



UZUN BİR KARAYOLU TÜNELİNDE ACİL DURUM SİMÜLASYONU

Nureddin DİNLER* ve Özkan KAÇAN**

*Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 06570 Maltepe, Ankara,
ndinler@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2872-9050

**Karayolları Genel Müdürlüğü, 06100 Çankaya, Ankara,
okacan@kgm.gov.tr, ORCID: 0000-0002-3120-5995

(Geliş Tarihi: 22.05.2020, Kabul Tarihi: 30.09.2020)

Özet: Karayolu taşımacılığında coğrafi olarak aşılması güç olan bölgelerde tüneller hem kat edilecek yolu kısaltmakta hem de yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bir taşıtın tünel içerisinde yanması oluşabilecek en kötü senaryodur. Dünyada insanların hayatlarını kaybetmesi ile sonuçlanan büyük tünel yangınları olmuştur. Ülkemizde de Ovit, Kop ve Zigana tüneli gibi uzun karayolu tünelleri inşa edilmektedir. Bu çalışmada, uzun bir karayolu tüneli (14500 m) içerisindeki taşıt yangını (30 MW) için acil durum modellemesi yapılmıştır. Acil durum için kritik nokta belirlenerek, 1000 m uzunluğunda bölge 1/100 ölçeğinde incelenmiştir. Çalışmada Ansys Fluent kullanılmıştır. Türbülanslı akış şartları dikkate alınmıştır. Yangının olduğu bölgedeki sıcaklık dağılımı, karbonmonoksit (CO) emisyon dağılımı ve hız dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiş ve yorumlanmıştır. Sıcaklık değerleri incelendiğinde yangın bölgesinde ortalama sıcaklık değerlerinin ilk 30 m’de ortalama 400 K’in üzerinde belirlenmiştir CO emisyon değerlerinin ise atış şaftına kadar 400 ppm seviyelerinin altına düşmediği, özellikle ilk 50 m’de ortalama 1000 ppm’in üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karayolu tüneli, acil durum, havalandırma.

EMERGENCY SIMULATION IN A LONG HIGHWAY TUNNEL

Abstract: In regions that are difficult to overcome geographically in road transport, tunnels both shorten the road to be covered and save fuel. It is the worst scenario that a vehicle can burn in a tunnel. There have been major tunnel fires in the world that have resulted in people's lives. In our country, long highway tunnels such as the Ovit, Kop and Zigana tunnels are being built. In this study, emergency modeling was carried out for vehicle fire (30 MW) in a long road tunnel (14.5 km). The critical point for the emergency was determined and the 1000 m long region was examined on a scale of 1/100. Ansys Fluent was used in the study. Turbulent flow conditions are taken into account. Temperature distribution, carbon monoxide (CO) emission distribution and velocity distributions in the region where the fire is located were examined. Results are given in graphs and interpreted. When the temperature values are examined, the average temperature values in the fire zone were obtained above 400 K in the first 30 m. It was obtained that the CO values did not fall below 400 ppm until the firing shaft, especially in the first 50 m, above 1000 ppm on average.

Keywords: Road tunnel, emergency condition, ventilation.

SEMBOLLER

A	Tünel kesit alanı [m ²]	T	Sıcaklık [K]
C _p	Karışımın öz ısı [kJ/kg°C]	T ₀	Ortam başlangıç sıcaklığı [°C]
D _h	Tünel hidrolik çapı [m]	T _f	Yangın sıcaklığı [°C]
D*	Yangın karakteristik çapı [m]	t	Zaman [s]
Fr	Froude sayısı [=V/√gL]	V	Tünel içi hava hızı [m/s]
g	Yer çekimi ivmesi [m/s ²]	V _c	Kritik hız [m/s]
H	Tünel yüksekliği [m]	φ	Genel değişken
K ₁	Froude sayısına bağlı katsayı [F _r ^{-1/3}]	μ	Dinamik viskozite değeri [kg/ms]
k	Türbülans kinetik enerjisi	ε	Türbülans yutulma oranı
L	Karakteristik uzunluk [m]	Γ	Genel difüzyon katsayısı
m*	Kütleli debi [kg/s]	δ	Bir özelliğin iki değeri arası fark
P	Tünel kesitinin çevre uzunluğu [m]	θ	Eğim
p	Basınç [Pa]	ρ	Hava yoğunluğu [kg/m ³]
Q	Yangın yükü [MW]	ρ ₀	Ortam başlangıç hava yoğunluğu [kg/m ³]
Q _c	Taşıma bağlı ısı salınımı [kW]	EPC	Avrupa Parlamentosu ve Konseyi
Q*	Boyutsuz ısı salınım oranı	HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
		KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
		PIARC	Dünya Yol Birliği

GİRİŞ

Ulaştırmanın güç olduğu coğrafi engellerin aşılmasında karayolu tünelleri ulaşımı kolaylaştırmaktadır. Bu tüneller, ulaşımı kolaylaştırırken bölgeler arası ilişkileri geliştirmede izole gözükken bölgelerin ekonomik gelişiminde de bir katalizör olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, insanlığa birçok katkı sağlayan bu tünellerin yukarıda belirtilen iyi yönlerinin dışında tünel içerisindeki olası bir kaza ve kaza sonrasında oluşabilecek sıkıntılar oldukça ciddi boyutlara ulaşabilmektedir. Bu kazaların açık karayolundaki benzer kazalara göre sıklığı az olmakla birlikte sahip oldukları etki oldukça yüksek olabilmekte ve bu nedenle medyanın ve halkın ilgisini daha çok çekmektedir.

Dünya çapında yaşanmış olan ve yaşanan en ciddi karayolu tüneli kazası olarak anılan 1999 yılında meydana gelen Mont Blanc (Fransa) Tüneli felaketidir. 11,6 km uzunluğundaki tünelde bir kamyonun başlayan yangın, 23 tır ve 10 arabaya yayılarak 39 kişinin hayatını kaybetmesine sebep olmuştur. Tünel uzun yıllar önce tasarlandığından, tünel güvenlik ekipmanlarının ve acil durum senaryolarının yetersizliğinden kaynaklı tespitler uzun süre dile getirilmiştir. Aynı yıl gerçekleşen bir diğer kaza olan Tauern Tüneli felaketinde ise, bakım nedeniyle tünel trafiği tek şeritten sağlanırken, bir kamyon beklemeye kuyruğuna hızla çarpmış, zincirleme kazalar meydana gelmiş, yangın saç spreyi de içeren çeşitli malları taşıyan başka bir kamyonun da alev almasıyla yayılmıştır. Yangını söndürmek yaklaşık 16 saat sürmüştür. 2 yıl sonra gerçekleşen (2001) Gotthard Tüneli kazasında ise, kontrolü kaybedilen bir kamyon karşı şeride geçmiş, tehlikeli madde taşıyan bir başka kamyonu çarpmış ve 7 ağır yük taşıyan yayılan bir tünel yangınına sebep olmuştur. Yangın sonucunda 11 kişi hayatını kaybetmiştir (PIARC, 2017). Tüm bu kazaların ortak özellikleri; tünellerin uzun (> 6 km) ve tek tüp halinde olmasıdır. Söz konusu kazalar doğrudan etkilerinin yanı sıra, uzun süre tünellerin kapalı kalmaları sebebiyle, alternatif güzergâhlarda trafik sıkışıklığına yol açmış, buna bağlı kaza oranları yükselmiştir. Sadece Gotthard Tünelinin kapanması nedeniyle İtalya ekonomisi 2,5 milyar Euro zarara uğramıştır. Tüm Avrupa ekonomisine zararın 15 milyar Euro'yu bulduğu tahmin edilmektedir (EU Report, 2003). Yaşanan üzücü tünel yangınları, bu konuya olan ilgiyi daha da arttırmıştır.

Karayolu tünel yangını; yangının dinamik süreci (türbülans, yanma, radyasyon, vb.) ve tünelin geometrik düzeni (tünel geometrisi, araç geometrisi ve bunların düzeni gibi) arasındaki karşılıklı etkileşimler nedeniyle çok karmaşık bir olgudur. Meydana gelen tünel yangınlarının nedenleri; aracın kendiliğinden tutuşmasına (yük, yakıt ve araç dâhil), araç çarpışmasına ve aşırı yüklü çarpışmalara (örneğin, ön arka çarpışma ve yan duvarla çarpışma) göre sınıflandırılabilir. Bu nedenlere bağlı yangınlar, tünel duvarının yanında, sağ / sol şeritte ya da yolun ortasında rastgele ateş dağılımını mümkün kılmaktadır. Yangının gelişimi, duman dağılımı ve tünel kaplamasındaki hasar, tüneldeki yangının yerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu sebeplere bağlı olarak

karayolu tüneli yangınlarında, duman hareketi ve tünel yangın güvenliği yönetiminin anlaşılmasına açık bir ihtiyaç doğmuştur (Wang vd., 2017).

Karayolu tünellerinde, belirli bir yönde duman akışını sağlamak için havalandırma sistemleri kullanılmaktadır. Hava hızı çok düşük olduğunda, yangın dumanı iki yönlü olarak yayılır. Hava hızı yüksek olduğunda ise atım yönünde yangın dumanı hızla yayılır ve tünelin içini doldurur. Her iki durumda, yangın kaynağına yaklaşan itfaiyeciler için tehlikeli olabilir.

Boyuna havalandırma yapılan tünellerde, havalandırma hızının kritik hızdan çok yüksek olduğu durumlarda hava akımının alt kısmında katmanlaşma sorunu baş gösterebilmektedir. Bu sebeple geri akışın engellenmesini sağlayacak en düşük hızı belirlemek amacıyla sınırlandırma hızı kavramı geliştirilmiştir (Wu ve Bakar, 2000). Li vd. (2010), gerçekleştirdiği model deneylerde sınırlandırma hızı tanımlanmıştır. Tünellerin çoğu, duman hareketini önemli ölçüde etkileyebilecek bir eğime sahiptir. Atkinson ve Wu (1996), tünel eğimi ile kritik hız arasındaki etkileşimi incelemek için düz zemin ile %10'a kadar eğimli tünel modellerinde deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmalar sonunda, düz bir tünelde eğimli bir tünel arasındaki kritik hızlar arasında ilişki kurmuşlardır. Hyun vd. (2009), yaptığı benzer bir çalışmada eğim ve kritik hız arasındaki ilişki önerilmiştir. Chow vd. (2015) ise aynı ilişkiyi farklı katsayı ile tanımlamışlardır. Bu çalışmaların yanında, tünel içerisinde taşıt blokajının yangın üzerine etkisi ile ilgili incelemeler de yapılmıştır. Oka ve Atkinson (1995), blokaj etkisinin ısı yayma oranı üzerine yaptığı etkiyi incelemişlerdir. Bu çalışmada, yangının tünel genişliğinin büyük kısmını işgal ettiği ve tavana doğru yükselerek arttığı, kritik hızların da azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde yapılan diğer araştırmalarda da yangının gerisinde konumlandırılan araçların blokaj oranının artmasıyla kritik hızın azaldığı gösterilmiştir (Li vd., 2010; Lee and Tsai, 2012; Alva vd. 2017). Hu vd. (2007) deneysel çalışmasında tünel içindeki duman sıcaklığının değişimi incelenmiştir. Deneylerde yangın boyutu, tünel kat yüksekliği, tünel kesit geometrisi ve havalandırma hızı etkisi incelenmiştir. Duman hareket yönünde olan havalandırma hızının etkisi ve tünel içindeki bariyer etkisinin duman sıcaklığı ve hareketi üzerindeki etkileri de çalışmada araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, tünel içinde taşıt hareketi olmadığı sürece yangın boyutundaki artışın tünel tavanındaki duman sıcaklığını artırdığını göstermektedir.

