



Altyapı Projelerinde Kazı Esnasında Karşılaşılan Zehirli Gaz Sızıntılarının Havalandırma Tabanlı Giderilmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (HAD) Kullanımı

The Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) in Ventilation-Based Mitigation of Toxic Gas Leaks Encountered During Excavations in Infrastructure Projects

G. GÜLSEV UYAR AKSOY ^{1*}, C. OKAY AKSOY ², H. BERKER SARISAN ³

¹ Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, Türkiye

² Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

³ GOA Mining, Ankara, Türkiye

Geliş (received): 33 Eylül (September) 2024 Kabul (accepted): 28 Mart (March) 2025

Öz

Altyapı projelerinde kazı esnasında sızan zehirli gazların havalandırma yoluyla giderilmesi hem insan sağlığı hem de çevrenin korunması açısından önemlidir. Bu süreçte, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları, gazların taşınması ve dağılımı ile ilgili karmaşık fiziksel süreçleri modellemek ve analiz etmek için oldukça değerlidir. Jeotermal bölgelerdeki altyapı projeleri sırasında, yer altı kaynaklarından çeşitli gazlar sızabilir. Bu gazlar, hidrojen sülfür (H_2S), karbondioksit (CO_2) ve metan (CH_4) gibi zehirli ve/veya yanıcı gazları içerebilir. Zehirli gazların havalandırma yoluyla giderilmesi için etkili bir havalandırma sistemi tasarımı çok önemlidir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları, havalandırma sistemlerinin tasarımını ve performansını değerlendirmek için kullanılabilir. Kazılar esnasında karşılaşılan kaynaklardan sızan gazların HAD simülasyonları ile modellenmesi, gazların altyapı projeleri boyunca nasıl hareket ettiğini ve çevresel etkilerini anlamaya yardımcı olabilir. HAD simülasyonları, havalandırma sistemlerinin yerleştirilmesi, kanal tasarımı, hava akış hızları ve filtrasyon verimliliği gibi faktörlerin optimize edilmesine yardımcı olabilir. Bu optimizasyon, zehirli gazların etkili bir şekilde giderilmesini ve çevresel etkilerin en aza indirilmesini sağlar. HAD simülasyonları, zehirli gazların giderilmesi için havalandırma sistemlerinin etkinliğini ve güvenliğini değerlendirmek için kullanılabilir. Ayrıca, olası acil durumlar sırasında havalandırma sistemlerinin işletimini simüle etmek, riskleri değerlendirmeye yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Altyapı, Fan, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Tünel

ABSTRACT

Mitigating toxic gases leaking during excavations in infrastructure projects is crucial for both human health and environmental protection. In this context, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are highly valuable for modeling and analyzing the complex physical processes related to the transport and dispersion of gases. During infrastructure projects in geothermal regions, various gases may leak from underground sources.

These gases may include toxic and/or flammable substances such as hydrogen sulfide (H_2S), carbon dioxide (CO_2), and methane (CH_4). Designing an effective ventilation system is essential to mitigate toxic gases through ventilation.

CFD simulations can be utilized to evaluate the design and performance of ventilation systems. Modeling gas leaks from sources encountered during excavations with CFD simulations can help understand how these gases move throughout infrastructure projects and assess their environmental impacts. CFD simulations assist in optimizing factors such as the placement of ventilation systems, duct design, airflow velocities, and filtration efficiency. This optimization ensures the effective removal of toxic gases and minimizes environmental impacts.

Moreover, CFD simulations can be used to evaluate the efficiency and safety of ventilation systems in mitigating toxic gases. Simulating the operation of ventilation systems during potential emergency scenarios can also aid in risk assessment and preparedness..

Keywords: Infrastructure, Fan, Computational fluid dynamics, Tunnel

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1542949>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: gulsevaksoy@hacettepe.edu.tr

GİRİŞ

Altyapı projelerinde, ciddi çevresel etkilere sahip olabilen gaz sızıntılarıyla karşılaşılabilir. Bu gazlar genellikle zehirli ve/veya yanıcıdır. En yaygın olanları arasında hidrojen sülfür (H_2S), karbondioksit (CO_2) ve metan (CH_4) bulunmaktadır. Bu gazların çevreye salınması oldukça tehlikelidir.

Bu gazlar doğrudan insan sağlığına zarar verebilir. Hidrojen sülfür, kısa süreli maruz kalma ile solunum sistemi üzerinde ciddi etkilere yol açabilir ve uzun süreli maruz kalma durumunda ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Yüksek konsantrasyonlarda karbondioksit, solunum problemlerine ve hatta ölüme yol açabilir. Metan, yanıcı bir gazdır ve patlama riskini artırabilir.

Ayrıca, gaz sızıntıları doğal habitatları da olumsuz etkiler. Bu gazların bitki örtüsüne ve toprağa zarar vermesi, ekosistemlerin dengesini bozabilir. Yüksek konsantrasyonlarda karbondioksit, bitki büyümesini olumsuz etkileyebilir ve toprağın asitlenmesine yol açabilir. Metan sızıntıları, atmosferde sera etkisi yaratarak iklim değişikliğine yol açabilir.

Gaz sızıntılarının havalandırma yoluyla temizlenmediği durumlarda ciddi riskler ortaya çıkar. Özellikle kapalı alanlar veya tünellerde gaz konsantrasyonları tehlikeli seviyelere ulaşırsa, bu durum, işçilerin sağlığını tehlikeye atabilir ve acil durumlarda patlama veya zehirlenme riskini artırabilir.

