



Linyit ve Taşkömürü Tozlarının Yanabilirlik ve Patlayabilirlik Açısından Değerlendirilmesi

Characterization of Lignite and Hardcoal Dusts in Terms of Flammability and Explosibility

Emre Günay*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, biri yeraltı taşkömürü biri yeraltı linyit ocağında üretim esnasında oluşan havada asılı kalabilen ve patlamaya neden olabilecek kömür tozlarının (float dust) miktarları belirlenmiştir. Ayrıca, yeraltından alınan kömür örneklerinin kısa analizleri yapılmış, hazırlanan kömür tozlarının Hartmann aparatı kullanılarak patlayabilir nitelikte olup olmadıkları ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlikleri incelenmiştir. Yeraltında yapılan ölçümler sonucunda, linyit ocağında bir vardiyada oluşan havada asılı toz yoğunluklarının 14.36 mg/m³ ile 72.23 mg/m³ arasında ve ton başına oluşan havada asılı toz miktarlarının ise 9977 mg ile 26717 mg arasında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yeraltı taşkömürü ocağında yapılan ölçümlerde havada asılı toz yoğunluklarının 81.64 mg/m³ ile 269.80 mg/m³ arasında değiştiği ve ton başına havada asılı toz miktarlarının ise 79024 mg ile 278960 mg olduğu tespit edilmiştir. Hartmann aparatı ile yapılan deneyler sonucunda hem linyit hem de taşkömürü tozlarının patlayabilir nitelikte olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, kömür tozu örneklerinin sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik sıcaklıklarının örneklerin kül içeriklerine bağlı olarak 190°C ile 220°C arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular kömür tozuna yönelik olarak ülkemizdeki çalışmaların artırılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Kömür tozu, Kömür tozu patlaması, Tutuşabilirlik, Toz konsantrasyonu

Abstract

In this study, the amount of float dust that can cause coal dust explosion in two underground coal mines (one hardcoal and one lignite). Besides, a proximate analysis has been performed for the samples obtained from underground and using the Hartmann apparatus it was determined whether the coal dust samples prepared were flammable. Smoldering temperatures of the coal dust samples were also found. The measurements performed underground revealed that the amount of float dust in lignite mine was between 14.36 mg/m³ and 72.23 mg/m³ and the amount of coal dust formed per ton of coal produced was between 9977 mg and 2717 mg. For underground hardcoal mine, the amount of float dust in was between 81.64 mg/m³ and 269.80 mg/m³ and the amount of coal dust formed per ton of coal produced was between 79024 mg and 278960 mg. The test performed by Hartmann Apparatus showed that both hardcoal and lignite dusts were flammable. In addition, depending on their ash content, smoldering temperatures of coal dusts were between 185°C and 240°C. The findings obtained from the study revealed that the number of studies on coal dust should be increased in our country.

Keywords: Coal dust, Coal dust explosion, Flammability, Dust concentration

1. Giriş

Madencilik uzun yıllardır dünyada büyük önem verilen ve diğer çalışma alanlarına kıyasla daha fazla emek ve sermaye gerektiren bir endüstri koludur. Ayrıca diğer sektörlerin ihtiyacı olan hammadde ve yan ürünlerin temininde önem taşı-

maktadır. Ancak madencilik faaliyetleri, değerli madenlerin yeraltından çıkarılması, işlenmesi ve piyasaya kazandırılması aşamalarında iş sağlığı ve güvenliği açısından ciddi riskler taşımaktadır. Yeraltı madencilik faaliyetlerinde bu riskler çok daha fazladır. Yeraltında karşılaşılan gazlardan sonra en önemlisi kömür tozlarından kaynaklı olan risklerdir. Kömür tozları yeraltında çalışanlar için ciddi sağlık problemlerine, işgücü kayıplarına ve çalışma alanında verimin düşmesine neden olabilmektedir. Sağlık açısından etkilerinin yanında yeraltı çalışmalarında bir etkenle havalanarak uygun konsantrasyona ulaşan kömür tozları bir ateşleme kaynağıyla

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: emre.gunay@beun.edu.tr

Emre Günay orcid.org/0000-0001-9874-593X



Bu eser "Creative Commons Atıf-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

tutuşması sonucu patlayarak daha tehlikeli ve ölümcül sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca kömür tozları, makine ve teçhizatın üzerinde birikerek kullanım ve ömürleri açısından sorunlara sebep olmakta, hatta makinelerin ısınarak sıcak yüzey oluşturdukları noktalarda tutuşmalara sebep olarak yangın ve patlama gibi büyük sorunlara neden olabilmektedir. Bu sebeple yeraltı çalışmalarında tozla mücadele büyük önem kazanmaktadır.

Kömür tozunun patlayabilirliğinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar 20. yüzyılın başlarında başlamıştır (Hartmann vd. 1997). Bu araştırmalarda temel amaç; kömür tozu patlamalarının anlaşılması, önlenmesi ve kontrol edilmesi çerçevesinde, “kömür tozunun patlayabilirliği”, “minimum patlayabilir toz konsantrasyonu gibi parametrelerinin belirlenmesine yönelik olmuştur. Kömür tozunun patlayabilirliğine yönelik deneysel çalışmalar deneysel ocaklarda yapılan çalışmalar ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar olmak üzere iki grupta incelenebilir.

Kömür tozu patlamalarının mekanizmasının anlaşılması ve özellikle olayda etkili olan faktörlerin anlaşılması için 20. yüzyılın ortalarında çeşitli ülkelerde başlayan deneysel ocaklardaki denemeler, bu yüzyılın sonunda özellikle Amerika Birleşik Devletleri (ABD)’nde yoğunlaşmıştır. Pittsburgh Araştırma Laboratuvarı’na ait deneysel ocakta 1980-2000 yılları arasında yapılan denemeler havada asılı duran toz (Weiss vd. 1989), minimum patlayabilir kömür tozu konsantrasyonu (Weiss vd. 1989, Cashdollar vd. 1987 ve 1992 Greninger vd. 1990) taş tozu gereksinimleri, pulverize kömür ve iri taneli kömür taneciklerinin etkileri (Weiss vd. 1989) konularında önemli temel bilgilere ulaşılmasına ön ayak olmuştur.

Yeraltı kömür madenciliğinde; ayakta üretim çalışmaları esnasında, nakliyat güzergâhlarında, konveyörlerde, silolarda, çalışanların ve iş makinelerinin hareketleriyle toz oluşumu meydana gelmektedir. Kaba ve büyük toz parçacıkları hemen çökelmektedir. Fakat ince kömür parçacıkları havada asılı olarak kalabilmekte ve yeraltında havalandırma sisteminin etkisiyle daha uzun mesafelere taşınabilmektedir. Bu şekilde hareket eden tozlara “havada asılı toz” denir ve genellikle 200 mesh elekten geçen (<75 µm) kömür parçacıklarından oluşmaktadır (NIOSH 2006). Tozun 5 µm’den büyük olanları solunum yoluyla tutulmakta ve zamanla dışarı atılmaktadır. Solunabilir toz tanımı Tozla Mücadele Yönetmeliği içerisinde “Aerodinamik eşdeğer çapı 0.1–5.0 mikron büyüklüğünde kristal veya amorf yapıda toz ile çapı 3 mikrondan küçük, uzunluğu çapının en az üç katı olan lifsi tozlar” şeklinde ifade edilmiştir ve en tehlikeli toz boyutu

1-2 µm’dir (Didari 1985). Havada asılı olan tozlar patlayıcı ortam oluşturması sebebiyle solunabilir tozlara göre daha tehlikelidir.

