>Kontrol Odası Operatörü</p>	<p>1. Gaz izleme sistemlerinde rutin izlemeye devam et</p> <p>2. Gerekli gibi gaz alarmlarına dikkat et ve teyit et.</p> <p>3. Alarm seviyesini belirle ve ocak yetkililerine bildir.</p> <p>4. Rutin denetimsel fonksiyonlara devam et</p>	<p>1. Alarm logunda olayın fark et ve kaydet</p> <p>2. Analiz sonuçlarını tekrar kontrol et</p> <p>3. ERZ Kontrolörünü ve Müdür Yardımcısını ve Uzunyayak Madencilik Koordinatörünü haberdar et</p> <p>4. Alarmı izle ve duruma ilgili güncelleme yap</p> <p>5. Gaz alarm protokollerini izle</p> <p>6. Her örneği 1 saat içinde analiz et</p> <p>7. Azot tesisinden balon örnek iste</p> <p>8. Azot tesisinin çalıştığını teyit et</p>	<p>1. Seviye 1'e uygun davran</p> <p>2. Etkilenen tüp demeti izleme noktasını bekleme al</p> <p>3. Yeraltı Ocak Müdürünü, Havalandırma Mühendisini, Havalandırma ve Gaz Drenajı Amirini ve Uzunyayak Amirini haberdar et</p> <p>4. Gaz alarm protokollerini izle</p> <p>5. Durumu güncelle</p> <p>6. Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımını düzenli olarak bilgilendir</p>	<p>1. ERZ Kontrolörünü acil balon örnek ihtiyaçları için haberdar et</p> <p>2. Yeraltı Ocak Müdürünün talimatına uygun olarak ihtiyaç olmayan personelin tahliyesini başlat</p> <p>3. Acil Durum Prosedürlerini başlat</p>
<p>Müdür Yardımcısı</p>	<p>1. Gaz alarmlarından haberdar ol ve teyit et.</p>	<p>1. Tertip toplantısında ocaktaki işçileri ocaktaki seviye ile ilgili haberdar et</p> <p>2. Toplanacak balon örnekler ve etkilenen alan ya da barajın incelenmesi için kaynakları organize et</p> <p>3. Alarm durumundan ERZ Kontrolörünü haberdar et</p> <p>4. Azot tesisinin faaliyetini teyit et</p> <p>5. Azot tesisinden balon örnek almak için ayarlama yap</p> <p>6. İnertizasyon boru hattında inceleme yapmak ve inertizasyonu tesis etmek için gerekli ayarlamaları yap</p> <p>7. Etkilenen alanda detaylı inceleme yapmak için gerekli ekipmanı ayarla ve hava akış desenlerini, basınç farklarını, sıcak bölgelerin büyüklüğünü, oksidasyonun durumunu, sıcak noktaları ve kaçak hatlarını tespit et</p> <p>8. Barajlardaki kaçakların engellendiğinden ya da minimize edildiğinden emin ol</p>	<p>1. Seviye 1'e uygun davran</p> <p>2. Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımının talimatlarını yerine getirilebilmesi için kaynakları sağla</p>	<p>1. Yeraltı Ocak Müdürünün talimatına uygun olarak ihtiyaç olmayan personelin tahliyesini başlat</p> <p>2. Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımı</p>

<p>Havalandırma Mühendisi</p>	<p>1. Gaz izleme sistemi, havalandırma sistemi, kontrol odası alarm kayıtları, gaz konsantrasyonları, gaz eğilimleri, barometrik eğilimler ve indeks eğilimlerini rutin olarak kontrol et</p>	<p>1. Normale uygun davran 2. Alarmdaki noktalardan veri ve eğilimleri değerlendirir 3. İlgilenilen alan için tüp demeti izleme sistemini gözden geçir 4. Gaz kuyuları ve drenaj sistemlerini gözden geçir 5. İnertizasyon durumunu gözden geçir 6. ERZ kontrolörünün inceleme raporunu gözden geçir ve detaylı inceleme gereksinimlerini düşün</p>	<p>1. Seviye 1'e uygun davran 2. Göçük drenaj ya da inertizasyon sisteminde değişiklik yapmayı düşün. 3. Eğilimlerin ve analizlerin yapılması için dışardan yardım almayı düşün 4. Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımı içinde yer al 5. İnertizasyon kapasitesi için durum kötüleşiyorsa mevcut seçenekleri değerlendir</p>	<p>1. Acil Durum Planına yardımcı ol</p>
<p>Yeraltı Ocak Müdürü</p>	<p>1. Kontrol odası alarm kayıtlarını rutin gözden geçir</p>	<p>1. Kendiliğinden Yanma Eylem Planı ve diğer prosedürlere uyulduğunu teyit et</p>	<p>1. Seviye 1'e uygun davran 2. Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımı kur 3. Eğilimleri incele ve Eylem Planı geliştir 4. Saha Yöneticisini haberdar et 5. Eylem Planının uygulandığına emin ol 6. Seviye 3 için hazırlıkları gözden geçir</p>	<p>1. Acil Durum Planını yürürlüğe sok</p>
<p>Saha Yöneticisi</p>			<p>1. Seviye 1'e uygun davran 2. Eylem Planını gözden geçir 3. Uygun dış kaynakların kullanıldığına emin ol 4. İşgücü ile iletişime geç 5. Seviye 1 eylemleri için rapor yaz 6. Kendiliğinden Yanma ile Mücadele Takımında yer al 7. Kurumsal yetkilileri haberdar et</p>	<p>1. Mümkün olduğunda tüm personele izahat ver ve ocağı boşalt 2. Yeraltı Ocak Müdürü ya da Kendiliğinden Yanma Yönetim Takımının talimatlarını yerine getir</p>