Tünel yangınlarıyla ilgili bir diğer araştırma konusu da tünellerin kesit değişimlerinin yangın üzerine etkisidir. Bu çalışmaların en önemlilerinden birisi Kurioka vd. (2003), tünel içerisinde çıkan bir yangının yakın bölgesindeki olayları analiz etmek için yaptıkları deneylerdir. Yaptıkları çalışmada 1/10, 1/2 ve tam ölçekli olmak üzere ve tam ölçekli modeller dikkatlen ve en alı kesitli olmak üzere modeller kullanmışlardır. Deneylerde kare kesitli yangın kaynağı kullanmışlardır. En/boy oranı, açığa çıkan ısı miktarı ve uzunlamasına

havalandırma hızı değiştirilmiştir. Alevin eğilmesi, görünür alev yüksekliği, duman tabakasının maksimum sıcaklığı ve konumu için ampirik formüller 1/10 ölçekli model tünel kullanılarak elde edilmiştir. Yangın kaynağının yakınındaki alanda yangın olayını tahmin etmek için buldukları ampirik bağıntıların uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Lee ve Ryou (2005), benzer bir çalışmada aynı hidrolik çapa sahip tünel için en/boy oranı arttıkça kritik hızın arttığını tespit etmişlerdir. Vauquelin ve Wu (2006), ölçekli modeller üzerine yapılan deneysel çalışmalarında tünel genişliğinin kritik hız üzerindeki etkisini araştırmışlar ve tünel kesitinin en/boy oranının düşük olduğu durumlarda, tünelin genişliği arttıkça kritik hızın arttığını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmaların dışında, Kashef vd. (2009), iki bölge (düz ve kavisli) tarafından oluşturulan uzun bir yol tünelinde 30 MW'lık bir etkinlikte duman yayılmasını kontrol etmek için farklı acil durum havalandırma stratejilerinin etkinliğini değerlendirmiştir. Sonuçlar, düz bölgedeki senaryolar durumunda geri tepmenin önlendiğini veya sınırlandırıldığını göstermiştir. Tam tersine, kavisli bölgede yer aldığı, temiz hava ile yanma ürünleri arasında iyi bir karıştırma gerçekleştiği görülmüştür. Bu karıştırma prosesi, düz zonda gerilemeye neden olmuş ve düz bölgede geriye doğru uzanarak, geri tepme derecesini arttırmıştır. Çalışma sonucunda kavisli bölgedeki duman geri tepmesini en aza indirmek için, kavisli bölge boyunca tavan jet fanları kurmak önemi vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Caliendo vd. (2012), kavisli tünellerde yangın etkisini incelemiş, tünelin tam ortasında meydana gelen bir otobüs yangını simüle ederek, 3 m/s kritik havalandırma hızı için geri tepmenin önlendiğini göstermiştir. Karaaslan vd. (2011), at nalı kesitli bir tünelin ölçek modeli üzerinde yaptıkları tünel yangını çalışmasında duman hareketini incelemiş ve dumanın kontrolü için fan çalışma sırasının, fan itiş gücünün ve havalandırmaya başlama zamanının tünel yangınları üzerindeki önemini vurgulamışlardır.

Literatür çalışmalarında, giriş bölümünde bahsedildiği üzere karayolu tünel yangınlarıyla ilgili; kritik hız kavramı, geri katmanlaşma, maksimum duman sıcaklığı, tünel içerisindeki araçların blokaj etkileri, tünel kesitinin etkileri (en, boy, hidrolik çap, kavis vb.), yanan araç türünün etkileri, atmosferik koşulların etkisi ve son zamanlarda da yangın önleme sistemlerinin etkinliği (su sisi ve sulu yangın önleme sistemleri vb.) üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada 14500 metrelik uzun bir karayolu tünelindeki tünel iç kesiminde acil durum

olarak 30 MW gücünde yangın modellenmesi yapılmıştır. İncelenen 1000 metrelik kesimde, 1/100 ölçek model kullanılarak, tünel geometrisi, araçlar, tahliye noktaları ve jet fanlar modellenmiştir.

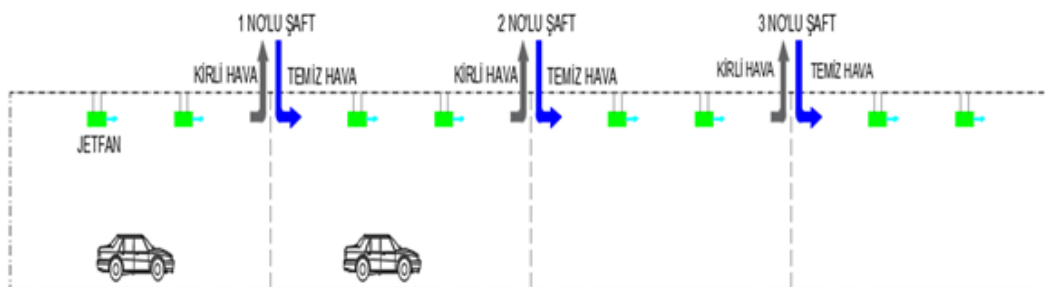
PROBLEMİN TANIMI

Karayolu tünellerinde gerçek boyutta bir yangın düzeneği kurularak tünel içerisindeki yangına bağlı türbülans, sıcaklık değişimi, hava hızı değişimi, duman emisyonları, görüş mesafesi gibi parametreleri incelemek en doğru verileri sağlayabilir. Ancak, bu düzeneklerin kurulumları hem süre hem maliyet yönünden olanaksızdır. Günümüzde HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımları sayesinde tam ölçekli ya da küçük ölçekli çalışmalara göre çok daha düşük maliyette, diğer yöntemlerle erişilmesi çok zor olan birçok ayrıntılı veri elde edilerek daha etkin değerlendirme yapılabilmektedir (Caliendo vd., 2012).

Bu çalışmada, ölçek model yaklaşımı ve Ansys Fluent yazılımı ile süreklilik, momentum, enerji ve tür denklemleri çözülerek türbülans, yanma, yüzdürme gibi karmaşık süreçler tanımlanmış, yangın sonucu oluşan dumanın gaz sıcaklığı, hava akış hızı, zehirli gaz konsantrasyonları, tünelde görüş mesafesi, insanların tahliye işlemleri gibi süreçlerle ilgili değerlendirmeler yapılmış ve analitik olarak tek boyutlu denklemler ile başlangıç hesapları yapılmıştır.

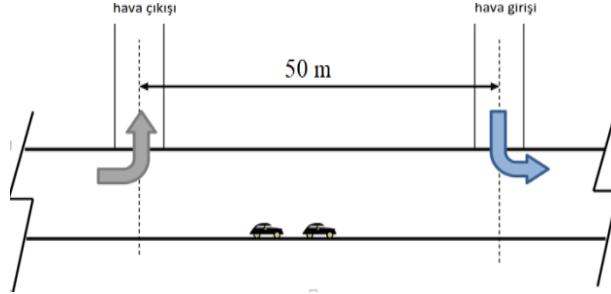
14500 m uzunluğunda çift tüp bulunan tünel, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Teknik Şartnamesine göre devlet ve il yolları standardına uygun olarak 2 şeritli yapılmaktadır (KGM, 1997). Tünelin havalandırma sistemi, trafikle aynı yönde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tünelin bulunduğu konum ve uzunluğu ile "EPC'nin 2004/54/EC sayılı direktifi" ve "Karayolları Teknik Şartnamesi" göz önünde bulundurularak klasik boyuna havalandırma sisteminin seçilmesi bu tünel için uygun görülmemiştir (EPC, 2004; KGM, 1997).

Yapısal maliyetleri (gabarinin büyümesi ve kanal maliyetleri) ve işletme zorlukları dolayısıyla yarı enine ve enine havalandırma sistemlerinin yerine, çok uzun tünellerde kullanılan ve diğer sistemlere göre maliyeti daha uygun olan bölünmüş boyuna havalandırma sistemi tercih edilmiştir ve havalandırma sistemine ait şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Havalandırma sistemi şematik gösterimi.

Tünelde havalandırma amaçlı 3 adet ana şaft yapısı bulunmaktadır. Eksenel fanların bulunduğu her ana şaft yapısı içerisinde birbirinden 50 m mesafe aralıklı sırasıyla 1 kirli hava kanalı ve 1 temiz hava kanalı şaftı bulunmaktadır (Şekil 2). Bu temiz ve kirli hava şaftları her iki tüpe de bağlanmaktadır. Bu sistemde jet fanlar ve eksenel fanlar beraber kullanılmaktadır.



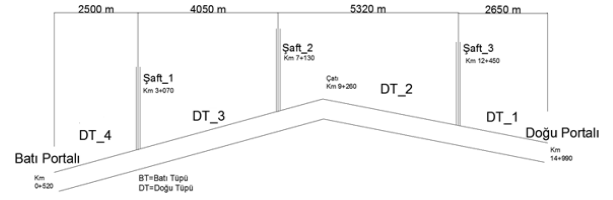
Şekil 2. Şaftların şematik gösterimi.

Tünelin Yapısal Özellikleri

Tünelde ait fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Tünelde eğim yer yer değişmekle beraber, büyük kısımlar çatı eğimli +0,85 ila -3,30 ve +3,30 ila -0,85 şeklinde değişmektedir. Hesaplamalarda eğime göre bölümler ayrı ayrı yapılmış olup bu bölümler Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. Tünelde ait fiziksel özellikler.

Hesaplarda Kullanılan Parametreler	Doğu Tüpe Değerleri
Tünel uzunluğu	14 500 m
Tünel boyuna eğimi	Çatı eğim
Tünel kesit alanı	67 m ²
Tünel yüksekliği	7,3 m
Tünel çevresi	31,16 m
Tünel hidrolik çapı	8,6 m
Şerit sayısı	2
Giriş portalı rakımı	1014 m
Çıkış portalı rakımı	1210 m



Şekil 3. Hesap yapılan bölümlerin şematik gösterimi.

Tünelde ait havalandırma hesapları için 2045 yılı tahmini trafik dağılımı referans alınmıştır. Tünelin yapılacağı güzergâhta, KGM'den alınan 2045 yılı trafik tahminine göre hesaplanan saatlik trafik verileri Tablo 2'de verilmiştir. Hesaplamalarda, 2045 yılı trafik dağılımına göre, Tablo 3'te gösterilen, günlük trafiğin %10 değeri olarak saatlik en yüksek trafik yükü alınmıştır.

Tablo 2. Trafik verileri.

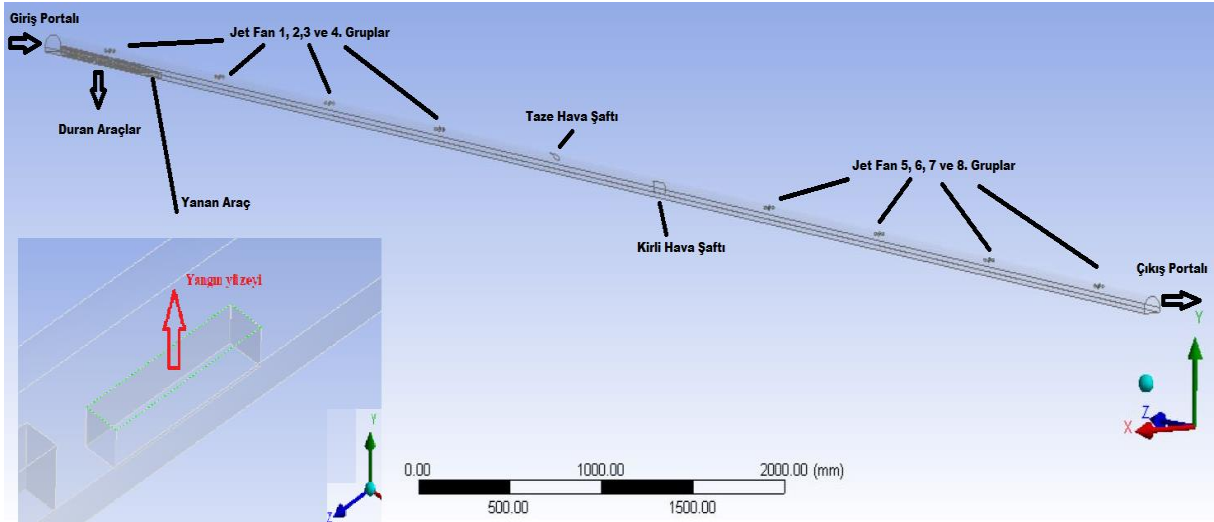
Yıllar	Otomobil	Hafif Yüklü Ticari Taşıt	Otobüs	Kamyon	Kamyon, Römork, Çekici, Yarı Römork	Toplam
2015	3187	254	65	528	382	4416
2016	6754	342	87	663	1340	9186
2017	12095	455	116	708	1816	15190
2018	21661	555	141	715	2006	25078

Tablo 3. Hesaplamalara katılan saatlik en yüksek trafik yükü.

