



Contents lists available at *Dergipark*

Journal of Scientific Reports-C

journal homepage: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jsrc>



E-ISSN: 2717-8633

Sayı(Number) 10, Ağustos(August) 2025

DERLEME MAKALESİ/ REVIEW ARTICLE

Geliş Tarihi (Receive Date): 31.05.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.08.2025

Kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanma ile mücadele yönetimi

Muhammet ÇAM^{a*}, Önder UYSAL^b

^a*Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, 43100, Türkiye, ORCID 0009-0000-7097-188X.*

^b*Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, 43100, Türkiye, ORCID 0000-0002-3640-3341*

Öz

Kalın kömür damarları madencilik açısından yüksek rezerv ve ekonomik avantajlar sağlamakla birlikte, kendiliğinden yanma riski nedeniyle ciddi güvenlik ve üretim sorunları barındırmaktadır. Kömürün düşük sıcaklıklarda oksidasyonu, oksijen teması ve ısının uzaklaştırılmaması sonucu birikerek yangın riskini artırmaktadır. Bu süreç; kömürün gözenek yapısı, nem oranı, pirit içeriği, jeolojik özellikler, havalandırma koşulları ve atmosferik faktörlerden etkilenmektedir. Riskin azaltılması için havalandırma sistemleri, gaz izleme merkezleri, kül enjeksiyonu, fenolik köpük ve beton kaplama, azot gazı uygulamaları gibi önleyici yöntemler kullanılmaktadır. Kendiliğinden yanma meydana geldiğinde ise erken tespit kritik olup, oksijenin kesilmesi, soğutma uygulamaları, azot gaz enjeksiyonu ve izolasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Bu stratejilerin bütüncül şekilde entegrasyonu, iş güvenliğini artırmakta, ekonomik kayıpları azaltmakta ve madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliğine katkı sunmaktadır.

© 2025 DPU All rights reserved.

Anahtar Kelimeler: Kalın kömür damarları, kendiliğinden yanma, oksidasyon, havalandırma, gaz izleme, azot enjeksiyonu, kül uygulaması, fenolik köpük, yangın müdahalesi, madencilik güvenliği.

* Corresponding author. Tel.: +90 539 899 14 76

E-mail address: muhammedcam098@gmail.com

Management of combating spontaneous combustion in thick coal seams

Abstract

Thick coal seams provide high reserves and economic advantages in mining; however, they also pose significant safety and production challenges due to the risk of spontaneous combustion. The oxidation of coal at low temperatures, its contact with oxygen, and the inability to dissipate heat lead to accumulation, thereby increasing the risk of fire. This process is influenced by factors such as coal's porosity, moisture content, pyrite content, geological characteristics, ventilation conditions, and atmospheric factors. To reduce the risk, preventive methods such as ventilation systems, gas monitoring centers, ash injection, phenolic foam and concrete coating, and nitrogen gas applications are employed. When spontaneous combustion occurs, early detection is critical, and methods such as oxygen isolation, cooling applications, nitrogen gas injection, and insulation techniques are implemented. The holistic integration of these strategies enhances occupational safety, reduces economic losses, and contributes to the sustainability of mining operations.

© 2025 DPU All rights reserved.

Keywords: Thick coal seams, spontaneous combustion, oxidation, ventilation, gas monitoring, nitrogen injection, ash application, phenolic foam, fire intervention, mining safety.

1. Giriş

Yeraltı kömür damarları, kalın ve ince olmak üzere farklı özelliklerde formasyonlardan oluşmaktadır. İnce damarlar genellikle düşük rezerv kapasitesine sahip olup madencilik faaliyetlerinde daha dikkatli bir kazı süreci gerektirir. Kalın damarlar ise daha büyük kömür rezervleri sunarak madencilik açısından ekonomik yönden verimli alanlar oluşturur. Ancak kalın ve ince kömür damarları jeolojik yapılarına bağlı olarak oksidasyona uğrama eğilimleri farklılık gösterebilmektedir. Özellikle ince damarlar, havayla daha fazla temas ettiğinde kendiliğinden yanma riskini artırabilirken, kalın damarlar iç kısımlarında oksijen sirkülasyonunun kısıtlanması nedeniyle farklı termal tepkimelere yol açabilmektedir. Bu nedenle her kömür damarına uygun önleyici ve müdahale edici yöntemlerin belirlenmesi madencilikte kritik bir öneme sahiptir.

Kömür damarlarının kalın olması, madencilik operasyonları açısından hem avantaj hem de dezavantajlar içermektedir. Kalın kömür damarları ekonomik olarak büyük avantaj sağlasa da üretim sürecine bakıldığında birçok zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklardan biri de kalın kömür damarlarının hazırlık ve üretimi sürecinde kendiliğinden yanma riskinin olmasıdır. Bu durum hem ekonomik kayıplara hem de iş güvenliği açısından ciddi risklere neden olabilmektedir. Ülkemizdeki yeraltı kömür madenciliğinin en büyük problemlerinden bir tanesi olan kendiliğinden yanma sorunu hem iş sağlığı ve güvenliği hem de ekonomik olarak büyük kayıplara neden olabilmektedir. Crossing point temperature deneylerinden elde edilen tutuşma sıcaklıkları, Karadon kömürlerinin nispeten yüksek bir kendiliğinden yanma eğilimine sahip olduğunu göstermiştir [1].

