



# KÖMÜR MADENLERİ İÇİN HAVALANDIRMA SİSTEM TASARIMI

*Design of Ventilation System for Coal Mine*

**Hüseyin Bulgurcu**

## ÖZET

Ülkemizde yıllar boyu kömür madenlerinde yaşanan facialar dikkatleri bu madenlerdeki ihmallere yöneltmiştir. Bu ihmallerin en önemli suçlusu kuşkusuz havalandırma sistemleridir. Maden havalandırma sistemlerinin tasarımı oldukça karmaşık bir süreç olup bu konuda hazırlanmış çeşitli yazılımlardan yararlanılmaktadır. Havalandırma sistemlerinin güncel mevzuata uygun olarak ve maden ocağının gelişmesine ayak uyduracak şekilde tasarlanması gereklidir. Havalandırma sistem tasarımı yanında bu sistemlerinin uygun şekilde işletimi ve bakımı da önemlidir. Bu çalışmada kömür madenleri için havalandırma sistemlerinin tasarımı, tipik maden havalandırma sistem çeşitleri ve tipik maden cihazlarının boyutlandırılması üzerinde durulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Maden havalandırması, Havalandırma tasarımı, Kömür madeni

## ABSTRACT

The disasters experienced in coal mines in our country for years have directed attention to the negligence in these mines. The most important culprit of these negligence is undoubtedly the ventilation systems. The design of mine ventilation systems is a very complex process and various software are used in this regard. Ventilation systems must be designed in accordance with current legislation and to keep up with the development of the mine. Besides ventilation system design, proper operation and maintenance of these systems is also important. In this study, the design of ventilation systems for coal mines, typical mine ventilation system types and sizing of typical mining devices are emphasized.

**Key Words:** Mine ventilation, Ventilation design, Ventilation operation

## 1. GİRİŞ

Maden havalandırması, yer altı maden ocaklarında; çalışan personelin ve çalışan makinelerin, güvenli ve rahat çalışmalarını için yapılan temel işlemlerden biridir.

Havalandırma işlemi yer altında; ocak sıcaklığını en uygun seviyeye ayarlamak, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, CH<sub>4</sub> gibi zararlı gazların derişikliğini, yönetmeliklerle belirlenmiş sınır değerler altında tutmak ve dışarı atmak, çalışan personel ve makineler için gereken oksijeni temin etmek için yapılmaktadır.

Türkiye'de, Maden ve Taş Ocakların İşletmelerinde ve Tünel Yapımında Alınacak İş Sağlığı ve İş Güvenliği Önlemlerine İlişkin Tüzüğü'nün 162. maddesi gereğince %19'dan az O<sub>2</sub>, %2'den çok CH<sub>4</sub>, %0,5'ten çok CO<sub>2</sub> ve diğer tehlikeli gazlar bulunan yerlerde çalışılması yasaklanmıştır [1]. Yine aynı

tüzüğü'nün 161. maddesi gereğince maksimum hava hızı 8 m/s olarak belirlenmiştir. Bu amaçla galerilerden geçecek hava miktarını ayarlamak için yer yer hava kapıları, hava perdeleri, hava köprüleri gibi yöntemlere başvurulmaktadır.

Maden havalandırma yöntemleri doğal ve mekanik olarak sınıflandırılır. Ancak sınırlı uygulanabilirliği ve yetersizliği nedeniyle doğal havalandırma kesinlikle tavsiye edilmez. Mekanik havalandırma; yer altı maden ocaklarında, vantilatörler yardımıyla yapılan havalandırma yöntemidir. Bu işlem "aksiyal" ve "radyal" fanlar yardımıyla gerçekleştirilir. Bunlar emici, üfleyici hem emici hem üfleyici olarak çalıştırılabilirler [2].

## 2. MADEN HAVALANDIRMA TASARIMI

Havalandırma, hava akışı kontrolü, yönü ve miktarı olarak tanımlanabilir. Havalandırma, faaliyetin üretim bölümünü doğrudan etkilemese de genellikle düşük personel çalışma oranı ve düşük maden verimliliği, artan potansiyel tehlike durumları ve düşük işçi motivasyonu ve şevki, uygun olmayan havalandırmanın sonuçlarıdır. Hava solunması için ve ayrıca gazlar, toz, ısı ve nem gibi kimyasal ve fiziksel kirleticilerin yayılması için gereklidir.

Maden üretiminin güvenli bir şekilde sağlanması için yer altı madenlerinin havalandırılması hayati önem taşımaktadır. Herhangi bir havalandırma sisteminin açık ve anlaşılır temelleri vardır: yeterli miktarda ve kalitede hava akışı sağlamanın bir sonucu olarak yeterli oksijen sağlamak ve güvenli kirletici konsantrasyonları elde etmek ve onları madenden uzaklaştırmak. Bu temel unsurlar tüm ülkelerin hukukunda düzenlenmiştir; ancak, miktar ve kalite gereklilikleri, havalandırılan durumun yanı sıra birkaç faktöre bağlı olarak farklı ülkelerde önemli ölçüde değişebilir: metalli, endüstriyel mineraller, kömür veya gazlı/gazsız.

Genel gereklilik, madencilerin güvenli ve sağlıklı bir ortamda çalışabilmeleri, yaşayabilmeleri ve hareket edebilmeleri ve tatmin edici bir konfora sahip olmalarıdır. Havalandırma, insan müdahalesinin gerekmediği veya mümkün olmadığı durumlarda da kullanılabilir. Yine de makineleri çalıştırmak ve soğutmak veya yanma süreçlerine oksijen sağlamak için uygun ve yeterli oksijen kaynağı gereklidir.

### 2.1 Maden Havalandırma Fanları

Hava akışı, yeraltındaki atmosfer koşullarını kontrol etmenin birincil tekniğidir. Doğal havalandırmanın hava yoğunluğu değişiklikleri modern taş ocaklarında bir miktar hava akışı sağlayabilse de genellikle madenlerdeki hava akışı fanlar tarafından üretilir. Ana fanlar, tüm maden hava akışını (tek başına veya birlikte) sağlar ve sıklıkla yüzeyde bulunur; ancak birkaç madende yer altına yerleştirilmiştir. Bazı bölgelerdeki yasa ve mevzuat, ana maden fanlarının yalnızca yüzeye yerleştirilmesini gerektirebilir ve bazı durumlarda tersine çevrilebilir olması gerekebilir. Ana fanlar genellikle bir madende tüm hava akışını sağlarken, havanın daha uç mekanlarda sirkülasyonu için hava akışının enerjisini artırmak için madenlerdeki diğer fanları kullanabiliriz. Bunlara güçlendirici (booster) fanlar denir ve genellikle madenin belirli alanlarını yönetirler.

Maden geliştirme başlıklarında, tek girişten dolayı bir havalandırma akışı mümkün olmayabilir. Bu durumlar için hava için bir giriş ve dönüş yolu geliştirilmelidir. Modern madencilikte bu, genellikle kör girişleri havalandırmak için havayı kanallardan akmaya iten yardımcı fanlar kullanılarak gerçekleştirilir. Alternatifler, örgü kumaş kanal kullanımını içerir ve bazı durumlarda jet fanları, regülatörler, durdurucular, hava kapıları, tıkaçlar ve hava geçişleri hava akışının yayılmasını kontrol eder. Maden havalandırma amaçlarına ulaşmak için hava akışı çok önemli bir teknik olsa da bazı durumlarda talep edilen hava akışı ekonomik madencilik için çok maliyetli olabilir. Bu gibi durumlarda, havalandırma sistemi üzerindeki yükü azaltmak için başka kontrol teknolojileri kullanılabilir. [3]. Bu teknikler metan drenajı, ısıtma ve soğutma sistemleri, toz bastırma sistemleri ve diğer farklı kontrol ve izleme sistemlerini içerir [4].

## 2.2 Maden Havalandırma Teorisi

Akışkanlar mekaniği ve termodinamik, maden havalandırma teorisinin iki temelidir, özellikle Bernoulli denklemi, boru sürtünme basıncı düşüşü için Chezy-Darcy yasası ve sabit akışlı enerji denklemi. Atkinson (1854) tarafından geliştirilen ve bugün hala kullanımda olan bağıntı maden havalandırma teorisinin temelini oluşturur. Akışkanlar mekaniğinin temelini kullanarak ve birkaç basitleştirici önermeyi göz önünde bulundurarak, şu anda modern madenlerde havalandırma ve havalandırma tasarım yazılımı teorisinin temeli olan birkaç ilişki türetmiştir. Bu yaklaşım sıkıştırılmazlık varsayımına dayanmaktadır; ancak kullandığımız Ventsim tasarımında, sıkıştırılabilir sıvılara da sahip olabiliriz. Son madenler daha derine doğru hareket ettikçe, bu ön kabul genellikle havanın yoğunluğundaki değişiklikler nedeniyle geçersiz hale gelir. Yükseklik ve sıcaklıktaki değişimler nedeniyle yoğunluktaki değişikliklerin %5'ten fazla olduğu durumlarda, sıkıştırılmazlık varsayımı zayıflar ve dikkate alınmamalıdır [4]. Madenin ömrü boyunca yeterli havalandırmayı sürdürmek için dikkatli bir ileri havalandırma tasarımına sahip olmak gereklidir. Gelişmiş havalandırma, iki temel parametrenin dikkate alınmasını içerir: maden fanlarının basıncı ve havanın toplam hacimsel debisi ve bunun yeterli ve ekonomik yayılması [5].

