

Örnek Bir Yeraltı Metal Madeninde Simülasyon Yazılımı ile Yangın Senaryoları Hazırlanıp Değerlendirilmesi

Hasan Onur İNAL*¹ ORCID 0000-0001-6564-5721

Bayram KAHRAMAN² ORCID 0000-0001-9429-6591

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, İzmir

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir

Geliş tarihi: 19.04.2023

Kabul tarihi: 23.06.2023

Atıf şekli/ How to cite: İNAL, H.O., KAHRAMAN, B., (2023). Örnek Bir Yeraltı Metal Madeninde Simülasyon Yazılımı ile Yangın Senaryoları Hazırlanıp Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(2), 473-483.

Öz

Yeraltı madenciliğinde havalandırma, işçi sağlığı ve güvenliği için hayati öneme sahiptir. Havalandırma sistemi tasarımı ve işletilmesi için simülasyon teknikleri kullanmak, doğru havalandırma sistemlerinin tasarlanmasına ve işletilmesine yardımcı olabilir. Bu nedenle, yeraltı madenciliğinde havalandırma ve simülasyon teknikleri, maden işletmeciliğinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Simülasyonlar, havalandırma sisteminin tasarımı ve işletilmesi için gerekli hava akış hızı, basınç düşüşü ve hava kalitesi gibi parametrelerin belirlenmesine kullanılmaktadır. Simülasyonlar ayrıca, havalandırma sistemlerinin farklı senaryolarda nasıl çalışacağını ve potansiyel sorunları belirleyebilmektedir. Bu çalışmada Ventsim yazılımı yardımıyla farklı yangın senaryoları değerlendirilerek acil durum eylem planları hazırlanmasına nasıl katkı verilebileceğini göstermek amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Simülasyon, Ventsim, Acil durum eylem planı, Yeraltı madenciliği, Havalandırma

Preparation and Evaluation of Fire Scenarios with Simulation Software in a Sample Metal Underground Mine

Abstract

Ventilation in underground mining is vital for worker health and safety. Using simulation techniques for ventilation system design and operation can assist in the design and operation of correct ventilation systems. Therefore, ventilation and simulation techniques in underground mining have become an important part of mining operations. Simulations can help determine the necessary parameters for the design and operation of the ventilation system, such as air flow rate, pressure drop, and air quality. Simulations can also identify how ventilation systems will work in different scenarios and detect potential problems beforehand. This

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Hasan Onur İNAL, hsnin127@gmail.com

study, it is aimed to contribute to the preparation of emergency action plans in underground mines by evaluating different fire scenarios with the help of Ventsim software.

Keywords: Simulation, Ventsim, Contingency plan, Underground mining, Ventilation

1. GİRİŞ

Yeraltı madencilğinde havalandırma hayati öneme sahiptir. Bu yüzden, maden güvenliği ve konforlu çalışma ortamı için havalandırma koşulları çok iyi planlanmalıdır. Bu amaçla, Türkiye’de çeşitli yasal düzenlemeler yapılmıştır. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi’ne göre, Solunum için gerekli hava miktarları her bir işçi için; grizu miktarı çok az olan ocaklarda 1-2 m³/dk., grizu miktarı orta seviyede olan ocaklarda 3-6 m³/dk., grizu miktarı yüksek seviyeli ocaklarda 20-25 m³/dk. olarak belirlenmiştir. Maden havası, yer altı çalışma alanlarında genellikle toz, su buharı ve gaz karışımından oluşmaktadır. Yeraltı havasındaki olumsuz değişim genel olarak oksijen miktarının azalması, karbondioksit ve diğer gazların artması olarak değerlendirilmektedir. Bu değişiklik maden havasını kirletmekte ve ortamda yanıcı, boğucu ve zehirli gazların birikmesine neden olmaktadır. Maden havasında kirletici olarak bulunan yanıcı gazlara örnek olarak metan (CH₄) ve türevlerinin yanı sıra karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H₂) verilebilir. Bu gazlar aynı zamanda belirli konsantrasyonlarda patlayıcı özellik gösterirler. Boğucu gazlar karbondioksit (CO₂), nitrojen (N₂) ve metan (CH₄); zehirli gazlar karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), hidrojen sülfür (H₂S) ve tüm azot oksitlerdir (N_xO_y). Bu anlamda madenlerin havalandırması; yer altında çalışan işçilere yeterli havanın getirilmesi, gazların seyreltilmesi ve sıcaklığın düzenlenmesini sağladığı için önemlidir. Her madenin tanımlanmış bir havalandırma devresine sahip olması önemlidir, bu sayede gerekli olan alanlarda hava ihtiyacı sağlanır. Hazırlık, geliştirme ve işletme çalışmalarından vazgeçildiğinde, yönetmelikler regülatör veya havalandırma kapıları ile ilgili (yer altındaki bir maden çalışmasından hava geçişini durdurmak veya düzenlemek için ahşap, plastik, kauçuk, metal veya diğer herhangi bir malzeme yapısı) uygulamaları gerektirir [1]. Bu sayede basınç kayıplarının önüne geçilmekte ve hava,