Kömürün kendiliğinden yanma sürecinde iş kazaları yaşanmış ve bunun örnekleri bulunmaktadır. 1992 yılında Kozlu Kömür İşletmesi'nde meydana gelen ocak yangını, yeraltı kömür madenlerinde kömürün kendiliğinden yanması sonucu oluşan ocak yangınlarının ciddi güvenlik riskleri oluşturduğunu bir kez daha açıkça göstermiştir. Göçük alanlarında bırakılan kömür, düşük ısı iletkenliği ve oksidasyon potansiyeli nedeniyle kendiliğinden ısınmış ve ardından tutuşarak büyük bir yangın oluşturmuştur [2].

Bu çalışmada kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanma ile mücadele yöntemleri kısaca ele alınmıştır.

2. Kalın Kömür Damarlarında Kendiliğinden Yanma Mekanizması ve Kimyasal Reaksiyonu

Kalın kömürlerin kendiliğinden yanması, esasen düşük sıcaklıklarda başlayan oksidasyon reaksiyonlarının birikmiş ısıyı artırmasıyla gelişir. Oksidasyon sürecinde en önemli faktör oksijenin varlığıdır. Eksenal baskı sonucu oluşan kırıklar ve çatlaklar, faylar, üretim sonrası arka göçük bölgeleri, ezilmiş baca eksenleri gibi lokasyonel bölgelere oksijen girişi ne kadar fazlaysa oksidasyon başlangıç olasılığı daha fazladır. İlk aşamada kömür yüzeyinde yavaş oksidasyon gerçekleşir. Ortaya çıkan ısı yeterince uzaklaştırılmadığında ortam sıcaklığı yükselir ve bu durum reaksiyon hızını artırarak zincirleme bir etkiye yol açar. Kalın kömür damarlarında bu süreç daha karmaşık işlemektedir Damar kalınlığı, havalandırma koşullarını etkiler ve oksijenin damar boyunca farklı oranlarda dağılmasına neden olur. Bu da farklı bölgelerde farklı sıcaklık artışlarının oluşmasına yol açar. Kömürün düşük sıcaklıklarda oksidasyonu sırasında açığa çıkan ısının ortamdaki uzaklaştırılmaması, kritik sıcaklığa ulaşılmasına ve kendiliğinden yanmanın başlamasına neden olur [3]. Kendiliğinden yanma, dışarıdan bir kıvılcım, alev ya da başka bir ısı kaynağı devreye girmeden, bir maddenin kendi içindeki kimyasal süreçler aracılığıyla alev almasıdır. Bu olgu, temelinde egzotermik, oksidatif reaksiyonlar sayesinde içsel sıcaklık artışının, malzemenin otomatik tutuşma sıcaklığına ulaşmasıyla gerçekleşir. Örneğin saman, kömür, yağlı bezler gibi materyallerde oksijenle gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları yeterince yavaş başladıktan sonra birikerek ortam ısısını artırabilir, bu da zamanla bir termal kaçak sürecini tetikler. Böylece iç ısı dışarı atılamaz ve sıcaklık kritik seviyeye ulaştığında kendiliğinden yanma başlar. Kendiliğinden yanma, yanıcı bir maddenin yavaş bir oksidasyon süreciyle başlaması ve ısının kolayca uzaklaştırılmadığı koşullar altında gelişmesiyle ortaya çıkar. Oksidasyon, kütle içerisindeki sıcaklığı kademeli olarak yükseltir ve sonunda yangının başlamasına neden olur [4].

3. Kalın Kömür Damarlarında Kendiliğinden Yanma Mekanizmasını Etkileyen Faktörler

Kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanmayı etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler genellikle kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri, maden ocağının havalandırma koşulları ve çevresel etmenlerle ilişkilidir. Kendiliğinden yanma mekanizmasını etkileyen faktörler Tablo.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanmayı etkileyen iç ve dış faktörler [5]

İç (endojen) Faktörler		Dış (ekzojen) Faktörler	
Kömürün Özellikleri	Jeolojik Özellikler	Atmosferik Koşullar	Madencilik Faktörleri
Nem içeriği	Damar eğimi	Sıcaklık	Üretim yöntemi
Mineral madde içeriği	Damar kalınlığı	Oksijen derişimi	Tavan koşulları
Petrografik yapısı	Faylar	Nem	Topuk koşulları
Tane boyutu	Derinlik		İlerleme hızı
Mikroorganizmalar	Jeotermik gradyan		Havalandırma basıncı
Pirit içeriği			Taban yolu koşulları
Fiziksel özellikler			Hava kaçakları

Öncelikle kömürün içeriğindeki uçucu madde oranı ve porozitesi, oksijen ile temasını artırarak oksidasyon sürecini hızlandırabilir. Daha gözenekli bir yapı, oksijenin kömür içine daha kolay nüfuz etmesine neden olur ve bu da ısının birikmesine yol açarak kendiliğinden yanma riskini artırır.