## 2.3 Maden Hava Yolu Direnci (Atkinson Yasası)

Fransız hidrolik mühendislerinin (Chezy ve Darcy) çalışmaları, Atkinson denkleminin temelidir. Chezy-Darcy çalışmaları bir boru için müteakip denklemi ifade eder [6]

$$P = fL \frac{Çevre}{A} \rho \frac{u^2}{2} \quad (1)$$

Burada:

$P$  = Kanalın basınç düşüşü (Pa),

$f$  = Kanalın sürtünme katsayısı,

$L$  = Kanal uzunluğu (m),

$Çevre$  = Kanalın çevresi (m),

$A$  = borunun kesit alanı ( $m^2$ ),

$\rho$  = sıvının yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),

$u$  = sıvının hızı (m/s),

Tamamen gelişmiş türbülanslı akış için, Atkinson sabit sürtünme katsayısı varsayıyordu. Ayrıca, başka bir varsayım olarak havanın yoğunluğu düzenliyi, Atkinson sürtünme faktörü,  $k$  ( $kg/m^3$ ) sabitlerin tek bir düşüncede birleşimidir,

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

Yerine konursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$P = KL \frac{Çevre}{A} u^2 \quad (3)$$

Bu denklem Atkinson denklemi olarak tanınır ve hava akış hızı hacmi  $Q$  ( $m^3/s$ ) cinsinden yazılabilir, burada  $Q = U.A$ ,

$$P = KL \frac{Çevre}{A^3} Q^2 \quad (4)$$

Herhangi bir hava yolu için çevre, uzunluk  $L$  ve enine kesit alanı  $A$ , bilinir. Yoğunluğa bağımlılığı göz ardı edersek, tam gelişmiş türbülanslı akış için sürtünme faktörü yalnızca hava yolu kaplamasının pürüzlülüğü ile değişir. Bu nedenle, tek bir değişken veya karakteristik sayı olan  $R$ 'yi elde etmek için, tüm bu faktörler söz konusu hava yolu için toplanabilir; burada  $R$ , hava yolu direnci olarak bilinir.

$$R = KL \frac{Çevre}{A^3} \quad (5)$$

O zaman maden havalandırmasının kare yasasını elde edebiliriz:

$$P = RQ^2 \quad (6)$$

Burada:

$P$  = hava yolu boyunca basınç (Pa)

$R = \text{Atkinson direnci } (Ns^2/m^8)$

$Q = \text{hava miktarı veya akış hızı } (m^3/s)$

bu denklem yoğunluğun daha önce tartışıldığı gibi sabit olduğunu varsayar; düzenli olarak standart hava yoğunluğunun  $1,2 (kg/m^3)$  olduğu varsayılır. Tablolarda belirtilen R değerleri tipik olarak bu değere atıfta bulunur. Diğer hava yoğunlukları için,  $\rho$ , sürtünme basıncı düşüşünü ve direnci elde etmek için aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$P = k_s L \frac{\rho_{\text{evre}}}{A^3} Q^2 \frac{\rho}{1,2} \quad (7)$$

$$R = k_s L \frac{\rho_{\text{evre}}}{A^3} \frac{\rho}{1,2} \quad (8)$$

Burada  $k_s=1,2 kg/m^3$  hava yoğunluğunda elde edilen sürtünme faktörüdür.

Bu hesaplamalardan, yer altı açıklık pürüzlülük derecesinin ( $k_s$ ) Atkinson direnci ve bu açıklıktan hava akışı maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır. Ayrıca hava akışı ile kaya arasındaki ısı transfer oranını da doğrudan etkiler.  $k_s$  (sürtünme faktörü), ayrıntıları McPherson'da (1993) bulunabilen çeşitli yollarla belirlenebilir:

- Benzer havalandırma hava yollarına benzetilerek,
- Doğrudan ölçümle.
- Tasarım tablolarından.
- Geometrik verilerden.

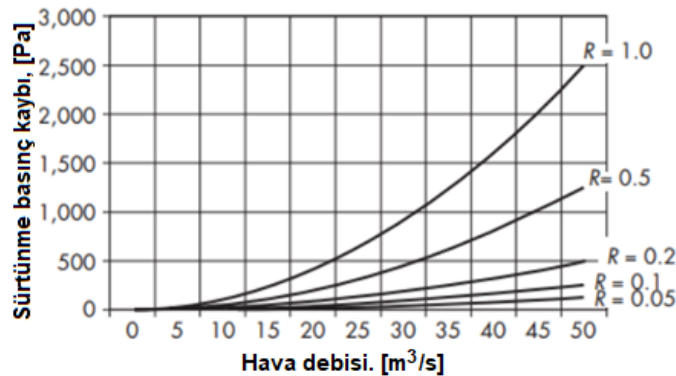
Havalandırma mühendisliğindeki en önemli kavramlardan biri hava yolu direncidir. Maden havalandırma kare yasası şunları belirtir:

$$P = RQ^2 \quad (9)$$

Yukarıdaki denklem, direncin, belirli bir hava yoğunluğunda sürtünme basıncı düşüşü ( $p$ ) ile hava akış hızının ( $Q$ ) karesi arasında bir orantı sabiti olduğunu göstermektedir. Şekil 1'de görülebilen bir  $p$ ,  $Q$  grafiği üzerindeki grafiğin parabolik formu, hava yolu direncinin eğrisi olarak tanımlanır.

Herhangi bir hava akımını bir hava yolundan geçirmenin maliyeti, doğrudan hava yolu direncine göre değişir. Fiyat, hava gücü= $P.Q$  kullanılarak veya  $p=RQ^2$  dikkate alınarak, hava gücü= $RQ^3$ e yol açan bir hava yolunda kullanılan hava gücü tarafından değerlendirilebilir.

Elektriğin kilovat saat başına sabit bir maliyeti olduğunu varsayarsak, o zaman basitçe bir hava yolunu havalandırmak için gereken fiyatı elde edebiliriz. Ayrıca bu denklem, belirli bir rotada hava debisini ikiye katlamanın, hava gücünü çoğaltma sonucunu doğrudan temsil eder; dolayısıyla, havalandırma maliyeti 8 kat olacaktır [4].



Şekil 1. Maden hava yolu direnci [7].

Tablo 1. Çeşitli madencilik durumları için sürtünme faktörleri ( $1,2 kg/m^3$  hava yoğunluğu için) [7]

Hava Yolu/Kanal Tipi	Sürtünme faktör k, $kg/m^3$	Hava Yolu/Kanal Tipi	Sürtünme faktör k, $kg/m^3$
<b>Dikdörtgen hava yolları</b>		<b>Şaftlar</b>	
Pürüzsüz beton astarlı	0.004	Düz çizgili, engelsiz	0,003
Püskürtme beton	0.0055	Tuğla kaplı, engelsiz	0,004
Astarsız, sadece küçük düzensizlikler	0,009	Beton kaplı, halat kılavuzları, boru bağlantı parçaları	0,0065
Duvar veya beton duvarlardaki kırışlar	0,0095	Tuğla kaplı, halat kılavuzları, boru bağ. parçaları	0,0075
Astarsız, tipik koşullar, düzensizlikler önemli değil	0.012	Astarsız, iyi kesilmiş yüzey	0,01
Astarsız, düzensiz kenarlar	0,014	Astarsız, büyük düzensizlikleri giderilmiş	0,012
Astarsız, pürüzlü veya düzensiz koşullar	0,016	Astarsız, file civatalı	0,014
Yan desteklerdeki kırışlar	0,019	Kiremit astarlı, iki yan buntun	0,018
Pürüzlü kenarlı eğimli basamaklı zemin, korkuluklar	0.04	Hortum astarlı, bağlantı parçası yok	0,007–0,014
<b>Çelik kemerli hava yolları</b>		Her biri bağ kırışlı iki yan buntun	0,022
Her yönden pürüzsüz beton	0,004	<b>Çelik konveyörlü ve motorlu desteklere sahip uzun ayak yüzü</b>	
Çepeçevre kemerler arası tuğla	0.006	İyi koşullar, pürüzsüz duvar	0,035
Beton levhalar veya kereste gecikmesi çepeçevre flanşlar arasında	0,0075	Tipik koşullar, konveyörde kömür	0,05
Levhalar veya yaya kadar flanşlar arasında kalan kereste	0.009	Zorlu koşullar, düzensiz ön yüz	0,06
Kemerlerin gerisinde kalan	0.012	<b>Havalandırma kanalı</b>	
Kemerler kötü hizalanmış, zorlu koşullar	0,016	Katlanabilir kumaş kanal (basma sistemi)	0,0037
		Tamamen gerilmiş spiral ile esnek kanal	0,011
		Fiberglas	0,0024
		Spiral sargılı galvanizli çelik	0,0021

## 2.4 Yerel (Şok) Kayıpları

Yukarıda açıklanan kuramsal bağıntılar bir hava yolu için sürtünme basıncı kaybının nasıl hesaplanabileceğini ifade eder. Ayrıca, yerel kayıplar olarak adlandırılan başka enerji kayıpları da meydana gelebilir. Hava akımının farklı bir yöne dönmesi gerektiğinde yeni çalkantılı girdaplar kurulur. Bunlar yayıldıkça gücü kullanır ve hava yolu direnci önemli ölçüde artabilir. Kayıplar; kavşaklar, dirsekler, engeller ve düzenleyiciler nedeniyle kesit değişimlerinde ve madene giriş/çıkış noktalarında meydana gelmektedir [4].