maden içerisinde havalandırması gereken yerlere yönlendirilmektedir. Doğal hava akışı yönündeki mekanik havalandırma, gerektiğinde hava akışı yönünü tersine çevirebilen vantilatörlere sahip olmalıdır. Yani işçiler olası bir yangında kaçmak için çıkışa yakın galeriyi tercih edeceklerinden, kaçış yolu kirli hava dönüş yolu üzerinde ise, açığa çıkan CO gazı işçileri takip edecektir. Havalandırma sisteminin emici olması durumunda, yer altında açığa çıkan metan gazını emeyeceği ve bu gazın vantilatör ile temas edeceği düşünüldüğünde, bu fanın hiçbir şekilde metanın tutuşmasına izin vermeyecek şekilde olması, yani ex-proof olması gereklidir. Ana havalandırma, madenin tümünde dolaşan havalandırma sistemini ifade ederken tali havalandırma, madenlerde hava ulaşmayan kör noktaları havalandırmayı ifade eder. Havalandırma için kullanılan simülasyonlar ise yer altı madenlerindeki ısı ve nemin termodinamik simülasyonlarını yapmak; havanın yön, miktar, yoğunluk ve akışını değerlendirmek ve ölçmek için kullanılır. Ayrıca havalandırma da kullanılacak ekipmanların maliyetini hesaplamak içinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, bir yeraltı altın madeninin nakliye yolunda çalışan maden kamyonunda çıkacak olası bir yangın durumu Ventsim Fire programı ile simüle edilerek değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sayesinde acil durum eylem planına etki edecek durumların önceden görülerek tedbirlerin daha rasyonel olarak alınması amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Yeraltı Madenlerinde Havalandırma

Yeraltı madenlerini havalandırmada yoğun bir şekilde simülasyon programları kullanılmaktadır. Madenlerdeki havalandırma sistemlerini simüle etmek ve modellemek için çeşitli teknikler ve yazılım araçları mevcuttur. Bu araçlar, madendeki hava akışının ve kirletici maddelerin davranışını

tahmin etmek ve zayıflık veya risk alanlarını belirlemek için bir dizi matematiksel model ve algoritma kullanır. Bu çalışmada kullanılan yazılım programı Ventsim'dir. Bu yazılım paketi, havalandırma sistemlerini tasarlamak, analiz etmek ve optimize etmek için madencilik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ventsim, maden havalandırma sistemindeki hava akışını simüle etmek için hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) kullanır [2].

Ventsim, aşağıda belirtilen işlemleri simüle etmek için bir dizi matematiksel model ve algoritma kullanır;

- Isı transferi denklemleri: Bu denklemler, maden atmosferi ile çevredeki kaya kütlesi arasındaki ısı transfer oranını belirlemek için kullanılır. Isı transfer denklemleri, sıcaklık gradyanı, kaya kütlesinin termal iletkenliği ve hava akış hızı gibi faktörlere bağlıdır. Isı transfer denklemleri, madenin ısı yükünü ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için soğutma gereksinimlerini belirlemek için kullanılır.
- Basınç denklemleri: Maden havalandırma şebekesindeki statik ve dinamik basınçları hesaplamak için basınç denklemleri kullanılır. Bu denklemler, sistemdeki hava akış yönünün ve basınç düşüşlerinin belirlenmesinde esastır. Basınç denklemleri, kütlenin korunumu ve enerji ilkelerine dayanmaktadır.
- Ses yayılma denklemleri: Maden havalandırma sistemindeki gürültü seviyelerini tahmin etmek için ses yayılma denklemleri kullanılır. Bu denklemler, madendeki gürültü seviyelerinin işçi sağlığı ve güvenliği için kabul edilebilir sınırlar içinde olmasını sağlamak için gereklidir [3].

Yukarıdaki denklemler, maden havalandırma simülasyon yazılımının esasını oluşturmaktadır. Yazılım paketleri, havalandırma sisteminin davranışını simüle etmek ve performansını optimize etmek için bu denklemleri kullanır. Bu sayede yeraltı madenlerinde kullanılan emici veya üfleyci fanların optimizasyonuna katkı sağlanabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Yeraltı madenlerinin havalandırmasında kullanılan emici fanlar

2.2. Simülasyon Adımları

Madencilik operasyonu ve havalandırma sistemini optimize etmek için kullanılan havalandırma simülasyon yazılımları, mühendislerin madenin ayrıntılı modellerini oluşturmasına ve madendeki hava ve gaz akışını simüle etmesine olanak tanır. Simülasyon, havalandırma sistemi tasarımını test etmek ve iyileştirmek için kullanılır ve güvenli çalışma koşullarının sürdürülmesinde etkili olmasını sağlar.

Simülasyon sürecindeki ilk adım, maden ve havalandırma sisteminin üç boyutlu (3B) modelini oluşturmaktır. Model, üretim galerilerini, başyukarı ve baş aşağı shaftları ve yüzey fanını içerir. Model, ayrıca madencilik yöntemi, cevher ve yantaş özellikleri ve hava kalitesi standartları ile ilgili verileri de içermektedir. Simülasyon yazılımları mühendislerin ve maden operatörlerinin yeraltı madenlerinin ayrıntılı üç boyutlu (3B) modellerini oluşturmalarına ve madendeki hava ve kirletici maddelerin akışını simüle etmesine olanak tanımaktadır.

