

TÜNEL YANGINLARININ MODELLENMESİ VE ETKİN
PARAMETRELERİN MODELLEMEDEKİ GERÇEKÇİLİĞİNİN
İNCELENMESİ

Merve ALTAY

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ali SÜRMEK

2016



T.C
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜNEL YANGINLARININ MODELLENMESİ VE
ETKİN PARAMETRELERİN MODELLEMEDEKİ
GERÇEKÇİLİĞİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve ALTAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

BURSA

Aralık 2016

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

“Merve ALTAY” tarafından “Prof. Dr. Ali SÜR MEN” yönetiminde hazırlanan “TÜNEL YANGINLARININ MODELLENMESİ VE ETKİN PARAMETRELERİN MODELLEMEDEKİ GERÇEKÇİLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tez, kapsamı ve niteliği açısından incelenmiş ve **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali SÜR MEN

.....

(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Prof. Dr. Yusuf Ali KARA

.....

(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

.....

(Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Tez Savunma Tarihi:

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Murat ERTAŞ

.../.../20...

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Merve ALTAY

İmzası:

X

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında, değerli zamanını ayırarak karőılaőtıęım problemleri aőmam konusunda yardımlarıyla destek olan, çalıőmamı yönlendiren ve kolaylaőtıran, tecrübelerini benden esirgemeyen tez danıőmanım Prof. Dr. Ali SÜR MEN'e, en sıkıntılı zamanlarımda desteklerini yanımda hissettiğim aileme ve arkadaőlarıma teőekkürü bir borç bilirim.

Merve ALTAY



İÇİNDEKİLER

sayfa no

Dış Kapak	
İç Kapak	
Tez Sınav Sonuç Formu	
İntihal Beyanı	
Teşekkür	
İçindekiler	v
Şekil Listesi	vii
Çizelge Listesi	x
Sembol ve Kısaltma Listesi	xi
Özet	xii
Abstract	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	6
2.1. Literatürde Yer Alan Deneysel Çalışmalar	6
2.2. Ölçeklendirilmiş Model Tünellerde Yapılan Deneysel ve Nümerik Çalışmalar	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1. Yararlanılan Yazılımlar	16
3.1.1. FDS programının özellikleri	17
3.1.2. Smokeview programının özellikleri	21
3.1.3. PyroSim ara yüz programının özellikleri	22
3.2. Tünel Yangınları Konusunda Temel Tanımlamalar	23
3.2.1. Tünel yangını havalandırma sistemleri	23
3.2.2. Kritik hız	27
3.2.3. Isı salım hızının tanımı, önemi ve tespiti	30
3.2.4. Duman geri nüfuz etme derinliği	32
3.3. Modelin Fiziksel Özellikleri	33
3.4. Simülasyon Yaklaşımı	34

	<u>sayfa no</u>
3.4.1. Ağ yapısında kullanılan eleman sayısı ve optimizasyonu	36
3.4.2. Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) kriteri	39
3.4.3. Yangın kaynağının ısı salım hızı	40
3.4.4. Ölçeklendirme tekniği	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	45
4.1. Referans Çalışmada Yer Alan Havalandırma Önerilerinin Sayısal Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi	45
4.2. Tez Kapsamında Geliştirilen Havalandırma Senaryolarının Sayısal Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	72
EKLER	76
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>sayfa no</u>
Şekil 3.1	Eksene dik havalandırma sistemlerinin şematik gösterimi	24
Şekil 3.2	Yarı- Eksene dik havalandırma sistemlerinin şematik gösterimi	25
Şekil 3.3	Jet fanlı EHS'nin şematik gösterimi	25
Şekil 3.4	Saccardo nozul ve jet fanlı kombine EHS'nin şematik gösterimi	26
Şekil 3.5	Şaft ve jet fanlı kombine eksenel havalandırma sistemlerinin şematik gösterimi	26
Şekil 3.6	Kritik hızda hava hareketinin sıcaklık dağılımına etkisi	27
Şekil 3.7	Boyutsuz kritik hızın, Boyutsuz ISH'a bağlı değişimi	29
Şekil 3.8	Tünel yangını esnasında duman geriye akışının şematik olarak gösterimi	32
Şekil 3.9	Senaryolarda kullanılan model tünelin üç boyutlu gösterimi	34
Şekil 3.10	Fan gruplarının ve yangın kaynağının tünel içindeki konumunun şematik gösterimi	34
Şekil 3.11	Cs 'nin simülasyon hassasiyetine etkisinin sıcak dağılımları ile gösterimi	35
Şekil 3.12	Maksimum CFL sayısı- iterasyon sayısı grafiği	40
Şekil 3.13	ISH'ın simülasyon zamanına bağlı değişimi: a) 50 MW, b) 10 MW	41
Şekil 3.14	10 MW ISH'na sahip yangın kaynağı kullanıldığında $y=150$ m'de elde edilen eksenel havalandırma hızı profili ($t=30$ s' de)	43
Şekil 3.15	10 MW için jet fanların kullanılmadığı ve hava hızı, kritik hızla eşit olduğu durumda tünel simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı	44
Şekil 3.16	10 MW ve 50 MW ISH'na sahip yangın kaynakları kullanıldığında $y=150$ m'de elde edilen eksenel havalandırma hızı profilleri ($t=30$ s'de)	44
Şekil 4.1	Senaryo 1'de havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra tünelin simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı	47
Şekil 4.2	Senaryo 4'te havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra tünelin simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı	47
Şekil 4.3	Yüksek hızda çalıştırılan fanların duman sütununu bozucu etkisinin sıcaklık dağılımı ile gösterimi (Senaryo 6)	48
Şekil 4.4	Senaryo 2' de tünelin simetri ekseninde havalandırma sistemi devreye girdikten: a) 5 s, b) 15 s, c) 30 s sonraki görülen sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4.5	Senaryo 2' de havalandırma sistemi devreye girdikten 15 s sonra $y=40$ ve $y=136$ m 'deki havalandırma hızı profilleri	50
Şekil 4.6	Senaryo 2' de havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra $y=40$ ve $y=136$ m 'deki havalandırma hızı profilleri	50
Şekil 4.7	Senaryo 5'te havalandırma sistemi devreye girdikten 15 s sonra $y=40$ ve $y=136$ m 'deki havalandırma hızı profilleri	51
Şekil 4.8	Senaryo 5'te havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra $y=40$ ve $y=136$ m 'deki havalandırma hızı profilleri	51
Şekil 4.9	Yangın kaynaklı dumanın eksenel yönde eğilim göstermesi	56

	<u>sayfa no</u>
Şekil 4.10	Dumanın tünel tavanından kopmadan ilerlemesi 56
Şekil 4.11	Senaryo P’de kullanılan model tünel 58
Şekil 4.12	Senaryo P’de, tünelin simetri ekseninde ($x= 0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerinde yüksekliğe bağlı elde edilen hız profilleri (Havalandırma sistemi devreye girdikten a) 15 s, b)30 s, c)180 s sonra) 59
Şekil 4.13	Taşıyım yoluyla transfer edilen ısıya insan tolerans limitler 61
Şekil 4.14	Senaryo P’de, tünelin simetri ekseninde ($x= 0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerinde yüksekliğe bağlı sıcaklık dağılımı(Havalandırma sistemi devreye girdikten a) 15 s, b)30 s c)180 s sonra) 64
Şekil 4.15	Senaryo T’de kullanılan model tünel 66
Şekil 4.16	Senaryo T’de, tünelin simetri ekseninde ($x= 0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerinde yüksekliğe bağlı hız profilleri (Havalandırma sistemi devreye girdikten a) 15 sn, b)30 sn c)180 sn sonra) 68
Şekil 4.17	Senaryo T’de, tünelin simetri ekseninde ($x= 0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerinde yüksekliğe bağlı sıcaklık dağılımı (Havalandırma sistemi devreye girdikten a) 15 sn, b)30 sn c)180 sn sonra) 69

ÇİZELGE LİSTESİ

		<u>sayfa no</u>
Çizelge 1.1	Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünel yangınları örnekleri	1
Çizelge 2.1	Literatürde yer alan bazı büyük ölçekli yangın testleri	10
Çizelge 2.2	Memorial tüneli testlerinden elde edilen veriler	11
Çizelge 3.1	Bazı karayolu taşıtlarının ISH'nın maksimum değerleri ve bu değerlere ulaşma süreleri	31
Çizelge 3.2	Kara yolu taşıtlarının taşıt türüne bağlı olarak maksimum ISH değerleri	32
Çizelge 3.3	10 MW ISH' na sahip yangın kaynağı kullanılan modelde 200 s'lik simülasyon zamanı için ağ yapısı-hesaplama süresi	38
Çizelge 3.4	50 MW ISH ' na sahip yangın kaynağı kullanılan modelde 200 s'lik simülasyon zamanı için ağ yapısı-hesaplama süresi	38
Çizelge 3.5	Tünelin gerçek boyutlarda ve 1/20 ölçeğinde modellendiğinde ISH ve havalandırma hızı değerleri	43
Çizelge 4.1	Referans makaledeki durum senaryoları	45
Çizelge 4.2	50 MW ISH'na sahip yangın oluşması durumu için geliştirilen havalandırma sistemi senaryoları	54
Çizelge 4.3	N 12101 - 3 Standardına göre fan sıcaklık sınıfları ve dayanabilecekleri maksimum duman sıcaklıkları	62
Çizelge 4.4	10 MW ISH'na sahip yangın oluşması durumu için geliştirilen havalandırma sistemi senaryoları	65

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

Semboller	Açıklama
A	Tünel Kesit Alanı
C	CFL kriteri, Boyutsuz
C_p	Özgül Isı, $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
C_s	Smagorinsky Sayısı, Boyutsuz
D^*	Karakteristik Yangın Çapı, Boyutsuz
Fr	Froude Sayısı, Boyutsuz
Fr_k	Kritik Froude Sayısı, Boyutsuz
H	Tünel Yüksekliği, m
k	Isı İletim Katsayısı, $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
k_{LES}	Akış İçindeki Kütle Difüzyonu, Boyutsuz
K_l	Froude Faktörü, Boyutsuz
K_g	Eğim Faktörü, Boyutsuz
L_f	Alev Kalınlığı, m
\dot{m}	Kütleli Debi, kg s^{-1}
P	Basınç, Pa
Pr	Prandtl Sayısı, Boyutsuz
\dot{Q}	Isı Salım Hızı, kW
Q^*	Boyutsuz Isı Salım Hızı, kW
Q_c	Konvektif Isı Salım Hızı, kW
Sc	Schmidt Sayısı, Boyutsuz
t	Zaman, s
T	Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
T_{max}	Yangında Ulaşılan Maksimum Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
T_0	Ortam Sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$
T_f	Yangın Akış Yönündeki Ortalama Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
u^*	Boyutsuz Havalandırma Hızı, m s^{-1}
U	Havalandırma hızı, m s^{-1}
U_c	Kritik Havalandırma Hızı, m s^{-1}
W	Tünel Derinliği, m
Z	Karışım Kesri, Boyutsuz
$\delta_x, \delta_y, \delta_z$	En Küçük Ağ Hücresinin Boyutları, m
μ_{LES}	Dinamik Viskozite, $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$
ρ	Yoğunluk (Özkütle), kg m^{-3}

Kisaltmalar	Açıklama
CFL	Courant- Friedrichs- Lewy kriteri
EHS	Eksenel Havalandırma Sistemi
FDS	Fire Dynamics Simulator Yazılımı
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ISH	Isı Salım Hızı
LES	Large Eddy Simulation Türbülans Modeli
NFPA502	Karayolu Tünelleri, Köprüleri diğer sınırlı erişimli Karayolu Standardı

ÖZET

TÜNEL YANGINLARININ MODELLENMESİ VE ETKİN PARAMETRELERİN MODELLEMEDEKİ GERÇEKÇİLİĞİNİN İNCELENMESİ

Merve ALTAY

Bursa Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Prof. Dr. Ali SÜRME

2016, 84 Sayfa

Bütün dünyada taşıt trafiğindeki artış oranı sebebiyle karayolu tünellerinin inşası ve karmaşıklığı giderek artmaktadır ve tünellerin güvenliği devlet adamları, araştırmacılar ve mühendisler arasında ilgi odağı olmuştur. Geçtiğimiz yıllarda karayollarında oluşan çok sayıdaki ölümcül yangınlar sonucu, karayolu görevlilerinin tünellerdeki can güvenliğini sağlamaları yönünde oldukça yüksek bir taleple karşılaşmaktadır. Bilgisayar simülasyonu, oluşan farklı yangın koşulları ile ilgili bilgi edinmek, tahminde bulunmak ve kurtuluş planı hazırlamak açısından en ekonomik, en etkili ve en esnek metottur.

Bundan dolayı bu çalışmada tünellerde oluşan taşıt (vehicle) ve havuz (pool) yangınları sonuçlarını analiz etmek amacıyla FDS (Yangın Dinamiği Simülatörü) yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, tünellerdeki cebri eksenel havalandırma sistemleri ve taşıt ve havuz yangınlarındaki Isı Salımı Hızı arasındaki ilişki tespit edilmeye çalışılmıştır. Cebri havalandırma etkileri büyük ölçüde yangın yükü çeşidine bağlı olduğundan, farklı yangın çeşitleri ayrı ayrı değerlendirilerek sonuçlar farklı yangın tiplerinin her biri için sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Eksenel Havalandırma Sistemleri, Jet Fanlar, Tünel Yangınları.

ABSTRACT

MODELLING OF ROAD TUNNEL FIRES AND INCORPARATING THE EFFECTIVE PARAMETERS OF THE MODELS IN A REALISTIC MANNER

Merve ALTAY

Bursa Technical University

Graduate Scholl of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Engineering Program

Master of Science Thesis

Prof. Dr. Ali SÜR MEN

2016, 84 Page

Due to the increasing rate of vehicle traffic and limited real estate, the construction and complexity of road tunnels are substantially increasing throughout the world and safety of them has become an important concern among officials, researchers and engineers. As a result of multiple-death fires that have occurred in past years in highway tunnels in the world; there is a growing demand on public highway officials to meet a minimum standard for life safety in tunnels. Computer simulation is one of most economical, impressive and flexible methods to get the knowledge about fire processes and to predict and prepare a rescue plan under different conditions.

So, in this study the capability of FDS (Fire Dynamic Simulator) used to simulate a vehicle fire and pool fire in a tunnel to analyze the consequences. Besides the relationship between forced longitudinal ventilation and ISH (Isı Salım Hızı) for vehicle and pool fires (fuel spillage, etc.) in tunnels tried to determined. As the effects of forced ventilation vary substantially depending on the type of fire load, different types of fire considered separately. Results presented for different fire sources.

Keywords: Longitudinal Ventilation Systems, Jet Fans, Tunnel Fires.

1. GİRİŞ

Tarih boyunca tüneller; yer altından geçişe imkân vermeleri sebebiyle ulaşımın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Günümüzde ise motorlu taşıt ulaşımı, metro ve demiryolu ulaşımı ve su gaz ve elektrik taşıma gibi pek çok amaç doğrultusunda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Tünellerin sadece giriş ve çıkış ile sınırlı konstrüksiyona sahip olması acil durumlarda ulaşımı zorlaştırmaktadır, herhangi bir sebeple yangın çıkması durumunda ise çevrede ciddi bir tahribat oluşması, ağır yaralanmalara ve en önemlisi de mal ve can kayıplarına yol açması gibi nedenlerle tünel yangınları en tehlikeli beşeri afetler arasında yer almaktadır.

Özellikle gelişen teknolojiyle birlikte tüm dünyada taşıt trafiğindeki artış oranı sebebiyle karayolu tünellerinin inşası ve karmaşıklığı giderek artmaktadır ve tünellerin güvenliği devlet adamları, araştırmacılar ve mühendisler arasında ilgi odağı olmuştur. Geçtiğimiz yıllarda karayollarında oluşan çok sayıdaki ölümcül yangınlar sonucu, karayolu görevlilerinin tünellerdeki can güvenliğini sağlamaları yönünde oldukça yüksek bir taleple karşılaşmaktadır.

Çizelge 1.1 Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünel yangınları örnekleri [1]

Yıl	Tünel Adı/Uzunluğu	Yer	Yangın Nedeni	Süre	Sonuçları		
					İnsan	Araç	Yapı
6 Ağustos 2001	Gleinalm L=8320 M	Avusturya	Kamyon Ve Otomobilin Önden Çarpışması		5 Ölü 4 Yaralı	1 Ağır yük Aracı 1 Otomobil	
24 Ekim 2001	St. Gotthart L=16322 M	İsviçre	Çarpışma	2 Gün	11 Ölü	13 Ağır yük Aracı 10 Otomobil	Ağır Hasar
4 Haziran 2005	Frejus L=12900m	Fransa /İtalya	Motor Yangını		2 Ölü 21 Yaralı	4 Ağır yük Aracı	10 Km' lik Onarılması Gereklİ Ekipman

Çizelge 1.1 Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünellerde yangınları örnekleri [1] (devamı)

16 Eylül 2006	Viamala L=700m	İsviçre	Çarpışmada İki Otomobil ve Bir Otobüs		9 Ölü 5 Yaralı	Yangının Diğer Araçlara Sıçraması	Tünel Duvarında Hasar
23 Mart 2007	Bumley L=3400m	Avusturya	Ağır Yük Aracı ve Otomobilin Ön ve Arka Çarpışması	1 Saat	3 Ölü 2 Yaralı	3 Kamyon 4 Otomobilde Çoklu Araç Hasarı	Hasar Yok
12 Ekim 2007	Newhall L=167m	ABD	2 Ağır yük Aracı Çarpışması	6-8 Saat	3 Ölü 10 Yaralı	30 Ağır Yük Aracı 1 Otomobil	Ağır Hasar
10 Mayıs 2009	Follo L=900m	Norveç	Ağır Yük Aracının Tünel Duvarına Çarpması	1-5 Saat	1 Ölü	1	Ağır Hasar
1 Mart 2014	Yanhou	Çin	2 Tanker		31 Ölü	42 Araç Hasarı	

Çizelge 1.1' de örnekleri yer alan ve dünya üzerinde sıklıkla yaşanan ve facialara sebebiyet veren bu yangınlar, yangına sebebiyet veren parametreleri en aza indirmek için gerekli tedbirlerin ve yangın güvenliğini sağlamanın ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Duman yayılımını etkin bir şekilde kontrol altında tutmak, tünel havalandırma sistemlerinin tasarımında yangın güvenliğini sağlama açısından en önemli ve bir o kadar da zor bir meseledir. Bu sebeple başarılı bir tünel havalandırma sistemi dizaynı için duman yayılımında etkin olan dinamik akış parametreleri iyi bir şekilde anlaşılmasıdır.

Tünel yangınları tünellerin geometrisi, eğimi, havalandırma sistemi özellikleri, dış ortam şartları (rüzgar basıncı, hızı vs.), yangın kaynağı özellikleri, yanma reaksiyonunu oluşturan bileşenlerin oranları gibi bir çok parametreden doğrudan veya dolaylı olarak etkilenmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda, gerçek tünel ortamında ve tam ölçekteki (full scale) tünellerde gerçekleştirdikleri yangın testlerinden elde ettikleri deneysel bulgulara dayanarak yangın ve duman

karakteristik özelliklerini saptama ve bu özelliklerden hareketle uygun havalandırma ve tahliye operasyonlarını belirlemeyi hedefledikleri görülmektedir. Ancak tünellerin oldukça büyük boyutlara sahip olması ve deneylerde gerçek bir araç yakılması zorunluluğu gibi birtakım nedenlerle yangın ve akış parametrelerinin ölçümü oldukça meşakkatli ve maliyetli bir iştir bu sebeple bu tip deneysel çalışmaların sayısı çok fazla değildir.

Belirlenen bir ölçeğe göre oluşturulan model tünellerden elde edilen veriler kullanılarak yangın güvenliğini sağlama çalışmaları, gerçek boyuttaki tünellerde yapılan çalışmaların getirdiği zorluklara karşı bir çözüm olarak gösterilebilir. Çünkü belirli bir ölçeğe göre hazırlanmış model tünellerle çalışmak daha az maliyetli olmaktadır. Ancak gerçek ve model tünel arasındaki mevcut benzerlik bağıntıları ve benzerlik oranına uygun olarak kullanılması gereken akışkanın gerçek şartlarda kullanımının oldukça zor olması gibi durumlar model tünellerden elde edilen deneysel verilerin hassaslığı konusunda şüphelere sebebiyet vermektedir. Son günlerde gelişen teknoloji ile birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanımı yaygınlaşmış ve tünel yangınlarında tünel içi akış analizleri yapılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda tünel yangınları, ANSYS Fluent, ANSYS CFX, FDS, PHOENICS, STAR CCM+ gibi yazılımları veya yangın için özel olarak geliştirilen JASMINE, SMARTFIRE SOFIE, FDS yazılımları kullanılarak nümerik olarak modellenmekte ve elde edilen gerçeğe oldukça yakın sonuçlar ile en uygun duman tahliye sistemine karar verilmektedir. Yangın güvenliği araştırmacıları ve uzmanları ve yangın mühendisleri tarafından bu yazılımlar arasından FDS (Fire Dynamics Simulator) tam boyutta çözüm yapabilme ve diğerlerinde olduğu gibi yangın kaynaklı duman Türlerin Taşınımı (Species Transport) modeli ile simüle edilmeyip Karışım Kesri (Mixture Fraction) modeli aracılığıyla direkt olarak yanma reaksiyonu oluşturmaya imkan vermesi gibi avantajlarından dolayı çokça tercih edilen bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği aracı olmuştur.

Bu çalışmada, Salih Karaaslan ve arkadaşlarının 1/20 ölçeğinde modelledikleri ve elde ettikleri sonuçların gerçekliğini Memorial Tünel Test sonuçlarıyla kıyaslayarak teyit ettikleri çalışmaları referans olarak kullanılmıştır [14]. Söz konusu çalışmada kullanılan model tünel 8.7×8.2×300 m (en×yükseklik×boy) boyutlarında olup at nalı kesitine sahiptir.

Literatürde yer alan gerçek taşıtlardan elde edilen ısı salım hızına (heat release rate) ve taşıt boyutlarına uygun olarak tünelin simetri eksenine yerleştirilmiş $1.54 \times 2.3 \times 7$ m boyutlarındaki yangın havuzu (pool fire) modeli 10 MW ve 50 MW olarak iki farklı ısı salım hızı için çeşitli durum senaryoları oluşturulmuştur. Ayrıca her biri üçer adet fan içeren jet fan grupları tünelin farklı kesitlerine yerleştirilmiştir. Isı salım hızı değişiminin duman karakteristiğine etkisi, aksel havalandırma sisteminin (EHS) yangın kaynaklı duman hareketine ve sıcaklık dağılımına etkisi yangın simülasyonlarına olarak geliştirilmiş olan FDS (Fire Dynamics Simulator) yazılımı ve Pyrosim ara yüzü kullanılarak geliştirilen senaryolar için ayrı ayrı numerik olarak incelenmiş elde edilen sonuçlar Smokeview yazılımıyla görüntülenmiştir.

Söz konusu nümerik analiz çıktılarının doğruluğu referans makaledeki verilerle kıyaslanarak kanıtlanmıştır. Modelde kullanılan duman dedektörleri aracılığıyla yangın kaynaklı duman en yakın fana ulaştığında, planlanan senaryoya bağlı olarak jet fan grupları belirlenen itiş gücü ile aktif hale getirilmiş ve/veya devre dışı bırakılmıştır. Her bir durum için simülasyon çıktıları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve insan ve çevre güvenliği ve enerji dengesi gözetilerek kontrolsüz duman yayılımının önlenmesi için yangının konumu ve şiddetine bağlı olarak optimum konum ve debilerde çalıştırılan jet fanların kullanıldığı bir duman tahliye sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, Literatür Özeti kısmında günümüze dek tünel yangın güvenliğini sağlamada bilimsel önem arz eden çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmanın literatüre katkısı değerlendirilmiştir.

Materyal ve Yöntem bölümünde ise başarılı bir duman tahliye sistemi geliştirmek adına öncelikle yangın mühendisliği terminolojisinde ve özel olarak da tünel yangını çalışmalarında sıkça kullanılan, duman yayılımında etkin olan dinamik akış parametreleri ve terimleri irdelenmiştir. Ayrıca kullanılan model geometrisi ve fiziksel özellikleri tanıtılmış ve nümerik analizlerin yürütülmesinde kullanılan FDS yazılımının teorik alt yapısı ve temel özellikleri üzerinde durulmuş, yeterliliği ve sınırları tartışılmıştır. Ardından model ağ yapısı, optimum ağ elemanı (mesh) boyutu ve sınır şartlarının modele uygulanması, akış modeli oluşturmada büyük öneme sahip boyutsuz sayılar gibi program girdileri üzerinde durulmuştur.

Sonuçlar ve Tartışma bölümünde ise; öncelikle referans makalede kullanılan senaryoların analizi sonucunda elde edilen hız ve sıcaklık profilleri ile bu çalışma elde edilen söz konusu profiller karşılaştırılmış, böylece yapılmış olan numerik analizlerin doğruluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca bir başka teyit metodu olarak CFL kriteri baz alınarak elde edilen sonuçlar gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak -konvansiyonel aksel havalandırma sisteminin kullanıldığı- referans çalışma ile bu tünel şartlarında mümkün olabilecek en iyi çözüm sağlandığı fakat mevcut havalandırma sisteminde ki bir takım sınırlamalardan dolayı tüm tünel boyunca yangın güvenliğini sağlama hususunda yetersiz kaldığı söylenebilir. Buna istinaden daha etkin bir duman tahliye sistemi geliştirmek amacıyla hali hazırdaki konvansiyonel havalandırma sistemine alternatif olarak mobil bir havalandırma sistemi düşünülerek bu sistemin etkinliği değerlendirilmiştir.

Öneriler Bölümü kapsamında, literatürde ve bu çalışmada yer alan metotlar değerlendirilmiş ve geliştirilen yöntemin literatüre nasıl bir bakış açısı sunduğu ve mevcut tünel havalandırma sistemlerine nasıl yenilikler getirilebileceğine dair tavsiyelerde bulunulmuştur.

2.LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde tünel yangın güvenliği konusunda çalışan araştırmacılar veya uzmanların, gerçek boyuttaki tüneller kullanılarak veya ölçeklendirilmiş bir model tünel üzerinden deneysel veya nümerik çalışmalar yürüttüğü görülmüştür. Söz konusu çalışmalar genellikle yangın kaynaklı akış hareketleri ve duman karakteristiği, uygun tünel havalandırma sistemlerinin tayini, duman tahliye metotları gibi konularda yoğunlaşmaktadır.

2.1. Literatürde Yer Alan Deneysel Çalışmalar

Gerçek boyutlu tüneller kullanılarak yapılan testler genellikle yüksek maliyetli zaman alıcı ve lojistik olarak uygulaması karışık çalışmalardır. Ayrıca çoğu zaman ekipman yetersizliği sebebiyle bu testlerden elde edilen bilgiler bazı durumlarda eksik kalmaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı, literatürdeki gerçek boyutlu tüneller kullanılarak gerçekleştirilmiş yangın testleri sınırlı sayıdadır. Tüm bu kısıtlara rağmen, günümüzde halen tünel yangınları ile ilgili kullanılmakta olan esas ve standartları belirlemede temel oluşturma açısından ve ayrıca literatür çalışmaları için kabul edilebilir bir doğrulama (verification) sağlama konusunda, gerçek ölçekte tünellerde yapılan testler sonucu elde edilmiş verilere ihtiyaç vardır. Bu testler sonucu çoğunlukla, maksimum ısı salım hızı-ISH (heat release rate), yakıt kütle azalış hızı (fuel mass loss rate), ölçülmüş maksimum gaz sıcaklıkları, alev boyu (flame length) gibi tünel yangın güvenliği çalışmalarındaki temel parametreler üzerinde yoğunlaşmıştır [2].