Kömür tozunun patlayabilirliğine yönelik olarak laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda çeşitli tip ve ebatlarda birçok ekipman denenmiş olmasına rağmen (Eckhoff 2003) en sık kullanılan iki ekipman Hartmann Aparatı ve 20 L küredir. Hartmann aparatı, kömürün patlayabilirliği için ilk olarak kullanılmaya başlanmış ve 1980 öncesi dönemde bu alet kullanılarak büyük miktarda veri üretilmiştir (Lees 1996 ve 2005). Bir Hartmann aparatı; tozun hava ile içine püskürtüldüğü 1.2 L hacmindeki düşey bir tüpten oluşmaktadır. Bu tüpe bağlı ısıtılmış bir tel ya da kıvılcım üretici bir ateşleme kaynağı olarak görev almaktadır. Aparatta kömür tozu tane boyutu, minimum toz konsantrasyonu, ateşleme enerjisi, sıcaklık gibi parametrelere bağlı olarak alev ilerlemesi izlenmektedir. Aparat üzerine bir basınç dönüştürücüsü bağlanarak kömür tozunun patlamasından kaynaklanan maksimum basınç ve zamana bağlı maksimum basınç artışını $[(dP/dt)_{max}]$ da ölçmek mümkün olabilmektedir. Hartmann aparatı ve türevleri geçmişte yaygın olarak kullanılsa da sonradan bu aparatın toz dağılması ve türbülans için düzenli koşullar yaratmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca, aparatın yapısından kaynaklı olarak bir “duvar etkisi” meydana geldiği ve alevin ilk genişlemeden geçerken tüp içerisinde yukarı ve aşağı yönde hareket etmekte olduğu tespit edilmiştir (Eckhoff 2003). Bu nedenlerden dolayı bu aparatta daha düşük yanma oranları ve basınç artışları kaydedilmekte ve sonuçta elde edilen basınç artışları daha karmaşık cihazlarda elde edilen değerlerden daha az olmaktadır. Buna bağlı olarak çeşitli araştırmacılar Hartmann aparatında çeşitli değişiklikler yaparak deneyler gerçekleştirmiştir. Hartmann aparatı günümüzde halen tozların yanabilirliğini (yanabilir/yanmaz) test etmek için eleme (screening) amaçlı kullanılmaktadır. Ülkemizde kömür tozu patlamalarıyla ilgili tek bir çalışma yapılmış ve bu çalışma 20 L deney yöntemiyle yapılmıştır. Elbistan, Soma ve Tunçbilek linyit kömürlerini kapsayan çalışmanın sonucuna göre bu yerlere ait kömür tozlarının alt patlayabilirlik sınırı sırasıyla 60, 30, 60 g/m³ çıkmıştır (Ü. Abdullah ve U. Suphi 2017).

Bu çalışmada linyit ve taşkömürü olmak üzere iki kömür türü kullanılarak örneklerin karakterizasyonu ve patlayabilirliğine yönelik olarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, örneklerin kısa analizleri yapılmış, Hartmann aparatı kullanılarak patlayabilirlikleri incelenmiş ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, yeraltında yapılan ölçümlerle örneklerin patlayabilir ortam

oluşturacak toz konsantrasyonları tespit edilmiş ve kazılan ton başına oluşan toz miktarları belirlenmiştir.

2. Gereç ve Yöntem

Çalışmada kullanılan linyit örnekleri dönümlü, göçertmeli tam mekanize katlı uzunayak yöntemiyle çalışan bir yeraltı linyit ocağından temin edilmiştir. Taşkömürü örnekleri ise biri ahşap tahkimatlı klasik uzunayak (A damarı), diğeri ise üretimin patlayıcı madde ile yapıldığı yarı mekanize taban ayak (B damarı) yöntemiyle çalışan iki farklı panodan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan örneklere ait kısa analizler ASTM (D3173-17a, D3174-12, D3175-18) standartlarına uygun şekilde yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar yeraltı ölçümleri ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere iki ana başlıkta incelenecektir.

2.1. Yeraltı Ölçümleri

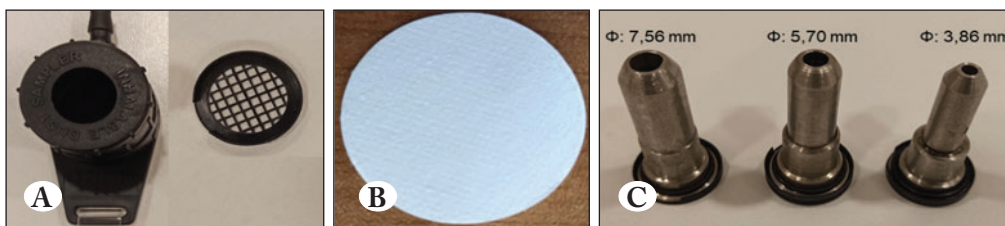
Yeraltında yapılan ölçümlerde havada asılı durabilen ve patlayıcı ortam yaratabilecek tozların (<75 µm) miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yeraltında havada asılı durabilen tozların ölçülebilmesi için geliştirilmiş özel bir cihaz bulunmadığından solunabilir toz ölçümünde kullanılan mevcut gravimetrik cihazlar üzerinde modifikasyonlar yapılmıştır. Bu amaçla çalışmada solunabilir toz ölçümünde kullanılan The Institute of Occupational Medicine (IOM)

örnekleyici başlıklar kullanılmıştır. IOM örnekleyici başlıklara cam mikrofiber membran malzemeden yapılmış, çapı 25mm, gözenek büyüklüğü 1.2 µm olan filtreler yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, ocakta hava hızlarının ocağın farklı kesimlerinde değişken olduğu göz önüne alınarak farklı hava hızlarında yapılacak örnekleme için sağlıklı olabilmesi için IOM örnekleyiciye monte edilen ve çeşitli hava hızlarında (<2 m/sn, 2 m/sn - 4 m/sn, > 4 m/sn) kullanılmak üzere tasarlanmış, farklı çaplarda (Φ: 3.86 mm, 5.70 mm ve 7.56 mm) izokinetik nozüller imal ettirilmiştir (Şekil 1). İzokinetik örnekleme ilk olarak Wilcox (1956) tarafından ortaya atılmıştır. Bu teknik ile örnekleme hızının hava hızına eşit bir hale getirilmesiyle toplanan örneklerin ocak havasındaki konsantrasyonları temsil etmesi sağlanmaktadır. Zira izokinetik örnekleme yapılmazsa ocak kesimindeki hava hızına bağlı olarak toplanan örnekler ya olduğundan fazla ya da olduğundan az olmakta ve hatta havadaki toz boyutlarını temsil edememektedir (Eckhoff 2003).

