



Bu proje Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti tarafından finanse edilmektedir.

# MISGEP

MADENCİLİKTE  
İŞ SAĞLIğI ve  
GÜVENLİĞİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

## İSG ALANINDA TEKNİK REHBERLER

### YERALTI MADENCİLİĞİNDE HAVALANDIRMA TASARIMI VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ

2023





**MİSGEP**

MADENCİLİKTE  
İŞ SAĞLIĞI ve  
GÜVENLİĞİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA  
TEKNİK REHBERLER DİZİSİ

CİLT 2:  
YERALTI  
MADENCİLİĞİNDE  
HAVALANDIRMA  
TASARIMI VE  
UYGULAMA  
YÖNTEMLERİ

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





# MiSGEP

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 (MiSGEP)**” tarafından maden işyerlerindeki İSG koşullarının iyileştirilmesi kapsamında “*Yeraltı madenciliğinde havalandırma tasarımı ve uygulama yöntemleri*” konu başlığı özelinde hazırlanmıştır. Bu teknik rehber, aşağıda listelendiği gibi MiSGEP Teknik Yardım Bileşeni kapsamında hazırlanan beş ciltlik teknik rehber serisinden ikincisidir.

- 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

MiSGEP 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 amaç ve hedef çerçevesinde hazırlanan bu rehber, madencilik sektöründeki kömür, metal ve endüstriyel mineral çıkarımını amaçlayan yeraltı ocaklarında bilimsel temelli, öncelikle yeraltı çalışanlarının sağlığını ve güvenliğini, sonrasında çevre ve ekosistemi, devamında ise işletmenin sürekliliğini garanti altına alan bir havalandırma altyapısının unsurlarını kullanıcıya aktarmak üzere tasarlanmıştır. Bu esnada, yenilenemez özellikteki yeraltı zenginliklerinin özenle korunması ve maksimum fayda sağlayacak şekilde yaklaşımlar konulması da çok önemlidir. Öncelikle madenin her safhasını ele alan güçlü bir tasarım, sonrasında uygulamanın esasları ve izleme/kontrol yöntemlerini sağlıklı şekilde canlı tutmak havalandırma mühendisliğinin ana yaklaşımıdır.

Ocak havalandırması, basit ve kolaylıkla anlaşılır bir kavram olarak görünse de personelin çalıştığı tüm alanlarda ya da kullandığı tüm güzergahlarda yeterli miktarda havayı sağlamak ve kirleticileri güvenli konsantrasyonlara seyreltmek zor olabilmekte, bu iş iyi bir planlama ve uygulamayı gerektirmektedir. Özellikle ocaklar derinleştikçe, formasyonlardaki gaz içerikleri arttıkça, ocaklarda mekanize sistemlerin yoğun olarak kullanılması söz konusu oldukça etkili bir havalandırma sisteminin kurulması ve işletilmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle, havalandırma ile ilgilenen teknik personelin; zehirli, boğucu ve patlayıcı ocak gazlarının, tozun ve diğer kirleticileri kontrolü, ocak yangını riskleri, ana ve tali fan uygulamaları, ısı stresi yönetimi, havayı soğutma ya da ısıtma, radyasyon kontrolü, kaçış ve kurtarma planlaması ve ocak havalandırma ekonomisi gibi havalandırma uygulamaları konularına çok iyi bir şekilde hakim olmaları gerekmektedir. Ayrıca, havalandırma ile ilgilenen tüm teknik personelin ve çalışanların ocak atmosferinde bulunan kirleticilere maruz kalma sınırları konusunda yetkin olması iş sağlığı ve güvenliği açısından şarttır. Ocaklardaki hava kalitesi kontrolü, havanın gazlar ve tozlardan arındırılmasını hedeflemektedir, ancak bu teknik rehberde toz ve diğer kirleticilerden ziyade ocakta felakete yol açabilecek patlama kontrolünü sağlamak açısından gazlar konusuna yoğunlaşmıştır. Ocak havasındaki tozların da mesleki hastalıklar yönünden önemi büyüktür.

Ülkemizde özellikle tasarım parametrelerinin seçiminde üretim odaklı düşünceler hakim olmakta ve havalandırma ise gerekli olduğu bilinmesine rağmen çoğu durumda geri planda kalmakta, hatta çoğunlukla ek bir yük olarak görülmektedir. Bunun temel sebebi ise iyi ve kötü havalandırılan bir ocak arasındaki verimlilik farkını ve maddi kayıpları sayısallaştırmanın oldukça zor olmasıdır.

Bu kapsamda bu teknik rehberin, günümüz şartlarında havalandırma mühendisliğindeki kavram ve eğilimleri mümkün olduğunca anlaşılır bir şekilde irdeleyerek iyi uygulamaların nasıl yapılması gerektiğine ve yeraltı ocaklarına yönelik havalandırma planlamasında dikkat edilmesi gereken noktalara değinen bir el kitabı olması amaçlanmıştır.

# İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER DİZİNİ	7
ÇİZELGELER DİZİNİ	8
KISALTMALAR	9
1. GİRİŞ	11
2. OCAK HAVASI VE OCAK ATMOSFERİNDEKİ KİRLETİCİLER	13
2.1. Yeraltı Kömür Ocakları	15
2.2. Yeraltı Metal Ocakları	16
2.3. Ocak Gazlarının Galeri İçindeki Potansiyel Birikme Yerleri ve Sensör Pozisyonları	16
2.4. Tozlar	17
3. ANA HAVALANDIRMA TÜRLERİ VE SİSTEMLERİ	19
3.1. Doğal Havalandırma	19
3.2. Mekanik Havalandırma	20
3.2.1. Merkezi Havalandırma	20
3.2.2. Çevresel Havalandırma	21
4. TEMEL AKIŞKANLAR MEKANİĞİ İLKELERİ VE HAVANIN GALERİ İÇİNDE AKIŞI	23
4.1. Laminer ve Türbülanslı Akış	23
4.2. Bernoulli Eşitliği	24
4.3. Ocak Toplam Basıncı (Yükü)	25
4.4. Sürtünme Kaynaklı Basınç Kayıpları (Pf)	25
4.4.1. Atkinson Eşitliği ve Karesel Kanun (Square Law)	25
4.4.2. Atkinson Sürtünme Faktörünün Belirlenmesi	26
4.4.3. Hava Yollarının Direnci	26
4.5. Şok Nedeniyle Oluşan Basınç Kayıpları (Px)	28
5. HAVALANDIRMA ÖLÇÜMLERİ	31
5.1. Hava Miktarı Ölçümleri	32
5.1.1. Kanatlı Anemometre ile Hava Hızı Ölçümü	33
5.1.2. Pitot Tüp ile Hava Hızı Ölçümü	34
5.2. Basınç Ölçmeleri	34
5.2.1. Manometre-Hortum Yöntemi	34
5.2.2. Barometrik Yöntem	36
5.3. Basınç-Hava Miktarı Ölçümlerinin Planlanması ve Organizasyonu	37
6. KÖMÜR VE METAL MADEN OCAKLARINDA HAVALANDIRMA PLANLAMASI	39
6.1. Temel Havalandırma Şebekesinin Oluşturulması ve Korelasyonu	40
6.1.1. Planlama/Kurulum Aşamasındaki Ocaklar	40
6.1.2. Çalışan Ocaklar	41
6.1.3. Korelasyon	42

6.2.	Gerekli Hava Miktarının Hesaplanması ve Hız Sınırları	42
6.2.1.	Tabaka Gazlarının Yayılımlarına Göre	43
6.2.2.	Oluşan Toz Miktarına Göre	44
6.2.3.	Dizel Egzoz Yayılımlarına Göre	45
6.2.4.	Patlayıcı Madde Miktarına Göre	46
6.2.5.	Hava Hızı Sınırları	47
6.3.	Planlama Uygulamaları ve Ocaktaki Aşamalar	47
6.4.	Havalandırma Ekonomisi ve Hava Yolu Boyutlandırma	48
6.4.1.	Eşdeğer Yıllık Maliyet	49
6.4.2.	Havalandırma İşletme Maliyeti	50
6.4.3.	En Uygun Hava Yolu Boyutlarının Bulunması	50
6.5.	Havalandırma Yazılımlarının Kullanımı	51
6.6.	Kömür Ocaklarında Havalandırma Planlaması	52
6.6.1.	Metan (CH <sub>4</sub> )	53
6.6.2.	Hava Hızı	54
6.6.3.	Uzunayaklarda Havalandırma	57
6.7.	Kömür Tozu Patlamaları	58
6.7.1.	Kömür Tozunun Patlayabilirliğini Etkileyen Faktörler	59
6.7.2.	Kömür Tozunun Patlayabilirliğinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Ekipman ve Deneysel Çalışmalar	60
6.7.3.	Kömür Tozuyla Mücadele ve Kömür Tozu Patlamalarının Bastırılması	62
6.8.	Metal Ocaklarında Havalandırma	64
6.8.1.	Temel Özellikler	65
6.8.2.	Tasarım Açısından Yeryüzü Bağlantılarının Önemi	65
6.8.3.	Sık Kullanılan Bazı Üretim Yöntemlerinde Havalandırma	67
6.9.	Tali Havalandırma	67
7.	FANLAR	71
7.1.	Fan Karakteristik Eğrisi ve Fan Seçimi	72
7.2.	Fan Kanunları	73
7.3.	Fanların İşletilmesi ve Bakımı	73
8.	OCAK HAVALANDIRMASINDA YAPILAN TEKNİK HATALAR VE ÖZENSİZ DAVRANIŞLAR	75
	KAYNAKLAR	77

# ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	CO maruziyeti ve olası etkileri (Strang ve McKenzie-Wood, 1985'ten değiştirilerek)	15
Şekil 2.2.	Bir ocak galerisi içinde gazların potansiyel birikme/tabakalaşma bölgeleri	16
Şekil 3.1.	Derinlikleri aynı olan iki kuyu ve bir galerinin olduğu bir ocağın şematik gösterimi	20
Şekil 3.2.	Temel doğal havalandırma sistemlerinden hava akımının yönü (Hartmann vd., 1997'den yeniden oluşturularak)	20
Şekil 3.3.	Merkezi havalandırma	21
Şekil 3.4.	Çevresel havalandırma	21
Şekil 4.1.	Bir boru içinde akan akışkanın hız profilleri (a) Laminer ve (b) türbülanslı	24
Şekil 4.2.	Çeşitli direnç değerleri için çizilmiş karakteristik eğriler.	28
Şekil 5.1.	Anemometre türleri (a) mekanik (Carroll Technologies Group, 2022) ve (b) dijital (Alnor, 2022)	32
Şekil 5.2.	Sabit nokta dolaştırma yöntemi	33
Şekil 5.3.	Bazı galeri kesitlerinde dolaştırma güzergahları	33
Şekil 5.4.	Pitot-statik tüp	34
Şekil 5.5.	Bir teleskopik pitot tüp	34
Şekil 5.6.	Bir dijital diferansiyel manometre (Dwyer, 2022b)	35
Şekil 5.7.	Manometre-hortum yöntemi için oluşturulacak düzenek	36
Şekil 6.1.	Bir yeraltı ocağının havalandırma planlamasındaki aşamalar (McPherson, 1993'ten değiştirilerek)	40
Şekil 6.2.	İki örnek ocak için yıllara göre hava kullanım faktöründeki değişimler: (a) Güney Afrika'daki bir altın madeni, (b) Avustralya'daki bir kömür madeni	43
Şekil 6.3.	Hava hızına göre toz konsantrasyonundaki değişim	45
Şekil 6.4.	Derinlik ve kömürleşme derecesine göre tahmin edilen metan içeriği	53
Şekil 6.5.	Patlama sayıları ile $c^2/F$ ilişkisi	56
Şekil 6.6.	Uzunayak havalandırma sistemleri (a) tek-girişli ilerletimli U-tipi, (b) tek-girişli dönümlü U-tipi, (c) arka nefeslikli tek-girişli dönümlü, (d) arka nefeslikli çift-girişli dönümlü, (e) Y sistemi, (f) çift-Z sistemi ve (g) W sistemi	57
Şekil 6.7.	U-havalandırma sisteminde göçükte metan dağılımı	58
Şekil 6.8.	Tek girişli - dönümlü uzun ayakta U-tipi havalandırma	58
Şekil 6.9.	Tek girişli-ilerletimli uzun ayakta U-tipi havalandırma	58
Şekil 6.10.	Patlama beşgeni	59
Şekil 6.11.	Tipik bir Hartmann aparatı	61
Şekil 6.12.	Küresel test kapları, (a) ISO 1 m <sup>3</sup> ve (b) 20-L küresel kap	62
Şekil 6.13.	Pasif taş tozu barajları (a)	63
Şekil 6.14.	Pasif su barajları (a)	64
Şekil 6.15.	Bir metal ocağı havalandırma tasarımı	65
Şekil 6.16.	Tek hava girişi ve tek hava çıkışına sahip kavramsal bir yeraltı metal ocağı	66
Şekil 6.17.	Kavramsal yeraltı metal ocağında yapılan ilk tasarım değişikliği	66
Şekil 6.18.	Kavramsal yeraltı metal ocağında yapılan ikinci tasarım değişikliği	66
Şekil 6.19.	Tipik bir ara katlı göçertme çalışmasında havalandırma	67
Şekil 6.20.	Ara katlı göçertme varyasyonları (a) çift girişli ve (b) tek girişli (Hartmann vd., 1997'den değiştirilerek)	67
Şekil 6.21.	Tipik bir dolgulu tavan ayak uygulaması	67
Şekil 6.22.	Tali havalandırma çeşitleri: (a) emici, (b) üfleyici ve (c) emici-üfle-yici kombinasyonu (overlap)	68
Şekil 6.23.	Fan ve arın arasındaki akış ilişkisini gösteren diyagram	69
Şekil 7.1.	Bir aksiyal fanın şematik görünümü (Mutama ve Pelletier, 1999)	71
Şekil 7.2.	Bir santrifüj fanın şematik görünümü (Hartmann vd., 1997)	72
Şekil 7.3.	Fan karakteristik eğrileri, ocak karakteristik eğrisi ile sistem çalışma noktalarının gösterimi	72

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Yeraltı ocaklarındaki gazlar ve bazı özellikleri (McPherson, 1993; Hartmann vd., 1997; ÇSGB, 2015)	14
Çizelge 2.2.	Kayaç ve mineral tozları için maruziyet eşik sınır değerleri (ÇSGB, 2013)	15
Çizelge 4.1.	Çeşitli ocak açıklıklarında sürtünme katsayıları (f) ve sürtünme faktörü (k) değerleri (McPherson, 1993)	27
Çizelge 4.2.	Çeşitli şok kayıpları için eşdeğer uzunluklar (Hartmann vd., 1997)	29
Çizelge 5.1.	Barometrik basınç ölçümü sonuçları	37
Çizelge 6.1.	Kömür işçisi pnömokonyozu (ILO kategorisi 1/0+) tanısı konulan maden çalışanların yıllara göre değişim yüzdeleri	44
Çizelge 6.2.	Çeşitli patlayıcı türlerine göre açığa çıkan gazlar ve miktarları (Greig, 1982; Zawadka-Malota, 2015; Sierra, 2020)	46
Çizelge 6.3.	Çeşitli ocak açıklıklarında azami hava hızları (McPherson, 1993)	47
Çizelge 6.4.	Eğimli galerilerde önerilen en düşük tabakalaşma katsayıları (McPherson, 1993)	55
Çizelge 6.7.	$K_{st}$ indeksine göre patlayabilirlik sınıflandırması	62
Çizelge 7.1.	Yeraltı ocaklarında yaygın olarak kullanılan fan türlerinin performans karşılaştırması (Hartmann vd., 1997)	72
Çizelge 7.2.	Fan kanunları	73

# MiSGEP

## MADENCİLİKTE İŞ SAĞLIĞI ve GÜVENLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

### KISALTMALAR

- ACARP : Australian Coal Association Research Programme  
(Avustralya Kömür Derneği Araştırma Programı)
- ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists  
(Amerikan Resmi Endüstriyel Hijyen Uzmanları Konferansı)
- ANFO : Amonyum Nitrat Fuel Oil
- ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-  
Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve  
İklimlendirme Mühendisleri Birliği)
- AUI : Hava Kullanım Endeksi (Air Utilization Index)
- CDEM : Kömür Tozu Patlayabilirlik Ölçer (Coal Dust Explosibility  
Meter)
- COHb : CO (Karbon Monoksit Tutan Hemoglobin)
- ÇD : Çalışma Düzeyi (Working Level – WL)
- ÇSGB : Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
- DHM : Doğal Havalandırma Basıncı
- DPM : Diesel Particulate Matter (Dizel Motorlarından Salınan  
Partikül Madde)
- EAC : Equivalent Annual Cost (Eşdeğer Yıllık Maliyet)
- EU : Avrupa Birliği (AB)
- HVAC : Heating, Ventilation, Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma,  
İklimlendirme)
- IDLH : Immediately Dangerous to Life or Health (İnsan Yaşamına ya  
da Sağlığına Anlık Tehlike)
- KİP : Kömür İşçisi Pnömonyozu (Coal Workers' Pneumoconiosis  
/ Black Lung Disease)
- kW : Kilowatt
- NFPA : National Fire Protection Association (Yangından Koruma  
Ulusal Derneği)
- NIOSH : National Institute of Occupational Safety and Health (Ulusal İş  
Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü)
- MSHA : Maden Güvenlik ve Sağlık İdaresi
- SIA 196 : İsviçre Tünel İnşası ve Madencilik Standardı
- STEL : Short Term Exposure Limit (Kısa Süreli Maruziyet Sınırı)
- TLV : Threshold Limit Value (Maruz Kalma Sınır Değeri)
- TWA : Time Weighted Average (Zaman Ağırlıklı Ortalama Değeri -  
ZAOD)
- VoD : Ventilation on Demand (İsteğe Bağlı Ayarlanabilir Havalandırma)
- WBT : Yaş Termometre Sıcaklığı (Wet Bulb Temperature)



# 1. GİRİŞ

Yeraltı ocaklarında havalandırma, iş sağlığı ve güvenliği açısından oldukça önemli olan, çok yönlü bir atmosferik kontrol aracıdır. Etkili bir havalandırma sistemi olmayan bir yeraltı ocağının güvenli olarak işletilebilmesi olanaksızdır. McPherson (1993) havalandırmayı, yeraltı ocaklarının can damarı olarak nitelendirmiş; hava giriş yollarının oksijeni çalışma alanlarına taşıyan arterler olduğunu ve hava dönüş yollarının ise kirleticileri (gaz, toz, ısı vb.) dış atmosfere taşıyan damarlarla benzediğini ifade etmiştir.

Temel olarak havalandırmanın amacı; personelin çalıştığı ya da kullandığı ocak bölgelerindeki ocak atmosferinde bulunan kirleticileri güvenli konsantrasyonlara seyreltecek yeterli miktar ve kalitede temiz havanın sağlanmasıdır. Esasen bu amaç oldukça açık ve anlaşılır bir amaçtır. Bu amaca ulaşmanın temel yöntemi ise yeterli hava akışının sağlanması ve düzenlenmesidir. Bu kapsamda, ocak havalandırması temel olarak akışkanlar mekaniği ve termodinamik prensiplerinin ocak açıklıklarında akan havaya uygulanması işidir. Modern yeraltı ocaklarında hava akışının sağlanması ve düzenlenmesi işi genel olarak yerüstüne konuşturılan ana fanlarla sağlanmaktadır.

Yeraltı ocaklarında havalandırmanın temel fonksiyonları, eş zamanlı olarak ocak havası kalitesinin (kalite kontrolü), miktarının (miktar kontrolü) ve sıcaklık-neminin (termal konfor) belirlenen sınırlar içinde tutulmasıdır. Kalite kontrolü, havanın gazlar ve tozlardan arındırılmasını hedeflemekte, miktar kontrolü ise hava akışının büyüklüğünün ve yönünün düzenlenmesi işlerini içermektedir. Sıcaklık ve nemin kontrolü içinse iklime ve ocak şartlarına bağlı olarak soğutma, ısıtma, nemlendirme ya da nemsizleştirme gibi işlemler uygulanmaktadır.

Bir yeraltı kömür ocağında uygulanacak havalandırma tasarımının başarıya ulaşması için öncelikle yeraltındaki tehlikeler ve riskler doğru tespit edilmeli ve özenle değerlendirilmelidir. Yeraltı ocaklarında cevherin özellikleri, derinlik, jeolojik koşullar, çevre kayaçların fiziksel ve kimyasal özellikleri, ocağa su ve gaz geliri gibi parametreler çoğunlukla kontrol edilemez nitelikte olmakla birlikte, üretim yöntemi, ocağın yerleşimi (düzeni), açıklıkların tasarımı ve boyutlandırılması, seçilecek ekipmanın tipi, boyutu ve yerleştirilmesi gibi tasarım parametrelerinde seçenekler yaratılabilmektedir.

Günümüzde, özellikle son 30 yılda, teknolojiye hızlı gelişmeler sonucunda madencilik sektöründe dijitalleşme adına önemli adımlar atılmış ve tüm dünyada yeraltı ocaklarının tasarımı ve işletilmesinde çeşitli bilgisayar yazılımları yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Havalandırma planlaması açısından değerlendirildiğinde, geleneksel teknikler yerini yazılım, ölçüm aletleri vb. gibi yeni araçlara bırakmıştır. Bu kapsamda yeraltı kömür ocaklarında sürekli izleme sistemleri yaygınlaşmış, havalandırma planlama ve simülasyon (ocak yangını, kaçış güzergahı vb.) yazılımları geliştirilmiş, yeraltı çalışanlarının silika ve kömür tozuna maruziyetlerinin azaltılmasına yönelik ağır düzenlemeler yapılmış, çalışma bölgelerinde hava kalitesinin iyileştirilmesi için yardımcı fan (tali/booster fan) uygulamalarına geçilmiştir. Yeraltı metal ocaklarında ise yine havalandırma yazılımlarının yoğun kullanımı, hava miktarının istendiği zaman ayarlanabileceği uygulamalar (Ventilation on Demand – VoD), kontrollü seri havalandırma uygulamaları ve tali havalandırma teknikleri geliştirilmiştir. Bu gelişmelere bağlı olarak, özellikle gelişmiş ülkelerde, yeraltı ocaklarında havalandırma sorunları büyük ölçüde aşılmıştır. Hatta son yıllarda enerji maliyetlerindeki büyük artışlar nedeniyle işletmeler, çabalarını havalandırma maliyetlerinin azaltılmasına yönlendirmeye başlamışlardır.



Bu rehberde öncelikle, yeraltı ocak tasarımında dikkat edilmesi gereken hususların anlaşılabilmesi için temel akışkanlar mekaniği ilkelerine ve havanın galeri içinde akışına değinilmekte, daha sonra havalandırma planlaması ve bir yeraltı ocağının havalandırma sisteminin etkinliğinin tespiti için gerekli olan havalandırma ölçümleri anlatılmaktadır.

Bu rehberde öncelikle, yeraltı ocak tasarımında dikkat edilmesi gereken hususların anlaşılabilmesi için temel akışkanlar mekaniği ilkelerine ve havanın galeri içinde akışına değinilmekte, daha sonra havalandırma planlaması ve bir yeraltı ocağının havalandırma sisteminin etkinliğinin tespiti için gerekli olan havalandırma ölçümleri anlatılmaktadır. Bunu takiben, yeraltı ocaklarında genel havalandırma planlamasına yönelik olarak; temel havalandırma şebekesinin nasıl oluşturulacağı ve bu şebekenin nasıl doğrulanacağı, hava miktarının hesaplanması ve hız sınırları, planlama uygulamaları ve ocaktaki aşamaları, havalandırma ekonomisi ve havayolu boyutlandırma ile havalandırma yazılımlarının kullanımı konularına değinilmektedir. Bu teknik rehberde ayrıca, yeraltı kömür ve metal ocakları özelinde bilgiler ve temel yöntemler için havalandırma sistemleri örneklerle anlatılmaktadır.

Özellikle son zamanlarda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar yeraltı kömür ve metal madenlerinde tozdan kaynaklı meslek hastalıklarının önemini ortaya koymasına rağmen, bu teknik rehberin kapsamı "iş sağlığı" yönünden çok "iş güvenliğini" ilgilendiren toz patlamaları çerçevesinde sınırlandırılmıştır.

## 2. OCAK HAVASI VE OCAK ATMOSFERİNDEKİ KİRLETİCİLER



Havalandırmada kullanılan “kirletici” tabiri normal şartlarda havanın bileşiminde bulunmayan ve istenmeyen madde anlamına gelmektedir. Yeraltı ocaklarının atmosferinde sıklıkla karşılaşılan kirleticiler gazlar ve tozlardır.

Yeraltı ocaklarında havalandırmanın temel amaçlarında bir tanesi havanın kimyasal kompozisyonunun belirli bir kalitede tutulmasını sağlamaktır. Esas itibarıyla hava çeşitli gazların bir karışımıdır. Hava yeraltı ocağına girdiğinde hacimsel olarak yaklaşık %78 azot (N<sub>2</sub>), %21 oksijen (O<sub>2</sub>) ve % 1 diğer gazları (karbondioksit - CO<sub>2</sub>, hidrojen - H<sub>2</sub> ve Argon -Ar) ihtiva etmektedir. Havanın yeraltı açıklıklarında dolaşmasıyla birlikte tabaka gazlarının yayılımı, oksidasyon, patlatma kaynaklı gazlar, madencilik faaliyetleri nedeniyle açığa çıkan toz, dizel egzoz dumanları gibi sebeplerle havanın kompozisyonu değişmekte başka bir deyişle kirlenmekte ve kalitesini kaybetmektedir.

Genel anlamıyla havalandırmada kullanılan “kirletici” tabiri normal şartlarda havanın bileşiminde bulunmayan (ya da fazla miktarda bulunmayan) istenmeyen madde anlamına gelmektedir. Kirleticiler parçacıklı yapıda olmayan (gazlar ve buharlar) ya da parçacıklı (sıvılar ve katılar) türde olabilmektedir. Yeraltı ocaklarında ocak atmosferinde sıklıkla karşılaşılan kirleticiler ise gazlar ve tozlardır.

Aşağıda kirletici nitelikteki ocak gazları üzerinde durulmaktadır. Rehberin amacı itibarıyla tüm gazlara tek tek değinmek yerine, ocak gazları, özellikleri ile konsantrasyon sınır değerlerinin bir çizelge şeklinde sunulması daha uygun olacaktır. Bu noktada özellikle, gazların sınır konsantrasyon değerlerinin anlaşılması için bazı tanımlamaların yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Gazlar için kullanılan ve personelin sağlığına ya da güvenliğine zarar vermeden maruz kalabileceği konsantrasyonlar genel itibarıyla “**Eşik Sınır Değer**” olarak adlandırılmaktadır. Bu eşik sınır değerler, Amerikan Resmi Endüstriyel Hijyen Uzmanları Konferansı (American Conference of Governmental Industrial Hygienist – ACGIH) ya da Birleşik Devletler Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü (US National Institute of Occupational Safety and Health – NIOSH) ve Avrupa Birliği (EU, 2017) gibi kurumların yürüttüğü hayvan ve insanlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar ve tecrübelerle ortaya çıkmış değerlerdir. Bu değerlerin yanı sıra madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğü ülkelerde eşik sınır değerler yasalar yoluyla da belirtilebilmektedir. Bu kapsamda yeraltı ocaklarında havalandırma ile ilgilenen teknik elemanların ve esasen tüm çalışanların gazlarla ilgili eşik sınır değerleri biliyor olması oldukça önemlidir.

Genel itibarıyla yaygın olarak kullanılan aşağıdaki üç çeşit “Eşik Sınır Değeri” bulunmaktadır.

1. **Zaman Ağırlıklı Ortalama Değer (ZAOD):** Bu sınır değer, herhangi bilinen bir etkisi olmaksızın çalışanların günde 8 saat ya da haftada 40 saat maruz kalabilecekleri ortalama konsantrasyondur.
2. **Kısa Süreli Maruziyet Sınır Değeri (KSMSD):** Bu sınır değer ise 15 dakikayı geçmeyecek bir sürede maruz kalınabilecek konsantrasyon ortalama değeridir. Ayrıca, bu tür bir durumun günde dört defadan fazla olmaması ve her olay arasında en az 60 dakika bulunması tavsiye edilmektedir (Hartmann vd., 1997).
3. **Tavan Sınır Değeri (TSD):** Bu değer hiçbir durumda aşılmaması gerek konsantrasyon değeridir ve özellikle anında etkili olan çok zehirli gazların kontrol edilmesinde kullanılan bir değerdir.

Yeraltı kömür ve metal ocaklarında önem arz eden gazlar Oksijen (O<sub>2</sub>), Azot (N<sub>2</sub>), Karbondioksit (CO<sub>2</sub>), Karbonmonoksit (CO), Metan (CH<sub>4</sub>), Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), Kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>), Azotoksit (NO), Azotdioksit (NO<sub>2</sub>), Nitröz Oksit (N<sub>2</sub>O), Hidrojen (H<sub>2</sub>) ve Radon (Rn)'dir. Bu gazların bazı özellikleri, yayıldığı kaynaklar, yaratacağı tehlikeler ve eşik sınır değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Ülkemizde yeraltı maden işletmelerine yönelik olarak bu gazlardan O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve H<sub>2</sub>S gazları için eşik sınır değerler Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve

Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılması Hakkında Yönetmelik'te (ÇSGB, 2015) belirtilmiştir. Diğer gazlar için çizelgede verilen eşik sınır değerler ise dünya genelinde kabul edilen değerlerden oluşmaktadır. Bu gazlardan CO ve CH<sub>4</sub> yeraltı kömür ocaklarında sıklıkla karşılaşılan gazlar olmaları ve madencilik tarihimizde büyük facialara yol açmaları nedeniyle üzerinde titizlikle durulması oldukça önemlidir. Yeraltı metal ocaklarında ise kullanılan dizel ekipmandan kaynaklı olarak Dizel Partikül Madde ve NOx gazları önem arz etmektedir.

**Çizelge 2.1** Yeraltı ocaklarındaki gazlar ve bazı özellikleri (McPherson, 1993; Hartmann vd., 1997; ÇSGB, 2015).

Gaz	Özgül Ağırlık (Hava = 1)	Fiziksel Özellikler	Ocaktaki Temel Kaynaklar	Tehlikeler	Eşik Sınır Değerler	Patlayıcı Aralık (%)
Oksijen (O <sub>2</sub> )	1,1047	Renksiz, Kokusuz Tatsız	Hava	Oksijen eksikliği (solunum yetersizliği) Reaktif gazlarla karıştığında patlayıcı karışım oluşturma	> % 19	-
Azot (N <sub>2</sub> )	0,9673	Renksiz Kokusuz Tatsız	Hava Tabakalar	Boğucu İnert	-	-
Metan (CH <sub>4</sub> )	0,5545	Renksiz Kokusuz Tatsız	Tabakalar	Patlayıcı Boğucu Tabakalanma	-	5-15
Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )	1,519	Hafif asidik tat ve koku	Oksidasyon, Yangınlar Patlamalar, İçten yanmalı motorlar, Solunum	Boğucu Solunum hızlanması	ZAOD*: %0,5 KMSMD: %3.0	-
Karbonmonoksit (CO)	0,967	Renksiz Kokusuz Tatsız	Yangınlar Kendiliğinden yanma İçten yanmalı motorlar	Zehirli Patlayıcı	ZAOD*: 50 ppm KMSMD: %0,04	12,5-74
Hidrojen sülfür (H <sub>2</sub> S)	1,177	Renksiz Asidik tat Çürük yumurta kokusu	Tabakalar Yeraltı suyu Organik materyalin bozunması	Çok zehirli Göz, solunum yollarını tahriş edici Patlayıcı	ZAOD*: 20 ppm KMSMD: 15 ppm	4,3-45,5
Hidrojen (H <sub>2</sub> )	0,0695	Renksiz Kokusuz Tatsız	Akü şarj istasyonları Tabakalar, Alevli yangın üzerine dökülen su	Oldukça patlayıcı	-	4-74.2
Azotoksit (NO)	1,036	Tahriş edici Renksiz, Asidik tat	İçten yanmalı motorlar Patlatma Kaynak	Zehirli	ZAOD: 25 ppm	-
Nitröz Oksit (N <sub>2</sub> O)	1,519	Tatlı kokusu		Narkotik (gülme gazı)	ZAOD: 50 ppm	
Azotdioksit (NO <sub>2</sub> )	1,588	Kırmızımsı kahverengimsi		Çok zehirli Boğaz ve solunum yolunu rahatsız edici	ZAOD: 3 ppm TSD: 5 ppm	
Kükürtdioksit (SO <sub>2</sub> )	2,212	Asidik tat Boğucu koku	Sülfür oksidasyonu Asit maden drenajı İçten yanmalı motorlar	Çok zehirli Göz, solunum yollarını tahriş edici	ZAOD: 2 ppm TSD: 5 ppm	-
Radon (Rn)	7,66	Renksiz Kokusuz Tatsız	Tabakalardaki Uranyum	Radyoaktif	1 ÇD	-

\* Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği (ÇSGB, 2013).

Benzer şekilde, ocak havası içinde bulunan tozlar için de sınır değerler tanımlanmaktadır. Tozla Mücadele Yönetmeliği'nin (ÇSGB, 2013) Ek-1 kısmında verilen tablolarda maddeler için maruziyet sınır değerleri sunulmuştur. Çizelge 2.2'de sunulduğu üzere kayaç ve mineraller için eşik değerleri de aynı dokümanda sunulmaktadır.

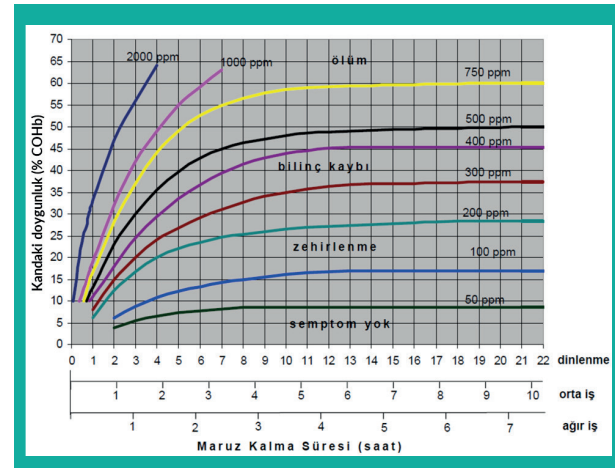
**Çizelge 2.2** Kayaç ve mineral tozları için maruziyet ZAOD (ÇSGB, 2013)

Kayaç-mineral	Zaman Ağırlıklı Ortalama Sınır Değeri
Asbest	0.1 lif/cm <sup>3</sup>
Silika (Kristal Yapıda)	
Kuvars (Solunabilir)	$\frac{10\text{mg/m}^3}{\% \text{SiO}_2+2}$
Kuvars (Toplam)	$\frac{30\text{mg/m}^3}{\% \text{SiO}_2+2}$
Kristobalit: Formülle hesaplanan kuvars değerinin ½ si kullanılır.	
Tridimit: Formülle hesaplanan kuvars değerinin ½ si kullanılır.	
Mineral	Sınır Değer (mg/m <sup>3</sup> )
Amorf yapıda (doğal diatomal toprak içeren )	
Silikatlar (%1'den az kristal silika içeren)	
Mika	80 mg/m <sup>3</sup>
Talk (Asbest içermeyen)	% SiO <sub>2</sub> +2
Talk (asbest içeren)	
Sabuntaşı	
Portland Çimentosu	
Grafit (Doğal)	
Kömür Tozu:	
%5 ve daha az SiO <sub>2</sub> içeren solunabilir toz	2.4 mg/m <sup>3</sup>
%5'ten fazla SiO <sub>2</sub> içeren solunabilir toz	$\frac{10\text{mg/m}^3}{\% \text{SiO}_2+2}$
İnert veya İstenmeyen Toz	
Solunabilir Kısım	5 mg/m <sup>3</sup>
Toplam Toz	15 mg/m <sup>3</sup>

## 2.1 Yeraltı Kömür Ocakları

Rehberin ileriki bölümlerinde CH<sub>4</sub> üzerinde detaylı olarak durulacağından bu bölümde CO ile ilgili detaylar verilecektir. CO, karbonlu malzemelerin tam olmayan (yetersiz oksijen ortamlarında) yanması sonucu oluşan bir gazdır. Yeraltı ocaklarında oluşan yangın ve patlamalar sonucunda ortaya çıkmaktadır. Esasen bu tür kazalarda meydana gelen ölümlerin büyük bir çoğunluğu patlama ya da yangından değil CO zehirlenmesi nedeniyle olmaktadır. Solunum yoluyla insan vücuduna girdiği andan itibaren CO, kandaki oksijeni dokulara taşıyan hemoglobin tarafından oksijen yerine tutulmakta ve dokulara oksijen yerine CO taşınmaktadır. CO tutan hemoglobin COHb olarak adlandırılmakta ve CO'nun vücuttaki etkileri kandaki COHb miktarına göre belirlenmektedir. Kandaki COHb miktarının %5-10'a ulaşması ile bilişsel yeteneklerde azalma şeklinde ilk etkiler ortaya çıkmaktadır. Kandaki COHb oranının %10-20'ye ulaşması ile hafif baş ağrısı, başın ön kısmında sıkılaşma hissi, %20-30'a ulaşmasıyla ciddi baş ağrısı, %30-40'a ulaşmasıyla oldukça ciddi baş ağrısı, sersemlik, görme kaybı, mide bulantısı ve bayılma gibi etkiler ortaya çıkmaktadır. Kandaki COHb miktarının %40-60 arasında ulaşması artan bayılma olasılığına, solunum ve nabızın hızlanmasına, kasılmaya yol açmaktadır. %60 ve üzeri COHb miktarı ise komaya ve ölüme neden olmaktadır.

CO'nun fizyolojik etkileri sadece ortamdaki CO konsantrasyonuna değil maruziyet süresine ve yapılan fiziksel aktivitenin yoğunluğuna da bağlıdır (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1** CO maruziyeti ve olası etkileri (Strang ve McKenzie-Wood, 1985'ten değiştirilerek)

McPherson (1993) CO zehirlenmesine maruz kalan bir kişinin vücudunda fizyolojik etkilerin yanı sıra ciddi psikolojik etkilerin de olacağını belirtmiştir. Zehirlenmeye maruz kalan kişilerde ölüm korkusunun geliştiğini, düşük seviyelerdeki zehirlenmelerde karar vermede zorluklar, dengesiz yürüme gibi etkiler görüldüğünü rapor etmiştir.

Zehirlenen kişilerin sessizleşebildiği ve aksi bir hale büründüğü ve bu nedenle güvenli ortama gitmeleri için verilen talimatlara uymayı reddettiklerini de bildirilmiştir.

Zehirleyici etkisinin yanı sıra CO, havada %12.5-74 oranları arasında patlayıcı özelliğe sahip bir gazdır. Ancak CO gazının normal şartlarda ocak havasında bu konsantrasyonlarda varlığı pek de mümkün değildir.

## 2.2 Yeraltı Metal Ocakları

Yeraltı metal ocaklarında formasyon kaynaklı gazlar haricinde, özellikle büyük dizel ekipmanların kullanılması ve patlatma faaliyetlerinin yoğun olarak uygulanması nedeniyle tehlike arz eden gazlar NOx ve Dizel Partikül Madde (DPM)'dir.

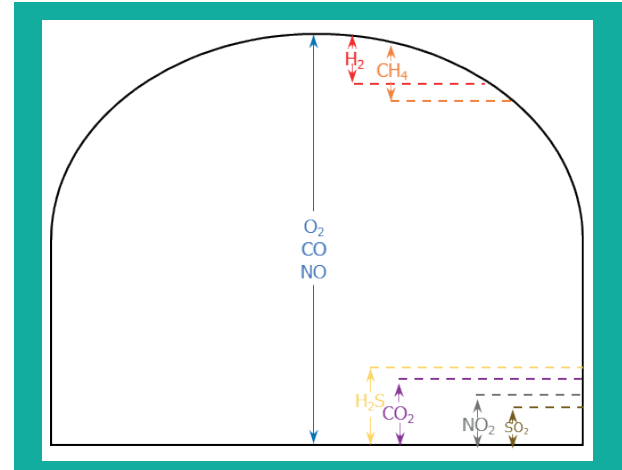
NOx gazları (NO, NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O) içten yanmalı motorların egzozlarından ve patlatma faaliyetlerinden ocak atmosferine yayılmaktadır. Bu gazlardan NO ortaya çıktığı andan itibaren hızlıca NO<sub>2</sub>'ye okside olmakta ve dolayısıyla bu durumda asıl tehlike yaratan gaz NO<sub>2</sub> olmaktadır. Ülkemizde maden mevzuatında NO<sub>2</sub> gazı için bir eşik sınır değeri belirtilmemiştir. Ancak, gelişmiş ülkelere bakıldığında bu gazın oldukça zehirli olması nedeniyle bu gazın 8 saatlik maruziyet eşik sınır değerleri (Zaman Ağırlıklı Ortalama Değer) ABD'de 5 ppm, Avrupa Birliği ülkelerinde 3 ppm (2023'ten sonra 1 ppm'e düşürülecek) ve Avustralya'da ise 10 ppm'dir. NIOSH'a göre NO<sub>2</sub>'nin insan yaşamı ya da sağlığı açısından tehlike yarattığı konsantrasyon (Immediately Dangerous to Life or Health - IDLH) **13 ppm** olarak belirtilmiştir (NIOSH, 2022b).

Dizel motorlardan kaynaklanan DPM ise üzerinde önemle durulması gereken bir diğer konudur. Dizel partikül madde yayılımlarına maruz kalan kişilerde göz ve burun tahrişi, baş ağrısı, kusma ve astım gibi olumsuz sağlık etkileri görülmektedir. Ayrıca, DPM'in potansiyel bir kanserojen olması da dünya madencilik endüstrisinde bu yayılımlara özen gösterilmesini beraberinde getirmiştir. NIOSH'a göre yeraltı madencileri, sınırlı bir alanda çalışmalarını nedeniyle tipik dizel egzozlarının çevresel konsantrasyonundan 100 kat fazla DPM yayılımına maruz kalabilmektedirler (NIOSH, 2022a). Yeraltı ocaklarında günden güne daha fazla dizel ekipman kullanılması DPM maruziyetini büyük ölçüde arttırmakta ve daha büyük riskleri beraberinde getirmektedir. DPM ile mücadelede dizel ekipmanın egzozlarına filtreler takılmakta ve bu yayılımların ocak atmosferine yayılmasının engellenmesi hedeflenmektedir. Kömür dışındaki yeraltı ocaklarında DPM için ABD'de izin verilebilir sınır değeri 160 µg/m<sup>3</sup>'tür. Ülkemizde ise yeraltı ocaklarında doğrudan DPM maruziyeti ile ilgili bir yönetmelik ve dolayısıyla herhangi bir sınır değeri bulunmamaktadır.

## 2.3 Ocak Gazlarının Galeri İçindeki Potansiyel Birikme Yerleri ve Sensör Pozisyonları

Yeraltı ocak atmosferine yayılan bir gazın galeri içinde potansiyel olarak birikebileceği yerler gazın kaynak noktası ve yoğunluğu ile ilişkilidir. Gazlar her ne kadar difüzyona (çok yoğunundan az yoğun ortama hareket) maruz kalsalar da genel itibarıyla karışım halindeki gazlar yoğunluklarına göre tabakalaşmamaktadır. Badino (2009) bu olayı, yoğunlukları farklı olsa da temiz hava içindeki gazların yoğunluklarına göre birbirinden ayrılmamasına benzetmektedir. Ocak ortamında gazların birbirine karışabilmesi için türbülanslı (çalkantılı) bir hava akışına ve zamana ihtiyaç bulunmaktadır. Eğer bir gaz, kaynağından ocak atmosferine yayıldığı anda yeterli türbülansa sahip bir akış ortamı yoksa tabakalaşabilecektir. Böylesi durumlarda gazların ocak ortamında içinde tabakalaşması Şekil 2.2'dekine benzer olacaktır.

**Unutulmamalıdır ki, karışım haline gelen gazların birbirinden tekrar ayrılarak tabakalaşması mümkün değildir.**



**Şekil 2.2** Bir ocak galerisi içinde gazların potansiyel birikme/tabakalaşma bölgeleri

Şekil 2.2'de gösterilen potansiyel birikim bölgeleri ocaklarda sürekli izleme ağına bağlı sensörlerin yer seçimleri için de yol göstericidir. Ocak gazlarından H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> havadan hafif olmaları nedeniyle galerilerin tavanında birikmeye meyilli olduğundan bu gazlara yönelik sensörler galeri tavanına yakın bir mesafede olmalıdır. Amagat Prensibi'ne (bir gaz karışımının hacmi, karışımı oluşturan gazların aynı koşullarda ayrı ayrı kaplayacakları hacimlerin toplamına eşittir) göre eğer bir gaz karışımının toplam hacmi yüksekse karışım içindeki gaz bileşenlerin

hacmi de yüksek olacaktır. Yani, ölçülecek gazların konsantrasyonları galeri içinde havanın en fazla olduğu noktada yüksek olacaktır. Galeri kesiti içinde en fazla havanın direncin en düşük olduğu bölgelerden geçeceği düşünüldüğünde, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazlarının takibi için kullanılacak sensörlerin galeri kesitinin ağırlık merkezinde ve tavan yakın bir yerde konuşlandırılması uygun olacaktır. CO gazının özgül ağırlığının (0.965) de havaya çok yakın olduğu düşünüldüğünde bu gaza yönelik sensörlerin de H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> sensörlerine benzer şekilde hava akışının yüksek olduğu bölgelere konuşlandırılması uygun olacaktır. Özgül ağırlıkları havadan ağır olan SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gazlarının konsantrasyonlarının ölçülmesine yönelik olarak kullanılacak sensörler ise galeri tabanına yakın mesafelere yerleştirilmelidir.

