FAN ENGINEERING

AIRONN

Teknik MAKALE

Uzun Karayolu Tünellerinde Entegre Havalandırma Sistemlerinin Yangın ve Günlük İşletme Senaryoları Açısından Performans Analizi

(Çalışma 12 km' lik bir tünel için yapılmıştır.)

İçindekiler

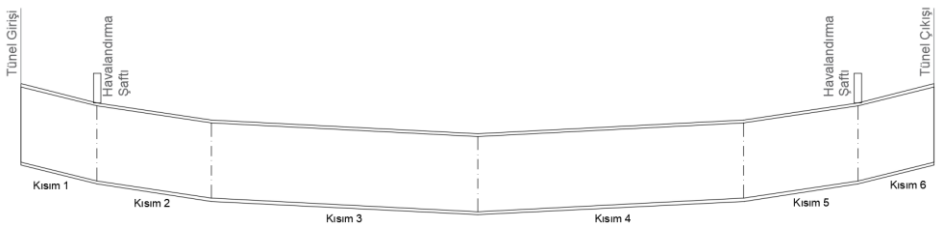
Giriş 2
Ortam Şartları: Sıcaklık ve Rüzgâr Bilgisi 3
Yangın Yükü 4
Trafik Bilgisi 5
Havalandırma Sistemi 6
Kritik Hız Hesabı : 9
Günlük Havalandırma Hesaplama Sonuçları 11
Yangın Senaryolarının İncelenmesi 12
Günlük Havalandırma Analizi 17
Sonuç – Değerlendirme 19

Giriş

Tünel havalandırma sistemleri, güvenli trafik akışı ve acil durum yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu sistemler genel olarak boyuna (longitudinal) havalandırma ve enine (transversal) havalandırma olmak üzere iki temel yöntemle sınıflandırılmaktadır. Boyuna havalandırma, jet fanlar veya aksiyal fanlar kullanılarak hava akışının tünel boyunca tek yönde hareket ettirilmesine dayanır ve özellikle yangın dumanının hızlı tahliyesinde etkilidir. Enine havalandırma ise tünel kesiti boyunca taze hava beslemesi ve kirli havanın emilmesi prensibine göre çalışır; bu sayede daha homojen hava dağılımı sağlanır. Modern tünel projelerinde, bu iki yöntemin birlikte ve bütünleşik biçimde kullanılması hem normal işletme koşullarında hem de yangın senaryolarında optimum performans elde edilmesine imkân tanımaktadır.

Bu çalışmada, boyuna ve enine havalandırma yöntemlerinin entegre biçimde uygulandığı örnek bir tünel üzerinde hem günlük işletme koşulları hem de yangın senaryosu incelenmiştir.

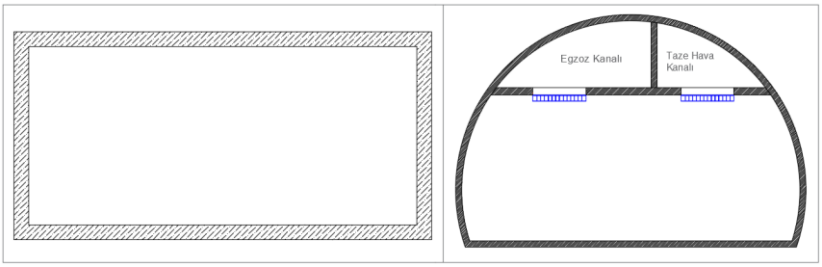
Tünelin toplam uzunluğu 12 km'dir. Tek yönlü trafik akışına sahip olan tünel, iki şeritli olarak tasarlanmıştır. Tünel güzergâhı boyunca eğimler sabit değildir; toplamda altı farklı eğim bölgesi bulunmaktadır. Tünel girişinden itibaren ilk kısımda eğim aşağı yönlü iken, orta bölümden itibaren eğim yukarı yönlüdür. Eğimlerin dağılımı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1 : Tünel boyuna kesiti şematik çizimi

Kesit geometrisi açısından tünel iki farklı yapıya sahiptir. Giriş ve çıkış bölgelerinde dikdörtgen tip kesit bulunurken, orta kısımda yaklaşık 10 km uzunluğunda dairesel kesit yer almaktadır. Bu kesit tipleri Şekil 2'de şematik olarak sunulmuştur.

Ayrıca, tünelin geometrik özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu tabloda; kesit tipi, kesit alanı, yaş çevre uzunluğu ve farklı eğim bölgelerine karşılık gelen tünel uzunlukları detaylı olarak verilmektedir.



Şekil 2 : Tünel enine kesiti şematik çizimi

Datalar							
	Kesit Tipi	Alan (m2)	Çevre (m2)	Yükseklik (m)	Uzunluk (m)	Eğim (%)	Eğim Yönü
Kısım 1	Tip 1	80	38	6	1000	2.5	-
Kısım 2	Tip 2	55	31	5	1500	1.5	-
Kısım 3	Tip 2	65	31	5	3500	0.50%	-
Kısım 4	Tip 2	65	31	5	3500	0.50%	+
Kısım 5	Tip 2	65	31	5	1500	1.5	+
Kısım 6	Tip 1	80	38	6	1000	2.5	+

Tablo 1 : Tünelin geometrik bilgileri

Ortam Şartları: Sıcaklık ve Rüzgâr Bilgisi

Tünel içindeki çevresel koşullar; mevsimsel, günlük ve hatta saatlik olarak değişiklik gösterebilmektedir. Hesaplamalarda tutarlılık sağlanabilmesi amacıyla sabit referans değerler kabul edilmiştir. Bu kapsamda, ortam sıcaklığı 15 °C, rüzgâr hızı ise 4 m/s olarak alınmıştır. Bu değerler, mühendislik hesaplamalarında sık kullanılan ortalama atmosfer koşullarını temsil etmektedir.

Rüzgârın tünel üzerindeki etkisi, portal giriş ve çıkışlarında basınç farkı yaratmaktadır. Bu çalışmada, hâkim rüzgârın tünel çıkış portalına dik yönde etki ettiği varsayılmıştır. Bu varsayım doğrultusunda:

Tünel giriş portalında: Atmosferik basınç esas alınmıştır (referans basınç = 0 Pa).

Tünel çıkış portalında: Rüzgârın oluşturduğu dinamik basınç farkı dikkate alınmıştır.

Dinamik basınç, aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho\, V^2$$

Burada;

ρ = hava yoğunluğu (≈ 1.2 kg/m³, 15 °C için),

v = rüzgâr hızı (4 m/s),

ΔP = dinamik basınç (Pa).

Hesaplama sonucu:

$$\Delta P = \frac{1}{2} * 1{,}2 * 4^2 = 9{,}6 \text{ Pa}$$

Dolayısıyla, tünel çıkış portalında atmosfer basıncına ek olarak +9.6 Pa'lık bir fark basınç oluşmaktadır. Bu basınç farkı, tünel içindeki hava akışını doğrudan etkilemekte ve havalandırma hesaplamalarında sınır koşulu olarak kullanılmaktadır.

