



Bu proje Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti tarafından finanse edilmektedir.

MISGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIğI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA TEKNİK REHBERLER

YERALTI KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE METAN DRENAJİ

2023



MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIĞI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA
TEKNİK REHBERLER DİZİSİ

CİLT 3:
YERALTI
KÖMÜR
MADENCİLİĞİNDE
METAN
DRENAJİ

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 Kömür Madenciliğinde Metan Drenajı” konu başlığı özelinde hazırlanmıştır. Bu teknik rehber, aşağıda listelendiği gibi MiSGEP Teknik Yardım Bileşeni kapsamında hazırlanan beş ciltlik teknik rehber serisinden üçüncüsüdür.

- 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 yeraltı kömür madenlerinde güvenli ve etkili metan tespiti ve kontrol önlemlerinin tasarlanması ve uygulanması konusunda maden sahiplerine ve işletmecilerine, devletlerin düzenleyici kurumlarına ve yasama organları ile politika yapıcılara bilgi ve rehberlik sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. Kılavuz öncelikle metan kaynaklı ölümleri, yaralanmaları ve hatta mal kayıplarını azaltmak için iyi madencilik uygulamalarını teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Bu ciltte yer alan yönergeler, madencilik endüstrisinde toplanan bilimsel bilgilere ve uygulama ilkelerine dayanmaktadır. Teknik rehber, maden mühendisliği bölümlerinde öğretilen ders kitapları gibi madencilik literatüründeki çeşitli güncel belgelere dayanarak derlenmiş ve oluşturulmuştur. Ancak, bu teknik rehberde kapsamlı

ve kuralcı bir yaklaşım veya belirli bir jeolojik ortam veya belirli bir kömür madeni için özel tavsiyeler verilmemekte olup, bu nedenle madencilik uygulamaları yeterince ele alınmamış olabilir. Bu rehber, gaz içeren her madenin kendine özgü özelliklere sahip olduğunu ve bu sebepten dolayı, genel evrensel bir çözümün olmadığını kabul etmektedir. Dolayısıyla, detaylı bilgiler ile beraber uluslararası maden endüstrisine ait iyi uygulama örneklerini içeren bu rehber, bir madene ait metan kontrolü ve korunma çözümleri geliştirilirken kullanılabilir. Günümüz teknolojilerinin sunduğu imkânların kömür madenciliği ve metan drenajı uygulamalarındaki kullanımı önem arz etmektedir. Madenlerdeki metan drenajı sistemleri için iyi uygulamalar arasında uygun bir gaz tespit yönteminin seçilmesinin yanı sıra maden drenaj sisteminin uygun şekilde uygulamaya koyulması ve çalıştırılması bulunmaktadır. Bu rehber, yalnızca metan drenajına yönelik bir fikir veya yaklaşım önermekte olup, sürekli olarak gelişen en son teknolojiyi yansıtmayabilir. Bununla birlikte, teknik rehberin sonundaki referanslar ve ek kaynaklar, metan drenajındaki son gelişmelerin takip edilmesine yardımcı olabilir.

Havalandırma ve drenaj ile ilgili iyi uygulamalar, madencilik teknolojisi ilerledikçe gelişmektedir. Bunlar, kömür madenciliği tarihindeki kritik anlarda uygulanan, dikkatle düşünülmüş ve sürekli olarak iyileştirilen kanunların yanı sıra, insanların icat ve yeniliklerinin yaratıcılığının ve madencilerin nesilden nesile aktarılan uygulama deneyimlerinin sonucudur. Kişiler arası, şirketler arası veya ülkeler arası bilgi ve iyi uygulama paylaşımı, yeraltı madenciliğinde halihazırda birçok hayat kurtarmış olup gelecek de kurtaracaktır.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER DİZİNİ	6
ÇİZELGELER DİZİNİ	7
KISALTMALAR	8
TERİMLER DİZİNİ	9
1. GİRİŞ	15
2. KÖMÜR KÖKENLİ GAZA GENEL BAKIŞ	17
2.1. Kömür Kökenli Gazın Varlığı	17
2.2. Kömürün Gözenekliliği ve Gaz Adsorpsiyonu	19
2.3. Kömür Özelliklerinin Sorpsiyon Kapasitesine Etkisi	21
2.4. Gaz Rezervuar Basıncı	22
2.5. Yerinde Metan İçeriğinin Değişkenliği ve Ölçümü	22
3. METAN GAZININ RİSKLERİNİ ORTADAN KALDIRMAYA YÖNELİK TEKNİKLER	31
3.1. Kömür Kökenli Gaz Emisyonunu Belirleyen Koşullar	31
3.1.1. Kömürde Metan Taşınımı Olgusu	31
3.1.2. Madencilik Faaliyetlerinin Metan Emisyonuna Etkisi	34
3.1.3. Çalışma Ortamına Salınan Metan Emisyonunun Tahmini	37
3.2. Patlayıcı Gaz Konsantrasyonlarının Kontrolü	41
3.2.1. Gaz ve Kömür Tozu Patlaması Tehlikesi	41
3.2.2. Mevcut Maksimum Konsantrasyonlar	42
3.2.3. Kişisel Ölçüm Stratejisi	42
3.3. Metan Patlaması Riskine Karşı Havalandırma Önlemleri	43
3.4. Ocak Gazlarının Gerçek Zamanlı Olarak İzlenmesi	47
3.5. Uzunayak Pano Alanında Ek Havalandırma Sistemlerinin Kullanılması	52
3.5.1. U Tipi Havalandırma Sistemine Sahip Ayaklarda Metan Kontrolü Yöntemleri	52
3.5.2. Dönümlü Uzunayak Arınlarında Metan Kontrolü Örnekleri	55
4. METAN GAZI DRENAJ YÖNTEMLERİ	61
4.1. Tarihçe ve Arka Plan	61
4.2. Metan Drenaj Yöntemlerinin Sınıflandırılması	62
4.3. Madencilik Faaliyetleri Öncesi Metan Drenajı Yöntemleri	62
4.3.1. Madencilik Faaliyetleri Öncesi Çözümler	64
4.3.2. Madencilik Faaliyetleri Öncesi Metan Drenajı İçin Koşullar	67
4.3.3. Düşük Geçirgenliğe Sahip Kömür Damarlarında Gelişmiş Ön Drenaj Yöntemleri	67
4.4. Madencilik Sonrası Metan Drenajı Yöntemleri	68
4.4.1. Kömür Çıkarma Sırasında Drenaj	69
4.4.2. Kazılmış Olan Alanlardan Drenaj	75
4.4.3. Madencilik Faaliyetleri Sonrası Metan Drenajı İçin Koşullar	76

4.5.	Terk Edilmiş Bölgelerdeki Metan Gazı	76
4.6.	Drenaj Yöntemlerinin Seçiminde Kritik Faktörler	77
4.6.1.	Derin Çok Damarlı Madenlerde Yüksek Gaz Emisyonunun Olduğu Geri Dönümlü Aynalara Sahip Uzunayaklar	77
4.6.2.	Çeşitli Uzunayak Havalandırma Sistemlerinde Eğimli Sondaj Delikleri İçin Tasarım Kuralları	78
4.7.	Metan Drenaj Sistemlerinde İzleme	84
5.	METAN DRENAJININ UYGULANMASI	87
5.1.	Düşük Geçirgenliğe Sahip Kömür Damarlarının Olduğu ve Çoklu Damar Madenciliği Yapılan Derin Madenlerde Drenaj	87
5.1.1.	Metan Drenaj Yöntemlerinin Seçilmesi	87
5.1.2.	Kömür Kökenli Gazın Tespitinin Hesaplanması	88
5.2.	Metan Drenaj Tasarımı ve Bileşenleri	88
5.2.1.	Genel Yönergeler	88
5.2.2.	Sondaj Delikleri	89
5.2.3.	Dikey Boru	89
5.2.4.	Sondaj Deliklerinin Yerleşim Düzenlerinin (Plan) Belirlenmesi	91
5.3.	Sondaj Deliği Açma Teknolojisine Genel Bakış	92
5.3.1.	Sondaj Teknolojisi	92
5.3.2.	Boru Tesisatına Bağlantı Delikleri	93
5.4.	Gaz Boru Şebekesi ve İlgili Altyapı	95
5.4.1.	Yeraltı Kömür Madeninde Boru Şebekesi	95
5.4.2.	Boru Hatları	95
5.5.	Hava Atıcının Gaz İstasyonu	97
5.5.1.	Yerüstü İstasyonu	97
5.5.2.	Yeraltı İstasyonları	99
5.6.	İzleme ve Gaz Kontrolü	100
5.7.	Drenajla Boşaltılan Gazın Yönetimi	100
5.7.1.	Verimlilik Değerlendirmesi	100
5.7.2.	Çevresel Hususlar	101
5.7.3.	Metanın Kullanımı	102
6.	METAN DRENAJINDA RİSK DEĞERLENDİRMESİ	105
7.	TEKNİK REHBER ÖZETİ	107
	KAYNAKLAR	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	: Gelişim aşamalarıyla kömürleşme süreci. (https://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/coal.html)	3
Şekil 2.2	: Bir kömür matrisinde metan adsorpsiyonunun şematik diyagramı[16], (a) Kömür matrisi gaz adsorpsiyonunun şematik diyagramı (b) Kömür adsorpsiyon gazının sızıntı süreci.	7
Şekil 2.3	: Gaz-katı tip sorpsiyonda tip I adsorpsiyon eğrisi[17, 18].	7
Şekil 2.4	: Yüksek uçuculuğa sahip bitümlü kömürlerin metan içeriğinde basınçla gerçekleşen değişimler (23 nolu kaynaktan alınmıştır).	8
Şekil 2.5	: Farklı kömür sınıfları için derinlikle birlikte adsorbe edilen kömür kökenli gazdaki değişiklikler (27 ve 28 nolu kaynaklardan alınmıştır).	9
Şekil 2.6	: Kömürleşme sırasında kömürden üretilen gaz (4, 29 ve 30 nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).	10
Şekil 2.7	: Örnek bir manometrik sıvı desorbometre şeması.	15
Şekil 2.8	: Yaklaşık metan içeriğinin desorpsiyon yoğunluk indeksine bağlılığı[84].	15
Şekil 2.9	: Kömür numunelerinin toplanması için çelik bilyeli hava geçirmez çelik silindirik kap[85].	16
Şekil 2.10	: Kömür numuneleri toplamak için kullanılan diğer çelik kapların görünümü.	16
Şekil 2.11	: Galerinin ilerleyen tarafında numune toplamak için sondaj deliklerinin yer tespitine ilişkin örnek[85].	1
Şekil 2.12	: Kömür numunelerini kırmak için kullanılan örnek ekipmanın görünümü.	2
Şekil 2.13	: AGH UST laboratuvarında kömür numunelerinin gazının giderilmesi için kullanılan örnek ekipmanın görünümü.	3
Şekil 2.14	: Sırasıyla 0,5 MPa, 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınçlarda metan ile doymuş üç numuneye ilişkin desorpsiyon sonuçlarına uygun eğri örnekleri.	3
Şekil 2.15	: AGH UST laboratuvarında kömür üzerindeki gazların sorpsiyonu ve desorpsiyonu için kullanılan XEMIS cihazı.	4
Şekil 2.16	: Yüzey test sondajı deliklerinden elde edilen ölçüm verilerine göre kömür damarındaki metan içeriğinin kontur haritası.	5
Şekil 2.17	: Planlanan uzunayak panoları ile 418 numaralı kömür damarındaki metan içeriğinin kontur haritası.	6
Şekil 3.1	: Bir kömür matrisinde klit sistemi.	8
Şekil 3.2	: Numunelere göre gerilmelere bağlı kömür geçirimsizliği[23, 92].	10
Şekil 3.3	: İlerleyen bir uzunayağın boyuna kesiti: Uzunayak kazıları etrafındaki tabaka gerilmesi ve geçirgenlik davranışı (Whittaker (1974) ve McPherson (1975)'ten alınıp değiştirilmiş ve derlenmiştir)[109, 105].	12
Şekil 3.4	: 1970'lerde Almanya'da kabul edilen uzunayak etrafındaki gaz emisyon bölgesinin şekilleri. ([111] ve [112] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).	13
Şekil 3.5	: Forster'in modeline göre değiştirilmiş, bir gazdan arındırma bölgesi olan uzunayak göçük bölgesinin üzerindeki tabaka deformasyonu ([113, 114, 115] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).	13
Şekil 3.6	: Uzunayak madenciliği operasyonları sırasında jeolojik CO ₂ depolama ile zemin göçmesinin azaltılması[122].	14
Şekil 3.7	: Örtü katmanı ve alt katmanda farklı gerilme rahatlama bölgelerinin şematik diyagramı ([124] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).	15
Şekil 3.8	: Kömür kökenli gaz birikimi olan halkasal kırılma alanı ([125] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).	16
Şekil 3.9	: Çalışan bir uzunayağın etrafındaki gerilme rahatlama bölgeleri ([97] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).	17
Şekil 3.10	: Metan emisyonu-uzunayak aktivitesi akış şeması.	19
Şekil 3.11	: İşlenmemiş kömür sahalarındaki uzunayak panoları için gaz emisyon bölgelerinin derecesi.	20
Şekil 3.12	: Kömür metan içeriğinin (Vi) bir fonksiyonu olarak açıkta kalan kömür yüzeyinden birim emisyon (qs)[92].	21
Şekil 3.13	: Uzunayak panosu için örnek metan salım tahmini.	22
Şekil 3.14	: Pano tasarımı ve havalandırma planlarının çeşitleri ([14,189] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).	28

Şekil 3.15 :	Dönümlü tipik tek yollu tasarım panoları için havalandırma sistemleri. a) geleneksel bir U tipi sistem, b) a: Y tipi havalandırma sistemi-dönüş tarafı, c) Y tipi havalandırma sistemi-nefeslik sistemi, d) Geri dönüş sistemli U tipi havalandırma sistemi.	29
Şekil 3.16 :	Yüzeye aktarma yapan sensör dizisini (Sıcaklık, CO, CO ² , O ² , CH ⁴) gösteren yeraltı çevre izleme istasyonu.	33
Şekil 3.17 :	Tipik havalandırma sistemleri olan uzunayak alanında metan monitörlerinin yer tespiti, a) U tipi, b) Y tipi, c) Hava tahliye sistemi.	35
Şekil 3.18 :	406/1 numaralı damarda uzunayak F-1 girişlerindeki metan sensörlerinin konumu ^[193] .	35
Şekil 3.19 :	412 numaralı damarda uzunayak G-4'teki metan dedektörlerinin konumu ^[193] .	36
Şekil 3.20 :	Açılan galerilerde yardımcı havalandırma sistemiyle metan monitörü yer tespiti. a) üfleyici sistem, b) emici sistem, c) emici ve bindirmeli havalandırma sistemi olan birincil üfleyici sistem	37
Şekil 3.21 :	Açılan Üst Taban Yolu 22 örneğinde metan dedektörlerinin konumu ^[194] .	38
Şekil 3.22 :	Açılan Bant Yolu 5 örneğinde metan dedektörlerinin konumu ^[194] .	38
Şekil 3.23 :	Uzunayağın üst taban yolu köşesinde ek havalandırma sistemlerinin konumu. a) "kanat perdeler" ve hava taşıyıcıların kullanılması, b) temiz hava kanalları ve hava taşıyıcıların kullanılması, c) bölmeler ve hava taşıyıcıların kullanılması, d) bölmeler, ekstra kanallar ve hava taşıyıcıların kullanılması.	42
Şekil 3.24 :	Paralel dönüş galerisi (geri dönüş sistemi) olan 'U' tipi havalandırma sistemi için üst taban yolunda metan kontrolü için ek havalandırma sistemlerinin yerleşimi. a) havalandırma sisteminin yerleşimi, b) ek havalandırma sistemlerinin kullanılması	43
Şekil 3.25 :	'U' tipi havalandırma sistemi için alt taban yolunda metan kontrolü için ek havalandırma sistemlerinin yerleşimi ^[177] .	43
Şekil 3.26 :	409/3 numaralı damarda uzunayak D-2 örneğinde metan dedektörlerinin konumu ^[190] .	44
Şekil 3.27 :	409/3 numaralı damarda uzunayak D-2 örneğinde üst taban yolundaki metan sensörlerinin ve yardımcı havalandırma ekipmanlarının konumu ^[190] .	45
Şekil 3.28 :	406/1 numaralı damarda uzunayak F-1 örneğinde taban yollarındaki metan dedektörlerinin konumu ^[190] .	46
Şekil 3.29 :	406/1 numaralı damarda uzunayak F-1 örneğinde üst taban yolundaki otomatik metan sensörlerinin ve yardımcı havalandırma ekipmanlarının konumu ^[190] .	47
Şekil 3.30 :	Yardımcı fanlar ve kanal ile otomatik gaz sensörleri ve anemometrik sensörlerin konumunu gösteren 348 numaralı damardaki uzunayak B-11'in havalandırma şeması ^[190] .	48
Şekil 3.31 :	Yardımcı fanlar ve kanal ile 348 numaralı damarda B-11 havalandırma yolu ile uzunayak B-11'in kesişiminde gaz sensörlerinin ve anemometrik sensörlerin konumu ^[190] .	48
Şekil 3.32 :	Gaz monitörlerinin ve anemometrik sensörlerin konumunu gösteren 409/6 numaralı damardaki uzunayak G-6'nın havalandırma şeması ^[193] .	49
Şekil 4.1 :	Metan drenaj yöntemlerinin sınıflandırılması.	51
Şekil 4.2 :	CBM, CMM ve AMM arasındaki farkların şematik diyagramı.	52
Şekil 4.3 :	Aktif bir madende kullanılan metan drenaj yöntemleri ([¹⁹⁷] nolu kaynaktan alınmıştır).	53
Şekil 4.4 :	Ön drenaj yöntemleri ^[198] .	54
Şekil 4.5 :	Sondaj kazılarında ileri metan drenajı örnekleri şunlardır ^[198, 199] : a) Boşluklardan çift yönlü eğimli sondajlar, b) ayak ilerlemesi yönünde boşluklardan eğimli sondajlar, c) ayak hattına paralel boşluklardan açılan yatay damar içi sondaj delikleri, d) boşluklardan açılan ve ayak hattından sapan yatay damar içi sondaj delikleri.	55
Şekil 4.6 :	Ayağa başlamadan önce uzunayak panosunda sondaj delikleri açmanın farklı yolları arasında şunlar yer alır: a) taban yollarından yatay damar içi sondaj delikleri, b) üst taban yolundan tavan ve zemin damarlarına beş grup eğimli sondaj deliği, c) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve üst taban yolundan beş grup enine sondaj deliği, d) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve üst taban yolundan eğimli tek sondaj delikleri, e) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve alt taban yolundan eğimli tek sondaj delikleri ve f) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve alt taban yolundan beş grup eğimli sondaj deliği.	56
Şekil 4.7 :	Bitişik uzunayaktaki çalışmalar sırasında uzunayak panosunda sondaj delikleri açmanın farklı yolları şunlardır: a) Yatay damar içi sondaj delikleri, b) fanlı eğimli sondaj delikleri grubu, c) damar içi ve eğimli sondaj delikleri, d) damar içi tekli sondaj delikleri ve fanlı eğimli sondaj delikleri grubu	57
Şekil 4.8 :	Balgownie kömür damarı eğimli delme örüntüsü ^[200] .	58
Şekil 4.9 :	Taban yollarından açılan metan drenaj kuyuları ^[197] .	61

Şekil 4.10 :	Polonya'da kömür madenlerinde dönümlü uzunayaklar için en popüler havalandırma ve metan drenajı sistemleri[190], a) U tipi havalandırma sistemli uzunayak panosu, b) Y havalandırma sistemli uzunayak panosu, d) geri dönüşlü uzunayak panosu (kesilmiş paralel üst taban yolu).	62
Şekil 4.11 :	Uzunayak etrafındaki gaz giderme bölgesi.	63
Şekil 4.12 :	İki kömür sütunlu bir uzunayak için üstte uzanan kömür damarına tekli eğimli sondaj delikleri ^[92] .	63
Şekil 4.13 :	Üstte uzanan metan galerisinin şematik diyagramı.	64
Şekil 4.14 :	Eğimli ve uzun sondaj delikleri arasındaki iş birliğinin şematik diyagramı.	65
Şekil 4.15 :	Dikey kuyu yüzeyinden ayak arkası gazı drenajı ^[113] .	66
Şekil 4.16 :	Dikey kuyularla ayak arkası drenajlı uzunayak yerleşim düzeni örneği ^[183] .	67
Şekil 4.17 :	Geri dönüşlü uzunayak aynasının arkasındaki ayak arkası drenajının şematik görünümü ^[24] .	67
Şekil 4.18 :	Ayak arkası deliğinin şematik enine kesiti ([197, 232, 222] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).	68
Şekil 4.19 :	Uzunayak panosunun üst taban yolunda açılan yönlü sondaj deliği ile üstte uzanan kömür damarının metan drenajı ^[92] .	69
Şekil 4.20 :	Uzunayak panosunun bir enine kesitinden açılan yönlü sondaj deliği ile üstte uzanan kömür damarının metan drenajı ^[92] .	69
Şekil 4.21 :	Altta uzanan bir kömür damarına açılan metan drenajı amaçlı sondaj deliğinin kesit görünümü, ([233, 96] ⁷ dan sonra-Hungerford ve diğ. [234] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).	70
Şekil 4.22 :	Gaz taşıyan bir kayaç tabakasında yönlü sondaj deliği ile ayak arkasının metan drenajının şematik görünümü ^[113] .	70
Şekil 4.23 :	Bariyerli alanlardan metan drenajı ([199] nolu kaynaktan sonra).	71
Şekil 4.24 :	Çeşitli son drenaj sondaj deliği açma yöntemleri ^[59] .	72
Şekil 4.25 :	Havalandırma basıncındaki farkın bir sonucu olarak basınç rahatlama bölgesinde beklenen metan geçişinin kapsamı.	76
Şekil 4.26 :	Uzunayak kazısı sırasında metan giderme bölgesinin belirlenmesi ^[219, 190] .	78
Şekil 4.27 :	Y tipi havalandırma sistemli uzunayak panosu alanındaki metan drenajı amaçlı sondaj deliklerine örnekler.	80
Şekil 4.28 :	U tipi havalandırma sistemli uzunayak panosu alanındaki metan drenajı amaçlı sondaj deliklerine örnekler.	80
Şekil 4.29 :	Geri dönüşlü uzunayak alanındaki metan drenajı amaçlı sondaj deliklerine örnekler.	81
Şekil 4.30 :	Drenaj galerili bir uzunayak panosunun yerleşimi ^[120] .	82
Şekil 4.31 :	Atık alanı sızdırmazlık elemanı arkasından metan alımı.	84
Şekil 4.32 :	Kapalı atık alanının (eski ayak arkası) dışından metan alımı örneği ([23] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).	85
Şekil 4.33 :	Metan drenajı parametrelerinin CPO-1 denetleyicisinin blok şeması ^[251] .	87
Şekil 5.1 :	Dikey boruyu çimentolama borusuyla çimentolamak için örnek bir yöntem ^[92] .	92
Şekil 5.2 :	Dikey boruyu kapattıktan sonra bir deliğin sondaj planı.	93
Şekil 5.3 :	Madencilik planlarında kazıdan açılan sondaj deliklerinin ve kazı girintilerinin işaretlenmesi için örnek yöntem.	94
Şekil 5.4 :	Hazırlık galerisinde ön drenaj örneğinde sondaj deliklerinin parametrelerini belirleme yöntemi.	94
Şekil 5.5 :	Sondaj başlığı takılı dikey boru ([23 ve 92] nolu kaynaklardan sonra).	95
Şekil 5.6 :	Sondaj kulesi konumunun basitleştirilmiş şeması ([92] nolu kaynaktan sonra).	96
Şekil 5.7 :	Bir su kapanı aracılığıyla bir gaz borusuna sondaj deliği bağlantısı örneği.	98
Şekil 5.8 :	Su kapanı aracılığıyla gaz borusuna bir grup sondaj deliği bağlantısı yapılması örneği.	98
Şekil 5.9 :	Bir grup sondaj deliğinin su tankı aracılığıyla gaz borusuna bağlanması.	99
Şekil 5.10 :	Gaz borusuna ölçüm parçası ve su ayırıcı bağlantılarının şeması.	101
Şekil 5.11 :	Gaz borusundaki su ayırıcının görünümü.	101
Şekil 5.12 :	Eğimli maden kazısında plastik borunun askısı için kontra zincir kullanılması.	102
Şekil 5.13 :	Yüzeydeki gaz istasyonunun alttan görünümü.	103
Şekil 5.14 :	Yerel metan drenaj istasyonunun yerleşim düzeni.	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1	: Gazdan arındırma bölgesi açılarının değerleri.	79
Çizelge 4.2	: Uzunayak panolarındaki metan drenajının etkinliği ile havalandırma ve drenaj sistemlerinin türü arasındaki ilişkiler.	84
Çizelge 5.1	: Maden metanı uygulamaları ve özellikleri[263, 262].	109

TERİMLER DİZİNİ

Sözlükte Britannica, Oxford Languages, The Free Dictionary, Merriam-Webster Sözlük, Collins İngilizce Sözlük, SLB Enerji Sözlüğü gibi kaynakça ve sözlük kaynaklarından alınan terimler, tanımlar ve eş anlamlı terimler yer almaktadır. Diğer tanımlar ve terimler de ortak kullanımda olabilir.

Adsorpsiyon	: Tüm katı maddelerin temas halinde oldukları gaz moleküllerini veya çözeltileri yüzeylerine çekme yeteneği. Gazları veya çözünmüş maddeleri adsorbe etmek için kullanılan katılara adsorbanlar denir; adsorbe edilen moleküller genellikle toplu olarak adsorbat olarak adlandırılır.
Absorpsiyon	: Atomların, moleküllerin veya iyonların sıvı veya katı haldeki bir malzemeye girdiği fiziksel veya kimyasal bir fenomen veya süreç. Bu, adsorpsiyondan farklı bir süreçtir çünkü absorpsiyona uğrayan moleküller yüzey tarafından (adsorpsiyon durumunda olduğu gibi) değil hacim tarafından soğurulur.
Karbonlaşma	: Organik bitki maddesinin havayla temasının olmadığı bir yerde zamanla kömüre dönüşmesi.
Bitkisel madde	: Esas olarak karbon, hidrojen, oksijen, azot, kükürt ve bazı inorganik mineral elementlerden oluşur. Bu materyal oksijen olmadan su altında bozduğunda karbon içeriği artar.
Diyajenez	: Bir çökeltide meydana gelen değişikliklerin, tortunun çökmesinden sonra, ancak nihai olarak kayaca dönüşmesinden önce meydana geldiği, başta kimyasal süreçler olmak üzere tüm süreçlerin toplamı.
Deformasyonlu başkalaşım	: Başkalaşım sırasında kayaçların deformasyonu. Kayaç anizotropik strese, yani farklı yönlerde etki eden eşit olmayan basınçlara maruz kaldığında meydana gelir.
Buharsızlaştırma	: Bir katıdan uçucu maddelerin uzaklaştırılması. Kömürün buharsızlaştırılmasıyla, bazı oksijen, azot ve hidrojen kalıntıları içeren bir odun kömürünün elde edildiği varsayılır.
Bitümlü	: Doğal olarak oluşan veya kömür veya petrolden damıtma yoluyla elde edilen, hidrokarbonların ve diğer maddelerin çeşitli yanıcı karışımlarından oluşan bir malzeme.
Düşük bitümlü	: Bitümlü kömürden daha düşük ancak linyitten daha yüksek olan bir kömür sınıfı.
Termojenik	: Isı üretimine neden olan veya ısı üretimiyle ilgili.
Birincil biyojenik gaz	: Oluşumundan biyolojik süreçlerin doğrudan sorumlu olduğu biyojenik gaz. - Nispeten düşük sıcaklıklardaki ve düşük gömülme derinliklerindeki turbadan üretilen birincil biyojenik metan.
İkincil biyojenik gaz	: Geçirgen kömür yatakları veya diğer organik açıdan zengin kayaçlar boyunca hareket eden meteorik sular tarafından getirilen bakterilerin metabolik aktivitesi yoluyla üretilen gaz.
Metanojenik	: Enerji metabolizmasının bir yan ürünü olarak metan üretebilen anlamına gelir. Metanojenik bakteriler, Euryarchaeota taksonunun Methanobacteriaceae ve Methanosarcinaceae familyalarından çeşitli bakteriler olabilir.
Jeotermal gradyan	: Birim derinlik mesafesi başına sıcaklıktaki artış.
Maseral	: Kömürün mikroskopik olarak gözlemlenebilen, karakteristik fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip organik bileşenlerinden herhangi biri. Maseraller üç ana gruba ayrılır: Vitrinit, inertinit ve liptinit (eski adıyla eksinit).

Kömürleşme	: Bitkisel maddenin, son ürün olarak antrasit oluşturmak üzere giderek daha yüksek dereceli kömüre dönüştüğü bir süreç.
Klitler	: Kömürde doğal olarak oluşan dik açılı çatlama düzlemleri.
Etkin gözeneklilik	: Gözenekli bir malzemenin toplam boşluk alanının bir sıvıyı iletebilen kısmı.
Kronostratigrafi	: Kayaç tabakalarının yaşlarını zamana göre inceleyen stratigrafi dalı.
Sorbent	: Sıvıları veya gazları absorbe veya adsorbe etmek için kullanılan bir malzeme.
Adsorbat	: bkz. Adsorpsiyon
Sorbat	: Adsorpsiyon veya adsorpsiyon yoluyla başka bir madde tarafından çekilmiş veya çekilebilecek bir malzeme (bkz. Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon).
Gerçek yoğunluk	: Malzemedeki gözenekler (gerçek hacim) dikkate alınmadan bir numunenin kütlelerinin hacmine bölümü.
Görünür yoğunluk	: Eskiden hacim ağırlığı olarak adlandırılan, doğal durumdaki malzemenin birim hacmi başına kütlesi.
İzotermal süreç	: Sistemin sıcaklığının sabit kaldığı termodinamik bir süreç.
Petrografi	: Özellikle mikroskopik inceleme yoluyla kayaçların tanımlanması ve sınıflandırılmasıyla uğraşan petroloji dalı.
Litostatik yük	: Sıvılardaki hidrostatik basınca benzer şekilde bir kayaç kütlelerine çevresindeki kayaç tarafından uygulanan, litostatik basınç olarak da adlandırılan gerilme. Litostatik basınç, Dünya yüzeyinin derinliklerine gidildikçe artar.
Sabit karbon içeriği	: Bir kömür parçası ısıtıldıktan ve uçucu madde atıldıktan sonra kalan katı yanıcı kalıntı. Bir kömürün sabit karbon içeriği, bir numuneden nem, uçucu madde ve kül oranlarının çıkarılmasıyla belirlenir.
Kömürün yaklaşık analizleri	: Kömürün ayrıntılı analizleri, kömürün içindeki maddelerin yaklaşık miktarlarını belirler. Genellikle nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içeriği analiz edilir. Kömürde bulunan elementlerin belirlenmesi olan nihai analizden farklıdır.
Boğulma	: Bilinç kaybı ve genellikle ölümlü sonuçlanabilecek oksijen yoksunluğu veya bir asfiksi durumu.

MİSGEP

MADENCİLİKTE İŞ SAĞLIĞI ve GÜVENLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

KISALTMALAR

ACF	: Amoco Curve Fitting (Amoco Eğri Yaklaşımı)
AGH SET	: Akademia Górniczo-Hutnicza University of Science and Technology (Akademia Górniczo-Hutnicza Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)
AMM	: Abandoned Mine Methane (Terk Edilmiş Maden Metanı)
APS	: Alt Patlama Sınırı
ATEX	: ATmosphere EXplosive (Patlayıcı Ortam)
CART	: Classification and Regression Tree (Sınıflama ve Regresyon Ağaçları)
CBM	: Coal Bed Methane (Kömür Yatağı Metanı)
CMM	: Coal Mine Methane (Kömür Madeni Metanı)
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğal Gaz)
CSIRO - CET	: The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Centre for Exploration Targeting (İngiliz Milletler Topluluğu Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Örgütü, Keşif Hedefleme Merkezi)
CTP	: Cam Takviyeli Plastik
ÇSGB	: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
DC	: Decline Curve (Azalma Eğrisi)
ESD	: Eşik Sınır Değerleri
GMM	: Goaf Mine Methane (Ayak Arkası Metanı)
GRI	: Gas Research Institute (Gaz Araştırma Enstitüsü)
GWP	: Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
GZİS	: Gerçek Zamanlı İzleme Sistemi
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gazı)
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
MCF	: Modified Curve Fitting (Değiştirilmiş Eğri Yaklaşımı)
MDM	: Modified Direct Method (Değiştirilmiş Doğrudan Yöntem)
MİSGEP	: Madencilikte İş Sağlığı ve Güvenliğinin Geliştirilmesi Projesi
PE	: Polietilen
RPM	: Revolutions per Minute (Bir dakika süresince gerçekleştirilen dönüş/devir sayısı)
SEİS	: Sürekli Emisyon İzleme Sistemleri
SG	: Sera Gazı
SGO	: Serbest Gaz Oranı
USBM	: United States Bureau of Mines (Birleşik Devletler Maden Bürosu)
ÜPS	: Üst Patlama Sınırı
VAM	: Ventilation Air Methane (Havalandırma Hava Metanı)
ZAK	: Zincirli Ayak Konveyörü

1. GİRİŞ

Yeraltı kömür madenciliğinde meydana gelen iş kazaları arasında en trajik olanları metan gazı ve kömür tozu patlamalarıdır. Grizu patlamaları patlamaları çoğu zaman yeraltındaki yanıcı gazların tutuşmasıyla meydana gelmektedir. Yeraltı çalışma bölgelerine salınabilen yanıcı gazın doğal kaynakları, kömür damarları ve çevredeki gaz içeren tabakalardır. Kömür damarında bulunan çeşitli gazların toplamı, damar gazı veya kömür kökenli gaz olarak adlandırılır ve metan, belki de en yaygın olarak bulunan hidrokarbon tipi gazdır. Kömür kökenli gaz, kömür damarlarında bulunan ve “serbest gaz” olarak adlandırılan serbest haldeki gaz olarak oluşmaktadır. Kömür kökenli gaz yalnızca kömürün çeşitli yüzeylerinde değil, aynı zamanda gözenekli kumtaşları, çatlak sistemleri, birleşme yerleri, faylar ve “serbest gaz” içeren gaz cepleri gibi çevredeki tabakalarda ve yapılarda da bulunur [1]. Yukarıda belirtildiği gibi, metan genel olarak kömür damarlarında bulunan kömür kökenli gazların en büyük bileşenidir. Madencilik faaliyeti sırasında kömür damarlarından açığa çıkan metan, maden havalandırma sistemine karışarak özellikle tehlikeli konsantrasyonlarda risk oluşturmaktadır.

Kömür damarlarında metan oluşumu, kömür madenlerindeki iş yeri güvenliği ile ilgili ciddi bir risktir. Kömür damarlarının hazırlanması, işletilmesi ve terk edilmesi aşamalarında metan açığa çıkmaktadır. Madencilik faaliyetleri sırasında metan açığa çıktığı için yeraltı kömür ocaklarında metan varlığı iş güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Yanıcı ve patlayıcı bir hidrokarbon gazı olan metan, kömür madenlerinde her zaman ciddi bir tehdit oluşturmaktadır.

Yeraltı ocaklarında kömür damarlarının üretilmesi aşamasında kömür madenlerindeki gaz patlamalarına dair belirlenen güvenli seviyelerin aşılmasını önlemek amacıyla özel teknolojik çözümlerin uygulanması gerekir. Kömür damarı işletme derinliği ve madencilik faaliyetlerini belli bir bölgede toplama isteğinden dolayı çalışma bölgelerine ve hava yollarına aşırı metan salımı sıklıkla karşılaşılan bir sorundur. Bu durum metan gazı konsantrasyonunda artışlara neden olmaktadır. Dolayısıyla yeraltı kömür ocaklarında havalandırma çalışmaları ciddi bir önem kazanmaktadır.

Havalandırma için uygulanan temel yöntem, kazı alanlarına optimum düzeyde hava akımı sağlanmasıyla yeterli havalandırma elde edilmesinden ibarettir. Havalandırma optimizasyonu ocaktaki kazılar/ açıklıkların kesit alanları boyunca akış basıncındaki artış ile ilintilidir. Bu akış basıncı hem tozunu artıracağı hem de teknik ve ekonomik nedenlerden dolayı belirlenen eşik değerleri aşmamalıdır (örnek olarak, daha güçlü fanlara ihtiyaç duyulması).

Ocaktaki galeriler boyunca akan maden havasındaki metan konsantrasyonunun izin verilen seviyeleri aşmasını önlemek için yeraltı açıklıklarına salınan metan emisyonlarının azaltılmasının gerekliliği, önleyici bir tedbir olarak metan drenajının uygulanmasını gerekli kılar. Metan drenajı, kazı alanında açığa çıkan metan emisyonlarının azaltılmasını ve kömür üretiminden kaynaklanan metan konsantrasyonunun en yüksek olduğu alanların boşluğun arkasına kaydırılmasını sağlar. Yeraltında etkili metan drenajı yalnızca güvenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda maden kazılarındaki kömür üretimini artırır ve atmosfere salınan metan emisyonunu azaltmaktadır.



Bu rehber, yeraltı kömür madenciliği endüstrisine ait bilimsel bilgilere ve uygulama ilkelerine dayanarak yeraltı kömür madenlerinde güvenli ve etkili metan tespiti ve kontrol önlemlerinin tasarlanması ve uygulanmasını amaçlamıştır.

Kömür madenlerinde güvenlik koşullarını iyileştirmek için birçok önleyici tedbir bulunmaktadır. Yoğun havalandırma ve metan drenaj sistemlerinin yanı sıra, ocak gazları ve önemli hava parametreleri gerçek zamanlı olarak izlenmeli ve ek havalandırma cihazları kullanılmalıdır. Tüm bu önlemlerin uygun şekilde ve birlikte kullanımı, maden güvenliği açısından derin kotlardaki gaz kontrolüne ilişkin güvenilir bir dayanak sağlar.

Gazlı kömür damarlarının güvenli bir şekilde işletilmesini planlamak için, gaz yayılımının büyüklüğü ve tespiti, yeraltındaki kazı alanlarında açığa çıkan ve çeşitli gaz geri kazanım yöntemleriyle tespit edilen gaz miktarını yaklaşık olarak tahmin etmeyi amaçlayan uygun gazlılık tahmin yöntemleri kullanılarak belirlenmelidir.

2. KÖMÜR KÖKENLİ GAZA GENEL BAKIŞ

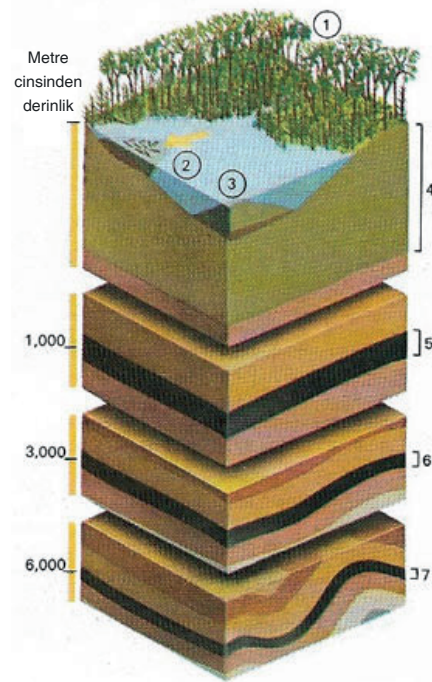
2.1. Kömür Kökenli Gazın Varlığı

Kömür damarlarında hapsolmuş gaz, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi organik bitkisel maddenin bozulması ve karbonlaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu süreçte aşağıdaki aşamalar tanımlanabilir:

- Diyajenez: Olgunlaşmamış organik bitkisel maddeyi turba ve ardından linyite dönüştüren fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler;
- Deformasyonlu başkalaşım: Kömür sınıfının veya kömürleşme özelliklerinin bir fonksiyonu olarak gerçekleşen ek fiziksel ve kimyasal değişiklikler.

//

Bir kömür damarındaki çeşitli gazların içeriğine damar gazı denir. Metanın damar gazı içindeki payı, kömürleşme sürecinin seyrine bağlı olarak değişebilir. Metan, kömür damarlarında emilmiş gaz ve 'serbest gaz' olarak adlandırılan serbest haldeki gaz olarak ortaya çıkar. Kömür damarlarında metan oluşumu, kömür madenlerinde iş güvenliği ile ilgili ciddi bir risktir.



Kömürleşme süreci bitki artıkları ile başlar [1]. Bataklık bir ortamda bulunan ölü bitki örtüsü kömürleşmenin ilk aşaması olan turbayı oluşturur [4]. Su altında, bakteriler organik materyalden bir miktar oksijen, azot ve hidrojeni uzaklaştırır. Başka bir yere taşınan ve suyla biriken artıklar, isli (mum) kömür denen ürünü oluşturur [2]. Su altında toplanan alg materyali, torbanit veya yosun kömürünü oluşturur [3]. Ölü organik madde tortular içinde gömülürse, turbanın üzerindeki ağırlık ve daha yüksek sıcaklık turbayı linyite dönüştürür [5]. Artan derinliklerde daha fazla ısı ve basınç ile linyit, bitümlü kömüre [6] ve ardından antrasite [7] dönüşür.

Şekil 2.1: Gelişim aşamalarıyla kömürleşme süreci.

(<https://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/coal.html>)

Doğal yapılar farklı olsa da her aşamada kömür kökenli gazlar açığa çıkmaktadır. Kömür kökenli gazın kaynağı, kömürleşme aşamasına bağlıdır. Kömür, kömürleşme sırasında karbondioksit, metan ve azot gibi gazları bünyesinde biriktirebilmektedir. Kömür, linyitten bitüme ve antrasite kadar daha yüksek değerlere veya sınıflara doğru kömürleşme sırasında çeşitli buharsızlaştırma (uçucu maddelerin uzaklaştırılması) aşamalarından geçen organik ve inorganik maddelerden oluşmaktadır. Linyit ve yarı bitümlü kömür gibi düşük kaliteli kömürler, kömürleşme sürecinde az miktarda uçucu madde kaybeder. Yüksek kaliteli kömürler ise bu süreçte büyük miktarda uçucu madde kaybederek metan, karbondioksit, azot ve büyük miktarlarda su üretmektedir. Genel olarak oluşum sürecinde, farklı karbonlaşma dönemlerinde oluşan termojenik, birincil biyojenik ve ikincil biyojenik gazların katkısının bulunduğu kabul edilmektedir^[2,3]. Düşük sıcaklıklarda oluşan kömür kökenli gaz biyolojik (biyojenik) bir kökene sahiptir^[4, 5, 6]. Çürüyen organik bitkisel madde birikimleri tarafından turba bataklıklarında metanojenik mikro organizmalar aracılığıyla üretilmektedir. Termojenik gazlar, esas olarak yüksek sıcaklıklarda kömürlerin başkalaşımının termal stabilitesinden sonra oluşur. Kömürleşme sırasında oluşan termojenik gazların miktarı ve türü, oluşma geçmişinin, jeotermal gradyanın, maseral bileşimin ve bir kömür havzasının diğer özelliklerindeki değişikliklerin bir sonucudur. Mikrobiyal bozunma^[7,8] veya jeokimyasal göstergeler^[9] gibi çeşitli faktörlerin kömür kökenli gazın oluşumu ve birikimi üzerindeki etkisinin anlaşılması için halen araştırmalar yürütülmektedir.

Ancak, kömürdeki gaz içeriği, teşekkül aşamasında oluşandan her zaman çok daha düşüktür. Bunun nedeni, gazın bir kısmının çevredeki kayaç oluşumlarının gözeneklerine dağılarak orada hapsolmesi veya jeolojik zaman boyunca atmosfere dağılmasıdır. Sonuç olarak, gaz içeriği kömür havzalarında ve hatta aynı havzada bulunan kömür yataklarında farklılık gösterebilir. Gaz karışımının bileşimi de farklılık gösterebilmektedir.

Kömür damarlarında bulunan gazların miktarı, yalnızca organik maddenin başkalaşım derecesine değil, aynı zamanda kömürün mevcut birikme kapasitesine ve jeolojik ortamına da bağlıdır. Kömür gazlarının tamamen veya kısmen atmosfere atılmasını kolaylaştıran veya bitişik kayaç katmanlarına aktarılmasına yol açan önemli faktörler tektonik olaylarla ilgilidir.

Kömür içeren katmanların çökeltilelerle kaplanmasıyla yüzeye doğru kömür kökenli gaz geçişi yavaşlamaktadır. Metanın dik kömür damarlarından yüzeye geçişinde damarın dalım açısı önemli bir rol oynar. Bununla bağlantılı olarak, dik damarlar daha sıkı kısımlarda daha derin olanlara göre daha fazla gaz içerebilir. Tavan ve taban kayaçlarının litolojik özellikleri de kömür kökenli gazın içeriğini belirlemektedir.

İçine kömür kökenli gazın geçiş yaptığı rezervuar oluşturan kayaçlar, geçirimsiz tabakalar tarafından etrafları çevrilirse ve madencilik faaliyetleri gerçekleşene

kadar bozulmadan kalırlarsa, bir maden ortamı için önemli gaz akış kaynakları haline gelebilirler.

Kömür damarları, farklı oranlarda metan (CH₄), karbondioksit (CO₂), azot (N₂), etan (C₂H₆), propan (C₃H₈), hidrojen sülfür (H₂S) ve kükürtdioksitten (SO₂) oluşan bir gaz karışımı içermektedir. Metan genellikle, karışımdaki en büyük fraksiyonu oluşturur ve karışımdaki oranı %80-99 olabilir^[10, 7, 11]. Ancak, gaz karışımının kömür sahasına göre değişiklik gösterdiği (%98 CO₂ ve %2 CH₄ ila %0 CO₂ ve %100 CH₄) Aşağı Silezya Kömür Havzası veya Velenje Kömür Madeninde olduğu üzere, genellikle karbondioksit gibi diğer gazların ağırlıklı olduğu kömür yatakları da bulunmaktadır^[12].

Kömür başkalaşımının gaz ürünlerinin yanı sıra, su içeriği de kömürleşme sürecinde değişir. Suyun (H₂O) fiziksel olarak sıkıştırılarak boş alanlara itilmesine ve ek olarak, H₂O, daha düşük kömür sınıflarıyla başkalaşım sırasında da kimyasal olarak üretilebilir. H₂O üretiminin azalmasıyla CO₂ çoğunlukla kimyasal olarak üretilir. H₂O ve CO₂ genellikle başkalaşımın erken evrelerinin ürünleridir ve büyük ölçüde daha sonraki CH₄ üretimi ile desteklenirler. Kömür kökenli gaz, serbest kömür nemi, sıcaklık ve basınç koşullarına bağlı olarak su buharı içermektedir.” sondaki referans aynı şekilde kalacak [13].

Bu nedenle, kömür sahasındaki madencilik faaliyetlerinden önce kömür damarındaki gazın bileşiminin belirlenmesi esastır. Böylece madende üretim yapılması planlanan yerlerde gaz emisyonlarını kontrol etmeye yönelik yöntemler ve önlemler geliştirilebilir.

Kömür sınıfı, CH₄ ve CO₂ konsantrasyonlarının konsantrasyonlarının konumlandırılmasında en geleneksel faktör olabilir.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, kömür damarlarında bulunan metan gazının iki temel biçimde oluştuğunu göstermektedir:

- Kömür matrisindeki mikro gözenekli yüzeyler veya daha seyrek olarak şeyl veya killi kayaçlar tarafından “emilmiş gaz”,
- Kömürdeki açık kırıklarda (çizikler/çatlaklar (klitler) veya çizik/çatlak (klit) sistemleri *olarak* adlandırılır) ve çevredeki *kayaçların çatlaklarında meydana gelen “serbest gaz” (ayrıca formasyon suyunda, çoğunlukla kumtaşlarının gözenek alanında çözünebilir).*

Yukarıdakilere ek olarak, gömülü halde oluşan gazın geri kalanı yeraltı suyu sisteminde çözünebilir.

Emilmiş gazın varlığı esas olarak kömür damarlarıyla ilişkilidir. Bu gaz tipik olarak bir kömür damarında bulunan gazın %98’ini oluşturur. Öte yandan, serbest metan gazının varlığı, metanın gözenekler veya klit boşlukları içinde birikmesine imkân tanıyan jeolojik yapılarla ilgilidir. Her iki gaz oluşum şekli de bu yapılarla yakından ilişkilidir. Madencilik faaliyetleri sırasında gaz taşıyan tabakalarda gevşemenin bir sonucu olarak emilmiş metanın açığa

çıkarak serbest metana dönüştüğü varsayılmaktadır. Ayrıca, metan kömürden kumtaşları gibi bitişik kayaç katmanlarının gözeneklerine kısmen geçiş yapabilir.

Serbest gaz oranı teorik olarak ilgili tabakaların etkin gözenekliliği ile kalınlığı ve gaz basıncı farkı çarpılarak belirlenebilir. Kömürün ve çevredeki kayaçların etkin gözenekliliğini tahmin etmek için ampirik değerlerin kullanılması gerekmektedir. Kömür gözenekliliği değerleri geniş bir aralıkta değişkenlik göstermekte olup, kronostratigrafiye bağlıdır^[14]. Kömür için tipik değerler %1 ile %10 arasındayken, kayaçlar için bu değer %0,3 ile %1,3 arasındadır.

$$SGO = e * d * (p1 - p2)$$

SGO: Serbest Gaz Oranı

e: Etkin gözeneklilik

d: Tabaka kalınlığı

p1: Kaynak bölgesinin basıncı

p2: Çevresel basınç

Bu nedenle, kömür damarlarının gaz içeriğinin gerçek durumu, kömür içeren katmanların orijinal koşullarından ve jeolojik zamanda yaşanan değişikliklerden kaynaklanan birçok faktörün yanı sıra mevcut kömür madenciliği koşulları ve bitişik rezervuar kayalarına geçiş olasılığının birleşik etkisine bağlıdır.

Bir kömür sahasında kömür damarı gazının oluşumunu belirleyen faktörler ne kadar çok bilinirse, kömür madenciliği faaliyeti sırasında kömür kökenli gazın serbest kalması ve açığa çıkmasıyla ilgili tahminleri yapmak o kadar kolay olmaktadır.

2.2. Kömürün Gözenekliliği ve Gaz Adsorpsiyonu

Bir kömür oluşumunun ne kadar gaz biriktirebileceğini gözenekliliği ve iç yüzey alanı belirler. Kömür, üç kategoriden gözenekler içeren bir maddedir. Bunlar mikro, mezo ve makro gözenek sistemleridir. Gözeneklilik, bir maddenin toplam hacmi içinde gözenekler tarafından işgal edilen hacmin oranı anlamına gelir. Gözenekler genellikle 2 nm'den (nanometre) küçük ise mikro gözenek, 2 ila 50 nm arasında ise mezo gözenek ve 50 nm'den büyük ise makro gözenek olarak tanımlanmaktadır. Kömürdeki mikro gözeneklerin 0,5 ila 1 nm (5 ila 10 Å) (Å: Ångström) arasında değişen nominal boyutlara sahip olduğu ve kömür matrisinin bir parçası olarak meydana geldiği tahmin edilmektedir^[15]. Makro gözenek sistemi, klit sistemi adı verilen ve doğal olarak oluşan bir kırık ağından oluşmaktadır.

Gözenekli bir katının yüzeyinde gaz moleküllerinin yoğunlaşmasına adsorpsiyon denilir. Burada, kömüre "sorban kütle" veya kısaca "sorban" denir. Çeşitli adsorbatların gözenek yapısı ile adsorpsiyon etkinliği arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır.

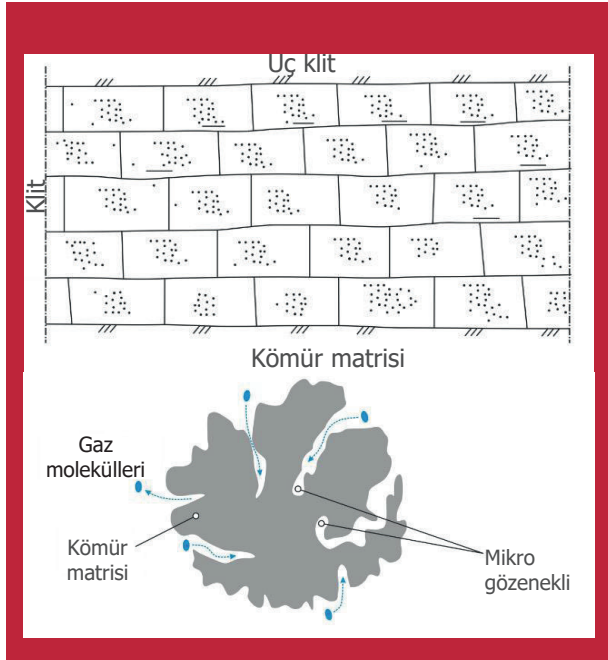
Kömür kararlı bir adsorbandır ve büyük bir gaz adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla, metanın çoğu kömürde gözenek yüzeylerinde emilmiş gaz olarak adsorbe edilirken, serbest gaz kömürün katı kütlelerinde veya diğer kayaçlarda yer alan gözeneklerde, çatlaklarda ve boşluklarda bulunur. Kömür maddesindeki toplam özgül yüzey alanında büyük bir paya sahip olan mikro gözenekler metanın kömürde birikmesi için mükemmel bir barınma ortamı sağlarken, orta boy gözenekler ve makro gözenekler metan geçişi için yollar sağlamaktadır. Kömürde gözenek dağılımı düzensizdir ve gözeneklerin yapısı ile ara bağlantı ağları farklıdır; hatta, birbirine bağlı ve birbirinden ayrı gözenekler mevcuttur^[16]. Akışkanlar (kömür kökenli gaz) birbirine bağlı gözeneklerden geçebilirken, ayrık (münferit) gözenekler gaz geçişine olanak tanımaz. Gaz adsorpsiyon süreçleri, kömür damarlarında gazların (esas olarak CH₄, CO₂, N₂) birikmesi bakımından özellikle önemlidir.

Adsorpsiyon performansının, adsorbe edilen metan miktarını belirlediği kabul edilmektedir. Gözenek ve çatlakların toplam hacmi, bir kömür damarının adsorpsiyon kapasitesinin ve geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yukarıda belirtilen faktörler, esas olarak üretilen metan gazının birikim koşullarını etkiler.

Bir kömür numunesinin gözenekliliği, gerçek yoğunluğundan ve görünür yoğunluğundan hesaplanabilir. Metan adsorpsiyon sürecini anlamak için kömür numuneleri üzerinde yapılan deneylerde gözlemlendiği üzere, metan molekülleri kömür numunesine girer girmez tüm gözenek yüzeyleriyle temas edemez, ancak numune yüzeyinde bir basınç ve konsantrasyon farkı oluşturur^[16]. Basınç farkı altında metan molekülleri kömür numunesinin dış yüzeyindeki daha büyük gözenek ve çatlaklardan içeri girmeye başlar. Daha sonra kömürün gözenekli yüzeylerine ulaşır temas ederek sonunda bu yüzeylere adsorbe edilmektedir. Aynı zamanda metan gazı molekülleri konsantrasyon farkının etkisi altındadır. Moleküller kömür örneğinin daha derindeki gözeneklerine dağılır ve mikro gözeneklerde adsorpsiyon/desorpsiyon süreçleri gerçekleşmektedir. Kömür matrisinin gaz adsorpsiyon süreci Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

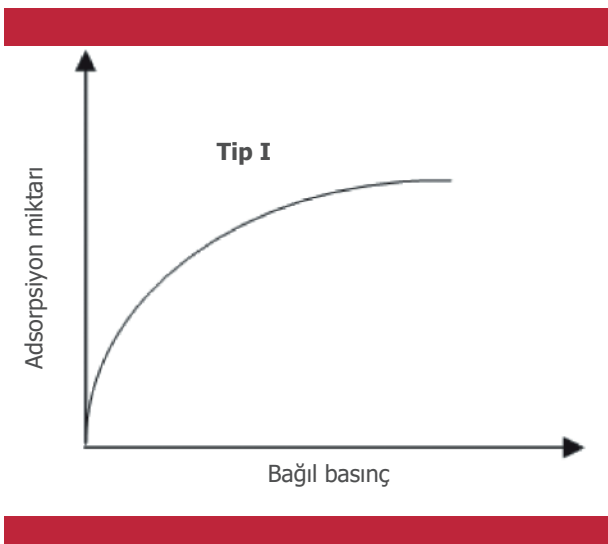


Adsorpsiyon kapasitesinin derecesi birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlileri şunlardır: kömürleşme derecesi, petrografik kompozisyon, sabit karbon içeriği, hafif fraksiyon içeriği, kül içeriği, nem içeriği, yerinde stres durumu, litostatik yükleme ve sıcaklık.



Şekil 2.2: Bir kömür matrisinde metan adsorpsiyonunun şematik diyagramı[16], (a) Kömür matrisi gaz adsorpsiyonunun şematik diyagramı (b) Kömür adsorpsiyon gazının sızıntı süreci.

Kömürde metan adsorpsiyonu ile ilgili birçok teorik ve deneysel araştırmanın sonuçları yayımlanmıştır. Adsorpsiyonun termodinamik özelliklerini (adsorpsiyon ısı, miktarı ve süresi) belirlemek için yapılan deneyler ile farklı başlangıç serbest gaz basınçları ve farklı sıcaklıklarda izotermal deneyler yapılmıştır. Sorpsiyon süreçleri teorisini açıklamak için birçok model önerilmiştir. Kömürdeki metan sorpsiyonunun, çeşitli tipler arasından tip I adsorpsiyonu izlediği tespit edilmiştir (Şekil 2.3)^[17, 18].



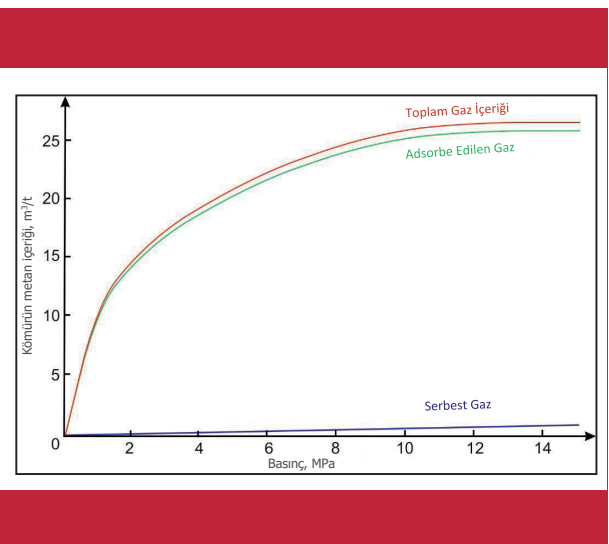
Şekil 2.3: Gaz-katı tip sorpsiyonda tip I adsorpsiyon eğrisi^[17, 18].

Pek çok araştırmacının işaret ettiği gibi, kömürde metan sorpsiyon sürecini açıklamak için Langmuir Modelini kullanmanın herhangi bir sakıncası bulunmamaktadır^[17, 18].

Adsorpsiyon kapasitesinin derecesi birçok faktöre bağlı olup, bu faktörlerden en önemlileri arasında kömürleşme derecesi, petrografik bileşim, sabit karbon içeriği, hafif kırılmalar, kül içeriği, nem içeriği, yerinde gerilme durumu, litostatik yük ve sıcaklık yer almaktadır.

Kömürün adsorbe ettiği gaz miktarı, artan gaz basıncı ile artarken, artan ortam sıcaklığı ve kömürün nem ve kül içeriği ile azalmaktadır. Sıcaklıktaki artış, kömürün gaz depolama kapasitesini biraz azaltır. Hem değişen basınca hem de değişen sıcaklığa bağlı olarak sorpsiyon eş sıcaklık eğrilerini tahmin etmenin bilinen modelleri de bulunmaktadır^[19, 20, 21]. Sıcaklığın, başta makro gözenekler ve mikro gözenekler olmak üzere kömür gözenekleri yapısının oluşumu üzerinde belirgin bir etkisi vardır^[22]. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, kömür damarında gaz geçişine elverişli olan makro gözenekler o kadar büyük olmaktadır. Ancak, küçük gözeneklerin oransal kırılma boyutu sıcaklığın artmasıyla azalır. Sonuç olarak, mikro gözeneklerin yapısı giderek daha düzenli hale gelmektedir.

Bir kömür damarında adsorbe edilmiş metan, serbest metana oranla çok daha yüksektir. Şekil 2.4'te, makro gözeneklerde (yani, klit ve kırılma sistemi) hem adsorbe edilmiş hem de serbest metanın dikkate alındığı yüksek dereceli kömür kapasitesinin bir örneği gösterilmektedir^[23]. Bu eğrilerin niteliksel seyri, McPherson'ın kitabındakilere benzerdir^[24].



Şekil 2.4: Yüksek uçuculuğa sahip bitümlü kömürlerin metan içeriğinde basınçla gerçekleşen değişimler (23 nolu kaynaktan alınmıştır).

Serbest gaz içeriğinin toplamdaki oranı sadece %2-3 olduğundan, madencilik faaliyetleri sırasında bir kömür damarında açığa çıkan gaz esas olarak desorbe edilen gazdır^[25]. Gaz taşıyan tabakalarda, kömürün gaz basıncı, makro gözenek hacmi ve iç yüzey alanına göre serbest ve adsorbe edilmiş gazların miktarı arasında bir denge durumu oluşturmaktadır. Bu basınç sorpsiyon denge basıncı olarak bilinir. Serbest gazın basıncının azalması sorpsiyon dengesinin bozulmasına neden olur ve böylece serbest gaz makro gözeneklerden sızar. Sorpsiyon denge basıncı daha sonra daha düşük bir seviyeye iner.

Ancak, sorpsiyon kapasitesi ölçümlerinin kömür damarlarından alınan numuneler üzerinde, yani gevşek kömür üzerinde laboratuvar koşullarında yapıldığı vurgulanmalıdır. Dolayısıyla, gerilme alanlarının etkisi altında kömürün sorpsiyon kapasitesinin aynı olup olmadığını değerlendirmek imkansızdır. Birçok yazar, gerilme etkisi altında mikro gözeneklerin boyutlarının değişmediğini belirtmektedir. Ancak, diğer faktörler bu gerilme durumunda sorpsiyon özelliklerini değiştirebilir. Bu nedenle laboratuvar ölçümleri makul olarak yaklaşık değerler şeklinde ele alınmalıdır.

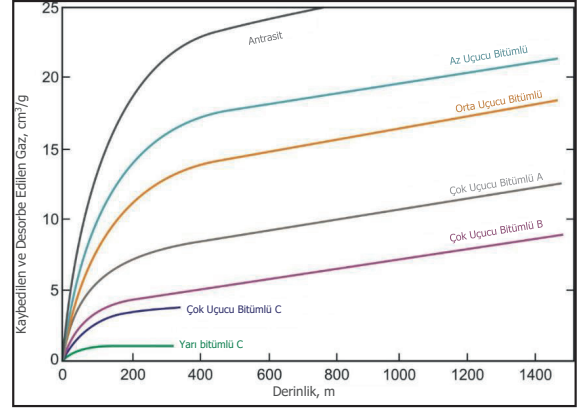
Desorpsiyon, sorpsiyon işlemine tamamen ters bir işlemdir. Sorbatın (absorpsiyon veya adsorpsiyon yoluyla başka bir madde tarafından çekilmiş veya çekilebilecek bir gazın) sorpsiyon boşluğundan çevreye salınmasıdır. Gaz molekülleri potansiyel bariyeri, yani minimum düzeyde olduğu desorpsiyon için aktivasyon enerjisini aşmalıdır. Moleküllerin fiziksel veya kimyasal adsorpsiyonla bağlanmasına bağlı olarak, bu işlem daha hızlı veya daha yavaş olabilir. Dolayısıyla, kömür sorpsiyon ve desorpsiyon çalışmaları, belirli bir kömür sahasında yapılacak metan drenajı ve güvenli madencilik faaliyetinin analizi için gereklidir.

2.3. Kömür Özelliklerinin Sorpsiyon Kapasitesine Etkisi

Kömür derecesi, kömürün sorpsiyon davranışı ve depolama kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, metan depolama kapasitesi genellikle kömürleşme derecesine bağlıdır^[26].

Düşük dereceli kömürler, birçok sorpsiyon boşluğunda (yani gözeneklerde) su tutma eğilimindedir. Böylece, artan kömürleşme derecesi ile nem azalırken metan sorpsiyon kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle, kömürün gazı adsorbe etme yeteneği de kömürleşme derecesinin bir fonksiyonudur.

Şekil 2.5'te, hidrostatik yük varsayımı kullanılarak çeşitli derinliklerde farklı dereceli kömürler için metan içerikleri gösterilmektedir. Ancak, gerçek basınç genellikle hidrostatik yükten daha düşük olduğundan, metan içeriği değerleri bir üst sınır olarak kabul edilmelidir.

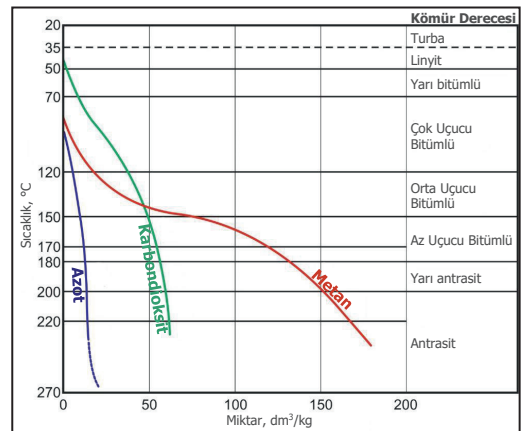


Şekil 2.5: Farklı kömür sınıfları için derinlikle birlikte adsorbe edilen kömür kökenli gazdaki değişiklikler (27 ve 28 nolu kaynaklardan alınmıştır).

Başlangıçta, yüksek uçuculuğa sahip bitümlü kömürlere ulaşılan kadar metan sorpsiyon kapasitesi kömürleşme derecesi ile azalır. Daha sonra, sorpsiyon düşük uçuculuğa sahip kömürler oluşana kadar kademeli olarak artar ancak antrasit derecesine ulaşmasıyla birlikte keskin şekilde düşer.

CH₄/CO₂ oranının kömürleşme derecesine göre değişiklik gösterdiğine inanılmaktadır^[4, 29, 30]. Şekil 2.6'da, tüm kömürleşme süreci boyunca oluşan gazların bağımlılık oranları gösterilmektedir. Ancak bu çizim niceliksel olarak değil niteliksel olarak ele alınmalıdır.

Kömürde de bulunan ve mineral madde olarak bilinen inorganik bileşenler, gaz tutmak için gerekli adsorpsiyon kapasitesine sahip değildir. Bu nedenle kömür damarlarıyla ilişkili karbonlu (yağlı veya bitümlü) şeyllerde bulunan gaz, bu tür şeyllerin organik kısmına emilmektedir.



Şekil 2.6: Kömürleşme sırasında kömürden üretilen gaz (4, 29 ve 30 nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).

Kömürleşme sürecinde oluşan gazların miktarını etkileyen başka faktörler de vardır ki bunların başında maseral içerik gelmektedir.

Kömürleşme derecesi, gözenek boyutu dağılımını etkileyen önemli bir faktördür. Bununla birlikte, kömürün farklı maseral bileşenleri, kömür derecesine bakılmaksızın bir yerde kömür damarının farklı kısımlarında spesifik yüzey alanında ve mezo gözenek ve mikro gözenek hacimlerinin dağılımında önemli farklılıklar olabileceği gerçeğine rağmen, hem serbest hem de adsorbe edilmiş gaz içeriğinin değişken payını etkileyebilir^[31]. İnorganik madde miktarı da depolama kapasitesini çok önemli bir şekilde etkilemektedir. Kömürlerin toplam gözenekliliği temel olarak rank etkileri ve mineral madde tarafından belirlense de, inertinit ve vitrinit gruplarının maseralleri arasındaki gözenek boyutu dağılımında sistematik farklılıklar mevcuttur. İnertinit bakımından zengin kömürler, vitrinit bakımından zengin kömürlere göre daha fazla gözenekliliğe sahiptir. Yüksek ve düşük uçucu bitümlü kömürler için, inertinit bakımından zengin kömürler makrogözeneklerle, vitrinit bakımından zengin kömürler ise mikro gözeneklerle karakterize edilir^[32]. Bu yüzden, kömürün maseral bileşimi gaz tutmada önemli bir role sahip olabilir. Gaz sorpsiyonunun vitrinit için en yüksek ve inertinit için en düşük olduğuna inanılmaktadır^[28]."

Kömürün daha yüksek derecelere doğru kömürleşmesi sırasında depolayabileceğinden daha fazla metan üretebileceği araştırmalarla da doğrulanmıştır. Bu nedenle, kömür kökenli gaz dışarı atılabilir ve kumtaşı katmanları gibi bitişik rezervuar kayalarına geçiş yapabilir^[6]. Bu aynı zamanda gaz içeriği ve maden kazı alanlarına olası emisyonlar değerlendirilirken ve gaz drenaj altyapısı tasarlanırken dikkate alınması gereken çok önemli bir husustur.

Kömür damarlarından kazı yerlerine doğru metan salınabilirliği ve drenaj sistemi aracılığıyla bu metanı yakalama imkânı değerlendirilirken, metan oluşumunu, kömürde depolanmasını ve tutulmasını etkileyen birçok jeolojik faktörün karmaşık etkileşimi dikkate alınmalıdır. Bunlardan kömür damarında metan geçişi ve metanın drenaj sistemi veya maden kazı yerlerine salınması ya da bu konumlarda açığa çıkmasıyla ilgili en önemli faktörler şunlardır:

- Kalınlık, kömürleşme derecesi, kömür damarları etrafındaki kayaç litolojisi ve petrografi,
- Serbest ve emilmiş durumdakiler dahil olmak üzere kömür damarlarının gaz içeriği,
- Kömür damarlarının geçirgenliği,
- Kömürlerdeki kırılma (klit) sistemi,
- Kömür damarının derinliği ve kömür maddesinin iskeleti üzerindeki gerilme durumu ve
- Hidrodinamik (basınç farkı altında tabakalarda su hareketi, difüzyon ve filtrasyon).