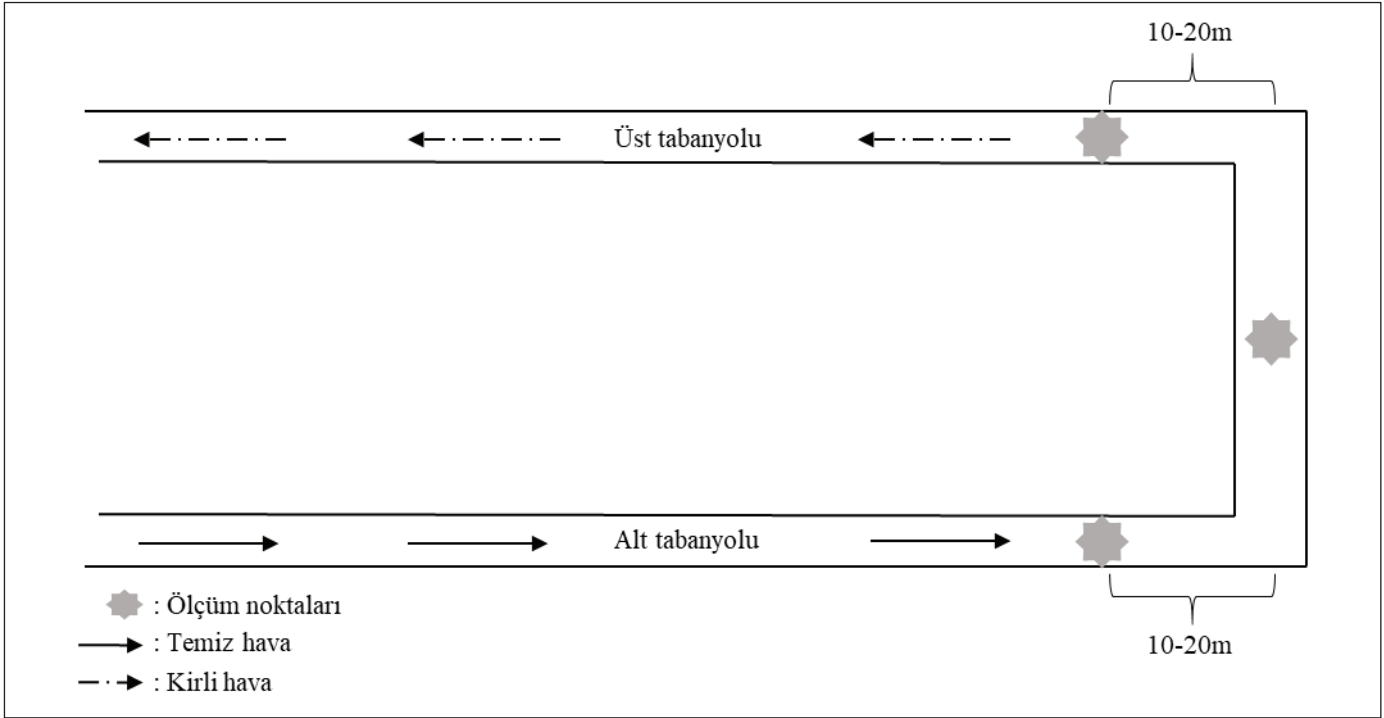
Yeraltında havada asılı duran ancak çökme ve patlayabilir ortam hazırlama potansiyeli olan tozların belirlenmesi için yapılan ölçümler, panoların hava girişleri (alt tabanyolu ve ayaktan yaklaşık 10-20m uzaklıkta), ayak ve hava dönüş yolları (üst tabanyolu ve ayaktan yaklaşık 10-20m uzaklıkta) olmak üzere üç farklı noktada gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

Çizelge 1. Ocaktan alınan kömür örneklerine ait kısa analiz sonuçları (orijinal bazda).

Örnek Yeri		Nem İçeriği (%)	Kül İçeriği (%)	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	
Linyit	Örnek I	II. Kat Ayak	10.60	20.00	21.63	47.77
		I. Kat Ayak	13.80	31.60	28.51	26.09
	Örnek II	II. Kat Ayak	9.00	38.21	26.88	25.91
		I. Kat Ayak	10.50	21.16	28.25	40.09
Taşkömürü	Örnek I	B Damarı	2.78	16.15	28.34	52.73
		A Damarı	2.28	9.66	27.83	60.23
	Örnek II	B Damarı	2.80	19.50	29.62	48.08
		A Damarı	2.10	9.87	28.36	59.67



Şekil 1. Çalışmalarda kullanılan (A) IOM örnekleyici başlık, (B) filtre ve (C) izokinetik nozüller.



Şekil 2. Yeraltındaki ölçüm noktalarının şematik gösterimi.

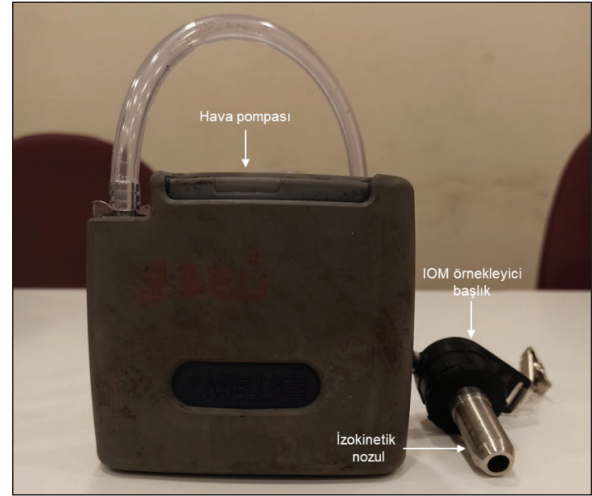
Yeraltında gerçekleştirilen ölçümlerden önce ocak içinde ölçüm yapılacak noktaların özellikleri Çizelge 2'de verilmiş ve belirlenen hava hızlarına uygun olacak şekilde izokinetik nozül seçimi yapılmıştır.

Çizelge 2'den görüleceği üzere linyit ocağının I.kat ve II.katında okunan hava hızlarına göre orta çaplı nozüller seçilmiş, taşkömürü ocağında okunan hava hızlarına göre de küçük çaplı nozüller seçilmiş ve deney setinde kullanılmıştır.

Ölçüm yapılacak noktalarda hava hızlarının tespiti ve uygun izokinetik nozül seçiminin ardından IOM örnekleyicide kullanılacak filtrelerin neminin alınması için filtreler 105°C'de 30 dakika boyunca etüvde bekletilmiş ve desikatöre konularak 15 dakika soğumaları sağlanmıştır. Daha sonra nemi giderilen filtreler ve nozüller IOM örnekleyici başlıklara monte edilerek ölçüm için kullanılacak hava pompalarına (Casella APEX 2 Plus) bağlanmıştır (Şekil 3).