Gerçek boyuttaki tünellerin kullanıldığı deneysel çalışmalara ait veriler günümüze dek yürütülmüş olan -bir düzineyi aşmayan sayıda- test programlarından elde edilmiştir. Bu test programlarından 98 test içeren Memorial Tünel Test Programı hariç, hepsi 30'dan daha az test içermektedir.

Gerçek boyutta tünellerde yapılan ilk yangın deneyleri 1960-1970 yıllarında Avrupa'da yaşanan tünel yangınlarını çözmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. 1960 ve 1980 yılları arasında birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilen Ofenegg, Glasgow ve Zwenberg seri deneylerinde yangın kaynağından ısı salım hızı herhangi bir ölçüm yapılmaksızın ağırlık azalışı yoluyla hesaplanmış bu sebeple de elde edilen veriler oldukça yetersiz veriler elde edilebilmiştir [3-5]. 1990' lı yıllarda Oksijen Tüketim

Kalorimetresi (O₂ Consumption Calorimeter) kullanımı ile duman içerisindeki O₂ konsantrasyonunu ölçmek suretiyle ISH ölçümü yapılmıştır. Bu teknik EUREKA EU499 projesinde ilk kez kullanılmış olmasına rağmen, deneylerin gerçek boyutlu tünel ortamında ve açık alanda yürütülmesi nedeniyle bir takım eksiklikler içermekle birlikte birçok taşıt kaynaklı (çeşitli karayolu ve demiryolu taşıtları) ISH ölçümünün daha kolay ve daha doğru yapılmasına imkân vermiştir [6]. Bu sebeple Oksijen Tüketim Kalorimetresi kullanımı ISH tespiti alanında dönüm noktası niteliğini taşımaktadır. Bu yıllarda, deneysel çalışmalar yalnızca bir araç yangını için yürütülmüş, 90' ların sonlarına doğru ise yangının bir araçtan diğerlerine sıçraması sonucu oluşan çoklu araç yangınları ile ilgili çalışmalara yoğunluk verilmiştir.

Büyük boyutlu tünellerde yangın testleri konusunda bir diğer dönüm noktası da Memorial Tünel Test Serileri (Memorial Tunnel Test Series)' dir [7]. Bu testlerde yangın kaynağı olarak gerçek bir taşıt yerine düşük kükürt içerikli 2 numaralı akaryakıt kullanılmıştır. Bu testlerin amacı iyi tanımlanmış bir yangın kaynağı kullanıp taşıtların tünel içi akışa etkisini ve ayrıca yangın kaynaklı dumanın tahliyesinde fanların etkinliğini saptamaktır. Memorial Tünel Test Serileri yürütülen tüm deneysel çalışmalar içerisinde en iyi ve en kapsamlı belgelenen testler olmaları hasebiyle günümüzde hala birçok çalışmaya referans olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarının doğrulanmasında oldukça önemli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmada elde edilen veriler yorumlanırken de, Memorial Tünel Test Serisinde geliştirilen senaryolardaki modellere fiziksel anlamda benzerliği olan testler seçilmiş, bu testlerden elde edilen veriler çalışmada elde edilen veriler ile kıyaslanarak doğruluğu gösterilmeye çalışılmıştır.

Memorial Tünel Test sonuçları Boston Central Artery Tunnel (BCAT) projesinde kullanılmış ve duman kontrol sistemleri dizaynı konusunda dünya çapında bir etki oluşturmuştur. Bu testler ile yalnızca tünel içi duman kontrolü değil aynı zamanda köpüklü yangın söndürme sistemlerinin performansı da değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu tarihe kadar üzerine pek çok teorik çalışma yapılmış ISH ve kritik havalandırma hızı arasındaki korelasyon (correlation) ilk kez gerçek boyutlu bir tünelde yapılan ölçümlerle doğrulanmış ve aksenal havalandırma hızı belirli bir değer üstüne çıktığında ISH' dan bağımsız olarak değiştiği öne sürülmüştür.

Bahsedilen tüm tünel yangını testleri günümüze dek gerçek ölçekte yapılan en kapsamlı testler olmakla birlikte şüphesiz ki en çok bilinen EUREKA ve Memorial Tünel Testleri bu konuda ortaya konan standartlar ve malumatlar için dayanak niteliği taşımaktadır [7], [8].

21. yüzyılda ise o dönemki diğer çalışmalar içerisinde bilimsel niteliği açısından farklı bir yere sahip No.3 Shimizu Tüneli deneylerinde benzin havuzu yangını (gasoline pan fires), otomobil ve otobüs yangınları gibi farklı yangın tipi ve/veya şiddetleri için, doğal ve zorlanmış aksenel havalandırma ve aynı zamanda sulu yangın söndürme sistemlerinin etkinlikleri test edilmiştir [9]. 2002 yılında Hollanda'da bulunan Benelux Tüneli'nde -ağır yük araçlarının ahşap modelleri oluşturularak-gerçekleştirilen testlerde de ve doğal ve zorlanmış aksenel havalandırma ve aynı zamanda sulu yangın söndürme sistemlerinin yangın kaynaklı dumanın tahliyesine etkisi incelenmiştir [1]. Özellikle ağır yük taşıtı yangınlarında aksenel havalandırma sistemlerinin ISH üzerindeki etkisi konusunda çok önemli sonuçlar elde edilmiştir. Aynı şekilde bu dönemlerde yürütülen Runehamar Tuneli test yangınlarında da benzer deney yöntemleri uygulanmış ancak Benelux tünel testlerinden farklı olarak farklı türlerdeki yük malzemesi kullanılarak şiddet açısından benzin tankeri yangınlarına (gasoline tanker fires) benzer yangınlar oluşturulmuş ve sonuçları tartışılmıştır [10].

Literatürde yer alan büyük ölçekli tünel yangını çalışmaları dışında orta boyutta sayılabilecek tüneller kullanılarak da deneysel çalışmalar yürütülmüştür. 1992-1993 yıllarında İngiltere'de Safety Executive Laboratuvarında gerçekleştirilen testlerde ISH tayini için oksijen kalorimetresi ve kütle kaybı oranı teknikleri kombine olarak kullanılmış ve ISH artarken, belirli bir ISH değerinden sonra kritik hızın neredeyse sabit bir değere ulaştığı sonucu elde edilmiştir [11]. Elde edilen sonuçlar bu konuda standart kabul edilen Memorial Tünel Test sonuçları ile de doğrulanmıştır. Böylece, duman tahliye sistemleri tasarımı konusunda daha önce Thomas tarafından öne sürülen basit Kritik Hız Tayini Teorisi bu ISH ölçüm tekniği sonuçları ile çürütülmüştür [12]. Bu çalışmada, elde edilen sonuçlarının günümüzde hala tünel yangınlarındaki aksenel akış ve geri akış arasındaki etkileşimin simüle edilmesinde geçerliliğini koruması hasebiyle literatürde yer alan önemli mihenk taşları arasında nitelendirilmektedir. Ayrıca çalışma Ingason ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda optik olarak duman konsantrasyonu

ölçülemediği olmakla birlikte, optik olarak ölçülen duman yoğunluğu (optical density/visibility) ve tünelin belirli yerlerinde ölçülen gaz konsantrasyonu arasında uyum elde edilmiş ve literatüre bu konuda yeni bir bakış açısı kazandırılmıştır [13].

Yukarıda, geçmişten günümüze literatürde önemli yer tutan deneysel çalışmalar ve bu çalışmaların literatüre kazandırdıklarına değinilmiş ve Çizelge 2.1’ de ise söz konusu çalışmalar özetlenmiştir. Maliyetli ve uzun zaman alan çalışmalar olmasından dolayı büyük ölçekli tünellerde gerçek boyutta yapılan deneysel çalışmalar az olmakla birlikte nümerik analizlerin doğrulanması açısından büyük önem arz etmektedir [1].

Bu tez kapsamında yürütülen nümerik analizlerde kullandığımız özellikleri ilerleyen kısımlarda belirtilecek olan model, Memorial Tüneline oldukça benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte referans olarak kullandığımız çalışmada elde edilen veriler Memorial Tünel Test Sonuçları ile kıyaslanmış ve doğrulanmıştır [14]. Bu sebeple çalışmamızın referans çalışma ile kıyaslanarak değerlendirilmesi doğrulanması yapılan analizlerin ve değerlendirmelerin Memorial Tünel Testlerinden elde edilen sonuçlara da uygunluğunun bir göstergesidir.

Kullanılan model tüneldeki fiziksel benzerlik nedeniyle, Memorial Tünel testlerinden daha detaylı bahsetmek konunun daha iyi kavranması açısından fayda sağlayacaktır.

Çizelge 2.1 Literatürde yer alan bazı büyük ölçekli yangın testleri [1]

Test Programı, Ülke , Yıl	Carleton Lab., 2011	San Pedro Tüneli, 2012	Brunsborg İsveç, 2011	Runahamar Tüneli, Norveç, 2003-2013	Benelux Tüneli, Hollanda , 2002	Shimizu No:3, Japonya, 2001	Memorial ABD, 1993-1995	Eu499, Norveç, 1990-1992	Tub-Vit, Finlandiya 1985	P.W.R.I. Japonya, 1980	P.W.R.I. Japonya, 1980	Zwenberg, Avusturya 1974-1975
Test No	2	1	2	4	14	10	98	21	2	8	16	30
Yangın Kaynağı	Tren ve Tanım Aracı	Ağır Yük Aracı Modeli	Metro	Scitiloz , Plastik, Mobilya Ağaç Paletler	N-Heptan +Toluen, Otomobil, Van,Ağır Yük Aracı	Benzin Havuzu (1.4-9 m ²), Otomobil, Otobüs	Yakıt (4.5-45 m ²)	Tahta Palet Heptan Havuzu , Otomobil, Metro	Tahta Palet (Tarım Aracının İki Otomobile Çarpışına	Benzin Havuzu (4,6m ² Yolcu Otobüsü, Otomobil	Benzin Havuzu (6,8,13,6 m ²), Tahta ve Kauçuk	
Tünel Kesit Alanı (m²)	55	37	44	32-47	50	115	36-60	25-35	24-31	58	57.3	20
Tünel Yüksekliği (m)	5.5	5.2	6.9	4.7-5.1	5.1	8.5	4.4-7.9	4.8-5.5	5	-6.8	-6.8	3.9
Tünel Uzunluğu (m)	37	600	276	1600	872	1120	853	2300	140	3277	700	390
Ölçümler	ISH, T, CO, CO ₂ , O ₂	ISH, T, CO, CO ₂ , O ₂ , Radyasyon, Duman Koyuluğu	ISH, T, CO, CO ₂ , O ₂ , Radyasyon, Duman Koyuluğu	ISH, T, CO, CO ₂ , O ₂ , HCN, H ₂ O, Radyasyon Duman Koyuluğu	ISH, T, m, v, Radyasyon, Duman Koyuluğu	T, v, Radyasyon, Duman Koyuluğu	ISH, T, CO, CO ₂ , v, Duman Koyuluğu	ISH, T, CO, m, CO ₂ , O ₂ , SO ₂ , NO, Duman Koyuluğu	ISH, T, m, CO, O ₂ , CO ₂ , v, Duman Koyuluğu	T, CO, CO ₂ , v, Radyasyon	T, CO, CO ₂ , v, Radyasyon	T, CO, CO ₂ , NOx, CH ₄ , O ₂ , v, Duman Koyuluğu
Isı Salım Hızı (MW)	32-55	150	77	70-203	3-26	2-30	10-100	2-120	1.8-8	Pool:9 (Otomobilin Isı'ı Bilinmiyor.)	(Otomobil Ve Otobüsün Isı'ı Bilinmiyor.)	8-21

- **Memorial Tüneli testleri**

Memorial Tüneli; yaklaşık 853 m uzunluğunda güneyden kuzeye %3.2 eğime sahiptir. Normal kullanımda tünel kuzey ve güney uçlarına yerleştirilmiş egzoz ve besleme fan çemberleriyle tamamen eksene dik havalandırma sistemine (full transverse ventilation system) sahiptir. Tünelde, havalandırma kanalı -düşey eksende yerden 4.3 metre yükseklikteki beton tavan çıkarılarak -açılmak suretiyle besleme ve egzoz giriş çıkışları elde edilmiştir. Yürütülen bazı EHS testlerinde, tünelde var olan tavan kaldırılmış tünel kare kesitten at nalı kesitli hale dönüştürülmüştür ve üçerli gruplar halinde toplam 24 adet jet fan kesit yüzeyinin hemen altına yerleştirilmiştir. Tüm fanlar 56 kW motor gücünde 1.287 m² tahliye alanına ve 42.94 m³/s nominal hacimsel debiye ve 300°C hava sıcaklığına kadar dayanıma sahiptir. Tünelde tamamen eksene dik (full transverse ventilation (ftv)), kısmi eksene dik (partial transverse ventilation (ptv)), tek nokta çıkışlı kısmi eksene dik (ptv with single point extraction), genişletilmiş egzoz çıkışlı kısmi eksene dik (ptv with oversized exhaust ports), nokta giriş nokta çıkışlı (point supply and point exhaust operation), doğal havalandırma, jet fanlarla EHS kullanılarak 98 farklı test gerçekleştirilmiştir. Söz konusu 98 testin tamamını açıklamak oldukça uzun olacağından önemli sonuçlar elde edilen testlerden bazılarının ortam sıcaklığı (T_o), yangında ulaşılan maximum sıcaklık (T_{max}) ve alev kalınlığı (L_f) Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 Memorial tüneli testlerinden elde edilen veriler (mekanik havalandırma durumu için maksimum sıcaklık ve duman geriye nüfuz etme derinliği (L_f) havalandırma sistemi devreye girer girmez ölçülmüştür)

Test Adı	Havalandırma Tipi	U (m/s)	T_o (°C)	H (m)	Nominal \dot{Q}_{max} (MW)	T_{max} (°C)	L_f Kuzey Çıkışa Doğru(m)	L_f Güney Çıkışa Doğru(m)
101CR	Tamamen Eksene Dik		21	4,4	10	574	-	-
103	Tamamen Eksene Dik		19	4,4	20	1361	10	10
113A	Tamamen Eksene Dik		20	4,4	50	1354	37	0
217A	Kısmi Eksene Dik (PTV)		13	4,4	50	1350	45	6

Çizelge 2.2 Memorial tünellerinden elde edilen veriler (devamı)

238A	Ptv-İki Kademeli		23	4,4	50	1224	21	13
239	Ptv-İki Kademeli		21	4,4	100	1298	54	15
312A	Ptv-Tek Nokta Tahliyeli		13	4,4	50	1301	42	7
318A	Beseleme ve Tahliye Noktalı		11	4,4	50	1125	22	20
401A	Ptv-Büyük Egzos Çıkış		21	4,4	50	1082	21	12
605	Eksenel	2.2	6	7,9	10	180	-	-
607	Eksenel	2.1	6	7,9	20	366	-	-
624B	Eksenel	2.3	14	7,9	50	720	-	21
625B	Eksenel	2.2	15	7,9	100	1067	-	85
501	Doğal Havalandırma		13	7,9	20	492	-	-
502	Doğal Havalandırma		10	7,9	50	923	27	-

2.2. Ölçeklendirilmiş Model Tünellerde Yapılan Deneysel ve Nümerik Çalışmalar

Önceki bölümlerde belirtilen zorluklardan dolayı tünel yangını araştırmacıları ve uzmanları, gerçek boyutta yapılmış deneysel çalışmaları referans alarak tasarladıkları küçük ölçekli modeller ile deneysel çalışmalar gerçekleştirmeye veya HAD programlarından yararlanarak sanal (virtual) olarak oluşturdukları modellerle nümerik analizler yapmaya yönelmiştir. Bu yöntemler hem kısa sürede hem de kolaylıkla uygulanabilir olmalarının yansın tek bir model üzerinde belirli parametreleri değiştirerek pek çok deneme yapmaya da imkan vermektedir. Bu sebeple, literatürde gerçek boyutta yapılan deneysel çalışmalara kıyasla çok daha fazla nümerik çalışma mevcuttur.

Son dönemlerde yürütülen ve literatüre önemli katkılar sağlayan çalışmalardan bahsedilecek olursa; 2006 yılında Lee ve Ryou tarafından yürütülen çalışmada, havalandırılan bir tünelde kare yüzey alanına sahip yangın kaynağından ısı akışı ve sıcaklık katmanları (temperature stratification) konusunda sayısal bir tanımlama elde etmek için FDS yazılımı yardımıyla Large Eddy Simulation yaklaşımı kullanılarak model oluşturulmuştur [15]. Çalışmada, tünelin boy-en oranının (aspect ratio) duman hareketine etkisi ve tünel tavanındaki sıcaklık dağılımı sayısal olarak analiz edilmiştir. Hu ve arkadaşları tarafından yarı-ampirik ifadeler formüle edilmiş, geliştirilen bu ifadeler önceki literatür çalışmalarında bulunan ifadelerle kıyaslanarak duman geri nüfuz etme uzunluğu (back layering length), kritik havalandırma hızı ve tavanın hemen altındaki sıcaklık dağılımı incelenmiştir [16]. Kritik aksenel havalandırma hızı; duman geri nüfuz etme derinliği sıfır olduğu durumdaki hız değeri olarak tanımlanmış ve teorik olarak formüle edilmiştir. Tam ölçekteki yangın testlerinden elde edilen sonuçlar teorik olarak hesaplanan değerlerle kıyaslanıp uygunluğu doğrulanmıştır.

Ayrıca 2007 yılında Hu ve arkadaşları tarafından farklı tünel kesitlerinde ve farklı aksenel havalandırma hızlarında, yangın kaynağının şiddeti değiştirilerek tünel içindeki aksenel sıcaklık dağılımı ve tavanın altındaki duman sıcaklığı deneysel ve sayısal olarak test edilmiştir [17]. Çalışmalar sonucu yangın şiddeti arttıkça tavadaki sıcaklığın da yükseldiği ancak aksenel havalandırma hızlarının etkisiyle yangın kaynağının önünde yer alan bölgede daha hızlı bir şekilde sıcaklık düşüşü olduğu görülmüştür. Ayrıca yangın kaynağının arka kısmında (upstream) akışa ters yönde hareket eden duman üzerinde “bariyer etkisi” tespit edilmiştir. Elde edilen numerik sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmış arka kısımda görülen geriye duman akışı üzerindeki bariyer etkisi teorisi doğrulanmıştır. Yangın önündeki sıcaklık düşüşü ile ilgili sonuçlar ise gerçek duruma göre abartılı olduğu saptanmıştır [14].

Yangın kaynaklı duman toksik gazlar içerdiğinden dolayı havalandırma sistemleri hem yangını kontrol altına alacak, hem de duman içerisinde bulunan zehirli gaz konsantrasyonunu insan sağlığı için tehlike oluşturacak sınırın altında tutacak şekilde tasarlanmalıdır. 2003 te Jojo ve Modic tarafından yürütülen çalışmalarda yangın bu yönüyle (zehirli gaz konsantrasyonları açısından) değerlendirilmiştir [18], [19]. Söz

konusu çalışmalarda ayrıca yangın oluşumu ve gelişimi ve farklı havalandırma yöntemleri de incelenmiştir.

Yangın karakteristiklerini, duman hareketini duman kontrol yöntemlerini incelemek amacıyla Mégret ve Vauquelin ölçeklendirilmiş bir model tünel kullanarak yarı ampirik model geliştirmiş ve yangının fiziksel özelliklerini değerlendirmiştir [20]. 2006 yılında ise Lee ve arkadaşları duman hareketinde tünelin boy-en oranı etkisini saptamak amacıyla numerik analizler yapmış Wu ve Bakar yangın kaynağı olarak propan gazı yakıcısı kullanarak deneysel olarak EHS'nin duman akışına etkisi üzerine çalışmalar yapmış literatüre kritik hızın tayini ile ilgili önemli bilgiler kazandırmışlardır [21].

2005'te Vauquelin eksenel ve eksene dik havalandırma sistemlerinin yangın kaynaklı duman kontrolü üzerindeki etkilerini araştırmıştır [22]. Ayrıca farklı kanal kesitleri ve farklı yangın kaynağı yükseklikleri için kritik hızın nasıl etkilendiği gözlemlemiş ve bunun üzerine bir takım çıkarımlar yapmıştır. Benzer olarak 2007 yılında Hu ve arkadaşları EHS'nin tünel tavanındaki sıcaklık dağılımına etkisini incelemiştir [23].

Hwang, ve Edwards tarafından Froude modeline dayanılarak deneysel olarak çalışılmış olan tünel yangınlarında sıcaklık tabakalaşmasını (temperature stratification) HAD yardımıyla nümerik olarak incelemiştir [24], [25]. Froude modeli geometrik bir benzerlik gerektirdiği için Wu, Bakar ve Kurioka ve arkadaşları yaptıkları farklı çalışmalarda laboratuvar ortamında geliştirdikleri ölçekli model tünelleri kullanarak fonksiyonel bir ilişki geliştirmiştir [26], [21].

2008 'de Vega ve arkadaşları tarafından, gerçek ölçekte deneysel ve sayısal olarak yapılmış olan çalışmalarda birçok senaryo oluşturulmuş ve böylece çok çeşitli yangın ve havalandırma yaklaşımları araştırılmıştır [27]. Bu amaçla Memorial tüneli tekrar düzenlenmiş ve test için kullanılabilir hale getirilmiştir bununla birlikte CFD teknikleriyle Memorial Tünel modeli oluşturulmuş elde edilen birbiri ile oldukça uyumlu sonuçlar ile EHS bilgisayarlı modellemesi için uygulanan tekniklerin güvenilirliği ispatlanmıştır.

Teze konu olan tünel yangını analizlerinde referans olarak çalışmada, at nalı kesitli tünel zemininin merkezine yerleştirilen dikdörtgenel geometriye sahip yangın havuzu ile yangın kaynağı simüle edilmiştir [14]. Ayrıca her biri üçer adet fan içeren,

jet fan grupları tünelin farklı kesitlerine yerleştirilerek aksel havalandırma sisteminin yangın kaynaklı duman karakteristiğine ve sıcaklık dağılımına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Yangın kaynaklı duman FLUENT yazılımı kullanılarak Türlerin Taşınımı (Species Transport) Modeli ile simüle edilmiştir. Optimum havalandırma yaklaşımının elde edilmesi için fan gruplarının sıra ve itiş güçleri değiştirilerek yangın kaynağının 10 MW ve 50 MW ısı salım hızı için farklı senaryolar geliştirilmiştir. Yapılan denemelerde tünel girişine yaklaştıkça, tavan bölgesinde meydana gelen geriye akış hızının arttığı gözlemlenmiş ve bundan hareketle mevcut havalandırma sisteminde kritik hızın altında kaldığı tespit edilmiştir. Kontrolsüz duman yayılımına sebebiyet veren bu durum, optimum havalandırma hızı ve jet fan operasyon başlama zamanı-sırası belirlenmeye çalışılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yararlanılan Yazılımlar

Son yıllarda yürütülen tünel yangın güvenliği çalışmaları incelendiğinde, tünel içi akış analizlerinde ANSYS Fluent, ANSYS CFX, PHOENICS, STAR CCM+ gibi yazılımları veya yangın için özel olarak geliştirilen JASMINE, SMARTFIRE SOFIE, FDS yazılımlarının kullanılarak oluşturulan numerik modellemelerde gerçeğe oldukça yakın sonuçlar ışığında optimum duman tahliye sistemi geliştirilmeye çalışıldığı görülmektedir.

Yukarıda bahsi geçen diğer yazılımlar arasından FDS (Fire Dynamics Simulator); tam boyutta çözüm yapabilme yetisine sahip olması ve diğerlerinde olduğu gibi yangın kaynaklı dumanın Türlerin Taşınımı (Species Transport) Modeli ile simüle edilmeyip Karışım Kesri (Mixture Fraction) Modeli aracılığıyla direkt olarak yanma reaksiyonu oluşturarak modellemeye imkân vermesi gibi özellikleri ile diğer HAD yazılımlardan ayrılmaktadır.

FDS, nümerik olarak düşük hızlı ($Ma < 0.3$) Navier-Stokes denklemleri yardımıyla özellikle yangın kaynağından duman ve ısı taşınımı gibi ısı termal güdümlü akışın (thermally-driven flow) simüle edilmesinde kullanılır. Pyrosim, FDS programında kodlar üzerinden çalışıldığı için kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir arayüz programıdır. Smokeview ise FDS sonuçlarını görselleştirilmesinde kullanılan ayrı bir yardımcı programdır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda da optimum çözüme ulaşmak için incelenen senaryolar, HAD yazılımlarından FDS (Fire Dynamics Simulator) programının 6.5.2 versiyonu yardımıyla oluşturulmuştur. Kullanım kolaylığı sağlamak için simülasyon senaryolarının bazıları Pyrosim ara yüzü desteğiyle modellenmiştir. Analiz tamamlandığında ise sonuçlar Smokeview programı ile görselleştirilmiştir

Bu kapsamda simülasyonlar, 8 GB RAM'e ve 2.4 GHz hızında ve 12 çekirdekli Intel (R) Xeon (R) işlemciye sahip Dell marka bir iş istasyonu (workstation) ve 48 GB RAM'e ve 2.4 GHz hızında herbiri 6 çekirdekli 2 adet Intel (R) Xeon (R) işlemciye sahip HP DL380 Gen9 kodlu sunucu (server) bilgisayar kullanılarak yürütülmüştür. Ayrıca diğer hesaplamalar ve grafikler 8 GB RAM ve 2.00 GHz hızında 4 çekirdekli

Intel(R) Core (TM) i7 işlemcili Lenovo Z50-70 kodlu dizüstü bilgisayar yardımıyla oluşturulmuştur.

3.1.1. FDS programının özellikleri

FDS ilk versiyonu 2000 yılında Amerika Birleşik Devletleri Ticaret Bakanlığı'na bağlı Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından piyasaya sürülmüş ücretsiz ve açık kaynaklı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır [28]. Günümüze dek özellikle duman tahliye sistemleri ve yangın dedektörü / sulu yangın söndürme sistemlerinin aktivasyon sistemleri ile ilgili oldukça gerçekçi ve pratik çözümler getiren bir program olmakla birlikte temel yangın dinamikleri ve yanma konularında da oldukça önemli katkı sağlar.

FDS genel olarak aşağıdaki durumları modellemek için kullanılabilir;

- Yangın kaynaklı ısı ve dumanın düşük hızlı taşınımı,
- Gaz ve katı cisimler arasında ısı transferi,
- Piroliz yangın büyümesi,
- Alev yayılımı,
- Isı dedektörleri ve sulu yangın söndürme sistemlerinin aktivasyonu,
- Sprinkler sistemleri ile yangının bastırılması

Aşağıda FDS yazılımında analizlerin yürütülmesinde kullanılan modellere detaylı olarak yer verilmiştir [29].

• **Türbülanslı akışın modellenmesi**

Tam Türbülanslı Navier-Stokes denklemlerinin analitik bir çözümü olmadığından dolayı çözüm için modelin üç boyutlu ağ hücrelerine ayrıldığı numerik yöntemler kullanılır. Modelde her bir ağ elemandaki fiziksel şartlar zamana bağlı olarak hesaplanır.

Türbülanslı akışlar edillerle (eddies) karakterize edilirler. Akışı karakterize eden bu edileri çözmek için modeller geliştirilmiştir. FDS programında varsayılan türbülans modu olarak kullanılan LES (Büyük Edi Simulasyonu) modeli kullanılarak yapılan analizlerde bütün boyutlardaki edilleri modellemek oldukça zaman alan bir işlemdir. Bu sebeple LES türbülans modelindeki temel prensip küçük boyutlu

hesaplaması çok zaman alan edileri doğrudan çözmek yerine modelleyerek Navier-Stokes denklemlerinde sadeleştirme yapmaktır. Aslında küçük boyutlu ediler yakın duvar akışları (near-wall flows), reaksiyon akışları (reacting flows), çok fazlı akışlar (multiphase flows) gibi durumlarda oldukça önemli rol oynar ve ihmal edilmemesi gerekir ancak tünel veya bina yangınlarında genellikle duman akış karakteristiği sıcaklık konsantrasyon analizleri yapıldığından dolayı küçük girdapların ihmal edilmesinde herhangi bir sakınca olmaz ve genellikle oluşturulan modeller büyük boyutlarda olacağından yapılan bu sadeleştirme hesaplama süresi açısından oldukça büyük bir avantaj sağlar.