2.4. Gaz Rezervuar Basıncı

Kömür damarının gaz basıncı, gaz rezervlerinin, gaz emisyonunun, gaz akışının, gaz çıkışının ve püskürme olaylarının değerlendirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır^[33, 34, 35, 36, 37, 38, 39].

Tabaka içinde, madencilik faaliyetinin bulunmadığı çalışma alanlarındaki artık gaz basıncı büyük önem taşımaktadır. Gaz basıncı ile kömür damarının derinliği arasında bir ilişki vardır. Bu parametreler arasındaki ilişki genellikle doğrusal olup, belirli bir kömür havzasında veya kömür sahasında yapılan ölçümlere göre belirlenir.

Siğ seviyede veya püskürmeye eğilimli olmayan ya da püskürme riski düşük kömür damarlarında gaz basıncı hidrostatik basınçtan genellikle daha düşüktür. Derin seviyede veya şiddetli püskürme riski olan kömür damarlarında, gaz basıncı hidrostatik basınca yaklaşabilir veya o seviyeye ulaşabilir^[40, 37]. Gaz basıncı değişimi, sınır derinliğin altında hidrostatik basınç hattını takip etmektedir. Aynı zamanda, gaz bileşiminin karakterinin değişmesi, magmatik intrusifler (sokulumlar) ve yakınlarda oluşan büyük bir fay gibi değişen jeolojik koşullara sahip bazı yerel bölgelerde gaz basıncı doğrusallık kuralından ciddi şekilde uzaklaşabilir.

Kömür damarlarındaki gaz basıncının doğrudan ölçümü, test edilecek kömür damarına galeriden açılan bir deliğe sonda monte edilmesiyle gerçekleştirilir. Çalışma alanındaki denge gaz basıncı, doğal gaz sızma prensibi kullanılarak ölçülür. Ölçüm teknolojisinde cihaz probunu içeride tutarken deliğin sızdırmazlığının sağlanması gerekir^[37].

Gözenek basıncı, daha doğrusu gözenek basıncındaki değişim, püskürme veya ani gaz çıkışı riskinin önemli bir belirleyicisidir. Maden açıklıklarına aniden salınan büyük miktarlarda kömür kökenli gaz, boğulma, zehirlenme, ortaya çıkan patlayıcı karışımların yanlılıkla (kasıtsız olarak) ateş alması sonucu patlama, yaralanma ve yoğun boğucu toza maruz kalma tehlikelerine neden olmaktadır.

Bu kategoride üç farklı olgu vardır:

- i) Gaz püskürmeleri,
- ii) Kömür damarından ya da tavan veya taban kayaçlarından ani gaz çıkışı,
- iii) Büyük miktarda gazın dinamik belirtiler olmadan ani şekilde çıkması.

Bu olguların kontrol edilmesi ve bu olgularla mücadele etme hakkında daha fazla bilgi birçok araştırma ve yayında bulunabilir^[41, 42, 43, 13, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50].

2.5. Yerinde Metan İçeriğinin Değişkenliği ve Ölçümü

Bir kömür damarının gaz içeriği, yeraltı kömür madenlerine salınan metan emisyonlarının belirlenmesinde önemli

bir değişkendir. Metan içeriği ile kömür damarı derinliği arasındaki ilişki çok iyi bilinmektedir. Derinlikle birlikte gaz içeriğindeki değişimin derecesi, bir kömür yatağından diğerine farklılık gösterir ve kömür damarlarının olduğu havzanın jeolojik tarihini yansıtmaktadır. Kalınlık, litolojik seri, fasiyes tutarlılığı ve birikme zamanına bağlı olarak kabuk hareketi sırasında yeniden şekillenen kömür damarlarını örten sedimanlar, kömürlü tabakalardaki metan içeriğinin dağılımını farklı şekillerde etkiler^[51, 52, 53, 54]. Birçok kömür havzasında metan içeriği derinlikle birlikte artarak sonunda maksimuma ulaşır ve sonra bu seviyenin altına düşer.

300 m derinliğe kadar oluşan kömür damarlarının genellikle gazı tükenmiştir veya bu damarlar metana doymun değildir^[55]. Kömür derinliği arttıkça kömürde adsorbe edilen gaz doymun olma eğilimine girer ve kömürde bulunması olası büyük miktarlarda serbest gaz, gaz basıncının, yani ilgili derinlikteki litostatik basıncın artmasıyla artar.



Kömür damarlarındaki metan içeriğinin doğru bir şekilde tespit edilmesi, madencilik faaliyeti sırasındaki emisyonların tahmin edilmesi ve maden havasındaki aşırı metan konsantrasyonlarına karşı gaz önleme ve kontrol önlemlerinin uygulama etkinliğine karar verilmesi açısından çok önemlidir.

Thakur^[56], Türkiye'deki kömür havzalarını gazlılık ve derinliklerine göre üç kategoride sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmaya göre Esen ve diğ.^[57], Soma kömür havzasının Eynez bölgesinde, kömür damarlarının ortalama 1,67 m³/t ve maksimum 4,2 m³/t gaz içeriğine göre "Hafif Gazlı" ve "Orta Gazlı" olarak sınıflandırıldığını bildirmiştir.

Bir dizi halindeki kömür damarlarının herhangi birinde, kömür kökenli gazların farklı kökenlerinin olması ve içerik veya bileşimlerinin yanal (xy düzleminde) farklılıklar göstermesi mümkündür. Bu nedenle, başta metan olmak üzere yanıcı gazların alansal dağılımının birikme alanı boyunca değişken olması muhtemeldir. Araştırmalar, kömür kökenli gaz içeriğinin kömür damarının farklı

katmanlarında da değişiklik gösterdiğini, bir başka deyişle dikey boyut (yani derinlik) boyunca değişken olduğunu göstermiştir. Bazı katmanlar diğer katmanlardan 3–4 m³/t daha yüksek gaz içeriğine sahip olabilmektedir. Lama ve Bodziony'nin^[40] aktardığı gibi bu katmanlar genellikle yüksek oranda düren içerir ve yüksek çatlama yoğunluğuna sahiptir (daha yumuşaktır). Ayrışmanın gaz içeriği üzerindeki etkisine de dikkat edilmelidir. Ayrışma derecesi, gazların sorpsiyon kapasitesini büyük ölçüde değiştirir. Ayrıca, çeşitli gaz türleri ve farklı kömür maseralleri üzerinde ayrışmanın etkisi farklıdır^[32].

Kömür damarlarındaki metan içeriği, kömür damarlarındaki ve bitişik kayalarındaki tektonik özelliklerden de etkilenmektedir. Faylar veya diğer kırıklar kömür kökenli gazların bir bölgeden diğer bölgeye aktarım kanalları olup, kömür kökenli gazın birikmesine katkıda bulunmaktadır. Bu tür yerler, yakınlarındaki maden kazılarına ani gaz boşalmalarına, hatta gaz ve kayaç püskürmelerine neden olabilir^[58, 59].

Bazı kömür havzalarında başta CO₂ olmak üzere farklı gazların girişini sağlayan kömür damarları veya tabakalarında magmatik intrusifler bulunması, metan içeriğinin değişkenliğini arttırmaktadır. Herhangi bir magmatik olaydan bu yana geçen jeolojik zaman ve söz konusu olaydan bu yana kömür damarında gerçekleşen başkalaşım derecesi, farklı gaz içeriğinin değişkenliğini etkilemektedir.

Maden alanındaki kömür damarlarının metan içeriğine ilişkin haritaların oluşturulması bu nedenle çok önemlidir. Kömür damarlarında ölçülen metan içeriği 25 m³/t^[1] ya da 30 m³/t^[60] civarına çıkabilir. Ancak birçok ülkedeki kömür madenciliği normlarına göre, metan içeriği 8 veya 9 m³/t olan kömürlerin çıkarıldığı madenler çok gazlı olarak sınıflandırılmaktadır.

Kömürdeki gaz oluşumlarına dair bilinenlere göre bu oluşumlar esasen yeraltı madencilik faaliyetlerinde metan emisyonuna neden olur. Metan içeriği, maden açıklıklarına salınması muhtemel metan miktarını tahmin etmek için kullanıldığından, tutuşma ve metan patlamasına karşı korunma önlemleri açısından çok önemlidir. Buna ek olarak, metan uygun şekilde yönetilir ve kullanılırsa faydalı bir enerji kaynağıdır.

Dünya madencilik endüstrisinde kömür damarındaki gaz içeriğini belirlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Kömür damarlarındaki metan içeriğini belirleme yöntemine bağlı olarak yöntemler şu şekilde sınıflandırılabilir^[61, 62]:

- Doğrudan yöntemler - Madende kömür numunelerinin alınmasını ve salınan gaz miktarının ölçülmesini içerirler;
- Dolaylı yöntemler - Adından da anlaşılacağı gibi, kömürdeki gaz içeriğini tahmin etmek için korelasyonlara, denklemlere ve laboratuvarda eş sıcaklık eğrisi analizlerine dayanırlar.

Kömür damarındaki metan içeriği çoğunlukla, dolaylı bir yaklaşıma oranla daha doğru sonuçlar veren doğrudan yöntemlerden biri kullanılarak belirlenir^[51, 61, 62].

Dünya genelinde kullanılan en popüler yöntemlerden bazıları şunlardır: Fransa'da geliştirilen Bertard Yöntemi^[63], Smith's ve Williams Yöntemi^[64, 65], USBM Doğrudan Yöntemi (Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu)^[66], Değiştirilmiş USBM Yöntemi (MDM) — Değiştirilmiş Doğrudan Yöntem^[67, 68, 69], GRI Yöntemi (Chicago'daki Gaz Araştırma Enstitüsü)^[70, 71, 72], Avustralya Standardı^[73, 74] ve CSIRO-CET yöntemi^[75]. Bu yöntemlerden bazıları halen geliştirilmektedir. USBM, değiştirilmiş USBM, Smith-Williams, Azalma Eğrisi (DC), Amoco Eğri Yaklaşımı (ACF) ve Değiştirilmiş Eğri Yaklaşımı (MCF) yöntemleri dahil olmak üzere birçok doğrudan yöntem, kömür veya şeyl numunelerinin gaz içeriklerini tahmin etmek için Wei ve diğ. tarafından analiz edilmiştir^[76]. Zhang^[77], yapısal karmaşıklığa dayalı olarak gaz içeriğini tahmin etmek için sinir ağı modeli olarak bilinen yöntemi kullanmıştır. Li ve diğ.^[78], kömür damarındaki gaz içeriğinin üç boyutlu miktar tahmini için destek vektör makinelerini ve sinir ağı ters çevirme yöntemlerini kullanmıştır.

Kömür damarındaki gaz içeriğinin doğrudan yöntemlerle belirlenmesine ilişkin prosedür, sondaj delikleri (döner sondajdan çıkarılan parçalar veya elmaslı karot sondajından çıkarılan karotlar kullanılarak), numune toplama, yayılan gazın ölçülmesi ve son olarak kömür numunelerinin öğütülmesi ile bağlantılı faaliyetlere ayrılabilir. Tüm bu işlemler sırasında numunelerden bir miktar gaz açığa çıkmaktadır. Bir kömür numunesinde bulunan gaz, aşağıdaki üç bileşenin toplamıdır^[52, 79]:

$$V_i = V_{loss} + V_{des} + V_{res} \quad (2.1)$$

Burada,

V_i toplam gaz içeriği,

V_{loss} : kayıp gaz (numune toplama, yani delme, numunelerin bir kaptan/konteynerde toplanması ve saklanması sırasında serbest gaz ve desorbe edilmiş gaz),

V_{des} : desorbe edilmiş gaz içeriği ve

V_{res} : artık gaz içeriği anlamına gelmektedir.

Kömür damarları nem, mineral madde ve kömür maddesi içerdiğinden, gaz içerikleri genellikle kuru-külsüz kömüre göre ayarlanır (1 ton kuru külsüz kömür, m³/t^{dal}). Yerinde numune alma işlemi sırasında gaz kaybı yaşanması, çeşitli doğrudan yöntemler kullanılarak kömür damarındaki metan içeriğinin belirlenmesi prosedüründe sürekli görülen bir sorundur. Kayıp gaz, kömür numunesindeki metan içeriğine eklenmelidir.

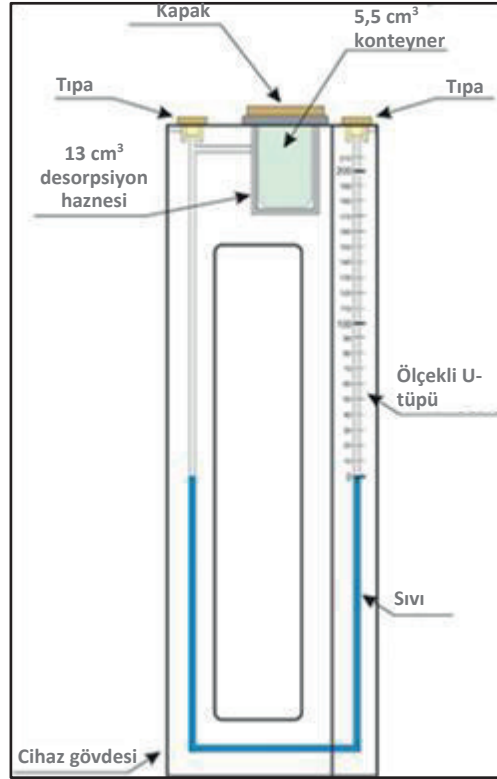
Bununla birlikte, desorpsiyon sonuçlarının incelenmesi, deneyde kullanılan kömür numunesindeki metan içeriği ile başlangıçtaki metan içeriği arasındaki ilişkiye göre belirlenir. Gaz kayıpları ilk desorpsiyon süreci ile alakalıdır. Bertard ve diğ.^[63] çalışmalarında kömürden metan desorpsiyonunun sonuçlarına dayanarak gaz

kaybının tahmin edilebileceğini göstermiş, gaz kaybının, desorpsiyon sürecinin başlamasından bu yana geçen zamanın karekökü ile ilişkilendirilerek tahmin edilebileceği tespit edilmiştir. Buna karşılık, Sagafi ve diğ.^[61], gazın kömürden ilk desorpsiyonunun zamanın üstel fonksiyonu olduğunu kanıtlamıştır.

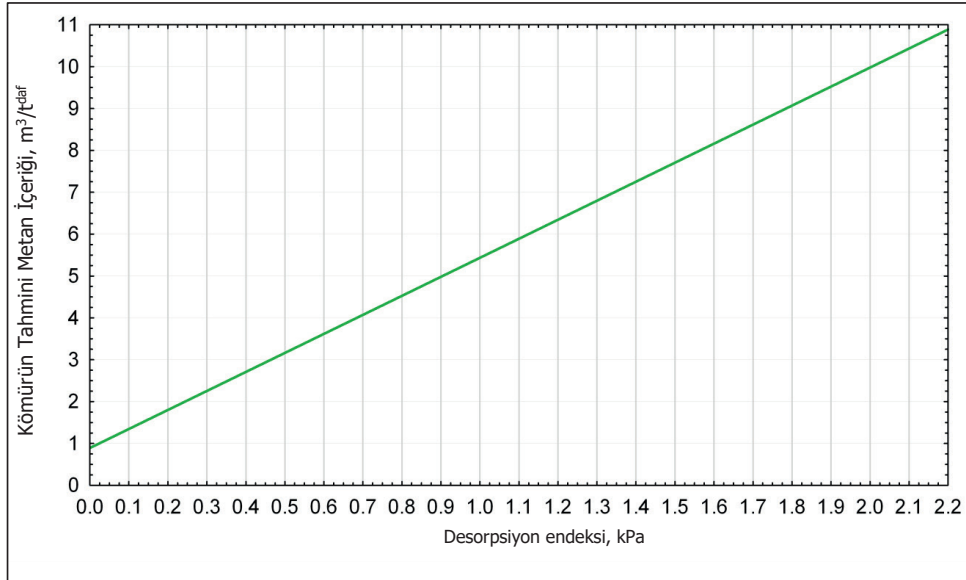
Smith ve Williams'ın 1981'de geliştirdikleri yöntem de bilinmektedir^[65]. Bu yöntem, yüzeyden delik açma sırasında alınan sondaj numunelerindeki gazların içeriğini belirlemek için kullanılır. Numune alımı ile ilgili gaz kayıpları, sıvı yer değiştirme yöntemi ile belirlenir. Numunede yüksek gaz desorpsiyon hızı nedeniyle, ölçüm sonucu genellikle bir hafta içinde alınır. Bu yöntemin kullanımına ilişkin ayrıntılar [65] nolu kaynak içinde bulunabilir.

Wei ve diğ.^[76], serbest gazın toplam gaza oranı %45'in altında olduğunda, şeyl örneklerinin kayıp gaz içeriğini tahmin etmek için USBM doğrudan yönteminin en iyi yöntem olduğunu kanıtlamıştır. Serbest gazın toplam gaza oranı yaklaşık %45 ila %75 arasında değiştiğinde, kayıp gaz içeriğini tahmin etmek için en iyi yöntem ACF'dir. Bu oranın yaklaşık %75'ten daha yüksek olduğu durumlarda ise en iyi tahmin yöntemi MCF'dir. Sonuç olarak yazarlar, kayıp gaz içeriğinin, desorbe edilmiş gaz ve artık gaz içeriklerine kıyasla, organik maddeler açısından zengin şeyllerin toplam gaz içeriğinin hesaplanmasında önemli bir rol oynadığına dikkat çekmiştir. Bu nedenle, uygun olmayan bir yöntem seçilmesi, şeyl numunelerin toplam gaz içeriğine ilişkin tahminin doğruluğunu önemli ölçüde etkileyebilir. Kayıp gazın belirlenmesi hakkında daha fazla bilgi literatürde bulunabilir^[73, 74, 64, 53, 80, 70, 71, 72, 75, 81, 82, 69, 83].

Laboratuvarlar ve araştırma enstitüleri, hala kayıp gaz miktarını kendi prosedürlerine göre tahmin etmeye çalışmaktadır. Polonya'da kömür madenciliği sektöründe, kömür numunelerinin sahada hermetik kaplarda (silindirlik) depolandığı sürenin iki dakikayı geçmemesi gerektiği varsayılmaktaydı. Test için kömür numunelerinin toplanması sırasında, (manometrik desorbometre ile ölçülen-Şekil 2.7) desorpsiyon yoğunluk endeksine dayalı olarak, kömür damarının yaklaşık metan taşıma kapasitesi belirlenmelidir. Metan içeriğinin desorpsiyon yoğunluk endeksine dayalı olarak tahmin edilmesi hakkında örnek bir eğri Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Galerinin ilerleyen ayağından kömür numunesi almak için kurulacak sondaj deliği düzenine ilişkin bir örnek Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Laboratuvarda desorbe edilmiş ve artık gazları belirleme prosedürü, kömürün sıkılığına ve vakum pompalı aparat içindeki numunenin (Şekil 2.13) gazdan arınma hızına bağlı olarak kömür numunesini iki ila dört saat boyunca öğütmek için kömür numunelerini içeren çelik kapların bir çalkalayıcıya yerleştirilmesini içerir (Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12). Daha sonra, çelik kaptan bir ölçüm tankına gaz pompalanarak ölçüm tankındaki basınç kaydedilir, kromatografi yöntemiyle gaz karışımındaki metan belirlenir, kömür kütlesi ölçülür ve kömürün fiziksel parametreleri belirlenir. Test prosedürünün tamamı [84 ve 85] nolu kaynaklarda ayrıntılı olarak sunulmaktadır.



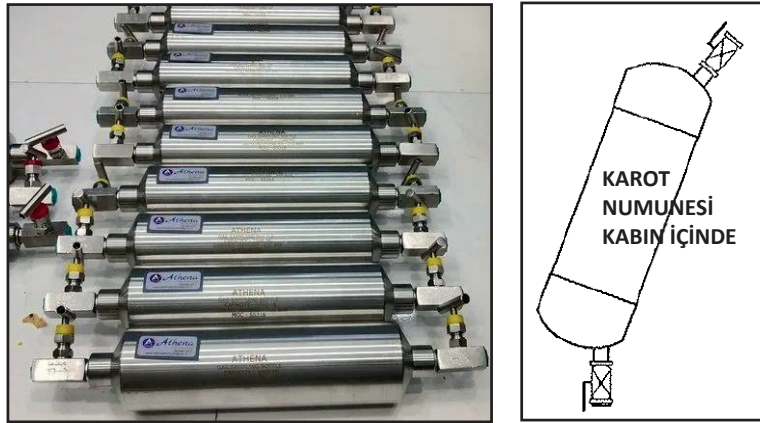
Şekil 2.7. Örnek bir manometrik sıvı desorbometre şeması.



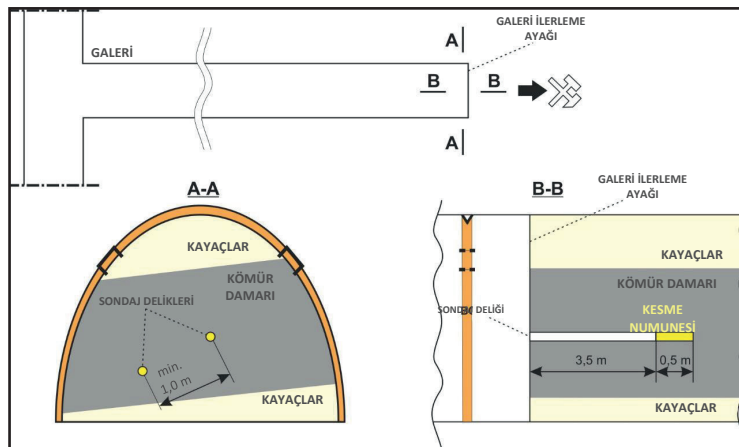
Şekil 2.8. Yaklaşık metan içeriğinin desorpsiyon yoğunluk indeksine bağlılığı^[84].



Şekil 2.9. Kömür numunelerinin toplanması için çelik bilyeli hava geçirmez çelik silindirik kap^[85].



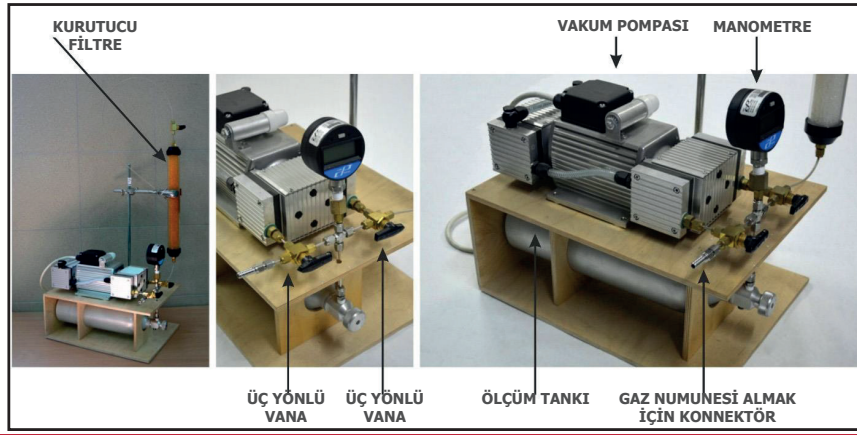
Şekil 2.10. Kömür numuneleri toplamak için kullanılan diğer çelik kapların görünümü.



Şekil 2.11. Galerinin ilerleyen tarafında numune toplamak için sondaj deliklerinin yer tespitine ilişkin örnek^[85].

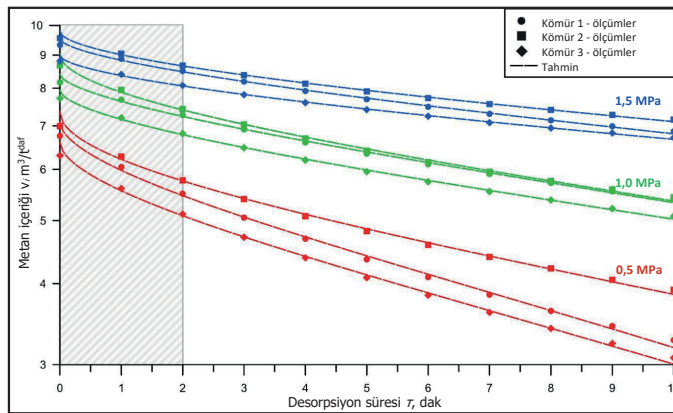


Şekil 2.12: Kömür numunelerini kırmak için kullanılan örnek ekipmanın görünümü.



Şekil 2.13: AGH UST laboratuvarında kömür numunelerinin gazının giderilmesi için kullanılan örnek ekipmanın görünümü.

İlk iki dakikada yapılan metan desorpsiyon testlerinin sonuçlarına göre, birçok kömür için %12'ye varan gaz kayıpları varsayılmıştır. Üç örnek numune için desorpsiyon eğrileri ve analiz edilen üç doyma basıncı değeri Şekil 2.14'te sunulmuştur.



Şekil 2.14: Sırasıyla 0,5 MPa, 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınçlarda metan ile doymuş üç numuneye ilişkin desorpsiyon sonuçlarına uygun eğri örnekleri.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, serbest gazın toplam gaza oranı sadece %2-3 olduğundan, madencilik faaliyetleri sırasında kömür damarında açığa çıkan gaz esas olarak desorbe edilen gazdır. Ancak, artık gaz olarak tanımlanan yerinde gaz desorbe edilmez. Bu nedenle, kömürdeki metan içeriğini belirlemek için bir metodoloji oluştururken yukarıda bahsedilen adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrilerinin dikkate alınması önemlidir^[85].

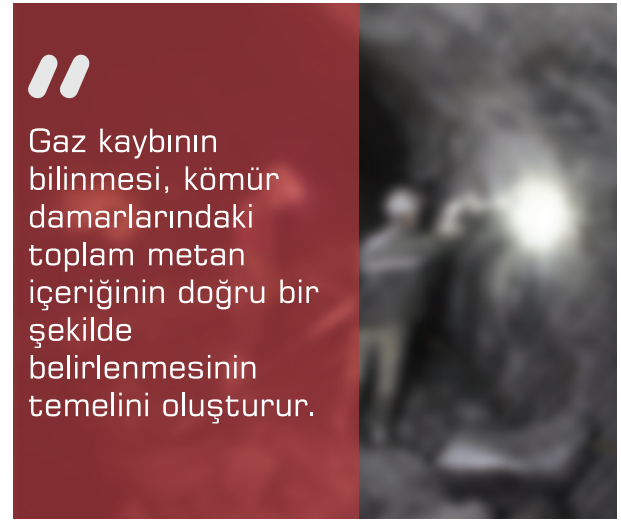
Taş kömürü üzerindeki metan sorpsiyon ve desorpsiyon mekanizmaları artık bilimsel araştırmalara konu olmaktadır. Sorpsiyon testlerine yönelik çağdaş ekipmanlar, kömürlerin sorpsiyon kapasitesini değerlendirmek veya difüzyon katsayılarını incelemek için kullanılabilir. Polonya'daki AGH UST (Kraków'daki AGH Bilim ve Teknoloji Üniversitesi) Laboratuvarında bulunan bu tür ekipmanların bir örneği Şekil 2.15'te gösterilmektedir.

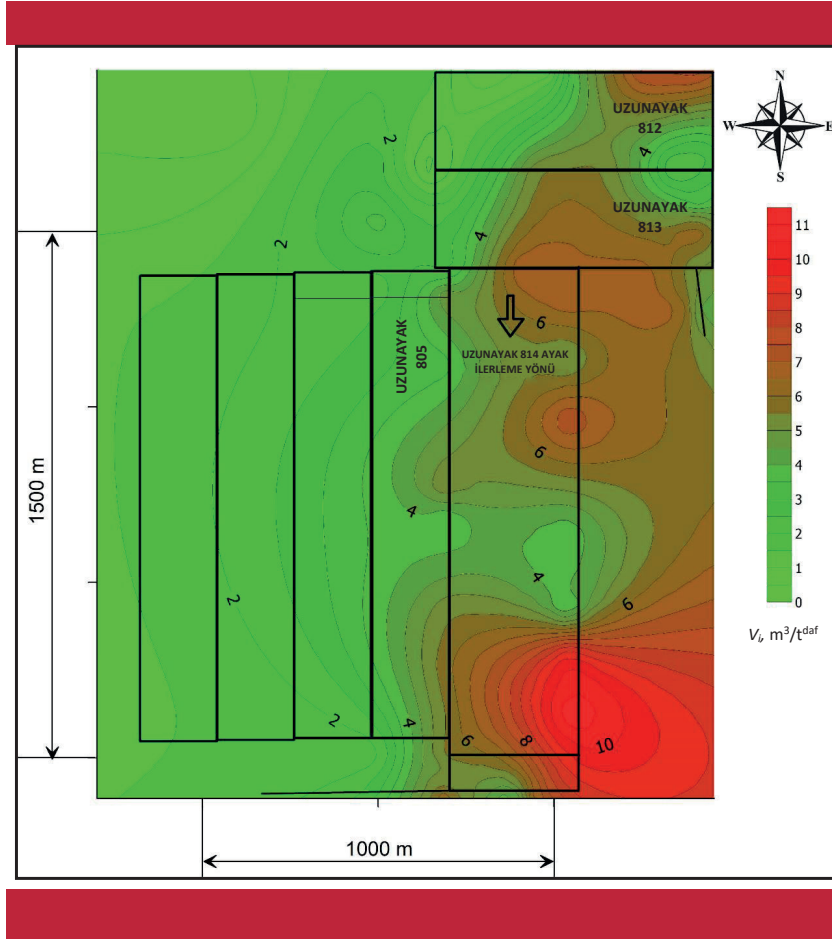


Şekil 2.15: AGH UST laboratuvarında kömür üzerindeki gazların sorpsiyonu ve desorpsiyonu için kullanılan XEMIS cihazı.

Birçok ülkede, ulusal yönetmelikler ve yasalar metan içeriğinin ölçülmesine ilişkin yaptırımları düzenler. Maden şirketi, madencilik faaliyetlerini planlarken kömür damarlarındaki metan içeriğini belirlemek ve olası emisyonları tahmin etmekle yükümlü olmalıdır. Dolayısıyla, ilgili madencilik ve jeoloji koşullarında en iyi sonucu verecek ölçüm yöntemi seçilmelidir. Listelenen yöntemler arasından dolaylı veya doğrudan bir yöntem seçilebilir. Manometrik desorbometrelerin kullanıldığı doğrudan desorbometrik yöntem, desorpsiyon basıncını hızlı bir şekilde belirlemek ve kömür sondajı numunesindeki metan içeriğini dolaylı olarak belirlemek için de faydalı olabilir^[86, 52, 82].

Bazı ulusal yönetmeliklerde, metan içeriği tayini için kömür numunesi alınımının sıklığı ve yeri belirtilmektedir. Eğer yönetmelikler bu konuda net değilse, damara erişim sırasında metan içeriği belirleme sıklığının belirlenmesi iyi bir uygulamadır. Örneğin, hazırlık galerilerinin açılması sırasında her 200 m'de bir metan içeriği tayini yapılması tavsiye edilir. Buna dayanarak, planlanan uzunayak panolarının etrafındaki metan içeriğinin bir kontur haritası oluşturulabilir. Metan içeriğinin kontur haritası ayrıca kömür sahasındaki bakır bir damar için, yatağın keşfi sırasında test sondajlarından alınan kömür parametrelerinin testlerine dayalı olarak da yapılabilir. Bu tür haritaların iki örneği Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de gösterilmektedir.

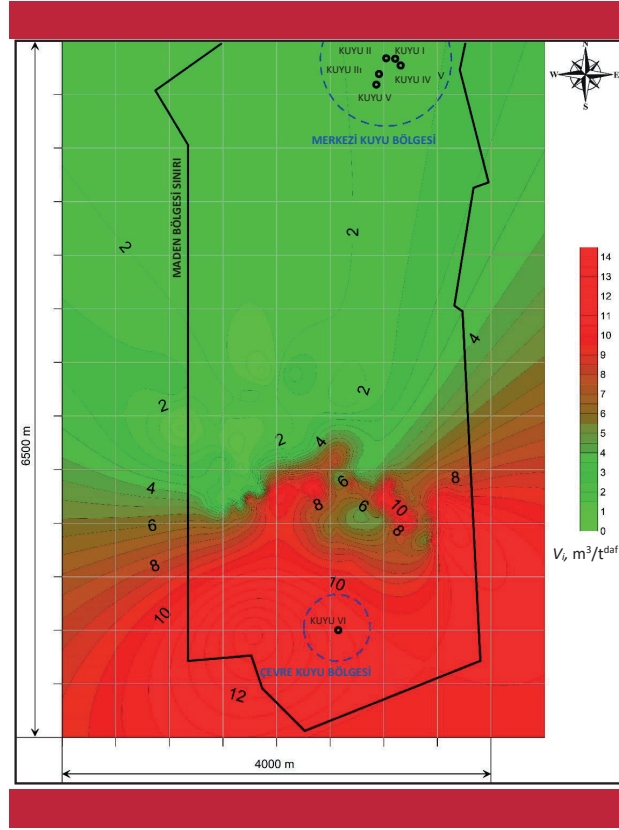




Şekil 2.16: Yüzeysel test sondajı deliklerinden elde edilen ölçüm verilerine göre kömür damarındaki metan içeriğinin kontur haritası.



Planlanan uzunayak paneli etrafındaki metan içeriğinin kontur haritası, uzunayak yüzeyi hareket ettikçe metan emisyonlarındaki yerel artışların tahmin edilmesine yardımcı olur.



Şekil 2.17: Planlanan uzunayak panoları ile 418 numaralı kömür damarındaki metan içeriğinin kontur haritası.

Yerinde metan içeriği, metan emisyonuna ilişkin tüm tahmin yöntemlerinde ve madencilik faaliyetleri öncesi, sırası ve sonrasında metan drenaj yönteminin seçiminde temel parametredir.

3. METAN GAZININ RİSKLERİNİ ORTADAN KALDIRMAYA YÖNELİK TEKNİKLER

3.1. Kömür Kökenli Gaz Emisyonunu Belirleyen Koşullar

3.1.1. Kömürde Metan Taşınımı Olgusu

Kömürdeki gaz taşınımı olgusu basitleştirilerek iki sürece indirgenebilir:

- i) Mikro gözenekli kömür matrisinden geçen akış, difüzyondan etkilenir.
- ii) Darcy Yasası'na göre, birbirine bağlı bir klit ağı veya kırıklardan akış, basınç farkı sayesinde gerçekleşir.

Madencilik faaliyetlerinin bir sonucu olarak kömürdeki orijinal basınç gevşeme ile azaldığında, klitlerdeki basınç da azalır ve bu da kömürün metanı adsorbe edilmiş bir biçimde tutma kabiliyetini azaltır. Sonuç olarak, klitler ve kömür matrisi arasında bir gaz konsantrasyonu gradyanı belirlenir. Gaz adsorpsiyon/desorpsiyon dengesindeki bozulma, adsorbe edilen gazın bir kısmının kömür matrisi-klit arayüzünde desorpsiyonunun bir sonucu olarak serbest duruma geçmesine neden olmaktadır.

Mikro gözeneklerin nominal çapı, gaz moleküllerinin ortalama serbest yoluna kıyasla küçük olduğu için, bu geçiş bir tür difüzyon süreci olup, Fick Yasası'nı izlemektedir. Difüzyon, yani molekülleri konsantrasyon gradyanına karşı hareket ettirme süreci, kömürdeki gazların taşınmasının birincil yoludur. Yasa, gazın kütle akış hızının (dm/dt), akış yönüne dik olan konsantrasyon gradyanı (dc/dx) ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir^[83].

$$\frac{dm}{dt} = -DF \frac{dc}{dx} \quad (3.1)$$

Burada,

D : Difüzyon katsayısı,

F : Akışın enine kesit alanı.

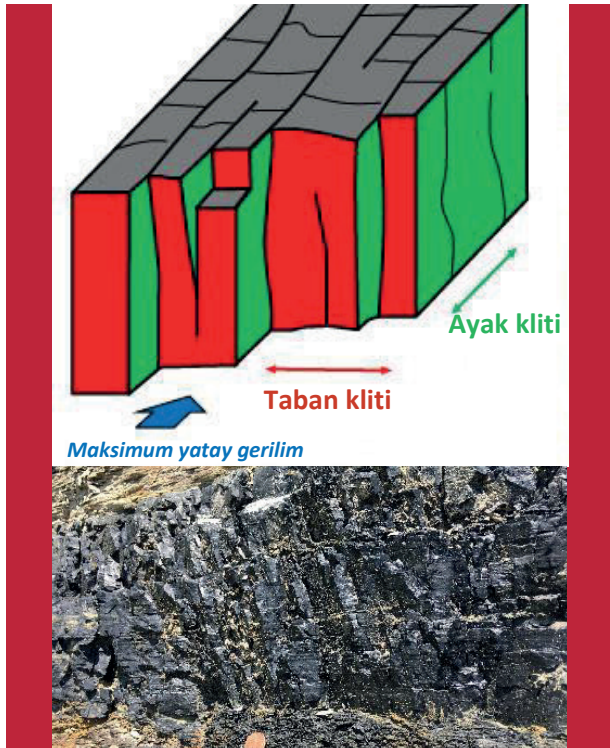
Sorbanın gözeneklerinin çapına bağlı olan bu katsayı, çeşitli kurallara tabi olabilir. Metanın mikro gözeneklerdeki kararsız hal (geçici) difüzyonu, deneysel tekniğin gerektirdiği sınır koşulları altında bir konsantrasyon (c) için ikinci Fick Yasası'nın çözümü ile ölçülmüştür.



Orijinal basınçtaki değişiklikler nedeniyle kömürdeki gaz adsorpsiyon/desorpsiyon dengesinin bozulması, gazın hareketine ve taşınmasına yol açar.

Kömürde gaz ve su akışı için sırasıyla birincil ve ikincil yollar olan yatay ve düşey çizikler (face and butt cleat) olacak şekilde iki tür çizik yapısı bulunmaktadır^[87]. Şekil 3.1'de görülebileceği gibi, iki klit seti genellikle karşılıklı olarak ortogonal veya neredeyse ortogonal durumda olup, esasen tabakalaşma yüzeylerine dik veya neredeyse diktir^[30]. Ayak klitleri yanal uzanımlı, dikey ve kömür damarı boyunca sürekli. Taban klitleri (bunlar da çoğu durumda dikeydir) süreksizdir ve Şekil 3.1'de gösterildiği gibi ayak kliti ile genellikle dik açılı bir kesişme noktasında sona erer. Klit aralıkları, kömürleşme derecesi ve damar kalınlığına göre değişiklik göstermektedir. Damar kalınlığı azaldıkça genellikle azalır. Ayrıca, alt bitümlüden orta ve düşük uçucu bitümlü kömüre ve antrasite uzanan kömürleşme derecesi arttıkça klit aralıkları azalır^[88]. Yerinde gerilme koşulları altında klitlerin açıklık genişlikleri, klit geometrisi ve sıvı geçirgenliğinin bir diğer önemli özelliğidir^[88, 30].

Klit sisteminden ayrı olarak, kömürde, tabakalaşma düzlemlerinde veya yüzeylerinde bulunan üçüncü bir bağlantı grubu vardır. Ancak, örtü katmanı ağırlığının uyguladığı yer çekimi ile ilişkili birincil gerilme nedeniyle, tabakalaşma düzlemleri/yüzeylerinin metan taşınımından sorumlu olması muhtemel değildir. Çoğu araştırmacı, gaz akışının yalnızca dikey ve dikeye yakın klit sistemi içinden gerçekleştiğini varsayar.



Şekil 3.1: Bir kömür matrisinde klit sistemi.

Bir klit ağına ulaşıldığında, akış viskoz hale gelir ve kömürün geçirgenliği tarafından kontrol edilir^[88]. Bu genellikle bir tabakalı akış süreci olarak kabul edilir ve aşağıdaki şekilde yazılabilecek Darcy Yasası'nı izler:

$$m = -F \frac{\rho k dp}{\mu dx} \quad (3.2)$$

Burada,

m	: Kütle akış hızı
k	: Görünür geçirgenlik
μ	: Gazın viskozitesi
dp/dx	: Hidrolik gradyan

Geçirgenliğin birimi m^2 'dir. Ancak, Darcy'nin eski birimleri (veya milidarcy, md) hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Darcy, dinamik viskozitesi 1 santipuz (0,01 cP=Ns/m²) olan tek fazlı bir akışkanı tabakalı akışta 1 cm³/sn hızında ve her bir cm² kesit alanından cm başına 1 atmosferik (101.324 Pa) bir basınç gradyanı altında geçiren bir ortamın geçirgenliğini tanımlamaktadır.

Metan, Fick Yasası'na göre matriste dağılırken, Darcy Yasası'na göre kömür klitlerinin içinden akar. Darcy Yasası, kırık aynasına tutunması nedeniyle akışkanın akışının viskoz olmasını gerektirir. Gaz akışında durum böyle değildir ve gaz, kırılma aynalarının yüzeyleri boyunca kaymaktadır.

Hem gaz kayması hem de kömür matrisinin büzülmesi olmak üzere iki farklı olgu, kömürün geçirgenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Matris büzülmesi ve gaz kayması sonucu basıncın azalmasıyla geçirgenlik önemli ölçüde artmaktadır^[88]. Gaz kaymasının etkisi, özellikle 1,7 MPa'nın üzerindeki gaz basınçları için matris büzülmesine kıyasla nispeten küçüktür. Gaz basıncı 1,7 MPa'nın altına düştüğünde hem gaz kayması hem de matris büzülmesinin etkileri önemli hale gelmektedir^[88]. Normal bırakma basıncı 1,0 MPa civarında olduğundan, gaz kayma bileşeninin geçirgenlik üzerinde önemli bir etkisi olmayabilir. Matris büzülmesiyle ilişkili geçirgenlik değişimi, kömür türü açısından sorpsiyon eş sıcaklık eğrilerinden tahmin edilebilir^[88].

Birbirine bağlı kırıklar, süzölmeye (infiltrasyon) benzer şekilde gaz difüzyonu, sızıntı ve gaz taşınımı için kanallar oluşturmaktadır. Kömürde makro gözenekler ve kırıklar yoluyla gaz taşınımı, Darcy Yasası'na, Fick Yasası'na veya bu yasaların birleşik bir biçimine uygun olarak gerçekleşebilir. Bu tür gözenekli ortamlarda gaz taşınımının analitik açıklamasını yapan makalelerin çoğunda, k geçirgenlik katsayısının kararlılığı varsayılır. Ancak, yukarıda sunulduğu gibi, iki başlıca denklem, akış yollarının (klitler ve gözenek yapısı) zaman içinde değişmeden kaldığını varsayar ki bu doğru değildir. Gazın tükenmesi sonucunda kömürün fiziksel yapısında bir

değişiklik olur ve bu da bu iki parametrenin değerlerini etkilemektedir. Dolayısıyla, maden ortamında salınan metan emisyonunu veya kömür damarından yakalanışını simüle etmek için bu parametrelere ilişkin doğru tahminlerin yanı sıra değerlerindeki değişimin bilinmesi de gerekir.

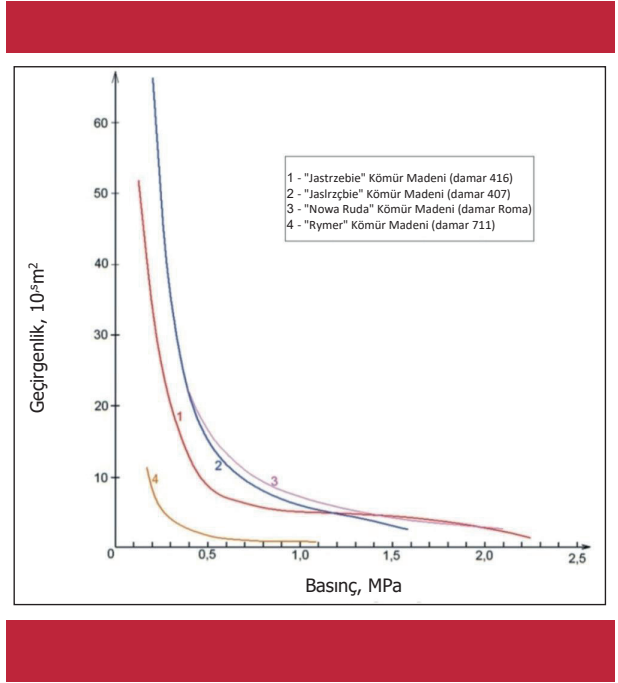
Kömürde gaz taşınımı, öncelikle kömürün ve klit ağının difüzyon ve geçirgenlik özelliklerine bağlıdır. Maden kazılarında salınan gaz emisyonunun gaz içeren tabakalar madencilik faaliyetleri bozulduğunda genellikle kömürün geçirgenliği tarafından kontrol edildiği varsayılır. Ancak kırılma bölgelerinde gaz difüzyonu, geçirgenliğin arttığı tavanmış tabakalarda belirleyici faktör haline gelmektedir. Bu nedenle, duruma bağlı olarak, difüzyon katsayıları olan D (m^2/sn) ve geçirgenlik k (m^2)'den biri veya her ikisi, kömürde gaz taşınımını ve gazın maden ortamında salınmasını etkileyen önemli parametrelerdir.

Anizotropik (birbirine dik yönlerde farklı davranan veya farklı özelliklere sahip olan) bir ortam olarak kömür, yatay ve düşey çizikler (face and butt cleat) tarafından gerçekleştirilen karakteristik kırılmalara bağlı değişken geçirgenliğe sahiptir (bkz. Şekil 3.1). Ayak klitleri sürekli ve uzun mesafeler boyunca uzanabilir ve bu durum da onları gaz akışı için daha geçirgen hale getirir. Taban klitleri kısa ve süresizdir ve genellikle ayak klitlerinde son bulmaktadır. Dikey geçirgenlik genellikle yatay geçirgenlikten ciddi oranda daha düşüktür. Bu nedenle kömür rezervuarlarında yatay geçirgenlik ve yönü daha önemlidir. Ancak, kömürde gaz akışı için ortalama geçirgenlik k_{av} şu şekilde tanımlanabilir:

$$k_{av} = \sqrt{k_x + k_y} \quad (3.3)$$

Burada ve klitlerin yönsel geçirgenlik katsayılarıdır.

Şekil 3.2'de, Polonya'da faaliyette olan kömür sahalarındaki birkaç damarda yapılan kömür geçirgenlik testlerinin sonuçları gösterilmektedir. Testler, sıkıştırma kuvvetlerine maruz kalan numuneler üzerinde yapılmış olduğundan bunlar *yerinde* koşulları ifade etmektedir. Testler, gerilmesi rahatlamış kömürün, klit ağının genişlemesi nedeniyle *yerinde* geçirgenlikten daha yüksek geçirgenlik katsayısı değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Numune üzerindeki basma gerilmeleri arttıkça geçirgenlik azalmaktadır. Gerilmenin 10 MPa'ya kadar artmasının geçirgenlikte 2-3 kat azalmaya neden olabileceği genel olarak kabul edilmektedir^[89, 90, 91]. Geçirgenlikteki değişiklik geri döndürülebilir bir olgudur. Gerilmenin rahatlaması, geçirgenlikte bir artışa neden olur ve bu da klitlerin elastik olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.2: Numunelere göre gerilmelere bağlı kömür geçirgenliliği^[23, 92].

Aslında, *yerinde* koşullardaki gaz hareketi olgusu çok daha karmaşık bir biçimde meydana gelir çünkü kömür yalnızca gaz taşınımının gerçekleştiği gözenekli bir madde değil, aynı zamanda adsorbe edilmiş metan da içeren bir maddedir. Desorpsiyon ve eş zamanlı gaz akışı olgusu hem mekanik olarak hem de enerji açısından yakından ilişkilidir. Darcy akış ve desorpsiyon modeli, termodinamik anlamda dönüşümlerdir. Gaz akış hızı, belirli koşullar altında desorpsiyon ve diğer koşullar altında kömür geçirgenliği ile belirlenebilir.

ABD, Güney Afrika ve Kanada'da kaydedilenler gibi yüksek geçirgenliğe sahip sığ damarlar, erişim ve yüzey operasyonlarından gaz çıkarma için iyi koşullar sunar ve dolayısıyla herhangi bir madencilik faaliyetinden önce erişime de olanak tanımaktadır. Daha fazla örtü derinliğine ve daha az geçirgenliğe sahip olan ancak daha yüksek yerinde gaz içeriğine sahip daha derin damarlar, yalnızca madencilik faaliyetlerine maruz kaldığında büyük miktarlarda gaz açığa çıkarmaktadır^[93].

Su geçirgenliği ideal olarak doğrudan kömür damarlarında ölçülmekle birlikte, göreceli gaz geçirgenliği genellikle maden ocaklarından veya sondaj kuyularından alınan kömür karot numuneleri üzerinde belirlenir. Kömür damarındaki geçirgenlik, dünyadaki kömür havzalarında oldukça değişken olup $10^{-18} - 10^{-13} m^2$ (0,001 ila 100 mD) arasında değerler kaydedilmiştir^[54]. Kömürlerin geçirgenliği hakkında daha fazla bilgi ilgili çalışmalarda bulunabilir. Test sonuçlarının, kömürlerin sıvılar (örneğin su) veya gazlar (hava için farklı, gaz için farklı değerler) için geçirgenliğini ifade edip etmediğine dikkat edilmelidir. Söz konusu değerler, bu akışkanların viskozitesi ve yoğunluğu ile ilişkilidir.

3.1.2. Madencilik Faaliyetlerinin Metan Emisyonuna Etkisi

İlk (yerinde veya bakir) gerilme durumunda kömür geçirgenliği tanımlanmış olup, önceki bölümde sunulan parametrelere bağlıdır. Düşük geçirgenliğe sahip kömürler, metan içeriği ve gözenek basıncından bağımsız olarak, uyarılma (yani, kömürün hidrolik çatlaması) olmaksızın düşük gaz emisyonlarına neden olmaktadır. Ayrıca, kırıkların oluşmadığı ve daha sonra yayıldığı durumlarda, gaz taşınımı açısından çevredeki kayaç katmanlarının geçirgenliği doğal olarak kömürün kendi geçirgenliğinden daha düşüktür (içeride klit ağları olmadığından). Dolayısıyla, açığa çıkan metan miktarı, hazırlık ve madencilik aşamalarında gerçekleştirilen madencilik faaliyetlerinin kapsamı ve ölçeği ile yakından ilişkilidir. Madencilik faaliyetleri, saha gerilmelerinin mevcut durumunu bozar ve etkilenen kömür içeren tabakaların yapısal özelliklerinde değişikliklere neden olmaktadır. Connell (2016)^[94], gerilmelerdeki bir değişikliğin, kömür ve kayacın farklı derecelerde deformasyonuna, gözeneklilikte değişikliğe ardından da geçirgenlikte değişikliğe yol açacağını belirlemiştir. Tabakalardaki deformasyon süreçlerinin etkisi, kayaç kütesinin mekanik özelliklerini belirgin şekilde değiştirir ve mikro ile orta ölçekli alanlarda meydana gelir^[94, 1].

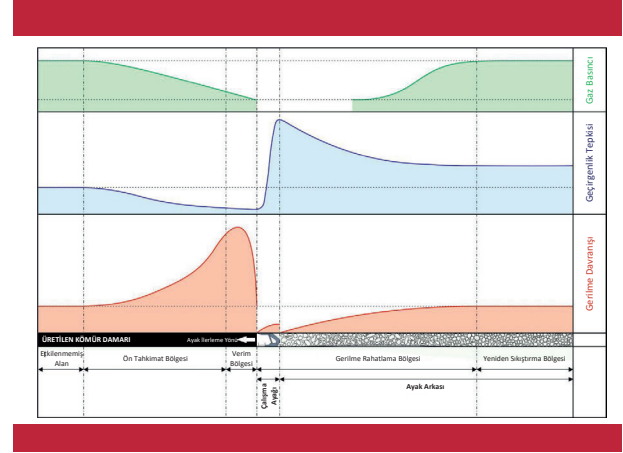
En yüksek gaz emisyonlarının, uzunayak sistemleri aracılığıyla kömür çıkarıldığında meydana gelmesi beklenmektedir. Uzunayak madenciliği, boşluktaki büyük ölçekli değişikliklerin ve yer değiştirmenin öncelikle mikro kırıkların oluşumunu etkilediği geniş bir alanda gerçekleştirilen karmaşık ve dinamik bir süreçtir. Mikro kırıklar, karakteristik kırılma süreci bölgeleri ile açılır ve gelişir. Birbirine bağlı kırıklar ve açık çatlaklar sistemi, gaz taşınımı için devamlı kırıkları oluşturmaktadır.

Açığa çıkan gazın hızı ve miktarı, kömür üretim hızına, üretilen kömür damarı ve diğer gaz taşıyan tabakalardaki geçirgenliğe, ilk gaz içeriğine ve taban ile tavan tabakalarının gevşeme bölgelerinin sınırlarına ve boyutuna bağlıdır. Uzunayakta üretim ilerledikçe, tabakaların gaz geçişi için önemli ölçüde gevşediği bir gerilme rahatlatma bölgesi ayırt edilebilir. Gevşeme bölgesi doğal olarak kırılmış bir bölge olmakla beraber, sıkıştırılmış bölgede kırılmalar meydana gelebilir. Gevşeme bölgesi, çok damarlı madencilik için gerilme rahatlatma bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Bu konularla uğraşan birçok araştırmacı, gerilme rahatlatma yerine basınç rahatlaması kavramını benimsemiştir. Basınç rahatlamasının büyüklüğü ve kırık bölgenin boyutu, üretilen kömür damarının jeolojik özellikleri ve kalınlığı, kömür içeren tabakanın mukavemeti ve bitişik yollara sahip maden kazı yerlerinin geometrisi ile ilişkilidir.

Mekanize uzunayak panosu ile aşamalı bir kömür çıkarma işleminin, çevredeki tabakalarda kırılma bölgelerinin oluşturularak kömür kökenli gazın salınmasına ve geçişine imkân tanınmasına nasıl tepki verdiğini anlamak için son yıllarda kapsamlı çalışmalar yapılmıştır^[95, 96, 97, 98, 99, 1, 14, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108].

Şekil 3.3'te, Durucan'ın (1981)^[97] ilerleyen bir uzunayak etrafındaki geçirgenlik dağılımı ve ilgili gaz akışı için modeller türetmesinden sonra genel olarak bilinir hale

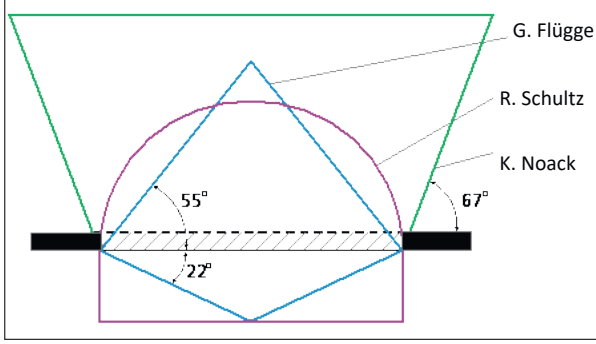
gelen, ayak ilerleme yönü boyunca gerilme rahatlatma ve geçirgenlik dağılımı sunulmaktadır^[104].



Şekil 3.3: İlerleyen bir uzunayakın boyuna kesiti: Uzunayak kazıları etrafındaki tabaka gerilmesi ve geçirgenlik davranışı (Whittaker (1974) ve McPherson (1975)'ten alınıp değiştirilmiş ve derlenmiştir)^[109, 105].

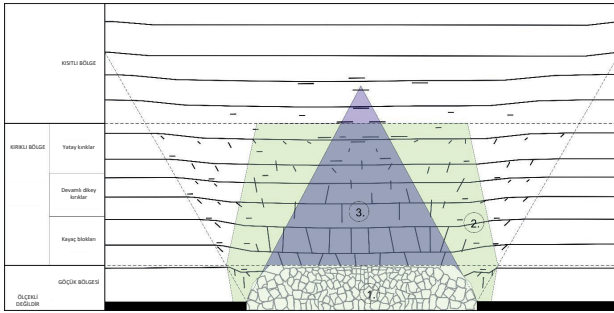
Şekil 3.3'e bakıldığında, ayak önünde, gerilmenin basma gerilmesi şeklinde olduğu ve ayağa doğru arttığı varsayıldığı yerde “ön dayanma bölgesi” bulunmaktadır. Bu bölgede kömür damarlarının geçirgenlik değerleri, yüksek dayanma basınçlarından dolayı çok düşüktür. McPherson (1975)^[109], ayak önündeki gerimli bölgede mikro kırılmalar meydana gelse bile kömür damarının geçirgenliğinin bu bölgede azalacağını öne sürmüştür. Mikro kırılmanın etkisi, kömür içindeki birbirine bağlı gözeneklerin kısmen kapanmasına neden olmaktadır. Bu etki zaten düşük olan geçirgenliğin daha da azalmasına neden olur. Aynanın 3 ila 5 metre önünde, gerilmenin maksimum değerine ulaştığı ve daha sonra azalarak kömür damarının kırılmasına ve parçalanmasına neden olduğu kabul edilir. Geçirgenliğin önemli ölçüde arttığı bu bölge ‘parçalanma bölgesi’ olarak bilinir. Kömür damarlarının geçirgenliği parçalanma bölgesinde artmaya başlamaktadır.

Uygulanan uzunayak madenciliği nedeniyle bozulan, örtü katmanında bulunan birleşmiş tabakaların kırılma bölgesini tanımlayan model uzun bir süre araştırılmıştır. Bu araştırmalarda formüller, matematiksel modeller ve laboratuvar ve simülasyon deneyleri kullanılmıştır. Bu amaçla jeomekanik ortamda sayısal modelleme ve bu ortamda metan taşınımını tahmin etmeye yönelik CFD modellemesi kullanılmaktadır. Bölgelerin belirlenmesi hakkında daha fazla bilgi [110] nolu kaynak içinde bulunabilir. Şimdiye kadar ayak üzerinde ve ayak arkası boyunca farklı kırılma bölgesi şekilleri dikkate alınmıştır. Şekil 3.4'te 20. yüzyılın yetmişli yıllarında Almanya'da ele alınan uzunayakın etrafındaki gaz emisyon bölgesinin şekilleri verilmiştir. Flügge tarafından önerilen bu bölge belirleme yöntemi başta Polonya olmak üzere Avrupa'daki kömür havzalarında popüler hale gelmiştir.



Şekil 3.4: 1970'lerde Almanya'da kabul edilen uzunayak etrafındaki gaz emisyon bölgesinin şekilleri. ([111] ve [112] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).

Aktif uzunayak arkasının üzerindeki tabaka gevşemesi, özellikle gaz akışı açısından çatlak davranışına neden olur. İlerleyen bir uzunayağın enine kesiti göz önüne alınarak, kayaç deformasyonu ve kırılmasının derecesine göre üstteki tabakalarda üç farklı bölge belirlenmiştir. Göçük bölgesi, kırılma bölgesi ve sürekli deformasyon bölgesi [113, 114, 115]. Ayrıca, temeldeki kaybin gerilme durumu da uzunayak madenciliğine kıyasla daha az derecede ve ölçüde olsa da etkilenmektedir. Bu özel bölgelerin aralıkları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

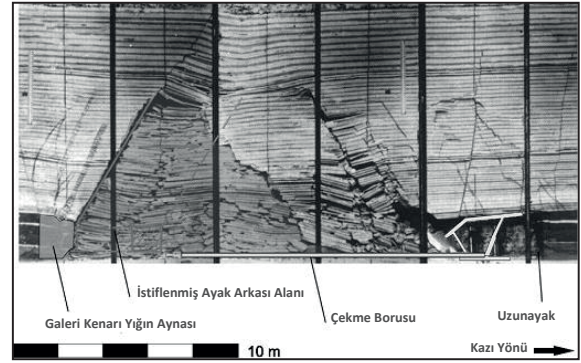


Şekil 3.5: Forster'in modeline göre değiştirilmiş, bir gazdan arındırma bölgesi olan uzunayak göçük bölgesinin üzerindeki tabaka deformasyonu ([113, 114, 115] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir). 1. Göçük alanı, 2. Büyük toplu geçirgenliğe sahip ancak yatay kırıkların çoğunlukta olduğu gevşeme alanı, 3. Büyük olasılıkla dikey geçirgenliğe sahip, devamlı dikey kırıkların çoğunlukta olduğu gazdan arınma alanı.

Göçük bölgesinde, çökmüş yalancı tavanın düzensiz örüntüleri arasındaki kırıklar (boşluklar) birbirine bağlıdır. Bu yalancı tavan bölgesinin yüksekliği, tipik bir göçük

alanı için ayak yüksekliğinin 3 ila 10 katı olup, bu rakam, tabakanın niteliğine bağlı olup istiflenmiş ayaklarda daha azdır^[91]. Bu bölgede oluşan boşluklar, tavanın aniden düşmesi veya göçmesi anında barometrik basınç nedeniyle kazı yerlerine ve yollara doğru gaz salındığı bir kömür kökenli gaz rezervuarı oluşturur.

Göçük bölgesi üzerinde, bazen bozulmuş bölge olarak adlandırılan ve kayaç bloklarının, devamlı düşey kırıkların ve yatay kırıkların tabakalaşma katmanı ayrılmasından kaynaklandığı kırıklı bir bölge vardır (Şekil 3.6). Bu bölge araştırmacılara göre iki veya üç alt bölgeye ayrılır^[116, 117, 115, 100, 118, 91, 119, 120, 121].



Şekil 3.6: Uzunayak madenciliği operasyonları sırasında jeolojik CO₂ depolama ile zemin çökmesinin azaltılması^[122].

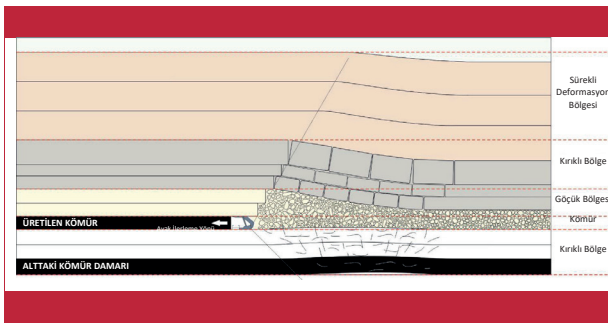
Kırılma bölgesinin alt kısmında kayaç katmanları, yatak ayrılmasından dolayı dikey kırıklar ve yatay kırıklar tarafından bloklara ayrılmaktadır. Her kırık kayaç katmanındaki bitişik bloklara, dikey kırıklar boyunca tamamen ya da kısmen temas edilir. Birbirine bağlı kırıklar, madende çalışma bölgeleri ile bağlantılı olabilen ve bu nedenle metan drenajı için kullanılabilir bir kanallar sistemi oluşturmaktadır. Kırıklı bölgenin orta kısmında, yatak ayrılmasından kaynaklanan yatay kırıklar da bulunurken (kayaç tabakası arayüzleri), devamlı dikey kırıkların sayısı kırıklı bölgenin alt kısmında olduğundan daha azdır. Kırıklı bölgenin alt ve orta kısımlarında yatay ve dikey devamlı kırıklar da birbirine bağlıdır. Bu nedenle, göçük bölgesinin ve kırıklı bölgenin alt ve orta kısımlarının toplam kalınlığı, birbirine bağlı kırıkların olduğu bölgenin yüksekliğini teşkil etmektedir (Şekil 3.5). Üçüncü alt bölgede, devamlı kırıklar oluşturan dikey kırıklarla birleştirilmesi gerekmeyen yatay kırıkların baskınlığı söz konusudur. Bu alt bölgede bulunan kömür damarları, sondaj kuyuları veya yollar gibi galeriler olması koşuluyla gaz taşınımı için geçirgen hale gelebilir.

Kırıklı bölgenin kalınlığı büyük ölçüde değişiklik gösterir ve kayaç tabakalarının mekanik özelliklerine, örtü katmanının kalınlığına ve uzunayak panosunun boyutuna bağlı olarak, örtü katmanının çıkarılan kömür damarı yatağının yüksekliğinin 20 ila 100 katı arasında olabilir^[111, 123, 121].

Kırıklı bölgenin üzerindeki bölge, büyük dikey kırılmaların olmadığı, sürekli deformasyon bölgesi olarak bilinen kısıtlı bölgedir. Sarkan tabakaların birbirinin yanından kayması nedeniyle bu bölgede yatay kırılma düzlemleri harekete geçebilir. Ancak katmanların sarkması azaldıkça bu yer değiştirmelerin büyüklüğü de azalır. Bu alanların geçirgenlikleri genellikle sabit kalır ve kazı yerlerine doğru çok az gaz akışı olmaktadır.

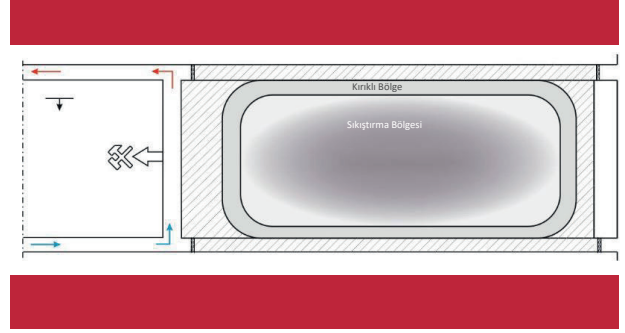
Uzunayak madenciliği alanı boyunca kayaç hareketi bölgelerinin boyutu önemli ölçüde değişiklik gösterebilir.

Ayağın ilerleme yönünün uzunlamasına kesiti (Şekil 3.7) göz önüne alındığında, büyük bir kömür bloğu çıkarıldığında, üretilen kömür yatağının kalınlığının üç ila altı katı olan yalancı tavan geniş ölçüde kırılır ve maden boşluğuna düşerek ayak göçük bölgesi oluşturur. (Referanslar aynı şekilde kalacak ^[115, 119]. Çökme bölgesi, boyutu en yakın tavanın jeomekanik parametrelerine bağlı olan uzunayağın etki alanına ayrılabilir. Bir de uzunayaktan kaçan havanın geçebileceği bir ayrılma alanı vardır. Bu bölgeler, örtü tabakasıyla birlikte, açığa çıkan kömür kökenli gaz için özellikle gözenekli bir bölge oluşturmaktadır. Bu bölge, gerilim rahatlatma bölgesine karşılık gelir ve diğer araştırmacılar tarafından basınç rahatlatma bölgesi olarak tanımlanır. Bu iki bölgenin ötesinde bulunan ayak arkasının devamında, gerilme dağılımı çok karmaşıktır, ancak genel olarak ayak yönü hattında, ayak arkası içindeki mesafe arttıkça gerilmenin ilk yerinde gerilmeye kadar arttığı söylenebilir. Örtü yükü yeniden stabilize edildiğinde, ana gerilmelerin üç eksenli sıkıştırma şeklini aldığına ve bu bölgede gözeneklilik ve geçirgenliğin giderek azaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle, bu alan göçükte kalan kömürün ve tavan kayaçlarının kademeli olarak sıkıştırıldığı "yeniden sıkışma bölgesi" olarak bilinmektedir.



Şekil 3.7: Örtü katmanı ve alt katmanda farklı gerilme rahatlatma bölgelerinin şematik diyagramı ([124] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).

Bakir bir yassı damardaki tek bir uzunayak panosu için, göçük bölgesi ile kırıklı bölgenin sınırındaki kırılma alanının düzlemsel konumda halka şeklini aldığı varsayılmaktadır. (Şekil 3.8). Kırılma bölgesinin dikey açıları göz önünde bulundurulduğunda bu şekil yukarıya doğru aktarılabilir^[125].



Şekil 3.8: Kömür kökenli gaz birikimi olan halkasal kırılma alanı ([125] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).

Sonuçlar, geçirgenliğin ayak arkasının kenarlarına ve köşelerine yakın yerlerde en yüksek seviyede olduğunu göstermiştir.

Zemin tabakalarındaki kırıklar, tavan kırıkları kadar incelenmemiştir. Uzunayağın önündeki gerilme yoğunlaşmaları birincil zemin göçmesine neden olurken, ikincil göçme, gerilmenin yeniden dağıtılması ve yer değiştirmesi olarak meydana gelir ve ayak hattında veya arkasında zemin kabarması gerçekleşir^[126]. Saha gözlemleri, iki farklı zemin kırığıyla ilişkili iki ana zemin göçmesi tipini göstermiştir^[127]: (a) Yatay kırıklara neden olan, zemindeki tabakalaşma düzlemleri boyunca kayma göçmesi ve (b) uzunayak kalkan desteklerinin önünde, uzunayağa paralel neredeyse dikey kırıkların oluşumu. Ayrıca saha gözlemleri, zemindeki dikey çatlakların göçme bölgesi boyunca gaz geçişinde baskın bir rol oynadığını göstermiştir.