Ölçümlerde kullanılan Casella APEX 2 Plus hava pompaları 1014 mbar basınçta çalışmakta ve azami 5.0 L/dk emiş kapasitesine sahiptir. Çalışma kapsamındaki ölçümlerde kullanılan hava pompaları 2.5 L/dk emişte çalıştırılmıştır.

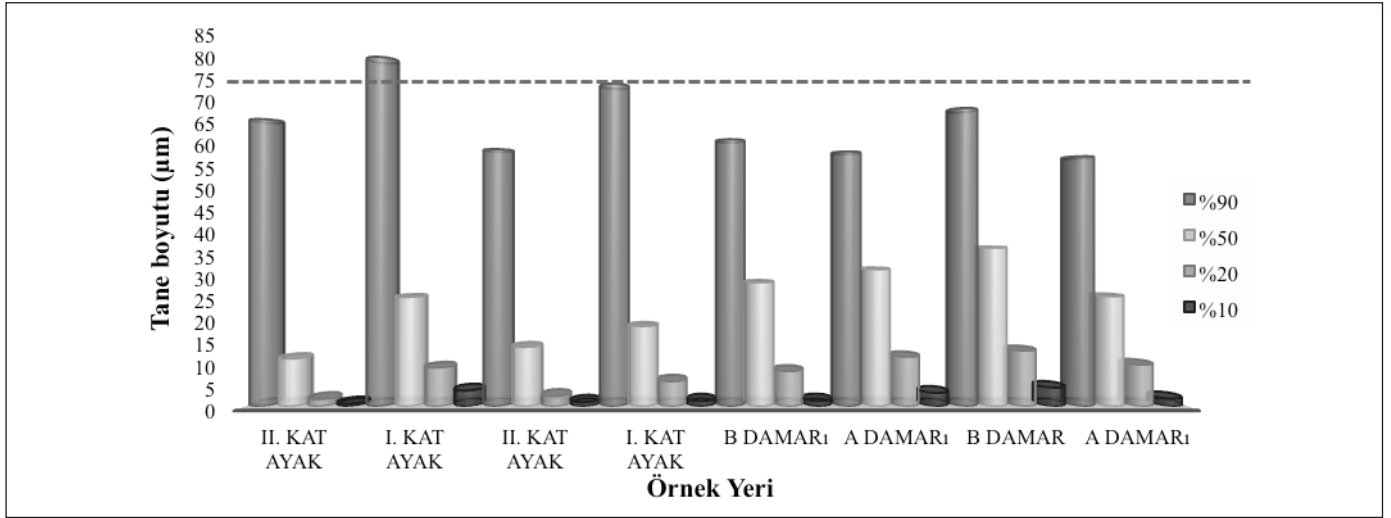
Hazırlanan ölçüm setleri ile üretim vardiyaları sırasında Şekil 2'de şematize edilen noktalarda havanın en yoğun olarak aktığı noktaya kesitin ağırlık merkezine yakın bir şekilde tahkimat ekipmanlarına sabitlenerek asılmış ve ayaklardaki



Şekil 3. Patlayabilir ortam yaratabilecek tozları ölçmek için yeraltında kullanılan set.

Çizelge 2. Toz ölçümü yapılan noktalara ait bilgiler.

Örnek Noktası		Hava Miktarı (m ³ /sn)	Hava Hızı (m/s)	Kesit (m ²)
Linyit	I.Kat	9.8	2.88	3.4
	II.Kat	12.78	3.00	4.26
Taşkömürü	A damarı	4.17	1.1	3.74
	B Damarı	3.67	0.9	4.08



Şekil 4. Örnek hazırlama işlemine tabi tutulan örneklerin tane boyutu analiz sonuçları.

mevcut çalışma koşullarına bağlı olarak 206-351 dakika sürelerle toz örnekleme gerçekleştirilmiştir.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları, kömür tozunun patlayabilirliğini belirlemek için Hartmann aparatında yapılan deneyleri ve ocaklardan temin edilen kömür tozlarının sıcak yüzeylerde tutuşmaya başladığı sıcaklığı (smoldering temperature) belirlemek için gerçekleştirilen deneyleri içermektedir. Bu amaçla, yeraltında ayaklarda alınan kömür örnekleri kırma, öğütme ve eleme işlemlerine tabi tutulmuş ve hazırlanan kömür tozu örneklerinin %90'ının 75 µm'nin altında olduğunu teyit etmek için boyut analizi yapılmıştır (Şekil 4). Örnek hazırlama işlemi sonrasında yapılan boyut analizlerinde linyit kömürü I. Kat ayak örneği hariç tüm örneklerin istenen boyutta olduğu tespit edilmiş, linyit kömürü I. Kat ayak örneği tekrar eleme işlemine tabi tutularak istenilen boyuta gelmesi sağlanmıştır.

2.2.1 Hartmann aparatında gerçekleştirilen deneyler

Çalışma kapsamında ocaktan alınan kömür ve toz örneklerinin patlayabilirliklerinin belirlenebilmesi amacıyla deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere ASTM- E789-95 (2019) standardına uygun şekilde bir "Hartmann Aparatı" imal ettirilmiştir ve kullanılmıştır (Şekil 5). Patlayabilirlik deneylerinde kullanılacak örnekler ilgili standartta belirtildiği üzere, Hartmann aparatının hacmi (0.00123 m³) de dikkate alınarak, 0.123 g, 0.246 g, 0.615 g, 1.23 g ve 2.46 g şeklinde tartılarak gruplanmış, deneyler bu miktarlar temel alınarak gerçekleştirilmiş ve patlamaya yol açan miktarlar tespit edilmiştir. Bu miktarlara karşılık gelen toz miktarları ise 100, 200, 500, 1000 ve 2000 g/m³tür.



Şekil 5. Patlayabilirlik deneylerinde kullanılan Hartmann Aparatı.

Hartmann Aparatında gerçekleştirilen her deneyden önce aparatın bağlantıları hava kaçağı açısından test edilmiştir. Sistemde herhangi bir hava kaçağının olmadığı teyit edildikten sonra önceden hazırlanmış kömür örnekleri apara-

tın besleme bölümüne homojen şekilde yerleştirilmiştir. Bağlantı civataları sıkıldıktan sonra deneyde kullanılacak hava kompresörü çalıştırılarak hava basıncı 8 bar'a (120 psi) ayarlanmıştır. Daha sonra kumanda düğmeleri kullanılarak kömür tozu örnekleri Hartmann Aparatının yanma haznesine verilmiş ve bunu hemen takiben ateşleme kaynağı ateşlenmiş ve kömür tozu örneklerinin patlayıp patlamadıkları gözlenmiştir.