Bu nedenle, gaz sızıntılarının etkili bir şekilde havalandırma yoluyla temizlenmesi çok önemlidir. Havalandırma sistemleri, bu gazları dışarı atarak çevreyi ve işçilerin sağlığını korumaya yardımcı olur. Bu sistemlerin uygun tasarımı ve düzenli bakımı kritik öneme sahiptir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanların ve gazların hareketini ve bu hareketlerin çevreleriyle etkileşimlerini sayısal olarak simüle eden bir mühendislik disiplini. HAD, temel olarak Navier-Stokes denklemlerini çözerek akışkan akışını, ısı transferini ve ilgili diğer fiziksel süreçleri analiz eder. Bu denklemler, kütle, momentum ve enerjinin korunumu prensiplerine dayanır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanların hareketini ve bu hareketin

çevreleriyle etkileşimlerini sayısal olarak simüle etmek için kullanılan güçlü bir araçtır. Yer bilimi çalışmalarında, HAD analizleri giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin bu alanlardaki kullanımı, daha güvenli ve verimli operasyonlar için kritik öneme sahiptir.

Madencilikte HAD analizlerinin kullanımı, madenlerin havalandırılması, yer altı suyu kontrolü ve patlama risklerinin değerlendirilmesi gibi birçok uygulama alanını kapsamaktadır. Özellikle yer altı madencilğinde, HAD simülasyonları, havalandırma sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunu sağlamak için kullanılır. İyi tasarlanmış bir havalandırma sistemi, işçilerin sağlığını korur ve metan gibi patlayıcı gazların birikmesini önler (Brune, 1996).

HAD analizleri, özellikle hidrojeoloji ve jeotermal enerji araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yer altı suyu akışının modellenmesi, su kaynaklarının yönetimi ve kirlenmenin izlenmesi açısından büyük önem taşır. HAD, yer altı suyu hareketlerini ve bu hareketlerin çevresel etkilerini simüle ederek, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine katkı sağlar (Bear, 1972).

Jeotermal enerji araştırmalarında da HAD analizleri önemli bir rol oynar. Jeotermal rezervuarların karakterizasyonu ve sıcak su veya buharın yer altındaki hareketinin modellenmesi, enerji üretiminin verimliliğini artırır (O'Sullivan vd., 2001). Bu analizler, aynı zamanda jeotermal sahalarda meydana gelebilecek gaz sızıntılarının değerlendirilmesine ve bu sızıntılara karşı önlemler alınmasına yardımcı olur.

HAD analizleri, madencilik ve yer bilimlerinde çevresel ve güvenlik risklerinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir. Örneğin gaz sızıntılarının simülasyonlarını yaparak, potansiyel tehlikelerin önceden tespit

edilmesini sağlar. Bu sayede, risk yönetimi stratejileri geliştirilebilir ve kazaların önüne geçilebilir.

HAD simülasyonları, karmaşık akışkan dinamiklerini anlamak ve tahmin etmek için güçlü araçlar sunabiliyor olsada, belirli sınırlamalar ve belirsizlikler de taşır. Model basitleştirmeleri, ağ yapısının kalitesi, türbülans modelleri ve sınır koşulları gibi faktörler, simülasyon sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilir. Bu nedenle, deneysel veri toplanması ve simülasyonların bu verilerle doğrulanması, modellerin güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Doğru veri toplama ve sürekli model kalibrasyonu, HAD simülasyonlarının doğruluğunu artırır ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini sağlar. Bu tür bir çalışmada, yer altından sızan gazların tespiti ve sızma hızları büyük önem taşır. Ayrıca, mevcut havalandırma yapısındaki kaçak veya sızıntıların belirlenmesi ve tünel yapısındaki havalandırmayı etkileyebilecek geçirgen alanların tespiti, simülasyonun doğruluğunu artıracaktır.

Sonuç olarak, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri, madencilik ve yer bilimi alanlarında kritik öneme sahip bir araçtır. HAD simülasyonları, maden havalandırmasından yer altı suyu yönetimine, jeotermal enerji araştırmalarından çevresel risk değerlendirmelerine kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Etkili önlemler alınmadığı takdirde hem çevre hem de insan sağlığı için potansiyel tehlikeler ortaya çıkabilir. Bu nedenle, gaz sızıntılarının yönetimi ve havalandırma sistemlerinin etkinliğinin sağlanması, altyapı projelerinde hayati öneme sahiptir.

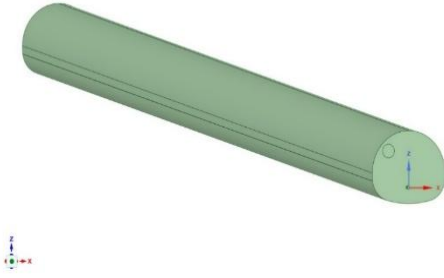
Bu çalışmada, İzmir-Ankara Hızlı Tren Tünel Projesi'nde yer alan T2 Tüneli örnek model olarak kullanılmıştır. Tünelin geometrisi, havalandırma yapısı, yüzeyleri modellenmiştir. Tünelde kazı esnasında karşılaşılan gaz

sızıntıları, yapılan ölçümler sonucunda analizlere tanımlanmıştır.