## 2.4 Tozlar

Nefes aldığımız doğal atmosfer içinde gazların yanı sıra çok sayıda sıvı ve katı partiküller bulunmaktadır. Toz ise genel tanımı itibarıyla katı partiküllere verilen isimdir. Bu katı partiküller doğal ve endüstriyel süreçler sonunda ortaya çıkabilmektedir. Kapalı endüstriyel ortamlarda bu kirleticilerin havadaki konsantrasyonlarının solunum sisteminin baş edemeyeceği seviyelere yükselmesi insan sağlığı açısından tehlikelere yol açmaktadır. Özellikle kayaçların çeşitli etkenlerle kırılması, ufalanması, öğütülmesi vb. sonucunda mineral tozları açığa çıkmaktadır. Mineral tozları genel itibarıyla düzensiz şekillerde ortaya çıkmakta ve özellikle solunum yollarında ve akciğerlerde ciddi hasarlara yol açabilmektedir.

Genel itibarıyla çapı 5µm'den küçük olan tozlar "**solunabilir toz**" olarak adlandırılmaktadır. Bunun yanında; solunum yoluyla vücuda alınarak canlıların vücutlarında zehir etkisi gösteren cıva, kadmiyum, selenyum gibi metallerin tozları "**zehirli tozlar**" olarak sınıflandırılmakta iken asbest lifleri gibi tozlar "**kanserojen tozlar**" olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, bazı tozlar ise akciğerlerde yaralanmalara yol açmakta ve alveollere dolarak akciğerlerdeki gaz değiş tokuşunu engellemektedir. Bu tür tozlar ise "**fibrojen tozlar**" olarak sınıflandırılmaktadır. Özellikle silika (kuvars) ve bazı silikatların (asbest, mika gibi) tozları en tehlikeli fibrojen tozlar sınıfında bulunmaktadır. Uzun süreli olarak solunabilir kömür tozu bulunan ortamlara maruz kalan çalışanlarda ciddi sağlık sorunları gözlenebilmektedir. Sağlık sorunlarının yanında güvenlik sorunları oluşturan bazı tozlar da bulunmaktadır. "Patlayıcı tozlar" olarak sınıflandırılan bu tozlar genel itibarıyla organik yapıda olup havada belirli bir konsantrasyona ulaştıklarında patlayıcı potansiyele sahip olabilmektedir. Kömür tozu, kükürt tozları ve bazı metal tozları bu sınıfa dahildir. Kömür tozlarının patlayabilirliği ile detaylı bilgi bu rehberin ileriki bölümlerinde verilecektir (Bölüm 6.7).

Havada askıda olan tozların solunabilir boyutta olanlarının uzun süreler ve yoğun miktarda solunması ile ortaya çıkan akciğer rahatsızlıklarına "**pnömokonyoz**" adı verilmektedir. Yeraltı maden ocaklarında ortaya çıkan tozların büyük bölümü tek başına ölümcül olmamakla birlikte asıl sorun yaratan bu tozlara uzun süreli maruz kalınmasıdır. Pnömokonyozların ortaya çıkmasında en önemli etkenler, tozun boyut dağılımı ve fiziksel/kimyasal özellikleri, solunan havadaki yoğunluğu, etkilenme süresi ve bireysel faktörlerdir.

Pnömokonyozlar arasında en yaygın görülen türler kömür işçisi pnömokonyozu (KİP) ve silikozistir. KİP, yeraltı kömür ocaklarında üretim, delik delme gibi yoğun kömür tozuna uzun süre maruz kalan işçilerde ortaya çıkabilen bir meslek hastalığıdır. Solunum yoluyla vücuda alınan kömür tozları akciğer dokusunda plaklar halinde birikmekte ve zamanla kişinin nefes alma kapasitesini düşürmektedir. Hastalığın bu etkilerinin ortaya çıkması 10-15 yıl sürebilmekte ve kişi bu süreçte akciğerlerindeki kapasite düşüklüğünü anlayamamaktadır. Bu hastalığın günümüzde tedavisi bulunmamaktadır.

Silikozis ise toza bağlı hastalıklar içinde en tehlikelisi olup kristal formundaki serbest silika tanecikleri (kuvars ve kumtaşı) nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu tanecikler akciğerde biriktiğinde akciğer kapasitesini azaltmasının yanı sıra düzensiz şekilleri ve keskin kenarları nedeniyle akciğerde yaralanmalara (fibröz) yol açmakta ve kısa sürede ölümcül sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Özellikle, silika içeren kayaçların çıkarılması ve kırılması/ öğütülmesi sırasında ya da kumlama/taşlama işlemleri yapılan iş sahalarında açığa çıkan tozların bulunduğu durumlar en tehlikeli koşulları oluşturmaktadır. Bu bağlamda silika içeren kömür tozları sonucu ortaya çıkan KİP oldukça ciddi sonuçlara yol açabilmektedir.

Ülkemizde kayaç ve mineral tozları için günlük maruz kalınabilecek zaman ağırlıklı ortalama eşik sınır değerler (ZAOD) Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından 5 Kasım 2013 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Tozla Mücadele Yönetmeliğinde belirtilmiştir (Çizelge 2.2).



## 3. ANA HAVALANDIRMA TÜRLERİ VE SİSTEMLERİ

Bir yeraltı ocağında hava akışının sağlanabilmesi için sistemde meydana gelecek enerji kayıplarının, sisteme eklenen enerji tarafından karşılanması gerekmektedir. Yeraltı ocaklarına enerji sağlayan iki sistem ise doğal havalandırma ve mekanik havalandırmadır. *Ana (birincil) havalandırma* olarak adlandırılan bu sistemler tali (ikincil) havalandırma sistemlerinden farklıdır.

### 3.1 Doğal Havalandırma

Yeraltı ocaklarında havanın akışını sağlayan tek doğal kuvvet, hava ve tabakalar arasındaki ısı farkı nedeniyle ortaya çıkan ısı enerjisi alışverişi ve bunun sonucunda havanın yoğunluğundaki değişimdir. Bu değişim ocak girişi ve çıkışı arasında bir basınç farkı yaratmakta ve bazı durumlarda ocaktaki enerji kayıplarını yenerek havanın galeriler içinde akışını sağlayabilmektedir. Bu durumda, doğal havalandırma esasen ocaktaki çalışma bölgeleri ve yüzey arasındaki kot farkı ile ocak içi ve dışı arasındaki sıcaklık farkına bağlı olacaktır. Bu farklar ne kadar büyük olursa doğal havalandırma basıncı da o denli büyük olacaktır. Havanın yoğunluğunda etkili olan faktörler sıcaklık, nem içeriği ve atmosferik basınçtır. Termodinamik bir olay olması nedeniyle kaya sıcaklıkları ve ocaktaki çeşitli açıklıklar arasındaki kot farkı doğal havalandırmanın gücünü belirleyecektir.

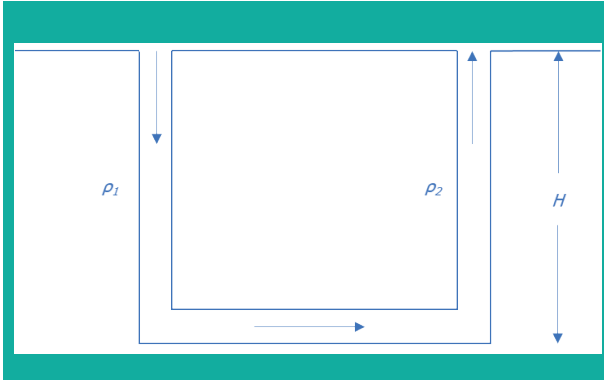
Derinlikleri aynı olan ve ortalama yoğunluğu ( $\rho_{1-ort}$ ) olan bir hava giriş kuyusu ( $Hm$  boyunda) ve ortalama yoğunluğu ( $\rho_{2-ort}$ ) olan bir çıkış kuyusuna sahip bir ocakta (Şekil 3.1); hava kolonunun hava giriş kuyusu dibinde oluşturacağı basınç ( $\rho_{1-ort}gH$ ) olacak ve hava kolonunun hava çıkış kuyusu dibinde oluşturacağı basınç ise ( $\rho_{2-ort}gH$ ) olacaktır. Bu durumda, havanın giriş kuyusundan çıkış kuyusuna doğru hareketini sağlayacak kuyu dipleri arasındaki doğal havalandırma basıncı (DHB, Pa) ise geleneksel olarak Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada,  $g$  yerçekimi ivmesidir ( $m/s^2$ ).

$$DHB = (\rho_{1-ort})gH - (\rho_{2-ort})gH = gH(\rho_{1-ort} - \rho_{2-ort}) \quad (3.1)$$

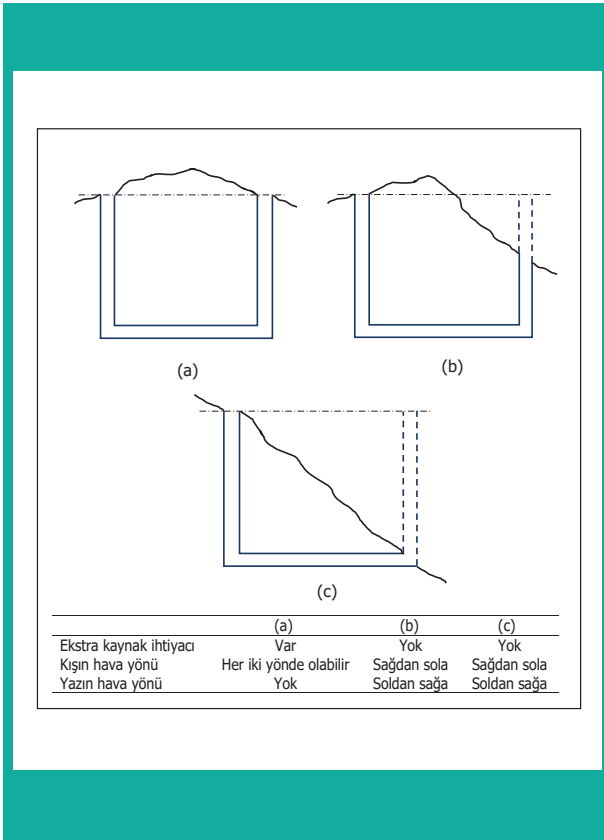
Sıcaklığın havanın yoğunluğunu doğrudan etkilediği düşünüldüğünde (Baris ve Aydin, 2020) bu durumda ocak dışındaki sıcaklığın mevsimsel olarak değişimi doğal havalandırmayı da doğrudan etkileyecektir. Özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında ocak içi sıcaklıklarla ocak dışı sıcaklıklar birbirine yaklaştığından doğal havalandırma nedeniyle oluşan hava akımı azalacaktır. Ayrıca, yaz ve kış aylarında sıcaklıkların ciddi miktarlarda değişmesi doğal havalandırmanın yönünü etkileyecektir. Kış aylarında yüzeydeki sıcaklıklar ocak içindeki sıcaklıklardan düşük olacak ve yazın ise daha yüksek olacaktır. Soğuk hava kolonundaki hava (düşük sıcaklıklara sahip olan) ağır olacak ve sıcak ve daha hafif olan hava kolonundaki havayı hareket ettirecektir. Ocaktaki hava akımı ağır olan kolondan hafif olan kolona doğru oluşacaktır. Şekil 3.2 iki kuyu ve bir bağlantı galerisine sahip üç ocağı ve mevsimlere göre doğal havalandırma nedeniyle oluşan hava akımının yönlerini göstermektedir.



Doğal havalandırma ocaktaki çalışma bölgeleri ve yüzey arasındaki kot farkı ile ocak içi ve dışı arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır.



**Şekil 3.1** Derinlikleri aynı olan iki kuyu ve bir galerinin olduğu bir ocağın şematik gösterimi



**Şekil 3.2** Temel doğal havalandırma sistemlerinden hava akımının yönü (Hartmann vd., 1997'den yeniden oluşturularak)

Bir yeraltı ocağında doğal havalandırmanın ölçülmesi için havalandırma ölçmelerinden faydalanılabilir. Fan tesisinden başlayarak yeraltında yapılacak havalandırma ölçmelerinde, hata ve doğal havalandırma olmadığı durumlarda, toplam basınç düşüşünün sıfır olması gerekmektedir. Eğer ölçümler sonucunda (ölçüm hatası olmadığı varsayılarak) pozitif ya da negatif bir fazlalık çıkmışsa bu durumda bu fazlalık doğal havalandırma basıncı olacaktır.

Doğal havalandırma basıncının ölçülmesine yönelik olarak en sık kullanılan yöntem, ana hava girişi ve çıkışı arasında ocağın tüm havasının geçtiği herhangi bir noktaya bir kapı inşa edilmesi ve fan durdurularak bu kapıda oluşacak basınç farkının bir manometre yardımıyla ölçülmesidir.

Çok çeşitli parametrelerden etkilenmesi nedeniyle doğal havalandırmanın yönü çok nadiren sabit olabilmektedir. Ocağın içi ve dışı sıcaklıkların eşit olduğu durumlarda ise bir hava akımının oluşması mümkün değildir. Yukarıdaki bilgiler ve bu çıkarımlar sonucunda doğal havalandırmanın güvenilir bir havalandırma yöntemi olduğu söylenebilir. Bu nedenle, özellikle yeraltı kömür ocaklarında, doğal havalandırma tek başına kullanılacak bir havalandırma sistemi değildir. Ülkemizde bazı yeraltı metal ocaklarının halen doğal havalandırma ile havalandırıldığı bilinmekle birlikte günümüzde içten yanmalı motorlara sahip ekipman kullanımının yaygınlaşması havalandırma ve dolayısıyla iş sağlığı ve iş güvenliği açısından riskleri beraberinde getirmektedir. Bu nedenle tüm yeraltı ocaklarında mekanik havalandırma sistemlerinin kullanılması iş sağlığı ve güvenliği yönünden bir norm haline gelmelidir.

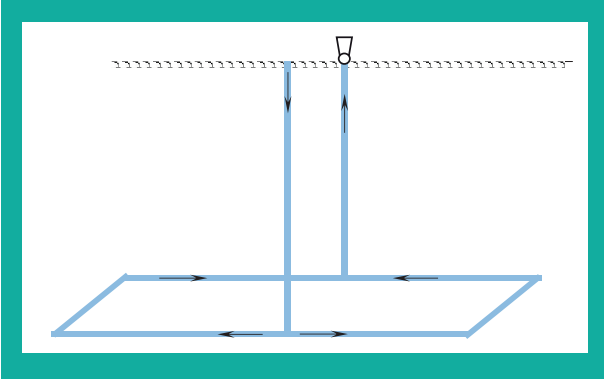
## 3.2 Mekanik Havalandırma

Yeraltı ocaklarında hava akımı "fan" (ülkemizdeki yaygın kullanımı "vantilatör") adı verilen mekanik cihazlarla yapılıyorsa bu havalandırma yöntemine mekanik havalandırma adı verilmektedir. Eğer ana fan ana hava çıkışı yoluna (kuyu, desandre) bağlı ise bu tip havalandırma "emici" olarak adlandırılırken, fan hava giriş yoluna bağlı ise bu durumda "üfleleyici" olarak adlandırılmaktadır.

Mekanik havalandırma kuyularının yerlerine göre *Merkezi* ve *Çevresel* olmak üzere iki türlü uygulanabilmektedir.

### 3.2.1 Merkezi Havalandırma

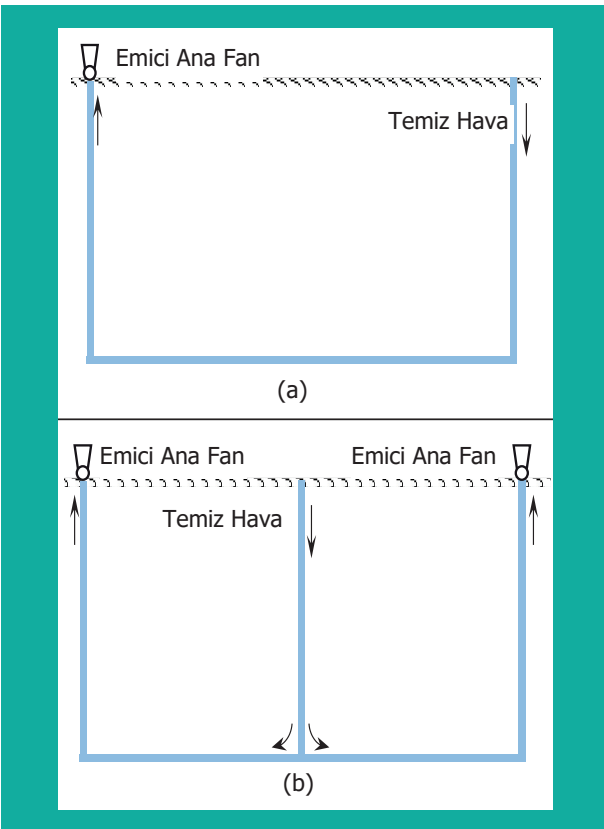
Bu havalandırma türünde hava giriş ve çıkış kuyuları maden yatağının merkezinde olacak şekilde birbirine yakın konumlandırılır (Şekil 3.3). Bu durumda temiz hava, ocağın merkezinden girmekte ve çeşitli çalışmaların yürütüldüğü yeraltı faaliyet noktalarını (galeri hazırlığı, nakliye istasyonu, üretim panosu, aynası vb.) dolaşarak yine merkezde bulunan hava çıkış kuyusundan ocağı terk etmektedir. Bu sistemde yer üstü tesislerinin bir arada olması avantaj olmakta ve sistem ocağın ilk aşamaları için daha uygun olabilmektedir. Ancak, bu sistemde havanın merkezde bulunan çıkış kuyusuna tekrar ulaşması gerektiğinden, özellikle ocak genişledikçe, sistemin direnci artmakta dolayısıyla bu da enerji maliyetini de arttırmaktadır. Kuyular birbirine yakın olduğundan özellikle basıncın en yüksek olduğu kuyularda kısa devre ihtimali bulunmaktadır. Ayrıca, bir kuyuda oluşacak göçük gibi bir kazanın diğer kuyuyu da etkileme riski bulunmaktadır.



Şekil 3.3 Merkezi havalandırma

### 3.2.2 Çevresel Havalandırma

Bu sistemde temiz hava kuyudan girerek yeralti çalışma noktalarına ulaşmakta ve buradan sahanın sınırında bulunan hava çıkış kuyusundan ocağı terk etmektedir (Şekil 3.4a). Bu sistemde kuyular birbirinden uzakta olduğundan bir kuyuda yaşanacak herhangi bir kazadan diğer kuyu etkilenmeyecektir. Sistemde fazla sayıda hava çıkış kuyusunun kullanılması mümkün olabilmekte ve bu da ocak güvenliğini arttırmaktadır (iki yerine üç ya da daha fazla yeryüzü bağlantısı) (Şekil 3.4b). Ocaktaki havalandırma şebekesi daha kısa olacağından ocak direnci düşük olacak ve bu sayede havanın ocağa sağlanması için daha az basınç ihtiyacı duyulacaktır.



Şekil 3.4 Çevresel havalandırma



## 4. TEMEL AKIŞKANLAR MEKANIĞI İLKELERİ VE HAVANIN GALERİ İÇİNDE AKIŞI

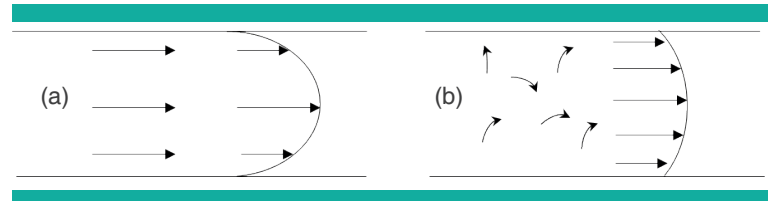
Bir yeraltı ocağında havalandırma ve dolayısıyla havanın akışı ile ilgili doğru yorum yapabilmek ve doğru yaklaşımlar uygulayabilmek ancak akışkanlar mekaniği prensiplerinin iyi anlaşılması ile mümkündür. Havalandırma mühendisliği konusunda çalışma yapacak bir mühendisin hemen hemen tüm mühendislik disiplinlerinin öğretim programlarında yer alan akışkanlar mekaniği konusunda temel bilgiye sahip olması gerekmektedir. Başka bir deyişle akışkanlar mekaniği kurallarının bilinmesi havalandırma teorisinin öncülüdür. Örneğin, bir noktada iki kola ayrılan havayolunda hava, minimum enerji kuralına bağlı olarak akış direnci yüksek olan kola daha az, direnci düşük kola ise daha çok gidecektir; dolayısıyla her iki koldan da eşit miktarda hava iletilmek isteniyorsa direnci düşük kola bir regülatör (ayar vanası mantığında) veya direnci yüksek kola bir güçlendirici tali fan konulması düşünülebilir. Hava her ne kadar bir gaz ve dolayısıyla sıkıştırılabilir olsa da, neredeyse tüm havalandırma hesaplarında sıkıştırılmaz olarak kabul edilmekte ve bu da hesaplamalarda ciddi kolaylık sağlamaktadır.



Akışkanlar mekaniği kurallarının bilinmesi havalandırma teorisinin öncülüdür.

### 4.1 Laminer ve Türbülanslı Akış

Akışkanlar mekaniğinde laminer, türbülanslı (çalkantılı) ve geçiş akışı olmak üzere üç temel akış türü bulunmaktadır. Bu üç tür akış için kesit alanındaki hız dağılımı birbirinden farklı olmakta, dolayısıyla akışkanlar her durumda farklı karakteristikler sergilemektedir. Laminer akışta, akışkan tabakalar halinde akmakta ve hız dağılımı parabolik bir şekil almaktadır (Şekil 4.1a). Türbülanslı akışta ise girdap hareketleri başlamakta ve tabakalar karışmaktadır. Bu akış türünde ise parabolik hız profili düzleşmeye başlamaktadır (Şekil 4.1b). Geçiş akışı ise laminer ve türbülanslı akış arasındaki geçiş bölgesidir.



Şekil 4.1 Bir boru içinde akan akışkanın hız profilleri (a) Laminer ve (b) türbülanslı

Akışın laminer ya da türbülanslı olduğunun belirlenmesi için akışkanlar mekaniğinde Reynolds Sayısı kullanılmaktadır. Osborne Reynolds, 1880'li yıllarda yaptığı deneylerde, akış rejiminin, akışkan üzerindeki atalet kuvvetleri ile akışa karşı koyan vizkozite kuvvetlerinin oranına bağlı olduğunu keşfetmiş ve bu orana Reynolds Sayısı adı verilmiştir (Çengel ve Cimbala, 2006). Dairesel kesitli bir boru içindeki akışa ait Reynolds Sayısı Eşitlik 4.1'deki gibi hesaplanır.

$$Re = \frac{\rho v_{ort} D}{\mu} \quad (4.1)$$

Burada:  $R_e$ , Reynolds sayısını (birimsiz),  $\rho$ , akışkanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v_{ort}$ , akışkanın kesit içindeki ortalama hızını (m/s),  $D$ , boru çapını (m) ve  $\mu$  ise akışkanın dinamik viskozitesini ( $\text{N.s/m}^2$ ) temsil etmektedir.

Dairesel olmayan hava yolu kesitleri için eşitlikteki  $D$  parametresi yerine hidrolik çap ( $D_h$ ) kullanılmaktadır. Hidrolik çap ise Eşitlik 4.2 ile hesaplanabilmektedir.

$$D_h = \frac{4A}{C} \quad (4.2)$$

Burada;  $A$ , kesit alanı ( $\text{m}^2$ ) ve  $C$  ise yolun çevresidir (m).

Reynolds sayısı 2000'den düşükse akış laminar olmakta ve tam olarak bilinmemekle birlikte Reynolds sayısının 3000'den yüksek olduğu durumlarda akış türbülanslı olmaktadır. Bu ikisi arasındaki bölge ise geçiş bölgesini temsil etmektedir.

Reynolds sayısı ile belirlenen akış türü ocak koşullarında havalandırılan yerlerin büyük çoğunluğunda türbülanslı olmaktadır. Hartmann vd. (1997) havalandırma borularında 0.2 m/s'lik bir akış hızının, ocak açıklıklarında ise 0.07 m/s'lik bir hava hızının türbülanslı akış yaratacağını belirtmiştir ( $Re \geq 4000$ ). Ancak, kapılar ve barajlardaki kaçaklar ya da hava yolu direncinin artması nedeniyle ortaya çıkabilecek alternatif akış güzergahları gibi bazı durumlarda akışın laminar olabileceği durumlarda da karşılaşılabileceği unutulmamalıdır.

## 4.2 Bernoulli Eşitliği

Ocak havalandırması genel itibarıyla akış değişkenlerinin zamanla değişmediği bir işlemdir (steady-state process). Bu işlemde geçişler ve enerji kayıpları rol oynamaktadır. Bu enerji kayıpları ise ocak havalandırmasında hava miktarı ve ocak yükü hesaplamalarında temeli oluşturmaktadır. Hareket eden bir akışkanın herhangi bir kesitindeki toplam enerji o kesitteki içsel, statik, hız, potansiyel ve ısı enerjilerinin toplamıdır. Ocak havalandırmasında ısı enerjisi, çok derin ocaklar ya da doğal olarak havalandırılan ocaklar hariç diğer enerjilere göre ihmal edilebilir düzeydedir. Sisteme ek bir enerji de sağlanmadığı varsayımıyla bu durumda A noktasındaki toplam enerji, akışkanın B noktasındaki enerjisi ve A-B noktaları arasında akıştan kaynaklı enerji kayıplarının toplamına eşit olacaktır (Eşitlik 4.3).

$$\text{Toplam Enerji}_A = \text{Toplam Enerji}_B + \text{Enerji kay} \quad A-B \quad (4.3)$$

Bernoulli eşitliğine göre ocak havalandırmasında bu eşitlik, havanın spesifik ağırlığındaki ufak değişimler nedeniyle havanın sıkıştırılmaz olduğu düşünülürken aşağıdaki şekli almaktadır.

$$\frac{p_A}{w} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_A = \frac{p_B}{w} + \frac{v_B^2}{2g} + Z_B + H_k \quad (4.4)$$

Burada;  $p$  basınç,  $w$  spesifik ağırlık,  $v$  hız,  $p/w$  statik enerji,  $v^2/2g$  hız enerjisi,  $Z$  potansiyel enerji ve  $H_k$  ise akış kaynaklı enerji kaybını ifade etmektedir. Bu eşitlikteki tüm parametreler spesifik enerji olduklarından, birimleri metredir ve bu nedenle bu parametrelere genel olarak "yük" adı verilmektedir. Bu durumda Eşitlik 4.4 aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$H_{s_1} + H_{v_1} + H_{z_1} = H_{s_2} + H_{v_2} + H_{z_2} + H_k \quad (4.5)$$

Burada;  $H_s$  statik yükü,  $H_v$  hız yükünü ve  $H_z$  ise potansiyel yükü ifade etmektedir. Ocak havalandırmasında bu yüklerin birimi mm su sütunu (mmss)'dir ve manometre yardımıyla ölçülmektedir. Bu yükleri SI birim sistemine dönüştürmek için  $P = \rho g H$  eşitliği kullanılmaktadır. Burada;  $P$  basınç (Pa),  $\rho$  yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $H$  ise yükü (m) ifade etmektedir.

İki nokta arasında hava akışının oluşması için bu iki nokta arasında basınç farkı olması gerektiğinden ocakların havalandırmasında da basınçlardan çok basınç farkları önemlidir. Ocak havalandırma sistemlerinin amacı, sisteme sağlanacak bir enerji (doğal havalandırma ya da mekanik olarak) ile bu basınç kayıplarının üstesinden gelmektir. Bu enerji "statik basınç" şeklinde olmakta ve kayıplar (sürtünme ve şok) ise bu statik yükte düşüşlere neden olmaktadır (Eşitlik 4.6).

$$P_s = P_f + P_x \quad (4.6)$$

Burada;  $P_s$  statik basıncı (Pa),  $P_f$  sürtünme kaynaklı basınç kayıplarını (Pa) ve  $P_x$  ise şok kayıplarını (Pa) ifade etmektedir.

Ocak havalandırmasında sürtünme kayıpları havanın sabit kesitten akarken kaybettiği yükleri (basınçları) temsil etmekte iken şok kayıpları ise akışın yönünün ya da kesitin alanının değişmesinden kaynaklı kayıplara karşılık gelmektedir. Ayrıca, bir sistemin girişinde (ana hava girişi) ve çıkışında (ana hava çıkışı), havanın kollara ayrılmasında veya iki (ya da daha fazla) hava akışının birleştiği kavşak noktalarında ve havayolunda bulunan engeller nedeniyle de şok kayıpları oluşmaktadır. Bunun yanında, kesit alanı değişimi nedeniyle şok kayıpları oluştuğunda; eğer alan büyüyorsa hız yükü statik yükü dönüşmekte, eğer kesit alanı küçülüyorsa statik yük hız yüküne dönüşmektedir. Bu durumda, statik ve hız yükü birbirine dönüştürülebilir olup esasen bu dönüşüme şok kayıpları eşlik etmektedir.

### 4.3 Ocak Toplam Basıncı (Yükü)

Tek bir fana ya da basınç kaynağına sahip ve tek bir çıkışa sahip bir yeraltı ocağındaki toplam enerji harcamasına “**ocak yükü**” ya da “**ocak toplam basıncı**” adı verilmektedir. Esasen bu kavram Bernoulli prensibine göre belirli miktar havayı ocak içinde hareket ettirmek için ocak girişi ve çıkışı arasında sağlanması gereken yük (basınç) farkını ifade etmektedir. Ocak toplam basıncı Eşitlik 4.7 ile ifade edilmektedir.

$$P_t = P_s + P_v \quad (4.7)$$

Burada:  $P_t$  toplam basıncı (Pa),  $P_s$  statik basıncı (Pa) ve  $P_v$  ise hız basıncını (Pa) ifade etmektedir.

Yeryüzüne ulaşan hava kinetik enerjisini atmosfere bırakacağından ocak hız basıncı ( $P_v$ ) ocak havalandırmasında bir kayıp olarak kabul edilmektedir. Ocak hız basıncı Eşitlik 4.8 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$P_v = \rho \frac{v^2}{2} \quad (4.8)$$

Burada;  $\rho$  havanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $v$  ise havanın hızını (m/s) temsil etmektedir.

### 4.4 Sürtünme Kaynaklı Basınç Kayıpları (Pf)

Bir hava yolundan akan bir akışkanın hava yolu içinde hareket ederken sürtünme kaynaklı kaybettiği yük Chezy-Darcy eşitliği ile bulunabilmektedir.

$$H_f = \frac{4fLv^2}{2gD} \quad (4.9)$$

Burada;

- $H_f$  : sürtünmeden kaynaklı yük kaybını (m)
- $f$  : Chezy-Darcy sürtünme katsayısını (birimsiz)
- $L$  : havayolunun uzunluğunu (m)
- $D$  : havayolunun çapını (m)
- $v$  : hava hızını (m/s)
- $g$  : yerçekimi ivmesini ( $\text{m/s}^2$ ) ifade etmektedir.

Yük (m) olarak ifade edilen bu eşitliğin basınç birimine dönüştürülmesi için Eşitlik 4.10 kullanılmalıdır.

$$P = \rho g H_f \quad (4.10)$$

Bu durumda Eşitlik 4.9 aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$P_f = \frac{4fL}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11'in yuvarlak kesitli olmayan hava yolları için genelleştirilmesi gerekmektedir. Hidrolik yarıçap

$$r_h = \frac{A}{C} = \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4} \quad (4.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $A$  hava yolunun kesit alanını ( $\text{m}^2$ ) ve  $C$  ise çevresini (m) temsil etmektedir.

Bu durumda Eşitlik 4.11'de  $4/D$  terimi yerine  $C/A$  terimi yazılırsa bu durumda eşitlik aşağıdaki şekle dönüşmektedir. Eşitliğin birimi ise Pa'dır.

$$P_f = fL \frac{C}{A} \rho \frac{v^2}{2} \quad (4.13)$$

Bu eşitlik sürtünme kaynaklı basınç kaybı ve hava miktarı ilişkisi açısından da ifade edilebilir. Bunun için  $v$  yerine  $Q/A$  yazılırsa bu durumda eşitlik

$$P_f = \frac{fL}{2} \frac{C}{A^3} \rho Q^2 \quad (4.14)$$

şekline dönüşmektedir. Burada  $Q$ , hava miktarını ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) temsil etmektedir.

#### 4.4.1 Atkinson Eşitliği ve Karesel Kanun (Square Law)

Atkinson, yeraltı ocaklarında hava akışının davranışını tanımlamak için Eşitlik 4.14'te verilen Chezy-Darcy eşitliğini kullanmıştır. Araştırmacı, bu eşitlikteki sürtünme katsayısının sabit olduğunu ve aynı zamanda ocaklar günümüze oranla nispeten sığ derinliklerde olduğundan hava yoğunluğunun da fazla değişmeyeceğini öngörmüştür. Bu düşünceden hareketle Atkinson, Chezy-Darcy eşitliğindeki sabitleri Eşitlik 4.10'daki gibi tek bir faktör (*Atkinson Sürtünme Faktörü,  $\text{kg/m}^2$* ) olarak tanımlamıştır. Burada önemli bir nokta Atkinson sürtünme faktörünün havanın yoğunluğuna bağlı olmasıdır. Ocak şartlarında, özellikle derin ocaklarda, hava yoğunluğunun değiştiği durumlarda Atkinson sürtünme faktörü ( $k$ ) havanın yoğunluğuna göre ayarlanmalıdır.

$$k = \frac{f\rho}{2} \quad (4.15)$$

Bu durumda Eşitlik 4.9'da görülen Chezy-Darcy eşitliği aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$P_f = kL \frac{C}{A^3} Q^2 \quad (4.16)$$

Bu eşitlik ocak havalandırmasında “**Atkinson Eşitliği**” ve “**k**” faktörü ise “**Atkinson Sürtünme Faktörü**” olarak bilinmektedir.

Bir havayolu için kesit alanı ( $A$ ), boy ( $L$ ) ve çevre ( $C$ ) parametreleri bilinmektedir. Sürtünme faktörü ( $k$ ) ise sadece hava yolu kaplamasının pürüzlülüğüne bağlı olduğundan bu parametreler tek bir karakteristik parametre ( $R$ ) olarak ifade edilebilir.

$$R = kL \frac{C}{A^3} \quad (4.17)$$

ve bu durumda Chezy-Darcy eşitliği

$$P_f = RQ^2 \quad (4.18)$$

şekline dönüşmekte ve birimi Pascal (Pa) olmaktadır. Bu eşitlik ocak havalandırmasında “**karenel kanun**” olarak bilinmektedir. Eşitlikteki “**R**” parametresi “**Atkinson direnci**” olarak bilinmekte olup birimi N.s<sup>2</sup>/m<sup>8</sup> ya da kg/m<sup>7</sup>’dir ve “**gaul**” olarak adlandırılır.

Atkinson direncinin birimi bazı kaynaklarda “**murgue**” cinsinden yazılmakta ve hesaplamalarda karışıklığa yol açmaktadır. Bu karışıklığın giderilmesi için iki birimin birbirine dönüştürülmesinin anlaşılması gerekmektedir.

1 gaul, içinden 1 m<sup>3</sup>/s hava geçen (ρ=1.2 kg/m<sup>3</sup>) bir hava yolunda 1 Pa basınç düşüşüne neden olan direnç olarak tanımlanmaktadır. 1 murgue (μ) ise, içinden 1 m<sup>3</sup>/s hava geçen bir hava yolunda 1 g/m<sup>2</sup> basınç düşüşüne neden olan direnç olarak tanımlanmaktadır (g/m<sup>2</sup>) ifadesindeki gram (g) parametresi kuvveti (gf) ifade etmekte olup ağırlık birimi olarak düşünülmemelidir. P=RQ<sup>2</sup> eşitliğinden murgue (μ) un esas itibarıyla gs<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>’e eşit olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda;

$$1\text{murgue} = \frac{1\text{gs}^2}{\text{m}^8} = \frac{1\text{gs}^2}{\text{m}^8} \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \frac{9.8\text{N}}{1\text{kg}} = (9,8) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^8}$$

Yani gaul’u murgue cinsinden ifade etmek için gaul değerinin yerçekimi ivmesi (9.81 m/s<sup>2</sup>) ile çarpılıp 1000’e bölünmesi gerekmektedir. Bir diğer ifadeyle, gaulu kilomurgue (κμ) olarak ifade etmek için yerçekimi ivmesine bölmek gerekmektedir (1 κμ = 9.81 gaul).

#### 4.4.2 Atkinson Sürtünme Faktörünün Belirlenmesi

Atkinson sürtünme faktörünün havalandırma için önemi, bir yeraltı açıklığının yüzeylerindeki pürüzlülüğün, o açıklığın direnci ve dolayısıyla içinden geçen hava miktarıyla doğrudan ilişkili olmasıdır. Bu anlamıyla, sürtünme katsayısı *f*, ya da sürtünme faktörü *k*, planlanmış ancak inşa edilmemiş bir yeraltı açıklığının direncinin tahmin edilmesi için kullanılmaktadır.

Atkinson sürtünme faktörünün belirlenmesi için en etkili ve kesin yol benzer hava yollarında yapılacak P-Q (basınç-hava miktarı) ölçümleridir (Bölüm 5). P-Q ölçümlerinde belirli bir hava yolu için sürtünme faktörü değeri belirlenerek bu faktör, bu hava yola benzeyen ya da benzeyecek yollar (tahkimat, yüzey kaplaması vb. benzer olan) için kullanılabilir. Yapılan ölçümlerden sonra sürtünme faktörü (*k*) daha önce verilen Eşitlik 4.16 kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir. Zira bu eşitlikte sürtünme faktörü (*k*) dışındaki tüm değişkenler bilinmektedir. Bu hesaplamalarda, varsa, hava yoğunluğundaki değişimlerinin hesaplamaya dahil edilmesi unutulmamalıdır (Bu durumda aşağıdaki eşitlik 1.2/ρ ile çarpılmalıdır).

$$k = \frac{P_f A^3}{CLQ^2} \quad (4.19)$$

Bu şekilde bulunan sürtünme faktörü (*k*) değerleri gerçek değerler olacağından diğer yöntemlere göre daha doğru sonuçlar verecektir. Ayrıca, sürtünme faktörünün bu şekilde tespit edilmesi havalandırma ölçmelerinde işleri kolaylaştırmakta zira bu durumda benzer hava yollarında basınç ölçümlerine gerek kalmamaktadır.

Henüz inşa edilmemiş hava yollarında yukarıda anlatılan yolla sürtünme faktörünün (*k*) tespiti mümkün olmayacağından, endüstride sıklıkla kullanılan yöntem sürtünme faktörünün (*k*) abaklar yardımıyla belirlenmesidir. Bu abaklar, uzun yıllardan beri yeraltında yukarıda anlatılan şekilde yapılan ölçümlerin bir raporlaması olarak değerlendirilebilir. Bu yöntem, elde herhangi bir veri bulunmadığı durumlarda oldukça pratik olabilmektedir. Çizelge 4.1’de çeşitli hava yolları için sürtünme faktörleri (*f*) ve katsayıları (*k*) değerleri verilmiştir.

#### 4.4.3 Hava Yollarının Direnci

Daha önce verilen Eşitlik 4.17 ve Atkinson eşitliği (Eşitlik 4.18) dikkatlice incelendiğinde hava yolu direncinin yeraltı ocak havalandırmasında büyük öneme sahip olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Her iki eşitlik de esas itibarıyla matematiksel eşitlikler olsa da bu eşitliklerdeki değişkenlerin fiziksel yorumlamalarına önem verilmelidir. Atkinson eşitliği basit olarak,

$$P = RQ^2$$

şeklinde ifade edilmekte ve görüleceği üzere bir hava yolunun direnci (*R*), esas itibarıyla o yoldaki sürtünme kaynaklı basınç düşüşü (*P*) ve hava yolunda geçen hava miktarının (*Q*) karesi ile orantılı bir parametredir. Bunun yanı sıra, bir yoldan belirli miktar bir havayı geçirmenin maliyeti doğrudan o yolun direncine bağlıdır. Sürtünme kaynaklı basınç kaybına (*P*) karşılık hava miktarı (*Q*) grafiği çizildiğinde bu parabolik bir eğri olmakta ve direnci temsil etmektedir. Bu eğriye “**karakteristik eğri**” adı verilmektedir. Karakteristik eğri tek bir hava yolu için çizilebileceği gibi bir ocak kesimi ya da tüm ocak için de çizilebilmektedir. Bir ocak kesimi ya da tüm ocak için karakteristik eğrinin çizilebilmesi için ocak kesimine ya da ocağa ait eşdeğer direncin (*R<sub>es</sub>*) bulunması gerekmektedir. Ocağa istenen hava miktarının sağlanması ocak karakteristik eğrisi kullanılarak yapılabilmektedir. Çeşitli direnç değerlerine karşılık çizilmiş örnek bir eğri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere direnç değerleri arttıkça karakteristik eğriler dikleşmekte ve dolayısıyla yüksek dirence sahip hava yollarından geçen hava miktarı azalırken bu havayı o hava yolundan geçirmek için ihtiyaç duyulacak basınç yükselmektedir. Örneğin, 0,05 gaul dirence sahip bir hava yolundan 100 Pa basınçta yaklaşık 45 m<sup>3</sup>/s hava geçirmek mümkünken 1 gaul dirence sahip bir hava yolundan 100 Pa basınçta ancak 10 m<sup>3</sup>/s’lik bir hava geçirmek mümkün olabilmektedir.

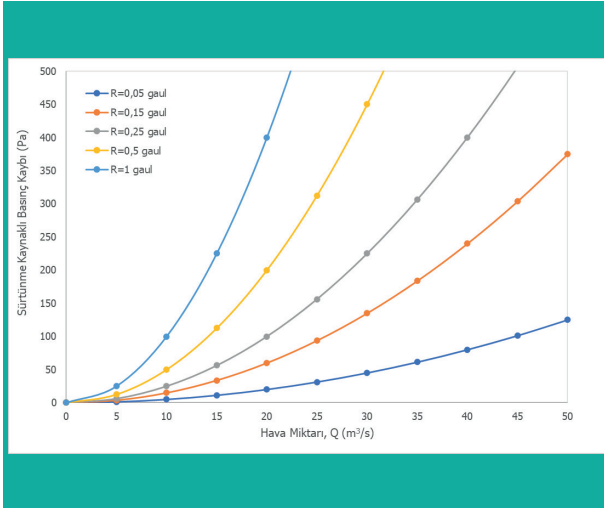
**Çizelge 4.1** Çeşitli ocak açıklıklarında sürtünme katsayıları (f) ve sürtünme faktörü (k) değerleri (McPherson, 1993).

	Sürtünme Katsayısı (f) (birimsiz)	Sürtünme Faktörü (k) (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>
<b>Dikdörtgen kesitli hava yolları</b>		
Düzgün beton tahkimatlı	0.0067	0.0040
Püskürtme betonlu	0.0092	0.0055
Küçük düzensizlikler bulunan, kaplanmamış	0.0150	0.0090
Beton ya da sıva üstüne boyunduruk	0.0158	0.0095
Kaplanmamış, tipik koşullar, büyük düzensizlikler yok	0.0200	0.0120
Kaplanmamış, düzensiz yan duvarlar	0.0230	0.0140
Kaplanmamış, pürüzlü ya da düzensiz koşullar	0.0270	0.0160
Yan direkler ve boyunduruk	0.0320	0.0190
Pürüzlü yan duvarlar ve düzensiz taban koşullarına sahip lağım	0.0670	0.0400
<b>Demir bağ tahkimatlı hava yolları</b>		
Her tarafı düzgün betonlu	0.0067	0.0040
Tüm bağların arası tuğla döşeli	0.0100	0.0060
Boşluklu fırçalanmış	0.0125	0.0075
Bağların arkası boşluklu	0.0200	0.0120
Bağlar kötü hizalanmış, pürüzlü koşullar	0.0270	0.0160
<b>Kuyular</b>		
Düzgün kaplanmış, engel yok	0.0050	0.0030
Tuğla döşeli, engel yok	0.0067	0.0040
Beton kaplama, halat, boru	0.0108	0.0065
Tuğla kaplama, halat, boru	0.0125	0.0075
Kaplamasız, yüzey düzgün	0.0167	0.0100
Kaplamasız, önemli düzensizlikler giderilmiş	0.0200	0.0120
Kaplamasız, hasır ve kaya saplama	0.0230	0.0140
<b>Çelik (zincirli) konveyör ve yürüyen tahkimatlı uzunayak</b>		
İyi koşullar, düzgün	0.0580	0.0350
Tipik koşullar, konveyörde kömür	0.0830	0.0500
Pürüzlü koşullar, eşit olmayan ayak hattı	0.1080	0.0650
<b>Havalandırma boruları<sup>b</sup></b>		
Katlanabilir fantüp <sup>c</sup> (sadece üfleyici sistemlerde kullanılabilen)	0.0062	0.0037
Esnek fantüp <sup>c</sup> (spiral yayla güçlendirilmiş; büzüşmeyen)	0.0180	0.0110
Fiberglas boru	0.0040	0.0024
Galvanizli çelik boru	0.0035	0.0021

<sup>a</sup> Sürtünme faktörü değerleri 1.2 kg/m<sup>3</sup> hava yoğunluğuna göre dir.