2.2.2 Sıcak yüzeylerde tutuşabilirliğin belirlenmesi

Kömür tozlarının tabaka halinde çalışmakta olan çeşitli ekipman üzerinde birikmesi ve özellikle ekipmanın çalışmasından kaynaklı olarak ısınan kısımlarda birikmesi sonucu kömür tozu tutuşabilmektedir. Herhangi bir etkiyle bu durumdaki toz tabakasının havalanmasıyla yanan toz, havada asılı duran yanabilir özellikte bir toz bulutuyla temas ettiğinde bir toz patlaması yaratabilmektedir. Bu durum ise özellikle yeraltı ocaklarında riski arttırmaktadır.

Kömür tozlarının sıcak yüzeylerde tutuşabilirliğinin belirlenmesi için ASTM E2021-15 (2015)'te tarif edildiği şekilde tasarlanan bir düzenek kullanılmıştır (Şekil 6). Bu düzenek, kimyasallara dayanıklı ve sıcaklığı 0-500°C arasında değişen, ayarlanabilir bir ısıtıcı tabla, ısı iletkenliği yüksek bir metal plaka, 10 cm çapta ve 12.4 mm yükseklikte ısı iletkenliği yüksek metal halka, iki saniyede bir veri kaydeden, 4 girişli bir termometre ve -50/+1100°C arasında çalışan K tipi iki adet termocuftan oluşmaktadır.

Deneyler, %90'ı 75 µm altındaki kömür tozu örneklerinin bir spatula yardımıyla halkadan taşmayacak ve üzeri düz

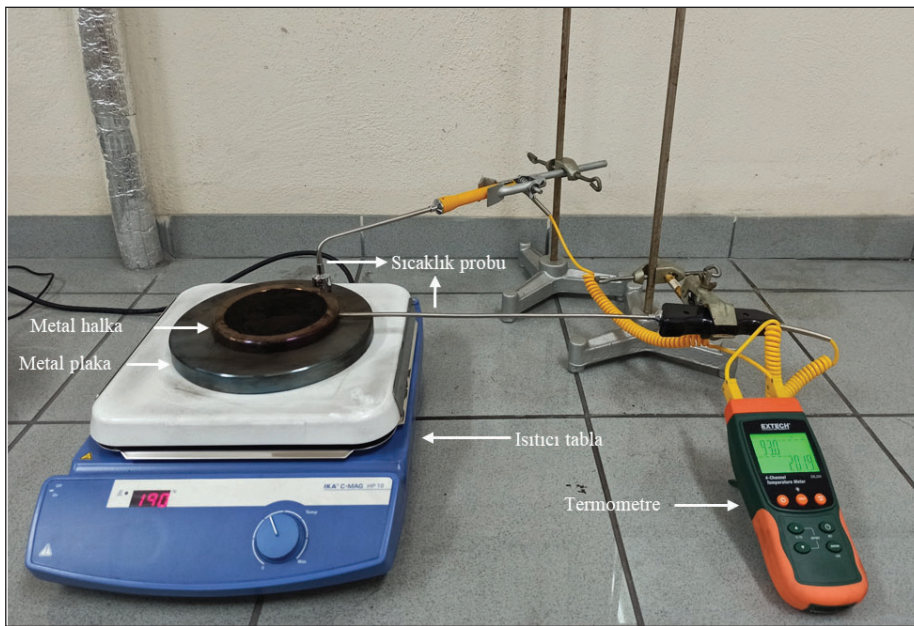
olacak şekilde, ortalama 40-60 g kömür tozu örneklerinin yerleştirilmesiyle başlatılmıştır. İlgili standartta belirtildiği üzere örneklerin deney düzeneğine yerleştirilmesi işlemi iki dakikayı aşmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kömür tozu örnekleri yerleştirildikten sonra hem sıcak yüzeyin hem de kömür tozunun sıcaklığı zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Tutuşabilirlik derecesinin belirlenebilmesi için 10'ar °C'lik sıcaklık artışlarıyla deneyler yapılmış ve tutuşmanın olmadığı sıcaklık bulunana kadar deneylere devam edilmiştir. Deneylere; kömür tozunda herhangi bir kendiliğinden ısınma ya da yanma (korlaşma) işareti görülene kadar devam edilmiştir. Kendiliğinden ısınma, yoğun ve ağır bir duman çıkışı (Şekil 7) ya da kömür tozunun aniden artan sıcaklığıyla anlaşılabilir. Bu işaretlerden herhangi birinin gerçekleşmesiyle deneyler sonlandırılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

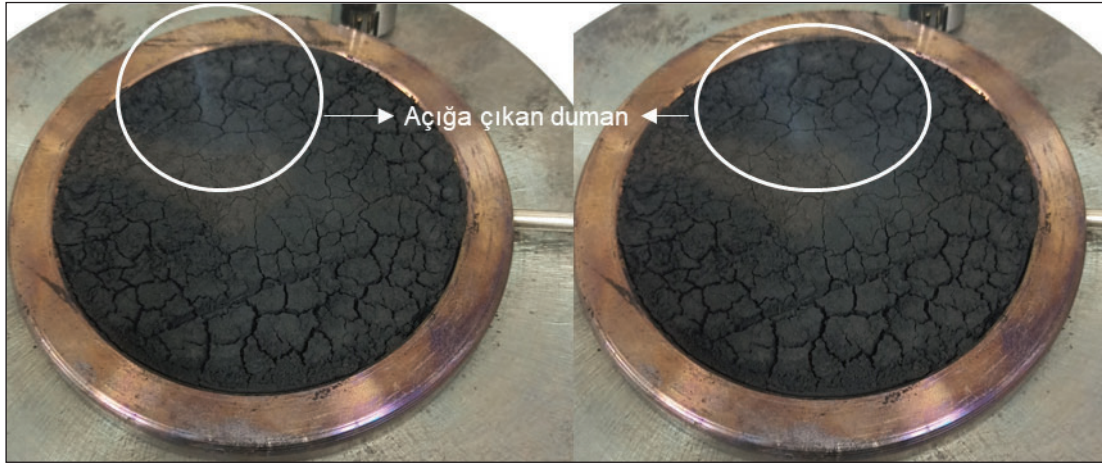
Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar bu bölümde yeraltı çalışmaları ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere ayrı ayrı verilmiştir.

3.1. Yeraltı Çalışmaları

Yeraltında panoların alt taban yolları, ayaklar ve üst taban yollarında üretim vardiyaları sırasında havada asılı duran ancak patlayabilir ortam hazırlama potansiyeli olan tozların miktarlarının belirlenmesi için yapılan ölçümlerin sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Kömür tozlarının sıcak yüzeylerde tutuşabilirliğinin belirlenmesi için hazırlanan deney seti.



Şekil 7. Deney esnasında açığa çıkan duman.

Çizelge 3. Yeraltında yapılan ölçümlerin sonuçları ve hesaplamalar.