Bu sebeple yukarıda bahsedilen amaçlar için özel olarak geliştirilen FDS programında LES modeli varsayılan türbülans modu olarak ayarlanmıştır. Böylece programda türbülans LES modelinin Smagorinsky formunda çözülmüş olur [31].

Yukarıda bahsedilenlere daha detaylı olarak değinilecek olursa, LES (Büyük edi simülasyonu) modelinde, akış alanındaki büyük ediler direkt olarak çözümlenirken, küçük ediler modellenir. Çünkü akıştaki büyük ediler geometriye ve probleme bağlıdır ancak küçük ediler problemten bağımsız olarak genel bir davranış gösterirler. Dolayısıyla küçük ediler bütün problemlerde kullanılabilir şekilde modellenir. Bu amaçla küçük ediler için momentum korunum denkleminin "altgrid-ölçek gerilmesi" bileşeni modellenir. Bu terimin modellenmesi için öncelikle "türbülans viskozitesi" modellenmelidir. Bu amaçla aşağıdaki gibi bir yol izlenerek modelleme yapılır.

Kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin sade halleri sırasıyla [31],

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial c_T}{\partial x_j} + \rho \bar{g} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \rho H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilirler. Burada ρ , u , μ , p , k_{eff} , T , H terimleri sırasıyla yoğunluk, hız, moleküler viskozite, basınç, efektif ısı iletkenlik katsayısı, sıcaklık ve entalpidir. σ_{ij} ise, moleküler viskoziteden dolayı oluşan gerilme tensörüdür,

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır. 3.2 denklemindeki C_T , türbülans katkısını içeren terimdir. LES modelinde $C_T = \tau_{ij}$ ' dir. τ_{ij} terimi altgrid-ölçek (Sub-grid scale) gerilimidir ve,

$$\tau_{ij} \equiv \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_j \bar{u}_i \quad (3.5)$$

olarak tanımlanır. Korunum denklemlerindeki τ_{ij} teriminin dışındaki bütün terimler hesaplanabilen terimlerdir, τ_{ij} teriminin ise modellenmesi gerekmektedir. LES modelinde altgrid-ölçek gerilmesi modellenirken,

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3.6)$$

formu elde edilir. 3.6 denkleminde altgrid-ölçek gerilmesinin yön bağımsız bileşeni τ_{kk} 'nin modellenmesine gerek yoktur. 3.7 denklemi ile hesaplanabilen deformasyon tensörünün değişimi olan \bar{S}_{ij} ' nin de modellenmesi gerekmez,

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

Bu durumda modellenmesi gereken tek terim türbülans viskozitesidir. LES modelinde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (3.8)$$

formülü ile modellenir. Burada,

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (3.9)$$

$$|\bar{S}| \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (3.10)$$

formülleriyle hesaplanırlar. Formüldeki \bar{S}_{ij} , κ , d , C_s, V sırasıyla; deformasyon tensorünün değişimi, Von Karman sabiti, komşu elemana olan uzaklık, Smagorinsky sabiti ve elemanın hacmidir [31]. Bu terimler içerisinde özellikle Smagorinsky sabitinin değeri simülasyon hassasiyeti açısından oldukça önemli yer tutmaktadır. FDS yazılımında simülasyon parametresi olarak girilen C_s değeri ile ilgi detaylar Bölüm 3.4' te mevcuttur.

- **Yanmanın modellenmesi**

FDS, Karışım Kesri Modelini (Mixture Fraction Model) varsayılan yanma modeli olarak kullanmaktadır ve bu yönüyle diğer HAD programlarından farklılık göstermektedir. Çünkü yaygın olarak kullanılan HAD programlarının büyük çoğunluğu yanma modelleri kullanmak yerine yangını, kütle kaynağından belirli oranlarda kütle çıkışı olarak modellerken; FDS reaksiyon oluşturarak yangın modellemeye imkân vermektedir [14], [30]. Karışım Kesri (Mixture Fraction) korunan bir skaler büyüklüktür. Akış alanında herhangi bir noktadaki yakıt kaynaklı gaz bileşenlerinin kesirleri (the fraction of gas) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Z = \frac{sY_F - (Y_0 - Y_0^\infty)}{sY_F^I + Y_0^\infty} ; \quad S = \frac{v_0 M_0}{V_F M_F} \quad (3.11)$$

Karışım kesri (Z), 0 ile 1 arasında bir değerdir. Z=1 durumu; sadece yakıt içeren bölgeyi temsil ederken, Z=0 yangından oldukça uzak bölgelerdeki yakıt kaynaklı komponentlerin yer almadığı çevre havasını temsil etmektedir.

Yanmanın, yakıt ve oksijenin sonsuz hızlı reaksiyonu ile karışım- kontrollü (mixing-controlled) olarak gerçekleştiği kabulü ile modellenir. Bütün ana reaktantlar ve ürünlerin kütle kesirleri, belirli karışım oranlarındaki basitleştirilmiş analiz ve ölçümlerden türetilen ampirik bağıntılardan elde edilir.

- **Işınımın modellenmesi**

Işınımsal ısı transferi (radiation transport); saçılma yapmayan gri gaz (non-scattering grey gas) için ışınımsal taşınım denklemlerinin çözümü yoluyla modele dahil edilir. Denklem, konveksiyon taşınımı için sonlu hacim metoduna benzer bir biçimde çözülür.

- **Geometri ve çoklu ağ yapısı (grid örgüsü) kullanımı**

FDS her bir ağ hücresi için korunum denklemlerini çözer. Modelleme sırasında kullanıcı tarafından belirlenen engeller tanımlanırken modelin dikdörtgen şeklindeki gereği hücre yapısıyla uyumlu olmasına dikkat edilmelidir. Geometrik özellikleri dikdörtgensel geometriye sahip ağ hücreleri ile uyumlu olmayan engeller kullanılmak istendiğinde bir takım teknikler (sawtooth...vs) uygulanarak uyumlu

hale getirilir ve programın bu tip engeller olduğu durumlarda sorunsuz hesaplama yapabilmesi sağlanır.

Modellemede kullanılan ağ elemanları ile aynı boyutlarda (uniform) olabilirler veya her üç koordinat ekseninde de uzatılabilirler. Bu özellik, farklı geometrik yapılarla uygun olarak ağ yapısı (grid örgüsü) oluşturmaya ve tek bir hesaplama alanında farklı ağ yapılarının çözümüne imkan vermektedir. Hücrelerin bu şekilde esnetilmesi ve farklı hücre büyüklüklerinin aynı modele kullanılabilir oluşu kullanıcıya tüm modele gereksiz yere sık ağ yapısı uygulamak yerine yangın kaynağına yakın bölgeler gibi kritik bölgelerde daha sık, diğer bölgelerde ise daha seyrek ağ yapısı oluşturulabileceği için daha kısa hesaplama süresi ve daha düşük hesaplama kapasitesi ile daha iyi hesaplama yapma olanağı sunar. Ayrıca bir simülasyon programının paralel hesaplama özelliğinden yararlanılarak bir veya birden fazla bilgisayar ile çözüm yapılmak istendiğinde, farklı büyüklüklerde hücrelerden oluşan çoklu ağ yapısına sahip modellerin kullanımı gereklidir.

- **Sınır şartları ve model için gerekli girdi parametreleri**

Tüm katı yüzeylere termal sınır şartları atanır. Isı ve kütle transferi ampirik korelasyonlar aracılığı ile yürütülür. Malzeme özellikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanır.

Modelleme için gerekli çevre şartları, sınır şartları, modelin geometrisi, malzeme özellikleri, yangın kaynağının boyutları şiddeti gibi tüm girdi parametreleri ve hangi simülasyon çıktıları elde edilmek istendiğine dair bilgiler metin belgeleri şeklinde programa aktarılır.

3.1.2. Smokeview (SMW) programının özellikleri

Smokeview, FDS yazılımında numerik olarak hesaplanan yangın modellerinin görsel hale getirilmesi için kullanılan bir yardımcı (companion) yazılımdır. FDS ve Smokeview programları ile temel olarak zamana bağlı değişen yangın olayının sayısal olarak hesaplanması ve görüntülenmesi hedeflenir. Ancak bu programları kullanılarak yapılabilecekler sadece yangın simülasyonları ile sınırlı değildir.

Bu programlar yardımıyla aynı zamanda bina içindeki kirletici akış veya tahliye akışı gibi soğuk akış modellemeleri de yapılabilmektedir [33].

Smokeview zamana bağlı izleyici parçacık akışının görselleştirilmesi, hesaplanan gaz değişkenlerinin sıcaklık, hız, konsantrasyon dağılımlarının elde edilmesinde veya animasyonlarının yapılmasında kullanılır. Bununla birlikte belirli bir zaman için simülasyonun herhangi bir bölgesindeki statik verilerin vektör grafiklerinin oluşturulmasında da kullanılır.

SMW, modelde analizlere başlanmadan önce, analizlerin yürütüldüğü esnada veya hesaplama sonunda kullanılabilir. Hesaplama sonrası Smokeview kullanımı ile simülasyon çıktıları gözlemlenebilmekte ve hesaplama esnasında kullanıldığında ise simülasyondaki ilerleme görüntülenebilmektedir. Analizlere başlamadan önce kullanımında ise model 3 boyutlu olarak görüntülenebileceği için varsa eksikliklerin çok daha kolay şekilde fark edilip giderilmesine imkân vermektedir.

Smokeview, görsel öğelerin oluşturulmasında OpenGL (3D Graphics Library OpenGL) ve GLUT (Graphics Library Utility Toolkit -GLUT) grafik kütüphanelerini kullanır. Bunların yanı sıra resim ve dosya sıkıştırmak için ZLIB yardımcı kütüphanesinden diyalog oluşturmada GLUI kütüphanesinden ve görüntü yakalama için GD, PNG, JPEG gibi pek çok yardımcı kütüphaneden de faydalanır.

3.1.3. PyroSim ara yüz programının özellikleri

Pyrosim; Fire Dynamics Simulator (FDS) için geliştirilmiş bir grafik ara yüz programıdır. Karmaşık yangın modellerinin tüm detaylarının hızlı bir şekilde oluşturulabilmesi ve yönetilebilmesini sağlar [34].

Pyrosim ara yüzüyle model oluşturulabileceği gibi AutoCAD DXF ve DWG veya mevcut olan FDS uzantılı dosyaların programa aktarılması ile de model oluşturulması mümkündür. Alternatif olarak da GIF, JPG veya PNG uzantılı dosyaların program içine aktarılıp oluşturulan modelde arka plan görseli olarak kullanmakta mümkündür.

PyroSim de çoklu ağ yapısı oluşturmak ve doğruluğunu teyit etmek yapmak için araçlar bulunur. PyroSim, FDS' te kullanılabilen birçok özelliğin kişiselleştirilebilir ve oluşturulan modele hazır olarak aktarılabilir reaksiyon, sıcaklık dedektörleri

malzeme partikül yüzey parametreleri gibi model parametreleri için geliştirilmiş kütüphaneleri bulunmaktadır, bu sayede model oluşturma süreci çok daha hızlı ve daha az hata ile yürütülmüş olur. Bu ara yüz model oluştururken tüm aşamalar 3 boyutlu olarak görüntülenebileceği için olası hatalar minimize edilmiş olur. Kısacası; PyroSim ara yüzü FDS programının mevcut tüm özelliklerini herhangi bir kısıtlama olmaksızın kullanımına imkân verdiği için kullanıcıya daha kolay, daha hızlı ve minimum hata ile modelleme yapma imkânı sunar.

3.2. Tünel Yangınları Konusunda Temel Tanımlamalar

3.2.1. Tünel yangını havalandırma sistemleri

Yangın ve dumanının olumsuz etkilerini azaltmada havalandırma en yaygın yöntemdir. Normal havalandırma sistemleri ısı ve yangın kaynaklı kirleticilerin uzaklaştırılmasında rol oynar ancak yangın durumunda özellikle de büyük çaptaki yangınlarda bu sistemler oldukça yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla bu gibi durumlarda duman kontrolü, duman tahliyesi, yangınla mücadele ve kurtarma için kaçış bölgeleri oluşturabilen özel olarak tasarlanmış yangın havalandırma sistemlerine ihtiyaç vardır.

Daha önceden sınıflandırılmış olan yangın havalandırma sistemleri aşağıda daha detaylı olarak anlatılmıştır.

- **Normal havalandırma sistemleri**

Normal şartlar altında araçlar tünelden geçerken, tünel ekipmanlarına ve tüneli kullanan kişilere zarar veren yüksek miktarda kirleticiyi toz ve ısıyı tünel ortamına bırakırlar. Bu sebeple normal havalandırma sistemlerinin temel amacı bahsi geçen maddeleri tünelden uzaklaştırılmasıdır.

Normal havalandırma sistemleri, doğal havalandırma ve mekanik havalandırma sistemleri olarak ikiye ayırmak mümkündür.

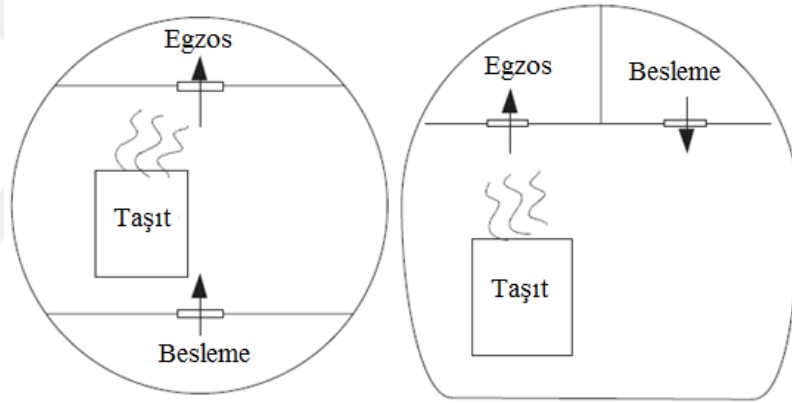
Yoğun trafik akışına sahip kara yolu tünelleri için piston etkisi ile ısı ve kirletici konsantrasyonunu düşürmede yeterli hava akışı sağlanır dolayısıyla bu şartlarda mekanik havalandırma sistemlerinin kullanılmasına gerek yoktur. Ayrıca çok kısa tünellerde de mekanik havalandırma sistemlerinin kullanımı da gereksizdir. Mekanik

fanlara ihtiyaç duyulmayan bu tip tünellerdeki havalandırma sistemleri doğal havalandırma sistemleri olarak nitelendirilir.

Mekanik havalandırma sistemleri genellikle çok uzun tünellerdeki zararlı maddelerin dışarı atılmasında oldukça etkin çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada sıkça sözü edilen; aksenal, eksene dik ,yarı- eksene dik havalandırma sistemleri mekanik havalandırma sistemleri sınıfında yer almaktadır.

- **Eksene dik (transverse) havalandırma sistemleri**

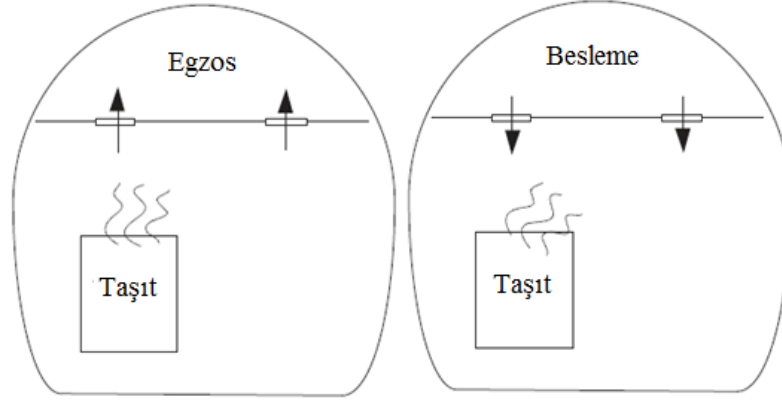
Bir eksene dik havalandırma sisteminde akış besleme kanallarından egzoz kanallarına doğru radyal olarak taşınır. Şekil 3.1’de de görüldüğü gibi besleme menfezleri (duct) zeminde egzoz menfezleri ise tünelin tavanına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Eksene dik havalandırma sistemlerinin şematik gösterimi

- **Yarı-eksene dik (semi-transverse) havalandırma sistemleri**

Yarı- eksene dik havalandırma sistemleri eksene dik havalandırma sistemleri ile hemen hemen aynıdır. Aralarındaki tek fark, Şekil 3.2’ de de görüldüğü üzere yarı eksene dik sistemlerde ya sadece egzoz yada sadece besleme menfezleri aktif durumdadır. Yani ya sadece temiz hava içeri alınır ya da sadece kirleticiler dış ortama taşınır.

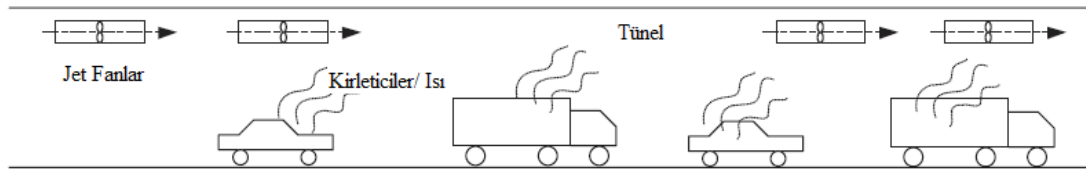


Şekil 3.2 Yarı- eksene dik havalandırma sistemlerinin şematik gösterimi

- **Eksenel havalandırma sistemleri (EHS)**

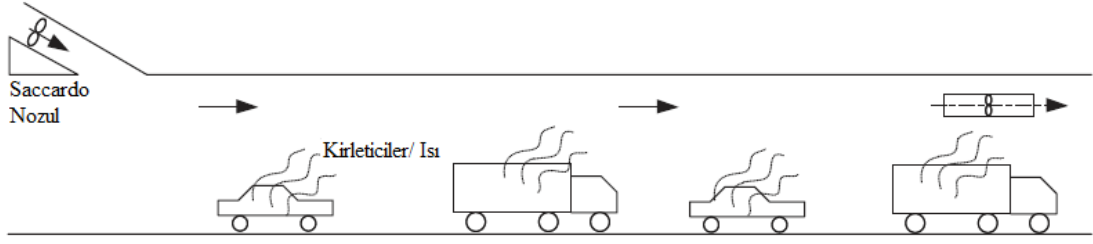
Eksenel havalandırma sistemlerinde genellikle jet fanlar ve /veya normal fanlar kullanılır. Eksenel havalandırma sistemlerinde fan kullanımı görece olarak daha düşük maliyetli ve kurulumu kolay olduğundan bu metod özellikle çok uzun tünellerde hava bacası (shaft) veya diğer havalandırma tipleri yerine tercih edilen havalandırma metodudur.

Eksenel havalandırma sistemlerinde fanlar genellikle tünelin giriş çıkışlarına 2 veya 3 jet fan bir grup oluşturacak şekilde tünel tavanının hemen altına veya nadiren de olsa yan duvarlara sabitlenir (Şekil 3.3). Jet fanlar, tünel geometrisi ve fanların özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte tünel içerisinde genellikle en fazla 100 m'ye kadar aralıklarla yerleştirilmektedirler.



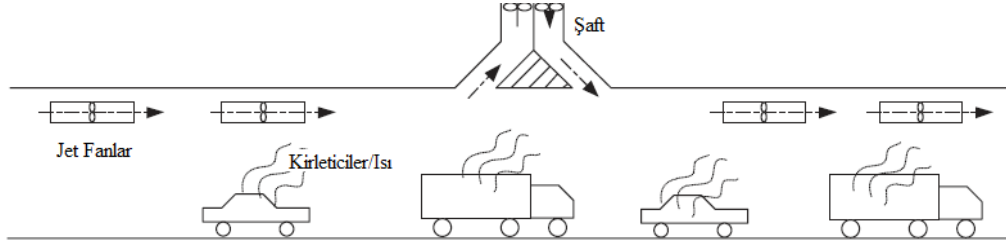
Şekil 3.3 Jet fanlı EHS'nin şematik gösterimi

Bununla birlikte Şekil 3.4' te görüldüğü gibi saccardo nozulu kullanılarak eksenel akış sağlanabilir. Ama bu nozul vasıtasıyla sağlanabilecek basınç yüksek olmayacağı için bu sistemler genellikle ya tek başına kısa tünellerde ya da jet fanlarla birlikte kombine olarak uzun tünellerde kullanılabilir.



Şekil 3.4 Saccardo nozul ve jet fanlı kombine EHS'nin şematik gösterimi

Eksenel havalandırma sistemine sahip bir tünelde kirleticiler veya diğer zararlı yangın ürünleri elimine edilmeyip yalnızca dış ortama taşındığından dolayı tünel çıkışına yaklaştıkça ısı ve kirleticili konsantrasyonları artma eğilimindedir. Bu durum sadece eksenel havalandırma sistemi kullanımının uzun tüneller için yetersiz olabileceğini göstermektedir. Büyük felakete yol açan yangınlarla karşılaşma olasılığı yüksek olan uzun tünellerde Şekil 3.5'te görüldüğü üzere jet fan kullanımına ek olarak bir veya daha fazla baca/şaft (shaft) inşa edilerek ortamdaki kirli havanın çekilip temiz havanın tünele gönderilmesi bir çözüm olarak önerilebilir.



Şekil 3.5 Şaft ve jet fanlı kombine EHS'nin şematik gösterimi

Bazen de en tehlikeli sonuçlara sebep olan parametre toz konsantrasyonudur. Bu durumda ise önerilen çözüm havadaki tozu elimine etmek için elektrostatik toz tutucu (filtre) kullanımı olmaktadır.

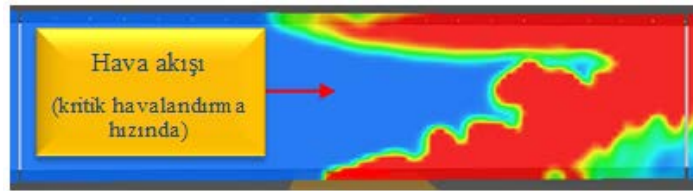
Bahsedilen eksenel havalandırma sistemlerinden de anlaşılacağı üzere havalandırma sistemi tasarımında diğer tüm mühendislik tasarımları gibi sık karşılaşılan, tehlikeli veya istenmeyen parametre/parametreler iyi analiz edilmeli ve bu doğrultuda sistemin ihtiyaçları tespit edilmeli, işlevsellik, kurulum kolaylığı, mevcut sisteme entegre edilebilirliği ve maliyet gibi faktörler göz önünde bulundurularak optimum çözüm geliştirilmelidir.

Normal bir havalandırma sisteminde en temel hedef yangın durumunda dumansız bir kaçış yolu oluşturmak olduğu için kazazedeler en azından yangın kaynaklı duman akışına ters yönde kaçabilmelidir. Ancak akış yönünde kalan yolcular ısı ve dumana maruz kalırlar. Karayolu tünellerinde bulunan yolcuların araçlarıyla kaçacakları kabul edilebilir. Bu durumda maruz kalma süresi azalır ve ölümcül sonuçlarla karşılaşılabilir. Ancak eğer yangın esnasında tünelde çok sayıda araç kuyruk halinde bulunuyorsa araçla kaçış imkânı olmaz ve bu durum çok trajik sonuçlar doğurabilir. Eksenel havalandırma sistemleri, hava bacaları (duct) uygulamalarında olduğu gibi duman çıkışı için ekstra alan gerektirmedikleri ve mevcut tünel yapılarına herhangi bir inşaa gerekmeksizin harici olarak entegre edilebildiği için -bir takım kısıtları olmasına rağmen- dünya çapında en yaygın tercih edilen havalandırma yöntemidir.

Eksenel havalandırma sistemine sahip tünellerde, ISH değeri, kritik havalandırma hızı ve duman geri nüfuz etme derinliği en önemli tasarım parametreleridir. Konunun iyice kavranması açısından bu konular üzerinde daha detaylı olarak durulmuştur.

3.2.2. Kritik hız

Kritik hız; duman geri akışını önlemek için gereken minimum eksenel havalandırma hızıdır. Burada dumanın geri akışını önlemekten kasıt geri yönelen duman kümesinin yangın kaynağı hizasının ötesine geçmemesidir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Kritik hızda hava hareketinin sıcaklık dağılımına etkisi

Daha detaylı şekilde ifade edilecek olursa, eksenel havalandırma sistemi uyarıldığında, yangın kaynağından çıkan gazlar tünel sınırlarından birine doğru hareket etmeye zorlanır.

Thomas ayrıca ΔT ve Q arasındaki ilişkiyi yola çıkarak aşağıda yer alan kritik hız ifadesini geliştirmiştir [1].

$$U_c = \left(\frac{g \dot{Q} H}{\rho_0 c_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (3.13)$$

Kenedy and Danziger'de bir model kurmuş ve Thomas'ın teorisiyle neredeyse aynı formül geliştirmiştir.

$$U_c = \left(\frac{g \dot{Q}_c H}{\rho_0 c_p T_f A Fr_c} \right)^{1/3} \quad (3.14)$$

Yangın akış yönündeki ortalama sıcaklık T_f aşağıdaki denklemden elde edilir [25].

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p U_c A} + T_0 \quad (3.15)$$

Yukarıdaki formüllerde yer alan Q_c , Taşınım (convective) ısı salımı, toplam ısı salımının % 60-80 'i civarındadır. T_0 , temiz hava sıcaklığı olarak kabul edilir. Karayolu Tünelleri, Köprüler ve Diğer Sınırlı Erişimli Karayolları Standardı (Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways) NFPA 502 tarafından geliştirilen ve bir takım iterasyonlar yapılarak eşzamanlı olarak çözülen kritik hız denklemleri aşağıdaki gibidir [36],

$$U_c = K_1 K_g \left(\frac{g \dot{Q} H}{\rho_0 c_p T_f A} \right) \quad (3.16)$$

Denklem 3.15'te yer alan K_1 ; Froude sayısı faktörü (0.606), K_g ; eğim faktörü, (düzlem için $K_g=1$)' dir.

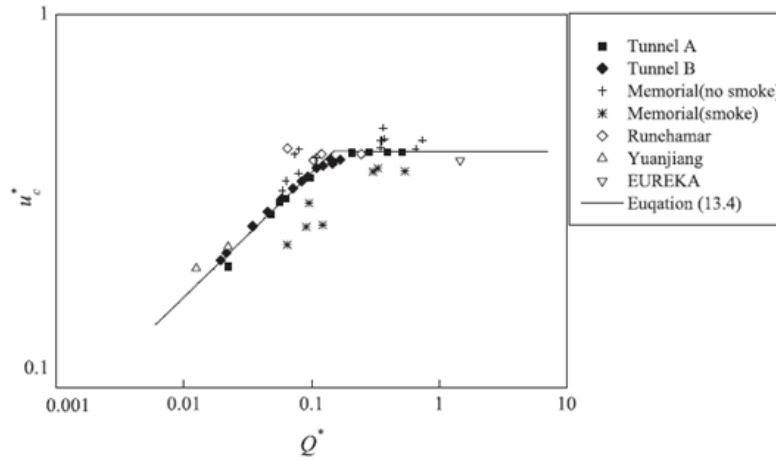
Lee ve arkadaşları büyük çapta yangınlar oluşturarak gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında; boyutsuz ISH 1 iken, Froude sayısının 4,5 olduğunu saptamıştır [15]. Aynı şekilde Li ve arkadaşları da kritik Froude sayısını neredeyse sabit bir değer olarak, küçük yangınlar için yaklaşık 1.15 çok büyük yangınlarda ise ISH'a bağlı değişmekle birlikte 4.5 civarında saptamıştır [32]. Ancak bu değerler çok kaba varsayımlarla elde edilmiş, gerçeğe çok yakın olmayan verilerdir. Yangın bölgesi oldukça dinamik bir ortam olduğundan dolayı tüm tünel yangını boyunca sabit bir Froude değerinin olması imkânsızdır. Bu yüzden Kritik Froude Modeli daha eski

çalışmalarda sıkça kullanılsa da günümüzde bir tasarım parametresi olarak tercih edilmez, bu yöntemle yalnızca genel bir çerçeve çizilebilir.