Üç boyutlu (3B) model oluşturulduktan sonra, madendeki hava ve gaz akışını simüle etmek için simülasyon yazılımı kullanılır. Simülasyon, madencilik faaliyetlerinin yerini, hava akış hızlarını, havadaki gaz ve toz konsantrasyonunu ve maden havasının sıcaklığını ve nemini dikkate alır. Simülasyon, hava akış modelleri, havadaki gaz ve toz konsantrasyonu ve maden havasının sıcaklığı ve nemi hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Yazılım, kullanıcıların havalandırma sistemlerinin

performansını analiz etmesine ve optimize etmesine yardımcı olacak bir dizi özellik ve araç sağlar. Simülasyon adımları şu şekilde sıralanabilir:

1. Üç boyutlu (3B) modelleme: Kullanıcıların galeriler, rampalar, havalandırma kuyuları ve diğer yapılar dahil olmak üzere yeraltı madenlerinin doğru ve ayrıntılı üç boyutlu (3B) modellerini oluşturmasına olanak tanır. Yazılım, kullanıcıların bu modelleri oluşturmasına ve düzenlemesine yardımcı olmak için bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyalarını ve jeo-uzamsal verileri içe aktarma ve modele notlar ve etiketler ekleme yeteneği gibi bir dizi araç sağlamaktadır.
2. Hava akışı simülasyonu: Yazılımlar hava akışı, sıcaklık, nem ve zararlı gazların konsantrasyonları arasındaki karmaşık etkileşimleri hesaba katarak madendeki hava akışını simüle edebilmektedir. Yazılımlar, kullanıcıların havalandırma sistemlerinin performansını analiz etmelerine ve optimize etmelerine yardımcı olacaktır. Örneğin; hava akış modellerini görselleştirme, düşük hava hızı veya düşük hava kalitesine sahip alanları belirleme ve hava akış hızlarını ve basınçlarını hesaplama gibi bir dizi araç sağlamaktadır.
3. Zararlı gazları izleme: Yazılımlar, kullanıcıların toz, gazlar ve diğer tehlikeli maddeler dahil olmak üzere zararlı gazların maden boyunca taşınmasını ve dağılmasını simüle etmesine olanak tanımaktadır. Yazılım, kullanıcıların gazların hareketini izlemelerine ve analiz etmelerine yardımcı olacaktır. Örneğin; konsantrasyon seviyelerini hesaplama, yüksek riskli alanları belirleme ve havalandırma kontrollerinin etkinliğini değerlendirme gibi bir dizi araç sağlamaktadır.
4. Sistem optimizasyonu: Yazılım, kullanıcıların farklı havalandırma senaryolarını simüle etme, maden yerleşimi veya üretim planındaki değişikliklerin etkisini değerlendirme ve çalışma alanlarını belirleme gibi havalandırma sistemlerinin tasarımını ve işletimini optimize etmelerine yardımcı olacak bir dizi araç sağlamaktadır [2].

Genel olarak simülasyon yazılımları, madenlerin havalandırma sistemlerinin tasarımını ve işletimini optimize etmelerine ve madenciler için güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı sağlamalarına yardımcı olabilecek güçlü ve çok yönlü bir havalandırma aracıdır. Simülasyon yazılımları, madencilik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve havalandırma performansını iyileştirme ve havadaki kirletici maddelerle ilişkili riskleri azaltma konusunda mühendislere katkısı büyüktür.

2.3. Havalandırma Bileşenleri

Madencilik operasyonu için havalandırma sistemi, bir yüzey fanı, hava yolları, hava kapıları, kontrol cihazları, emiş ve egzoz noktaları ve temiz hava giriş kuyusundan oluşur. Yüzey fanı, madene gerekli hava debisini sağlarken, hava giriş kuyuları, üretim galerilerine taze hava vermekte ve hava dönüş kuyusu, madendeki kirli havayı uzaklaştırmaktadır.

Havalandırma sistemi, yeraltı madenlerinde işçilere temiz hava sağlamak ve çalışma alanından tehlikeli gazları ve tozları uzaklaştırmak için kullanılan temel bir güvenlik özelliğidir. Sistem, bir hava yolu ağı ve havalandırma ekipmanı kullanarak maden içinde hava dolaşımını sağlamak için çalışır.

Yeraltı madencilğinde havalandırma sisteminin temel amaçlarından biri, madenin çalışma alanlarında yeterli temiz hava kaynağı sağlamaktır. Bu hedefe ulaşmak için gereken hava miktarı, madendeki çalışan madenci sayısı, madenin boyutu ve yapılan faaliyetler gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak belirlenir. Gerekli hava hacmi hesaplamak için gerekli hesaplamalar yapılmıştır [4].

Hava hareketinin hızı, havalandırma sisteminin emme ve tahliye tarafları arasındaki basınç farkıyla belirlenir. Bu basınç farkı, büyük hava hacimlerini hareket ettirmek için tasarlanmış havalandırma fanları kullanılarak oluşturulur. Hava yolunun kesit alanı ve uzunluğu da hava akışına karşı oluşan direnci etkileyen önemli faktörlerdir. Çalışmaya konu olan yeraltı madeni girişi aşağıda görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Yeraltı ocak girişi

2.4. Yeraltı Ocağının Simülasyon Yardımıyla Modellenmesi

Madencilikte uygulanan iki ana havalandırma sistemi vardır. Bunlar; doğal havalandırma ve mekanik havalandırma. Doğal havalandırma, maden ile yüzey arasındaki sıcaklık ve basınç farklarından kaynaklanan, madendeki doğal hava akışına dayanır. Bu tür havalandırma, düşük gaz ve toz emisyon seviyelerine sahip daha küçük ve daha sık madenler için uygundur. Ancak doğal havalandırma, daha derin madenlerde veya daha yüksek gaz konsantrasyonlarına sahip madenlerde etkili değildir.