Trafik Verileri	
Trafik akış (tek/çift yönlü)	Tek yön
Ağır vasıta	286 araç/saat
Orta yüklü ticari araç	56 araç/saat
Otomobil	2166 araç/saat

Tünel Geometrisi ve Ölçek Model Kullanımı

Hesaplamalara göre kritik nokta olarak bulunan DT_3 lokasyonu 11500 m'de (giriş portalından uzaklığı, % 3,3 eğimli kısım) meydana gelebilecek 30 MW'lık bir araç yangını, başlangıç noktası kabul edilmiş ve buna göre bir



Şekil 4. Geometrik model.

analiz çalışması yapılmıştır.

Geometri, yapının fiziksel geometrisini termodinamik yönden uygun yansıtaacak boyutlarda hazırlanmalıdır. Seçilen senaryoda, yangının 1000 metrelik kesiminde, %3,3 eğimli, 1/100 ölçek model kullanılarak, tünel geometrisi, araçlar, tahliye noktaları ve jet fanlar modellenmiştir (Şekil 4).

14500 metrelik tünelin geometrisinin tam ölçekte modellenmesi hem zor hem de analiz açısından çok yüksek maliyetler gerektirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada tüneldeki yangına bağlı fiziksel ve kimyasal süreçleri inceleyebilmek için ölçek model kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı ölçek modeller olmakla beraber bu çalışmada, birçok yangın güvenliğiyle ilgili bilimsel çalışmada kullanılan Froude ölçek modeli tercih edilmiştir ve kullanılan korelasyonların örnekleri Tablo 4'te verilmiştir (Lee ve Tsai, 2012; Alpgiray, 2016; Gong vd., 2016; Tang vd., 2017).

Tablo 5'te, tünel geometrik verileri, araçlar ve fanlara ait modelde kullanılan prototip modelin boyutları ve ölçek model karşılıkları verilmiştir.

Temel Sınır Şartlarının Belirlenmesi ve Ağ Yapısı Seçimi

Yangın yüküne bağlı, oluşacak gaz debisi ve emisyon dağılımını doğru tahmin edebilmek önemlidir. Bu çalışmada, tünelde tehlikeli madde taşımaları yapılmayacağı varsayılmıştır. Tehlikeli madde taşımalarına bağlı yangınların dışında 30 MW'lık araç yangınlarını 25-50 tonluk ağır yük taşıtları yangınları ve bu taşıtların beraber karıştığı kazalar oluşturmaktadır (PIARC, 2017:7). Tablo 6'da farklı ülkelerin tünel yangın yükü standartları verilmiştir. Tünelde tüp başına trafik yükünün, nispeten küçük olduğu düşünülerek, birden fazla ağır yük taşıtının çarpışması ve yangınına bağlı riskin düşük olması beklenmektedir. Tüm faktörler değerlendirilerek, havalandırma tasarımında yangın yükü 30 MW olarak alınmıştır.

Tablo 4. Froude ölçek model sisteminde kullanılan korelasyonlara örnekler (Ingason vd. 2015).

Birim	Ölçek
Isı salınım oranı (kW)	$Q_M/Q_F=(I_M/I_F)^{5/2}$
Hız (m/s)	$V_M/V_F=(I_M/I_F)^{1/2}$
Zaman (s)	$t_M/t_F=(I_M/I_F)^{1/2}$
Sıcaklık (K)	$T_M/T_F=1$
Gaz konsantrasyonu	$Y_M/Y_F=1$
Basınç (Pa)	$P_M/P_F=(I_M/I_F)$
Yanma hızı (kg/(m ² s))	$(m''_f \delta H_c)_M/(m''_f \delta H_c)_F=(I_M/I_F)^{1/2}$
Debi (kg/s)	$\rho_{w,M}/\rho_{w,F}=(I_M/I_F)^{5/2}$

Tablo 5. Tünelin ve kullanılan ekipmanların 1/100 ölçek model boyutları.

Tünelin ve Kullanılan Ekipmanların Geometrik Verileri	Prototip Model	1/100 Ölçek Model
Hesap Yapılan Uzunluk (m)	1000,00	10,00
Eğim (-)	%3,30	%3,30
Tünel Yüksekliği (H _T) (m)	7,22	0,0722
Tünel Hidrolik Çapı (D _H) (m)	8,60	0,0086
Şerit Sayısı (-)	2	2
Taze Hava Şaftı Ölçüleri (m ²)	10×5	0,1×0,05
Egzoz Hava Şaftı Ölçüleri (m ²)	4,5×3	0,045×0,03
Otomobil Ölçüleri (boy x en x yükseklik) (m ³)	4,2×1,8×1,4	0,042×0,018×0,014
Otobüs Ölçüleri (boy x en x yükseklik) (m ³)	12×2,5×2,9	0,12×0,025×0,029
Ağır Yük Taşıtı Ölçüleri (boy x en x yükseklik) (m ³)	13×2,5×3,6	0,12×0,025×0,036
Jet Fan Dış Çapı (m)	1,4	0,014
Jet Fan İç Çapı(m)	1,25	0,0125
Jet Fan Uzunluk (m)	3,4	0,034

Tünel yangınlarıyla ilgili kabul edilen yangın sıcaklık/zaman eğrilerine göre (Şekil 5) yangının yaklaşık 5 dakikada en yüksek sıcaklık değerine ulaşacağı kabul edilmiş ve oluşacak en yüksek sıcaklık, modifiye edilmiş hidrokarbon eğrisi referans alınarak hesaplanmıştır. Modifiye edilmiş hidrokarbon eğrisine (HCM) göre, zamana bağlı sıcaklık farkı Denklem 1 ile hesaplanmaktadır (Taillefer vd., 2013).

$$\delta T = 1280 (1 - 0,325 \exp^{-0,167t} - 0,675 \exp^{-2,5t}) \quad (1)$$

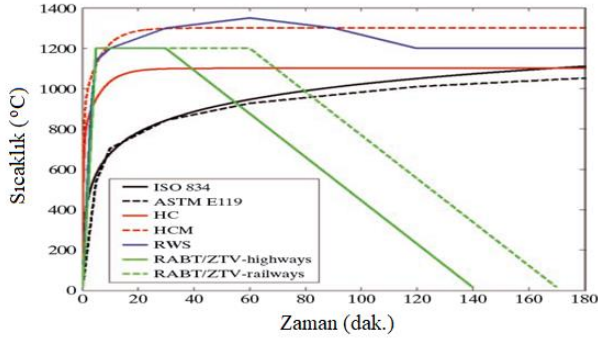
Denklem 1'de t, yangının başlangıcından itibaren dakika olarak geçen süreyi, δT oluşan sıcaklık farkını göstermektedir. Başlangıç tünel sıcaklığı 20°C olduğundan en yüksek sıcaklık değeri 1120°C (1393 K) olarak hesaplanmıştır.

Yangın sonrası oluşacak duman miktarını ve içeriğini belirlemek için "Runehamar Tünel Yangın Testleri" sonuçlarından faydalanılmıştır. Bu testlerde 66 ve 202 MW aralığında dört farklı ağır yük taşıtı yangını incelenmiştir (Li ve diğerleri, 2012). Yangın sonrası oluşacak duman miktarı (m^*_{gaz}), tüketilen yakıt miktarı ($m^*_{yakıt}$) ve tüketilen hava miktarının (m^*_{hava}) toplamına eşittir.

$$m^*_{gaz} = m^*_{hava} + m^*_{yakıt} \quad (2)$$

Tablo 6. Bazı ülkelerin yangın tasarım yükleri (PIARC, 2017).

Ülke	Yangın Tasarım Yükü (MW)	Açıklamalar
Avusturya	30	Yüksek risk kategorisinde 50 MW
Fransa	30-200	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 200 MW
Almanya	30-100	Tünel uzunluğu ve ağır yük taşıt sayısına göre değişiyor.
İtalya	20-200	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 200 MW
Japonya	30	Su sisi sistemiyle birlikte, havalandırma amaçlı
Norveç	20-100	Risk sınıfına göre değişiyor.
Portekiz	10-100	Trafik yoğunluğu ve özelliklerine göre değişiyor.
Singapur	30-200	İzin verilen araç türüne göre değişiyor.
İsviçre	30	Duman atım hızı 3,3-4 m/s arasında olacak şekilde
Amerika	30-300	Tehlikeli madde taşımacılığı varsa 300 MW



Şekil 5. Yangın durumunda karakteristik zaman/sıcaklık eğrileri (Maraveas ve Vrakas, 2014).

Li vd. (2012) Runehamar T1 testi sonuçlarına göre hesap yapılarak 30 MJ için değeri için yaklaşık olarak 9,824 kg hava, 1,622 kg yakıt tüketilmektedir ve $m^*_{gaz} = 11,45$ kg/s bulunmuştur.

Yangın sonrası oluşacak dumanın gaz içeriği, öncelikli olarak yanan yakıtla bağlıdır. Birçok küçük ve büyük yangın testleri yapılmış ve yangın sonucu oluşan CO₂, CO, HCN, NO, NH₃, HCl, SO₂ gibi gazların miktarları saptanıp bir korelasyona ulaşılmaya çalışılmıştır (Ingason vd., 2015). Tünel içerisinde meydana gelen yangınlarda, yangın sonucu oluşan CO ve CO₂'in tüneldeki miktarının belirlenebilmesi önemlidir. CO₂ oranı yanan üründen bağımsız olarak sadece ısı salınım oranına bağlı olmakla beraber, CO oranı yanan yakıtın türü ve geometrisiyle doğrudan ilişkilidir. "Runehamar Tünel Yangın Testleri" raporuna göre oluşan CO₂ miktarı ($m^*_{CO_2}$), Denklem 3'e göre belirlenebilir (Li vd., 2012).

$$m^*_{CO_2} = 0,087 Q \quad (3)$$

burada Q, MW birimiyle, $m^*_{CO_2}$ ise, kg/s birimiyle ifade edilmektedir. Denklem 3'e göre, $m^*_{CO_2} = 2,61$ kg/s bulunur.

Oluşan CO gazı miktarı ve ısı miktarı, yakıt türüne bağlı olarak değiştiğinden bunlarla ilgili kabuller yapılmıştır. "Fire in Tunnels" raporuna göre, tünelde 30 MW 'lık bir otobüs yangınına ait test sonuçlarına göre, her 2 kg CO₂ gazına karşılık, 0,1 kg CO gazı, 0,05 kg ısı ortaya çıkmaktadır (FIT, 2005: 60, 70). Bu sonuçları Runehamar test sonuçlarıyla birleştirerek en kötü senaryo düşünüldüğünde; 11,45 kg gaz içeriğinde, 2,61 kg CO₂ ortaya çıkacaktır. Gaz içeriğinde yaklaşık %22 oranında CO₂, %1 oranında CO ve %0,5 oranında ısı bulunduğu kabul edilmiş, kalan kısım su buharı olarak tanımlanmıştır.