- **Boyutsuz kritik hız modeli**

Oka ve Atkinson farklı geometriler ve farklı yangın kaynağı konumları için gerçekleştirdikleri çalışmalar ile ISH ve kritik hız arasındaki ilişkiyi saptamaya çalışmışlardır [37]. Bu çalışmalar sonucu, yangın şiddeti arttığında kritik hızın ISH' dan bağımsız hale geldiği saptanmış ve bu durum boyutsuz bir kritik hız ve boyutsuz ISH tanımlanarak parçalı bir fonksiyon şeklinde ifade edilmiştir.

Li ve arkadaşları deneysel ve teorik çalışmalar yürütmüş kritik hız geri nüfuz etme uzunluğunu birlikte değerlendirerek, kritik hızı matematiksel olarak ifade etmişler ve gerek gerçek boyutlu tünellerden elde edilen sonuçlar, gerekse model tünellerden elde edilen sonuçlarla ortaya koydukları denklemleri doğrulamışlardır [32]. Bu ifadeye göre boyutsuz ISH 0.15 değerine yaklaşırken, kritik hız sürekli ancak daha yavaş olarak artar, bu değerden sonra ISH' dan bağımsız bir şekilde neredeyse sabit kalır. Bu durum Şekil 3.7 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Boyutsuz kritik hızın boyutsuz ISH' a bağlı değişimi [32]

Söz konusu kritik hızın, ISH'na bağlı olarak ifade edildiği parçalı fonksiyon aşağıdaki gibidir:

$$u_c^* = \begin{cases} 0.81 Q^{*1/3}, & Q^* \leq 0.15 \\ 0.43, & Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (3.17)$$

Denklemden boyutsuz kritik hız; u_c^* , boyutsuz kritik hız; Q^* ile gösterilmiştir.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}}, \quad \dot{u}_c = \frac{u_c}{\sqrt{gH}} \quad (3.18)$$

Tüm bu incelemeler göstermektedir ki, kritik hız ısı salım hızı ve duman geri nüfuz etme uzunluğu ile yakından ilişkilidir ve bu parametrelere bağlı olarak tanımlanan bir değerdir. Öyleyse; ISH ve duman geri tepme uzunluğu daha detaylı incelenmelidir.

3.2.3. Isı salım hızının (ISH) tanımı, önemi ve tespiti

Tünel uzunluğu ve trafik yoğunluğu karayolu tünellerinin güvenlik seviyelerinin belirlenmesinde temel parametrelerdir. Daha gelişmiş yangın koruma sistemleri tasarımında ise tünelde yangın kaynağı olarak kullanılan araçlardan tünele olan ısı salım hızı en önemli parametrelerden biri kabul edilmektedir. ISH yangın kaynağı, aracın tipi, geometrisi, büyüklüğü ve içerdiği malzemeler, tünel geometrisi ve havalandırma koşulları gibi pek çok parametreye bağlıdır.

Büyük çaplı tünellerde yapılan deneysel yangın testleri yangın gelişimi ve sonuçlarının tanımlanmasında en önemli parametrenin ISH olduğunu göstermiştir. ISH; yakıtın yanma hızı (mass burning rate), ısı, duman ve gaz üretimi arasındaki fiziksel ilişkiyi gösterir.

Tünel havalandırma ve duman tahliye sistemleri ve hatta tünelin yapısal mukavemeti üzerine geliştirilmiş mühendislik tasarımlarında ISH anahtar parametredir.

Her bir araç veya yangın kaynağı olarak kullanılan materyal üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen maksimum ISH değerleri Megawatt (MW) cinsinden tablolştırılmıştır. Can ve mal güvenliği açısından en tehlikeli sonuçlar yangının pik yaptığı anlarda vuku bulduğundan dolayı tasarımlarda ISH için mühendislik emniyet değeri olarak çizelgeleştirilmiş maksimum ISH değerleri kullanılır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen ısı salım hızları tüm şartlar ve deney düzeneği aynı olsa bile değişebilir. Çünkü sisteme etki eden birçok dinamik parametre vardır ve bunların tam olarak kontrolünü ve her deneyde aynı olmasını sağlamak mümkün değildir. Bu sebeple bu verilerin seçiminde fazla sayıda kaynaktan yararlanmak ve seçimi titizle yapmak gerekmektedir.

Ingason tarafından 2001 yılına kadar yapılan tünel yangını çalışmaları sonucu farklı araç tipleri için elde edilen ISH değerleri derlenmiş, 2005 yılında ise Lönnermark ve Ingason yaptıkları ortak çalışmalar ile büyük tünel yangınlarında tünel tavanından ölçülen sıcaklığa tekabül eden maksimum ısı salım hızı değerlerini literatüre kazandırmıştır [38-39]. 2006'da Ingason literatürdeki tüm büyük ölçekli testler sonucu elde edilen ISH ve gaz sıcaklığı verilerini derlemiş ve tanımlamıştır [40].

Yangın güvenliği mühendisleri topluluğu ise 2008'de (Society Of Fire Protection Engineers (SFPE)) çeşitli araç ve komponentlerin ISH eğrilerini çıkarmış ve okuyucuya sunmuştur [41].

Teze konu olan model çalışmasında kullanılan yangın kaynağı şiddeti ile ilgili veriler, ISH'nın tespiti ve tablolaştırılması ile ilgili en son çalışma olarak Ingason ve Lönnermark tarafından 2012 yılında yayınlanan kitabın tünellerdeki ısı salım hızı bölümünden elde edilmiştir [42].

Tünel testleri boyunca ISH farklı metotlar kullanılarak ölçülmüştür. Bu metotlardan en yaygın kullanılanı ise Oksijen tüketim kalorimetresi (oxygen consumption calorimetry) kullanılarak ISH tespitidir. Yakıttaki kütle azalma miktarının ölçümü tekniği, iletim akışı (konvektive flow) tekniği, karbondioksit üretim kalorimetresi (carbon dioxide generation calorimetry) tekniği şeklinde diğer ISH ölçümü için kullanılan teknikleri sıralamak mümkündür. ISH ölçümünün hassasiyeti uygun tekniğin seçilmesi kadar kullanılan algılayıcıların (prob) tipine ve sayısına da bağlıdır.

Çizelge 3.1 Bazı karayolu taşıtlarının maksimum ISH değerleri ve bu değerlere ulaşma süreleri

Taşıt Türü, Modeli, Yıl, Test No	Kalorifik Değer (GJ)	Maks.(Pik) ISH (MW)	Maks. ISH'a Ulaşma Süresi (dk)
Citroen+Trabant,Test 7,NV	7.7	1.7	20
Küçük Taşıt + Büyük Taşıt, Test 9	7.9	7.5	13
Polo+ Trabant, Test 5	5.4	5.6	29

Çizelge 3.1 Bazı karayolu taşıtlarının maksimum ISH değerleri ve bu değerlere ulaşma süreleri (devamı)

Peugeot+Trabant, Test 5	5.6	6.2	40
Jetta+ Ascona, Test 8	10	8.4	55

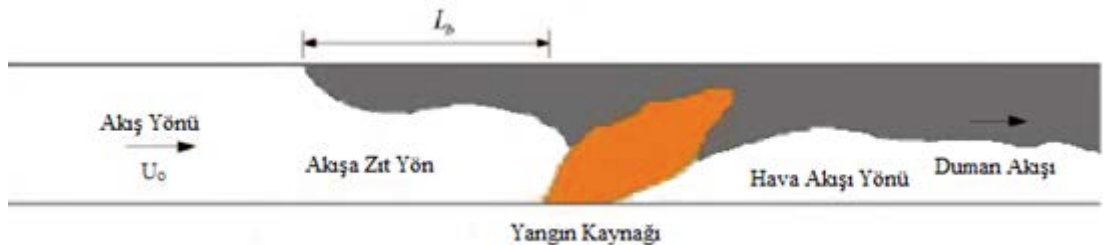
Çizelge 3.1 'de Karayolu taşıtlarının ısı salım hızının (ISH) maksimum değerleri ve bu değerlere ulaşma süreleri gibi gösterilmiştir. Tüm ölçüm sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde karayolu taşıtı kaynaklı yangınları, ISH'a bağlı olarak Çizelge 3.2 'deki gibi kategorize etmek mümkündür [43].

Çizelge 3.2 Kara yolu taşıtlarının taşıt türüne bağlı olarak maksimum ISH değerleri

Taşıt Türü	Maksimum Sıcaklık (°C)	Maksimum ISH (MW)
Otomobil	400-500	3-5
Otobüs veya Raylı Taşıt	600-800	15-20
Büyük Kamyon veya Tanker	1000-1200	50-100

3.2.4. Duman geri-nüfuz etme derinliği (back-layering length)

Yangın ile karşı karşıya kalınan bir tünelde, havalandırma hızı kritik hız değerinin altındaysa, duman yangın kaynaklı akışın tersi yönde hareket eder. Dumanın yangın kaynağından itibaren geriye doğru ilerleme mesafesi geri nüfuz etme derinliği olarak tanımlanır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Tünel yangını esnasında duman geriye akışının şematik olarak gösterimi[1]

Belirlenen ısı gücü için tasarlanan havalandırma hızına sahip aksel havalandırma sistemlerinde temiz hava akışı, kritik hız değerinin altında olamaz.

3.3. Modelin Fiziksel Özellikleri

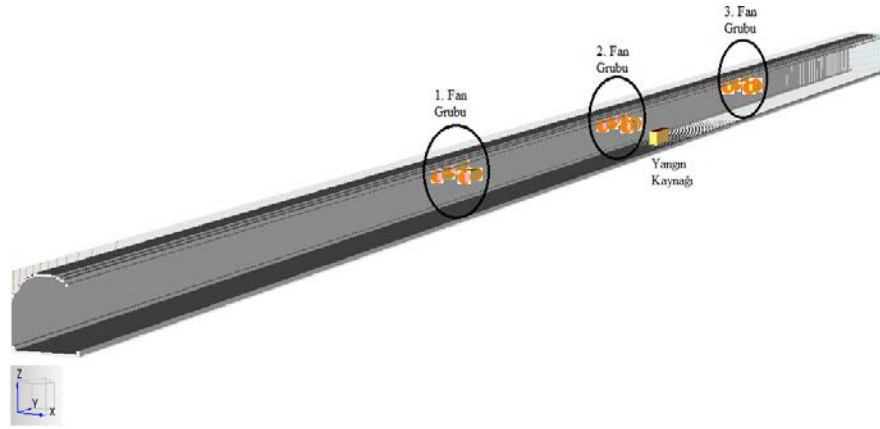
Bu çalışmada Salih Karaaslan ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan model tünel referans olarak kullanılmıştır [14]. Söz konusu tünel Şekil 3.9'dan da anlaşılacağı üzere at nalı kesitlidir ve $8.7 \times 8.2 \times 300$ m (en \times yükseklik \times boy) boyutlarına, 0.005 m et kalınlığına sahiptir ve tünel yüzeyleri adyabatik kabul edilmiştir. Tünel içi işletme hava sıcaklığı 300 °K ve yoğunluğu 1.225 kg/m^3 değerindedir.

Her biri maksimum $86.9 \text{ m}^3/\text{s}$ debi kapasitesine sahip 5 m boyunda, 1.25 m iç çap ve 0.05 m et kalınlığı ile 1.3 m dış çaplı gövdeye sahip jet fanlar, üçerli gruplar halinde Şekil 3.9 ve 3.10'da gösterildiği gibi konumlandırılmıştır. Söz konusu debi ve boyutlara sahip toplam 9 adet fana giren maksimum hava hızı her biri için yaklaşık 73 m/s ' ye tekabül etmektedir.

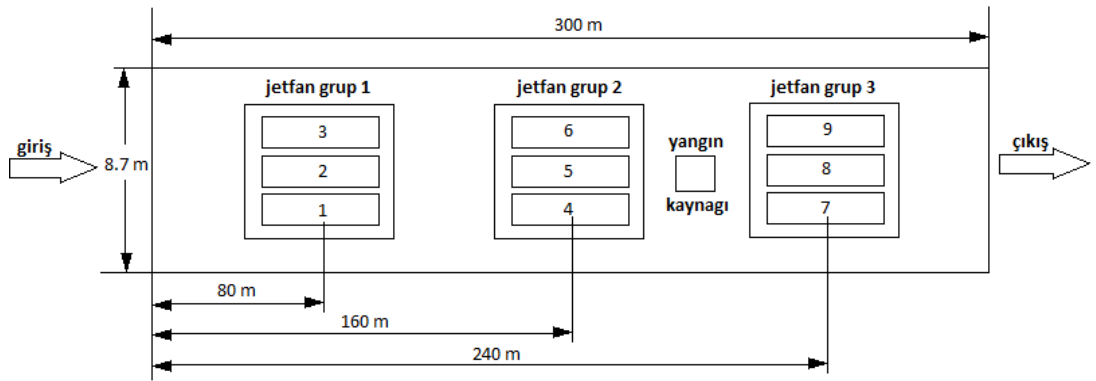
Modelde kullanılan fanlar aracılığıyla çeşitli güç ve konumlar için yangın durumunda aksenal hava sistemlerinin etkisini incelemek amaçlı senaryolar oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Ancak bu çalışmada amaç fan tasarımı yapmak olmadığından, jet fan komponentleri tek tek modellenmemiş yalnızca literatürde kullanılan jet fanlardan birinin boyutları ve debisi seçilerek jet fanlar yardımıyla tahliye edilen hava hareketlerinin gözlenmesi sağlanmıştır [14], [44].

Değişken parametre olarak fan gücü ve konumu alınmasının yanı sıra yangın kaynağı şiddeti de bir başka değişken parametre olarak senaryolara konu olmuştur. Bu kapsamda kullanılan yangın kaynağı literatürde yer alan ısı salım hızı (heat release rate) ve taşıt boyutlarına sadık kalınarak seçilmiş tünelin simetri eksenine yerleştirilmiştir. Tüm senaryolar için $1.54 \times 2.3 \times 7$ m (en \times yükseklik \times boy) boyutlarındaki propan havuzu yangını (propane pool fire) kullanılmış, simülasyon ortamında gerçek bir reaksiyon oluşturulmaya çalışılmıştır. Yangının otomobil yada minivan yangını olması durumunda yaklaşık maksimum 10 MW ISH oluşturacağı varsayımıyla bir takım senaryolar oluşturulmuştur. Bununla birlikte senaryoların bazılarında ise yangının büyük kamyon ya da tanker yangını olması durumunda maksimum 50 MW ISH görüleceği varsayımıyla, karşılaşılabilecek durumlar incelenmiştir. Her bir senaryo için yürütülen simülasyonlardan elde edilen veriler ayrı ayrı değerlendirilmiş ve insan/çevre güvenliği ve enerji dengesi gözetilerek

kontROLSÜZ duman yayılımının önlenmesi için optimum tünel içi duman tahliye sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.9 Senaryolarda kullanılan model tünelin üç boyutlu gösterimi



Şekil 3.10 Fan gruplarının ve yangın kaynağının konumunun şematik gösterimi

Şekil 3.9' daki görselde PyroSim arayüzünde oluşturulan tünel modelinin içinin net görünebilmesi için tünel sağ tünel duvarı kaldırılmıştır. Şekil 3.10' daki çizim ise, tünel en-boy oranı (8.7-300) gözetilerek yapılsa detaylı bir görünüm elde edilemeyeceği için ölçeksiz olarak yapılmıştır. Belirtilen konumlar temsilidir.

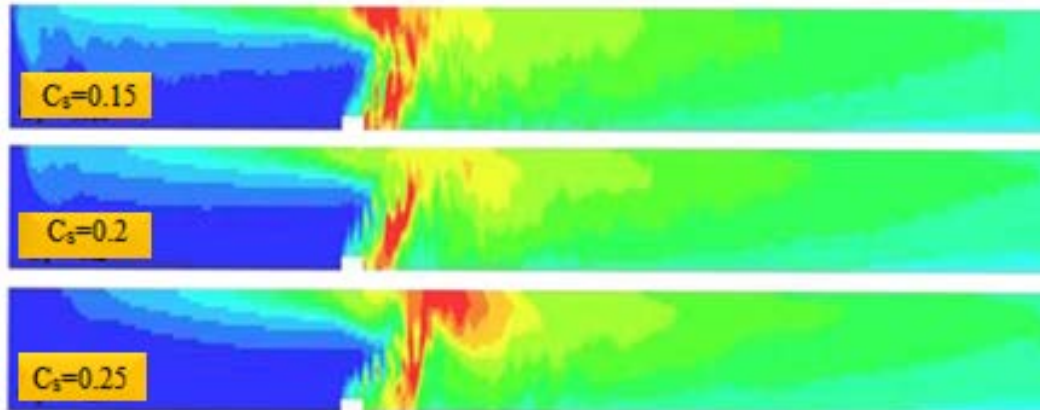
3.4. Simülasyon Yaklaşımı

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi bu çalışmada; hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olarak FDS (Fire Dynamic Simulator), PyroSim ara yüzü ve Smokeview yardımcı programı ile iş birliği içinde kullanılmıştır. FDS programı yardımıyla oluşturulan model için, Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde; zamana ve mekâna bağlı ikinci derece doğruluklu (second order accurate in space and time)

algoritma kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak, Bölüm 3.1.1.'de detaylı olarak bahsedilen LES modeli kullanımı ile, büyük ediler doğrudan çözülmüş, küçük ediler, "altgrid-ölçek gerilmesi" bileşeni modellenmiştir. Bu sayede Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde sadeleştirme yoluna gidilmiş ve hesaplama zamanı tasarrufu sağlanmıştır. Küçük edilerin modellenmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biri olan Smagorinsky Sabiti (C_s), modeli oluşturmada diğer önemli parametrelerden Türbülanslı Prandtl ve Schmidt sayıları ve bu sayıların simülasyon girdisi olarak tanımlanan değerleri aşağıda açıklanmıştır.

- **Smagorinsky sabiti (C_s)**

Küçük edilerin modellenmesinde kullanılan Smagorinsky Sabiti (C_s)'ndeki değişim sıcaklık dağılımı ve alevin konumunda değişikliklere yol açarak ısı iletim (k_{LES}) ve akış içerisindeki kütle difüzyonunu etkiler. Bu sebeple C_s , simülasyonun hassasiyeti açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu sabit ampirik olarak tayin edilir. Bunun nedeni, türbülanslı hareketin bir fonksiyonu olan dinamik viskozitenin C_s üzerindeki etkisinden dolayı bu değer her bir türbülanslı hareket çeşidine göre farklılık göstermesidir. Dolayısıyla evrensel bir Smagorinsky sabiti olduğu söylenemez. Ancak $C_s=0.2$ değeri referans değer alınarak, bu değerden 50% ve 25% daha küçük C_s değerleri (0.10, 0.15) oldukça hassas sonuçlar vermektedir, 25% ve 50% daha büyük değerleri ise (0.25 and 0.30) dinamik viskozite karakteristiği hakkında genel bir çerçeve çizer. $C_s=0.2$ değeri ise genellikle çözüm süresi ve hassasiyet göz önüne alındığında en optimum değer olduğundan dolayı FDS programında varsayılan değer olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.11 C_s 'nin simülasyon hassasiyetine etkisinin sıcak dağılımı ile gösterimi

Bu çalışma kapsamında model tünel üzerinde sırasıyla, 0.20, 0.25 değerleri için hesaplamalar yapılmış ve Şekil 3.11’deki tünel simetri eksenindeki sıcaklık dağılımlarında da görüldüğü gibi $C_s=0.2$ değeri optimum çözüm getirdiğine karar verilerek sayısal hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır.

- **Türbülanslı Prandtl ve Schmidt sayıları**

FDS ile modellenen tünellerde, ısı iletim (thermal conductivity), ve k_{LES} , akış içerisindeki kütle difüzyonunu (diffusivity of the species), $(\rho D)_{LES}$ tayin etmede Türbülanslı Prandtl ve Schmidt sayıları kullanılır.

Kısaca, taşınım olayındaki türbülans etkisini modellemek için bu sayılar kullanılır denebilir.

$$k_{LES} = \frac{C_p \mu_{LES}}{Pr_{turb}} \quad (3.19)$$

$$(\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_{turb}} \quad (3.20)$$

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde; Atmosferik basınç altında moleküler Prandtl sayısı 100 ve 3000 °K aralığındaki hava sıcaklığına bağlı olarak 0.2 ve 0.9 aralığındaki değerleri alır.

FDS programında, alev bu boyutsuz sayı tarafınca belirlenen türlerin kütleli taşınımı (species mass transfer) bilgisine göre konumlandırılır. Bu sebeple Türbülanslı Schmidt Sayısının alev uzunluğuna etki etmesi beklenir bu sayı arttıkça alev uzunluğu da artar.

Türbülanslı schmidth sayısı 0.4 ve 1.0 aralığında bir değer almaktadır.

Bu çalışmada; seçilen Smagoronsky sabiti değerine uygun olarak Türbülanslı Prandtl ve Schmidt Sayısı 0.5 değerinde kabul edilmiştir.

3.4.1. Ağ yapısında kullanılan eleman sayısı ve optimizasyonu

Başlangıç zaman adımı ağ elemanı geometrik boyutunun, akışın karakteristik hızına bölümü ile otomatik olarak hesaplanır. Nümerik analizler kullanılan ağ hücresi

boyutuna karşı hassastır dolayısıyla bu parametre zaman maliyeti açısından çok önemli bir rol oynar.

FDS'de, yangının simülasyon hassasiyeti ve zaman açısından en iyi şekilde çözülebilmesi için boyutsuz bir ifade olan D^* karakteristik yangın çapı (characteristic fire diameter) tanımlanır. Alev özellikleri, aşağıdaki gibi ifade edilen bu boyutsuz sayıya direkt olarak bağlıdır [45];

$$D^* = \left(\frac{q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (3.19)$$

FDS kullanıcı klavuzunda farklı senaryolarda yangının hassas bir şekilde ve yüksek doğrulukla çözülebilmesi için, D^*/dx oranının 4 ile 16 arasında olması tavsiye edilmektedir [46]. Şayet $D^*/dx=4$ ise kaba, $D^*/dx=10$ ise orta, $D^*/dx=16$ ise sık ağ yapısı oluşturulmuş olur.

Bu çalışma kapsamında, hesaplama zamanı tasarrufu sağlamak amacıyla çoklu ağ yapıları bir arada kullanılmak istenmiş buna istinaden daha dikkatli incelenmesi düşünülen kritik bölgeler sık, diğer kısımlar orta ağ yapısı kullanılarak modellenmiş ve paralel çözüm yapılmıştır. Ancak analiz tamamlandıktan sonra bu farklı ağ yapılarının birleştiği düğüm noktalarında kararsızlıklar gözlemlenmiş, simülasyon yakınsaması sağlanamamıştır. Bu kararsızlıkların giderilmesi için yapılan araştırmalar ve programın destek ekibiyle yapılmış olan görüşmeler sonucu, böylesine büyük boyutlu -dolayısıyla oldukça fazla sayıda ağ hücresi içeren-bir modelde, yangın kaynağının şiddetinin çok yüksek olması ve fanların kullanımı gibi etkenlerden dolayı çoklu ağ yapılarının birlikte kullanılarak çözüme ulaşılamayacağı sonucuna varılmıştır. Kullanılan yazılım kaynaklı bu sınırlamadan dolayı senaryolar farklı boyutta ağ yapısı kullanılmadan modellenmiştir. Model kullanılan bilgisayarların her bir çekirdeğine 1 bölge gelecek şekilde, 10 ayrı bölgeye ayrılmış ve bu yolla paralel çözüm yapılmıştır. Böylece her biri 12 çekirdeğe sahip bilgisayarların, 10 çekirdeği HAD çözümlenmeleri için kullanılarak çözüm süresi kısaltılmaya çalışılmış buna rağmen 200 saniyelik simülasyon zamanı için oldukça uzun çözüm süreleri ile analizler yürütülmüştür. Çizelge 3.3 ve 3.4'te, D^*/dx oranı gözetilerek oluşturulan ağ yapılarının hesaplama süresi gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 10 MW ISH' a sahip yangın kaynağı kullanılan modelde 200 s'lik simülasyon zamanı için ağ yapısı-hesaplama süresi

Test no	Ağ elemanı Boyutu (m)	Toplam ağ elemanı sayısı	Hesaplama Süresi (saat)
1(Kaba)	0,5751	112500	45.24
2(orta)	0.2223	1946512	376.55
3(sık)	0.1489	6480000	...

Çizelge 3.4 50 MW ISH a sahip yangın kaynağı kullanılan modelde 200 s'lik simülasyon zamanı için ağ yapısı-hesaplama süresi

Test no	Ağ elemanı boyutu (m)	Toplam ağ elemanı sayısı	Hesaplama süresi (saat)
1(Kaba)	1.0870	17,280	5.24
2(Orta)	0.3490	503360	38.49
3(Sık)	0.2870	1051880	127.11

Çizelge 3.3 ve 3.4 incelendiğinde, 50 MW'lık yangın kaynağının kullanıldığı simülasyonlar, 10 MW'lık yangın kaynağının kullanıldığı duruma göre çok daha düşük sürelerde tamamlandığı görülmektedir. Bunun nedeni, ağ elemanı boyutu belirlenirken kullanılan D^* boyutsuz sayısının ısı salım hızı ile orantılı olarak artmasıdır. Dolayısıyla 50 MW'lık yangın durumunda modelde çok daha büyük boyutlu yani daha az sayıda ağ elemanı kullanılmıştır. Buda hesaplama süresini ciddi anlamda kısaltmıştır.

Yukarıdaki çizelgelerde yer alan ağ yapılarının kullanıldığı modellerin yakınsama durumu Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) kriteri ile kontrol edilmiş ve 10 MW ve 50 MW ISH'na sahip yangın kaynağı kullanılan modellerde her iki durum içinde orta sıklığa sahip ağ yapısı tercih edilmiştir

3.4.2. Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) kriteri

CFL kriteri (condition), kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu farklar metoduyla nümerik olarak çözümünde yakınsama için gerekli bir koşuldur. FDS programının geliştiricilerinden McGrattan (2006)'da, FDS programında oluşturulan simülasyonun yakınsama durumunu kontrol etmek amacıyla CFL kriterini kullanış ve diğer kullanıcılara da yakınsama kontrolünün bu yolla yapılması gerektiğini tavsiye etmiştir [46]. Bu ifadeye göre hiçbir zaman adımı başlangıç zaman adımından daha büyük olamaz.