Öte yandan mekanik havalandırma, madendeki hava akışını kontrol etmek için fanların ve diğer ekipmanların kullanılmasını içerir. Bu tür havalandırma, doğal havalandırmadan daha etkilidir ve daha yüksek gaz ve toz emisyon seviyelerine sahip daha büyük ve derin madenler için uygundur. Mekanik havalandırma sistemleri ayrıca pozitif basınçlı (üfleleyici) ve negatif basınçlı (emici) sistemler olarak iki kategoriye ayrılabilir.

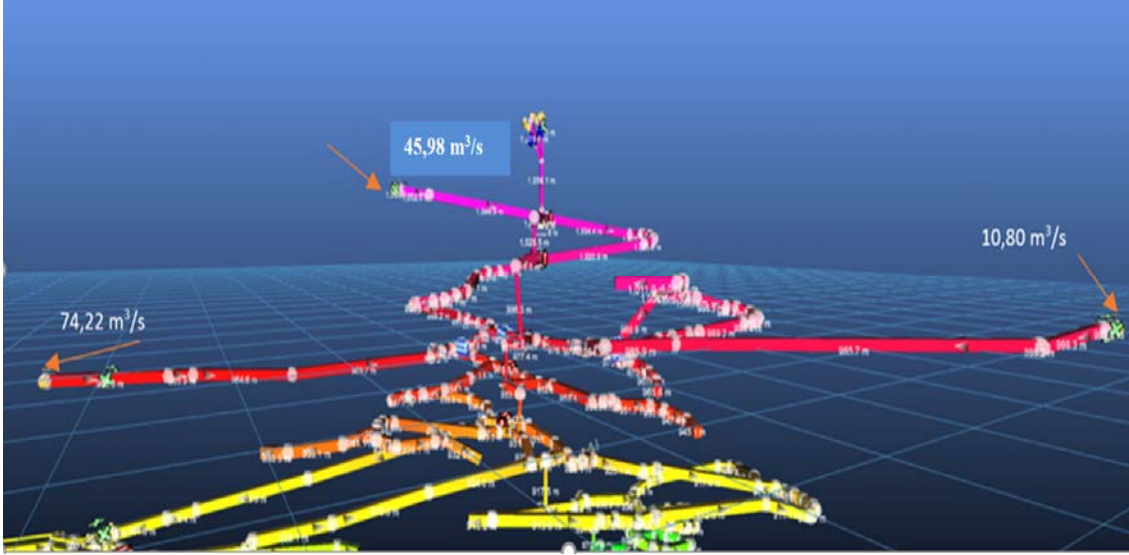
Pozitif basınçlı sistemler, kirli havanın girişini önleyen bir pozitif basınç farkı oluşturarak temiz havayı madene zorlamak için fanların kullanılmasını içerir. Bu tür bir sistem, madendeki tozu ve diğer kirlenmeleri kontrol etmede etkilidir, ancak çalışması için önemli miktarda enerji gerektirir [5].

Öte yandan, negatif basınçlı sistemler, madende negatif bir basınç farkı oluşturmak için egzoz fanlarını kullanabilir ve aynı anda kirli havayı çıkarırken madene temiz hava çekebilirler. Bu tür bir sistem, pozitif basınçlı sistemlerden daha enerji verimlidir ve madendeki gaz emisyonlarının kontrolünde etkilidir.

Bu çalışmada, örnek bir yeraltı ocağında mevcut havalandırmanın iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından değerlendirilmesi simülasyon yazılımı Ventsim kullanılarak yapılmıştır. Madende var olan gerçek havalandırma sistemi simüle edilerek nakliye yolunda yangın çıkması halinde ortaya oluşacak değişimi, hava sirkülasyonu ve gazın dinamik hareketleri incelenmiştir.

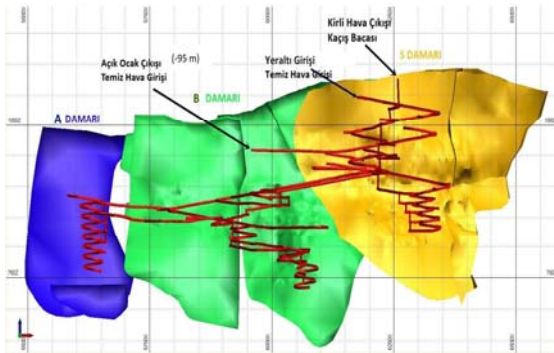
Örnek yeraltı işletmemizde; yeraltı ocağına 0 kotundaki portaldan 45,98 m³/s, -60 kotundaki galeri açıklığından 10,80 m³/s, -95 kotundaki açık işletme girişinden 74,22 m³/s ve olmak üzere toplam 131 m³/s hava girmektedir (Şekil 3).

A ve B damarında aktif üretim yapılmakta olup S damarında üretim yapılmamaktadır. -121 kotundaki B ve A damarları temiz hava giriş yolu başlangıcı olan kavşak noktasına kadar hava kapılarından 13 m³/s hava, hava dönüş yoluna kaçak yapmaktadır. Bu nedenle, B ve A damarları temiz hava yoluna 118 m³/s hava gitmektedir. Bu miktarın 2,5 m³/s'lik kısmı hava dönüş yoluna kaçak yapmakta ve sonuçta B ve A damarları temiz hava yol ayrımı olan kavşağa 115,5 m³/s hava gelmektedir. Bu miktarın 61,37 m³/s lik kısmı B damarına gitmektedir. B damarı hava giriş rampasındaki hava dönüş kuyusuna bağlantı kapılarında 8 m³/s hava kaçığı olmakta ve rampa tabanına 53,37 m³/s hava ulaşmaktadır. Delme patlatma işleminden sonra yükleme ve taşıma işlemi sırasında dizel araçlar için gerekli olan 37,5 m³/s nin çok üzerinde bir hava miktarı rampa tabanına ulaşmaktadır. Üretim galerilerine temiz hava 2x55 kW Korfmann marka tali vantilatörler ile sevk edilmektedir (Şekil 4).