Jet fanlar, kapasitesi ve iç hacmine bağlı olarak momentum kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Her bir jet fanın, jet fan kataloglarından seçilerek 45 kW, 1304 N/m³ itki gücüne sahip olduğu kabul edilmiştir. Yangın bölgesine 100'er m yakınındaki fan grupları (1 ve 2 numaralı fan grupları), yangını tetikleme riski ve yoğunluk değişimi nedeniyle verimsiz olacağı için çalıştırılmamıştır. Şafta kadar olan kısımdaki 2 grup (4 adet jet fan) devreye girmiştir.

Olası bir yangın durumunda gerek acil durum araçlarının müdahalesi, gerekse tünel içinde dumandan ve sıcaklıktan arındırılmış bir ortam sağlanabilmesi amacıyla tünel içinde oluşabilecek ters katmanlaşmanın önlenmesi gerekmektedir. Ters katmanlaşma, duman ve sıcak havanın istenilen havalandırma yönünün tersine ilerlemesidir. Kritik hız ise ters katmanlaşmanın önüne geçilen minimum havalandırma hızıdır.

Tünel içerisinde yangın esnasında havalandırma sistemi aracılığı ile sağlanan hava hızı, dumanı istenilen yönde yönlendirmek ve bu esnada ters katmanlaşmayı engellerebilmek için kritik hızdan büyük olmalıdır.

Karayolu tünellerinde duman, trafiğin akış yönüne doğru yönlendirilmelidir. Bu sayede yangın bölgesinde oluşabilecek bir trafik sıkışıklığı durumunda, araçların ve içerisindeki yolcuların dumana ve sıcaklığa maruz kalmamaları sağlanmış olur.

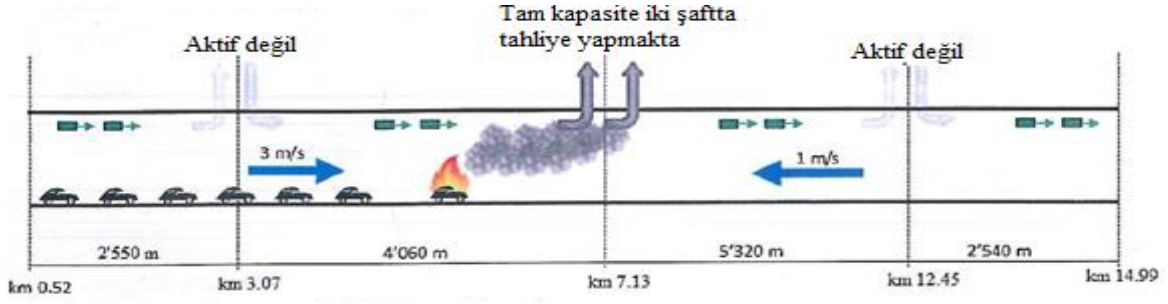
Kritik hız; yangın ısı yükü, tünel yüksekliği, tünel kesit alanı, tünel eğimi, ortam sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Denklem 4 ve Denklem 6'nın birlikte çözülmesiyle kritik hız ve kritik sıcaklık hesaplanabilmektedir (Toprak, 2014).

$$V_c = K_1 \left(\frac{g Q_c H}{\rho_0 c_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (4)$$

$$K_1 = 1 + 0,0374(\theta)^{0,8} \quad (5)$$

$$\text{Burada;} \quad T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p A V_c} + T_0 \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemlerde V_c kritik hızı (m/s), T_f kritik sıcaklığı (°C), T_0 başlangıç sıcaklığı (°C), Q_c taşınımla ısı yükünü (kW), H tünel yüksekliğini (m), ρ_0 ortam hava yoğunluğunu (kg/m³), c_p havanın özgül ısısını (kJ/kg°C),



Şekil 6. Şaftlar öncesi yangın durumu şematik gösterimi.

K_1 Froude sayısı faktörünü, θ tünel eğimini, A tünel kesit alanını (m^2), g yerçekimi ivmesini ($kg.m/s^2$) göstermektedir. Eğimin $\% -3,3$ olduğu kısımda, 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız ve sıcaklık değerleri hesabında kullanılan değerler ve Tablo 7'de ve NFPA (National Fire Protection Association)'a göre iterasyon sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Eğimin $\% -3,3$ olduğu kısımda kritik hız hesabında kullanılan değerler.

Yangın Yüğü (Q) (MW)	30,00
Tünel Yüksekliği (H_T) (m)	7,22
Tünel Kesit Alanı (A) (m^2)	67,00
Tünel Eğimi (θ) (%)	-3,30
Ortam Hava Yoğunluğu (ρ_0) (kg/m^3)	1,20
Ortam Sıcaklığı (T_0) ($^{\circ}C$)	20,00
Havanın Özgül Isısı (C_p) ($kJ/kg^{\circ}C$)	1,01
Froude Sayısı Faktörü (K_1) ($Fr^{-1/3}$)	0,61

Tablo 8. Eğimin $\% -3,3$ olduğu kısımda kritik hız ve sıcaklık değerleri iterasyonları (NFPA 502, 2017: Annex-D).

İterasyon	T_f ($^{\circ}C$)	V_c (m/s)
1	20,00	2,98
2	144,26	2,65
3	159,80	2,62
4	161,51	2,61
5	161,70	2,61
6	161,72	2,61
7	161,72	2,61
8	161,72	2,61

Eğimin $\% -3,3$ olduğu kısımda 30 MW'lık yangın durumunda kritik hız (V_c) 2,61 m/s, kritik sıcaklık (T_c) $162^{\circ}C$ bulunmuştur. Yüksek eğim nedeniyle, yangın sonucu oluşan baca etkisi en çok bu bölümde etkili olmaktadır. Tünel içi havalandırma tasarım hızı, bu değeri aşacak şekilde 3 m/s olarak seçilmiştir.

Yangının arka kısmındaki (giriş kısmından arkada kalan 11500 metrelik mesafe) jet fanların çalıştığı ve tünel içinde 3 m/s'lik hava hızının sağlandığı varsayılarak, model çalışmadaki tünel giriş portalı 3 m/s hava hızını sağlayacak şekilde dinamik basınç olarak tanımlanmıştır. Tünel içerisindeki yangının etkisi, yangının tünel içerisindeki pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada yangın sonucu oluşan dumanın tahliyesi için

dumanın en yakın hava değişim istasyonunun yayılım yönüne yönlendirilmesi (Şekil 6) göz önünde bulundurulmuştur (CETU, 2003: 69).

Şaftın ileri kısmındaki tersinir çalışan jet fanların sayısal olarak hesaplanan senaryoya göre, tünel içinde şafta kadar 1 m/s hava hızını sağladığı varsayılarak, model çalışmadaki çıkış portalından tünel içerisine 1 m/s hava hızını sağlayacak şekilde dinamik basınç tanımlanmıştır.

Tünel şaftlarındaki 2×70 m³/s debili aksiyal fanlar tam kapasite ile tahliye amaçlı çalıştırılmıştır. Tahliye fanlarına ait tünele bağlanan menfezler basınç olarak tanımlanmıştır.

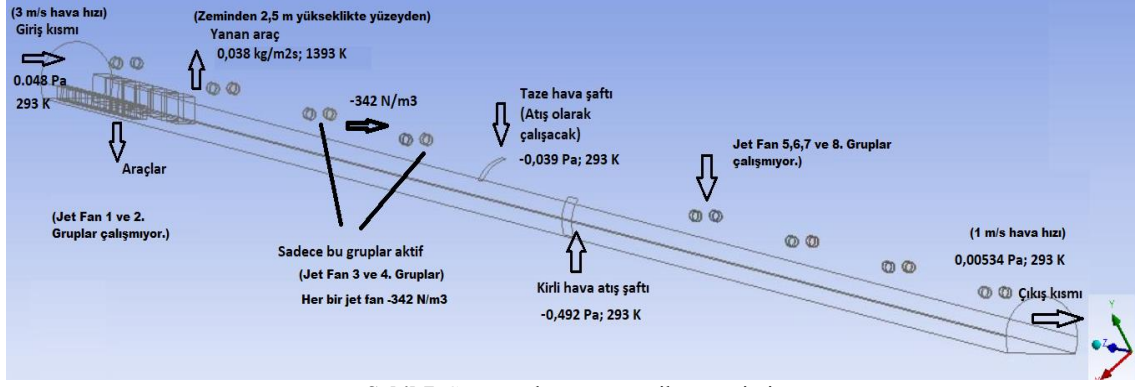
Duman, birim yüzey alandan (ağır yük taşıtı ya da otobüsün yüzey alanı 30 m²) geçen kütle akısı olarak tanımlanmıştır. Otobüs boyutu yükseklikleri 2,5 metre ile 3 metre arasında değişmektedir. Yapılan çalışmada, yangın sonucu oluşan dumanın, otobüsün üst yüzeyine yakın bir bölgeden dağıldığı düşünülmüş, yerden 2,5 metre yükseklikte, 12 metre uzunluğunda yüzey (otobüs üst yüzeyi) yangın kaynağı olarak seçilmiştir. Kullanılan sınır şartları Tablo 9'da ve Şekil 7'de geometri üzerinde de gösterilmiştir.

Tablo 9. Kullanılan sınır şartları.

Kararlı Rejim Sınır Koşulları	Prototip Model	1/100 Ölçek Model
Isı salınım oranı (kW)	30000	0,30
Tünel içi hava hızı (m/s)	3,00	0,30
Kirli hava şaftı hava hızı	9,57	0,96
Taze hava şaftı hava hızı	2,68	0,27
Tünel içi sıcaklık (K)	293,00	293,00
Duman sıcaklığı (K)	1393	1393
Debi (kg/s)	11,45	0,0001145
Jet Fan itki gücü (N/m^3)	1304	342
Betonarme duvar kaplama kalınlığı (m)	0,30	0,003

Ağ yapısı seçimi

Analizlerden daha kesin ve kısa zamanda çözüm alabilmek için ağ yapısı hücre boyutlarının uygun seçilmesi önemlidir (McGrattan ve Forney, 2004). Duman karakteristiğini ölçmek için minimum yangın karakteristik çapı (D^*) Denklem 7 ile belirlenir.



Şekil 7. Sınır şartlarının şematik gösterimi.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (7)$$

Burada, Q, kW biriminden ısı salınım oranını, ρ_0 , başlangıç hava yoğunluğunu, c_p başlangıç havanın başlangıç özgül ısısını, T_0 başlangıç ortam sıcaklığını ve g ise yerçekimi ivmesini ifade eder.

Yükseklığe (H) bağlı, boyutsuz ısı salınım oranı (Q^*), Denklem 8 ile belirlenir.

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g} * H^{5/2}} \quad (8)$$

Denklem 7 ve Denklem 8 birleştirilerek Denklem 9 elde edilir.

$$D^* / H = (Q^*)^{2/5} \quad (9)$$

Eğer Denklem 9 doğru sonuç veriyorsa, Denklem 10 ile uygun ağ (grid) hücre boyutu elde edilir (Li ve diğerleri, 2012).

$$\text{Yangın bölgesi mesh boyutu} = 0.075 D^* \quad (10)$$

Ölçek modelde kullanılan sınır değerlerine göre, Denklem 7 ve 8'den boyutsuz yangın çapı ve boyutsuz ısı salınım oranı hesaplanırsa;

$$D^* = \left(\frac{0,3}{1,2(1,01)(293)(\sqrt{9,81})} \right)^{2/5} = 0,037$$

$$Q = \frac{0,3}{1,2(1,01)(293)(\sqrt{9,81})(0,0722)^{5/2}} = 0,193 \quad \text{bulunur.}$$

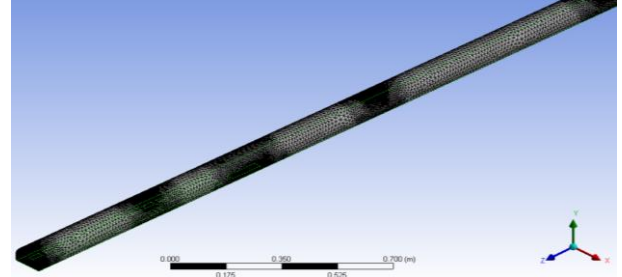
Denklem 9 ile kontrol yapıldığında,

$$D^* / H = 0,512, \quad (Q^*)^{2/5} = 0,512 \quad \text{bulunur.}$$

Doğru sonuç alındığı için, Denklem 10 ile $0.075 \times 0,037 = 0,0028$ m bulunur.