Tahmin edilen hızlar her bir zaman adımının (time step), CFL kriterine uygunluğu 3.21 bağıntısıyla test edilebilir. Aşağıdaki bağıntılar göz önüne alındığında

$$C = \delta t . \max \left(\frac{|u_{ijk}|}{\delta x} \frac{|v_{ijk}|}{\delta y} \frac{|w_{ijk}|}{\delta z} \right) < 1 \quad (3.21)$$

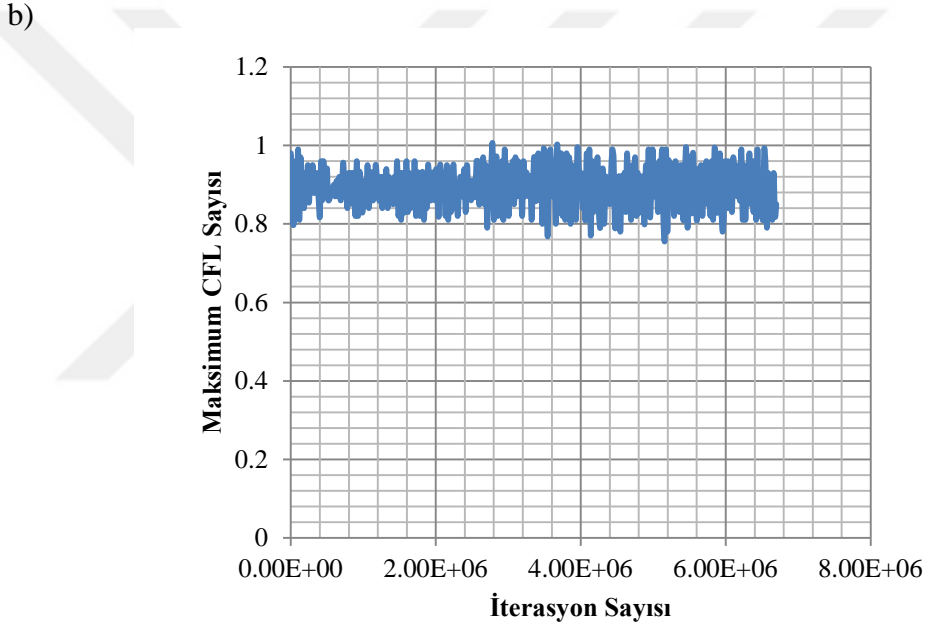
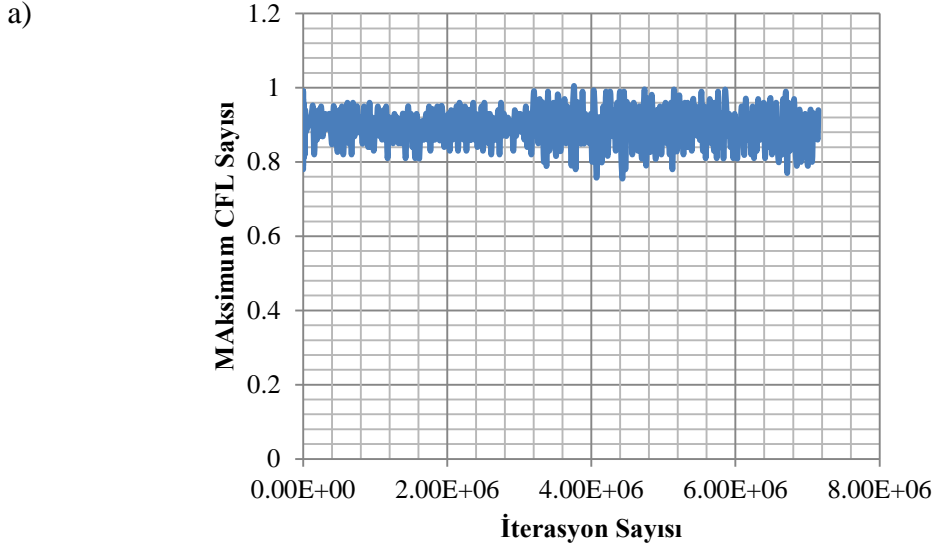
Başlangıç zaman adımı, ağ hücrelerinin boyutunun karakteristik hıza bölünmesiyle elde edilerek, FDS programında otomatik olarak hesaplanmaktadır. Varsayılan başlangıç zaman adımı aşağıdaki gibidir;

$$\delta t_{\text{initial}} = 5(\delta x \delta y \delta z)^{1/3} / \sqrt{gH} \quad (3.22)$$

Burada; δx , δy , δz değerleri en küçük ağ hücresinin boyutları, H; hesaplama alanı yüksekliği, g; yerçekimi ivmesidir.

Bu çalışmada, model oluştururken yakınsama ölçütü olarak kullanılan CFL kriteri(C)'nin, 1 değerinden küçük olma şartı korunarak CFL kriterinin sırasıyla 0.8 ve 0.99 aralığında olması gerektiği kodlanmıştır.

Şekil 3.12'den de anlaşılacağı üzere iterasyonlar yapılırken CFL değeri 1 değerini genellikle aşmamış ve istenen aralıkta (0.8-0.99) kalmıştır.

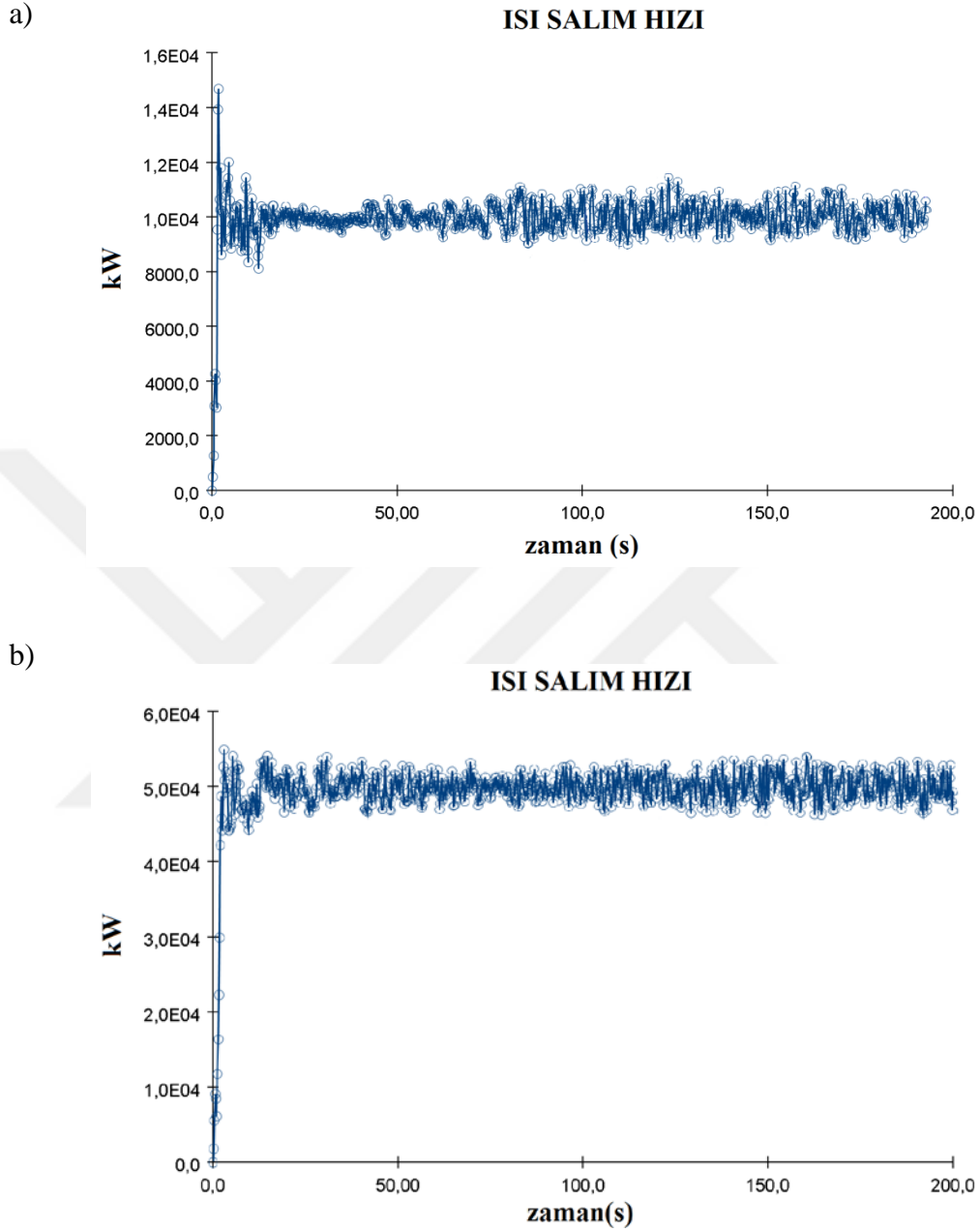


Şekil 3. 12 Maksimum CFL sayısı- İterasyon sayısı: a)10 MW , b)50 MW

3.4.3. Yangın kaynağının ısı salım hızı

Senaryolarda kullanılan birim alan başına ısı salım hızı değerleri 10MW ve 50 MW yangın şiddeti için sırasıyla; 927,64 ve 4638,22 kW/ m² olarak ayarlanmıştır. Yürütülen sayısal analizlerde; ısı salım hızı karakteristiği programda varsayılan mod olarak modellenmiştir buna göre ısı salım hızının maksimum değerinde olduğu varsayımı yapılarak tüm senaryolar gerçekleştirilmiştir. Bu teknik en kötü durumu referans alarak tedbir alınması açısından, yangın güvenliği sağlama çalışmalarında sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir.

Her iki yangın kaynağı içinde analizlerden elde edilen ISH'ın simülasyon zamanına bağlı değişim grafiği Şekil 3.13'te yer almaktadır.



Şekil 3. 13 ISH'ın simülasyon zamanına bağlı değişimi: a) 10 MW, b) 50 MW

Program kütüphanesinde propan reaksiyonu ile ilgili bilgiler bulunmakla birlikte model oluşturulurken varsayılan bazı değerlere elle müdahale edilmiştir.

Ayrıca modelde; tünel içerisine tünel girişinden çıkışına kadar aksel olarak birer metre aralıklarla ve düşey olarak da insan boyu düşünülerek seçilmiş 1 ile 2 m yükseklikleri arasına 0.1 m aralıklarla ayrı ayrı sıcaklık, hız ve karbon monoksit

konsantrasyon değerlerinin ölçülmesi için algılayıcılar tanımlanmıştır. Simülasyon sonunda bu veriler vasıtasıyla yalnızca renkli hız, sıcaklık ve konsantrasyon dağılımı değil aynı zamanda herbir nokta için excel dosyasına depolanmış havalandırma hızı, sıcaklık ve gaz konsantrasyon verileri elde edilmiştir.

3.4.4. Ölçeklendirme tekniği

Froude Modelleme Tekniği, tünel yangını ölçeklendirilmesinde oldukça yaygın kullanılan bir tekniktir. Bu teknikle, Froude sayısının karakterize ettiği atalet ve kaldırma kuvvetleri oranı korunur. Froude modelleme tekniğine göre, ısı salım hızı sıcaklık bölgesi aynı tutularak model ve gerçek tünel olarak aşağıdaki ifadeye göre ölçeklendirilir [14], [37];

$$\frac{Q_{model}}{Q_{gerçek}} = \left(\frac{L_{model}}{L_{gerçek}} \right)^{5/2} \quad (3.23)$$

Ayrıca hızlar ve tünel uzunluğu arasında da aşağıdaki gibi bir ilişki mevcuttur;

$$\frac{V_{model}}{V_{gerçek}} = \left(\frac{L_{model}}{L_{gerçek}} \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

Bu çalışmaya konu olan referans makale de kullanılan tünelin 8.7× 8.2× 300 m (en× yükseklik×boy) boyutlarında olduğu daha önceki bölümlerde bahsedilmişti, söz konusu tünel nümerik çalışmada modellenirken 3.23 ve 3.24 denklemleriyle özetlenen Froude ölçeklendirme tekniğine göre 1/20 ölçeğinde küçültülerek ANSYS Fluent yazılımında modellenmiştir [14]. Bu çalışmada ise, tünelin gerçek boyutları ile modelleme yapılarak nümerik analizler yürütülmüştür.

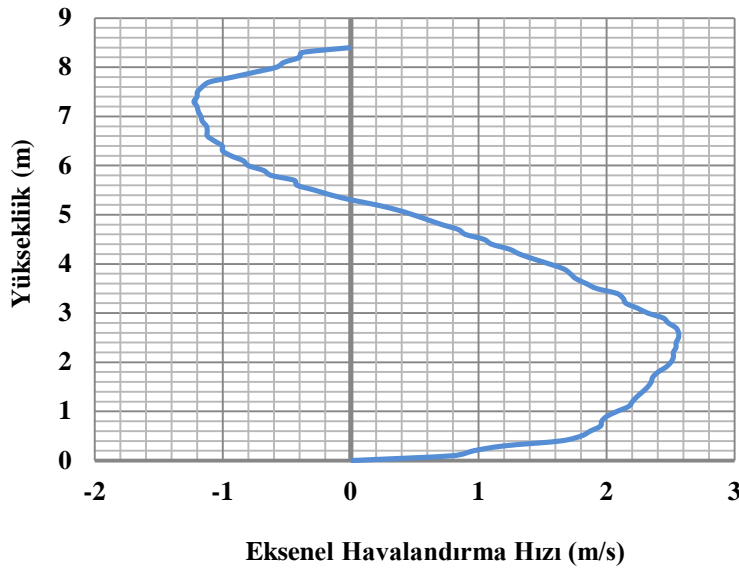
Buna göre, 1/20 ölçeğinde modellenen tünelin, gerçek boyutta hesaplanan havalandırma hızı ve ısı salım hızı aşağıdaki çizelge 3.5' te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5'den de anlaşılabilieceği üzerine kritik havalandırma hızı değeri, gerçek boyuttaki modelde 10 MW ve 50 MW için Froude ölçeklendirme yöntemi kullanılarak sırasıyla 2,77 ve 5,48 m/s olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 Tünelin gerçek boyutlarda ve 1/20 ölçeğinde modellendiğinde ISH ve havalandırma hızı değerler

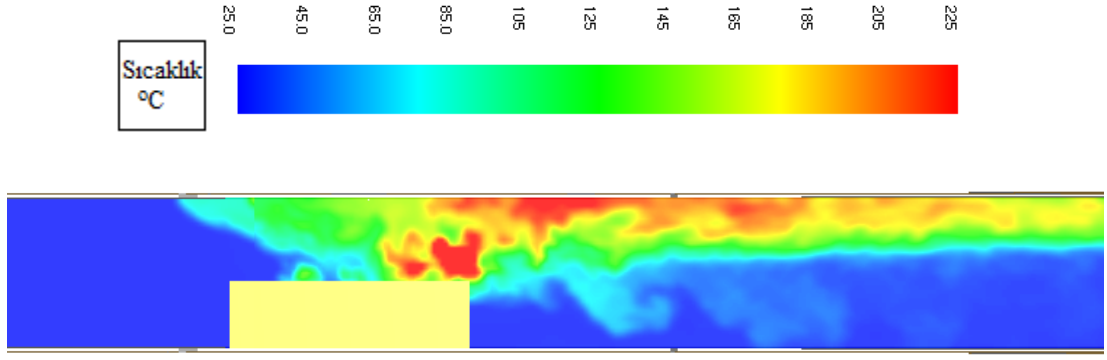
	Gerçek Boyutta Modellenen Tünel		1/20 Ölçeğinde Modellenen Tünel	
	Isı Salım Hızı (MW)	Havalandırma Hızı (m/s)	Isı Salım Hızı (MW)	Havalandırma Hızı (m/s)
10 MW 'lık yangın kaynağı için	10	2,77	0.0056	0.62
50 MW 'lık yangın kaynağı için	50	5,48	0.02795	1.225

Aşağıdaki hız profillerinden ise 10 MW ve 50 MW ısı salım hızına sahip yangın kaynaklarının kullanıldığı ve sırasıyla Çizelge 3.3 ve 3.4 'te yer alan orta sıklıkta ağ yapısına sahip modellerde yukarıda hesaplanan kritik hız değerleri ile aynı veya çok yakın değerlerde (sırasıyla 2.8, 5.48 m/s), duman geriye nüfuz etme durumu görülmez.

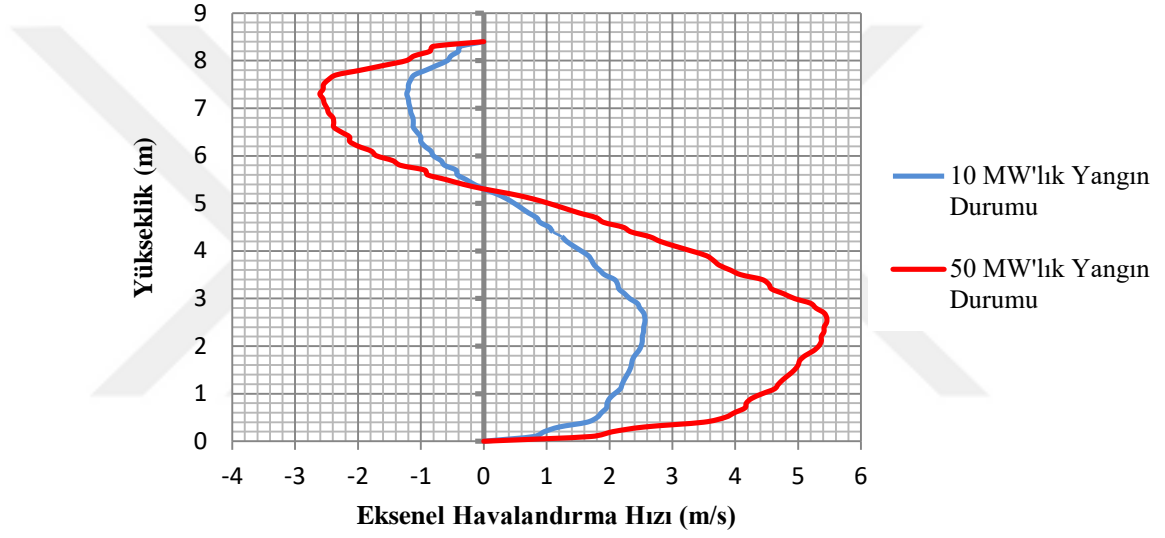


Şekil 3.14 10 MW ISH' a sahip yangın kaynağı kullanıldığında y=150 m'de elde edilen aksenal havalandırma hızı profili (t=30s)

Ek 1' de yer alan grafikte görülebileceği üzere 10 MW ısı salımı için referans çalışmada saptanan havalandırma hızı değerleri ile Şekil 3.14' te yer alan bu çalışmada elde edilen havalandırma hızı değerleri ve Şekil 3.15' te yer alan tünel simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı ile oldukça uyumludur.



Şekil 3. 15 10 MW için jet fanların kullanılmadığı ve hava hızı, kritik hıza eşit olduğu durumda tünel simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.16 10 MW ve 50 MW ISH'a sahip yangın kaynakları kullanıldığında $y=150$ m'de elde edilen eksenel havalandırma ($t=30$ s)

Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16' da elde edilen değerlerin; tünel girişinden itibaren 150 m'de simetri ekseninde düşey doğrultuda 0.1 m aralıklarla gaz akış ölçer yerleştirilerek yapılan modellemenin 30 s simülasyon zamanında elde edilen veriler olduğunu hatırlatmakta fayda vardır

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, ilk olarak referans çalışmada yer alan havalandırma senaryoları analiz edilmiştir [14]. Analiz sonuçları incelenirken bu geometri ve fiziksel şartlara sahip tünellerde oluşan yangınlarda insan sağlığı ve çevre güvenliğini sağlamak için ortaya atılan havalandırma sistemi çözüm senaryolarının belirli yönlerden eksik kaldığı, hatta durumu daha da kötüleştiren sonuçlara yol açtığı tespit edilmiştir. Ardından yeni çözüm alternatifleri geliştirilmeye çalışılarak optimum çözüme ulaşılmıştır.

4.1. Referans Çalışmada Yer Alan Havalandırma Önerilerinin Sayısal Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Referans çalışmada kullanılan model üzerinde jet fanların bazıları aktif hale getirilmiş ve bazıları devre dışı bırakılmıştır. Ayrıca kullanılan fanlarda 27 Pa ve 54 Pa basınç farkına karşılık gelen sırasıyla 30 ve 48 m/s deşarj (discharge) hızları için süreklilik denkleminde hareketle sırasıyla 46,875 m³/s, 75 m³/s akış debileri tanımlanarak oluşturulan senaryolar aşağıdaki çizelgede kodlar halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Referans makaledeki durum senaryoları

Uygulama senaryoları	Havalandırma Test Kodu	Isı Salm Hızı (ISH) (MW)	Aktif Jet Fan Grubu	Deşarj Hızı (m/s)
1	10FG1(1)	10	1	(1)
2	10FG1(2)+ 10FG2(1)	10	1-2	(2)-(1)
3	50FG1(1)	50	1	(1)
4	50FG1(1)+ 50FG2(1)	50	1-2	(1)-(1)
5	50FG1(2)	50	1	(2)
6	50FG1(2)+ 50FG2(2)	50	1-2	(2)-(2)
7	50FG1(2)+50FG2(2)+50FG3(2)	50	1-2-3	(2)-(2)-(2)
8	50FG1(2)+ 50FG2(1)	50	1-2	(2)-(1)
9	50FG1(2)+50FG2(1)+50FG3(2)	50	1-2-3	(2)-(1)-(2)

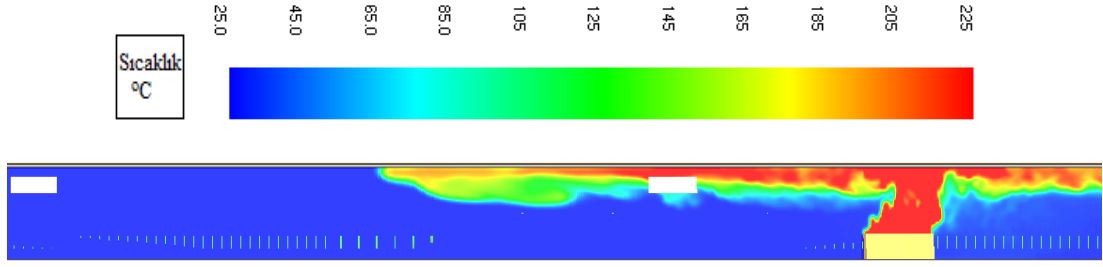
Çizelge 4.1' deki kodlama sisteminde ilk iki hane ısı salım hızını sonraki üç hane aktif durumdaki fan gruplarını kalan kısımlar ise deşarj hızını göstermektedir. Deşarj hızı 30 m/s için; (1) , 48 m/s için; (2) kodu kullanılmıştır. Örneğin; 10FG1(2)+10FG2(1) şeklinde kodlanan Senaryo 2'de; 10 MW ısı salım hızına sahip yangın kaynağı kullanılmış, 1. fan grubu 48 m/s, 2. fan grubu ise 30 m/s lik deşarj hızlarında çalıştırılmış ve 3. fan grubu devre dışı bırakılmıştır.

Söz konusu çalışmada her iki yangın kaynağı için öncelikle dumanın tünel girişine kadar ulaşma süresi tespit edilmiş ardından daha etkin bir havalandırma için dumanın yangın kaynağına en yakın fan grubuna (1. fan grubu) ulaşma süresi belirlenip havalandırma sisteminin bu andan itibaren çalıştırılması gerektiği kanısına varılmıştır. Bu bağlamda, 10 MW' lık yangın kaynağı kullanılarak oluşturulan senaryolarda duman 1. fan grubuna 20 s'de, 50 MW'lık yangında ise 10 s'de ulaştığından dolayı havalandırma sistemi bu sürelerden sonra devreye sokulmuştur.

Makalede tüm senaryolar hep birlikte değerlendirildiğinde Senaryo 2 (10FG1(2)+10FG2(1)) ve Senaryo 5 (50FG1(2))' den duman tahliyesi ve tünel içi sıcaklıkların düşürülmesi hususunda diğerlerine nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

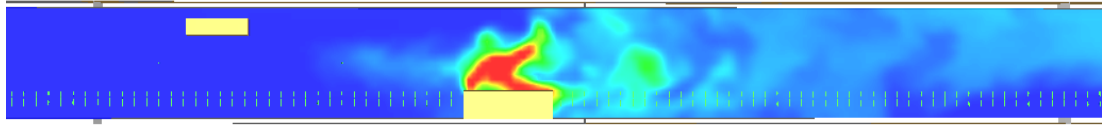
Isınan gazlar kaldırma kuvvetinin etkisi ile tünel tavanına doğru hareket eder ve tavana çarpıp tekrar tünel zeminine doğru yönelir böylece tünel içi yoğun türbülanslar oluşur. Bu sebeptendir ki, 50 MW' lık yangın kaynağı kullanılarak oluşturulan senaryolarda yangın güvenliğinin sağlanması yüksek ısı salımından dolayı oluşan etkilerin yanı sıra bahsi geçen türbülanslı hava akışının kontrolü açısından da oldukça zordur. Tüm simülasyonlar bu etkiler gözetilerek oluşturulmaya çalışılmıştır.

Senaryo 1'de; 1. fan grubu 30 m/s hızla çalıştırıldığında ancak 1. fan grubunun arkasında kalan alanı tamamen temizleyebilmiş (Şekil 4.1), fakat önündeki kısmı sadece kısa bir mesafe için dumansız hale getirebilmiştir. Bu sebeple, yangın kaynağına yakın bölgelerde etkin olmadığı rahatlıkla söylenebilir. Buradan hareketle, yalnızca 1. fan grubunun çalıştırılması ile 10 MW' lık bir yangında bile duman tahliyesi etkin şekilde yapılamıyorken, 50 MW ISH' a sahip bir yangın kaynağı kullanıldığında (Senaryo 3), yalnızca bu fan grubunun bu güçte çalıştırılması ile başarılı bir sonuç almanın mümkün olmadığı açıktır.



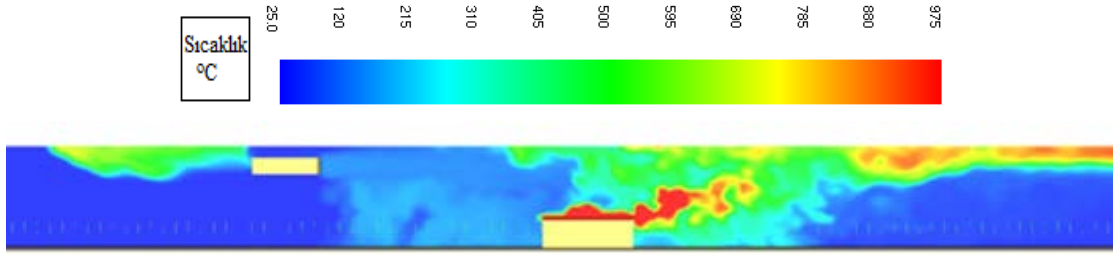
Şekil 4.1 Senaryo 1’de havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra tünelin simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı

İncelenen durumlar göstermiştir ki, yalnızca 1. fan grubu ile çalışmak bu şiddetteki yangınlar ve bu uzunluktaki tüneller için yetersiz kaldığından daha fazla fana ihtiyaç vardır. 1. ve 2. fan gruplarının havalandırmaya etkisini gözlemlemek amacıyla geliştirilen Senaryo 4’te daha hızlı ve daha etkin bir havalandırma yapıldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu durum yalnızca tünel girişi ile yangın kaynağı arasında yer alan bölge için geçerlidir. Çünkü Şekil 4.2’ de de görüleceği üzere yangın kaynağına yakın konumlandırılmış 2. fan grubu hızlı bir tahliye sağlarken yangın kaynağından çıkan duman sütununun bozulmasına ve zemine doğru yönelmesine sebep olmuş ve yangın kaynağından tünel çıkışına kadar oldukça yoğun türbülanslar görülmüştür.



Şekil 4.2 Senaryo 4’te havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra tünelin simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı

Fanların Senaryo 4 ile aynı konumda ve debilerde olduğu Senaryo 6’ da da benzer bir durum gözlemlenmiştir. Ancak kullanılan fanların daha yüksek debilerde çalıştırılmasından dolayı tahliye işlemi daha hızlı gerçekleşmiş ve daha yoğun türbülanslar ile karşılaşmıştır. Senaryo 6’daki bu türbülans etkisi Şekil 4.3’te havalandırma sistemi devreye girdikten 15 s sonra tünelin simetri eksenindeki sıcaklık dağılımından da net olarak görülebilmektedir.