Şekil 3. Yeraltı ocak havalandırma projeksiyonu

%75 vantilatör verimi dikkate alındığında, yeraltı işletmesi için gereken fan gücü 182 kW'dır. Bu çalışmada nakliye yolunda çalışan maden kamyonunda çıkacak yangın ile ilgili bir senaryo değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Yeraltı ocağı üretim damarları ve hava girişleri

2.5. Yangın Senaryosu Oluşturulması ve Simülasyonu

Yeraltı altın madenciliğindeki yaygın yangın türleri tipik olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar elektrik yangınları, mekanik yangınlar ve kendiliğinden yanma olayları olarak sıralanabilir [6].

Elektrik yangınları, madende kullanılan elektrikli ekipmanlardaki elektrik arızaları veya arızalarından kaynaklanır. Bu yangına sebep olarak, kablolar, transformatörler, motorlar ve jeneratörler gibi ekipmanların kısa devrelerini, söz konusu devrelerin aşırı yüklenmesi veya aşırı ısınması gösterilmektedir. Elektrik yangınları, hızla yayılabileceği ve genellikle kontrol edilmesi zor olduğu için özellikle tehlikeli olabilir.

Mekanik yangınlar, madende kullanılan makine ve teçhizatın arızalanması veya fonksiyonunu yitirmesinden kaynaklanmaktadır. Buna aşırı ısınma, sürtünme ısı veya arızalı yataklar, kaplinler, kayışlar ve dişlilerin neden olduğu kıvılcıklar dahildir. Mekanik yangınlara hidrolik sızıntılar, yakıt sızıntıları veya diğer yanıcı sıvı kaynakları da neden olabilmektedir.

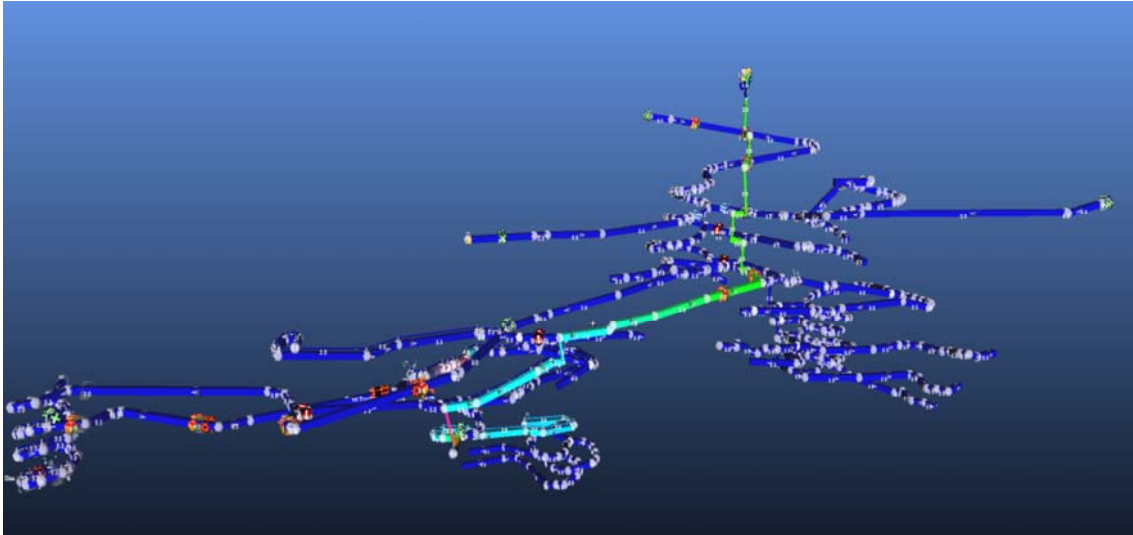
Yeraltı altın madenciliğinde, cevher, yantaş veya diğer organik malzeme stoklarında kendiliğinden tutuşan yangınlar meydana gelmekte ve tespit edilmesi ve söndürülmesi zor olmaktadır. Kömür, ağaç veya petrol bazlı ürünler gibi organik materyaller mikrobiyal aktivite, oksidasyon veya diğer kimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen ısı nedeniyle kendiliğinden tutuşan yangınlar meydana gelir.

Bu üç kategoriye ek olarak, yer altı madenciliğindeki yangınlara yanıcı maddelerin uygun olmayan şekilde taşınması, depolanması ve bertaraf edilmesi, yasak alanlarda açık alev kullanılması veya sigara içilmesi gibi insan hatası neden olmaktadır [7].