Hücre boyutu, tüneldeki ağ yapısını basitleştirmek için 0,0028 metre yerine 0,002 m olarak, tetrahedral elemanlardan oluşan düzensiz ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ, yangın bölgesinde, jet fan kısımlarında, şaftların bulunduğu bölgede ve portal giriş çıkışında iyileştirilmiştir. Toplam 2 293 533 ağ hücresi üretilmiştir (Şekil 8).

Kontrol amaçlı olarak, yangın bölgesine yakın bir noktada, farklı ağ sayılarında hız, sıcaklık ve yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır (Tablo 10). 3 ve 4 numaralı ağ sayılarında, sonuçlara etkilerin çok az olduğu görülmüştür. Tüm hesaplamalarda 10^{-6} ile 10^{-9} mertebesinde yakınsama sağlanmıştır.



Şekil 8. Ağ yapısı gösterimi.

Tablo 10. Farklı ağ sayılarında sonuçların karşılaştırılması.

No	Ağ Element Sayısı	Hız	%	Sıcaklık	%	Yoğunluk	%
1	943 057	1,80421	%29	329,13	%-7	1,01039	%8
2	1 120 445	1,48539	%-6	311,15	%-1	1,0879	%1
3	2 141 331	1,4197	%0	309,07	%0	1,10271	%0
4	2 293 533	1,4016	-	308,904	-	1,09952	-

Matematiksel Modelleme

Analizler kararlı rejimde basınç tabanlı olarak yapılmıştır. Akışa dair parametreleri hesaplayabilmek için akışkanın uyması gereken kütle ve momentumun korunumu gibi temel prensiplerden yola çıkılarak temel akış denklemleri elde edilebilir. Genel değişken ϕ kullanılarak, süreklilik, momentum, enerji, türbülans modeli denklemleri gibi tüm denklemler genel bir formda yazılabilir. Genel bir ϕ değişkeni için üç boyutlu genel taşınım denklemi Denklem 11'de verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{U}\phi) = \nabla(\Gamma_\phi \nabla\phi) + S_\phi \quad (11)$$

Bu eşitlikte; ϕ , genel bir değişkeni, Γ , genel difüzyon katsayısını ve S , kaynak terimini temsil etmektedir. Genel taşınım denklemi için, değişkenler ve bunlara karşılık gelen difüzyon katsayıları ile kaynak terimleri de Tablo 11'de verilmiştir.

Türbülans modeli seçiminde, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) denklemleri, modellenen türbülans ölçeğindeki transport denklemlerini akışa dair parametrelerin ortalama değeri olarak ifade etmektedir. Çözüm yapılırken; basınç, sıcaklık, enerji ya da tür konsantrasyonu gibi skaler büyüklükler için ortalananmış değerler kullanılarak sistem çözümlenebilir hale getirilmektedir. Bu çalışmada, süreklilik denkleminin sağlanması, hesap yükünün nispeten az olması, türbülans harcanım oranının hesaplanması ve sonucun negatif çıkmaması (hızın karesi) gibi konularda oldukça tutarlı olan realizeable k/ϵ modeli kullanılmıştır (Berberoğlu, 2008). Bu modelde k , türbülans kinetik enerjisini, ϵ , türbülans yutulma oranını (turbulence dissipation rate) ifade eder. Türbülanslı viskozite değeri μ_t ; k ve ϵ 'nin fonksiyonu olarak ifade edilir.

SONUÇLAR

Çalışmada, 2045 yılı trafik verileri temel alınarak tespit edilen kritik yangın bölgesinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bölge, iki tüp şeklinde olan tünelin Doğu tüpü girişinden 11500 metre uzaklıkta yer almaktadır. 30 MW'lık bir otobüs yangını durumu Ansys Fluent programı yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen hız, sıcaklık, karbon monoksit emisyonları sonuçları sırasıyla bölüm içerisinde verilmiştir.

Analiz sonuçları; yangın bölgesinde oluşabilecek hasarları tespit edebilmek için dikey kesitte, tünel

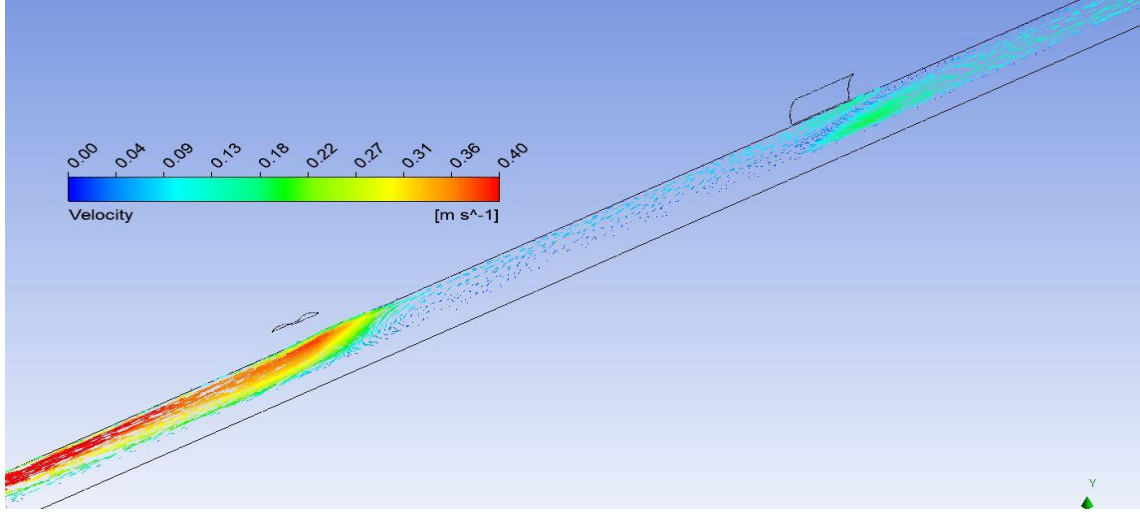
boyunca duman dağılımını görebilmek için yatay kesitte, atış fanlarının performanslarını izleyebilmek ve olası tünel içine duman basma riskini görebilmek için şaft bölgesinde yatay kesitte, yangın bölgesine müdahale edecek itfaiye personeli ve ters yönde tünel kullanıcılarının tahliyesi için önemli olan yerden 1,7 metre mesafede yatay kesitte incelenmiştir.

Hız dağılımı incelendiğinde, dağılım yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar 3 m/s değerinin üzerindedir. Temiz hava şaftından, tünel çıkışına kadar olan kesimde ise trafiğin tersi yönde yaklaşık 1 m/s'lik hava hızı sağlanmaktadır. Atış fanlarına yakın bölgedeki hız vektörleri Şekil 9'da verilmiştir. Jet fan gruplarının çalıştığı 150 m'lik kesimde yerel hız dağılımı da Şekil 10'da verilmiştir. Yangın bölgesinden 150 m ve 250 m mesafede çalışan jet fan gruplarının hız konturları incelendiğinde, piyasada bulunabilen jet fanlara ait teknik özelliklere göre 33,6 m/s'lik hava hızını doğru şekilde yansıttığı görülmektedir. Jet fan grupları arasındaki 100 m'lik mesafe jet fanların çalışma verimi açısından yeterli görülmektedir.

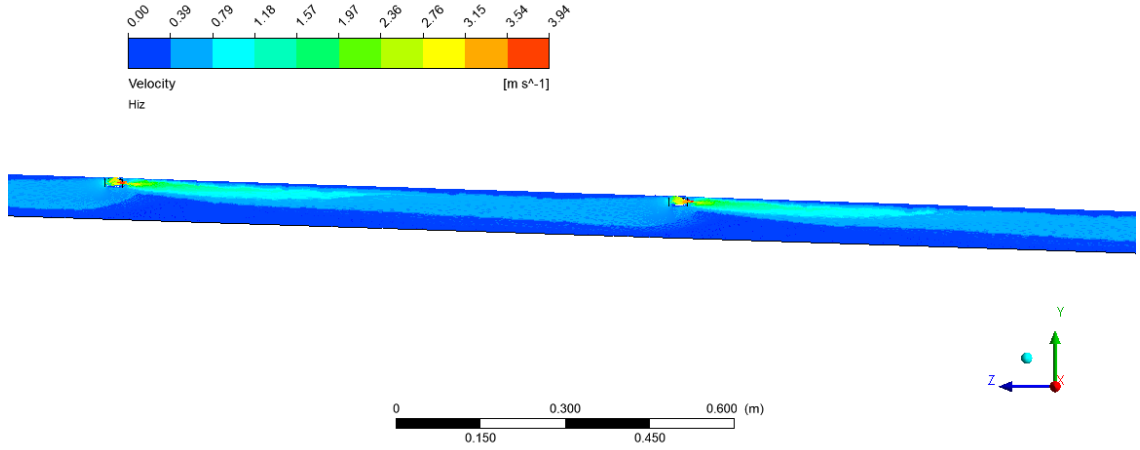
Şekil 11'de yerden 1,7 m mesafede lokal hız dağılımı gösterilmiştir. Yangın bölgesinin arka kısmında, insanların tahliye edileceği bölgede (trafik akış yönünün tersi istikamette), yerden 1,7 m mesafede hız 3 m/s'dir. Trafik yönünde yangın mahaline yakın kısımlarda hız 6-7 m/s seviyelerindeyken, diğer kısımlarda 4 m/s'yi geçmemektedir.

Tablo 11. Genel taşınım denklemi için, değişkenler ve bunlara karşılık gelen difüzyon katsayıları ve kaynak terimleri (Novozhilov, 2001).

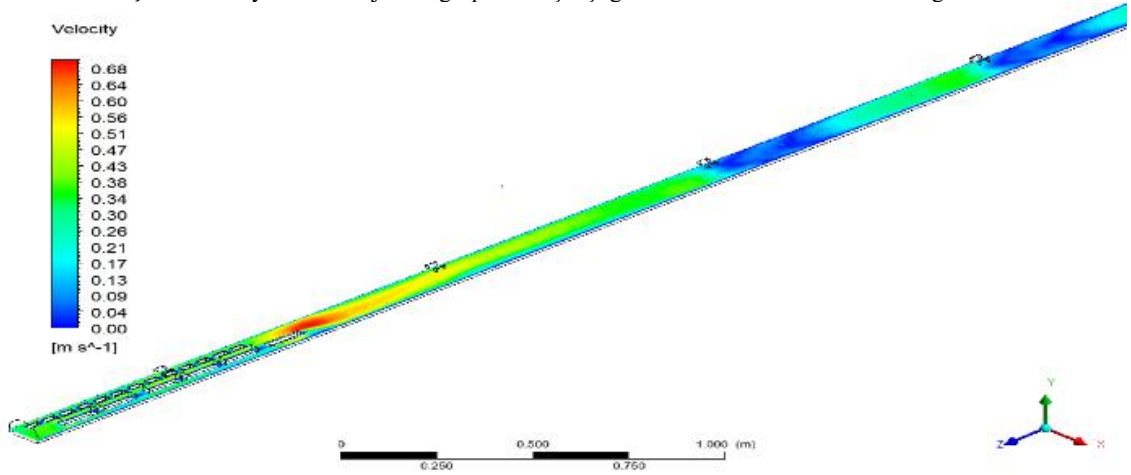
Denklem	ϕ	Γ	S_ϕ
Süreklilik	1	0	0
x-momentum	u	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}\right)$
y-momentum	u_z	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}\right)$
z-momentum	u_z	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial z} - g(\rho - \rho_{ref}) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}\right)$
Türbülans kinetik enerjisi	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$P + G - \rho\epsilon$
Türbülans kinetik enerji yutulması	ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k}(C_1G - C_2\rho\epsilon)$
Enerji	h	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	$-Q_R$
Kimyasal reaksiyon	Y_F	$\frac{\mu_e}{\sigma_Y}$	$-C_R\rho\frac{\epsilon}{k}\min\left(Y_F, \frac{Y_0}{r}\right)$
$P = \mu_e \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\}$ $G = g \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \frac{\partial p}{\partial z}$			



Şekil 9. Boyuna kesitte atış fanlarına yakın 150 m'lik kısımda yerel hız dağılımı.