Kömürün kendiliğinden yanması, kömür partiküllerinin oksijenle yavaş reaksiyonu sonucu ısının birikmesi ve belirli bir sıcaklığa ulaştığında yanma sürecinin başlaması ile meydana gelmektedir. Bu sürece oksidasyon süreci denilmektedir. Kömürün kendiliğinden yanma olayı, genellikle yeraltı madenciliğinde kalın kömür damarlarında,

düşük oksijen seviyeleri ve yüksek sıcaklıkların etkisiyle hızlanmaktadır [6]. Partikül boyutu ile spontan yanma eğilimi arasında anlamlı bir ilişki yok; risk daha çok gözenek yapısı ve oksijen adsorpsiyon kapasitesine bağlıdır [7].

Kalın kömür damarlarında oksidasyon süreci daha karmaşık ve risklidir. Çünkü kömür hacminin ve yüzeylerinin artması oksidasyon sürecini hızlandırmaktadır. Bu süreci aynı zamanda atmosferik basınç ve kömürün kendi bünyesindeki nem gibi faktörler de etkilemektedir.

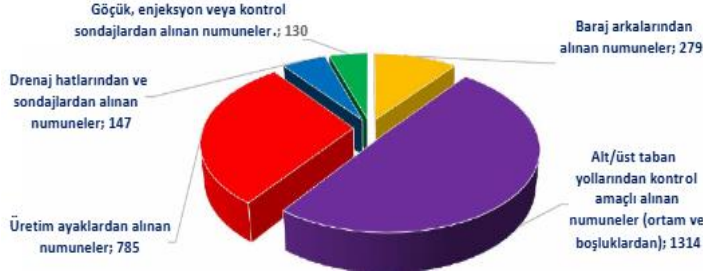
Yeraltı madenlerinde kömür, genellikle nemli ortamlarda bulunur, bu da oksidasyonun daha hızlı gerçekleşmesine neden olur [8]. Kömür bünyesindeki nem oranı, düşük seviyelerde oksidasyonu yavaşlatabilse de belirli bir oranın üzerinde olduğunda ekzotermik reaksiyonlarla ısı açığa çıkarabilir ve kömürün sıcaklığını artırarak kendiliğinden yanmaya zemin hazırlayabilir. Aynı zamanda madende bulunan su drenajının yetersiz olması da oksijenle tepkimeye giren yüzeylerin artmasına ve bu süreçlerin hızlanmasına neden olabilir.

Son olarak, havalandırma koşulları da büyük önem taşır. Yetersiz havalandırma, oksijenin belirli bölgelerde yoğunlaşmasına veya sıcaklığın kontrolsüz bir şekilde artmasına sebep olabilir. Yeterli oksijen sağlayan ancak aşırı hava akışı olmayan bir havalandırma, kömürün oksidasyon sürecini hızlandırabilir. Bunun yanında aşırı hava akımı, kömürün soğumasına neden olarak yanma riskini düşürebilir [9]. Genellikle ezilen galeri yüzeylerinde ve galeri dönüş noktalarındaki kömürler, hava hızına bağlı olarak oksidasyon için oldukça elverişli ortamlar oluşturur. Bu nedenle belirli bölgelerde (örneğin kılçık baca, su ve drenaj cepleri gibi alanlarda) hava hızını düzenlemek ve ortamın hava sirkülasyonu sağlanması amacıyla üfleyici fanlar kullanılarak oksijen akışı kontrollü şekilde sağlanabilmektedir. Böylece, oksidasyonun hızlanması engellenerek yangın riski azaltılmış olur [10].

4. Kalın Kömür Damarlarında Kendiliğinden Yanmaya Karşı Önleyici Yöntemler

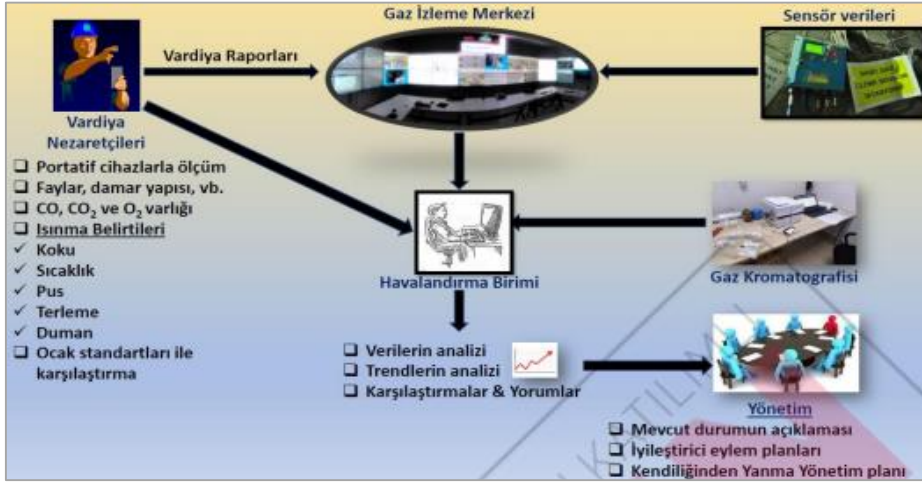
Kömür damarlarında kendiliğinden yanma, özellikle yer altı madencilikinde ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu durum kömürün oksijenle teması sonucu meydana gelen oksidasyon reaksiyonları ve ısınma süreciyle başlamaktadır. Oksijenin kömürle uzun süre temas etmesi, sıcaklık artışına yol açarak kömürün kendiliğinden tutuşmasına neden olabilir. Bu nedenle madencilik faaliyetlerinde kendiliğinden yanmayı önleyici çeşitli yöntemler ve uygulamalar geliştirilmiştir.

Kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanmayı önlemek için alınabilecek başlıca önlemlerden birisi etkili bir havalandırma sistemidir. Etkili bir havalandırma sistemi sonucunda oksijen seviyeleri kontrol altında tutularak kendiliğinden yanma riski azaltılabilmektedir. Bir ocak havalandırılmasında özellikle kesit daralmalarının ve havalandırma kapılarının bulunduğu yerler direnç değişimlerine yol açtığı için çok dikkatli olunmalıdır. Bu yüksek basınç farkları; eski imalatlara, göçüklere, çatlaklara giderek hava kaçışını artırır [11]. Yerüstünde gaz izleme merkezleri aracılığıyla termal sensörler ve gaz ölçüm cihazları ayrıca portatif cihazlar kullanılarak kalın kömür damarlarındaki sıcaklık değişimleri izlenerek takip edilmektedir [12]. Yeraltı (Ek ibare:RG-10/3/2015-29291) kömür ocaklarında kullanılacak ekipman ve tesisatlar ile bu tip madenlerin grizu gazı ve/veya yanıcı tozlar tarafından muhtemel tehlike oluşturabilecek yerüstü tesislerinde kullanılan parçalar 30/12/2006 tarihli ve 26392 4 üncü mükerrer sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Muhtemel Patlayıcı Ortamda Kullanılan Teçhizat ve Koruyucu Sistemler ile İlgili Yönetmelik (94/9/AT)’te belirtilen I. Grup (Değişik ibare:RG-10/3/2015-29291) Teçhizatın uygun kategorisinde olmalıdır [12]. Şekil 1’de gösterildiği gibi Polyak Eynez Kırıncı Yeraltı Linyit İşletmelerinde belirli lokallerden gaz kromatografisi için numuneler alınmaktadır. Alınan bu numunelerin sayısal miktarı ve oransal olarak dağılımı gösterilmiştir. Gaz kromatografisi yöntemi ile analiz edilmektedir. Yapılan analizler, ortamdaki gazların bileşim ve yoğunluklarını ortaya koyarak kömürün kendiliğinden yanma sürecinin hangi aşamada bulunduğunu belirlemeye olanak tanımaktadır. Özellikle oksijen, karbonmonoksit, karbondioksit, metan ve hidrojen gibi gazların oranları üzerinden yapılan değerlendirmeler, oksidasyon hızının artışı ve sıcaklık değişimlerinin izlenmesiyle birlikte kendiliğinden yanma riskinin seviyelendirilmesine imkân sağlamaktadır.



Şekil 1. Kalın kömür damarlarında gaz kromatografisi için numune alınan bölgeler ve sayısal dağılımı [13].

Yapılan bir çalışmada, Zonguldak Sert Kömür Havzası'ndan alınan 26 örnek üzerinde düşük sıcaklık oksidasyon testleri yapıldığı ve bu testlerin oksidasyon sırasında CO konsantrasyon profillerini değerlendirmeyi ve spontan yanma risklerini analiz edilmiş ve 100°C ile 200°C arasındaki sıcaklıklarda CO konsantrasyonunun belirgin şekilde arttığını ve bu sıcaklık aralığında spontan yanma riskinin yüksek olduğunu gösteriyor [14]. Yeraltı kömür işletmelerinin Acil Eylem Planı, Yangından Korunma Planı, Patlamayı Önleme Planı ve Kendiliğinden Yanma Yönetim Prosedürü/planı (Şekil 2.) hazırlanmalı ve süreç bu kapsamda yönetilmelidir [15].



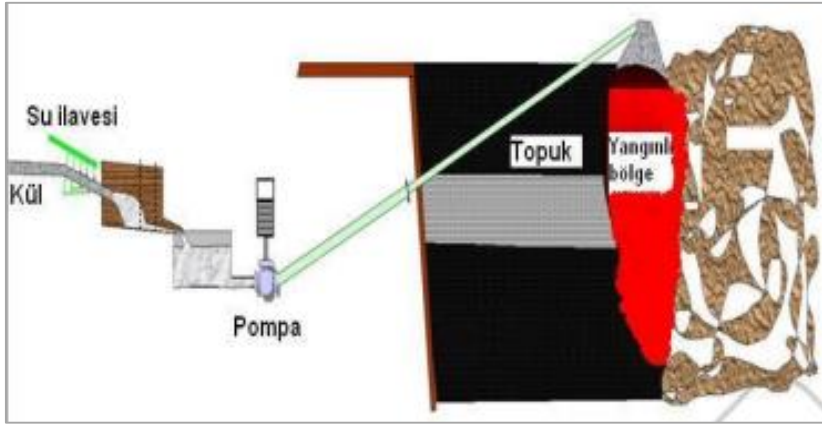
Şekil 2. Örnek bir kendiliğinden yanma yönetim planı [15].