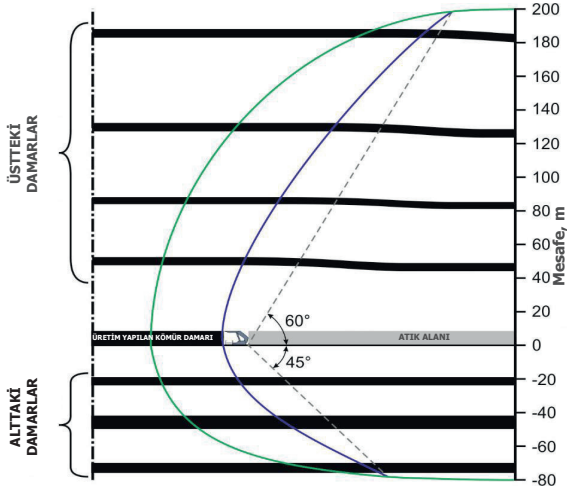
Ayağın arkasında, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, olası maksimum geçirgenlik noktaları kazı bölgesi üzerinde ve altında sırasıyla 60 ve 45 derecelik açılardaki hatlar boyunca uzanır. Pek çok araştırmacı, tabakaların yapısına göre bu açıların 50-70° ve 40-50° aralığında olabileceğine işaret etmektedir (Şekil 3.9). Bazı araştırmacılar belirli damarlar için daha büyük açılar bildirirse de^[128, 129], bunlar çoğu zaman kömür damarının doğrultu açısından kaynaklanır. Kazı yerlerine akan gazın büyük bir kısmının, geçirgenliğin çok yüksek olduğu bu noktaların ardındaki alanlardan gelmesi beklenir.

Gerilme rahatlatma bölgesinin dikey aralığı tabaka yapısına bağlıdır. Çalışma alanının 100 m'den daha fazla yukarıdaki ve 40 m altındaki mesafelerde bulunan kömür damarlarının gerilme bozulmalarından fazla etkilenmesi beklenmemektedir. Avrupa'da yapılan çalışmalar^[60, 130, 131], içinde gazın salındığı gerilmemiş bir kemer veya bozulma bölgesinin uzunayağın üzerinde oluştuğunu, tabakaların farklı litolojik ve geometrik özellikleriyle tipik olarak tavanın içine doğru 160 m ila 200 m ve uzunayağın altındaki kadar yaklaşık 40 m ila 70 m kadar uzandığını göstermiştir (Şekil 3.9).

Ayak uzunluğunun 250 m'den az olduğu bakir tabakalarda, tavadaki gerilmemiş bölge 200 m kadar yüksek olmayabilir^[131]. Müdahale edilmiş bölgeleri

etkileyen yerinde gerilim, tabakaların litolojik, fiziksel ve geometrik özellikleri, kayaç katmanlarının eğimi ve yüzey topografyası gibi başka faktörler de bulunmaktadır.

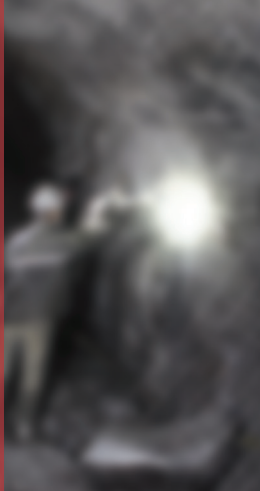
Kırıklı bölgelerin ve basınç rahatlatma bölgelerinin belirlenmesi hakkında daha fazla bilgi [132, 10, 133, 134, 129, 58, 135, 136, 137, 126, 138, 139, 140, 141] nolu kaynaklar içinde bulunabilir.



Şekil 3.9: Çalışan bir uzunayağın etrafındaki gerilme rahatlatma bölgeleri ([97] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).



Basınç tahliye bölgesini belirlerken kömür damarlarının ve kaya katmanlarının eğimini ve önceki madencilik faaliyetlerinin etkisini göz önünde bulundurun.



Özetle, üretilen bir uzunayağın etrafındaki tabakaların geçirgenliği, madenciliğin neden olduğu gerilme değişimlerinden etkilenmektedir. Böylece kömür damarlarında gözeneklerden akış performansında değişiklikler meydana gelmektedir. Kırık kümelerinin ve sistemlerinin oluşumu ve yayılımı, deformasyon olaylarına karışan kayaçların neden olduğu stratigrafi ve petrografiye önemli ölçüde bağlıdır. Örtü katmanı ve alt katmanların mekanik yapı değişimi, yerinde gaz basınçları ile maden atmosferi arasındaki basınç gradyanında artışa neden olan kırık oluşumu ve geçirgenlikteki değişiklikleri

belirlemektedir^[1]. Kömür taşıyan tabakaların geçirgenliğini belirleyen gerilme rahatlatma bölgesi, ana belirleyici faktör olarak kabul edilir ve kazı yerlerine ve bitişik yollara metan geçişi için kapsamlı yollar sağlamaktadır^[142]. Bu arada gerilme ve yer değiştirmedeki değişikliklerle geçirgenlik de değişiklik göstermektedir^[143]. Dolayısıyla, basınç rahatlatma bölgesinin boyutunun bilinmesi, metan çıkışı veya metan yakalama konumlarını tahmin etmek için önemlidir. Yukarıdaki teorik hususlar, bakir bir kömür sahasındaki yeni bir uzunayak panosu için geçerlidir. Ancak, önceki madencilik faaliyetlerinin etkisinin olması ve maruz kalmış tabakalarda eski göçük bölgelerinin olması durumunda, kömür sahasının bu bölümünde yeni madencilik faaliyetleri tasarlanırken ayrıntılı bir jeomekanik analiz yapılmalıdır.

3.1.3. Çalışma Ortamına Salınan Metan Emisyonunun Tahmini

Bir madende metan patlaması riskini kontrol etmek ve kabul edilebilir bir seviyede tutmak için kömür damarının gaz emisyonu özelliklerinin bilinmesi gerekir. Ayrıca, kömür matrisinde ve kırıklarda gaz taşınımına dair bilgiler, madencilik faaliyetleri sırasında gaz içeren tabakalardan ocaktaki hava yollarına salınan gazın tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Açığa çıkan gaz miktarına emisyon denir. Emisyon, birim zamanda salınan gaz miktarı olarak ifade edilir ve mutlak emisyon olarak adlandırılmaktadır. Özgül gaz emisyonu, madencilik faaliyetleri sonucunda ve bir ton kömürün üretilmesiyle ilgili olarak tüm gaz kaynaklarından (üretilen damar, bitişik damarlar, gaz içeren tabakalar) yeraltı kazı alanlarına salınması beklenen gaz miktarıdır.

Planlama amacıyla, uygun tahmin yöntemleri kullanılarak ve doğal kaynaklardan yeraltındaki kazı alanlarına salınacak ve/veya drenaj sistemleri tarafından yakalanacak gaz miktarı hesaplanarak, gaz emisyonunun büyüklüğü ve yakalanacak gaz miktarı değerlendirilebilir. Tabakalar içindeki gaz kaynakları, tüm yerinde adsorbe edilmiş ve 'serbest' gaz miktarlarını içerir. Birinci bölümde belirtildiği gibi, adsorbe edilen gazın (desorbe edilen gaz) sadece bir kısmı yeraltındaki kazı alanlarına veya drenaj sistemlerine salınabilir. Artık gazın salınamayacağı varsayılır.

Tüm desorbe edilen ve serbest metanın salınabilmesi için, madencilik faaliyetleri nedeniyle gevşemiş tabakalarda uygun geçirgenlik ve gaz geçiş ağlarının oluşması gerekir. Bu koşullar, madencilik faaliyetlerinin türüne, tabaka gevşeme bölgelerinin sınırlarına ve boyutuna ve yerinde gaz basıncı ile havalandırma veya drenaj basıncı koşulları arasındaki fark basıncına bağlıdır.

Madencilik faaliyeti sırasında metan emisyonu karmaşık bir olgudur. Metan kaynakları belirlenebilse de, metan emisyonunun tahmini zordur ve birçok faktöre bağlı olabilir. Faktörlerin bir kısmı araştırmacılar tarafından geliştirilen katsayılar kullanılarak tahmin edilebilirken, bir kısmı ise ancak yerinde uygulamalı verilere dayalı olarak belirli bir olasılıkla tahmin edilebilmektedir.

Hazırlık çalışmaları sırasında sürülen galerilere ve sürülen

galerilere ve uzunayaklara salınan uzunayaklara salınan metan emisyonlarını tahmin etme yöntemlerinde farklı faktörler dikkate alınır. Sürülen galerilerde metan salım kaynakları, ayakta ve yeni çıkarılmış kömürün taşınması sırasında kömürden salınan emisyonlarla ve bir galerinin ayna ve yan duvarlarında açıktaki kömür yüzeyinden salınan emisyonlarla ilgilidir. Bitişik kömür damarlarından veya gaz içeren tabakalardan kaynaklanan metan akışı, üretilen galeri etrafındaki küçük gevşeme bölgesi nedeniyle genellikle dikkate alınmaz. Galerilere metan salımının tahmin edilmesi hakkında daha fazla bilgi [1] nolu kaynak içinde bulunabilir.

Madencilik nedeniyle etkilenen tabakalar tarafından önemli ölçüde küçültülen gevşeme bölgesi nedeniyle, çalışma işyerlerine salınan metan emisyonlarının tahmini farklı görünür. Uzunayak yöntemiyle kömür çıkarma işlemi sırasında hem aynaya hem de bitişik galerilere metan salınmaktadır. Pik gaz salınımları, bir uzunayak arınında üretim ve ve tavan göçmesini takiben madenin dönüş hava yollarında meydana gelir. Üretilen damardan ve kömür içeren tabakalardan kömür kökenli gaz salımı ve akış mekanizmaları bir önceki bölümde sunulmuştur.

Bir uzunayak bölgesinde havayoluna salınan tahmini metan emisyonu değerleri, madencilik faaliyetleri sırasında güvenliği sağlamak için önemlidir. Havalandırma bölgesine verilmesi gereken hava miktarlarını belirlemek açısından dayanak teşkil etmektedir. Bazı durumlarda, yeni bir maden sahasında havalandırma şebekesi tasarlanırken göz önünde bulundurulur veya uzunayak alanında yardımcı havalandırma sistemlerinin seçilmesi yoluyla uygun önleme yöntemlerinin belirlenmesinde ve izleme sistemlerinin planlanmasında kullanılırlar. Tahmin edilen metan emisyonunun, kabul edilebilir metan konsantrasyonlarının güvenliğinin havalandırma seyreltmesiyle garanti edilemeyecek kadar yüksek olması durumunda tahmini emisyonlar aynı zamanda bir metan drenaj sisteminin tasarlanması için de kullanılır.

Metan emisyonunun tahmini, yakın gelecekteki birkaç gün veya hafta gibi değişken bir dönemi kapsayabilir. Öngörülen metan emisyonları, günlük üretim hacmi veya vardiyalar sırasında madencilik operasyonlarının ilerlemesindeki değişkenlikle ilgili olabilir. Yöntemlerde, üretilen damardan metan salımı dikkate alınır, ancak uzunayak madenciliği operasyonu alanındaki hazırlık çalışmalarına salınan emisyonlar da hesaba katılabilir. Maden kazılarına metan salımına ilişkin tahminler aşağıdakilere dayanmaktadır:

- Ampirik modeller^[144, 145, 146],
- Simülasyon modelleri^[147, 148],
- Kısa dönem tahmin modelleri (sözde gerçek zamanlı)^[149, 67, 150],
- Metan kontrolüne yardımcı olan bilgisayar yazılımları (gerçek zamanlı çalışan ve madenin izleme sistemleriyle entegre)^[151, 152, 153].

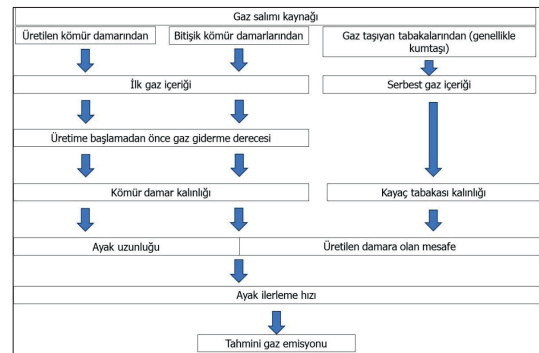
Ampirik model en yaygın olanıdır çünkü geçerliliği dünya genelinde belirli kömür havzaları ve hatta kömür yataklarının koşullarında doğrulanmış formüllere dayanmaktadır.

Diğer metan emisyonu tahmin yöntemleri genellikle münferit vaka incelemelerine göre uyarlanır. Ampirik yöntemlerin her birine ilişkin gerçek sonuçların elde edilmesi için gerekli koşullar şunlardır:

- Madencilik faaliyetleri kaynaklı tabakaların basınç rahatlama ve gaz emisyon bölgeleri aralığının uygun şekilde belirlenmesi,
- Uzunayak panosunun tasarlanan uzunluğu üzerinde üretilen damarın metan içeriğinin doğru olarak belirlenmesi,
- Gaz emisyon bölgesi kapsamında yer alan üst ve alt kömür damarlarının metan içeriğinin uygun şekilde belirlenmesi.

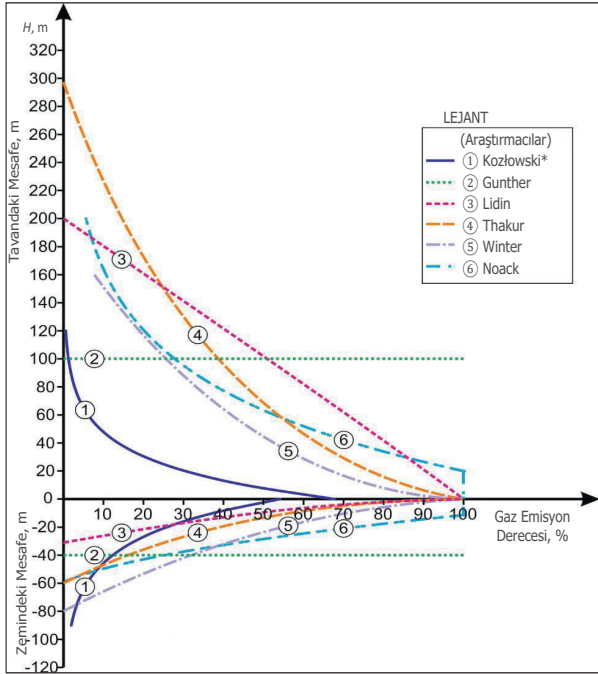
Daha önce bahsedildiği gibi, yalnızca desorbe edilen ve serbest gaz maden kazı yerlerine geçebilir. Ancak, kayaç katmanlarında, serbest gazın katkısı büyük ölçüde kayaç özelliklerine (esas olarak gözeneklilik ve bağlantılılık), tabakaların gevşeme derecesine ve yerinde gaz basıncı ile maden havalandırma sistemi basıncı arasındaki fark basıncına bağlıdır. Basınç rahatlama bölgesi, gazın tüm gaz kaynaklarından, ayak arkası alanları da dahil olmak üzere yeraltındaki kazı alanlarına akmasına olanak tanımaktadır. Gaz akışının yoğunluğu, tabakaların gevşeme derecesine ve büyük ölçüde bitişik tabakalardaki kayaçların tipine ve mukavemetine bağlıdır. İlerleyen uzunayak panosunun etrafındaki basınç rahatlama ve gaz emisyon bölgelerinin belirlenmesi önemlidir. Makul derecede homojen stratigrafi koşullarında madencilik yapılırken, uluslararası düzeyde kabul görmüş yöntemler kullanılarak, basınç rahatlama bölgesi makul derecede doğru bir şekilde belirlenebilir. Jeolojik veriler ve gazlılık verileri de mevcut olmalıdır. Ancak, tektonik koşulların yanı sıra tabakaların sahip olduğu homojen olmayan ve tamamen izotropik nitelik, jeolojik koşullarda önemli değişikliklerin olduğu alanlarda madencilik yapılırken ortaya çıkan gazlılık seviyesinde beklenmeyen değişikliklere neden olabilir. Geliştirilen kömür sahalarında yapılan jeolojik keşif, metan emisyonlarına ilişkin tahminlerin dayanağı olmalıdır.

Şekil 3.10'da, çeşitli jeolojik koşullar ve madencilik koşulları için uzunayak faaliyetleri sırasında metan emisyonu kaynaklarına yönelik bir akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Metan emisyonu-uzunayak üretim çalışmalarında akış şeması.

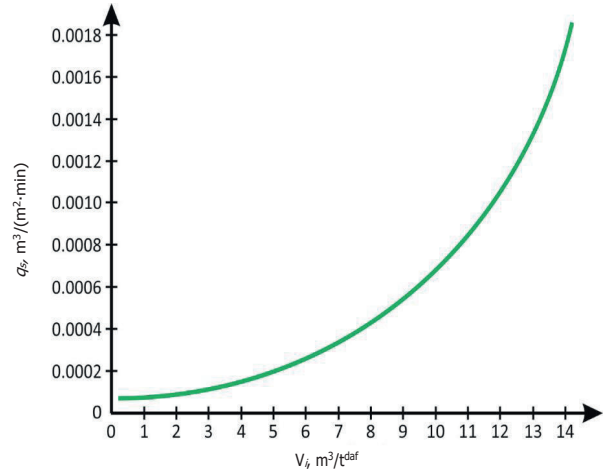
Tahmin modellerinde kullanılan ampirik ilişkiler çoğunlukla kazılmış olan damar kaynağıyla ilişkilidir. Genellikle kömürde bulunan metan miktarının salım oranını (kömür damarının gazdan arındırılma derecesi), ayak emisyonu katsayısını, kömür üretim katsayılarını (çıkarılan kömürden salınan gazın zaman ve üretim seviyeleriyle ampirik ilişkisi) ve düzensizlik emisyonu katsayısını içerirler. Üstte ve altta uzanan kömür damarlarının gaz giderme derecesi, jeolojik koşullara ve belirlenen kömür çıkarma yöntemine bağlı olarak, genellikle madencilik nedeniyle meydana gelen bozulmaların bir fonksiyonu olarak verilir. Farklı araştırmacılar tarafından bakır kömür sahalarındaki uzunayak panolarında yer alan gaz emisyon bölgelerinin derecelerine dair yapılan en yaygın tespit Şekil 3.11'de verilmiştir. Ancak bunlar gaz emisyon bölgesinde yer alan kömür damarlarının gaz giderme katsayısı değerleridir^[145, 146]. Bu profiller, Avrupa'daki kömür sahalarının koşulları için geçerli olmakla beraber, tüm koşullar için geçerli olup olmadığı açık değildir. Karacan ve Goodman^[99], Kuzey Appalaşya kömür havzası açısından doğrulanmış çeşitli parametrelere dayalı olarak gaz emisyon derecesini tahmin etmeye yönelik olasılıksal bir yöntem göstermektedir^[99]. Bunlara ek olarak, üstte ve altta uzanan formasyonlardaki bilinmeyenlerle ve bunların madencilik nedeniyle meydana gelen bozulmalara nasıl tepki verebileceğiyle ilgili olarak her daim bir miktar belirsizlik mevcuttur^[54].



Şekil 3.11: İşlenmemiş kömür sahalarındaki uzunayak panoları için gaz emisyon bölgelerinin derecesi.

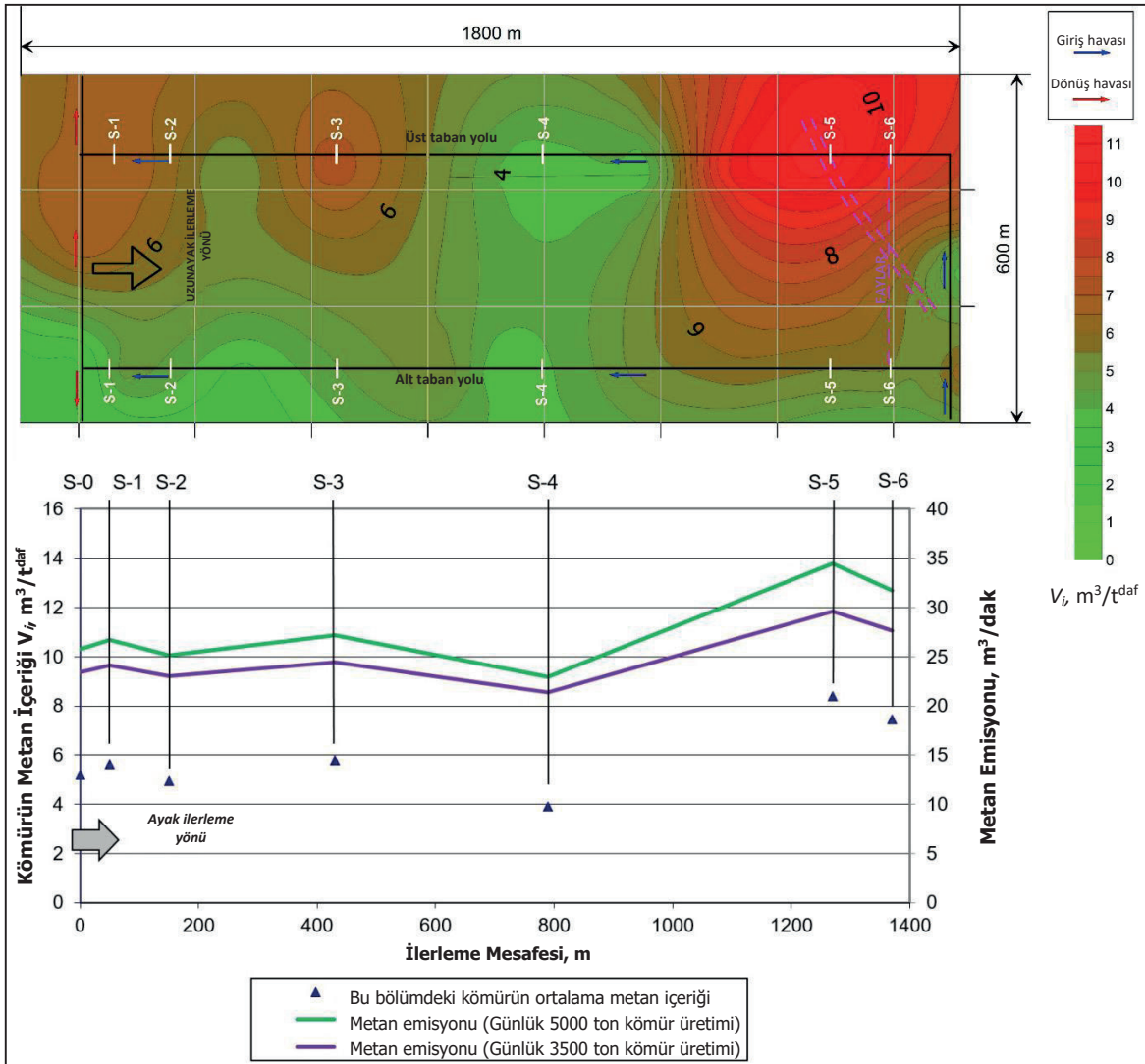
* Kozłowski tarafından geliştirilen metod içinde bağıl mesafe indeksi (üretimi yapılan kömür damarı kalınlığına bölünerek metre cinsinden elde edilen bir boyutsuz bir endekstir) kullanırken diğer araştırmacılar gerçek mesafeyi kullanmışlardır.

Çeşitli emisyon yöntemlerinde veya modellerinde birçok katsayı ampirik olarak geliştirilmiştir^[145, 146]. Bu katsayılar genellikle 100 ila 300 m'lik ayak uzunlukları için verilir. Örneğin, Polonya madencilik endüstrisindeki metan salımı tahmin edilirken, yüzeyin 1 m²'si ile ilişkili olarak açık kömür yüzeyindeki birim metan salımının bağımlılık oranı kullanılır. Bu ilişki, kömürün başlangıçtaki metan içeriği veya açıkta kalma süresi ile ilgili olabilir^[154]. Birim metan emisyonunun bir örneği Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Kömür metan içeriğinin (V) bir fonksiyonu olarak açıkta kalan kömür yüzeyinden birim emisyon (q_s) [92].

Kazılmış damardaki metan içeriğinin değişkenliğinin hesaba katılması büyük önem taşımaktadır. Bölüm 1'de gösterildiği gibi, bir damardaki hazırlık çalışmaları sırasında kömürün metan içeriğinin kontur haritasının çizilmesi iyi bir uygulamadır. Birbirinden herhangi uzaklıkta bulunan birkaç enine uzunayak kesiti için tahmin yapılır. Bu enine kesitler, kömür damarındaki metan içeriğinde gözle görülür değişikliklerin olduğu yerlerden seçilir. Şekil 3.13'te, 418 numaralı kömür damarındaki örnek bir uzunayak panosu için metan içeriği haritası gösterilmektedir. Uzunayak boyunca görülen, S1'den S4'e doğru uzunayak pano uzunluğu çizgileri çizimlerde işaretlenmiştir. Bu enine kesitler, metan salımını tahmin etmek için aynanın konumunu göstermektedir. Bu kesitler, kömür damarındaki metan içeriğinde yaşanan karakteristik değişikliklere dayalı olarak izole edilmiştir. Belirli bir ayak konumundaki metan salımının tahmin edilmesi için, uzunayağın genişliği boyunca görülen ortalama içerik belirlenir.



Şekil 3.13: Uzunayak panosu için örnek metan salım tahmini.

Uygulama deneyimlerinin gösterdiği gibi, çalışma bölgeleri ve bitişik yollara salınan gaz miktarı, ayak ilerleme hızının bir türevi olan üretim hacmine bağlıdır. Kozłowski^[155], bir uzunayakda gerçekleştirilecek modüler günlük kömür üretimi için ampirik katsayıların belirlenmesini tavsiye etmiştir. Fiili üretim veya değişkenliği için, üretim hacminin üstel fonksiyonunun kullanılması tavsiye edilmekte olup, bu ilişki Lunarzewski^[1] tarafından da doğrulanmıştır.

$$Q = a_m \sqrt{P} + b_m \quad (3.4)$$

Burada,

P, günlük kömür üretim hızıdır (ton/gün),

a_m ve b_m ise kömür üretim seviyeleri ve haftalık çalışma günü sayısı ile ilgili ampirik sabitlerdir. Polonya'nın madencilik endüstrisindeki modüler kömür üretimi P_m

miktarı için, bu katsayılar sırasıyla $a_m = 0,0277P_m$ ve $b_m = 0,3800P_m$ olarak tanımlanmıştır^[145, 92].

Madencilik faaliyetlerinin değişkenliğinin etkisi, uzunayağın ilerleme hızıyla da ilişkilendirilebilir. Örneğin Polonya madencilik endüstrisinde, bir ayağın bir aydaki ortalama günlük ilerlemesine ilişkin ilerleme değişim katsayısı (m/g) şu şekilde kullanılır:

$$c_A = 1,24A^{-0,32} \quad (3.5)$$

Belirtmek gerekir ki gazlı bir damarda hızla ilerleyen bir ayak zamanla metan emisyonunun artmasını sağlamaktadır. Madencilik faaliyeti durduğunda, gaz kömür damarından desorbe edilmeye ve ana damarın üzerindeki küçük damarlardan ve çevredeki kayalardan azalan bir hızla da olsa akmaya devam eder. Üretilen damarın üstündeki ve altındaki kömür damarları, kırık

bölgesinden ayak arkasına geçecek olan metanı serbest bırakabilir. Metan drenajı yapılmadığı takdirde bu metan maden havalandırma sistemine de salınabilir.

Dolayısıyla, herhangi bir dönemde salınan metan miktarı, eş zamanlı olarak metan drenajının kullanılmasından bağımsız olarak, ayak ilerleme hızı ve kömürün üretilmesinin neden olduğu tabaka bozulmasının derecesi ile bağlantılıdır. Havalandırma sistemi havasındaki metan konsantrasyonunun aşırı artışını önlemek için başka yöntemler kullanılmadığı sürece kömür üretim hızında ve tabaka bozulmasında daha fazla artış önlenerek kömür kökenli gaz emisyon oranının stabilize edilmesi gerekli olabilir.

Metan emisyonu tahmin yöntemlerinde dikkate alınan yukarıda belirtilen faktörlere ilaveten, metan emisyonunu önemli ölçüde etkileyen ek faktörlerin de dikkate alınması her zaman gereklidir:

- Aktif uzunayağın arkasından metan salımı,
- Eski üretim alanlarından alanlarından metan salımı veya göçük alanlarından, metan içeren faylardan vb. metan girişi gibi uzunayak ortamındaki diğer olası metan girişleri.

Bunedenle, mutlak metan emisyon tahmininin nihai değerini %20 oranında artıran tahmin yöntemi önerilmektedir. Öte yandan, tahmin yöntemi bu ek kaynakları dikkate almıyorsa, jeolojik koşulların ve madencilik koşullarının analizine dayalı olarak bu kaynaklardan metan girişi olasılığı varsa, elbette tahmin sonucuna fazlalık dahil edilmesi iyi bir uygulama niteliğinde olacaktır.

En yüksek gaz emisyonu, kömür çıkarıldığında ve dolayısıyla taban ve tavan tabakaları gevşediğinde beklenebilir. Metan salımının gerçekleşme derecesi, tabakaların özel gevşeme davranışına, sistemin zemini-damarı-tavanının fiziksel özelliklerine, uzunayak panosunun geometrisine^[14, 156], gaz kaynaklarının miktarına, gaz kaynaklarına olan yakınlığa ve gevşemiş bölgenin konfigürasyonuna bağlıdır^[124].

Metan emisyonlarını belirleyen birçok faktörün istatistiksel ilişkilerinin kullanıldığı başka yöntemler de geliştirilmiş olup, bunlar arasında çoklu doğrusal regresyon tekniği^[157, 158, 159], gri sistem teorisi^[160, 161], destek makine öğrenimi algoritmaları^[162, 163], kanıt teorisi^[164], kaos teorisi^[165, 166], fraktal teori^[167], istatistiksel yöntem^[168], bulanık veri madenciliği^[169], sınıflandırma ve regresyon ağacı (CART) analizi^[170], sayısal modelleme^[171, 172], yapay sinir ağı^[173, 174, 175] ve Monte Carlo simülasyon yöntemi^[176] bulunmaktadır.

Özetlemek gerekirse, metan tahmini şunlar için yararlıdır:

- Yeni planlanan havalandırma bölgesinde gerekli hava miktarlarının belirlenmesi,
- Metan drenajı ihtiyacının değerlendirilmesi,

- Gaz izleme ve metan kontrol stratejilerinin planlanması,
- Uzunayak panosu için gaz emisyonları nedeniyle kömür üretimine sınırlamalar getirilmesi,
- Havalandırma sistemlerindeki arızaların, diğer gaz kontrol önlemlerinin veya gaz izlemenin etkilerinin değerlendirilmesi, ve
- Metan geri kazanımı ve kullanımı için beklentilerin incelenmesi.

Ancak üretim planlama aşamasında metan tahmini hesaplamalarının yapılmasının temel nedeni, metan drenajının belirlenen hava akış hızlarında kullanılmasına ve üretilecek kömür miktarına karar verilmesidir.

3.2. Patlayıcı Gaz Konsantrasyonlarının Kontrolü

3.2.1. Gaz ve Kömür Tozu Patlaması Tehlikesi

Belgelenen ilk kömür madeni gaz patlamalarının 1810'da Amerika Birleşik Devletleri'nde ve 1845'te Fransa'da olmak üzere meydana geldiği 19. yüzyılın başları ile ortalarından beri kömür kökenli gaz önemli bir madencilik tehlikesi olarak kabul edilmektedir^[4]. Kontrol ve önleme tekniklerindeki önemli gelişmelere rağmen yeraltı madenlerinde metan patlamaları hala meydana gelmektedir. Bunun başlıca nedeni, maden kazılarında patlayıcı metan karışımları oluşturabilen metan konsantrasyonlarının birikmesidir. Meydana gelen bu vakalarda insan unsuru hala hayati önem taşımaktadır.

Bu nedenle temel güvenlik unsuru, maden kazılarında metan konsantrasyonlarının sürekli olarak kontrol edilmesidir. Bir sonraki adım, olası patlayıcı karışımların tutuşma başlangıç değerlerini kontrol etmektir.

Elektrik kıvılcıkları, çeliğin sürtünmesinden kaynaklanan yüksek sıcaklıklar, kuvarslı kayaç, kayaç düşmelerinden kaynaklanan adyabatik sıkıştırma, alüminyumun demire çarpması, yıldırım çarpmaları, tüten malzemeler, patlayıcılar ve füyeler, kendiliğinden yanma ve açık alevler gibi çeşitli kaynaklar metan-hava karışımlarını tutuşturabilir. Tam mekanize madenlerde metan tutuşmasının önemli bir kaynağı sürtünme tutuşmasıdır^[177]. Kömür kesme makineleri nedeniyle meydana gelen metan tutuşma olaylarının diğer kaynaklara kıyasla sıklığı, bu tehlikenin mutlak kontrolünün sağlanmasındaki teknik zorluğu göstermektedir.

Katı genetik ilişkiler, patlamaların başlama ve yayılmasındaki benzerliklerden benzerliklerden ötürü

en yaygın tehlike olan metan ve partiküllerin bir arada bulunması durumu, patlama başlangıçlarını ve patlama yoğunluklarını etkiler. Madencilik terminolojisinde bu patlayıcı karışımların denk gelmesi sonucu ortaya çıkan patlamalara “hibrit karışım patlamaları” denir.

Kömür tozunun tutuşabilir olmasına ek olarak, hava-metan-toz karışımı olması durumunda toz patlamasının koşulları değişmektedir. Havadaki metan içeriği, hava-toz karışımının alt patlama sınırını düşürerek, patlamanın daha kolay başlatılmasına katkıda bulunur. Örneğin araştırmalar, havada %2 oranında metan olmasının, patlamanın iletildiği kömür tozu alt patlama sınırının (APS) metan olmayan havada belirlenen değerlere göre yaklaşık üçte bir oranında azalmasına neden olduğunu göstermektedir^[178, 179].

Toz kömür-hava karışımındaki metan içeriği de hibrit karışımın minimum tutuşma enerjisinde azalmaya neden olmaktadır. Toz-hava karışımındaki metan içeriği ayrıca basınç dalgasının yoğun bir şekilde artmasına ve alev hızının iki kat artmasına neden olur. %2'den biraz daha yüksek metan konsantrasyonu, tozdaki yanmaz madde içeriği %80'den yüksek ve uçucu içerik %10'dan az olduğunda bile patlamanın yayılma olasılığına katkıda bulunmaktadır.

Michelis'ten (1991)^[180] sonra hibrit karışımların tutuşma ve patlama riskini azaltma yöntemlerine “koruyucu önlemler” adı verilmektedir. Michelis, önleyici tedbirleri metan ve kömür tozuna karşı olanlar şeklinde ayırmıştır. Metana karşı alınan önlemler arasında metan drenajı, ayrılan metanın havalandırma yoluyla seyreltilmesi ve maden havasındaki konsantrasyonların sürekli izlenmesi yer almaktadır. Toza karşı alınan önlemler arasında madencilik faaliyetleri sırasında toz oluşumunun sınırlandırılması ve bastırılması, potansiyel tutuşturma kaynaklarının ortadan kaldırılması, bir patlama oluşmasının önlenmesi ve patlamanın maden kazıları boyunca yayılmasının sınırlandırılması yer alır. Gazlı kömür madenlerinde tüm koruyucu önlemler aynı anda uygulanmalıdır. Bununla ilgili daha fazla bilgi [181, 182, 183, 24, 121, 184] nolu kaynaklar içinde bulunabilir.

3.2.2. Mevcut Maksimum Konsantrasyonlar

Metan, hava ile karışım hacimce %5 ile %15 arasında bir konsantrasyon sağlandığında patlayıcıdır. Atmosfer basıncında, havadaki en patlayıcı metan konsantrasyonu hacimce %9,5'tir ve bu da ideal stokiometrik oksijen-metan karışımını oluşturur.

Konsantrasyonu patlayıcı bir karışıma karşılık gelen (karışımında yeterli oksijenin olması) yanıcı bir gazın bulunduğu ortamda patlayıcı karışımı tutuşturmak için gerekli enerji tetiklendiğinde yanıcı gaz patlaması meydana gelebilir. Yanıcı gaz ve oksijen karışımının patlaması, yalnızca bu gazın alt ve üst patlama sınırları

arasındaki konsantrasyonlarında mümkündür. Patlama sınırları, saf oksijen ve ortalama oksijen konsantrasyonuna sahip havalar için farklıdır. Alt patlama sınırı, altında yanıcı gaz ve oksijen karışımının patlayıcı olmadığı yanıcı gazın yüzde şeklinde ifade edilen konsantrasyonudur. Üst sınır, üzerinde yanıcı gaz ve oksijen karışımının patlayıcı olmadığı yanıcı gaz konsantrasyonudur. Her bir gazın ve bunların karışımlarının patlayıcılık potansiyeli de bu karışımdaki oksijenin varlığına ve konsantrasyonuna bağlıdır. Bir yanıcı gaz karışımının patlama tehlikesinin değerlendirilmesi, çeşitli araştırmalarda verilen çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir^[181, 185, 183, 24, 186].

Birçok ülkede, kömür madenciliği sektörü, yeraltı madenlerindeki münferit hava yollarında izin verilen metan konsantrasyonlarına ilişkin yasal gereklilikler mevcuttur. Bunlar çoğu zaman, temiz hava ve dönüş havası akışları olan kazı yerleri ve yollar ile ilgilidir. Mevcut maksimum konsantrasyonlar genellikle metan ve hava karışımının alt patlama sınırının 2-3 katı olarak kabul edilmiş güvenlik faktörüne göre belirlenmektedir.

Metanın alt patlama sınırının en az %2,5 altında bir güvenlik faktörü (yani %2 metanın altında) madenlerde iyi bir uygulama olarak kabul edilmektedir. Ancak, elektrikli ekipmanlarla maden kazısı için daha yüksek bir güvenlik faktörü gereklidir. Örneğin, Polonya'nın madencilik düzenlemelerine göre üretim bölgelerinde izin verilen maksimum metan konsantrasyonu hacimce %2'ye ulaşırsa, elektrik kesilir ve ekstra ölçümler yapılmaktadır. Daha sonra konsantrasyonu azaltmak için aktif yöntemler seçilir. Son olarak, metan konsantrasyonu hacimce %3'e ulaşırsa, madenciler tehlikeli bölgeden çekilir ve kurtarma operasyonunun özel ilkelerine göre ek işlemler gerçekleştirilir. Türkiye'de ise ilgili mevzuat olan ve 19.09.2013 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanan “Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği”nde, havasında %2'den çok metan bulunan yerlerde önleyici faaliyetler ve kurtarma çalışmaları haricinde çalışılmayacağı belirtilmiştir.^[187]

Madende aşırı konsantrasyonu önlemenin birincil yolu, doğru hızda yeterli miktarda temiz hava yardımıyla konsantrasyonu Eşik Sınır Değerlerinin (ESD) altında tutmaktır.

3.2.3. Kişisel Ölçüm Stratejisi

Metan renksiz, kokusuz, zehirsiz ve tatsız bir gazdır ve maden havasındaki varlığını doğrulamak için bir ölçüm cihazına ihtiyaç vardır.

Kazı alanlarında ve yollarda metan konsantrasyonunun tespiti, metan mevcudiyetinde madencilik işlerinin güvenliği için temel teşkil etmektedir. Çalışma yerlerinin vardiya öncesi incelemeleri ve bir madenin belirli alanlarında maden havasındaki metan konsantrasyonu içeriğinin düzenli olarak belirlenmesi, ulusal yasa ve yönetmeliklerin gerekliliklerine göre yapılmalıdır. Metan kontrol kuralları [60, 130, 183] nolu kaynaklar içinde verilmektedir.

Metan konsantrasyonunu belirlemek için elle gaz numunesi alma yöntemleri kapsamında, gazlı madenlerde genellikle yürürlükteki mevzuat (AB'de ATEX) tarafından zorunlu kılınan el detektörleri kullanılır. Manuel dedektörlerden katalitik oksidasyon metanometreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoklu gaz dedektörleri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metanın özkütlesi, havadan düşük olduğu için tavanda birikmesi muhtemeldir. Uzatma problemleri, tehlikeli veya erişilemeyen bir konumdan numune alınmasına olanak tanımaktadır. Çalışma yerlerinin vardiya öncesi incelemelerine ilişkin kurallar genellikle her ülkenin madencilik yönetmeliklerinde verilmektedir.

Gaz bileşiminin kesin olarak belirlenmesi için numuneler, daha sonra laboratuvar analizleri için yeryüzüne taşınacak olan yeraltı numune kaplarına alınır. Söz konusu kurallar hakkında daha fazla bilgi için lütfen [182, 188, 24] nolu kaynaklara bakınız.

3.3. Metan Patlaması Riskine Karşı Havalandırma Önlemleri

Tarihsel olarak ocak üretkenliğini artırmak ve güvenli madencilik operasyonları yürütmek için kömür kökenli gazlar ocak atmosferine salınmıştır. Birleşik Krallık'ta ve diğer Avrupa ülkelerinde kazıma ve sığ kuyu açma yoluyla yüzeyden kömür çıkarılırken, kömür kökenli gazlar bir sorun teşkil etmemiştir^[4]. 18. yüzyılın sonunda yüzeye yakın kömür damarları yavaş yavaş tükendiğinden ve teknoloji büyük derin madenlerin inşasına imkân verecek şekilde geliştirilmesine rağmen bu madenlerdeki metan gazı, kömür üretiminin sürdürülmesini zorlaştırmaya başlamıştır. 19. yüzyılın başlarında İngiltere, Fransa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde kömür madeni patlamaları gözlenmiştir. 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında, Avustralya, Kanada, Belçika, Almanya, Japonya, Polonya, Rusya ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki derin yeraltı kömür madenlerinde küçük patlamaların yanı sıra büyük ve yıkıcı patlamalar gerçekleşmiştir^[129]. Tüm bu yaşanan kazalara yetersiz havalandırma veya gaz drenajının olmaması^[96, 4], kömür yatağı metanının açık ateş, sigara ateşi veya barutun uygunsuz kullanımı ve madencilik ekipmanlarından çıkan kıvılcımlarla tutuşabilecek miktarlara ulaşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kömür tozu da madenlerin büyük bölümlerinde patlamalara yol açmıştır^[4].

Tehlikeli bir metan emisyonunun bulunabileceği ve tehlikeli konsantrasyonların yayılmaya devam edebileceği bir ocağın herhangi bir bölümünde metan patlamalarını etkili bir şekilde önlemek için havalandırma sistemi bazı gereklilikleri karşılamalıdır.

Metan, yeterince yüksek hava akış hızlarının olmadığı maden kazı yerlerinin tavanının yakınında katmanlaşma ve yatay katmanlar oluşturma eğilimindedir. Bu

olgu, metan havadan daha hafif olduğu ve havanın yoğunluğunun yalnızca 0,55'i kadar yoğunluğa sahip olduğu için oluşur. Çoğu durumda, ortalama 0,5 m/sn'lik bir hava hızı katmanlaşmayı önleyecektir, ancak bu hava hızının yetersiz kalacağı bazı durumlar bulunmaktadır^[24]. Metanın katmanlaşmasını engelleyen faktörler, öncelikle bir galerinin eğimi, gaz emisyon oranındaki azalma ve hava akış hızındaki artıştır^[189, 183].

Günümüzde, patlayıcı karışımların oluşmasını mümkün olan her yerde önleyerek ve potansiyel ateşleme kaynaklarından izolasyonu sağlayarak patlama riskini azaltmak esastır. Yüksek saflıkta metanı havalandırma sistemi ile gaz emisyon noktalarında güvenli genel konsantrasyonlara inecek şekilde seyreltmek esas uygulama durumundadır. Bunun için iyi tasarlanmış bir havalandırma sistemi gerekmektedir.

Havalandırmanın birincil hedefleri şunlardır:

- Yanıcı ve zehirli gazları sürekli olarak seyreltmek, zararsız hale getirmek ve uzaklaştırmak.
- Yeterli oksijen içeren hava temin etmek.
- Sıcaklık, nem ve havadaki toz miktarı ile ilgili olarak makul çalışma koşullarını korumak.

Önceki bölümlerde gösterildiği gibi, madencilikte kullanılan uzunayak panoları, maden havalandırma ortamında beklenen en yüksek miktardaki metan emisyonlarını üretmektedir. Planlanan uzunayak panolarında havalandırma performansı gereksinimlerinin belirlenmesi ve metan drenajı ihtiyacına karar verilmesi, metan emisyonu tahminlerinin mevcudiyetine ve doğruluğuna bağlıdır. Belli bir bölgede ilk metan önleme tedbiri olan havalandırma, uzunayak panoların hazırlık planıyla yakından ilgili bir yöntemdir. Panonun nasıl hazırlanmasının planlandığına ve havalandırmayla ilgili başka hangi tehlikelerin ortaya çıkabileceğine bağlı olarak farklı havalandırma sistemleri dikkate alınmaktadır.

Havalandırma sistemi her zaman tüm maden sahasına metan ve diğer gazları veya tozu seyreltmek için gerekli miktarda hava sağlayamaz. Havanın madene dar kuyulardan ve galerilerden girmesi ve çalışma alanlarına ulaşmak için uzun mesafeler kat etmesi gerekir, bu da daha büyük basınç kayıplarına ve kaçakların artmasına neden olmaktadır. Hava yollarını oluşturan havalandırma ağı, mevcut ana havalandırma fan istasyonlarına belirli bir miktarda hava verilmesini sağlar. Aynı zamanda çalışma bölgelerinin kesitlerinde ortalama hızın artırılması sadece oluşan basınç düşüşü nedeniyle değil aynı zamanda toz bastırma nedeniyle de mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, havalandırma sistemi gerekli miktarda havanın sağlanmasına izin vermiyorsa ve havalandırma bölgesinde öngörülen metan salımı çok yüksekse metan drenajı yapılmalıdır.

Artan metan emisyonlarının etkisi, ayak boyunca hareket eden hava miktarının artırılmasıyla hafifletilebilse de bu

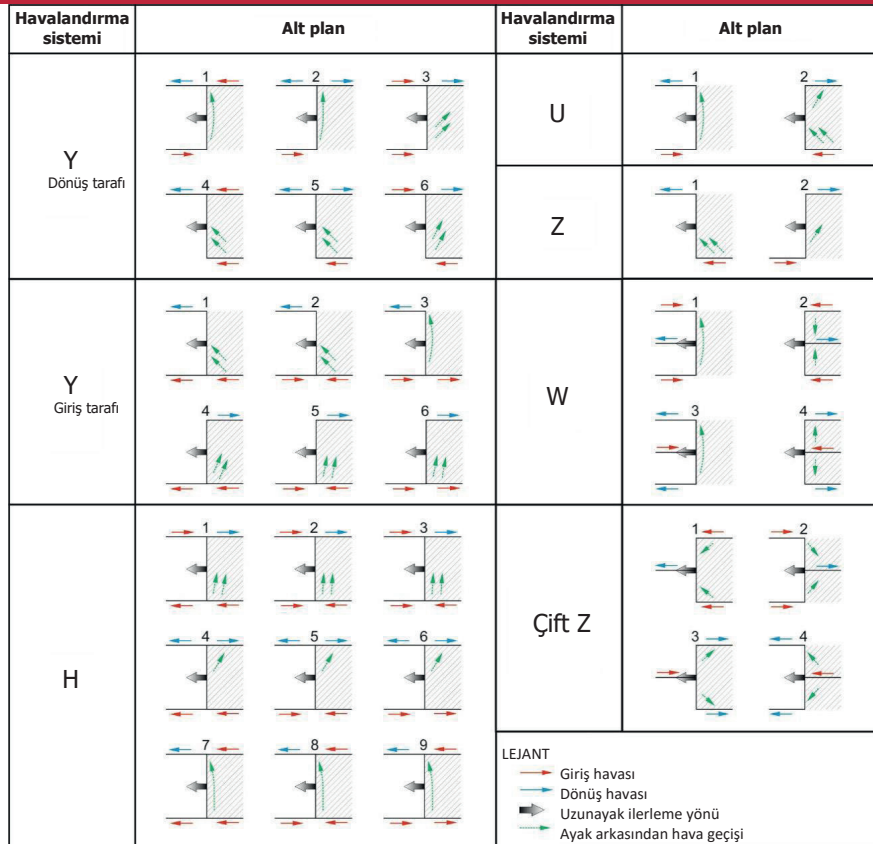
uygulamanın esas olarak kabul edilebilecek havalandırma hızıyla ilgili sınırlamaları göz ardı edilmemelidir.

Havalandırma sisteminin seçimi, havalandırma ile ilgili tahmin edilen madencilik tehlikelerinin durumuna göre yapılmalıdır. Gaz ve kömür patlamaları, kömür ve gaz püskürmeleri, kendiliğinden çıkan yangınlar veya (diğer özel tehditler) çevresel ısı tehlikesi gibi tehlikeler, planlama ve hazırlık çalışmaları aşamasında dikkate alınmalıdır. Madenin havalandırılması, tahmin edilen madencilik tehlikelerinin seviyelerine göre özelleştirilmelidir. Havalandırma seçiminde belirleyici faktör, uzunayak panolarda metan patlamasının kendiliğinden yangın çıkma riski ile bir arada bulunması olmalıdır.

Yolların kesit alanlarındaki minimum ve maksimum ortalama hava hızı, birçok ülkede ulusal yönetmeliklerin yaptırımlarını karşılamalıdır. Bu nedenle, gazlı madenlerdeki gerekli hava akış hızları hem kömür damarı kalınlığına hem de metan emisyon oranına bağlıdır. Kömür madenlerinin havalandırma şebekeleri genellikle kapsamlı ve çok karmaşıktır. Uzunayak panolarına hava sağlama imkânı, metan salımı sırasında üretimi sınırlayabilir. Ayağın ilerleme hızı, ayak arkasında kömürün kendiliğinden yanmasına ilişkin yerel koşullara göre ayarlanarak daha düşük olabilir. Dolayısıyla, bir

düzine kadar uzunayak panosunun olabileceği bu tür madenler genellikle karmaşık bir havalandırma ağına sahip olmaktadır. Hem gerçek kapasite değerleri hem de ana fanların toplam basıncı, maden havalandırma ağındaki hava dağılımına ve her bir uzunayak panosuna hava beslemesine dair olanakları belirlemektedir.

Uzunayak havalandırma sistemi panoların tasarımına bağlıdır. Yeraltı kömür madenciliği sektöründe çok sayıda olası pano tasarımı çeşidi bilinmektedir. Şekil 3.14'te, Noack'ın panoları ve havalandırma sistemlerini tasarlayanın farklı yollarına ilişkin genel bakışının^[14] değiştirilmiş bir hali gösterilmektedir. Uzunayak pano havalandırma sistemlerinin adları, uzunayak ile yolları oluşturan harflerden alınmıştır. Ana hava yolları ve ayak arkası üzerinden olası hava geçişi, ilgili şemalarda işaretlenmiştir. Hava geçiş yönünün (yeşil oklar) başından ayak arkasına doğru olduğu sistemler, metan yoğunlaşma bölgesinin çalışma bölgesinden uzağa taşınmasına imkân tanımaktadır. Ancak, bu tür havalandırma düzenlerinin, ayak arkasında kalan kömürün oksidasyon süreçlerinin gelişmesine ve sonuç olarak, ayak arkasında kömürün kendiliğinden yanmasına katkıda bulunabileceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla, bu tür havalandırma düzenlerinde olağanüstü kontrol önlemleri ve kendiliğinden yanmanın önlenmesine yönelik tedbirler uygulanmalıdır.



Şekil 3.14: Pano tasarımı ve havalandırma planlarının çeşitleri ([14, 190] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).

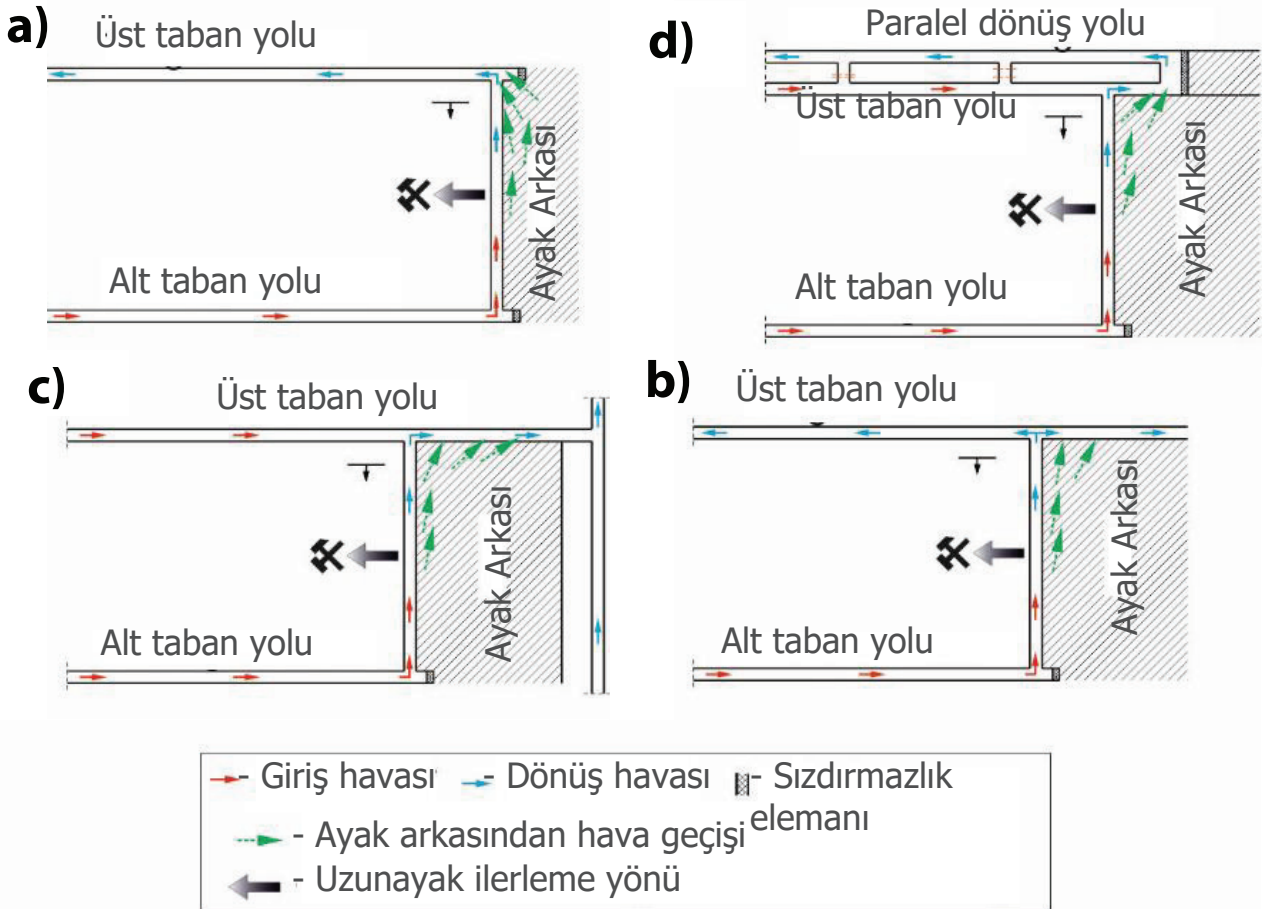
Birçok ülkedeki kömür sahalarının jeolojik koşulları, tekli galeriler kullanılarak panoların ekonomik olarak tasarlanmasına imkân tanımaktadır. Bazı elverişli jeolojik koşullarda, üst taban yolunun korunarak bir sonraki panoda alt taban yolu olarak kullanılması mümkündür.

Panonun ekonomik planlama yerleşimi nedeniyle, dönümlü uzunayaklar için en sık kullanılan havalandırma sistemleri şunlardır^[191] (Şekil 3.15):

- U tipi havalandırma sistemi:
 - a Geleneksel U tipi sistem,
 - b Geri dönüş sistemli U tipi havalandırma sistemi.
- Y tipi havalandırma sistemi:
 - c Dönüş tarafı,
 - d Nefeslik sistemi - iki yönde dönüş havası dağıtımı.

Ancak, madencilik alanlarındaki panoların yerleşimi, havayolu direnci nedeniyle uzunayağa getirilebilecek hava akışını sınırlar. Dolayısıyla, bu tür sistemler, salınan metan konsantrasyonlarının yalnızca belirli emisyon değerlerinde seyreltilmesini mümkün kılmaktadır.

Metan emisyonu tahmininin sonuçları, arındaki gerekli hava akış miktarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu belirlemede hem de ayağın akış açısından etkin enine kesitinin kullanılması tavsiye edilir. Metanın gereken seviyeye seyreltilmesi nedeniyle uzunayağa iletilecek olası hava akış miktarı gerekenden azsa metan drenajı yapılmalıdır. Metan yakalama imkânları açısından, belirli bir metan drenaj çözümü için etkinlik oranı olarak adlandırılan etkinlik dereceleri hesaba katılmalıdır (bkz. Bölüm 4).



Şekil 3.15: Dönümlü tipik tek yollu tasarım panoları için havalandırma sistemleri.

a) geleneksel bir U tipi sistem, b) a): Y tipi havalandırma sistemi-dönüş tarafı, c) Y tipi havalandırma sistemi-nefeslik sistemi, d) Geri dönüş sistemli U tipi havalandırma sistemi.

U-tipi havalandırma sistemi, ayak arkası tarafındaki yolların bakım ihtiyacının olmaması nedeniyle en ekonomik sistemdir. Bu sistem, ayak arkası boyunca hava geçişini sınırlar ve kömürün kendiliğinden yanma eğiliminin yüksek olduğu durumlarda önerilmektedir. Ancak, artan metan girdisi ile bu sistem, üst taban yolu köşesinde ve ayağın arkasındaki kapatılmış üst taban yoluna bitişik ayak arkası alanındaki patlayıcı bölgede metan birikmesine katkıda bulunmaktadır.

U tipi havalandırma sistemi, kömürün kendiliğinden yanmasını etkili bir şekilde sınırlamaktadır. Ayak arkası boyunca sınırlı hava akışı sağlar ve yalnızca uygun uzunayak ilerleme hızı durumunda kendiliğinden yanma olasılığını azaltmaktadır. Kömür damarlarının karmaşık tektonik yapısı ve jeolojik bozulmalar, kendiliğinden yanma riskini en aza indiren ayak ilerleme hızının gerçekleştirilmesinde sorunlara neden olabilir. Uzunayak panosunun ayak arkası alanında kendiliğinden yangın çıkması durumunda bu sistem, yangının ortadan kaldırılması olasılığını azaltır. Ciddi bir metan emisyonu söz konusu olduğunda, kömürün kendiliğinden yanmasından dolayı daha sınırlı bir ayak ilerleme hızı gerekli olabilir. Bu sistem, birlikte ortaya çıkan diğer risklerle etkili bir şekilde mücadele etmek için uygun değildir.

Bu nedenle, metan birikimini ve bu alanda salınan daha yüksek oranda metanın seyreltilmesini kontrol etmek için, ayağın üst taban yoluna ek hava akışı sağlayan Y tipi havalandırma sistemi daha faydalıdır. Y tipi sistem, yüksek metan emisyonlarının öngörüldüğü durumlarda tercih edilmekte olup, ince kömür damarlarındaki aynalarda çok iyi çalışmaktadır. Sistem ayrıca zorlu iklim koşullarında da faydalıdır. Metan drenajı gerektiğinde yararlıdır (bkz. Bölüm 4). Ancak, bu sistem, ayak arkası tarafı üst taban yolunun muhafazası için, ayak arkası boyunca bir yığın aynası inşa edilmesi ve ayak arkası boyunca üst taban yolunun desteklenmesi gibi daha yüksek seviyeli yatırımlar gerektirir. Y tipi sistemin bir çeşidi, hava tahliyeli havalandırma sistemidir. Hava tahliyeli havalandırma sistemi aynı zamanda ayak arkası tarafında galeri sızdırmazlığının sağlanmasını gerektirir ve ayak arkasından hava geçişi, ayak arkasındaki patlayıcı bölgenin aktif uzunayaktan önemli bir mesafeye kaydırılmasına imkân sağlamaktadır^[33, 192]. Ayak arkası tarafındaki üst taban yolunda hava akışının ayarlanması mümkündür. Ancak bu sistem, havanın diğer çıkış kuyularına boşaltılmasını veya bazı ülkelerde madencilik düzenlemelerinde izin verilmeyen dönüş havayolu regülatörlerinin kullanılmasını gerektirir. Buna ek olarak, bazı ülkelerde hava tahliyeli galerilerdeki metan konsantrasyonlarının, bölüm 3.2.2'de bahsedildiği gibi %2'nin altında olacağı şeklinde düzenlemeler mevcuttur. Bu nedenle, daha büyük hava akış miktarları hava

tahliyesi yoluyla geri döndürülmelidir. Bu nedenle üst taban yoluna temiz hava verilmesi ve dönüş taraflı bir Y tipi havalandırma sisteminin kullanılması tercih edilmektedir.

Dolayısıyla, ekonomik nedenlerle, klasik U tipi havalandırma sistemi geliştirilerek geri dönüşlü bir sisteme dönüştürülmüştür (Şekil 3.15). Geri dönüş sistemine sahip U tipi bir havalandırma sistemi, ayak arkasındaki patlayıcı bölgeyi uzunayaktan daha uzağa kaydırmak için uyarlanmıştır. Prefabrik geri dönüş sisteminin farklı çözümleri bölüm 3.5.1'de sunulmuştur. Bu çözümler, ayak çıkışının köşesinde ve ayak arkasında metanın seyreltilmesi için geliştirilmiştir. Y sistemi kullanılırken ayak arkası tarafındaki bir üst taban yolunun korunması ihtiyacından kaçınmak için bazen üç yollu bir geri dönüş sistemi kullanılır. Bunun çeşitlerinden biri, bölüm 3.5.1'deki örnekte gösterildiği gibi kısa geri dönüş sistemidir.

Görülebileceği gibi, panonun ve seçilen havalandırma sisteminin tasarımı, yalnızca metanın seyreltilmesi için gerekli hava akış hızlarının sağlanmasıyla ilgili olmayıp, aynı zamanda hava geçişi ve tehlikeli metan konsantrasyonlarının ayak arkasına kaydırılması gibi işlevlere sahiptir. Ayak arkasındaki yüksek metan konsantrasyonları kömürün kendiliğinden yanmasının inertizasyonunda da rol oynamaktadır.

Ancak, havalandırma sisteminin belirlenen durumundan bağımsız olarak, hazırlık çalışmalarında yüksek konsantrasyon bölgelerinin konumunun değişken olabileceği unutulmamalıdır. Esas olarak barometrik basınçtaki değişikliklerin bir sonucu olarak maden havalandırma basıncındaki değişiklikler aynı zamanda, ayak arkasındaki yüksek konsantrasyon bölgesinin boyutunu da belirleyebilir. Dış basınçtaki değişiklikler, ayaktan akan havanın barometrik basıncında hızla değişikliklere neden olmaktadır. Ancak ayak arkasında bu değişiklikler daha yavaş gerçekleşir ve bu da barometrik basınçta ani düşüşlerle birlikte yüksek konsantrasyonların ayak içine kaymasına neden olabilir. Bu etki madenlerde görülmektedir^[192, 193]. Dolayısıyla, bölüm 3.5'te gösterildiği gibi, uzunayak ortamının hava yollarına barometrik basınç monitörlerinin yerleştirilmesi iyi bir uygulamadır.

Havalandırma sisteminin seçimi, havalandırmayla ilgili tahmin edilen madencilik tehlikelerinin durumuna göre yapılmalıdır. Metan patlamaları veya kömür ve gaz püskürmeleri, kendiliğinden çıkan yangınlar veya çevresel ısı yükü gibi tehlikeler, uzunayak panolarının tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Maden bölgesinin havalandırması, tahmin edilen bu tehlikelerin seviyelerine göre özelleştirilmelidir. Havalandırma seçiminde belirleyici faktör, uzunayak panolarda metan emisyonu, kendiliğinden yangın çıkma riski ve termal çalışma koşulları ile bir arada bulunması olmalıdır.

3.4. Ocak Gazlarının Gerçek Zamanlı Olarak İzlenmesi

Ocak havasındaki metan konsantrasyonları aşağıdaki araçlarla kontrol edilir:

- Portatif metan ölçerler,
- Gerçek zamanlı izleme sistemleri.

Tüm cihazlar, herhangi bir metan emisyonu olan maden ocaklarında kullanım için onaylanmış olmalıdır. Avrupa Birliği'nde cihazlar, 2014/34/EU sayılı direktifteki (eski adıyla ATEX 100a) Madde 114'e göre patlayıcı karışımlar (kömür tozu ve metan içeren ortamlar) nedeniyle tehlike altında olan madencilik uygulamalarına yönelik elektrikli cihazları kapsayan patlama Grup 1 yaptırımlarını karşılamalıdır.

Metan konsantrasyonları, ocağın münferit bölümlerinde izin verilen değerleri genellikle aşmaktadır. Sürekli kayıt yapan metan ölçerlerin kurulumunda bu husus dikkate alınmalıdır. Maden kazılarında metan konsantrasyonunun gerçek zamanlı ölçümüne metanometri denir. Metanometri, daha büyük bir gerçek zamanlı izleme otomasyon sisteminin parçası olabilir. Gerçek zamanlı izleme, akan havanın çeşitli gaz parametreleri ve fiziksel parametrelerinin izlenmesini içerebilir. Çoğu kömür madeninde aşağıdakiler izlenir:

- CH₄, CO, O₂,
- Hava hızı,
- Sıcaklık,
- Barometrik basınç,
- Regülatörlerde (kapılarda), bariyerlerde veya sızdırmazlık elemanlarındaki basınç farkı,
- Yangın dumanı,
- Bakir kayaç sıcaklığı.

Metanometri sistemi genellikle, kömür üretimi sürecinde makine ve ekipmanların güvenliğini ve çalışmasını kontrol eden telemetrik sistemin bir parçasıdır. Güvenlik konularında sistem karar verir. Ancak öte yandan, kömür üretim makinelerinin (kesiciler veya sürekli kazıcılar gibi) çalışma sürekliliği üzerinde de önemli bir etkisi bulunmaktadır.

Otomatik bir havalandırma kontrol sistemi fikri, maden havası parametrelerinin sürekli olarak izlenmesine dayanmaktadır. Sistemde, aşağıdakiler gibi çeşitli hava parametreleri için sensörler bulunur:

- CH₄ konsantrasyonu,
- CO konsantrasyonu,
- CO₂ konsantrasyonu,
- Duman algılama,
- Hava hızı ölçümü,
- Barometrik basınç ve basınç düşüşü ölçümü.

Metanometri sistemleri, sistemde şu şekilde çalışan metan monitörleri ile donatılır:

- Devre kesici,
- Kayıt monitörü,
- Kayıt-devre kesici monitörü.

Devre kesici izleme sensörü:

- Belirli bir metan içeriğinin olduğu ortamlarda çalıştırılması onaylanmış cihazlar hariç, metan konsantrasyonu izin verilen değeri aştığında, cihazların elektriğini bağımsız bir şekilde kesmeli,
- Merkezi izleme odasında ve metan konsantrasyon sınırının aşıldığı yerde uyarı vermeli ve
- Merkezi izleme odasında veya metan sensörünün kurulduğu yerdeki metan konsantrasyonlarını göstermeli ve kaydetmelidir..

Kayıt izleme monitörü:

- Merkezi izleme odasındaki yer sensörü metan konsantrasyonunu kaydetmeli,
- İzin verilen metan konsantrasyonu aşıldığında, merkezi izleme odasında ve metan sensörünün kurulu olduğu yerde görsel veya sesli olarak uyarı vermelidir.

Kayıt-devre kesici sensörü hem devre kesici hem de kayıt sensörü olarak işlev görmelidir.

Devre kesici sensör, havadaki metan konsantrasyonu izin verilen değeri aştığında, merkezi kontrol odasında veya monitörün kurulu olduğu yerde metan içeriğine ilişkin uyarı vererek elektrikli ekipmanları otomatik olarak kapatmalıdır.

Kayıt-devre kesici monitörü aracılığıyla elektrikli cihazların elektriğinin kesilme süresi yerinde belirlenmelidir. Metan patlama mekanizması nedeniyle, herhangi bir hava-metan karışımının belirli bir monitörün çalışması için ayarlanan eşik değerden %0,2 daha yüksek bir konsantrasyonla monitörün ölçüm odasında görüldüğü andan itibaren sayılan ve 15 saniyeden uzun olmayan bir sürede elektrikli cihazların otomatik olarak kapatılarak korunması önerilir. Ancak, kayıt-devre kesici sensörü galeri açma makinesinde kullanıldığında derhal bir devre kesici sensörü işlevi görmelidir.

Özellikle uzunayak alanlarında, metan emisyonu, havalandırma, metan drenajı ve diğer madencilik tehlikelerinin kontrolü üzerindeki etkileri açısından üretim parametrelerinin izlenmesi de tavsiye edilmektedir. Mevcut bir tehlike hakkında madencileri uyarma ve bilgilendirme yöntemi bu sisteme dahil edilmelidir.

Madencilik makinelerinin teknik durumu ve üreticiler tarafından sunulan çözümler, bir metan tehlikesine ilişkin olarak aşağıdaki açılardan tam kontrol sağlar^[88]:

- Ayna konveyörünün altındaki yerler de dahil olmak üzere olası bir konsantrasyon birikimi olan yerlerde metan içeriğinin ölçülmesi,

- Metan drenaj sistemlerinde metan konsantrasyonunun ölçülmesi,
- Bir boru hattındaki ve galerilerdeki metan konsantrasyonuna bağlı olarak bir metan drenaj sistemi üzerinde otomatik kontrol,
- Hava akışındaki değişikliklerden kaynaklanan hava hızı ve metan konsantrasyonunun ölçülmesi,
- Bir maden alanındaki havalandırmayı ve basınç dağılımındaki değişiklikleri etkileyen havalandırma bariyerlerinin durumunun kontrol edilmesi,
- Diğer gazlarla ilgili bir tehlikenin meydana gelme olasılığı varsa, bu diğer gazların (örneğin O₂, CO₂, CO) içeriğinin ölçülmesi.

Metan sensörlerinin ve diğer gazlar veya hava parametrelerine ilişkin sensörlerin yerleri, her bir madenin havalandırma bölümü yöneticisi tarafından belirlenmeli ve bu konudaki ulusal düzenlemelere uygun olmalıdır.