Şekil 10. Boyuna kesitte jet fan gruplarının çalıştığı 150 m'lik kesimde lokal hız dağılımı.



Şekil 11. Yerden 1,7 m mesafede 400 m'lik mesafede lokal hız dağılımı.

Şekil 12'de yangının olduğu kısımda 1300 K gibi yüksek sıcaklık değeri görünürken, yangın bölgesinde sıcaklığın 600 K düzeyinde olduğu, havalandırma yönünde yangına en yakın fan grubunun bulunduğu ilk 50 m'lik kısımda 400-500 K seviyelerine düştüğü gözlemlenmektedir. Bunun nedeni de jet fanların çalışması ile havanın tahliye edilmesidir.

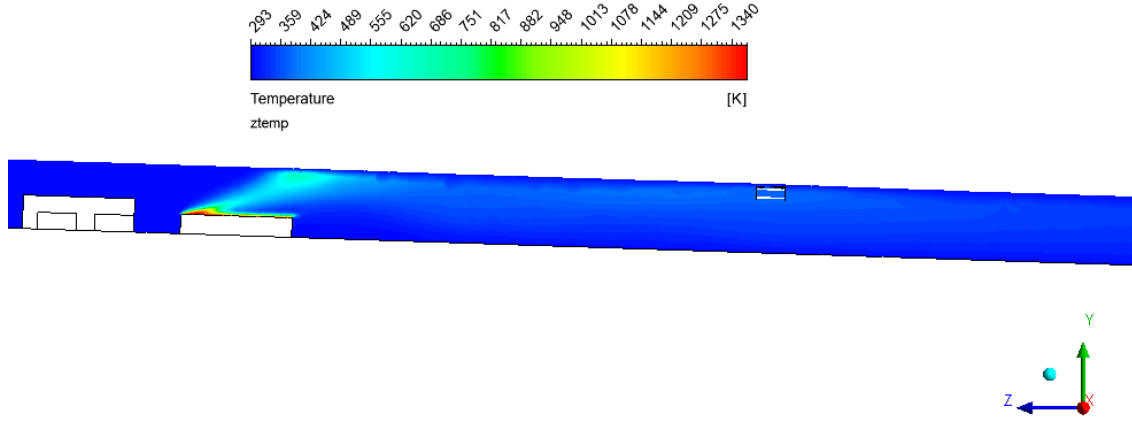
Yangın bölgesindeki sıcaklık dağılımı 400 K civarında olduğu belirlendikten sonra sıcaklık skalası en yüksek 600 K olacak şekilde belirlenmiş ve yangına müdahale noktasında önemli olan 200 m'lik bölge içerisindeki sıcaklık dağılımı Şekil 13'te verilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13 incelendiğinde, yangın bölgesinden geriye doğru sıcaklık yayılmamıştır. Bu da tünel kullanıcılarının tüneli tahliyesi için güvenli alanın oluştuğunu ve havalandırma için seçilen tasarım hızının (3 m/s) yeterli olduğunu

göstermektedir. Sıcaklığa bağlı karışım havası yoğunluk düşüştü nedeniyle yangın mahalline yakın noktalarda tünel tavanına yakın kısımlarda iken, yangın olan bölgeye uzaklık arttıkça soğuyan havanın, yoğunluğunun artması nedeniyle sıcaklığın tüm kesitte homojen olarak dağıldığı gözlemlenmektedir.

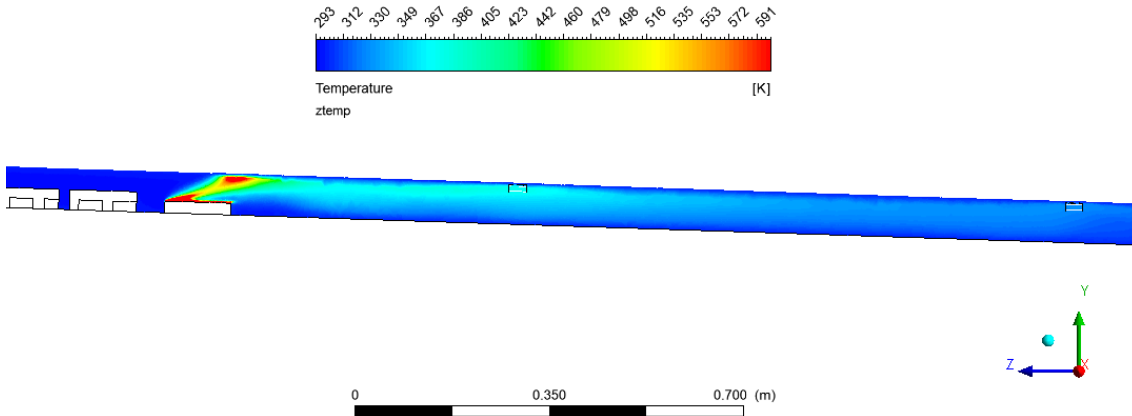
Eksenel fanların yangın durumunda ne şekilde etkileneceğini tespit edebilmek için Şekil 14'te, zeminden 6 m yükseklikte yerel sıcaklık dağılımı verilmiştir. Yangın bölgesinde sıcaklık değerleri 600 K

seviyelerindeyken, yangın bölgesinden 200 m uzaklıkta tavan sıcaklığı 330 K seviyelerine düşmüştür. Çalıştırılmayan ilk jet fan grubunda sıcaklık değerleri 500 K seviyelerindedir. Havalandırma sisteminin ana elemanları olan jet fanlar 250°C (523 K)'de 90 dakika süre ile çalışacak şekilde seçildiği kabulüyle, yangın bölgesinden 150 m ileride bulunan ve aktif olan jet fanların zarar görmeyeceği öngörülebilir.

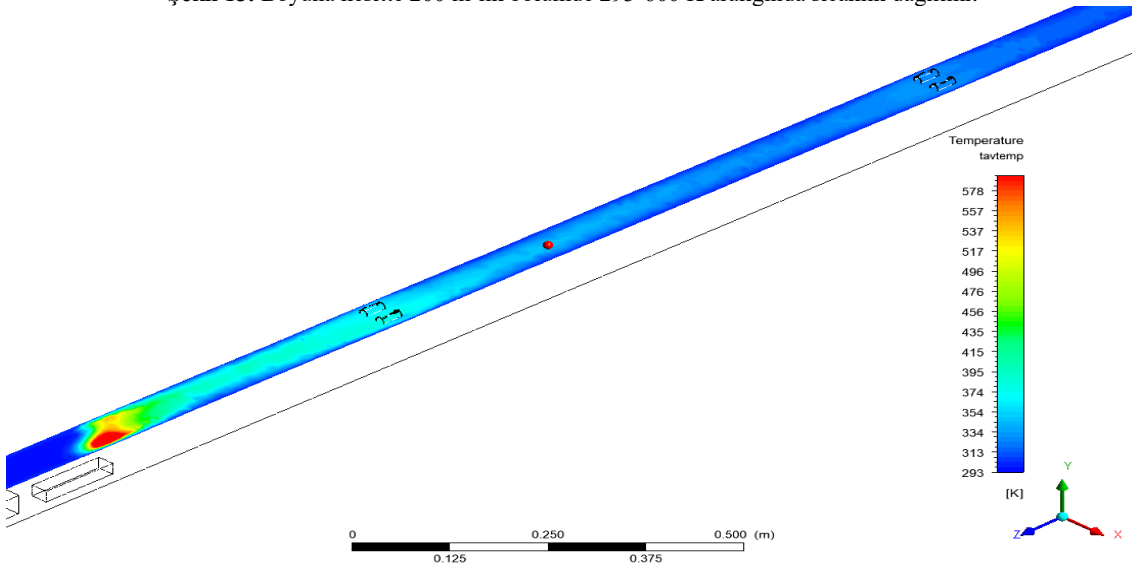
Şekil 15'te, ortalama bir insan boyunun 1,7 m olduğu kabul edilerek 400 m'lik kısımda zemin seviyesine yakın



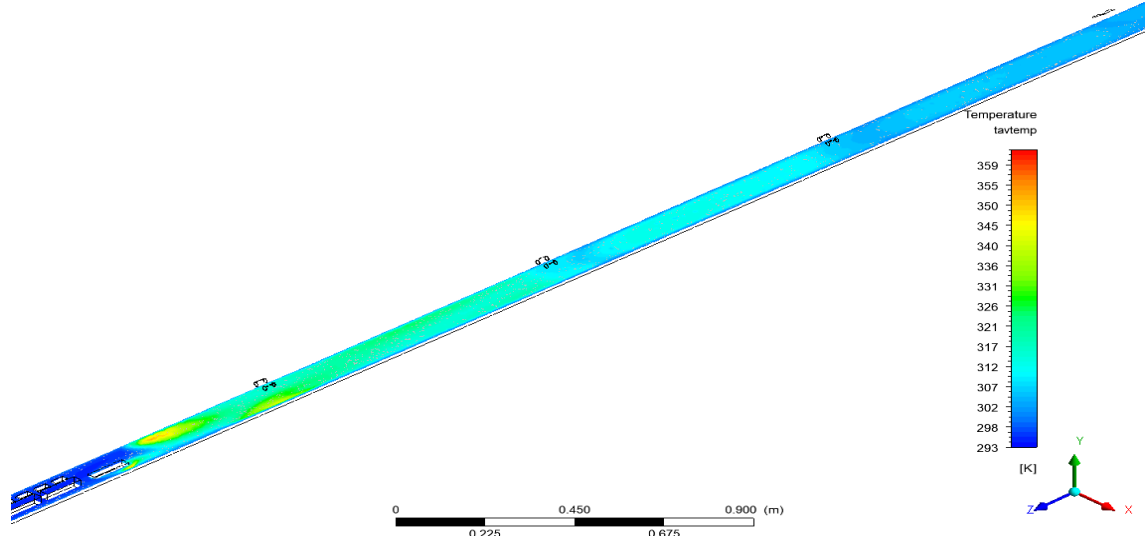
Şekil 12. Boyuna kesitte yangın bölgesinde sıcaklık dağılımı.



Şekil 13. Boyuna kesitte 200 m'lik bölümde 293-600 K aralığında sıcaklık dağılımı.



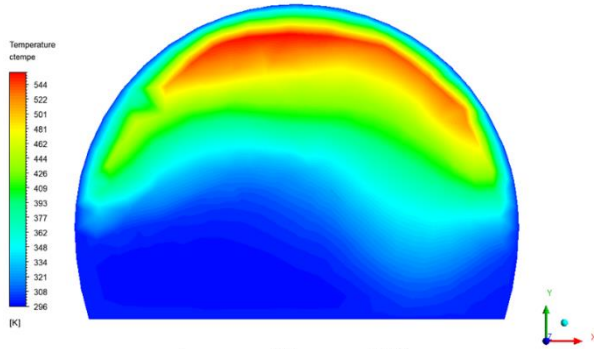
Şekil 14. Zeminden 6 m yükseklikte, 200 m'lik kısımda tavan bölgesi sıcaklık dağılımı.