<sup>b</sup> Bu değerler yeni malzemeler için tipik değerler olup üretici firmadan doğru değerlerin temin edilmesi gerekmektedir. Aşınmış ve kullanılmış havalandırma boruları için bu değerlerin %20 fazlası kullanılmalıdır.

<sup>c</sup> Hazırlık galerisi havalandırmalarında ya da istenen özel bir noktaya bir tali vantilatör yardımıyla havanın iletilmesinde kullanılan, genelde dokuma (tekstil) takviyeli PVC'den imal edilen esnek hava iletim tüpleridir. Katlanabilir tipte olanlar sadece üfleyici fanlarla birlikte kullanılabilirler. Fantüplerin emici modunda çalışabilmesi için spiral yayla takviye edilen ve yaratılan vakumla büzüşmeyen çeşitleri mevcuttur.



**Şekil 4.2** Çeşitli direnç değerleri için çizilmiş karakteristik eğriler.

Bir hava yolunun direncinin hangi koşullarda değiştiğini ve bu değişimlerin hava yolu direncini nasıl etkilediğini anlayabilmek için daha önce de verilen [Eşitlik 4.17](#)'yi dikkatle incelemek gerekmektedir.

$$R = kL \frac{C}{A^3} \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17'den görüldüğü üzere bir hava yolunun direncini, dolayısıyla havalandırma maliyetini azaltabilmek için ya sürtünme faktörünün azaltılması, ya boyun kısaltılması ya da kesit alanının genişletilmesi gerekmektedir. Pratikte boyun kısaltılması mümkün değildir. Zira açılan yolların uzunlukları sabittir. Sürtünme faktörünün azaltılabilmesi içinse hava yolunun pürüzlülüğünün azaltılması gerekmektedir. Bu bazı durumlarda mümkün olsa da (örneğin ana yolların püskürtme beton kaplanması) çoğu durumda tüm ocaktaki açıklıkların pürüzlülüğünü azaltmak pek de mümkün değildir. Halihazırda çalışan bir ocakta hava yollarının kesit alanlarını genişletmek ise hem zaman hem de maliyet açısından neredeyse mümkün değildir. Ancak, yeraltı açıklığı çevresinde gelişen uyarılmış gerilmeler nedeniyle meydana gelen kesit daralmaları (konverjans) hava yollarının planlama aşamasında tasarlanan kesit alanlarından küçük kesit alanlarına yol açtığından bu kesimlerin taranmasıyla tekrar tasarım kesit alanlarına büyütülmesi havalandırma açısından önemli olabilmektedir.

Eşitlik 4.17'den görüldüğü üzere, belirli bir uzunluğa (L) ve sürtünme faktörüne (k) sahip olan bir hava yolunda direnç (R),  $C/A^3$  ile orantılıdır. Herhangi bir şekil ya da kesit alanı için çevre (C) ise  $\sqrt{A}$  ile orantılı olduğundan bu durumda  $R \propto \frac{1}{A^{2.5}}$  olmaktadır. Eğer hava yolu dairesel ise (alan (A) çapın (d) karesi ile orantılı olduğundan) bu durumda  $R \propto \frac{1}{d^5}$  olacaktır. Bu durumda, dairesel bir hava yolunda çap değişirse direnç, çapın 5nci kuvvetiyle orantılı olacaktır.

Bu noktadan hareketle, örneğin tali havalandırmada 1200 mm çapında bir fantüp yerine aynı boy ve sürtünme faktörüne sahip 600 mm çapında bir fantüp kullanılırsa (çap yarıya düşürülürse) bu durumda 600 mm çapındaki fantüpün direnci 1200 mm çapındakine göre  $2^5=32$  kat daha fazla olacaktır. Direnç 32 kat artarsa bu durumda havalandırma için gerekli basınç ve dolayısıyla fanın işletilmesinde tüketilen enerji miktarındaki artış sonucu havalandırma maliyeti de 32 kat fazla olacaktır. Bu örnekten açıkça görüldüğü üzere yeraltı ocaklarında açıklıkların kesit alanlarının geniş tutulması esas itibarıyla direncin azalmasını ve daha az havalandırma maliyetini beraberinde getirecektir. Tasarım açısından düşünüldüğünde hava yollarının tasarımları sadece havalandırma düşünülerek yapılmadığından diğer maliyetler de göz önüne alınarak optimum kesit alanları tasarlanmalıdır.

## 4.5 Şok Nedeniyle Oluşan Basınç Kayıpları (Px)

Havanın yön değiştirmesi, kesit alanındaki değişimler, havanın kollara ayrılması ya da kollardan geçen havanın birleşmesi gibi durumlarda havanın mekanik enerjisinde kayıplar olmakta ve bu durumlarda direnç ciddi oranlarda artabilmektedir. Yeraltı ocaklarında bu koşullar, dönüşlerde, kavşaklarda, kesit alanının değiştiği yerlerde, hava yolunda engeller bulunduğu (malzeme, vagon, bant konveyör vb.) ve ocağın giriş ve çıkışlarında ortaya çıkmaktadır. Şok kayıpları iki yöntemle hesap edilebilmektedir.

McElroy (1935), şok kaybının miktarının ( $P_x$ ), hız basıncı ( $P_v$ ) kullanılarak hesaplanabileceğini belirtmiştir. Buna durumda şok kayıpları Pa cinsinden Eşitlik 4.19 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$P_x = X P_v = X \rho \frac{v^2}{2} \quad (4.19)$$

Burada; X, şok faktörünü (birimsiz),  $\rho$ , havanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) ve v ise ortalama hava hızını (m/s) ifade etmektedir.

Eşitlikten görüldüğü üzere şok kayıpları hesap edilirken şok faktörü X'in bilinmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Şok faktörlerinin seçimi için en kapsamlı kaynaklardan bir tanesi Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneğinin yayımladığı el kitabıdır (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE, HVAC Fundamentals Handbook). Bunun yanı sıra McPherson (1993) de çeşitli durumlardaki şok faktörlerinin hesaplanmasına değinmiştir. Şok kayıpları hesaplandıktan sonra genellikle akış yönündeki diğer kola

ekleme yapılmalıdır. Bunun nedeni ise şok kaybına yol açan etkenden oluşan girdapların akış yönünde ilerlemesi ve ek direnç yaratmasıdır. Yeraltı ocaklarında çok çeşitli kesit şekilleri bulunması nedeniyle şok faktörlerinin yukarıdaki kaynaklardan belirlenmesi güç olabilmektedir. Zira bu kaynaklarda verilen şok faktörleri çoğu durumda dikdörtgen ve dairesel kesitli yollar için verilmekte, örneğin at nalı şeklinde bir kesit için şok faktörünün hesaplanması zor olabilmektedir.

Şok kayıplarının hesaplanabilmesi için ikinci yöntem ise “eşdeğer uzunluk” yöntemidir. Bu yöntemde, oluşan şok kayıpları uzunluk cinsinden ifade edilerek ( $L_e$ ), Eşitlik 4.17’de verilen Atkinson direnci formülündeki L uzunluğuna eklenmektedir. Direnç bulunduktan sonra ise  $P=RQ^2$  eşitliğinden şok kayıpları basınç (Pa) cinsinden hesaplanabilmektedir. Böylece hem sürtünmeden kaynaklı

basınç farkı ( $P_f$ ) hem de şok nedeniyle oluşan basınç kaybı ( $P_x$ ) tek bir formülde ifade edilmiş olmakta ve hava yoluna ait statik basınç kaybı ( $P_s$ ) hesaplanabilmektedir (Eşitlik 4.20).

$$P_s = P_f + P_x = \frac{k(L + L_e)C}{A^3} Q^2 \quad (4.20)$$

Esasen eşdeğer uzunlukların belirlenmesi için şok faktörü ( $X$ )’in bulunmasına ihtiyaç duyulmakta ise de literatürde yeraltı ocaklarında sıklıkla karşılaşılan şok kayıpları için eşdeğer uzunluklar çizelgeler halinde bulunabildiğinden bu yöntem ilk yöntemle göre daha pratiktir. Çeşitli şok kayıplarına karşılık gelen eşdeğer uzunluklar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2** Çeşitli şok kayıpları için eşdeğer uzunluklar (Hartmann vd., 1997)

Kaynak	Eşdeğer Uzunluk ( $L_e$ ) (m)	Kaynak	Eşdeğer Uzunluk ( $L_e$ ) (m)
Dar açılı, kurbalı (virajlı, kavisli) dönüş	1	Kademeli daralma	1
Dar açılı, keskin dönüş	45	Ani daralma	3
Dik açılı, kurbalı dönüş	1	Kademeli genişleme	1
Dik açılı, keskin dönüş	20	Ani genişleme	6
Geniş açılı, kurbalı dönüş	1	Kola ayrılma - düz kol	10
Geniş açılı, dik dönüş	5	Kola ayrılma ayırık kol (90°)	60
Kapı	20	Kol birleşmesi-düz kol	20
Giriş	6	Kol birleşmesi-ayırık kol	10
Çıkış	20	Ocak arabası ya da kafes (skip) (kesit alanının %20’si)	30
		<b>Ocak arabası ya da kafes (kesit alanının %40’ı)</b>	<b>150</b>



## 5. HAVALANDIRMA ÖLÇÜMLERİ



Yeraltı ocaklarında yapılacak ölçümlerle havalandırma sisteminin sağlıklı çalışıp çalışmadığı, değişikliklerin hangi etkilere yola açtığı ya da açacağıın belirlenmesi çok önemlidir.

Binalarda kullanılan havalandırma sistemleri ile yeraltı ocaklarındaki havalandırma şebekeleri arasındaki temel fark, binalardaki havalandırma sistemlerinin aksine yeraltı ocaklarındaki havalandırma koşullarının dinamik olması ve şebekedeki dirençlerin sürekli olarak değişmesidir. Bu nedenle yeraltı ocaklarında yapılacak ölçümlerle havalandırma sisteminin sağlıklı çalışıp çalışmadığı, değişikliklerin hangi etkilere yola açtığı ya da açacağıın belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu sayede; tüm çalışma bölgelerine yeterli hava sağlanıp sağlanmadığı belirlenebilmekte, havalandırma planları güncel tutulabilmekte ve havalandırma şebekesinde hava yönlerinin ve miktarlarının arzu edilen seviyelerde olup olmadığı tespit edilebilmektedir.

Yeraltı ocaklarında havalandırma koşullarına yönelik olarak yapılacak bir ölçümün temel amacı, ana akış yollarındaki hava akımlarının, basıncın ve hava kalitesinin havalandırma sistemi içindeki dağılımını tespit etmektir. Bunun yanı sıra, hava kapıları ve barajlardaki basınç farklarının ölçülmesi de amaçlar arasındadır.

Hava akış yönü ve hava akımlarının büyüklüğü belirlendikten sonra yeraltı ocakları için en gerekli ölçümler, hava ve kayaç sıcaklığının yanı sıra hava kapıları ve barajlar üzerindeki basınçlardır. Mekanik olarak havalandırılan yeraltı ocaklarında havalandırma ekipmanının performans verilerinin belirlenmesi ve hava akışı ile ilgili hesaplamaları yapabilmek için hava yollarının fiziksel karakteristiklerinin elde edilmesi temel amaçtır. Buna yönelik olarak temel havalandırma ölçümleri üç ana grupta sınıflandırılabilir:

1. Hava Miktarı Ölçümleri
2. Basınç Ölçümleri,
3. Sıcaklık-Nem Ölçümleri

Bir yeraltı ocağında yapılacak havalandırma ölçmelerinin temel amacı; havalandırma şebekesinin ana kollarındaki sürtünme kaynaklı basınç düşüşlerinin ( $P_s$ ) ve kollardaki hava miktarlarının ( $Q$ ) belirlenmesidir. Yapılan ölçümlerle bu veriler elde edildikten sonra planlama ya da kontrol amaçlı olarak aşağıdaki parametreler bulunabilmektedir (McPherson, 1993).

1. Hava akımlarının dağılımı, basınç düşüşleri ve kaçaklar,
2. Hava gücü kayıpları ( $P \times Q$ ) ve dolayısıyla şebeke boyunca havalandırma işletme maliyetleri,
3. Sistemin hacimsel (volümetrik) verimi,
4. Kol dirençleri ( $R = P/Q$ )
5. Doğal havalandırma etkileri,
6. Sürtünme faktörleri.

## 5.1 Hava Miktarı Ölçümleri

Hava miktarı ölçümleri genel olarak hava yolunun kesit alanının ve o noktada hava hızının ölçümünden oluşmaktadır. Ölçüm yapılacak yerler tüm ana hava giriş ve dönüş yolları ile iş yerlerindeki hava akış debisinin belirlenmesine izin verebilecek şekilde seçilmelidir. Ölçüm için seçilen yerlerde hava akışında hızlı değişimler, ani türbülanslar yaratacak etkilerin olmamasına ve hava akışının kesit boyunca düzenli olabileceği yerlerin seçilmesine dikkat edilmelidir. Bunun yanı sıra hava hızı ölçümü yapılacak noktada kesit alanının da kolaylıkla belirlenebilecek olması da göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun için ölçüm noktasının doğru ölçülebilecek kesite sahip (hava kapısı, dikdörtgen ya da kare kesitli beton kaplamalı vb.) bölgelerde seçilmesi pratik açıdan önemlidir. Modern haritacılık donanım ve yazılımlarının net havayolu kesit alanını ve şeklini belirleyecek imkanlar sunduğu da unutulmamalıdır.

Hava hızının ( $v$ , m/s) ve kesit alanının ( $A$ , m<sup>2</sup>) belirlenmesinden sonra  $Q = v \times A$  eşitliği kullanılarak hava miktarı ( $Q$ , m<sup>3</sup>/s) hesaplanabilmektedir.

Hava hızının ölçümü için çeşitli ölçüm ekipmanları mevcuttur. Bunlar; anemometre, velometre, pitot tüpü, rotametre ve kata termometresidir. Pratik olarak kullanılabilirleri ve yeraltı ocaklarında doğru sonuçlar vermeleri açısından bu rehberde kanatlı anemometre ve pitot tüp ile hava hız ölçümleri üzerinde durulacaktır.

### 5.1.1 Kanatlı Anemometre ile Hava Hızı Ölçümü

Yeraltı ocaklarında hava hızı ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan yöntem kanatlı anemometre (pratikte anemometre) kullanımınıdır. Bu yöntemde temel olarak hava, cihazın pervanesinden geçerken pervanesinin belirli bir açısal hızla dönmesine neden olmakta ve bu açısal hız ise havanın hızıyla orantılı olmaktadır. Mekanik anemometrelerde (Şekil 5.1a) genellikle cihazın üzerinde bir kronometre ve bir ölçüm kadranı bulunmakta ve belirli bir zamanda havanın kaç metre ilerlediği tespit edilebilmektedir. Düşük hava hızları (0.25 m/s – 15 m/s) için kullanılan anemometreler genellikle 8 kanatlı iken daha yüksek hava hızları ( $\leq 50$  m/s) için kullanılan anemometreler 4 kanatlı olarak imal edilmektedir.

Günümüzde mekanik anemometreler yerini dijital anemometrelere bırakmıştır (Şekil 5.1b). Bu cihazlar hava hızı ölçümlerini yaparak okunan değeri bir ekran üzerinde gösterme kabiliyetine sahiptirler. Modern dijital anemometrelerde kesit alanı girilerek okunan hava hızı değerlerinin anında hava miktarına dönüştürülmesi de mümkün olabilmektedir. Okunan değerler cihazın hafızasında da saklanabilmekte ve doğrudan bilgisayar ortamına aktarılabilir. Bazı dijital anemometre

modelleri hava sıcaklığını da ölçebilmektedir. Kömür ocaklarında kullanılacak anemometrelerin alev sızdırmaz (intrinsically safe / Ex Proof) özellikle olması gerekmektedir.



**Şekil 5.1.** Anemometre türleri (a) mekanik (Carroll Technologies Group, 2022) ve (b) dijital (Alnor, 2022)

Esas itibarıyla basit bir alet olmasına karşın anemometre ile hava hız ölçümlerinin dikkatli bir şekilde yapılmaması durumunda ölçümlerde ciddi hatalar yapılabilmektedir. Zira her ölçüm noktasında yapılacak ölçüm hataları toplamda büyük ölçüm hatalarına yol açacak ve bu nedenle ocaktaki hava dağılımı yanlış belirlenecektir. Ölçüm hatalarının en aza indirilmesi için ölçümler sırasında anemometre hava akımına dik bir şekilde tutulmalı, anemometre ile ölçüm yapacak kişi hava akımını engellemeyecek bir pozisyonda durmalıdır. Bunun için anemometre genellikle bir uzatma çubuğuna bağlanmakta ve böylece cihaz, ölçüm yapan kişinin vücudundan uzakta tutularak kişinin hava akımına engel olması engellenmektedir. Ayrıca, hava hızı ölçümü yapılacak noktada kesit alanını daraltan ya da hava akımını ani şekilde etkileyecek engellerin de bulunmaması gerekmektedir.

Anemometre ile yapılacak hava hızı ölçümlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için tek nokta ve dolaştırma yöntemi olmak üzere iki teknik bulunmaktadır. Her iki yöntemde de anemometre okumaları üretici firma tarafından sağlanan kalibrasyon eğrisi ya da düzeltme faktörlerinden faydalanılmalıdır. Ayrıca hava yoğunluğunda oluşacak değişim nedeniyle de Eşitlik 5.1 kullanılarak anemometre okumaları düzeltilmelidir.

$$v = v_i + C_c \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_m}} \quad (5.1)$$

Burada;  $v$  düzeltilmiş hava hızını (m/s),  $v_i$  anemometre okumasını (m/s),  $C_c$  aletin kalibrasyon tablosu ya da grafiğinden okunan düzeltme faktörünü,  $\rho_c$  kalibrasyon

sırasındaki hava yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $\rho_m$  ise ölçüm sırasındaki hava yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) temsil etmektedir.

#### Tek Nokta Ölçümü

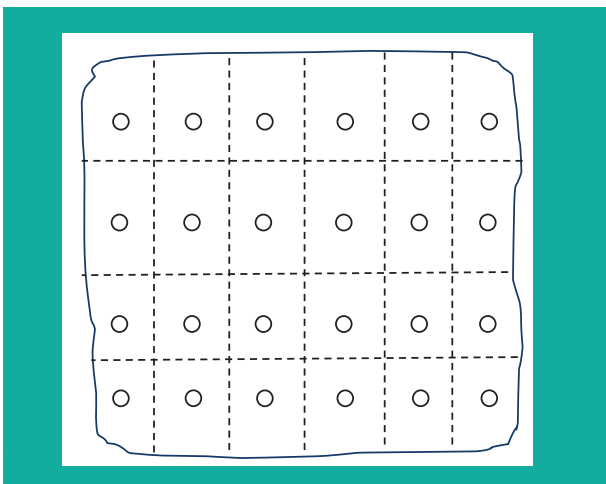
Bu yöntem, kesit alanı içinde tek bir noktada yapılan ölçüme göre kesitteki ortalama hava hızının elde edildiği en kolay ve en hızlı yöntem olmasına karşın hataya da en müsait olanıdır. Bu yöntemde anemometre kesit alanının tam merkezinde tutulmakta ve ölçülen değer ise 0,8 ile çarpılarak kesitteki ortalama hava hızı elde edilmektedir. Bu yöntemle düzenli bir kesite sahip ve düz hava yollarında doğruya yakın sonuçlar almak mümkündür. Yeraltı ocak şartlarında hava yollarının kesit alanlarındaki düzensizlikler göz önüne alındığında hava hızının bu yöntemle doğru ve tekrarlanabilir şekilde ölçülmesi pratikte pek de mümkün değildir. Bu nedenle bu yöntem hızlı ve yüzeysel bir kontrol için yapılacak ölçümlerde uygundur.

#### Dolaştırma Yöntemi

Bu yöntemde hava hızı, anemometrenin galeri kesitinde hareket ettirilmesiyle ölçülmektedir. Bu amaçla anemometre, uzunluğu galeri kesitinin büyüklüğüne göre belirlenecek bir uzatma çubuğuna bağlanarak kullanılmaktadır.

Dolaştırma yöntemi "eşit alanlar" ve "sürekli dolaştırma" olmak üzere iki türlü uygulanabilmektedir. Eşit alanlar yönteminde galeri kesiti eşit alanlardaki hayali kesitlere bölünmekte ve her alanın orta noktasında anemometre (ya da pitot tüp) ile ölçüm yapılmaktadır (Şekil 5.2). Ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması ise galerideki ortalama hava hızı değerini vermektedir.

Bu yöntemde özellikle yan cidarlara, tavana, tabana yakın yerlerde ve köşelerde hava dağılımı kesitin diğer kısımlarından farklı olacağından ölçüm doğruluğunu arttırmak adına bu bölgelerde daha fazla sayıda ölçüm yapmak yerinde olacaktır. Ölçüm noktalarının sayısı kesitin şekline göre değişmekle birlikte 24'ten az olmamalıdır.



Şekil 5.2 Sabit nokta dolaştırma yöntemi

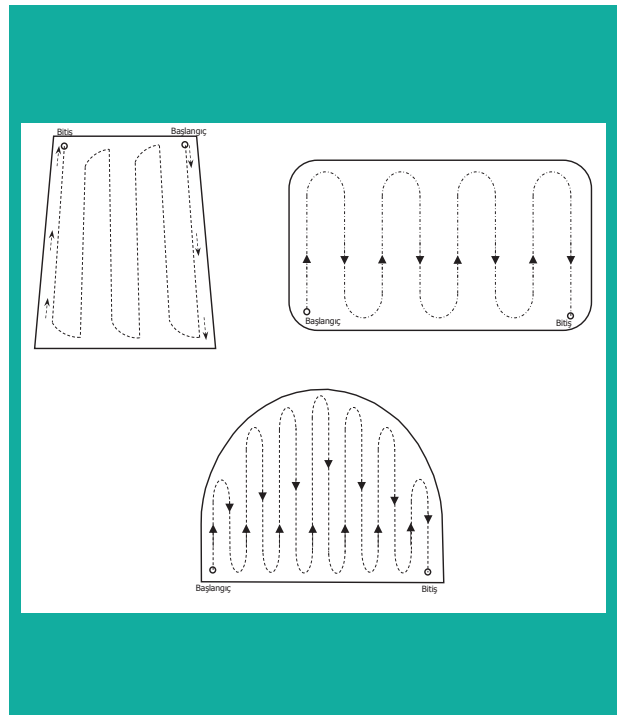
#### Sürekli Dolaştırma (Travers) Yöntemi

Bu yöntem tüm dünyada yeraltı maden ocaklarında yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde anemometre, genellikle boyu galeri yüksekliğine göre seçilen bir uzatma çubuğuna bağlanmakta ve galerinin bir kenarından başlanarak galeri cidarlarına paralel olacak şekilde galeri kesiti içinde dolaştırılmaktadır.

Ölçümler sırasında ölçüm yapan kişi anemometreyi kendisine doğru olacak şekilde (hava akımına dik) vücudundan en az 1.5 m uzakta tutarak ölçüme başlamalıdır. Ölçümlere başlamadan önce anemometre galerinin alt ya da üst köşesinde tutulmalı ve anemometrenin pervanesi sabit bir hızda dönmeye başlanana kadar kronometre (ya da cihaz reset [sıfırlama] konumunda tutulmalıdır) çalıştırılmamalıdır.

Galeri kesitinde anemometrenin dolaştırılacağı hayali güzergah galeri cidarlarına paralel olarak belirlenmelidir. Dolayısıyla farklı geometrilerde dolaştırma güzergahları da farklılık gösterecektir. Şekil 5.3 bazı galeri kesitlerine göre dolaştırma güzergahlarını göstermektedir.

Dolaştırma işleminin süresi galeri büyüklüğüne göre değişmektedir. McElroy (1935) 3 m<sup>2</sup>'lik bir açıklık için bu sürenin 1 dakika olması gerektiğini, 10 m<sup>2</sup>'lik bir açıklık içinse 3 dakikalık bir dolaştırma süresinin kabul edilebilir sonuçlar verdiğini rapor etmiştir. McPherson (1993) ise anemometre dolaştırma hızının galerideki hava hızının %15'inden fazla olmaması gerektiğini ayrıca dolaştırma süresinin hiçbir koşulda 60 saniyeden az olmaması gerektiğini belirtmiştir. Buna göre, örneğin hava hızının 1 m/s olduğu bir noktada anemometre dolaştırma hızı 0.15 m/s'den fazla olmamalıdır.



Şekil 5.3 Bazı galeri kesitlerinde dolaştırma güzergahları

Sürekli dolaştırma yönteminde anemometre ile elde edilen ortalama hız değerlerinin doğruluğunun onaylanması için ilk ölçümün başlangıç noktası ikinci ölçümün bitiş noktası olacak şekilde arka arkaya üç ölçüm yapılmalı ve ölçümler sonunda elde edilen hız değerlerinin en fazla  $\pm\%5$  farklılık göstermesi gerekmektedir. Hava hızı ölçümleri ocaktaki çeşitli etkenlerden (bir hava kapısının açılması, galerideki engeller, taban kabarması vb. gibi düzensizlikler) etkileneneği için ölçüm noktalarının mümkün olan en uygun yerlerde seçilmesi önem arz etmektedir.

### 5.1.2 Pitot Tüp ile Hava Hızı Ölçümü

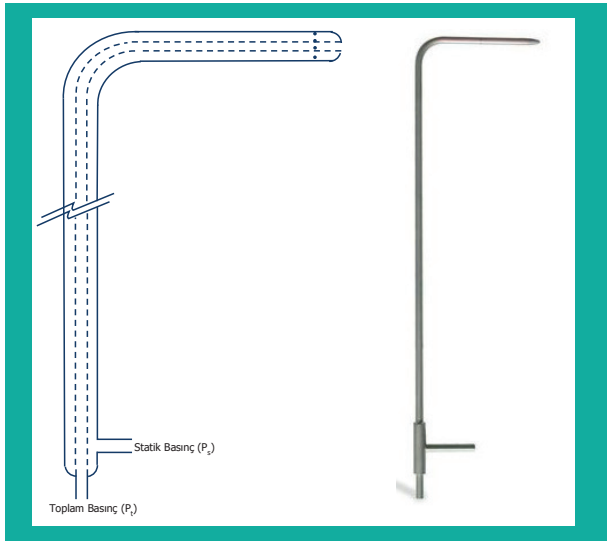
Pitot tüp esas itibarıyla havanın statik basıncını ve toplam basıncını ölçmek için kullanılan bir alettir. Bir pitot tüp iç içe geçmiş iki borudan oluşmaktadır (Şekil 5.4). Doğrudan hava akımına karşı tutulduğunda içteki boru hava akımının toplam basıncına ( $P_t$ ) maruz kalmaktadır. Dıştaki boru üzerinde ise çap boyunca küçük delikler bulunmaktadır. Bu delikler hava akımına dik olduğundan havanın kinetik enerjisine maruz kalmamakta ve bu durumda hava akımının statik basıncını ( $P_s$ ) algılamaktadır. Pitot tüpünün iki ucuna bağlanan bir diferansiyel manometrede okunan değer ise hız basıncını ( $P_v$ ) vermektedir (Eşitlik 5.2).

$$P_v = P_t - P_s \quad (5.2)$$

Hız basıncı,  $P_v$  ölçüldükten sonra hava hızı ise önceki bölümde verilen Eşitlik 4.8 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$v = \sqrt{\frac{2P_v}{\rho}}$$

Burada;  $v$  hava hızını (m/s),  $P_v$  hız basıncını (Pa) (manometreden) ve  $\rho$  ise hava yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) temsil etmektedir.



Şekil 5.4 Pitot-statik tüp

Yeraltı ocaklarında hava hızı ölçümleri için kullanılan pitot tüplerinin galeri kesitine uygun boyda seçilmesi gerekmektedir. Bunun için genellikle 1.5m boyunda bir pitot tüp yeterli olmaktadır. Bunun yanı sıra günümüzde boyu istenen uzunlukta ayarlanabilen (teleskopik) pitot tüpler de pratikte oldukça kullanışlı olabilmektedir.



Şekil 5.5 Bir teleskopik pitot tüp (Dwyer, 2022a)

Pitot tüp hareket etmeyen parçalardan oluşması açısından oldukça sağlam ve doğru sonuçlar veren bir alettir. Sonuçların doğruluğu genellikle kullanılan diferansiyel manometrenin hassasiyetine bağlıdır. Ayrıca, pitot tüp hava yönüne de oldukça hassastır. Doğru ölçümler yapabilmek için pitot tüpünün ucu hava akımına paralel olarak tutulmalıdır.

## 5.2 Basınç Ölçmeleri

Yeraltı ocaklarında basınç ölçümlerinin amacı ölçüm yapılan hava yollarında ortaya çıkan sürtünmeden kaynaklı basınç düşüşlerinin ( $P_f$ ) ölçülmesidir. Buna yönelik olarak kullanılan iki temel yöntem bulunmaktadır. Manometrik ölçümlerin yapıldığı doğrudan yöntemde, iki istasyonda bulunan manometreler bir lastik hortum ile birbirine bağlanmakta ve istasyonlar arasındaki sürtünme kaynaklı basınç düşüşü ölçülmektedir. İkinci yöntem olan dolaylı yöntemde ise her noktada bir barometre ya da altimetre yardımıyla mutlak basınçlar ölçülmekte ve barometre ile ölçülen değerler çeşitli parametrelere göre ayarlanmakta ve düzeltilmektedir. Barometre ya da altimetre ile yapılan ölçümler çeşitli etkenlerden etkilenmediği için doğrudan yöntem (manometre-hortum yöntemi) daha doğru sonuçlar vermektedir.

### 5.2.1 Manometre-Hortum Yöntemi

Bu yöntemde iki nokta arasındaki sürtünmeden kaynaklı basınç kaybı iki pitot tüp ve bir manometre yardımıyla doğrudan ölçülebilmektedir. Teorik olarak iki nokta arasındaki basınç farkı Eşitlik 5.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_{12} = \rho_a F_{12} = \rho_a \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + \rho_a (H_1 - H_2)g - (P_2 - P_1) \quad (5.3)$$

Burada;  $P_{12}$  1 ve 2 noktaları arasındaki basınç farkını (Pa),  $\rho_a$  havanın ortalama yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  hava hızını (m/s),  $H$  ölçüm noktasının kotunu (elevasyonunu) (m) ve  $g$  ise yerçekimi ivmesini ( $\text{m/s}^2$ ) temsil etmektedir.

$$\frac{\rho_a V^2}{2} = P_v \text{ (hız basıncı) ve } \rho_a gH + P = P_s \text{ (statik basınç) olduğundan Eşitlik 5.3 yeniden yazılırsa}$$

$$P_{12} = (P_{v_1} + P_{s_1}) - (P_{v_2} - P_{s_2}) \text{ ve dolayısıyla}$$

$$P_{12} = P_{t_1} - P_{t_2} \text{ olacaktır.}$$

Yani; iki nokta arasındaki ortalama hava yoğunluğuna göre sürtünmeden kaynaklı basınç kaybı 1 noktasındaki toplam basınç ile 2 noktası arasındaki toplam basınç arasındaki fark olacaktır. Eğer standart hava yoğunluğuna karşılık oluşan basınç kaybı bulunmak istenirse bu durumda aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$P_{12} \text{ (düzeltmiş)} = 12 \frac{\rho_{st}}{\rho_a} \quad (5.4)$$

Manometre-hortum yönteminde diferansiyel bir manometre ile iki nokta arasındaki basınç farkı doğrudan ölçülebileceği ve herhangi bir ek hesaplama gerektirmediği için bu yöntem doğrudan yöntem olarak adlandırılmaktadır.

Bu yöntemde bir diferansiyel manometre kullanılarak manometrenin yüksek basınç ve düşük basınç uçlarına yaklaşık iki pitot statik tüpün "toplam basınç uçları" lastik hortumlarla bağlanarak ölçüm yapılan iki nokta arasındaki sürtünme kaynaklı basınç farkı ölçülebilmektedir. Bu iş için genellikle boyu 300 m'ye kadar uzun olabilen ve kullanılan manometrenin girişlerine uygun çapta sağlam, esnek ve kolay yıpranamayacak tipte bir hortum kullanılmaktadır.

Bu yöntemde kullanılan manometreler analog olabileceği gibi günümüzde analog manometreler yerini dijital diferansiyel manometrelere bırakmıştır (Şekil 5.6). Bu manometreler genellikle yüksek hassasiyette ölçüm yapabilmekte ve ölçülen değerleri de kaydedebilmektedir.



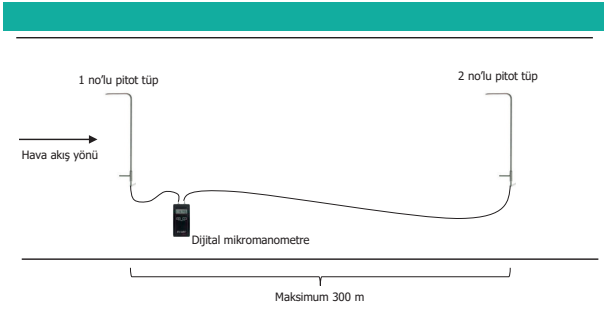
Şekil 5.6 Bir dijital diferansiyel manometre (Dwyer, 2022b)

#### Ölçüm Prosedürü

Bu yöntemde ölçüm için genellikle iki kişiye ihtiyaç bulunmaktadır. Ölçüm prosedürü aşağıdaki gibidir.

- Öncelikle hortum ölçüm istasyonları arasına yayılır. Kullanılacak hortumun boyu uzun olduğundan, hortumun rahatlıkla yayılması, toplanması ve hareket ettirilebilmesi için bir makara sistemi kullanılması uygun olacaktır. Daha sonra hortumun bir ucu öndeki pitot tüpünün (şekilde solda), diğer ucu da arkadaki pitot tüpünün "toplam basınç" ucuna bağlanır. Her iki pitot tüpünün uçları da hava akışının tam olarak pitot tüpüne girebilmesi için hava akış yönüne paralel olarak tutulmalıdır (Şekil 5.7).
- Ölçümler sırasında pitot tüpler gözlemcilerin vücudundan uzakta ve hava yolunun yüksekliğinin yarısı ile 2/3'ü arasında tutulmalıdır (kesitin ağırlık merkezine yakın).
- Yüksek basınç tarafındaki pitot tüpün toplam basınç ucuna bağlı hortum dijital manometrenin yüksek basınç ucuna ve düşük basınç tarafındaki pitot tüpün toplam basınç ucuna bağlı hortum ise dijital manometrenin düşük basınç ucuna bağlanır. Eğer manometrede negatif basınç ölçülüyorsa manometreye bağlı hortumların uçları yer değiştirilmelidir.
- Hortumlar manometreye bağlandıktan sonra manometre sıfırlanmalı ve ölçüm boyunca manometrenin dijital ekranında ölçülen basınç değeri sabitlenene kadar beklenmelidir. Bu işlem hortumun uzunluğuna ve çapına bağlı olarak değişmekte ancak genellikle 2 ila 3 dakika kadar sürebilmektedir.

- e. Ölçüm bittiğinde öndeki gözlemci ölçüm istasyonunu işaretlemeli, arkadaki gözlemciye işaret vererek bir sonraki istasyona doğru ilerlemelidir. Bu esnada arkadaki gözlemci de öndeki gözlemciyle ilerlemeye başlamalı ve öndeki gözlemcinin işaretlediği istasyonda durmalı ve aynı işlem sırasıyla bir sonraki ana istasyona (kavşak) kadar ölçüme devam edilmelidir.
- f. Ölçümler sırasında seçilen güzergahta hava kapısı varsa hava kapısının iki tarafındaki basınç farkının da ölçülmesi gerekmektedir. Bunun için ayrıca, 2-3 metre boyunda bir hortum bulundurulması uygun olacaktır. Hava kapılarında sadece statik basıncın ölçülmesi yeterli olmakta, (varsa) kaçak hava akımından etkilenmemesi için pitot tüpün toplam basınç ucu kapatılmalıdır.
- g. Basınç ölçümleri sırasında kesitten geçen hava miktarı ( $Q$ ), barometrik basınç, yaş ve kuru sıcaklıklar da ölçülmeli ve kaydedilmelidir.



**Şekil 5.7** Manometre-hortum yöntemi için oluşturulacak düzenek

Bu ölçüm yöntemi yükseklikteki ufak değişimlerden, psikrometrik parametrelerden ya da bağımsız hava ölçümlerinden etkilenmemektedir. Pitot tüpü, naylon bağlantı hortumu ve manometreden başka bir ekipmana ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak bu yöntem eğer doğru planlanmazsa oldukça zor ve kullanışsız olmaktadır. Her bir hava yolu kavşaktan kavşağa ölçülmeli ve bu da eğer hortum boyu uygun olmazsa zorluklar yaratmaktadır. Bu ölçüm yöntemiyle sürtünmeden kaynaklı basınç kayıplarını 1 Pa'a kadar ölçmek mümkündür.

## 5.2.2 Barometrik Yöntem

Bir yeraltı hava yolunun iki noktasında barometrelerle mutlak statik basınçlar ölçülürse, bu iki ölçüm arasındaki fark istasyonlar arası kot farkına, hava hızlarına ve mevcut hava akışı koşullarında iki istasyon arasındaki sürtünme kaybına bağlı olacaktır. Kot ve hava hızları ayrı ayrı ölçülebildiğinden barometrik okumalar iki nokta arasındaki sürtünme kayıplarını belirlemek için kullanılabilir. Bu yöntemde Bernoulli eşitliğinden yola çıkarak önce

Eşitlik 5.5 (Hall, 1981) kullanılarak sürtünmesiz basınç kaybı ( $P_{2calc}$ ) hesaplanmakta ve daha sonra Eşitlik 5.6 kullanılarak iki nokta arasındaki basınç farkı ( $P_{12}$ ) hesaplanmaktadır.

$$P_{2calc} = P_2 \frac{2P_1 + Dg\rho_1}{2P_2 - Dg\rho_2} \quad (5.5)$$

$$P_{12} = P_{2calc} - P_2 \quad (5.6)$$

Burada;  $P_{2calc}$  1 ve 2 noktaları arasındaki sürtünmesiz basınç kaybını (Pa),  $P_1$  ve  $P_2$  1 ve 2 noktalarında ölçülen barometrik basınçları (Pa),  $D$  iki nokta arasındaki kot farkını (m) ve  $\rho_1$  ve  $\rho_2$  ise 1 ve 2 noktalarındaki hava yoğunluklarını ( $\text{kg/m}^3$ ) göstermektedir. Hava yoğunluğunun hesaplanabilmesi için kuru sıcaklık ile yaş sıcaklık ya da doğrudan bağıl nemin de ölçülmesi gerekmektedir. Hava yoğunluğunun hesabı için Davis (1992) ve Picard vd. (2008)'in çalışmalarından yararlanılabilir.

### Ölçüm Prosedürü

Yeraltında bir barometrik ölçüm yapabilmek için ölçüm ekibinin yanında iki barometre, bir psikrometre, iki kol saati, iki anemometre, 2m'lik bir şerit metre, iki not defteri ve istasyonları işaretlemek için iki kutu spreyci boyalar bulundurulmalıdır.

Ölçüm istasyonları için genellikle ana kavşakların seçilmesi uygun olacaktır. Barometrik ölçüm için iki teknik bulunsa da "sıçramalı teknik (leapfrog)" ile daha düzgün ölçümler yapmak mümkündür. Bu yöntemde ardışık istasyonlarda iki barometre ile aynı zamanda ölçümler yapılmaktadır. Her ölçümden sonra ilk barometre bir sonraki istasyondaki barometrenin yanına getirilmekte ve her iki barometrenin eş ölçümler yaptığı test edilmektedir. Daha sonra barometre bir sonraki istasyona götürülmekte ve ölçümlere devam edilmektedir.

Ölçüm yapılan her bir istasyonda; tarih, barometre kimliği ve gözlemcinin ismi, istasyonun numarası ve yeri, zaman, barometre okuması, yaş ve kuru sıcaklıklar ile anemometre okumaları kayıt edilmelidir. Her bir istasyonun lokasyonu havalandırma planına işlenmeli ve istasyonun kotu belirlenmelidir. Barometreler mümkünse galeri tabanından 0,5 m yükseklik içinde konumlandırılır. Anemometre ile hava hızı ölçümleri barometrenin lokasyonda konumda yapılmalıdır.

### Örnek:

Yeraltında eğimli bir hava yolu üzerinde iki istasyonda yapılan barometrik ölçümlerden elde edilen değerler Çizelge 5.1'de verilmiştir. İstasyon A -260 katında ve İstasyon B ise -360 katındadır. Hava yolundan geçen hava miktarı  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Bu bilgilere göre hava yolunun ölçüm yapılan kesimindeki basınç düşüşünü ve direncini bulunuz.

**Çizelge 5.1** Barometrik basınç ölçümü sonuçları.

İstasyon	Kot (m)	Barometrik Basınç (Pa)	Bağlı Nem (%)	Hava Yoğunluğu (hesaplanmış) (kg/m <sup>3</sup> )
A	-260	103525	86,84	1,232
B	-360	104610	81,30	1,246

Buna göre, Eşitlik 5.5'ten

$$P_{Bcalc} = P_B \frac{2P_A - Dg\rho_A}{2P_B - Dg\rho_B} = 104610 \frac{2(103525) + (100)(9,81)(1,232)}{2(104375) - (100)(9,81)(1,246)} = 104978 Pa$$

Bu durumda A ve B noktaları arasındaki basınç farkı Eşitlik 5.6'dan

$$P_{AB} = P_{Bcalc} - P_B = 104,978 - 104,610 = 368 Pa \text{ olarak bulunmuştur. Burada D'nin ölçülen iki nokta arasındaki kot farkı olduğuna dikkat edilmelidir.}$$

Eğer hava yolundan geçen hava miktarı 25 m<sup>3</sup>/s ise  $P = RQ^2$ 'den

$$R = (368) / (15^2) = 0.59 \text{ Gaul olarak bulunur.}$$

### 5.3 Basınç-Hava Miktarı Ölçümlerinin Planlanması ve Organizasyonu

Basınç ölçmeleri, bir yeraltı ocağının havalandırma sisteminin 3 boyutlu havalandırma simülasyon yazılımları ile gerçeğe yakın ve doğru modellenebilmesi, havalandırma sisteminin performansının doğru izlenmesi ve sistemde yapılacak değişikliklerin sonuçlarını önceden kestirebilmek için son derece önemlidir. Bu nedenle basınç-hava miktarı ölçümleri son derece iyi planlanmalı ve organize edilmelidir.

Havalandırma ölçümleri genellikle zaman alan bir aktivite olduğundan ve ocak büyüklüğüne göre harcanacak zaman da fazla olacağından ölçümlere başlanmadan önce havalandırma planı dikkatle incelenmelidir. Orta ve büyük ölçekli ocaklarda ocakta bulunan tüm açıklıklarda ölçüm yapmak genellikle mümkün olmayacaktır. Bu nedenle bu tür ocaklarda yapılacak ölçüm güzergahları her bir yeryüzü bağlantısını ve tüm ana hava yollarını içermelidir. Ana güzergahlar dışında farklı galeriler/çalışma alanlarında ölçüm yapmak verilerin artırılması adına olumludur. Güzergahlar seçilirken seçilen güzergahların havalandırma şebekesinde bir kapalı döngü oluşturmasına (ölçümlerin başladığı noktaya dönen) dikkat edilmelidir. Büyük ocaklarda ana ölçüm rotalarının tek bir ölçümde ölçülmesi mümkün olmayacağından bu durumlarda ana güzergahlar kendi içinde daha küçük kapalı güzergahlara bölünmelidir.

Ölçümlere başlanmadan önce ölçüm yapılacak **güzergah önceden gezilmeli ve istasyonlar ayarlanmalıdır**. Özdeş hava yolları varsa (taban yolları, paralel sürülmüş ana yollar, desandreler vb.) ve ölçümler manometre-hortum yöntemiyle yapılacaksa bu durumda bu tür yolların sadece bir tanesinde basınç farkı ölçüm yapmak yeterli olacak ancak bu yollardaki hava miktarı ölçümleri ise ayrı ayrı yapılacaktır. Bu amaçla hava miktarı ölçümü yapılacak istasyonlar da önceden belirlenmiş ve hazırlanmış olmalıdır.

Yeraltı ocaklarındaki koşullar dinamik olduğundan havalandırma sisteminde bir vardiya içinde hatta çok kısa sürelerde bile önemli değişiklikler olabilmektedir. Ölçümler sırasında **bir hava kapısının açılması, kafes, vagon gibi ekipmanın hareketi, ocak yollarında direncin değişmesi gibi sebeplerle havalandırma sisteminde ciddi farklılıklar yaşanabilmektedir**. Bu nedenle, **havalandırma ölçümlerinin hafta sonlarında ya da ocağın çalışmadığı, ocakta az kişinin bulunduğu tatil günlerinde gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır**.