Yeraltı metal madenciliğinde yangınları önlemek için, düzenli ekipman bakımı, yanıcı maddelerin uygun şekilde depolanması ve taşınması, etkili havalandırma sistemleri ve çalışan eğitim programları dahil olmak üzere sıkı güvenlik protokolleri ve prosedürlerinin uygulanması esastır. Herhangi bir yangın olayına hızlı bir şekilde

müdahale etmek ve daha büyük ve tehlikeli yangınlara dönüşmesini önlemek için sprinkler sistemleri, yangın söndürücüler ve duman dedektörleri gibi uygun yangın söndürme ve algılama sistemlerine sahip olmak da kritik öneme sahiptir [8].

Bu çalışmada yangın sebebi olarak en yaygın görülen dizel yakıt ve lastik yanması senaryosu programda simüle edilmiştir. Örnek olarak B damarında çıkarılan dizel yakıt ve lastik yanması senaryosunda; oluşan kirli havanın büyük kısmının havalandırma kuyularından yeryüzüne çıktığı görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. B damarından çıkan yangının havalandırma kuyularından yeryüzüne direkt çıkışı

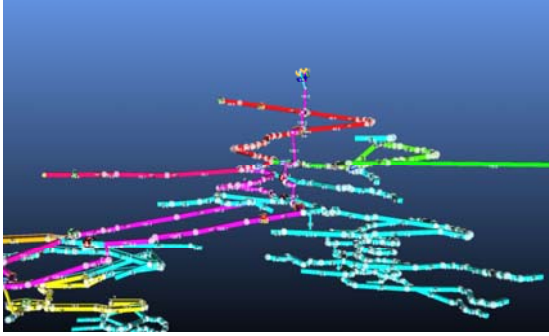
2.6. Yangın Senaryosunun Simülasyonu ve Değerlendirilmesi

Yeraltı maden işletmesinin A damarından B damarına giden 900 metre ve 872 metre uzunluğunda iki adet hafif rampalı nakliye yolu bulunmaktadır. Bu yollardan 900 metre uzunlukta olanı, temiz havanın üretim galerilerine girdiği tüneldir. Diğeri ise üretim galerilerinden dolaşan temiz havanın kirlenerek çıktığı güzergahtır. Kirli hava bu yolu takip ederek havalandırma kuyularından emici fanlarla yer yüzüne taşınmaktadır. Oluşturulan yangın senaryosunda her iki yolda dizel ve lastik yangını ele alınmıştır.

İlk senaryoya göre; temiz havanın B damarından A damarına gittiği yolda yangın çıkması halinde oluşan gaz ve partiküller, bütün üretim galerisini dolaşmakta ve tüm madene 45 dakika içinde yayılmaktadır. Bunu gözlemek için yeraltı ocağının birçok yerine dinamik gözlem aracı yerleştirilmiştir. Dinamik monitör, dinamik veya yangın simülasyonu sırasında değişen havalandırma koşullarını kaydetmek ve grafiklerle göstermek için kullanılır. Zamana dayalı dinamik simülasyon, yangının sonuçlarını, duraklatılabilen ve devam ettirilebilen şekilde grafiksel olarak gösterir. VentFIRE modülü aynı anda birden fazla parametreyi simüle edebilir. Zaman tabanlı

simülasyon sonuçlarının geçmişini kaydetmek için, havalandırma akışındaki değişiklikleri kaydetmek üzere tanımlanmış konumlara 'monitörler' yerleştirilebilir. Dinamik simülasyon, simülasyon sırasında dinamik olarak görüntülenebilen ve değiştirilebilen zamana dayalı simülasyon sonucunu gösteren özel bir simülasyon yöntemidir. Dinamik simülasyon, kirletici maddelere, gazlara, DPM'ye (Dizel partikülleri) ve ısıya uygulanabilmektedir.

Bu senaryoda fanların ters çalıştırılması durumunda yangın dumanı 0 ve -95 kotundan yeryüzüne ulaşmaktadır (Şekil 6).

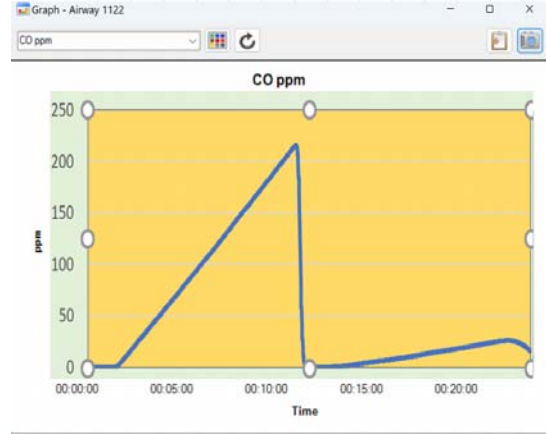


Şekil 6. Emici fanın ters çalıştırılması halinde havanın kırmızı ile gösterilen yerlerden (0 kotu ve -95 kotundan) çıkışı

İkinci senaryoya göre; A damarından B damarına doğru kirli havanın aktığı yönde çıkarılan yangında zehirli gazların direkt olarak emici kuyulara doğru aktığı ve üretim galerilerine uğramadığı saptanmıştır. Ayrıca, bu yangın çıktığında regülatör kullanılarak hava tahliyesi hızlıca sağlanmış olup, B ve S damarına zehirli gazların girişi engellenmiştir.

İlk senaryoda dinamik monitörlerden elde edilen bilgilere göre emici fanların ters çalıştırılmaması ve regülatörlerin kapalı olması durumunda CO seviyesi 15 dk. süre içinde 200 ppm seviyesine çıkarak, oldukça tehlikeli seviyelere gelmektedir (Şekil 7).

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğine göre CO müsaade edilen değer maksimum 50 ppm dir.