Şekil 15. Zeminden 1,7 m yükseklikte, 400 m'lik kısımda sıcaklık dağılımı.

sıcaklık dağılımı verilmiştir. Yangın bölgesinden, tünel kullanıcılarının tahliyesinin yapılacağı geri bölgede sıcaklık değerlerinin yükselmediği görülmektedir. Havalandırma yönünde ilk 150 m'lik kısımda sıcaklık değeri 330 K (63°C) seviyelerini geçmektedir. Bu da yangına müdahale noktasında gelecek itfaiye personelinin gerekli koruyucu önlemleri almasını gerektirmektedir.

Şekil 16'da yangın bölgesinden, trafik yönünde 10 m ileride tünel kesitinin yerel sıcaklık dağılımı verilmiştir. Beklenildiği gibi, karışım havasının sıcaklığı bağlı yoğunluk düşüşü nedeniyle sıcak hava yükselmiş ve tünel tavanında en yüksek değerler ölçülmüştür.



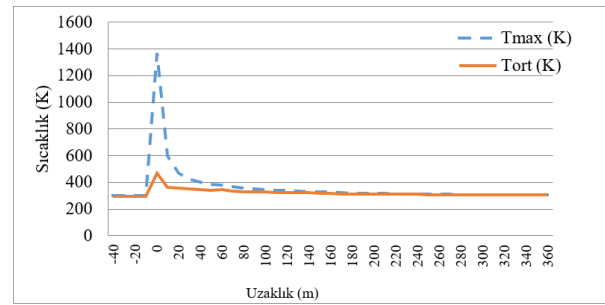
Şekil 16. XY ekseninde yangın bölgesinden 10 m ileride sıcaklık dağılımı.

Şekil 17'de, 0 m yangın bölgesi olmak üzere, -40 m tünel kullanıcılarının tahliye güzergâhında, 360 m'de trafik yönünde kirli hava atış şaftına kadar olan mesafede ölçülen en yüksek sıcaklıklar ve ortalama sıcaklıklar grafik olarak gösterilmiştir.

Tünel içindeki beton yapının hasarı; beton yapının dağılması ve ısıl olarak mukavemetinin azalmasına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Isıl bozulma, tünel astar veya döşeme kalınlığının yarısını aşarsa yapının ciddi şekilde hasar gördüğü kabul edilir. Tünelde beton

yüzeyle sıcaklığın yayılması 200°C'de başlar, kritik sıcaklık ise 300°C'dir. (PIARC, 1991).

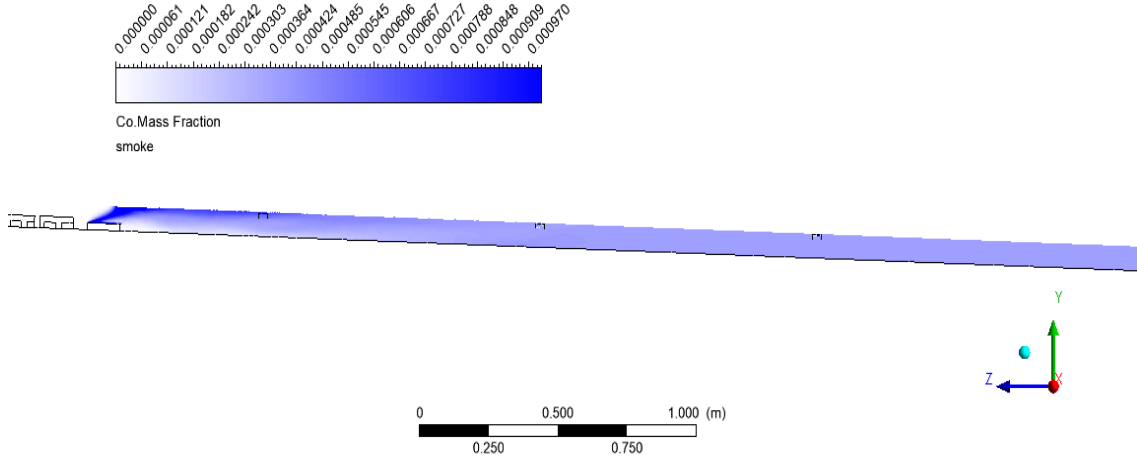
Sıcaklık analizi sonuçları incelendiğinde, yangın bölgesinden trafik yönünde ilk 50 metrelik kısımda ölçülen en yüksek sıcaklıklar 200°C'nin üzerinde seyretmektedir. Bu bölümde beton malzemelerin zarar görebileceği öngörülebilir. Özellikle yangın bölgesi ve 20 m ilerisine kadar olan bölümde sıcaklıklar belirli bölümlerde 300°C'yi (573 K) aşmaktadır. Bu bölümlerde yapısal dökülmeler ve kalıcı hasarlar beklenebilir. Özellikle yangının çıktığı bölgeye yakın olan 20 m'lik mesafede tavan sıcaklık değerleri kritik değerleri aşmaktadır.



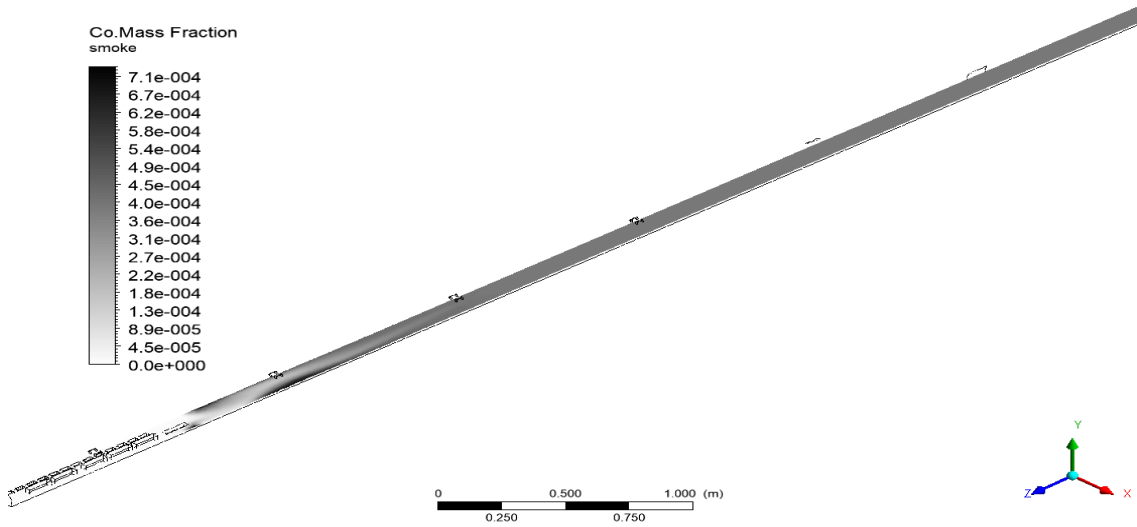
Şekil 17. Yangın bölgesinden 40 m geride ve 360 m ileride (trafik yönüne) sıcaklık değişimi.

Yangın mahalinden trafik yönünde ilk 100 m'lik kısımda tünelin tavan kısmına yakın bulunan bölgede, 100°C ile 350°C arasında sıcaklık değerlerinin değiştiği ve yangına dayanıklı malzemelerin kullanılmaması durumunda, aydınlatma armatürlerinde, aydınlatma, haberleşme ve veri iletim kablolarında, kablo kanallarında, ve destek elemanlarında kalıcı hasarlar olabileceği öngörülebilir (PIARC, 1991).

Acil durumlardaki önemli noktalardan birisi de karbonmonoksit emisyonu konsantrasyonlarıdır. Şekil 18'de yangın bölgesinden geriye doğru dumanın



Şekil 18. Boyuna kesitte 400 m'de zamandan bağımsız CO dağılımı.



Şekil 19. Boyuna kesitte, zeminden 1,7 m mesafede CO ve duman dağılımı.

yayılmadığı görülmektedir. Yangın bölgesinden şafta kadar olan bölümde karışım havasında bulunan CO seviyesi 10000 ppm'den 400 ppm seviyelerine kadar azalmıştır.

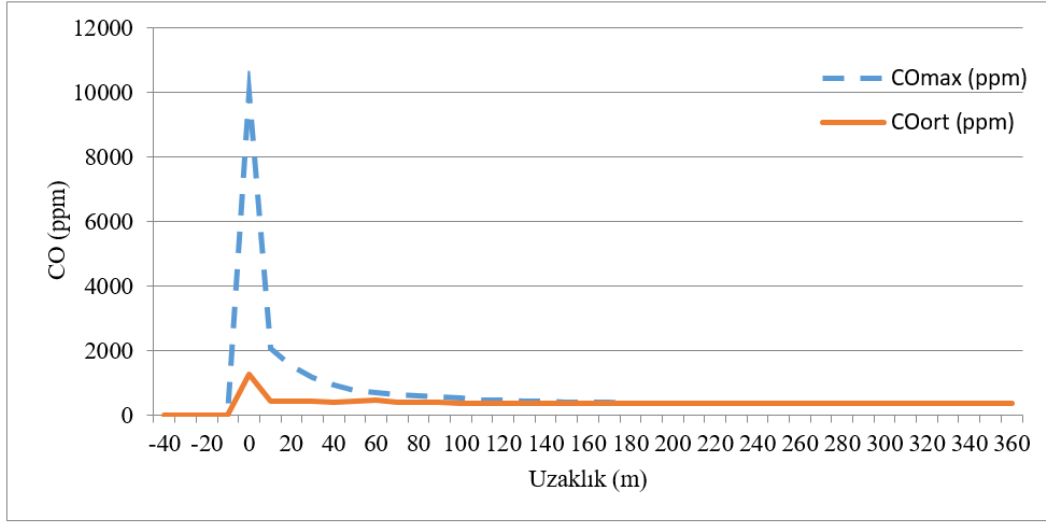
Şekil 19'da şaftların sonrasındaki duman dağılımını da görebilmek için 400 m'lik kısımda CO dağılımı gösterilmiştir. Sıcaklık düşmesi nedeniyle yangın mahallinden şafta doğru karışım havasının yoğunluğu yükselmekte ve duman tünel kesitine dengeli biçimde dağılmaktadır. Yangının olduğu bölgenin hemen sonrasındaki çalışmayan ilk jet fan grubu havalandırmaya karşı blokaj etkisi yaptığından dolayı ilk jet fan grubunun altında ufak bir kısımda dumanın çıktığı görülmektedir.

Şekil 20'de 0 m yangın bölgesi olmak üzere, -40 m tünel kullanıcılarının tahliye güzergâhında, 360 m'de trafik yönünde kirli hava atış şaftına kadar olan mesafede ölçülen en yüksek ve ortalama CO değerleri grafik olarak gösterilmiştir.

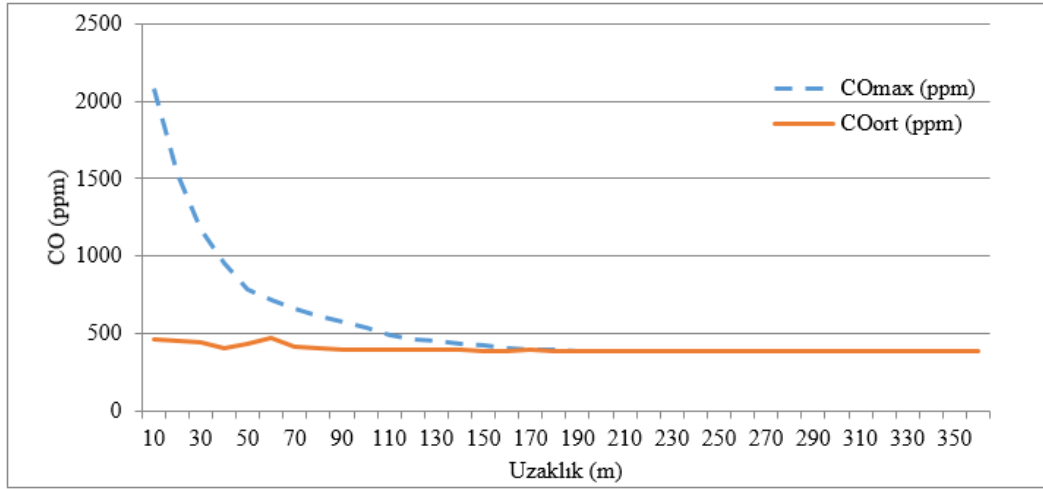
Şekil 21'de yangın bölgesinin 10 m ilerisinden, kirli hava atış şaftına kadar CO miktarı değişimi detaylı olarak grafikte gösterilmiştir. Ortalama CO değerlerinin atış şaftına kadar 400 ppm seviyelerinin altına düşmediği,

özellikle ilk 50 m'de ortalama 1000 ppm'in üzerinde olduğu görülmektedir. Yangın mahallinden trafik yönüne göre geride kalan kısımda CO oranının kabul edilebilir seviyelerde olduğu (Şekil 20), bu da yangının gerisinde bekleyen tünel kullanıcılarının dumandan etkilenmeden tahliyesinin gerçekleşebileceğini göstermektedir.