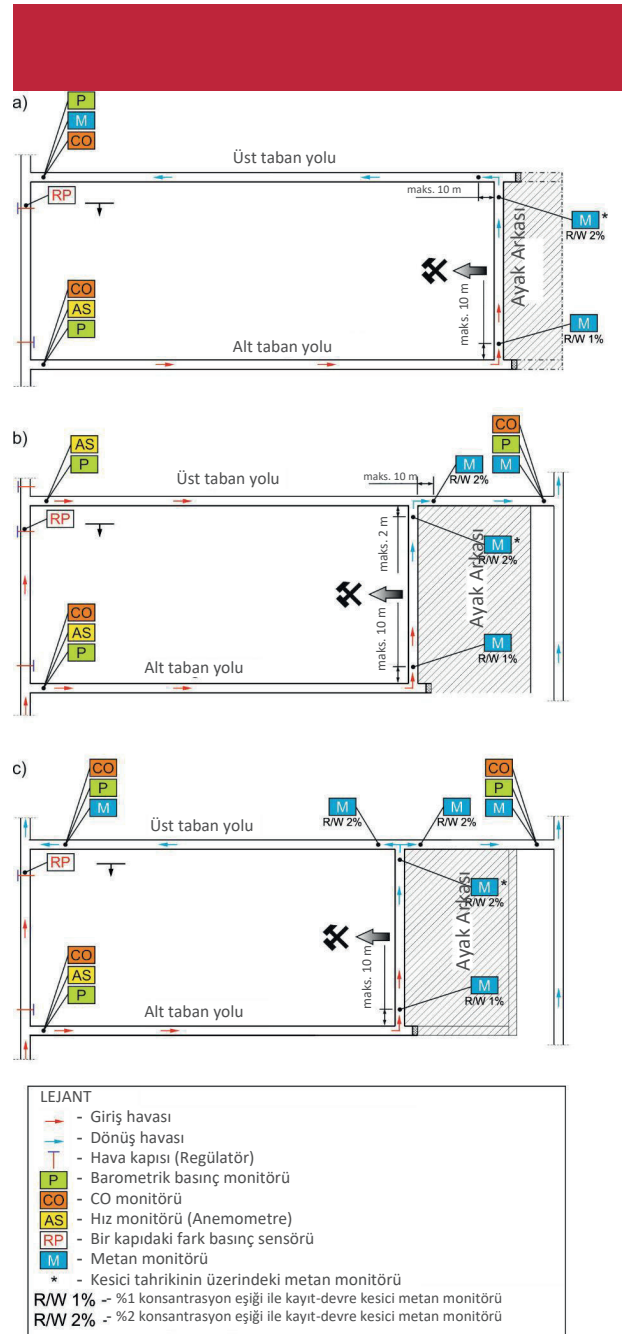
Şekil 3.16'da galeri tavanı altındaki aynada yerleşik sensörler gösterilmektedir.



Şekil 3.16: Yüzeğe aktarma yapan sensör grubu (Sıcaklık, CO, CO₂, O₂, CH₄) gösteren yeraltı çevre izleme istasyonu.

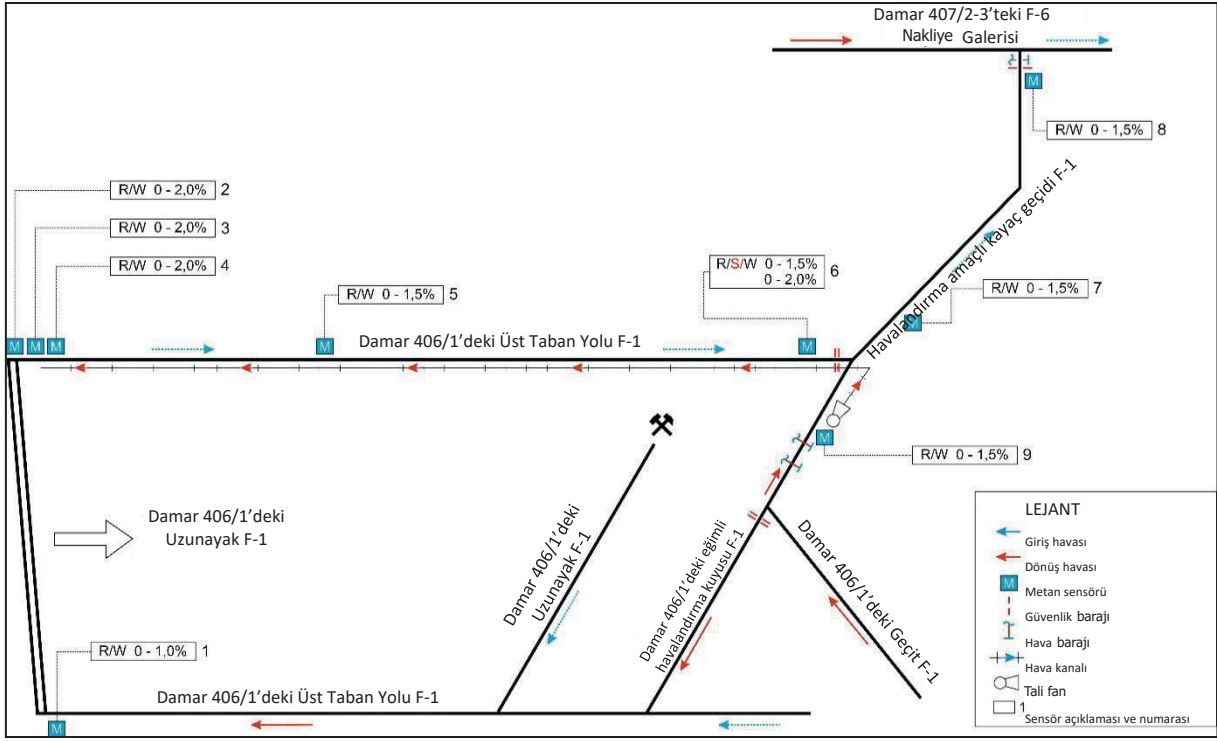
Uzunayak alanında metan sensörleri için önerilen yerler

Kayıt edici-devre kesici sensörler uzunayak alanlarına yerleştirilmelidir. Bu monitörler, giriş havasının ayağa girdiği yerin önüne, uzunayak çıkışına ve uzunayak alanının çıkışındaki dönüş havasına yerleştirilmelidir. Giriş havası sensörleri, dönüş havasından daha düşük daha düşük bir değere, örneğin daha düşük bir sayıya ayarlanmalıdır. Metan sensörleri, tahkimatların altına ve galerilerin tavanına monte edilmektedir. Girişten aynaya ve aynadan çıkışa olan mesafeler kesin olarak tanımlanmalıdır. Şekil 3.17'de, metan monitörlerinin ve diğer gaz monitörlerinin tipik havalandırma sistemlerine sahip uzunayak alanlarına yerleştirilmesine ilişkin kavramsal prensip gösterilmektedir.

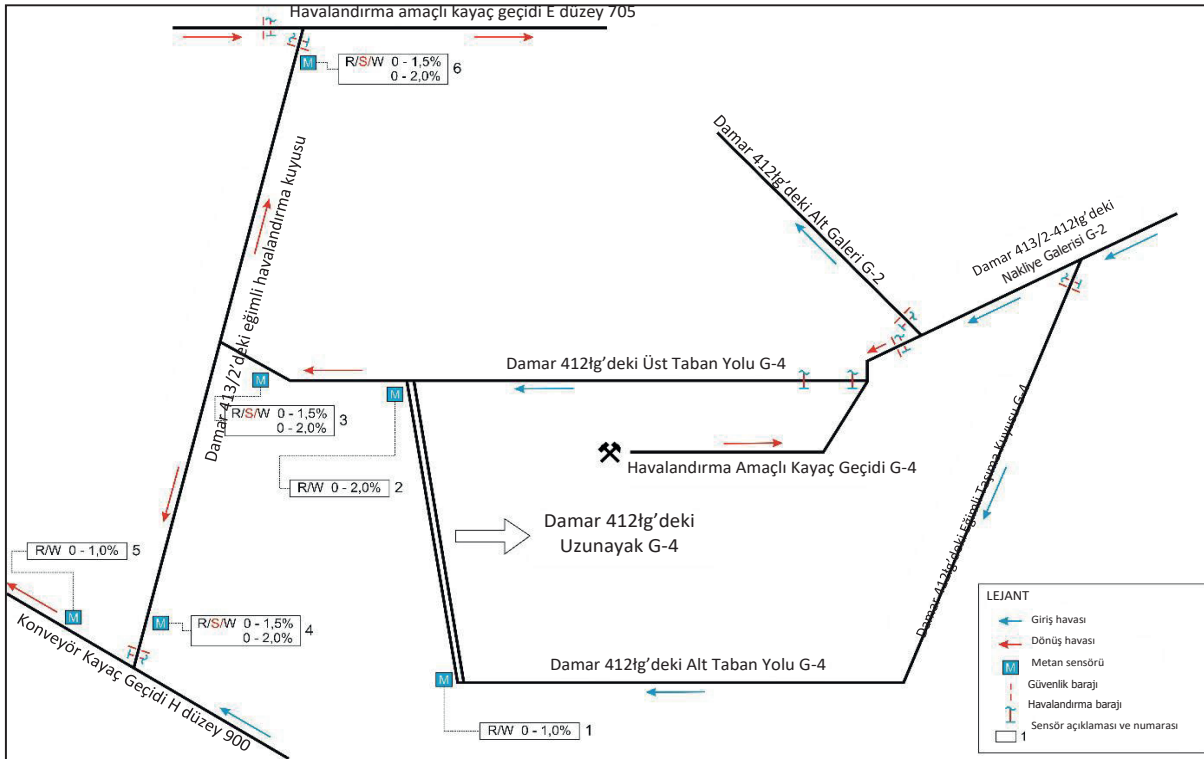


Şekil 3.17: Tipik havalandırma sistemleri olan uzunayak alanında metan monitörlerinin yer tespiti, a) U tipi, b) Y tipi, c) Hava tahliye sistemi.

Şekil 3.18'de, U tipi bir havalandırma sistemi olan 406/1 numaralı damarda F-1 uzunayak alanındaki havalandırma planı ve metan sensörlerinin konumu gösterilmektedir^[194]. Şekil 3.19'da, Y tipi bir havalandırma sistemi olan 412 tlg numaralı damardaki uzunayak G-4'te gaz izleme sistemi sensörlerinin yerleşimi ve havalandırma parametrelerinin bir örneği gösterilmektedir^[194, 195].

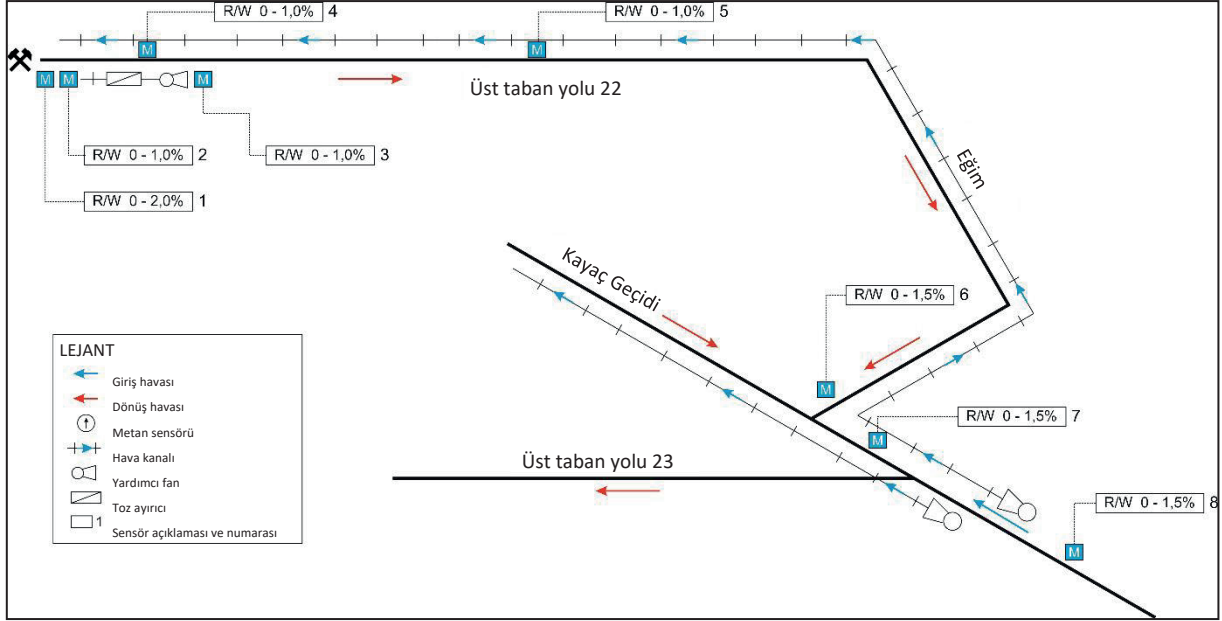


Şekil 3.18: 406/1 numaralı damarda uzunayak F-1 girişlerindeki metan sensörlerinin konumu^[194].

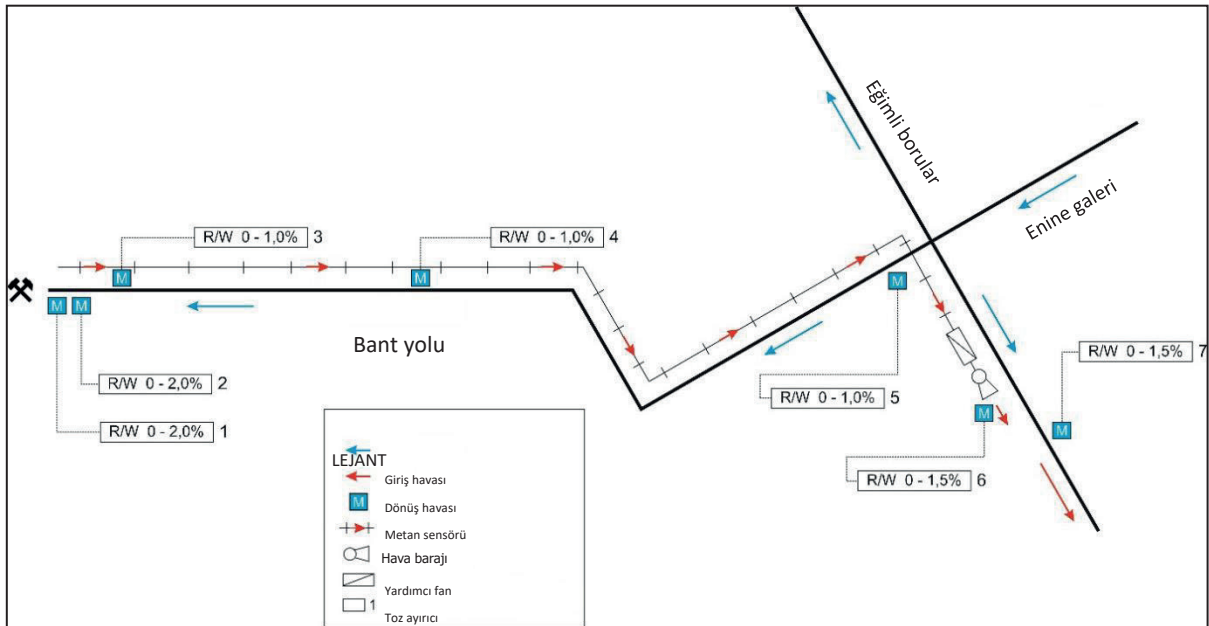


Şekil 3.19: 412 numaralı damarda uzunayak G-4'teki metan dedektörlerinin konumu^[194].

Şekil 3.21 ve 3.22'de, sırasıyla üfleyici ve emici havalandırma sistemleri olan iki galeride metan sensörlerinin kullanımına ilişkin örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.21: Açılan Üst Taban Yolu 22 örneğinde metan dedektörlerinin konumu^[195].



Şekil 3.22: Açılan Bant Yolu 5 örneğinde metan dedektörlerinin konumu^[195].

Kayıt sensörleri genellikle dönüş hava yollarındaki yerlerin dışında kullanılır. Bu monitörler kazılardaki metan konsantrasyonunu kaydetmeli ve sınır değeri aşıldığında uyarı vermelidir. Söz konusu sensörler havalandırma alanlarının çıkışına ve havalandırma kuyularına kurulurlar.

Polonya'nın madencilik sektöründe bu metan ölçerler, metan konsantrasyonunun merkezi dönüş havasında %1,5'i aşması ve çıkış kuyularında %0,75'i aşması halinde bilgi vermektedir. Kayıt için kullanılan metan sensörleri, havalandırma kuyularına, merkezi fan kanalının en az 10 m altında veya bacaya doğru ayrı havalandırma seviyelerinden en yüksek hava girişinin 10 m yukarısında olacak şekilde yerleştirilir.

Madendeki hava parametrelerini izleme sistemi, hiyerarşik bir yönetim sisteminin uygulanabilirliği ve yeraltı güç ve sinyal cihazlarının iki aşamalı kontrolü gibi temel gereksinimleri karşılamalıdır. Sistemin merkezi kısmı telemetri sistemidir. Yüzeyin bir kısmı merkezi telemetriden, yeraltı ise saha cihazlarından oluşmaktadır.

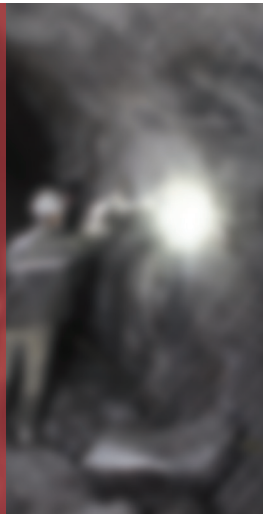
Sistem, yerüstünde yer alan istasyon kısmında, sevk istasyonunun bilgisayarına bağlı olan endüstriyel kontrolörler veya kontrol bilgisayarları ile donatılmış kontrol panellerinden oluşur ve bunlar sayesinde yeraltı kontrol ve ölçüm cihazlarından gelen bilgiler sevk istasyonunda kullanılabilir. Ayrıca, maden ortamının yönetimi ile ilgili diğer sistemlerden veya ölçüm cihazlarından gelen bilgiler de sevk istasyonunun bilgisayarına girilebilir.

Saha cihazları olarak gaz sensörleri kendinden güvenlidir. Kontrol ve ölçüm cihazları, yüzeyden uzaktan çalıştırılır ve bir fiber optik ağa dayalı bir telemetri sistemine bağlanır. Ancak madende kablosuz veri iletimine dayalı daha fazla sistem geliştirilmektedir.

Yeraltı cihazları, sürekli ve döngüsel bir eylem birimine bölünebilen merkezi telemetri birimleriyle birlikte çalışmaktadır. Günümüzde gazlı madenlerde, metan sensörleri ile çalışan ve sürekli işlem yapan merkezi telemetri birimlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Döngüsel aktiviteye sahip ekipmanlar ise diğer telemetri sistemlerinde çalışan sensörler, sinyal dönüştürücüler ve devre dışı bırakılan cihazları içermektedir. Telemetri sisteminin ölçüm ve yürütme bölümleri ile merkezi izleme odasının yerüstündeki bölümü modüler bir yapıya sahiptir.



Maden havasındaki metan konsantrasyonları, taşınabilir metan ölçüm cihazları ve gerçek zamanlı izleme sistemleri cihazları kullanılarak eş zamanlı olarak kontrol edilmelidir.



3.5. Uzunayak Pano Alanında Ek Havalandırma Sistemlerinin Kullanılması

3.5.1. U Tipi Havalandırma Sistemine Sahip Ayaklarda Metan Kontrolü Yöntemleri

U tipi havalandırma sistemi, metan emisyonlarının artması durumunda uzunayak arkasındaki üst taban yolunda metan birikmesine neden olabilir. Uzunayak boyunca akış hızının artırılması mümkün olmayabilir veya ayak arkasından daha fazla metanın salınımına neden olabilir. Ayağın önünde üst taban yolunun enine kesitini korumak genellikle zordur. Bu, havalandırma direncini artırır ve alındaki hava akış hızını azaltabilir.

Dolayısıyla, artan metan emisyonları ile üst taban yolu köşesinde yüksek metan konsantrasyonlarının birikmesini önlemek için çeşitli teknik çözümler uygulanmaktadır. Tüm teknik çözümler, ek havalandırma cihazları veya havalandırma tesisatları içermektedir. Bu tür ek bir havalandırma sistemi kullanıldığında, metan değerleri, ayağın arkasındaki üst taban yolunda hacimce %2 konsantrasyonunun altında tutulabilir.

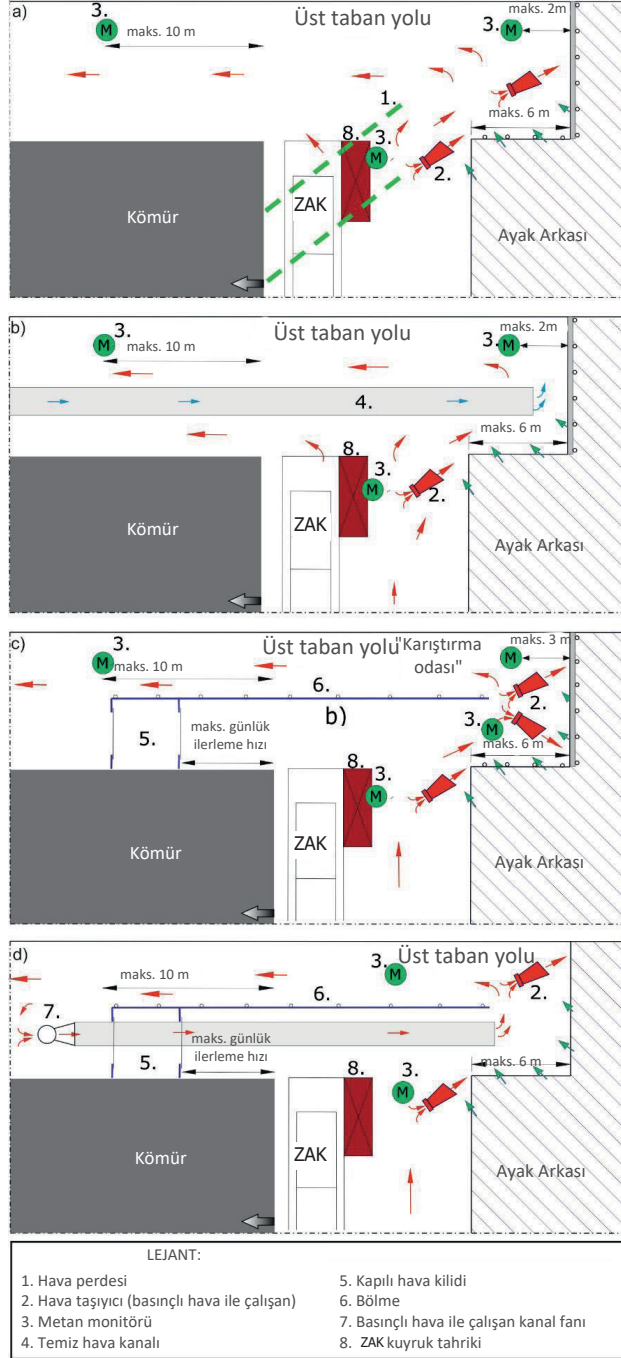
Hava perdeleri, hava taşıyıcılar ve kanal sistemlerinde bölmeler ve metan birikmiş bölgeleri havalandırmak için basınçlı hava gibi çeşitli yardımcı havalandırma cihazları ve çözümleri kullanılmaktadır.

Çoğu durumda, ayak çıkışı ile üst taban yolu kesişim bölgesinde metan konsantrasyonlarını nispeten azaltmak için ek havalandırma cihazları kullanılır. Örneğin, hem "kanat perdeleri" olarak adlandırılan perdeler hem de havayı ayağın arkasındaki üst taban yolunun tasfiye tarafına yönlendirmek için tasarlanmış basınçlı hava ile çalışan hava taşıyıcılar vardır (Şekil 3.23a). Bu bölgede artan hava akış hızları, metanı dönüş havasıyla seyreltir ve deşarj eder.

Ek çözümler ve havalandırma sistemlerinin uygulanması beklenen sonuçları tam olarak sağlamıyorsa, üst taban yolu köşesinde hava akış miktarının artırılması gerekir. Bunun bir örneği, ayağın üst taban yoluna temiz hava sağlayan ek bir üfleyci havalandırmanın kullanılmasıdır (Şekil 3.23b). Kanaldan dışarı akan temiz hava, üst taban yolu köşesindeki metanı seyreltmelidir. Bu çözüm, alçak panolar çalıştırılırken alındaki hava akışını artırma olasılığı olmadığında uygulanmalıdır. Ancak daha önce tüm panolarda yaygın olarak kullanılmış ve teknik tasarımlarda yer bulmuştur. Doğru yaklaşım, ayakta gerekli hava akışının hesaplanması ve bu hava akışının sağlanması için havalandırma şebekesinde bu düzenlemenin yapılmasıdır. Temiz hava içeren kanalların kullanılması, ayak çıkışı bölgesinde metan emisyonuna karşı ana koruma önlemi olarak değil, ek bir önlem olarak ele alınmalıdır.

Üst taban yolu köşesine metan salımının artması durumunda kısa prefabrik geri dönüş sistemi kullanılır. Bu sistemin çalışma prensibi, üst taban yolu bölümünün bir bölme kullanılarak ikiye bölünmesinden oluşmaktadır (Şekil 3.23c).

Bu şekilde Y tipi sisteme benzer bir havalandırma sistemi elde edilmektedir. Ayrıca gerekirse, üst taban yoluna hava sirkülasyonu yapılabilir (Şekil 3.23d). [92, 191] nolu kaynaklarda diğer hususların yanı sıra bu tür havalandırma çözümleri açıklanmaktadır.



Şekil 3.23: Uzunayağın üst taban yolu köşesinde ek havalandırma sistemlerinin konumu.

- "kanat perdeler" ve hava taşıyıcıların kullanılması,
- temiz hava kanalları ve hava taşıyıcıların kullanılması,
- bölmeler ve hava taşıyıcıların kullanılması,
- bölmeler, ekstra kanallar ve hava taşıyıcıların kullanılması.

Uzunayak panolarının hazırlanması sırasında hava yollarına salınan metan emisyonunun teknik tasarımda tahmin edilenden önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülür. Dolayısıyla, klasik U tipi sistemin paralel bir dönüş galerisi ile değiştirilmesi gerekir, ancak bu ek maliyetlere neden olmaktadır (ikinci dönüş galerisi-geri dönüş sistemi).

Y tipi havalandırma sistemi (çeşitli şekillerde), yüksek metan emisyonu olan uzunayak panolarda metanı kontrol etmek için kullanılır. Sistem, gazlı veya gazsız uzunayak panoları veya kömürün kendiliğinden yanması riski yüksek olan veya olmayan panolar için uygundur. Ayrıca, bu uzunayak panolar rekor düzeyde ilerleme hızları ve kömür üretimi sağlamaktadır.

Y tipi dönüş tarafı havalandırma sistemi, metan emisyonu yüksek olan ince damarlı panolarda kullanılmaktadır. Metan konsantrasyonunun uzunayaktan ayak arkasına doğru hareket etmesine olanak tanır. Giriş havası iki galeriden sağlanır (alt taban yolu ve üst taban yolu). Uzunayak havalandırıldıktan sonra, gazlar temiz hava ile karıştırılır ve ayak arkasındaki üst taban yolu üzerinden uzaklaştırılır. Bu sistem aynı zamanda, uzunayağının çıkışında yüksek çevresel ısı yükleri olduğunda termal çalışma koşullarının kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır. İki yönde dönüş havası dağıtımını yapan Y tipi havalandırma sistemi (hava tahliye sistemi), nispeten düşük ve orta kalınlıkta kömür damarlarına sahip uzunayak panolar için uygundur^[188, 171].

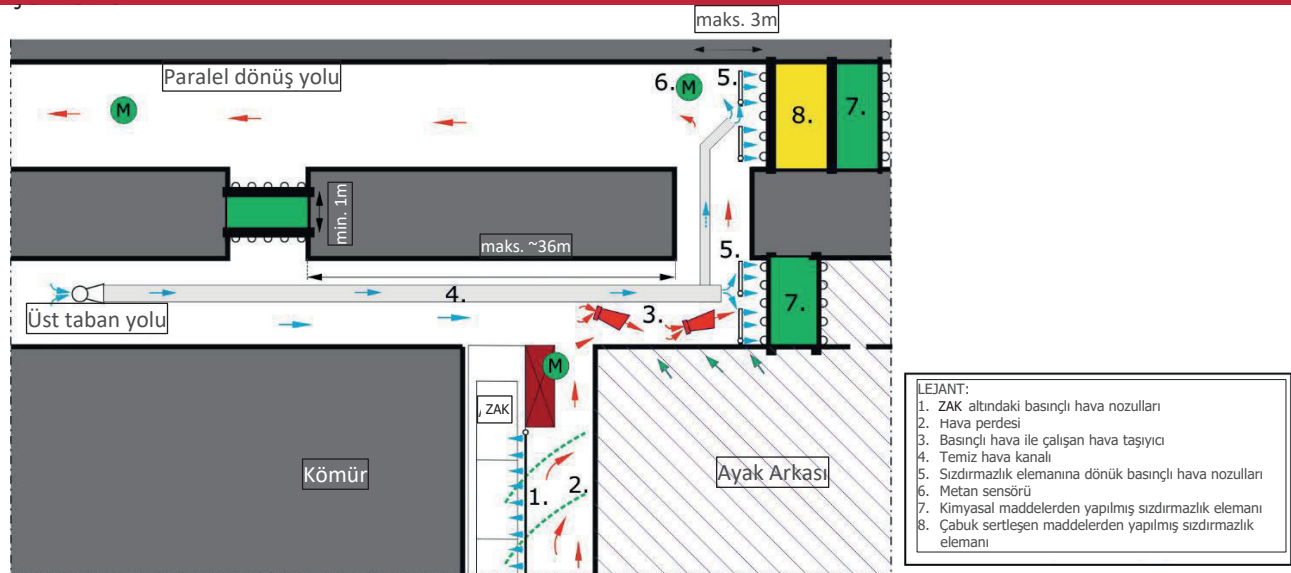
Bazen "geri dönüş sistemi" olarak bilinen, paralel dönüş galerisine sahip U tipi havalandırma sistemi, çok yüksek metan emisyonunun tahmin edildiği yerlerde kullanılmaktadır. Giriş havası, uzunayakta iki galeri (alt taban yolu ve üst taban yolu) üzerinden sağlanır ve dönüş

havası, bazen dış dönüş galerisi olarak da adlandırılan ikinci (üstteki) üst taban yolu üzerinden akar. Bu sistemin ana avantajı, metan konsantrasyonlarının sınırını etkileyen ekstra hava akışı sağlama imkânı, uzunayaktaki hava akışını kontrol etme imkânı ve üstte ve altta uzanan kömür damarlarından metan drenajı kolaylığıdır. İlave havalandırma sistemlerinin tipik yerleri Şekil 3.24'te sunulmuştur. Zincirli ayak konveyörünün altındaki altındaki boş alan önemlidir. Konveyörlerin altındaki olası metan tutuşma olayları nedeniyle bu bölgeyi temizlemek iyi bir uygulama niteliğindedir. Şekil 3.24'te, basınçlı hava tesisatına bağlı delikli bir boru hattı inşa etme yöntemi gösterilmektedir. Boru hattı, zincirli ayak konveyörünün uzunluğu boyunca uzanır ve konveyör zincirinin alt kılavuzunda havalandırma delikleri bulunmaktadır.

Yerel gaz çıkışına bağlı olarak, uzunayak panolarındaki metanı kontrol etmeye yönelik ek havalandırma cihazları panonun çeşitli yerlerinde kullanılabilir. Bu tür cihazlar ayağa girişte de kullanılmaktadır. Metan sensörleri ile bu tür cihazların yerleşimine bir örnek Şekil 3.25'te gösterilmektedir.

Kazı yerlerinde metanın izin verilen konsantrasyonların altına ineceği şekilde seyrettilmesi mümkün değilse, drenaj teknikleri uygulanarak gazın havalandırma sistemi hava akımına girmesi önlenmelidir. Ancak, havalandırma sistemleri ve drenaj yöntemlerinin doğru bir kombinasyonunun kullanılması gerekmektedir.

Metan monitörlerinin konumu seçilen çözüme bağlıdır. Metan konsantrasyonunu kaydetme ve elektrikli cihazları devre dışı bırakabilme işlevlerine sahip metan sensörleri, hava parametrelerini sürekli izleme sistemlerinde kullanılmaktadır.



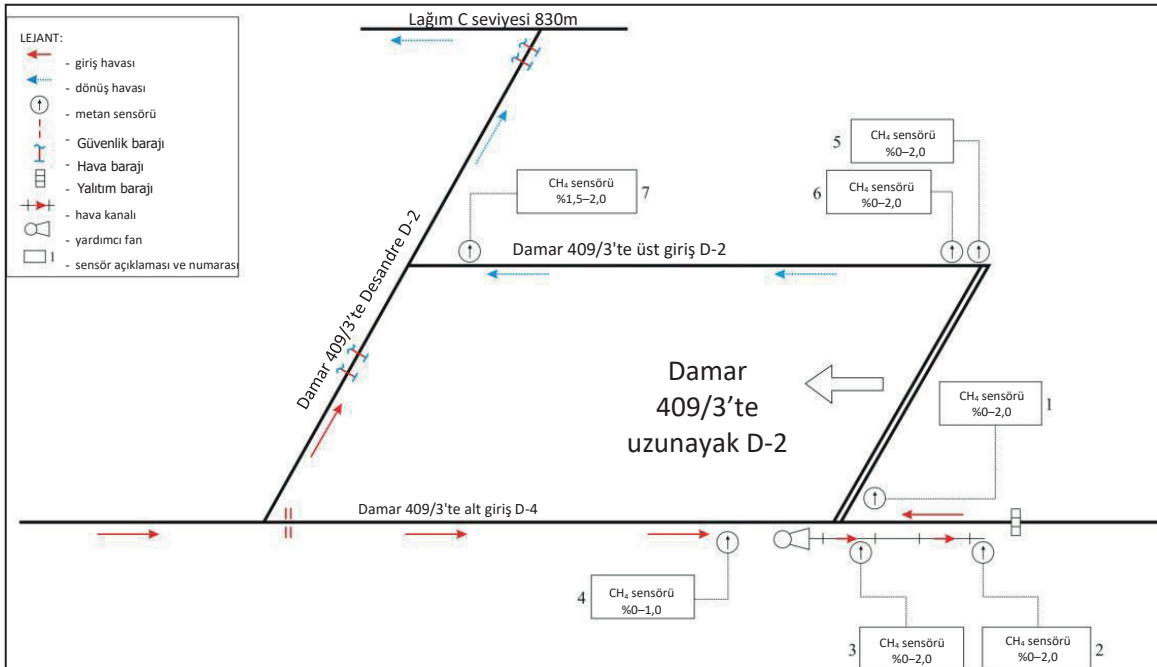
Şekil 3.24: Paralel dönüş galerisi (geri dönüş sistemi) olan 'U' tipi havalandırma sistemi için üst taban yolunda metan kontrolü için ek havalandırma sistemlerinin yerleşimi. a) havalandırma sisteminin yerleşimi, b) ek havalandırma sistemlerinin kullanılması



Şekil 3.25: 'U' tipi havalandırma sistemi için alt taban yolunda metan kontrolü için ek havalandırma sistemlerinin yerleşimi^[177].

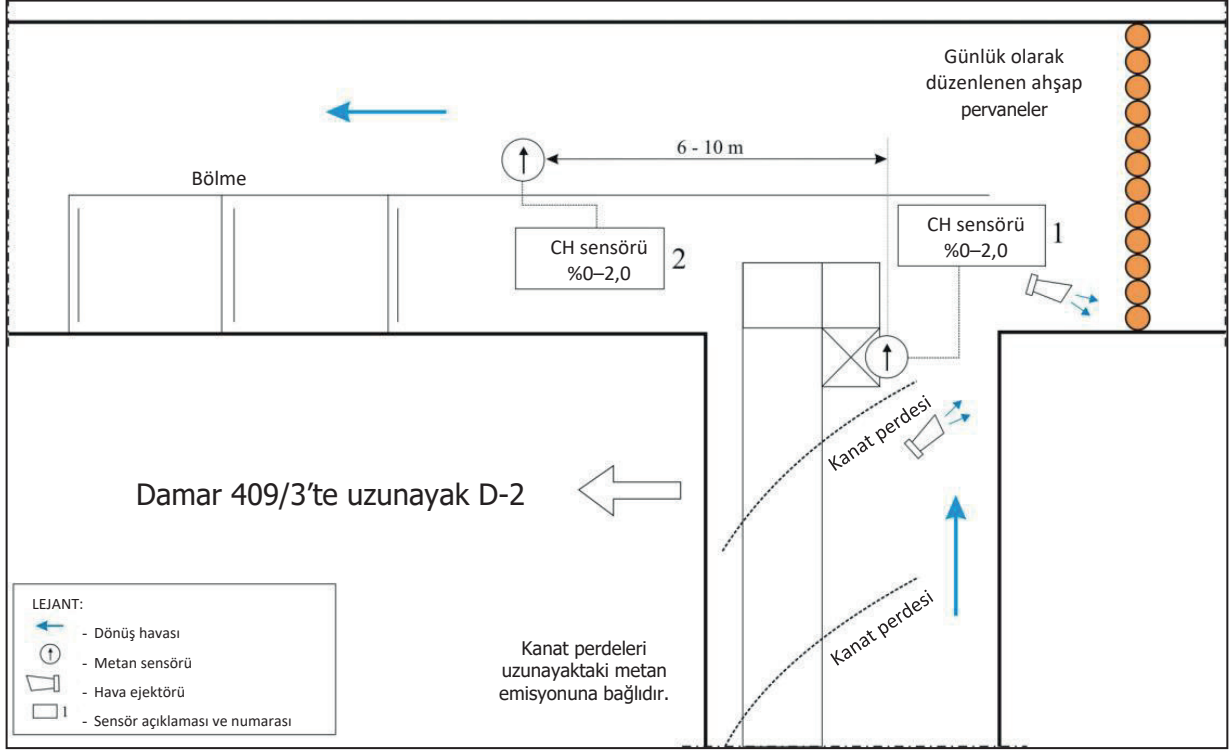
3.5.2. Dönümlü Uzunayak Arınlarında Metan Kontrolü Örnekleri

Metan sensörlerinin kurulum ilkeleri, U tipi bir sistem tarafından havalandırılan iki uzunayak ve Y tipi bir sistem tarafından havalandırılan bir uzunayak örneğiyle sunulmaktadır. Şekil 3.26'da, 409/3 numaralı damarda uzunayak D-2'deki havalandırma planı ve metan sensörlerinin konumu gösterilmektedir.



Şekil 3.26: 409/3 numaralı damarda uzunayak D-2 örneğinde metan dedektörlerinin konumu^[191].

Metan izleme sensörlerinin konumu, belirli bir uzunayaktaki yerel koşullara ve uzunayakların alt taban yolları ile kesişiminde tehlikeli metan konsantrasyonlarının birikmesine izin vermemek için kurulan ek yardımcı havalandırma ekipmanlarının konumuna bağlı olabilir. Şekil 3.27'de, uzunayak D-2'nin üst taban yolunda metan izleme sensörlerinin ve yardımcı havalandırma ekipmanlarının konumuna dair bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 3.27: 409/3 numaralı damarda uzunayak D-2 örneğinde üst taban yolundaki metan sensörlerinin ve yardımcı havalandırma ekipmanlarının konumu^[191].

Yardımcı ekipmanlarda, bir uzunayak içinde nispeten düşük konsantrasyonda metan içeren havanın bir kısmını ayak arkasına doğru yönlendirmesi beklenen bölmeler kullanılmaktadır^[196, 197, 195]. Ayak arkasından akan yüksek konsantrasyonda metan içeren hava ile karıştırmaları gerekir. Havalandırma ekipmanları en sık kullanılan ekipmanlardır, ancak bölmeler boyunca düşük hava hızı ve ayak arkasından büyük bir metan girişi sırasında yolun uzunluğu fazla olduğu için etkinlikleri düşüktür.

Ayak arkasından akan hava daha az miktarda metan içeriyorsa veya hava ejektörleri, kanat perdeleri veya kısa hava kanallı yardımcı fanlar gibi diğer dinamik yardımcı havalandırma ekipmanlarıyla aynı anda bir bölme kullanılıyorsa etkinlikleri daha fazladır. İnce kömür damarlarında madencilik yapılırken, hava üst taban yolundan bir galeriyle kesişim noktasına doğru akar ve galeri tabanında daha büyük bir hız oluşturur. Ancak, ayak arkasından gelen hava galerinin tavanında akabilir. Daha fazla hava dönüşü sağlayan hava ejektörleri kullanıldığında hava karışımı gerçekleşecektir.

Şekil 3.28, 406/1 numaralı damarda uzunayak F-1'deki havalandırma planı ve metan sensörlerinin konumunu gösterirken, Şekil 3.29, bu uzunayağın üst taban yolundaki metan sensörlerinin ve yardımcı havalandırma ekipmanlarının konumunu göstermektedir.

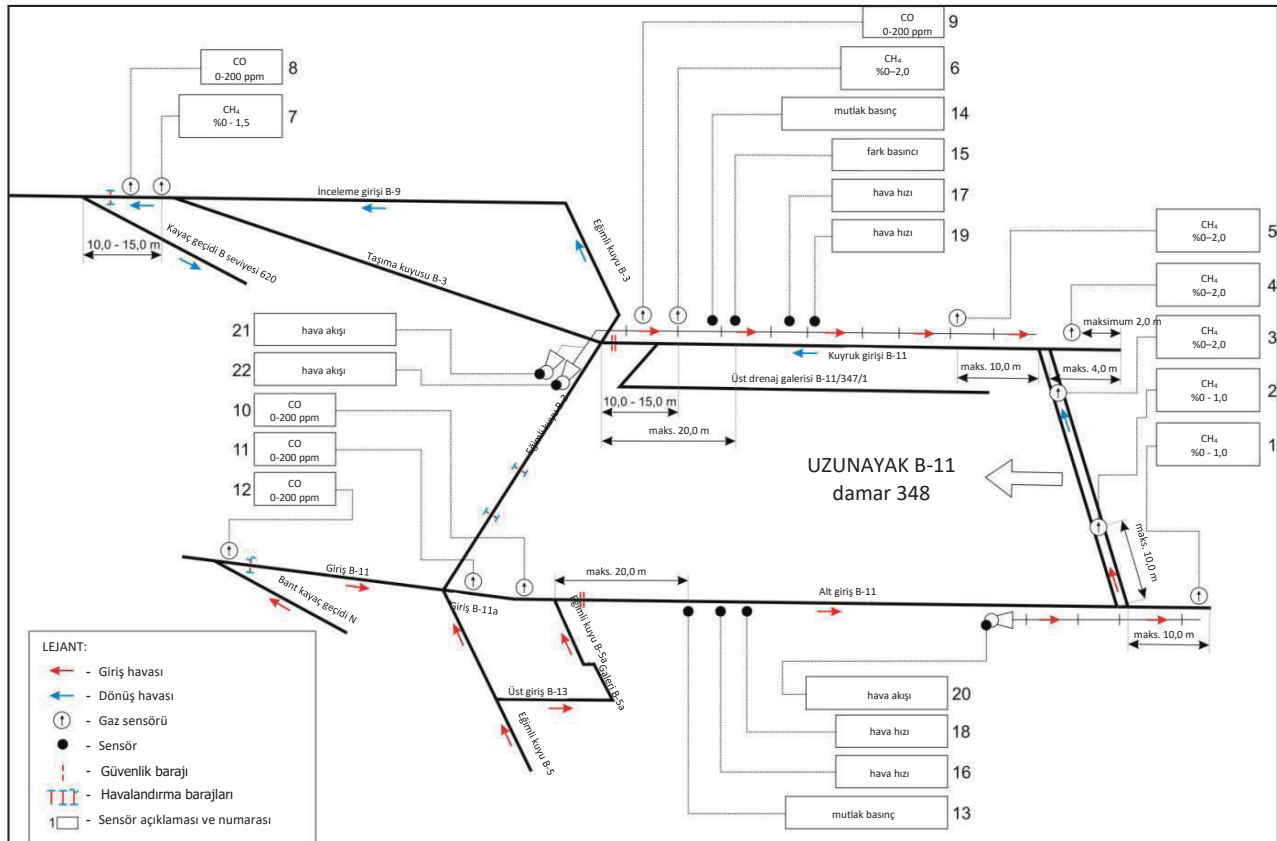
Alt Giriş F-1'den ayağa 1200 m³/dak hava akışı sağlanmaktadır. Üst taban yolu köşesine, kanal sistemiyle Eğimli Havalandırma Borusu F-1'den hava tazelenir. F-1 uzunayak galerisindeki fan ve hava kanalı, Üst Giriş F-1 ile ayağın kesişme alanına 500 m³/dak hava beslemesi sağlar. Şekil 3.28, uzunayak pano alanındaki metan monitörlerinin konumunu göstermektedir. Bazı metan monitörleri çift bantlıdır. İlk aralığın, yani %1,5 metan konsantrasyonunun aşılması, uyarı ve alarm verilmesine neden olmaktadır. İkinci aralığın, yani %2'nin aşılması durumunda tüm uzunayak alanındaki elektrikli cihazlar kapatılır. Şekil 3.29'da, üst taban yolu köşesinin ek havalandırma cihazlarıyla donatılması gösterilmektedir. Metan girişinde ani bir artış olması gibi acil durumlarda kullanılan basınçlı hava tesisatına bağlı iki delikli boru hattının kullanımı görülmektedir.

Başka bir örnek, 348 numaralı kömür damarındaki uzunayak B-11'dir. Uzunayağın bu alanının güvenliği, hava parametrelerine ilişkin birçok sensör ve monitör ile sağlanmaktadır. GZİS'nin (Gerçek Zamanlı İzleme Sistemleri) metan monitörleri, CO monitörleri ve anemometrik monitörleri (hız sensörleri) uzunayak içine kurulmuştur. Monitörlerin ve sensörlerin yerleşim planı, Şekil 3.30 ve 3.31'deki uzunayak havalandırma şemasında gösterilmektedir. 348 numaralı kömür damarındaki uzunayak B-11'de ek havalandırma ekipmanları da kurulmuştur. Bir havalandırma yöneticisi, kullanılacak ekipmanların türüne ve yerine karar verir. Metan emisyonu, mevcut düzenlemelere ve rehberlere göre uzunayak B-11'de kontrol edilir.

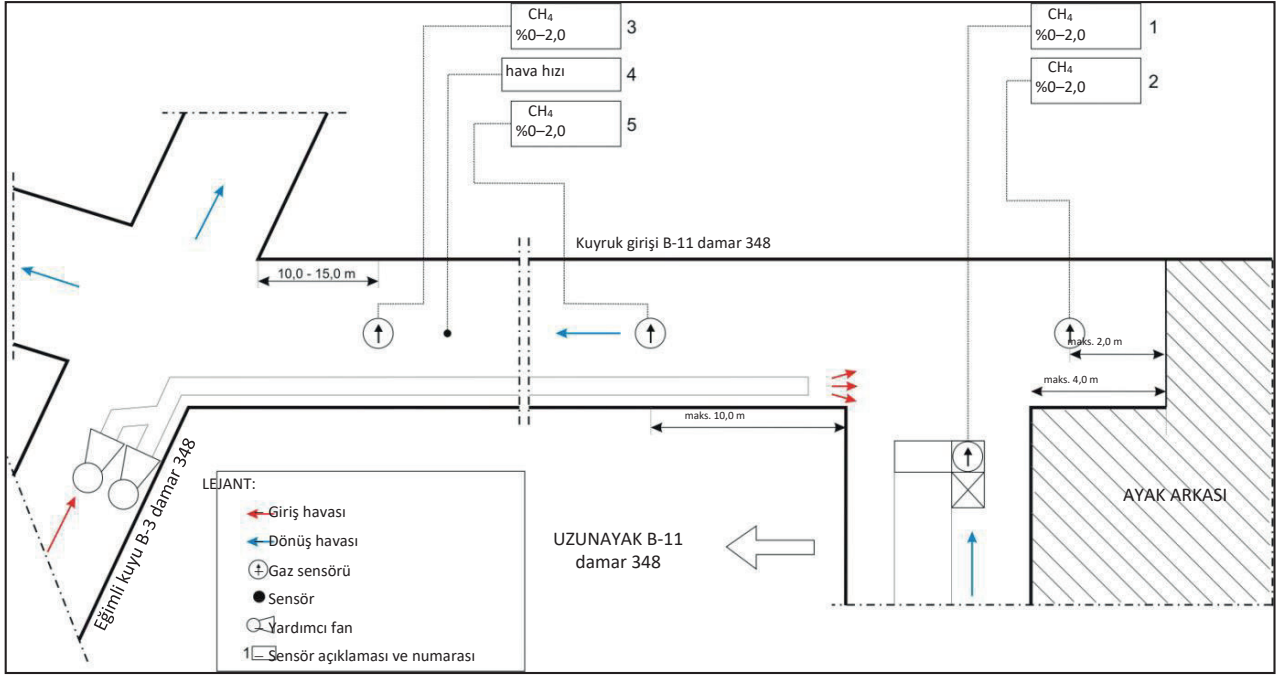
Şekil 3.32'de, Y tipi havalandırma sistemine sahip uzunayak için metan monitörleri, CO monitörleri ve anemometrik monitörlerin bir örneği gösterilmektedir.

Uzunayak panolarının yoğun bir şekilde havalandırılması, kazı yerlerine salınan metanı seyrelterek konsantrasyonunu iş güvenliğini sağlamaya yönelik madencilik yönetmeliğinde öngörülen seviyeye indirmek için yapılır. Ancak, bu havalandırma genellikle, planlanan madencilik süreci parametrelerini sağlamak için yetersizdir veya ek cihazlar veya havalandırma sistemleri olmadan kullanılması imkansızdır. Dolayısıyla, kömür madenlerinde madencilik faaliyetleri sırasında metan drenajı uygulanmaktadır^[192, 190].

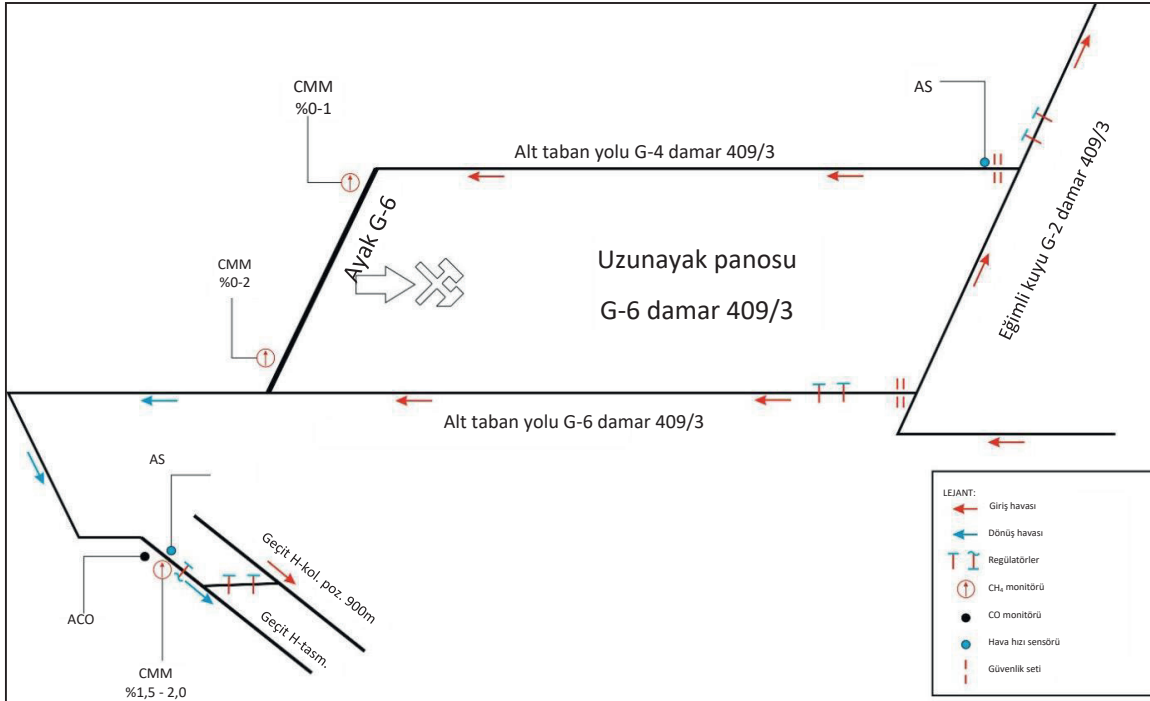
Patlamaların önlenmesi için tüm bu ek havalandırma çözümleri, planlamada yeterli bir güvenlik payı ve tüm madencilik faaliyetlerinde sürekli dikkatlilik gerektirmektedir.



Şekil 3.30: Yardımcı fanlar ve kanal ile otomatik gaz sensörleri ve anemometrik sensörlerin konumunu gösteren 348 numaralı damardaki uzunayak B-11'in havalandırma şeması^[191].



Şekil 3.31: Yardımcı fanlar ve kanal ile 348 numaralı damarda B-11 havalandırma yolu ile uzunayak B-11'in kesişiminde gaz sensörlerinin ve anemome sensörlerinin konumu



Şekil 3.32: Gaz monitörlerinin ve anemometrik sensörlerin konumunu gösteren 409/6 numaralı damardaki uzunayak G-6'nın havalandırma şeması^[194].

4. METAN GAZI DRENAJ YÖNTEMLERİ

4.1. Tarihçe ve Arka Plan

Eskiden maden üretkenliğini artırmak ve güvenli madencilik operasyonları yürütmek için kömür kökenli gaz tahliye edilmekteydi. Avrupa ülkelerinde sıyırma ve sığ kuyu açma yoluyla yüzeyden kömür çıkarılırken metan bir sorun teşkil etmiyordu^[4]. 18. yüzyılın sonunda sığ kömür kaynakları yavaş yavaş tükendiğinden ve teknoloji büyük derin madenlerin inşasına imkân verecek şekilde geliştirildiğinden, bu madenlerde metan açığa çıktığı gözlemlenmiştir^[4]. Kömür madenlerinde metan gazı patlamaları 19. yüzyılın başından itibaren belgelenemeye başlamıştır.

Kaydedilen ilk metan drenajı 1730'da İngiltere'de gerçekleştirilmiştir. Carlisle Spedding, literatürde yeraltı kazılarında ilk metan alımının yazarı olarak geçmektedir. Spedding, Salton şaftının yaklaşık 80 m derinliğe batması sırasında kömür damarını sıkı bir şekilde yalıtılmış ve damardan yayılan metanı bir boru hattı vasıtasıyla yerüstüne boşaltmıştır^[23]. Literatürde 19. yüzyılın başında Buddle'in Wallsend Madenindeki bir gaz üfleyiciden metanı yakalamayı ve onu bir boru hattı aracılığıyla kazı alanlarının ilerisine boşaltmayı amaçlayan çalışmasından bahsedilmektedir. 19. yüzyılın sonlarında Saar Havzası'nda da benzer bir yöntem uygulanmıştır. Frankenholz madeninde, şaftta negatif bir basınç kullanarak eski ayak arkasını setle çevreleme ve kapalı alanlardan metan boşaltma yöntemi uygulanmıştır^[23].

Mevcut anlayışa göre metan drenajına yönelik ilk girişimler, yani metan gazının tabakalardan tahliyesi, 1943'ün başında Ruhr bölgesindeki Mansfeld kömür madeninde gerçekleştirilmiştir. Bu madende yukarı doğru dikey olarak açılmış 280 mm çapındaki bir kuyunun yanında damar madenciliğine başlanmıştır. Kuyunun, kömür damarlarını örten bir demetin içinden geçmesi amaçlanmıştır. İşletmenin başlamasından sonra, daha önce 'gazlanmamış' kuyudan güçlü bir metan çıkışı meydana gelmiştir. Kuyuyu tahta bir tapa ile kapatmak işe yaramamış, 2,5 m uzunluğunda bir boru bırakılarak ve bu boruyu dönüş hava yollarına giden 80 mm çapında bir boru hattına bağlayarak kuyunun çimentoyla kapatılmasına karar verilmiştir. Gaz yakalamada ulaşılan olumlu sonuçlar, daha fazla kuyu açılmasını ve çalışmalar ilerledikçe sistematik metan drenajını sağlamıştır. Belgelenen bu olay, metan drenajının başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem daha sonra Hans kömür madeninde de kullanılmaya başlanmıştır^[23].

Ruhr bölgesindeki Emscher-Lippethe kömür madeninde ve Saar Havzası'ndaki Hirschbach madeninde eş zamanlı olarak başka girişimler başlatılmıştır. Bu madenlerde metan drenajı için maden damarına bitişik damarlarda özel olarak sızdırmazlığı sağlanan galeriler açılmıştır. Bu yöntemin, gazın %80 ila %90 oranında metan konsantrasyonları ile yakalanan Hirschbach madeninde etkili olduğu ve çıkarılan gazdaki metan konsantrasyonu yalnızca %30 olan Emscher-Lippe madeninde daha az etkili olduğu anlaşılmıştır^[23].



Metan drenajı terimi, bir kömür madeninde kömür damarlarından çalışma alanlarına doğru metan çıkışlarını azaltmak, muhtemel metan çıkışlarını zaman ve mekan içinde kontrol etmek ve ayrıca gaz/kömür patlamaları, ani metan çıkışları gibi çeşitli beklenmedik gaz olaylarını önlemek veya yoğunluğunu azaltmak için önlemler almak olarak anlaşılmalıdır.

1945'ten sonra Avrupa madenlerinde metan drenaj teknolojisi hızla geliştirilmiştir. 1949'da Belçika'da, ardından 1950'de İngiltere ve Fransa'da, 1951'de Sovyetler Birliği'nde, 1952'de Hollanda'da ve 1958'de Polonya'da metan drenajı başlatılmıştır. Maden gazının aydınlatma için kullanılması 18. yüzyılın başlarında gerçekleşmiş ve 1880'lerde kaydedilmiştir.

Metan drenajı terimi, "kazı alanlarına metan akışlarını azaltmak için tedbirler almak, bu akışların yer ve zamanını değiştirmek ve ayrıca gaz ve kömür, püskürmeleri, patlamaları ve ani metan çıkışı gibi çeşitli beklenmedik gaz olaylarını önlemek veya yoğunluğunu azaltmak" olarak anlaşılmalıdır^[92]. Bu önleyici teknikler sayesinde, gaz içeren tabakalardaki farklı açıklıklardan (sondaj delikleri, kuyular, ekstra galeriler) çıkan kömür kökenli gazlar drenaj sistemleriyle yakalanmaktadır. Açıklıklar, negatif basınçlı yeraltı veya yerüstü boru sistemlerine bağlanmaktadır. Yüksek safılıkta gazın hava yollarına girmeden önce kaynağında yakalanarak drenaj sisteminde tutulması ve madenden çıkarılması, metan patlaması risklerini en aza indirmenin başka bir yoludur.

Sanayileşmiş ülkelerdeki deneyimler, iyi gaz drenajı uygulamalarına yapılan yatırımların, madendeki arıza sürelerinin azalmasıyla sonuçlandığını göstermektedir. Bunun nedeni; gazlı maden koşulları, daha güvenli madencilik ortamları ve daha fazla gaz kullanma ve maden metan emisyonlarını azaltma imkânıdır.

Aşağıdaki hususlar, kömür damarlarının gazdan arındırılmasından doğan avantajlardır:

- Güvenlik (boru hatlarına metanın çekilmesi, havalandırma kanallarına yayılan metan miktarını azaltır ve patlama riskini azaltır),
- Ekolojik (atmosfere salınan metan emisyonlarını azaltarak çevre koruma),
- Ekonomik (kazı yerlerini havalandırmak için gerekli hava akımının azaltılması ve iki enerji taşıyıcısı olan kömür ve metanın satışından kar elde edilmesi).

Dünyanın kömür havzalarındaki farklı jeolojik koşullar ve madencilik koşulları, farklı metan drenaj tekniklerinin geliştirilmesine neden olmuştur.

4.2. Metan Drenaj Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Metan drenaj yöntemleri geleneksel olarak madencilik öncesi veya madencilik sonrası teknikleri içerecek şekilde sınıflandırılmaktadır.

Ön drenaj, genellikle kömürün üretilmesinden önce kazılacak damardan metanın uzaklaştırılmasını içerirken, son drenaj, madencilik faaliyetleri nedeniyle tetiklenen tabaka hareketi, gevşeme ve artan geçirgenliğin bir

sonucu olarak çevredeki damarlardan salınan metan ve diğer gazların yakalanmasını içermektedir.

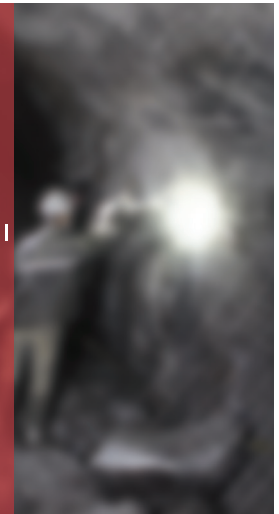
Son drenaj yöntemleri genellikle madencilik faaliyetlerinin neden olduğu bozulma sonucu açığa çıkan metanın maden maden havayoluna girmeden önce durdurulmasından ve üretilen damarın üstündeki ve bazen de altındaki bozulma bölgesine erişimin sağlanmasından oluşmaktadır.

Üretilen damarın üstünde veya altında bir veya daha fazla kömür damarının bulunduğu durumlarda, bu kaynaklardan çıkan emisyonlar, öncelikle bu damarların net kömür kalınlığına ve gaz içeriğine bağlı olarak üretilen damardan çıkan emisyonları önemli ölçüde aşabilir. Dolayısıyla, ön drenaj yöntemlerine kıyasla, son drenaj teknikleri kullanılarak genellikle çok daha yüksek miktarda gaz akışları tahliye edilebilir. Verimli drenaj ve güvenli kullanım için yeterince yüksek gaz konsantrasyonlarının sağlanması, bu sistemlerin dikkatli bir şekilde tasarlanmasını ve yönetilmesini gerektirir. Üretilen gazlı bir kömür damarının tavanında ve zemininde kömür oluşumu ne kadar fazlaysa, son drenaj o kadar önemli hale gelmektedir.

Esas olarak kömür damarlarından metan çıkarma yeri ve zamanına bağlı olarak, metan drenaj yöntemlerinin sınıflandırılmasıyla ilgili çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Metan drenaj yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Madencilik faaliyetleri öncesi (CBM - Kömür Yatağı Metanı dahil edilebilir), madencilik (CMM - Kömür Madeni Metanı dahil edilebilir) ve madencilik sonrası (AMM - Terk Edilmiş Maden Metanı dahil edilebilir) aşamaları şeklinde bir sınıflandırma yaygın olarak kabul edilmektedir. Maden işletmesi tamamlandıktan ve maden kapatıldıktan sonra, basınç farkı ve yükselen su seviyeleri nedeniyle metan yerüstüne doğru hareket edebilir. Terk edilmiş bir madenden drenaj sistemi ile gaz alımı da AMM'ye dahildir. Bazı araştırmacılar ayrıca, maden hala çalışır durumdayken gazın kapalı eski atık alanlarının arkasından yakalanması durumunda Ayak Arkası Metanı (GMM) şeklinde bir kategori de kabul etmektedir.



Çeşitli maden bölgelerinde metan drenajı tekniğinin birçok sınıflandırması vardır. Ancak bunlar geleneksel olarak ön drenaj veya son drenaj teknikleri olarak sınıflandırılmaktadır.



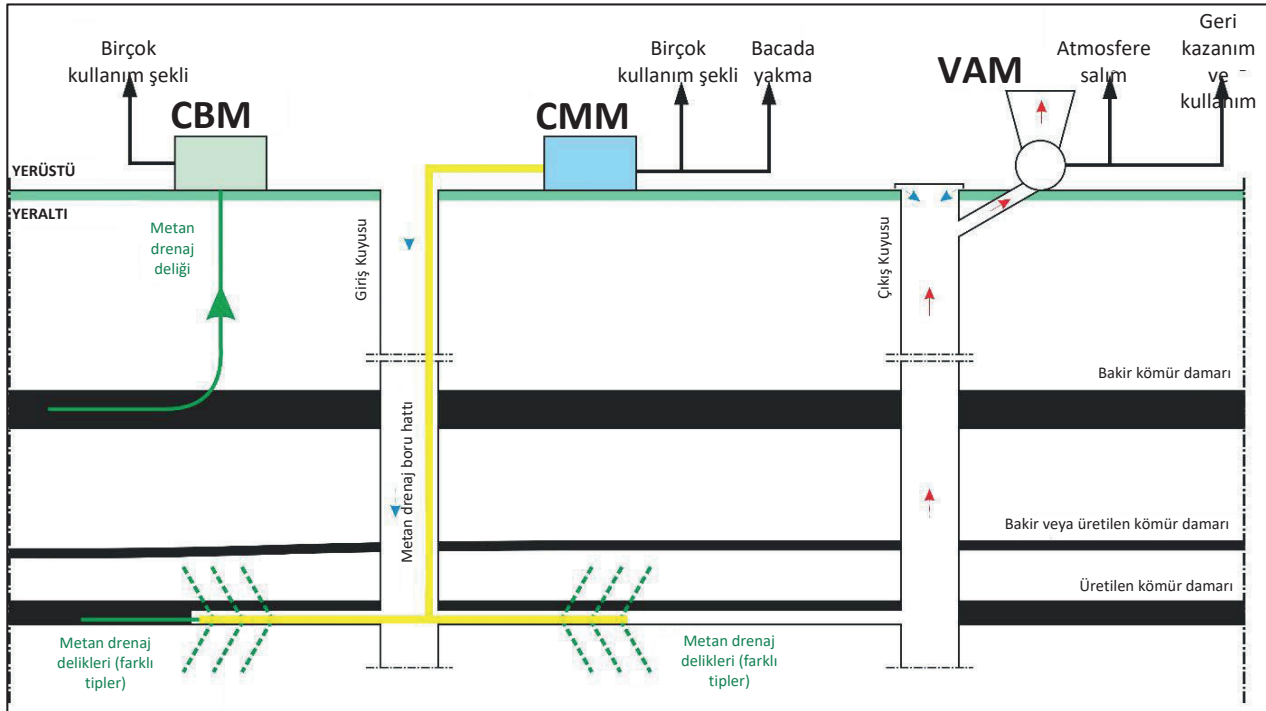
Ön drenaj		Son drenaj		
Yerüstünden	Yeraltı kazılarında	Madencilik alanlarında	Ayak arkalarından	Atık alanları
CBM	CMM		AMM	

Şekil 4.1: Metan drenaj yöntemlerinin sınıflandırılması.

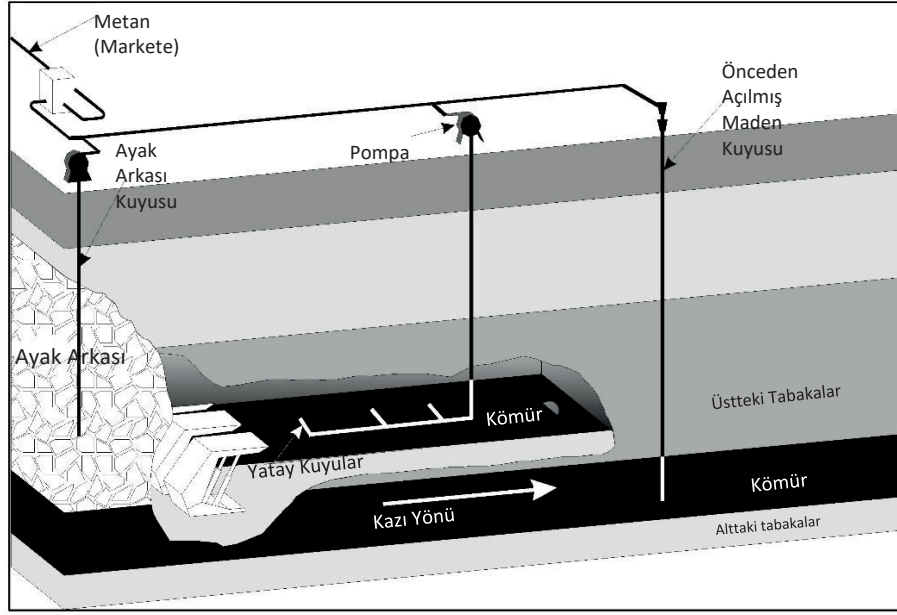
Madenlerden metan elde etmenin bir başka yöntemi daha olmakla beraber bu yöntemin bir parçası da havalandırmadır. Havalandırma sistemine metanın çekilmesi VAM olarak bilinir. Bu gazın konsantrasyonu genelde düşük olup, ekonomik kullanımı için kendine mahsus yöntemlere başvurulması gerekir. Gaz çoğu zaman hava ile atmosfere salınır. VAM ile metan elde edilmesi metan drenajından bağımsızdır ve yeraltı maden işletmesinin herhangi bir aşamasında gerçekleştirilebilir.

Şekil 4.2'de, basitleştirilmiş bir maden modelinde CBM, CMM ve VAM arasındaki farkı gösteren bir diyagram yer almaktadır. Şekil 4.3'te, ön drenaj ve son drenaj kuyusu arasındaki farklar gösterilmektedir.

Metan drenajı sırasında, kullanılan yöntemle ilgili olarak metan konsantrasyonu farklılık gösterebilen bir gaz elde edilir.



Şekil 4.2: CBM, CMM ve AMM arasındaki farkların şematik diyagramı.



Şekil 4.3: Aktif bir madende kullanılan metan drenaj yöntemleri ([198] nolu kaynaktan alınmıştır).