Şekil 7. Simülasyon çalıştıktan sonra maden sahasında görülen CO ppm miktarı

Ek olarak, temiz havanın B damarından A damarına gittiği yolda çıkarılan ikinci yangın senaryosunda emici fanlar ters çalıştırılmış, regülatörler kapatılarak yangın 1 saat 15 dakika boyunca simüle edilmiştir.

Çıkan tabloda zehirli gazlar -121 kotundaki temiz hava girişinden dışarı doğru tahliye edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Yangın Senaryo Simülasyonlarının Acil Durum Eylem Planına Katkısı

Yeraltı madenlerindeki yangın simülasyonları, madencilerin ve acil durum müdahale ekiplerinin farklı senaryoları simüle etmelerine ve kontrollü bir ortamda acil durum müdahale planlarını test etmelerine olanak tanıdığından acil durum planlaması için önemli bir araçtır [2]. Yeraltı madenlerinde yangın simülasyonunun acil durum planları için önemi şu şekilde özetlenebilir:

Geliştirilmiş güvenlik: Madenciler ve acil durum müdahale ekipleri, çeşitli senaryoları simüle ederek potansiyel tehlikeleri belirleyebilir ve gerçek bir acil durum meydana gelmeden önce bunları hafifletmek için stratejiler geliştirebilir. Bu durum, güvenliği artırmaya ve kaza olasılığını azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Gelişmiş acil durum hazırlığı: Yangın simülasyonları, madencilerin ve acil durum müdahale ekiplerinin acil durum müdahale planlarını ve prosedürlerini uygulamasına, boşlukları ve eksiklikleri belirlemesine ve müdahale stratejilerini iyileştirmesine olanak tanır. Bu, gerçek bir acil durumla başa çıkmak için daha hazırlıklı olmalarını sağlamaktadır [9].

Uygun maliyetli eğitim: Yangın simülasyonları, madencileri ve acil durum müdahale ekiplerini acil durum müdahale prosedürleri konusunda eğitmek için uygun maliyetli bir yol sağlar. Pahalı ve tehlikeli olabilen canlı tatbikatlar yapmak yerine, simülasyonlar güvenli ve daha düşük maliyetle yapılabilir.

Mevzuata uygunluk: 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun 11. Maddesi ve İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik gereği işyerleri için acil durum planlarının olması gereklidir. Ayrıca Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğinin de acil durumlar ile ilgili maddeler de mevcuttur. Yangın simülasyonları yapmak, madenlerin bu düzenlemelere uyum göstermelerine ve planlarının etkili olmasını sağlamalarına büyük katkı sağlamaktadır.

Acil durumların azaltılmış etkisi: Madenciler ve acil durum müdahale ekipleri, farklı senaryoları simüle ederek ve acil durum müdahale planlarını test ederek acil durumların etkisini en aza indirecek stratejiler geliştirebilir. Bu, gerçek bir acil durumdan kaynaklanabilecek can ve mal kaybını azaltmaya yardımcı olabilir.

Gerçekleştirilen senaryolara göre acil eylem planı hazırlanması halinde, regülatörlerin etkin bir şekilde kullanılması durumunda fanların ters yönde çalıştırılması gerekmektedir. Yangının yerine göre senaryolar oluşturulmalı ve bu senaryolara göre etkin acil eylem planları hazırlanmalıdır. İşçilerin tahliyesi de buna göre ayarlanmalıdır. Örneğin A damarından B damarına doğru çıkan yangınlarda zehirli gazla direkt olarak havalandırma kuyularından dışarı çıkmakta B damarından A damarına giden nakliye yolunda yangın çıkması durumlarında zehirli gaz tüm üretim galerilerini

dolaşmaktadır. Bunu önlemek için fanların ters yönde çalıştırılması şarttır.

Madenlerde acil durum planlarında diğer önemli bir olayda işçilerin tahliyesidir. Ortalama sağlıklı bir yetişkin yaklaşık 3,5 ila 4,5 m/sn hızla koşabilir [10]. Bununla birlikte, tam koşu hızı yaş, cinsiyet, kondisyon düzeyi, vücut kompozisyonu ve bireysel genetik gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Dayanıklılık ve genel kardiyovasküler sağlık da dikkate alınması gereken önemli faktörlerdendir. Belirtilen senaryolarda ilk 15 dakikada zehirli gazların hızla yayıldığı görülmüştür. Yangın senaryosunun başladığı yerden en yakın çıkış noktasına olan mesafe 1200 m'dir. Bu durumda, işçilerin tahliye süresi 15-20 dakika arası değişmektedir. Bu hesabı yaparken sporcu ve normal sağlıkta bir insanın koşma hızı ve madendeki rampaların eğimi dikkate alınmıştır.

Çizelge 1'de görüldüğü üzere işçilerin herhangi bir yangın anında çıkışa doğru yönelip madeni terk etmesi özellikle üretim galerilerinde çalışan işçiler için zor olmaktadır. Bu durumda, madenlerde yer alan sığınakların kullanılması üretim galerilerinde çalışan işçiler için gerekli olabilir. Oluşan zehirli gazların solunması işçilere zarar vereceğinden yangının olası etkilerine karşı ek tedbir olarak temiz hava sirkülasyonuna sahip sığınakların kullanılması gereklidir (Şekil 8).