KAYNAKLAR

Addammungs-Richtlinien, 2016. Richtlinien der Bezirksregierung Arnsberg über das explosionsfeste Abdämmen von aufgegebenen Grubenbauen (Abdämmungs-Richtlinien; Guidelines of the Arnsberg District Government for the Construction of Mine Seals). www.esb.bezreg-arnsberg.nrw.de.

Agilent. www.agilent.com/en/product/

Anglo American, 2022. GRO-6953-TARP-Active Goaf Spontaneous Combustion. https://www.coalminesinquiry.qld.gov.au/___data/assets/pdf_file/0011/1620992/AGM.002.001.0755-Active-Goaf-Spontaneous-Combustion-TARP.pdf (erişim tarihi 20 Temmuz 2022).

Arisoy, A., Beamish, B., Yoruk, B., 2017. Moisture moderation during coal self-heating. *Fuel* 21, 352-358.

Banerjee, S.C., 1985. Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires. A. A. Balkema, Rotterdam, 165 p.

Baris, K., 2010. Farklı Kömürleşme Derecesine Sahip Kömürlerde Düşük Sıcaklık Oksidasyonu. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 215 s.

Baris, K., Kizgut, S., Didari, V., 2012. Low-temperature oxidation of some Turkish coals. *Fuel* 93, 423-432.

Beamish, B., Beamish, R., 2010. Benchmarking moist coal adiabatic oven testing, Underground Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia.

Beamish, B.B., Barakat, M.A., George, J.D.S., 2000. Adiabatic testing procedures for determining self-heating propensity of coal and sample ageing. *Thermochimica Acta* 362, 1-2, 79-87.

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, 423-427.

Berkowitz, N., 1979. An Introduction to Coal Technology. Academic Press Inc., New York, 335 p.

Brady, D., 2008. The role of gas monitoring in the prevention and treatment of mine fires, Coal Operators' Conference. The AusIMM Illawara Branch, Wollongong, AU, pp. 202-208.

Brake, D.J., 2013. Mine Ventilation - A Practitioner's Manual. Mine Ventilation Australia, Brisbane, 725 p.

Cakir, A., Baris, K., 2009. Assessment of an underground coal mine fire: A case study from Zonguldak, Turkey, Coal Operators' Conference. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Wollongong, Australia, pp. 259-270.

Carpenter, D.L., Giddings, D.G., 1964. The initial stages of the oxidation of coal with molecular oxygen. I. Effect of time, temperature and coal rank on rate of oxygen consumption. *Fuel* 43, 247-266.

Cheng, J., Wu, Y., Dong, Z., Zhang, R., Wang, W., Wei, G., Chu, T., Yu, Z., Qin, Y., Liu, G., Li, H., 2021. A novel inorganic retarding gel for preventing coal spontaneous combustion. *Case Studies in Thermal Engineering* 28, 101648.

Clemens, A.H., Matheson, T.W., 1996. The role of moisture in the self-heating of low-rank coals. *Fuel* 75, 891-895.

Clemens, A.H., Matheson, T.W., Rogers, D.E., 1991. Low temperature oxidation studies of dried New Zealand coals. *Fuel* 70, 215-221.

Cliff, D., Brady, D., Watkinson, M., 2015. The Green Book - Spontaneous Combustion in Australian Coal Mines. ACARP, Australia, 352 pp.