HAD ANALİZLERİ

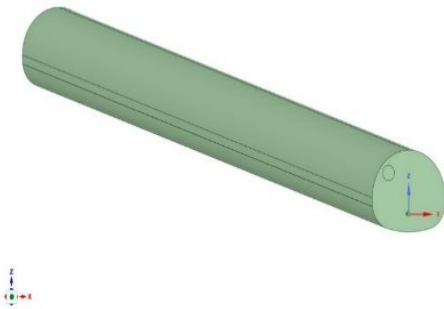
Geometri

HAD analizlerini gerçekleştirmek için, yapının üç boyutlu geometrisinin bir bilgisayar destekli tasarım programında oluşturulması gerekmektedir. Bu projede, ANSYS programının SpaceClaim modülü tasarım aracı olarak kullanılmıştır. Oluşturulan tünel geometrisi 815 metre uzunluğunda ve 130 m² yüzey alanına sahiptir. Tünel geometrisi içinde, 2200 milimetre çapında ve 765 metre uzunluğunda bir fan tüp geometrisi oluşturulmuştur (ANSYS Education Tutorials, 2016).



Şekil 1. Üç boyutlu tünel geometrisi

Figure 1. 3D tunnel geometry



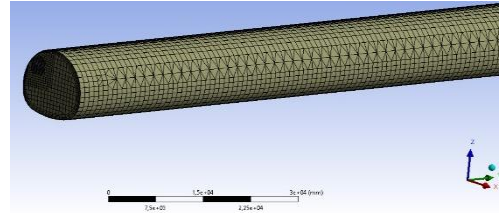
Şekil 2. Üç boyutlu fan tüp geometrisi

Figure 2. 3D fan duct geometry

Çözüm Ağı Yapısı (Meshing)

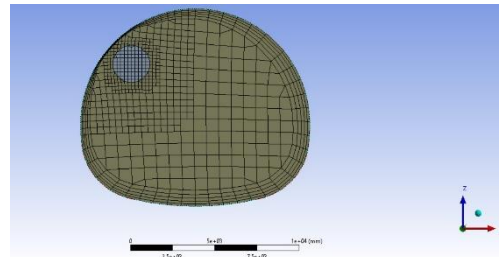
Çözüm ağı oluşturma, fiziksel bir alanı daha küçük aralıklara bölme işlemidir. Ağ oluşturma amacını, bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Bu çalışmada, ağ oluşturma tekniği olarak Cutcell Mesh yöntemi kullanılmıştır. Cutcell Mesh, yüksek ortogonal kalite ve düşük eleman sayısı nedeniyle verimli bir ağ modelidir. Geometri üzerinde, 2.426.253 elemandan oluşan ve 0.07 ortogonal kalite değerine sahip yüksek kaliteli bir ağ oluşturulmuştur.

Ağ üzerinde, inlet, internal_fantup1, outlet, wall_fantup1 ve fluid_source gibi sınır isimleri tanımlanmıştır. Inlet sınır ismi fan kanalının girişini, internal_fantup1 fan kanalının tünele açıldığı yüzeyi, outlet tünel çıkışını, wall_fantup1 fan tüpün duvarlarını ve fluid_source tünel zeminindeki gazın salındığı alanları temsil eder (ANSYS Education Tutorials, 2016).



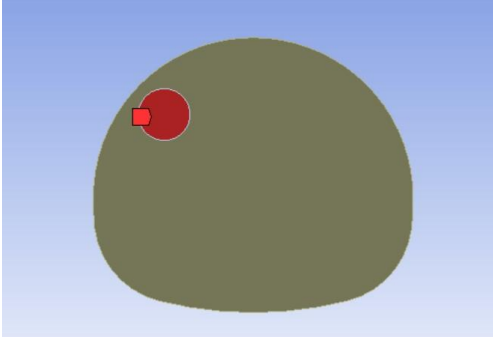
Şekil 3. Tünel üzerinde oluşturulan çözüm ağı