Şok kayıplarının etkileri, direnci etkileyen tüm faktörlerin en belirsiz olanıdır. Şok kayıplarından kaynaklanan ek direncin değerlendirilmesi iki teknikle değerlendirilebilir. Bir şok kaybından kaynaklanan basınç kaybı, bir şok basınç kaybı veya  $P_{şok}$  olarak temsil edilebilir:

$$P_{şok} = X \rho (u^2/2) \quad (10)$$

Burada:

$X$  = şok kayıp faktörü,

$\rho$  = hava yoğunluğu (tipik olarak  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ) ve

$u$  = havanın hızı (m/s).

Bu, kare yasası ile bir şok kaybı direncine dönüştürülebilir,  $R_{şok}$ :

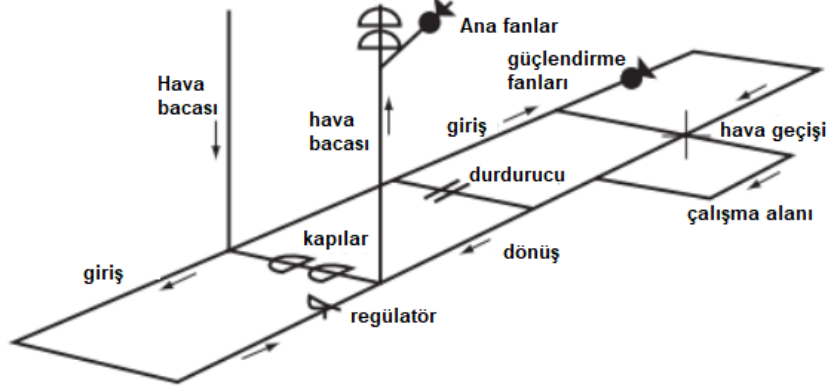
$$R_{şok} = R_s = \left( X \rho / 2A^2 \right) \quad (11)$$

## 2.5 Maden Havalandırma Sistemleri

Jeolojisi, geometrisi/yerleşimi, kapsamı/boyutu ve kirleticileri açısından her yeraltı madeni benzersizdir. Bu nedenle, maden çalışmalarını oluşturan hava yollarındaki hava akışları ve basınç düşüşü de oldukça değişkendir. Ancak, tüm havalandırma sistemlerinin belirli özellikleri bazı ortak noktalara sahiptir ve havalandırma sistemleri ve alt sistem sınıflandırmaları tanınabilir. Mevcut ve sonraki bölümün amacı, yer altı havalandırma sistemlerinin gerekli kriterlerini tartışmak, havalandırma altyapısının kritik bileşenlerini belirlemek ve ayrıca havalandırma mühendislerinin bazı teknik

terimlerini sunmaktadır. İyi yapılmış bir havalandırma sistemi uyarlanabilir, ekonomik, yeterli ve esnek olmalıdır [5]. Havalandırma sistemleri genel olarak takımlar halinde şu şekilde konulabilir:

- Maden sistemleri
- Bölge sistemleri
- Yardımcı havalandırma sistemleri



Şekil 2. Basit maden havalandırma sistemi [7].

Yukarıdaki şekil, birincil ve basit bir sistem düzenini ve kullanılabilir bazı havalandırma kontrol cihazlarını gösteren açıklayıcı bir maden havalandırma sistemini açıklamaktadır. Yukarıdaki şekil aşağıdakileri göstermektedir:

- Taze hava, şaftlar veya diğer yüzey bağlantıları yoluyla girer.
- Kirleticilerin çoğu buraya eklenir.
- Hava, giriş havası yollarından çalışma alanlarına doğru akar.
- Kirletilmiş hava, dönüş havası yollarından sistem boyunca geri döner.
- Dönüş havası, yukarı döküm miller veya diğer yüzey dönüş bağlantıları yoluyla yüzeye doğru akar.

Bununla birlikte, havalandırma bu şematik açıklamadan daha karmaşıktır. Hava, çoğu sıvı gibi, bir noktadan diğerine daha düşük dirençli rotayı izlemeye çalışacak ve havalandırma gerektiren alanlara giden rota genellikle yüksek dirençli bir rota boyunca uzanır. Havanın ihtiyaç duyulan yerlere ulaştırılabilmesi için hava akımı kontrol cihazlarına ihtiyaç vardır. Bunlar iki ana kategoriye ayrılabilir: havaya enerji ekleyerek onu gereken yere yönlendiren aktif cihazlar veya havayı başka yollardan geçmeye ikna etmek için akış yollarına direnç ekleyen pasif cihazlar. Aktif cihazların örnekleri arasında ana fanlar ve yardımcı fanlar bulunur. Pasif cihazların örnekleri, direnç ekleyerek basınç düşüşünü artıran hava geçişlerini, durdurmaları, hava kapılarını, regülatörleri ve contaları içerir. Her iki tip de sonraki bölümlerde tartışılmaktadır [4].

Alman kömür madenciliği endüstrisinin Madenler Yönetmeliğinde havanın şartlandırılmasına göre, yer altı operasyonları için yerinde çalışma saatleri için 25 °C'ye kadar etkin sıcaklıklarda herhangi bir kısıtlama yoktur. Çalışma saatleri, daha yüksek efektif sıcaklıklarda vardiya başına ortalama sekiz saat seviyesinden vardiya başına altı veya beş saate düşürülür. 30 °C'lik yeterli bir sıcaklığın üzerinde, yeraltında çalışmaya yalnızca istisnai durumlarda izin verilir. Ayrıca, 32 °C'nin üzerindeki etkili sıcaklıklarda tamamen yasaklanmıştır.

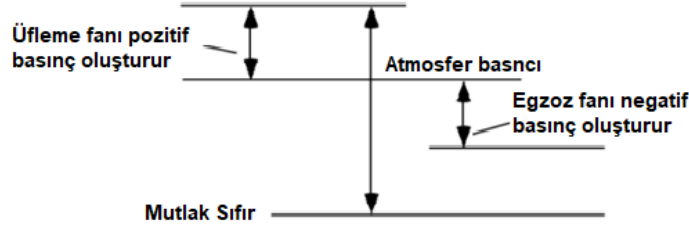
Solunum için gerekli hava miktarları (her bir işçi için)

- Grizu miktarı çok az olan ocaklarda : 60-120 m<sup>3</sup>/h
- Grizu miktarı orta seviyede olan ocaklarda : 180-360 m<sup>3</sup>/h
- Grizu miktarı yüksek seviyeli ocaklarda : 1200-1500 m<sup>3</sup>/h

## 2.6 Fan Yerleşimleri

Fan konumları ve hava akımı yolu ile ilgili olarak, üç havalandırma sistemi vardır: maden fanının dönüş havası şaftının üstüne yerleştirildiği egzoz (çekme) sistemi; üfleme (itme) sistemi, maden fanı

giriş havası miline yerleştirilmiş ve hem giriş hem de dönüş hava millerinde fanlar bulunan kombine sistem (itme-çekme). Bu sadece ana havalandırma sistemlerini işaret eder; yerel kuruluşlar, örneğin operasyonel bir ortam için bir yüz havalandırma sistemi, merkezi sistemden farklı olabilir. Spesifik plana bağlı olarak, madenin basıncı negatif (fan tasarımı bir emiş oluşturduğundan, maden basıncını atmosferik referans noktasından daha az koyarak egzoz sistemi) veya pozitif (üfleme yaklaşımı) olabilir. Bunun nedeni, Şekil 3'te gösterildiği gibi maden basıncının atmosferik basınca göre değerlendirilmesidir:



**Şekil 3.** Üfleme sistemi için madenin pozitif basıncını ve egzoz yaklaşımı için madenin negatif basıncını gösteren diyagram [5].

## 2.7 Hava Akımı Yönü

Hava akımı yönü, ana fanın konumundan etkilenir ve bu da çalışma veya nakliyenin diğer taraflarını önemli ölçüde etkiler. Bir yandan, tropik olmayan sistem, hava akımının ve taşınan kayanın ters yönlerde hareket ettiği sistemdir, bu da maden taşımacılığının hava giriş yollarında gerçekleştirildiğini ima eder. Bu, toz ve diğer dumanların çok aşırı olmaması için hava giriş yollarındaki hava hızlarına sınırlamalar getirme eğilimini gösterir. Öte yandan, tropik sistem, hava akımının ve çıkarılan kayanın aynı yönde aktarıldığı veya nakliyenin dönüş hava yollarında gerçekleştirildiği sistemdir. Bu sistem, kırılmış kayadan gelen toz, ısı ve diğer kirleticilerin doğrudan dışarıya atılmasını sağlayacaktır. Ayrıca nakliye yolunda yangınla karşılaşma durumunda da bu sistem avantajlıdır. Hava akımı yönündeki diğer bir unsur da hava yolunun eğimidir. Hava akımının eğimli yapılarla yukarı doğru itilmesi, buna yükselen havalandırma denir [5].