Azot gazı uygulaması, yer altı kömür ocaklarında kendiliğinden yanma riskini azaltan en etkili yöntemlerden biri olarak bilinmektedir. Bu uygulama, özellikle kömür ocaklarında yangın riski taşıyan ortamların kontrol altına alınmasında oldukça etkili olmaktadır. Azot gazı, genellikle yeraltındaki kömür yataklarında oksijenin seviyesini belirli bir oranın altına düşürmek amacıyla kullanılır. Ortamdaki oksijenin azalması, kömürün kendiliğinden tutuşma sıcaklıklarına ulaşmasını zorlaştırır. Böylece sıcaklıkların arttığı ve kömürün tutuşma noktasına yakın olduğu durumlarda, gizli ocak yangınının başlaması engellenmektedir [10]. Özellikle arka göçük bölgelerine azot gazı enjekte edilerek, burada oksijensiz (inert) bir ortam oluşturulur ve kendiliğinden yanma riski büyük ölçüde ortadan kaldırılır. Azot gazı uygulamasının en büyük avantajlarından biri, oksidasyon sürecini tamamen durdurması ve kömür yüzeylerinde yangın oluşumunu engellemesidir. Ancak bu yöntemin dikkat edilmesi gereken bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Azot gazının çalışma ortamına geçiş yapması veya kaçması, ortamdaki oksijen seviyesini düşürerek

için uygulanmaktadır. Özellikle galeri ve rekup yollarında kullanılan bu izolasyon yöntemleri sayesinde, kömür yüzeyleri tamamen kaplanarak oksijenle teması engellenir ve böylece oksidasyon süreci durdurulur. Beton püskürtme ve fenolik köpük uygulamaları, madenlerde uzun süreli bir koruma sağlar ve yangın riskini minimize eder. Fenolik köpük, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve yanmaz bir malzeme olduğu için madenlerde güvenle kullanılabilir. Ayrıca hafif ve uygulanması kolaydır ve kömür yüzeylerine sıkıca yapışarak izolasyon sağlar. Beton püskürtme yöntemi ise daha kalıcı bir izolasyon sağlar ve yangına karşı güçlü bir bariyer görevi görür. Harç enjeksiyonu, düşük maliyetli ve uygulanması kolay çözümler olmakla birlikte, yangın bölgesine eşit dağılması zordur; zira sıvı akışkandır ve çatlaklardan akar [19].

Önleyici yöntemlerden bir diğeri de kül işlemleridir. Bu yöntemde, özellikle kalın kömür damarlarının üretimi sonrası arka göçük bölgelerine kül enjekte edilerek, burada kalan kömürün oksijenle teması kesilir. Kül uygulaması için belli bir spesifik özelliklere sahip termik santral kazan dibi küllerinin yerüstü kül tesisinde su ile karıştırılarak, kül-su karışımı (pulp) şeklinde daha önceden monte edilmiş boru altyapısı ile ayak üretim bölgesinin bulunduğu kısma, arka konveyör gerisine ve tavana delinmiş deliklerden tavan bölgesine ya da kullanılmayan metan drenaj deliklerinden tavan kısımlarına uygulanmasıdır. Su ve kül karışımı ayak gerisinde üretimden kalmış-oksidede olabilecek kömür yüzeyini kapattığından oksidasyonu engellemektedir. Yine, tavana delinmiş deliklere kül uygulaması da, tavanda hem oksidasyonu engellemekte hem de olası boşlukları doldurmaktadır. Bu uygulamada külün geleceği ya da kül suyunun geleceği bölgelerde su drenajı, tahkimatın iyileştirilmesi, vb. konularda önceden önlem alınmaktadır [15].

Örneği Şekil.4'de gösterildiği gibi kül uygulaması genellikle arka göçük bölgelerinde ve madencilik faaliyetleri sonrası bırakılan kömür alanlarında tercih edilmektedir. Bu yöntem hem ekonomik hem de çevre dostu bir çözüm sunduğu için madencilik sektöründe yaygın olarak uygulanmaktadır.



Şekil 4. Damar içinde ulaşılamayan kısımdaki yangına kül ile müdahale [20]

Kömür damarlarında kendiliğinden yanmaya karşı alınan bu önleyici tedbirler, madencilik faaliyetlerinde iş güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Azot gazı uygulaması, beton püskürtme, fenolik köpük ve kül işlemleri gibi yöntemler, kömürün oksijenle temasını engelleyerek oksidasyon sürecini durdurmaya ve yangın riskini minimize etmeye yönelik etkili çözümler sunmaktadır.

Özellikle kalın kömür damarlarında arka göçük bölgelerinde kalan kömür büyük bir yangın riski oluşturduğundan, bu bölgelerde azot gazı kullanımı ve izolasyon işlemleri dikkatli bir şekilde yürütülmelidir. Bunun yanı sıra, kül uygulaması ve fenolik köpük işlemleri gibi yöntemler de ek güvenlik sağlamak için entegre bir şekilde uygulanmalıdır.