Figure 3. Meshing on the tunnel



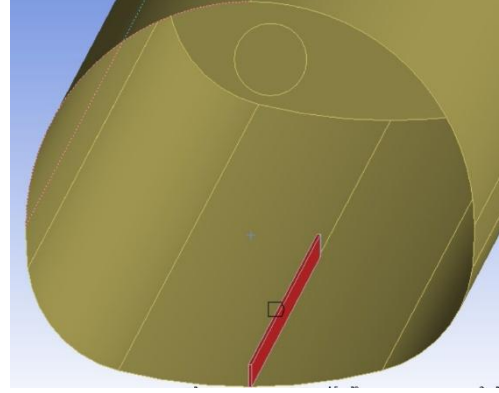
Şekil 4. Çözüm ağı kesit görünümü

Figure 4. Cross section view of the meshing



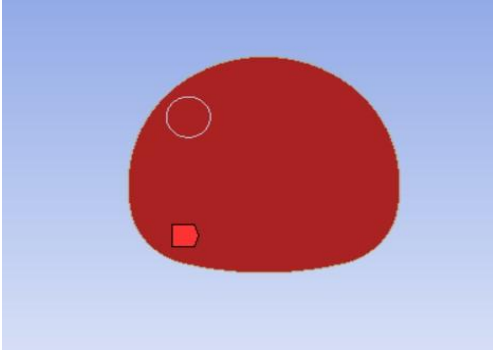
Şekil 5. Inlet sınır ismi

Figure 5. Inlet boundary name



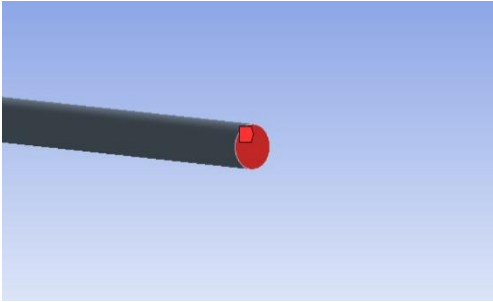
Şekil 8. Fluid_source sınır ismi

Figure 8. fluid_source boundary name



Şekil 6. Outlet sınır ismi

Figure 6. Outlet boundary name



Şekil 7. Internal_fantup1 sınır ismi

Figure 7. Internal_fantup1 boundary name

HAD Analizleri

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), sıvıların (genellikle sıvılar ve gazlar) hareketini ve etkileşimlerini bilgisayar tabanlı sayısal yöntemler kullanarak analiz eden bir mühendislik aracıdır. HAD analizleri, bilgisayar programları ve matematiksel yöntemler kullanarak akışkan akışını, sıcaklık dağılımlarını, basınç farklarını ve diğer fiziksel özellikleri modelleyip simüle eder.

HAD analizi, bir sistem veya cihazın geometrisini matematiksel olarak modellemeyi ve bu modele uygun olarak akışkan davranışlarının denklemlerine dayanan simülasyonlar yapmayı içerir. Temel denklemler, Navier-Stokes denklemleri, momentum denklemleri ve enerji denklemleri gibi denklemlerden oluşur. Bu denklemler, sonlu elemanlar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi, sonlu farklar yöntemi gibi sayısal yöntemler kullanılarak çözülür ve böylece akışkan davranışları modellenir (ANSYS Education Tutorials, 2016).

T2 tünelinin kazı çalışmaları esnasında, tünel aynasından itibaren 400 metre boyunca 8000ppm CO₂ ve 40ppm H₂S gazlarının sızdığı tespit edilmiştir. Gaz sızıntıları saha ölçümleri doğrultusunda analizler üzerinde modellenmiştir. T2 tüneli jeotermal bir havzada bulunmasına rağmen, kazı esnasında karşılaşılan sızıntılar jeotermal değildir. Ayrıca, kullanılan fan tüplerin sızdırmaz olduğu ve tünel içindeki hava akışını etkileyen başka faktörlerin (iş makinesi, insan, araç) bulunmadığı varsayılmaktadır. Tünelin tüm yüzeyleri tahkimatlıdır. Yüzeyler Ground Sheet örtü ile kaplanmıştır. Saha incelemeleri doğrultusunda analizlerde tünelin tüm yüzeylerine 3 cm yüzey pürüzlülüğü uygulanmıştır. Zeminden sızan gazların sıcaklığı 28°C, tünelin nominal sıcaklık değeri ise 26°C'dir. Bu sebeple zeminden sızan gazların termal etkisi bulunmamaktadır.

HAD analizlerini gerçekleştirmek için ANSYS Fluent programı kullanılmıştır.

Analiz senaryosu 1

Fan tarafından tünele sağlanan hava akış debisi 39 m³/s'dir. Fanın yüzey alanı 3.8013 m²'dir. Tünelin kesit alanı 130 m² olup, tünel içindeki ortalama hava akış hızı tünel çıkışına doğru (-Y yönünde) 0.3 m/s'dir.

Aşağıdaki analizler, 765 metre uzunluğunda ve 2200 mm çapında bir fan ve fan kanalı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve 39 m³/s hava akış hızı sağlanmıştır. Bu kurulum T2 Tüneli'nin mevcut havalandırma yapısıdır. 39 m³/s hava akış hızını sağlamak için fanın hava üfleme hızı hesaplanmıştır (Goodfellow, 2020).

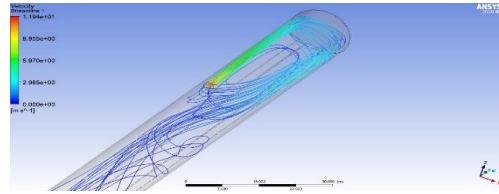
$$39 \text{ m}^3 = (3,8013 \text{ m}^2) * (V1) \quad (1)$$

Bu hesaplamalar sonucunda fanın hava üfleme hızı 10.2596 m/s olarak belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde, tünel aynasından başlayarak 400 metre mesafeye kadar,

fluid_source sınırından 8000 ppm CO₂ ve 40 ppm H₂S salınımı yapılmıştır.