Yangın Yükü

Tünelden binek araçlar, hafif ticari araçlar, otobüsler ve ağır ticari araçlar geçiş yapmaktadır. Araçların yangın yükleri, taşıt tipine ve taşıdıkları yüklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kritik senaryonun belirlenebilmesi için, hesaplamalarda ağır ticari araçların yangın yükü esas alınmıştır. PIARC (World Road Association), dünya genelinde yol tünelleri için standartlar ve rehberler geliştiren uluslararası bir organizasyondur. 2017 yılında yayımladığı "Design Fire Characteristics for Road Tunnels" dokümanı, farklı araç tipleri için tavsiye edilen yangın yüklerini sunmaktadır. PIARC'a göre araç tiplerine göre yangın yükleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Araç Tipleri	Yangın Yükü (MW)
Binek Araç	5-10
Hafif Ticari Araç	15
Otobüs	20
Ağır Ticari Araç (25 tona kadar)	30-50
Ağır Ticari Araç (25-30 ton)	70-150
Petrol tankeri	200-300

Tablo 2 : PIARC' a göre Araçların Yangın Yükleri

Farklı çalışmalar da benzer araç tipleri için yangın yükü değerleri sunmaktadır. Örneğin:

- TNO Fire Safety (Hollanda, 2015): Ağır ticari araçlar için 25–35 MW, otobüsler için 15–25 MW, binek araçlar için 5–12 MW.
- SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2016): Ağır ticari araçlar için 30–50 MW, hafif ticari araçlar için 10–20 MW, binek araçlar için 5–10 MW.

Bu kaynaklar, PIARC verileri ile büyük ölçüde uyumlu olup, kritik senaryonun ağır ticari araç yangın yükü esas alınarak yapılmasını desteklemektedir.

Tablodan görüldüğü üzere, yangın yükü 200–300 MW olan petrol tankerleri bu tünelde kullanılmamaktadır. Bu nedenle, havalandırma tasarımında ağır ticari araçlara ait 30 MW yangın yükü dikkate alınmıştır. Yangın sonucu ortaya çıkan ısı, ışınım (radiation), taşınım (convection) ve iletim (conduction) mekanizmaları ile kontrol hacmine ve hacim sınırlarına yayılır. Hesaplamalarda, toplam ısıl yükün yaklaşık %66'sının taşınım yoluyla aktarıldığı kabul edilmiştir.

Trafik Bilgisi

Tünel içi havalandırma tasarımı açısından araç kompozisyonu kritik bir parametredir. Bunun temel nedeni, farklı araç tiplerinin emisyon profillerinin ve ısı üretim kapasitelerinin farklılık göstermesidir. Örneğin:

- Binek araçlar: Motor hacimleri ve yakıt tüketimleri daha düşük olduğu için karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyonları sınırlıdır.
- Hafif ticari araçlar: Daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olup, emisyon değerleri binek araçlardan bir miktar daha yüksektir.
- Ağır ticari araçlar: Büyük motor hacimleri ve yüksek yük taşıma kapasiteleri nedeniyle CO, NO_x, PM ve ısı üretimi açısından en yüksek değerlere sahiptir. Yangın senaryolarında da yanıcı yükleri çok daha fazladır.

Bu nedenle, tünel içindeki araç tipi dağılımı, hem normal işletme koşullarında hava kalitesinin değerlendirilmesi hem de acil durumlarda (örneğin yangın) duman ve ısı tahliye sistemlerinin kapasite tasarımının belirlenmesi açısından doğrudan etkilidir .

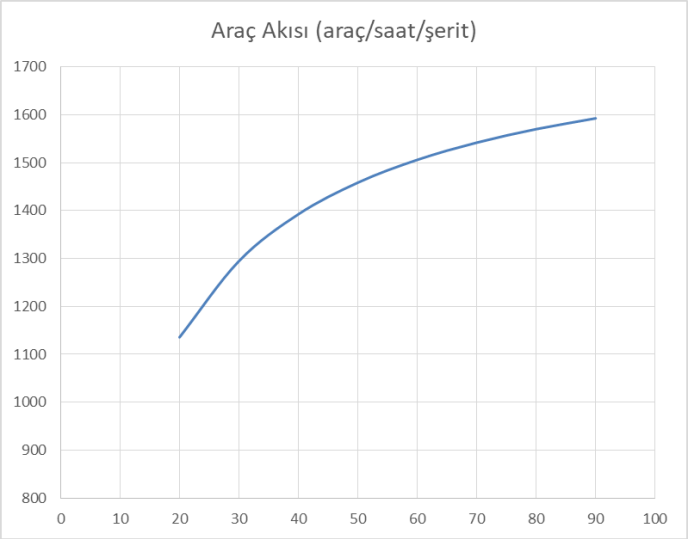
Tünellerdeki araç kompozisyonu ve trafik akısı, bölgesel mevsimsel değişiklikler, günün saatleri ve şehir içi yoğun trafik periyotları nedeniyle sürekli değişim göstermektedir. Özellikle sabah ve akşam saatlerinde trafik yoğunluğu önemli ölçüde artmaktadır.

Bu çalışmada, hesaplamalar için aşağıda belirtilen ortalama trafik kompozisyonu ve kapasiteleri esas alınmıştır:

Binek Araç	75	%
Hafif Ticari Araç	10	%
Ağır Ticari Araç	15	%

Tablo 3 : Taşıtların Tiplerine Göre Dağılımı

Taşıtların hızlarına bağlı olarak şerit başına trafik akısı, simülasyon ve gözlem verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu dağılım, tünel içi havalandırma ve duman tahliye sistemlerinin tasarımında kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3 : Taşıt hızlarına göre trafik akısı

Havalandırma Sistemi

Bu çalışmada, tünel havalandırması çift yöntemli bir yaklaşım ile tasarlanmıştır. Hem enine (transversal) havalandırma hem de boyuna (longitudinal) havalandırma sistemleri birlikte kullanılmıştır.

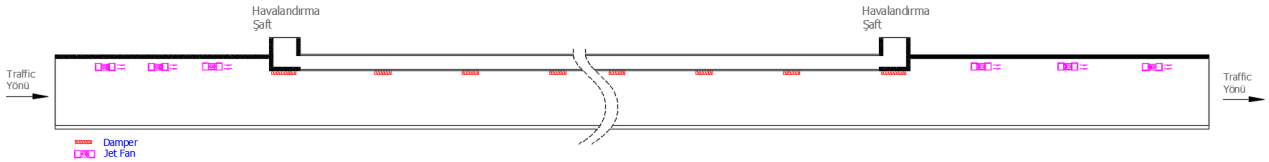
- *Enine havalandırma:* Tünel boyunca yerleştirilen egzoz ve taze hava kanalları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sistem, tünel kesiti boyunca homojen hava dağılımını ve kirli havanın uzaklaştırılmasını sağlar.

- *Boyuna havalandırma:* Tünel giriş ve çıkışlarında yerleştirilen jet fanlar sayesinde uygulanmaktadır. Jet fanlar, tünel boyunca hava akışını yönlendirerek hem normal işletme koşullarında hem de yangın durumlarında duman ve sıcak havanın tünel dışına tahliyesine olanak tanır.

Bu sayede, tünel içinde enine ve boyuna havalandırmanın avantajları birleştirilmiş ve hem normal trafik

işletmesi hem de acil durumlar için optimum havalandırma performansı sağlanmıştır.