## 2.8 Havalandırma Planlama/Tasarım

Havalandırma tasarımının nihai amacı, tüm operasyonel yüzleri, hava yollarını ve yer altı ortamlarını en az masrafla uygun şekilde havalandırabilecek bir sistem planlamaktır. Uygun bir maden havalandırma sistemi her zaman, hala alternatifleri olması gereken maden tasarımının ilk geliştirilmesiyle başlar. Şekil 4, yeni bir yeraltı madeni tasarlamak için birincil modeli göstermektedir. Nihai bir havalandırma planlama şemasına giren birçok faktöre rağmen, dikkate alınan tüm öğeler arasında sürtünme ve şok kayıplarının en aza indirilmesi en baskın iki tanesidir.

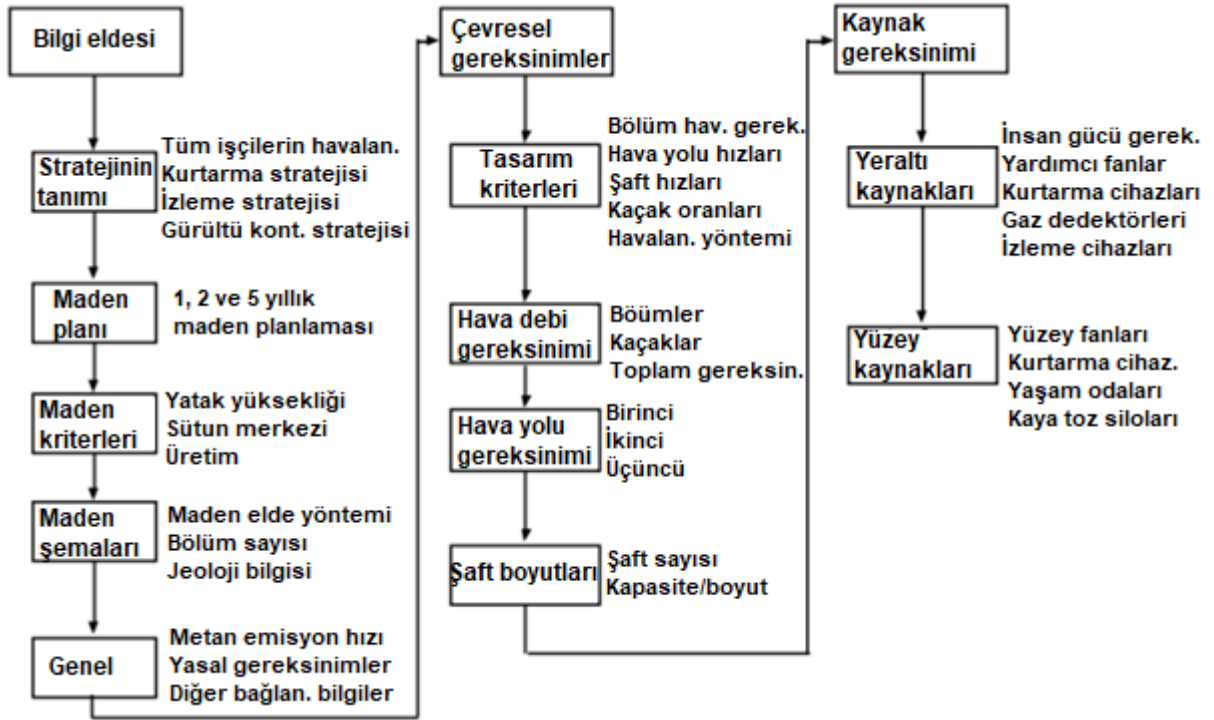
### 2.8.1 Sürtünme Kayıplarının Azaltılması

Denklemden:

$$R = \frac{K P L}{5,2 A^3 N^3} \quad (12)$$

K, P ve L'yi azaltabilecek ve A ve N'yi geliştirebilecek herhangi bir şey, R'yi azaltacak ve pratik ve uygulanabilir kısıtlamalar olacağını algılayarak daha düşük toplam havalandırma basıncına sahip olma açısından sonunda masrafları azaltacaktır.





Şekil 4. Yeni bir maden planlanırken dikkate alınan faktörler [5].

### 2.8.2 Şok Kayıplarını Azaltılması

Yeraltındaki tüm yaralanmaların %30'a kadarı şok kayıplarından kaynaklandığından, masrafları azaltmak için şok kayıplarının azaltılması gerekir. denklemden:

$$H_x = X H_v \quad (13)$$

Bu amaca ulaşıldığında, verilen hava hızı için şok kayıp faktörü X'in azaltılacağı açıktır. Bu, köşeleri yuvarlayarak, beklenmedik hava hızı ve hava akımı yönü değişikliklerinden uzak durarak vb. başarılabilir. [5]

## 3. YERALTI MADENCİLİĞİNDE TİPİK MADEN HAVALANDIRMA DEVRELERİ

### 3.1 Gazlı Madenleri Güvenli Hale Getirmek İçin Havalandırma Tasarım Kriterleri

- NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gibi zehirli gazları seyreltir ve uzaklaştırır.
- Tozları ve zararlı gazları giderir.
- Madendeki sıcaklığı düzenler.
- Dizel motorlardan, patlayıcılardan ve cevher kütlelerinden gazları çıkarır.
- Çalışanların düzgün nefes almasını sağlar.
- Hava veya mevsim ne olursa olsun yeterli havalandırma akışı olmasını sağlar.
- Özellikle patlama dumanlarını verimli bir şekilde temizlemeye yardımcı olur.

### 3.2 Yüz Havalandırması

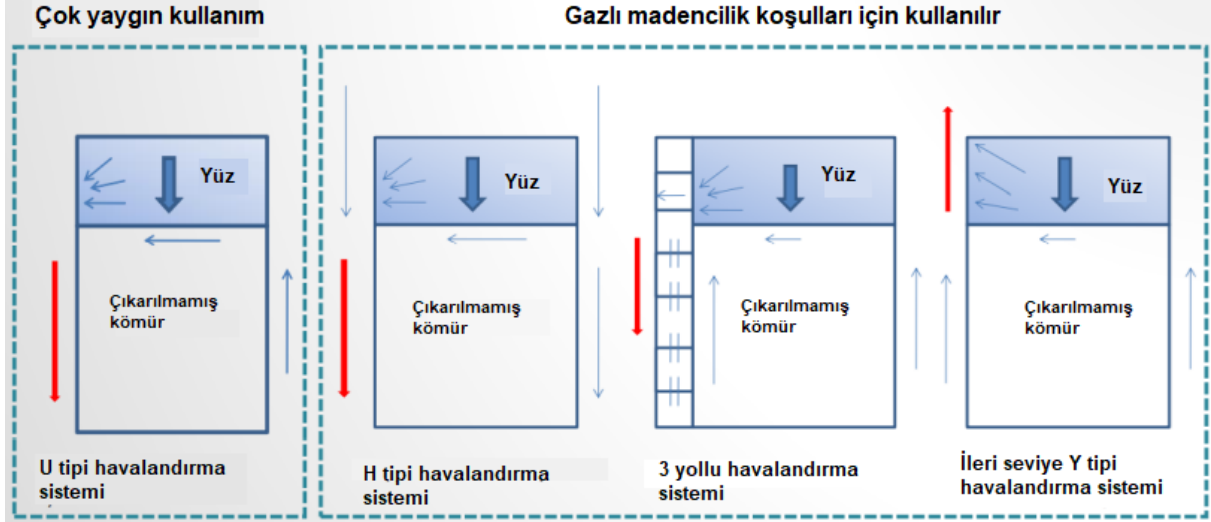
Yüzeyde yüksek seviyeli hız:

- Gaz için tatmin edici
- Toz için yetersiz



Yüzeyde düşük seviyeli hız:

- Gaz için yetersiz
- Toz [8] için tatmin edici

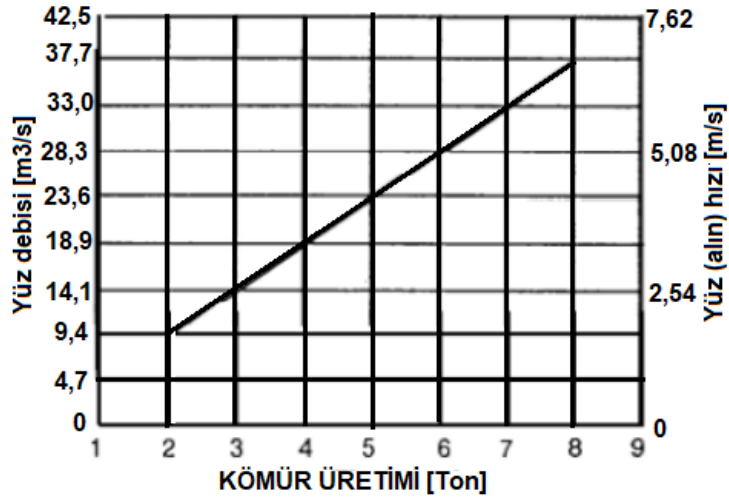


Şekil 5. Farklı tipte havalandırma sistemleri [9].