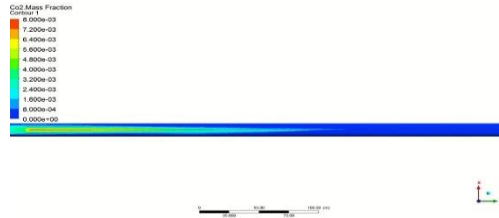
Hava akışı maksimum olarak 11,94 m/s hızda fan tüpten çıkmış ve aynaya çarpmıştır. Aynaya çarptıktan sonra akış hızı 2,985 m/s değerine kadar düşmüştür ve aynadan uzaklaşmaya devam ettikçe hızlar daha da düşerek 0 m/s seviyelerine inmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Fan tüpten çıkan havanın akış eğrileri

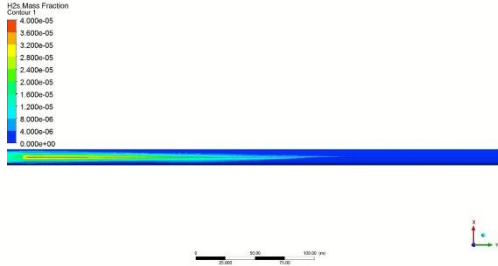
Figure 9. Streamlines of the air flow coming from fan duct

Görseller CO₂ ve H₂S gazları için -Z yönünden bakıldığında görülen kütle konturlarını göstermektedir. Görseller tünelin aynadan çıkışa doğru ilk 400 m yani gaz salınımı olan bölge ve son 400 m yani gaz salınımı tanımlanmamış bölge olarak iki şekilde incelenmektedir. Kütle konturları incelendiğinde aynadan ilk 400 m mesafede aynaya yakın olan kısımlarda 0 ppm CO₂ ve H₂S gazları görülürken, 400. m'ye yaklaştıkça küçük bir bölgede CO₂ için 8000 ppm, H₂S için 40 ppm gaz değerleri görülmüştür. Bunun sebebi hava akışının aynadan uzaklaştıkça zayıflaması ve uygun akışın sağlanamamasıdır (Şekil 10, Şekil 11).



Şekil 10. İlk 400 metre CO₂ konturları

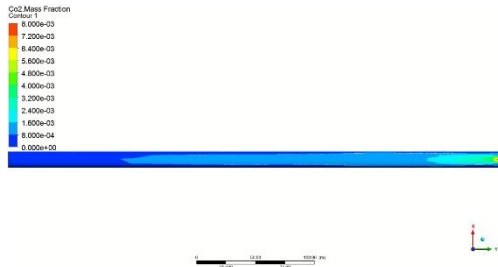
Figure 10. First 400 meters CO₂ contours



Şekil 11. İlk 400 metre H₂S kütle konturları

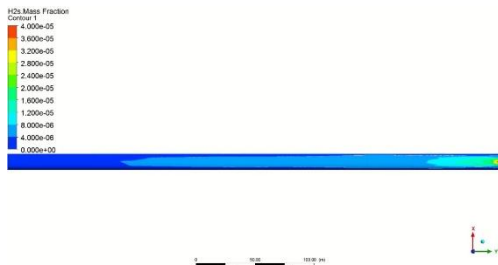
Figure 11. First 400 meters H₂S contours

CO₂ ve H₂S gazlarının son 400 m kütle konturlarına bakıldığında tünel çıkışının yaklaşık 100. m'sinde gazların CO₂ için 800 ppm ve 1600 ppm arasında, H₂S için 4 ppm ile 8 ppm arasında olduğu görülmektedir. Tünelin ortasında daha yüksek olan gaz yoğunluğunun tünelin çıkışına doğru azaldığı görülmektedir. Kütle konturlarından anlaşılabileceği üzere gazlar tünelin çıkışına doğru çok verimli olmasa da süpürülmektedir (Şekil 12, Şekil 13).



Şekil 12. Son 400 metre CO₂ kütle konturları

Figure 12. Last 400 meters CO₂ contours

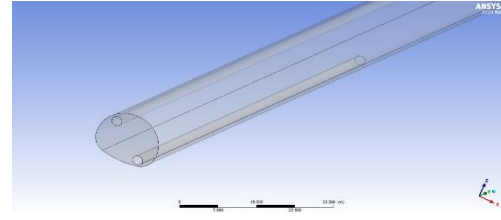


Şekil 13. Son 400 metre H₂S kütle konturları

Figure 13. Last 400 meters H₂S contours

Analiz senaryosu 2

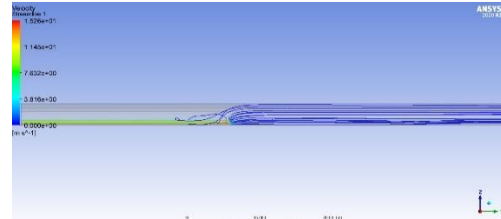
İlk analizdeki havalandırma yapısına ek olarak, tünelin 100. metresine bir fan yerleştirilmiş ve bu fandan itibaren tünel çıkışına kadar fan tüp tanımlanmıştır. Bu fan tüp, ilk fan kanalına benzer şekilde 2200 mm çapındadır. İkinci fan, tünel içindeki hava akışını 39 m³/s debide çekmektedir (Şekil 14).



Şekil 14. İkinci fan ve fan tüp

Figure 14. Second fan and fan duct

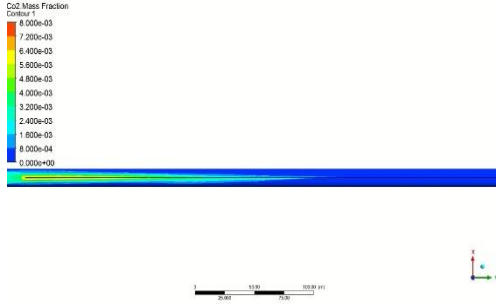
Tünelin çıkışındaki 2. fan incelendiğinde, fanın gelen hava akışını emdiğini ve yaklaşık 11,45 m/s hızlarla tünelin dışına attığı görülmüştür (Şekil 15).