Tünelde kullanılan havalandırma ekipmanlarının şematik yerleşimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 4). Bu şematik düzen, tünel boyunca hava akış yönlerini ve ekipman konumlarını net bir biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4 : Tünel Havalandırması Tasarımı

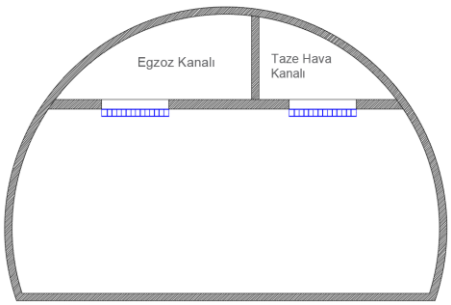
Tünel havalandırması kapsamında, tünel tavanında bir egzoz kanalı ve bir taze hava kanalı yer almaktadır. Bu kanallar, tünel giriş ve çıkış bölgelerinde bulunan aksiyal fanlara bağlı olarak çalışmaktadır. Kanalların teknik özellikleri ve yerleşimi aşağıdaki gibidir:

Uzunluk: Egzoz ve taze hava kanalları, tünelin yaklaşık 11 km'lik bölümünü kapsamaktadır.

Damperler: Tüm kanal boyunca, hava akışının kontrolü ve yönlendirilmesi amacıyla havalandırma damperleri yerleştirilmiştir. Bu damperler, farklı trafik ve acil durum senaryolarında hava dağılımının optimize edilmesini sağlamaktadır.

Bağlantı sistemi: Kanallar, aksiyal fanlar aracılığıyla tünel içi hava hareketini desteklemekte ve hem normal işletme koşullarında hem de yangın durumunda etkili duman tahliyesi sağlamaktadır.

Bu düzenleme sayesinde tünel içinde enine havalandırma etkili bir şekilde sağlanmakta, taze havanın dağılımı ve kirli havanın uzaklaştırılması kontrol altında tutulmaktadır.



Şekil 5 : Tünel kesitindeki havalandırma kanalları

Tünel havalandırma sistemi kapsamında, boyuna havalandırma jet fanlar aracılığıyla sağlanmaktadır. Jet fanlar,

tünel giriş ve çıkışlarında senaryoya bağlı olarak hava akışını yönlendirmek amacıyla yerleştirilmiştir. Tünel giriş ve çıkışlarında ikişerli gruplar halinde 3 grup jet fan bulunmaktadır. Toplamda 12 adet jet fan kullanılmaktadır; tünel girişinde 6 adet, tünel çıkışında 6 adet. Kullanılan jet fanların nominal itki gücü 1450 N'dur. Bu fanlar, tünel boyunca hava akışını boyuna yönlendirmek ve gerektiğinde duman tahliyesi sağlamak için tasarlanmıştır.

Tünel tavanındaki havalandırma damperleri sayesinde, egzoz veya taze hava kanalları üzerinden enine havalandırma sağlanabilmektedir. Bu sistemin kapasitesi:

Egzoz kapasitesi: 200 m^3/s

Taze hava kapasitesi: 100 m^3/s

Egzoz ve taze hava fanları tersinir çalışma yeteneğine sahiptir. Bu sayede, Taze hava fanları, gerekli durumlarda tahliye amacıyla çalıştırılabilir. Egzoz fanları, gerektiğinde taze hava beslemesi için kullanılabilir. Bu tasarım yaklaşımı, hem normal işletme koşullarında hem de acil durum senaryolarında esnek ve etkin havalandırma performansı sağlamaktadır.

Yangın senaryosu :

Tünel içindeki yangın senaryoları, farklı konumlarda oluşabilecek yangın durumlarını incelemek amacıyla üç ayrı noktada modellenmiştir:

Yangın Konumu 1: Tünel girişinden 500 m ileride

Yangın Konumu 2: Tünel ortasında, tünel girişinden 6 km ileride

Yangın Konumu 3: Tünel çıkışına 500 m mesafede

Bu senaryolar kapsamında, havalandırma sisteminin çalışması ile tünel içindeki hava hızları ve duman tahliye performansı değerlendirilmiştir.

Tünel girişinde yangın meydana geldiğinde, jet fanlar kullanılarak duman, enine havalandırma kanallarındaki damperlere yönlendirilir ve damperler aracılığıyla tahliye edilir. Bu senaryoda, tünel girişinden doğal taze hava girişi sağlanmaktadır.

Tünelin ortasında yangın oluştuğunda, dumanın tahliyesi için egzoz kanalı damperleri açılmakta ve tünel içerisindeki sıcak gazlar tahliye edilmektedir. Aynı zamanda taze hava damperleri ile dumanın seyrini kontrol edecek şekilde taze hava beslemesi yapılmaktadır.

Tünel çıkışında yangın meydana geldiğinde, duman jet fanlar aracılığıyla çıkış portalından tahliye edilmektedir. Bu sırada taze hava beslemesi, enine havalandırma damperleri üzerinden sağlanmaktadır.

Yangın senaryolarında enine havalandırma sistemlerinin tünel kesitinde hava hızının 1.5–2 m/s arasında olması önerilmektedir. Bu hız aralığı, dumanın kontrol altında tutulması ve tünel içinde güvenli tahliye yollarının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Günlük durum senaryosu

Günlük işletme koşullarında, tünel içindeki egzoz gazları ve partikül dağılımı, trafik kapasitesi ve araç kompozisyonuna bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, PIARC 2019 referansı kullanılarak karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO_2) ve partikül madde (PM) konsantrasyonları sırasıyla ppm ve mg/m³ cinsinden belirlenmiştir.

Tünel içi emisyonlar, tünelde sıkışık trafik yaşanmayacağı varsayımıyla, araç hızlarının 20–90 km/h aralığında olduğu durumlar için modellenmiştir. Bu hız aralığı, farklı trafik yoğunluklarında tünel hacmine yayılan emisyon miktarını belirlemeye ve havalandırma sisteminin kapasiteye cevabını analiz etmeye olanak sağlamaktadır.

Hesaplamalar, özellikle kritik senaryoya göre sabit trafik akısı ve havalandırma kapasitesi altında tünel ortamına yayılan gaz konsantrasyonlarını ortaya koymaktadır. Bu analiz, havalandırma sisteminin günlük işletme koşullarında yeterliliğini ve tünel içi hava kalitesini değerlendirmek açısından temel bir parametre oluşturmaktadır.

Kritik Hız Hesabı :

Uzunlamasına (boyuna) tünel havalandırma sistemlerinde birincil tasarım koşulu, tünel içindeki geri katmanlaşmayı (backlayering) önlemektir. Geri katmanlaşma, yangın veya yoğun egzoz gazı durumlarında dumanın veya kirli havanın yangın kaynağı yönüne doğru geri akması olarak tanımlanır ve tünel içinde tehlikeli bir durum yaratır.

Bu durumu önlemek için belirlenen minimum hava hızı, tünel boyunca dumanın geri akmasını engelleyecek şekilde kritik hız (critical velocity) olarak adlandırılır.