### 3.3 Toz Taşınmasını En Aza İndirmek İçin Hava Akışı Kontrolü

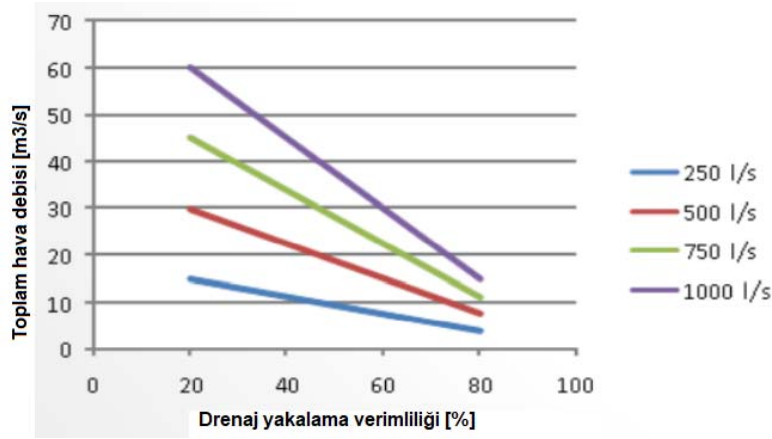
#### 3.3.1 Havadaki Toz Konsantrasyonu ile İlgili Düzenlemeler

- $1 \text{ mg/m}^3$  idi.
- 2016'da  $0,5 \text{ mg/m}^3$  oldu [4].

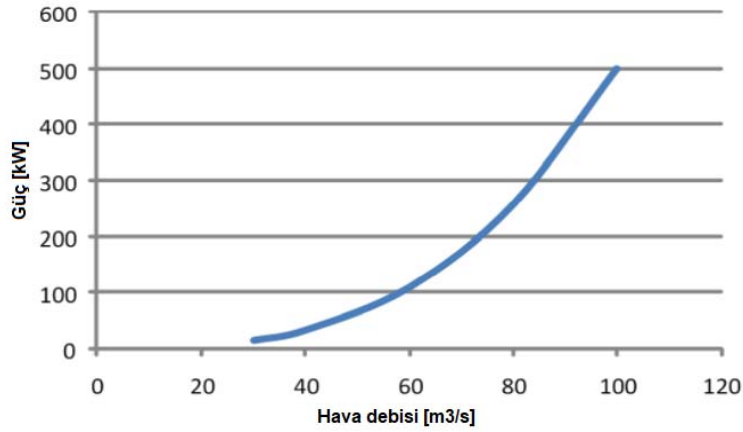


Şekil 6. Yüzde üretim kütlesi başına gerekli hava akışları [9].

Hava akışının hesaplanması aşağıdaki grafikten yapılabilir.



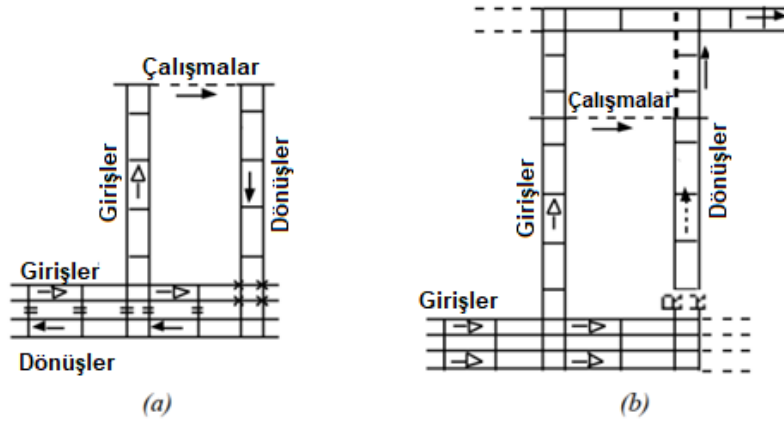
Şekil 7. Uzun ayak metan emisyonlarını %2'ye seyreltmek için gereken hava akışları [4].



Şekil 8. Havalandırma havası için güç gereksinimleri örneği [4].

Hava her zaman en az dirençli yoldan geçer; ancak, kullanım için gerekli olan yerde olmayabilir. Havanın gerektiği yerde iletilmesi için havalandırma cihazları gereklidir; tüm yapı için hava akışını sağlamak ve yönetmek için gerekli araçlar fanlardır. Ayrıca yeraltında başarılı hava dağılımı için başka birkaç kontrol planı da gereklidir.

Herhangi bir havalandırma sisteminin amacı iki yönlüdür. Bir yandan, birincil havalandırma, havayı merkezi hava yolları aracılığıyla çalışma yüzeylerinden çalışma alanına yönlendirmeli, böylece yüzün havalandırılması için taze hava sağlamalı ve ardından kirli havayı dönüş havası yolları aracılığıyla çalışma alanına geri göndermelidir. Atmosfer. Öte yandan, çalışma yüzeyini temizlemek, tozu yakalamak ve ortadan kaldırmak ve varsa gazı azaltmak ve uzaklaştırmak için acil çalışma bölgesinde mevcut olan havayı verimli bir şekilde kullanmak için alın havalandırma sisteminin taslağı çizilmelidir. Madenin türüne ve yerel jeolojik yapıya bağlı olarak, havalandırma düzenleri iki geniş gruba ayrılabilir; 1. bir U-tüp düzenlemesi veya 2. içinden akışlı bir sistem. Şekil 9 a, havanın çalışma alanından geçtiği ve ardından bitişik hava yollarından geri geldiği birincil U-tüp düzenlemesini göstermektedir. Genellikle, uzun sütunlar ve duraklar, onları girişlerden ayırmak için aralarına girer. Durakların erişim kapıları, tüketim ve dönüş hava yolları arasındaki trafiği kolaylaştırır. Bu eğilimin varyasyonu, uzun ayak ve oda ve sütun tipi madencilik yöntemleri olacaktır. Diğer düzenleme, Şekil 9 b'de görülmektedir; burada, girişler ve dönüşler, çoğu kez, tamamı giriş veya dönüş olan bitişik hava yollarından coğrafi olarak ayrılmıştır. Genellikle daha az yükselticiye yol açan coğrafi ayırım nedeniyle daha az hava yolu ve durma gerekli olsa da operasyonel bölgelerde hava akımı yönetimi için mevcut hava düzenlemeleri ve hava kaçağı gerekli olabilir [5].



Şekil 9. Temel havalandırma sistemleri (a) U-tüpü ve (b) içten akışlı [5]

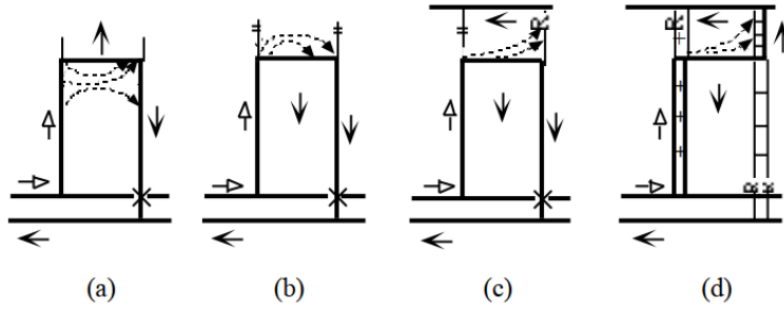
Yeraltındaki gerçek düzenler, herhangi bir sistemin varyantları veya iki sistemin bir karışımı olabilir.

### 3.4 Tabakalı Yataklar

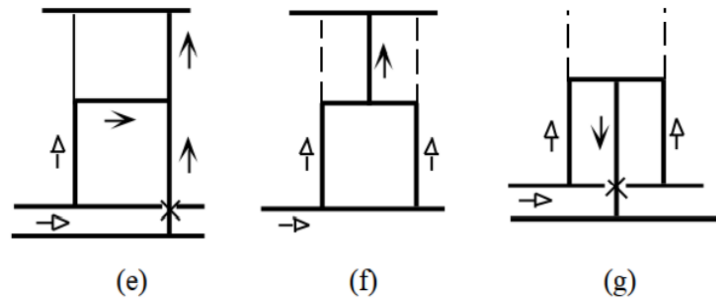
Cevher kütlelerinin (kömür, potas, kireçtaşı, tuz, vb.) tabular formlarını çıkaran yeraltı madenlerinin çoğu, genellikle iki teknikten birini kullanır: oda ve sütun veya uzun ayak madenciliği. Orijinal düzenler, yerel jeolojinin koşullarına bağlı olarak madenden madene ve bölgeden bölgeye anlamlı bir şekilde farklılık gösterebilirken, bu tekniklerin orijinal taslağı aynı kalır. Sonraki sektörler, yaygın olarak kullanılan hava akımı dağıtma sistemini betimler.

#### 3.4.1 Uzun Ayak Sistemleri

Şekil 3.6, uzun ayak segmentlerinde kullanılan havalandırmanın sık kullanılan yerleşim planlarından bazılarını göstermektedir [5].