Havalandırma ölçmeleri yöntem itibarıyla basit prosedürlerden oluşsa da pratikte ölçümler sırasında çeşitli sorunlar yaşanabilmekte ve ölçümlerin doğruluğu olumsuz etkilenebilmektedir. Bu nedenle, havalandırma ölçümlerini yapacak ekibin tecrübeli olması, bu rehberde anlatılan teknik kavram ve detaylara hakim olması önemlidir. Bir galeride yapılan hava ölçümlerinin zaman kaybı olarak görülmesi ve dolaştırma yöntemi yerine galeri kesitinde tek bir noktada yapılması, ölçümlerin üstün körü yapılarak yuvarlak rakamların elde edilmesi gibi ülkemizde sıklıkla yapılan hatalar sonucunda elde edilen hava hızı verileri çok hatalı sonuçlara yol açmakta ve ocak güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Zira  $P = RQ^2$  eşitliğine hâkim olmayan ya da eşitliği sadece bir formül olarak gören ve önemsemeyen bir ölçüm ekibi, basınç kaybının hava miktarının karesi ile orantılı olduğunu gözden kaçırarak ve ocakta hava hızı ile kesit alanı ölçümünde yapılacak küçük hataların bile çok hatalı hava miktarı ölçümlerine sebebiyet vereceğinin farkında olmayacaktır.



## 6. KÖMÜR VE METAL MADEN OCAKLARINDA HAVALANDIRMA PLANLAMASI

Rehberin daha önceki bölümlerinde bahsedilen havalandırmanın genel prensipleri hem metal hem de kömür ocaklarına uygulanabilir niteliktedir. Havalandırma açısından kömür ocakları ve metal ocakları madencilik yöntemleri ve ocak atmosferine yayılan kirlilikler açısından farklılık göstermektedir. Bu bölümde bu farklılıklar üzerinde durulacaktır.

Yeraltı ocaklarında havalandırma planlaması, üretim hedeflerinin gerçekleştirilmesi ve operasyonların sağlıklı ve güvenli şekilde sürdürülebilmesi için öncelikli olarak ocak planlaması aşamasında dikkate alınması ve eş zamanlı olarak yürütülmesi gereken bir kavramdır. Henüz planlama aşamasında bulunan yeraltı ocaklarında havalandırma dikkate alınmadan yapılan ocak planları, ocağın ömrü boyunca ciddi iş sağlığı ve güvenliği sorunlarını beraberinde getirebilmekte, üretim ve zaman kayıplarına yol açabilmektedir. Örneğin, havalandırma gereksinimleri dikkate alınmadan planlanan bir ocakta, piyasa koşullarındaki değişiklikler ve üretilen cevhere artan talep gibi sebeplerle yeni bir panonun üretime alınması ocağa sağlanan hava miktarı yetersiz olduğundan mümkün olamayabilmektedir. Bunun yanı sıra, planlama aşamasında havalandırma ihtiyaçlarının doğru belirlenmemiş olması nedeniyle ocağa hava sağlayan ana fan/fanların kapasiteleri yetersiz olabilmekte ve artan ihtiyaçları karşılamak için büyük maliyetler altına girilerek ana fan/fanların kapasitelerinin artırılmasına ihtiyaç duyulabilmektedir.

Havalandırma planlaması, birçok parametrenin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir iştir. Modern havalandırma planlamasında geleneksel tekniklerin kullanımının yanı sıra günümüzde bilgisayar yazılımları kullanılmakta ve bu yazılımların doğru kullanımı ise planlama aşamasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bir yeraltı ocağının havalandırma planlaması yapılırken öncelikli iş, ocağa ait temel şebekenin oluşturulmasıdır. Bu noktada özellikle havalandırma ölçmelerinden elde edilecek verilerin temel şebekede kullanılması planlama açısından son derece önemlidir. Eğer ocak henüz planlama aşamasında ise bu durumda ocak planları da dikkate alınarak alternatif havalandırma planlarının oluşturulması gerekmektedir. Tüm planlama ekibi bir araya gelerek alternatifler üzerinde tartışmalı ve tüm madencilik faaliyetleri açısından en makul, uygulanabilir ve az maliyetli bir plan üzerinde mutabık kalınmalıdır.

Bir yeraltı ocağında havalandırma planlamasında gerekli adımları gösteren akış şeması Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere bir yeraltı ocağının havalandırma planlaması birçok aşamadan oluşmakta ve planlamanın doğru yapılabilmesi için çok sayıda veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Planlama aşamalarının her birinin üzerinde ciddiyetle durulmalı, ihtiyaç duyulan tüm veriler hassas bir biçimde ölçülmeli (ya da hesaplanmalı) ve kullanılmalıdır. Bu verilerin elde edilmesi için harcanacak zaman ve maliyet, işletme faaliyetlerine başlamadan önce dikkate alınmalı ve planlanmalıdır. Havalandırma planlaması aşamasında yapılacak hataların ya da dikkate alınmayan parametrelerin ocağın ömrü boyunca onarılması güç sorunlara yol açacağı ve busorunların sonradan düzeltilmesinin oldukça zor olacağı unutulmamalıdır.



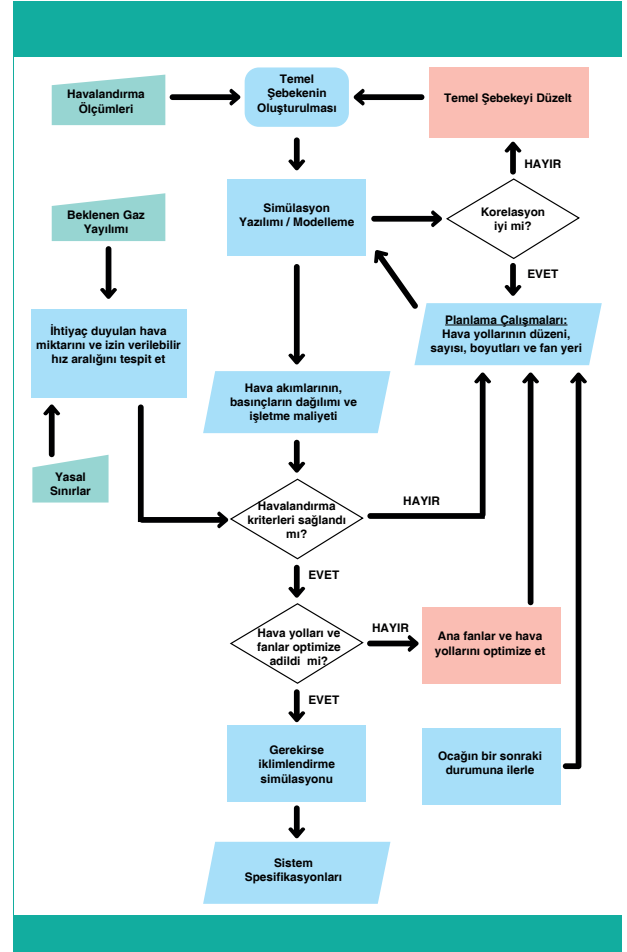
Yeraltı ocaklarında havalandırma dikkate alınmadan yapılan ocak planları, ocağın ömrü boyunca ciddi iş sağlığı ve güvenliği sorunlarını beraberinde getirebilmekte, üretim ve zaman kayıplarına yol açabilmektedir.

Madencilik yönteminin seçimi esas itibarıyla cevherin yatağının oluşumu ve yayılımı ile ilişkili olduğundan ve bu da doğrudan havalandırma sistemi tasarımını etkileyeceğinden, kömür ve metal madenciliğinde karakteristik farklar ortaya çıkmaktadır. Kömür yatakları genel itibarıyla görece olarak düşük eğimlerde ve tabakalı yapıda oluşmasına karşın, metal yatakları yeraltında çok farklı geometri ve eğimlerde bulunmaktadır. Metal yataklarında karşılaşılan bu değişkenlik ise kömür yataklarına nazaran çok fazladır. Çoğu kömür yatağının aksine metal madenciliğinde karşılaşılan yataklar düşeyde yayılım gösteren, masif yapı ve dik eğimlerde oluşmuştur. Bu nedenle metal madenciliğinde uygulanan madencilik yöntemleri kömür ocaklarına göre çok farklı olabilmektedir. Ancak, yatakların benzer olduğu koşullarda hem kömür hem de metal madenciliğinden kullanılan havalandırma sistemleri de benzerlik gösterebilmektedir.

Kömür ve metal ocakları, ocak atmosferine yayılan kirlilikler bakımından da karakteristik farklılıklar göstermektedir. Kömür madenciliğinde temel atmosfer kirleticisi metan ( $CH_4$ ) olduğundan ve bu gazın patlayıcı özellikte olması nedeniyle yapılacak havalandırma tasarımlarında metanın güvenli bir konsantrasyona seyreltilmesi ve bu konsantrasyonun ocakta herhangi bir tehlikeye mahal vermeyecek şekilde kontrol altında tutulmasını sağlayacak sistemler oluşturulmaya çalışılmaktadır. Çoğu durumda kömür ocaklarına metan gazı ile mücadele için sağlanacak temiz hava miktarı ile ocak atmosferindeki diğer kirleticilerin (kömür tozu, patlayıcı maddeden kaynaklı gazlar ve dizel egzozlardan ocağa yayılan kirleticiler) de seyreltilmesi mümkün olmaktadır.

Metal ocaklarında ise genel itibarıyla patlayıcı bir atmosferin oluşması nadiren görülmekte ancak kömür ocaklarına kıyasla ocak atmosferinde daha fazla kirletici bulunabilmektedir. Özellikle yoğun dizel ekipman kullanımı nedeniyle bu ekipmanın egzozlarından ortama yayılan zehirli gazlar, kanserojen maddeler (dizel partikül madde) ve ısı bu tür ocakların havalandırma tasarımında ana kriter konumundadır.

Yukarıda sayılan sebeplerden dolayı kömür ocakları ve metal ocaklarının havalandırma sistemlerinin tasarımında farklı kriterler bulunmaktadır. Bu farklılardan biri de havanın yeniden kullanımı ile ilişkilidir. Kömür ocaklarında metan varlığı nedeniyle kirli havanın doğrudan başka bir yeraltı çalışma noktasına iletilmesi ya da seyreltilerek tekrar kullanılması metanın potansiyel olarak patlayıcı bir ortam yaratabilecek olması nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği açısından uygun değildir. Oysa metal ocaklarında oksijenin yeteri miktarda yüksek olması ve kirleticilerin düşük konsantrasyonlarda bulunması koşulu ile havanın kontrollü bir şekilde yeniden kullanılması mümkün olabilmektedir. Bunun yanı sıra, yeraltı metal ocaklarında kol (tali) vantilatörü (yükseltici - booster fan) kullanımı yaygın olarak kullanılırken kömür ocaklarında bu yöntem tercih edilmemekte hatta ABD gibi ülkelerde yasaklanmış durumdadır.



Şekil 6.1 Bir yeraltı ocağının havalandırma planlamasındaki aşamalar (McPherson, 1993'ten değiştirilerek)

## 6.1 Temel Havalandırma Şebekesinin Oluşturulması ve Korelasyonu

Yeraltı ocaklarında havalandırma planlamasındaki ilk aşama temel havalandırma şebekesinin oluşturulmasıdır. Temel havalandırma şebekesinin oluşturulmasında ocak planları kullanılmaktadır. Bu planlar üzerinde hava giriş ve dönüş yolları tespit edilerek havalandırma planlamasına esas şebeke oluşturulmaktadır. Bu noktada henüz planlama/kurulum aşamasında olan ocaklar ile halihazırda çalışan ocaklar arasında önemli farklar bulunmaktadır.

### 6.1.1 Planlama/Kurulum Aşamasındaki Ocaklar

Henüz planlama/kurulum aşamasında olan yeraltı ocaklarında henüz herhangi bir yeraltı açıklığı bulunmadığından ya da açıklıkların çok küçük bir kısmı açılmış olduğundan, bu tür ocaklarda havalandırma ölçümlerinin yapılması dolayısıyla kollardaki gerçek dirençlerin tespit edilmesi mümkün değildir. Bu durumda

planlanan hava yollarının dirençlerinin yolların fiziksel özellikleri kullanılarak daha önce verilen eşitlikler (Eşitlik 4.17 ve 4.18) kullanılarak hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için yolların kesit alanlarının, çevre uzunluklarının, yollardaki sürtünme faktörlerinin ve şok kayıplarının belirlenmiş olması gerekmektedir. Bu aşamada bölgedeki çalışan ocaklardan bilgiler edinmek (benzer kesit alanlarında açılmış, aynı tahkimat türü kullanılacak hava yollarındaki gerçek sürtünme faktörü değerlerini açılacak benzer galeriler için kullanmak) ve planlama ekibinin daha önceki tecrübelerinden faydalanmak yararlı olabilecektir.

### 6.1.2 Çalışan Ocaklar

Şekil 6.1’den görüldüğü üzere bir mevcut bir yeraltı ocağında temel havalandırma şebekesinin oluşturulmasından sonra yapılacak ilk iş, temel havalandırma şebekesinin ek verilerle güçlendirilmesi ve gerçeğe en yakın hale getirilmesidir.

Bu aşamada temel amaç, ana havalandırma güzergahlarında yapılacak havalandırma ölçümleri (P-Q ölçümleri) ile temel havalandırma şebekesine veri sağlamak olmalıdır. Havayolundaki mutlak basınç veya bir uzunluktaki basınç farkı (basınç kaybı) ve kesitteki hava hızının ölçülmesi esastır. Havalandırma şebekesine veri sağlamak için öncelikle ana havalandırma yollarında havalandırma ölçümleri yapılmalı ve “özdeş dirençler” kullanılarak ek hava yolları şebekeye dahil edilmelidir. Burada kullanılan özdeş direnç, birbirine benzer hava yollarında yapılan havalandırma ölçüm sonuçlarından elde edilen direnç değerlerinin özdeş yollarda (aynı tabakalarda açılmış, benzer kesitte, benzer tahkimatın kullanıldığı vb.) kullanılması anlamına gelmektedir. Bu aşamada, havalandırma ölçümlerinden elde edilen verilerin bir bilgisayar yazılımı kullanılarak işlenmesi planlama açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Havalandırma ölçümlerinden elde edilen sürtünme kaynaklı basınç kaybı,  $P_f$  (Pa), ve hava miktarı,  $Q$  ( $m^3/s$ ), değerleri temel şebekeye işlenmekte ve bilgisayar yazılımları Atkinson Eşitliğini kullanarak ( $P=RQ^2$ ) otomatik olarak ölçüm yapılan yolun direncini,  $R$  ( $Ns^2/m^8$ ), hesaplayabilmektedir. Özellikle hava miktarının düşük olduğu yollarda ortaya çıkan basınç düşüşleri de küçük olacağından, **bazı durumlarda mevcut hava yollarında ölçüm yapmak pratik olarak mümkün olmayabilir**. Zira bu durumlarda ölçüm cihazının belirli bir değer etrafında sabitlenmesi zor olacak ve basınç düşüşü küçük olduğundan hata yapma olasılığı artacaktır. Eğer bu sebeplerle **yapılan ölçümün doğruluğunda şüpheler varsa bu yolların dirençlerinin Eşitlik 4.17 ile hesaplanması uygun olacaktır**. Hesaplamalarda özdeş hava yollarından elde edilen sürtünme faktörü ( $k$ ) değerleri kullanılmalı ve şok kayıpları da dikkate alınmalıdır.

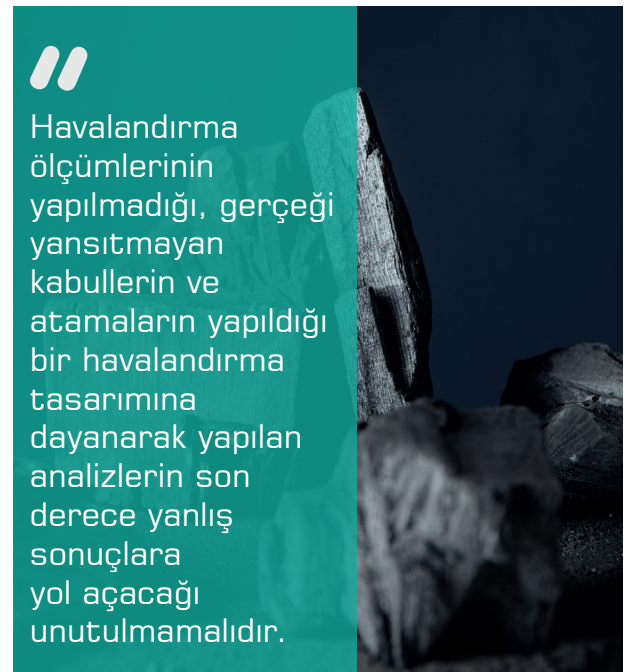
Çalışan yeraltı ocaklarında mümkün olan tüm hava kapıları ve barajların dirençleri ölçülmelidir. McPherson

(1993) hava kapılarının dirençlerinin  $1-2 Ns^2/m^8$ ’den birkaç bin  $Ns^2/m^8$ ’e kadar değiştiğini ve ölçülemeyen kapı ya da baraj varsa planlama açısından  $25 m^2$ ’lik bir kesit için tek bir kapı için  $10-50 Ns^2/m^8$  ve barajlar için  $1000-5000 Ns^2/m^8$  aralıklarındaki değerlerin kullanılabileceğini belirtmiştir.

Yukarıda sayılanların yanı sıra çalışılmış ve **ocakla irtibatı kesilmiş bölgeler ile göçük bölgelerinde ölçüm yapmak mümkün olmayacağından bu bölgeleri temel havalandırma şebekesinde gösterebilmek için havalandırma yazılımlarında bu bölgelere “sabit akış (fixed flow)”** ataması yapılmalıdır. Ancak bir havalandırma şebekesinden çok sayıda sabit akış atamasının yapılması uygun olmamakta, havalandırma yazılımları bu durumda hata vermekte ve kullanıcıyı uyarmaktadır.

Bu işlemlerin sonunda, temel şebekede her bir kolun direnci ( $R$ ) ya doğrudan verilmiş, ya basınç düşüşü ( $P$ ) ve hava miktarı ( $Q$ ) atanmış ya da ilgili havayolu geometrisine göre sürtünme faktörü ( $k$ ) tanımlanmış duruma gelecektir. Ancak bu aşamada, oluşturulan temel şebekenin yeraltı ocağını gerçek bir şekilde yansıtıp yansıtmadığı büyük öneme sahiptir. Stewart (2019) çoğu yeraltı ocağında dirençlerin ve dolayısıyla basınç düşüşlerinin olduğundan yüksek tahmin edildiğini bildirmiştir. Bu durumda havalandırma maliyetlerinin de gereksiz şekilde yüksek olacağı açıktır.

**Havalandırma ölçümlerinin yapılmadığı, gerçeği yansıtmayan kabullerin ve atamaların yapıldığı bir havalandırma tasarımına dayanarak yapılan analizlerin son derece yanlış sonuçlara yol açacağı unutulmamalıdır.**



### 6.1.3 Korelasyon

Bir yeraltı ocağı için oluşturulan temel şebekenin havalandırma planlamasında kullanılabilmesi için kullanılan temel şebekenin ocağın gerçek durumunu temsil etmesi gerekmektedir. Bu nedenle oluşturulan temel şebekenin doğrulanması şarttır. Günümüzde havalandırma planlamaları havalandırma simülasyon yazılımları ile yapılmaktadır. Bir yeraltı ocağına ait temel şebekenin doğrulanabilmesi için temel şebeke simülasyon yazılımına yüklenmeli ve simülasyon havalandırma ölçümlerinden elde edilen veriler de yazılıma işlenerek karşılaştırılmalıdır. Daha sonra **simülasyon sonucunda kollarda elde edilen hava miktarları, havalandırma ölçümlerinden elde edilen gerçek değerlerle karşılaştırılmalıdır**. Havalandırma ölçümlerinde hata yapılması kaçınılmaz olduğundan ölçülen değerlerle havalandırma simülasyon yazılımlarından elde edilen değerlerin mükemmel uyum göstermesi pratikte mümkün değildir. Bunun yanı sıra havalandırma yazılımları anlık sonuçları değerlendirmekte ancak havalandırma ölçümleri uzun zaman periyotlarında tamamlanmaktadır. Bu nedenle de havalandırma simülasyon yazılımları ile ölçülen değerlerin tam uyuşması neredeyse imkansızdır. Bir havalandırma şebekesinin toplam korelasyonu aşağıdaki eşitlikle bulunabilmektedir.

$$\text{Şebeke Korelasyonu} = \frac{\text{Ölçüm yapılan tüm kollar için hesaplanan ve gerçek hava miktarları arasındaki farkın mutlak değeri toplamı}}{\text{Ölçüm yapılan tüm kollarda ölçülen hava miktarlarının mutlak değerinin toplamı}} \times 100$$

(6.1)

McPherson (1993) bir şebeke korelasyonunun ancak; (i) hiçbir önemli hava kolunun hesaplanan ile ölçülen değeri arasında %10'dan fazla fark olmadığı ve (ii) toplam korelasyonun da **en fazla %10** hataya sahip olduğu durumlarda kabul edilebileceğini belirtmiştir.

Korelasyon çalışmasının yukarıda belirtilen sınırlar dışında kalması ya havalandırma ölçümlerinde ya da havalandırma yazılımlarında oluşturulan temel şebekede hatalar olduğunun göstergesidir. Bu durumda öncelikle havalandırma yazılımında oluşturulan model olası hatalara karşı incelenmelidir. Buna yönelik olarak hava yollarının fiziksel özelliklerinin yanı sıra havalandırma ölçümlerinden elde edilen değerlerin yazılımı doğru olarak aktarılıp aktarılmadığı kontrol edilmelidir. Özellikle ana fanın basıncının hatalı olduğu modellerde yazılımdan elde edilen hava miktarları sürekli olarak düşük ya da yüksek olabilmektedir. Havalandırma yazılımında temel hataların olmadığı teyit edilirse bu durumda bu durumda gerçek değerlerden sapan hava yollarında yeni havalandırma ölçümleri yapılarak hatalar giderilmeye çalışılmalıdır.

## 6.2 Gerekli Hava Miktarının Hesaplanması ve Hız Sınırları

Bir yeraltı ocağına sağlanacak temiz hava miktarının planlama aşamasında tespit edilmesi iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu miktarın hesaplanmasında esas olarak gözetilmesi gereken, personelin çalıştığı ya da kullandığı tüm ocak kesimleri ve güzergahlarda iş sağlığı ve güvenliği açısından asgari sınırların ve konforlu bir çalışma ortamının sağlanmasıdır. Bunun yanı sıra ulusal yasa ve yönetmeliklerde belirtilen asgari hava hızı ve miktarı koşullarının da yerine getirilmesi hedeflenmelidir. Dolayısıyla, havalandırma planlaması yapacak mühendisin bu yasa ve yönetmelikleri iyi bilmesi ve anlamış olması gerekmektedir.

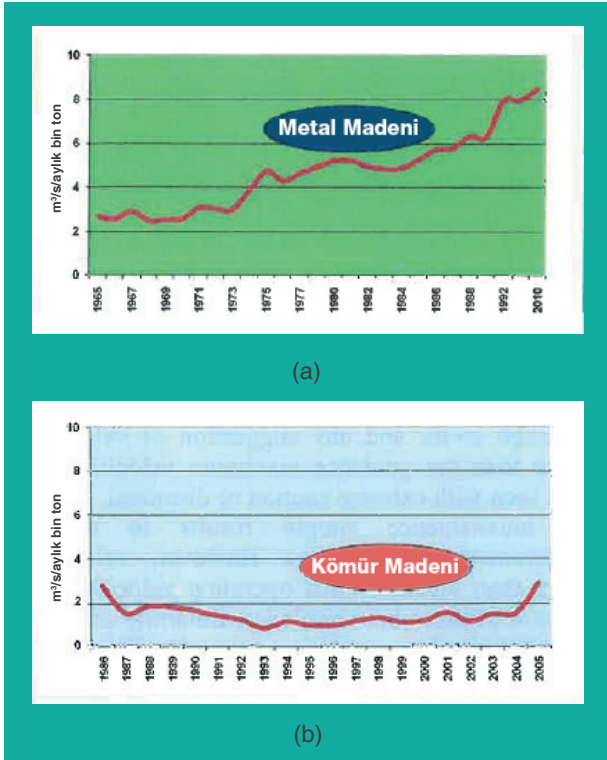
Ocak havalandırması bir yeraltı maden işletmesinin stratejik bileşenlerinden birisidir. Yeni tehlikeler ve uyulması zorunlu olan sınır değerler konusundaki farkındalığın artması sonucunda havalandırma altyapısı ve tasarımlarının beklenmeyen kapasite düşüşlerini karşılayabilir bir yetenek ve esnekliğe sahip olması zorunludur (Belle vd., 2014). Maden metotlarının modernizasyonu ile ilgili olanların yanı sıra, madenlerdeki tipik sağlık ve güvenlik tehlikeleri, gazlar, toz, ısı, iyonlaştırıcı radyasyon ve dizel motorlardan salınan partikül maddelerdir (DPM). İşletme derinliği ve buna ilişkin sağlık ve güvenlik tehlikeleri cevherden cevhere fark etmektedir.

Doğal koşullar ve işletme şartlarının oluşturduğu tehlikeler, genel olarak hava hızını temel ve öz değişken olarak kabul eden uygun bir ocak havalandırması yaklaşımı ile yönetilebilir (Belle vd., 2014). Son noktada, oluşturulan hava yolu kesit alanı ile ihtiyaç duyulan hava debisi ve basınç kaybı hesabına gidilmekte, sonuçta ocak havalandırma verimliliği belirlenmektedir. Üretilen birim cevher miktarı (aylık üretilen bin ton) başına ihtiyaç duyulan temiz hava miktarını (m<sup>3</sup>/s) belirleyen Hava Kullanım Endeksi (Air Utilization Index – AUI) bazı ülkelerin havalandırma mühendisleri tarafından kullanılan popüler bir verimlilik parametresidir (Belle vd., 2014).

Hava hızı ve sonuçta bir hava yolu kesitinden geçen hava debisi aşağıdaki belirtilen çeşitli işletme ihtiyaçlarını karşılayacak düzeyde olmalıdır. Bunların arasında hava ihtiyacı hangisi en yükseğe tasarım için “belirleyici parametre” olarak kullanılmalıdır.

- normal çalışma şartlarında toz, gaz veya diğer belirlenmiş tehlikeleri seyreltme
- dizel motorların ürettiği gazlar, toz ve partiküler maddeleri (DPM) seyreltme
- ısı yönetimine yönelik olarak ortamı uygun çalışma sıcaklıklarına düşürebilme
- patlatma sonrası emniyetli ve kabul edilebilir bir giriş süresi sağlama

Bir ocak için hava debi ihtiyaçları zaman içinde de değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin, bir Güney Afrika altın madenindeki Hava Kullanım Endeksi 1960'lardan 2010'lu yıllara kadar 2.5'tan 7 seviyesine kadar yükselmiştir (Şekil 6.2a). Bu mertebenin, büyüyen işletme derinlikleri nedeniyle termal konforun sağlanabilmesi için hava ihtiyacının artması, maruziyet değerlerindeki mevzuat değişiklikleri ve dizel ekipman kullanımındaki (mekanizasyon mertebesi) artış nedeniyle yükseldiği söylenebilir. Benzer şekilde Avustralya Queensland'deki bir kömür ocağındaki hava kullanım faktörünün yıllara göre değişimi Şekil 6.2b'de sunulmuştur. Burada yıllar içindeki düşüş, etkin metan drenajı ile sağlanmış, son yıllardaki hızlı artışa ise gaz içeriklerindeki artış yol açmıştır.



Şekil 6.2 İki örnek ocak için yıllara göre hava kullanım faktöründeki değişimler: (a) Güney Afrika'daki bir altın madeni, (b) Avustralya'daki bir kömür madeni (Belle vd., 2014)

Bir yeraltı ocağına sağlanacak hava miktarı geleneksel olarak; yeraltındaki çalışan sayısı, tabakadan kaynaklı gaz yayılımları, faaliyetlerden kaynaklanacak toz miktarı, patlatma uygulamalarında açığa çıkan gaz yayılımları, (varsa) ocakta kullanılacak dizel ekipmanların egzozlarından çıkan gazları ve hava hızı limitleri dikkate alınarak tahmin edilmektedir.

Yeraltında görev yapan çalışanların solunum ihtiyaçlarına göre ihtiyaç duyulan hava miktarı kişilerin solunum sonucunda ortama yaydığı CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile ilişkilidir. Buna yönelik olarak, yeraltında hareketli işler yapılırken **çalışan başına 0.01 m³/s**'lik bir hava miktarı yeterli olmaktadır. Bu değer, yukarıda sayılan

diğer kriterlere göre ihtiyaç duyulan hava miktarları ile karşılaştırıldığında oldukça düşük bir değerdir ve bu nedenle genellikle ocak için gerekli hava debisinin hesabında pek esas alınan bir kriter değildir.

### 6.2.1 Tabaka Gazlarının Yayılımlarına Göre

Tabaka gazlarına göre ihtiyaç duyulan hava miktarının tahmin edilmesi kömürün bünyesinde özellikle CH<sub>4</sub> ve zaman zaman CO<sub>2</sub> gazlarının varlığı nedeniyle daha çok yeraltı kömür ocaklarında önem arz eden bir kriter konumundadır. Madencilik faaliyetleri sonucu açığa çıkan tabaka gazlarının sınır değerler altında tutulabilmesi için gerekli olan hava miktarı Eşitlik 6.2 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$Q = \frac{100E_g}{C_g} \quad (6.2)$$

Burada;  $Q$  temiz hava miktarını (m³/s),  $E_g$  gaz yayılım oranını (m³/s) ve  $C_g$  ise gazın seyreltileceği konsantrasyonu (hacimce yüzde) temsil etmektedir.  $C_g$  değeri genellikle yasaların gösterdiği konsantrasyonun yarısını göstermektedir.

Ülkemizde yeraltı kömür ocaklarında panoların hava dönüşlerinde izin verilebilir CH<sub>4</sub> konsantrasyonu %1 olduğundan (ÇSGB, 2013) yapılacak hesaplamalarda  $C_g$  değerinin %0.5 olarak kullanılması uygun olacaktır. Ayrıca, Eşitlik 6.2'deki gaz yayılım oranı ( $E_g$ )'yi tespit etmek günümüzde kullanılan merkezi izleme sistemleri sayesinde kolaylaşmıştır. Ocak kesimlerinde bulunan CH<sub>4</sub> sensörü değerlerinin belirli bir zaman aralığında değerlendirilmesiyle gaz yayılım oranı tespit edilebilmektedir. Bu durum ancak mevcut durumda çalışan ocaklarda mümkün olabilmektedir. Bu durumda, eğer varsa, planlanan ocağın yakınında işletilen komşu ocaklardan gerçek gaz yayılım oranlarının elde edilerek hesaplamalarda kullanılması düşünülebilir. **Gaz yayılım oranlarının doğrudan elde edilemeyeceği ocaklarda ise arama sondajları ve hazırlık çalışmaları sırasında hem işletilecek kömür damarından hem de bu damarın üstünde ve altında bulunan kömür damarları ve tabakalardan alınacak kömür örnekleri kullanılarak yapılan gaz içeriği testlerinden elde edilen veriler ve planlanan üretim miktarları kullanılarak** gerekli olan temiz hava miktarı tahmin edilebilmektedir. Böyle durumlarda ise Eşitlik 6.3 kullanılabilir.

$$Q = \frac{E}{C} \frac{P}{3600h} \quad (6.3)$$

Burada; E gaz yayılım oranını (m<sup>3</sup>/t), P üretilen kömür miktarını (t/saat) ve C ise metanın seyreltileceği konsantrasyonu (hacimce %) göstermektedir.

#### Örnek:

Bir yeraltı kömür ocağında bir ayaktan 8 saatlik bir vardiyada 2750 m<sup>3</sup> metan ortama yayılmıştır. Yasaya göre pano hava dönüşünde elektriğin kesilmesi gereken CH<sub>4</sub> konsantrasyonu %1 ise bu ayağa verilmesi gereken temiz hava miktarını belirleyiniz.

Hava miktarının belirlenebilmesi için öncelikle bir vardiyada ayakta CH<sub>4</sub> yayılım oranı (E<sub>g</sub>) bulunmalıdır.

$$E_g = \frac{2750}{(8)(60)(60)} = 0,0955 \text{ m}^3 / \text{s}$$

CH<sub>4</sub> için pano hava dönüşünde izin verilen yasal sınır konsantrasyonu %1 olduğuna ve planlama için bu konsantrasyonun yarısı (C<sub>g</sub>=%0.5) hedeflenirse bu ayakta ihtiyaç duyulan temiz hava miktarı Eşitlik 6.2 kullanılarak bulunabilir.

$$Q = \frac{(100)(0,0955)}{0,5} = 19,1 \text{ m}^3 / \text{s}$$

#### Örnek:

Bir yeraltı kömür ocağında kurulacak uzun ayak panosunda günlük 3000 t üretim hedeflenmektedir. Üretim yapılacak kömür damarının gaz içeriği 7,5 m<sup>3</sup>/t olarak tespit edildiğine ve bu damarın yakınında başka bir kömür damarı bulunmadığına göre bu ayağa sağlanması gereken temiz hava miktarı ne olmalıdır?

Ülkemizde pano hava dönüş yolunda izin verilebilir sınır % 1 olduğundan bu konsantrasyonun yarısı (% 0,5) hedeflenerek ihtiyaç duyulacak hava miktarı Eşitlik 6.3 kullanılarak bulunabilir.

$$Q = \frac{(7,5)(3000)}{(0,005)(24)(3600)} = 52,1 \text{ m}^3 / \text{s}$$

### 6.2.2 Oluşan Toz Miktarına Göre

Pnömokonyoz dünya madencilik endüstrisinde en önemli mesleki hastalıklardandır. Örneğin, NIOSH verilerine göre, son 40 yılda dünyadaki kömür işçisi pnömokonyozu yaygınlık oranlarını belirten yüzdeler Çizelge 6.1'te sunulmuştur.

**Çizelge 6.1** Kömür işçisi pnömokonyozu (ILO kategorisi 1/0+) tanısı konulan maden çalışanların yıllara göre değişim yüzdeleri

Dönem (yıl)	Maden işyerinde çalışma süresi (yıl)					Bilinmeyen	Toplam
	0-9 yıl	10-14 yıl	15-19 yıl	20-24 yıl	25+ yıl		
1970-1974	3.1	8.9	14.4	20.8	32.5	0.4	11.8
1975-1979	1.1	6.2	11.0	18.8	26.5	0.4	3.0
1980-1984	0.8	2.4	6.1	10.3	21.3	0.8	2.5
1985-1989	0.8	2.6	5.9	9.5	19.3	3.6	3.4
1990-1994	0.7	2.2	2.9	4.5	10.0	0.6	3.0
1995-1999	0.3	1.3	1.8	2.3	3.9	0.0	2.0
2000-2004	1.0	1.2	3.3	4.8	6.7	0.9	3.6
2005-2009	0.4	0.4	2.3	3.9	6.9	0.3	2.6
2010-2014	0.3	1.1	3.6	4.8	10.0	0.0	2.9
2015-2019	0.6	2.3	5.6	9.9	14.5	0.0	5.0
2016-2020	0.5	2.6	5.8	10.3	15.0	0.0	5.2
2017-2021	0.4	2.2	5.4	9.6	13.2	0.0	4.1

Kaynak: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/respiratorydiseases.html>

Yoğun ve uzun süreli araştırmalar sonucunda tozun fizyolojik etkilerinin anlaşılmasında, örnekleme ve analizinde, zorunlu standartların oluşturulması ve kontrol önlemlerinin geliştirilmesi konularında büyük yol alınmıştır. Ancak, mevcut yeraltı madencilik yöntemleriyle toz taneciklerinin havaya karışması kaçınılmazdır. Yeraltı kömür ocaklarında havaya karışan toz tanelerinin havalandırma ile seyreltilmesi toz konsantrasyonlarının kontrol edilmesi için temel araçtır. Esasen yeraltı ocaklarında tozun kontrolü için önemli olan hava miktarından çok havanın hızıdır. Belirli bir miktarda toz üretilen bir hava yolunda, tozun havayla taşınacağı mesafe ve toz taneciklerinin çökme hızı hava hızına bağlıdır. Ağır ve daha yuvarlak şekilli toz tanecikleri daha hızlı çökerken, daha küçük tanecikler havada asılı kalmaya eğilimli olmaktadır. Solunabilir boyuttaki (<5 µm) toz taneciklerinin çökme hızları ise ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durumda solunabilir toz bir gaz gibi ele alınabilmektedir. Oluşan tozu seyreltmek için gerekli hava miktarı ise Eşitlik 6.4 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$Q = \frac{(E)(P)1000}{(C)3600} \quad (6.4)$$

Burada;  $Q$  gerekli hava miktarını ( $m^3/s$ ),  $E$  solunabilir toz yayılım oranını ( $g/t$ ),  $P$  üretilen kömür miktarını ( $t/h$ ) ve  $C$  ise solunabilir toz konsantrasyonundaki artışı ( $mg/m^3$ ) göstermektedir. Eşitlikten de görüldüğü üzere oluşan toz miktarına göre gereken temiz hava miktarının hesaplanabilmesi için bir ton üretim başına üretim başına

#### Örnek:

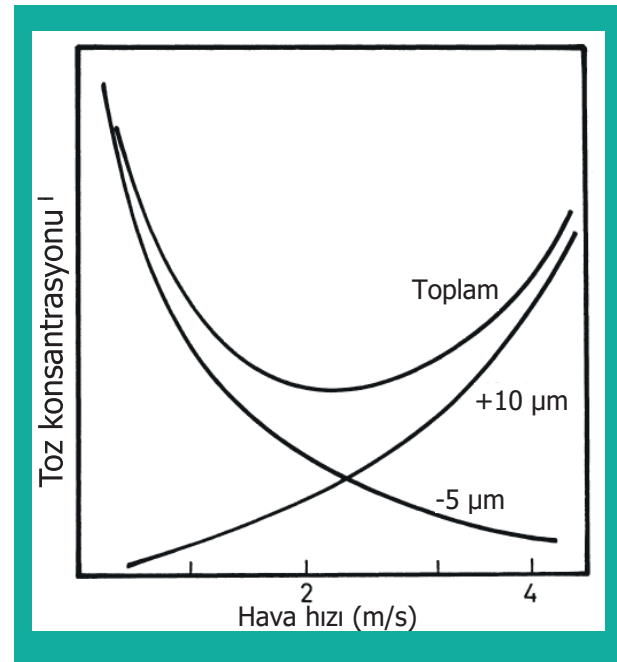
*Bir uzun ayak arınında üretilen bir ton kömür başına oluşan toz miktarı 1.4 gramdır. Ayak hava girişinde ölçülen toz konsantrasyonu 0.45  $mg/m^3$  olduğuna ve ayakta üretim 100 t/s ise ayaktaki solunabilir toz konsantrasyonunu ülkemizdeki sınır değer olan 2.4  $mg/m^3$ 'e (%5 ve daha az  $SiO_2$  içeren solunabilir kömür tozu) seyreltmek için gerekli hava miktarı ne kadardır?*

$$Q = \frac{(1,4)(100)1000}{(2,4 - 0,45)3600} = 19,9 \approx 20 m^3 / s$$

%5'ten daha yüksek  $SiO_2$  içerikli kömür tozu için de  $(10mg/m^3)/(\%SiO_2+2)$  bağıntısı ile limit değeri bulunmaktadır. Aynı işletme şartlarındaki örnek %9  $SiO_2$  içerikli kömür tozu için hesaplanırsa oldukça farklı bir ihtiyaç ortaya çıktığı görülebilir.

$$Q = \frac{(1,4)(100)1000}{\left[\left(\frac{10}{9+2}\right) - 0,45\right]3600} = 84,7 \approx 85 m^3 / s$$

Solunabilir boyuttan daha büyük toz parçacıklarını hava miktarının, dolayısıyla hava hızının artırılmasıyla seyreltmek mümkün değildir. Zira hava hızı arttıkça bu tanecikler havada daha uzun süre asılı kalacak ve çökünceye kadar kat edecekleri mesafe uzayacaktır. Ayrıca, hava hızı arttıkça daha önce çöken toz tanecikleri türbülanslı akıma girecek ve havaya karışacak ve toz konsantrasyonu artacaktır. McPherson (1984) en düşük toz konsantrasyonunun 2 m/s hava hızında elde edildiğini ancak 1,5-3,5 m/s arasındaki hava hızlarının kabul edilebilir olduğunu belirtmiştir (Şekil 6.3).



**Şekil 6.3** Hava hızına göre toz konsantrasyonundaki değişim (McPherson, 1984'ten değiştirilerek)

### 6.2.3 Dizel Egzoz Yayılımlarına Göre

Yeraltı ocaklarında kullanılan dizel ekipmanın egzozlarından insan sağlığına zararlı birçok madde (zehirli gazlar, dizel partikül madde) ocak atmosferine yayılmaktadır. Bu nedenle madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğü ülkelerin mevzuatlarında dizel egzozlardan çıkan maddeler için çeşitli kriterler koyulmuştur. Ülkemizde dizel egzoz gazlarından ocak atmosferine yayılan maddelerin seyreltilmesi için gerekli hava miktarına yönelik olarak mevzuatta herhangi bir sınır değeri belirtilmemiş olmasına rağmen gelişmiş madencilik ülkelerinde 100 kW dizel ekipman gücü başına ortama sağlanması gereken temiz hava miktarları  $m^3/s$  cinsinden verilmektedir. Örneğin Avustralya'da her bir 100 kW dizel ekipman gücü başına sağlanması gereken temiz hava miktarı 5  $m^3/s$  ile 6  $m^3/s$  arasında iken Kanada'da 4.7  $m^3/s$  ile 9.2  $m^3/s$  arasında değişmekte ancak planlama için genellikle 6  $m^3/s$  değeri kullanılmaktadır (Halim, 2017). ABD'de de Kanada'ya benzer bir yaklaşım

uygulanmakta ve planlama aşamasında 6 m<sup>3</sup>/s/100 kW değeri kullanılmaktadır. McPherson (1993) ise planlama aşamasında 6-8 m<sup>3</sup>/s/100kW değerinin uygun olacağını belirtmiştir. Bu durumda dizel araçlardan yayılan gaz miktarı gözetilerek ocağa sağlanması gereken hava miktarı Eşitlik 6.5 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q = q_{kw} \frac{G}{100} \quad (6.5)$$

Burada;  $Q$  ocağa sağlanması gereken temiz hava miktarını (m<sup>3</sup>/s),  $q_{kw}$ , 100 kW dizel motor gücü başına gerekli hava miktarı (6-8 m<sup>3</sup>/s) ve  $G$  ise yeraltındaki toplam dizel motor gücünü (kW) temsil etmektedir.

Dizel egzoz yayılımlarına göre yapılacak temiz hava ihtiyacı hesaplarında ocakta kullanılan tüm dizel ekipman gücünün dikkate alınması yerinde olacaktır. Zira özellikle metal ocaklarında bazı durumlarda tüm dizel ekipmanlar planlanandan farklı şekilde aynı anda işletilebilir ve bu durum planlama aşamasında dikkate alınmaz ise ocağa sağlanan hava miktarı yetersiz kalabilir.

#### 6.2.4. Patlayıcı Madde Miktarına Göre

Yeraltında patlayıcı maddelerin kullanımı sonucunda ocak atmosferine CO, CO<sub>2</sub>, ve azot oksitler (NO, NO<sub>2</sub>) gibi gazlar yayılmaktadır. Patlatma işlemlerinden sonra ocaktaki çalışmaların güvenli bir şekilde yürütülebilmesi için patlatma sonrası açığa çıkan bu gazların seyreltilmesi ve herhangi bir tehlikeye yol açmayacak konsantrasyonlara seyreltilmesi gerekmektedir.

Bu kritere göre ihtiyaç duyulan hava miktarlarının tahmini daha çok metalik ocaklarına uygun olmaktadır. Zira kömür ocaklarında özellikle hazırlık çalışmalarında zaman zaman da üretim faaliyetlerinde patlayıcı madde kullanılsa da kullanılan patlayıcı madde miktarı ve patlatma işleminin sıklığı yeraltı metal ocaklarına oranla çok düşüktür.

Kullanılan patlayıcı madde miktarına göre yapılan hesaplamalarda 1 kg patlayıcı maddenin patlatılması sonucu açığa çıkan CO miktarı ile bu gaz için yasa ve yönetmeliklerde belirtilen izin verilebilir sınır değerler dikkate alınmaktadır. Bilindiği üzere ülkemizde yürürlükte olan mevzuata göre yeraltı ocaklarında CO gazı için izin verilebilir eşik sınır değer 50 ppm (%0.005) olarak belirtilmiştir (ÇSGB, 2015).

Bu kritere göre hesaplamaların yapılabilmesi için 1 kg patlayıcı ateşlendiğinde açığa çıkan CO miktarının bilinmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Literatürde çeşitli patlayıcı türleri için açığa çıkan gaz miktarlarını bulmak

mümkün olduğu gibi (Çizelge 6.2) esasen bu bilginin kullanılan patlayıcı maddenin üreticisinden sağlanması hesaplamaların doğruluğu açısından önemlidir.

**Çizelge 6.2** Çeşitli patlayıcı türlerine göre açığa çıkan gazlar ve miktarları (Greig, 1982; Zawadka-Malota, 2015; Sierra, 2020).