Bu önleyici tedbirlerin dikkatli bir şekilde uygulanması hem madencilerin güvenliği hem de yer altı kömür ocaklarının uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

5. Kalın Kömür Damarlarında Kendiliğinden Yanmaya Karşı Müdahale Yöntemleri

Kömür damarı içerisinde ulaşılabilen kısımlarda kendiliğinden yanma meydana gelmesi durumunda, bu durumun çalışma ortamına duman ya da zararlı gazları verecek hale gelmeden önce (bilimsel ölçüm ve gözlemlerle) tespit edilmesi oldukça önemli bir husustur [20].

Sıcaklık arttıkça oksidasyon ve gaz çıkışı hızlanmakta bununla birlikte olayın ileri aşamalarında sorunlar ağırlaşmaktadır. Bu nedenle olayın erken tespiti ve gelişmesini sınırlandırmak için gerekli tedbirlerin alınması önem taşır [21]. Yanma olayının erken tespiti, etkili bir müdahale yöntemi seçiminde ve sürecin emniyeti için oldukça önemlidir. Seçilecek olan müdahale yöntemleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Yanma olaylarının erken tespit edilmesi, yangının kontrol altına alınabilmesi için kritik bir aşamadır. Kömür damarlarındaki kendiliğinden yanmayı engellemek için uygulanabilecek yöntemlerden biri, kömür damarlarının sıcaklık seviyelerinin izlenmesi ve gerektiğinde soğutma işlemleri ile müdahale edilmesidir [23]. Bu süreçte, yanmanın meydana geldiği lokal bölgelere özel delikler açılarak borulama işlemleri gerçekleştirilir. Bu borular aracılığıyla su veya yangın inhibitörleri (one seven, one fire vb.) kullanılarak bölgenin soğutulması sağlanır. Ancak, su kullanımı sonucunda aşırı buhar oluşumu gibi ek riskler ortaya çıkabilir. Özellikle kapalı alanlarda oluşan buhar, görüş mesafesini düşürebilir, sıcaklık artışına neden olabilir ve operasyonların güvenliğini tehdit edebilir. Bu tür riskleri minimize etmek amacıyla, soğutma sürecine su ile birlikte taş tozu gibi yardımcı malzemeler eklenerek ısının daha hızlı emilmesi sağlanabilir. Taş tozu serpmeye işleminde kullanılan taş tozu; "pulverize edilmiş, kireç taşı, dolomit, anhidrit, alçı taşı, kil taşı ve diğer nötr maddelerden oluşan, tamamı - 20 meş ya da en az % 70'i - 200 meş olan, % 5'den fazla yanıcı madde, % 4'den fazla serbest ya da birleşik silika içerme yen, ıslanıp kuruduktan sonra topaklaşmayan toz karışımı" olarak tanımlanmıştır [24].

Tablo 2. Müdahale kapsamında galeri ve ayak bölgelerindeki genel uygulamalar [22].

No	Üretim Ayakları	Galeri	Ayak
1	Azot uygulaması		X
2	Kül uygulaması	X	X
3	Okside olan kömürün kazılarak uzaklaştırılması	X	X
4	Yalıtım köpüğü (fenolik köpük)		X
5	Su ile soğutma yapılması	X	X
6	Yangın söndürme köpüğü uygulaması	X	X
7	Çimento enjeksiyonu uygulaması	X	
8	Püskürtme beton ile yüzey yalıtımı uygulaması	X	
9	Portatif yangın söndürme cihazlarının kullanımı	X	X

Kendiliğinden yanma meydana gelen lokal bölgelerde yangının yayılmasını önlemek ve reaksiyonu durdurmak amacıyla hava akışının yönlendirilmesi veya tamamen kesilmesi gibi stratejiler uygulanabilir. Hava akışının kesilmesi, oksijenin yangın bölgesine ulaşmasını engelleyerek yanma reaksiyonunu sınırlar. Ancak tamamen kesilmesi yerine kontrollü yönlendirme yapılması bazı durumlarda daha etkili olabilir, çünkü ani hava kesintileri yanma dengesini bozarak beklenmedik reaksiyonlara yol açabilir. Eğer yangın kontrol altına alınamaz ve yanma süreci devam ederse, yangının olduğu bölgeyi tamamen izole etmek için kül, beton ve fenolik köpük gibi yalıtım malzemeleri kullanılarak dolgu işlemi yapılır. Bu dolgu malzemeleri, oksijen girişini engelleyerek yanmanın sürdürülebilmesi için gerekli olan hava kaynağını keser. Bununla birlikte, söndürme işleminin hızlandırılması ve güvenliğin artırılması amacıyla yanma bölgesine azot gazı enjekte edilebilir.

Gelişmiş teknolojilerin, özellikle azot enjeksiyonu ve karbondioksit ile dolun yapılması gibi yöntemlerin kullanımı, kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanmanın önlenmesinde önemli ölçüde iyileşme sağlamıştır [25]. Azot gazı, yangının devamlılığını sağlayan oksijenin yerini alarak reaksiyon sürecini durdurur. Ayrıca yangın söndürme sürecini daha etkin hale getirmek için azot gazı, özel kimyasal inhibitörlerle (one seven, one fire vb.) birlikte de uygulanabilir.