Hesaplamalarda kullanılan kritik hız denklemi, NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (2023) referansına göre aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$V_c = K1 * Kg * \left[\frac{gHQ}{\rho_\infty c_P A T_f}\right]^{1/3}$$

$$Tf = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_P A V_c}\right) + T$$

$$Kg = \begin{cases} 1 + 0{,}037 * (f)^{0.8} & f < 0 \\ 1 & f \geq 0 \end{cases}$$

V_c	Kritik Hız (m/s)
A	Tünel Kesit Alanı (m^2)
Q	Isıl Güç (W)
C_p	Sabit basınç altında havanın özgül ısı katsayısı (J/(kg*K))
H	Tünel yüksekliği (m)
ρ_∞	Hava yoğunluğu (kg/m3)
T_f	Yangın Bölgesi Sıcaklığı (K)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
f	Tünel eğimi

	Kısım 1	**Kısım 6**
Yangın Yükü (mW)	30.00	30.00
Taşınımsal Isı Oranı	0.67	0.67
Tünel Alanı (m2)	80.00	80.00
Çevre (m)	38.00	38.00
Yükseklik (m)	6.00	6.00
Hidrolik Çap (m)	8.421	8.421
Eğim (%)	-2.50	2.50
Ortam Sıcaklığı (°K)	288.15	288.15
Yoğunluk (kg/m3)	1.20	1.20
Özgül Isı (kj/kg K)	1005.00	1005.00
Yer çekimi ivmesi (m/s2)	9.81	9.81
K1	0.74	0.74
Kg	1.077843725	1
λ	0.02	0.02
Kritik Hız (Vc) - m/s	2.560	2.360
Kabul Edilen Hız	3.00	3.00
Debi (m3/s)	240	240

Tablo 4 : Kritik Hız Hesabı

Günlük Havalandırma Hesaplama Sonuçları

Tünel boyunca altı farklı eğim bölgesi bulunmaktadır ve eğimler tünel boyunca değişiklik göstermektedir. Bu eğim değişiklikleri, tünel içi hava hareketi ve egzoz gazlarının dağılımı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Trafik akışı sırasında, tünel hacmine yayılan egzoz gazlarının miktarı her bir eğim bölgesinde hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, araç kompozisyonu, trafik hızı ve tünel geometrisi göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Taşıt Hızı	Kısım 1	Kısım 2	Kısım 3	Kısım 4	Kısım 5	Kısım 6	Tünel
	Ortama Yayılan CO Miktarı (g/h)						Toplam CO [g/h]
20	1174	1986	5197	5954	2959	2331	19600
30	843	1430	3741	4192	2010	1507	13724
40	749	1298	3452	3988	1987	1562	13038
50	664	1160	3127	3627	1804	1401	11782
60	558	994	2763	3303	1689	1332	10639
70	597	1101	3148	3824	1970	1596	12236
80	610	1128	3273	4136	2238	1890	13274
90	589	1120	3291	4385	2527	2366	14278

Tablo 5 : Tünele Yayılan CO Miktarı

Taşıt Hızı	Kısım 1	Kısım 2	Kısım 3	Kısım 4	Kısım 5	Kısım 6	Tünel
	Ortama Yayılan NO2 Miktarı (g/h)						Toplam NO2 [g/h]
20	140	235	601	655	304	219	2152
30	108	187	495	549	257	188	1785
40	84	154	436	502	239	179	1593
50	68	130	384	453	219	168	1422
60	60	120	366	460	241	193	1439
70	54	115	365	481	263	215	1494
80	51	112	370	512	293	246	1583
90	53	116	384	528	301	251	1633

Tablo 6 : Tünele Yayılan NO2 Miktarı

Taşıt Hızı	Kısım 1	Kısım 2	Kısım 3	Kısım 4	Kısım 5	Kısım 6	Tünel
	Ortama Yayılan PM Miktarı (g/h)						Toplam PM [g/h]
20	429	667	1610	1659	730	501	5595
30	438	678	1636	1691	749	517	5709
40	443	688	1667	1735	775	539	5848
50	448	697	1693	1767	792	551	5947
60	448	697	1696	1780	805	567	5992
70	456	710	1724	1815	828	586	6119
80	464	727	1787	1892	863	612	6344
90	468	736	1829	1947	889	629	6497

Tablo 7 : Tünele Yayılan PM Miktarı

Tünel içindeki egzoz gazlarının konsantrasyonunun kabul edilebilir sınır değerlerin altına düşürülmesi, tünel havalandırma sisteminin temel tasarım hedeflerinden biridir. Bu kapsamda, tünel hacmine yayılan gazların istenen sınır değerlerin altına seyreltilmesi için gerekli hava debisi hesaplanmıştır.

Hesaplamalar, aşağıdaki parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir:

- Araç tipi ve trafik kompozisyonu
- Trafik hızı ve akısı
- Tünel geometrisi ve eğim değerleri
- Hedef gaz konsantrasyonları (CO, NO_2, PM)

			Taşıt Hızı (km/h)							
			20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00
Tünel Kısımlar	Uzunluk (m)	Eğim %	Gerekli Hava Debisi (m3/s)							
Kısım 1	1000.00	-2.50	21.38	17.37	17.57	17.76	17.76	18.11	18.41	18.58
Kısım 2	1500.00	-1.50	35.88	28.63	27.30	27.65	27.64	28.17	28.84	29.21
Kısım 3	3500.00	-0.50	91.86	75.65	66.63	67.19	67.30	68.40	70.89	72.56
Kısım 4	3500.00	0.50	100.06	83.99	76.67	70.11	70.64	73.54	78.20	80.76
Kısım 5	1500.00	1.50	46.42	39.35	36.49	33.54	36.87	40.25	44.84	46.02
Kısım 6	1000.00	2.50	33.42	28.74	27.30	25.61	29.48	32.87	37.60	38.40
Toplam	12000.00	-	329.01	273.73	251.95	241.87	249.69	261.34	278.78	285.52

Tablo 8 : Günlük Havalandırma Taze Hava İhtiyacı

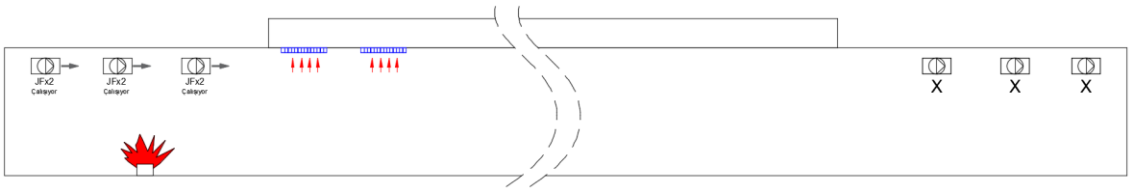
Yangın Senaryolarının İncelenmesi

Senaryo 1:

Yangın, tünel girişinden 500 metre ileride meydana gelmiştir. Bu senaryoda, tünel içi hava akışının ve duman tahliyesinin analizi yapılmıştır. Tünel girişinden itibaren 200 m, 400 m ve 600 m noktalarında, ikişerli gruplar halinde jet fanlar aktif olarak çalıştırılmaktadır. Tünel çıkışındaki jet fanlar bu senaryoda devreye alınmamıştır.
Egzoz ve Taze Hava Kanalları:

- Egzoz kanalı fan kapasitesi: 200 m^3/s
- Taze hava kanalı fan kapasitesi: 100 m^3/s

Bu senaryoda, hem egzoz kanalı hem de taze hava kanalı, duman tahliyesi amacıyla çalıştırılmaktadır. Toplamda, 300 m^3/s'lik bir hava debisi ile dumanın tünelden tahliyesi sağlanmaktadır.
Bu düzenleme sayesinde, yangın tünel girişinde meydana gelse bile, jet fanlar ve kanal sistemleri koordineli çalışarak dumanın tünel içindeki geri akışını önlemekte ve taze havanın girişini sağlamaktadır.