Cliff, D., Rowlands, D., Sleeman, J., 1996. Spontaneous Combustion in Australian Underground Coal Mines. SIMTARS.

Coal Mining Safety and Health Regulation, 2017. Subordinate Legislation 2017, No.165, Queensland, AU.

Coward, H.F., 1957. Research on Spontaneous Combustion of Coal in Mines - A review, Research Report 142. Safety in Mines Research Establishment, Great Britain.

ÇSGB, 2015. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği (29291 No'lu Resmi Gazete). Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.

Danish, E., Onder, M., 2020. Application of fuzzy logic for predicting of mine fire in underground coal mine. *Safety and Health at Work* 11, 322-334.

Davidi, S., Grossman, S.L., Cohen, H., 1995. Organic volatiles emissions accompanying the low-temperature atmospheric storage of bituminous coals. *Fuel* 74, 9, 1357-1362.

Didari, V., 2015. Kömürün Kendiliğinden Yanmasının Yatkınlığının Araştırılması ve Panoların Risk Sınıflaması (yayımlanmamış). 32 s.

Ding, C., Li, Z., Wang, J., Duanmu, P., Lu, B., Gao, D., 2022. Experimental research on the spontaneous combustion of coal with different metamorphic degrees induced by pyrite and its oxidation products. *Fuel* 318, 123642.

Fan, Y.J., Zhao, Y.y., Hu, X.M., Wu, M.Y., Xue, D., 2020. A novel fire prevention and control plastogel to inhibit spontaneous Combustion of coal: Its characteristics and engineering applications. *Fuel* 263, March 2020, 116693.

Feng, K.K., Chakravorty, R.N., Cochrane, T.S., 1973. Spontaneous combustion - a coal mining hazard. *Canadian Institute of Mining Bulletin*, October, 75-84.

Fidjestøl, P., Lewis, R., 1998. Microsilica as an Addition, in: Hewlett, P.C. (Ed.), *LEA's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, pp. 679-712.

Gangopadhyay, P.K., 2007. Application of remote sensing in coal-fire studies and coal-fire-related emissions. The Geological Society of America Reviews in Engineering Geology 18, 239-248.

Gillies, A.D.S., Wu, H.W., 2007. Inertisation and Mine Fire Simulation Testing Using Computer Software. Australian Coal Association Research Program, C14205, 215 p.

Gouws, M.J., Wade, L., 1989. The self-heating liability of coal: Predictions based on composite indices. Mining Science and Technology 9, 81-85.

Griffin, K.R., Luxbacher, K.D., Schafrik, D.J., Karmis, M.E., 2012. Comprehensive ventilationsimulation of atmospheric monitoring sensors in underground coal mines, 14th U.S. North American Mine Ventilation Symposium, 17-20 June, Salt Lake City, UT.

Güney, M., 1968. Oxidation and spontaneous combustion of coal - Review of Individual factors. Colliery Guardian 216, 137-143.

Ham, B., 2005. A review of spontaneous combustion incidents, Coal Operators' Conference, University of Wollongong, Wollongong, NSW, pp. 237-242.

Hartmann, L.H., Mutmanský, J.M., Ramani, R.V., Wang, Y.J., 1997. Mine Ventilation and Air Conditioning, 3rd Edition ed. John Wiley & Sons, New York, 730 p.

Hu, H.X., Du, L., Xing, Y.F., Li, X.C., 2017. Detailed study on self- and multicomponent diffusion of CO₂ - CH₄ gas mixture in coal by molecular simulation. Fuel 187, 220-228.

Humphreys, D., Rowlands, D., Cudmore, J.F., 1981. Spontaneous combustion of some Queensland coals, Ignitions, Explosions and Fires in Coal Mines Symposium. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Illawara Branch, pp. 5-1-5-19.

IME, 1985. Sealing-off fires underground. Institution of Mine engineers Memo, 1-47.

Jakab, E., Yun, Y., Meuzelaar, H.L.C., 1989. Effects of Weathering on the molecular structure of coal, in: Nelson, C.R. (Ed.), Chemistry of Coal Weathering. Elsevier, Amsterdam, pp. 627-626.

Jones, J.E., Trickett, J.C., 1954. Some observations on the examination of gases resulting from explosion in collieries. Trans. Inst. Min. Engrs 114, 768-790.

Justin, T.R., Kim, A.G., 1988. Mine Fire Diagnostics to Locate and Monitor Abandoned Mine Fires, Mine Drainage and Surface Mine Reclamation, Pittsburg, pp. 348-355.