Ölçüm Yeri		Filtrede Biriken Toz Miktarı (mg)	Örnekleme Süresi (dk)	Pompadan Geçen Hava Miktarı (m ³ /dk)	Havada Asılı Toz Yoğunluğu (mg/m ³)	Kesitten Geçen Hava Miktarı (m ³ /dk)	Kesitten Geçen Hava Miktarına Göre Biriken Toz Miktarı (g)	Ortalama Üretim (ton)	Havada Asılı Toz Oluşum Miktarı (mg/ton)	
		(A)	(B)	(C)	A/(B*C)	(D)	E=[(D*A)/C]/1000	(F)	(E/F)*1000	
Linyit	I. Kat	Hava Girişi	12.6	351	0.0025	14.36	580	2923.2	293	9977
		Ayak	12.4	330	0.0025	15.03	637	3159.5	275	11489
		Hava Dönüşü	12.0	324	0.0025	14.82	694	3331.2	270	12338
	II. Kat	Hava Girişi	21.3	220	0.0025	38.73	814	6935.3	428	16204
		Ayak	34.9	225	0.0025	62.04	767	10707.3	438	24446
		Hava Dönüşü	37.2	206	0.0025	72.23	720	10713.6	401	26717
Taşkömürü	A Damarı	Hava Girişi	60.4	252	0.0025	95.88	220	5315.2	50	106304
		Ayak	158.5	235	0.0025	269.80	220	13948.0	50	278960
		Hava Dönüşü	44.9	220	0.0025	81.64	220	3951.2	50	79024
	B Damarı	Hava Girişi	94.2	220	0.0025	171.28	250	9420.0	92	102391
		Ayak	112.8	212	0.0025	212.84	250	11280.0	88	128182
		Hava Dönüşü	69.0	205	0.0025	134.64	250	6900.0	85	81176

Çizelge incelendiğinde ölçümlerin gerçekleştirildiği yeraltı linyit ocağında bir vardiyada oluşan havada asılı toz yoğunluklarının 14.36 mg/m^3 ile 72.23 mg/m^3 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca, ton başına oluşan havada asılı toz miktarlarının ise 9977 mg ile 26717 mg arasında olduğu belirlenmiştir. Yeraltı linyit ocağında yapılan ve I. Kat'a ait ölçümlerin belirli bir kısmında kesici yükleyicide oluşan bir sorun nedeniyle üretime ara verilmiştir. Bu nedenle bu örneğe ait ölçümlerde ayakta oluşan toz miktarları II. ayak örneklerine oranla düşük çıkmıştır. Yeraltı taşkömürü ocağında yapılan ölçümlerde ise havada asılı toz yoğunluklarının linyit ocağına oranla daha yüksek olduğu ve toz yoğunluklarının 81.64 mg/m^3 ile 269.80 mg/m^3 arasında değiştiği ve ton başına havada asılı toz miktarlarının ise 79024 mg ile 278960 mg olduğu tespit edilmiştir. Taşkömürü ocağında toz oluşum miktarlarının linyit ocağına göre yüksek çıkmasının önemli bir nedeninin ayaktaki düşük hava hızları olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, örneklerin nem içeriklerinin de bu sonuca etkisi olduğu kanaatine varılmıştır. Örneklerin nem içerikleri incelendiğinde (Çizelge 1) taşkömürü örneklerinin nem içeriklerinin linyit örneklerine göre yaklaşık 5-6 kat düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, linyit ocağında tam mekanize kazı yapılması nedeniyle kesici yükleyici üzerinde bulunan su fisketelerinin kullanılmasının üretim esnasında oluşan tozu bastırmada etkili olmasının da bir diğer etken olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3'den de görüleceği üzere linyit ocağında II. kat ayak, taşkömürü ocağında ise, A ve B damarı ölçümlerinde hava giriş noktasında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçların, hava dönüş noktasında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlardan yüksek çıktığı görülmüştür. Linyit ocağında yeterli miktarda hava hızı olmasına rağmen hava dönüş yolunda ve hava giriş yolunda bulunan kapıların ve ayrıca hava girişte bulunan bant sisteminden dolayı hava girişte yapılan ölçümlerin hava dönüşüne göre yüksek çıktığı düşünülmektedir. Taşkömürü ocağında her iki kömür damarı için de hava hızının düşük olması nedeniyle tozların taşınmadığı ayrıca yarı mekanize taban ayak olarak çalışan B damarında ayakların dilimle ve üçgen şeklinde hava dönüş yollarından dönmesi nedeniyle düşük çıktığı düşünülmektedir.

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

3.2.1 Patlayabilirlik deneyi

Çalışma kapsamında ocaktan alınan kömür ve toz örneklerinin patlayabilirliklerinin belirlenebilmesi için Hartmann Aparatı kullanılmıştır. Daha öncede anlatıldığı gibi Hartmann aparatının hacmi (0.00123 m^3) de dikkate alınarak

0.123 g , 0.246 g , 0.615 g , 1.23 g ve 2.46 g şeklinde tartılarak gruplanmış ve deneyler bu miktarlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu miktarlara karşılık gelen toz miktarları ise sırasıyla 100 , 200 , 500 , 1000 ve 2000 g/m^3 'tür.

Ayaklardan alınan örnekler için orijinal bazda ve nemi giderilmiş olarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deneylere ait sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge incelendiğinde hem linyit ve hem de taşkömürü tozlarının patlayabilir nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Orijinal nemli linyit kömürünün 163.90 g/m^3 ile 182.76 g/m^3 konsantrasyonlarda patlayabilir olduğu görülmüştür. Nemi giderilen örnekler ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda patlama konsantrasyonlarının ortalama %40 oranında azaldığı ve örneklerin 100.98 g/m^3 ile 103.25 g/m^3 konsantrasyonlarında patlayabilir olduğu belirlenmiştir. Linyit ocağı II. kat ayaktan alınan ikinci örneğin patlayabilir olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun örnek alındığı sırada ayakta taş kesimi yapılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alınan örneğe ait kısa analiz sonuçları incelendiğinde bu örneğe ait kül içeriğinin diğer örneklerden neredeyse iki kat fazla olması da bu durumu destekler niteliktedir.

Taşkömürü örneklerine ait sonuçlar incelendiğinde, A ve B damarları arasında ve ayrıca nemli ve nemsiz taşkömürü örneklerinin patlama miktarları arasında çok fazla fark olmadığı belirlenmiştir. Bu örneklerle ait kısa analiz sonuçları incelendiğinde tüm örneklerin nem içeriklerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Hartmann aparatı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda taşkömürü örneklerinin 75.28 g/m^3 ile 83.98 g/m^3 konsantrasyonları arasında patlayabilir nitelikte oldukları tespit edilmiştir.