Bu yöntem özellikle tam mekanize ayaklarda hava çıkış noktalarında bulunan hassas gaz ölçüm sensörlerinden alınan veriler doğrultusunda yaygın olarak kullanılır.

Sensörlerin sağladığı veriler (CO, CO₂ vb.), göçük bölgelerinde meydana gelen kendiliğinden yanmaları erkenden tespit etmeye olanak tanır ve böylece en uygun müdahale yöntemi belirlenebilir. Sürekli ısı izleme, kontrollü havalandırma ve inert gaz enjeksiyonunun entegrasyonu, kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanma riskini azaltmada en etkili çok aşamalı yaklaşımdır [26]. Arkadan göçertmeli üretim yapılan ayaklarda toz kömürlerin tamamıyla alınmaması nedeniyle, bu bölgelerde oksidasyon süreci hızlanabilir. Bu tür durumlarda, göçük bölgelerine su yardımıyla kül enjekte edilerek kömür tozlu yüzeyler kaplanır ve boşluklar doldurulur. Böylece, kömür tozlarının oksijenle teması kesilerek kendiliğinden yanma sürecinin önüne geçilir.

Yanmanın etkili bir şekilde kontrol altına alınabilmesi için müdahale yöntemleri arasında kapsamlı bir değerlendirme yapılması gerekir. Özellikle ayak topuklarındaki yanıl ve tavan boşlukları, ayak rekuplarındaki kırıklı tarama yüzeyleri ve baskı sonucu oluşabilecek çatlaklar gibi yanma riskinin yüksek olduğu bölgelerin termal ve gaz ölçümlerinin titizlikle yapılması gerekmektedir. Bu ölçümler doğrultusunda, en uygun müdahale yöntemi belirlenerek yangının daha geniş alanlara yayılmasının önüne geçilir.

Diğer bir önemli husus ise kalın kömür damarlarında bulunan üretim ve hazırlık galerilerinde nakliye için kullanılan bantlardan dökülen kömürlerin sürtünme sonucu ısınarak yanmaya neden olabileceğidir. Bu tür durumlarda, yangın çıkan kömür yığını bölgeden uzaklaştırılarak müdahale gerçekleştirilir. Müdahale süreçlerinin birbirleriyle uyumlu olması ve önceden belirlenmiş planlamalara göre uygulanması, yangının hızlı ve etkili bir şekilde kontrol altına alınmasını sağlar. Tüm bu yöntemler, kendiliğinden yanmanın önüne geçmek ve kömür madenciliğinde yangın riskini minimize etmek için entegre bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

6. Sonuç

Kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanma, madencilik sektöründe karşılaşılan en zorlu sorunlardan biridir. Ülkemizde de sıklıkla yeraltı kömür madenciliğinde karşılaşılan bu sorunun takibi ve erken tespiti çok önemlidir. Bu durum yalnızca ekonomik kayıplara yol açmakla kalmaz aynı zamanda iş güvenliğini de ciddi şekilde tehdit eder. Bu risk ancak etkili önleyici tedbirler ve hızlı müdahale yöntemleriyle yönetilebilir. Yapılan çalışmalar ve uygulamalar, havalandırma sistemlerinin optimizasyonu, gaz izleme merkezlerinin kurulması, azot gazı uygulamaları gibi stratejilerin etkinliğini göstermektedir.

Özellikle erken tespit ve doğru müdahale yöntemlerinin uygulanması, yangının yayılmasını önleyerek hem güvenliği hem de üretkenliği artırmaktadır. Önleyici yöntemlerin yanı sıra müdahale aşamasında da doğru tekniklerin kullanılması önemlidir. Kül, beton ve fenolik köpük uygulamaları gibi müdahaleler oksijen temasını azaltarak yangının kontrol altına alınmasında büyük rol oynamaktadır. Ayrıca azot gazı gibi inert gazların kullanımı, yangın söndürme süreçlerinde etkili bir çözüm sunmaktadır. Kalın kömür damarlarında, her durumda farklı koşullara göre esnek bir müdahale yaklaşımı benimsenmeli ve sürekli izleme yapılmalıdır.

Sonuç olarak kalın kömür damarlarında kendiliğinden yanma ile mücadelede bütünsel bir yaklaşım gereklidir. Etkili önlemler ve doğru müdahale yöntemleri ile güvenlik seviyeleri artırılabilir, ekonomik kayıplar en aza indirilebilir ve madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliği sağlanabilir. Bu stratejilerin entegrasyonu, kalın kömür damarlarında yaşanabilecek yangın risklerini minimize ederek daha güvenli ve verimli bir çalışma ortamı yaratılmasına katkı sağlar.