Kelemen, S.R., Freund, H., 1990. Oxidation kinetics of Wyoming Powder River Basin coal in O₂ between 295 and 398 K. Energy Fuels 4, 165-171.

Kock, F.J., 1983. Fire Fighting with nitrogen in the German coal mining industry. Revue de L'Institute D'hygiene Des Mines 38, 2, 160-165.

Koenning, T.H., 1989. Spontaneous combustion in coal mines, 4th U.S. Mine Ventilation Symposium, June 5-7, Berkeley, California, 75-81.

Krishnaswamy, S.K., Gunn, R.D., Agarwal, P.K., 1996. Low-temperature oxidation of coal. 1. A single-particle reaction-diffusion model. Fuel 75, 333-343.

Krzystolik, P., 1991. Advantages/disadvantages of bleeder systems, AMC Coal Convention. AMC, Pittsburgh, PA, pp. 155-195.

Kumar, A., Kumar, H., Pandey, V.N., Singh, D.K.P., Chauha, S.K., 2012. Gas monitoring and power cut-off system for underground mines, 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 18-20 July, Singapore.

Li, J.H., Li, Z.H., Yang, Y.L., Duan, Y.J., Xu, J., Gao, R.T., 2019. Examination of CO, CO₂ and active sites formation during isothermal pyrolysis of coal at low temperatures. Energy 185, 28-38.

Litton, C.D., 1986. Gas Equilibrium in Sealed Coal Mines. U.S. Bureau of Mines, RI 9031, 13 pp.

Mahadevan, V., Rumlu, M.A., 1985. Fire risk rating of coal mines due to spontaneous heating. Journal of Mines, Metals and Fuels 33, 357-362.

McPherson, M.J., 1984. Mine ventilation planning in the 1980s. International journal of Mining Engineering 2, 185-227.

McPherson, M.J., 1993. Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. Chapman & Hall, United Kingdom, 930 p.

MDG-1006, 2011. Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline. Mine Safety Operations Branch of Industry and Investment NSW, 112 p.

Miron, Y., Smith, A.C., Lazzara, C.P., 1990. Sealed Flask for Evaluating the Self-heating tendencies of coals, RI 9330. US Bureau of Mines.

Mitchell, D.W., 1990. Spontaneous Combustion, in Mine Fires. Maclean Hunter Publ. Co., pp. 27-38.

Morris, R., Atkinson, T., 1987. The science and art of sealing a mine fire. Mining Science and Technology 5, 221-246.

MSA, 2007. Gas Detection Handbook. Mine Safety Appliances Company (MSA), 5th Edition, Pittsburgh, PA.

MSHA, 2008. Sealing of abandoned areas; Final rule, U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration, <http://arlweb.msha.gov/REGS/FEDREG/FINAL/2008finl/08-1152.asp> (erişim tarihi 19 Temmuz 2022)