Şekil 15. İkinci fanın akış eğrileri

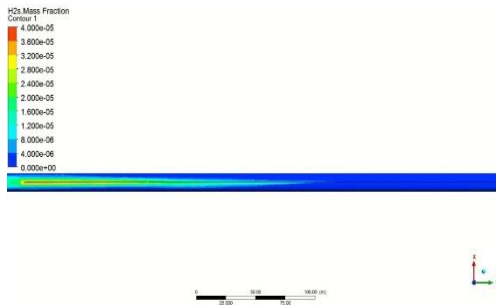
Figure 15. Streamlines of the second fan

CO₂ ve H₂S gazlarının aynadan itibaren ilk 400 m bölgesine bakıldığında kütle konturlarının 1. analiz ile benzer olduğu görülmüştür. 2. fanın emiş gücü bu mesafelerde etkili olmadığı için ilk senaryoya benzer kontur yapıları oluşmuştur. Aynadan itibaren yaklaşık 400 m mesafede CO₂ için yaklaşık 8000 ppm, H₂S için yaklaşık 40 ppm değerinde birikmeler olduğu görülmüştür. Aynaya yakın yerlerde ise hava akışı güçlü olduğundan dolayı, gaz süpürme oranı yüksek olmuştur (Şekil 16, Şekil 17).



Şekil 16. İlk 400 metre CO₂ konturları

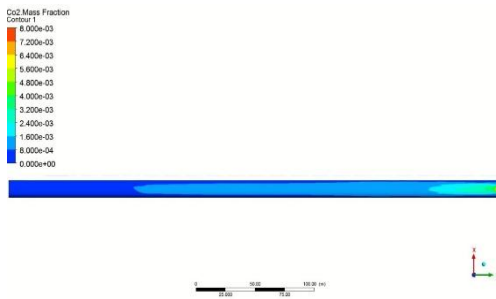
Figure 16. First 400 meters CO₂ contours



Şekil 17. İlk 400 metre H₂S kütle konturları

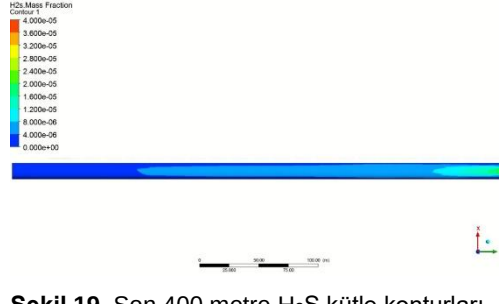
Figure 17. First 400 meters H₂S contours

CO₂ ve H₂S için son 400 m kütle konturlarına bakıldığında yapılan ilk analizle benzer sonuçlar elde edilmiştir. 2. Fanın salınan gazların 0 ppm olduğu ve hava akışının güçsüz olduğu, çıkışa 100 m mesafede konumlandırılması, gazların uzaklaştırılmasında etkili olamamıştır. (Şekil 18, Şekil 19).



Şekil 18. Son 400 metre CO₂ kütle konturları

Figure 18. Last 400 meters CO₂ contours



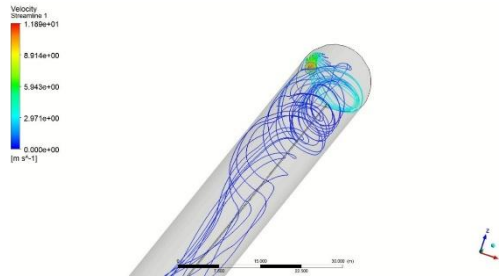
Şekil 19. Son 400 metre H₂S kütle konturları

Figure 19. Last 400 meters H₂S contours

Analiz senaryosu 3

Bu senaryoda 765 m olan fan tüp uzunluğu 790 m'ye yükseltilmiştir. 2. fan kullanılmamıştır. Kullanılan fanın çapı 2200 mm'dir. Fan tüpten tünele verilen hava debisi 39 m³/s'dir.

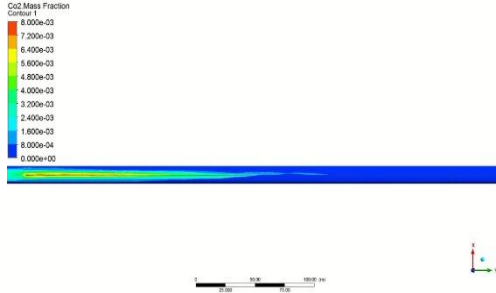
Akış eğrilerine bakıldığında akışın fan tüpten maksimum 11,89 m/s hızlarla çıktığı ve yaklaşık 5,943 m/s hızlarla aynaya çarptığı görülmüştür. Aynaya çarptıktan sonra akış yaklaşık 2,971 m/s hızlarla sarmal bir akış yapısı oluşturarak yoluna devam etmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. Fan tüpten çıkan havanın akış eğrileri

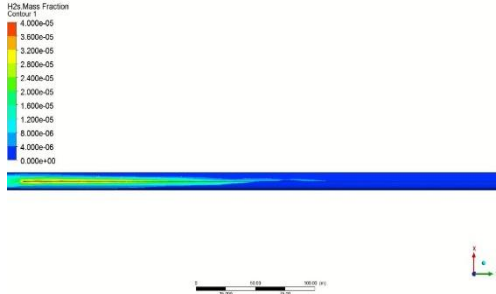
Figure 20. Streamlines of the air coming from fan duct

Kütle konturları incelendiğinde önceki senaryolarda olduğu gibi hava akışının ilk 200-250 m bölgelerinde gazları tamamen süpürdüğü görülmüştür. 400. m'ye yaklaştıkça gaz kaynağı üzerinde ve çevresinde CO₂ için maksimum 8000 ppm H₂S için maksimum 40 ppm değerlerinde gaz birikmeleri görülmektedir (Şekil 21, Şekil 22).