Şekil 4.3 Yüksek hızda çalıştırılan fanların duman sütununu bozucu etkisinin sıcaklık dağılımı ile gösterimi (Senaryo 6)

Senaryo 6’ da görülen 2. fan grubunun duman sütununu bozucu etkisinin azaltılması amacıyla geliştirilmiş olan Senaryo 8’ de 2. fan grubu $30 \text{ m}^3/\text{s}$ deşarj debisi ile çalıştırılmış buna bağlı olarak da nispeten daha düşük türbülanslı akış elde edilmiştir fakat tünel çıkışına yakın bölgelerde havalandırma bu senaryoda da yetersiz kalmıştır.

Senaryo 7 ve Senaryo 9 ‘da 3. fan grubu devreye sokulmuş ancak tünel çıkış tarafındaki türbülansın dolayısıyla oldukça kötü olan durumu daha da kötüleştirmenin ötesine geçilememiştir.

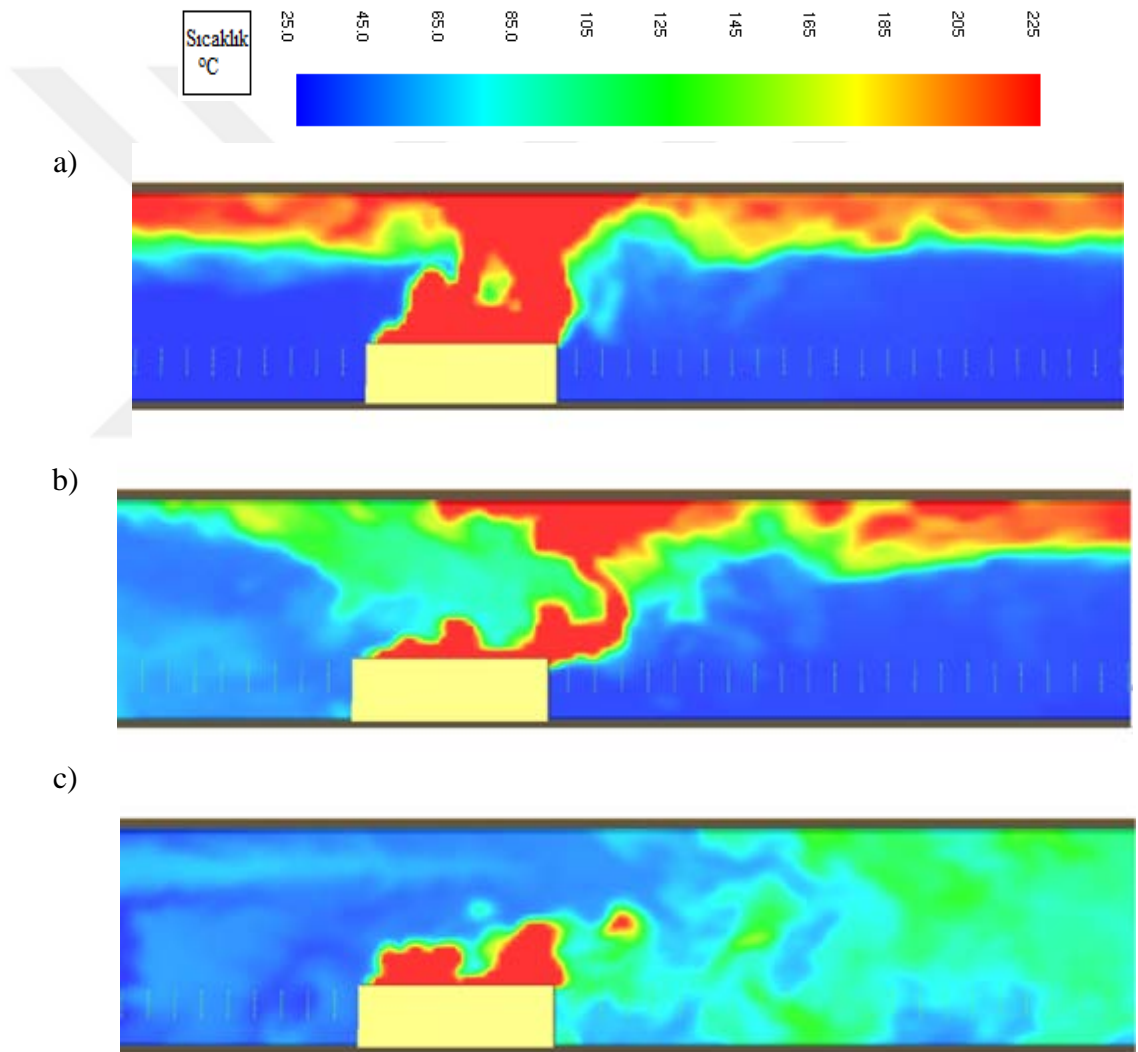
Referans olarak kullanılan makalenin yazarları tarafından tüm bu analizler değerlendirildiğinde, tünelde 10 MW ISH’a sahip yangın görülmesi durumunda 1. fan grubu için $75 \text{ m}^3/\text{s}$, 2. fan grubu için ise $46,875 \text{ m}^3/\text{s}$ deşarj debileri tanımlanarak oluşturulan Senaryo 2 ve 50 MW ISH’ a sahip yangın görülmesi durumunda ise sadece 1. fan grubundaki fanlar kullanılarak yürütülen Senaryo 5 optimum çözüm olarak önerilen senaryolardır [14].

İncelenen bütün senaryolar ve yazarların optimum çözüm önerileri göstermektedir ki, önemli olan daha fazla sayıda fan kullanımı değil, doğru konumlandırılmış ve doğru hızlarda çalışan fan kullanımınıdır.

Önerilen optimum çözümler daha detaylı incelenecek olursa;

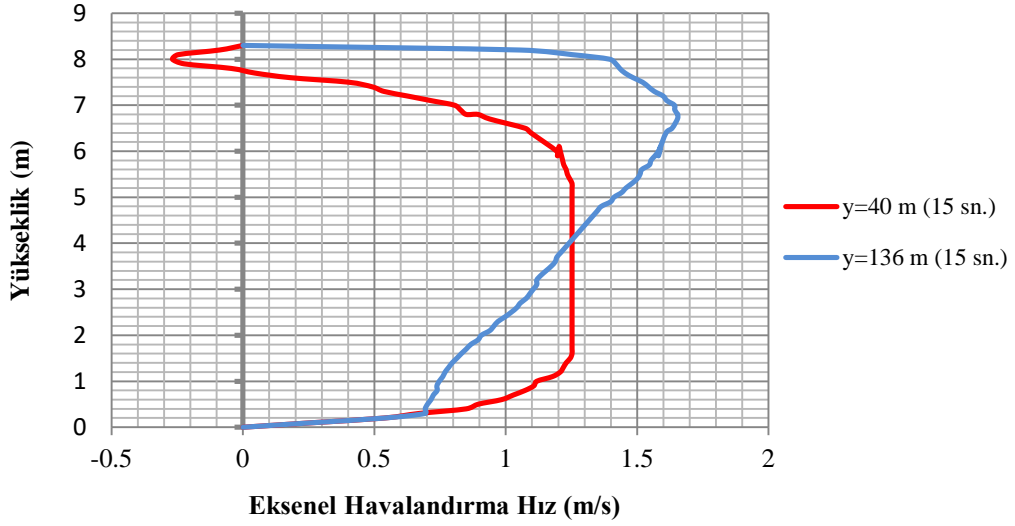
Senaryo 2’ de yangın kaynağı önünde yer alan fan grupları (FG1, FG2) çalıştırılmıştır. Tüm tünel yangın havalandırma ve duman tahliye sistemlerinde hedeflenen, dumanın mümkün olduğunca tünel tavan yüzeyini süpürerek uzaklaştırılması ve tüm tünel boyunca insan sağlığına zarar verecek hız ve sıcaklık

eşliğinin aşılmamasıdır. Bu hedef doğrultusunda Şekil 4.4' te yer alan sıcaklık dağılımları değerlendirildiğinde Şekil 4.4.a' da görülen duman geriye akışı kısa bir süre sonra Şekil 4.4.b'de görüldüğü gibi jet fanlar yardımıyla giderilmiş ancak duman geri nüfuzu önlenirken özellikle 2. jet fan grubunun duman sütununu bozucu etkisi göz ardı edilmiştir. Tünel girişinden yangın kaynağına kadar olan bölge dumandan arındırılıp sıcaklık değerleri kabul edilebilir sınırlara getirilmekle birlikte, göz ardı edilen bu bozucu etki bir süre sonra daha da belirginleşmiş Şekil 4.4.c' den de görüldüğü üzere yangın kaynağından itibaren tünel çıkışına kadarki bölgeler oldukça türbülanslı bir akış ve yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır.

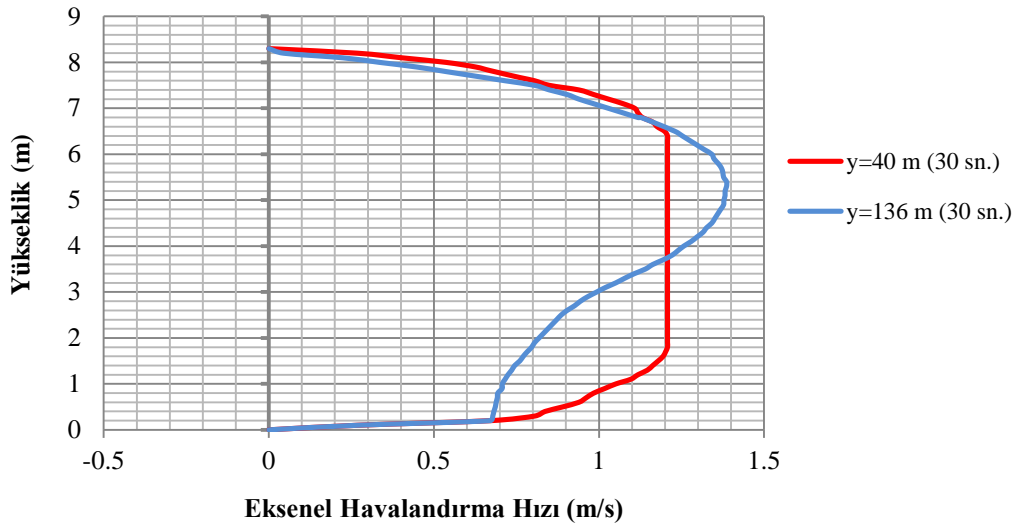


Şekil 4.4 Senaryo 2' de tünelin simetri ekseninde havalandırma sistemi devreye girdikten: a) 5 s, b) 15 s, c) 30 s sonraki görülen sıcaklık dağılımları

Şayet tek amaç yangın kaynağı önündeki bölgeyi temizlemek olsa idi, önerilen bu sistem gayet başarılı sayılabilirdi ancak tüm tünel boyunca yangın güvenliğini sağlama temel hedefi düşünüldüğünde bu sistemin yeterli olduğu söylenemez.



Şekil 4.5 Senaryo 2' de havalandırma sistemi devreye girdikten 15 s sonra y= 40 ve y=136 m' deki havalandırma hızı profilleri

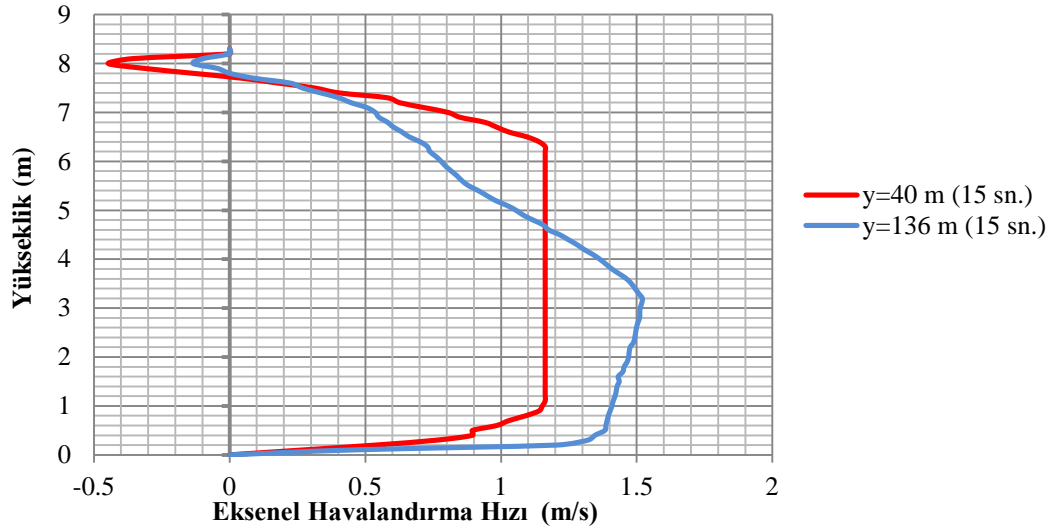


Şekil 4.6 Senaryo 2' de havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra y= 40 ve y=136 m' deki havalandırma hızı profilleri

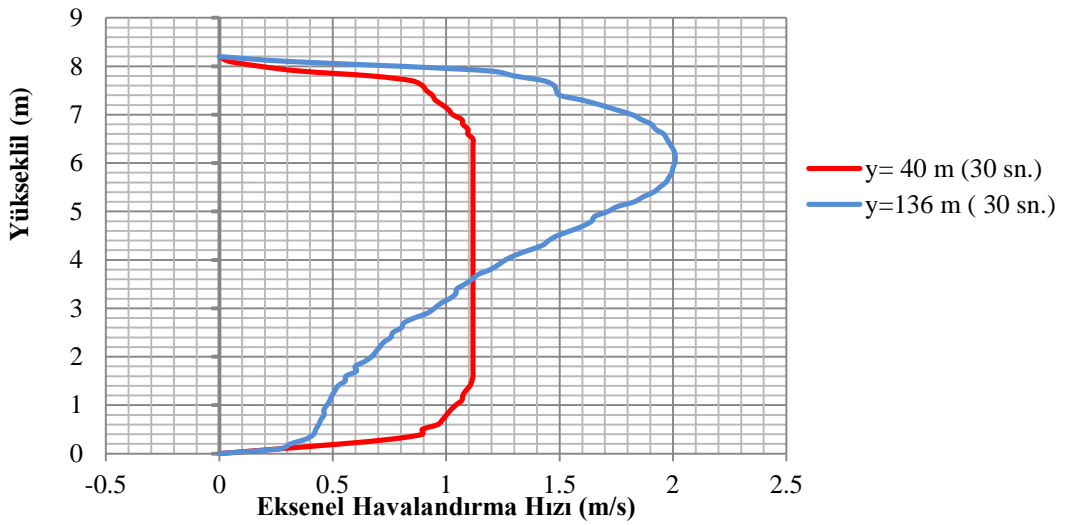
Şekil 4.5' te görüleceği üzere gerçek boyutlardaki tünel kullanılarak yapılan simülasyonlarda 10 MW ISH'a sahip yangın oluşması durumunda fanlar devreye girdikten 15 s sonra, tünel girişinden 40 m ileride görülen yaklaşık 0.25 m/s' lik hız

sahip duman geri akışı, 30 s’de giderilerek Şekil 4.6’de görülen hız profilleri elde edilmiştir.

Ek 2 incelendiğinde referans makale de 1/20 ölçeğindeki modelin ANSYS programı ile analiz sonucu bulunan 40 ve 136. metredeki hız profilleri ile bu çalışmada gerçek tünel boyutları için yürütülen nümerik analizlerden elde edilen 10 MW’lık yangın kaynağı için Şekil 4.5 ve 4.6’ daki, 50 MW’lık yangın kaynağı için ise Şekil 4.7 ve 4.8’ deki hız profilleri oldukça uyumludur.



Şekil 4.7 Senaryo 5’te havalandırma sistemi devreye girdikten 15 s sonra y= 40 ve y=136 m’ deki havalandırma hızı profilleri



Şekil 4.8 Senaryo 5’te havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra y= 40 ve y=136 m’ deki havalandırma hızı profilleri

Gerçek boyutlardaki tüneller kullanılarak yapılan simülasyonlardan, 50MW ISH' a sahip yangın oluşması durumunda fanlar devreye girdikten 15 s sonra, tüneller girişinden 40 m ileride görülen yaklaşık 0.42 m/s ve 136 m ileride görülen yaklaşık 0.18 m/s hıza sahip duman geri akışı 30. s'de giderilerek Şekil 4.8' de görülen hız profilleri elde edilmiştir.

Referans makalede yer alan tüm senaryolar etraflıca değerlendirildiğinde daha iyi bir çözüm üretmeye katkı sağlayacak çıkarımlar yapmak mümkündür. Bu kapsamda örneğin, havalandırma sisteminin en önemli parçası olarak kullanılan jet fanlar, akışa ters yönde yangın kaynağına çok yakın konumlandırıldığı veya gereğinden yüksek hava deşarj debisi ile çalıştırıldıkları takdirde yükselmekte olan duman sütunu üzerinde bozucu etki yaratarak türbülans oluşumuna sebebiyet vermektedirler. Aksi durumda ise, jet fanlar yangın kaynağına çok uzak konumlandırıldığı veya gereğinden daha düşük debilerde çalıştırıldığında yeterli emme yapamamakta ve bu durum dumanının dışarıya taşınamayıp tünele yayılması gibi bir takım istenmeyen durumlara yol açmaktadır.

İlk denemelerde fan sayısını artırmanın duman tahliyesini kolaylaştıracağı şeklinde bir genel kanı olmasına rağmen yukarıda, bahsi geçen etkiler sonucu fazla sayıda fan kullanımından ziyade optimum tahliye hızlarında ve konumlarında fanların kullanılmasının yangın güvenliğini sağlamada daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu denemelerde, her bir fan grubunun ardında kalan alanları temizlediği gözlemlenmiştir. Bu durumda tüm fanlar tüneller girişi ile yangın kaynağı arasında kalan bölgeye yerleştirildiğinde, dumanın geri akışını önleme ve buldukları bölgeyi temizleme konusunda yeterli performans sağlanır fakat tüneller çıkış tarafında kalan bölgedeki etkinlikleri oldukça yetersiz kalır. Bu durum, özellikle tüneller giriş kısmının herhangi bir nedenle kazazedelerin kaçışına imkân vermeyecek halde olduğu yangınlarda insan sağlığı için oldukça tehlikeli hatta ölümcül sonuçlara sebebiyet verebilir bu sebeple yangın tahliye sistemleri düşünülürken belirli alanların temizlenip kalan kısımların göz ardı edilmesi kabul edilemez, tüm tüneller boyunca havalandırma sağlanması esastır. Bu amaçla, referans makaledeki fark edilen eksiklikler göz önüne alınarak yeni senaryolar geliştirilmiş ve optimum havalandırma çözümleri elde edilmiştir.

4.2. Tez Kapsamında Geliştirilen Havalandırma Senaryolarının Sayısal Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Referans çalışmada, özellikle 50 MW gibi büyük ısı salım hızına sahip bir yangını önleme de mevcut konvansiyonel sistemlerle yapılan havalandırmaların yetersiz olduğuna yer verilmiştir [14]. Buradan yola çıkılarak, yangın çıkan bölgenin sensörler aracılığıyla algılanıp, fanların bu bölgeye yakın optimum konumlara hareketli bir mekanizma ile yerleştirildiği bir mobil sistem geliştirilebileceği fikrinden hareketle -referans çalışmadaki ile aynı fiziksel şartlara sahip bir yangın durumunda- yangın güvenliği sağlamak için gerekli jet fan konumları ve deşarj hızları optimize edilerek en uygun aksenal havalandırma sistemi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu yönüyle incelendiğinde tez kapsamında yapılan çalışmaları, durum çalışması (case study) olarak nitelendirmekte herhangi bir beis yoktur.

Literatürde her bir araç için maksimum ısı salım hızı verilerine ulaşılabilir ve bu değerlerin bir yangın güvenliği otomasyon sistemine tanıtılması mümkündür. Bir araç tanıma sistemiyle aracın cinsi tespit edildikten sonra yangın durumunda bu aracın maksimum ısı salımı, tünelin geometrisi, çevre şartları gibi parametrelere ait bilgileri içeren ve sistemde daha önceden tanımlanmış kodlara bağlı oluşturulmuş algoritmalarla havalandırma sisteminin devreye girdiği bir otomasyon geliştirilebileceği öngörülmüştür. Önceki bölümlerde incelenen büyük çaptaki tünel yangınlarında yangın güvenliğini sağlamada daha etkin olan eksene dik havalandırma sistemleri, şaft veya nozul içeren aksenal havalandırma sistemleri gibi yöntemlerin hali hazırdaki sistemlere uygulanabilirliği olmadığı için bu gibi durumlarda kolay entegrasyonundan dolayı jet fan kullanılarak aksenal havalandırma sağlanan sistemlerin önerildiği görülmektedir. Fakat literatürdeki çalışmalar, referans çalışma ve bu tez kapsamında yapılan analizler bu denli büyük yangınlar söz konusu olduğunda; konvansiyonel aksenal havalandırma sistemlerinin yetersiz olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ancak konvansiyonel sistemlere entegre edilen ve büyük çaplı yangın durumlarında devreye girebilecek bir mobil sistem tasarımı ile en uygun duman tahliyesi ve yangın güvenliği sağlanabilir. Bununla birlikte daha önce de belirtildiği gibi bu bir durum çalışması olduğundan söz konusu hareketli mekanizmanın tasarımı ile ilgili detaylar bu tez kapsamında konu edilmeyecektir.

Bu bölümde yapılan çalışmalarda, öncelikle 50 MW'lık yangın oluşması durumunda yangın güvenliği çözümleri üretilmiştir, ardından 10 MW'lık yangın için eksenel havalandırma sistemi çözüm önerileri sunulmuştur. İlk olarak 50 MW'lık yangın için geliştirilen model üzerinden analizlerin yürütülmesinin 2 nedeni vardır: 1) Öncelikle, 50 MW'lık yangında Çizelge 3.4 'ten hatırlanacağı üzere daha az ağ elemanı kullanılmıştır bu da daha kısa çözüm süresi yani aynı sürede daha fazla test yapma imkanı demektir. İkinci sebebi ise 50 MW'lık yangın kontrolü çok daha zor olduğundan bu durum için çözüme götüren teknikler daha fazla test yapılarak iyi şekilde kavrandığı takdirde, 10 MW'lık yangında çözüme ulaşmak daha kolay olacaktır

Bahsi geçen optimum çözümlere ulaşmada katkı sağlayan deneme senaryoları Çizelge 4.2' de 50 MW'lık yangın oluşması durumu için ve Çizelge 4.4' te 10 MW'lık yangın oluşması durumu için belirtildiği gibidir.

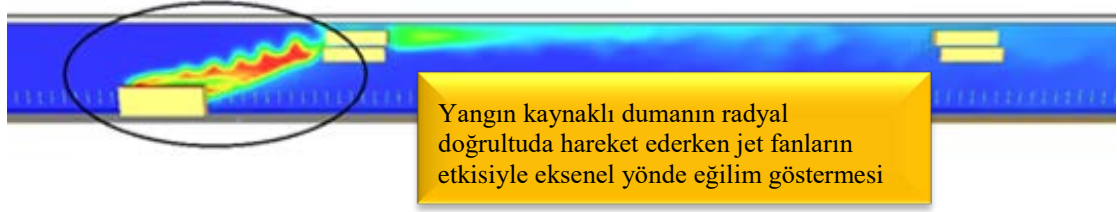
Çizelge 4.2 50 MW ISH'na sahip yangın oluşması durumu için geliştirilen havalandırma sistemi senaryoları

Senaryo	1. Fan Grubu		2. Fan Grubu		3. Fan Grubu		4. Fan Grubu	
	Konum (m)	Debi (m ³ /s)	Konum (m)	Debi (m ³ /s)	Konum (m)	Debi (m ³ /s)	Konum (m)	Debi (m ³ /s)
A	197	75	247	46,875	-	-	-	-
B	197	75	237	75	277	75	-	-
C	197	30	-	-	-	-	-	-
D	197	30	217	46,875	-	-	-	-
E	197	30	217	46,875	247	55	-	-
F	197	30	217	30	247	30	277	30
G	197	30	217	46,875	247	65	277	75
H	157	8,56	197	50	227	75	267	75

Çizelge 4.2 50 MW ISH'na sahip yangın oluşması durumu için geliştirilen havalandırma sistemi senaryoları (devamı)

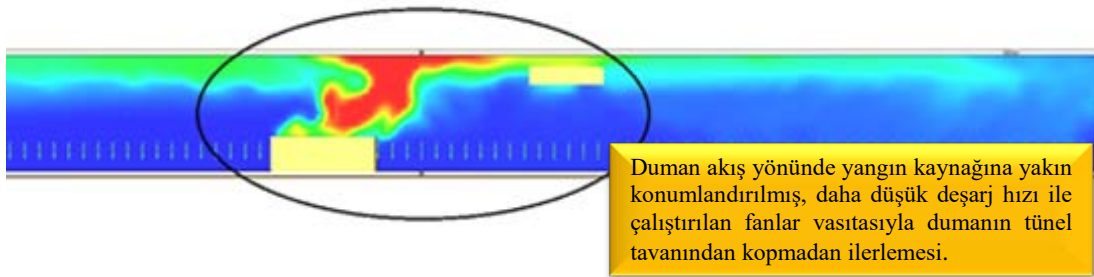
I	157	8,56	197	50	227	75	267	85
J	157	8,56	197	50	227	75	267	100
K	197	30	217	46,875	247	60	277	70
L	197	30	217	40	247	50	277	60
M	197	30	217	40	247	40	277	40
N	197	30	217	40	247	45	277	45
O	197	30	217	40	247	45	277	50
P	197	30	217	40	247	45	277	55

Referans çalışmadan fanların tünel çıkış tarafında konumlandırılarak çok daha etkin bir havalandırma yapılabileceği çıkarımı yapılmıştı. Buna istinaden, öncelikle Senaryo A'da iki adet fan grubu Çizelge 4.2 'de belirtilen konumlarda ve debilerde çalıştırıldığında, özellikle 1. fan grubunun yüksek boşaltma debisi dumanın çok hızlı taşınmasını sağlamıştır. Bu sayede duman geriye akış hareketi kolayca ve hızlı şekilde önlenmiştir. Ancak yangın kaynağından çıkan ve ısınan gazların yükseleceği gerçeğine uygun olarak kaldırma kuvvetinin etkisi altındaki dumanın eksene dik olarak yükselmesi gerekirken; aksel olarak yüksek deşarj debisi ile çalıştırılan jet fanların etkisi altında kısmen aksel bir yönelim gösterir. Dumanın tünel tavanından koparak bu şekilde bir eğilim göstermesi yangın kaynağına yakın bölgelerde özellikle zeminden 2 m yüksekliğe kadar olan insan sağlığı için önem arz eden mesafelerde daha sıcak bir ortam oluşmasına sebebiyet vermiş ve ayrıca 1. fan grubundan hızlıca aktarılan duman 2. fan grubuna ulaşmadan dağılmıştır.



Şekil 4.9 Yangın kaynaklı dumanın aksel yönde eğilim göstermesi.

Saptanan bu iki olumsuz duruma jet fan hızının ve konumunun etkisini daha net görebilmek amacıyla oluşturulan Senaryo B’de 3 adet jet fan grubu $75 \text{ m}^3/\text{s}$ debide çalıştırılmış ve dumanın aksel hareketinin arttığı, 2. fan grubunun ise 1. fan grubuna daha yakın konumlandırıldığı daha az türbülans olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen bu senaryo da beklenen sonuçları vermiştir. Bunun üzerine jet fan hız ve konum parametreleri ayrı ayrı ele alınarak çözüm aranmış ve son olarak bulunan çözüm önerileri kombine edilerek optimum çözüme ulaşılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak Senaryo C simüle edilerek yalnızca 1. fan grubunu düşük hızlarda çalıştırılarak hızın etkisine bakıldığında önceki senaryolara göre dumanın daha eksene dik bir yönelim gösterdiği görülmektedir. Fakat tünelin kalan kısmında elbette ki tek fan grubu kullanımı yetersiz olduğu için duman yayılımı söz konusudur. Burada dumanın mümkün olduğunca eksene dik yükselmesini istediğimizden, ilgilendiğimiz kısım yangın kaynağı ve 1. fan grubu arasındaki bölgedeki duman hareketidir. Buna istinaden simülasyon sonucu jet fan hızını düşürerek dumanın radyal yönelim göstermesine katkı sağlanabileceği görülmüştür.