Kaynaklar

- [1] A. Yılmaz, S. Bilen, and M. Rasskazova, "Determination of gas contents and spontaneous combustion liabilities of Zonguldak coals," *Solid Fuel Chem.*, vol. 59, no. 2, pp. 97–103, 2025, doi: 10.3103/S0361521924700617.
- [2] A. Değirmenci, "Kozlu müessesesindeki ocak yangınları ve alınan önlemler," in *Proc. Türkiye 8. Kömür Kongresi*, Zonguldak, Turkey, 1992, pp. 153–164.
- [3] J. Smith, "Mechanisms of coal spontaneous combustion in underground mines," *Min. Saf. Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 110–120, 2003.
- [4] "Spontaneous combustion," *Britannica*, [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/spontaneous-combustion>
- [5] Ö. Ören, "Kütahya bölgesi linyitlerinin kendiliğinden yanmaya yakınlıklarının araştırılması," M.S. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Turkey, 2006.
- [6] M. E. Yılmaz and A. Kaya, "Kömür yangınları ve kendiliğinden yanma olayı," *Maden Müh. Derg.*, vol. 45, no. 3, pp. 255–267, 2019.
- [7] S. Yılmaz, "Prediction of spontaneous combustion liability for imported steam coals," *Energy Sources A, Recovery Util. Environ. Eff.*, vol. 47, no. 1, pp. 12329–12343, 2025, doi: 10.1080/15567036.2025.2512224.
- [8] J. Tian, Z. Li, and G. Wang, "Study on the spontaneous combustion of coal and its prevention in underground mining operations," *J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 312–323, 2016.
- [9] T. Lee and P. Wang, "Ventilation effects on coal oxidation," *Int. Min. Saf. Rev.*, vol. 18, no. 1, pp. 45–58, 2019.
- [10] M. Çam, "Yeraltı kömür madenciliğinde kendiliğinden yanma ile mücadele çalışmalarında azot gazı kullanımı," M.S. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya Dumlupınar Üniv., Kütahya, Turkey, 2025.
- [11] S. İnal and K. Aydıner, "Kömürün kendiliğinden yanması ve etkileyen faktörler," *Bilimsel Madencilik Derg.*, vol. 58, no. 2, pp. 145–165, 2019.
- [12] Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, "Maden işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliği yönetmeliği," *Resmî Gazete*, no. 28770, Sep. 19, 2013, last amended Mar. 10, 2015, no. 29291.
- [13] E. Kahraman and A. Ramazanirend, "Yeraltı madenciliğinde gaz kromatografi kullanımı ve önemi," *ResearchGate*, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/xxxxxxx>
- [14] M. Bilen, "Online CO monitoring during low temperature oxidation of Zonguldak coals," *Solid Fuel Chem.*, 2025. [Online]. Available: <https://acikarsiv.beun.edu.tr/entities/publication/7b710e0c-76e0-4e07-9b95-0cec6c411b40/full>
- [15] E. Kahraman, A. Ramazanirend, E. Küçükali, O. Altıparmakoglu, and A. Fişne, "Polyak Eynez C-02 panosunda kendiliğinden yanmayı önleyici çalışmaların incelenmesi," in *Proc. Türkiye 28. Uluslararası Madencilik Kongresi*, Dec. 2023.
- [16] E. Kuzuluk, "Farklı miktar ve özellikteki kömür yığınlarının kendiliğinden yanma davranışları, önlenmesi ve önceden tespit edilmesine bir örnek: Çayırhan kömür stokları," M.S. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniv., Konya, Turkey, 2014, pp. 5–45.
- [17] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, "Maden işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliği yönetmeliği," *Resmî Gazete*, no. 28770, Sep. 19, 2013.
- [18] Y. Zhang, Y. Gao, D. Sun, F. Zhao, and W. Xu, "Application of nitrogen curtain technology to longwall goaf: A case study in Shajihai coalmine," *Fires*, vol. 6, no. 9, p. 363, 2023, doi: 10.3390/fires6090363.
- [19] X. Liu, Y. Zhang, Z. Wang, Q. Yue, and M. Chen, "Combustion mechanism and control approaches of underground coal fires: A review," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–145, 2023, doi: 10.1007/s40789-023-00581-w.
- [20] E. Kahraman, C. Sığirci, Ş. Tarhan, and F. B. Taşkın, "Çayırhan linyit işletmesi G sahasında ocak yangınları ile mücadele yöntemlerinin incelenmesi," in *Proc. Türkiye 8. Kömür Kongresi*, 2012.
- [21] H. Demirkan, Ed., "Kömürün kendiliğinden yanma olgusu," Zonguldak/Ankara: MASİS Yayınları, 2023.
- [22] E. Kahraman, "Yeraltı kömür madenciliğinde yangınlarla mücadele çalışmaları," in *Proc. Uluslararası Katılımlı Yangın Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, Turkey, 2024.
- [23] H. Öztürk, "Kömür damarlarındaki kendiliğinden yanma ve müdahale teknikleri," *Müh. Teknik Derg.*, vol. 55, no. 6, pp. 198–212, 2020.
- [24] T. Güyagüler, *Kömür tozu patlamalarında taş tozu barajları*. Ankara: ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, 1977.
- [25] X. Liu and W. Zhang, "Technology for prevention of spontaneous combustion in thick coal seams," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 187–195, 2020.
- [26] L. Zhang and Y. Li, "Prevention strategies for spontaneous combustion in thick coal seams," *Int. J. Coal Geol.*, vol. 194, pp. 45–53, 2018.