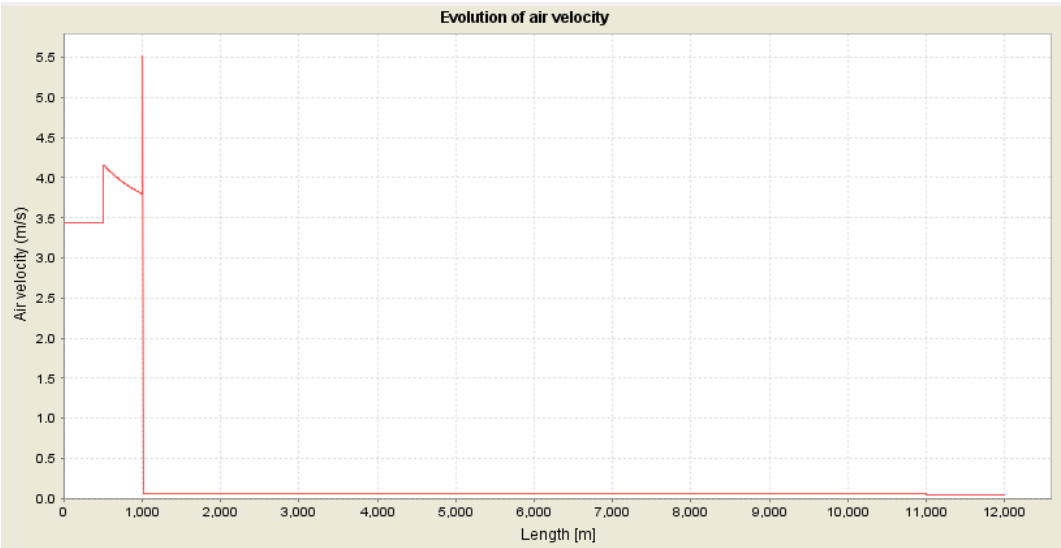


Şekil 6 : Yangın Senaryo 1 Şematik Gösterimi

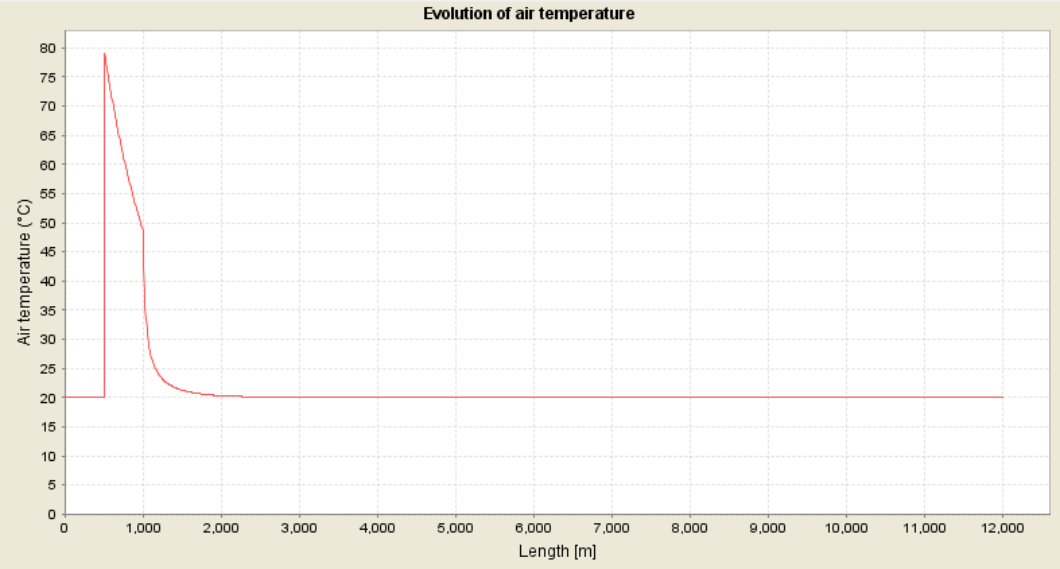
Senaryo 1 kapsamında, tünel girişinden 500 metre ileride meydana gelen yangın için hava hızı ve hava sıcaklığı dağılımı analiz edilmiştir. Analiz, jet fanlar ve tünel tavanındaki egzoz ve taze hava kanallarının çalışması dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları, duman tahliyesinin etkinliğini ve tünel içi güvenli ortamın sağlanmasını göstermektedir. Elde edilen veriler, hava akış hızlarının ve sıcaklık profillerinin tünel kesitine göre dağılımını ortaya koymaktadır.

Şekil 7 ve Şekil 8, sırasıyla tünel içindeki hava hızları ve sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu grafikler, sistemin kritik bölgelerde duman kontrolü ve taze hava beslemesini sağlama kapasitesini doğrulamaktadır.



Şekil 7 : Yangın Senaryo 1 Tünel Boyunca Hava Hızı



Şekil 8 : Yangın Senaryo 1 Tünel Boyunca Hava Sıcaklığı

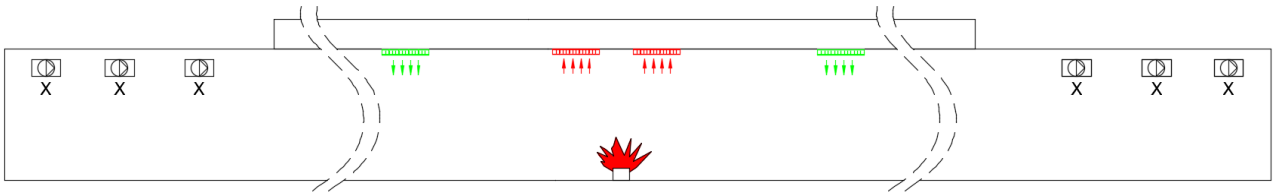
Senaryo 2 :

Yangın, tünelin ortasında, tünel girişinden 6.000 metre ileride meydana gelmiştir. Bu senaryoda, tünel içi hava akışı ve duman tahliyesi egzoz ve taze hava kanalları aracılığıyla analiz edilmiştir. Tünel girişinde ve çıkışında bulunan **hiçbir jet fan** bu senaryoda çalıştırılmamaktadır. Bu yaklaşım, yangının tünel ortasında meydana geldiği durumlarda boyuna hava akışının doğal kanal sistemi üzerinden sağlanması prensibine dayanmaktadır.