CO analizi sonuçları incelendiğinde, yangın bölgesine yakın 50 m'lik mesafede sıcaklık kaynaklı yoğunluk farkı nedeniyle CO'nin tünelin tavan kısmında yoğunlaştığı, 60 m'de çalıştırılmayan jet fanın engellemesinden dolayı ortalama değerlerin nispeten yükseldiği, 70 m'den sonra ise dumanın soğuyarak çökmeye başlamasıyla beraber en üst ve ortalama değer arasındaki farkın kapandığı görülmektedir. İlk 30 m'de yangın durumunda tünel kullanıcıları için kabul edilebilir güvenlik kriterlerine göre 1200 ppm seviyesinin (Caliendo vd., 2013) üzerinde olduğu görülmektedir. Bu da yangın söndürme ekiplerinin oksijen maskesi vb. koruyucu önlemler olarak yangına müdahale etmesini gerektirmektedir.



Şekil 20. Yangın bölgesinden 40 m geride ve 360 m ileride (trafik yönüne) CO değişimi.



Şekil 21. Yangın bölgesinden kirli hava şaftına kadar CO değişimi.

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Literatür çalışmalarından faydalanılarak seçilen tasarım yangın yüküne göre kritik hız ve sıcaklık değerleri hesaplanmış analitik olarak yapılan hesaplar sonucunda yangın sonucu oluşan kritik nokta olarak tünelde eğimin en yüksek olduğu DT_3 lokasyonu bulunmuştur. Bu bölgede eğimin negatif olması sebebiyle, yangın sonucu oluşan baca etkisinin yüksek olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır. Ansys Fluent yazılımında geometri hazırlanırken, mesh yapısı hazırlanırken ve uygun model seçilirken (k-ε türbülans modeli) literatür çalışmalarından faydalanılmış ve sonuçların analitik hesaplamalarla uygunluk gösterdiği görülmüştür.

Yangın bölgesinden 150 m ve 250 m mesafede çalışan jet fan gruplarının hız konturları incelendiğinde, fanların çalışma hızı 33,6 m/s olarak elde edilmiştir. Jet fan grupları arasındaki 100 m mesafe jet fanların çalışma verimi açısından yeterli görünmektedir. Yangın bölgesinin arka kısmında, insanların tahliye edileceği bölgede (trafik akış yönünün tersi istikamette) hava hızı 3 m/s olmaktadır. Ayrıca, trafik yönünde yangın

mahaline yakın kısımlarda hız 6-7 m/s seviyelerindeyken, diğer kısımlarda 4 m/s'yi geçmemektedir.

Eksenel fanların yangın durumunda ne şekilde etkileneceğini tespit edebilmek için zeminden 6 m yükseklikte yerel sıcaklık dağılımı verilmiştir. Yangın bölgesinde sıcaklık değerleri 600 K seviyelerindeyken, yangın bölgesinden 200 m uzaklıkta tavan sıcaklığı 330 K seviyelerine düşmüştür. Yangın bölgesinden, tünel kullanıcılarının tahliyesinin yapılacağı geri bölgede sıcaklık değerlerinin yükselmediği görünmektedir. Havalandırma yönünde ilk 150 m'lik kısımda sıcaklık değeri 330 K (63°C) seviyelerini geçmektedir. Ortalama sıcaklık değerlerinin ilk 30 m'de ortalama 400 K'in üzerinde olduğu ve yangına müdahale ekipleri ve o bölgedeki tünel kullanıcıları için riskli olduğu görünmektedir. Bununla birlikte, 0 m yangın bölgesi olmak üzere, -40 m tünel kullanıcılarının tahliye güzergâhında, 360 m'de trafik yönünde kirli hava atış şaftına kadar olan mesafede hesaplanan ortalama CO değerlerinin atış şaftına kadar 400 ppm seviyelerinin altına düşmediği, özellikle ilk 50 m'de ortalama 1000 ppm'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yangın mahallinden trafik

yönüne göre geride kalan kısımda CO oranının kabul edilebilir seviyelerde olduğu, sadece trafik yönünde ilk 50 m’de referans değerini aştığı belirlenmiştir.

Çalışmada tünel içerisinden tehlikeli madde yüklü araçların geçmediği (özellikle tankerle akaryakıt taşımacılığı) varsayımı yapılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda çok uzun gerçek bir karayolu tüneline tehlikeli madde geçişi olan durumlar hesaba katılarak, değişik araç yangınları üzerine (30, 50, 100, 200 MW’lık yangın durumları) çalışma yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Alpğiray B., 2016, *Enine Havalandırma Sistemine Sahip Bir Tünelde Yangın Kaynaklı Duman Tahliyesinin Sayısal Yöntemle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Alva W.U., Jomaas G., Anne S. and Dederichs A., 2017, The Influence of Vehicular Obstacles on Longitudinal Ventilation Control in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, 87, 25-36.

Atkinson G.T. and Wu, Y., 1996, Smoke Control in Sloping Tunnels, *Fire Safety Journal*, 27, 335-341.

Berberoğlu M.İ., 2008, *Yeraltı Raylı Taşıma Sistemi İstasyonu İçin Yangın Modellemesi ve Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M.L., Meo, M.G. and Russo, P., 2012, Numerical simulation of different HGV fire scenarios in curved bi-directional road tunnels and safety evaluation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31, 33-50.

Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M.L., Meo, M.G. ve Russo, P., 2013, “Simulation of fire scenarios due to different vehicle types with and without traffic in a bi-directional road tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 22-36.

Chow W.K., Gao Y., Zhao J.H., Dang J.F., Chow C.L. and Miao L., 2015, Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation, *Fire Safety Journal*, 75, 14-22.

CETU. (Novembre, 2003). *Dossier Pilote Des Tunnels Equipments -Ventilation*, Bron: Centre D’etudes Des Tunnels, 45-69.

EPC (European Parliament and of the Council), 2004, On Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network, *Official Journal of the European Union*, Brussel, 29 April 2004, L201, 56-76.

EU Report, 2003, EU (European Union) Directorate General for Energy and Transport, *Safety in European Road Tunnels*, EU Report 1.4.73, Brussel, 1-7.

FIT (European Thematic Network Fire in Tunnels), 2005, *Design Fire Scenarios*, Technical Report Part 1, A. Haack, STUVA, 60-70.

Gong, L., Jiang, L., Li, S., Shen, N., Zhang, Y. and Sun, J. 2016, “Theoretical and experimental study on longitudinal smoke temperature distribution in tunnel fires”, *International Journal of Thermal Sciences* 102, 319-328.

Hu L.H., Huo R., Wang H.B., Li Y.Z. and Yang R.X., 2007, Experimental Studies On Fire-Induced Buoyant Smoke Temperature Distribution Along Tunnel Ceiling, *Building and Environment*, 42, 11, 3095-3915.

Hyun K.G., Ryul K.S., Sun R.H., 2009, An Experimental Study on the Effect of Slope on the Critical Velocity in Tunnel Fires, *Journal of Fire Sciences*, 28, 27-47.

Ingason, H., Li, Y.Z. ve Lönnemark, A., 2015, Springer Science+Business Media New York, “Tunnel Fire Dynamics”, 372-384, 473-504.

Karaaslan S., Hepkaya E., Yucel N., 2011, Ölçeklendirilmiş Bir Kısa Tünelde Boyuna Havalandırma Sisteminin CFD Simülasyonu”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 33, 1, 63-77.

Kashef A., Saber H.H. and Gao L., 2009, Optimization of Emergency Ventilation Strategies in a Curved Section of a Road Tunnel, *National Republican Congressional Committee (NRCC)*, 51289, 11.

KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı), 1997, *Karayolu Tüneli Uygulama Projesi Teknik Şartnamesi*, KGM Matbaası, Ankara, 1-18.

Kurioka H., Oka Y., Satoh H. and Sugawa O. 2003. Fire Properties in Near Field of Square Fire Source with Longitudinal Ventilation in Tunnels, *Fire Safety Journal*, 38, 319-340.

Lee S.R. and Ryou H.S., 2005, An Experimental Study of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires, *Journal of Fire Sciences*, 23, 119-138.

Lee Y.P. and Tsai K.C., 2012, Effect of Vehicular Blockage on Critical Ventilation Velocity and Tunnel Fire Behavior in Longitudinally Ventilated Tunnels, *Fire Safety Journal*, 53, 35-42.

Li Y.Z., Lei B. and Ingason H., 2010, Study of Critical Velocity and Backlayering Length in Longitudinally Ventilated Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, 45, 361-370.

Li, Y.Z., Lei, B., Ingason, H. (2012) Scale modeling and numerical simulation of smoke control for rescue stations in long railway tunnels. *Journal of Fire Protection Engineering* 22 (2):101-131.

- Maraveas, C. and Vrakas, A.S., 2014, Design of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety, *Structural Engineering International*, 3, 1-11.
- McGrattan, K. and Forney, G., 2004, Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's Guide. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
- NFPA, 2017, *NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2017 Edition*, NFPA (National Fire Protection Association), Massachusetts, USA.
- Novozhilov V., 2001, Computational Fluid Dynamics Modeling of Compartment Fires, *Progress in Energy and Comustion Science*, 27, 611-666.
- Oka Y. and Atkinson G.T., 1995, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, 25, 305-322.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress), 1991, "Fire in Road Tunnels. *Protection for Civil Engineering Structures, Electrical Circuits and Equipment*, PIARC Committee on Road Tunnels, Paris, 175, 55-68.
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress), 2017, *Road Tunnels: (2017R02EN) Design Fire Characteristics for Road Tunnels*, PIARC Technical Committee 3.3 on Road Tunnels Operations, Paris, 3-64.
- Taillefer, N., Carlotti, P., Lemerle, C. and Avenel, R., 2013, Ten Years of Increased Hydrocarbon Temperature Curves in French Tunnels, *Fire Technology*, 49(2), 531-549.
- Tang F., Li L., Chen W., Tao C. and Zhan Z., 2017, Studies on Ceiling Maximum Thermal Smoke Temperature and Longitudinal Decay in a Tunnel Fire with Different Transverse Gas Burner Locations, *Applied Thermal Engineering*, 110, 1674-1681.
- Toprak, A.S., 2014, *CFD Application of a metro tunnel fire safety and emergency ventilation systems*, Master's Thesis, Marmara University Department of Mechanical Engineering, İstanbul.
- Vauquelin O. and Wu Y., 2006, Influence of Tunnel Width on Longitudinal Smoke Control, *Fire Safety Journal*, 41, 420-426.
- Wang X.Y., Spearpoint M.J. and Fleischmann C.M., 2017, Investigation of the Effect of Tunnel Ventilation on Crib Fires Through Small-Scale Experiments, *Fire Safety Journal*, 88, 45-55.
- Wu Y. and Bakar M.Z.A., 2000, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation System - A Study of the Critical Velocity", *Fire Safety Journal*, 35, 363-390.