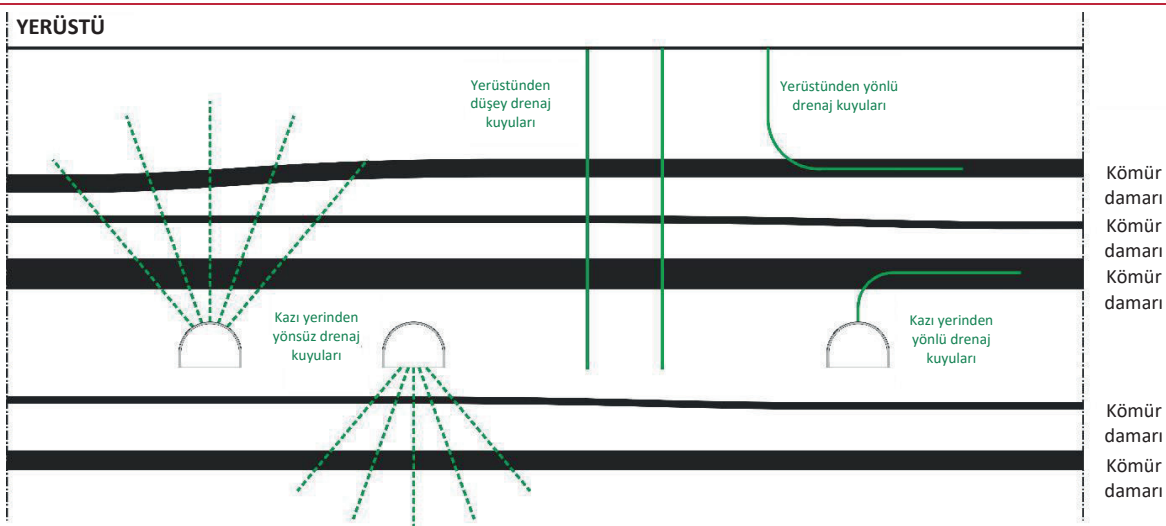
4.3. Madencilik Faaliyetleri Öncesi Metan Drenajı Yöntemleri

4.3.1. Madencilik Faaliyetleri Öncesi Çözümler

Gerekirse, uzunayak panolarının işletmeye hazırlanması sırasında galerilerin hazırlanması veya açılması süreçleri sırasında gaz yakalanabilir. Ayrıca, geliştirilmekte olan damarın üstündeki veya altındaki damarlar gibi gaz kaynaklarının, damar içi sondaj delikleriyle gazı giderilebilir:

- Yüze sondaj deliklerinden drenaj,
- Kömür damarında yeraltı hazırlık çalışmaları sırasında drenaj,
- Diğer kömür damarlarında madencilik faaliyetleri sırasında drenaj.

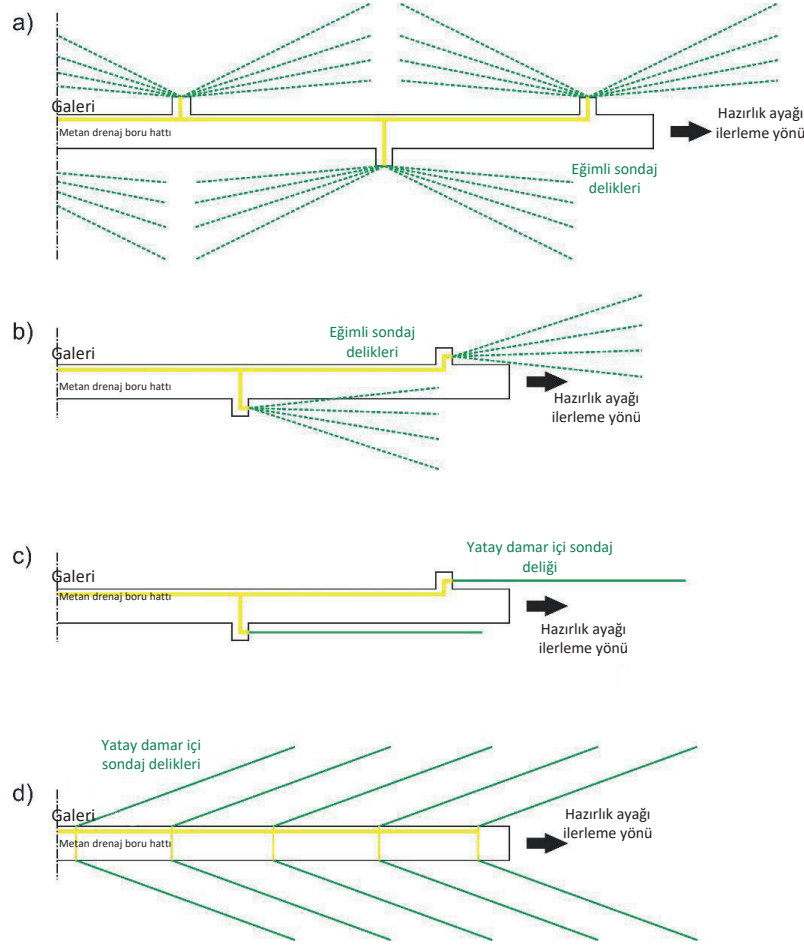
Şekil 4.4'te, üretilmesi beklenen damarların gazdan arındırılması için kazı yerlerinden ve yüzeiden açılan drenaj deliklerinin farklı çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Ön drenaj yöntemleri^[199].

Yeraltı hazırlık çalışmaları sırasında drenaj

Açılan galerilerin hazırlanması sırasında metan drenajı çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Sondaj delikleri çoğunlukla yoldaki boşluklardan açılmakla beraber direkt olarak yoldan da açılabilirler. İlerleme ayağı yönünde ve ilerleme ayağının biraz gerisinde de sondaj deliklerinin açılması mümkün olmaktadır. Sondaj delikleri kömür damarlarında da açılabilir olup, bu durumda damar içi sondaj delikleri olarak adlandırılırlar. Buna ek olarak üstte ve altta uzanan tabakalarda da açılmaları mümkündür. Sondaj delikleri yoldaki bir sondaj sahasından tek bir sondaj deliği olarak veya çoklu sondaj delikleri, damar içi fan sondaj delikleri^[14] veya grup sondaj delikleri biçiminde açılabilir. Şekil 4.5'te, açılan galerilerin hazırlanması sırasında drenaj sondajı yapılmasına ilişkin çeşitli örnekler gösterilmektedir. Galerilerin açılması sırasında uygulanan drenaj yöntemi, yardımcı havalandırma sistemine uyarlanmalıdır. Burada cebri havalandırma sisteminin kullanılması tavsiye edilmektedir.

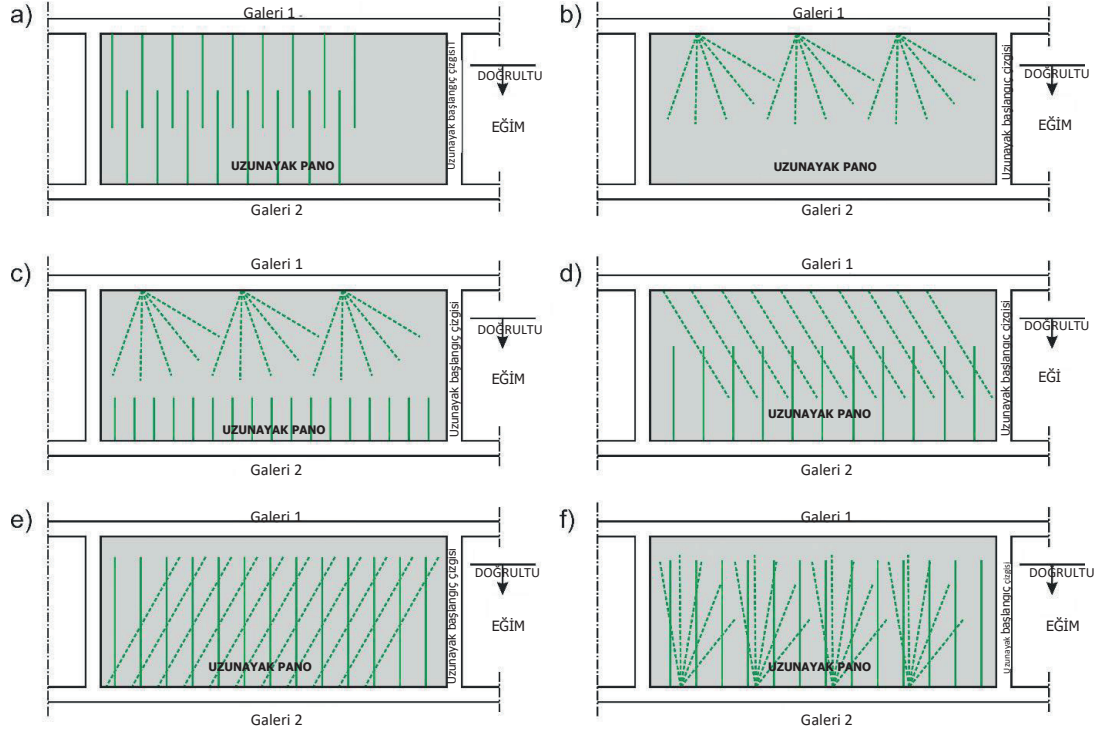


Şekil 4.5: Sondaj kazılarında ileri metan drenajı örnekleri şunlardır^[199, 200]: a) Boşluklardan çift yönlü eğimli sondajlar, b) ayak ilerlemesi yönünde boşluklardan eğimli sondajlar, c) ayak hattına paralel boşluklardan açılan yatay damar içi sondaj delikleri, d) boşluklardan açılan ve ayak hattından sapan yatay damar içi sondaj delikleri.

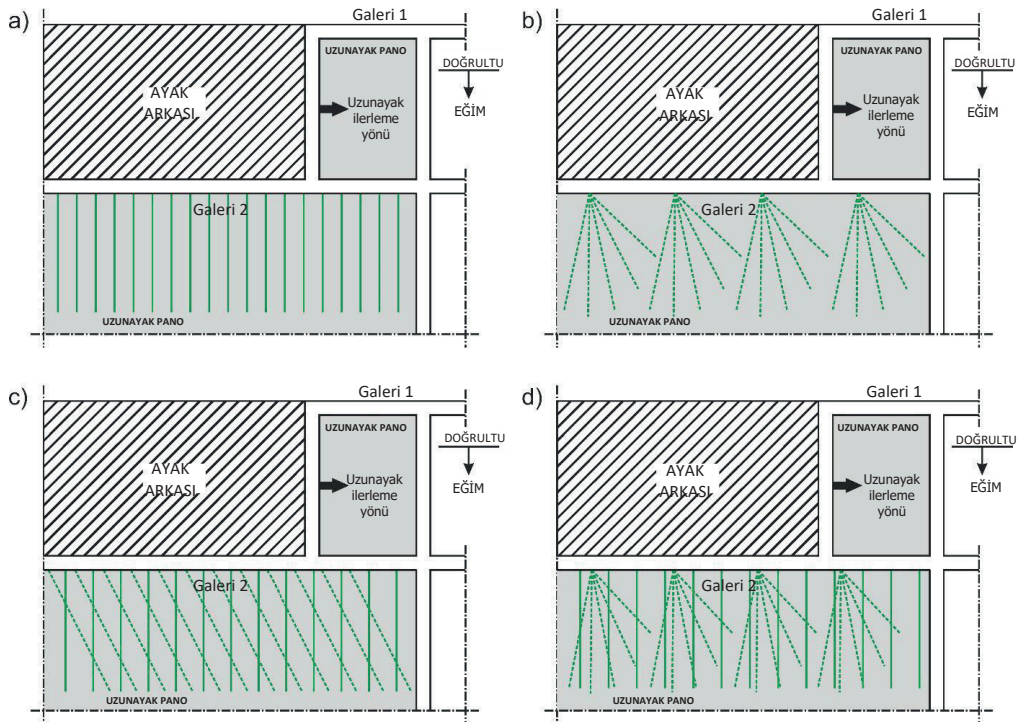
Madencilik faaliyetlerinde ön drenaj

Ön drenaj, işletme için kömür damarlarının hazırlanması sırasında da gerçekleştirilebilir. Örneğin, kömür damarlarının gazdan arındırılması, damardaki eğimli sondaj delikleri ve yatay delikler veya yönlü sondaj delikleri aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu durumda, uzunayak panosunu çevreleyen maden kazılarında ve bitişik kazılardan (üstte ve altta) drenaj amaçlı sondaj delikleri açılabilir. Bu deliklerin boyutları gelecekteki işletim panosunu kapsamaktadır. Planlanan doğrultu alınlarının ön drenaj örnekleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Benzer şekilde, bir damarın eğimi boyunca planlanan uzunayaklardan drenaj yapılabilir. Planlanan uzunayak panosunun ön drenajı, bitişik uzunayağın üretilmesi sırasında da gerçekleştirilebilir. Böyle bir durumda, kazılacak kömür damarının diğer kısmının gazının giderilmesi için yolların birinden drenaj amaçlı sondaj delikleri açılır. Şekil 4.7'de, bu tür metan drenajının örnekleri gösterilmektedir. Sondaj örüntüleri değişiklik gösterebilir ve kömür geçirgenliğine, üstte ve altta uzanan kömür damarlarının varlığına, damar eğimine vb. bağlıdır.

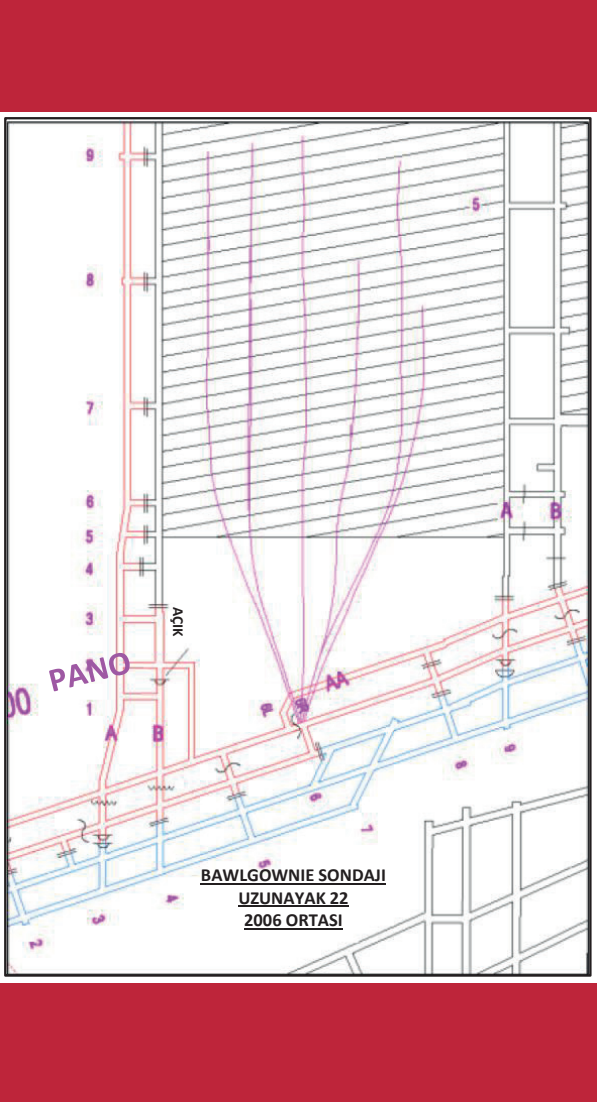
Şekil 4.8'de, uzunayaknda faydalı gaz kontrolü ile çok yüksek gaz akışlarının ürettiği Balgownie damarının yönlü damar içi sondaj delikleri gösterilmektedir^[201].



Şekil 4.6: Ayağa başlamadan önce uzunayak panosunda sondaj delikleri açmanın farklı yolları arasında şunlar yer alır: a) taban yollarından yatay damar içi sondaj delikleri, b) üst taban yolundan tavan ve zemin damarlarına beş grup eğimli sondaj deliği, c) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve üst taban yolundan beş grup enine sondaj deliği, d) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve üst taban yolundan eğimli tek sondaj delikleri, e) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve alt taban yolundan eğimli tek sondaj delikleri ve f) alt taban yolundan yatay damar içi sondaj delikleri ve alt taban yolundan beş grup eğimli sondaj deliği.



Şekil 4.7: Bitişik uzunayaktaki çalışmalar sırasında uzunayak panosunda sondaj delikleri açmanın farklı yolları şunlardır: a) Yatay damar içi sondaj delikleri, b) fanlı eğimli sondaj delikleri grubu, c) damar içi ve eğimli sondaj delikleri, d) damar içi tekli sondaj delikleri ve fanlı eğimli sondaj delikleri grubu



Şekil 4.8: Balgownie kömür damarı eğimli delme örüntüsü^[201].

4.3.2. Madencilik Faaliyetleri Öncesi Metan Drenajı İçin Koşullar

Ön drenaj, doğrudan üretilen damardan çıkan gaz akışını azaltmanın tek yoludur ve kömür çıkarılan damar ana gaz emisyon kaynağı ise bu önemli hale gelebilir. Patlama risklerini azaltmak için bazen ön drenaj gereklidir. Drenaj kömür çıkarmadan önce yapıldığından, toplama sistemlerinin yer hareketinden etkilenmesi olası değildir ve uygunsa, genellikle nispeten yüksek saflıkta gaz çıkarılabilir. Kömürün geçirgenliği ve gaz içeriğinin önemli miktarda gaz akışına imkân tanımak için yeterli olması şartıyla, kömür çıkarılmadan önce kömür bloklarından yapılan drenaj genellikle yüksek saflıkta ve tutarlı gaz akışları üretmektedir. Bakir galerilere yayılan önemli gaz akışları, orta ila yüksek kırılma geçirgenliğinin göstergesidir ve hem etkili ön drenaj hem de gaz kullanımı için bir potansiyel sunmaktadır.

Kömür geçirgenliği, kömür damarını yeterince boşaltmak için gereken süreyi doğrudan etkilemektedir. Kömürün geçirgenliği ne kadar düşükse, kömür kökenli gaz içeriğini gereken ortalama değere düşürmek amacıyla gazı boşaltmak için o kadar fazla zamana ihtiyaç bulunmaktadır. Alternatif olarak, daha düşük geçirgenliğe sahip kömürler, kömür çıkarma öncesinde istenen metan seviyelerine ulaşmak için daha fazla sayıda sondaj deliği açılmasını gerektirir. Gazdan arındırma için mevcut süre ve sondaj işleminin maliyeti, sahaya özgü koşullar altında madencilik öncesi gaz gidermenin nihai fizibilitesini belirlemektedir.

Birçok ülkede sığ rezervler çıkarıldıkça ve madencilik faaliyetleri daha derin damarlara doğru ilerledikçe, kömür geçirgenliği ve ön drenaj verimliliği azalmaktadır. Bunun nedeni, bu kömür havzalarında gerçekleştirilen herhangi bir etkili metan drenajının, kömür kademeli olarak çıkarıldığı için tabakaların göçmesinin neden olduğu kırılma ve geçirgenlik artışına dayanmasıdır.

Ön drenaj, kömür ve gaz püskürmesine eğilimli kömür damarlarının gazdan arındırılması için temel bir önleme yöntemidir^[54,40]. Kömür çıkarma işleminden önce metan drenajı sistemlerinin uygulanması, damarın gaz içeriğini ve gaz basıncını ve dolayısıyla tam ölçekli madencilik başladığında drenaj sistemi üzerindeki yükü azaltır. Tam ölçekli madencilikten önceki drenaj süresi ne kadar uzun olursa o kadar iyidir. Gaz basınçlarının düşürülmesi ayrıca gaz püskürme riskini de azaltmaktadır.

Damar içi sondaj delikleri hakkında daha fazla bilgi [202, 203, 204] nolu kaynaklar içinde bulunabilir.

4.3.3. Düşük Geçirgenliğe Sahip Kömür Damarlarında Gelişmiş Ön Drenaj Yöntemleri

Damar içi delikler değişimli olarak çalışır. Tipik olarak, deliği emme sistemine bağlandıktan hemen sonra, deliğe su girmesi nedeniyle kapasitede bir düşüş olmaktadır. Ancak bir süre sonra delikten çıkan gaz verimi maksimum değere yükselir ve ardından tükenme aşaması gelir. Gaz üretim süresi, öncelikle kömür damarının geçirgenliğine ve drenaj sisteminin parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, gazın akış hızlarını artırmak için delik etrafındaki kömür kırılmasını artıran yöntemler kullanılabilir.

Gaz drenaj performanslarını artırmak için, sondaj deliği yoğunluğunun artırılması ve gaz drenajı süresinin uzatılması gibi farklı önlemler uygulanır. Ayrıca gevşetme patlatması, kömür damarlarının geçirgenliğini etkili bir şekilde iyileştirebilir. Ancak, bu teknoloji madencilik sektörü tarafından henüz yeterince kabul görmemiş ve benimsenmemiştir çünkü patlayıcıların patlamaması, maden güvenliği için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Şok dalgası, ultrason, CO₂ ve N₂ gazı yer değiştirmesi parametreleri karışık sonuçlarla test edilmiştir^[204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211].

Yüzeyden kömür damarlarına açılan dikey sondaj delikleri benzer şekilde davranır. Kömür damarlarındaki gaz içeriği derinlikle birlikte artma eğilimindedir. Yüzeğe yakın damarlar, hareket halindeki gazlarının çoğunu muhtemelen kaybeder. Ancak, yüzey sondajından yön kontrollü olarak açılan çok sayıda sondaj deliği, kabul edilebilir akış hızları üreten mesafeler için bir kömür damarını takip edecek şekilde yönlendirilebilir. Herhangi bir damara giren deliğin kısınlığı nedeniyle, kömür damarlarını kesecek şekilde yüzeyden açılan dikey deliklerin çok az gaz üretmesi muhtemeldir. Uygulanan hidrolik uyarım veya hidrolik kırma, damara su veya kum parçacıkları içeren bir köpük enjekte edilmesini içerir. Sondaj deliğinde başka işlemler de yapılmaktadır. Amaç, damarın kırılma ağını hidrolik basınçla genişletmektir. Kum parçacıklarının amacı, enjeksiyon durduğunda akış yollarını açık tutmaktır.

Yüksek geçirgenliğe (> 10 mD) sahip sığ ila orta derinlikteki damarlar için, "hidrolik olarak kırılmış kuyular" olarak da bilinen, yüzeyden açılmış hidrolik olarak uyarılan dikey kuyular, başta Birleşik Devletler olmak üzere çeşitli yerlerde geleneksel olarak madencilikten önce metanı boşaltmak için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır^[212].

Damar içi sondaj delikleri için hidrolik kırma teknolojisi, düşük geçirgenliğe sahip kömürde gaz drenajı için yaygın olarak kullanılmaktadır ve sonuçlar umut vericidir. Ancak yeraltı hidrolik kırma işlemi, karmaşık bir ekipman seti ve uzun bir çalışma süresi gerektirmekte olup, bu da madendeki sınırlı alan nedeniyle bu tekniğin uygulanmasını engellemektedir.

Patlamalara eğilimli kömür damarları gazdan arındırılırken metan drenajı performansının artırılması çok önemlidir. Kömür damarının gaz içeriğini ve kömür ve gaz püskürme riskini etkili bir şekilde azaltmak için, yüksek gazlı kömür damarlarında hidrolik kırma uygulanabilir. Koruyucu katman kullanımı, gerilmeyi etkili bir şekilde azaltabilir ve birden fazla kömür damarı altında geçirgenliği artırabilir. Kömür damarlarının geçirgenliğini ve püskürmelere eğilimli, düşük geçirgenlikli kömür damarlarında gaz ön çıkarımının etkinliğini artırmak için hidrolik önlemler, gazlı kırma ve diğer önlemler uygulanmaktadır^[213]. Ana yönlü sondaj deliği, kömür tabanındaki kayaç yolunu değiştirmek için kullanılır ve yan yönlü sondaj delikleri gaz çıkarma maliyetini azaltmak için eğimli deliklerinin yerine kullanılır^[214]. Aynı zamanda, gerilmeyi azaltmak ve kömür damarının geçirgenliğini artırmak için ana sondaj deliği, yan sondaj delikleri ve yönlü hidrolik jet kullanılarak yumuşak alt katmanlar boyunca yumuşak kömür çıkarılmaktadır.

Sondaj deliklerinde hidrolik yıkama, düşük geçirgenliğe sahip yumuşak kömür damarlarında geçirgenliği artırmak ve kömür ve gaz püskürmelerini hızlı bir şekilde ortadan kaldırmak için yaygın olarak uygulanmaktadır^[215, 216, 217, 218].

Madendeki drenaj deliklerinin geçirgenliğini iyileştirmek mümkün olup, bu yönde çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Sondaj deliklerinin verimliliğini artırma örnekleri makalelerde verilmiştir^[214]. Ancak, bu çalışmalar

önemli finansal kaynaklar gerektirmektedir. Bu nedenle, düşük geçirgenliğe sahip birçok madende, son drenaj adı verilen madencilik sonrası metan drenajı kullanılarak çok daha etkili metan yakalama gerçekleştirmek için ön drenaj yapılmaz.

4.4. Madencilik Sonrası Metan Drenajı Yöntemleri

Dünyanın birçok kömür havzasında, kömür damarlarının düşük geçirgenliği (<0,1 mD) ve damarların yerel jeolojik özellikleri (örneğin yumuşak kömürler, faylanma) ön drenaj teknikleri için elverişli değildir. Örneğin, yüzeyden damar içine yönlü sondaj tekniklerinin, yaklaşık 0,5 mD ila 10 mD (yani, yaklaşık $5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^2$ ila $1 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$) geçirgenlik aralığına sahip kömür damarlarının önceden gazdan arındırılmasında etkili olduğu kanıtlanmıştır^[54].

Madencilik için neden olduğu gaz içeren katmanlar, uygulanan uzunayak madencilik sistemi sırasında metanın verimli bir şekilde yakalanmasında önemli bir rol oynamaya başlamaktadır.

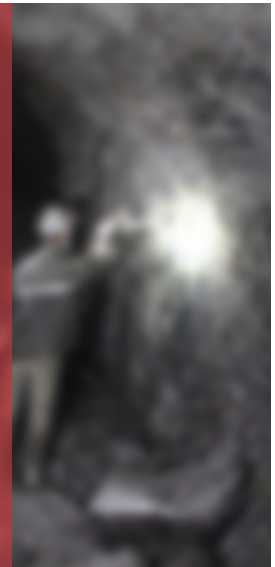
Metan özü, bölüm 3'te gösterildiği gibi, gaz desorpsiyon kaynaklarında yakalanması ve ön tahliye bölgesinde yer değiştirmesine dayanmaktadır.

Delik yerleşimi için pano kenarından optimum mesafe, sahaya özel deneysel değerlendirmelerle birlikte uzunayak örtü katmanının oturma mekaniği değerlendirilerek belirlenmelidir. Delikler, gevşeme bölgesinde olacak şekilde pano kenarına yeterince yakın bir konumda olmalı, ancak sisteme aşırı miktarda maden havalandırma havası çekilecek kadar yakın olmamalıdır^[96, 219]. Uzunayağın sürekli ilerleyen aynası, bir basınç rahatlatma bölgesinin sürekli oluşumunu sağlamaktadır. Bu kendi kendini oluşturan bölgeden gaz yakalanmalıdır. Kömür çıkarma işlemi sırasında gaz yakalama genellikle son drenaj yöntemi olarak bilinir.

- Kömür çıkarma sırasında drenaj,
- Kazılmış olan alanlardan drenaj.



Genel olarak, uzunayak arının arkasında açılan çapraz ölçüm sondaj kuyuları, kömür arının önünde açılanlara kıyasla daha yüksek yakalama verimliliği elde eder ve daha yüksek gaz saflıklarını korur.

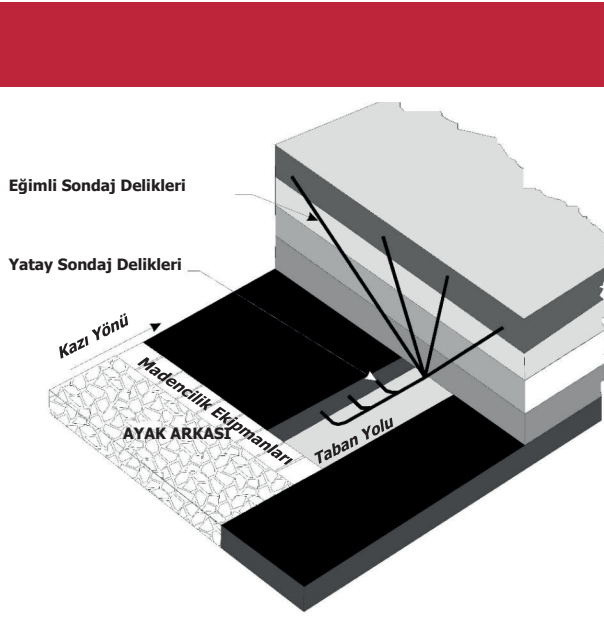


4.4.1. Kömür Çıkarma Sırasında Drenaj

Kömür üretimi sırasındaki son drenaj aşağıdakiler kullanılarak uygulanabilir:

- Eğimli sondaj delikleri,
- Süper parlak yöntemler,
- Uzun yönlü sondaj delikleri,
- Yüzeiden ayak arkasına sondaj delikleri (veya kuyuları).

Şekil 4.9'da hem damar içi sondaj deliklerinin ön drenaj yöntemi olarak hem de eğimli sondaj deliklerinin son drenaj yöntemi olarak kullanılmasının avantajları gösterilmektedir. Hem eğimli hem de damar içi sondaj delikleri yeraltı kazı yerlerinden açılmaktadır.



Şekil 4.9: Taban yollarından açılan metan drenaj kuyuları^[198].

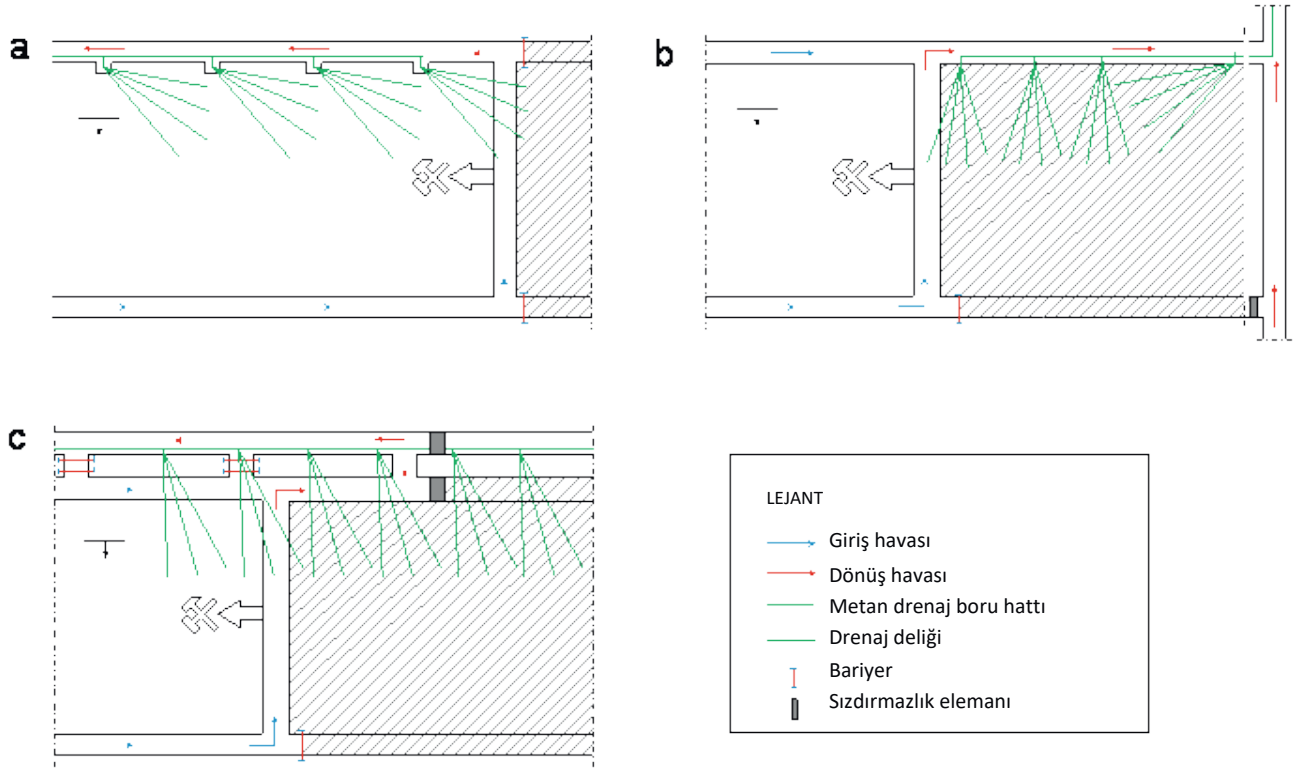
Eğimli sondaj delikleri

Eğimli sondaj delikleri çeşitli konfigürasyonlarda açılır ve kömür üretiminin neden olduğu gerilme azalmasına yanıt olarak gevşemiş tavan ve zemin tabakalarını boşaltmak için tasarlanmaktadır. Genellikle, iki ila üç gaz giriş noktası, tavan ve zemin tabakalarında geri dönümlü uzunayağın ilerisinde çalışır. Her sondaj noktası, üç ila beş grup sondaj deliğinden oluşmaktadır. Benzer şekilde, eğer mümkünse, ayağın arkasında sondaj delikleri bulunan daha fazla sayıda gaz çıkarma noktası bulunur. Bu tip konfigürasyon, uzunayak oluştuktan sonra ayak tabakaları geçerken daima hasar gördüğünden madencilik yapılmadan önce delinmiş olarak gösterilenlerden daha iyi performans gösterme eğilimindedir.

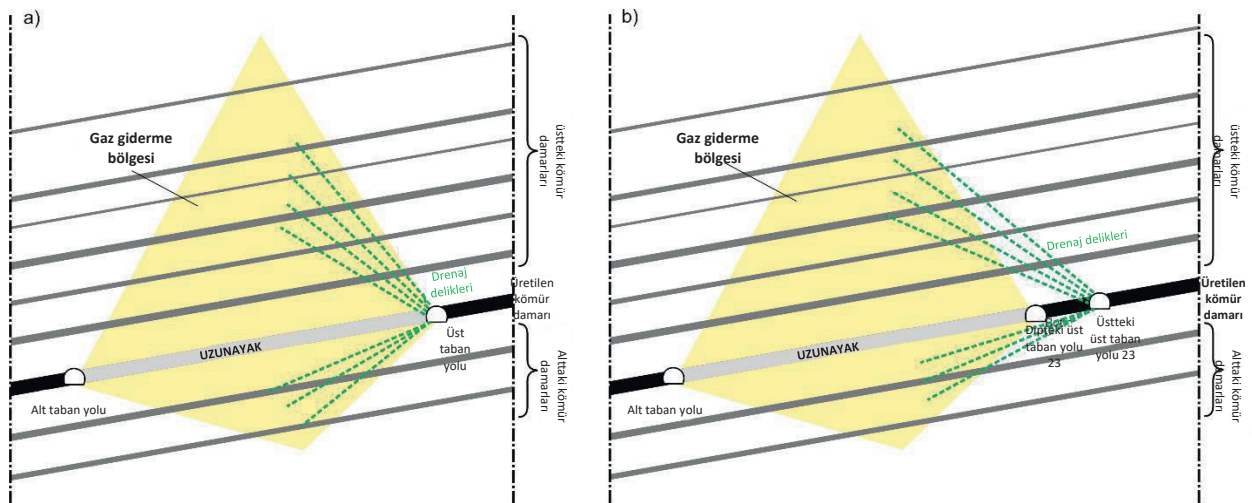
Üstte uzanan gevşemiş kömür damarlarından metan yakalamak için, geri dönümlü uzunayak aynası olan uzunayak sistemi tarafından oluşturulan basınç rahatlama bölgesinin sınırlarının belirlenmesi gerekir. Gazdan arındırma bölgesi konsepti, metan drenajı amacıyla uygulamaya koyulmuştur ve Bölüm 3'te açıklanan basınç rahatlama bölgesine karşılık gelmektedir. Bu bölge hem üstte hem de altta uzanan kömür damarlarını içerir. Bu kömür damarlarındaki metanın basınç rahatlama bölgesinde yakalanması kolaydır. Geri dönümlü uzunayak alınlarının havalandırma sistemine bağlı olarak (bkz. Bölüm 3), eğimli sondaj delikleri ilerleme ayağının önünden veya arkasından açılmaktadır.

Genel olarak, uzunayağın arkasından açılan eğimli sondaj delikleri, kömür ayağının önünden açılanlara kıyasla daha yüksek yakalama verimliliği sağlar ve daha yüksek gaz saflıklarını korumaktadır. Bununla birlikte yığın aynalar inşa edilerek ayağın arkasındaki üst taban yolunun korunması ve bazı durumlarda da ayak arkasının sızdırmazlığının sağlanması gerekir. Ayağın arkasındaki üst taban yolunun sızdırmazlık elemanları, galeri desteğini artırmaya ve kendiliğinden yanma riskini en aza indirmek için ayak arkasını havalandırma sistemi girişinden izole etmeye yarar.

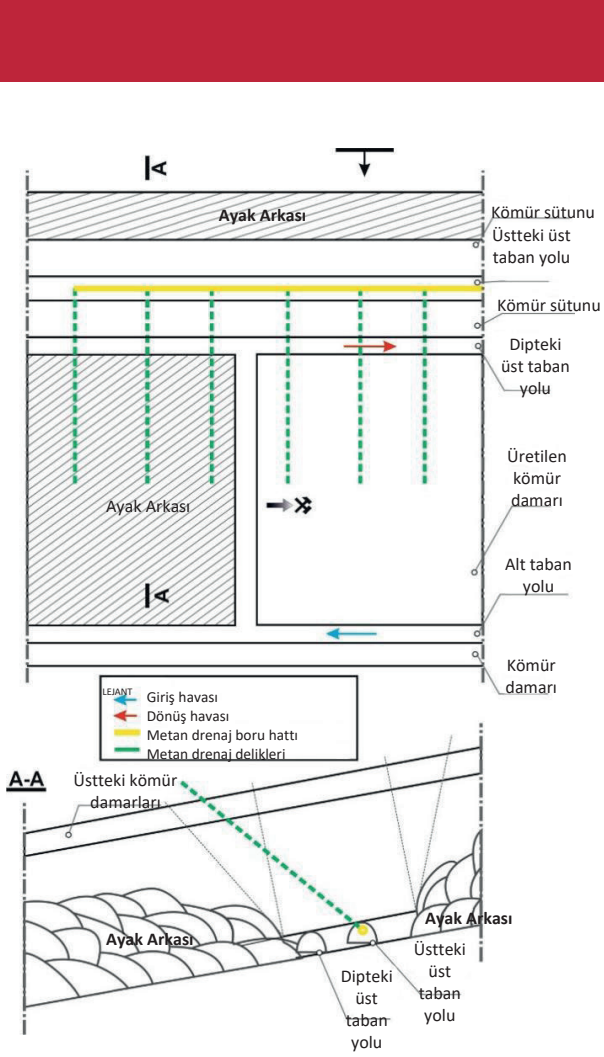
Şekil 4.10'da doğrultu alınları ve eğim alınları için gazdan arındırma bölgesine sondaj delikleri açmanın en yaygın yolları gösterilmektedir. Bir dizi sondaj deliği veya bir grup sondaj deliği genellikle yoldaki sondaj alanından açılır. Sondaj deliklerini, taban yolları ekseninden sapma açıları ve düşey açılar nitelendirir. Eğimli sondaj deliklerinin konumu ve parametreleri, yerel jeolojik özelliklere ve uzunayak havalandırma sistemlerine bağlıdır. Sondaj delikleri genellikle aktif panoların taban yollarından açılmaktadır. Havalandırma basıncının havalandırılmalı uzunayak panoları etrafındaki dağılımı nedeniyle, eğimli sondaj delikleri için genellikle bir üst taban yolu seçilir. Ancak, kömür çıkarılmış damarda yollardan açılan eğimli sondaj delikleri de yaygın olarak uygulanmaktadır. Şekil 4.11'de, ilerisinde sondaj delikleri açılmış bir ayağın enine kesiti gösterilmektedir. Bu bölge ile ilgili daha önce G. Flügge^[220] tarafından açıklama yapılmıştır. Flügge'nin araştırmasına göre, kömür çıkarılmış düz bir damar için üçgenin kenarlarının açısı 60 derecedir. Polonya'da kömür madenciliği sektöründe metan emisyonlarını tahmin etmek ve metan drenaj sistemlerini kullanmak için genellikle böyle bir bölge belirlenmektedir. Şekil 4.12'de, gazdan arındırma bölgesine giden tekli eğimli sondaj delikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.10: Polonya'da kömür madenlerinde dönümlü uzunayaklar için en popüler havalandırma ve metan drenajı sistemleri^[191], a) U tipi havalandırma sistemli uzunayak panosu, b) Y havalandırma sistemli uzunayak panosu, d) geri dönüşlü uzunayak panosu (kesilmiş paralel üst taban yolu).



Şekil 4.11: Uzunayak etrafındaki gaz giderme bölgesi.



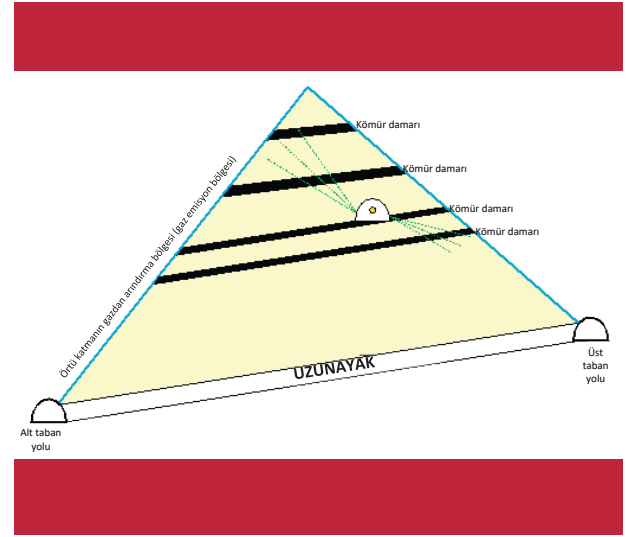
Şekil 4.12: İki kömür sütunlu bir uzunayak için üstte uzanan kömür damarına tekli eğimli sondaj delikleri^[92].

Bindirmeli yöntemler

İkinci yöntemde üretilen kömür damarının üstünde veya altında uzanan kömür damarlarında bulunan tavan tabakasında çalışma bölgesi yönüne paralel bir metan drenaj galerisinin açılması yer almaktadır. Bazen “bindirmeli galeri” veya “Hirschbach” olarak adlandırılan bu metan drenajı yöntemi, 1940’ların sonlarında Saar kömür sahasında geliştirilmiştir^[131, 220, 144]. Bu yöntem, 1940’ların sonlarında, üretilen damarın tavanındaki çok sert kumtaşlarının, doğrudan taban yollarından drenaj delikleri açmayı zorlaştırdığı Saar Havzası’nda geliştirilmiştir. Bu yöntem, planlanan bir uzunayak panosu üzerindeki bir kömür damarında çıkmaz bir galeri açılmasını içerir. Bir galeri sızdırmaz olup, metan drenaj sisteminin emme basıncına (negatif basınç) sahiptir. Geri

dönümlü uzunayağın kazısı sırasında, gevşemiş bölgede bulunan bu galeri, çevredeki kayalardan metan çeken bir kanal görevi görmektedir. Bu galerinin drenaj etkisi, altta uzanan damarlara önceden bir dizi delik açılarak artırılabilir (Şekil 4.13). Aktif uzunayak panosu ile metan galerisi arasındaki gevşeyen tabakalar, gaz yukarı doğru hareket ederken gaz için geçiş yolları ve toplama noktaları görevi gören bölgelere gaz üretmektedir. Bu çizim, panonun üzerinde tavan tabakalarına ve zeminin altından altta uzanan zemin tabakalarına açılmış sondaj deliklerini göstermektedir.

Drenaj delikleri, gevşeme bölgesinde olacak ancak göçme bölgesini kesmeyecek şekilde yerleştirilmelidir.

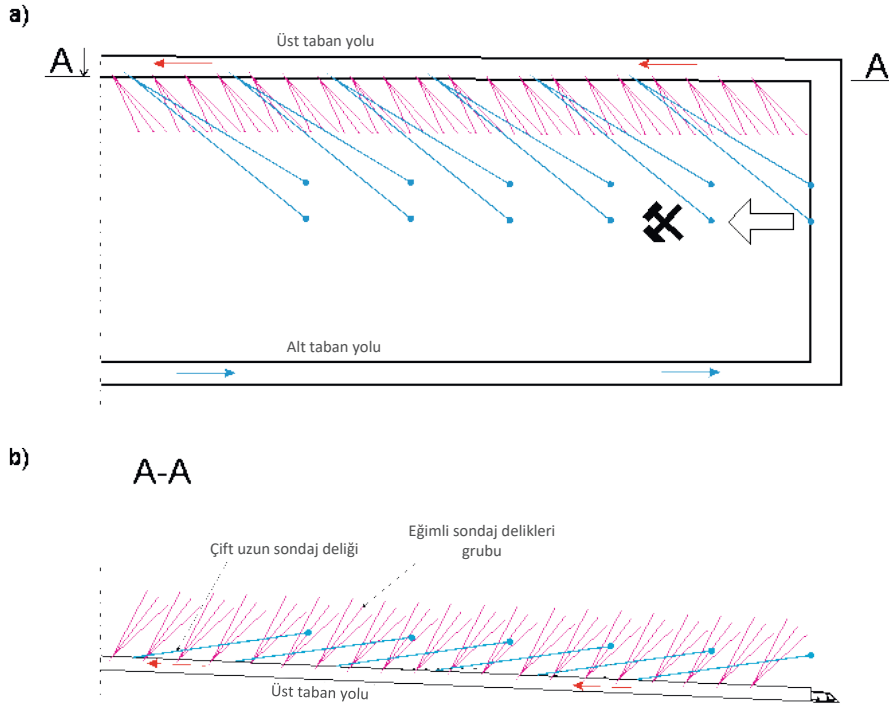


Şekil 4.13: Üstte uzanan metan galerisinin şematik diyagramı.

Bu yöntem Asya ülkelerinde kömür madenciliğinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanımına ilişkin daha fazla bilgi [131, 14, 191, 120] nolu kaynaklar içinde bulunabilir.

Altteki kömür damarlarındaki metan drenaj galerisi, genellikle kömür çıkarılmadan önce üstteki kömür damarındaki patlama tehdidini ortadan kaldırmak için kullanılır. Uzunayak kazılarının üstünde veya altında bir metan drenaj galerisinin açılması ve bozulmuş bölge içinde yer alan önceki kazı yerlerinden çıkan gazın boşaltılması, aktif maden kazı yerlerine salınan metan emisyonlarını azaltmanın etkili yollarıdır.

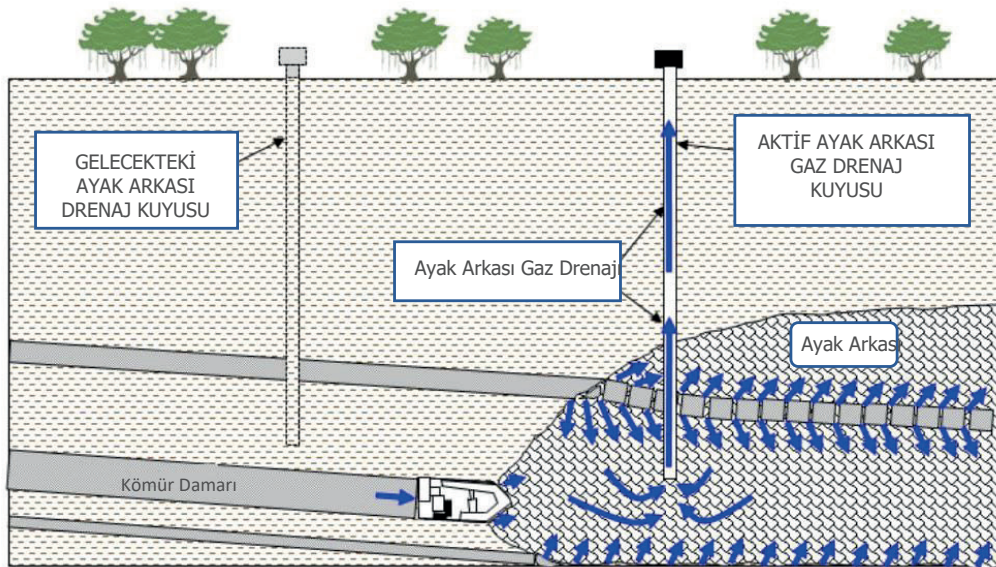
Bu yöntemin değiştirilmiş bir hali, tasarlanan uzunayak üzerinde tavanda 200 mm çapında iki ila üç uzun sondaj deliği açmak ve bunları metan drenajı amaçlı sondaj delikleri olarak kullanmak şeklindedir^[221]. Şekil 4.14’te, geri dönümlü uzunayağın ilerisindeki eğimli ve uzun sondaj deliklerinin yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 4.14: Eğimli ve uzun sondaj delikleri arasındaki iş birliğinin şematik diyagramı.

Yerüstünden ayak arkasına açılan sondaj delikleri (veya kuyuları)

Yerüstünden ayak arkasına açılan sondaj delikleri ve dikey kuyular, “ayak arkası havalandırma sondaj delikleri”^[222], “ayak arkası delikleri”^[223, 224] veya “ayak arkası gazı havalandırma delikleri”^[225, 226] olarak bilinir ve genellikle kömür çıkarılmadan önce yüzeyden ayak arkasının üst sınırlarına doğru açılırlar. Bu sondaj delikleri, deliğin alt kısmı alttaki gevşemiş ve kırılmış tabakalardan yukarı doğru hareket eden gazı boşaltacak şekilde hazırlanır. Şekil 4.15’te, tipik olarak dikey olan ayak arkası kuyusunun drenaj yöntemi gösterilmektedir.

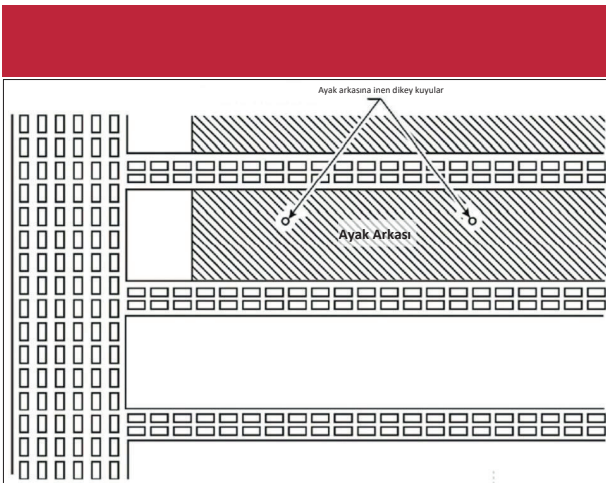


Şekil 4.15: Dikey kuyu yüzeyinden ayak arkası gazı drenajı^[113].

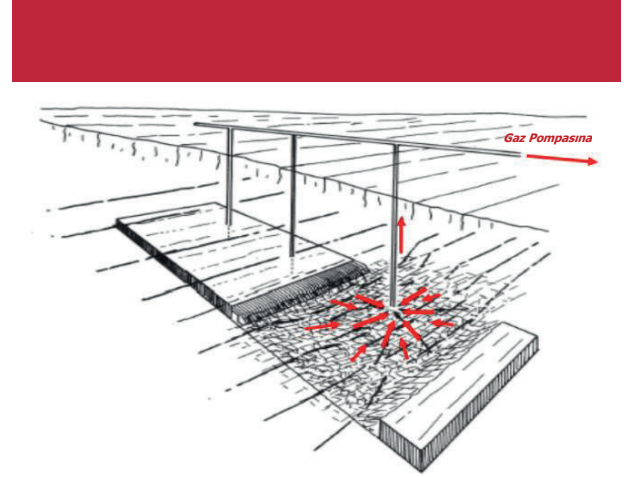
Delikler genellikle kısmi vakum altında çalıştırılmaktadır. Emmenin büyük miktarlarda maden havası çekip, metanı seyrelterek saflığını %30'un altına indirecek seviyede olmadığından emin olunmalıdır. Saflık %25 ila %30'un altına düştüğünde bu ayak arkası delikleri kapatılmalıdır. Bu yöntem Avustralya^[227, 228], Amerika^[229, 230, 203, 231, 226, 119] ve Ukrayna'daki^[232] madencilik sektöründe yaygın olarak uygulanmaktadır. Ayak arkası delikleri arasındaki mesafe genellikle belirli yerel jeolojik koşullar altında etkili yarıçaplarına bağlı olup, ilk ayak arkası deliği genellikle başlangıç çizgisinden 30-100 m uzaklıktadır. Emme basıncı (negatif basınç), deliğin geometrik parametrelerine ve beklenen etkili yarıçapına bağlı olarak seçilmektedir.

Bu metan drenaj yöntemi, örtü katmanında kömür tabakası veya kömür damarı yoksa etkilidir. Daha sonra, yüksek konsantrasyonlarda metan ayak arkasına kaydırılır. Uzunayak pano alanına metan akışını sınırlamanın etkinliği, çok damarlı uzunayak madenciliği yapılması durumunda azalabilir. Ayak arkası gazı havalandırma deliği tarafından yakalanan gaz miktarı nispeten yüksek bir seviyede tutulabilse de basınç rahatlama bölgesinden uzunayak pano alanına metan girişi yine de önemli düzeyde olabilir ve bu, dönüş hava yollarında metanın konsantrasyonunun düşürülmesine dair beklenen sonucu sağlamaz. Çok derin madenler için maden içi drenaja kıyasla uygun maliyetli olmakla beraber üretkenlik ömrü daha kısadır. Kuyular kısa ömürlüdür ve gaz kalitesinde hızla düşüşe neden olmaktadır. Teknolojik deneyim eksikliği ve yüzeyden ayak arkasına açılan sondaj deliklerinin operasyonel kapsamı, ayak arkasında kendiliğinden yanma riskinin artmasına neden olabilir. Metanın taşınması için yüzey altyapısı da gereklidir.

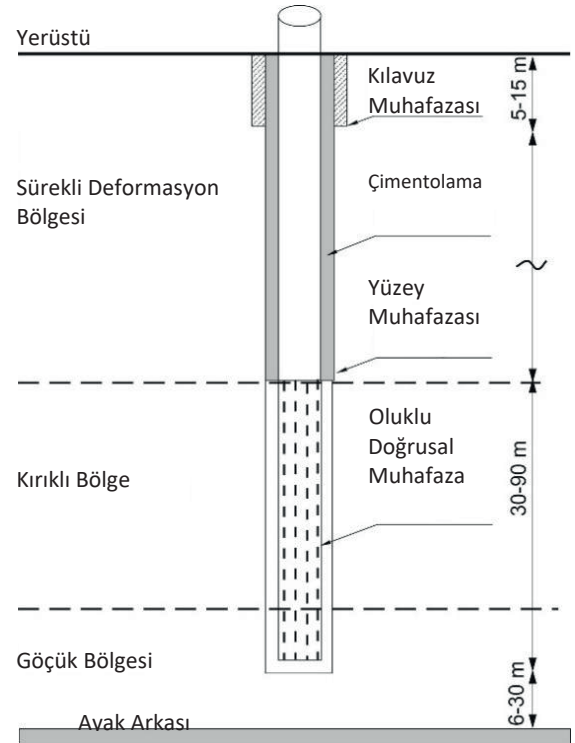
Şekil 4.16 ve 4.17'de, yüzeyden damar içine açılan sondaj delikleri kullanma fikri gösterilmektedir. Şekil 4.18'de, ayak arkası deliğinin şematik enine kesiti gösterilmektedir.



Şekil 4.16: Dikey kuyularla ayak arkası drenajlı uzunayak yerleşim düzeni örneği^[183].



Şekil 4.17: Geri dönüşlü uzunayak aynasının arkasındaki ayak arkası drenajının şematik görünümü^[24].



Şekil 4.18: Ayak arkası deliğinin şematik enine kesiti ([198, 233, 223] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).

Üstte ve altta uzanan kömür damarlarına açılan uzun yönlü sondaj delikleri

Madencilik sektöründe uzun yıllardır çeşitli amaçlarla yönlü sondaj yöntemleri kullanılmaktadır. Yönlü bir delik, önceden belirlenmiş bir rota izlenerek delik ekseninin amaçlanan eğriliği (uzayda eksenin konumunun değiştirilmesi) ile açılan bir delik olarak anlaşılmaktadır. Söz konusu bozulma, bu amaç için tasarlanmış aletler kullanılarak veya sondaj teknolojisinin parametreleri değiştirilerek elde edilir. Bu sondaj delikleri genellikle geleneksel düz sondaj deliklerinden daha uzundur.

Yönlü delik ekseninin eğilmesi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemlerden en yaygın olanları şunlardır:

- Tablo yöntemi,
- Turbo matkaplar kullanarak delikler açmak,
- Dalgıç hidrolik motorlar kullanarak delikler açmak,
- Üst ve yan tahrik kullanarak delikler açmak.

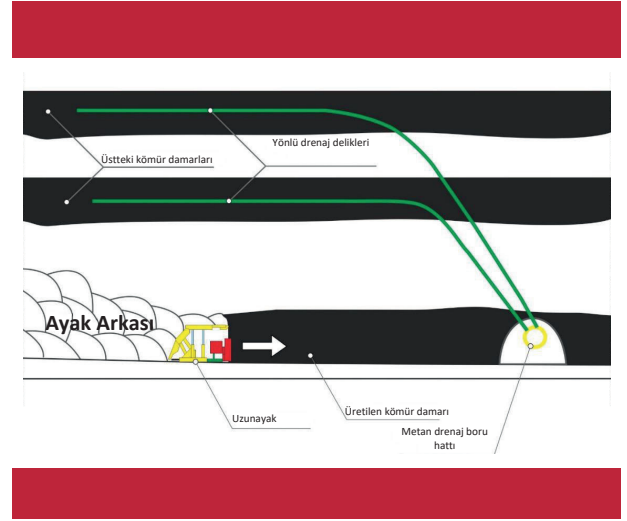
Yönlü delikler açmanın günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntemi, pozitif yer değiştirmeli tip hidrolik motorların kullanılmasıdır.

Şekil 4.19 - 4.20'de, gaz taşıma boru hattına bağlı üst taban yolundan örtü katmanındaki basınç rahatlama bölgesine yönlü delikler açılmasına ilişkin örnekler gösterilmektedir. Şekil 4.21'de gösterildiği gibi yüzeyden uzun yönlü sondaj delikleri de açılabilir.

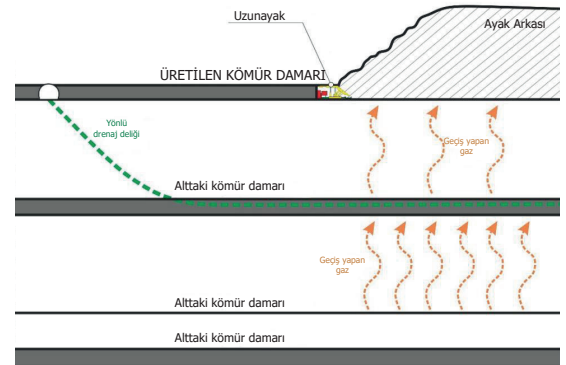
Yönlü sondaj delikleri, sıgı madenlerdeki aktif uzunayakların arkasından metan drenajı için de kullanılabilir. Şekil 4.22'de gaz taşıyan bir kayaç tabakasında yönlü sondaj deliği ile ayak arkasının metan drenajının şematik görünümü verilmiştir.



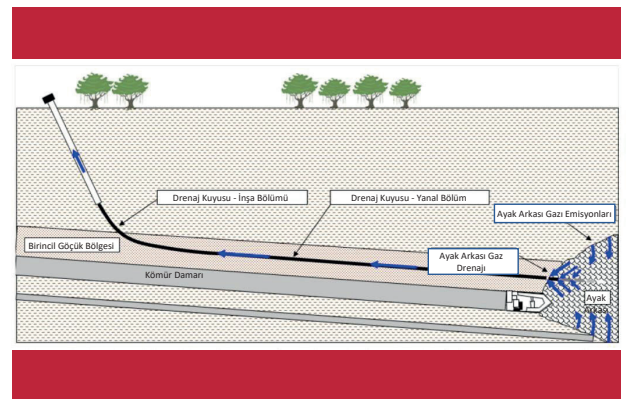
Şekil 4.19: Uzunayak panosunun üst taban yolundan açılan yönlü sondaj deliği ile üstte uzanan kömür damarının metan drenajı^[92].



Şekil 4.20: Uzunayak panosunun bir enine kesitinden açılan yönlü sondaj deliği ile üstte uzanan kömür damarının metan drenajı^[92].



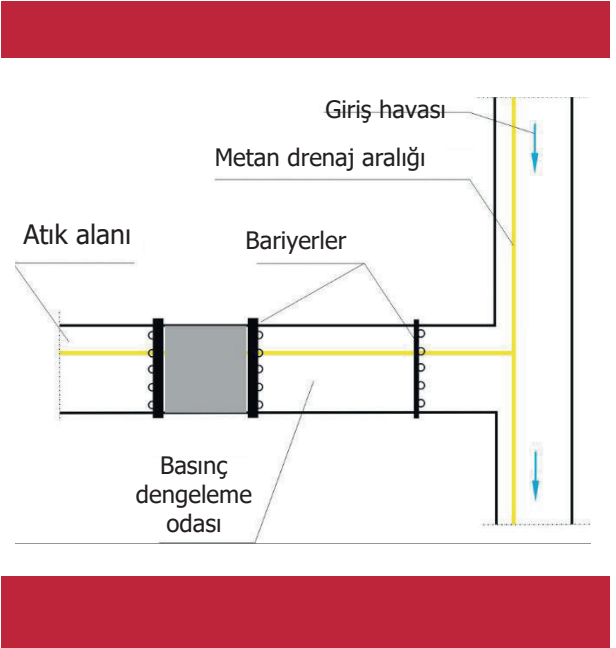
Şekil 4.21: Alttaki kömür damarına açılan metan drenajı amaçlı sondaj deliğinin kesit görünümü, ([234, 96]'dan sonra-Hungerford ve diğ. [235] nolu kaynaklardan alınarak değiştirilmiştir).



Şekil 4.22: Gaz taşıyan bir kayaç tabakasında yönlü sondaj deliği ile ayak arkasının metan drenajının şematik görünümü^[113].

4.4.2. Kazılmış Olan Alanlardan Drenaj

Her maden kazısı belirli bir amaç için yapılmaktadır. Bazıları on yıllar boyunca havalandırma ağında kalır ve maden kaynakları tükenene kadar işlevlerine devam eder. Maden sahalarından birinde veya tamamında madencilik faaliyeti tamamlandıktan sonra maden havalandırma şebekesindeki üretim alanları, özel ve uygun sızdırmazlık elemanlarıyla madenin geri kalanından izole edilir. Metan emisyonu en yüksek olan madenlerde, gaz bileşimi parametreleri yönetmeliklere uygunsa, bu kapalı alanlardan metan drenajı yapılmaktadır. Sızdırmazlık elemanının drenaj ağına bağlanması, gaz çekişinin üfleyici olmasına yol açar ve bu da komşu kazı yerlerine salınan emisyonu sınırlayabilir. Sızdırmazlık elemanı önüne kurulmuş bir sürgülü vana kullanılarak, sızdırmazlık elemanı arkasından gaz taşıma borularına giden gazın akış hızının düzenlenmesi de mümkündür. Ayrıca barometrik basıncın dalgalanmasına bağlı olarak sızdırmazlık elemanlarının arkasından metan alımını artırmak veya azaltmak mümkündür. Şekil 4.23'te, belli bir bölgedeki gaz taşıma boru hattına sızdırmazlık elemanı arkasından boru bağlanmasına dair örnek gösterilmektedir.

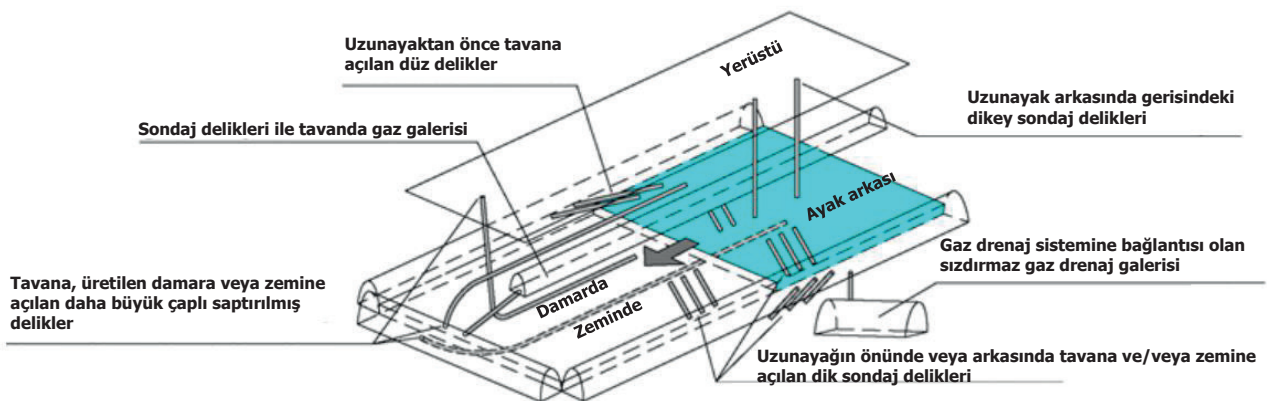


Şekil 4.23: Bariyerli alanlardan metan drenajı ([200] nolu kaynaktan sonra).

Maden ocaklarında setle kapatılmış alanların metan drenajı uzun yıllardır yapılmaktadır. Setle kapatılmış alanlardan metan salımı zamanla azalsa da bir madende sızdırmazlık elemanlarının arkasından metan alımının toplam gaz alımı içindeki payı çok yüksektir ve kazı yerlerinden veya hazırlık galerilerinden yakalanan metan miktarını aşabilir. Nispeten yüksek metan konsantrasyonu ve sabit bir seviyede alım ile uzun yıllardır metan drenajı yapılan arkadan metan drenajı ağında bu tür sızdırmazlık elemanları vardır. Aktif uzunayak panolarından metan drenajında her zaman büyük bir gaz alımı olmaz. Eski atıklar aktif panolara bitişik ise, metan drenajının önemli bir etkisi gözlemlenebilir. Kazı yerlerinde metan alımının arttığı dönemlerde sızdırmazlık elemanlarının arkasından gelen metan miktarı azalır. Barometrik basıncın dalgalanmasına bağlı olarak, daha önce de belirttiği gibi, bu alımın metan drenaj istasyonunun emişiyle (negatif basınç) düzenlenerek artırılabilir veya azaltılabilir vurgulanmalıdır. Madenin merkezi metan drenaj sisteminden ayrılabilen regülatörler, sızdırmazlık elemanlarının arkasından metan yakalanmasına yalnızca periyodik olarak olanak tanır.

4.4.3. Madencilik Faaliyetleri Sonrası Metan Drenajı İçin Koşullar

Madencilik faaliyetleri sonrası gaz drenaj stratejisi, açıklanan drenaj tekniklerinden birinin veya tümünün kullanımını içerebilir. Şekil 4.24'te, bu yöntemlerin kullanımının şematik bir diyagramı yer almaktadır.



Şekil 4.24: Çeşitli son drenaj sondaj deliği açma yöntemleri^[59].

Son drenaj yöntemi seçilirken birkaç önemli husus dikkate alınmalıdır. İlk olarak, drenaj sistemi (sondaj delikleri, metan drenajı, ayak arkası delikleri vb.) ve taban yolları arasındaki basınç farkı sıklıkla, havalandırma havasının galeri çerçevesinden veya ayak arkası tarafındaki galeriden drenaj sistemine sızmasına neden olmaktadır. Bu sızıntı sondaj deliğinin sızdırmazlık kalitesini düşürebilir ve metan drenaj verimliliğini azaltabilir. Bu nedenle, sondaj deliklerinin sızdırmazlığı kritik öneme sahiptir. İkinci faktör, yatırım maliyetlerinin ölçülebilir kârlarla (örneğin gaz satışından) veya uzunayak üretkenliğinde bir artış gibi ölçülemez kârlarla dengelenmesidir. Son olarak, bir madencilik sonrası drenaj programının seçimi ve konfigürasyonu, gerekli gaz drenaj verimliliğine, madencilik koşullarına ve yerel jeolojik koşullara, tekniğin en büyük gaz akışlarından sorumlu bölgeyi hedef almasının uygunluğuna ve maliyetlere bağlı olacaktır. Bu nedenle, en uygun yöntemleri (tek bir drenaj yöntemi veya yukarıda bahsedilen yöntemlerin bir kombinasyonu) seçmek için yeraltı kömür madenlerinde metan emisyonuna dair hususların ve drenaj yöntemlerinin bilinmesi önemlidir. Uygun drenaj yöntemleriyle metan drenajı performansının artırılması, metan emisyonlarını azaltabilirken kömür üretiminden elde edilen kâr en üst düzeye çıkarılabilir ve madencilik faaliyetlerinin güvenliğini sağlayabilir.

Şu unutulmamalıdır ki, farklı drenaj yöntemlerinin birlikte kullanımının yanı sıra, metan yakalamanın etkinliğini artırmak için çeşitli başka çözümler de uygulanabilir. Ancak buna dikkatle yaklaşılmalı ve gaz alımının durumu kontrol edilmelidir. Örneğin, ayağın arkasında oluşturulan bariyer veya sızdırmazlık elemanı sayesinde ayak arkasında drenaj boruları döşemek gibi bazı gaz drenajı yöntemleri, metanı seyreltmek için bazen patlayıcı menzil içinde olmak üzere sisteme aşırı miktarda havanın çekilmesine olanak tanımaktadır. Yalnızca düşük saflıkta metanı yakalayan bu ve diğer türlerdeki metan drenajı sistemlerinden kaçınılmalıdır. Bu sistemler oldukça verimsizdir ve geri dönüşlü uzunayak aynası ile ayak arkası temas noktalarında patlayıcı gaz karışımlarının birikmesine neden olmaktadır^[59].