Egzoz ve Taze Hava Kanalları:

- Egzoz kanalı fan kapasitesi: 200 m^3/s (tam kapasite)
- Taze hava kanalı fan kapasitesi: 100 m^3/s (tam kapasite)

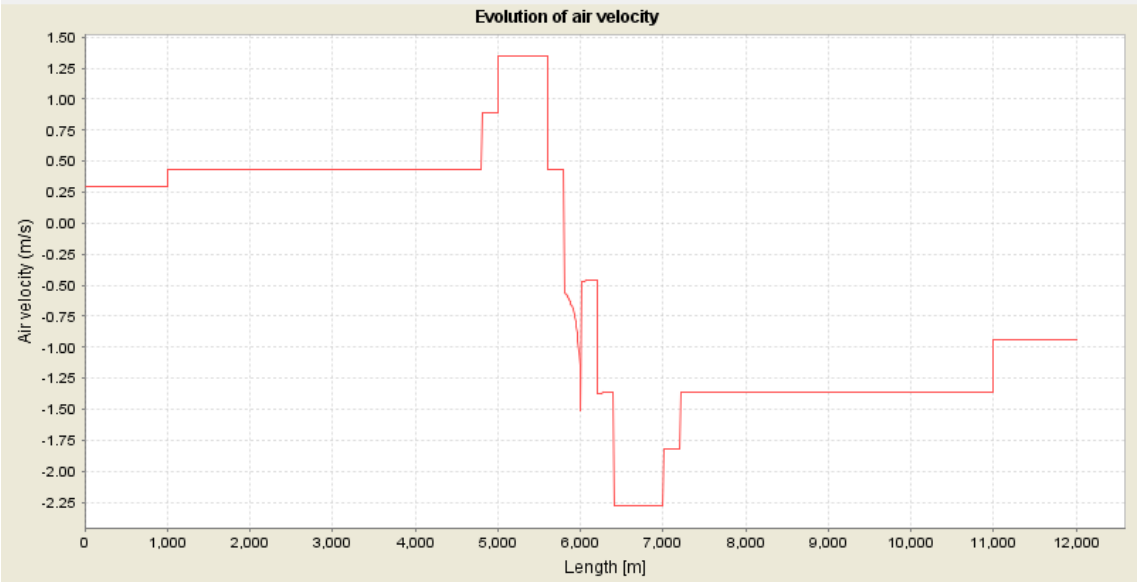
Bu senaryoda, egzoz kanalı duman tahliyesi için, taze hava kanalı ise hava beslemesi ve duman seyrinin kontrolü amacıyla çalıştırılmaktadır. Yangın senaryosunun şematik gösterimi, tünel giriş-orta-çıkış konfigürasyonu ve fan yerleşimleri Şekil 9'da sunulmuştur.



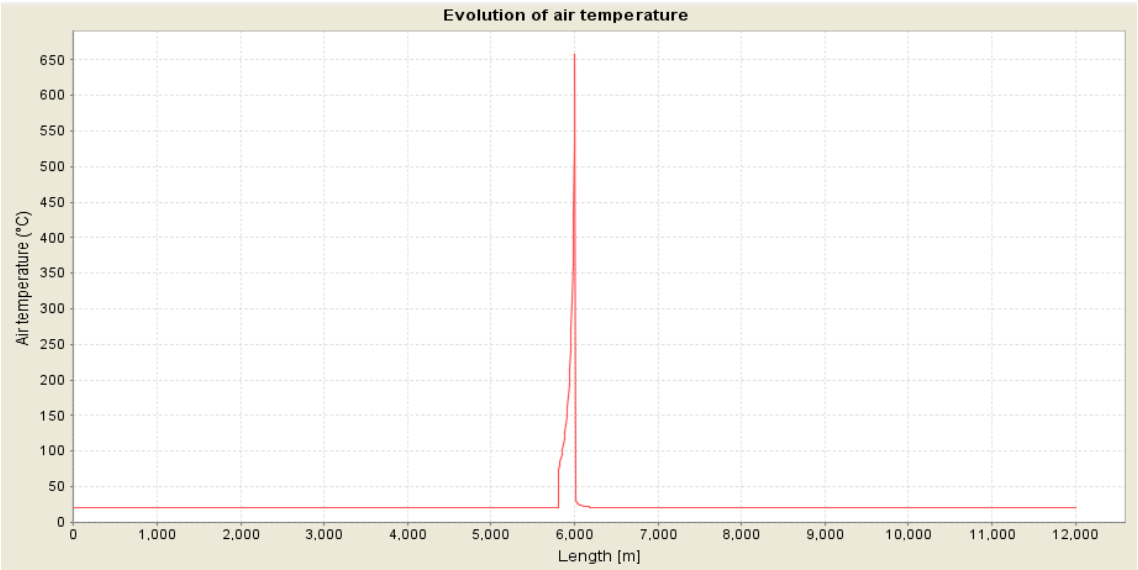
Şekil 9 : Yangın Senaryo 2 Şematik Gösterimi

Elde edilen sonuçlar, tünel ortasında meydana gelen yangınlarda duman tahliyesinin etkinliğini ve tünel içi güvenli hava koşullarının sağlanmasını göstermektedir.

Şekil 10 ve Şekil 11, sırasıyla tünel içindeki hava hızları ve sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu grafiklerle, enine havalandırma sisteminin, yangın tünel ortasında oluştuğunda duman kontrolü ve taze hava beslemesi açısından yeterliliği değendirilebilmektedir.



Şekil 10 : Yangın Senaryo 2 Tünel Boyunca Hava Hızı



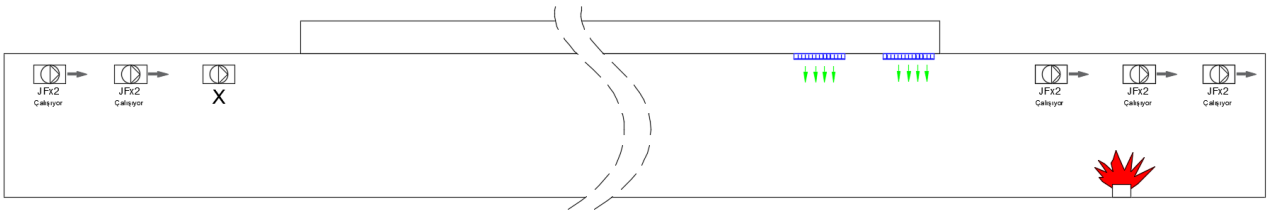
Şekil 11 : Yangın Senaryo 2 Tünel Boyunca Hava Sıcaklığı

Senaryo 3:

Bu senaryoda yangın, tünel çıkışına 500 metre kala meydana gelmiştir. Tünel girişinde bulunan jet fanlar yalnızca iki grup aktif olarak çalıştırılırken, tünel çıkışındaki altı adet jet fanın tamamı devreye alınmıştır. Bu düzenleme sayesinde, tünel çıkış portalı duman tahliyesi için etkin bir şekilde kullanılmakta ve dumanın tünel içine geri akışı önlenmektedir.

Taze hava beslemesi, tünel tavanındaki hava kanalları aracılığıyla toplam 150 m^3/s debi ile sağlanmaktadır. Bu hava akışı, dumanın seyreltilmesini ve tünel içindeki güvenli tahliye koşullarının korunmasını mümkün kılmaktadır. Jet fanlar ile enine havalandırma sisteminin koordineli çalışması, tünel içinde yangın kaynaklı dumanın etkin bir şekilde kontrol edilmesini ve tahliye edilmesini sağlamaktadır.