Şekil 21. İlk 400 metre CO₂ konturları

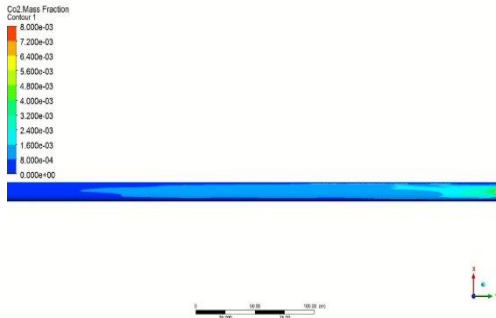
Figure 21. First 400 meters CO₂ contours



Şekil 22. İlk 400 metre H₂S kütle konturları

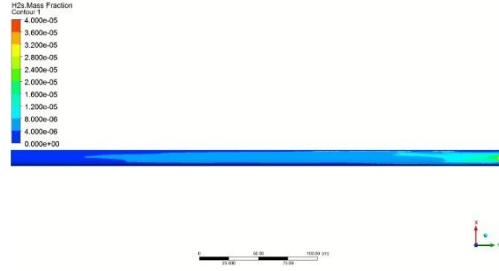
Figure 22. First 400 meters H₂S contours

Son 400 m kütle konturlarında oluşan yapı 1. analiz ile benzerlik göstermiştir. Son 100 m bölgelerinde iki gaz içinde 0 ppm değerleri görülürken, kaynağın bitiminden itibaren CO₂ için 2400 ppm, H₂S için 12 ppm değerinde birikmeler oluşmuştur (Şekil 23, Şekil 24).



Şekil 23. Son 400 metre CO₂ kütle konturları

Figure 23. Last 400 meters CO₂ contours



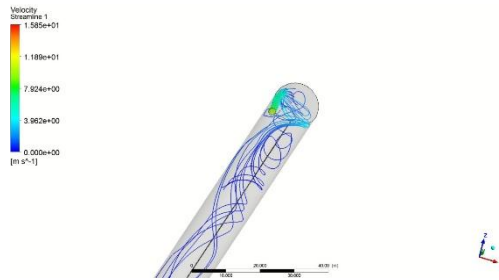
Şekil 24. Son 400 metre H₂S kütle konturları

Figure 24. Last 400 meters H₂S contours

Analiz senaryosu 4

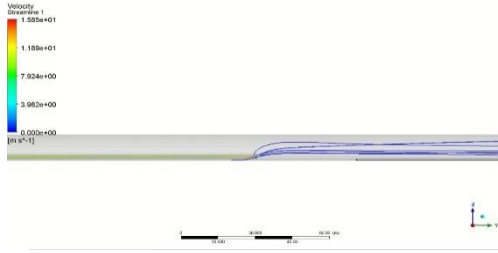
Yapılan 4. analizde 2. bir fan bulunmaktadır. Bu fanın çapı 2200 mm'dir. Fan, tünelin çıkışına 375 m mesafeye tanımlanmıştır. Fana 2200 mm çapında tünelin çıkışına kadar fan tüp tanımlanmıştır. İkinci fana 39 m³/s hava emiş debisi tanımlanmıştır. Yapılan analizde birinci fan tüpün boyu 790 m, hava akış debisi 39 m³/s ve ikinci fan tüpün boyu 375 m, hava emiş debisi 39 m³/s'dir.

Fan tüpten çıkan hava akışı yaklaşık 11,89 m/s hız değeriyle aynaya çarpmıştır. Aynaya çarptıktan sonra 3,962 m/s hızla -Y yönünde tünelin çıkışına doğru ilerlemeye başlamıştır. 2. fana yaklaşıncaya kadar hava akış hızı yaklaşık olarak 0 m/s değerine kadar düşmüştür. Hava akışı 2. fana ulaştığında vakum etkisiyle beraber fan tüpün içinden geçip tahliye olmuştur (Şekil 25, Şekil 26).



Şekil 25. Fan tüpten çıkan havanın akış eğrileri

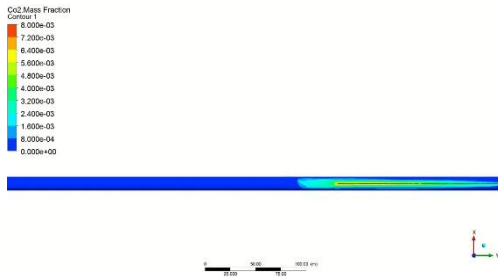
Figure 25. Streamlines of the air coming from fan duct



Şekil 26. İkinci fanın akış eğrileri

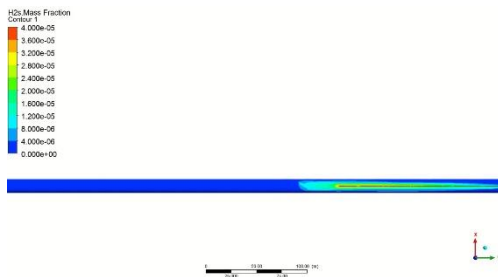
Figure 26. Streamlines of the second fan