Şekil 10. Uzun ayak havalandırma sistemlerinin düzenlemeleri: (a) tek girişli ilerleme; (b) Tek girişli geri çekilme; (c) geri hava alma ile tek girişli geri çekilme; (d) arka kanamalı çift girişli geri çekilme [5].

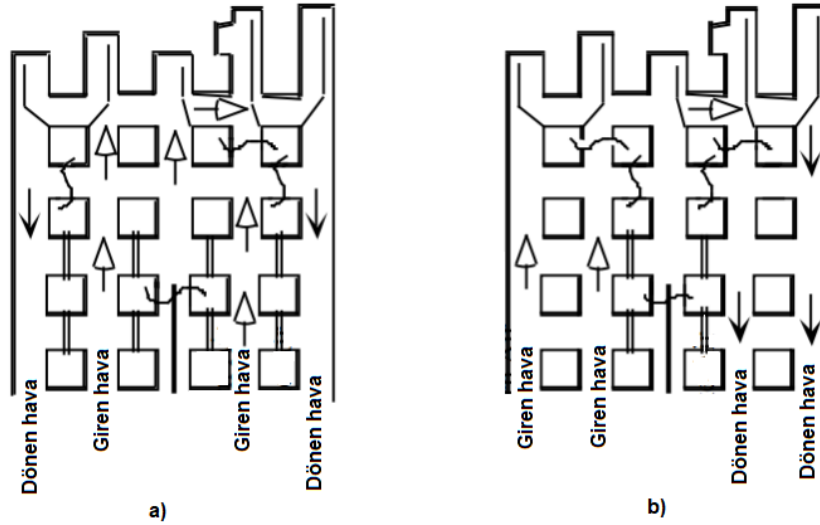


Şekil 11. Uzun ayak havalandırma sistemlerinin gruplandırılması: (e) Y sistemi; (f) çift Z sistemi; (g) W sistemi [5]

### 3.4.2 Oda ve Sütun Sistemleri

Şekil 12, birkaç girişin çalıştırıldığı bir kömür madeninde bir odayı ve sütun ilerletme panelini havalandırmak için iki tekniği göstermektedir. Şekil 12 a, giriş hava yollarının panelin merkezi dilimindeki hava yolları olduğu, dönüş hava yollarının her iki tarafta olduğu, genellikle balık kuyruğu tekniği olarak yönlendirilen yönlü veya W sistemidir. Şekil 12 b'deki teknik, giriş ve dönüşün nötr hava yolunun her iki tarafında konumlandırıldığı tek yönlü sistemdir.

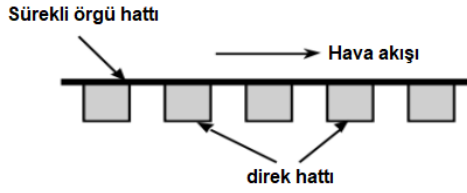
ABD kömür madenlerinde, bu girişlerdeki havanın işletme alanlarının havalandırılması için kullanıldığı düşünülmektedir; dolayısıyla bir regülatör vasıtasıyla dönüş havası yoluna yönlendirilirler. Bariz bir zayıflık, tek yönlü sisteme kıyasla çift durdurmaya ihtiyaç duymamızdır. Ayrıca ekstra durdurmalara kıyasla iki kat hava kaçağı gözlemleyebiliriz.



Şekil 12. Konveyör bandı girişindeki hava akımını kontrol etmek için hat örgüleriyle birlikte oda ve sütun gelişimi: (a) çift yönlü sistem; (b) tek yönlü sistem [5].

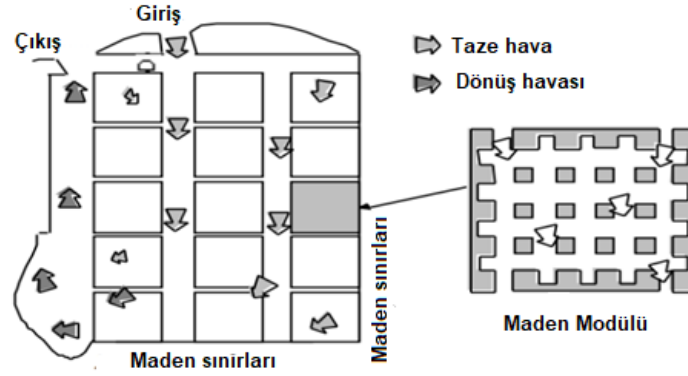
### 3.4.3 Büyük Boyutlu Girişlere Sahip Madenler

Doğal olarak, girişleri çok büyük olan madenler, yer altı operasyonlarını uygun şekilde havalandırmak için geniş havalandırma hava hacmi oranı gerektirir. Bu gerekliliği karşılamaya çalışırken, genellikle iki önemli sorunla karşılaşılır: yerel hava sirkülasyonu ve duraklardan hava kaçağı; bunların her ikisi de uygun olmayan şekilde inşa edilmiş (ve bakımı yapılmış) duraklardan veya çoğu durumda yeterli sayıda durak olmamasından kaynaklanır. ve her ikisi de yeraltı operasyon alanını olumsuz etkileyebilir. Maden yönetimi, teknik sorunlardan veya ilgili maliyetlerden dolayı sık sık durdurucu yapılması konusunda isteksizdir. Taze havanın, havanın gerekli olduğu operasyon alanlarına verimli bir şekilde aktarılmasını sağlamak için her türlü mantıksal önlem dikkate alınmalıdır. Uygun havalandırmanın sürdürülmemesinin sonucu, yalnızca federal ve eyalet yasalarını ihlal etmeyen, aynı zamanda çalışan verimliliğini ve üretkenliğini olumsuz yönde etkileyebilecek düşük işlevsel bir alandır. Taze havayı geniş mekanlarda operasyon alanlarına yönlendirmek için kontrol cihazlarına ihtiyaç vardır. 10,67 m genişliğinde ve 6,1 m yüksekliğindeki bir girişte geleneksel metal çerçeveli durdurucular inşa etmenin doğru ve kesin masrafını, dahil edilen çeşitli parametreler nedeniyle elde etmek zordur. Bu tel örgü perdelerin maliyeti durdurucu başına 1.500 ila 3.000 ABD doları arasında değişmektedir (1997 yılı). Fiyat, işçilerin ve maddelerin masraflarını içerir. Bununla birlikte, bu durdurucular, örgü şeritleri arasında ve çevre birimlerin çevresinde daha önemli sızıntılara maruz kalmaktadır (Şekil 13).



**Şekil 13.** Kesintisiz örgü perde hattı çevre birimlerin etrafındaki sızıntıyı azaltacaktır [5].

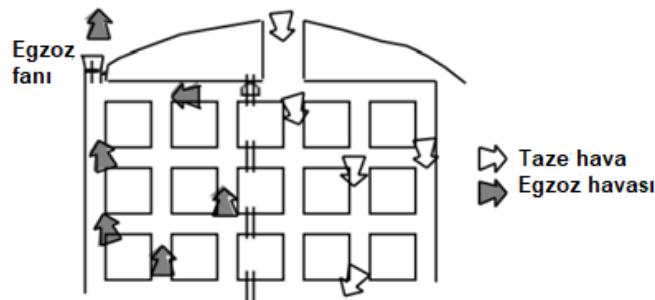
Kaçakların elektrik maliyeti üzerindeki etkisi dikkate değer olarak kabul edilmektedir. Durdurma yoluyla meydana gelen herhangi bir sızıntının, güvenlik ihtiyaçlarını karşılamak için yer altına ek hava "pompanarak" karşılanması gerektiğinden, fanın gücü ve hava debisinin küpü olması nedeniyle fandanaki enerji talebini yoğun bir şekilde artıracaktır. Örneğin, hava akımındaki %26'lık bir artış, hava gücünün maliyetini iki katına çıkarır. Modüler bir düzenleme bir alternatif sunar. Bu düzende, önceden planlanmış bir madencilik bloğunun dört yanında kasıtlı olarak devasa bariyer sütunları bırakır; böylece hava etkili bir şekilde daha geniş alanlara yönlendirilebilir. Bir sonraki çizim (Şekil 14), modüler bir düzenleme [5] ile teorik bir maden operasyonunu göstermektedir.



**Şekil 14.** Havayı çalışma alanlarına yönlendirmek için tamponlar yerine bir modül sisteminin kullanıldığı teorik bir yer altı kireçtaşı madeni [5].