Şekil 4.10 Dumanın tünel tavanından kopmadan ilerlemesi

İkinci olarak 1. fan grubu Senaryo C (Bkz: Ek 3.i) ile aynı konum ve debide çalıştırılıp 2. fan grubu yangın kaynağına önceki konumlardan daha yakın tutularak Senaryo D oluşturulmuştur. Ek 3ii’deki sıcaklık dağılımından da anlaşılacağı üzere tahmin edildiği gibi 2 jet fan kullanımı bu denli büyük bir yangının tahliyesi için yetersiz olduğundan üçüncü bir fan grubuna ihtiyaç vardır.

Bu amaçla; Senaryo E geliştirilmiştir (Bkz: Ek 3.iii). Bu senaryo için kademeli olarak artan fan deşarj hızları tanımlanarak simülasyonlar yürütülmüş ve simülasyon çıktıları analiz edildiğinde tünel çıkışına yakın insan boyu mesafelerinde yüksek sıcaklıklar ve yoğun türbülanslar gözlemlenmiştir. Bu sebeple; mevcut fan grupları ile jet fanların deşarj hızlarını tünel çıkışına doğru kademeli olarak artırma yönteminin tek başına yetersiz olduğu kanısına varılmıştır.

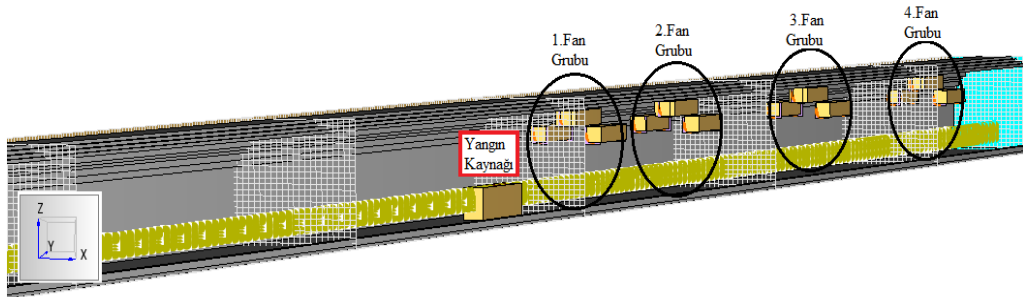
Bu noktada tamamen farklı bir bakış açısıyla, Senaryo H, I, J tasarlanmış bu senaryolara göre modelde, yangın kaynağının tünel giriş tarafında kritik hız değerinde çalıştırılan 1 adet fan grubu, tünel çıkış tarafında ise çeşitli hızlarda 3 adet jet fan grubu kullanılmıştır. Bu modellerde tünel giriş kısmına konuşlandırılan bir grup fan kritik havalandırma hızında çalışacak ve sadece dumanın geri akışını önleyecek, çıkış kısmındaki yüksek hızlı fanlar ise duman tahliyesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak simülasyonlar sonucu, geri akış insan sağlığını tehdit edecek kritik tünel yükseklikli olan 2 m'nin çok üstünde olduğu için giriş tarafındaki fan grubunun hiçbir olumlu etki yapmadığı gözlemlenmiştir (Bkz: Ek 3.iv, Ek 3.v).

Senaryo E' nin simülasyonundan elde edilen, mevcut fanların yangının olumsuz etkilerinin en aza indirgenmesinde yetersiz olduğu çıkarımına dönüldüğünde; tünel çıkışındaki bu kararsız türbülanslı durumun, bir fan grubu daha eklenerek giderilebileceği düşünülebilir. Zaten yangının 50 MW ISH'a sahip olduğu ve bu yangın şiddetinin tanker yangınları gibi büyük çaplı yangınlar kategorisinde olduğu düşünülürse mevcut fan gruplarının yetersiz olması gayet olağandır [43].

Fanların yalnızca yangın kaynağı ve tünel çıkışı arasında yer alan bölgeye konumlandırılması ve dört grup fan kullanılmasına karar verilmiştir. Bu dört grup fan için belirlenen optimum konumlardaki deşarj debilerinin iyi bir şekilde analiz edilmesi gerektiğinden dolayı simülasyon denemelerinin çoğu bu aşamada yapılmıştır. Bu aşamaya kadar yapılan analizler, nasıl bir yol izlenmesi gerektiği konusunda rehberlik etse de 4. fan grubu devreye girdikten sonra belirlenen fanların yeni konumları itibariyle gerekli fan deşarj debilerinde de değişime sebep olmuştur. Yangın kaynağından tünel çıkışına kadar adım adım gidilerek gerekli fan debilerinin belirlemek amacıyla yol gösterici nitelikte Senaryo F modellenmiştir. Buna göre tüm fanlar $30 \text{ m}^3/\text{s}$ deşarj debisinde tanımlanmıştır. Beklendiği üzere ilk fan grubu için

ideal olan 30 m³/s debisi diğer fanlar için yetersiz kalmıştır (Bkz: Ek 3.vi). Bunun üzerine 2. fan grubunu dolayısıyla tünel girişinden 217. metreye kadar olan alanı insan sağlığı ve çevre güvenliği için uygun şartlara taşımak amacıyla sırasıyla Senaryo G ve K yürütülmüş (Bkz: Ek 3.vii) ve 2. fan grubunun deşarj hızının düşürülmesi gerektiğine karar verilerek Senaryo L ve M (Bkz: Ek 3.viii) ile 2. Fan deşarj debisinin 40 m³/s olması kararlaştırılmıştır. Senaryo N ve O (Bkz: Ek 3.ix) 'de 3. fan grubu 45 m³/s deşarj debisi ile çalıştırıldığında tünel girişinden itibaren 247. metreye kadar olan alanın yangın güvenliğini sağlama açısından tatmin edici sonuçlar vermiştir. Son olarak Senaryo P' de 4. fan grubu debisi 55 m³/s olarak belirlenmiş ve böylelikle fan deşarj debilerinin tümü saptanmıştır. Elbette ki sistem oldukça dinamik bir yapıda olduğu için fan hızları belirlenirken, eklenen her bir fan sistemde köklü değişikliklere yol açmaktadır. Bu sebeptendir ki, optimum değerleri bulurken, senaryolarda bahsi geçen fana debi ayarı yapılırken Çizelge 4.2 'de görüleceği üzere dört fan grubu da sistemde mevcut olmakla birlikte diğer fan gruplarına ait debiler de önceki senaryolarda elde edilen bakış açısı ile tanımlanmış böylece yalnızca tek fan grubunun değil, tüm fanların etkileşim içinde olduğu kombine sistem değerlendirilmiştir. Simülasyon hesaplama sürelerinin oldukça uzun olduğu göz önüne alınırsa yalnızca fan debisi optimizasyonu için yürütülmüş olan 27 adet deneme ile tez çalışmasının en vakit alan aşamasını teşkil ettiği söylenebilir.

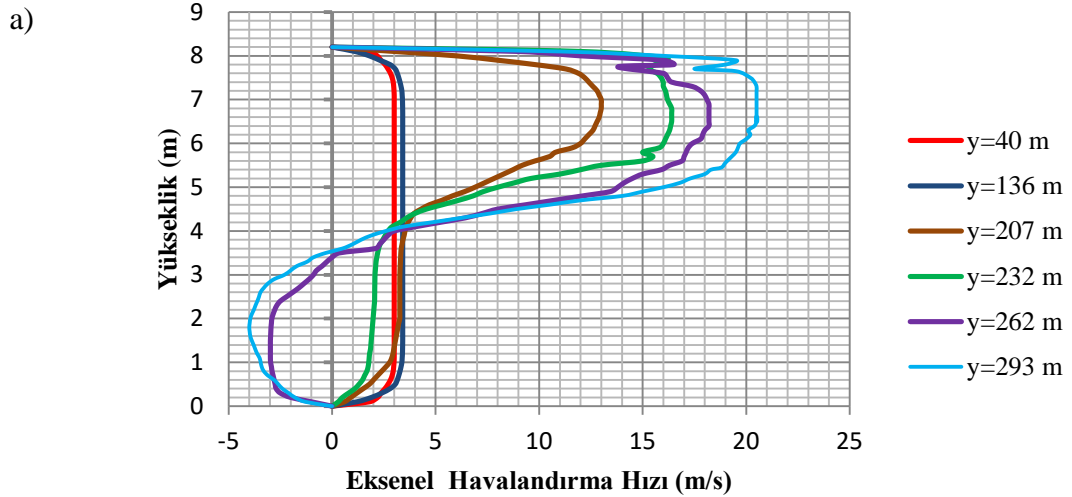
Şekil 4.11 'de belirtilen model tünel kullanılarak oluşturulan Senaryo P'nin analizinden elde edilen ve Şekil 4.12 ve 4.13'te yer alan hız profilleri ve sıcaklık dağılımları incelendiğinde yangın güvenliği için optimum çözüm yakalandığını söylemek mümkündür.



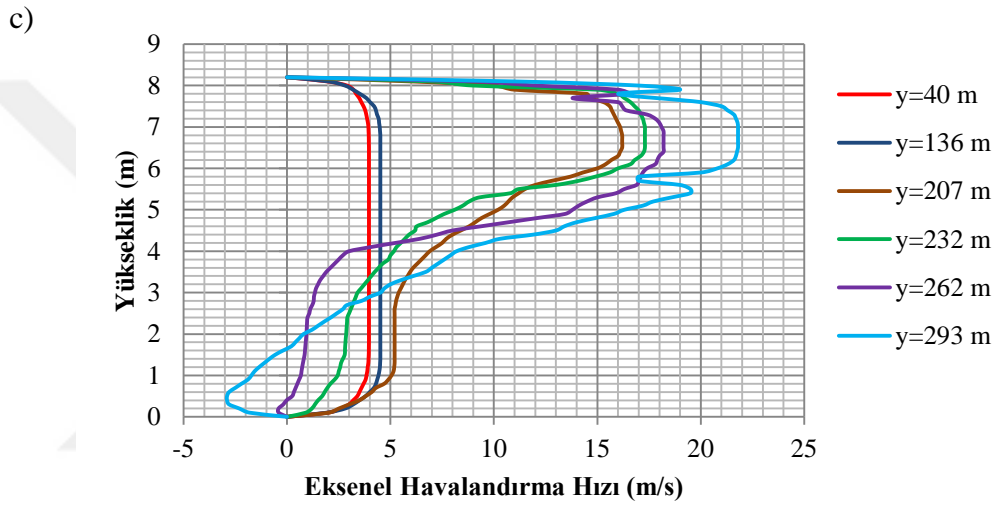
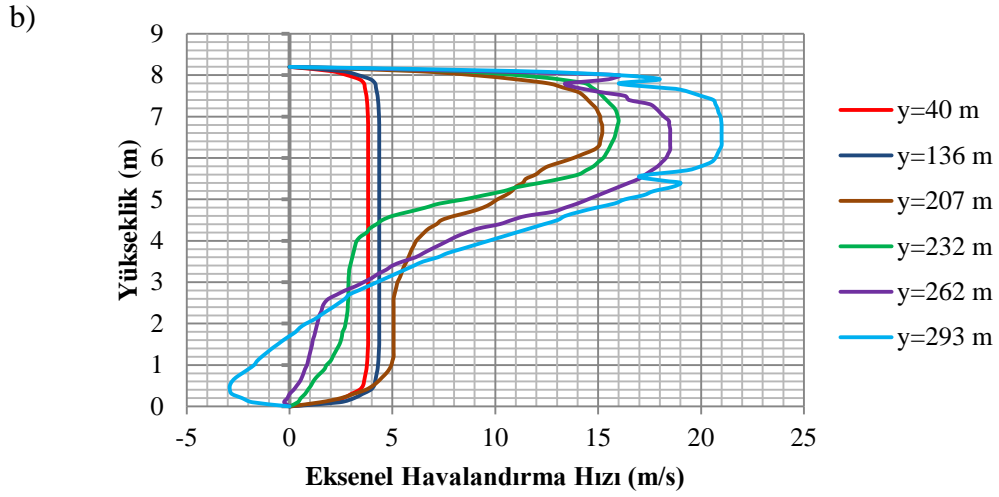
Şekil 4.11 Senaryo P'de kullanılan model tünel (Şekilde yer alan kesit, tünelin yangın kaynağına yakın bölgesinden tünel çıkışına kadarki alanı kapsar)

Şekil 4.12 'de tünel girişinden itibaren referans çalışma göz önünde tutularak 40. ve 136. metre mesafelerde düşey kesit alınıp bu kesitlerde yüksekliğe bağlı olarak hız profilleri incelenmiştir. Ardından jet fanların konumları düşünülerek fanlar arasında yer alan bölgeler incelenmek amacıyla fan gruplarının tam ortasında yer alan konumlara düşey kesit atılarak bu kesitlerdeki ($y=207$ m, $y=232$ m, $y=262$ m, $y=293$ m 'de yer alan düşey kesitlerdeki) hız profilleri incelenmiştir.

Şekil 4.12.a' da tünel çıkışına yakın bölgelerde ($y=262$ m, $y=293$ m 'de) yaklaşık 3.5 m ve altında yer alan tünel içi yüksekliklerde geri hava akışı gözlemlenmiştir. Bu durum, bu simülasyon süresinde yangın kaynağına yakın bölgelerde fanların yeterli havalandırma ve duman tahliyesi sağladığı ancak tünel çıkışına yakın havalandırmanın henüz yeterli olmadığını göstermektedir. Eksenel havalandırma sisteminin devreye girmesinin ardından çok kısa bir süre geçtiği düşünülürse bu gayet olağandır bununla birlikte tünel çıkışına yakın 3.5 m ve altındaki bölgelerde görülen dış ortam havasının tünele girişinden kaynaklı olduğu öngörülen geri hava akışı maksimum 4 m/s hızına ulaşmıştır. Bu tür bir geri akış istenmemekle birlikte bu hız değeri insanların kaçabilmesine imkân veren limit hava hızı değeri olan 11 m/s' den oldukça düşük bir değer olduğu için insan sağlığı için kabul edilebilir bir olumsuz etki yaratmaktadır [14].



Şekil 4.12 Senaryo P'de, tünelin simetri ekseninde ($x=0$ 'da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerinde yüksekliğe bağlı elde edilen hız profilleri (Havalandırma sistemi devreye girdikten a) 15 s, b)30 s, c)180 s sonra)



Şekil 4.12 Senaryo P’de, tünelin simetri ekseninde ($x=0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerinde yüksekliğe bağlı elde edilen hız profilleri (Havalandırma sistemi devreye girdikten: a) 15 s, b)30 s, c)180 s sonra) (devamı)

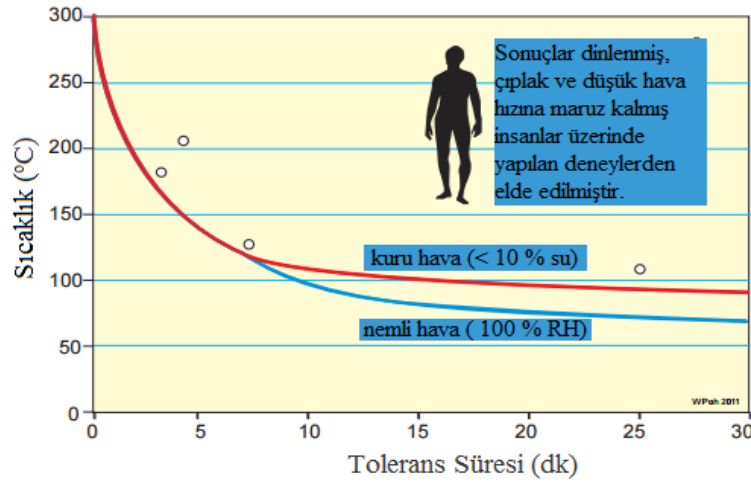
3,5 metre yükseklikten itibaren ise fanların etkisi ile eksenel hızda ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Modelde tünel çıkışına doğru jet fanların deşarj debileri artırıldığı için doğal olarak hız profillerinde de bu artış gözlemlenmiş ve tünel çıkışına doğru alınan kesitlerde hızlar giderek artmıştır.

Fanlar devreye girdikten 30 saniye sonra tünel çıkışına yakın gözlenen geri hava akışı ortadan kalkmış ve fanların yeterli havalandırmayı sağlayarak tünel boyunca yangın güvenliğini oluşturduğu görülmüştür.

Fanlar devreye girdikten 180 saniye sonra da 30 saniye sonrasında hemen hemen aynı hız profilleri elde edilmiştir. Bunun nedeni, Bölüm 3.4.3’ te de bahsedildiği üzere simülasyon boyunca ısı salım hızının maksimuma ulaştıktan sonra sürekli olarak o

değerde olduğu varsayımı ile analizlerin yürütülmesidir. Bu sebeple ısı salım hızındaki ufak farklılıklara bağlı olarak hızlarda küçük değişimler görülmekle birlikte Şekil 4.12.b ve Şekil 4.12.c'deki hız profilleri oldukça benzer davranış göstermektedir. Ayrıca analizlerin ısı salım hızının maksimum değerinde sabit tutularak yapıldığı düşünülürse 30. saniyeden sonra alınacak herhangi bir zaman dilimi için yine Şekil 4.12.b ve Şekil 4.12.c'ye oldukça benzer hız profili elde edileceğini söylemek yanlış olmaz. Ek 4 incelendiğinde de, Şekil 4.12.b ve 4.12.c'deki hız profillerindeki benzerliği sıcaklık dağılımlarından da gözlemlemek mümkündür.

Şekil 4.14' te ise Senaryo P'nin simülasyonunda elde edilen sıcaklık dağılımları yer almaktadır. Tıpkı hız profillerinde olduğu gibi sıcaklık dağılım haritasından da havalandırma sistemi devreye girdikten 15 saniye sonra henüz yeterli bir havalandırma olmadığı ve 30. saniyeden itibaren ise geliştirilen havalandırma sisteminin bu durum için yeterli optimum çözüm sağladığı görülmektedir. Bu yargıya varırken özellikle dikkat edilen iki kısıtlama vardır. Birincisi, maksimum insan boyu düşünüldüğünde, simülasyon sonuçlarına göre zeminden 2 metre yükseklikteki hava sıcaklığının insan sağlığı için bir tehdit oluşturmamasıdır.



Şekil 4.13 Taşınım yoluyla transfer edilen ısıya insan tolerans limitleri [47]

Bu yükseklik için maksimum sıcaklık değeri 113 °C olarak modele yerleştirilen termo elemanlar aracılığıyla, tünel girişinden itibaren 274. m' de havalandırma sistemi devreye girdikten 180 saniye sonra ölçülmüştür. Tünel girişinden itibaren 258. metre civarında havalandırma sistemi devreye girdikten 15 saniye sonra 108 °C

olarak tespit edilmiş olan hava sıcaklığı ise bu yükseklikteki ikinci en yüksek sıcaklıktır. Bu sıcaklıklar, Şekil 4.13'te belirtilen limit sıcaklık değerlerinin oldukça altındadırlar. Bununla birlikte Şekil 4.14' teki tüm tünel boyunca (tünelin simetri eksenindeki) sıcaklık dağılımlarından da 2 m ve altındaki yüksekliklerde insan sağlığını tehdit edecek sıcaklık değerlerine ulaşılmadığı açıkça görülmektedir.

Geliştirilen havalandırma sistemi ile, sıcaklık konusunda en önemli kısıtlamalardan ilki olan insan sağlığı için güvenli bir ortam temin etme şartı sağlanmıştır. İkinci önemli konu ise tavana yaklaştıkça daha da artan yüksek sıcaklık değerlerine jet fanların dayanımı ile ilgilidir. Buna istinaden jet fan katalogları incelenmiş ve birçok firma tarafından F200 - F300 - F400 - F600 sıcaklık sınıflarına ait 120 dakikaya kadar dayanıma sahip seçenekler ile “N 12101 - 3 Standardı” na uygun olarak jet fan üretimi yapıldığı tespit edilmiştir [48-50]. Bu sınıflandırmada örneğin F300; 300°C sıcaklığa dayanımlı fanları temsil etmektedir, maksimum dayanım süresi kataloglarda ayrıca belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, özel kaplama malzemeleri ve yöntemleri kullanılarak kullanılarak Çizelge 4.3'te yer alan 842 °C' lik sıcaklık dayanımına da diğerlerine göre daha az dayanım süreleriyle ulaşabilen jet fanlar mevcuttur, bu sıcaklığa dayanım süresi, uygulanan yöntemlere göre farklılık gösterdiği için çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 N 12101 - 3 Standardına göre fan sıcaklık sınıfları ve dayanabilecekleri maksimum duman sıcaklıkları

Kategori	F200	F300	F400	F600	F842
Sıcaklık (°C)	200	300	400	600	842
Fonksiyonel dayanım(en az)(dk)	120	60	120	60	-

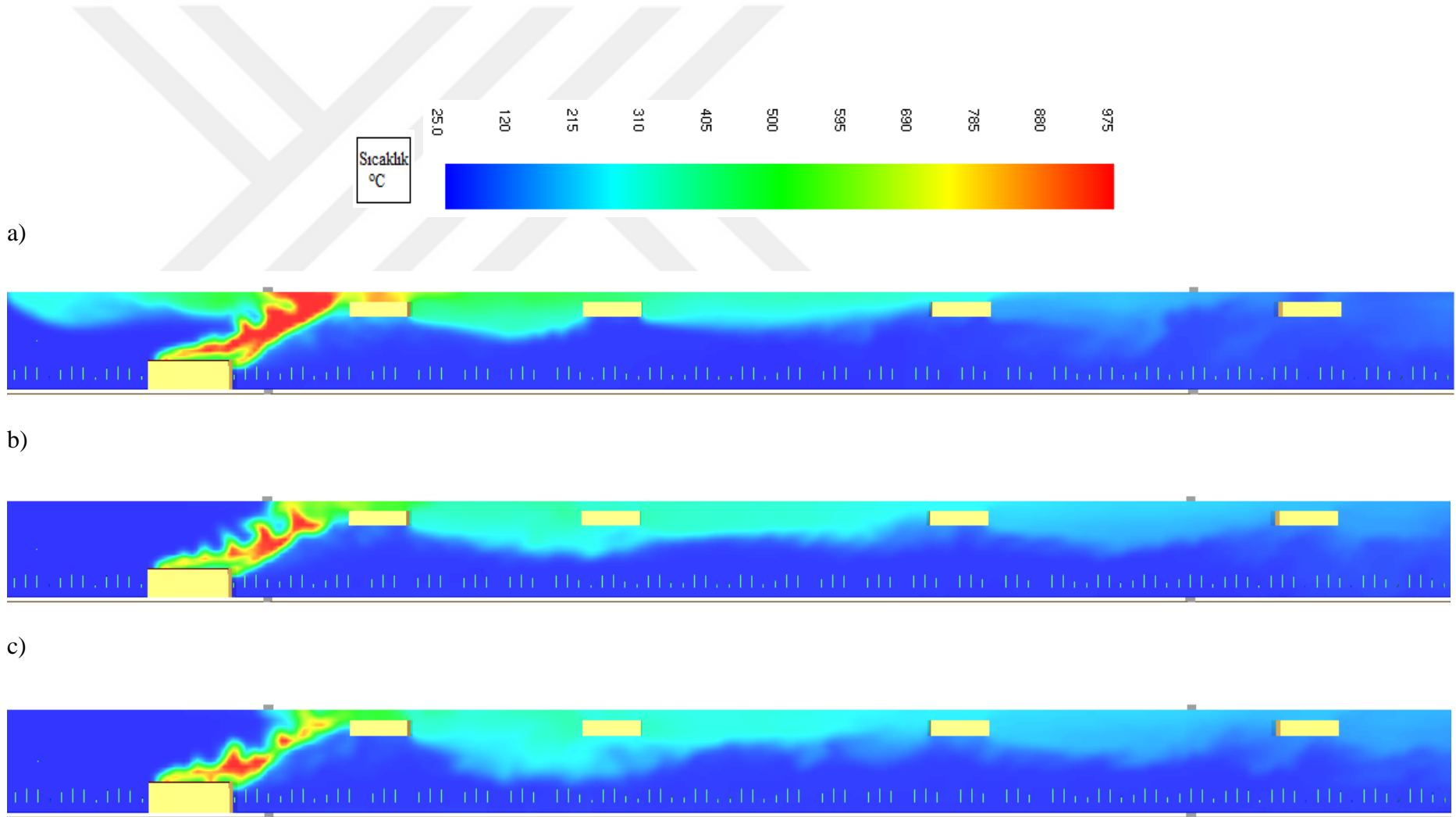
Şekil 4.14'teki sıcaklık dağılımlarından havalandırma sisteminin devreye girdiği ilk anlarda 1.jet fan grubunun yüksek sıcaklığa maruz kaldığı görülmektedir. Yalnızca bu fan grubu için özel kaplama yöntemleri ile üretilen sıcaklık dayanımı yüksek fan kullanılması gerekmektedir birlikte diğerlerinde F400 tipi fan kullanım yeterli olacaktır [51].

Yüksek sıcaklığa dayanıklı fan kullanma zorunluluğu maliyet açısından olumsuz bir etken gibi gözükmektedir. Ancak, 50 MW ısı salımı hızının tanker yangınları kategorisinde olduğu düşünülürse, literatürde bu tür büyük yangınlar için sunulan çözüm yöntemlerinin genellikle duman tahliyesi için ekstra alanlara ihtiyaç duyulan

tamamen farklı sistemler olduğu ve mevcut konvansiyonel sistemlere uygulanabilirliklerinin mümkün olmadığı hatırlanmalıdır. Bu açıdan değerlendirildiğinde sadece yangın kaynağına en yakın konumdaki, en yüksek ısıya maruz kalan fan grubunun yüksek ısı dayanımlı olarak üretimi nispeten daha az maliyetli olacaktır.

Tüm bu sınırlamalar da göz önünde bulundurulduğunda, bu tip bir tünelde 50 MW yangın durumu için, Senaryo P 'de belirtilen konumlarda ve deşarj debilerindeki jet fan grupları kullanılarak, can ve sistem güvenliği, maliyet, mevcut sistemlere entegrasyonu gibi birçok faktör açısından optimum çözüme ulaşmak mümkündür.





Şekil 4.14 Senaryo P’de, tünelin simetri ekseninde ($x= 0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerindeki sıcaklık dağılımları (Havalandırma sistemi devreye girdikten: a) 15 s, b)30 s, c)180 s sonra)

10 MW ısı salım hızına sahip yangın kaynağı kullanılarak yürütülen analizlerde ise; Çizelge 4.4'te yer alan senaryolar geliştirilerek daha etkin bir çözüm sunulmaya çalışılmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere, 50 MW yangın kaynağı ile yapılan denemelerde elde edilen tecrübeler ışığında yürütülen analizlerle daha az deneme yapılarak çözüme gidilmesi sağlanmıştır.