3.2.2 Sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneyi

Tozların çalışmakta olan ekipmanların sıcak yüzeylerinde birikip tutuşarak hem patlama hem de yanma riski teşkil etmesinden dolayı bu çalışmada ASTM E2021-15 (2015)'te tarif edilen yöntemle tozların sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik alt sınırları incelenmiştir. Ayaktan alınan ve örnek hazırlama işlemleri sonucu $75 \text{ } \mu\text{m}$ nin altında öğütülen kömür tozu örnekleri bir spatula yardımıyla iki dakika içinde metal halkanın içine taşmayacak ve üzeri düz olacak şekilde konulduktan sonra deney başlatılmıştır. Deneye başladıktan sonra hem sıcak yüzeyin hem de kömür tozunun sıcaklığı zama-na bağlı olarak ölçülmüştür. Deneye, kömür tozu üzerinde kendiliğinden ısınma veya korlaşma belirtisi görülene kadar devam edilmiştir. Bu işaretlerden herhangi biri gerçekleştiğinde deneyler sonlandırılmıştır. Tutuşabilirlik derecesinin belirlenebilmesi için $10^{\circ}\text{ar } ^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklıklarda deneyler ya-

pılmış ve tutuşabilirliğin olmadığı sıcaklık bulunana kadar deneylere devam edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler Çizelge 5'te verilmiştir.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığının Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberinde (2010) "Kullanılan aletlerin yüzey sıcaklığı metan ve kömür tozuna göre dizayn edilecektir. Kömür tozu var ise 150 °C yok ise 450 °C olabilmektedir." denmektedir. Sözü edilen rehberde belirtildiği üzere

kömür tozu varlığının olduğu noktalarda çalışacak aletlerin sıcaklıklarının 150°C'yi geçmesi istenmemektedir. Çizelge 5'te verilen sonuçlar incelendiğinde ayaktan alınan kömür örneklerinin sıcak yüzeylerde tutuşma sıcaklıklarının 190-220°C olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler incelendiğinde çalışmalarda kullanılan kömür tozlarının çalışmakta olan aletlerin üzerine biriktiğinde ve aletlerin çalışma esnasında 190°C'ye kadar ısındığında tutuşmaya başlayacağı anlaşılmıştır. İş Teftiş Kurulu Başkanlığının Yeraltı ve Yerüstü

Çizelge 4. Ocaktan alınan kömür örneklerinin patlayabilirlik deney sonuçları.

		Örnek Yeri	Nem (%)	Alt Patlama Sınır Konsantrasyonu (g/lit)	Karşılık Gelen Toz Konsantrasyonu (g/m ³)
Linyit	Ölçüm I	II. Kat Ayak	10.60	0.2016	163.90
			Yok	0.1270	103.25
		I. Kat Ayak	13.80	0.2248	182.76
			Yok	0.1242	100.98
	Ölçüm II	II. Kat Ayak	9.00	--	--
			Yok	--	--
		I. Kat Ayak	10.50	0.2210	179.67
			Yok	0.1259	102.36
Taşkömürü	Ölçüm I	B Damarı	2.78	0.1033	83.98
			Yok	0.0988	80.33
		A Damarı	2.28	0.0959	77.97
			Yok	0.0960	78.05
	Ölçüm II	B Damarı	2.80	0.0951	77.32
			Yok	0.0944	76.75
		A Damarı	2.10	0.0942	76.59
			Yok	0.0926	75.28

Çizelge 5. Toz tabakalarının sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneyi sonuçları.

	Örnek Yeri	Sıcak Yüzeylerde Tutuşabilirlik Sıcaklığı (°C)	Tutuşmaya Başladığı Sıcaklık (°C)
Linyit	Örnek I	II. Kat Ayak	200
		I. Kat Ayak	190
	Örnek II	II. Kat Ayak	240
		I. Kat Ayak	190
Taşkömürü	Örnek I	B Damarı	220
		A Damarı	210
	Örnek II	B Damarı	210
		A Damarı	210

Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberinde belirtilen alt sınır değerine yakın değerler çıkmıştır.

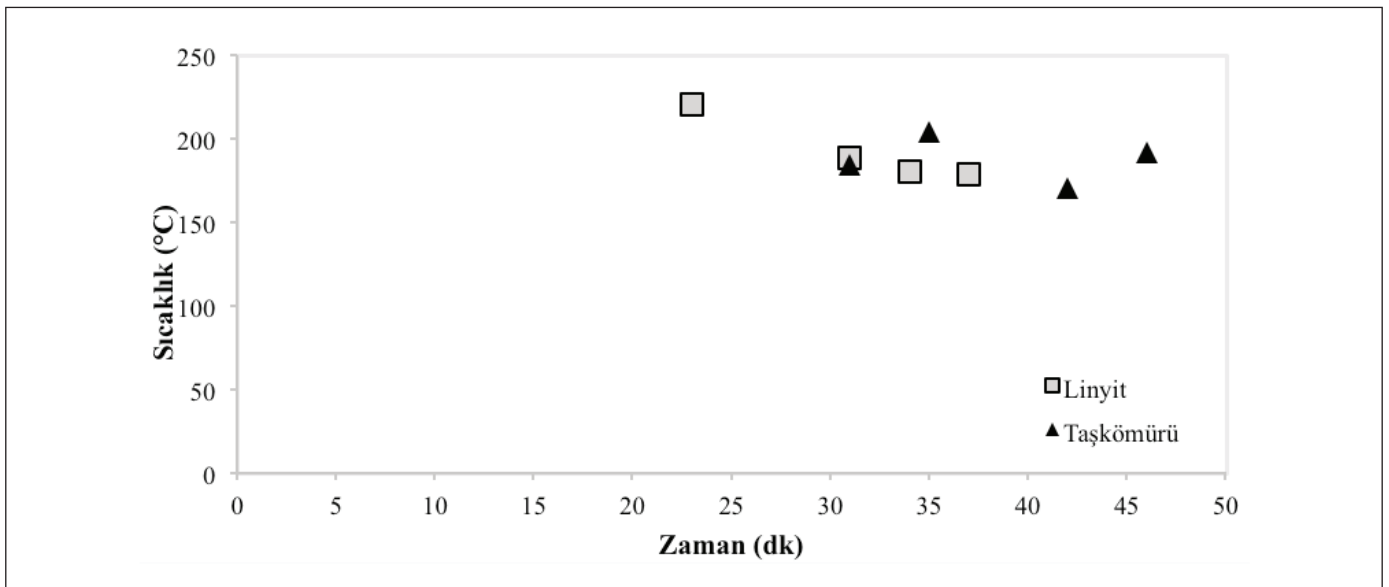
Ayrıca yapılan sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneyleri sırasında, deney başlangıcından kömür tozunun tutuşma anına kadar geçen süreler belirlenmiş ve kömür tozu örneklerinin ne kadar sürede tutuşmaya başladığı incelenmiştir (Şekil 8). Buna göre linyit örneklerinin deney başlangıcından 23-37 dakika sürede tutuşmaya başladığı ve ortalama tutuşma başlangıç sıcaklığının 31.25 dakika olduğu belirlenmiştir. Buna karşın taşkömürü örneklerinin deney başlangıcından 31-46 dakika sürelerde tutuşma işareti gösterdiği ve ortalama tutuşma başlangıç sıcaklığının 38.5 dakika olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, biri linyit ve diğeri taşkömürü ocağı olmak üzere iki farklı yeraltı ocağından elde edilen linyit ve taşkömürü tozlarının patlayabilirlikleri ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, yeraltında yapılan ölçümlerle ocaklarda üretim sırasında oluşan, kömür tozu patlamalarına neden olabilecek boyutları ($<75 \mu\text{m}$) ve havada asılı durabilen kömür tozlarının oluşum miktarları belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuç ve öneriler özet olarak aşağıda sunulmuştur.