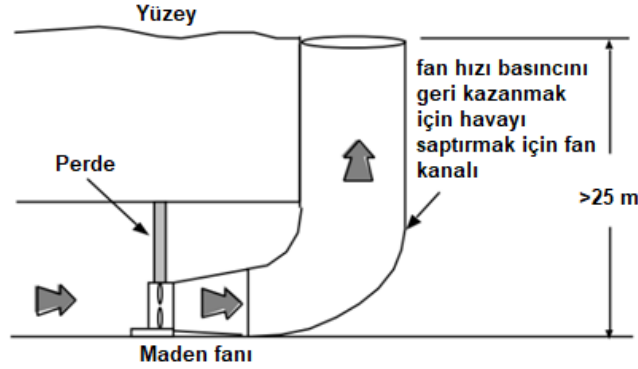
### 3.4.4 Yeraltı Hava Sirkülasyonu

Uygun olmayan bir şekilde inşa edilmiş ve yetersiz bir şekilde korunan durduruculara ek olarak, yeraltında hava sirkülasyonunun bir başka önemli kaynağı da uygun olmayan maden organizasyonudur [11]. Kireçtaşından oluşan yeraltı maden çalışmalarında sıklıkla yaşanan tasarım hatalarından biri, merkezi giriş ve dönüş hava yollarının yan yana yerleştirilmesi ve egzoz havasının giriş hava yollarına geri kaçmasıdır. Bu durum, genellikle cevherin çıktığı kireçtaşı ve kömür madenlerinde kullanılan bir kutu kesimi tünele girmek için kullanıldığında daha da kötüleşir. Hava giriş ortamından dışarı atılamaz. Maden gelişiminin ilk aşamasında, merkezi giriş ve dönüş hava yolları birbirine yakın konumlandırılmamalıdır. Hava baypasını önlemek için madenin çalıştırılmasında portal ortamlarındaki giriş ve dönüşlerin fiziksel olarak ayrılması onaylanmıştır (Şekil 15) [5].



**Şekil 15.** Hava baypasını önlemek için perdeleme sistemi kullanılır [5].

Bu mümkün değilse ve hem giriş hem de dönüşün kutu kesitinin altında birbirine bitişik olarak yerleştirilmesi gerekiyorsa, Şekil 16, egzoz fanının sonu tahliyede dikey bir fan kanalının çalışmasıyla giriş havasını ve dönüş havasını ayıran vekil bir tekniği göstermektedir.



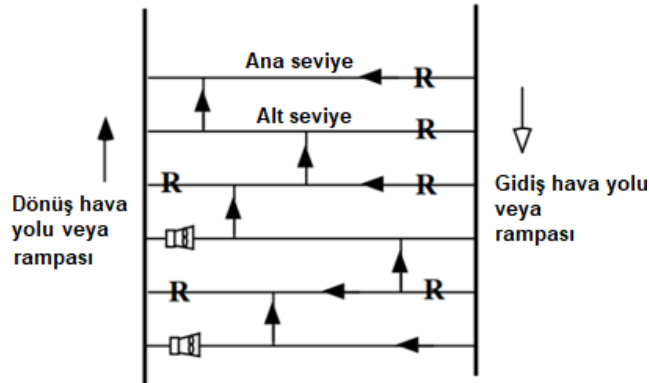
**Şekil 16.** Fan kanalı, egzoz havasını yönlendirmek ve kaybedilen hız basıncını geri kazanmak için kullanılır [5].

Şekil 16, en az 25 m uzunluğunda dikey bir kanal (kaçınma) kullanılarak, egzoz havasının yukarı doğru saptırıldığı önerilen bir düzeni betimler. Kaçınma' aynı zamanda daha karlı bir amaca da hizmet eder: Aksi takdirde kaybedilecek olan fan hızı basıncını artırabilir. Ek darbe kayıplarını önlemek için bağlantı dirseğinin yuvarlak ve pürüzsüz olması gerekir.

### 3.5 Metal Cevheri Yatakları

Metal madenlerindeki tenör eşitsizliği ve dalgalanan metal piyasası, kaçınılmaz izlenimi verecek olandan daha fazla durak veya çalışma alanının geliştirilmesini gerektirirken, bunların belki de yalnızca bir kısmı herhangi bir vardiyada çalışır.

Metal madenleri için havalandırma ağları, tabakalı yataklara göre daha karmaşık olma eğilimindedir ve genellikle üç boyutludur. Şekil 17, gerçek geometrinin büyük ölçüde farklılık göstermesine rağmen birçok metal madenin havalandırma tasarımını açıklamaktadır [5].



**Şekil 17.** Bir metal madeni için havalandırma sistemini gösteren kesit [5].

Bireysel durdurucular için hava akımı yayma sistemleri de cevher kütlesinin boyutuna, geometrisine ve tenör farkına bağlı olarak çok büyük değişkenliğe tabidir. Durdurucular arasında seri havalandırma yapılmalı, böylece patlatma gazları hızlı ve etkili bir şekilde boşaltılabilir (Şekil 18).



Şekil 18. Çekme veya kes-doldur durdurucuları için basit bir havalandırma sistemi örneği [5].

#### 4. MADEN HAVALANDIRMA AĞI ANALİZİ

Yeni madenlerin taslağında gerekli bir bileşen, havalandırma sistemi boyunca yeterli çevresel koşulları sağlama amacına ulaşmak için fanların ve diğer havalandırma kontrol cihazlarının konumunu ve görevlerini düzenleyerek hava akımlarının yayılmasının sayısal tasarımıdır. Mevcut madenlerde, tünelin iyi planlanmış havalandırması ve madene yapılan uzantılar için yeni fanların, şaftların ve diğer hava yollarının hemen erişilebilir olduğundan emin olmak için önceden tasarlamak daha iyidir. Bu nedenle havalandırma tasarımı sürekli ve rutin bir süreç olmalıdır. Akışkanlar mekaniği yasaları, havanın hava yolları, kanallar ve borulardaki davranışını ele alır. Daha önce gösterildiği gibi, madencilikle ilgili olarak bu, Atkinson denkleminin, kare yasanın ve bazı durumlarda termodinamik yasalarının kullanılmasını içerir.

Havalandırma ağı analizi, bu tür soruların ele alınmasını sağlayan bir aile olan birkaç teknik için genel bir terimdir. Pratik belirleyiciler, tatmin edici alternatiflerin sayısını sınırlayacaktır. İşe alınacak herhangi bir yöntemin gerekli bir yönü, kullanımının basit olması ve çoklu çözümlerin araştırılmasına izin verecek kadar hızlı ve esnek olmasıdır [10].

##### 4.1 Havalandırma Ağı Analizinin Temelleri

Bir iletken ağı içindeki elektrik akımının davranışını yöneten temel ilişkiler ilk olarak Gustav R. Kirchhoff (1824–1887) tarafından kabul edildi. Bu aynı temel ilişkiler artık Kirchhoff yasaları olarak biliniyor ve aynı zamanda akışkan ağlara da uygun. Kirchhoff'un birinci yasası (bundan sonra Kirchhoff 1 olarak anılacaktır), bir kavşağa giren kütle akışının, o kavşağı terk eden kütle akışına eşit olduğunu ifade eder (kütlenin korunumu yasasının bir sonucu) ve şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_j M=0 \quad (14)$$

burada M, j bağlantısına giren pozitif ve negatif kütle akışlarıdır. Yine de:

$$M=Q\rho \quad (15)$$

burada Q akışın hacmidir ( $m^3/s$ ) ve  $\rho$  hava yoğunluğudur ( $kg/m^3$ ), dolayısıyla:

$$\sum_j Q\rho=0 \quad (16)$$

Havalandırma ağı etrafındaki yoğunluk değişimi önemsiz ise (yani akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilebilir), o zaman:

$$\sum_j Q=0 \quad (17)$$

Bu, bir havalandırma incelemesi yapılırken bir kavşak çevresinde alınan hava akışı ölçümlerinin kesinliğini kontrol etme olanağı sağlar. Kirchhoff'un ikinci yasası (bundan sonra Kirchhoff 2 olarak anılacaktır), temel biçiminde beyan edilmiştir, ağdaki kapalı bir yol veya ağ etrafındaki tüm basınç düşüşlerinin cebirsel toplamı, fanların ve/veya etkileri hesaba katılarak sıfır olmalıdır. doğal



havalandırma basınçları, enerjinin korunumu yasasının bir sonucudur. Tek bir hava yolu için sürekli akışlı enerji denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta u^2/2 + \Delta Zg + w = \int V dp + F \text{ J/kg} \quad (18)$$

Burada:

$u$  = hava hızı (m/s),

$Z$  = referans noktasının üzerindeki yükseklik (m),

$g$  = yer çekimine bağlı ivme ( $m/s^2$ ),

$W$  = fandan gelen iş girişi (J/kg),

$V$  = özgül hacim ( $m^3/kg$ ),

$P$  = barometrik basınç (Pa),

$F$  = sürtünmeye karşı yapılan iş (J/kg).

Bir ağ içinde bir kapalı döngü veya ağı şekillendiren birkaç dal göz önüne alındığında, tüm  $\Delta Z$ 'lerin cebirsel toplamı sıfır olmalıdır ve kinetik enerjideki tüm değişikliklerin toplamı,  $\Delta u^2/2$ , ihmal edilebilir düzeydedir. Ağ etrafındaki kalan terimleri toplayarak, m şunu verir:

$$\sum m \int V dp + \sum m(F - W) = 0 \quad (19)$$

$V.dP$  terimlerinin toplamı, havaya termal eklemelerden kaynaklanan doğal havalandırma enerjisi NVE'dir, dolayısıyla:

$$\sum(F - W) - NVE = 0 \quad (20)$$

Bu hesaplama kilogram başına joule cinsindedir ve şimdi yoğunluk  $\rho$  ile çarpılarak basınç birimlerine dönüştürülebilir.

$$\sum(F - W) \rho - \rho NVE = 0 \quad (21)$$

Ancak  $\rho_f = \rho$ , sürtünme basıncı düşüşü ve  $\rho_p = \rho f$ , bir fandaki toplam basınçtaki artış ve  $\rho_{NVE} = NVP$ , doğal havalandırma basıncı ise, Kirchhoff'un ikinci yasası şu hale gelir:

$$\sum(P - \rho_f) - NVP = 0 \quad (22)$$

Kirchhoff yasaları, sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz akışa sahip sıvı ağlarına uygulanabilir. Sıkıştırılabilir akış durumunda, analiz kütle akışına göre yapılır; sıkıştırılamaz akış durumunda, gözden geçirme hacim akışı temelinde yürütülür. Bu noktadan itibaren, sıkıştırılamaz akış varsayılacaktır.