Drenaj performansının bozulması, havalandırma sistemindeki metan konsantrasyonlarında hızlı artışlara yol açabilir (madene toplam havalandırma hava akışının sabit kaldığı varsayıldığında). Dolayısıyla, gaz drenajı sistemleri sürekli ve ayrıntılı izleme ve yönetim gerektirir^[59].

4.5. Terk Edilmiş Maden Metanı

Maden gazı, eski kazılardan kalan yeraltı boşluğunda birikir ve kalan alan, çıkarılan toplam kömürün %25 ila %35'i arasında değişen bir hacme sahip bir yeraltı rezervuarı oluşturmaktadır^[236]. Böyle bir gaz madenindeki metan

konsantrasyonlarının %15-90 aralığında olabileceği ve gazlı kömür madeni iyi bir şekilde kapatılmışsa neredeyse hiç oksijen olmadığı varsayılmaktadır^[237].

Gaz drenajının yapılmaması halinde ve bir gaz basıncı gradyanı altında, terk edilmiş madenlerde biriken maden gazları daha düşük basınçlı alanlara geçme eğilimindedir^[238]. Basınç farkı aşağıdaki nedenlerden herhangi birinden kaynaklanıyor olabilir^[236]:

- Üç ana süreçten dolayı basınç artışı:
 - Susuzlaştırmanın sona ermesi, gazları sıkıştırarak yeraltı boşluklarındaki su girişine eş değer bir oranda gazı değiştiren su tablası geri kazanımına neden olur,
 - Yerinde bırakılan kömürden desorpsiyon yoluyla rezervuara gaz temini,
 - Çökmenin neden olduğu boşluk hacmindeki azalma ve çöken malzeme yığını hidrostatik basıncı artırır.
- Sızıntı olan terk edilmiş kömür madenlerinde kaçak emisyonları artıran ana güçlerden biri olan maden rezervuarı ile dış atmosfer arasındaki basınç gradyanındaki değişimler^[239].

Yeraltı suyunun yükselen aynası nedeniyle, dikey veya dikeye yakın faylar, şaftlar, endüstriyel amaçlar için açılmış ve uygun olmayan bir şekilde kapatılmış dikey sondaj delikleri, terk edilmiş kuyular ve terk edilmiş kazı yerlerinin üzerindeki kayaç kütlelerinin göçmesinden sonra oluşan devamlı dikey kırıklar gibi potansiyel yollardan yüzeye maden gazlarının çıkması gibi olası bir risk vardır. Sığ eski maden ocaklarının üzerindeki kayaç kütlesi çok ayrılmış olduğundan ve madenin kazı tavanının malzemesi zayıf olduğundan, çökme meydana gelirse devamlı dikey kırıkların yüzeye ulaşma olasılığı yüksektir^[240].

Bazı terk edilmiş madenlerdeki gazların basınç davranışı, birkaç kavramsal modelin yardımıyla açıklanabilir. Terk edilmiş bir maden için genel model, akış davranışının, bir gaz çıkarma sistemi aracılığıyla yerüstüne bağlı olan belirli bir hacimdeki boşluğa metan ve hava girişleriyle ifade edilebileceğini varsayar. Madencilik sonrası göçük bölgelerinin ve artık kazıların birbirine bağlı miktarlarını dikkate alan basit kavramsal modeller, sürekli akışlı gaz sistemlerinde yeraltı suyunun geri gelişinin simüle edilmesine dayanan diğer havuzlara bağlı ayrı havuzlar olarak ele alınmaktadır^[241].

Burada anahtar nokta, planların ve maden kapatma projelerinin hazırlanması aşamasında maden gazı yakalama olasılığının planlanmasıdır. Kapatılan

madendeki gaz rezervuarı tahmin edilmelidir. Madenin yeraltındaki kısmını yerüstünden ayıran kontrollü bağlantıların bırakılması önemlidir.

Terk edilmiş kömür madenlerinden metan yakalama olasılığı hakkında daha fazla bilgi [242, 243, 244, 245, 246, 240] nolu kaynaklar içinde bulunabilir.

4.6. Drenaj Yöntemlerinin Seçiminde Kritik Faktörler

4.6.1. Derin Çok Damarlı Madenlerde Yüksek Gaz Emisyonunun Olduğu Geri Dönümlü Aynalara Sahip Uzunayaklar

Uygun gaz yakalama yöntemi, diğer faktörlerin yanı sıra damarların geçirgenliğine bağlıdır. Bölüm 3'te gösterildiği gibi, geçirgenliği 0,1 mD'nin altında olan kömür damarları metan taşınması bakımından neredeyse hiç geçirgen değildir. Bu nedenle, gaz içeren bir tabakada uzunayak alanına metan emisyonunun salınması beklenmektedir. Bu durumda, ön drenaj herhangi bir etki yaratmaz ve madencilik sonrası drenaj yöntemlerinin seçilmesine odaklanılmalıdır. Madencilik faaliyetleri sonrası drenaj yöntemlerinin seçiminde kritik faktörler şunlardır:

1. Bir uzunayak alanında öngörülen emisyon değeri ve uzunayak alanına sağlanan maksimum hava akımı ile seyreltilebilecek maksimum değer belirlenmesi,
2. Metan drenaj verimlilik faktörüne dayalı olarak gerekli metan alımının belirlenmesi,
3. Metan yakalama verimliliğine göre metan drenaj yönteminin seçimi.

Öngörülen metan emisyonu sonucu ve ayağa verilebileceği belirlenen hava miktarları, metan drenajının planlanan uygulamadan bağımsız olarak belirlenmesini sağlar. Belirlenen hava miktarları, metan konsantrasyonunu gereken seviyede tutmak için çok düşükse, metan drenajı gereklidir. Yakalanması gereken metan miktarı, tahmin edilen ve seyreltilebilir miktarlar arasındaki farktır. Drenaj için gerekli olduğu belirlenen metan miktarı için metan drenaj yöntemi seçilmelidir. Önceki bölümde gösterildiği gibi, düşük damar geçirgenliği koşullarında madencilik sonrası drenaj yöntemlerine odaklanılmalıdır. Bu yöntemler arasında en önemlisi, belirli bir çözümün verimlilik seviyesidir. Etkinlik, madenlerde yapılan uygulamalı deneylerin sonuçlarının analizine dayalı olarak belirlenir. Kullanılan metan drenajı yöntemi ile uzunayak alanındaki ölçüm sonuçlarına göre, öngörülen metan ölçümü hakkında dönüş havası tarafından tahliye edilen metan miktarındaki azalma derecesi değerlendirilir. Ancak bu gerçekte, tahmin edilen değeri değil, havalandırma metanı ve metan drenaj sistemi tarafından yakalanan metan miktarlarının toplamını ifade eder. Bu şekilde, etkinlik faktörü aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$E = \frac{Q_o}{Q_o + Q_w} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Burada,

Q_o – birim zamanda metan drenaj sistemleri tarafından yakalanan metanın akış hızı, m³/dak,

Q_w – eş zamanlı olarak havalandırma sistemine salınan metanın akış hızı, m³/dak.

Metan drenaj etkinlik faktörünün değeri, belirli bir havalandırma yöntemi için seçilen metan drenaj sistemlerinde ve çeşitli işletme sistemlerinde metan drenajı sonuçlarının karşılaştırılmasına imkân tanımaktadır. Çeşitli madencilik koşulları ve jeolojik koşullarda metan drenajı sonuçlarını karşılaştırmak için kullanılabilir. Ancak, kömür üretimini artırma olasılığı, ayak ilerleme hızı vb. gibi diğer ek etkileri yansıtmaz. Bu bakımdan her seferinde yerel koşullar göz önünde bulundurularak ve teknolojinin uygunluğu değerlendirilerek bir analiz yapılmalıdır.

Örneğin, metan drenajının uygulamaya koyulması, uzunayak alanındaki metan emisyonunu sekizden altı m³/dakikaya düşürürse, formülle hesaplanan metan drenajının etkinliği sadece %25 olacaktır. Ancak, bu metan miktarlarının eş zamanlı olarak yakalanması, bölgesel akımdaki metan zirve konsantrasyonlarını %1,5'ten örneğin etkinlik faktörüne düşürmektedir.

Uzunayak alanlarında metan konsantrasyonundaki değişikliklerin uygulamadaki gözlemlerine dayanarak, metan drenajının operasyonel değerlendirmesinin şu ilkesi benimsenebilir: Uzunayak alanında yayılan metan, çoğunlukla kazılmış olan damardan geliyorsa, metan emisyonu üretimle orantılıdır. Bu nedenle, havadaki metan miktarı ve oran olarak içeriği, alt taban yolundan üst taban yoluna kazı vardiyesinde kademeli olarak artar.

Kazı dışı vardiya, metan emisyonu hızla önceki değer yarısına kadar düşer⁽¹⁾. Bu koşullar altında, komşu kayaçlardan metan drenajı gereksizdir ancak üretilen damarın metan drenajı olasılığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Üstteki kömür damarlarından metan akışıyla birlikte, en büyük metan miktarı, tavan bozulduğunda ve özellikle kazı vardiyesinin sonunda ayak ilerlemesi durduğunda ve doğal tavan göçmesi meydana geldiğinde ortaya çıkar. Ayak çıkışı ve üst taban yolunun köşesinde havalandırma sistemindeki metan konsantrasyonunda hızlı bir artış olmaktadır.

Tabloyu tam olarak anlamak için, havalandırma sisteminin gevşeme bölgesi üzerinden metan geçişi üzerindeki etkisine dikkat edilmelidir. Gerilmesiz kayaç kütesinde, bir kömür damarındaki metan, birkaç MPa'lık yüksek basınç altında oluşur. Dolayısıyla, havalandırma parametrelerinin ayarlanmasının veya barometrik basınçtaki bir değişikliğin neden olduğu kazı yerlerindeki havalandırma basıncında yaşanan hafif bir değişiklik, kazı yerlerine salınan metan

emisyonu üzerinde gözle görülür bir etkiye sebep olmaz. Gerilmesiz tabakalarda açılan sızdırmaz sondaj deliklerinde negatif basınç ayarlanırken benzer koşullar gözlemlenir. Ancak, tabakalar gevşemişse ve bir çatlak ağı oluşmuşsa, havalandırma basıncındaki hafif bir değişiklik gevşeyen bölgede metan geçişinin yönünü değiştirebilir. Sabit havalandırma koşullarında, gevşemiş tabakadan çıkan metan, örneğin geri dönüşlü uzunayaklarda ayak arkası ile doğrudan temas halinde olan havalandırma sistemi hava yollarına akacaktır. Sonuç olarak, metan girişi, üst taban yolu ile ayak sonunun kısa bir bölümünde yoğunlaşır.

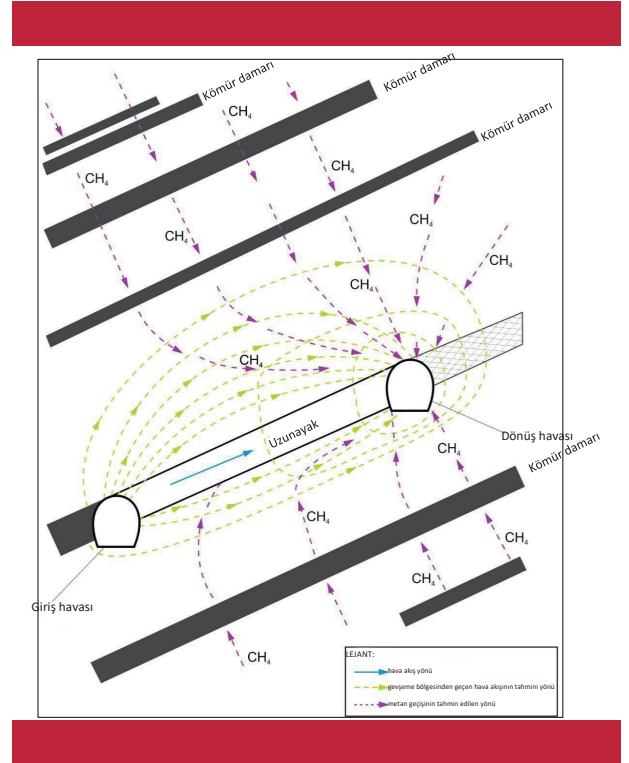
Gevşemiş bölge ve göçük bölgesinin derinliklerinde havalandırma basıncının etki aralığı, araştırmacılar için hala bir araştırma konusudur^[247, 248, 192, 193, 249]. Tabaka yapısı, kömür damarlarındaki metan içeriği, ayak girişi ve çıkışı arasındaki havalandırma basınç farkı, ayak tahkimatının türü vb. gibi birçok faktöre bağlıdır. Bununla birlikte, uygulama gözlemleri, fark basıncının doğrudan göçme bölgesini ve gevşeme bölgesindeki kayaç bloklarını kapsadığını göstermektedir.

Metan drenajının etkili olmasını sağlayan uygun koşullar şu durumlarda ortaya çıkar:

- Uzunayağın arkasındaki gevşek bölge üzerinde drenaj sisteminin emme basıncını aktif olarak etkilemek mümkün olduğunda,
- Metan drenaj sisteminin oluşturduğu emme basıncı, havalandırma basıncındaki farkla aynı yönde hareket ettiğinde ve metan drenajı üst taban yollarından yönlendirildiğinde (Şekil 4.25'te, ayağın arkasındaki gazdan arındırma bölgesinde metan geçiş yönleri gösterilmektedir),
- Sondaj delikleri veya metan galerileri gevşemiş bölgede açıldığında ve içinden akış gerçekleşen çatlaklar üzerinden göçük bölgesine bağlanmadığında (Daha sonra yüksek emme basınçları, sondaj delikleri çevresinde emme basıncını koruyacaktır.)



En etkili çapraz ölçüm sondajları, ilerleyen uzunayak arınının arkasındaki gaz giderme bölgesinde bulunan sondajlardır. Arın çizgisinden önceki veya sonraki sondaj deliklerinin mesafesi, alt ve üst tabakaların jeolojik yapısına göre değişir.



Şekil 4.25: Havalandırma basıncındaki farkın bir sonucu olarak basınç rahatlama bölgesinde beklenen metan geçişinin kapsamı.

Uzun yıllar süren tecrübe ve deneyler sonucunda, derin kömür madenlerinde yüksek gaz emisyon oranlarının olduğu çok damarlı madencilik çalışmalarında geri dönüşlü aynalara sahip uzunayaklar için iki metan drenaj yöntemi geliştirilmiştir:

- Üst taban yollarından üretilen damarın tavan ve zeminindeki basınç rahatlama bölgesine kadar açılan eğimli sondaj deliklerini içeren bu yöntem tüm kömür havzalarında kullanılan ana yöntemdir;
- İşletilen damarın üzerindeki basınç rahatlama bölgesinde bulunan bir damarda açılan metan galerileri.

4.6.1. Çeşitli Uzunayak Havalandırma Sistemlerinde Eğimli Sondaj Delikleri İçin Tasarım Kuralları

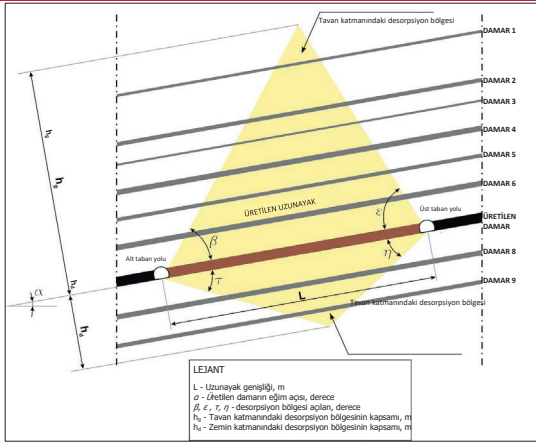
Bölüm 3'te basınç rahatlama bölgesinin nasıl belirleneceği anlatılmaktadır. Drenaj amaçlı sondaj delikleri, göçük bölgesinden geçmemeleri adına bu bölgede konumlandırılmalıdır. Polonya'daki kömür sahalarında yaygın olan jeolojik koşullar altında, eğimli sondaj deliklerinin yükselme açılarına dair doğru hesaplama sonuçları, [220] nolu kaynak içinde açıklanan ve Şekil 4.26'da sunulan yöntem kullanılarak elde edilir. Bunların eğimleri, gaz giderme bölgesinin açılarıyla yaklaşık olarak aynıdır. Ancak sondaj deliklerinin uzunayağa göre eğik olduğu durumlarda değerlerin buna göre

ayarlanması gerekmektedir. Örneğin, paralel bir üst taban yolundan sondaj delikleri açıldığını varsayalım (geri dönüşlü havalandırma sistemi – bkz. Bölüm 3). Bu durumda, yollar arasındaki kömür sütunlarının genişliğinin dikkate alınması ve sondaj deliği uzunluğunun gevşeme bölgesinde kalmasının sağlanması gerekir.

Sondaj deliğinin uzunluğu, başta alttaki ve üstteki damarların konumu olmak üzere jeolojik koşullar tarafından belirlenir. Teknik olarak mümkün olduğu sürece, eğimli sondaj deliklerinin gevşeme bölgesindeki tüm kömür damarlarına ulaşması amaçlanmalıdır. Gazdan arındırma bölgesinin yüksekliği, uzunayağın genişliğine bağlıdır.

Şekil 4.26'daki gösterim kullanılarak, desorpsiyon bölgesinin yüksekliği aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$h_g = L \cdot \frac{g \beta \cdot g \varepsilon}{g \beta + g \varepsilon} \quad (4.2)$$



Şekil 4.26: Uzunayak kazısı sırasında metan giderme bölgesinin belirlenmesi^[220, 191].

Şekil 4.26'ya göre, düşey düzlemde bir gazdan arındırma alanındaki kömür damarının seviyesi ile desorpsiyon alanı arasındaki eğim açıları aşağıdaki gibi hesaplanır (örnek için Çizelge 4.1'e bakınız):

- alt taban yolu için

$$\beta = \delta_g - \alpha \quad (4.3)$$

- - ve üst taban yolu için

$$\varepsilon = \delta_d + \alpha \quad (4.4)$$

Burada,

α - üretilen damarın eğim açısı (derece),

δ_g, δ_d - gazdan arındırma bölgesinin açıları (derece).

Çizelge 4.1. Gazdan arındırma bölgesi açılarının değerleri.

Damar eğimi (eğim açısı)	Tavan tabakaları için açılar		Zemin tabakaları için açılar	
	Üst taban yolu için,	Alt taban yolu için,	Üst taban yolu için,	Alt taban yolu için,
α , (derece)	δ_g (derece)	δ_d (derece)	δ_g (derece)	δ_d (derece)
0	60,0	60,0	60	60
10	58,1	61,9	61,9	58,1
20	53,1	66,9	66,9	53,1
30	46,9	73,1	73,1	46,9
40	41,9	78,1	78,1	41,9
50	40,0	80,0	80,0	40,0

Zemin tabakaları için, karşılıklı gelen ters açılar dikkate alınır. Altta kömür damarlarından çıkan gaz emisyonu, gazdan arındırma bölgesi için hesaplanandan daha düşük olduğu için, tavan tabakalarında açıların değerinin yalnızca yarısı varsayımına dahil edilir:

$$\tau = \frac{\beta}{2} \quad \eta = \frac{\varepsilon}{2} \quad (4.5)$$

Elde edilen formülde (8.4), zemin tabakalarındaki gazdan arındırma bölgesinin maksimum uzunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır:

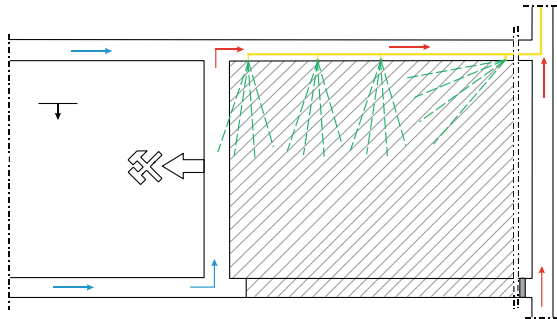
$$h_d = L \cdot \frac{g \eta \cdot g \tau}{g \eta + g \tau} \quad (4.6)$$

Böyle bir bölge için eğimli sondaj delikleri tasarlanmalıdır. Sondaj deliklerinin yükselme açıları, eğimli sondaj deliğinin yol ekseninden sapması için düzeltme yapılarak yaklaşık olarak gazdan arındırma bölgesi açısına karşılıklı gelecek şekilde ayarlanmalıdır. Sondaj deliğinin uzunluğu, jeolojik koşullara ve her şeyden önce kömür damarlarının konumuna bağlıdır. Teknik olarak mümkünse, sondaj deliklerinin gazdan arındırma bölgesinde üstte uzanan en önemli kömür damarlarını geçmesi amaçlanmalıdır. Uzunayak panosu alanında ek bir metan girişi kaynağı olabilecek jeolojik bozuklukların (esas olarak faylar) varlığı da dikkate alınmalıdır.

Geri dönüşlü uzunayak madenciliğinde, örtü katmanından gaz alımının maksimum yoğunluk seviyesine ulaştığı bölgenin alana 10 ila 30 m mesafede, hatta ayağın 50 m arkasında meydana geldiği ve daha sonra kademeli olarak azaldığı, ayağın arkasındaki jeolojik koşullara bağlı olarak 150 ila 200 m mesafede ise tamamen kaybolduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu metan gelişim mekanizması, metan yakalama sürecinin işleyişini belirler. Hareketli tahkimatların hemen arkasındaki sondaj delikleriyle basınç rahatlatma bölgesine nüfuz edilmesi,

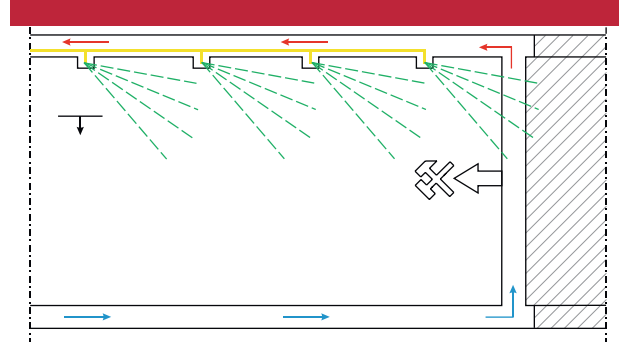
emme basıncı oluşturulması ve metan akışının sondaj deliklerine yönlendirilmesidir. Dolayısıyla, iyi metan drenajı sonuçları elde etmek için, metan drenajı bölgesindeki geçirgenlik derecesine ve dışarı akışın yoğunluğuna bağlı olarak, bu bölgenin tüm uzunluğu boyunca sondaj deliklerindeki emme basıncının ayarlanması mümkündür.

Y tipi havalandırma sistemine sahip geri dönüşlü uzunayaklarda, jeolojik koşullara bağlı olarak maksimum uzunlukta eğimli sondaj delikleri 100 m'ye kadar ulaşabilir. Ayağın arkasında, yol ekseninden yaklaşık 90° veya 60°'lik bir yatay sapma açısı ile bir dizi sondaj deliği açılmalıdır. İki ila beş sondaj deliğinden oluşan delik grupları ayağın arkasında maksimum 60 m mesafede çalışmalıdır. Uygun gaz taşıyan tabaka koşulları altında 200 m'ye kadar bir dizi sondaj deliğinin açılması mümkündür. Ayağın önünde bir dizi sondaj deliği açılır ve yalnızca ayanın arkasındaki metan emme boru hattına bağlanır. Mümkünse, ayak arkası tarafındaki bir yoldan da delikler açılabilir. Aynadan daha uzak bir mesafede, drenaj açıklıkları yol ekseninden 30°'ye kadar sapabilir. Uzunayak panosunun yerel koşulları, özel eğim açıları ve sondaj deliğinin sapmasını belirler. Ayak arkasında kalan karbonun oksidasyonunu tespit etmek için sondaj deliklerindeki veya her sondaj deliğindeki metan konsantrasyonunun sürekli olarak izlenmesi gerekir.



Şekil 4.27: Y tipi havalandırma sistemli uzunayak panosu alanındaki metan drenajı amaçlı sondaj deliklerine örnekler.

U tipi havalandırma sistemine sahip geri dönüşlü uzunayaklarda, teknik nedenlerle mümkün olan maksimum uzunluğa sahip (100 m'den fazla) eğimli sondaj delikleri, üst taban yolunun ekseninden ayak yönünde 45°'ye kadar bir açıyla yön değiştirmelidir (Şek. 4.28). Bununla birlikte sapma açısı, sondaj sahası ile ayna arasındaki mesafeye ve kömür damarının eğimine bağlı olmalıdır. Böylece sondaj delikleri gazdan arındırma bölgesinde yer alır ve bu bölgede mümkün olduğu kadar çok kömür tabakasını kesmektedir.



Şekil 4.28: U tipi havalandırma sistemli uzunayak panosu alanındaki metan drenajı amaçlı sondaj deliklerine örnekler.

Dik kömür damarları için drenaj amaçlı sondaj deliğinin yükselme açısı aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\tan \phi = \sin \gamma \tan(60 - 0.4\alpha) \quad (4.7)$$

Burada:

α - kömür damarının eğim açısı (derece),

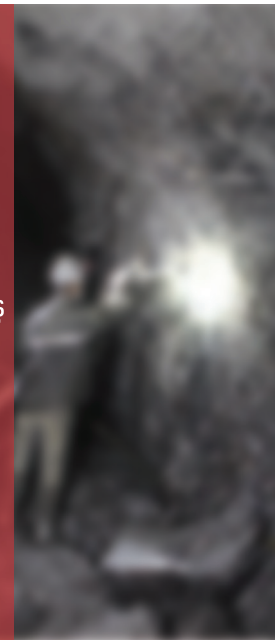
γ - yol ekseninden yatay sapma açısı (derece),

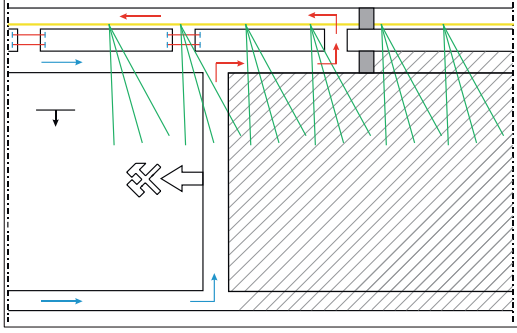
ϕ - yükselme açısı (derece).

Ger dönlü uzunayaklarda, üst galeriden 10 ila 15 m aralıklarla eğimli sondaj delikleri açılmalıdır. Delikler, galeri ekseninden ayak arkasına doğru 45° ila 90° eğimli olmalıdır. Deliklerin uzunluğu, dikey eğim açısına ve gevşemiş bölgede beklenen aralığa bağlı olmakla beraber 60 m'den az olmamalıdır. Drenaj amaçlı sondaj deliklerinin eğimi, alt bagaj kapağı yolundan 20 ve 30 m yukarıda drenaj deliğinin gazdan arındırma bölgesi düzlemiyle kesişmesi prensibi izlenerek grafiksel olarak belirlenebilir.



Terk edilmiş madenler, yoğunluğu zamanla azalan bir metan emisyonu kaynağı olabilir. Bu nedenle, terk edilmiş madenlerde gaz yakalama olasılığının değerlendirilmesi, fizibilite çalışmalarının bir parçası olarak vaka bazında ayrı ayrı yapılmalıdır.

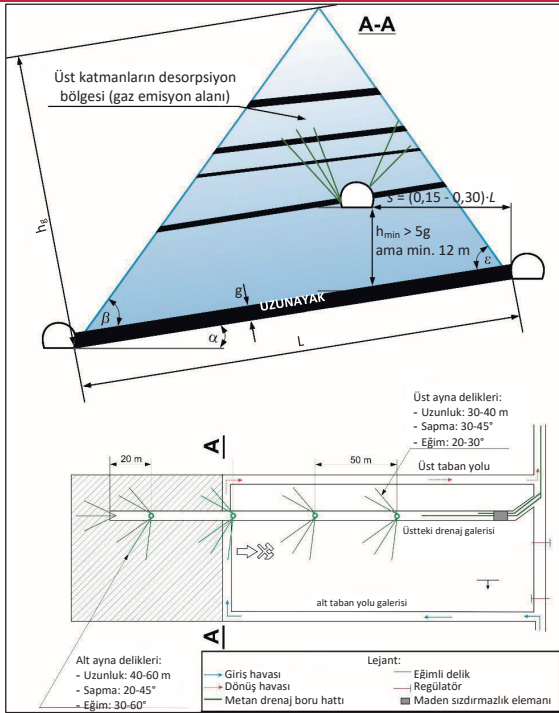




Şekil 4.29: Geri dönüşlü uzunayak alanındaki metan drenajı amaçlı sondaj deliklerine örnekler.

Tüm sondaj deliklerinde, her bir sondaj deliğinin yükselme açısında 10°'den büyük farklılıklar olmaması gerektiği kuralına uyulmalıdır.

Üstte uzanan metan galerisinde metan drenaj yöntemi seçilirse, galerinin gazdan arındırma bölgesinde uygun şekilde konumlandırılması gerekir. Üretilen damar ile drenaj galerisi arasındaki mesafe, galerinin hiçbir şekilde göçük bölgesinde olmayacağı ve tercihen kayaç blokları alt bölgesi ile devamlı düşey alt bölgede konumlanacağı şekilde ayarlanmalıdır. Uzunayak panosunun havalandırma sistemi ve panodaki havalandırma basıncının dağılımı nedeniyle, drenaj galerisi, üst taban yolu tarafında desorpsiyon bölgesinde bulunmalıdır (Şekil 30).



Şekil 4.30: Drenaj galerili bir uzunayak panosunun yerleşimi^[120].

Üretim yapılan damar ile drenaj galerisi arasındaki dikey mesafe, üretilen damarın kalınlığının beş katından ve 12 m'den az olmamalıdır. Drenaj galerisinin üst taban yolu kenarından yatay mesafesi olmalı ancak galeri desorpsiyon bölgesinde yer almalıdır. Bu formül, Polonya'daki diğer madenlerde bulunan mevcut metan drenaj sistemlerine dayalı olarak elde edilen ampirik deneyimlere dayanmaktadır^[250, 92]. Bu nedenle, galeri etrafındaki gerilmesiz bölge ve devamlı kırıklar arasındaki bağlantının etkisi, galeriye hava sızıntıları yaşanması bakımından önem taşımamaktadır.

Şekil 4.30'da gösterilen tipik çap ve yönleri sahip drenaj amaçlı sondaj delikleri grubu, drenaj galerisinden yaklaşık 50 m mesafede açılır.

Bu eğimli delikler, tabaka drenajını iyileştirmek için üstteki kömür damarlarına doğru açılmakta olup, drenaj galerisi olan damar içine açılmaları gerekmez. Söz konusu delikler muhafaza boruları kullanılmadan açılır.

Metan, desorpsiyon bölgesi ve metan katmanlarını galeriye bağlayan devamlı kırıklar sisteminin oluşmadığı uzunayak ilerleme sürecinin ilk aşaması haricinde esas olarak sızdırmazlık elemanının arkasından boşaltılmaktadır. Metan, negatif basıncın olduğu bir galeriye boşaltılmaktadır. Ancak ayak ilerlemesinin ilk aşamasında galeri hala stabil olup, çevresinde büyük bir gerilme rahatlama bölgesi oluşmamış konumdadır. Bu süre zarfında gaz, galerideki negatif basınç sonucu sadece drenaj deliklerinden geçer. Uzunayağın ilerlemesi sonucunda galeri etrafındaki gerilmesiz bölge büyürse, galeriye boşaltılan metan miktarı önemli ölçüde artar ve deliklerin artık bir önemi kalmaz. Bu deliklerin genellikle drenaj toplama borularına bağlı olmamasının nedeni budur. Sondaj tamamlandıktan sonra çelik kemer tahkimat çatalları gevşetilir ve giriş, içinden metan boru hatları ve kontrol (ölçüm) borularının geçtiği sıkı bir izolasyonla kapatılmaktadır.

Bugüne kadar elde edilen deneyimler, üstten drenaj yönteminin özellikle, üretilen damardan ve üstteki tabakalardan (yani tavandaki kömür damarlarından) metan salındığında yararlı olduğunu göstermektedir^[130, 251, 123, 250]. Gazdan arındırmaya tabi tutulan üstteki kömür damarlarının sayısı ve toplam kalınlığı kesinlikle hayati önem taşımaktadır. Kalınlık ne kadar fazla olursa, drenaj o kadar etkin olmaktadır.

Özetlemek gerekirse, drenaj yöntemi seçimi uzunayak panosunun nasıl sağlandığına ve havalandırma sistemine bağlıdır. Ayrıca, tahmin edilen metan emisyonuna ilişkin etkinlik, yerel uzunayak madenciliği koşulları için özel bir çözüm seçilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Çizelge 4.2'de, Polonya kömür madenlerinde on yıl boyunca yapılan araştırmalara dayalı olarak uzunayak panolarındaki metan drenajının etkinliği ile havalandırma ve drenaj sistemlerinin türü arasındaki ilişkiler gösterilmektedir^[250]. Metan drenajında en yüksek etkinliğin, geri dönüşlü U

tipi bir havalandırma sistemi ve üzerinde drenaj galerisi bulunan U tipi bir sistemle elde edildiği sonucuna varılabilir. Tipik Y tipi havalandırma uygulandığında, ayak hattının arkasındaki üst taban yolundan açılan sondaj deliklerinin hava sızdırmazlığı zamanla azalmaktadır. Bunun nedeni, üst taban yolunun giderek daha fazla bozulması ve

muhafaza borularının ayak arkasının hemen yakınına yerleştirilmesidir. Buna karşılık, paralel yol aralarda bir sütun bırakır ve bu sütun, drenaj amaçlı sondaj deliklerinde kalıcı hava sızdırmazlığı elde edilmesini mümkün kılarak daha yüksek metan konsantrasyonuna sahip bir gaz karışımının elde edilmesine neden olmaktadır.

Çizelge 4.2. Uzunayak panolarındaki metan drenajının etkinliği ile havalandırma ve drenaj sistemlerinin türü arasındaki ilişkiler.

Toplam metan emisyonu, m ³ /dak	Metan drenajının etkinliği							Ortalama drenaj etkinliği, %
	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	>80	
Y tipi bir sistemle havalandırılan uzunayak panolar	52,4	56,1	49,9	46,2	57,9	Elde edilmedi	Elde edilmedi	48,7
U tipi bir sistemle havalandırılan uzunayak panolar	40,6	38,3	48,8	64,0	Elde edilmedi	Elde edilmedi	Elde edilmedi	41,2
Geri dönüşlü uzunayak panolar	58,0	60,1	62,2	64,2	64,5	68,3	71,5	63,9
Üzerinde drenaj galerisi olan ve U tipi bir sistemle havalandırılan uzunayak panolar	60,2	62,6	68,4	64,7	68,6	68,8	76,0	65,5

Çeşitli madencilik sistemleri için metan drenajının etkinliği üzerine yapılan araştırmalar, metan drenajının etkinliği açısından aşağıdaki madencilik sistemlerinin avantajlı olduğunu doğrulamıştır:

- Üzerinde drenaj galerisi olan uzunayak panoları, etkinlik faktörü E = %58 ila %72,
- Geri dönüşlü uzunayak panoları, etkinlik faktörü E = %58 ila %72.

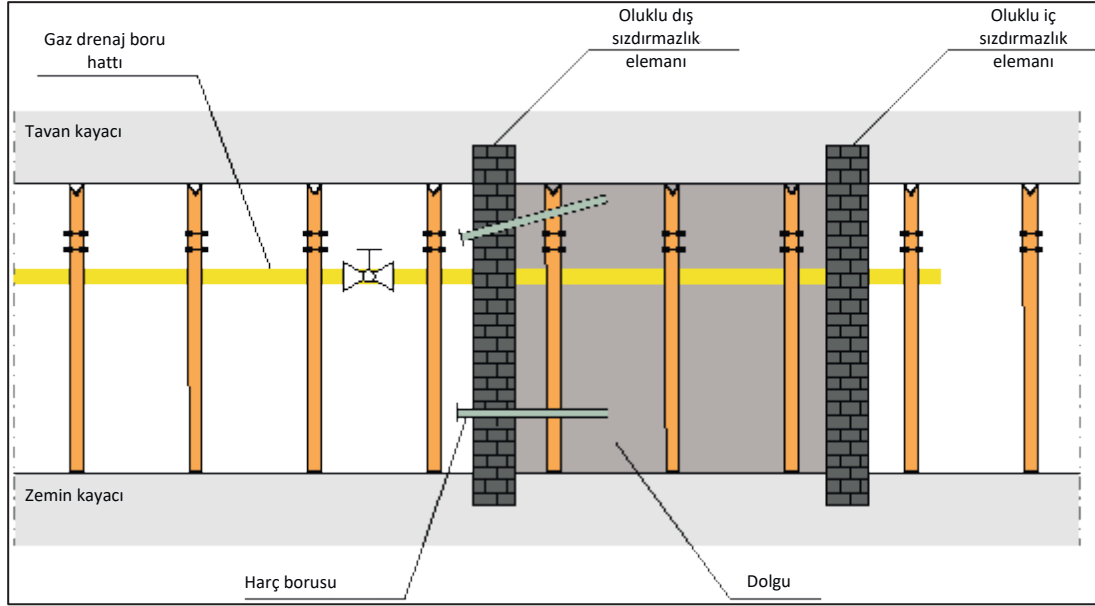
Metan drenajı ile metan tehlikesiyle mücadele için daha az elverişli olanlar:

- U tipi havalandırma sistemli uzunayak panolar, etkinlik faktörü E = %40 ila %64,
- Y tipi havalandırma sistemli uzunayak panolar, etkinlik faktörü E = %50 ila %58.

Polonya’da kömür madenlerinde eski göçük bölgelerinin (kapatılmış ayak arkası alanları) metan drenajı da büyük önem taşımaktadır. Kayaç kütlesi gevşediğinde çok yoğun olarak gerçekleşen kayaç kütlesinden metan drenajı zamanla zayıflar ama hiçbir zaman tamamen kaybolmaz. Ayak arkası kapatılıp orijinal gaz basıncı düştükçe, metan yavaşça gaz taşıyan tabakadan ayak arkasına ve oradan da yalıtım setlerindeki sızıntılarla hava yollarına geçmektedir. Bazen, altta uzanan damarların üretilmesi nedeniyle gerçekleşen tabakaların ikincil basınç giderimi, metan drenaj sürecini geçici olarak etkinleştirebilir.

Birim alan başına geçiş yapan metan miktarı önemsiz olmakla birlikte, sürekli artan atık alanı göz önüne alındığında, bunlara salınan toplam metan miktarı madenin genel gaz dengesini etkileyebilir.

Sızdırmazlık elemanının (bariyer) dışındaki metan alımı Şekil 4.31 ve 4.32’de gösterilmektedir. %30 CH₄’ün üzerinde bir konsantrasyona sahip gazların karışımı, üretilen uzunayak panosunun üst taban yoluna inşa edilmiş sızdırmaz yalıtım setinden geçen bir boru hattı aracılığıyla emilmektedir. Metan içeriğine bağlı olarak, yakalanan karışımın miktarı boru hattına takılan bir vana ile düzenlenmektedir. Metan konsantrasyonunda bir azalma olması durumunda, içeri akış sınırlandırılmalıdır. Konsantrasyonun artması durumunda metan toplama işleminin seviyesi artırılmalıdır. Birçok durumda gaz, set arkasından periyodik olarak toplanır. Yani konsantrasyon %30 CH₄’ün altına düştükten sonra vana tamamen kapatılır, atığın metanla dolması beklenir ve belirli bir konsantrasyona (örneğin %50 CH₄) ulaştıktan sonra gaz toplama yeniden başlatılır. Diğer bir çeşit ise, sızdırmazlık elemanlarının arkasında büyük metan konsantrasyonları varsa, eski atığa eğimli sondaj delikleri açılması şeklindedir. Bu sondaj deliklerinde yüksek sıklıklarla ve eksiksiz gaz bileşimi kontrolü mutlaka sağlanmalıdır. Gaz taşıma boru hattında asgari metan konsantrasyonunu sağlamaya yönelik herhangi bir yaptırım yoksa bu tür eylemler önerilmez ve tehlikeli durumlara yol açabilir.



Şekil 4.31: Atık alanı sızdırmazlık elemanı arkasından metan alımı.

Gazlı atık alanından bu şekilde yakalamak zahmetlidir. Çünkü metan konsantrasyonundaki değişiklik, gaz toplamanın yoğunluğundan, sızdırmazlık elemanının sıklığından ve dış atmosferik basınç dalgalanmalarının neden olduğu atık alanının içi ve dışı arasındaki basınç farkındaki değişimlerden etkilenir. Bu nedenle amaç, alımı otomatik bir şekilde düzenlemektir. Atık alanlarının metan drenajı genellikle düşük yoğunluklu ancak uzun sürelidir.

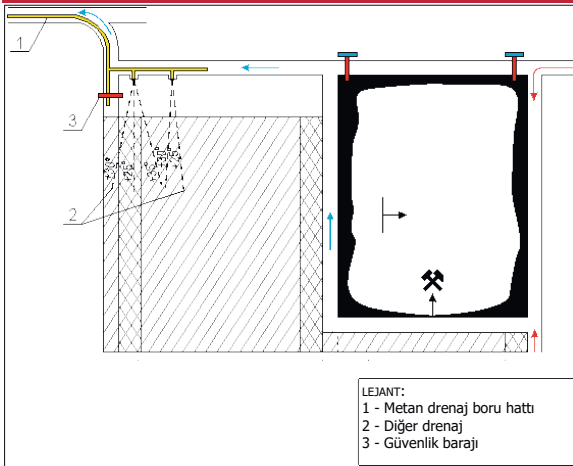
Uygun sonuçlar elde etmek ve deliklerin doğru yerleşimini sağlamak için, madencilik alanı çevresindeki havalandırma basıncının düzeni ve koşulları hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Dolayısıyla, dönüş havası yollarındaki gaz bileşiminin tespiti, madencilik faaliyetlerinin güvenliği için özellikle önemlidir.

Eski atık alanında metan drenajının etkinliğini artırma çalışmaları aşağıdakilere yönelik olmalıdır:

- Yalıtım setlerinin sızdırmazlığının iyileştirilmesi,
- Ayak arkasında doğrudan gaz geçişi,
- Setlerin arkasından gaz alımının otomasyonu,
- Hava yollarındaki havalandırma basıncı ile sondaj deliği emme basıncının etkileşimi dikkate alınarak drenaj amaçlı sondaj deliklerinin yaygın kullanımı.

Yukarıdaki yönergelerde, aynaların metan drenajını tasarlarken ve gerçekleştirirken izlenmesi gereken genel ilkeler sunulmaktadır. Yerel jeolojik koşullar ve madencilik koşullarına uyarlanarak deneysel olarak düzeltmeleri yapılmalıdır.

Metan drenajının etkinliğinde belirleyici bir faktör olan sondaj deliğinin sıkı bir şekilde kapatılması hususuna özel dikkat gösterilmelidir. Sızdıran bir borulu delik, içinde emme basıncı oluşturulduktan sonra havayı emerek metan konsantrasyonunu düşürmektedir. Deliklerin sıklığı metan drenajının etkinliğini belirler. Önemli ölçüde emme basıncı kullanılması, en emek yoğun faaliyet olan delme işleminin kapsamının azaltılmasını



Şekil 4.32: Kapalı atık alanının (eski ayak arkası) dışından metan alımı örneği ([23] nolu kaynaktan alınarak değiştirilmiştir).

mümkün kılarsa da sondaj deliğinde basıncın çok yüksek tutulması tavsiye edilmez.

Bir metan drenaj sistemini planlarken, uygularken ve yönetirken aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- Sondaj, izleme ve düzenleme için erişim güvenliği,
- Sondaj deliklerini stabilize etmek için zemin stabilitesi ve gerekli destek sistemleri,
- Tavan ve zemin son drenaj sondaj deliklerinin beklenen performansı arasındaki farklar dikkate alınarak gaz drenajı amaçlı sondaj deliği konfigürasyonları,
- Drenaj kapasitesi, boru çapları, çekiş pompası ve altyapı gereksinimleri,
- Drenaj boru şebekesinin yeri, kurulumu ve devreye alınması,
- Su tutucular ve susuzlaştırma tesisleri,
- Drenaj sistemi ve altyapısının operasyonel kontrolü ve bakımı,
- Sondaj deliklerinin, boru şebekelerinin ve yerüstündeki çıkarma tesisinin izlenmesi, ve
- Gaz drenaj borularının geri dönüşlü uzunayak alınlarının arkasında ezilmeye karşı korunması.

4.7. Metan Drenaj Sistemlerinde İzleme

Gaz drenaj sisteminin etkinliğini belirlemek için manuel veya uzaktan izleme sistemleri kullanılmalıdır. İzleme kalitesi, sensörlerin güvenilirliğine, konumlandırılmasına, bakımına, kalibrasyonuna ve kullanımına bağlıdır. Bugüne kadar kullanılan ve manuel olarak uygulanan metan drenaj sistemini kontrol etme yöntemleri şu anda yeterli değildir.

Kömür madenlerinde metan akışının izlenmesi, gerçek zamanlı bir izleme sisteminde kaydedilen sürekli bir kontrol faaliyeti olarak gerçekleştirilmelidir. Her bir sondaj deliğinde, gaz drenaj boru tesisatında ve boşaltılan gazı madenden çeken pompaları barındıran yerüstündeki metan çıkarma tesisinde ölçümler yapılması gerekmektedir.

İzlenecek parametreler arasında karışım akışı, gaz konsantrasyonu, gösterge basıncı ve sıcaklık yer alır. Akış verilerinin standartlaştırılmasını kolaylaştırmak için barometrik basınç da kaydedilmelidir. Bazı durumlarda, maden kazı yerlerine boşaltılan veya yayılan gaz,

yanlış metan ölçümüne neden olabilecek nem, kükürt bileşikleri veya daha ağır gaz halindeki hidrokarbonlar (örneğin etan veya propan) gibi başka bileşenler içerebilir. Dolayısıyla, doğru ölçümler sağlamak amacıyla, herhangi bir ek bileşeni düzeltebilen bir izleme ve ölçüm programı tasarlamak için özen gösterilmelidir.

Kurulu sistemin gerçek performansını orijinal tasarım konseptine göre değerlendirmek için izleme yapılmalıdır.

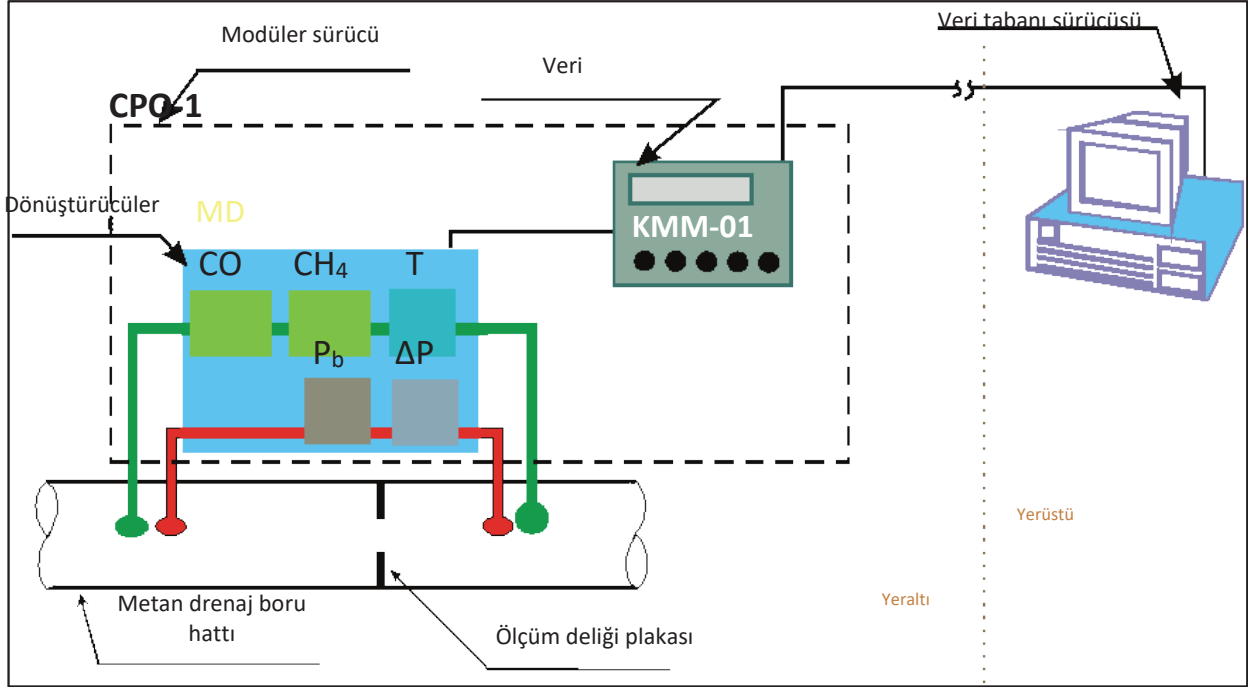
Metan drenajının yüksek etkinliğini sürdürmek için, boru hatlarında taşınan bir gazın parametrelerini sürekli olarak kontrol etmek gerekir. Uygulamada, değişken madencilik koşulları ve jeolojik koşullardan ve çevrenin etkisinden bağımsız olarak, varsayılan parametreleri korumak için metan drenajını kontrol etmenin gerekli olduğu kanıtlanmıştır.

En son gaz ölçüm sistemleri, bir metan drenaj sisteminin boru hatlarındaki metan konsantrasyonunun ve deşarjının sürekli olarak ölçülmesine olanak tanımaktadır^[241]. Bir kontrol sistemi kavramı, bir drenaj boru hattının seçilen noktalarında başta metan konsantrasyonu, ölçüm deliği plakasındaki basınç düşüşü, mutlak basınç ve sıcaklık olmak üzere bir ortamın parametrelerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Ayrıca, ayak arkasında yangın tehlikesini kontrol etmek için drenaj boru hatlarındaki karbonmonoksit içeriği kontrol edilir. Sistemde ölçülen parametreler, bir boru hattına boşaltılan metan deşarjının tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Yukarıdaki kontrol ve ölçüm işlevleri, Polonya madenlerinde yaygın olarak kullanılan gaz tehlikeleri ve havalandırma sistemlerini kontrol eden Gerçek Zamanlı İzleme Sistemi'ne dahil edilebilecek, metan drenajı parametrelerinin CPO-1 denetleyicisine dayalı bir alt sistem tarafından sağlanmaktadır.

CPO-1 denetleyicisi aşağıdaki alt sistemleri içerir (Şekil 4.33):

- CH4: Yüksek metan konsantrasyonu dedektörü (%0-100)
- T: Sıcaklık dedektörü (0-50°C)
- Pb: Mutlak basınç dedektörü (0-120kPa)
- ΔP: Bir ölçüm deliği plakasında basınç farklılıkları dedektörü (0-200Pa)
- CO: Bir boru hattındaki karbonmonoksit içeriği dedektörü (0-1000ppm)-isteğe bağlı.

Dedektörler tarafından ölçülen sinyaller, kontrolör sisteminde dönüştürülür ve daha sonra yerüstündeki bir izleme sisteminin kontrol odasına iletilmektedir.



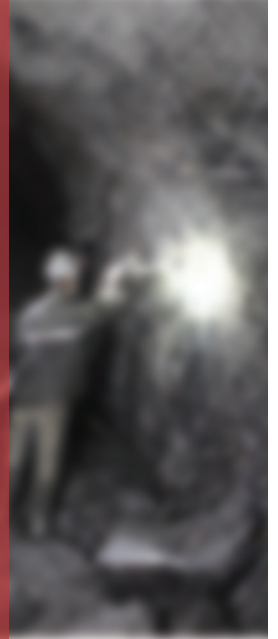
Şekil 4.33: Metan drenajı parametrelerinin CPO-1 denetleyicisinin blok şeması^[252].

Bilgisayar yazılımları, bir metan drenajı sisteminin farklı alanlarında bulunan sensörlerden gelen verilerin görsel olarak sunulmasına ve kaydedilmesine olanak tanmaktadır. Sistem kriz durumlarında uyarı verir. Bir metan drenajı sisteminde alarma neden olan metan konsantrasyonu, bir boru hattında %30'un altıdır. Uyarı değeri, bir ölçüm istasyonunda %40'ın altıdır. Özel yazılımlar, metan deşarjı da dahil olmak üzere bir ortamın parametrelerinin hesaplanmasına ve sensörlerden gelen anlık değerlere göre belirli bir süre için boru hattı sisteminde dengelerinin kurulmasına olanak tanmaktadır. Bir metan drenaj sisteminin izlenen kısmının, madenin farklı alanlarının mekansal planlarında görsel olarak sunulması çok önemlidir. Metan deşarjının seyrine göre deşarjın vardiya ve gün dengeleri hesaplanmakta ve drenajla boşaltılan metan değerleri haftalık ve aylık olarak hesaplanmaktadır.

Tahmin edilen metan emisyonu miktarı, metan drenaj sisteminin tasarımını, kömür damarının ve çevredeki tabakaların jeolojisini, emisyonların örüntüsünü ve metan kontrolü ve drenaj sistemiyle ilişkili madencilik maliyetlerini belirlemelidir. Amaç, bir madende madencilik faaliyetleri sırasında güvende kalmaktır. Yakalanan metan kullanımından elde edilen gelirler ikincil bir hedef olmalıdır. Dolayısıyla, drenaj sistemi tasarımı, zaman içinde gelişen madenin çeşitli yerlerinden gerekli yakalamayı sağlamak için sürekli olarak ayarlama yapılmasını gerektirir.



Kömür madenlerinde metan drenajı uygulamasının öncelikli hedefi madencilik çalışmalarının güvenliğini sağlamaktır. Bu nedenle, metanın tutulmasından elde edilen gelirler her zaman ikincil bir hedef olmalıdır.



5. METAN DRENAJININ UYGULANMASI

5.1. Düşük Geçirgenliğe Sahip Kömür Damarlarının Olduğu ve Çoklu Damar Madenciliği Yapılan Derin Madenlerde Son Drenaj

5.1.1. Metan Drenaj Yöntemlerinin Seçilmesi

Bölüm 4'te gösterildiği gibi, en etkili yöntem, ayak hattının arkasından metan gazı yakalamadır. U tipi havalandırma sistemi, düşük geçirgenliğe sahip çoklu damarlarda uzunayak madenciliği sırasında metan drenajı için Y tipi sistemden daha kötü bir teknik çözümdür. Y tipi sistemde, ayak arkası tarafı galeri stabilitesi için özel bir destek düzenlemesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu galeride, geri dönüş uzunayak aynası arkasından delikler açılması tercih edilir. Genellikle, ayağın ilerisindeki dönüş galerisinden ön sondaj yapılmaktadır.

Polonya madenlerinde yürütülen araştırmaların gösterdiği gibi, 60 m uzunluğundaki bir sondaj deliği grubunun işletilmesi genellikle uzunayak hattının yaklaşık 45 m gerisinde başlarken, 80 m uzunluğundaki sondaj delikleri için ayak hattının yaklaşık 60 m ve 100 m uzunluğundaki sondaj delikleri için ayak hattının yaklaşık 70 m gerisinde işletim yapılmaktadır. Ayrıca sondaj delikleri genellikle 20 ila 40 derecelik eğim açıları ve 20 ila 30 derecelik yatay sapma açıları ile açılır. Sonuç olarak, yakalanan metan-hava karışımındaki metan konsantrasyonu, uzunayak hattının yaklaşık 5-15 m gerisinde azalır¹⁹⁴. Böyle bir durumda metan konsantrasyonunun gerekli değer altına düşmesini önlemek için metan alımı ayarlanmalıdır.

Sondaj işlemi sırasında ayak bölgesi etrafındaki gerilme dağılımı nedeniyle ek kırıklar ve çatlaklar oluşmaktadır. Deliklerin basınç rahatlama bölgesinde mi yoksa göçük bölgesinde mi kaldığı çok önemlidir. İlk delikler, uzun süre dayanabilir ve geri dönüşlü uzunayak gerisinden gazı etkili bir şekilde çekebilir. Kırılma bölgesi, sondaj deliğine hava beslemesinin zamanla artmasına neden olabilir. İçinden akış olan kırılma sistemindeki boşlukların göçük bölgesi ile bağlantısı, kuleye daha fazla havalandırma havası girişi sağlamaktadır. Zamanla, çıkarılan gazlarda ayak arkasındaki karbonmonoksit ve kömür oksidasyonunun diğer oksidasyon ürünleri değişiklik gösterebilir. Bu gazların içeri akışının bir sonucu olarak, sondaj deliği tarafından yakalanan karışımdaki metan konsantrasyonu azalmaktadır. Belirli bir madendeki metan drenaj planında belirlenen metan konsantrasyonu düşürülürse, sondaj deliği, drenaj sisteminin gaz boru hattından ayrılmalıdır.

Uygulamalar, hat ayağının ilerisindeki kazı sondaj deliklerinin, ayak onların altından geçerken yüksek gerilimlerin neden olduğu hasar nedeniyle, genellikle ayağın gerisinde açılan deliklere göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle U tipi havalandırma sistemleri Y tipi sistemler kadar işlevsel değildir.



Bir metan drenaj sisteminin tasarımı, madendeki tüm kaynaklardan beklenen maksimum gaz akış hızlarına göre yapılmalıdır.

Uzunayak panonun U tipi havalandırmasında, geri dönüşlü uzunayağın ilerisindeki ilk eğimli sondaj deliği grubu en etkili olanlardır. Delik grupları arasındaki mesafe aşağıdaki şekildedir:

- 60 m uzunluğundaki delikler için yaklaşık 18 m,
- 80 m için yaklaşık 23 m, 100 m için yaklaşık 35 m.

Ancak, farklı madenlerde bu genelleştirilmiş tavsiyelerin yanlış olabileceğine dikkat edilmelidir. Aralıkların kısıtlanması jeolojik koşullara bağlıdır.

Geri dönüşüm bölgelerindeki eğimli deliklerden drenaj bazen, gazın ayak başlangıç çizgisine yakın bir sızdırmazlık elemanının arkasından çıkarıldığı ve gaz toplama boru hattına beslendiği ayak arkası drenajıyla desteklenir. Ancak, yakalanan gazın saflığının düşük olması nedeniyle yakalama etkinliği genellikle düşüktür^[124]. Dolayısıyla, gaz alımı dikkatli bir şekilde ve tam kontrol altında uygulanmalıdır.

Başka bir teknik, gazı, esas olarak açılan veya önceden var olan bir galeri aracılığıyla, ayak arkası alanının ardından, yasal sınırların altına seyreltileceği ana hava akımına vermektir. Sonuç olarak, metan drenajı artık gerekli olmayabilir veya gerekli yakalama etkinliği azaltılabilir. Ancak, tutarlı sonuçlar elde etmek için gereken drenaj yakalama etkinliğinden bağımsız olarak sağlam bir yönetim planı yürürlükte olmalıdır^[130].

5.1.2. Kömür Kökenli Gazın Tespitinin Hesaplanması

Drenaj deliklerine hesaplamalı gaz beslemesi için çeşitli yöntemler ve modeller vardır ve bunlar genellikle delik çevresindeki kömür veya kayaç davranışının yerel geçirgenliğinin analizi ile ilişkilidir. Kanıtlandığı üzere bir sondaj deliğindeki gazın kütleli akış hızı, sondaj deliği girişindeki emme basıncının karesinin bir fonksiyonudur. Bu işlevin seyri değişiklik gösterebilir ve diğer birçok faktöre bağlıdır. Tutulan gaz miktarının tahmin edilmesiyle ilgili daha fazla bilgi ^[253, 254, 255, 256, 257, 258] nolu kaynaklar içinde bulunabilir.

5.2. Metan Drenaj Tasarımı ve Bi-leşenleri

5.2.1. Genel Yönergeler

Bir metan drenaj sisteminin tasarımı, madendeki tüm kaynaklar için öngörülen maksimum beklenen gaz akış hızlarına dayanmalıdır. Daha önce bahsedildiği gibi, güvenlik amacıyla boru hattı konsantrasyonları için asgari sınırların dahil edilmesi tavsiye edilmektedir. Bir madende metan için üst patlama sınırının (ÜPS) iki katı düzeyinde gerekliliklerin sürdürülmesi iyi bir uygulama niteliğindedir.

Gaz kalitesi, gaz drenaj sisteminin doğal veya yapısal bir özelliği değil, bir tasarım özelliğidir. Ancak, boru hattında gerekli metan konsantrasyonunu korumak iyi bir standart sayılmaktadır. Örneğin, Polonya madencilik sektöründe, taşıma boru hatlarında asgari %30 metan konsantrasyonu sağlanması gerekmektedir. Diğer bazı ülkelerde, gaz drenaj borularında yüksek metan konsantrasyonunun korunması tavsiye edilmektedir. Elbette hem güvenlik hem de verimlilik nedenleriyle %30'dan az metan gaz saflığı kabul edilebilir olarak değerlendirilmelidir. Ancak, düşük konsantrasyonlu gaz boru hattı taşımacılığının güvenliğini artırmak için standartların geliştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, düşük konsantrasyonlu gaz boru hatlarında bazı patlamaya dayanıklı cihazların kullanılması gerekir. Bu nedenle, düşük konsantrasyonlu metanın boru hattıyla taşınması birçok ülkede tamamen yasaklanmamıştır. Yüksek metan konsantrasyonunu korumanın ikinci bir olumlu yönü daha bulunmaktadır. Bu düzen, metan drenaj sisteminin dikkatli ve ayrıntılı bir şekilde tasarlanmasını gerektirir. Bu yöntem, daha fazla metan yakalama imkanı sağlarken bu tür sistemlerin performansını artırır. Dikey boruların uygun bir şekilde kurulumu ve sondaj deliği gruplarının veya bir gruptaki sondaj deliklerinin her birinin sistematik olarak düzenlenmesi dahil olmak üzere kaliteli sondaj deliği sızdırmazlığına dikkat edilmesi ve yerüstündeki çıkarma tesisinde uygulanan emme basıncı, kömür damarlarından çıkan yüksek konsantrasyonlu gazın tanınması için temel oluşturur. Delik sızdırmazlığı uygun değilse, artan gaz akışı daha fazla hava getirip gaz saflığını azaltır. Buna karşılık, emmeyi azaltmak toplam karışım akışını azaltır ancak gaz saflığını artırmaktadır. En önemlisi, yerüstü tesisindeki emme basıncı ve akış hızı, uzunayak havalandırma denetçileri ile iletişimi sürdürürken yalnızca yeraltı durumu tam olarak bilinerek ayarlanmalıdır.

Bir sondaj deliği veya bir grup sondaj deliğinin girişinde izin verilen azami emme basıncına ilişkin tasarım varsayımları önemlidir. Bir boru sistemi tasarlanırken, sondaj deliklerinin bağlantı noktasındaki basınç farkını belirlemek için, sondaj deliklerinin boru tesisatına bağlantı yerinde mevcut bir barometrik basınç miktarı da varsayılmalıdır.

Gaz yakalamanın bu etkinliği, drenaj boru sistemiyle ilgili birçok faktöre bağlıdır ve bunların en önemlileri şunlardır:

- a. Sondaj deliği (uzunluk, çap, eğim, boşluk),
- b. Dikey boru (uzunluk, sızdırmazlık elemanı)
- c. Sondaj deliği emme ve çıkarma performansı
- d. Boru şebekesi tasarımı ve bütünlüğü

5.2.2. Sondaj Delikleri

Drenaj deliklerinin çapının yakalanan metan miktarı üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Deliklerin çaplarını seçerken, teknik sondaj imkanları dikkate alınmalı, delme aralığı ise mevcut ayak ilerleme hızının korunmasını sağlamalıdır. Yeraltı madenlerindeki sondaj teknolojileri, 42 ile 200 mm arasında çaplar ve birkaç yüz metrelik uzunluklar elde edilmesini sağlamaktadır. Eğimli sondaj deliklerinin çapları genellikle 65 mm, 80 mm, 95 mm veya 114 mm'dir ve uzunlukları 50–120 m'dir. Deliklerin verimliliği nedeniyle, sondaj deliklerinin uç kısımlarını mümkün olan en büyük çapta delmek avantajlıdır.

Sondaj deliğinin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için iki temel koşulu sağlaması gerekmektedir. Birinci koşul, açıklığın, ventilasyon havasının açıklığa emilmesini önleyecek ölçüde sızdırmazlığıdır. İkinci koşul, gelen gazın miktarına göre ayarlanarak sondaj deliğindeki akış direncini, sondaj deliğinin tüm uzunluğu boyunca barometrik basınçtan daha düşük olacak şekilde sınırlandıran sondaj deliğinin geçirgenliğidir. Dikey borunun sızdırmazlığı, delikteki yüksek kaliteli gaz miktarından sorumludur.

5.2.3. Dikey Boru

Bir sondaj deliğinin başlangıç uzunluğu bir dikey boru içinde yer almaktadır. Dikey boruların başlıca işlevleri, gevşemiş kayadaki sondaj deliğini stabilize etmek ve her şeyden önce, hava yollarından sondaj deliklerine hava sızıntısına karşı sızdırmazlık sağlamaktır. Dikey borunun uzunluğu, gevşemiş tabakanın kalınlığına ve niteliğine bağlıdır. Örneğin, giderek daha fazla çatlayan zeminde açılan daha sığ açılı delikler, daha uzun dikey boru uzunlukları gerektirmektedir.

Dikey boru çapları, sondaj deliği çaplarından daha büyüktür. 65 mm çapındaki delikler için dikey borunun iç çapı 80 mm, 80 mm çapındaki delikler için dikey borunun iç çapı 100 mm'dir^[92]. Muhafaza boruları, taşıma için 2,5-3,0 m uzunluğundaki bölümlerden oluşmaktadır. Muhafaza borularının çap aralığı 50 mm ile 300 mm'dir. Borular delikte birbirlerine takılıp sıkılmaktadır. Muhafaza borularının uzunluğu, jeolojik koşullara ve sondaj sahasında galeri çevresinde beklenen gevşeme bölgesine göre seçilmelidir. Muhafaza borularının uzunluğu genellikle 6 m ile 12 m arasındadır^[23, 92]. Ancak uzunayak alanlarında dikey boru uzunluğunun 10 m'den az olmaması tavsiye edilmektedir.

Dikey borular, çok çeşitli izin verilen nominal basınçlarda ve uzunluklarda kullanılabilir (her iki tarafı antistatik PVC'den

yapılanlar dahil). Belirli bir ülkedeki yerel madencilik faktörleri ve sondaj teknolojileri, bu parametrelere göre dikey boru seçimini belirlemektedir.

Gevşememiş tabakalarda 3 m uzunluğunda bir dikey boru yeterli sızdırmazlığı sağlar ve kırık tabakalarda 12 m uzunluğa kadar muhafaza boruları kullanılır. Dikey borular genellikle konik dişlerle bağlanmaktadır. Girişteki dikey boru, sürgülü vananın vidalanmasına ve deliğin metan drenajına veya drenaj boru hattına bağlanmasına imkân veren bir flanşla donatılmıştır.

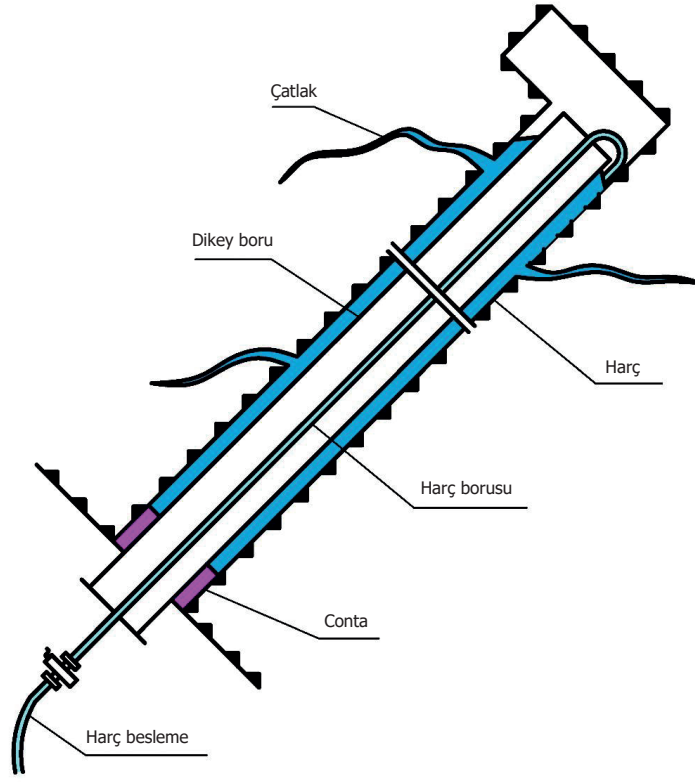
Dikey borunun uzunluğu boyunca, deliğin çapı, drenaj deliğinin çapından en az 50 mm daha büyük olmalıdır.

Dikey borunun kapatma cihazıyla birlikte kurulumundan sonra, muhafazasının sızdırmazlığı ve sağlamlığı, deliğin açıldığı kazı derinliğinden hesaplanan yükseklikteki hidrostatik basınçtan %50 daha yüksek bir basınç altında test edilmelidir.