- Ölçümler sonucunda her iki ocaktan alınan kömür tozu örneklerinin patlayabilir nitelikte oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle kömür tozlarının iş sağlığı ve güvenliği açısından bir risk teşkil edebileceği söylenebilir.

- Taşkömürü ocağında yapılan havada asılı kalabilen ve patlamaya neden olabilecek nitelikteki toz miktarları linyit ocağındakilere göre oldukça yüksektir. Bunun en önemli nedeninin ayaktaki hava hızlarının düşük olması olduğu düşünülmektedir. Ayaklarda oluşan toz miktarları açısından, linyit ocağında ayaktaki hava hızlarının (I. Kat 2.88 m/s, II. kat 3.0 m/s) yeraltı taşkömürü ocağı ayaklarındaki hava hızlarına göre (klasik ayak 1.1 m/s, yarı mekanize ayak 0.9 m/s) ideal olduğu açıktır. Bu sonuçlar, toz oluşumu açısından hava hızının etkisini bir kez daha ortaya çıkarması açısından önemlidir.
- Çalışmada kullanılan taşkömürü örnekleri linyit örnekleri ile karşılaştırıldığında taşkömürü tozlarına ait patlayabilirlik alt sınırlarının linyit örneklerine göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma özellikle taşkömürü örneklerinin oldukça düşük nem ve kül içeriklerinin neden olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda kömür tozu örneklerinin nemli bir pozisyonda tutulmalarının patlayabilirlik açısından olumlu etki yaptığı söylenebilir.
- Sıcak yüzeylerde tutuşabilirlik deneylerinden elde edilen sonuçlar, her iki ocakta da tozların makine ve teçhizat üzerinde birikerek ısınmasıyla tutuşmaya sebep olacak düzeyde olabileceğini ve bu nedenle bu konuya azami dikkat gösterilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.
- Her iki ocaktan alınan kömür tozu örneklerinin patlamaya veya yangına neden olabilecek nitelikte olması nedeniyle kömür tozlarının oluşumunun ve makine-teçhi-



Şekil 8. Kömür tozlarının tutuşmaya başladıkları zaman ait sıcaklık zaman grafiği.

zat üzerinde birikmesinin engellenmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle yeraltında solunabilir tozla mücadele yöntemlerinin, patlayabilir nitelikteki kömür tozunun oluşumu ve sıcak yüzeylerde tutuşabilirlikle mücadelede etkin rol oynayacağı söylenebilir. Bu amaçla, yeraltında yapılacak olan ilkel temizleme yöntemlerinin bile (faraş, kürek, fırça vb. aletlerle temizleme) etkili olabileceği düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan Hartmann aparatı çeşitli yapısal etkiler nedeniyle günümüzde sadece eleme (screening) amaçlı kullanılmaktadır. Kömür tozu örneklerinin alt patlama sınırlarının ve patlama basınçlarının daha doğru tespiti için 20 L küre ile gerçekleştirilecek deneyler önerilmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında Hartman aparatı ile elde edilen alt patlama sınırları rakamsal olarak değil örneklerin patlayabilir nitelikte olup olmadığını göstermesi açısından değerlendirilmelidir.

Kömür tozu patlamalarının felakete sebep olması nedeniyle dünya madencilik endüstrisinde yeraltı kömür ocaklarında kömür tozlarının karakterizasyonu ve patlayabilirliği konusunda yoğun çalışmalar sürerken ülkemizde bu tür çalışmaların sayısı oldukça azdır. Ülkemizdeki çalışmalar yönetmelikler kapsamında sadece solunabilir toza yönelik durumdadır. Kömür tozu patlamalarının yıkıcı etkileri düşünüldüğünde bu konuya yönelik çalışmaların artırılmasının gerekliliği ortadadır. Buna yönelik olarak endüstri ve üniversite işbirlikleri ile konuya yönelik daha detaylı araştırmalar yapılması gerekmektedir.

5. Teşekkür

Yazar, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi'ne (Proje No: 2019-29011448-01) çalışma kapsamında sağladığı destek için teşekkürlerini sunar.

6. Kaynaklar

- ASTM, 2015.** Standard test method for hot-surface ignition temperature of dust layers, American Standards for Testing Materials, E2021-15.
- ASTM, 2017.** Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke, American Standards for Testing Materials, D3173-17a.
- ASTM, 2018.** Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke, American Standards for Testing Materials, D3174-12.
- ASTM, 2018.** Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke, American Standards for Testing Materials, D3175-18.

- ASTM, 2019.** Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds, American Standard Testing Methods, E1491-06 (Reapproved 2019).
- Cashdollar, K. L., Sapko, M. J., Weiss, E. S., Hertzberg, M. 1987.** Laboratory and mine dust explosion research at the Bureau of Mines, In Industrial dust explosions, STP 958, West Conshocken, PA: American Society for Testing Materials.
- Cashdollar, K. L., Weiss, E. S., Greninger, N. B., Chatrathi, K. 1992.** Laboratory and large-scale dust explosion research. *Plant/Operations Progress*, 11(4): 247-255.
- ÇSGB, 2010.** Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığı, Yayın no: 43, 140s.
- Didari, V. 1985.** Kömür Tozu Patlaması, *Madencilik*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, 24 (4): 23-29.
- Eckhoff, R. K. 2003.** Dust Explosions in the Process Industries, 3rd edition, Gulf Professional Publishing, USA, 2003. ISBN 0-7506-7602-7.
- Greninger, N. B., Cashdollar, K. L., Weiss, E. S., Sapko, M. J. 1990.** Suppression of dust explosions involving fuels of intermediate and high volatile content. In Proceedings of the fourth international colloquium on dust explosions, *Polish Academy of Sciences*, Porabka-Kozubnik, Poland, November 4-9, pp. 208-228.
- Hartman, L. H., Muutmansky, J. M., Ramani, R. V., Wang, Y. J. 1997.** Mine ventilation and air conditioning, 3rd edition, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Lees, F. P. 1996.** Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, 2nd edition, Elsevier, Oxford, UK.
- Lees, F. P. 2005.** Lees' Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control, 3rd edition, Elsevier, Oxford, UK.
- NIOSH, 2006.** Float Coal Dust Explosion Hazards, *Milestones in Mining Safety and Health Technology*, DHSS, Publication No.2006-125.
- Ü. Abdullah ve U. Suphi. 2017.** Investigation of explosibility characteristics of some Turkish lignitecoal dusts, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39 (21): 2039-2045.
- Weiss, E. S., Greninger, N. B., Sapko, M. J. 1989.** Recent dust explosion studies the Lake Lynn experimental mine. In Proceedings of the 23rd international conference of safety in mines research institutes, U.S. Department of Interior, *Bureau of Mines*, Washington, DC, September 11-151, pp. 843-856.
- Wilcox, J. 1956.** Isokinetic flow and sampling. *Journal of The Air Pollution Control Association*, 5:4, 226-245. Doi: 10.1080/00966665.1956.10467715