- Mucho, T.P., Houlison, I.R., Smith, A.C., Trevits, M.A., 2005. Coal mine inertisation by remote application, National Coal Show, June 7-9, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 7-9.
- Mukherjee, S.K., Singh, P.K., Bhattacharjee, B., 1988. Critical analysis of some occurrences of underground fire in Raniganj Coalfield. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, September, 428-433.
- Munson, B.R., Young, D.E., Okisishi, T.H., 2018. *Fundamentals of Fluid Mechanics 8th Edition* ed. Reynolds John Wiley & Sons, New York, 816 p.
- NIOSH, 2022. Nitrogen dioxide, <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0454.html> (Ağustos 2022 tarihinde ulaşıldı)
- Parr, S.W., Kressman, W., 1911. The spontaneous combustion of coal. *Industrial and Engineering Chemistry*, 17, 151-158.
- Parr, S.W., Milner, R.T., 1924. The oxidation of coal at storage temperatures. *Industrial and Engineering Chemistry* 17, 2, 118-120.
- Ponec, V., Knor, Z., Čern, S., 1974. *Adsorption on solids*. Butterworths, London, 693 pp.
- Qiao, J., Hu, X.M., Liang, T.T., Zhang, Q., Wang, W., Zhao, Y.Y., Ju, S., Tian, F.C., 2022. Preparation and characterization of PVA-H18 gel foam for preventing spontaneous combustion of coal based on interfacial self-assembly. *Fuel* 327, November 2022, 12581.
- Ryan, L., Watkinson, M., 2018. Potential tube bundle improvements, 18th Coal Operators' Conference, Wollongong, Au, pp. 294-299.
- Schmal, D., 1989. Spontaneous heating of stored coal, in: Nelson, C.R. (Ed.), *Chemistry of Coal Weathering*. Elsevier, Amsterdam, pp. 133-215.
- Sevenster, P.G., 1961. Studies on the interaction of oxygen with coal in the temperature range 0° to 90°C. *Fuel* 40, 7-17.
- Shinn, J.H., 1984. From coal to single-stage and two-stage products: a reactive model of coal structure. *Fuel* 63, 1187-1196.
- Singh, R.N., Demirebilek, S., Turney, M., 1984. Application of spontaneous combustion risk index to mine planning, safe storage and shipment of coal. *Journal of Mines, Metals and Fuels* July, 347-356.
- Singh, R.V.K., 2013. Spontaneous heating and fire in coal mines. *Procedia Engineering* 62, 78-90.
- Smith, A.C., Lazzara, C.P., 1987. *Spontaneous Combustion Studies of US Coals*, RI 9079. US Bureau of Mines.
- Smith, A.C., Miron, Y., Lazzara, C.P., 1991. *Large-scale Studies of Spontaneous Combustion of Coal*, RI 9346. US Bureau of Mines.
- Stach, E., Mackowsky, M.T.H., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., Teichmüller, R., 1975. *Stach's Textbook of Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 428 p.
- Strang, J., MacKenzie-Wood, P., 1985. *A Manual on Mines Rescue, Safety and Gas Detection*. Kiama, Weston, 366 pp.
- Tang, Z., Xu, G., Yang, S., Deng, J., Xu, Q., Chang, P., 2021. Fire-retardant foam designed to control the spontaneous combustion and the fire of coal: Flame retardant and extinguishing properties. *Powder Technology* 384, May 2021, 25-266.
- Timko, R.J., Derick, R.L., 2006. Methods to determine the status of mine atmospheres- An overview. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa* 59, 2, 1-9.
- Tripathi, D.D., Sen, S.K., 1996. Prediction of fire Status - A new approach to an old problem. *Coal International* 244, 3, 118-121.
- Wang, C., Lv, C., Bai, Z., Deng, J., Kang, F., Xiao, Y., Shu, C.M., 2021. Synergistic acceleration effect of coal spontaneous combustion caused by moisture and associated pyrite. *Fuel* 34, 121458.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M., 2003a. Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 487-513.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M., 2003b. Pathways for production of CO₂ and CO in low-temperature oxidation of coal. *Energy Fuels* 17, 150-158.
- Wei, D., Du, C., Lei, B., Lin, Y., 2020. Prediction and prevention of spontaneous combustion of coal from goafs in workplace: A case study. *Case Studies in Thermal Engineering* 21, 100668.
- Winmill, T.F., 1913/14. The absorption of oxygen by coal. *Trans. Inst. Min. Engrs*, 46, 563-591.
- Winmill, T.F., 1914/15. The absorption of oxygen by coal. II. The quantity of oxygen absorbed. *Trans. Inst. Min. Engrs*, 48, 503-507.
- Winmill, T.F., 1916a. Atmospheric oxidation of iron pyrites. *Trans. Inst. Min. Engrs*, 51, 500-507.
- Winmill, T.F., 1916b. Absorption of oxygen by coal. *Trans. Inst. Min. Engrs*, 51, 493-499.
- Yan, B., Hu, X., Zhao, Y., Yu, M., Feng, Y., He, Z., Qi, G., Ren, Q., Liang, Y., Wang, W., Qiao, J., Zhang, Q., 2022. Research and development of a sodium alginate/calcium ion gel based on in situ cross linked double-network for controlling spontaneous combustion of coal. *Fuel* 322, 124260.

Yang, F., Lai, Y., Song, Y., 2019. Determination of the influence of pyrite on coal spontaneous combustion by thermodynamics analysis. *Process Safety and Environmental Protection* 129, 163-167.

Yu, G., Shi, Y., Wang, Z., Li, S., Tang, Y., 2012. Application of preventive grouting technology in fire prevention and extinguishment in close coal seams. *Journal of Coal Mine Safety* 43, 8, 145-147.

Yuan, B., 2018. Control technique of spontaneous combustion in fully mechanized stope during period of end caving under complex mining influence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 108, 3.

Zipf, R.K., Sapko, M., Brüne, J., 2007. Explosion Pressure Design Criteria for New Seals in U.S. Coal Mines. NIOSH, IC9500, 76 pp.





Bu proje Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti tarafından finanse edilmektedir.

MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIğI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA TEKNİK REHBERLER

2023

www.isginfo.org

İSG.info