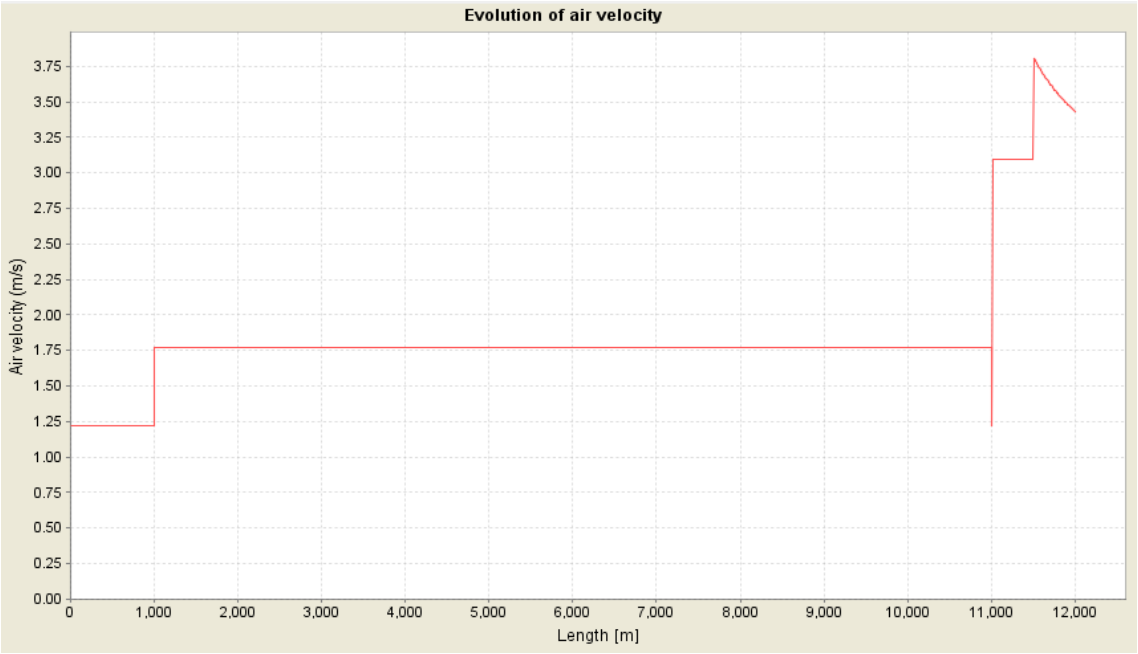
Yangın senaryosunun şematik gösterimi, Şekil 12'de sunulmuştur. Şekilde, tünel çıkışına yakın yangın konumu, aktif jet fan grupları ve taze hava kanalları aracılığıyla sağlanan hava beslemesi açıkça gösterilmektedir. Bu görsel, tünel çıkışındaki duman tahliyesi ve havalandırma sisteminin senaryoya göre nasıl çalıştığını görsel olarak desteklemektedir.



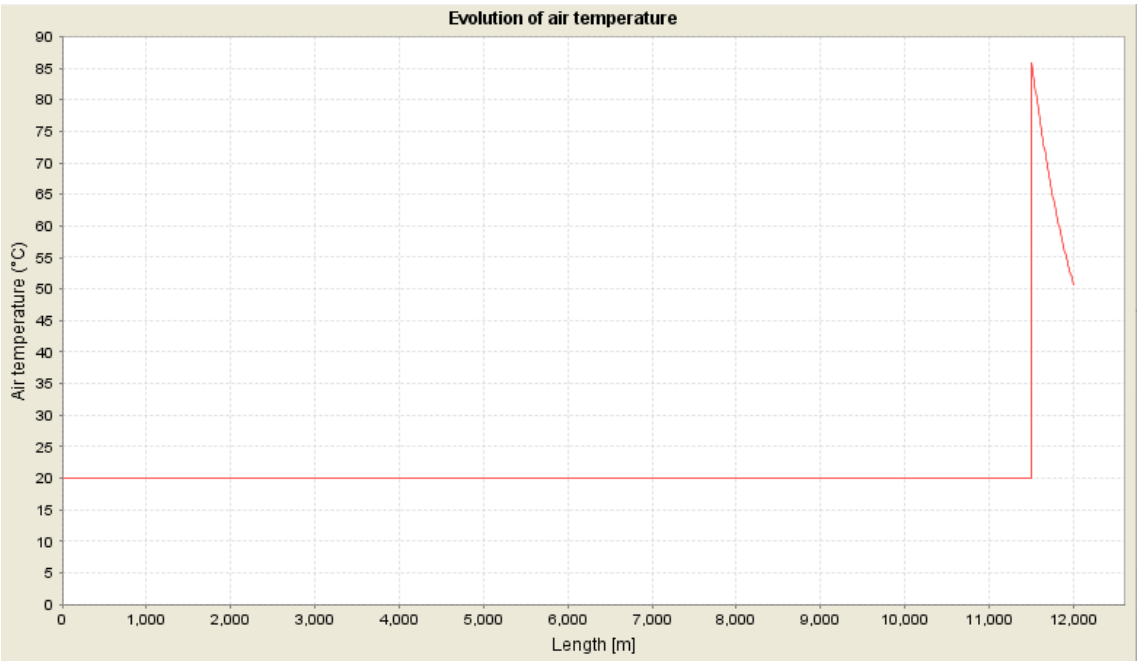
Şekil 12 : Yangın Senaryo 3 Şematik Gösterimi

Elde edilen sonuçlar, tünel çıkışına yakın yangınlarda duman tahliyesinin etkinliğini ve tünel içi güvenli hava koşullarının korunmasını göstermektedir. Analiz bulguları, tünel içindeki hava akış hızlarının ve sıcaklık profillerinin dağılımını ortaya koymaktadır.

Şekil 13 ve Şekil 14, sırasıyla tünel içindeki hava hızları ve sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu grafikler, havalandırma sisteminin, yangın çıkışa yakın meydana geldiğinde dahi duman kontrolü ve taze hava beslemesi açısından yeterli olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 13: Yangın Senaryo 3 Tünel Boyunca Hava Hızı



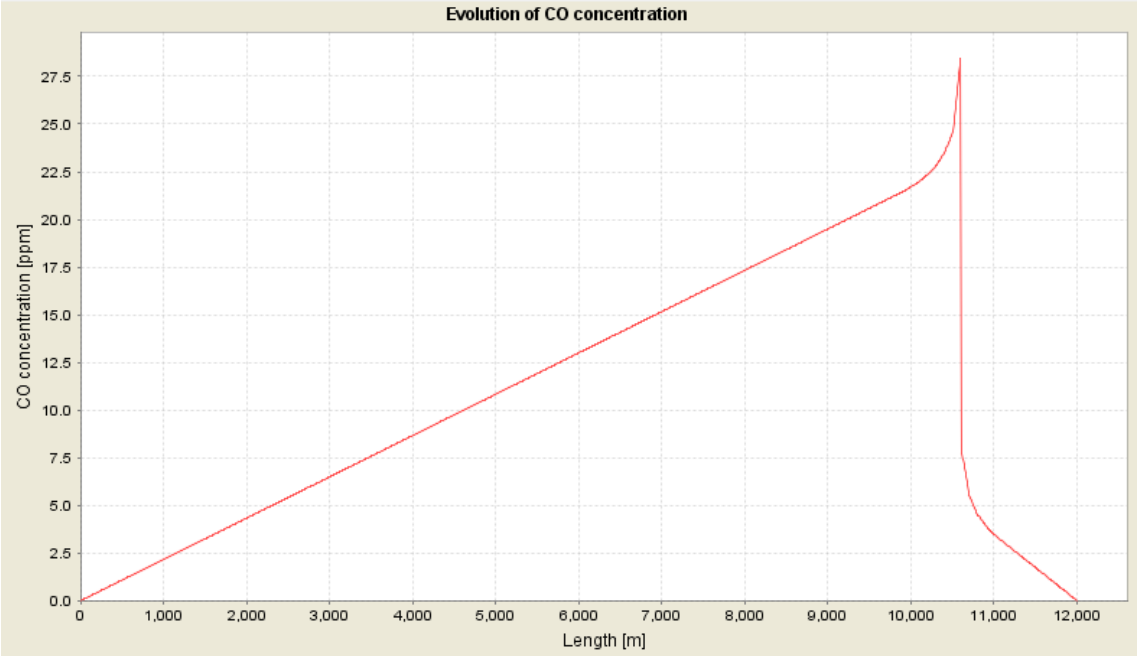
Şekil 14: *Yangın Senaryo 3 Tünel Boyunca Hava Sıcaklığı*