Patlayıcı türü	Birim patlayıcı madde miktarı başına açığa çıkan gaz hacmi		
	(l/kg)		
	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Ammonite 1	5.87	145.15	4.74
Ammonite 2	2.63	110.22	1.22
Dinamit 1*	5.93	167.45	0.99
Dinamit 2*	4.37	181.60	0.64
Dinamit 3*	4.58	185.12	2.00
Dinamit 4*	1.56	171.53	5.96
MWE 1 (emülsiyon)	21.85	109.34	0.68
MWE 2 (emülsiyon)	21.43	123.72	1.15
MWE 3 (emülsiyon)	21.43	105.26	0.40
Metanite 1	9.29	91.85	3.86
	(m <sup>3</sup> /kg)		
ANFO <sup>1</sup>	0.01304	0.0829	0.0026
Ammon dinamit <sup>2</sup>	0.03	0.06	0.004
Ammon gelignit <sup>2</sup>	0.05	0.07	0.006
ANFO <sup>2</sup>	0.03	0.05	0.007
Dynagel <sup>2</sup>	0.03	0.07	0.005
Watergel <sup>2</sup>	0.09	0.05	0.002

(<sup>1</sup>Sierra, 2020 ve <sup>2</sup>Greig, 1982)

\* Bu ürünlere ait ticari isim ve üretici bilgisi ilgili yayınlarda verilmemiştir.

Kullanılan patlayıcı madde miktarına göre ihtiyaç duyulacak temiz hava miktarı Eşitlik 6.6 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$Q = \frac{(M)(V_g)100}{0,005t} \quad (6.6)$$

Burada;  $Q$  gerekli hava miktarını ( $m^3/s$ ),  $M$  bir defada kullanılan patlayıcı madde miktarını (kg),  $V_g$  açığa çıkan CO miktarını ( $m^3/kg$ ) (genellikle  $0,04 m^3/kg$  kabul edilebilir) ve  $t$  ise havalandırma için gerekli süredir (dak.).

### 6.2.5 Hava Hızı Sınırları

Yeraltı ocaklarına sağlanan hava miktarının yanı sıra galeri ve yeraltı çalışma noktalarındaki hava hızları da havalandırma planlaması açısından oldukça önemlidir. Zira çeşitli kriterlere göre hesaplanan hava miktarlarının oluşturduğu hava hızları bazı durumlarda çok fazla bazı durumlarda ise az olabilmektedir. Ayrıca, yeraltı kömür ocaklarında metan gazıyla mücadelede hava miktarının yanı sıra metan gazının tabakalaşmasının engellenmesi açısından hava hızının da önemi büyüktür. Metanın tabakalaşması rehberin ileriki bölümlerinde detaylı olarak değinilecektir.

Ayrıca, çeşitli ülkelerde yeraltı ocaklarında çeşitli ocak kesimlerinde hava hızı ile ilgili olarak alt ve üst sınırlar bulunmaktadır. Ülkemizde yürürlükte olan Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'nde yeraltı ocaklarına yönelik olarak "hava hızı her halde **0.5 m/s**'den az olamaz" ve "insan ve malzeme taşımada kullanılan kuyularda, lağımlarda, ana nefeslik yollarında, eğimli ve düz yollarda hava hızı **saniyede 8 m'yi** aşamaz" hükümleri bulunmaktadır (ÇSGB, 2015). Buna göre bir yeraltı ocağının havalandırma planlaması yapılırken bu bölümde bahsedilen kriterlere göre hava miktarı hesabı yapıldıktan sonra hız limitlerinin sağlanıp sağlanmadığı da kontrol edilmelidir. Hava hızının  $0.5 m/s$ 'den düşük olduğu hava yollarındaki hava miktarının bu hız sınırı göz önüne alınarak yeniden hesaplanması gerekmektedir. Eğer hava hızları Yönetmelikte belirtilen  $8 m/s$  sınırından yüksek çıkıyorsa bu durumda ocak planında gerekli düzenlemeler yapılmalıdır.

Genel olarak dünya madenciliğine bakıldığında yeraltı ocaklarında sağlanması gereken hava hızı alt sınırı  $0.25 - 0.3 m/s$  olup, ayaklarda ise  $1-3 m/s$  hava hızlarının tipik değerler olduğu söylenebilir. Genel olarak çeşitli ocak açıklıklarında havalandırma planlamasında kullanılacak azami hız sınırları Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelgedeki değerler küresel ölçekte değerler olup bu değerlerin doğrudan kullanılmasından önce ulusal yasa ve yönetmeliklerde verilen hız sınırlarının dikkate alınması uygun olacaktır.

**Çizelge 6.3** Çeşitli ocak açıklıklarında azami hava hızları (McPherson, 1993)

Çalışma Yeri	Hava Hızı (m/s)
Ayak arınları	4
Bant galerileri	5
Ana nakliyat yolları	6
Ana hava yolları	8
Nakliyat kuyuları	10
Havalandırma kuyuları	20

### 6.3 Planlama Uygulamaları ve Ocaktaki Aşamalar

Bir yeraltı ocağına ait havalandırma planlaması ocakta meydana gelecek temel değişiklikleri göz önüne alan uzun vadeli bir plan olmalıdır. Hazırlıkların ve çalışmaların devam ettiği mevcut bir ocakta planlama uygulamaları, ocaktaki değişiklikleri de göz önüne alarak temel havalandırma şebekesinde yapılacak modifikasyonları içermektedir. Havalandırma şebekesinde yapılacak modifikasyonlar; (i) kuyu ya da yeryüzü bağlantılarının inşası ya da kapatılması, (ii) yeni çalışma işyerlerinin açılması ya da terk edilmesi, (iii) ana hava yollarının eklenmesi, (iv) hava kapılarının eklenmesi/çıkartılması, (v) fanların yerlerinin değiştirilmesi ya da farklı karakteristiklere sahip yeni bir fanın kullanılması gibi faktörleri içermelidir. Ocağın ömrü boyunca ortaya çıkacak değişiklikler, ocağın hazırlık ve üretim termin planlarına uygun şekilde değerlendirilmeli ve havalandırma planı bu alternatiflere göre değiştirilerek analizler yapılmalıdır. Bu durumda, bir havalandırma planının tasarlanabilmesi için ocak hazırlık ve üretim termin planının hazırlanmış olması ön şarttır.

Bunun yanı sıra oluşturulan temel havalandırma şebekesi yeraltında bulunan ve havalandırma ile bağlantılı tüm yapıları içermelidir. Barajlar, hava kapıları, ayak göçükleri, tali fanlar ve ocakta havalandırmaya hizmet eden tüm açıklıklar havalandırma yazılımında oluşturulacak modele dahil edilmelidir. Ocakta hazırlıklar ve üretim faaliyetleri devam ettikçe havalandırma modeli yeni havalandırma ölçüm verileriyle güncellenmelidir. Bu çalışma ocağın ömrü boyunca sürekli olarak sürdürülürse temel havalandırma şebekesi ocağın gerçek durumunu temsil edecek ve özellikle acil durumlarda çok önemli bir işleve sahip olacaktır.

Bu aşamada havalandırma yazılımlarının sadece kullanılan verilere göre sonuçlar verdiği gözden kaçırılmamalı, bu tür yazılımlardan elde edilen sonuçların doğru olup olmadığının, amaçlanan hedeflere ulaşıp ulaşılamayacağına planlamayı yapan mühendis ya da ekip tarafından değerlendirileceği unutulmamalıdır.

Bu hususların yanı sıra, **ocanın ömrü boyunca ortaya çıkabilecek olası felaketler (ana yollarda göçük, ocakta yangın, patlama vb.) oluşturulan model ve alternatiflerinde incelenmeli** ve alınacak tedbirler önceden değerlendirilmelidir. Bu hususlara ek olarak, planlama aşamasında tasarlanan havalandırma planı alternatiflerinin maliyetleri ve etkinliği de dikkatlice incelenmelidir.

Dinamik doğaları nedeniyle yeraltı ocaklarında ocak ömrü boyunca önemli değişikliklerin olması kaçınılmazdır. Havalandırma planlaması açısından bu değişikliklerin en önemlileri; yeni bir çalışma alanının açılması ya da eski bir alanın barajlanarak terk edilmesi, ocak büyüklüğünün artması nedeniyle mevcut fanın kapasitesinin yetersiz kalması ve bu nedenle ocağa ihtiyaç duyulan temiz havanın sağlanamaması ve ocağın iki ana bölümünün birbirine bağlanmasıdır (komşu sahanın ruhsatının da alınmasıyla iki ocağın birleştirilmesi gibi). Günümüzde kullanılan havalandırma yazılımlarında bu tür aşamaların (stages) modellenmesi mümkündür. Dolayısıyla, ocakta meydana gelecek değişiklikler (aşamalar) havalandırma yazılımlarında modellenmeli, bu durumların öncesinde ve sonrasında havalandırma açısından ne tür değişiklikler olacağı tespit edilmeli ve incelenmelidir.

Ocak hazırlık ve termin planındaki aşamalara göre havalandırma modelinin incelenmesi, ocağın ömrü boyunca havalandırma açısından ocakta oluşabilecek en kötü durumun tespit edilmesini ve seçimlerin buna göre yapılmasını sağlayacaktır. Ocaktaki farklı zaman aşamalarında farklı havalandırma koşulları oluşacağından bu aşamalar arasında karşılaştırma yapmak ve alternatifleri değerlendirmek de bu sayede mümkün olacaktır.

Halihazırda çalışan bir ocağın aksine yeni planlanan ya da yeni açılacak bir yeraltı ocağı için hazırlık ve üretim yönteminde değişiklikler olabileceği göz önüne alınarak birden fazla temel havalandırma şebekesi alternatifi oluşturmak mümkün olabilmektedir. Böylece mevcut bir ocağa nazaran planlama aşamasında daha esnek seçimler yapmak mümkün olabilecektir. Böylesi durumlarda her bir alternatif ocak planı için hava yollarının yerleri, sayıları ve ebatlarının yanı sıra kuyular, desandreler, fanların yerleri ve çalışma noktaları ve havalandırma kontrol yapıları (kapılar, regülatörler vb.) düşünülmelidir. Daha sonra ocağın ömrü boyunca gerçekleşecek değişiklikler de göz önüne alınarak planlama uygulamaları yapılmalıdır. Ocaktaki aşamalar değerlendirilirken kısa aralıkların seçilmesi (örneğin ömrü 25 sene olan bir ocakta her yılı modellemek) pratik olmayacağından ocaktaki büyük değişikliklerin olduğu durumlar değerlendirilmelidir. Bu durumda, örneğin, hazırlıkların tamamlandığı ve üretime başlandığı aşama, ocağın işletme ömrünün orta noktası ve ocakta önemli değişikliklerin olacağına öngörüldüğü bir aşama gibi iki-üç aşamanın seçilerek incelenmesi uygun olacaktır.

## 6.4 Havalandırma Ekonomisi ve Hava Yolu Boyutlandırma

Bir yeraltı ocağının havalandırma planlaması yapılırken havalandırma için harcanacak bedelin de dikkate alınması gerekmektedir. Yeraltı ocaklarının havalandırmasında ilk yatırım ve işletme maliyeti olmak üzere iki temel maliyet kalemi bulunmaktadır. İlk yatırım maliyeti temel olarak havalandırma sisteminde ihtiyaç bulunan ekipmanın temini için yapılan harcamaları temsil ederken, işletme maliyeti ise ocağın ömrü boyunca havalandırma sisteminin sağlıklı bir şekilde çalışır durumda tutulması için gerekli harcamaları temsil etmektedir.

Madencilik faaliyetleri genel itibarıyla tek seferde finansmanı oldukça zor büyüklükteki maliyetlere sahip olduğundan yapılacak değerlendirmelerde enflasyon ve faiz kavramlarının da dikkate alınması gerekmektedir.

Finansman için faiz karşılığı bugün alınan bir miktar paranın, ödenecek faiz dolayısıyla ödeme takvimi sonunda ilk alınan borç miktarından daha büyük bir miktar şeklinde geri ödenmesi gerekmektedir. Bugün belirli bir faiz oranında ( $i$ , %) alınan bir borç karşılığında ( $K$ ),  $n$  yıl sonunda ödenecek toplam miktar ( $T$ ) Eşitlik 6.7 ile hesaplanabilmektedir.

$$T = K(1+i)^n \quad (6.6)$$

Örneğin, bir bankadan %14 faiz oranı ile 5 yıllığına alınan 10.000.000 TL'lik bir borç için 5 yılın sonunda ödenecek toplam miktar olacaktır

$$T = (10.000.000 \text{ TL})(1+0,14)^5 = 19.254.146 \text{ TL}$$

Faizin yanı sıra projenin gerçekleştirildiği ülkede enflasyonun da mevcut olması paranın değerini de olumsuz etkileyeceğinden hesaplamalarda enflasyonda da dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla bu noktadan sonra rehberde sunulan hesaplamalarda enflasyonun faiz oranına olan etkisinin de dikkate alındığı kabul edilecektir.

Enflasyon ve faizin olduğu bir ekonomide zamana bağlı olarak paranın değeri değişeceğinden farklı zamanlarda borç alınan ve harcanan paranın değerlerinin karşılaştırılması gerekmektedir. Bunun için bu değişkenlerin dikkate alınarak paranın "**bugünkü değerinin**" hesaplanması gerekmektedir. Eşitlik 6.6'ya göre, belirli bir yıl ( $n$ ) sonunda istenen miktarda bir paranın ( $T$ ) ödenebilmesi için bugün yapılması gereken yatırım miktarı ( $K$ ) aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$K = \frac{T}{(1+i)^n} \quad (6.7)$$

Bu dönüşümün yapılması sayesinde gelecekte yapılacak harcamalar bugünkü değere dönüştürülerek karşılaştırma yapmak mümkün olacaktır.

**Örnek:**

Bir yeraltı ocağında ocağın ömrü boyunca farklı zamanlarda iki ana fanın kullanılması düşünülmektedir. Ocakta ilk ana fan hemen kurulacak ve ocağın büyümesi ile birlikte 4 yılın sonunda bir yeni fan daha sisteme kurulacaktır. İlk fanın satın alma bedeli 1.500.000 TL olup dördüncü yılın sonunda alınacak ikinci fanın satın alma bedelinin ise 2.250.000 TL olacağı tahmin edilmektedir. Buna göre %20 faiz oranıyla yapılacak toplam maliyetin bugünkü değerini hesaplayınız.

Eşitlik 6.7 kullanılarak ikinci fan için dört yıl sonra ödenecek bedelin bugünkü değeri:

$$K = \frac{2.250.000}{(1+0,20)^4} = 1.085.070 \text{ TL olarak bulunur.}$$

Bu durumda ilk fan için 1.500.000 TL de ödeneceğine göre bu iki fan için toplam ödenecek bedelin bugünkü değeri 1.500.000 TL + 1.085.070 TL = 2.585.070 TL olacaktır.

Bu örnekte eğer bugünkü değerler üzerinden bir karşılaştırma yapılmıyorsa ikinci fanın daha pahalı olduğu düşünülebilirdi ancak dikkat edilirse satın alınacak ilk fanın esasen daha pahalı olduğu görülmektedir.

Havalandırma planlamasında ikinci maliyet kalemi ise "işletme maliyetleri" dir. İşletme maliyetleri esasen sistemin sürdürülmesi için her yıl yapılan ödemeleri kapsamaktadır. Bu durumda paranın günümüzdeki değeri ile karşılaştırma yapabilmek için gelecekte yapılacak bu ödemelerin bugünkü değerlerinin bilinmesine gerek vardır. Gelecekte oluşacak ve  $n$  yıl sonunda her yıl sonu ödenecek işletme maliyetlerinin ( $K_i$ ) bugünkü bedelleri ( $T_i$ ) Eşitlik 6.8 ile bulunabilmektedir.

$$T_i = \frac{K_i}{i} \left[ 1 - \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (6.8)$$

**Örnek:**

Bir yeraltı ocağı için bir ana fan satın alınması düşünülmektedir. İki farklı firmadan alınan tekliflere göre A firmasından alınacak fanın ilk yatırım maliyeti 3.000.000 TL ve yıllık işletme gideri ise 4.000.000 TL'dir. B firmasından alınacak fanın ise ilk yatırım maliyeti 4.750.000 TL ve yıllık işletme maliyeti ise 3.400.000 TL'dir. Fanın ocaktaki kullanım süresi 10 yıl ve faiz oranı %20 ise buna göre ana fanı hangi firmadan satın almak daha ekonomik olacaktır?

A firmasından satın alınması düşünülen fan için  $K_i = 4.000.000$  TL,  $n = 10$  yıl ve  $i = 0,20$ 'dir. Buna göre 10 yıllık işletme maliyeti:

$$T_i = \frac{4.000.000}{0,20} \left[ 1 - \frac{1}{(1+0,20)^{10}} \right] = 16.770.000 \text{ TL}$$

olacaktır.

Bu fan için ilk yatırım maliyeti 3.000.000 TL olduğundan A firmasından alınacak fanın toplam maliyeti

3.000.000 TL + 16.770.000 TL = 19.770.000 TL olarak bulunur.

B firmasından satın alınması düşünülen fan için  $K_i = 4.750.000$  TL,  $n = 10$  yıl ve  $i = 0,20$ 'dir. Buna göre 10 yıllık işletme maliyeti:

$$T_i = \frac{3.400.000}{0,20} \left[ 1 - \frac{1}{(1+0,20)^{10}} \right] = 14.255.000 \text{ TL}$$

olacaktır.

Bu fan için ilk yatırım maliyeti 4.750.000 TL olduğundan B firmasından alınacak fanın toplam maliyeti

4.750.000 TL + 14.255.000 TL = 19.005.000 TL olarak bulunur.

Fan A firmasından alınırsa toplam maliyet 19.770.000 TL iken B firmasından alındığında 19.005.000 TL olduğundan bu fanın B firmasından alınması daha ekonomik olacaktır.

### 6.4.1 Eşdeğer Yıllık Maliyet

Bir proje gerçekleştirilirken faiz karşılığı alınan borç paranın gelecekte tamamının bir seferde ödenmesi yerine yıllık eşit taksitler şeklinde ödenmesi daha avantajlıdır. Madencilikte bu yıllık eşdeğer taksitler büyük ilk yatırım harcaması yapılmasını gerektiren temel işlemler (ana fan satın alınması, kuyu-desandre açılması vb.) için kullanılmaktadır. Borç alınan  $T$  miktar para için,  $i$  faiz oranında ve  $n$  yıl boyunca ödenmesi gereken Eşdeğer Yıllık Maliyet (EYM) Eşitlik 6.9 kullanılarak bulunmaktadır.

$$EYM = \frac{(T)(i)}{\left[ 1 - 1/(1+i)^n \right]} \quad (6.9)$$

**Örnek:**

Bir yeraltı ocağında açılacak bir havalandırma kuyusunun toplam maliyeti 90.000.000 TL'dir. Bu kuyu 20 yıl kullanılacağına göre yıllık %15 faiz oranında bu kuyunun Eşdeğer Yıllık Maliyeti (EYM) ne kadardır? Bu ocakta yıllık 1.000.000 ton mineral üretilmesi planlanıyorsa kuyu açmanın ton mineral başına maliyeti ne kadardır?

Açılması planlanan bu kuyu için EYM:

$$EYM = \frac{(90.000.000)(0,15)}{[1 - 1/(1+0,15)^{20}]} = 14.378.500 \text{ TL ve}$$

Her ton mineral başına maliyet ise  $14.378.500 / 1.000.000 = 14,378 \text{ TL/ton}$  olacaktır.

### 6.4.2 Havalandırma İşletme Maliyeti

Havalandırma için kullanılan bir fan tarafından üretilen hava gücü (G) aşağıdaki eşitlikle bulunmaktadır.

$$G = (P_t)(Q) \quad (6.10)$$

Burada;  $P_t$  meydana gelen toplam basınç artışını (Pa) ve  $Q$  ise hava miktarını ( $m^3/s$ ) temsil etmektedir.

Ancak yeraltı ocaklarının havalandırmasında kullanılan bir fan, temel olarak bir elektrik motoru ve pervaneden oluştuğundan ve bu sistemde kaçınılmaz olarak kayıplar olduğundan elektrik motoru tarafından sağlanması gereken gücün hava gücünden daha fazla olması gerekmektedir. Bu kavram ise fan verimi ( $\eta$ , %) olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda fanın elektrik motorunca sağlanan güç (G) (kW) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$G = \frac{(P_t)(Q)}{1000\eta} \quad (6.11)$$

Eğer kWh başına elektrik maliyeti ( $e$ ) de biliniyorsa bu durumda bir fanın yıllık elektrik tüketim maliyeti (işletme maliyeti,  $K_i$ ), Eşitlik 6.12 kullanılarak TL/yıl cinsinden hesaplanabilmektedir.

$$K_i = \frac{(P_t)(Q)}{1000\eta} (e)(24)(365) \quad (6.12)$$

#### Örnek:

Planlama aşamasında olan bir yeraltı ocağında statik basınç kaybının 1200 Pa olacağı ve ihtiyaç duyulan temiz hava miktarının 110  $m^3/s$  olacağı tahmin edilmektedir. Ocakta bu koşullarda çalışacak ve %75 verime sahip bir fanın satın alma bedeli 3.500.000 TL'dir. Bu fanın 10 yıl boyunca hizmet vereceği planlanıyorsa, kWh başına elektrik maliyeti ortalama 4 TL ve yıllık faiz oranı %15 ise bu fanın yıllık toplam satın alma ve işletme maliyetini hesaplayınız.

Bu bilgilere göre; Eşitlik 6.9 kullanılarak fanı satın almanın eşdeğer yıllık maliyeti (EYM)

$$EYM = \frac{(3.500.000)(0,15)}{[1 - 1/(1+0,15)^{10}]} = 697.387 \text{ TL}$$

olarak hesaplanır.

Yıllık işletme maliyeti ise Eşitlik 6.12 kullanılarak:

$$K_i = \frac{(1200)(120)}{1000(0,75)} (4)(24)(365) = 6.727.680 \text{ TL / yıl}$$

olarak bulunur.

Bu durumda bu fanın satın alınması ve işletilmesi sonucunda oluşacak yıllık toplam maliyet ise

$$\text{Toplam Yıllık Maliyet} = EYM + K_i = 697.387 + 6.727.680 = 7.425.067 \text{ TL olacaktır.}$$

### 6.4.3 En Uygun Hava Yolu Boyutlarının Bulunması

Diğer ekonomik hesaplamalarda olduğu gibi bir hava yolunun toplam maliyeti, hava yolunun satın alma (sahip olma) maliyeti ve işletme maliyetinin toplamı olacaktır. Yeraltında sürülen galerilerin maliyetleri açıklığın kesit alanına göre değişmekte, kesit alanı arttıkça kazı maliyeti de artmaktadır. Ancak havalandırma açısından durum tam tersine olmakta ve hava yolunun kesit alanı arttıkça, direnç ve dolayısıyla havalandırma işletme maliyeti azalmaktadır. Bu nedenle, toplam maliyetin minimum olması ancak hava yolu boyutlarının en uygun olduğu durumlarda ortaya çıkabilmektedir.

En uygun hava yolu boyutlarının bulunabilmesi için ilk yatırım ve işletme maliyetleri için maliyet fonksiyonlarının bilinmesine ihtiyaç vardır.

Yeraltında bir hava yolunun açılmasında ortaya çıkan maliyetler sabit ve değişken maliyetler olmak üzere iki türdür. Sabit giderler ekipmanın kurulması ve sökülmesi gibi maliyetleri içermektedir. Basıncılı hava boruları, havalandırma boruları gibi maliyetler açılacak hava yolunun boyu ( $L$ ) ile ilişkilidir. Değişken maliyetler ise hava yolunun kesit alanıyla, dolayısıyla kazılacak hacimle ( $V$ ), ilişkili olarak değişen kazı ve tahkimat maliyetleridir. Bu bilgiler ışığında ilk yatırım maliyet fonksiyonu Eşitlik 6.13'teki gibi ifade edilebilir.

$$K_{\text{ilk yatırım}} = K_{\text{sabit}} + aV + bL \quad (6.13)$$

Burada;  $K_{\text{sabit}}$  sabit giderler,  $V$  hacim ( $m^3$ ) ( $A \times L$ ),  $a$  ve  $b$  ise sabitlerdir.

İşletme maliyetlerinin ise daha önce Eşitlik 6.12 ile hesaplanabildiği belirtilmiştir. Burada;  $P = RQ^2$  ve  $R = k \frac{CL}{A^3}$  olduğundan Eşitlik 6.12 aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$K_i = k \frac{CL}{A^3} Q^3 \frac{e}{\eta} \frac{(24)(365)}{1000} \quad (6.14)$$

**Örnek:**

Bir yeraltı ocağında açılması düşünülen demir bağlı ve püskürtme betonlu sürülecek bir ana giriş desandresi ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir. Buna göre en uygun desandre kesit alanını bulunuz.

**Kazı maliyeti**

Ekipman kurulumu ve sökümü	3.500.000 TL
Kazı maliyeti	5.000 TL/m <sup>3</sup>
Donatı ve kaplama	18.000 TL/m

**Fiziksel veriler**

Desandre şekli	At nalı ( $C = 4,16\sqrt{A}$ )
Desandre boyu	1.500 m
Sürtünme faktörü	0,0067 kg/m <sup>3</sup>
Hava yoğunluğu	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Hava miktarı	200 m <sup>3</sup> /s
Fan verimi	% 70
Desandre ömrü	15 yıl

**Finansal Veriler**

Yıllık faiz oranı	%15
Ortalama elektrik maliyeti	4 TL/kWh

Öncelikle Eşitlik 6.13 kullanılarak ilk yatırım maliyet fonksiyonu oluşturulmalıdır.

$$K_{ilk\ yatırım} = 3.500.000 + 5.000V + 18.000L$$

$$V = AL \text{ ve } L = 1500 \text{ olduğundan}$$

$$K_{ilk\ yatırım} = 30.500.000 + 7.500.000A \text{ olacaktır.}$$

Daha sonra bu fonksiyon kullanılarak Eşitlik 6.9 yardımıyla Eşdeğer Yıllık Maliyet hesaplanmalıdır.

$$EYM = \frac{(30.500.000 + 7.500.000A)(0,15)}{[1 - 1/(1+0,15)^{15}]} = 5.216.020 + 1.282.628A$$

Toplam maliyetin bulunabilmesi için işletme maliyetinin bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Eşitlik 6.14 kullanılarak

$$K_i = (0,0067) \frac{(4,16\sqrt{A})(1500)}{A^3} (200)^3 \frac{4}{0,70} \frac{(24)(365)}{1000}$$

ve

$$K_i = \frac{16.742.312.229}{A^{2,5}} \text{ olarak bulunur.}$$

Bu durumda Toplam Maliyet Fonksiyonu ise

$$\text{Toplam Maliyet} = 5.216.020 + 1.282.628A + \frac{16.742.312.229}{A^{2,5}}$$

olarak bulunur.

En uygun hava yolu boyutunun bulunması için ya toplam maliyet fonksiyonunun grafiğinin çizilmesi ya da bu fonksiyonun türevinin alınarak 0'a eşitlenmesi gerekmektedir. Bu fonksiyonun grafiğinin çizilmesi pratik olmadığından yukarıdaki fonksiyonun türevi alınarak 0'a eşitlenirse:

$$\frac{d \text{ Toplam Maliyet}}{dA} = 1.282.628 - \frac{41.855.780.573}{A^{3,5}} = 0$$

Bu durumda

$$32633 = A^{3,5} \text{ olacak ve } A \text{ ise } 19.48 \text{ m}^2 \text{ olarak bulunacaktır.}$$

## 6.5 Havalandırma Yazılımlarının Kullanımı

Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle geleneksel yöntemlerle yapılan havalandırma planlaması yerini bilgisayar yazılımlarına bırakmıştır. Günümüzde kullanılan havalandırma yazılımları neredeyse havalandırma ile ilgili tüm hesaplamaları ve modellemeleri yapabilmektedir. Bunun yanı sıra tehlike durumlarında ocaktaki kaçış yollarının analizi, gaz yayılım modellemeleri, gerçek zamanlı veri takibi gibi önemli uygulamalar da bu yazılımlarla kullanıma sunulmuştur.

Havalandırma yazılımlarının kullanımının yaygınlaşması bir avantaj olarak görülse de bu yazılımların kullanımında yapılan hatalar yeraltı ocaklarının güvenliğini tehdit edebilmektedir. Günümüzde kullanılan bu yazılımların daha yetenekli hale gelmesi ve alınan çıktılarının daha da "renkli" hale gelmesi kullanıcıları yanıltabilmekte ve yazılımın kullanılmasını gerektiren esas hedefler geri planda kalabilmektedir.

Tüm bilgisayar yazılımlarında olduğu gibi havalandırma yazılımlarının da kullanıcı tarafından girilen verilere göre hesaplama ve modelleme yaptığı gözden kaçırılmamalıdır. Bu nedenle bu yazılımlar kullanılırken verilerin doğruluğunun ve sonuçların gözden geçirilmesi oldukça önemlidir. Havalandırma yazılımlarının simülasyon (canlandırma) amaçlı olduğu ve hatalı üretilen havalandırma modellerinin sistemde yapılacak değişiklikleri de hatalı canlandıracağı unutulmamalıdır.

Herhangi bir havalandırma yazılımında bir yeraltı ocağına ait havalandırma modelinin oluşturulması toplamda bir ya da iki gün sürmektedir. Ancak, oluşturulan bu modeller çoğu durumda ocağın gerçek durumunu yansıtmadığından yanlış planlamaların yapılması kaçınılmaz olmaktadır.

Yanlış planlama sonuçlarının ise ancak sistem çalışmaya başladıktan sonra anlaşılabilir olması ise büyük bir sorundur. Bu nedenlerle **tasarlanan ve havalandırma yazılımlarında modellenen havalandırma planlarının doğruluklarının kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir.** Doğruluğundan emin olunmayan, hatalı modellenmiş bir havalandırma modelinin bir yeraltı ocağında havalandırma ile ilgili kararlarda kullanılmasının önemli maddi kayıp ve iş güvenliği eksikliklerine yol açabileceği unutulmamalıdır.

Havalandırma yazılımlarında yapılan modellemelerin ocağın gerçek durumunu yansıtması çok önemlidir. Bölüm 6.1.2 ve 6.1.3'te belirtilen yöntemlerle havalandırma parametrelerinin (basınç, basınç farkı, hava hızı, hava debisi, sıcaklık, nem gibi) ölçümlerinin hiç yapılmadığı ya da yetersiz/yanlış ölçümlerin yapıldığı durumlarda bir havalandırma yazılımında yapılacak modellemenin ocağın gerçek durumunu yansıtması neredeyse imkansızdır. Havalandırma yazılımlarında oluşturulan modellerden elde edilen sonuçların gerçek durumla uyuşmadığı durumlarda kullanıcılar oluşturulan model üzerinde ayarlamalar, kabuller ve hatta hileler yapmaktadırlar. Bu ayarlama, kabul ve hileler genellikle iyi niyetle yapılmakta ve örneğin sürtünme faktörlerinin, şok kayıplarının, havayollarının kesit alanlarının ya da regülatör ayarlarının değiştirilmesi ile gerçek değerlere ulaşmaya çalışılmaktadır. Ancak birbirine bağlı birçok hava yolunun bulunduğu, birçok çalışma işyerinin olduğu bir yeraltı ocağının modellenen havalandırma şebekesi üzerinde ayarlamalar yaparak sonuçlar almak, yapılan değişikliklerin ocağın diğer kesimlerinde de farklılıklar yaratması nedeniyle neredeyse imkansızla yakındır.

Ancak ender de olsa bazı durumlarda hatalı bir fan eğrisi ve hatalı sürtünme faktörleri kullanılarak "doğru" hava miktarlarına ulaşmak mümkün olabilmekte ve havalandırma şebekesindeki küçük ya da bölgesel değişimler incelenebilmektedir. Bu durumda ise oluşturulan modele bir güven duyulması söz konusu olmaktadır. Hatalı olmasına rağmen bu tür bir model; ocakta yeni bir ana havayolunun açılması, kapatılması, ana fanın yenilenmesi/yerinin değiştirilmesi ya da fan çalışma noktasının modifikasyonu gibi büyük değişikliklerin modellenmesinde çok hatalı sonuçlar verebilmekte ve bu sonuçlar gerekli değişiklik yapıncaya kadar fark edilememektedir.

Bir yeraltı ocağı için havalandırma yazılımları ile oluşturulan havalandırma modelinde ocak içinde hava yoğunluğundaki değişimler, ekipman hareketi nedeniyle oluşan piston etkisi, ısı farklılığı nedeniyle doğal havalandırmadaki değişiklikler, fan performansındaki değişimler (eskimiş, aşınmış kanatlar vb.) göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, barajlar ve kapılardan kaynaklı kaçakların önemsizmemesinin ciddi hatalara neden olacağı unutulmamalıdır. Bunun yanı sıra oluşturulan havalandırma modelinde çok sayıda havayoluna "sabit

akış" değeri atanmamalı, bu şekilde oluşturulan bir modelin "tahmin" kapasitesinin olmadığı gözden kaçırılmamalıdır.

Hatalı oluşturulan bir havalandırma modelinin olası sonuçlarından bir tanesi de fanlarla ilgilidir. Havalandırma yazılımlarında oluşturulan hatalı modeller seçilecek fanın(fanların) istenen basınç ya da hava miktarına ulaşmaması, bir ya da birkaç fanın stall (duraysız) pozisyonuna girmesi, fanın düşük verimde çalışması ve bu nedenle fazla enerji maliyetlerine yol açması gibi sorunlara yol açmaktadır. Burada, yanlış modelleme sonucunda verimsiz çalışan bir fanın bir yıl gibi bir sürede satın alma maliyetinden daha fazla elektrik maliyetine yol açabileceği gözden kaçırılmamalıdır.

## 6.6 Kömür Ocaklarında Havalandırma Planlaması

Kömür ocaklarında kullanılacak havalandırma sistemleri her koşulda yeraltında güvenli ve sağlıklı bir atmosferde çalışmaya olanak verecek şekilde tasarlanmalıdır. Buna yönelik olarak belirlenecek olan hava miktarı rehberde daha önce anlatılan kriterlere göre (Bölüm 6.2) dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Bu noktada, hava miktarının havalandırma gücüne etkisi unutulmamalıdır. Havalandırma gücü, ocaktaki sürtünme kaynaklı basınç kaybı ( $P_f$ ) ve hava miktarının ( $Q$ ) çarpımına eşit olduğundan esas itibarıyla hava miktarının kübü ( $Q^3$ ) ile orantılıdır. Bu nedenle hava miktarı hesabında yapılacak küçük hataların havalandırma gücünü ve dolayısıyla maliyetini yüksek oranda etkileyeceği unutulmamalıdır.

Kömür ocaklarında metan gazı varlığı nedeniyle her bir çalışma noktası "bağımsız" olarak havalandırılmalı (**paralel havalandırma**) ve bu sayede her bir yeraltı çalışma noktasına kirlenmemiş havanın ulaşması sağlanmalıdır. Bu durumda her bir üretim panosuna bir temiz hava kolundan yeterli miktarda temiz hava ulaştırılmalı, bir panonun dönüş havasının (kirli havanın) diğer bir panonun giriş havasına (temiz hava) karışması (**seri havalandırma**) önlenmelidir. Aynı şekilde, tali havalandırılan galerilere de yeterli miktarda temiz havanın ulaştırılması sağlanmalı, hem hazırlık galerisinin dönüş havasının tali fan tarafından emilerek tekrar hazırlık galerisine basılmasını engelleyecek tasarımlar yapılmalı (Bölüm 6.9) hem de bir hazırlık galerisinin hava dönüşünün (kirli havasının) bir diğer iş yerinin temiz havasına karışmadan o bölgedeki ana hava dönüş yoluna bağlanması sağlanmalıdır.

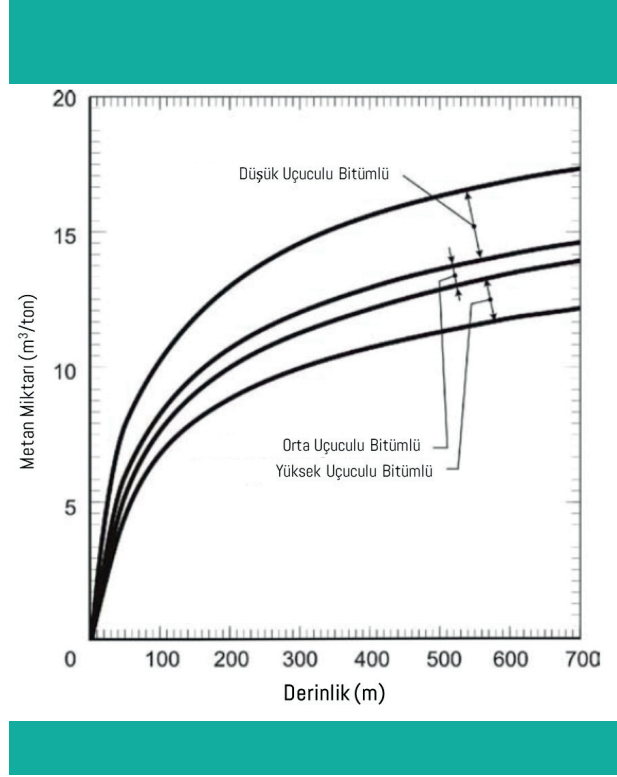
Bu noktada özellikle yeraltı kömür ocaklarında ciddi iş sağlığı ve güvenliği sorunlarına ve dünyada olduğu gibi ülkemiz kömür madencilğinde de çoğu zaman büyük çaplı felaketlere yol açan metan ( $CH_4$ ) gazı, üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir gazdır. Bu gaz ile mücadelede klasik bilgilerin dışında görece olarak az bilinen/dikkate alınmayan önemli noktalar bulunmaktadır. Rehberin bu bölümünde hava hızının kömür ocaklarının havalandırma planlamasında nasıl bir öneme sahip olduğundan da bahsedilecektir.

### 6.6.1 Metan (CH<sub>4</sub>)

Bilindiği üzere CH<sub>4</sub> kömürün oluşumundan kaynaklı sebeplerle kömür bünyesinde bulunan ve madencilik faaliyetleri ile ocak atmosferine yayılan bir gazdır. CH<sub>4</sub> gazı renksiz, kokusuz, tatsız ve zehirli olmayan bir gaz olup özgül ağırlığının (0.554) havadan çok hafif olması nedeniyle ocak koşullarında tavan ve tavana yakın yerlerde birikebilen bir gazdır.

Hava içerisinde %5-15 arası konsantrasyonlarda ve ortamda yeterli oksijen (>%12) ile bulunduğu bu karışıma "grizu" adı verilmekte, bir ateşleyici kaynak bulunduğu patlayıcı özellik göstermektedir (Coward ve Jones, 1952). Ayrıca bazı durumlarda yeraltı kömür ocaklarında ani ve anormal hacimli metan emisyonları (metan püskürmesi; degaj) oluşmakta ve kömürün de ufalanması nedeniyle kömür ocaklarında büyük tehlikelere yol açmaktadır. Bu nedenle, CH<sub>4</sub> kömür ocaklarında en korkulan ve ciddiyetle mücadele edilmesi gereken bir gazdır. Kömür matrisi içine hapsolmuş metanın içeriği ve ocak atmosferine belli bir hızda salınımı ile uzun jeolojik zaman içinde kayalar içindeki çatlak ve kırık sistemlerinde birikip bir yeraltı açıklığı ile kesiştiğinde ani boşalımı (degajı) farklı fenomenlerdir. Bir kömür ocağında ikinci durum söz konusu ise veya böyle bir potansiyel varsa, jeolojik inceleme ve etütler çok önemli rol oynar, fay, kırık ve eklem sistemlerinin haritalanması, bu yapılırken jeofizik araçlardan faydalanılması önemli bir husustur. Jeolojik arıza ve dolayısıyla degaj risk haritaları ocak planlamasında etkin olarak kullanılmalıdır. Çoğu durumlarda metan gazı ve yeraltı suyu degajları birbirine eşlik edebilmektedir. Metan degajı ile ilgili mekanizmaların çok karmaşık olduğu bilinmektedir. Avustralya Kömür Derneği Araştırma Programı (Australian Coal Association Research Programme) kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar bu konuyla ilgili detayları sunmaktadır (ACARP, 1996).

CH<sub>4</sub> çoğunlukla tüm kömür damarlarının bünyesinde bulunan ancak kömürleşme derecesi yükseldikçe miktarı da artan bir gazdır. Ayrıca, görece derindeki kömür yataklarındaki metan miktarının sığ derinliklerde bulunan kömür damarlarına göre daha fazla metan içerdiği bilinmektedir (Şekil 6.4). Bu durumda bazı ocaklarda sığ derinliklerde çalışılırken ciddi sorunlara yol açmayan CH<sub>4</sub> planlamada yapılan hatalar nedeniyle ocağın derinleşmesi ile ciddi havalandırma sorunlarını da beraberinde getirebilmektedir.



Şekil 6.4 Derinlik ve kömürleşme derecesine göre tahmin edilen metan içeriği (Kissell, 2006).

Kömürün gözenekli yapısı ve çatlak ağının yaygın olması nedeniyle CH<sub>4</sub> hem kömür gözeneklerinin iç yüzeylerinde adsorbe (soğrulmuş) halde hem de serbest halde bulunabilmektedir. Serbest halde bulunan CH<sub>4</sub> molekülleri gözenek ve çatlaklar içinde serbestçe hareket edebilmektedir. Ancak serbest halde bulunan CH<sub>4</sub> molekülleri tipik olarak kömürün toplam gaz içeriğinin ancak %5-10'unu içermektedir (McPherson, 1984). Adsorbe haldeki CH<sub>4</sub> moleküllerinin desorbe olabilmesi (gözenek yüzeylerinden koparak serbest hale gelmesi) için bir enerji gerekmektedir. Madencilik faaliyetleri sonucunda kömürün yapısının bozulmasıyla önce serbest haldeki CH<sub>4</sub> molekülleri açılan çatlak ağından geçerek ocak atmosferine yayılmakta ve bunu adsorbe haldeki CH<sub>4</sub> moleküllerinin desorbe olması takip etmektedir. Ancak kömüre ve çeşitli faktörlere (gaz basıncı, porozite [gözeneklilik], permeabilite [iletimlilik], vb.) bağlı olarak CH<sub>4</sub> gazının kömürden desorbe olma hızı kömürden kömüre önemli farklar göstermektedir. Ancak her durumda kömür damarlarında bulunan serbest haldeki CH<sub>4</sub> moleküllerinin öncelikli olarak ocak atmosferine yayılacağı açıktır.

Yukarıda sayılan nedenlerle yeraltı kömür ocaklarında havalandırma planlaması yapılırken kömür damarlarından ocak ortamına yayılacak gaz miktarının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunun içinse kömür damarlarının gaz içeriklerinin ölçülmesi şarttır. Bu amaçla doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

Yaygın olarak uygulanan doğrudan yöntemde; sahada açılan sondajlardan (yerüstü veya yeraltı) alınacak karot (ya da kırıntı) örnekleri kapalı, hava sızdırmaz kaplara konulmaktadır. Daha sonra örnek alınması sırasında kaybedilen gaz miktarı tahmin edilmekte ( $Q_1$ ), örneklerden desorbe olan metan miktarı ( $Q_2$ ) laboratuvar ortamında ölçülmekte ve örnekler içinde kalan gazın ( $Q_3$ ) da öğütülerek belirlenmesiyle toplam gaz içeriği ( $Q=Q_1+Q_2+Q_3$ ) tespit edilmektedir.

Dolaylı yöntemde ise ölçüm yapılacak damardan alınan karot ya da kırıntı örnekleri kapalı bir kaba konulmakta ve artan basınçlar altında kaba metan gazı basılmakta ve her basınçta kabın ağırlığı ölçülerek kömür bünyesine adsorbe olan metan miktarı belirlenmektedir. Daha sonra, basınç değerlerine karşılık gelen toplam metan miktarlarının grafiği (izoterm) çizilmektedir. Bu yöntemle kömür damarının toplam basıncı tespit edilebilmektedir.

Metan yayılımına göre kömür ocaklarında verilen hava miktarının belirlenmesinde çalışılan kömür damarının gaz içeriğinin bilinmesi tek başına yeterli değildir. Zira yeraltı kömür ocaklarında metan yayılımları;

- Çalışılan kömür damarından,
- Çevredeki kömür damarları ve kayaçlardan ve
- Uzunayak gerisinde kalan göçük bölgesinden kaynaklanmaktadır (Durucan ve Güyagüler, t.y.).

Dolayısıyla yeraltı kömür ocaklarında ocak atmosferine yayılan metan emisyonuna göre gerekli hava miktarı hesabının yapılabilmesi için o ocaktaki “**toplam metan yayılımı**” belirlenmesi gerekmektedir. Toplam metan emisyonu ise iki şekilde belirlenebilmektedir.

Bunun için kullanılacak ilk yöntem farklı ülkeler için geliştirilmiş ampirik (deneysel) tahmin yaklaşımlarının kullanılmasıdır. Bu ampirik yaklaşımların temelinde çalışılan kömür damarında yayılımın %100 olacağı ve çevre kömür damarları ve kayaçlardan yayılacak gaz emisyonlarının ise çalışılan damara uzaklığına göre farklı yüzdelere olacağı bulunmaktadır. Örneğin; tabanda bulunan damarlardan ayağa metan yayılımına yönelik olarak Gunther, Flügge, Winter ve Schulz ayağa tabandan 5-10 m'den yakın bulunan damarlardan kaynaklı gaz gelirin damara ait desorbe gaz içeriğinin %100'ü olacağını, Jeger ise bu miktarın damara ait desorbe gaz içeriğinin %90'ı olacağını belirtmişlerdir (Boxho vd., 1980). Bu tahmin yöntemleri ve pratikte uygulanmaları ile ilgili detaylı bilgiye Didari (1988)'den ulaşılabilir.