Gazların kütle konturlarına bakıldığında 2. fanın etkisi net bir şekilde görülmektedir. Zeminden salınan gazlar 2. fanın etki alanına girdiklerinde vakumlanıp tahliye olmuşlardır. Bunun sonucunda 2. fandan sonra tünel çıkışı yönünde CO_2 ve H_2S gazları 0 ppm değerindedir. Ancak önceki analizlerde olduğu gibi kaynağın üzerinde CO_2 için 1600 ppm-6400 ppm aralığında, H_2S için 8 ppm-32 ppm aralığında birikmeler görülmektedir (Şekil 27, Şekil 28).



Şekil 27. CO_2 kütle konturları

Figure 27. CO_2 contours



Şekil 28. H_2S kütle konturları

Figure 28. H_2S contours

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan analizlerde akış eğrilerinden görüldüğü üzere aynaya yakın olan kısımlarda akış hızları yaklaşık 3 m/s olmuştur. Tünelin çıkışına yaklaştıkça hava akış hızları 0 m/s değerine yaklaşmaktadır.

Aynaya yakın kısımlardaki CO_2 ve H_2S gazlarının 0 ppm değerinde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi hava akışının aynaya yakın bölgelerde yaklaşık 3 m/s hızlarında ve güçlü olmasıdır. Böylece aynaya yakın bölgelerdeki gazlar süpürülmüştür.

1. analizde görüldüğü üzere tünelin aynadan itibaren yaklaşık 400. metresinde CO_2 ve H_2S gazlarında kaynak üzerinde yaklaşık 8000 ppm ve 40 ppm'e kadar birikmeler görülmüştür. Bunun sebebi akış hızının o bölgelerde 0 m/s değerine yaklaşmasıdır.

2. analizde eklenen fan, tünelin çıkışına yakın ve gazların 0 ppm değerinde olduğu bölgede (tünelin çıkışından 100 m) konumlandırıldığı için gazların tahliye edilmesine pozitif katkı sağlayamamıştır.

Eklenen 2. fanın konumunun kaynağa yaklaştırılması (tünelin çıkışından 375 m) ve bağlı olduğu fan tüpün uzatılmasıyla beraber gazların süpürülme performansı gözle görülür şekilde iyileşmiştir. 4. analizde tanımlanan 2. fandan itibaren tüneldeki CO_2 ve H_2S gazları 0 ppm değerindedir.

1. fana bağlı olan fan tüpün 765 m uzunluktan 790 m uzunluğa çıkarılması gazların süpürülme performansında beklenen etkiyi yaratamamıştır. Bu havalandırma çalışmasında etkili olan parametrenin 2. fanın konumu olduğu görülmüştür. 2. fan kaynağa ne kadar yakın konumlandırılırsa gazlar ortamdaki o kadar iyi uzaklaştırılmaktadır.

Analizlerin sonuçları, altyapı projelerinde kazı esnasında karşılaşılan gaz sızıntılarının etkin bir şekilde uzaklaştırılmasında uygun havalandırma tasarımının önemini

vurgulamaktadır. Fan yerleşimi, kanal konfigürasyonları ve hava akış hızlarının optimize edilmesiyle, HAD simülasyonları tünel ortamlarında toksik gazların birikimini en aza indirme potansiyelini göstermiştir.

Bu çalışma, HAD metodolojisinin, gaz dağılımının dinamikleri hakkında değerli bilgiler sağladığını ve insan sağlığını ve çevreyi korumak amacıyla etkin havalandırma sistemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırdığını göstermektedir. Çalışmada gerçekleştirilen analizler, gaz sızıntılarının neden olduğu zorlukların üstesinden gelinmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin önemini vurgulamakta ve bu tür projelerin güvenliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamadaki rolünü ön plana çıkarmaktadır.

Aynı şekilde, farklı geometrilerde, yapılarda ve kaynak türlerinde meydana gelebilecek gaz ve sıvı sızıntılarının uzaklaştırılması için farklı yöntemlerin analizi ve test edilmesi de HAD yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Böylece, zaman ve kaynak yönetimi verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir.

KATKI BELİRTME

Bu makale, TUBITAK TEYDEB 3220754 numaralı "Yer Altı Madenlerinde Yangınla Mücadelede Azot Tüplerinin Kullanımı" adlı proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan türetilmiştir. Yazarlar makaleye yaptıkları katkılardan dolayı hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Brune, J. F. (1996). Mine Ventilation Systems. In: Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V., & Wang, Y. J. (Eds.), Mine Ventilation and Air Conditioning. Wiley-Interscience.

Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications.

O'Sullivan, M. J., Pruess, K., & Lippmann, M. J. (2001). State of the Art of Geothermal Reservoir Simulation. *Geothermics*, 30(4), 395-429.

ANSYS Training Courses (2016). SpaceClaim Introduction, Meshing Introduction, Fluent Introduction

Çengel Y. A., Cimbalek J. M. (2004). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications

Goodfellow H. D., Kosonen R. (2020). Industrial Ventilation Design Guide: Volume 1: Fundamentals

Liu C., Yeoh G. H., Tu J. (2007). Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach

Ferziger, J.H., & Perić, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*.