- Dikey boru ile kayaç kütlesi arasındaki dairesel boşluğu bir çimentolama borusuyla çimentolayarak,
- Dikey boru ile kayaç kütlesi arasındaki dairesel boşluğu, bir çimentolama borusu kullanarak borunun dış kısmında bir bodur boru aracılığıyla çimentolayarak,
- Çapı 100 mm'den az ve uzunluğu 6 m'den fazla olmayan ve 45°'ye kadar açıklık eğimi olan boruların sızdırmazlığı için kullanılan basınçsız yöntem,
- Çapları 100 mm'den büyük, uzunlukları altı m'den büyük ve eğimleri 45°'den fazla olan boruları sızdırmaz hale getirmek için kullanılan basınç yöntemi,
- Muhafaza borusu ile kayaç kütlesi arasındaki boşluğu sızdırmazlık elemanı ve sondaj kulesiyle çimentolayarak.

Şekil 5.1'de, dikey boruyu doldurma ve çimento bulamacının çimentolama tankına bağlı bir borudan beslenmesi yöntemi gösterilmektedir. Basıncı havanın basıncı altında, çimento bulamacı muhafaza borusu ile kayaç kütlesi arasına pompalanmaktadır. Dikey boruda çimento bulamacı görüldükten sonra, çimentolama durdurulmaktadır.

Dikey borunun uzunluğunun ortasına bir conta (pistondaki) yerleştirmek ve ardından borunun üst kısmına çimento sütü dökmekten oluşan bir yöntem de yaygın olarak kullanılmaktadır. Boruyu drenaj deliğine soktukten sonra, sondaj kulesinin piston üzerindeki basıncı altında, çimento bulamacı muhafaza borusundan dışarı itilmektedir.

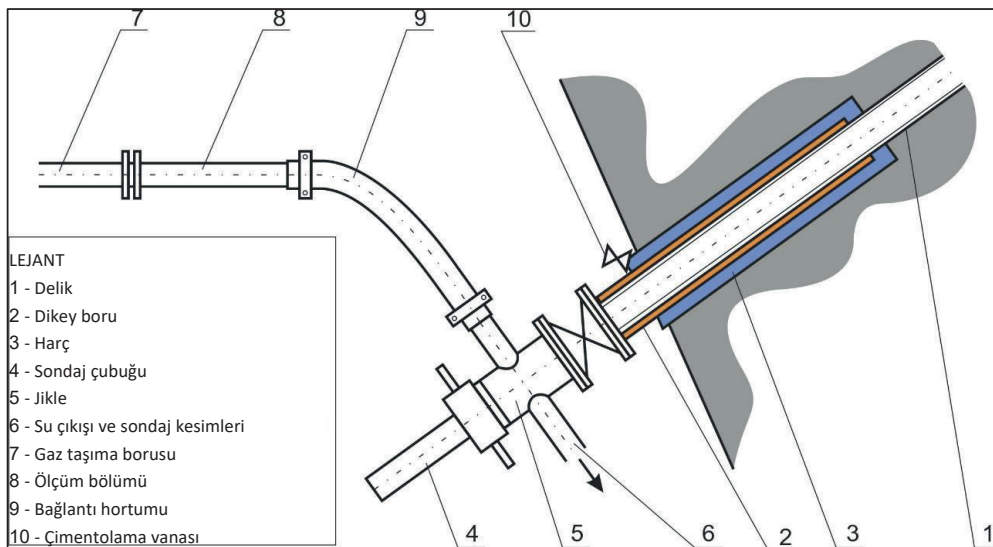


Şekil 5.1: Dikey boruyu çimentolama borusuyla çimentolamak için örnek bir yöntem^[92].

Ayrıca dikey boruların sızdırmazlığını kimyasallarla (reçine bazlı yapıştırıcılar) sağlama yöntemleri de bulunmaktadır.

Çimento (yapıştırıcı) sertleştikten sonra, su basıncı kullanılarak dikey borunun sızdırmazlık ve dayanıklılık testi gerçekleştirilir. Bu amaçla, boruya bir ağızlık takılır ve belirli bir seviyede beklenen hidrostatik basınçtan %50 daha yüksek bir basınç altında su verilir. Boru, su basıncına bir saat boyunca dayanırsa ve borunun çevresinde bariz bir su sızıntısı yoksa, dikey boru sızdırmazlık işleminin başarılı olduğu kabul edilmektedir.

Bir sızıntı tespit edilmesi durumunda, çimento harcı bir bodur boru ile kapaktan muhafaza borusuna pompalanarak ve tüm boş alan doldurularak muhafaza borusunun sızdırmaz hale getirilmesi işlemi tekrarlanır. Çimento sertleştikten 24 saat sonra dikey borudaki çimento tapası delinir ve tekrar sızdırmazlık testi yapılmaktadır.

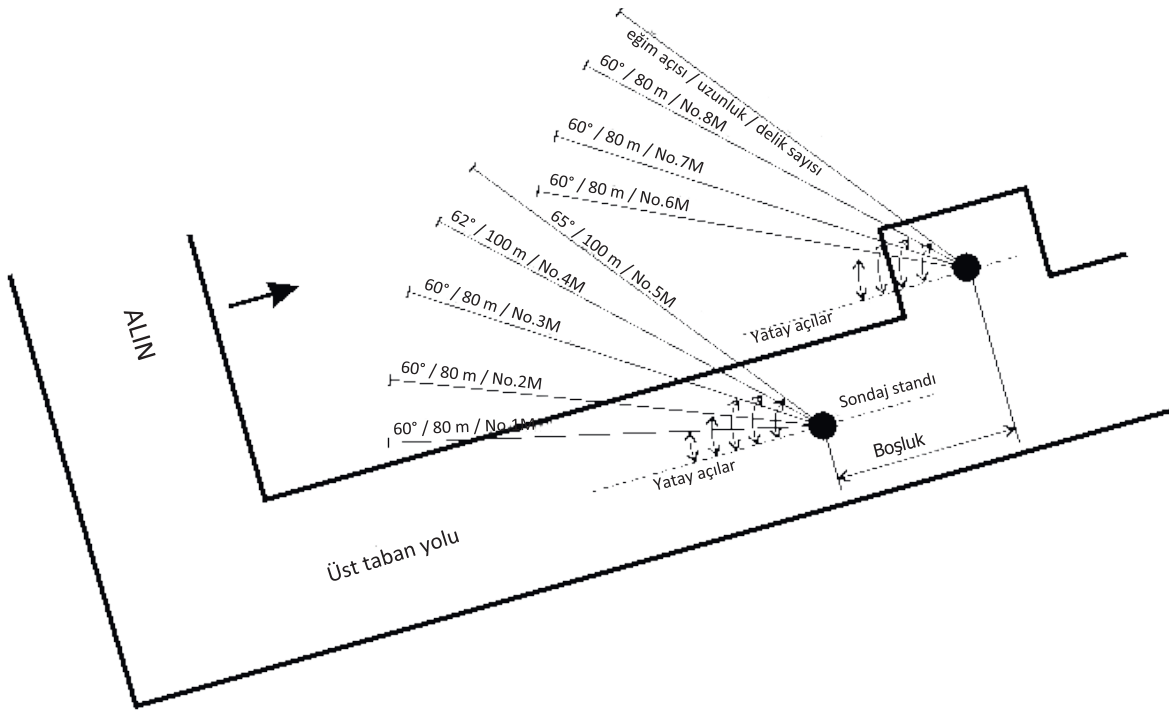


Şekil 5.2: Dikey boruyu kapattıktan sonra bir deliğin sondaj planı.

Çimentolama işleminden sonra, sondaj boruları sondaj deliklerine takılarak ve sondaj kulesinden basınçlı hava kullanılarak sondaj delikleri kurutulur ve kalan sudan arındırılır.

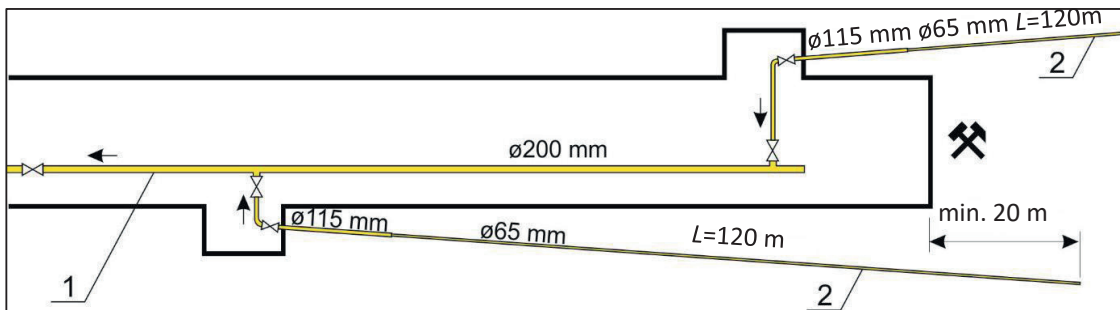
5.2.4. Sondaj Deliklerinin Yerleşim Düzenlerinin (plan) Belirlenmesi

Metanı yakalamak için kayaç kütlelerinde drenaj delikleri açılmaktadır. Organizasyon ve madencilik amaçları doğrultusunda, tasarlanan sondaj delikleri, uzunayak panoların maden planlarına, şemalarına ve yerleşim düzenlerine uygulanır. Açıklık uzunluğunun tahmini haritalarda gösterilmesi gerekir. Maden haritalarında sondaj deliklerinin tanımlanması iyi bir uygulama teşkil etmektedir. Şekil 5.3'te sondaj deliğinin nasıl işaretleneceği gösterilmektedir. Sondaj deliği uzunluğu, hat boyunca veya deliğin sonunda işaretlenebilir. Eğim açısı ve delik numarası sondaj hattı üzerine girilebilir.



Şekil 5.3: Madencilik planlarında kazıdan açılan sondaj deliklerinin ve kazı girintilerinin işaretlenmesi için örnek yöntem.

Drenaj deliklerinin yatay düzleme ve kazı eksenine eğim açıları, gazdan arındırma bölgesinin açısına ve gevşeme bölgesinin dikey mesafesine bağlıdır. Diyagramlarda boru hatlarını işaretlemenin başka bir yolu Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

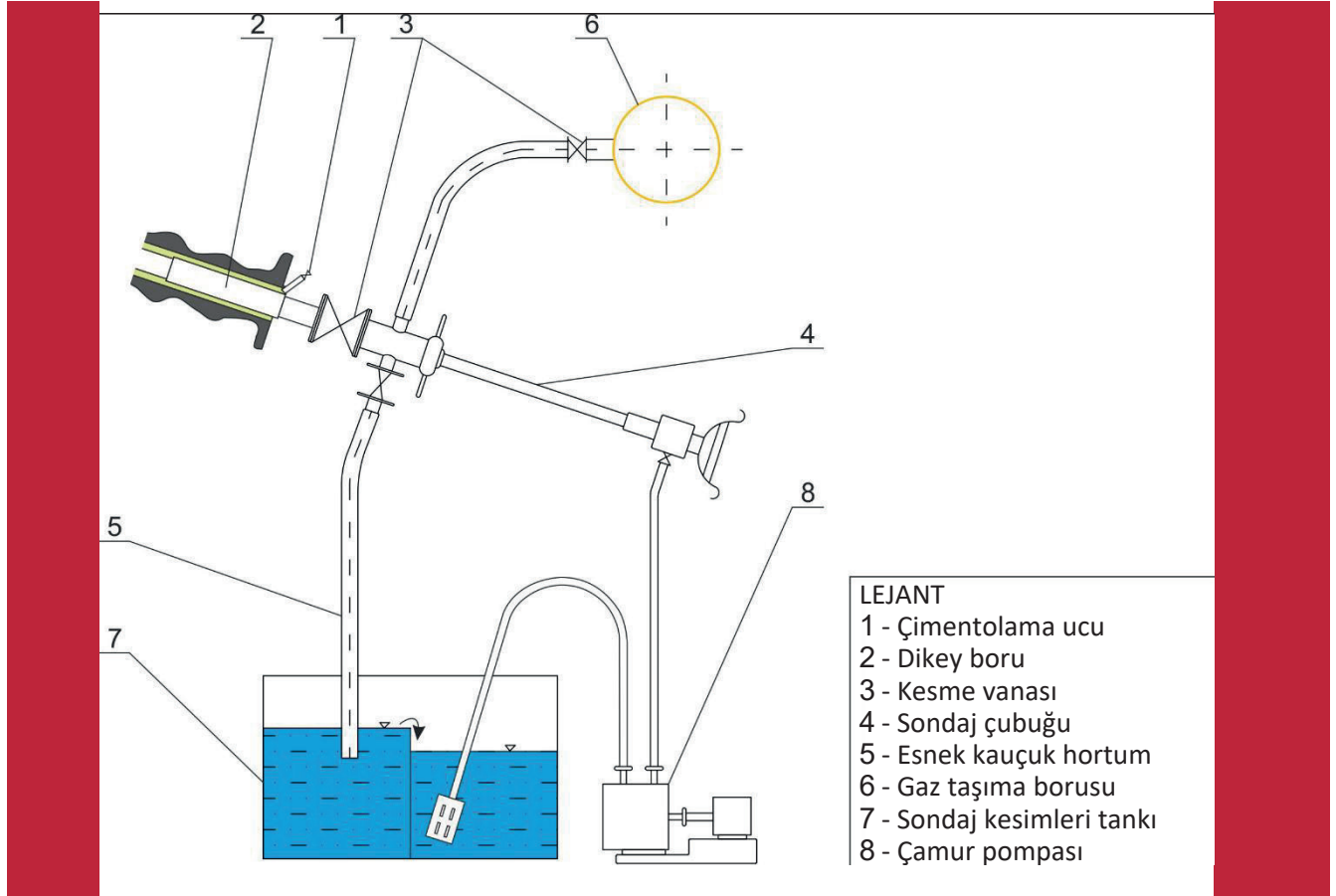


Şekil 5.4: Hazırlık galerisinde ön drenaj örneğinde sondaj deliklerinin parametrelerini belirleme yöntemi.

5.3. Sondaj Deliği Açma Teknolojisine Genel Bakış

5.3.1. Sondaj Teknolojisi

Drenaj deliğini açmadan önce, açıklığa muhafaza borusunun flanşına vidalanması gereken bir sürgülü vana takılmalıdır. 10 m'den daha uzun olacak şekilde açılacak her deliğin, en az bir sürgülü vana ile donatılmış bir muhafaza borusu içinden delinmesi tavsiye edilmektedir. Bununla birlikte sürgülü vana ve manometreli bir kısa boru kullanılması önerilmektedir. Hidrojeolojik açıdan ve gaz açısından keşif yapılmamış kayaç kütlelerinde, muhafaza boruları ayrıca sondaj çubuğu ile deliğin sıkı bir şekilde kapatılmasını sağlayan özel tasarım jiklelerle donatılır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5: Sondaj başlığı takılı dikey boru ([23 ve 92] nolu kaynaklardan sonra).

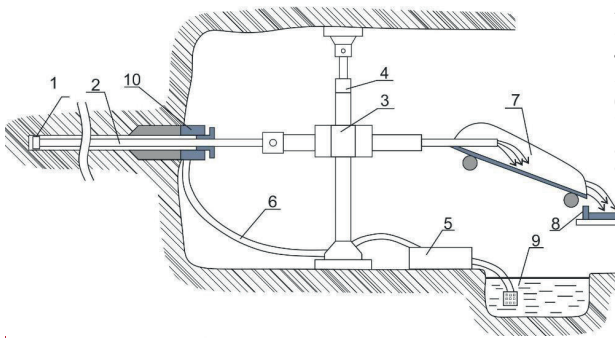
Sondaj kulesini gerekli deliğin açılacağı yönde ayarlayıp kurduktan ve uygun eğim açısını ayarladıktan sonra, dikey borunun deliği önceden açılır. Kayaç kütlelerinin jeolojik koşullarına bağlı olarak muhafaza borusu için delik uzunluğu seçilir.

İlk bölümdeki açıklığı tamamen kapatmak, sondajla çıkarılan su veya gazın ani ve kontrolsüz bir şekilde dışarı akmasına karşı koruma sağlamak ve bunların daha sonra güvenli bir şekilde yakalanması ve boşaltılmasını temin etmek için muhafaza boruları kullanılmaktadır. Dikey boru aynı zamanda maden kazısını tavanda bulunan delinmiş tanklardan veya açık fay çatlaklarından toz girmesine karşı korumaktadır.

Bir deliğin döner sondajı, sondaj deliğinin dibindeki kayacın dönme hareketi yapan çeşitli burgularla kesilmesi veya kırılmasıyla dayanır. Bir delik açmak için, uygun bir burğu sondaj deliğine sokulur ve sondaj borularından oluşan bir sondaj dizisine vidalanır.

Motorla tahrik edilen ucu döndürmek için bir sondaj dizisi kullanılmaktadır. Sondaj başlığı ucunun sondaj deliğinin dibindeki kayaca girmesi için, sondaj kulesinin motoru ve hareketli tablası tarafından sondaj dizisi aracılığıyla sondaj çubuğuna yeterli aksel basınç uygulanmalıdır.

Sondajda ilerlemenin koşulu, Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, bir çamur pompası tarafından pompalanan sirkülasyonlu bir sondaj çamuru kullanılarak kesilen parçaların sistematik olarak çıkarılmasıdır. Sondaj kulesi mili ve ardından sondaj çubuğu aracılığıyla sondaj deliğinin dibine sulu çamur beslenmektedir. Sonuç olarak sıvı, sondajla kesilen parçalarla birlikte sondaj çubuğu ile sondaj deliği yüzeyi arasındaki delikten dışarı akmaktadır.



- 1 - Karot sondaj ucu
- 2 - Sondaj sıvısı boruları
- 3 - Sondaj kulesi
- 4 - Genişletme payandası
- 5 - Sondaj sıvısı pompası
- 6 - Sondaj sıvısı hortumu
- 7 - Karot kutusu
- 8 - Çıkış kutusu
- 9 - Sondaj sıvısı tankı
- 10 - Jikle

Şekil 5.6: Sondaj kulesi konumunun basitleştirilmiş şeması ([92] nolu kaynaktan sonra).

Sondaj ilerledikçe, kademeli bir şekilde çubuklar eklenerek sondaj dizisi uzatılır. Kabloyu uzatmak veya kısaltmak için bir sondaj tablası kullanılmaktadır. Bu tabla üzerinde sondaj borusu kilitlenir, vidaları gevşetilir ve başka bir sondaj çubuğu eklenir veya çıkarılır. Sondaj işlemi, özellikle sert kumtaşlarında sondaj ucunu çabuk aşındırdığından, bu uç yenisi ile değiştirilmelidir. Sondaj dizisinin tamamı dışarı çekilmelidir.

Aşağıdaki gibi parametrelerin doğru bir şekilde seçilmesi sayesinde sondajda hızlı ilerleme sağlanır:

- Burgu üzerindeki basınç,
- Burgunun devir sayısı,
- Delikte dolaşan çamur miktarı,
- Sondaj ucunun tipi, delinen kayacın sertliğine bağlıdır.

Sondajın hızla ilerlemesi ve az miktarda yıkama suyu olması durumunda, delikte çamurlu bir kütle oluşabilir. Bu kütle sondajı zorlaştırır ve hatta sondaj dizisinin durmasına neden olabilir. Bu esas olarak yatay veya aşağı doğru sondaj delikleri için geçerlidir.

Özellikle daha ufalanabilir ve kolayca küçük parçalara bölünen veya toz haline getirilen kömürlerin olduğu sahalarda, kömürün parçalanarak sondaj deliğine dökülmesi bir sorun teşkil edebilir. Bu sorun, düz sondaj çubukları kullanılarak aşılabılır. Sondaj talaşları, sürekli su püskürtülerek giderilir ve sondaj deliklerinden parçalanmış kömürü çıkarmak için burğu kullanılabilir. Delikleri açık tutmak için delikli plastik astarlar kullanılabilir^[24].

Deneyimler, sert kayada sondaj yapılırken burğu üzerindeki basıncın artırılması ve devir sayısının azaltılması gerektiğini göstermiştir. Kesme ve ezme uçlarıyla sondajın ilerlemesi, uç devir sayısı ile basit ve işlevsel bir ilişki içindedir. Çamur miktarındaki artış, belirli bir sınıra kadar da olsa sondaj ilerlemesinde artışa neden olmaktadır.

Delinecek kayaların sertliğine göre uygun sondaj makineleri seçilir. Örneğin, yumuşak ve orta-sert tabakalarda kesici uçlar (taçlı uçlar) ve yüksek dişli özel kırıcılar (kırma uçları) kullanılır. Sert ve orta-sert kayalarda ise sadece üç çeneli döner yataklı uçlar (kırma uçları) kullanılmaktadır.

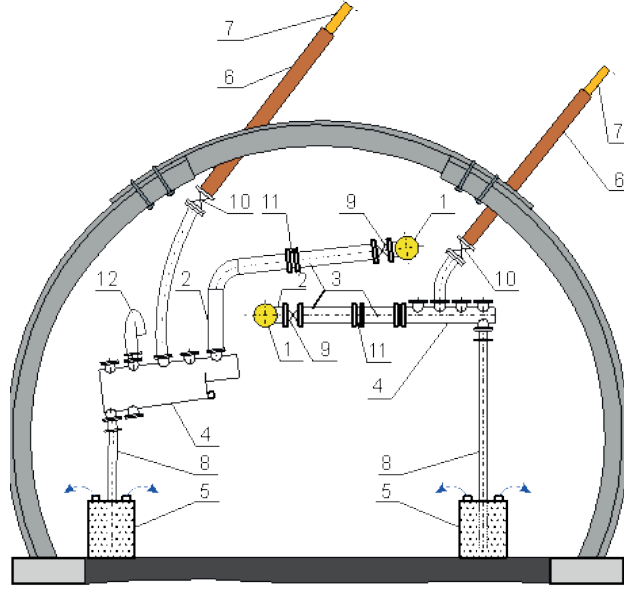
Deneyimler, burgunun basıncı ve dönüşü ile pompalanan çamur miktarının artmasıyla, kırıcı uçların jeolojik koşullardan bağımsız olarak tatmin edici sonuçlar elde edilmesini sağladığını göstermektedir.

Küçük çaplı delikleri açmak için, sondaj uçları yerine çoğunlukla 36–112 mm çapında elmas karot uçları kullanılmaktadır. 65–114 mm çapındaki Vidia plakaları ile güçlendirilmiş uçlar için önerilen delme koşulları, eğimli (yukarı doğru) delikler açarken 50–200 RPM ve asgari 30 dm³/dak. akan çamur kullanılarak, uç çapının her 1 cm'si başına 15–20 N kuvvet uygulanmasıdır. Negatif açılı delikler açılırken, deliğin yıkama yoğunluğu daha fazla olmalıdır.

5.3.2. Boru Tesisatına Bağlantı Delikleri

Sondaj ve sızdırmazlık işleminden sonra, tüm sondaj delikleri, yeraltına veya yerüstüne kurulmuş bir gaz istasyonu veya kaldırma tertibatında son bulan bir boru hattı ağına bağlanmaktadır. Şekiller 5.7, 5.8 ve 5.9 sifonlu kuyuları gaz boru hatlarına bağlamanın çeşitli yolları gösterilmektedir.

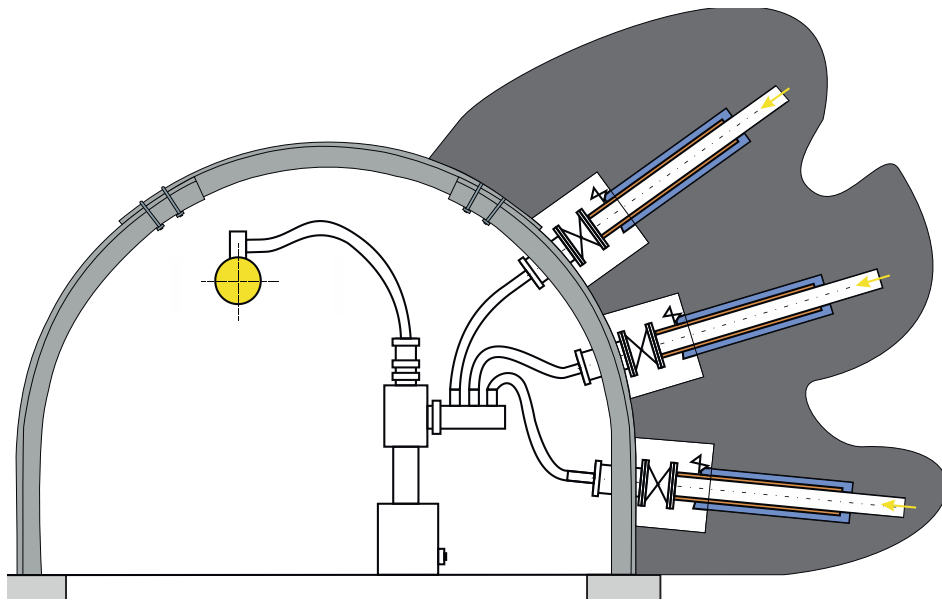
Gaz boru hattına bağlı her sondaj deliğine bir ayar vanası takılmalıdır. Bir grup sondaj deliğinin bir kapatma vanası ile sonlandırılmasına izin verilir. Her bir sondaj deliği veya sondaj deliği grubu, yakalanan gazdaki metan konsantrasyonunu kontrol üzere numune alınabilmesi için ölçüm noktası ile donatılmalıdır. Dikey borunun sızdırmazlığının değerlendirilmesi veya gevşeme bölgesinin gazdan arındırma bölgesine çarpan deliğin değerlendirilmesi açısından ölçümler çok önemlidir.



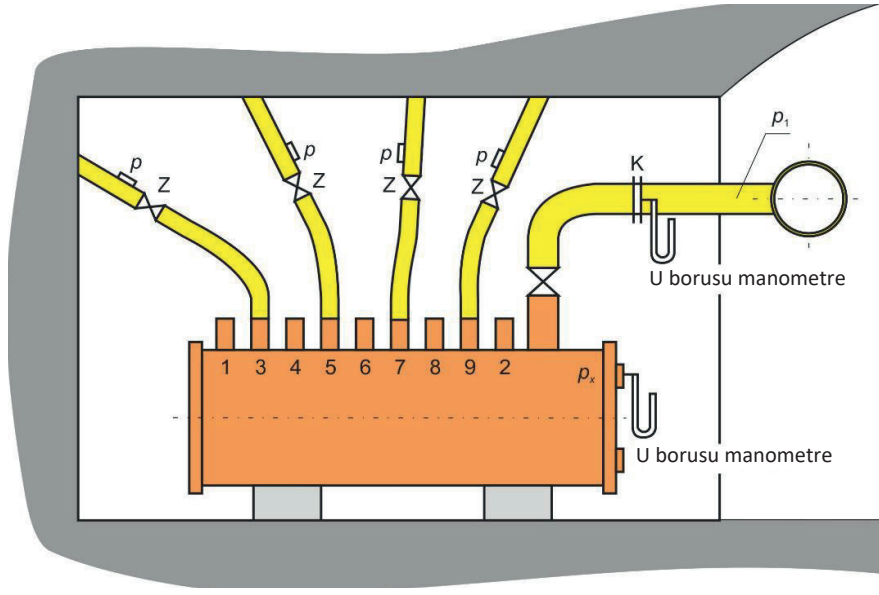
LEJANT

- 1 - Gaz taşıma borusu
- 2 - Gaz borusuna bağlantı
- 3 - Ölçüm parçası
- 4 - Toplama borusu
- 5 - Tutucu (susuzlaştırıcı)
- 6 - Dikey boru
- 7 - Sondaj deliği
- 8 - Susuzlaştırma hortumu
- 9 - Damper
- 10 - Kesme vanası
- 11 - Ölçüm deliği
- 12 - Kapalı çıkış portu

Şekil 5.7: Bir su kapanı aracılığıyla bir gaz borusuna sondaj deliği bağlantısı örneği.



Şekil 5.8: Su kapanı aracılığıyla gaz borusuna bir grup sondaj deliği bağlantısı yapılması örneği.



Şekil 5.9: Bir grup sondaj deliğinin su tankı aracılığıyla gaz borusuna bağlanması.

5.4. Gaz Boru Şebekesi ve İlgili Altyapı

5.4.1. Yeraltı Kömür Madeninde Boru Şebekesi

Metan drenaj şebekesi aşağıdaki unsurlarla donatılır:

1. Kontrol tertibatlarına, su tahliyesi için drenaj cihazlarına ve taşıma boru hatlarıyla bağlantıya sahip drenaj delikleri.
2. Aşağıdakilerle birlikte gaz karışımını metan drenaj istasyonuna taşıyan birbirine bağlı borular:
 - Drenaj cihazları ve drenaj elemanları,
 - Kapatma ve ayar vanaları,
 - Kontrol ve ölçüm cihazları.

Bakım, genişletme veya acil durum amaçları için izolasyon sağlamak üzere her kol veya bölge boru hattına bir tam yönlü bir vana takılmalıdır. Ayrıca her kolun başlangıcına ve düşey çıkış borusuna bağlı her kolun üzerine 1000 m'yi geçmeyecek aralıklarla kesme vanaları konulmalıdır.

Ayrıca, ana boru hattından her maden bölgesine giden kollara ölçüm noktaları kurulmalıdır. Ölçüm noktaları aşağıdakilerin ölçülmesine olanak tanımalıdır:

- Gaz karışımının hacim akışı,
- Boru hattı içindeki negatif basınç,
- -Kimyasal analiz için numune alımı.

Ana boru hattında otomatik ölçüm kullanılması tavsiye edilir.

Akış ölçümleri genellikle delikli plakalar, venturiler veya her türlü engelden arındırılmış düz boru bölümlerine yerleştirilmiş diğer gaz akış ölçerler kullanılarak yapılır.

Yakalanan gaz karışımında istenen metan konsantrasyonunu elde etmek için delikler ayak hattından uzaklaştıkça drenaj deliklerine uygulanan basınç miktarı ve yakalanan gaz karışımının miktarı ayarlanmalıdır.

Boru hattında özellikle eğimli kollarda basınç birikmesini önlemek için metan drenaj şebekesinde suyun kontrol edilmesi gerekir.

5.4.2. Boru Hatları

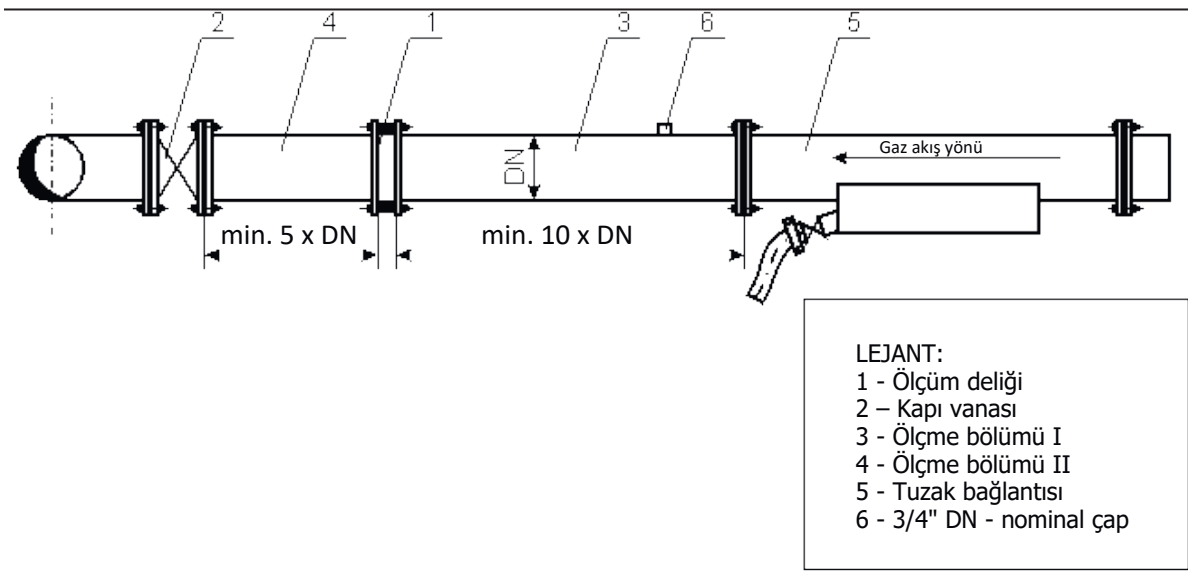
Bir yeraltı madeninde boru hattı ağı oluşturmak için çelik, cam takviyeli plastik (CTP) ve polietilen (PE) borular kullanılabilir. Borular ve ek yerleri, elektrik önleme ve alev direnci gerekliliklerini karşılamalıdır. Boru bağlantıları flanşlı, victaulic veya dişli olabilir. Bu tür bağlantıların kullanılmasının başlıca amacı gaz sızdırmazlığının sağlanmasıdır. Yeraltı kazılarında boru hatları asılı olduğu için dengeleyicilere ihtiyaç duyulmaz. Borular katı bir şekilde asılı olduğunda ve boru hattına zarar verecek şekilde deformasyonların meydana gelebileceği durumlarda dengeleyiciler kullanılmalıdır.

Boru hatlarının çapları, karışımın özgül yoğunluğu ve ayrı bölümlerde hesaplanan basınç düşüşü dikkate alınarak, taşınan karışımın beklenen akışına göre seçilmelidir. Basınç düşüşlerini tasarlarken, bağlantı elemanları ve parçaları için standartlaştırılmış eş değer boru uzunlukları kullanılabilir. Bu değerler yerüstündeki gaz sistemlerinin rehberlerinde bulunabilir.

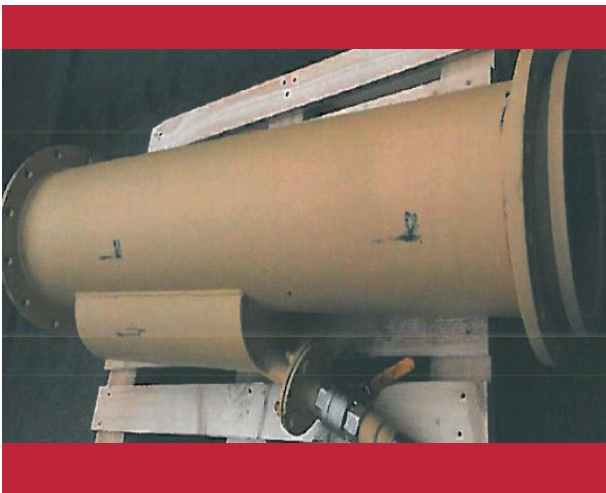
Yerüstündeki metan drenajı tesislerinde azami negatif basınç dikkate alınmalıdır. Yerüstü istasyonlarında genellikle, drenaj pompalarının emme tarafındaki negatif basınç 50 kPa'yı geçmez ve çoğunlukla 30 ile 40 kPa arasındadır. Bu durumda boruların, bağlantıların ve bağlantı elemanlarının 0,63 MPa'lık nominal basınç dikkate alınarak gereken mukavemet için seçilmesi önerilmektedir.

Boru hatları, keresteler üzerine veya yol zeminindeki uygun destekler üzerine kurulabilir. Kurulum detayları teknik projede belirtilmelidir. Madenin yerüstündeki boru hatlarının ısı yalıtımı yapılmalıdır.

Boru aralığının gradyanının mümkün olduğu kadar tek tip tutulması gerekir. Bu, çevredeki atıklardan sisteme çekilen suyu boşaltmak için su ayırıcıların ve alçak noktalara yerleştirilecek kapanların kullanılmasına olanak tanımaktadır (Şekiller 5.10 ve 5.11)



Şekil 5.10: Gaz borusuna ölçüm parçası ve su ayırıcı bağlantılarının şeması.



Şekil 5.11: Gaz borusundaki su ayırıcının görünümü.

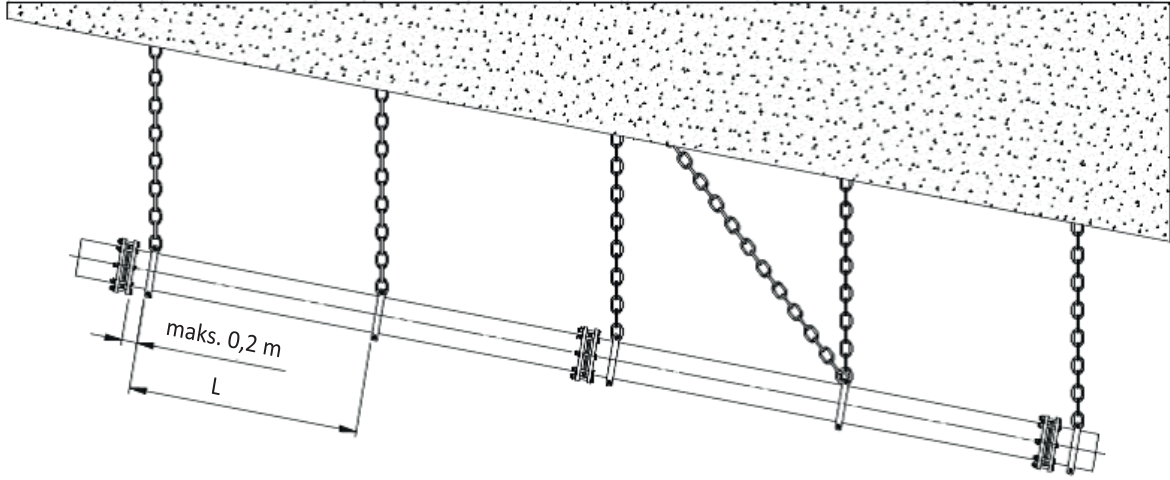
Plastik borular

Belirtilen izin verilen nominal basınçta parlama direnci ve anti-elektrostatik özelliklerin karşılanması koşuluyla

plastik boru hatları kullanılabilir. Bağlantılar için kauçuk, klingerit veya mukavemet ve sızdırmazlık koşullarını karşılayan diğer malzemelerden yapılmış sızdırmazlık elemanları kullanılabilir.

Bağlantıların sızdırmazlığı üretici tarafından belirtilmeli ve belirli bir ülkedeki madencilik sektörü için belirlenen drenaj borularına ilişkin yaptırımları karşılamalıdır.

Plastik boru hatları, borunun çapına bağlı olarak uygun mukavemette ve aralıklı zincirler kullanılarak yan aynaya ve kazı tavanına gömülü veya ankrajlı muhafaza askılarına asılmalı veya kazı tahkimatına bağlanmalıdır (Şekil 5.12). Muhafaza askılarının aralığı, boru hattının çapına bağlıdır. Genel olarak, askı aralığının 180 mm çapa kadar boru hatları için 2 m'yi, 250 mm'ye kadar boru hatları için 3 m'yi ve 400 mm çapa kadar boru hatları için maksimum 4 m'yi geçmemesi gerektiği varsayılabilir. Eğimi 4°'den fazla olan kazılarda, kazının eğimine göre mesafelerde kontra zincir kullanılmalıdır. Örneğin 10 dereceye kadar eğimli kontra zincirler her 120 m'de bir, 20° eğimli kontra zincirler ise her 20 m'de bir kullanılmalıdır.



Şekil 5.12: Eğimli maden kazısında plastik borunun askısı için kontra zincir kullanılması.

Boru hatları, gaz karışımının akış direnci mümkün olduğunca düşük olacak şekilde döşenmelidir. Ancak yapım için ikinci önemli koşul, boru hattının kazı yerinde, mekanik hasar olasılığının mümkün olduğunca düşük olacağı bir konuma sahip olmasıdır.

Boru hatları, bağlantıları ve bağlantı parçaları korozyona karşı korunmalıdır.

Boru hattı döşendikten sonra sızdırmazlığı kontrol edilmelidir. Sızdırmazlık, örneğin en az 0,1MPa'lık bir değerle basınçlı hava kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ulusal boru sızdırmazlık standartları kullanılmalıdır.

Bir kömür madeninin galerilerinde bulunan diğer yerleşik boru hatlarından ayırt edilebilmesi için gaz boru hatlarının işaretlenmesi iyi bir uygulamadır. Kendinden yapışkanlı bantlar kullanılabilir veya boru hattının bazı kısımları belirli bir renge (örneğin sarı) boyanabilir.

Metan drenaj ağı, sondaj deliklerindeki tasarım emme basıncı ve bağlantı noktalarındaki barometrik basınç dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Drenaj deliklerinin emme basıncı 5 ila 13 kPa arasında değişebilir. Tasarım amaçları doğrultusunda, sırasıyla 5,5 kPa ve 120 kPa'lık emme basıncı ve barometrik basınç varsayılabilir.

Gaz karışımı akış dirençlerinden kaynaklanan basınç kayıpları, boru hattının dikkate alınan enine kesitleri arasındaki basınç karelerinin farkı varsayılarak diğer emme boru hatlarına benzer şekilde hesaplanmaktadır. Karışımın yoğunluğu, taşınabilen metan ve diğer gazların konsantrasyonuna göre değerlendirilmelidir. Asgari metan konsantrasyonunun bağlanma sınırı ve diğer gazların önemli payları hakkında bilgi eksikliği durumunda, karışımın geri kalan kısmının maden koşullarına benzer sıcaklık ve basınçtaki hava ile işgal edildiği

varsayılabilir. Ancak, bir gaz boru şebekesinde, akan gazın yoğunluğunun, boru şebekesinin her kolundaki metan konsantrasyonu ve basınçta önemli değişiklikler nedeniyle değişebileceği unutulmamalıdır.

5.5. Hava Atıcının Gaz İstasyonu

Metan drenaj istasyonu, madendeki metan drenaj sisteminin önemli bir unsurudur. Yeraltı metan drenaj boru hatları ağında negatif basınç oluşturur ve metan alıcıları için bir gaz pompa istasyonu görevi görmektedir.

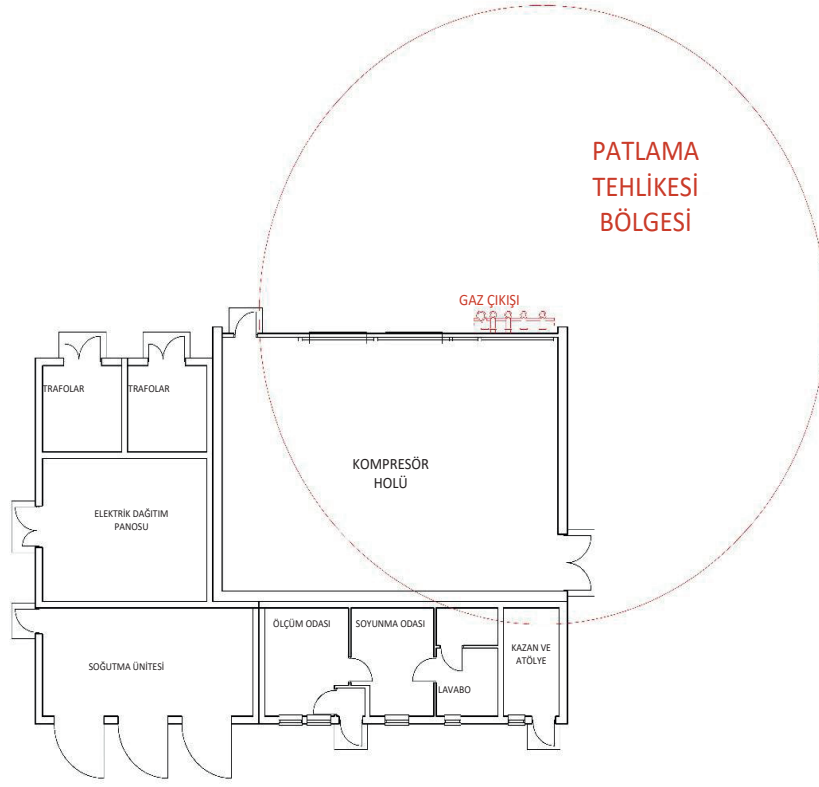
İstasyonlar, çalışma kapsamı ve konumuna göre üç temel türe ayrılabilirler:

- merkezi yerüstü istasyonları,
- yeraltı merkez istasyonları,
- lokal yeraltı istasyonları.

5.5.1. Yerüstü İstasyonu

Merkezi yerüstü metan drenajı istasyonları genellikle madencilik tesislerinin egzoz bacalarının yakınında bulunan hafif yapılardır. Ancak, gaz patlaması riski nedeniyle mesafe ulusal düzenlemelere uygun olmalıdır. Bina, en yakın binalara veya diğer teknik binalara en az 20 m mesafede yer almaktadır. Bina genellikle binanın aynalarından sabit bir mesafede çitlerle (tel örgü) çevrelenir. Bina çevresinde, örneğin ATEX KULLANICILARI 1999/92/ EC direktifindeki (ATEX 137) standarda göre patlama alanları belirlenir. Gaz istasyonunda elektrik şebekesi, merkezi kullanım suyu tesisatı, merkezi ısıtma tesisatı, havalandırma ve klima tesisatı, kanalizasyon sistemi ve patlamaya dayanıklı acil durum tesisatı bulunmalıdır.

Örnek bir metan drenaj istasyonunun düzeni Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13: Yüzeyledeki gaz istasyonunun alttan görünümü.

İstasyon, sürekli personele sahip gaz odası kontrolü prensibine göre inşa edilmelidir.

Yatırıma başlamadan önce “Metan drenaj istasyonunun teknik tasarımı” hazırlanmalıdır. Tasarımda, madende yakalanan gazın artmasıyla genişleme durumu dikkate alınmalıdır.

Yeraltı kazı yerlerinden ve metan alım noktalarından emiş boru hatları istasyona bağlanır. Ana boru hattını metan drenaj istasyonuna bağlamadan önce tesisatı alev aktarımına veya gaz karışımı patlamasına karşı korumak için bir alev tutucu takılmalıdır.

Metan tahliye istasyonunun birincil elemanı, negatif basınç oluşturmak için kullanılan cihazdır. 20. yüzyılda sıvı halkalı tip kompresörler yaygın olarak kullanılmaktaydı.

20. yüzyılın sonlarında Roots, pistonlu tip, vidalı tip, santrifüjli tip kompresörler yaygın olarak kullanılmaya başlandı. En güncel çözümlerde, hava atıcılar ses emici kaplar içine alınır. Bu, istasyonun çevresindeki çevreye yayılan gürültü emisyonlarını önemli ölçüde azaltır. Sistemleri seçerken, alıcıya gönderilen gazın mümkün olan en düşük su ve yağ içeriğine göre tercih yapılmalıdır.

Bu istasyonlarda kapasitenin ve boru hatlarındaki negatif basınç ve pozitif basınç değerleri düzenlenmesi, sürgülü

vana sistemi kullanılarak manuel olarak yapılmaktadır. Metan drenaj istasyonu aşağıdakiler üzerinde kontrole sahip olmalıdır:

- Ölçüm ve güvenlik ekipmanları,
- İstasyonun girişindeki negatif basınç,
- İstasyonun çıkışındaki pozitif basınç,
- Ölçüm delikleri üzerindeki fark basıncı,
- Toplanan gazdaki metan konsantrasyonu,
- Yakalanan ve pompalanan gazın sıcaklığı,
- Her bir üfleyicinin çalışma parametreleri.

Otomatik ayarlama, sürekli parametre kaydı ve veri arşivleme işlemleri uygulanmalıdır. Veri kaydının sıklığı (örneğin saatte bir) sabitlenmelidir. Yakalanan ve müşteriye pompalanan gaz miktarının nm^3/dak (saatte normal metreküp) cinsinden ifade edilen sürekli kaydı sağlanmalıdır.

Çalışma parametrelerinin izlenmesiyle, istasyonun çalışma parametrelerinin madende seçilen konumlara (örneğin madendeki ana kontrol odası) iletilmesi imkânı sağlanmalıdır.

Vakum değerinin ve yakalanan gaz miktarının kontrolü,

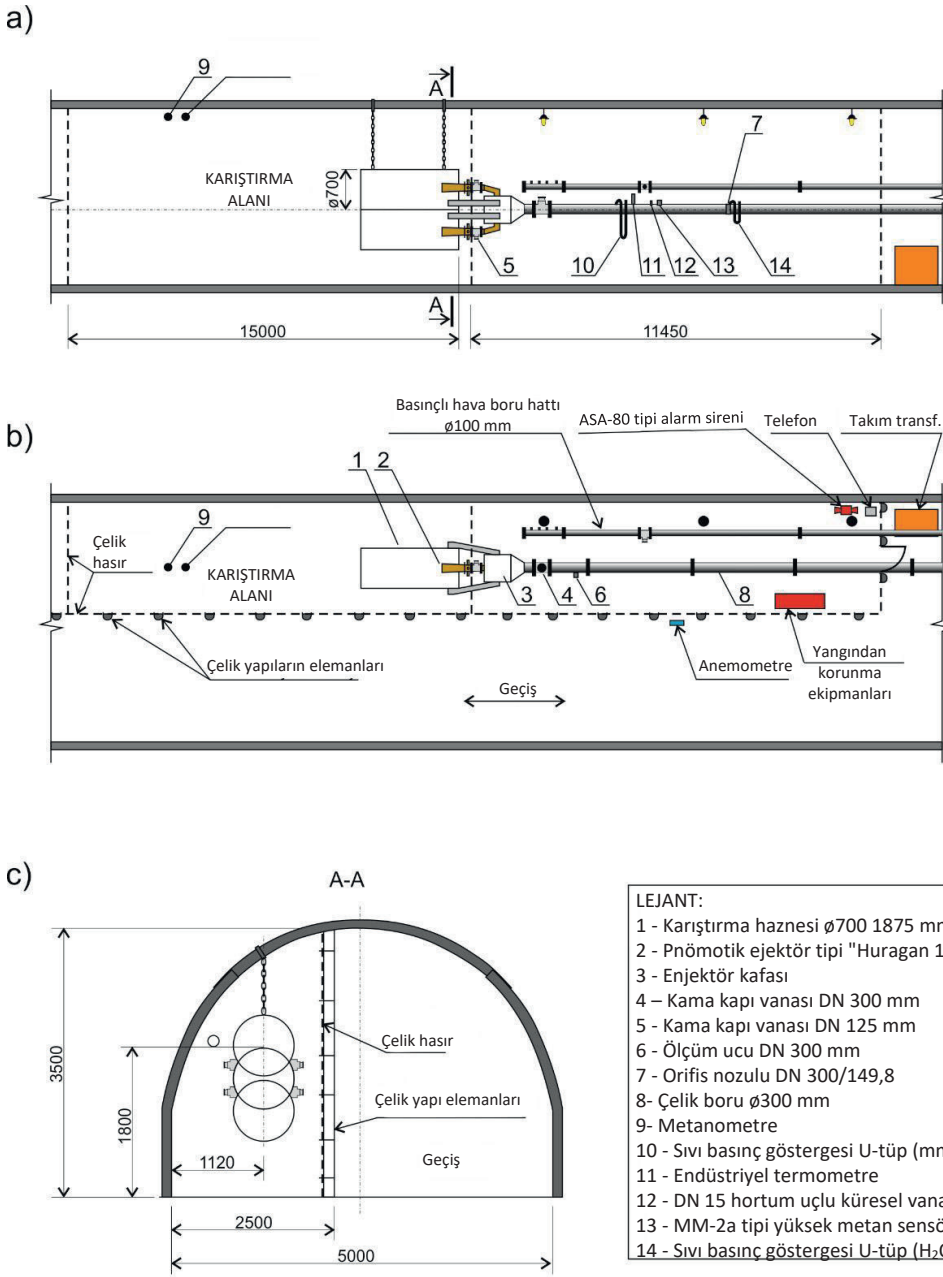
üfleyciyi çalıştıran elektrik motorunun hızı değiştirilerek otomatik olarak yapılmalıdır. Devir değişimi, bir frekans dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Vakum pompalarından önceki gaz filtreleme ve susuzlaştırma sistemi, alıcıya pompalanan gazın yüksek saflıkta olmasını sağlamalıdır. Bu, kojenerasyon sistemlerinde gazın elektrik ve ısı üretmek için kullanılmasını sağlamaktadır.

İstasyon, emme tarafında azami negatif basınç ve çıkışta pozitif basınç olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu basınç, tasarlanan boru şebekesinin hesaplamalarına dayalı olarak sağlanmalıdır. İstenen gaz sıcaklığını otomatik olarak koruyan otonom bir kapalı devre gaz soğutma sistemi tasarlanmalı ve uygulamaya konmalıdır.

5.5.2. Yeraltı İstasyonları

Merkezi yeraltı metan drenajı istasyonlarında, yerüstü istasyonlarına benzer şekilde, negatif basınç oluşturmak için çoğunlukla sıvı halkalı vakum pompaları veya santrifüjlü tip kompresörler kullanılmaktadır. Lokal istasyonlarda hava atıcılar kullanılmaktadır. Vakumun yüksekliği ve verimliliği bir vana sistemi kullanılarak düzenlenir. Yeraltı merkezi metan drenajı istasyonları tüm madeni veya birkaç maden alanını kapsamaktadır. Hava atıcılar elektrikliyse bu istasyonlar bağımsız bir hava akımında olmalıdır.

Bir lokal yeraltı istasyonu örneği Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



Şekil 5.14: Yerel metan drenaj istasyonunun yerleşim düzeni.

Negatif basınç oluşturan cihazlar, basınçlı hava ile çalışan pnömatik enjektörler olabilir. Burada alev tutucular gereklidir. Çıkan gaz, madendeki grup dönüş hava yollarına aktarılmaktadır. Ölçümler, metan monitörleri ve manometreler gibi yerel sensörler kullanılarak gerçekleştirilir.

Lokal yeraltı metan drenajı istasyonları maden sahalarında inşa edilir. Bu istasyonlar, bir maden ayağından veya bir maden alanından metanı drenajla boşaltmak için tasarlanır. Yakalanan gaz dönüş havası yollarına boşaltılmaktadır.

5.6. İzleme ve Gaz Kontrolü

Gaz drenajı sistemlerinin etkinliği ve performansını sürdürmek için sürekli izleme ve yönetim gerekmektedir. Karışım, gaz akışı ve konsantrasyonu, gösterge basıncı ve sıcaklık parametrelerinin tümü, sondaj deliklerinde, gaz drenaj borularında ve yeraltı veya yerüstündeki benzin istasyonlarında yapılan ölçümlerle izlenmelidir. Barometrik basınçtaki değişiklikler gaz akışlarını etkiler ve akış verilerinin standardizasyonuna yardımcı olmak için kaydedilmelidir. Bu parametrelerin izlenmesinden elde edilen veriler güvenlik planlaması için gereklidir. Taşınan gazın metan konsantrasyonu, toplam gaz akış hızı ve statik basınç parametrelerinin izlenmesi gerekir. Sondaj deliği izleme verileri, sistem yönetimi için gereklidir.

Kömür kökenli gazın yakalanma yerlerinde gaz konsantrasyonlarının kontrol edilmesi çok önemlidir ve bu kontrol, belirli bir sondaj deliğinin veya bir grup sondaj deliğinin bağlantısının kesilmesine ilişkin kararların alınmasını mümkün kılmaktadır. Ne yazık ki, bir geri dönüşlü uzunayağın gerisindeki sondaj delikleri bazen erişilemez durumdadır ve uzaktan elektrikli izleme ekipmanı kurmak için uygun bir ortamda değildir. Genellikle, bu sondaj deliklerinde gaz saflığı kontrolü yapılmaz. Ancak, gaz konsantrasyonunun dolaylı olarak belirlenmesini sağlayan, elde taşınır bir lazer probu kullanılarak çelik drenaj borularının yüzey sıcaklığının uzaktan ölçülmesiyle gaz saflık kontrolü düşünülebilir^[130].

Gaz alımı izleme verilerinin analizi, artan kömür üretim hızlarının gaz akışları üzerindeki etkileri hakkında tahmini bilgiler sağlayabilir. Modellemede ayrıca metan sınır değerlerine ve havalandırma miktarlarına bağlı olarak maksimum kontrol edilebilir gaz akışı ve ilgili maksimum kömür üretim hızı da tahmin edilebilir.

Gaz drenaj sisteminin etkinliğini belirlemek için manuel veya uzaktan izleme sistemleri kullanılmalıdır. İzleme kalitesi, sensörlerin güvenilirliğine, konumlandırılmasına, bakımına, kalibrasyonuna ve kullanımına bağlıdır.

Her bir sondaj deliğinde, gaz drenaj boru tesisatında ve boşaltılan gazı madenden çeken pompaları barındıran

yerüstü metan çıkarma tesisinde ölçümler yapılması gerekmektedir^[59, 259].

İzlenecek parametreler arasında karışım akışı, gaz konsantrasyonu, gösterge basıncı ve sıcaklık yer alır. Akış verilerinin standartlaştırılmasını kolaylaştırmak için barometrik basınç da kaydedilmelidir. Bazı durumlarda, maden kazı yerlerine boşaltılan veya yayılan gaz, yanlış metan ölçümüne neden olabilecek nem, kükürt bileşikleri veya daha ağır gaz halindeki hidrokarbonlar (örneğin etan veya propan) gibi başka bileşenler içerebilir. Doğru ölçümler sağlamak amacıyla, herhangi bir ek bileşeni düzeltebilen bir izleme ve ölçüm programı tasarlamak için özen gösterilmelidir^[260].

Kurulu sistemin gerçek performansını orijinal tasarım konseptine göre değerlendirmek için izleme yapılmalıdır.

Metan tespiti için optik sensörler, kalorimetrik sensörler, piroelektrik sensörler, yarı iletken metal oksit sensörleri ve elektrokimyasal sensörler dahil olmak üzere beş önemli sensör kullanılabilir. Optik ve kalorimetrik gaz sensörleri, yeraltı madenlerinde yaygın olarak kullanılan geleneksel sensörlerdir. Katalitik gaz sensörü, adsorban bazlı gaz sensörü ve termal iletkenlik gaz sensörü olmak üzere üç tip kalorimetrik gaz sensörü bulunmaktadır. Katalitik sensörler, yeraltı madenlerinde en sık kullanılan metan sensörleridir. Esas olarak alt patlama sınırını ölçmek için kullanılırlar ve genellikle çift aralıklı metan sayaçlarına sahiptirler. Hassasiyet 10-30 mV / %1 CH₄. Diğer yanıcı gazlar da katalitik yanmaya neden olur ve ölçüm sonuçlarını etkiler. Ayrıca sensör zehirlenmesine (silikonlar) karşı hassaslardır.

Metan ölçümüne yönelik termokondüktometrik yöntem, esas olarak alt patlama sınırının üzerindeki metan konsantrasyonları için kullanılır. Metan drenajı boru hatlarında ölçüm 1mV / %1 CH₄ hassasiyeti ile sağlanmaktadır.

5.7. Drenajla Boşaltılan Gazın Yönetimi

5.7.1. Verimlilik Değerlendirmesi

Sahadaki izleme, raporlama ve doğrulama sistemleri ve prosedürü, metan yöneticilerinin bir madende en fazla emisyon oranına sahip yerleri belirlemesine yardımcı olmaktadır.

İzleme, emisyon verilerinin ölçümünü içermekle birlikte emisyonları farklı doğruluk dereceleriyle izlemek için birçok farklı seçenek bulunmaktadır. Şimdiye kadar sunulan yöntemler arasında emisyon faktörlerinin kullanımı, el makineleri kullanılarak noktasal ölçümler ve sürekli emisyon izleme sistemleri (gerçek zamanlı izleme veya metanometri sistemleri) yer almaktadır.

Daha yüksek sıklıklarla veya daha yüksek numune alma hızlarıyla veri toplamanın genellikle daha fazla doğruluk sağladığı kabul edilir. Çünkü bu verilerle günlük sıcaklık veya basınç değişikliklerinden kaynaklanan değişiklikleri ve operasyonel faktörlerden kaynaklanan değişiklikler saptanabilir ve ortalamaya göre istatistiksel değişimler ve numune alma hataları ele alınabilir. Ancak, izleme yöntemlerinde yetenekli ve eğitilmiş personel, en ilgili ve önemli konumlarda uygun şekilde kalibre edilmiş ve bakımı yapılmış ekipmanlar, uygun izleme sıklıkları ve ölçüm konumlarına dayalı olarak sonuçların doğru yorumlanması gerekmektedir^[260].

Kömür üretimiyle ilgili bir emisyon faktörünün kullanılması, bir madendeki metan emisyonlarının izlenmesi ve metan tehlikelerinin değerlendirilmesi için en doğrudan yöntem olabilir. Emisyon faktörleri genellikle çıkarılan her bir metrik ton kömür başına CH₄ hacmi olarak belirtilir. Diğer bir faktör, havalandırma sistemindeki metan, çalışma alanlarından, hazırlık alanlarından veya sızdırmazlık elemanları ve bariyerlerin arkasından tahliye edilen metan gibi kaynaklara göre ayrılmış toplam metan emisyonu olabilir. Genellikle geçmiş verilerden bir faktör türetildikten sonra, bir emisyon tahmini geliştirmek için bu faktör üretilen kömür miktarına uygulanmaktadır. Tip eğrileri geliştirildikten sonra büyük maden popülasyonlarında kullanımı nispeten kolaydır. Gelecekteki emisyonlar, eğriler izlenerek tahmin edilebilir^[260].

Yeraltı madenlerinde hem havalandırma sisteminde hem de gaz drenaj sistemlerinde gaz akış ölçümleri yapmanın çok yaygın bir yöntemi, el makinelerinin kullanılmasıdır. Bu ölçümlerin yasal güvenlik düzenlemelerine uygun olması ve eğitilmiş, yetkin bir kişi tarafından kabul edilmiş prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmesi gerekir. El makineleri yalnızca günlük, aylık, üç aylık veya yıllık gibi düşük sıklıklı ölçümler için uygundur. Tabaka özelliklerindeki, kömür üretim hızındaki ve diğer maden faaliyetlerindeki değişikliklerden kaynaklanan gaz akışlarının değişkenliği nedeniyle, ölçüm ne kadar sık yapılırsa, doğruluk da o kadar yüksek olmaktadır^[77]. Bir el aletinden elde edilen veri ölçümlerinin analizi, risk azaltma imkanlarını belirlemek için değerli veriler sağlayabilir. Bu yöntem, personelin doğru ölçüm yapma ve gaz numuneleri alma yetkinliğini ve makinelerin bakım prosedürleri ve kalibrasyonunu gerektirir.

Sürekli Emisyon İzleme Sistemleri (SEIS), hem drenaj hem de havalandırma sistemlerinden kaynaklanan CH₄ emisyonlarının en doğru ölçümünü sağlayabilse de bunların uygulanması pahalı olabilir. Ancak, çoğu modern yeraltı kömür madeni, sahaya ve yerüstündeki uzaktan izleme istasyonlarına gerçek zamanlı yönetim bilgileri sağlayan sürekli çevresel izleme sistemlerine sahiptir ve bu sistemler madenin yönetimine faydalar sağlar. Gerçek zamanlı izleme sistemlerinin yönetimi için önemli insan kaynakları gerekmez ve bu sistemler belirli madenlerde risk azaltma imkanlarının değerlendirilmesine yardımcı

olurlar. Ancak bu, diğer yöntemlere kıyasla pahalı olabilir. Ek olarak, bu yöntem personelin verileri doğru bir şekilde yorumlama yetkinliğine bağlıdır^[260].

5.7.2. Çevresel Hususlar

Metan, ikinci en önemli insan kaynaklı sera gazıdır. Kızılötesi ışınları soğurarak küresel ısınmaya katkıda bulunur. Atmosferdeki CH₄ konsantrasyonu, insan faaliyetlerinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir.

CO₂'e kıyasla daha düşük atmosferik konsantrasyonuna rağmen metan, referans kaynağa bağlı olarak CO₂'den 28-32 kat daha yüksek (100 yıllık bir zaman ufkunda) küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip olmaktadır^[261].

Küresel kömür madeni metan (CMM) emisyonları, kömürle ilgili diğer sera gazı (SG) emisyon kaynaklarına (örneğin, kömürün yakılmasından kaynaklanan karbondioksit) kıyasla daha küçüktür, ancak önemsiz değildir^[59].

Madenden çıkarılan metan gazı, zararlı çevresel etkilerine rağmen, enerji sağlayabilen yüksek kaliteli bir yakıttır ve bu nedenle atmosfere salınarak israf edilmemelidir. Metan gazının yakalanması ve kullanılması, madencilik operasyonlarına önemli bir değer katabilir. Yakalanan CMM, doğal bir kaynağın değerinden yararlanılarak doğrudan enerji sağlamak veya üretmek için kullanılabilir. Bu da enerji satışları veya maliyet tasarrufları yoluyla madene ekonomik getiri sağlayabilir. Ayrıca metan kullanımı, maden güvenlik ekipmanları ve operasyonlarına yeniden yatırılacak sermaye üretmek için kullanılabilir. Bu da enerji satışları veya maliyet tasarrufları yoluyla madene içsel değer katmaktadır. Mevcut teknoloji, enerji geri kazanımını optimize edebilir ve yeraltı kömür madenciliğinden kaynaklanan metan emisyonlarının önemli bir kısmını fiilen ortadan kaldırılabılır (Şekil 6.1). İyi gaz drenajı standartları ve uygulamaları, istikrarlı ve kullanılabilir kalitede gaz sağlar ve en düşük maliyetli kullanım fırsatlarının uygulanmasını kolaylaştırır. Madencilik faaliyetlerindeki değişiklikler nedeniyle, gaz arzı dalgalanır ve gaz kullanım ekipmanları arada sırada arızalanır veya bakım için durdurulmaları gerekir. Kullanılmayan gaz, emisyonları en aza indirmek için yakılabilir. Yakalanamayan ve kullanılmayan metan, havalandırma sisteminde seyreltilerek atmosfere salınmaktadır^[59].

CMM kullanımının uygun olmadığı durumlarda CMM'nin yakılması, cazip olabilecek bir emisyon azaltma seçeneğidir. İdeal olarak, her kullanım tesisi, bir arıza durumunda veya planlı bakım nedeniyle tesisin geçici olarak kapatılması gerektiğinde ve metan üretiminin henüz ticari olarak kullanılabilir seviyelere ulaşmadığı erken maden hazırlık aşamasında bir yakma tesisi ile donatılmalıdır. Bu, atmosfere salınan metan emisyonlarını en aza indirir ve böylece kullanım olmadığı zamanlarda çevreyi korumaktadır^[59].

5.7.3. Metanın Kullanımı

Kömür damarlarındaki metan içeriği derinlikle birlikte arttıkça, kömür madenlerinde salınan metan miktarının da artması beklenmektedir. Bu nedenle, metan geri kazanımına ve yakalanan gazın kullanım uygulamalarına büyük önem verilmelidir. Metanın ilk kaydedilen kullanımı, 1733'te Haig Colliery'de (Batı Cumbria) ısıtma ve aydınlatma amaçlıydı. Isıtma için yeraltı drenaj sisteminden metan kullanımına yönelik ilk sistemler, 1958 ve 1960'ta sırasıyla Polonya'daki Silezya Kömür Madeni ve 1-Maja Kömür Madeni'nde uygulanmıştır.

Maden metan uygulamaları Çizelge 5.1'de^[263] sunulmaktadır. Kömür çıkarma sürecinde uygulanan prosedürlerin maden gazı kaynağına bağlılığı dikkate alınmıştır.

Gaz şebekelerinin altyapısı ve kömür damarlarından geri kazanılan metanı taşıma konusundaki nispeten sınırlı kapasitesi dikkate alındığında, yine de çoğu enerji tedarik şebekesinin maden tesisi arazisinde veya yakınında bulunduğu belirtilmelidir.

Çizelge 5.1 Maden metanı uygulamaları ve özellikleri^[263, 264].

Teknoloji	Havalandırma havasından geri kazanılan gaz	Geliştirilen kömür damarlarından geri kazanılan gaz	Bakır kömür damarlarından geri kazanılan gaz
Geri kazanma araçları	Fanlar	Dikey borular, kömür damarlarındaki sondaj delikleri (yatay)	Kömür damarlarında dikey sondaj delikleri
Kullanılan ekipmanlar	Fanlar, bir boru hattı sistemi	Kömür damarlarındaki sondaj delikleri ve/veya yer üstü ekipmanları, kompresörler ve pompalar	Kömür damarlarındaki sondaj delikleri ve/veya yer üstü ekipmanları, kompresörler ve pompalar
Isıtma değeri	Düşük (metan içeriği < %1 (genellikle %0,6'nın altında))	Orta (10–30 MJ/kg)	Yüksek (37 MJ/kg'ye kadar)
Uygulamalar	Kazanlarda, pistonlu motorlarda veya gaz türbinlerinde hava ile yakma; reaktörlerde ısıya veya elektriğe dönüştürme (akışı tersine çeviren oksitleyiciler)	Enerji üretimi; gaz dağıtım şebekelerinde kullanım (arıtma sonrası); doğrudan (örneğin endüstriyel) kullanım	Geliştirilen kömür damarlarından geri kazanılan gaz; kimya endüstrisi için ham madde
Kullanılabilirlik	Teknolojilerin ilk grubu mevcut, ikinci grup geri bildirim aşamasında	Mevcut teknolojiler	Mevcut teknolojiler
Uygulanabilirlik	Yerel koşullara bağlı	Lokalizasyona bağlı olarak yaygın	Teknolojiye (çıkarma), finansmana ve lokalizasyona bağlı
Metan azaltma derecesi	%10–90	%50'ye kadar	%70'e kadar

Bu durum, Polonya'daki kömür yataklarının gazdan arındırılması yoluyla elde edilen gazın kullanılmasının aşağıdaki gibi olası yollarını açıklar^[263]:

- Kazanlarda ve diğer sistemlerde (örneğin kurutma odaları) gaz yakılarak ısınma amaçlı ısı üretimi,
- Elektrik ve sıcak suyun birlikte üretimi,
- Elektrik ve proses buharının birlikte üretimi,
- Elektriğin ve kurutma işlemleri için gerekli olan maddelerin birlikte üretimi,
- Isı, soğuk hava ve elektriğin birlikte üretimi,
- Kombine sistemlerde elektrik üretimi.

Çoğu durumda, gaz sistemi bir termik santrale veya fosil yakıtlı bir elektrik santraline bağlıdır. Bu tür tesislerin büyük çoğunluğunun işleyişi, yüksek verimlilikleri ve nispeten küçük yatırımlar gerektirmeleri nedeniyle pistonlu içten yanmalı motorlara dayanmaktadır.