Toplam metan emisyonunun belirlenebilmesi için günümüzde uygulanabilecek ve daha doğru sonuçlar verebilecek yöntem ise merkezi izleme sisteminde kaydedilen metan konsantrasyonlarının analizi

yoluyla toplam metan yayılımlarının belirlenmesidir. Yöntemin avantajı metan yayılımlarının  $m^3/s$  cinsinden belirlenebilmesi ve hava miktarı hesaplamalarında doğrudan kullanılabilmesidir. Bu yöntemin kullanılabilmesi için ön şart merkezi izleme sistemine bağlı metan sensörleri ve hava hızı sensörlerinin doğru ölçümler yaptığından emin olunmasıdır. Bir ayakta toplam metan yayılımını belirlemek için merkezi gaz izleme sisteminden ayaktaki çalışmaları ve değişiklikleri temsil edebilecek belirli bir zaman aralığında (örneğin ayağın normal çalışma koşullarında 1 ay) ayak hava girişi ve ayak hava dönüşündeki metan sensörleri ve hava hızı sensörlerinin verileri sistemden alınmalıdır. Hava hızı verilerinin alınması ve ayak kesitinin de biliniyor olmasıyla belirli bir zamanda ayaktan geçen toplam ortalama hava miktarı ( $m^3/s$ ) bulunabilmektedir. Metan sensörü verilerinin de aynı zaman aralığında incelenmesiyle ortalama metan konsantrasyonu da bulunabileceğinden ayaktaki toplam metan yayılımı  $m^3/s$  cinsinden bulunabilmektedir.

Yöntemin tek dezavantajı bu yöntemin sadece çalışan ocaklarda uygulanabilmesidir. Ancak bu yöntem kullanılarak elde edilen veriler aynı kömür damarlarında benzer koşullarda çalışan komşu ocakların ya da aynı kömür damarında çalışacak yeni panolarda havalandırma planlanması için de kullanılabilir.

### 6.6.2 Hava Hızı

Yeraltı kömür ocaklarında ihtiyaç duyulan temiz havayı ocak içindeki güzergahlarından geçirebilmek için gereken hava yollarının sayısı (ana yollar, kuyular vb.) bu sayının hava yollarında oluşacak hızları etkilemesi bakımından önem arz etmektedir. Örneğin, 250  $m^3/s$  temiz hava ihtiyacı bulunan bir yeraltı ocağında 20  $m^2$  kesit alanına sahip tek bir hava giriş desandresinin sürülmesi planlandıysa bu durumda desandrede 12,5  $m/s$ 'lik bir hız ortaya çıkacak, bu hız yasal sınırların (ülkemizde 8  $m/s$ ) ve konfor sınırlarının oldukça üzerinde olacak ve bu nedenle bu hava miktarının ocağa sağlanabilmesi için ek yeryüzü bağlantısı/bağlantılarına ihtiyaç duyulacaktır. Benzer şekilde aynı miktardaki bir havanın 3 m çapında tasarlanan tek bir kuyudan ocağa sokulması kuyuda 35,4  $m/s$  gibi sınırların çok üstünde bir hava hızına neden olacaktır.

Yeraltı kömür ocaklarında hava hızının önem kazandığı bir diğer nokta ise metan varlığıdır. Özellikle yeraltı kömür ocaklarında ciddi iş sağlığı ve güvenliği sorununa, dünyada olduğu gibi ülkemizde de çoğu zaman büyük çaplı felakete yol açan metan gazının ocak atmosferinde yasal sınırların altında ve güvenli konsantrasyonlarda tutulabilmesi için gerekli hava miktarının belirlenmesi için [Bölüm 6.2.1](#)'de verilen Eşitlik 6.2 ve 6.3'ün kullanılması gerekmektedir. Ancak metan bulunan yeraltı kömür ocaklarında tespit edilen hava miktarının sağlanması

metanla mücadele için her durumda tek başına yeterli değildir.

Metanın arınlarda ve galerilerin tavan bölümlerinde birikmeye ve tavanda tabakalanmaya meyilli olması dolayısıyla bazı galeriler ve çalışma bölgelerinde genel havalandırma havasındaki metan konsantrasyonu oldukça düşük olmasına karşın aynı bölgelerde tavan seviyesinde yüksek konsantrasyonları görülmesi doğaldır. Ayrıca galeri tavan kısımlarında taş düşmesi ve tahkimat aralarındaki akmalar nedeniyle oluşan cep benzeri boşlukların uygun bir dolgu malzemesi kullanılarak bertaraf edilmesi ve böylece bu ceplerde metan birikmesinin önüne geçilmesi de önemli bir noktadır. Metanın tabakalaşmaya yatkın bir gaz olması nedeniyle yeraltı kömür ocaklarında metan gazıyla mücadelede açıklığa sağlanan hava miktarı esasen tek başına yeterli değildir. Zira metanın hava ile seyreltilmesi ve tabakalaşmasının engellenebilmesi için gerekli türbülansın sağlanması gerekmektedir. Her ne kadar **teorik olarak yeraltı ocaklarında 0.07 m/s'lik bir hızın sağlanması akışı türbülanslı yapsa da bu hız metanın ayırık bir tabaka oluşturmasını önlemeye yeterli değildir.** Bir başka deyişle, çalışma ortamına **yeterli hava miktarı sağlanmasına karşın uygun hava hızı değerleri elde edilemezse metanın tabakalaşması da önlenemez** demektir.

Yaptıkları analitik ve deneysel çalışmalar sonucunda (Bakke ve Leach, 1962) bu olaya yönelik olarak bir Tabakalaşma Katsayısı (TK) geliştirmiştir (Eşitlik 6.15).

$$TK = \frac{v}{1,64^3 \sqrt{\frac{Q_g}{W}}} \quad (6.15)$$

Burada; v hava hızını (m/s),  $Q_g$  metan yayılımını ( $m^3/s$ ) ve W ise hava yolu genişliğini (m) temsil etmektedir.

Eşitlikten görüldüğü üzere metan tabakalaşması üzerinde en etkili parametre hava hızı (v)'dir. Dikdörtgen olmayan kesitlerde hava yolu genişliği (W), galeri genişliğinin  $\frac{3}{4}$ 'ü kabul edilebilir. Ayrıca, teorik olarak hava hızı her ne kadar tabakanın hemen altındaki hız olsa da galeri kesitinin tavadan  $\frac{1}{3}$ 'lük kısmındaki ortalama hava hızı da kullanılabilir. Günümüzde merkezi gaz izleme sistemlerinde kullanılan hava hızı sensörlerinin bu bölgeye yerleştirilmesi bu bölgedeki hava hızının kolaylıkla tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Eşitlik 6.15'teki küp kök ifadesinin metan geliri ve hava yolu genişliğindeki hataları da en aza indirdiği gözden kaçırılmamalıdır.

Bakke and Leach (1962) tabakalaşma katsayısının "2" olduğu durumlarda karışımın sağlandığını ancak yeterli seyrelme için bu katsayının en az "5" olması gerektiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, hava yolunun eğimli olması ve havalandırmanın aşağıdan yukarı yapılması durumunda, tabakalaşmanın doğasından kaynaklanması nedeniyle yolun eğimine göre tabakalaşma katsayısının dolayısıyla

hava hızının bir miktar daha artırılması gerekmektedir (Çizelge 6.4). Tek giriş çıkışlı uzun ayak yönteminin uygulandığı Avrupa ocaklarında çoğu durumda 5 tabakalaşma sayısına ulaşılması çok zor olacağından (tek bir hava yolunda çok yüksek hava hızı elde edileceğinden) tabakalaşma katsayısının "2" olmasının yeterli olacağı da belirtilmiştir.

**Çizelge 6.4** Eğimli galerilerde önerilen en düşük tabakalaşma katsayıları (McPherson, 1993).

Eğim (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Aşağıdan yukarı	5	5.7	6.2	6.6	6.9	7.2	7.4	7.6	7.7	7.8
Yukarıdan aşağı		3.3	3.7	4.1	4.3	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9

Yeraltı kömür ocaklarında metanın tabakalaşmasının engellenmesi için en etkili yöntem havalandırma olmakla birlikte tabakalaşma katsayısının uygun değerlerde tutulması, bazı diğer havalandırma kısıtları ile birlikte değerlendirilmelidir. Rehberin önceki bölümlerinde bahsedildiği üzere (Bölüm 6.2.2) yeraltı kömür ocaklarında ayaklarda tozla en iyi mücadele 2 m/s hava hızında gerçekleşmekte ve hava hızlarının 4 m/s üzerinde olmaması gerekmektedir. Bunun yanında hava miktarının artırılması ise hava gücü hava miktarının küpü ile orantılı olduğundan havalandırma maliyetlerini ciddi oranda arttırmaktadır. Bu bilgiler ışığında yeraltı kömür ocaklarında havalandırma planlamasının bu koşulları gözeterek optimum koşullara yönelik yapılması bir mecburiyettir. Bu noktada pratikten bir örnek durumu açıklamak yerinde olacaktır.

#### **Örnek:**

*Haftada 5 m ilerleme yapan ve yılda 100,000 ton kömür üreten, orta dereceli metan emisyonuna ve 4.5 m<sup>2</sup> kesit alanına sahip bir uzunayak panosunda toplam metan emisyonu 0.285 m<sup>3</sup>/s'dir. Bu durumda bu uzunayağa verilmesi gereken en düşük hava miktarı ne kadardır (pano hava dönüş yolunun genişliği 3m'dir)? Eğer bu şartlarda çalışmak mümkün olamıyorsa ne yapmak gerekir?*

*Ayakta toplam metan geliri 0.285 m<sup>3</sup>/s ise pano hava dönüş yolunda metan konsantrasyonunu %1.5 altında tutabilmek için gerekli minimum hava miktarı 19 m<sup>3</sup>/s olmalıdır (Eşitlik 6.2'den). Uzunayağın kesit alanı 4.5 m<sup>2</sup> olduğuna göre ayaktaki hava hızı*

$$v = (19 \text{ m}^3/\text{s}) / (4,5 \text{ m}^2) = 4.22 \text{ m/s olacaktır.}$$

Bu hava hızı ise ayakta müsaade edilen hava hızı sınırını aşmaktadır. Panonun hava dönüş yolunda tabakalaşma katsayısının 5 ya da en azından 2 olması için ihtiyaç duyulan hava hızları ise

$$5 = \frac{v}{1,643 \sqrt[3]{\frac{0,285}{3}}} = 3,74 \text{ m/s} \text{ ve } 2 = \frac{v}{1,643 \sqrt[3]{\frac{0,285}{3}}} = 1,49 \text{ m/s}$$

olacaktır.

Buna göre ayağa sağlanması gereken  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  hava miktarı ile yeterli tabakalaşma katsayıları elde edilmesine rağmen iş sağlığı ve güvenliği koşulları açısından bu hava miktarını ayaktan geçirmek mümkün olmayacaktır. Bu durumda metan drenajı gibi bir alternatifin düşünülmesine ihtiyaç bulunacaktır.

Eğer metan drenajıyla  $0.285 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik metan geliri örneğin yarıya düşürülürse ayakta metan geliri  $0.143 \text{ m}^3/\text{s}$  olacaktır. Bu durumda metan konsantrasyonunun %1.5 altında tutulması için gerekli minimum hava miktarı ise  $9.53 \text{ m}^3/\text{s}$  ve arındaki hava hızı ise  $2.11 \text{ m/s}$  olacaktır.

Hava dönüş yolunda tabakalaşma katsayısının 5 ya da en azından 2 olması için gerekli hava hızları ise

$$5 = \frac{v}{1,643 \sqrt[3]{\frac{0,143}{3}}} = 2,97 \text{ m/s} \text{ ve } 2 = \frac{v}{1,643 \sqrt[3]{\frac{0,143}{3}}} = 1,19 \text{ m/s}$$

olacaktır.

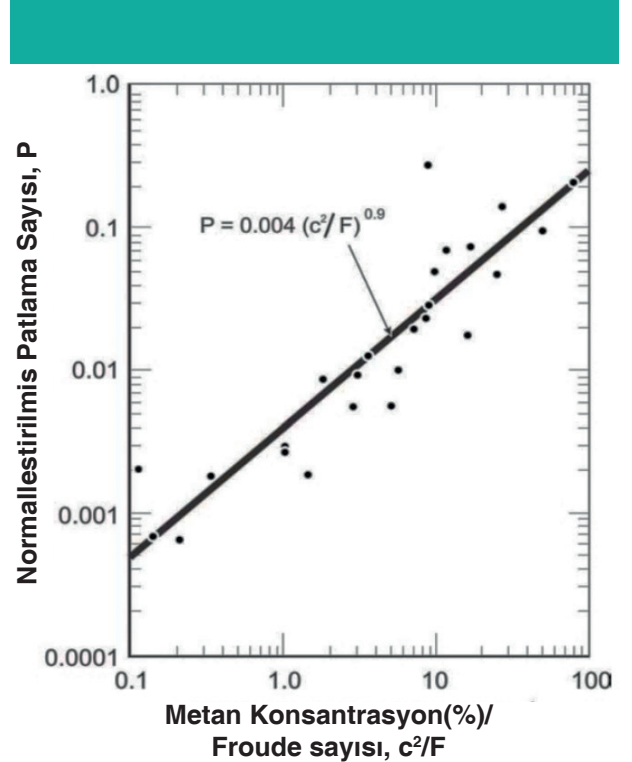
Bu durumda ise arına sağlanan  $2.11 \text{ m/s}$  hava hızıyla elde edilecek tabakalaşma katsayısı  $3.55$  olacak ve güvenli çalışma için ihtiyaç duyulan koşullar sağlanmış olacaktır.

Tabakalaşma katsayısının önemini yanı sıra, metan konsantrasyonu ve Froude sayısı arasında da bir ilişki bulunmaktadır. Froude sayısı ( $F$ ) Eşitlik 6.16 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$F = \frac{v^2}{g \frac{\Delta\rho}{\rho} \sqrt{A}} \quad (6.16)$$

Burada;  $F$  Froude sayısını,  $v$  hava hızını (m/s),  $g$  yerçekimi ivmesini ( $\text{m/s}^2$ ),  $\Delta\rho/\rho$  hava ve metan arasındaki yoğunluk farkının hava yoğunluğuna bölümünü ve  $A$  ise havayolunun kesit alanını ( $\text{m}^2$ ) belirtmektedir.

Bakke vd. 1958-1965 arasında Birleşik Krallıkta uzunayaklarda ve taban yollarında meydana gelen 123 parlama/patlamayı incelemiş ve patlama riskinin tek başına metan konsantrasyonuna bağlı olmadığını ve metan konsantrasyonu ( $c$ ) ve Froude sayısının ( $F$ ) tek bir değişken ( $c^2/F$ ) olarak ifade edilebileceğini göstermiştir (Kissell, 2006) (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Patlama sayıları ile  $c^2/F$  ilişkisi (Kissell, 2006)

Şekilden görülebileceği üzere verilere uyarlanan doğrunun denklemi  $P = 0.004 (c^2/F)^{0.9}$  dur. Froude sayısı ile birlikte değerlendirildiğinde; çoğu ocakta kesit alanı ( $A$ ),  $c^2$  ve  $v^2$  ye kıyasla fazla değişmemektedir. Dolayısıyla, patlama riski esas olarak  $c^2/v^2$  ile ilişkilidir.

**Örnek:**

$10 \text{ m}^2$ 'lik bir kesite sahip bir hava yolunda metan konsantrasyonu % 1 ve hava hızı  $0.5 \text{ m/s}$  iken hava hızının  $0.6 \text{ m/s}$ 'ye çıkarılmasıyla patlama riski nasıl değişir?

Kesit alanı  $10 \text{ m}^2$  ve hava hızı  $0.5 \text{ m/s}$  ise kesitten geçen hava miktarı  $Q = (10 \text{ m}^2)(0.5 \text{ m/s}) = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Hava yolundaki metan konsantrasyonu %1 ise bu durumda metan geliri  $(5 \text{ m}^3/\text{s}) / 100 = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir.

Hava hızı  $0.6 \text{ m/s}$ 'ye çıkarılırsa, bu durumda kesitten geçen hava miktarı  $Q = (0.6 \text{ m/s}) (10 \text{ m}^2) = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  olacak ve ortamdaki metan konsantrasyonu ise  $c = (0.05 \text{ m}^3/\text{s}) / (6 \text{ m}^3/\text{s}) = \%0.83$  olacaktır. Buna göre ilk durumda patlama riski

$P_1 = 1^2 / (0.5 \text{ m/s})^2 = 4$  iken, ikinci durumda

$P_2 = (0.83)^2 / (0.6 \text{ m/s})^2 = 1.91$  olacaktır.

Buna göre hava hızının  $0.5 \text{ m/s}$ 'den  $0.6 \text{ m/s}$ 'ye çıkarılması patlama riskini yarıdan da aza indirecektir.

Bu sebeplerle, diğer nedenlerin (tozla mücadele) yanında, yeraltı kömür ocaklarında metanla mücadele için özellikle ayaklarda ve hazırlık galerilerinde yeterli hava miktarının

sağlanması yeterli olmamakta, gerekli hava hızının da mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Ancak, ülkemizdeki yeraltı kömür ocaklarında hava hızlarının artırılmasının kendiliğinden yanmayı tetikleyebileceği gibi yanlış bir algı bulunmakta ve hava hızları ayaklar ve hazırlık galerilerinde gerekli hız değerlerinin çok altında tutulmakta, hatta özellikle sınırlandırılmaktadır. Unutulmamalıdır ki, gelişmiş ülkelerde kömür ocaklarında ayaklarda 2-3 m/s hava hızlarına ulaşılmakta (Colinet vd., 1997; Gillies ve Wu, 2002; Rider ve Colinet, 2007) ancak ocak planlamalarının uygun yapılmasıyla kendiliğinden yanma sorunları nadiren yaşanmaktadır.

### 6.6.3 Uzunayaklarda Havalandırma

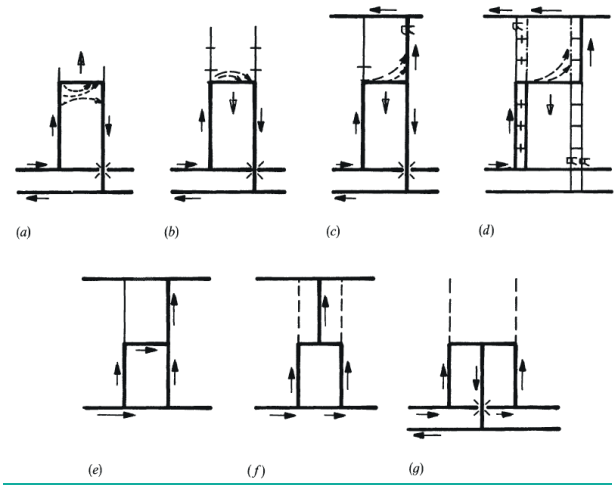
Uzunayak üretim yöntemi yeraltı kömür madenciliğinde dünyada ve ülkemizde en yaygın olarak kullanılan üretim yöntemidir. Esas itibarıyla kömür damarının lağımlarla kesilmesini takiben eş zamanlı olarak taban yollarının sürülmesi ve daha sonra bu taban yollarının bir baca (genellikle başyukarı) ile birleştirilerek ayağın teşkil edilmesi şeklinde uygulanan bir yöntemdir.

Yeraltı madenciliğinden genel olarak hava akımının yönü iki konu açısından oldukça önemlidir. Bunlardan ilki üretilen cevherin nakliyatı ile ilgilidir. Hava akımı ve nakliyatın ters yönde olduğu sistemlere “**antitropal**” denmektedir. Bu sistemin kullanıldığı durumlarda nakliyat “*hava giriş yollarında*” yapılmaktadır. Hava akımı ile nakliyat yönünün aynı olduğu sistemler ise “**homotropal**” olarak adlandırılmakta ve bu sistemlerde ise nakliyat “*hava dönüş yollarında*” yapılmaktadır. Bu bakımdan, özellikle **metan içeriği yüksek ve/veya toz sorunu yaratan tipte kömürlerin üretildiği yeraltı kömür ocaklarında “homotropal” sistemin kullanılması tercih edilmelidir.** Bu sayede, üretilen kömürün nakliyatı sırasında ortama yayılacak metan ve toz gibi kirlenmelerin çalışma iş yerlerine ulaşması engellenmektedir.

Hava yönü açısından ikinci konu ise havalandırmanın başyukarı mı başaşağı mı yapılacağıdır. **Başyukarı** havalandırmada hava, alt kattan üst kata doğru akmaktadır. **Başyukarı havalandırmanın avantajı özellikle metan yönündendir.** Metan, havadan hafif bir gaz olduğundan doğal olarak üst kotlara doğru hareket etmeye eğilimlidir. Bu durumda yeraltı kömür ocaklarında havanın alt kottan üst kotlara akması oldukça avantajlı hale gelmektedir. Havanın damar eğimi yönünde (üst kattan alt kata doğru) hareket ettiği “**başaşağı**” havalandırmanın uygulandığı durumda ise metan ayak ve nakliyat yolları içine dolmakta ve tehlikeli durumlar ortaya çıkabilmektedir.

Ocak koşulları ve gazlılık gözetilerek yöntemin uygulandığı yapılar varyasyonlara bağlı olarak uzunayak yönteminde havalandırma sistemi de değişebilmektedir

(Şekil 6.6). Şekilde görülen sistemlerden (e), (f) ve (g)'de verilen havalandırma tipleri, ayakta açığa çıkan gaz yayılımının havadan ağır gazlardan oluştuğu durumlarda yaygındır. Basit U-havalandırma sisteminde ise 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. Ancak sistemin temel dezavantajı ise özellikle gazlı ocaklarda yüksek konsantrasyondaki metanın panonun üst taban yolu köşesinde birikmesidir (Şekil 6.7).



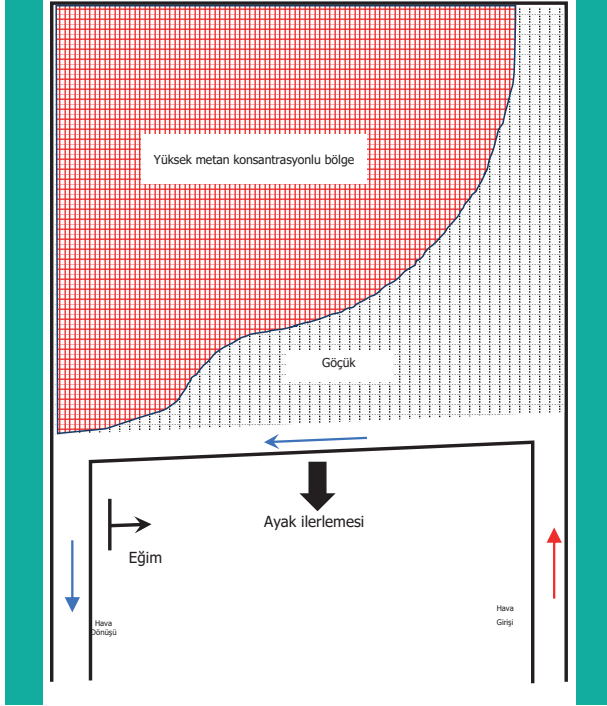
**Şekil 6.6** Uzunayak havalandırma sistemleri (a) tek-girişli ilerletimli U-tipi, (b) tek-girişli dönümlü U-tipi, (c) arka nefeslikli tek-girişli dönümlü, (d) arka nefeslikli çift-girişli dönümlü, (e) Y sistemi, (f) çift-Z sistemi ve (g) W sistemi (McPherson, 1993).

Çok yüksek günlük üretimlerin hedeflendiği ve çoklu taban yollarının sürüldüğü ABD, Avustralya ve Çin gibi ülkelerin aksine ülkemiz yeraltı kömür ocaklarında üretim tek giriş-tek çıkış (bir alt taban yolu ve bir üst taban yolu) şeklinde yapılmaktadır. U-tipi havalandırma yapılan, tek-girişli dönümlü sistemde temiz hava pano hava girişinden (genellikle alt taban yolu) ayağa gelmekte ve ayakta kirlenerek hava dönüş yolundan (genellikle üst taban yolu) ayağı terk etmektedir (Şekil 6.8). Sistemin uygulanması için kömür kesen lağımların bulunduğu her iki katta da hazırlıkların tamamlanmış olması ve taban yollarının pano sınırına kadar önceden sürülmüş olması gerekmektedir.

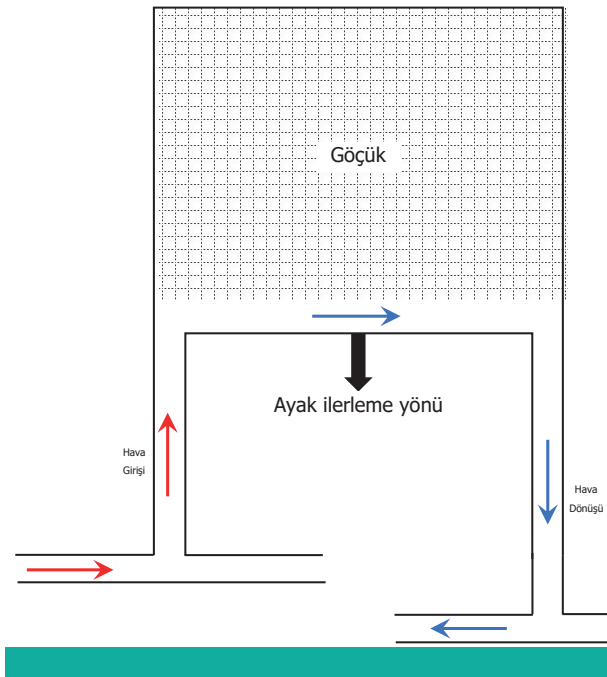
Uzunayak yönteminin kullanıldığı yeraltı kömür ocaklarında çalışma yapılan tüm panolar birbirinden bağımsız olarak havalandırılmalıdır. Bunun sağlanabilmesi için her bir çalışma bölgesine diğer bölgelerden bağımsız olacak şekilde temiz hava sağlanmalıdır (*bağımsız havalandırma*). Bunun temel sebebi, bir çalışma bölgesine sağlanan temiz havanın kirlenmelerle ( $CH_4$ , CO, toz vb.) kirlendikten sonra diğer bir çalışma bölgesine giriş havası olarak verilmesinin engellenmesidir.

Uzunayak yönteminin uygulandığı kömür ocaklarında, tali fanlar hariç, tüm ana fanlar yerüstüne yerleştirilmelidir. Her ne kadar ocak ana fanları bağımsız enerji kaynaklarına

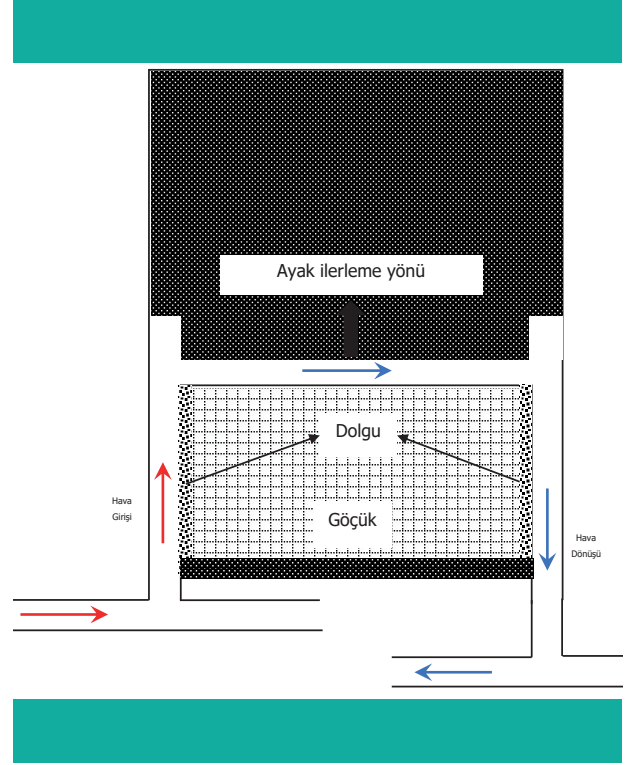
bağlanıyor olsa da **olası bir güç kesintisi durumunda ocakta metan yayılımı açısından avantajlar teşkil etmesi nedeniyle yeraltı kömür ocaklarında “emici” fanlar kullanılmalıdır.** Genel itibariyle büyük ocaklarda birden fazla ana fanın kullanılmasına ihtiyaç duyulabilmektedir.



**Şekil 6.7** U-havalandırma sisteminde göçükte metan dağılımı (Krzystolik, 1991'ten değiştirilerek)



**Şekil 6.8** Tek girişli - dönümlü uzun ayakta U-tipli havalandırma



**Şekil 6.9** Tek girişli-ilerletimli uzun ayakta U-tipli havalandırma

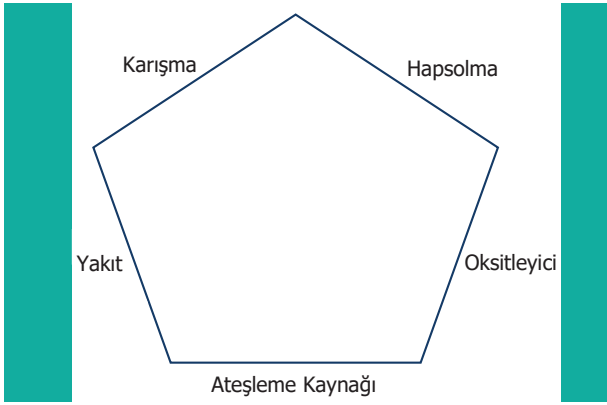
## 6.7 Kömür Tozu Patlamaları

Genel anlamıyla toz, kırma ya da diğer mekanik işlemler sonucu ana maddenin fiziksel ayrışmasıyla oluşan katı taneciklerdir. Bu tanecikler genellikle düzensiz şekle sahip ve  $0.5 \mu\text{m}$ 'den büyüktürler (Kulkarni vd., 2011). BS2955 (1958)'e göre  $1000 \mu\text{m}$ 'den küçük boyutlu tanecikler “pudra” olarak tanımlanırken  $74 \mu\text{m}$ 'den ( $200 \text{ meş}$ ) küçük çaplı taneler ise “toz” olarak tanımlanmaktadır. Yangından Korunma Ulusal Derneği (NFPA) ise tozu, çapı  $420 \mu\text{m}$  ya da daha küçük olan herhangi katı parçacık olarak tanımlamaktadır (NFPA, 2002).

Yeraltı kömür ocaklarında tozun ortaya çıkması madencilik faaliyetlerinin kaçınılmaz bir sonucudur. Kömürün oluşum süreci boyunca kömür damarındaki doğal hareketler ve çevre kayaların damar üzerinde yarattığı basınç nedeniyle oldukça ince boyutta tozlar oluşmaktadır. Bunun yanı sıra yeraltı kömür ocaklarında üretim, delme, patlatma, yükleme ve nakliyat sırasında da kömür tozu oluşmaktadır. Bu faaliyetler sonucu oluşan ve havada asılı kalan tozlar havalandırma akımı ile birlikte taşınmakta ve tavan ve tahkimat üzerinde, yan duvarlarda ve ocak tabanında birikerek patlamalar için potansiyel bir yakıt olabilmektedir.

Bir toz patlamasının oluşabilmesi için havada asılı duran yanıcı özellikte partiküllerin ateşleyici bir kaynaktan temas geçmesi ve hızlı bir şekilde yanması gerekmektedir.

Havada asılı duran maddenin tane boyutu azaldıkça yanma daha hızlanmakta ve patlayıcı olmaktadır. Ancak bu belirli bir tane boyutuna kadar olmakta zira belirli bir boyuttan sonra tanecikler birbirine bağlanma eğiliminde olmaktadır (Eckhoff, 2003). Toz bulutu eğer kapalı bir ortamda değilse sadece bir harlama ile yanmakta ancak kapalı bir ortamda ise yanma ısı toz bulutu boyunca alev ilerlemesi ile birlikte ani bir basınç gelişimine yol açabilmektedir. Bu şok dalgası esasen normal ocak atmosferi ile genişleyen patlamanın artan basıncı arasında hareketli bir sınır oluşturmaktadır. Bu nedenle şok dalgası boyunca oldukça yüksek yoğunlukta basınç gradyanı bulunmakta ve bu gradyan patlamanın güzergahında bulunan nesnelere üzerine büyük bir dinamik yükün etkimesine sebep olmaktadır (McPherson, 1993). Şekil 6.10'da bir toz patlamasının oluşabilmesi için bir arada bulunması gereken faktörler görülmektedir.



Şekil 6.10 Patlama beşgeni

Kömür ocaklarında meydana gelen patlamaların tümü, uzunca bir süre metan gazına bağlanmış, kömür tozunun patlaması olayını madencilik endüstrisi çok geç kabullenmiştir. Özellikle yüksek uçucu madde miktarına sahip kömürlerin üretildiği yeraltı ocaklarında ocak açıklıklarında birikmiş olan ince tozların bir darbe etkisiyle havalanarak yoğun bir buluta dönüşmeleri ve bu bulutun bir ateşleyici kaynakla temas etmesi sonucunda toz patlamaları oluşabilmektedir.

Yeraltı kömür işletmeciliğinde karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi olan kömür tozu patlamaları çok ciddi iş sağlığı ve güvenliği sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle bir yeraltı kömür ocağında oluşan kömür tozunun patlama karakteristiklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu karakterizasyon çalışmaları ocakta yapılan ölçümleri ve deneysel çalışmaları kapsamaktadır. Bu tür çalışmalarla bir ocağındaki toz kaynakları belirlenebilmekte, patlayabilir kömür tozunun özellikleri, miktarı (biriken ve havada asılı), alt patlama sınırları, metan varlığında davranışı, minimum ateşleme sıcaklığı ve inertleme yöntemi gibi birçok özellik belirlenebilmektedir.

### 6.7.1 Kömür Tozunun Patlayabilirliğini Etkileyen Faktörler

Kömür tozunun patlayabilirliği aşağıda detaylı olarak açıklanan pek çok faktöre bağlıdır.

*Kömürün türü:*

Kömür tozunun patlayabilirliğinin artan uçucu madde ile arttığını gösteren birçok kanıt vardır (Holding, 1982; Didari, 1985). Bu nedenle, düşük kömürleşme derecesine sahip kömürler toz patlamalarına daha yatkındırlar. Ancak, bu yüksek kömürleşme derecesine sahip kömürlerin üretildiği ocaklarda patlama olmayacağı anlamına gelmemektedir (McPherson, 1993).

Kömür tozunun patlayabilirliği tozun kül, nem içeriği ve yaşının artması ile azalmaktadır. Uzun süre bekleyen kömür taneciklerinin üzerleri kısmi bir oksidasyon tabakası ile kaplanacaktır. Bu nedenle çalışan bir ayak ya da kazı yüzeyinde toz patlaması riski daha yüksek olmaktadır.

*Tozun inceliği*

Genel olarak, tozun patlayabilirliği, tane boyutu incelidikçe artmaktadır. Bunun nedeni ise tane boyutunun küçülmesi sonucunda artan yüzey alanı ve taneciklerin hava ile daha yoğun bir karışım oluşturmalarıdır. Birçok deneme, patlamalarda yer alan tozun 0.75-1 mm'den daha küçük boyutlarda olduğunu ve en dikkate değer tane boyutunun 75 µm dolayında olduğunu göstermiştir. Polonyalı araştırmacılar 75 µm'den küçük taneciklerin çok tehlikeli olduğunu, Sovyet araştırmacılar ise metrik 80 No. elekten geçebilen tozların (66-100 mikron) önemli olduğunu kabul etmektedirler (Didari, 1985). ABD'de ise standart toz patlama testlerinde %95'i 200 meş (75 µm) altına geçen örnekler kullanılmaktadır (ASTM, 2012, 2014, 2019). Ancak genel bir yaklaşım olarak, havalandırma ve hava ile karışan herhangi bir tozun patlayabilir olduğu söylenebilir. Bu durumda ise 250 µm'dan küçük çapa sahip tüm tanecikler patlayabilir olarak kabul edilebilir (McPherson, 1993). Ayrıca, patlayabilir ortam oluşturma potansiyeli olan tozlar (<74 µm) ocak havasında asılı durabilmekte ve hava akımlarıyla ocağın farklı kesimlerine taşınarak birikebilmektedir. Bir basınç etkisiyle bu tozlar havalanabilmekte ve sonuçları felaket olan patlamalara yol açabilmektedir (Harris vd., 2010).

*Tozun konsantrasyonu*

Bir toz patlamasının oluşabilmesi için bir toz bulutu içindeki tozun belirli sınırlar içinde olması gerekmektedir. Bu sınırlar g/m<sup>3</sup> cinsinden ifade edilmektedir. Tozların patlayabilirliğinde genellikle alt patlama sınırı dikkate alınmaktadır. Bu sınır, alevin ilerlemesi için havada yeterli

tozun bulunduğu konsantrasyona karşılık gelmektedir. Havada toz tanecikleri birbirine çok yakınsa (yoğunsa) bu durumda tanecikler arasında yeterli oksijen kalmayacak ve ısı üretimi olmayacaktır. Sıcaklığın tozun ateşlenme noktasından düşük kaldığı bu durum üst patlama sınırı olarak adlandırılmaktadır.

%25-30 uçucu madde içeren ince tozlarla yapılan çeşitli denemelerde, iş yeri hacmi içinde çökmüş toz miktarı 100-120 g/cm<sup>3</sup> olan ocakların tehlikeli ve 300-400 g/cm<sup>3</sup> olan ocakların ise yüksek derecede tehlikeli kabul edilebilecekleri görülmüştür (Didari, 1985). Holding (1982) kömür tozunun uçucu madde içeriğine göre alt patlama sınırının 50 g/m<sup>3</sup> mertebesinde olduğunu ve maksimum patlayabilirliğe ise 150-300 g/m<sup>3</sup> seviyelerinde erişildiğini rapor etmiştir. Kömür tozunun uçucu madde içeriğinin artmasıyla bu sınırlar daha aşağı seviyelere düşmektedir (Ürünveren ve Ural, 2017).

%5 ve daha az SiO<sub>2</sub> içeren solunabilir toz miktarı sınırlarının 2.4 mg/m<sup>3</sup> mertebelerinde olduğu göz önüne alındığında 50 g/m<sup>3</sup>lük bir konsantrasyonun boğucu bir atmosfer yaratacağı açıktır. Dolayısıyla, bir ocak havalandırma şebekesinin herhangi bir kolunda normal şartlarda bu türlü bir konsantrasyonun bulunması mümkün değildir. Ancak, toz bastırma yöntemlerinin kullanılmadığı ya da etkin kullanılmadığı durumlarda mekanize kazı makinelerinin kesici kafalarında patlayıcı toz konsantrasyonları oluşabilmektedir. Ayrıca, hava yolları ya da konveyörlerin üzerinde birikecek çok ince bir kömür tabakası bir şok dalgasıyla havalandığında patlayıcı bir atmosfer yaratabilmektedir.

#### Nem

Ocaklarda çökmüş olan toz, genellikle serbest nem (yüzey nemi) içermekte olup bunun patlayabilirlik üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu etki higroskopik (kimyasal olarak bağlı) nem içeriğine göre daha büyüktür. Kömür tozundaki nemi buharlaştırmak için enerji gerekmekte, bu enerji ise toz bulutunun ateşlenmesi için mevcut enerjiyi azaltmaktadır. Ayrıca, su buharı bir inert (kimyasal tepkimeye girmeyen) gaz gibi davranmakta ve patlayıcı atmosferi seyreltmektedir. Nemin en önemli özelliği toz taneciklerini ıslatması ve topaklanmasını sağlamak ve bu sayede tozun dağılılırliğini azaltmasıdır (Hartmann, 1954).

Denemeler, nem oranındaki çok küçük oynamalarla patlamaz nitelikteki tozların patlayabilir duruma geçebildiğini ya da tersine durumların oluşabildiğini göstermiştir. Özellikle, oldukça fazla nem içeren ocak kısımları, kuru toz içeren kısımlara komşu iseler dikkatli olunması gerekmektedir. Kuru kısımlarda başlayabilecek bir patlama karşısında ıslak kısımların pek önemli bir engel

olamayacağı ve patlamanın gelişebileceği bilinmelidir. Diğer bir deyişle, ıslaklık koşulları tüm bir bağımsız ocak kesiminde homojen olmadıkça yerel ıslaklıklar, toz patlaması açısından bir anlam taşımamaktadır (Didari, 1985).

#### Metan

Ocak havasında küçük yüzdelerde dahi metan bulunması tozun alt patlayabilirlik sınırını düşürmekte, toz bulutunu ateşlenmeye karşı daha duyarlı yapmakta ve toz patlamasının şiddetini arttırmaktadır. Hartmann (1954) bu durumu; ateşlemenin ilk safhasında kömür tozundan yayılan yanabilir gaz ile metan gazının karışması nedeniyle atmosferde metan gazı bulunduğu durumlarda patlayıcı konsantrasyona kömür tozunun tek başına bulunduğu durumlardan daha hızlı ulaşılmasının sebep olduğu şeklinde açıklamıştır. Bu nedenle grizulu ocaklarda toz patlamalarına karşı çok daha duyarlı olunması önerilmektedir.

#### Ateşleme kaynağı

Bir toz patlamasında ilk ateşlemenin enerji seviyesi toz patlamasının gücü ve ilerleme hızı konularında büyük bir rol oynamaktadır. Yeraltı kömür ocaklarında toz patlamalarını başlatan en önemli kaynak grizu patlamalarıdır. Bu türlü bir olay bir şok dalgası yaratmakta ve alevle birlikte toz patlamalarına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, patlayıcı maddelerle yapılan ateşlemeler de toz patlamalarına neden olabilmektedir. 1906 yılında Courrieres ocağında ocak atmosferinde metan bulunmamasına rağmen meydana gelen toz patlamasının yasak olan patlayıcı maddenin kullanılmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Cybulska, 1981).

Ayrıca, yangınlar sonrasında oluşan karışık gaz patlamaları da olaya neden olabilen kaynaklardır. Bunlar hem tozu havalandıran ve hem de ateşleyebilen unsurları birleştirdikleri için daha önemlidirler. Öte yandan herhangi bir nedenle havada askıya geçmiş bir toz bulutunun ateşlenmesi için ocakta grizuyu ateşleyebilen tüm kaynaklar uygun olabilmektedir.

### 6.7.2 Kömür Tozunun Patlayabilirliğinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Ekipman ve Deneysel Çalışmalar

Kömür tozunun patlayabilirliğinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar 20. yüzyılın başlarında başlamıştır (Hartmann, 1954). Bu araştırmalarda temel amaç; kömür tozu patlamalarının anlaşılması, önlenmesi ve kontrol edilmesi çerçevesinde, "kömür tozunun patlayabilirliği", "minimum patlayabilir toz konsantrasyonu", "minimum ateşleme enerjisi" ve "minimum ateşleme sıcaklığı" gibi

parametrelerinin belirlenmesine yönelik olmuştur. Kömür tozunun patlayabilirliğine yönelik deneysel çalışmalar esas itibariyle (i) Deneysel ocaklarda yapılan çalışmalar,

(ii) Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar olmak üzere iki grupta incelenebilir:

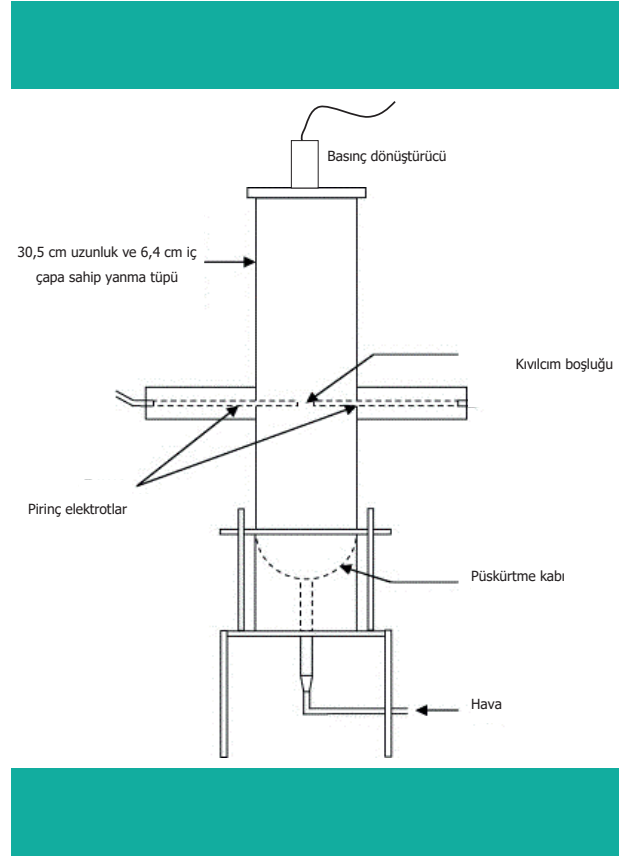
(i) Deneysel ocaklarda yapılan çalışmalar:

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

(ii) Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar:

Kömür tozunun patlayabilirliğine yönelik olarak laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda çeşitli tip ve ebatlarda birçok ekipman denemiş olmasına rağmen (Eickhoff, 2003) en sık kullanılan iki alet "Hartmann Aparatı" ve "20 L küre"dir. Bu aletlerden Hartmann aparatı, kömürün patlayabilirliği için ilk olarak kullanılmaya başlanmış ve 1980 öncesi dönemde bu alet kullanılarak büyük miktarda veri üretilmiştir (Lees, 1996, 2005).