Çizelge 1. Madenin belli noktalarından dışarıya çıkış süreleri

Koşu yolu	Variş süresi (dakika)
A damarından B damarına giden nakliye yolu	11,1 dakika
A damarı nakliye yolundan -121 kotlu çıkış	26 dakika
B damarı nakliye yolundan -121 kotlu çıkış	15,2 dakika
A damarı en alt kot üretim galerisinden -121 kotlu çıkış	36,3 dakika

Bu sığınakların özellikleri şu şekilde olmalıdır;

1. Yeraltı madenlerindeki acil durumlarda çalışanların güvenli bir alana sığınmalarını sağlamalıdır.

2. Yangın, gaz kaçağı veya diğer tehlikeli durumlarda kullanılacak şekilde tasarlanmalıdır.
3. Tasarımı, dayanıklılık, hava sızdırmazlığı, yangın dayanımı ve gaz filtreleme kapasitesi gibi faktörleri içermelidir.
4. Havalandırma sistemleri ve diğer donanımlarla donatılarak çalışanların yaşamsal ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır.
5. Yeraltı madenlerindeki işletmelerin özelliklerine ve risklerine göre özelleştirilebilmelidir [11].

Ayrıca, yangına karşı işçiler eğitilmiş olmalı bu sayede erken müdahale imkânı oluşturulmalıdır. Otomatik yangın söndürme ekipmanları ve diğer teknik sistemler periyodik olarak test edilmelidir.



Şekil 8. Yeraltında kullanılan 12 kişilik taşınabilir sığınma odası

4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, yangın senaryolarının simüle edilmesi acil durum planlarına pozitif olarak katkı yapacak ve olası durumlar gerçekçi olarak ele alınabilecektir. İşletmeler, bu sayede maliyet etkin politikalar üreterek oluşturulan senaryoyu test edebilecektir. Alınması gereken tedbirleri gerektiği şekilde alıp kaynak ve malzeme israfının önlenmesi yanı sıra etkin politikalar geliştirebilecektir.

Bu sayede;

Eylem planlarının etkililiğinin artması ve güncellenmesi: Simülasyonlar sayesinde acil durum eylem planlarındaki eksiklikler ve hatalar tespit

edilerek düzeltilir ve bu sayede eylem planları daha etkili hale getirilir.

Daha iyi hazırlanmış personel: Simülasyonlar sayesinde maden çalışanları ve acil durum müdahale ekipleri, acil durumlarda başa çıkmak için daha iyi hazırlanır. Bu da acil durumlarda daha etkili bir müdahale ve daha az zararlar sonuçlanır.

İşçi güvenliğinin artması: Simülasyonlar sayesinde, acil durum müdahale ekipleri işçilerin güvenli bir şekilde tahliyesi için en uygun yöntemleri belirleyebilirler. Bu da işçilerin hayatını kurtarabilir ve ciddi yaralanmaların önüne geçebilir.

Maliyet tasarrufu: Simülasyonlar gerçek acil durumların maliyetli ve tehlikeli olabilecek uygulamalarından kaçınmak için maliyet tasarrufu sağlar [7].

Mevzuata uyum: Simülasyonlar, yeraltı madenciligi için gerekli olan acil durum planı mevzuatına uyumu sağlar ve madenlerin denetçiler tarafından kabul edilmesini kolaylaştırır [12].

5. KAYNAKLAR

1. Olgun, B., Gültek, S., Bulgurcu, H., 2015. Yeraltı Maden Ocaklarında Havalandırma Kriterleri. Teskon 2015 Bildiriler Kitabı, 357-370.
2. Liang, Y., Zhang, J., Wang L., 2019. Forecasting Spontaneous Combustion of Coal in Underground Coal Mines by Index Gases: A review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 57, 208-222.
3. Barker, M., Caldwell, S., Orozco, M.G., 2023. NFPA 120 Standard for Fire Prevention and Control in Coal Mines, National Fire Protection Association (NFPA).
4. Perrott-Humphrey, F., 2011. SME Mining Engineering Handbook. Third Edition, Darling, P., The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 405.
5. Salami, O.B., Xu, G., Kumar, A.R., Pushparaj, R.I., 2023. Underground Mining Fire Hazards and Optimization of Emergency Evacuation Strategies: The Issues, Existing Methodology

- and Limitations, and Way Forward. Process Safety and Environmental Protection, In Press.
6. U.S. Department of Labor, 2016. Guidelines for Mine Emergency Response Planning, <https://www.msha.gov/p16-v-01>, Erişim Tarihi: 12.03.2023.
 7. Zujovic, L., Kecojevic, V., Bogunovic, D., 2021. Interactive Mobile Equipment Safety Task-Training in Surface Mining. International Journal of Mining Science and Technology, 31, 743-751.
 8. Conti, RS., Chasko, L., Wiehagen, WJ., Lazzara, CP., 2012. Mining Publication: Fire Response Preparedness for Underground Mines, The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Pittsburgh.
 9. Birch, B.W., 2014. Fire Simulation for Emergency Planning: A Case Study from the South African Mining Industry. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 114(7), 583-588.
 10. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2017. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=18858&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeligi&mevzuatTertip=5>, Erişim Tarihi: 14.04.2023.
 11. Gürleyen, A., 2016. Sığınma Odalarının Yeraltı Metal Madenlerinde Kullanımının Araştırılması. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, 91.
 12. Direk, C., 2016. Bir Yeraltı Taşkömürü Madeninde Göçük ve Taş-Kavlak Düşmesi Kazalarının Kök Nedenlerinin Araştırılması. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, 107.