Tedarik edilen gaz yakıtının türü, bir motorun çalışması için önemlidir. Piyasada bulunan tüm cihazlar, madenlerden drenajla boşaltılan gazla çalıştırılmaz. Yakıtların alternatif kullanımı için belirleyici faktörler Wobby endeksi, metan sayısı ve yanma oranıdır. Çoğu durumda, asgari düzeyde bir metan konsantrasyonu da gereklidir. Ayrıca, maden gazının yakıt olarak kullanılabilmesi için besleme sistemlerinde ve yanma odalarında değişiklikler yapılması gerekir. Bu ayarlamalar genellikle sıkıştırma oranı ve ortalama efektif basınçtaki değişikliklerle bağlantılıdır. Bazı durumlarda, *karışımın homojenleştirme derecesinin* ve ateşleme enerjisinin değiştirilmesini de içerirler. Yapısal değişiklikler genellikle yanma odasının şeklini etkileyen motor kafasını içerir. En basit çözümler, yanma odasının hacminin ve ateşleme açısının değiştirilmesine dayanır. Daha karmaşık olanlar, besleme sisteminin değiştirilmesini, gaz karışımının uygun türbülansının seçilmesini, yanma odasındaki gazların bileşiminde yerel değişikliklerin yapılmasını veya buji sayısının artırılmasını içerir. Bu zorluklara rağmen, özel gazlarla çalışan tesislerde pistonlu motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Metan drenajından elde edilen gazın kullanılması, bir motorun gücünde ve veriminde önemli bir azalmaya neden olmaktadır.

Metan drenajı yoluyla elde edilen maden gazının alternatif bir uygulaması, saflaştırılması ve sıvılaştırılarak LNG'ye dönüştürülmesidir^[144, 251]. Nihai sıvı ürün, %97 CH₄ ve %3 N₂'den oluşur, yeniden gazlaştırmadan sonra, özellikleri doğal gazın özellikleriyle hemen hemen aynı olan bir yakıt haline gelmektedir. En önemli fark, metan geri kazanımı yoluyla elde edilen gazın ne daha yüksek hidrokarbonlar ne de su içermesidir. Bunlar, kriyojenik işlemler başlamadan önce tamamen ortadan kaldırılmaktadır.

Geri kazanılan metanın sıvılaştırılması süreci, kriyojenik süreçleri başlatmadan önce gazın saflaştırılması gerekliliği gibi ciddi bir zorluk içerir. Başlıca kirlenmeler arasında H₂S, Hg, O₂, CO₂, H₂O ve N₂ bulunmaktadır. Azot, yoğunlaşma sıcaklığı metaninkinden daha düşük

olduğu için doğrudan ayrılma da diğer kirlenmelerin gelişmiş ekipmanlar kullanılarak uzaklaştırılması gerekir.

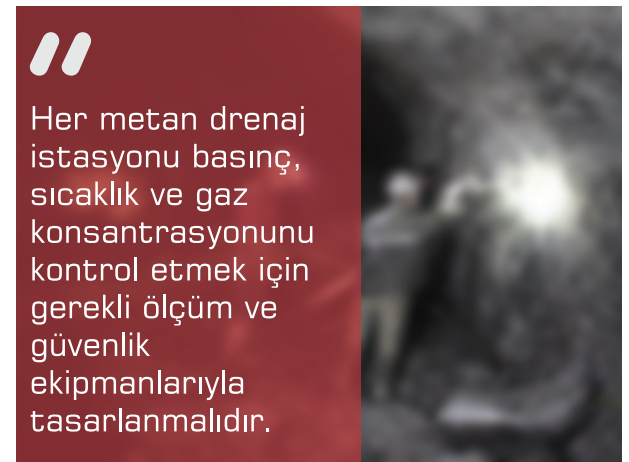
Metan drenajı yoluyla elde edilen gazdan uzaklaştırılması en zor olan "kirlilik", metan drenaj istasyonu tarafından pompalanan havadaki oksijendir. Aktif karbon kullanımıyla H₂S ve Hg gazının saflaştırılması mümkünken, CO₂ ve H₂O adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılır. İşlemden açığa çıkan büyük miktarda su, yoğunlaşma yoluyla uzaklaştırılır.

Tesis besleyen elektrik şebekesine (madenin şebekesi veya harici şebeke) alternatif olarak, geri kazanılan gazın yakıt olarak yakıldığı bir gaz motoruyla çalışan bir elektrik jeneratörü kullanmak mümkündür. Böyle bir kombinasyon, tüm işletmenin maliyet etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Sıvılaştırılmış metan satışından elde edilen gelir, alternatif enerji kaynaklarının fiyatlarıyla güçlü bir şekilde ilişkilidir. Sıvılaştırılmış metan, gaz dağıtım şebekelerinin bulunmadığı bölgelerde kullanılabilir. Bu alanlarda yer alan enerji tüketen üretim tesislerinde teknolojik amaçlarla ve çalışanlarına sosyal hizmet sağlamak amacıyla fuel oil ve LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) kullanılmaktadır. Bu nedenle, sıvılaştırılmış metanın fiyatı, bu yakıtların ve ithal LNG'nin fiyatlarına göre rekabetçi olmalıdır.

An itibarıyla çalışan madenlerde geri kazanılan metanın yalnızca uygulanması sağlık ve güvenlik yönetmelikleri tarafından zorunlu kılınan drenaj sistemleri aracılığıyla elde edildiği vurgulanmalıdır. Madencilik şirketlerinin metan kullanım derecesini ve metan drenajının etkinliğini artırmak için metan yakalama maliyetinin enerji üretim maliyetlerine mutlaka dahil edilmesi gerekmektedir.

Isıtma talebinin mevsimsel olması nedeniyle yakalanan metan miktarının tamamının kullanılmadığı da belirtilmelidir. Mevcut miktar kışın (ısıtma mevsimi boyunca) neredeyse tamamen tüketilmektedir. Bu nedenle, metan fazlasının diğer uygulamalar için kullanılmasını sağlamak amacıyla, LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) veya CNG (sıkıştırılmış doğal gaz) üretmek için çıkarma işlemi derinleştikçe kazı yerlerini havalandırmak için kullanılan soğutulmuş suyun hazırlanması gibi adımlar atılmalıdır.



Her metan drenaj istasyonu basınç, sıcaklık ve gaz konsantrasyonunu kontrol etmek için gerekli ölçüm ve güvenlik ekipmanlarıyla tasarlanmalıdır.

6. METAN DRENAJINDA RİSK DEĞERLENDİRMESİ

Gazlı kömür madenlerinde olağan dışı gaz emisyonları ve püskürme olayları gibi riskleri azaltmak için ayrıntılı yöntemler geliştirilmeli ve önemli risklerin tespit edildiği her yerde bu yöntemler uygulanmalıdır. Güvenli çalışma koşulları, gaz kontrol yöntemlerinin ve metan drenajının uygulanmasına ve izlenmesine bağlıdır. Operasyonel maden güvenliği gerekçesiyle sadece yeraltı izleme sistemi kurulumunun değil, aynı zamanda güvenlik planlaması için verilerin toplanması ve kullanılmasının önemi göz ardı edilemez.

Üstteki gaz galerisinden gaz drenajı, iyi performansı nedeniyle yüksek gaz içerikli kömür madenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, aktif uzunayak panosunun ayak arkası bölümünde kömürün kendiliğinden ısınma ortamı üzerinde gaz galerisinden gaz drenajının etkisine odaklanan çok az çalışma bulunmaktadır. Ayak arkası gazı emisyonu ve çalışma ayağında gaz birikimi azaltılmış olsa da gaz drenajının mevcut negatif basıncı yalnızca gaz akışının yönünü değil aynı zamanda oksijenin kütle transferini de değiştirerek kömürün kendi kendine ısınmasını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, üstteki galeriden gaz drenajı yapılırken, kömürün kendiliğinden yanmasına ilişkin risk değerlendirmesi ve tehlikeli alanların sınıflandırılması büyük önem taşımaktadır^[265].

Eğimli sondaj delikleriyle metan drenaj teknolojisinin kullanılması, çalışmaları denetleyen kişileri işlerin etkili bir şekilde organize edilmesine özel dikkat göstermeye mecbur bırakır. Bir grup sondaj deliği açıldıktan sonra, sondaj makinesini ve yardımcı ekipmanları çekmek ve sondaj makinesini yeni bir konumda kurmak gerekir. Gaz boru hattı, ilerleyen bir çalışma ayağı olarak art arda kısaltılmalı ve sökülen borular taban yolundan çekilmelidir.

Taban yolunun boyutlarına bağlı olarak sondaj makinesinin konumu da yerüstüne malzeme taşınmasını engelleyerek sorun teşkil edebilir. Bu sorunun çözümü, taban yolunun yan aynasında önceden hazırlanmış sabit deliklerden sondaj yapmaktır. Ancak bu yöntem, hazırlık çalışmalarının yürütülmesi aşamasında ek harcamalar gerektirir.

Kuyu delme teknolojisi, su bazlı çamur kullanılmasını gerektirir. Kapalı bir çamur sisteminin kullanılması, taban yoluna su çıkışı olasılığını sınırlar, ancak sızıntı durumunda veya sondaj çubuklarının sökülmesi sırasında suyun dışarı akma olasılığı vardır ve bu da personel hareketi ve elle taşıma riskini artırmaktadır. Sondaj deliklerinin çoğunun, diğer işlerin aynı anda yürütüldüğü ayağın üst taban yolu ile galerinin kesişme noktasına yakın bir yerde açılması önemlidir.

Sorun, açıklıkların doğruluğunun denetlenmesiyle ilgilidir. Oluşturulan açıklık uzunluğunun tasarımda varsayılandan daha kısa



Güvenli madencilik için havalandırma sistemleri ve metan kontrol önlemleriyle bağlantılı olarak, gaz drenajının tasarımı, kömürden desorbe edilen gaz miktarının, salımın ve hassas maden alanlarına geçişin bilinmesi kritik bir önem taşır.

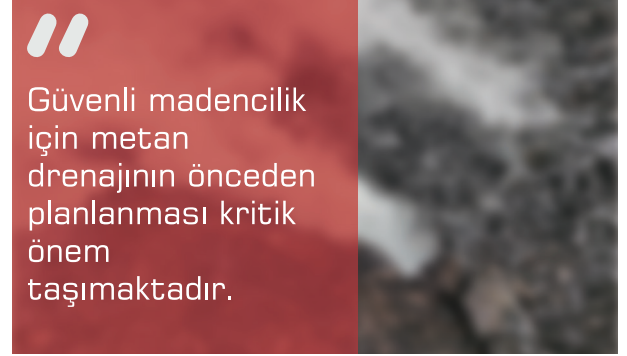
olduğu durumlar olabilir. Ayrıca, zorlu jeolojik koşullar, ekipman arızaları veya ihmal, uygun denetimin olmaması durumunda, drenaj deliklerinin parametrelerinin yanlış olmasına yol açabilir. Bu tür eylemler, ekibin kuyulardan metan alımının sonuçlarına dayanarak sonraki deliklerin uzunluklarını ve eğim açılarını belirlerken doğru sonuçlara varmasını imkânsız kılmaktadır.

Klasik drenajın önemli bir avantajı, kayaç kütlesinin karmaşık yapısı, uygun şekilde tanınmaması ve hesaplama modellerindeki kusurlar nedeniyle geri dönümlü uzunayağın ilerlemesi ile sondaj deliği parametrelerinde sürekli olarak düzeltme yapma imkânı sağlamasıdır. Zira metan drenajı aşamasında tasarım varsayımlarında tutarsızlıklar olabilir. Bunun avantajı, metan tehlikesi seviyesi üzerinde gerçek bir etkinin sağlanabileceği yerlerde metan drenajı yapılmasına imkân tanınması ve bu sayede yapılan iş sayısının sınırlandırılabilmesidir.

Avantajları özetlemek gerekirse, metan içeriği tahminine göre metan drenajının gerekli olduğu bölgeler, havalandırma sistemindeki metan içeriği değerlerinin teorik değerleri aşmayacağı şekilde belirlenir. Klasik drenaj delikleri yöntemi, metanın yalnızca bu bölgelerden yakalanmasına olanak tanıyarak iş miktarını en aza indirir. Gerçek koşullarla herhangi bir tutarsızlık, uzunayak madencilik faaliyetlerinin seyri boyunca düzeltilebilir.

Gaz drenajı koşulları altında kömürün kendiliğinden yanması riskinin analizi, gaz yayılmasını verimli bir şekilde kontrol edebilen ve kömür yangınlarının önlenmesini en üst düzeye çıkarabilen gaz drenajına ilişkin uygun parametrelerin seçilmesi açısından faydalıdır^[266]. Negatif basınç nedeniyle, ayak arkası gazı bir drenaj sistemine akar ve drenaj verimliliği, drenaj basıncı ayarlanarak iyileştirilebilir^[202, 137, 120]. Belirli bir çalışma bölgesi için gaz felaketlerinin ve kömürün kendi kendine ısınmasının önlenmesi dikkate alındığında, farklı gaz drenaj hızlarıyla kömürün kendi kendine ısınmasının risk değerlendirmesi, çalışma bölgesinin ilerlemesi sırasında drenaj hızının ayarlanması için bir referans sağlayabilir.

Güvenli madencilik için metan drenajının önceden planlanması çok önemlidir. Havalandırma sistemleri ve metan kontrol önlemleriyle bağlantılı olarak, gaz drenajının tasarımı, kömürden desorbe edilen gaz miktarının, salımın ve hassas maden alanlarına geçişin bilinmesini gerektirir. Bu bilgi olmadan gaz drenaj sisteminin tasarlanması gelecekte, yakalanan gazın kalitesinin düşük olmasına ve havalandırma sistemine salınan gaz miktarının daha önemli düzeylerde olmasına katkıda bulunabilir.



//
Güvenli madencilik için metan drenajının önceden planlanması kritik önem taşımaktadır.

7. TEKNİK REHBER ÖZETİ

Gazlı bir kömür madeninde metan drenajına yatırım yapılması, madencilik operasyonlarının güvenliğini sağlama ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Gaz kontrol önlemleri veya gaz izleme sistemleri ile metan drenaj sisteminin uygun tasarımı ve doğru kullanımı da maden verimliliğini artırabilir. Güvenli gaz yakalama ve kullanımı için ulusal veya tesis içi düzenlemelerin oluşturulması ve uygulanması, enerji üretimi ve daha önemli metan emisyonu azaltımları şeklinde faydaları teşvik etmektedir.

Kömür madenciliği sektörü gelişmekte olan ülkelerde metan drenajı çalışmaları yoğunlaştırılmalıdır. Madencilik girişimcileri, metan drenajı tekniklerini geliştirmeyi veya bu işleri gerçekleştirmeleri için uzman şirketlerle birlikte çalışmayı düşünmelidir. Ancak öncelikle diğer madenlerin kanıtlanmış deneyimlerinden bir şeyler öğrenebilirler ve madenleri için uygun en iyi uygulamaları geliştirebilirler.



Bir maden işletmesinin kanıtlanmış prensipler temelinde metan drenajına yatırım yapması, madencilik operasyonlarının güvenliğini artırdığı gibi verimliliğinin de artırılmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Lunarzewski L.W., 1998. Gas emission prediction and recovery in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology*, 35, ss.117–145.
- [2] Scott A.R., Kaiser W.R., Walter B.A., 1994. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico-Implications for coalbed gas producibility. *AAPG (Advancing the World of Petroleum Geosciences) Bulletin*, 78, ss.1186–209.
- [3] Whiticar M.J., 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*, 161, ss.291–314, doi:10.1016/S0009-2541(99)00092-3.
- [4] Flores R.M., 1998. Coalbed methane: From hazard to resource. *International Journal of Coal Geology*, 35, ss.3–26.
- [5] Rice C.A., Flores R.M., Stricker G.D., Ellis M.S., 2008. Chemical and stable isotopic evidence for water/rock interaction and biogenic origin of coalbed methane, Fort Union Formation, Powder River Basin, Wyoming and Montana. U.S.A. *International Journal of Coal Geology*, 76, ss.76–85. doi:10.1016/j.coal.2008.05.002.
- [6] Rice D.D., 1993. Composition and origins of coalbed gas. In: Law B.E., Rice D.D., eds., *Hydrocarbons from coal*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Studies in Geol., No. 38, ss.159–184.
- [7] Smith J.W., Pallasser R.J., 1996. Microbial origin of Australian coalbed methane. *AAPG Bulletin*, 80, ss.891–97.
- [8] Strapoc D., Mastalerz M., Dawson K., Macalady J., 2011. Biogeochemistry of microbial coal-bed methane. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, ss.617–56, doi:10.1146/annurev-earth-040610-133343.
- [9] Kotarba M.J., Rice D.D., 2001. Composition and origin of coalbed gases in the Lower Silesian basin, southwest Poland. *Applied Geochemistry*, 16, pp.895–910, doi:10.1016/S0883-2927(00)00058-5.
- [10] Feng G., Zhang A., Hu S., Cheng J., Miu X., Hao G., Han D., Guan S., Zhao G., 2018. A methodology for determining the methane flow space in abandoned mine gobs and its application in methane drainage. *Fuel*, vol. 227, ss.208–217.
- [11] Szlązak N., Kubaczka C., 2012. Impact of coal output concentration on methane emission to longwall faces. *Arch. Min. Sci.*, Vol. 57, No 1, ss.3-21. DOI 10.2478/v10267-012-0001-x.
- [12] Si G., Jamnikar S., Lazar J., Shi J.-Q., Durucan S., Korre A., Zavšek S., 2015. Gas emissions measurement and modelling in multi-level longwall top coal caving of ultra-thick coal seams Part I: In-situ measurements. *IJCG*
- [13] Hargraves A.J., 1983. Instantaneous outbursts of coal and gas. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, No 285, March, ss.1-37.
- [14] Noack K., 1998. Control of gas emissions in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology* 35, ss.57-82.
- [15] Mastalerz M., He L., Melnichenko Y.B., Rupp J.A., 2012. Porosity of Coal and Shale: Insights from Gas Adsorption and SANS/USANS Techniques. *Energy Fuels*, 26(8), ss.5109–5120.
- [16] Jia G., Yang M., Zhang X., Liu L., 2022. Experimental Study on the Pore Structure of Middle- and Low-Rank Coal and Its Influence on Methane Adsorption. *Geofluids*, vol. 2022, Article ID 1372243, 9p., <https://doi.org/10.1155/2022/1372243>.
- [17] Tang, X., Ripepi, N., 2016. Temperature-dependent Langmuir model in the coal and methane sorption process: Statistical relationship. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, Vol. 340, No. 1, ss.61-69.
- [18] White C.M., Smith D.H., Jones K.L., Goodman A. L., Jikich S. A., LaCount R.B., Schroeder K.T., 2005. Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery a review. *Energy and Fuels*, Vol. 19, No. 3, ss. 659-724, <https://doi.org/10.1021/ef040047>.
- [19] Bakhshian S., Sahimi M., 2017. Adsorption-induced swelling of porous media. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 57, 1–13, doi:10.1016/j.ijggc.2016.12.011.
- [20] Bakhshian S., Shi Z., Sahimi M., Tsotsis T.T., Jessen K., 2018. Image-based modeling of gas adsorption and deformation in porous media. *Scientific Reports*, 8, ss.1–12, doi:10.1038/s41598-018-26197-8.
- [21] Shuyuan L., Chenhui W., Wancheng Z., Miao Z., 2020. Temperature- and pressure-dependent gas diffusion in coal particles: Numerical model and experiments, *Fuel*, Volume 266, 117054, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117054>.
- [22] Zhao S., Chen X., Li X., Qi L., Zhang G., 2021. Experimental analysis of the effect of temperature on coal pore structure transformation, *Fuel*, Volume 305, 121613, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121613>.
- [23] Kozłowski B., Grębski Z., 1982. *Odmetanowanie górotworu w kopalniach*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.

- [24] McPherson M.J., 1993. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. 1st edition. Chapter 12, ss. 401-456, Springer London, United Kingdom, Chapman & Hall.
- [25] Gray I., 1987. *Reservoir Engineering in Coal Seams: Part 1-The Physical Process of Gas Storage and Movement in Coal Seams*. SPE Reservoir Engineering, 2, ss.28–34, doi:10.2118/12514-pa.
- [26] [101] Kędzior S., 2015. Methane contents and coal-rank variability in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *International Journal of Coal Geology*, 139, ss.152–164. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.09.009>.
- [27] Kim A.G., 1977. Estimating methane content of bituminous coal beds from adsorption data. Series: Report of investigations 8245. United States Department of the Interior, Bureau of Mines: Washington, DC, USA.
- [28] Prasad B.N., 2009. Coalbed Methane: Genesis and Reservoir Characteristics. *Mine Tech*, Volume 30 No 4, ss.38-49.
- [29] Hunt J.M., 1979. *Petroleum geochemistry and geology*. Freeman W.H. and Co., Second Edition, New York.
- [30] Rightmire C.T., Eddy G.E., Kirr J.N., 1984. *Coalbed Methane Resources of the United States*. American Association of Petroleum Geologists. AAPG Studies in Geology Series, No. 17, <https://doi.org/10.1306/St17437>.
- [31] Mastalerz M., Drobnik A., Strąpoć D., Acosta W.S., Rupp J., 2008. Variations in pore characteristics in high volatile bituminous coals: Implications for coal bed gas content. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 76, Iss. 3, pp. 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.07.006>.
- [32] Beamish B.B., Crosdale P.J., 1995. The influence of maceral content on the sorption of gases by coal and the association with outbursting. In: Lama R.D. (Ed.), *Management and Control of High Gas Outbursts In Underground Coal Mines*. Westonprint, Kiama, NSW, Australia, ss.353–362.
- [33] [64] Gilmore, R.C., Marts, J.A., Saki, S., Bogin, G.E., Grubb, J.W. and Brune, J.F., 2014. CFD modeling of gas flows and explosion hazards in bleeder ventilated and progressively sealed longwall gobs. 10th International Mine Ventilation Congress (IMVC), Sun City, South Africa, ss.47–54.
- [34] He X.Q., Chen W.X., Nie B.S., Zhang M., 2010. Classification technique for danger classes of coal and gas outburst in deep coal mines. *Safety Science* 48 (2), ss.173–178.
- [35] Paterson L., 1986. A model for outbursts in coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Abstracts 23 (4), ss.327–332.
- [36] Paterson L., 1990. Mechanism of outbursts in coal and the prevention of outbursts by gas drainage. In: *Proceedings of the International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, 285s.
- [37] Wang L., Cheng Y., Wang L., Guo P., Li W., 2012. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines. *Safety Science* 50(3), ss.523–529, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.09.022>.
- [38] Xu T., Tang C.A., Yang T.H., Zhu W.C., Liu J., 2006. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (6), ss.905–919.
- [39] Zhang R.L., Lowndes I.S., 2010. The application of a coupled artificial neural network and fault tree analysis model to predict coal and gas outbursts. *International Journal of Coal Geology* 84 (2), ss.141–152.
- [40] Lama, R.D., Bodziony, J., 1998. Management of outburst in underground coal mines. *International Journal of Coal Geology* 35, ss.83–115.
- [41] Aguado M.B.D., Nicieza C.G., 2007. Control and prevention of gas outbursts in coal mines, Riosa–Olloniego coalfield, Spain. *International Journal of Coal Geology*, 69, ss.253-266.
- [42] Black D.J., 2019. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29, ss.815-824.
- [43] Gray I., 1980. The mechanism of, and energy release associated with outbursts. In: *Symposia Series – Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, ss. 111–125.
- [44] Harvey, C, 2002. History of outbursts in Australia and current management controls. In Aziz N. (ed.), *Coal 2002: Coal Operators' Conference*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp 36-46.
- [45] Lama R.D., Bodziony J., 1996. Outbursts of gas, coal and rock in underground coal mines. RD Lama, Wollongong.
- [46] Liu Z., Yang H., Cheng W., Xin L., Ni G., 2017. Stress distribution characteristic analysis and control of coal and gas outburst disaster in a pressure-relief boundary area in protective layer mining. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 358, <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3149-z>.

- [47] Skoczylas N., 2012. Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 55, ss.102-107, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.005>.
- [48] Tu Q.Y., Xue S., Cheng Y.P., Zhang W., Shi G.F., Zhang G.S., 2022. Experimental study on the guiding effect of tectonic coal for coal and gas outburst Fuel, 309 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.005>.
- [49] Wold M.B., Choi S.K., 1999. Outburst mechanisms: coupled fluid flow-geomechanical modeling of mine development. ACARP Project C6024, Final Report.
- [50] Wold M.B., Connell L.D., Choi S.K., 2008. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining. *International Journal of Coal Geology*, 75 (1), ss.1-14, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.01.006>.
- [51] Creedy D.P., 1986. Methods for the evaluation of seam gas content from measurements on coal samples. *Mining Science and Technology*, 3, ss.141–160, [https://doi.org/10.1016/S0167-9031\(86\)90278-1](https://doi.org/10.1016/S0167-9031(86)90278-1).
- [52] Diamond W.P., Schatzel S.J., 1998. Measuring the gas content of coal: A review. *International Journal of Coal Geology*, 35, ss.311–331, [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(97\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00040-2).
- [53] Hemza P., Sivek M., Jirásek J., 2009. Factors influencing the methane content of coal beds in the Czech part of the Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic. *International Journal of Coal Geology*, 79, ss.29–39. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.04.003>.
- [54] Karacan C.Ö., Ruiz F.A., Cotè M., Phipps S., 2011. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to green-house gas reduction. *International Journal of Coal Geology*, 86, ss.121–156.
- [55] Creedy D.P., 1993. Methane emissions from coal related sources in Britain: Development of a methodology. *Chemosphere*, Volume 26, Issues 1–4, ss.419-439.
- [56] Thakur P., 2011. Gas and Dust Control. *SME Mining Engineering Handbook*, 3th Edition, Published by SME Inc. USA, ss.1595-1609.
- [57] Esen O., Özer S.C., Soylu A., Rend A.R., Fisne A., 2018. An Investigation of the Coal Seam Gas Content and Composition in Soma Coal Basin, Turkey. Aziz N., Bob Kininmonth B. (editors), *Proceedings of the Coal Operators' Conference*, University of Wollongong - Mining Engineering, 7-9 February 2018, University of Wollongong, ss. 2843–293.
- [58] Li S.G., Lin H.F., Zhao P.X., Xiao P., Pan H. Y., 2014. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas. *Journal of China Coal Society*, vol. 39, no. 8, ss.1455–1462.
- [59] United Nations Economic Commission for Europe, 2010. Best Practice Guidance For Effective Methane Drainage And Use In Coal Mines. ECE ENERGY SERIES No.31. Methane to Markets Partnership. United Nations, New York And Geneva.
- [60] Creedy D., 2016. Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines. (Second Edition). United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), ECE Energy Series No. 47. United Nations Publication. <https://doi.org/10.18356/d114d3d8-en>.
- [61] Saghafi A., 2017. Discussion on determination of gas content of coal and uncertainties of measurement. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27, ss.741–748, <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.024>.
- [62] Seidle J., 2011. *Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering*; PennWell Corporation: Tulsa, OK, USA.
- [63] Bertard C., Bruyet B., Gunther J., 1970. Determination of desorbable gas concentration of coal (direct method). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 7, 43–65, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90027-6).
- [64] Diamond W.P., Schatzel S.J., Garcia F., Ulery J.P., 2001. The Modified Direct Method: A solution for obtaining accurate coal desorption measurements. In *Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium*, Tuscaloosa, AL, USA, 14–18 May; University of Alabama: Tuscaloosa, AL, USA. Paper 0128, ss.331–342.
- [65] Smith D.M.; Williams F.L., 1981. New technique for determining the methane content of coal. In *Proceedings of the 16th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Atlanta, GA, USA, 9–14 August; ss.1272–1277.
- [66] Kissell F.N., McCulloch C.M., Elder C.H., 1973. The Direct Method of Determining Methane Content of Coalbeds for Ventilation Design. Series: Report of Investigations 7767; United States Department of the Interior, Bureau of Mines: Washington, DC, USA.
- [67] Dixon D. W., Longson I., 1996. A statistical method for methane prediction and improved environmental control, *Mine Ventilation Symposium*, Salt Lake City, no 6.

- [68] Schatzel S.J., Hyman D.M., Sainato A., LaScola J.C., 1987. Methane Contents of Oil Shale from the Piceance Basin, CO. United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Report of Investigations; Paper 9063; United States Department of the Interior: Washington, DC, USA.
- [69] Ulery J.P.; Hyman D.M., 1991. The modified direct method of gas content determination—Applications and results. In Proceedings of the Coalbed Methane Symposium Proceedings, Tuscaloosa, AL, USA, 13–17 May. University of Alabama: Tuscaloosa, AL, USA, Paper 9163. ss.489–500.
- [70] Mavor M.J., Pratt T.J., 1996. Improved methodology for determining total gas Content. Volume II. In Comparative Evaluation of the Accuracy of Gas-in-Place Estimates and Review of Lost Gas Models, Topical Report GRI-94/0429, Gas Research Institute: Chicago, IL, USA.
- [71] Mavor M.J., Pratt T.J., Britton R.N., 1994. Improved Methodology for Determining Total Gas Content. Volume I. In Canister Gas Desorption Data Summary, Topical Report GRI-93/0410, Gas Research Institute: Chicago, IL, USA.
- [72] McCulloch C.M., Levine J.R.; Kissell F.N.; Deul M., 1975. Measuring the Methane Content of Bituminous Coalbeds; Report of Investigation 8515; United States Department of the Interior, Bureau of Mines: Washington, DC, USA.
- [73] Australian Standard AS 3980-1991, 1991. Guide to the Determination of Desorbable Gas Content of Coal Seams—Direct Method; Standards Association of Australia: Sydney, Australia.
- [74] Australian Standard AS 3980-1999, 1999. Guide to the Determination of Gas Content of Coal—Direct Desorption Method, 2nd ed.; Standards Association of Australia: Sydney, Australia.
- [75] Saghafi A., Williams D.J., Roberts D.B., 1995. Determination of Coal Gas Content by Quick Crushing Method. CSIRO Investigation Report CETriR391R, CSIRO Research Publications Repository: Canberra, Australia, 9p.
- [76] Wei D., Zhang J-C., Tang X., Wei X-L., Li Z-M., Wang C-H., Chen Q., Liu C., 2018. Investigation of gas content of organic-rich shale: A case study from Lower Permian shale in southern North China Basin, central China. *Geoscience Frontiers*, vol. 9, Iss. 2, ss.559-575. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.05.009>.
- [77] Zhang J., 2011. Study on the Gas Content of Coal Seam Based on the BP Neural Network. *Procedia Engineering*, 26, ss.1554–1562.
- [78] Li N., Peng S., Du W., Guo, Y., 2018. New method for predicting coal seam gas content. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(10), ss.1272–1284.
- [79] [229] Wang L., Cheng L.-B., Cheng Y.-P., Liu, S., Guo P.-K., Jin K., Jiang H.-N., 2015. A new method for accurate and rapid measurement of underground coal seam gas content. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, ss.1388–1398, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.020>.
- [80] Liu Y., Du Y., Li Z., Zhao F., Zuo W., Wei J., Mitri H., 2020. A rapid and accurate direct measurement method of underground coal seam gas content based on dynamic diffusion theory. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30, ss.799–810, doi:10.1016/j.ijmst.2020.07.004.
- [81] Szlązak N., Korzec M., 2016. Method for Determining the Coalbed Methane Content with Determination the Uncertainty of Measurements. *Archives of Mining Sciences*, 61, ss.443–456, doi:10.1515/amsc-2016-0032.
- [82] Szlązak N., Korzec M., Piergies K., 2022. The determination of the methane content of coal seams based on drill cutting and core samples from coal mine roadway. *Energies*, 15(1), art. no. 178, ss.1–14.
- [83] Xu H., Pan Z., Hu B., Liu H., Sun G., 2020. A new approach to estimating coal gas content for deep core sample. *Fuel*, 277, 118246, doi:10.1016/j.fuel.2020.118246.
- [84] Polish Committee for Standardization PN-G-44200:2013-10; Górnictwo—Oznaczenie Metanonośności w Pokładach Węgla Kamiennego—Metoda Zwiercinowa. The Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2013.
- [85] Szlązak N., Obracaj D., Korzec M., 2021. Estimation of gas loss in methodology for determining methane content of coal seams. *Energies*, 14(4), 982, ss.1-15.
- [86] Karbownik M., 2022. Analysis of the application of methane-bearing capacity test methods in the conditions of Polish mining. *Journal of Sustainable Mining*, 21(4), Article 2, <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1365>.
- [87] Wang H., Yue G., Yue J., Li M., Zheng X., 2019. Permeability of coal associated with cleat and bedding structure: measurement and modeling, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, DOI: 10.1080/15567036.2019.1675813.
- [88] Harpalani S., Chen G., 1997. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal. *Geotechnical and Geological Engineering*, 15, ss.303-325.

- [89] Bartosiewicz H., Hargraves A.J., 1985. Gas properties of Australian coal. Bull. Proc. AusIMM, Vol. 299, No. 1, ss.71-77.
- [90] Lama, R.D., and Nguyen, V.U., 1987, A model for determination of methane flow parameters in coal from desorption tests', Proc. of the Twentieth Int. Symp. on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industry, Johannesburg South Africa, ss. 275-282.
- [91] Siahaan, Boni B.S.N., Study of methane gas migration in coal sorption tests, Doctor of Philosophy thesis, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, 1990. <http://ro.uow.edu.au/theses/866>.
- [92] Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., 2015. Methane drainage in Coal Mines (Odmetanowanie górotworu w kopalniach węgla kamiennego). Ed. By Nikodem SZLĄZAK. AGH University of Science and Technology Press, Krakow, s. 295, ISBN: 978-83-7464-725.
- [93] EUR 17392 EN, 1997. European Commission report Technical coal research. Mining operations. Optimization of mine ventilation and methane recovery. British Coal Corporation, Stoke Orchard, Cheltenham, Gloucestershire GL52 4RZ. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- [94] Connell L.D., 2016. A new interpretation of the response of coal permeability to changes in pore pressure, stress, and matrix shrinkage. Int. J. Coal Geol. 162, ss.169–182.
- [95] Barker Read, G.R., Radchenko, S.A., 1989. Methane emission from coal and associated strata samples. International Journal of Mining and Geological Engineering 7, ss.101-126.
- [96] Diamond W.P., 1994. Methane control for underground coal mines. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 9395.
- [97] Durucan S., 1981. An investigation into the stress- permeability relationships of coals and flow patterns around working longwall faces, PhD Thesis, University of Nottingham, s.301.
- [98] Gray, I., 1987. Reservoir Engineering in Coal Seams: Part 2-Observations of Gas Movement in Coal Seams. SPE Reservoir Engineering 2, ss.36-40.
- [99] Karacan C.Ö., Goodman G., 2011. Probabilistic modeling using bivariate normal distributions for identification of flow and displacement intervals in longwall overburden. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48, ss.27–41.
- [100] Palchik V., 2005. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: field measurements and prediction. Environ Geol (2005) 48: 68–80 DOI 10.1007/s00254-005-1261-y.
- [101] [156] Peng S.S., 2006. Longwall Mining, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Englewood, CO, USA, 2nd edition.
- [102] Qian Liu Q. Lin B., Zhou Y., Li Y., Porosity model of the goaf based on overlying strata movement and deformation. Environmental Earth Sciences (2022) 81:214. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10329-5>.
- [103] Ren, T., Edwards J., 2000. Three-dimensional computational fluid dynamics modelling of methane flow through permeable strata around a longwall face. Mining Technology 109, ss.41-48.
- [104] Si G., Jamnikar S., Lazar J., Shi J.-Q., Durucan S., Korre A., Zavšek S., 2015. Monitoring and modelling of gas dynamics in multi-level longwall top coal caving of ultra-thick coal seams, part I: Borehole measurements and a conceptual model for gas emission zones, International Journal of Coal Geology, Volumes 144–145, ss.98-110, ISSN 0166-5162. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.04.008>.
- [105] Whittaker B.N., 1974. An appraisal of strata control practice. Trans. Inst. Mining and Metallurgy 134, ss.9-24.
- [106] Yang W., Lin B., Yan Q, Zhai C. 2014. Stress redistribution of longwall mining stope and gas control of multi-layer coal seams. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 72, 2014, ss.8-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.08.009>.
- [107] Zhang B., Liang Y., Sun H., Wang K., Zou Q., Dai J., 2022. Evolution of mining induced fractured zone height above a mined panel in longwall coal mining. Arabian Journal of Geosciences (2022) 15: 476. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09768-y>.
- [108] Zhang C., Song Z., Bai Q., Zhang L., Chen J., 2022. Intensive field measurements for characterizing the permeability and methane release with the treatment process of pressure-relief mining. Scientific Reports (2022) 12:14847. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19283-5>.
- [109] McPherson M. J., 1975. The Occurrence of Methane in Mine Workings, Journ. of Mine Ventilation Society of South Africa, Vol. 28, No. 8, 1975, pp 118-128.
- [110] Galvin J. M., 2016. Ground Engineering-Principles and Practices for Underground Coal Mining, Springer, Cham, Switzerland.

- [111] Curl S.J., 1978. Methane prediction in coal mines. IEA Coal Research, Report Number ICTIS/TR 04 Dec., 79s.
- [112] Noack K., 1971. Investigations into the gas-emission zone around face areas. Control of gas emission in underground workings, improvement of the underground climate. In: European Community for Coal and Steel _Ed., Information Conference in Luxemburg, February 24–25, ss.154–167.
- [113] Black D.J., Aziz N.I., 2009. Developments in coal mine methane drainage and utilisation in Australia. Proceedings of the Ninth International Mine Ventilation Congress, Department of Mining Engineering, Indian School of Mines University, Dhanbad, India, 10-13 November, ss.445-460.
- [114] Forster I., Enever J., 1992. Hydrogeological response of overburden strata to underground mining. Office of Energy Report, Vol. 1, p 104.
- [115] Palchik V., 2003. Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining. *Environ Geol* 44(1), ss.28–38.
- [116] Karacan C.Ö., Esterhuizen G.S., Schatzel S.J., Diamond, W.P., 2007. Reservoir simulation-based modeling for characterizing longwall methane emissions and gob gas venthole production. *International Journal of Coal Geology*, 71(2–3), ss.225–245.
- [117] Karacan C.Ö., Olea R.A., 2014. Inference of strata separation and gas emission paths in longwall overburden using continuous wavelet transform of well logs and geostatistical simulation. *Journal of Applied Geophysics*. 105, ss.147-158.
- [118] Peng S.S., Chiang H.S., 1984. Longwall mining. New York: Wiley.
- [119] Singh M.M., Kendorski, F.S., 1981. Strata disturbance prediction for mining beneath surface water and waste impoundments. 1st Conf. Ground Control in Mining, Morgantown, USA, USA WV, July 1981, ss.76–89.
- [120] Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J., 2014. Methane drainage from roof strata using an overlying drainage gallery. *International Journal of Coal Geology*; ISSN 0166-5162, vol. 136, ss.99–115.
- [121] Thakur P.C., 2006. Coal seam degasification. In: Kissell FN, ed. Handbook for methane control in mining. Pittsburgh, PA: U.S. Department of Health and Human Services, Public.
- [122] Kempka T., Waschbüsch M., Azzam R., Fernández-Steeger T.M., 2008. Reducing ground subsidence involving geological CO₂ storage during longwall mining operations. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 41, iss. 3, ss. 439–448. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-222>
- [123] Schatzel S.J., Karacan O.C., Krog R.B., Esterhuizen G.S., Goodman G.V.R., 2008. Guidelines for the Prediction and Control of Methane Emissions on Longwalls. Department of Health and Human Services, NIOSH IC 9502, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburg, PA, G.V.R., ss.1-83.
- [124] Zhang Q., Wang E., Li Z., Wang H., Xue Z., 2022. Control of directional long borehole on gas drainage and optimal design: Case study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 107, November, 104766. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104766>.
- [125] Wei P., Li X., Hu Q. et al., 2020. A Trapezoidal Three-Dimensional Model for Gas Extraction Based on Shapes of Caved Overlying Strata and Numerical Calculation. *Nat Resour Res* 29, ss.4031–4051. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09677-5>.
- [126] Qingsheng B., Shihao T., 2019. A General Review on Longwall Mining-Induced Fractures in Near-Face Regions. *Geofluids*, vol. 2019, Article ID 3089292, 22 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/3089292>.
- [127] Indraratna B., Nemcik J. A., and Gale W. J., 2000. Review and interpretation of primary floor failure mechanism at a longwall coal mining face based on numerical analysis. *Géotechnique*, vol. 50, no. 5, ss.547–557.
- [128] An F., Wang Z., Yang H., Yang S., Pan F., Chen T., Xie C., 2016. Application of directional boreholes for gas drainage of adjacent seams. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 90, ss.35–42.
- [129] Guo H., Yuan L., Shen B.T., Qu Q.D., Xue J.H., 2012. Mining-induced strata stress changes, fractures and gas flow dynamics in multi-seam longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, ss.129–139.
- [130] Creedy D.P., 2001. Effective design and management of firedamp drainage. Contract Research Report 326/2001, prepared by Wardell Armstrong for the Health and Safety Executive.
- [131] Creedy D.P., Saghafi, A., Lama, R.D., 1997. Gas Control in Underground Coal Mines: IEA Coal Research. International Energy Agency (IEA) CR/91, ss. 120. London: The Clean Coal Centre.
- [132] Das S.K., 2000. Observations and classification of roof strata behaviour over longwall coal mining panels in India. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences, vol. 37, no. 4, ss.585–597.
- [133] Feng G., Zhang A., Hu S., Guo X., Li C., Hao G., Li Z., 2019. A Method to Accurately Determine the Methane Enrichment Zone of a Longwall Coal Mine. Volume 2019, Article ID 2438075, ss.1-10. <https://doi.org/10.1155/2019/2438075>.
- [134] Gao F.Q., Stead D., Coggan J., 2014. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach. *Computers and Geotechnics*, vol. 55, ss.448–460.
- [135] Mark C., 2007. Multiple-seam mining in the United States: background. In *Proceedings of the New Technology for Ground Control in Multiple-Seam Mining*, U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh Research Laboratory, ss. 3–14, Pittsburgh, A, USA.
- [136] Qian M.G., Shi P.W., 2003. *Control of Mine Ground Pressure and Strata*. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou, China.
- [137] Qin Z.Y., Yuan L., Guo H., Qu Q.D., 2015. Investigation of longwall goaf gas flows and borehole drainage performance by CFD simulation. *International Journal of Coal Geology*, vol. 150-151, ss.51–63.
- [138] Qu Q.D., Xu J.L., Wu R.L., Qin W., Hu G.Z., 2015. Three zone characterisation of coupled strata and gas behaviour in multi-seam mining,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 78, ss.91–98.
- [139] Singh R.P., Yadav R.N., 1995. Prediction of subsidence due to coal mining in Raniganj coalfield, West Bengal, India. *Engineering Geology*, vol. 39, no. 1-2, ss.103–111.
- [140] Wang Z. W., Ren T., Cheng Y.P., 2017. Numerical investigations of methane flow characteristics on a longwall face part I: methane emission and base model results. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 43, ss.242–253.
- [141] Yuan L., Guo H., Shen B.T., Qu Q.D., Xue J.H., 2011. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability. *Journal of China Coal Society*, vol. 36, no. 3, ss.357–365.
- [142] Karacan C.Ö. , Ricardo A.O., 2014. Inference of strata separation and gas emission paths in longwall overburden using continuous wavelet transform of well logs and geostatistical simulation. *Journal of Applied Geophysics*, 105, ss.147–158.
- [143] Adhikary D.P , Guo H., 2015. Modelling of longwall mining-induced strata permeability change. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 48, ss.345–359.
- [144] Creedy D.P, 1996. *Methane Prediction in Collieries*. Report SIMRAC, South Africa.
- [145] Krause E., Łukowicz K., 2000. Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian [The dynamic forecasting of the absolute methane-bearing capacity in longwalls
- [146] Noack K., Opahle M., 1992. Progress achieved in the prediction of gas emission. *International Mine Ventilation Congress*, Johannesburg, South Africa, issue 5, ss.79– 87.
- [147] Kesley A., Lea C. J., Lowdnes I.S., Whittles D., Ren T.X., 2003. CFD modelling of methane movement in mines. 30th International Conference on Safety in Mines Research Institutes, South Africa, issue 30.
- [148] Ren T.X. Edwards J.S. 1998: Application of CFD techniques to methane prediction and control in coal mines. 27th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, ss. 733–743, 1998
- [149] CEC, 1989. Short-term forecasting of methane emission levels using continuously monitored data. Final Report on ECSC Contract 7220 - AC/832, 1989 EUR 12326EN.
- [150] Tazuede C., Pokryszka Z.: Dynamic prediction of methane emission at longwalls, *The International Conference of Safety in Mines Research Institutes*, Pretoria, South Africa, no. 25, 1993.
- [151] CEC, 1992. Prediction of gas emission on short faces and drivages. Final Report on ECSC Contract 7220-AC/834, 1992 Report EUR 14189EN.
- [152] Dziurzyński W., Krach A. Krawczyk J., Pałka T., 2007. Zastosowanie miary odległości szeregow czasowych do walidacji modelu matematycznego przewietrzania kopalni stosowanego w programie VentMet [An application of distance in time series to validate a mathematical model of mine ventilation using the VentMet programme
- [153] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S., 2007. Walidacja komputerowego programu symulacji wentylacji VentMet dla rejonu ściany, z uwzględnieniem zmiennych w czasie źródeł metanu, związanych z cykliczną pracą kombajnu [Validating the computer programme VentMet created for the simulation of ventilation in a longwall area, considering changing sources of methane resulting from the cyclic functioning of a coal-cutter.

- [154] Obracaj D., Korzec M., Deszcz P., 2021. Study on methane distribution in the face zone of the fully mechanized roadway with overlap auxiliary ventilation system. *Energies*, vol. 14, iss. 19, art. no. 6379, ss.1-23.
- [155] Kozłowski B., 1972 *Prognozowanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego*. Katowice, Wyd. Śląsk.
- [156] Schatzel S.J., Krog R.B., Garcia F., Marshall J.K., 2006. Prediction of longwall methane emissions and associated consequences of increasing longwall face lengths: a case study in the Pittsburgh Coalbe, in: *Proceedings of 11th U.S./ North American Mine Ventilation Symposium*, ss. 375-382.
- [157] Kirchgessner A.D., Piccot S.D., Winkler J.D., 1993. Estimate of global methane emissions from coal mines. *Chemosphere* 26, ss.453–472.
- [158] Liu P., Wei H.Z., Jing J.B., Yang Y.Y., 2019. Predicting technology of gas emission quantity in coal mine based on enhanced CART regression algorithm. *Coal Sci Technol*, 47(11), ss.116–122.
- [159] Lv F., Liang B., Sun W.J., Wang Y., 2012. Gas emission quantity prediction of working face based on principal component regression analysis method. *J China Coal Soc* 37(01), ss.113–116.
- [160] Wang Y., Yao D., Lu H., 2018. Mine Gas Emission Prediction Based on Grey Markov Prediction Model. *Open Journal of Geology*, 8, ss.939-946. doi: 10.4236/ojg.2018.810056.
- [161] Yu Y., Lu J.G., 2006. The Gas Emission Forecast Based on the Grey Theory and Artificial Neural Network. *Artificial Intelligence*, 22, ss.269-272.
- [162] Bi S., Shao L., Qi Z., Wang Y., Lai W., 2022. Prediction of coal mine gas emission based on hybrid machine learning model. *Earth Science Informatics*. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00894-5>
- [163] Zhou J., Lin H., Jin H. et al., 2022. Cooperative prediction method of gas emission from mining face based on feature selection and machine learning. *Int J Coal Sci Technol* 9, 51. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00519-8>
- [164] Duan Z.M., Cheng J.T., 2013. Gas Emission Prediction of Coal Mine Based on Evidence Theory Combining with Neural Network. *AMR*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.756-759.3799>.
- [165] He H., Hu, M., 2009. Chaos forecasting of gas emission based on improved CC method. *Mining Research and Development*, 29(4), ss.69–71.
- [166] Huang W., Tong M., Ren, Z., 2009. Nonlinear combination forecast of gas emission amount based on SVM. *Journal of China University of Mining & Technology*, 38(2), ss.235–238.
- [167] Wu L., Liu S., Chen D. et al., 2014. Using gray model with fractional order accumulation to predict gas emission. *Nat Hazards* 71, ss.2231–2236. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0960-z>.
- [168] Liu Y.W., Xue W.T., Li, Z.Q., 2015. Problems and Correction of Gas Emission Prediction Model in Mine Statistical Method. *Safety in Coal Mines*, 46, ss.176-178.
- [169] Xu C.-K., Wang, Y.-C., Wang, J.-W., 2004. Research on forecast technology of mine gas emission based on fuzzy data mining. *Journal of China University of Mining & Technology (English Edition)*, 14(2), ss.174–178.
- [170] Karacan C.Ö., Goodman G., 2012. A CART technique to adjust production from longwall coal operations under ventilation constraints. *Safety Science*, Volume 50, Issue 3, March, ss.510-522.
- [171] Karacan C.Ö., 2008. Modeling and prediction of ventilation methane emissions of U.S. longwall mines using supervised artificial neural networks. *International Journal of Coal Geology*,73(4), ss.371–387.
- [172] Tomita S., Deguchi G., Matsuyama S., Li H., Kawahara H., 2003. Development of a simulation program to predict gas emission based on 3D stress analysis. In: *30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes*. South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 69–76.
- [173] Chen Y., Zheng L., Huang J., Zou Z., Li C, 2020. Prediction of gas emission based on grey-generalized regression neural network. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020, 467.
- [174] Wang X.L., Liu J., Lu J.J., 2011. Gas emission quantity forecasting based on virtual state variables and Kalman filter. *J China Coal Soc* 36(1): ss.80–85.
- [175] Yuan D.C., Yue X.G., Wang C., Zhang J.F., 2013. Gas emission prediction based on coal mine operating data. In: *The 3rd international conference on green power, materials and manufacturing technology and applications (GPMMTA 2013)*.
- [176] Rahimi S., Atae-e-pour M., Madani H., et al. Model of Prediction of Gas Emission based on Gas Content Uncertainty in Coal Mine using Geostatistical Simulation and Monte Carlo Method, 11 June 2021, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-607234/v1>.

- [177] Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J., 2020: Enhancing safety in the Polish high-methane coal mines: an overview. *Mining, Metallurgy & Exploration*; vol. 37 iss. 2, ss. 567–579.
- [178] Bartknecht W. 1987. *Staubexplosionen – Ablauf und Schutzmassnahmen*. Spronger Verlag, Berlin.
- [179] Michelis J., 1998. *Explosionenschutz im Bergbau unter Tage*. Verlag Glueckauf GmbH, Essen.
- [180] Michelis J., 1991. Preventive and constructive explosion protection against coal dust and methane explosions in coal mining. EuroPex, Edition 16.
- [181] Cheng J., 2018. *Explosions in underground coal mines. Risk Assessment and Control*. Springer, Cham.
- [182] Du Plessis J.J.L., Philips H.R., Lebecki K., Belle B.K., 2014. Explosible dusts and mine explosion prevention. In *Ventilation and Occupational Environment Engineering in Mines*, 3rd ed.; du Plessis, J.J.L., Ed.; Mine Ventilation Society of South Africa: Johannesburg, South Africa, 2014; Chapter 28, s. 577. ISBN 978-0-620-61172-5.
- [183] Kissell F.N., 2006. *Handbook for methane control in mining*. National Institute for Occupational Safety and Health, IC9468, 180p.
- [184] Thakur P.C., 2019. *Gas and Dust Explosions*. Editor(s): Pramod Thakur, In *Advanced Mine Ventilation*, Woodhead Publishing, 2019, ss.377-398, ISBN 978-0-08-100457-9. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04167-6>.
- [185] Jürgen F. Brune, Saqib A. Saki, Prevention of gob ignitions and explosions in longwall mining using dynamic seals. *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 27, Issue 6, 2017, ss.999-1003. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.026>.
- [186] Timko R.J., Derick, R.L., 2006. Methods to determine the status of mine atmospheres - An overview. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, Vol. 59 No. 2.
- [187] MİİSGY, Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. *Resmî Gazete* 28770 (19 Eylül 2013). Erişim 26 Ekim 2023. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18858&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [188] Hartman H.L., Mutmansky J.M., Ramani R.V., Wang Y. J., 1997. *Mine Ventilation and Air Conditioning*. 3d edn. John Wiley & Sons, Inc, New York. USA.
- [189] Creedy D.P., Phillips H.R., 1997. *Methane Layering in Bordland Pillar Workings*. Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report. Project COL 409. Johannesburg, South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee.
- [190] Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., 2008. Directions of changes in ventilation system of longwalls with attention on reduction ventilating hazards. *Mineral Resources Management. IGSMiE PAN*. ISSN 0860-0953. 2008, vol. 24, iss.1/2, ss.201-214.
- [191] Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., Piergies K., 2017. Current ventilation problems in hard coal mines. Nikodem Szlązak (ed), AGH University of Science and Technology Press (Wydawnictwa AGH). Krakow, Poland.
- [192] Lolon S.A., Brune J.F., Bogin G.E., Juganda A., 2020. Study of Methane Outgassing and Mitigation in Longwall Coal Mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37, 1437–1449 (2020).. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00287-6>.
- [193] Wasilewski S., 2014. Influence of barometric pressure changes on ventilation conditions in deep mines. *Arch Min Sci* 59(3), ss.621–639.
- [194] Szlązak N., Berger J., Borowski M., OBRACAJ D., Swolkień J., Korzec M., 2012: *Metody odmetanowania pokładów węgla*. Wydawnictwa AGH, Kraków, p. 242. ISBN: 978-83-7464-675-8
- [195] Szlązak N., Swolkień J., Obracaj D., 2013. Gas monitoring as a prevention system of mine workings in Polish coal mines. In: *Thirtieth annual international Pittsburgh coal conference: coal – energy, environment and sustainable development*, September 15–18, 2013, Beijing. ISBN 1-890977-30-6.
- [196] Szlązak J., Szlązak N., 2001. *Air Filtration in Abandoned Workings of Longwalls with Cavings*. Górnictwo, kwartalnik AGH, Kraków 2001 vol. 4.
- [197] Szlązak J., Szlązak N., 2004. Evaluation of Ventilation Systems in Longwalls in Coal Mines During Methane and Fire Hazards. *Proceedings of the 3rd School of Mining Aerology, Zakopane*.
- [198] United States Environmental Protection Agency, 2009. *Identifying Opportunities for Methane Recovery at U.S. Coal Mines, Profiles of Selected Gassy Underground Coal Mines 2002–2006*. EPA 430-K-04-003, January.
- [199] Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J., 1995. *Przewietrzanie Kopaln*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1995, ISBN 83-856223-24-8.
- [200] Wood D.J., Charles C.O.A., 1993. Optimization of mine ventilation and methane recovery. *European Commission technical coal research Mining operations*, EUR 17392 EN.
- [201] Hungerford F., Ren T., 2013. *Wollongong Cross-Measure Directional Drilling*, Coal Operators'

- Conference. Cross-Measure Directional Drilling.
- [202] Guo H., Clint T., Qu Q.D., Qin Z.Y., 2015. Longwall horizontal gas drainage through gob pressure control. *Int J Coal Geol*, 150–151 (2015), ss. 276–286.
- [203] Karacan C.Ö., Diamond W.P., Schatzel S.J., 2007. Numerical analysis of the influence of in-seam horizontal methane drainage boreholes on longwall face emission rates. *International Journal of Coal Geology*, Volume 72, Issue 1, ss.15–32.
- [204] Lin J., Ren T., Wang G., Booth P., Cheng Y., Black D., Hungerford F., Nemicik J., 2020. Field trials of nitrogen injection enhanced gas drainage in hard-to-drain coal seam by using underground in-seam (UIS) boreholes. *Fuel* 328 (2022) 125293.
- [205] Connell L.D., Sander R., Camilleri M., Heryanto D., Pan Z., Lupton N., 2017. Nitrogen enhanced drainage of CO₂ rich coal seams for mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(5):755–61.
- [206] Liu J., Le Q., 2013. Experimental Study on Deep Borehole Pre-Cracking Blasting of Drilling through Strata at Low Permeability Seam. *Advanced Materials Research*, 868, ss. 339–342.
- [207] Liu P., Liu A., Liu S.M., Qi L.L., 2022. Experimental evaluation of ultrasound treatment induced pore structure and gas desorption behavior alterations of coal. *Fuel*, 307, 121855.
- [208] Liu P., Liu A., Zhong F., Jiang Y., Li J., 2021. Pore/fracture structure and gas permeability alterations induced by ultrasound treatment in coal and its application to enhanced coalbed methane recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108862.
- [209] Ren T., Wang Z., Liang Y., Zhang J., 2018. Numerical investigation of CO₂ fringe behaviour on a longwall face and its control. *International Journal of Coal Geology*, 186, ss.80–96.
- [210] Shi Q., Qin Y., Li H., Qiu A., Zhang Y., Zhou X., Zheng S., 2016. Response of pores in coal to repeated strong impulse waves. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, ss.298–304.
- [211] Zhou F.D., Hussain F., Cinar Y., 2013. Injecting pure N₂ and CO₂ to coal for enhanced coalbed methane: Experimental observations and numerical simulation. *International Journal of Coal Geology*, 116–117, ss.53–62.
- [212] Sun J., Schechter D., 2015. Investigating the effect of improved fracture conductivity on production performance of hydraulically fractured wells: Field-case studies and numerical simulations. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 54(06), ss.442–449.
- [213] Lu Y.Y., Li R., Xian X. F., Ge Z. L., Xia, B. W., 2021. Discussion on efficient development of deep coalbed methane by surface directional well + hydraulic slotting. *J. China Coal. Soc.* 46, 876–884. doi:10.13225/j.cnki.jccs.yt21.0089oi:10.13225/j.cnki.jccs.yt21.0089.
- [214] Li D., Chen Y., Zhang J., Wang M., 2023. Research and application of pressure relief and permeability improvement in high gas outburst mines by directional drilling and hydraulic jet. *Frontiers in Earth Science*, 10. DOI=10.3389/feart.2022.1029429.
- [215] Cao Z.Y., Wang E.Y., He X.Q., Wang H., Liu Q.L., Zhang G.H., et al., 2021. Effectiveness of pressure relief and gas drainage of hydraulic punching in short-distance coal seam group with the risk of outburst. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 38, ss.634–642. doi:10.13545/j.cnki.jmse.2020.0206.
- [216] Chen D.D., He W. R., Xie S. R., He F.L., Zhang Q., Qin B.B., 2020. Increased permeability and coal and gas outburst prevention using hydraulic flushing technology with cross-seam borehole. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 73, 103067. doi:10.1016/j.jngse.2019.103067.
- [217] Feng D., Xu J., Tao Y.Q., Peng S.J., Wu X.F., Zhang X.M., 2017. Development of hydraulic punching test system and its application. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 7, ss.782–788. doi:10.13545/j.cnki.jmse.2017.04.025.
- [218] Li D.Q., 2019. Hydraulic drill hole reaming technology with large flow and draining of coal mine gas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29, ss.925–932. doi:10.1016/j.ijmst.2018.06.003.
- [219] Diamond W.P., Jeran P.W., Trevitz M.A., 1994. Evaluation of alternative placement of longwall gob gas ventholes for optimum performance. Bureau of Mines, Information Circular No: 9500.
- [220] Flügge G., 1971. Die Anwendung der Trogtheorie auf den Raum der Zusatzausgasung. *Glückauf Forschungshäfte*, 32, ss.337–341.
- [221] [114] Leśniak G., Brunner D.J., Topór T., Stota-Valim M., Cicha-Szot R., Jura, B., ... & Plonka, G., 2022. Application of long-reach directional drilling boreholes for gas drainage of adjacent seams in coal mines with severe geological conditions. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 88.
- [222] Mutmansky J., 1999. Guidebook on Coalbed Methane Drainage for Underground Coal Mines. Technical Report. United States Environmental Protection Agency (USEPA).

- [223] Wang Y., Si G., Xiang Z., Oh J., Belle B., Webb D. 2022. A theoretical goaf resistance model based on gas production analysis in goaf gas drainage. *International Journal of Coal Geology*. Volume 264, 104140. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104140>.
- [224] Xiang, Z., Si, G., Wang, Y., Belle, B. and Webb, D. 2021, Goaf gas drainage and its impact on coal oxidation behaviour: A conceptual model, *International Journal of Coal Geology*, 248, s.103878.
- [225] Karacan, C.Ö., 2009. Reconciling longwall gob gas reservoirs and venthole production performances using multiple rate drawdown well test analysis, *International Journal of Coal Geology*, 80(3-4), ss.181–195.
- [226] Karacan, C.Ö., 2015. Analysis of gob gas venthole production performances for strata gas control in longwall mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, ss.9–18.
- [227] Palmer I., 2010. Coalbed methane completions: a world view. *International Journal of Coal Geology*, 82, ss.184–195.
- [228] Si G., Belle B., 2019. Performance analysis of vertical goaf gas drainage holes using gas indicators in Australian coal mines. *International Journal of Coal Geology*, 216, s.103301.
- [229] Esterhuizen G.S., Karacan C.Ö., 2005. Development of Numerical Models to Investigate Permeability Changes and Gas Emission around Longwall Mining Pano. In: *Alaska Rocks, The 40th US Symposium on Rock*.
- [230] Esterhuizen G.S., Karacan C.Ö., 2007. A Methodology for Determining Gob Permeability Distributions and its Application to Reservoir Modeling of Coal Mine Longwalls. SME, Annual Meeting. Denver, CO.
- [231] Karacan C.Ö., Olea, R.A., Goodman, G., 2012. Geostatistical modeling of the gasemission zone and its in-place gas content for Pittsburgh-seam mines using sequential Gaussian simulation. *Int. J. Coal Geol.* 90-91, 50–71.
- [232] Shirin L.N., Dudlya N.A., Fedorenko E.A., 2011. Methane Drainage Borehole Drilling Technology Status of Ukraine. *Procedia Earth and Planetary Science* 3, ss.47-52.
- [233] United States Environmental Protection Agency: Enhanced Gob Gas Recovery. Technical Report. June 2000 –2006. EPA 430-K-04-003.
- [234] Diamond W.P., 1993. Methane Control for Underground Coal Mines. In *Hydrocarbons from Coal*, editors: Law B.E. and Rice D.D., publisher: AAPG, ss.237-267.
- [235] Hungerford F., Kelly M., Saghafi A., Williams R J., 1988. Long-Hole Drilling for Gas Emission Control at Appin Colliery NSW, Australia. Paper in Proceedings of the Fourth International Mine Ventilation Congress, ed. by A.D.S. Gillies (Brisbane, Queensland, Australia, July 3-6, 1988). Aust. Inst. Min. and Metall., Melbourne, Victoria, Australia, ss.207-216.
- [236] Shi J.-Q., Rubio R.M., Durucan S., 2016. An improved void-resistance model for abandoned coal mine gas reservoirs. *International Journal of Coal Geology* 165, ss.257–264. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.09.001>.
- [237] United Nations Economic Commission for Europe, 2019. Best Practice Guidance For Effective Methane Recovery And Use from Abandoned Coal Mines. ECE Energy Series no.64. Methane to Markets Partnership. United Nations, New York And Geneva.
- [238] Tauziède C., Pokryszka Z., Barriere J.P., 2002. Risk assessment of gas emission at the surface of French abandoned coal mines and prevention techniques. *Trans. Inst. Min. Metall. Sect A. Min. Technol.* Vol. 111 (September–December 2002).
- [239] Lagny C., 2014. The emissions of gases from abandoned mines: role of atmospheric pressure changes and air temperature on the surface. *Environ. Earth Sci.*, 2014 71 (2), 923–929.
- [240] Palchik V., 2014. Time-dependent methane emission from vertical prospecting boreholes drilled to abandoned mine workings at a shallow depth. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 72, ss.1–7.
- [241] Adams R., Younger P.L., 2001. A strategy for modelling ground water rebound in abandoned deep mine systems. *Ground Water* 39 (2), ss.249–261.
- [242] Chen D., Chen A., Hu X., Li B., Li X., Guo L., Feng R., Yang Y., Fang X., 2022. Substantial methane emissions from abandoned coal mines in China, *Environmental Research*, Volume 214, Part 2, 113944, ISSN 0013-9351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113944>.
- [243] EPA, 2019. Legal and Regulatory Status of Abandoned Mine Methane in Selected Countries: Considerations for Decision Makers. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EPA Publication No: 430R19003. March.
- [244] Hu S., Zhang A., Feng G., Guo X., Miu X., Li C., Han D., Wang J., Kang L., 2018. Methane Extraction from Abandoned Mines by Surface Vertical Wells: A Case Study in China. *Geofluids*, vol. 2018, Article ID 8043157, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/8043157>.

- [245] Karacan C.Ö., Warwick P.D., 2019. Assessment of coal mine methane (CMM) and abandoned mine methane (AMM) resource potential of longwall mine panels: Example from Northern Appalachian Basin, USA, *International Journal of Coal Geology*, Volume 208, ss.37-53, ISSN 0166-5162. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.04.005>.
- [246] Liu Y., Gao H., Yu Z., Li C., Ren H., Zhao Y., Huang F., Guo Y., Wan M., Tian J., Chen L., 2022. Managing Methane Emissions in Abandoned Coal Mines: Comparison of Different Recovery Technologies by Integrating Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 56 (19), 13900-13908. DOI: 10.1021/acs.est.2c02928.
- [247] Belle B., 2014. Evaluation of Barometric Pressure (BP) and Cage Effect on Longwall Tailgate Gas Levels. In: *Proceedings of the 10th International Mine Ventilation Congress*, ss.501-511. Sun City, South Africa, MVSSA.
- [248] Juganda A., Pinheiro H., Wilson F. et al., 2022. Investigation of Explosion Hazard in Longwall Coal Mines by Combining CFD with a 1/40th-Scale Physical Model. *Mining, Metallurgy & Exploration* 39, 2273–2290. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00629-6>.
- [249] Zipf R.K. Jr., Marchewka W., Mohamed K., Addis J., Karnack F., 2013. Tube bundle system for monitoring of coal mine atmosphere. *Mining Engineering*, vol. 65, iss. 5, ss.57–63.
- [250] Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., 2012. Effectiveness of coal mine methane drainage in Polish mines. 29th Annual International Pittsburgh Coal Conference: Coal – Energy, Environment and Sustainable Development, 15–18 October, Pittsburgh, USA.
- [251] Creedy D.P., Kershaw S., 1988. Firedamp prediction – a pocket calculator solution. *The Mining Engineer*. 2, ss. 377-379.
- [252] Tor A., Jakubów A., Szlązak N., Wasilewski S., 2006. Methods and means of recovery and utilization of methane from mines. *Proceedings of the 11th U. S./North American mine ventilation symposium 2006: Pennsylvania, USA*, 5–7 June.
- [253] Gao YB, Lin BQ, Yang W, Li ZW, Pang Y, Li H., 2015. Drilling large diameter cross-measure boreholes to improve gas drainage in highly gassy soft coal seams. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 26:193-204.
- [254] Liu Q., Cheng Y., 2014. Measurement of pressure drop in drainage boreholes and its effects on the performance of coal seam gas extraction: a case study in the Jiulishan Mine with strong coal and gas outburst dangers. *Natural hazards*, 71(3), ss.1475-1493.
- [255] Liu Q.Q., Cheng Y.P., Yuan L., Fang Y.X, Shi DZ, Kong S.L., 2014. A new effective method and new materials for high sealing performance of cross-measure CMM drainage borehole. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 21: ss.805-813.
- [256] Wang, Z., Sun Y., Wang Y., Zhang J., Sun Z., 2019. A coupled model of air leakage in gas drainage and an active support sealing method for improving drainage performance. *Fuel*, vol. 237, ss. 1217–1227.
- [257] Whittles D.N., Lowndes I.S., W. Kingman S.W., Yates C., Jobling S., 2006. Influence of geotechnical factors on gas flow experienced in a UK longwall coal mine panel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, no. 3, ss. 369-387.
- [258] Zhang Y., Zou Q., Guo L., 2020. Air-leakage Model and sealing technique with sealing–isolation integration for gas-drainage boreholes in coal mines. *J. Process Saf. Environ. Prot.* 140, ss. 258–272.
- [259] Taylor T.J., 1852–1853. Proofs of subsistence of the firedamp of coal mines in a state of high tension in situ. *Trans. North of England Institute of Mining Engineers*, 1, ss.275–299.
- [260] United Nations Economic Commission for Europe, 2021. Best Practice Guidance for Effective Management of Coal Mine Methane at National Level: Monitoring, Reporting, Verification and Mitigation. ECE Energy Series no.71. United Nations, Geneva.
- [261] Etmnan M., Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P., 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: a significant revision of the methane radiative forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 43 (12), s. 623.
- [262] Myhre G., Shindell D., Bréon F., et al., 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing In *Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- [263] Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M, 2014: Selected issues related to methane hazard in hard coal mines. Ed. by Nikodem SZŁĄZAK. AGH University of Science and Technology Press, Krakow, s. 148.
- [264] Skorek J., Kalina J.: *Gazowe układy kogeneracyjne*. WNT Warszawa 2005.
- [265] Chu T., Li P., Chen Y., 2019. Risk assessment of gas control and spontaneous combustion of coal under gas drainage of an upper tunnel. *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. 29, Iss. 3, ss. 491-498.

- [266] Qin B., Li L., Ma D., Lu Y., Zhong X., Jia Y., 2016. Control technology for the avoidance of the simultaneous occurrence of a methane explosion and spontaneous coal combustion in a coal mine: A case study. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 103, Part A, ss. 203-211.



Bu proje Avrupa Birliği ve Türkiye Cumhuriyeti tarafından finanse edilmektedir.

MİSGEP

MADENCİLİKTE
İŞ SAĞLIğI ve
GÜVENLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ

İSG ALANINDA TEKNİK REHBERLER

2023

www.isginfo.org

İSG.info