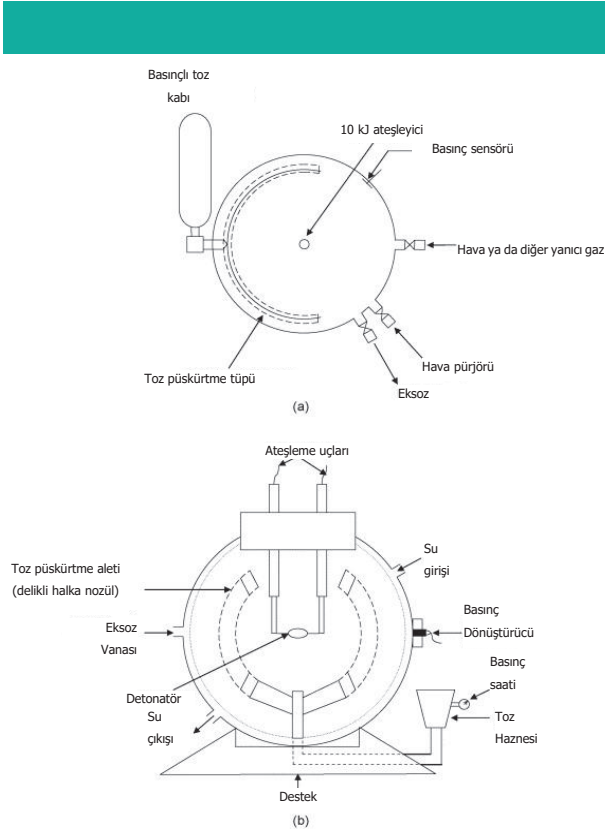
Bir Hartmann aparatı; tozun hava ile içine püskürtüldüğü 1.2 L hacmindeki düşey bir tüpten oluşmaktadır (Şekil 6.11). Bu tüpe bağlı ısıtılmış bir tel ya da kıvılcım üretici bir ateşleme kaynağı olarak görev almaktadır. Aparatta kömür tozu tane boyutu, minimum toz konsantrasyonu, ateşleme enerjisi, sıcaklık gibi parametrelere bağlı olarak alev ilerlemesi izlenmektedir. Aparat üzerinde bir basınç dönüştürücüsü bağlanarak kömür tozunun patlamasından kaynaklanan maksimum basınç ve zamana bağlı maksimum basınç artışını,  $(dP/dt)_{max}$  da ölçmek mümkün olabilmektedir.



Şekil 6.11 Tipik bir Hartmann aparatı

Hartman 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 – alev ilk genişlemeden geçerken tüp içerisinde yukarı ve aşağı yönde hareket etmekte - olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı bu aparatta gerçekten daha düşük yanma oranları ve basınç artışları kaydedilmekte ve sonuçta elde edilen basınç artışları daha karmaşık cihazlarda elde edilen değerlerden daha az olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı Hartmann aparatı günümüzde halen tozların yanabilirliğini (yanabilir/yanmaz) test etmek için eleme amaçlı kullanılmaktadır.

Hartmann aparatından elde edilen basınç artışı sonuçlarındaki eksiklikler ise günümüzde büyük hacimli test aletleriyle aşılmıştır. Bu tür aletlerde bir toz bulutu boru şekilli bir aparattan daha iyi modellenebilmektedir. Bu amaca yönelik olarak kullanılan iki alet Siwek (1977) tarafından geliştirilen 20 L küre ve 1 m<sup>3</sup>’lük standart ISO kabıdır (ISO, 1985) (Şekil 6.12).



**Şekil 6.12** Küresel test kapları, (a) ISO 1 m<sup>3</sup> ve (b) 20-L küresel kap (Abbasi ve Abbasi, 2007)

Şekil 6.12'de verilen test düzenekleri kullanılarak test edilen tozun patlaması sırasında oluşan zamana bağlı maximum basınç artışı,  $(dP/dt)_{max}$  tespit edilebilmekte ve bu değer Bartknecht (1978) tarafından ortaya atılan  $K_{St}$  adı verilen patlayabilirlik indeksinin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Eşitlik 6.17).

$$K_{St} = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{max} V^{1/3} \quad (6.17)$$

Burada;  $K_{St}$  patlayabilirlik indeksini (bar.m/s),  $P$  basıncı (bar),  $t$  zamanı (s) ve  $V$  hacmi (m<sup>3</sup>) temsil etmektedir.  $K_{St}$  indeksine göre bir tozun patlayabilirliği Çizelge 6.5'e göre değerlendirilmektedir.

**Çizelge 6.5**  $K_{St}$  indeksine göre patlayabilirlik sınıflandırması.

$K_{St}$ (bar.m/s)	Grup	Patlayabilirlik
0	St0	Patlamaz
$0 < K_{St} < 200$	St1	Zayıf
$200 < K_{St} < 300$	St2	Kuvvetli
$300 < K_{St}$	St3	Çok kuvvetli

$K_{St}$  indeksinin yanı sıra, 20 L ve 1 m<sup>3</sup>lük test düzenekleri kullanılarak bir tozun patlayabilir olup olmadığı, minimum patlayabilir toz konsantrasyonu ve patlama için gereken minimum enerjisi de tespit edilebilmektedir.

### 6.7.3 Kömür Tozuyla Mücadele ve Kömür Tozu Patlamalarının Bastırılması

Yeraltı kömür ocaklarında toz patlamalarına karşı alınabilecek önlemler bir bütün halinde değerlendirilmelidir. Bu önlemlerin hiçbir aşamada ödün verilmeden uygulanması büyük afetlerin karşılıklı riskini azaltacaktır.

Yeraltı kömür ocaklarında kömür tozu patlamalarına karşı alınabilecek önlemler temel olarak dört aşamada değerlendirilmelidir.

- Tozun oluşmasını, birikmesini ve havaya karışmasını önlemek,
- Tozun ateşlenmesini önlemek,
- Gelişen toz patlamalarının ocağın diğer kesimlerine yayılmasını önlemek.

#### Tozun oluşmasını birikmesinin ve havaya karışmasının önlenmesi

Patlayabilir nitelikteki kömür tozu ile mücadelede düşünülmeye gereken yöntemler esas itibarıyla solunabilir tozla mücadele için kullanılan yöntemlerle özdeşdir. Buna yönelik olarak tozun yeraltı açıklıklarında birikmesini engellemek üzere basit önlemler almak zaman zaman etkili olabilmektedir. Bu kapsamda, yoğun toz biriken ortamlarda süpürge, faraş, kürek gibi ilkel araçlarla da olsa mücadele kısmi olarak olumlu sonuçlar getirebilmektedir.

Ayrıca, özellikle tozun yoğun olarak ortaya çıktığı kaynak noktalarında (aktif ayaklar, bant konveyör transfer noktaları, kalkan tipi tahkimatlar, delik delme işlemleri, kırıcılar) kontrol altına alınması oldukça önemlidir. Bu amaçla su spreylere kullanılması oldukça etkili olabilmektedir. Su spreylere (fiskete) ile çalışmaların çeşitli aşamalarında ıslatma, sulama, arına su empenyesi gibi çalışmalar patlayıcı niteliği olan tozları bağlamada da etkili olmaktadır. Özellikle, nakliyat ekipmanlarının ve transfer noktalarının yakınına yerleştirilen su spreylere malzemenin önceden ıslatılmasını sağlamakta, nem içeriğini arttırmakta ve böylece tozumu engellemektedir.

Günümüzde su spreylere uzunayaklarda yoğun şekilde kullanılan kesici-yükleyici makinaların vazgeçilmez bir parçası konumundadır ve panolarda toz patlamalarının engellenmesinde temel araç niteliğindedir. Bunun yanında suyun toz bastırmada etkinliğinin artırılması için çeşitli kimyasalların (yüzey etkin maddeler) suya karıştırılması da son yıllarda araştırma konusu olmuştur. Ayrıca,

kalsiyum klorür ve magnezyum klorür gibi higroskopik tuzlar da kömür tozu ile karıştırılmakta ve bu sayede havadaki nemi adsorbe eden tuzların kömür tozlarını da bağlayarak havalanmalarını engellemesi mümkün olmaktadır.

#### Tozun ateşlenmesinin önlenmesi

Yeraltı kömür ocaklarında tozun birikmesi engellenemediyse toz patlamalarının oluşmasının önlenmesi adına alınacak ikinci tedbir biriken tozun bir ateşleme kaynağı nedeniyle ateşlenmesinin engellenmesidir. Kömür tozunun patlamasıyla mücadele, öz itibarıyla metan-hava karışımının (grizu) patlamasının engellenmesiyle mücadeleye benzerdir. Bunun yanında tozun alevlenme özelliğini azaltmak üzere kömür tozunun yanmaz bir malzemeyle (genellikle taş tozu) karıştırılması oldukça faydalıdır. Bunun yanında yasa ve yönetmeliklere uygun patlayıcı madde kullanımı önem arz etmektedir.

Yeraltı kömür ocaklarında kömür tozunun taş tozu ile karıştırılarak inert hale getirilmesi 1900'lerin başlarında uygulanmaya başlanan ve halen yoğun bir şekilde uygulanan bir yöntemdir. Kömür tozuna inert bir malzemenin karıştırılması yanma işlemini tamamen engellemekte ya da en azından yoğunluğunu azaltmakta ve kömür tozunun çevreye dağılmasını engellemektedir. "Taş tozu" genel itibarıyla silika içermeyen kireçtaşı, dolomitten ya da nem tuttuğunda topaklanmayan malzemelerden oluşmaktadır. Kireçtaşı ve dolomit nem tuttuğunda topaklaşma özelliği gösterdiği ve bu nedenle havaya karışamayacak hale geldiğinden topaklanmayı önlemek için taş tozu karışımlarının içine stearik asit ve oleik asit gibi kimyasallar katılmaktadır.

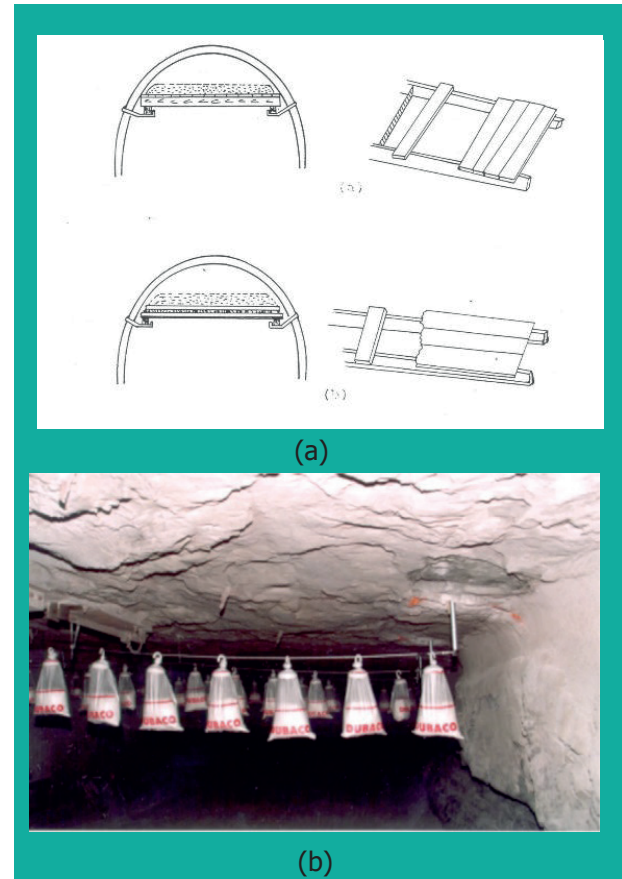
Bu noktada biriken kömür tozuna katılacak inert malzemenin miktarı önem kazanmaktadır. Araştırmalar sonucunda kömüre katılacak inert malzeme miktarının %60-80 arasında olmasının kömür tozu patlamalarının ateşlenme hassasiyetini ve patlama şiddetini azalttığı gösterilmiştir (Addai vd., 2016). ABD'de Maden Güvenlik ve Sağlık İdaresi (MSHA) tarafından yayımlanan direktiflere göre günümüzde ABD'deki yeraltı kömür ocaklarında kömür tozlarının patlamasının engellenmesine yönelik olarak inert malzeme oranının % 80 olması gerekmektedir (Harris vd., 2010). ABD'de buna yönelik olarak, elde taşınabilen ve alınan toz örneğinin yanmaz malzeme oranının gösteren bir kömür tozu patlayabilirlik ölçer (CDEM - Coal Dust Explosibility Meter) de geliştirilmiştir (Harris vd., 2009).

#### Gelişen toz patlamalarının ocağın diğer kesimlere yayılmasının önlenmesi

Alınan tüm önlemlere karşı başlamış ve gelişme gösteren bir toz patlamasının, büyümeden ve ocağın diğer kesimlerine yayılmadan durdurulması oldukça önemlidir. Bu amaçla, geleneksel olarak uygulanan taş tozu ve su barajlarının (pasif patlama bariyerleri) yanı sıra günümüzde aktif patlama bariyerleri de geliştirilmiştir.

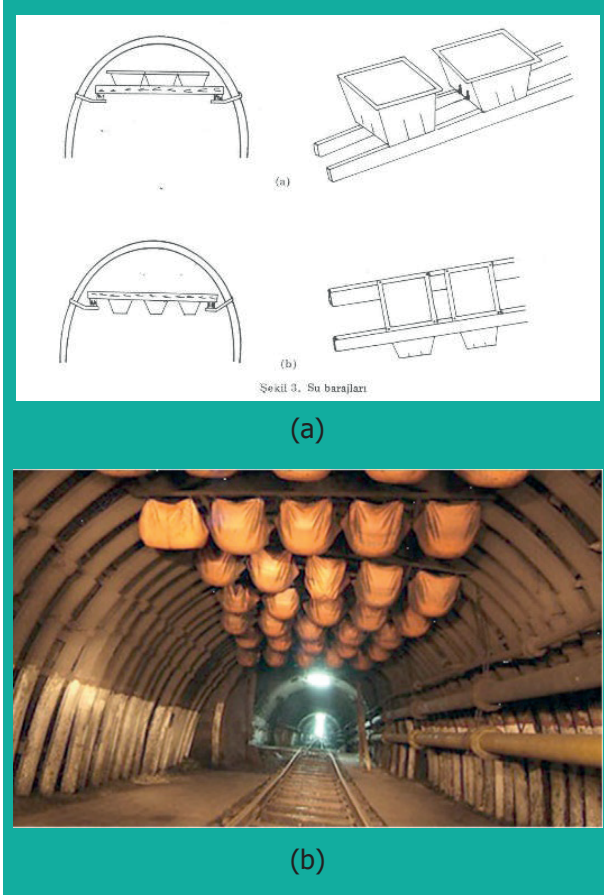
*Pasif patlama bariyerlerinin* temelinde patlama alevinin önünden giden şok (basınç) dalgasının etkisiyle kolayca devrilecek şekilde raflara (torbalara) yerleştirilmiş su ya da taş tozunun kullanılması yatmaktadır. Şok dalgasının etkisiyle devrilen (patlayan) taş tozu ya da su barajlarındaki taş tozu ve su ortama dağılmakta ve patlamanın bu noktadan ileriye geçmesini engellemektedir.

Bu amaçla kullanılan klasik taş tozu barajlarında taş tozu, kolay dağılım göstermesi açısından rafların üzerine yerleştirilmektedir (Şekil 6.13a). Bu tip taş tozu barajlarında toz miktarı kurulan rafın metresi başına 30-60 kg arasında değişmektedir (McPherson, 1993). Taş tozu barajlarının kurulacağı yerler dikkatlice seçilmelidir. Eğer taş tozu barajları patlamanın merkezine çok yakın kurulursa alev önü taş tozu ortama yeterince dağılmadan barajlı bölgeyi geçebilir, eğer çok uzağa kurulursa alev önü bölgeye ulaşıncaya kadar taş tozu çok dağılılabılır. Buna yönelik olarak McPherson (1993) 30 kg/m şeklinde yüklenen taş tozu barajlarının arından en fazla 200 m uzağa daha yüklü barajların ise bir miktar daha uzağa kurulmasının uygun olabileceğini belirtmiştir. Taş tozu barajları tüm çalışma bölgelerinin hava giriş ve dönüş yollarına kurulmalı, nakliyat galerilerine ise özel dikkat gösterilmelidir. Klasik taş tozu barajlarının kurulması zahmetli ve bakımı zor olduğundan bu tip barajlar günümüzde yerini taş tozu torbalarına bırakmıştır. (Şekil 6.13b). Bu yöntemde taş tozları patlama basıncının ulaşmasıyla kolaylıkla delinebilen polietilen torbalara yerleştirilmektedir.



**Şekil 6.13** Pasif taş tozu barajları (a) Polonya tipi raf ve (b) Torbalı (Ray vd., 2022)

Pasif taş tozu barajlarına benzer şekilde, klasik su barajlarında da içinde yaklaşık 40-90 L su bulunan plastik tekneler patlama basıncının etkisiyle kolayca yıkılacak raflara yerleştirilebilmektedir (Şekil 6.14a). Raflı taş tozu barajları gibi bu tip su barajlarının da kurulması ve bakımı zor olabilmektedir. Bu nedenle günümüzde Şekil 6.14b'de görülen ve 40-80 L kapasiteli polivinil/polistirel su barajlarının kullanımı yaygınlaşmıştır.



**Şekil 6.14** Pasif su barajları (a) Polonya tipi raflı ve (b) Polivinil/polistirel (Ray vd., 2022)

Yeraltı ocaklarında patlamaların bastırılması için geliştirilen yeni bir yöntem ise *aktif patlama bariyerleridir*. Bu yöntemde, yangının ilerlemesini engellemek için kullanılan malzeme patlama kaynaklı alevin bu bölgeye yaklaşmasıyla otomatik olarak salıverilmektedir. Bu amaçla sistemde patlamayı algılayacak bir sensör, elektromekanik bir söndürme sistemi ve etkili bir inert malzeme bulunmaktadır. Aktif patlama bariyerlerinin pasif bariyerlere üstünlüğü, bu sistemin çalışmasının patlama basıncından bağımsız olmasıdır. Zira sistem kendi içinde bir enerji kaynağı barındırdığından sensörün patlama basıncını algılaması yeterlidir. Bu nedenle aktif patlama bariyerleri ile patlama ilerlemesi erken aşamalarda tespit edilebilmekte ve patlamanın büyümesi engellenebilmektedir.

## 6.8 Metal Ocaklarında Havalandırma

Metal ocaklarında havalandırma esas itibariyle hem temiz hava ihtiyacının belirlenmesi hem de ocak planı ve kullanılan üretim yöntemlerinin çeşitliliği açısından kömür ocaklarından farklılık göstermektedir.

Günümüzde yeraltı metal ocaklarında hazırlık, üretim ve nakliyat faaliyetlerinde yoğun olarak dizel motorlu ekipmanlar kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak ocak atmosferine çalışanların sağlığını tehdit edecek konsantrasyonlarda karbonmonoksit, karbondioksit ve azot oksitlerin yanı sıra dizel partikül madde (DPM) yayılabilmektedir. Bu yayılımlardan NO<sub>2</sub> son derece zehirli bir gaz olup bu gazın izlenmesine özellikle dikkat edilmelidir. Mevcut durumda, Amerikan Hükümeti Endüstriyel Hijyen Uzmanları Konferansı (ACGIH) NO<sub>2</sub> gazı için eşik sınır değeri 3 ppm'den 0.2 ppm'e düşürmüştür ve Avrupa Mesleki Maruziyet Sınırları Bilimsel Komitesi'nin de tavsiye ettiği eşik sınır değer 0.2 ppm iken kısa süreli maruziyet sınırı ise 1 ppm'dir (Brake, 2013; EU, 2017; OSHA, 2021). Ülkemizde yeraltı madenciliğinde NO<sub>2</sub> yayılımı ile ilgili bir maruziyet sınır değeri bulunmamaktadır.

DPM ise üzerinde önemle durulması gereken bir diğer konu olup yayılımlarına maruz kalan kişilerde göz ve burun tahrişi, baş ağrısı, kusma ve astım gibi olumsuz sağlık etkileri görülmektedir. Ayrıca, DPM'in potansiyel bir kanserojen olması da dünya madencilik endüstrisinde bu yayılımlara özen gösterilmesini beraberinde getirmiştir. Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsüne (NIOSH, 2022a) göre yeraltı madencileri, sınırlı bir alanda çalışmaları nedeniyle tipik dizel egzozlarının çevresel konsantrasyonundan 100 kat fazla DPM yayılımına maruz kalabilmektedirler. Yeraltı ocaklarında günden güne daha fazla dizel ekipman kullanılması DPM maruziyetini büyük ölçüde arttırmakta ve daha büyük riskleri beraberinde getirmektedir. DPM ile mücadelede dizel ekipmanın egzozlarına filtreler takılmakta ve bunların ocak atmosferine yayılmasının engellenmesi hedeflenmektedir. Kömür dışındaki yeraltı ocaklarında DPM için ABD'de izin verilebilir sınır değeri 160 µg/m<sup>3</sup>'tür. Ülkemizde ise yeraltı ocaklarında doğrudan DPM maruziyeti ile ilgili herhangi bir sınır değeri bulunmamaktadır.

Bunun yanı sıra yeraltı metal ocaklarında birçok üretim yönteminde yoğun olarak patlayıcı madde kullanılmakta ve patlamalar sonucu da dizel emisyonlara benzer gazlar ocak atmosferine yayılmaktadır. Bu sebeplere bağlı olarak yeraltı metal ocaklarına sağlanacak temiz hava miktarı esas itibariyle dizel egzoz emisyonları ve patlayıcı madde miktarına göre belirlenmektedir (bkz. [Bölüm 6.2.3](#) ve [6.2.4](#)). Buna bağlı olarak yeraltı metal ocaklarında kullanılan her 100 kW başına ortalama olarak 6-8 m<sup>3</sup>/s'lik bir havanın ocağa sağlanması gerekmektedir.

Bu noktada bir konuya dikkat çekilmesi yerinde olacaktır. Yeraltı metal ocaklarında gerekli hava miktarı yapılırken sadece ekipman egzozlarında kaynaklı gazların tek başına dikkate alınması yetersiz bir yaklaşımdır. Zira bu yaklaşım, tozların, ısının ve patlatma kaynaklı kirliliğin uzaklaştırılması için havalandırmaya gerek olduğu gerçeği ortadayken, sanki ocakta hiçbir dizel ekipman yoksa havaya ihtiyaç olmayacağı gibi bir algı yaratmaktadır. Bu nedenle, **hava miktarının daha doğru belirlenebilmesi için, hiçbir dizel ekipman bulunmasa bile, yeraltı metal ocaklarında havalandırmaya ihtiyaç duyulan her açıklıkta en az 0.5 m/s hava hızına ulaşılmasının hedeflenmesi gerekmektedir** (Brake, 2013).

Kömür ocaklarının aksine dünyada metal ocaklarında yaygın bir uygulama ise yeraltında kol vantilatörlerinin (tali/yardımcı fan ya da booster fan) kullanılmasıdır. Kol vantilatörleri üretim yapılan katlarda ihtiyaç duyulan basınçların ve hava miktarlarının sağlanması için kullanılmakta ve regülatörlerin aksine “pozitif ayarlama” için kullanılmaktadır.

### 6.8.1 Temel Özellikler

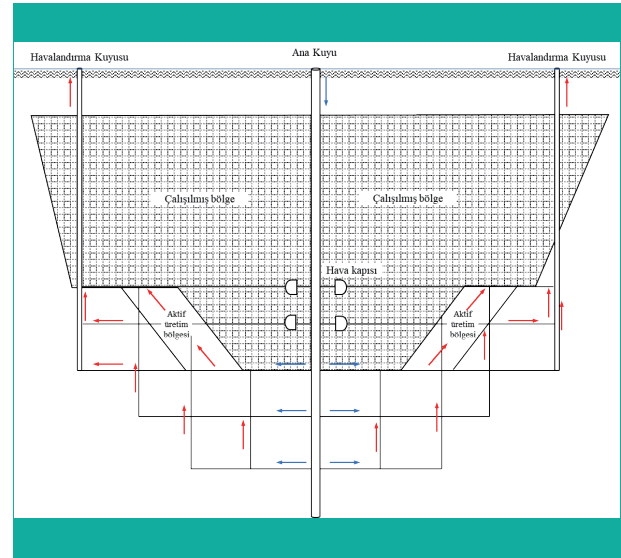
Yeraltı metal ocaklarının havalandırma planlamasında dikkate alınması gereken temel özellikler bulunmaktadır. McElroy (1935) bu özellikleri aşağıdaki sıralamıştır.

- İnsan nakliyatının yapıldığı açıklıkların hava girişi ya da hava çıkışı olarak kullanılması,
- Tüm mevcut yerüstü bağlantılarının ya da düşük bir direnç elde etmek için yeterli sayıdaki bağlantının havalandırma için kullanılması,
- Giriş havasının doğrudan en alt kote indirilerek yukarı doğru yönlendirilmesi ile aktif çalışma bölgelerinden geçerek ana dönüş yollarına bağlanması (**başyukarı havalandırma**),
- Aktif ocak bölgelerine ulaşmak için gerekli mesafenin minimumda tutulması,
- Ana hava giriş ve çıkış yolları arasında dengeli bir direnç ilişkisi sağlanması,
- Aktif açıklıklarda en az sayıda engel (hava kapısı ya da hava kilidi vb.) kullanılması,
- Kaçak ve geri çevrimden kaçınılması ve
- Havanın aktif bölgelerden göçüğe doğru dolaştırılması.

Eğer **iş sağlığı ve güvenliğine gerekli özen gösterilirse çoğu yeraltı metal ocağı “emici” bir ana havalandırma sistemiyle güvenli bir şekilde havalandırılabilir.** Böylece hava aktif açıklıklardan ocağın en alt kotuna indirilmekte ve yeraltı çalışma noktalarından geçen ve kirlenen hava ana hava dönüşünden (dönüşlerinden) atmosfere bırakılmaktadır.

Yeraltı metal ocaklarında çalışma noktalarına ulaşmak için mesafenin minimumda tutulması hem ocakta güvenliği arttırmakta hem de kaçak ihtimallerini azaltmaktadır. Bunu başarmanın en iyi yolu, çalışmaların hava giriş ve çıkış kuyuları (ya da rampalarının) arasında olacak şekilde ayarlanmasıdır. Yeraltı çalışma noktalarının ana kuyunun bir tarafına ya da iki tarafına birden genişlediği ocaklarda havalandırma kuyularının aktif çalışmaların sınırlarında açılması tercih edilmelidir (Şekil 6.15).

Şekilde 6.15'te görüldüğü üzere; hava, merkezi olarak konumlandırılmış ve görece olarak daha geniş bir ana kuyudan ocağın dip kotlarına indirilmekte, aktif üretim bölgelerinden (panolarından) geçerek tavan taşında sürülmüş ve görece daha az aktif olan havalandırma kuyularından atmosfere salınmaktadır. Böylesi bir sistemde daha önce sayılan kriterler başarılı bir şekilde sağlanmış olmaktadır.

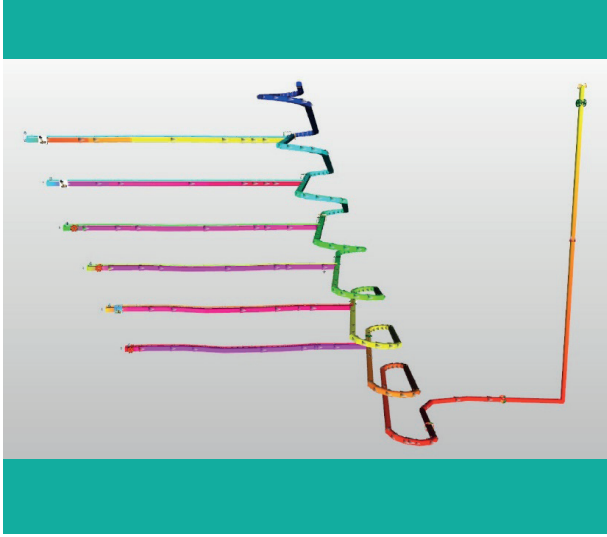


Şekil 6.15 Bir metal ocağı havalandırma tasarımı

### 6.8.2 Tasarım Açısından Yeryüzü Bağlantılarının Önemi

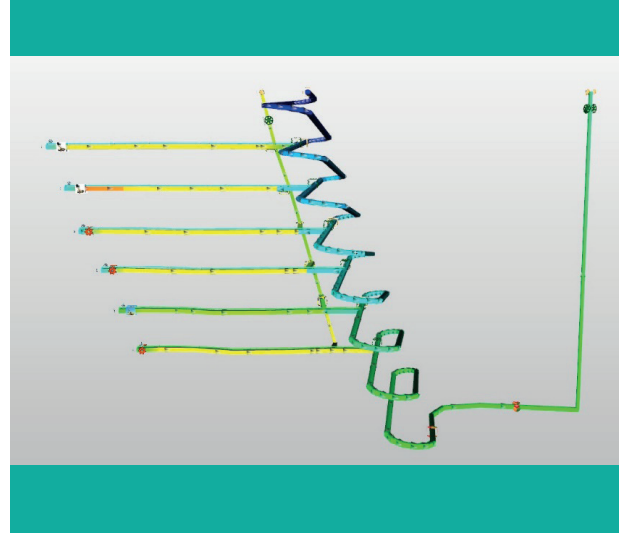
Yeraltı metal ocaklarında tasarım açısından bir hava girişi (kazı ve nakliyat ekipmanlarının yeraltına kolaylıkla indirilebilmesi için günümüzde genellikle rampa ya da desandre) ve bir de hava çıkışı olmak üzere iki yeryüzü bağlantısı (Şekil 6.16) yeterli olsa da çalışmaların güvenli bir biçimde sürdürülmesi için yeryüzü bağlantılarının sayısı önem kazanmaktadır. Zira günümüz yeraltı metal ocaklarında üretim ve hazırlık faaliyetlerinde yoğun şekilde tali havalandırma kullanılması gerekliliğinin yanında büyük güçlere sahip dizel ekipmanın da yoğun biçimde kullanımı bazı sorunları da beraberinde getirmektedir.

Şekil 6.16 dikkatle incelendiğinde, katlarda tali havalandırma yapılmasından kaynaklı dönüş havalarının ocak ana hava girişine (rampaya) ulaşması nedeniyle alt katlara giden havanın gitgide kirlendiği anlaşılabilmektedir. Bunun yanı sıra, dizel ekipmanın da ocağa giriş-çıkış için rampayı kullanacağı düşünüldüğünde ekipmandan kaynaklanan ısı ve tozun da çalışma işyerlerine sağlanan temiz havaya karışması kaçınılmazdır.



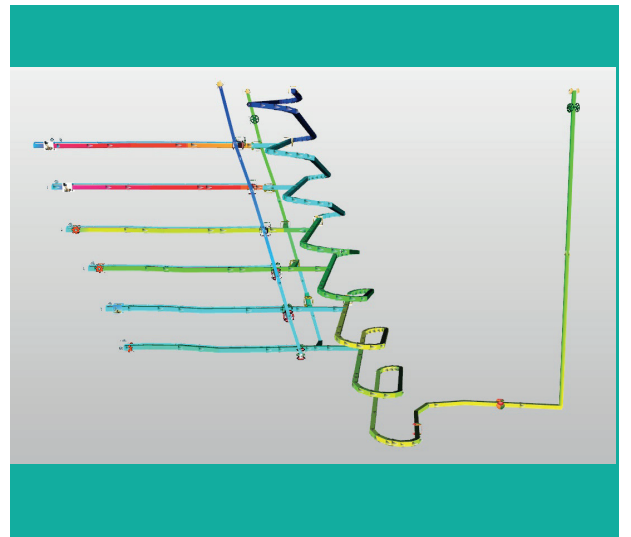
**Şekil 6.16** Tek hava girişi ve tek hava çıkışına sahip kavramsal bir yeraltı metal ocağı

Bu sorunların aşılabilmesi için katlardan rampaya ulaşan kirliliğin rampaya ulaşmadan ocağı terk etmesinin sağlanması gerekmektedir. Buna yönelik olarak bir yeryüzü bağlantısı tasarlanır ve bu bağlantıya da bir emici fan konursa bu durumda tali olarak havalandırılan katlardaki faaliyetler nedeniyle kirlenen havanın ocak ana hava girişine (rampa) ulaşmadan ocağı terk etmesi mümkün olabilecektir (Şekli 6.17). Ancak bu durumda her ne kadar katlardan gelen dönüş havaları ana hava girişine ulaşmasa da hali hazırda ocakta sadece bir ana hava girişi bulunmaktadır. Bu durumda ocakta nakliyat faaliyetlerinin ana hava girişinden yapılacak olması ve bu nedenle dizel ekipmandan kaynaklanan ısı ve toz gibi kirliliklerin ocağa yayılacak olması halen bir sorun teşkil etmektedir. Ayrıca mevcut durumda ocakta tek bir hava girişi bulunduğu için burada meydana gelecek bir yangın, patlama vb. durumunda ocakta oldukça tehlikeli koşullar ortaya çıkabilecektir.



**Şekil 6.17** Kavramsal yeraltı metal ocağında yapılan ilk tasarım değişikliği

Bu sorunun aşılabilmesi için ocak tasarımında bir değişikliğe daha ihtiyaç duyulacaktır. Ocağa ana hava girişi olarak hizmet edecek yeni bir yeryüzü bağlantısının da planlamaya dahil edilmesiyle artık ocağın iki ana hava girişi olacak, katlarda kirlenen hava katlara yakın olan hava dönüş bağlantısından yeryüzüne atılacak ve aynı zamanda katlara sağlanacak temiz hava ise yeni tasarlanan yeryüzü bağlantısından sağlanacaktır (Şekil 6.18). Böylelikle, ocağa hava girişi iki ana yeryüzü bağlantısından sağlanacağı için bu bağlantılardan herhangi birinde meydana gelen yangın, patlama vb. durumlarda ocağa diğer yeryüzü bağlantısından temiz hava sağlanabilecektir.



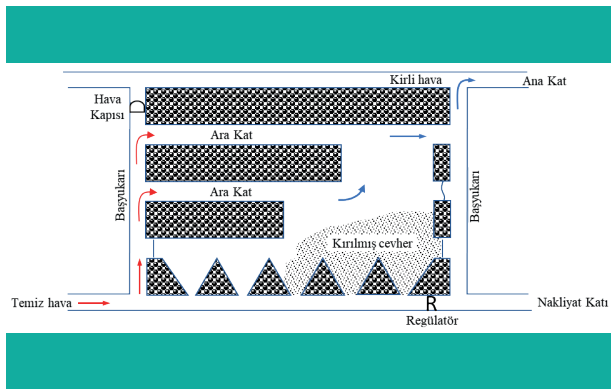
**Şekil 6.18** Kavramsal yeraltı metal ocağında yapılan ikinci tasarım değişikliği

### 6.8.3 Sık Kullanılan Bazı Üretim Yöntemlerinde Havalandırma

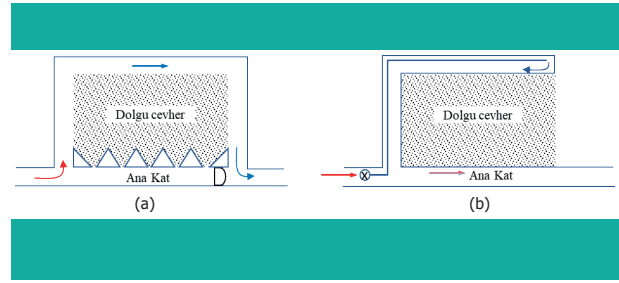
Yeraltı metal ocaklarında yapılacak havalandırma planlaması esas itibarıyla üretim için tercih edilen yönetime göre şekillenmektedir. Metal yatakları genellikle masif ya da dik damarlar (filon) şeklinde oluştuğundan üretim yöntemleri de bu tür yataklara uygun şekilde seçilmektedir. Ancak yeraltı metal ocaklarında çok farklı koşullar ortaya çıkabileceğinden havalandırma sistemleri de bu koşullara uyacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu bağlamda, rehberin bu bölümünde dünyada ve ülkemizde sıklıkla kullanılan ara katlı göçertme, dolgulu tavan ayak yöntemleri üzerinde durulacaktır.

#### Ara Katlı Göçertme

Bu yöntemde panonun karşılıklı sınırlarında olacak şekilde katlar arasında başyukarılar açılmakta, üretim ise katlar arasında bırakılan genellikle büyük boyutlu panolarda sürdürülmektedir. Bu durumda çalışma noktasına sağlanan temiz hava bir başyukarıdan girip üretim odasından (boşluğundan) geçmekte ve kirliliği diğer başyukarıdan bir üst kata iletilmektedir (Şekil 6.19). Spesifik çalışma koşullarına göre havalandırma sisteminde de çok farklı varyasyonlar ortaya olabilmektedir. Örneğin bazı durumlarda çalışma katının üst kat ile bağlantısı bulunmamakta ancak yine de iki giriş galerisi bulunabilmekte (Şekil 6.20a) ya da tek giriş galerisi bulunan ve dolayısıyla ara kat galerisinin tali fan ile havalandırıldığı durumlar (Şekil 6.20b) da ortaya çıkabilmektedir. Bu yöntemde uygulanan havalandırma sistemleri aynı zamanda da ara katlı topuklu ayak ile benzerlikler göstermekte ancak ara katlı topuklu ayaklarda üretim ara katlarda yapılırken tali havalandırma kullanılmakta ve dolayısıyla yöntemin havalandırması esasen Şekil 6.20b'de verilen şekilde yapılmaktadır.



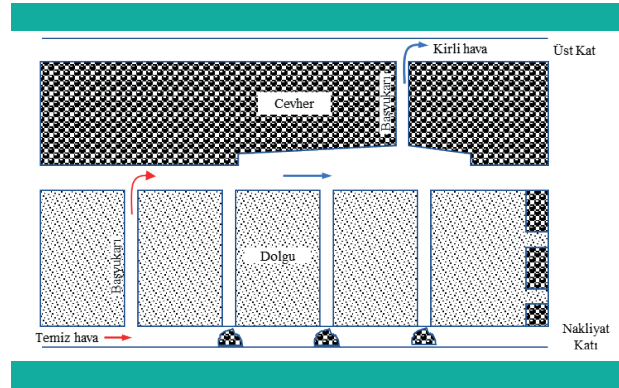
Şekil 6.19 Tipik bir ara katlı göçertme çalışmasında havalandırma



Şekil 6.20 Ara katlı göçertme varyasyonları (a) çift girişli ve (b) tek girişli (Hartmann vd., 1997'den değiştirilerek)

#### Dolgulu Tavan Ayak

Esas itibarıyla dolgulu tavan ayak yönteminin havalandırması da ara katlı göçertme yöntemine benzemektedir. Bu yöntemde de temiz hava dolgu malzemesi arasında belirli aralıklarla bırakılmış başyukarılardan kazı yapılan bölgeye ulaştırılmakta ve kirlenen hava ise cevher içinde açılmış başyukarılardan üst kata ve oradan da ana hava dönüş yoluna ulaştırılmaktadır (Şekil 6.21).



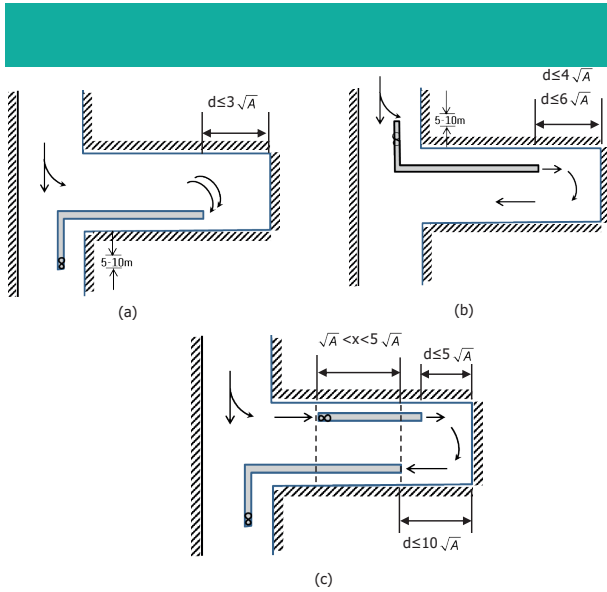
Şekil 6.21 Tipik bir dolgulu tavan ayak uygulaması

## 6.9 Tali Havalandırma

Tali havalandırma sistemleri, yeraltı ocaklarında ana havalandırma akımının doğrudan parçası olmamakla birlikte havalandırılmasına gerek olan hazırlık galerileri ile bazı üretim bölgelerinde kullanılan sistemlerdir. Bu sistemler, temel olarak ana fanlara göre daha küçük kapasitelerde olan tali fanlar ve havalandırma borularından oluşmaktadır. Tali havalandırma üfleyici, emici ya da her ikisinin kombinasyonu şeklinde uygulanabilmektedir (Şekil 6.22). Avantajları nedeniyle bu üç sistem arasında hem dünyada hem de ülkemizde en yaygın olarak kullanılan tali havalandırma sistemi üfleyici tali havalandırma sistemleridir.

Emici tali havalandırmada havalandırma borusu emici bir fanın ucuna bağlanmakta ve arındaki hava emilmektedir (Şekil 6.22a). Bu durumda havalandırma borusunun ucu ile arın arasında temiz bir bölge yaratılmaktadır. Bu yöntemde havadaki kirlilikler doğrudan galeriyi kat etmek yerine havalandırma borusundan geçmektedir. Ancak bu yöntem patlatma sonrası gazları temizlemekte dezavantaja sahiptir. Zira galeriye giren havanın galerinin tüm kesit alanını doldurması gerektiğinden havanın hızı düşmekte ve bu nedenle arındaki kirli havayı temizleme süresi uzamaktadır. Emici tali havalandırmada havalandırma borusunun arına uzaklığının genel olarak  $d \leq 3\sqrt{A}$  olması tavsiye edilmektedir.

Üfleyici tali havalandırma (Şekil 6.22b) ise arında çalışma sırasında ortama yayılan gazların daha verimli, hızlı temizlenmesi ve patlatmalardan sonra arına yeniden giriş süresini kısaltması açısından avantajlıdır. Ayrıca, üfleyici tali havalandırmada arına taşınan hava doğrudan temiz havadır. Ancak arında kirlenen havanın galeriyi terk etmesi için tüm galeriden geçmesi gerekmektedir. Ayrıca üfleyici tali havalandırma toz oluşumu açısından da dezavantajlara sahiptir. Üfleyici tali havalandırmada havalandırma borusunun arına olan uzaklığının ( $d$ ) genel olarak  $d \leq 4\sqrt{A}$  ile  $d \leq 6\sqrt{A}$  arasında olması tavsiye edilmektedir ( $A$ ; galerinin kesit alanı  $m^2$ ).



**Şekil 6.22** Tali havalandırma çeşitleri: (a) emici, (b) üfleyici ve (c) emici-üfleyici kombinasyonu (overlap)

Hem bir emici hem de bir üfleyici tali fanın kullanıldığı kombinasyon sistemlerinde ise çok çeşitli kombinasyonlar olabileceği gibi en yaygın olarak kullanılanı Şekil 6.22c'de verilmiştir. Bu sistemde üfleyici fan arına yakın bir yere yerleştirilmekte iken emici fan ise daha uzağa konulmaktadır. Bu sistemin kömür ocaklarında

kullanılmasında emici fana bağlı havalandırma borusunun arına olan uzaklığının  $d < 10\sqrt{A}$  olması, üfleyici fana bağlı havalandırma borusu ile arın arasındaki uzaklığın  $d \leq 5\sqrt{A}$  olması ve emici, sistem ile üfleyici sistemin çakıştığı bölgenin ise  $\sqrt{A}$  ile  $5\sqrt{A}$  arasında olması tavsiye edilmektedir (Sierra, 2020).

Tali havalandırma sistemlerinin dirençlerinin ( $R$ ) ve ihtiyaç duyulan hava miktarının ( $Q$ ) sağlanması için gerekli basınç kaybının ( $P$ ) ve sisteme sağlanması gereken güç miktarlarının ( $G$ ) hesaplaması Bölüm 4.3, 4.4 ve 4.5'te hava yolları için verilen hesaplama yöntemleriyle aynı şekilde yapıldığından rehberin bu bölümünde ayrıca verilmeyecektir. Ancak tali havalandırma sistemlerindeki kaçak miktarlarının tespiti arına verilecek hava miktarını ve dolayısıyla ocağa girecek toplam hava miktarını doğrudan etkilediğinden bu husus üzerinde durulması gerekmektedir.