Günlük Havalandırma Analizi

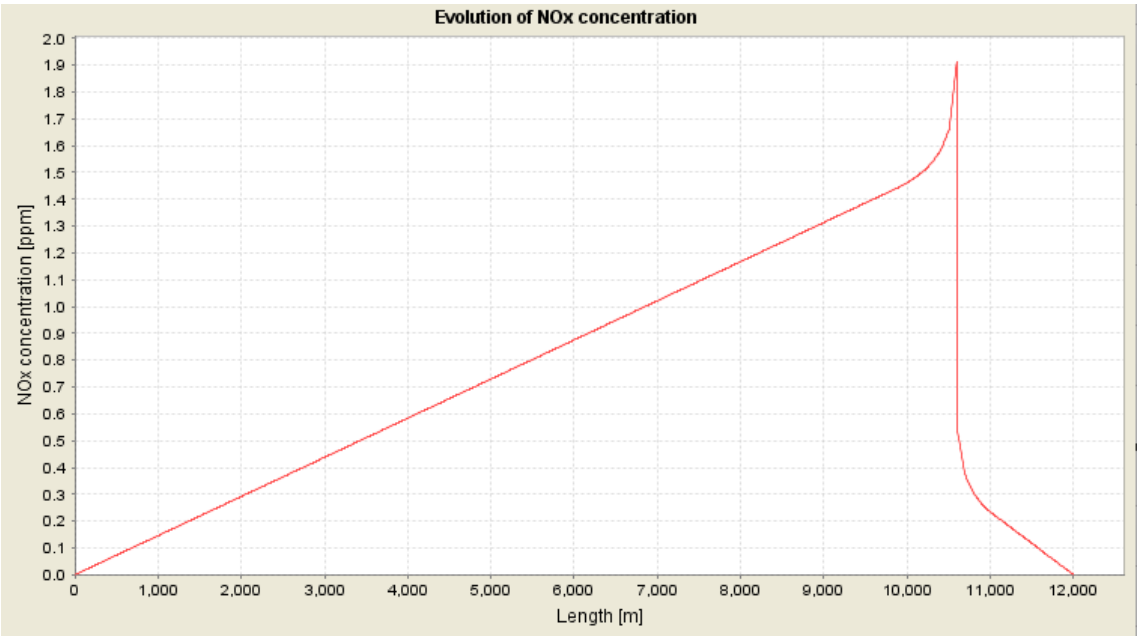
Günlük işletme koşullarında, tünel içindeki egzoz gazları ve partikül dağılımı, trafik kapasitesi ve araç kompozisyonuna bağlı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, tünelin 9.000–11.000 metreleri arasından toplam 300 m³/s debi egzoz edilmektedir. Tünel girişindeki üç grup jet fan, trafik yönünde çalıştırılmakta ve böylece boyuna hava akışı sağlanmaktadır.

Bu koşullar altında, tünel içindeki emisyon konsantrasyonları hesaplanmıştır. Hesaplamalar, özellikle karbon monoksit (CO) ve azot dioksit (NO_2) konsantrasyonlarını dikkate alarak gerçekleştirilmiştir.

Tünelin olağan günlük kullanımında, trafik hızı 20 km/s olarak kabul edilmiştir. Bu hızın seçilmesinin nedeni, emisyon gazlarının en fazla bu hızda üretiliyor olmasıdır. Bu hız ve trafik akısı için elde edilen CO ve NO_2 dağılımı, aşağıdaki görselde paylaşılmıştır (Şekil 15 ve Şekil 16). Görsel, havalandırma sisteminin, trafik akışına bağlı olarak tünel içindeki egzoz gazlarını etkin bir şekilde seyreltme kapasitesini göstermektedir.



Şekil 15: Günlük Durum 20 km/s Hızda CO konsantrasyonu



Şekil 16: Günlük Durum 20 kmh Hızda NO2 konsantrasyonu

Sonuç – Değerlendirme

Bu çalışmada, boyuna ve enine havalandırma sistemlerinin bütünleşik kullanıldığı 12 km uzunluğundaki tünelde, hem günlük işletme koşulları hem de yangın senaryoları analiz edilmiştir. Analizler, tünel geometrisi, eğim değerleri, trafik kompozisyonu ve emisyon karakteristikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Yangın senaryolarında, tünel girişinde, ortasında ve çıkışında meydana gelen yangınlar için farklı fan konfigürasyonları ve hava kanalı debileri uygulanmıştır. Analizler göstermiştir ki; jet fanlar ve tavan egzoz/taze hava kanalları koordineli olarak çalıştırıldığında, dumanın geri katmanlaşması önlenmekte ve tünel içinde güvenli hava koşulları sağlanmaktadır. Yangın konumuna bağlı olarak, kritik bölgelerde duman tahliyesi ve taze hava beslemesi etkin bir şekilde sağlanmıştır. Hava hızı ve sıcaklık analizleri, tüm senaryolarda sistemin performansını doğrulamaktadır.

Günlük işletme koşullarında, özellikle tünel 9.000–11.000 metreleri arasındaki bölümde 300 m^3/s hava debisi ile egzoz gazlarının tahliyesi sağlanmıştır. Trafik hızı 20 km/s olarak seçilmiş, bu hızın emisyon gazlarının maksimum üretildiği durum olduğu belirlenmiştir. Analizler, tünel içinde CO ve NO_2 konsantrasyonlarının havalandırma sistemi tarafından etkin bir şekilde seyreltildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, yapılan analizler tünel havalandırma sisteminin hem günlük işletme hem de kritik yangın senaryolarında yeterli performans sağladığını ve tünel içi hava kalitesi ile güvenli tahliye koşullarının sürdürülebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, tünel havalandırma sistemlerinin tasarımında boyuna ve enine havalandırmanın entegrasyonunun önemini ve kritik hız, fan kapasitesi, duman tahliyesi ve taze hava beslemesi parametrelerinin etkisini detaylı şekilde göstermektedir.

Zigana Tüneli
Avrupa'nın en uzun 2. KarayoluTüneli
Ovit Tüneli
Avrupa'nın en uzun 4. Karayolu Tüneli
Salang Tüneli
Afganistan
Llogara Tüneli
Arnavutluk
Tunnel Krakow
Polonya
T9 Railway
Gürcistan
E60 Tüneli
Gürcistan
Tunnel Oman
Umman
İstanbul Yeni Havalimanı Tünelleri
Türkiye
Qaf Plloc Tüneli
Arnavutluk
AIRONN