Kare yasası, Kirchhoff'un sıkıştırılamaz akış yasalarına dahil edilmesini gerektirir.

Kirchoff 1

$$\sum_j Q = 0 \quad (23)$$

Kirchoff 2

$$\sum m(RQ|Q| - Pf) - NVP = 0 \quad (24)$$

Burada:

$R$  = direnç ( $Ns^2/m^8$ )

$|Q|$  = hava akışının mutlak değeri

Bu, sürtünme basıncı düşüşünün her zaman hava akışıyla aynı işarete sahip olmasını sağlar ve negatif sayıların karesini alma veya karekökünü alma karmaşıklığını ortadan kaldırır.

#### 4.2 Kare Kanundan Sapmalar

Maden havalandırmasının temel ilişkisi kare kanundur  $p = RQ^2$ . Bu, Chezy-Darcy ilişkisinden geliştirilmiştir ve tamamen gelişmiş türbülanslı akış için geçerlidir. Direnç,  $R$ , kendisi Darcy sürtünme faktörü  $f$  ile ilişkili olan sürtünme faktörünün,  $k$  bir fonksiyonudur. Akış rejimi geçiş bölgesine veya laminer akış bölgesine ( $f$ ) düşerse ve dolayısıyla  $k$ , Reynolds sayısının ( $Re$ ) bir fonksiyonu haline gelirse,  $R$ 'nin değeri hava akışına göre değişir. Bu durumlarda kare kanunu uygulanamaz.

Geçiş bölgesi için aşağıdaki ilişki geçerlidir:

$$P = RQ^n \quad (25)$$

n değerlerinin 1,8–2,05 aralığında olduğu bildirilmiştir. Laminer akış durumunda, aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$P = RLQ \quad (26)$$

burada RL, laminer dirençtir.

### 4.3 Havalandırma Ağlarını Çözme Yöntemleri

Temel olarak, havalandırma ağlarını çözmek için iki yöntem vardır:

1. Analitik yöntemler, kesin çözümler sağlayan denklemler üretmek için geçerli yasaları formüle eder.
2. Sayısal yöntemler, gerekli doğruluk derecesinde bir çözüm bulunana kadar yinelenir.

#### 4.3.1 Analitik Yöntemler

Aşağıdaki paragraflarda havalandırma ağlarını çözmek için analitik yöntemler açıklanmaktadır.

#### 4.3.2 Eşdeğer Dirençler

Bu, ağ analizinin en temel tekniğidir [12]. İki veya daha fazla hava yolu seri veya paralel olarak sıralandığında, bu dirençlerin her biri, elektrik devrelerine benzer bir davranışla tek bir eşdeğer dirence dahil edilebilir. Bir maden havalandırma ağı, birleştirilmiş birkaç yol ve tünelden oluşur; dallar arasındaki bu bağlantılar, seri ve paralel olarak bağlanmış tünellere bölünebilir.

• Seri devreler: olağan bileşen, her dalda akan hava miktarının benzer olmasıdır. Seri bağlı n dalın eşdeğer direnci:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (N.S^2/m^8) \quad (27)$$

• Paralel devreler: olağan bileşen, her branşmandaki basınç düşüşünün benzer olmasıdır. n dalın paralel bağlanması durumunda eşdeğer direnç:

$$1/\sqrt{R} = \sum 1/\sqrt{R_{nn1}} \quad (N.S^2/m^8) \quad (28)$$

#### 4.6.3 Sayısal Yöntemler

Çok sayıda sayısal yöntem mevcuttur. Yöntemler arasındaki birincil farklılaşma, ağ seçimi ve denklemlerin sayısal olarak çözülmesi etrafında döner. Her zaman en verimli olmasa da en sağlam plan, 1936'da Illinois Üniversitesi'nde su dağıtım sistemleri için Profesör Hardy Cross tarafından tasarlandı. Bu teknik en yaygın kullanılan tekniktir ve maden havalandırma sistemlerinde kullanılmak üzere 1951'de Nottingham Üniversitesi'nde Profesörler F.B. Hinsley ve D.R. Scott tarafından geliştirilmiştir [4].

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Maden havalandırma sistemleri, yer altı madenlerinin güvenli bir şekilde işletilmesi için önemlidir ve taze hava akışının sağlanması ve kirli havanın uzaklaştırılması sağlanır. Yeraltı maden havalandırma sistemleri ayrıca çalışma yüzeylerinin ısisını ve nemini düşürür. Yeraltı madenlerindeki zayıf maden havalandırması, kömür madenlerinde toza aşırı maruz kalmanın ana nedenlerinden biridir. Solunabilir kömür tozunun solunması, kömür madeni işçilerinde pnömokonyoza neden olur ve sonunda ölüme neden olur. Kömür madeni tozuyla kaynağında mücadele etmek hayat kurtarma meselesidir.

Bu çalışmada kömür madenlerinin havalandırma sistem elemanları tanıtılmış, tasarımda kullanılan kriterler açıklanmıştır. Özellikle havalandırma ağlarının çözümünde kullanılan sayısal analiz yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemlerin uygulamasında ve maden havalandırma sistemlerinin tasarımında VentSIM, VnetPC, VUMA, MINEV, ClimSIM ve DuctSIM gibi yazılımlar kullanılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Maden ve Taş Ocakların İşletmelerinde ve Tünel Yapımında Alınacak İş Sağlığı ve İş Güvenliği Önlemlerine İlişkin Tüzük (Yayın tarihi: 22.10.1984).  
<https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/2.5.848428.pdf> (15.12.2022 tarihinde erişildi)
- [2] Ayvazoğlu ve diğerleri, "Yer Altı Kazılarında Havalandırma Uygulamaları" (PDF).Erişim tarihi: 16 Aralık 2022.
- [3] Tong, R.; Yang, Y.; Ma, X.; Zhang, Y.; Li, S.; Yang, H. Risk Assessment of Miners' Unsafe Behaviors: A Case Study of Gas Explosion Accidents in Coal Mine, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 1765.
- [4] SME Mining Engineering Handbook, Michael A. Tuck, Associate Professor of Mining Engineering, University of Ballarat, Victoria, Australia.
- [5] Mine Ventilation Systems Practical Mine Ventilation Engineering, Chapter 9.
- [6] Kayode M. Ajayi, Khosro Shahbazi, Purushotham Tukkaraja, Kurt Katzenstein, Prediction of airway resistance in panel cave mines using a discrete and continuum model, *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 29, Issue 5, 2019, Pages 781-784, ISSN 2095-2686, <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.02.004>.
- [7] McPherson 1993; with permission from Springer Science and Business Media.
- [8] Patton, S., Best Practices in Effective Ventilation of Underground Coal Mines, U.S. Practices and Regulations, Workshop on Best Practices in Coal Mine Methane Capture and Utilization, Bogotá, Colombia, July 2018.
- [9] Souza, Euler. (2017). Application of ventilation management programs for improved mine safety. *International Journal of Mining Science and Technology*. 10.1016/j.ijmst.2017.05.018
- [10] Burak OLGUN, Serdar GÜLTEK, Hüseyin BULGURCU, Yeraltı Madenlerinde Havalandırma Kriterleri, 12.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı sayfa 359-369, 8-11 Nisan 2015.
- [11] Demirović, Safer & Marković, Jelena. (2020). A Real Application of Air Recirculation in Underground Coal Mine.
- [12] Nyaaba, Wedam & Frimpong, Samuel & Professor, K & Chair,. (2015). Optimization of Mine Ventilation Networks Using the Weighted Augmented Lagrange Method.

## ÖZGEÇMİŞ

### Hüseyin BULGURCU

1962 yılında İzmir Kınık Poyracık'ta doğdu. 1984 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makine Enerji dalından lisans, 1989 yılında M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünden Yüksek Lisans, 1994 yılında aynı Enstitüden Doktora dereceleri aldı. 1995 yılında Y. Doçent, 2013 yılında Doçent oldu. 1986-1989 yılları arasında Kartal Teknik Lisesinde, 1989-1995 yılları arasında Çankırı Meslek Yüksekokulunda öğretim elemanı olarak çalıştı. 1994 yılında YÖK-D.B projesi kapsamında İngiltere'de Manchester College'de mesleki araştırmalarda bulundu. 1995-2012 yılları arasında Balıkesir Meslek Yüksekokulu İklimlendirme ve Soğutma Programında çalıştı. Ağustos 2012 ila Eylül 2016 tarihleri arasında Balıkesir Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nde çalıştı. Mart 2017'de emekli oldu. Sektör firmalarında danışmanlık yapmaktadır.