Tali havalandırma sistemleriyle havalandırılacak mesafelerin uzun olması ve havalandırma borularının belirli uzunluklarda imal edilmesi, dolayısıyla uzun mesafelerde birbirlerine eklenerek kullanılması nedeniyle tali havalandırma sistemlerinde kaçakların olması kaçınılmazdır. Sistemde kaçakların oluşması ise üfleyici tali havalandırma sistemlerinde arında ihtiyaç duyulan temiz hava miktarının arına sağlanması açısından çok önemlidir. Brake (2008) tali fan ile arın arasında (havalandırma borusu çıkışı) %30 hava kaçağının oldukça iyi olduğunu kötü montaj nedeniyle çoğu durumda kaçakların %50'yi bulduğunu belirtmişlerdir.

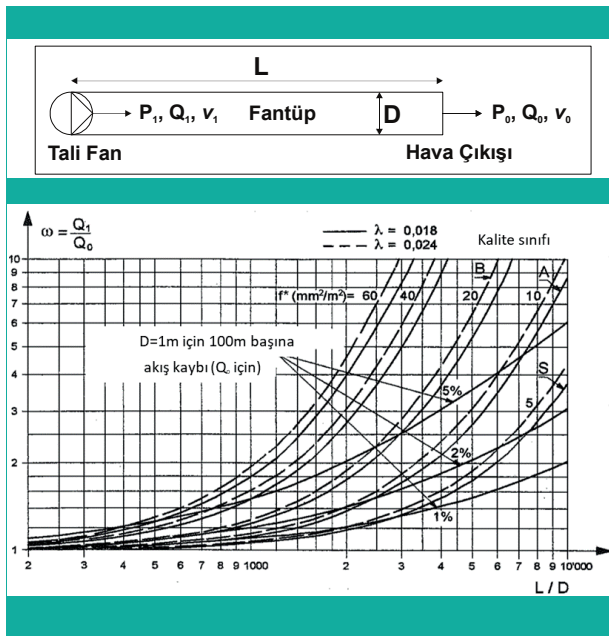
Tali havalandırma sistemlerinde kaçakların tahmin edilebilmesi için İsviçre Tünelcilik Standardı'nda (SIA 196, 1998) bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde göre tali havalandırma fantüpleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

Fantüp sınıfı	Sürtünme katsayısı, $\lambda$	Etkin kaçak alanı, $f$
S	0.015	5 $mm^2/m^2$
A	0.018	10 $mm^2/m^2$
B	0.024	20 $mm^2/m^2$

Fantüp sınıfları ise aşağıdaki şekilde tarif edilmektedir:

- S sınıfı : yeni, nizami şekilde kurulmuş ve düzenli bakımı yapılan, 100m'den uzun olmayan az sayıda bağlantı noktası içeren, çok düşük kaçak ve sürtünme kayıplarına sahip fantüpler
- A sınıfı : yeni, düşük hasar riski içerecek şekilde nizami olarak kurulmuş, düşük kaçak ve sürtünme kayıplarına sahip fantüpler
- B sınıfı : kullanılmış veya düzenli olarak bakımı yapılmak suretiyle kullanımda olan, ortalama kaçak ve sürtünme kayıplarına sahip fantüpler

Ancak, SIA 196'da bahsedilen bahsedilen fantüp sınıflarına karşılık gelen etkin kaçak alanları ( $f$ ) yorumsal olup fantüpün fiziki durumu ve yıpranma şartlarına göre yukarıdaki listede verileden farklı değerler alınabilmektedir. Örneğin, A sınıfı bir fantüpün yüzeyinde 5-10  $\text{mm}^2/\text{m}^2$ lik bir etkin kaçak alanı ( $f$ ) olacağı, eğer B sınıfı bir fantüp ise bu durumda etkin kaçak alanının ( $f$ ) 20-60  $\text{mm}^2/\text{m}^2$  'ye kadar çıkabileceği belirtilmiştir. Buna uygun olacak şekilde bu standartta, girişteki hava miktarının ( $Q_1$ ) çıkıştaki hava miktarına ( $Q_0$ ) oranına ( $\omega$ ) karşılık havalandırma borusunun uzunluğunun ( $L$ ) borunun çapına ( $D$ ) oranı ile ilişkisini gösteren bir diyagram verilmiştir (Şekil 6.23).



**Şekil 6.23** Fan ve arın arasındaki akış ilişkisini gösteren diyagram

Bir tali havalandırma sisteminde meydana gelecek kaçakların bulunabilmesi için kullanılacak havalandırma borusunun durumuna ve L/D oranına göre bu diyagram kullanılarak sistem için ( $\omega$ ) oranı tespit edilmelidir. Daha sonra arına verilecek temiz hava miktarı bilindiğinden ( $\omega$ ) oranı kullanılarak fana sağlanması gereken hava miktarı tespit edilebilmektedir.

#### ÖRNEK:

750 m uzunluğunda sürülecek bir galerinin tali olarak havalandırılması için 900 mm çapında kullanılmış ve yıpranmış fantüpler kullanılacaktır. Arında ihtiyaç duyulan temiz hava miktarı 15  $\text{m}^3/\text{s}$  ise bu durumda fana gelmesi gereken hava miktarı ne kadar olmalıdır? ( $\lambda=0.024$ )

Verilere göre bu sistemde L/D oranı  $750\text{m}/0.9\text{m} = 833$ 'tür. Fantüpler kullanılmış ve yıpranmış olduğundan Şekil 6.21'deki diyagramda  $f^*=60 \text{ mm}^2/\text{m}^2$  eğrisi ( $\lambda=0,024$  olduğundan kesikli çizgi) ile  $L/D=833$  değeri kesiştirilirse  $\omega$  oranı yaklaşık 1.7 olarak bulunacaktır. Örneğe ilişkin,

girdi ve çıktı değerleri Şekil 6.22'de kırmızı çizgilerle işaretlenmiştir. Bu durumda;

$\omega = Q_1/Q_0$  olduğundan arında 15  $\text{m}^3/\text{s}$  temiz hava isteniyorsa bu durumda fana gelmesi gereken hava ise

$$Q_1 = (15 \text{ m}^3/\text{s})(1.7) = 25.5 \text{ m}^3/\text{s} \text{ olmalıdır.}$$

Eğer fantüp çapı daha büyük seçilirse (örneğin 1400 mm) sistemin direnci ve dolayısıyla basıncı oldukça azalacak ve dolayısıyla sistemdeki kaçaklar da azalacaktır. Bu durumda  $L/D = 535$  olacak ve Şekil 6.21'den  $\omega$  oranı yaklaşık olarak 1.35 olarak bulunacaktır. Buna bağlı olarak ise fana sağlanması gereken temiz hava

$$Q_1 = (15 \text{ m}^3/\text{s})(1.35) = 20.25 \text{ m}^3/\text{s} \text{ olacaktır.}$$

Tali havalandırma sistemlerindeki kaçakların dikkate alınmasının yanı sıra tali havalandırma sistemlerinin yoğun olarak kullanıldığı yeraltı metal ocaklarında tali havalandırma sistemlerinin doğru planlanması özellikle önem arz etmektedir. Bilindiği üzere yeraltında kullanılan çoğu tali fan tavana asılmakta ya da bazı durumlarda yere monte edilmektedir. Nereye konumlandırıldığından bağımsız olarak tali fanların kısa devre yapmaması için (sağladığı havayı tekrar giriş havası olarak kullanma) bir miktar bypass havasının tali fana sağlanması gerekmektedir. Brake (2008) bu bypass havasının, fan giriş havasının en az %30'u kadar ya da galeride 0,5  $\text{m/s}$  hız oluşturacak bir miktarda olması gerektiğini belirtmiştir. Bunu bir örnekle anlatmak yerinde olacaktır.

#### ÖRNEK:

200 kW'lık dizel bir makinenin çalıştığı 20  $\text{m}^2$  kesitli bir galeride tali havalandırma uygulanmaktadır. Tali havalandırma sisteminde kaçak kaybının %30 olacağı kabulüyle bu galerinin etkin bir şekilde havalandırılması için tali fana sağlanması gereken hava miktarı ne kadar olmalıdır? (Hava ihtiyacı: 0,06  $\text{m}^3/\text{s}/\text{kW}$ )

Dizel gücüne göre arına sağlanması gereken hava miktarı:  
 $Q = (200 \text{ kW})(0.06 \text{ m}^3/\text{s}/\text{kW}) = 12 \text{ m}^3/\text{s}$

Sistemde %30 kaçak olacağına göre:  
 $Q = (12)/(0.7) = 17.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Yeterli bypass havası için gerekli hava miktarı (%30 kriterine göre):  
 $(17.1) + (17.1 \times 0.30) = 22.2 \text{ m}^3/\text{s}$  ve

Yeterli bypass havası için gerekli hava miktarı (galeride 0.5  $\text{m/s}$  hız yaratma kriterine göre)  
 $(17.1) + (20 \times 0.5 \text{ m/s}) = 27.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Bu durumda, bu tali fanın kısa devre yapmaması ve arına 12  $\text{m}^3/\text{s}$ 'lik bir hava miktarı sağlanması için ana havalandırma şebekesi tarafından tali fan girişine sağlanması gereken hava miktarı 22.2 – 27.1  $\text{m}^3/\text{s}$  arasında olmalıdır.



## 7. FANLAR

Fan, dönen bir pervanenin mekanik enerjisini havanın hareket ettirilmesi ve toplam basıncını arttırmak için kullanılan bir alettir. Genel olarak fanların işlevi belirli miktardaki bir havayı, basıncını arttırarak bir hava yolu ya da birbirine bağlı hava yolu sistemlerinde bir noktadan bir noktaya iletmektir. Bu fanlarda tahrik sistemi olarak genellikle elektrik motorları kullanılmaktadır.

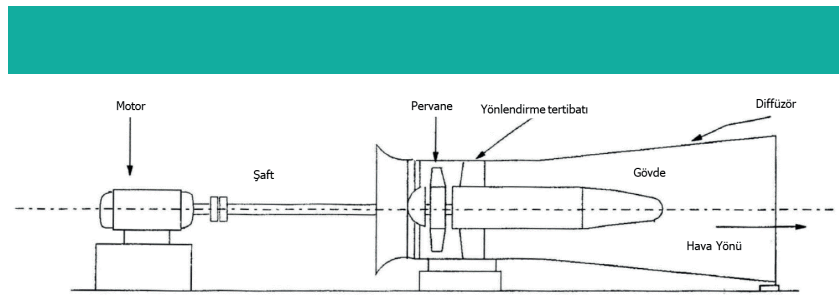
Yeraltı ocaklarında kullanılan fanlar sıklıkla “vantilatör” olarak da adlandırılmaktadır. Bu fanlar yeraltındaki kullanım amaçlarına göre *ana*, *yardımcı* ve *tali* fanlar olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir. Genellikle yerüstüne yerleştirilen *ana fanlar*, yeraltı ocaklarına temiz hava sağlamaktadır. Bu tür fanlar ocağın genel havalandırmasını sağlamak için kullanılan büyük kapasiteli fanlardır. Yardımcı fanlar (ya da kol vantilatörleri) ocağın bir kesimindeki havalandırma koşullarını iyileştirmek için kullanılan orta kapasiteli fanlardır. Tali fanlar ise ocağın ana havalandırma şebekesince havalandırılmayan ve özellikle hazırlık işlerinde (galeri, kuyu açma vb.) kullanılan, yerleri kolaylıkla değiştirilebilen ve görece olarak düşük kapasiteli fanlardır.



Yeraltı ocaklarında kullanılan aksiyal ve radyal tiplerindeki fanlar ana, yardımcı ve tali olmak üzere üç grupta sınıflandırılır

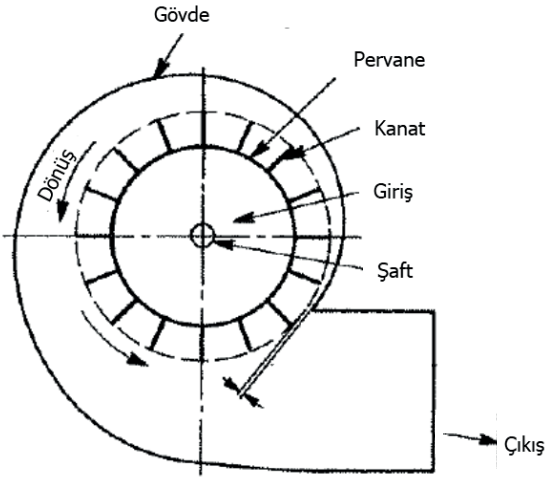
Yeraltı ocaklarında kullanılan fanlar temel olarak iki tiptedir: Aksiyal (eksenel) ve Radyal (santrifüj).

*Aksiyal fanlar*, bir mil üzerine yerleştirilmiş kanatların silindirik bir kanal içinde dönmesiyle hava akımını sağlar. Bu tür fanlarda hava eksen yönünden (eksenel) girmektedir. Dünyada ve ülkemizde yeraltı ocaklarının ana havalandırmasında sıklıkla kullanılan fan türüdür (Şekil 7.1). Bu tüp fanlarda çalışma alanı sabit olup, seri ve paralel bağlanmaları kusursuz olarak yapılabilir. Ayrıca, basit yapıları, hava akım yönünün değişmemesi ve düşük iç dirençleri nedeniyle özellikle yeraltında kullanıldıklarında avantajlar sağlamaktadır. Bu tip fanların kurulumları kolay ve ilk yatırım masrafları düşüktür. Uygun ayarlamalarla acil durumlarda ters yönde çalışmaları mümkündür. Gürültü yönünden radyal fanlara göre daha avantajlıdır.



Şekil 7.1 Bir aksiyal fanın şematik görünümü (Mutama ve Pelletier, 1999)

*Radyal (santrifüj) fanlarda* hava, yüksek hızda dönen ve üzerinde kanatları bulunan göbeğin merkezine dik olarak girmekte ve göbeği döndürmektedir (Şekil 7.2). Hava radyal olarak dışa doğru hareket ederken santrifüj kuvvetine maruz kalmakta ve bu da havanın statik basıncında bir artışa neden olmaktadır. Radyal fanların kanatları öne eğik, düz ya da geriye eğik olabilmektedir.



**Şekil 7.2** Bir santrifüj fanın şematik görünümü (Hartmann vd., 1997)

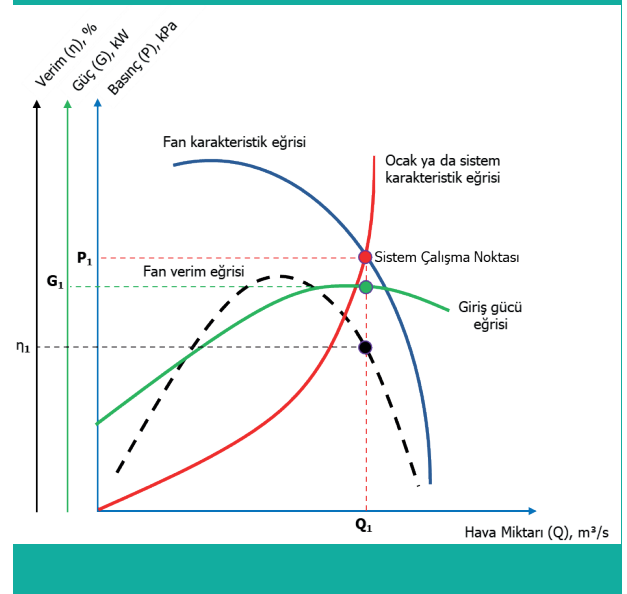
Yeraltı ocaklarında yaygın olarak kullanılan bazı aksiyel ve radyal fanların performanslarının karşılaştırılması Çizelge 7.1'de verilmiştir.

**Çizelge 7.1** Yeraltı ocaklarında yaygın olarak kullanılan fan türlerinin performans karşılaştırması (Hartmann vd., 1997)

Fan Tipi	Basınç	Hava Miktarı	Güç	Verim	Hız
Radyal (öne eğik kanatlı)	Orta	En yüksek	Yüksek	Orta (%60-70)	Orta
Radyal (geriye eğik kanatlı)	En yüksek	Orta	Orta	Yüksek (%60-80)	Yüksek
Aksiyel	Düşük	Yüksek	Düşük	En yüksek (%70-85)	En yüksek

## 7.1 Fan Karakteristik Eğrisi ve Fan Seçimi

Fan karakteristik eğrileri, farklı koşullarda gösterdikleri davranış ve performanslarını ölçmek için kullanılan eğrilerdir. Bu amaçla fan üretici firmalar ürettikleri her spesifik fan için hava miktarına (Q) karşılık, basınç (P), güç (G) ve verim (η) eğrilerini de kullanıcıya sağlamaktadır. Konsept bir aksiyel fana ait karakteristik eğriler ile bu fanın kavramsal bir sistemde çalışacağı noktaları Şekil 7.3'te verilmiştir.



**Şekil 7.3** Fan karakteristik eğrileri, ocak karakteristik eğrisi ile sistem çalışma noktalarının gösterimi

Bir fanın herhangi bir ocak ya da sistemde (örneğin tali havalandırma sistemi) hangi koşullarda çalışacağını belirlenebilmesi için ocağa, bir ocak kesimine ya da sisteme ait karakteristik eğrinin çizilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu karakteristik eğri Atkinson Eşitliği ( $P = RQ^2$ ) (Eşitlik 4.18) ile tanımlandığından parabolik bir eğridir (Şekil 7.3).

Buna göre bir ocağa, bir ocak kesimine ya da bir havalandırma sisteme ait karakteristik eğrinin çizilebilmesi için aşağıdaki işlem sırası izlenmelidir.

- Öncelikle ocağın, ocak kesiminin ya da havalandırma sisteminin eşdeğer direnci ( $R_{es}$ ) belirlenir. Eşdeğer direnç belirlenirken seri bağlı yollar için yolların ayrı ayrı dirençleri toplanır. Eğer yollar paralel bağlı ise aşağıdaki eşitlik kullanılmalıdır.

$$\frac{1}{\sqrt{R_{es}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R_n}}$$

Bir ocak kesimi ya da tali havalandırma sistemi gibi görece olarak basit devrelerde seri ve paralel yolların eşdeğer dirençlerinin bulunması analitik yollarla kolay olmakta ancak ocaklara ait karmaşık devrelerde iterasyon tekniklerinin kullanılması gerekmektedir (Hardy-Cross iterasyonu). Ancak günümüzde kullanılan havalandırma yazılımları ile ocakların eşdeğer dirençleri kolaylıkla belirlenebilmektedir.

- Eş değer direnç ( $R_{es}$ ) belirlendikten sonra karakteristik eğrinin çizilebilmesi için çeşitli Q

değerleri atanarak  $P=RQ^2$  eşitliğinden atanan Q değerlerine karşılık P değerleri bulunmalı ve bu değerler kullanılarak P-Q grafiği çizilmelidir.

- (c) Sistem karakteristik eğrisinin basınca ait fan karakteristik eğrisi ile kesiştiği nokta (sistem çalışma noktası) fanın bu sistemde belirli bir Q değerine karşılık hangi basınçta çalışacağını göstermektedir (Şekil 7.3 – kırmızı eğri ile mavi eğrinin kesiştiği nokta).
- (d) Ocak karakteristik eğrisi ve fan basınç eğrisinin kesiştiği noktanın izdüşümünün diğer fan eğrileri ile kesiştiği noktalar (Şekil 7.3'te görülen yeşil ve siyah noktalar) ise fanın, o spesifik P ve Q değerlerinde hangi verimde çalışacağını ve bu koşullarda ne kadar güç tüketeceğini gösterecektir.

## 7.2 Fan Kanunları

Bazı fiziksel parametrelerinin değişmesiyle fanların performans verileri de değişmektedir. Bu parametreler: pervane dönüş sayısı (n), pervane çapı (D), havanın yoğunluğudur (ρ). Bu değişimlerin, hava miktarı (Q), basınç (P), güç (G) ve verim (η) üzerindeki etkileri fan kanunları olarak bilinmektedir. Fan kanunları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Fan kanunları

Değişiklik	Dönüş Sayısı (n) (D ve ρ sabit)	Pervane Çapı (D) (n ve ρ sabit)	Hava Yoğunluğu (ρ) (D ve n sabit)
Hava Miktarı (Q)	$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$	$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$	$Q_1=Q_2$
Basınç (P)	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$
Güç (G)	$\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$	$\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5$	$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$
Verim (η)	$\eta_1 = \eta_2$	$\eta_1 = \eta_2$	$\eta_1 = \eta_2$

Buradaki parametrelerin yanı sıra pervane kanatlarının açısının değiştirilmesi de fan performansında değişiklikler yaratmaktadır. Bu özellik bir tasarım parametresi olduğundan kanat açısının değiştirilmesi nedeniyle meydana gelecek performans değişiklikleri üretici firmalar tarafından karakteristik eğriler olarak sağlanmaktadır. Fanlarda pervane kanat açıları manuel olarak değiştirilebildiği gibi otomatik olarak bu değişikliğin yapılabileceği fanlar da piyasada mevcuttur.

## 7.3 Fanların İşletilmesi ve Bakımı

Günümüzde yeraltı maden ocaklarına hizmet eden ana havalandırma fanları modern ekipmanlarla donatılmış durumdadır. Bu kapsamda fanların otomatik olarak çalıştırılıp durdurulması, fan devrinin değiştirilmesi hatta fanın ters yönde çalıştırılması, fan basıncı ve hava miktarı ile fanın yarattığı titreşimin ölçülmesi ve bu sayede mekanik ve yapısal zararların önlenmesi mümkün hale gelmiştir. Yeraltı ocaklarının mekanik olarak havalandırılmasında kullanılan ana fanların iki farklı enerji kaynağına bağlanması, kömür ocakları özelinde ise farklı enerji kaynağına bağlı özdeş iki fanın bulundurulması ülkemizde yasal zorunluluktur. Bu sayede herhangi bir arıza, enerji kesilmesi durumunda ocak havalandırmasının sekteye uğraması önlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, özdeş iki fanın bulunduğu ocaklarda ana fanların periyodik aralıklarla çalıştırılması fanların eş miktarda aşınmalarının (eş yaşlandırma) sağlanması için önemlidir.

İster ana fan olsun ister tali fan olsun bir fan biriminin takibi belirli zaman aralıklarında rutin incelemelerle yapılmalıdır. Halihazırda ölçüm ve alarm sistemleri ile donatılmış ana fanların performans verileri sürekli olarak izlenmeli ve olağan dışı durumlarda kısa sürede gerekli tedbirlerin alınması sağlanmalıdır. Fanın performans takibine yönelik olarak ölçüm sistemi ve arızaları bildirecek alarm sistemlerinin bulunmadığı durumlarda (örneğin tali fanlar) fan performansı daha yakından takip edilmelidir. Bu kapsamda, fan gürültüsü ve titreşimi izlenmeli, belirli aralıklarla basınç ve hava akışı ölçümleri yapılarak fanın performansının yeterli seviyede olduğu teyit edilmelidir. Bunun yanında fan üreticisinin kullanım ve işletme kılavuzunda belirttiği hususlar dikkate alınmalı fanlar mekanik olarak zorlanacak şartlarda çalıştırılmamalıdır. Bu bağlamda ocak direncinin artması nedeniyle fan kapasitesinin zorlanmasına müsaade edilmemelidir. Böylesi durumlarda fan kanatlarının parçalanması gibi sonuçlarla karşılaşılabilen unutulmamalıdır. Ayrıca fanların koruyucu ve önleyici bakımları için aşağıdaki noktalara dikkat edilmelidir.

- Fan yağlanmaz, aksami yağlanır.
- Eğer işletmede fan bakımı konusunda yetişmiş personel yoksa fanların bakımı için dışarıdan hizmet alınmalıdır.
- Yeraltı maden ocaklarının tozlu koşullar içermesinden dolayı fan kanatlarına yapışan tozlar zamanla fanlarda verim kaybı, titreşim ve balans problemlerine yol açmaktadır. Bu nedenle fanların kanatları periyodik aralıklarla temizlenmelidir.
- Rulman gresleri imalatçının belirttiği zaman aralıklarında uygun gresle değiştirilmelidir.
- Fanın kaide ve temel bağlantıları kontrol edilmelidir.



## 8. OCAK HAVALANDIRMASINDA YAPILAN TEKNİK HATALAR VE ÖZENSİZ DAVRANIŞLAR



Havalandırma planını yapacak teknik personelin akışkanlar mekaniği ve ocak havalandırması ile ilgili temel kavramları ve prensipleri çok iyi özümsemiş olması gerekmektedir.

Yeraltı ocaklarında yapılan teknik hatalar öncelikle ocak planlamasından başlamaktadır. Bunun temelinde ise havalandırma planlamasının sanki hazırlık ve üretim planlamasından ayrı bir işmiş gibi düşünülmesi yatmaktadır. Oysa havalandırma planlaması, ocak planlamasının tüm süreçlerinde eş zamanlı olarak sürdürülmesi gereken ve madencilik sırasında da yakından takip edilmesi gereken bir iştir. Planlama aşamasında havalandırma ile ilgili yapılan hatalar ocak faaliyete başladıktan sonra ortaya çıkacağından yapılan planlama hataları ise erken fark edilememektedir. Böylesi durumlarda ana fan seçimleri çoğunlukla hatalı yapılmakta, yasal yükümlülüklerin karşılanmasında zorluklar yaşanmakta, ocaklarda yetersiz havalandırma koşulları nedeniyle ciddi iş sağlığı ve güvenliği tehlikeleri yaşanabilmekte ve hatta üretim faaliyetlerinin sürdürülmesi bile tehlikeye girmektedir. Geri döndürülemeyecek olması nedeniyle havalandırma planlamasında yapılan hataların varlığı ocak faaliyette iken görmezden gelinmekte/inkar edilmekte ve çalışmalar uygun olmamasına rağmen mevcut koşullarda sürdürülmektedir.

Yeraltı ocaklarında doğru ve etkin bir havalandırma planlaması yapılabilmesi için havalandırma planını yapacak teknik personelin akışkanlar mekaniği ve ocak havalandırması ile ilgili temel kavramları ve prensipleri çok iyi özümsemiş olması gerekmektedir. Bu kapsamda teknik personel; zehirli/patlayıcı ocak gazlarının ve tozun özellikleri ve kontrolü, havalandırma ölçmeleri, sürekli izleme sistemleri, sensör verilerinin değerlendirilmesi, ocak yangını riskleri, kendiliğinden yanma (yeraltı kömür ocaklarında), fan teorisi, ana ve tali fan uygulamaları, kaçış ve kurtarma planlaması, ocak havalandırma ekonomisi ve ısı stresi yönetimi gibi havalandırma uygulamaları konularında yetkin olmalıdır. Bu noktada meslektaşların tecrübelerinden yararlanmak son derece faydalı olsa da “doğru bilinen yanlışların” yapılmaması için bilgi ve tecrübeler teknik personel tarafından daima sorgulanmalı, bilim ve mühendislik ilkelerinden ödün verilmemelidir.

Yeraltı ocaklarında havalandırma planlaması yapılırken son yıllarda en sık yapılan yanlışlar havalandırma yazılımlarının planlamada kullanılmasında karşımıza çıkmaktadır. Havalandırma yazılımları teknik personelin işini kolaylaştırır da bu yazılımların doğru kullanılmaması ciddi planlama sorunlarını beraberinde getirmektedir. Çalışan ocakların havalandırma sistemlerinin yazılımlarda hatalı modellenmesi nedeniyle havalandırma sistemlerinin performanslarının denetlenmesi ve yapılacak değişikliklerin etkilerini incelemek mümkün değildir. Bu bağlamda en büyük eksiklik havalandırma ölçmelerinin doğru ve etkin yapılmamasıdır. **Havalandırma yazılımlarında kullanılmak üzere ocakta mutlaka basınç farkı ve hava miktarı ölçümleri (P-Q ölçümleri)** etkin biçimde yapılmalı ve havalandırma yazılımında elde edilen veriler kullanılmalıdır. **Gerçek veriler ve yazılım sonuçları korele edilmeli ve hatalar düzeltilmelidir.** Havalandırma yazılımlarında bir ocağın modellenmesinin doğru ve gerçeğe uygun yapılması ancak bu şekilde mümkündür. Havalandırma ölçmeleri yapılırken ölçüm tekniklerinden sapılmasının (örneğin anemometre ölçümlerinde dolaştırma yöntemi yerine tek bir noktadan ölçüm almak, ya da dolaştırma yöntemi kullanıp çok hızlı ölçüm yapmak) **son derece hatalı sonuçlara yol açabileceği** unutulmamalıdır.

Yeraltı ocaklarının havalandırmasında “bir şey olmaz” yaklaşımı tamamen terk edilmeli, bilimsel havalandırma ilkeleri ciddiyetle uygulanmalı, yasa ve yönetmeliklerde belirtilen tüm kurallara titizlikle uyulmalıdır. Havalandırma planlaması ve havalandırmayı ilgilendiren konularda teknik personelin bilgi eksikliği varsa yardım almaktan çekinilmemeli ve sorunlar planlama aşamasında ortaya çıkmadan yok edilmeli, ortaya çıktıysa da bilimsel yöntemlerle kökünden çözülmeye çalışılmalıdır. Zaten mühendislik yaklaşımının temel gereği olarak, sorunların öngörüler yapıp tasarım ve kurulum aşamasında çözülmesi gerekir. Yeraltı ocaklarında havalandırma ile ilgili sorunların çözülmesinde sorunu kökten halletmek yerine anlık ve geçici palyatif yaklaşımlardan vazgeçmek için; madencilik faaliyetlerinin yasalar ya da denetimlerle durdurulmasını, havalandırma kaynaklı kazalar (ya da korkular) yaşanmasını ya da ocak atmosferinin çalışanlar için kabul edilemez bir hale gelmesini beklemenin doğru olmadığı unutulmamalıdır. Bunun yanında, bir yeraltı ocağında havalandırma açısından yapılacak en tehlikeli uygulamalar bilgi eksikliği ve fazla özgüven nedeniyle uyulması gereken kurallara uyulmamasından ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda “biz yıllardır bu şekilde çalışıyoruz, herhangi bir sorun yaşamadık”, “ocağımız son derece güvenli”, “bizim ocağımızda zaten fazla metan yok”, “biz %2-3 metanda çok çalıştık”, “X Bey bana böyle söylemişti ben de aynısını uyguluyorum” gibi düşünce ve yaklaşımlardan tamamen uzaklaşılmalıdır. Ocakların planlanması ve sistem tasarımındaki bu eksikliklerin sonuçları ise üretimin erken durması, yüksek maliyetler, ocaklarda kötü çevre koşulları ve sıklıkla iş sağlığı ve güvenliğini ciddi şekilde tehdit eden trajik olayların oluşması şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Teknik personelin yanı sıra yeraltında iş gören çalışanların da havalandırma sistemi ve oluşabilecek tehlikeler konusunda bilgilendirilmeleri şarttır. Çalışanların tehlikeler hakkındaki bilgi eksiklikleri nedeniyle yeraltı ocaklarında zaman zaman ciddi iş sağlığı ve güvenliği açıkları ortaya çıkmaktadır. Bunlardan bazıları, gürültü yapıyor gerekçesiyle tali fanların kapatılması, arında hava soğuk diye fantüplerin ağızlarının büzülmesi, zehirli/patlayıcı gazların uygun konsantrasyonlarda olmadığı koşullarda çalışmaların sürdürülmesi, patlamalardan sonra arına erken girilmesidir.

Yeraltı metal ocaklarında yaygın olarak tali havalandırma sistemleri kullanıldığından bu sistemlerin doğru tasarımının yapılmaması ve uygun kullanılmaması iş sağlığı ve güvenliği açısından riskleri beraberinde getirmektedir. Özellikle dizel ekipmanın çalıştığı ve/veya patlayıcı madde kullanımının yaygın olduğu hazırlık galerileri ve üretim bölgelerinde, bu rehberde anlatılan prensipler dikkate alınarak havalandırma planlaması yapılmasına özen gösterilmelidir. Bu kapsamda yeraltı metal ocaklarına sağlanacak toplam hava miktarları hesaplanırken bu rehberin [6.9 Tali Havalandırma](#) bölümünde verilen hesaplamalara uyulması önem arz etmektedir.

Ülkemizdeki bazı yeraltı metal ocaklarının doğal havalandırma ile havalandırıldığı bilinmektedir. Ancak doğal havalandırma kontrol edilebilir bir havalandırma türü olmadığından günümüz koşullarında yapılan madencilik faaliyetleri açısından kullanılması uygun değildir. Bu nedenle yeraltı metal ocaklarının ana havalandırma sistemlerinde mekanik havalandırma kullanılmalıdır.

Son yıllarda dünyada ortaya çıkan gerektiğinde havalandırma (ventilation on demand) kavramı enerji maliyetlerinin azaltılması açısından oldukça faydalı olsa da yeraltı metal ocaklarında bu işlemin otomasyon olmadan manuel olarak yapılması bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Özellikle yeraltında çalışan işçilerin bu faaliyetleri yetkililerin bilgisi olmadan yürütmesine (işçilerin tali fanları kapatıp açması) izin verilmemelidir.

Yeraltı kömür ocakları özelinde ise metan ve solunabilir/patlayabilir nitelikteki toz ile mücadeleye azami özen gösterilmeli ve bu rehberde anlatılan hususlar hem planlama aşamasında hem de faaliyetler sırasında dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda özellikle metan ile mücadelede tabakalaşma katsayısı ve hava hızına özel ilgi gösterilmelidir. Metan gelirinin sadece üretim faaliyeti sürdürülen kömür damarı/damarlarından değil bu damarların tavan ve tabanlarında bulunan formasyonlar ve kömür damarlarından da ortama metan yayılabileceği unutulmamalıdır. Bu bağlamda kömür ve çevre kayaçların bünyelerindeki metan içeriğinin ölçülmesinin bir denetleme zorunluluğu ya da angarya değil bir gereklilik olduğu anlaşılmalıdır.

Metan varlığı sebebiyle yeraltı kömür ocaklarının hazırlık galerilerinde kullanılan tali havalandırma sistemleri özenle tasarlanmalı ve performansları yakından izlenmelidir. Birçok yeraltı kömür ocağında uzun yıllardır kullanılan tali fanların performanslarının halen ilk günkü gibi olduğu düşünülmekte hatta bazı fanların karakteristik eğrilerinin bile ocak yönetiminde dahi bulunmadığı durumlar bulunmaktadır. Bu durumda tali havalandırma bir ezbere dayanmakta ve performansı değerlendirilemeyen bir sistem ile havalandırma yapılmaya çalışılmaktadır. Bu yaklaşımlar ise bu tür galerilerde iş sağlığı ve güvenliği açısından ciddi riskleri beraberinde getirmektedir.

## KAYNAKLAR

Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2007. Dust explosions-Cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Material* 140, 1-2, pp. 7-44.

ACARP, 1996. Outbursting Scoping Study. C4034, March 1996. 693p.

Addai, E.K., Gabel, D., Krause, U., 2016. Experimental investigations of the minimum ignition energy and the minimum ignition temperature of inert and combustible dust cloud mixtures. *Journal of Hazardous Materials* 307, pp.302-311.

Alnor, 2022. TSI Alnor RVA801 Rotating Vane Anemometer, <https://www.calcert.com/product/alnor-rva801-rotating-vane-anemometer> (Eylül 2022 tarihinde erişim sağlandı)

ASTM, 2012. Standard Testing Method for Explosibility of Dust Clouds (E1226-12a). American Standard Testing Methods.

ASTM, 2014. Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts (E1515-14). American Standard Testing Methods.

ASTM, 2019. Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds (D3175-18). American Standard for Testing Materials.

Badino, G., 2009. The legend of carbon dioxide heaviness. *Journal of Cave and Karst Studies* 71, 1, pp. 100-107.

Bakke, P., Leach, S.J., 1962. Principles of formation and dispersion of methane roof layers and some remedial measures. *The Mining Engineer* 121, 645-659.

Baris, K., Aydin, Y., 2020. Atmospheric monitoring systems in underground coal mines revisited: a study on sensor accuracy and location. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology* 23, 3, pp. 325-350.

Bartknecht, W., 1978. Brenngas-und Staubexplosionen, Forschungsbericht F45. Koblenz Bundeninstitut für Arbeitsschutz.

Belle, B., Nundlall, A.R., Biffi, M. ve Thomson, C., 2014. Mine Ventilation Design Velocity Standards for underground Mines – Mine Operators' Perspectives. *10th Int. Mine Ventilation Congress, IMVC 2014*, The Mine Ventilation Society of South Africa, pp. 235-247.

Boxho, J., Stassen, P., Mucke, G., Noack, K., Jeger, C., Lescher, L., Browning, E.J., Dunmore, R., Monis, I.H., 1980. Firedamp Drainage. Verlack Glückauf GmbH, Essen.

Brake, D.J., 2008. Correctly estimating primary airflow requirements for underground metalliferous mines, 10th Underground Operator's Conference, Lancelton, TAS, pp. 199-204.

Brake, D.J., 2013. Ventilation challenges facing the metalliferous sector, The Australian Mine Ventilation Conference, Adelaide, AU, pp. 3-12.

BS2955, 1958. Glossary of terms related to powders, No.505, British Standard Institute, London.

Carroll Technologies Group, 2022. ST1000-8 Low Speed Anemometer, <https://www.carrolltechnologiesgroup.com/products-shop/st1000-8-low-speed-anemometer/>

Cashdollar, K.L., Sapko, M.J., Weiss, E.S., Hertzberg, M., 1987. Laboratory and Mine Dust Explosion Research at the Bureau of Mines, Industrial Dust Explosions, STP 958. American Society of Testing and Materials, West Conshocken, PA.

Cashdollar, K.L., Weiss, E.S., Greninger, N.B., Chatrahi, K., 1992. Laboratory and large-scale dust explosion research. *Plant/Operator Progress* 11, pp. 247-255.

Colinet, J.F., Spencer, E.R., Jankowski, R.A., 1997. Status of dust control technology on U.S. longwalls, 6th International Mine Ventilation Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 345-351.

Coward, H.F., Jones, G.W., 1952. Limits of Flammability of Gases and Vapors. U.S. Bureau of Mines, Bulletin 503, 155p.

Cybulska, R., 1981. Examples of coal dust explosions, Ignitions, Explosions and Fires. Illawara Sym., pp. 71-78.

Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., 2006. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill, 2036p.

ÇSGB, 2013. Tozla Mücadele Yönetmeliği. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 28812 sayılı ve 05.11.2003 tarihli Resmi Gazete.

ÇSGB, 2015. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 28770 sayılı Resmi Gazete.

Davis, R.S., 1992. Equation for the determination of the density of moist air. *Metrologia* 29, 1, pp. 67-70.

Didari, V., 1985. Kömür tozu patlaması. *Madencilik* 24, 4, 23-29.

Didari, V., 1988. Metan Geliri Tahmin Yöntemlerinin İlkeleri ve Pratikte Uygulamaları. *Madencilik* 27, 3, 5-10.

Durucan, Ş., Güyagüler, T., 1985. Yeraltı Kömür Madenciliğinde Çevre Sorunları ve Kontrol Yöntemleri Seminer El Kitabı. Genel Maden İşçileri Sendikası.

- Dwyer, 2022a. Dwyer Series 166T Telescoping Stainless Steel Pitot Tube, [https://intl.dwyer-inst.com/Products/Product.cfm?Group\\_ID=63](https://intl.dwyer-inst.com/Products/Product.cfm?Group_ID=63) (Eylül 2022'de erişim sağlandı)
- Dwyer, 2022b. Series 475 Intrinsically Safe Handheld Digital Manometer, <https://intl.dwyer-inst.com/Product/Pressure/Manometers/Digital/Series475#specs>
- Eckhoff, R.K., 2003. Dust Explosions in the Process Industries (3rd Edition). Gulf Professional Publishing, ISBN 0-7506-7602-7, USA.
- EU, 2017. Indicative Occupational Exposure Values (IOELV). EU Directive 2017/164.
- Gillies, A.D.S., Wu, H.W., 2002. Dust measurement and control in thick seam mining, North American 9th US Mine Ventilation Symposium. Balkema, pp. 587-594.
- Greig, J., 1982. Gases Encountered in Mines, in: Burrows, J. (Ed.), Environmental Engineering in South African Mines, pp. 713-739.
- 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, Fourth International Colloquium on dust Explosions. Polish Academy of Sciences, Poland.
- Halim, A., 2017. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines -Are we using correct values?, 16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, Colorado, USA.
- Hall, C.J., 1981. Mine Ventilation Engineering. Society of Mining Engineers (SME) of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME), New York, 344 p.
- Harris, M.L., Cashdollar, K.L., Man, C.K., Thimons, E., 2009. Mitigating coal dust explosions in modern underground coal mines, 9th International Mine Ventilation Congress, New Delhi, India, pp. 143-149.
- Harris, M.L., Weiss, E.S., Man, C.-K., Colinet, J.F., Goodman, G.V., 2010. Rock dusting considerations in underground coal mines. U.S. National Institute of Occupational Health and Safety (NIOSH), <https://www.cdc.gov/niosh/mining%5C/UserFiles/works/pdfs/rdcui.pdf> (Ekim 2022'de erişim sağlandı).
- Hartmann, H.L., Mutmanky, J.M., Ramani, R.V., Wang, Y.J., 1997. Mine Ventilation and Air Conditioning. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 729 p.
- Hartmann, I., 1954. Dust explosions in coal mines and industry. *The Scientific Monthly* 79, 2, 97-108.
- Holding, W., 1982. Explosible Dusts, Environmental Engineering in South African Mines. Mine Ventilation Society of South Africa, pp. 763-771.
- ISO, 1985. Explosion Protection Systems, Part 1. Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air (ISO 6184/1). International Standard Organization, Geneva.
- Kissell, F.N., 2006. Handbook for Methane Control in Mining. US National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH), IC 9486, 184 p.
- Krzystolik, P., 1991. Advantages/disadvantages of bleeder systems, AMC Coal Convention, Pittsburgh, PA, pp. 155-195.
- Kulkarni, P., Baron, P.A., Willeke, K., 2011. Introduction to aerosol characterization, in: Kulkaarni, P., Baron, P.A., Willeke, K. (Eds.), Aerosol Measurement-Principles, Techniques and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Lees, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries-Identification, Assessment and Control (Vol.2). Butterworth-Heinemann, London.
- Lees, F.P., 2005. Lees' Loss Prevention in the Process Industries (partially updated by S. Mannan) (vols 1-3). Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford.
- McElroy, G.E., 1935. Engineering Factors in the Ventilation of Metal Mines. USBM, Bulletin No:385, 196 p.
- McPherson, M.J., 1984. Mine ventilation planning in the 1980s. *International Journal of Mining Engineering*, v.2, no.3, October 1984, pp. 185-227.
- McPherson, M.J., 1993. Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. Chapman & Hall, United Kingdom, 930 p.
- Mousset-Jones, P., 1986. A Survey of Mine Ventilation Practices, Mackay School of Mines, USA, pp. 19.
- Mutama, K.R., Pelletier, D.P., 1999. Axial flow fan use at San Manuel Mine, 8th U.S. Mine Ventilation Symposium, Rolla, Missouri, pp. 477-484.
- MVS Databook, 1999. *The Mine Ventilation Practitioner's Data Book*, Volume 2, The mine Ventilation Society of South Africa, Edited by A. Patterson.
- NFPA, 2002. Guide for Venting of Deflagrations. National Fire Protection Association, 68 p.
- NIOSH, 2022a. Diesel Exhaust, The National Institute for Occupational Safety and Health, <https://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/dieselexhaust.html> (Ağustos 2022 tarihinde erişim sağlandı).
- NIOSH, 2022b. Nitrogen dioxide, <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0454.html> (Ağustos 2022 tarihinde ulaşıldı)

OSHA, 2021. United States Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), Nitrogen Dioxide, <https://www.osha.gov/chemicaldata/21> (Ekim 2022 tarihinde erişim sağlandı)

Picard, A., Davis, R.S., Glaser, M., Fuji, K., 2008. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia* 45, pp. 145-155.

Ray, S.K., Khan, A.M., Mohalik, N.K., Mishra, D., Mandal, S., Pandey, J.K., 2022. Review of preventive and constructive measures for coal mine explosions: An Indian Perspective. *International Journal of Mining Science and Technology* 32, 471-485.

Rider, J.P., Colinet, J.F., 2007. Current Dust Control Practices on U.S. Longwalls. National Institute of Occupational Health and Safety (NIOSH), <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/cdcpcp.pdf>.

SIA 196, 1998. Baeulüftung im Untertgbau (in German). Swiss Standard, SN531196.

Sierra, C., 2020. Mine Ventilation - A Concise Guide for Students. Springer Nature, Switzerland.

Siwek, R., 1977. 20-L Laboratory Apparatus for the Determination of the Explosion Characteristics of Flammable Dusts. Winterhur Engineering College, Winterhur, Switzerland, , 109 p.

Stewart, C., 2019. Ventilation Modeling - Myths, Mistakes and Success (Workshop Presentation), 2019 Australian Mine Ventilation Conference, Perth, Au.

Strang, J., McKenzie-Wood, P., 1985. A Manual on Mines Rescue and Gas Detection. Weston & Co., Kiama, Australia.

Ürünveren, A., Ural, S., 2017. Investigation of explosibility characteristics of some Turkish lignite coal dusts. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 39, 21.

Weiss, E.S., Greninger, N.B., Sapko, M.J., 1989, Recent dust explosion studies at the Lake Lynn experimental mine, 23rd International Conference of Safety in Mines Research Institutes, September 11-15, Washington DC, 843-856.

Zawadka-Malota, I., 2015. Testing of mining explosives with regard to the content of carbon oxides and nitrogen oxides in their detonation products *Journal of Sustainable Mining* 14, 4, 173-178.







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](http://www.isginfo.org)

İSG.info