Bu senaryolarda, ISH' na bağlı hesaplanan D^* (Bkz: Bölüm 3.4.1) değeri oldukça küçük olduğundan 50 MW 'lık yangın kaynağı kullanılan duruma göre oldukça fazla sayıdaki (1 946 512 adet) ağ hücresi kullanılmıştır. Bu denli küçük ağ elemanı kullanımından dolayı yazılımın paralel çözüme imkan vermemesi nedeniyle tek ağ yapısı kullanılarak seri çözüm yapılması simülasyon süresini oldukça artırmıştır. Öyle ki bu ağ yapısı ile yürütülen Senaryo T'ye ait 200 saniyelik simülasyonlar 376,55 saatte tamamlanmıştır. Ancak başlangıçta 50 MW' lık yangın durumunda duman tahliye çalışmaları yapmak zaman kontrolü açısından oldukça avantaj sağlamış burada elde edilen tecrübelerle daha az deneme yapılarak çözüme ulaşılmıştır.

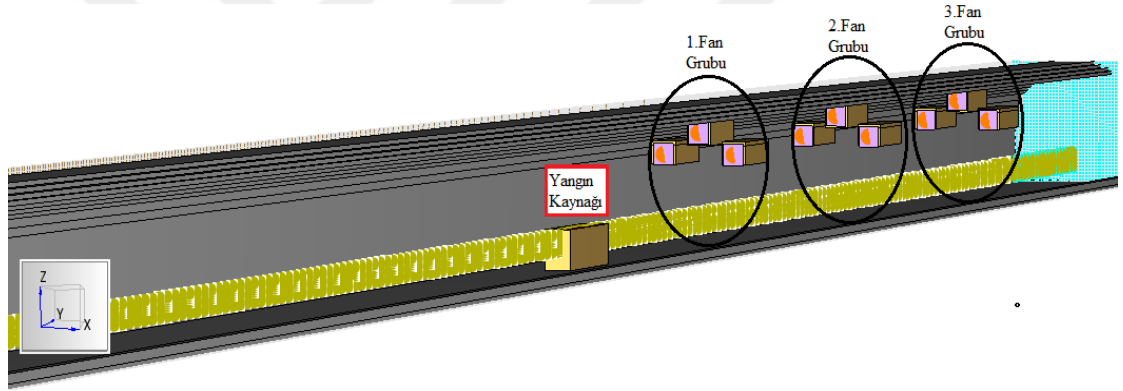
Çizelge 4.4 10 MW' lık yangın oluşması durumu için geliştirilen havalandırma sistemi senaryoları

Senaryo	1. Fan Grubu		2. Fan Grubu		3. Fan Grubu	
	Konum (m)	Debi (m^3/s)	Konum (m)	Debi (m^3/s)	Konum (m)	Debi (m^3/s)
R	77	75	157	46,875	277	86.9
S	207	25	237	45	267	55
T	207	30	237	40	267	55

10 MW' lık yangın oluşması durumunda havalandırma sisteminin konumları ilk olarak referans çalışmadaki gibi alınmış yalnızca fanların deşarj debileri değiştirilmiştir. Yani, referans çalışmada tünel çıkış kısmına yakın bölgelerde çok yetersiz olan duman tahliyesi 3. fan grubunun hızını artırarak giderilebileceği düşüncesiyle Senaryo R oluşturulmuştur. Bu senaryoda söz konusu fan grubunun deşarj debisi olarak, tahliye edebileceği maksimum havalandırma deşarj kapasitesi olan $86,9 m^3/s$ debisi seçilmiştir [14]. Ancak simülasyon sonucu elde edilen veriler, jet fanlar bu şekilde konumlandırıldığında fan hızlarını artırmanın türbülanslara

sebebiyet vererek mevcut durumu kötüleştirmekten başka bir fayda sağlamadığını gözler önüne sermektedir. Özellikle tünel çıkışında kabul edilemeyecek kadar kötü bir duman hareketi söz konusudur.

Senaryo P'nin simülasyonu ve 10 MW ISH' a sahip yangın olduğu durumda da daha etkin bir havalandırma için fanların yangın kaynağından itibaren tünel çıkışına kadarki bölgede yer alması gerektiğini göstermektedir. Buradan hareketle öncelikle Senaryo S oluşturulmuş, ardından bu senaryoda 1. ve 2. fan grubu deşarj debilerinin birbirine daha yakın olması gerektiğine karar verilmiş ve bu model üzerinden deşarj debileri üzerinde yapılan değişikliklerle Senaryo T geliştirilmiştir. Şekil 4.15'te Senaryo T'de oluşturulmuş model tünel yer almaktadır. Şekilde yer alan kesit tünel girişinden itibaren değil, tünelin yangın kaynağına yakın bölgesinden tünel çıkışına kadarki alanı kapsamaktadır.



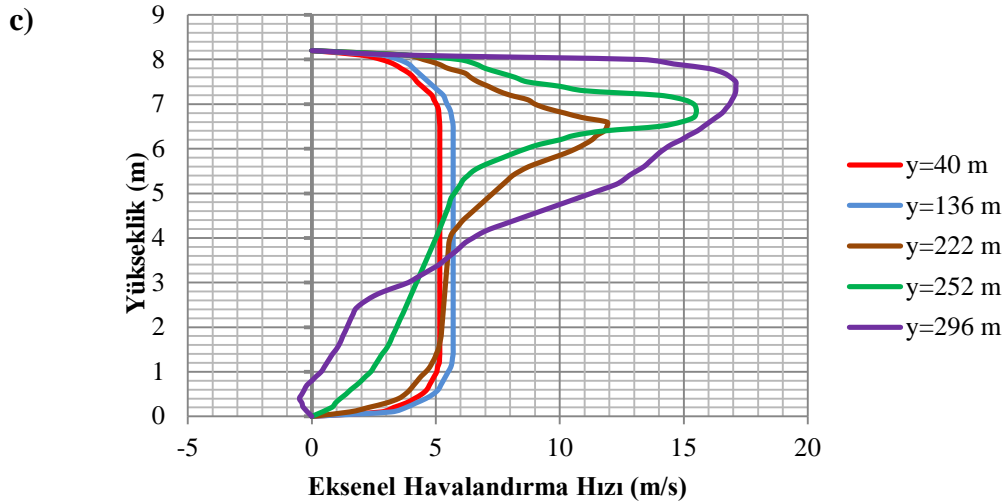
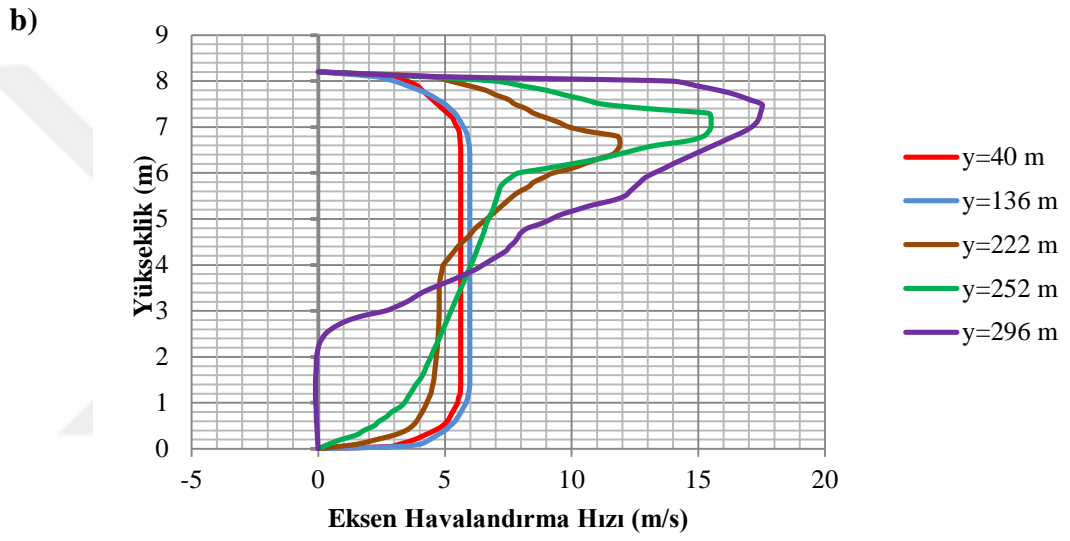
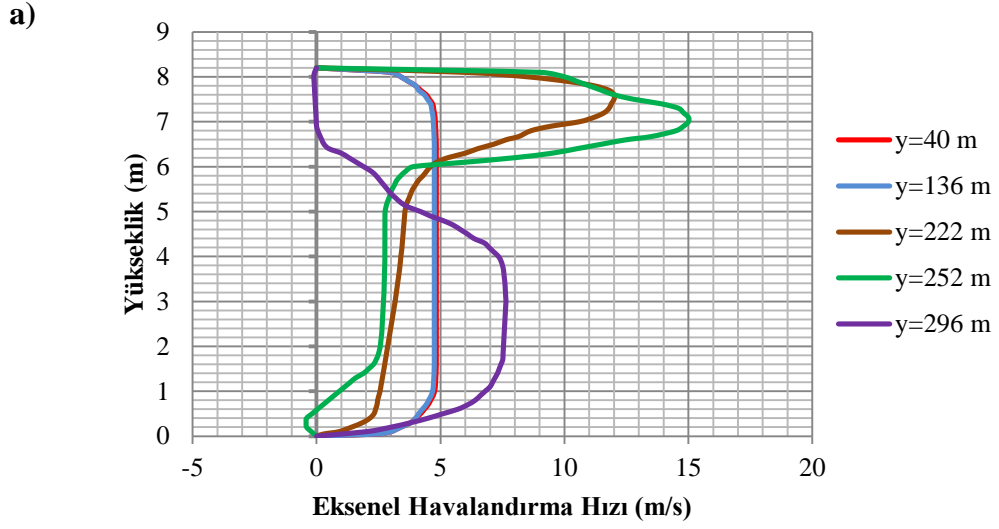
Şekil 4.15 Senaryo T'de kullanılan model tünel

Senaryo T' de de önceki senaryolarda olduğu gibi havalandırma sistemi duman, yangın kaynağına en yakın fan grubunda yer alan duman detektörünce algılandığı andan itibaren devreye girmiştir. Şekil 4.16 ve 4.17 'de yer alan hız profilleri ve sıcaklık dağılımları havalandırma sistemi devreye girdikten 15, 30 ve 180 s sonrasında aittir. İlgili şekillerden tünel girişinden itibaren havalandırma sisteminin etkisiyle 40. ve 136. metre mesafeye kadarki alana dumanın erişiminin engellendiği, böylece tünel girişi ve yangın kaynağı arasındaki bölgenin oldukça güvenli olduğu görülmektedir. Ayrıca yangın kaynağı ve tünel çıkışı arasında yer alan bölgede ise havalandırma sistemi devreye girdikten 15 saniye sonra duman tahliyesinin oldukça hızlı şekilde gerçekleştirildiği, 30. saniyeden itibaren ise tünelin insan sağlığını tehlikeye sokacak yangın etkilerinden tamamen arındırıldığı gözlemlenmektedir.

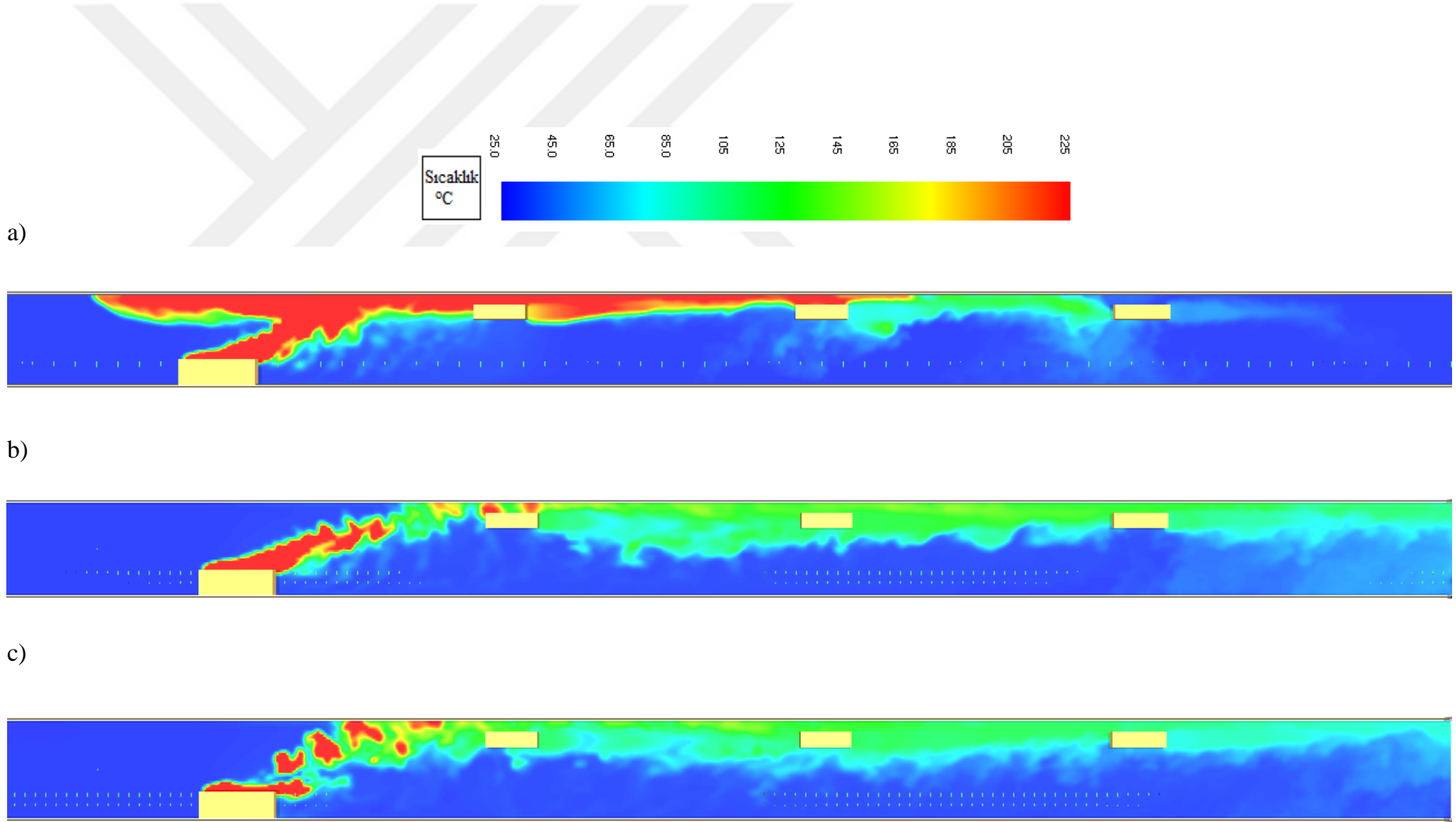
Sözü edilen etkilerin Ek 5'te yer alan tünelin simetri eksenindeki hız dağılımlarından da incelenmesi mümkündür.

Daha önce bahsedilen insan sağlığı için tehlike sınırları göz önünde bulundurulduğunda 10 MW ısı salımı hızına sahip yangın oluşması durumunda Senaryo T'de tavsiye edilen havalandırma sistemi konum ve deşarj debileri optimum çözüm sunmaktadır.





Şekil 4.16 Senaryo T’de, tünelin simetri ekseninde ($x=0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerindeki hız profilleri: Havalandırma sistemi devreye girdikten, a) 15 s, b)30 s c)180 s sonra



Şekil 4.17 Senaryo T’de, tünelin simetri ekseninde ($x=0$ ‘da) tünel boyunca çeşitli kesitlerde ve simülasyon sürelerindeki sıcaklık dağılımları (Havalandırma sistemi devreye girdikten: a) 15 s, b)30 s c)180 s sonra)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kara yolu tünellerinin büyük boyutlara sahip olmaları, atmosfer havasına açılan giriş çıkışları ile herhangi bir yangın oluşması durumunda pek çok dinamik parametrenin etkisinde olmaları gibi etkenler yangın güvenliğini sağlama amacıyla yapılan deneysel veya teorik çalışmaların yürütülmesini zorlaştırmaktadır. Tüm bu kısıtlara rağmen gelişen teknoloji ile birlikte tünellerde yangın güvenliğini sağlama hususunda etkin çözüm önerileri mevcuttur. Ancak bunların çoğu, duman tahliyesi için ekstra alanlara ihtiyaç duyulan, konstrüksiyon açısından mevcut sistemlerden tamamen farklı sistemlerdir.

Bununla birlikte dünya genelinde oldukça yaygın olarak kullanılan konvansiyonel havalandırma sistemlerinin de özellikle tünel içerisinde tanker, kamyon yangınları gibi yüksek ısı akısına sahip yangın oluşması durumunda yetersiz kaldıkları açıktır.

Kara yolu tünellerinde yangın güvenliğinin, yukarıda bahsedildiği gibi tünel konstrüksiyonunda köklü değişiklikler gerektiren sistemler yerine, mevcut sistemde yapılabilecek bir iyileştirme ile sağlanabileceği fikrinden hareketle bir mobil aksenal havalandırma sistemi geliştirilebileceği düşünülmüştür.

Bu kapsamda, bir araç tanıma sistemiyle aracın cinsi tespit edildikten sonra, yangın durumunda, bu aracın maksimum ısı salımına, tünelin diğer fiziksel şartlarına vs. ait bilgiler içeren ve daha önceden tanımlanmış olan kodlara bağlı oluşturulmuş algoritmalarla jet fanların konumları ve deşarj debileri belirlenerek havalandırma sisteminin aktif hale getirildiği bir otomasyon geliştirilebileceği öngörülmüştür.

Ardından referans çalışmadaki [14] ile aynı fiziksel şartlara sahip tünelde oluşabilecek bir yangın durumunda, yangının olduğu bölgenin sensörlerle algılandığı ve jet fanların yukarıdaki gibi bir otomasyon sisteminden gelen sinyallerle, o bölgeye hareketli bir mekanizma yardımıyla taşındığı bir mobil sistem kullanılması durumunda optimum havalandırma çözümleri elde edilmeye çalışılmıştır.

Böyle bir sistem tasarımı meşakkatli ve zaman alıcı bir işlem olarak düşünülebilir ancak tünelin özellikle büyük çaplı yangınlara karşı güvenli hale getirilmesi için önerilen ve köklü yapısal değişiklikler gerektiren sistemlere kıyasla, var olan

sisteme entegre edilecek yukarıda bahsedildiği gibi bir mobil sistemin nispeten daha düşük maliyetli olacağı açıktır. Kaldı ki, bu çalışmada amaç hareketli sistem mekanizma tasarımı değil sadece böyle bir sistem kullanılması halinde konvansiyonel sistemlere göre daha etkin bir havalandırma yapılıp yapılamayacağının analizidir. Bu açıdan bakıldığında geliştirilen senaryoların nümerik analizi ve yorumlanmasını kapsayan bu çalışma bir durum çalışması olarak nitelendirilebilir. Böyle bir yangın ile karşılaşılması durumu için yürütülen analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, optimum kabul edilen debi ve konumlarda yangın güvenliğini sağlamada oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Nümerik olarak bir referans çalışma üzerinden yürütülen bu çalışma ilerleyen dönemlerde model tünel kullanılarak deneysel olarak incelenmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ingason H., Li Y.Z., Lönnemark A., Tunnel Fire Dynamic, 2015 edition, Springer, 2014, 338.
- [2] Cheong M K, Spearpoint M J, Fleischmann C M., Design fires for vehicles in road tunnels, *Proc. 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*, Auckland, New Zealand, **2008**, 229.
- [3] Haerter A., Fire Tests in the Ofenegg-Tunnel in 1965, *International Conference on Fires in Tunnels*, Sweden, **1994**.
- [4] Feizlmayr A., Research in Austria on tunnel fire, Paper J2, *2nd Int Symp on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, UK, **1976**, 19.
- [5] Pucher K., Fire Tests in the Zwenberg Tunnel (Austria), Ivarson E (editör) *International Conference on Fires in Tunnels*, Sweden, **1994**, 187.
- [6] Fires in Transport Tunnels, Report on Full-Scale Tests, Germany, 1995.
- [7] Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Test Report, Massachusetts, 1995.
- [8] Haack A., Introduction to the Eureka-EU 499 Firetun Project, *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*, Sweden, **1994**.
- [9] Takekuni K., Disaster Prevention of Road Tunnel and Characteristics of the Evacuation Environment during Fires in Large-scale Tunnels in Japan, *4th Joint Workshop COB/JTA2 Joint Meeting JTA/Cob Open Work Shop 2001*, Netherlands, **2001**, 35.
- [10] Lönnemark A., Ingason H., Large-Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel – Gas Temperature and Radiation., *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, Sweden, **2003**.
- [11] Bettis R.J., Jagger S.F., Lea C.J., Jones I.P., Lennon S., Guilbert P.W., The Use of Physical and Mathematical Modelling to Assess the Hazards of Tunnel Fires, *8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Liverpool, **1994**, 439.
- [12] Thomas P.H., Movement of smoke in horizontal corridors against an air flow, *Institute of Fire Engineers*, UK, **1970**, 45.
- [13] Ingason H., Nireus K., Werling P., Fire Tests in a Blasted Rock Tunnel, *FOA*, Sweden, **1997**.
- [14] Karaaslan S., Hepkaya E., Yucel N., Cfd Simulation of Longitudinal Ventilation Systems In a Scaled Short Tunnel, *Thermal Science and Technology*, **2013**, 33, 63.
- [15] Lee R.S., Ryou H.S., A Numerical Study on Smoke Movement in Longitudinal

Ventilation Tunnel Fires for Different Aspect Ratio, *Building and Environment*, **2006**, 41, 719.

[16] Hu L.H., Huo R., Chow W.K., Studies on Buoyancy -Driven Back -Layering Flow in Tunnel Fires, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **2006**, 32, 1468.

[17] Hu L.H., Huo R., Wang H.B., Li Y.Z., Yang R.X., Experimental Studies on Fire -Induced Buoyant Smoke Temperature Distribution Along Tunnel Ceiling, *Building and Environment*, **2007**, 42, 3905.

[18] Jojo S.M., Chow W.K., Numerical Studies on Performance Evaluation of Tunnel Ventilation Safety Systems, *Tunnelling And Underground Space Technology*, **2003**, 18, 435.

[19] Modic J., Fire Simulation in Road Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **2003**, 18, 525.

[20] Mégret O., Vauquelin O., A model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics, *Fire Safety Journal*, 2000, 34, 393.

[21] Wu Y., Bakar, M.Z.A., Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems —A Study of the Critical Velocity, *Fire Safety Journal*, **2000**, 35, 363.

[22] Vauquelin O., Experimental simulations of fire - induced smoke control in tunnels using an air – helium reduced scale model: Principle, limitations, results and future, *Tunnelling and Underground Space Technology* , **2008**, 23, 171.

[23] Hu L.H., Huo R., Wang H.B., Yang, R.X., Experimental and numerical studies on longitudinal smoke temperature distribution upstream and downstream from the fire in a road tunnel, *Journal of fire sciences*, **2007**.

[24] Hwang C.C., Edwards, J.C., The critical ventilation velocity in tunnel fires —a computer simulation, *Fire Safety Journal*, **2005**, 40 , 213.

[25] Newma J.S., Experimental Evaluation of Fireinduced Stratification, *Combust Flame*, **1984**, 57, 33.

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

[27] Vega M., G., Diaz, K. M. A., Oro, J. M. F., Tajadura R. B., Morros, C. S., Numerical 3D Simulation of a Longitudinal Ventilation System: Memorial Tunnel Case, *Tunnelling and underground Space Technology*, **2008**, 23, 539.

[28] National Institute of Standards and Technology (NIST), <https://pages.nist.gov/fds-smv/>, Aralık 2016.

[29] McGrattan K., Klein B., Hostikka S., Floyd J., Fire Dynamics Simulator User's

Guide, Sixth Edition, NIST Special Publication, USA, 2013.

[30] Smardz P., *Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for Forced and Natural Convection Flows*, Piotr University of Ulster, UK, 2006.

[31] Ayhan H., Kocar C., Sökmen C.N. ,T-Birleşim Bölgelerinde Sıcaklık Salınımlarının Modellenmesi, *X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi*, Ankara, **2009**.

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

[33] Forney G.P., *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide*, Sixth Edition, NIST Special Publication 1017-1, USA, 2016.

[34] Thunderhead Engineering Consultants,
<http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/pyrosim-features/> Aralık 2016.

[35] Thomas P.H., The Movement of Buoyant Fluid against a Stream and the Venting of Underground Fires, *Fire Research Note No. 351.*, 1958.

[36] NFPA 502, *Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, 2016 Edition, 2016.

[37] Oka Y., Atkinson G.T., Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, **1995**, 25, 305.

[38] Lönnermark A., Ingason H., Gas Temperatures in Heavy Goods Vehicle Fires in Tunnels, *Fire Safety Journal*, **2005**, 40, 506.

[39] Ingason H., Lönnermark A., Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnels, *1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels*, Czech Republic, **2004**, 87.

[40] Ingason H., *Fire Testing in Road and Railway Tunnels, Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining*, Vivek B. Apte, Woodhead Publishing, 2006.

[41] Babrauskas, V., *Heat Release Rates*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4rd Edition, National Fire Protection Association, Springer, USA, 2008.

[42] Ingason H., Lönnermark A., *Heat Release Rates in Tunnel Fires: A Summary*, In *The Handbook of Tunnel Fire Safety*, 2nd edition, ICE Publishing, UK, 2012.

[43] DENG J. , MA L., WANG Z. , XING Z. , WANG W., Simulation Study on Critical Velocity of Longitudinal Ventilation Tunnel Fire, *Procedia Engineering*, **2013**, 52, 67.

[44] Valasek L., Glasa J., Simulation of the course of evacuation in tunnel fire conditions by FDS+Evac, *Proceedings of the 2013 International Conference on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering*, Greece, **2013**.

[45] Qiu Y., Lou B., Research on the Semi-transverse Ventilation and Smoke Exhaust Strategy in Sloping Tunnels, *International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS 2015) China*, **2015**.

[46] Kristopher Overholt,
<http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>, Aralık 2016.

[47] Engineers Australia - Society of Fire,
Safety, https://www.engineersaustralia.org.au/sites/default/files/shado/Learned%20Groups/Technical%20Societies/Society%20of%20Fire%20Safety/tenability_criteria_practice_note_2_0.pdf, Aralık 2016.

[48] Aironn İklimlendirme Sistemleri San. ve Taahhüt A.Ş.,
http://en.aironn.com.tr/pdf/aironn_katalog_eng.pdf, Aralık 2016.

[49] Smay Sp. z o.o.,
http://www.smay.pl/uploads/tx_smay/product_files/Smay_SCF__v531__EN.pdf, Aralık 2016.

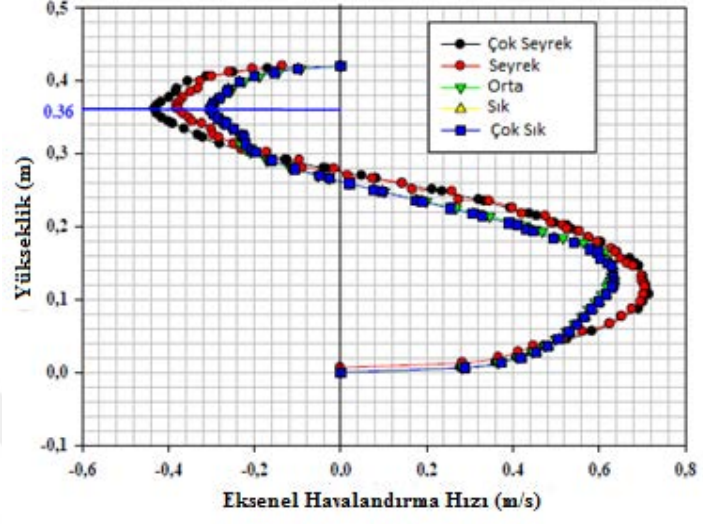
[50] WOLTER VENTILATION CO., LTD.,
http://www.wolter.eu/fileadmin/DOWNLOADS/wolter_jetfan_english_2014.pdf, Aralık 2016.

[51] MCO Endüstriyel Malzeme ve Taahhüt San. Tic. A.Ş.,
<http://www.imco.com.tr/download.aspx?T=DOC&ID=802>, Aralık 2016.



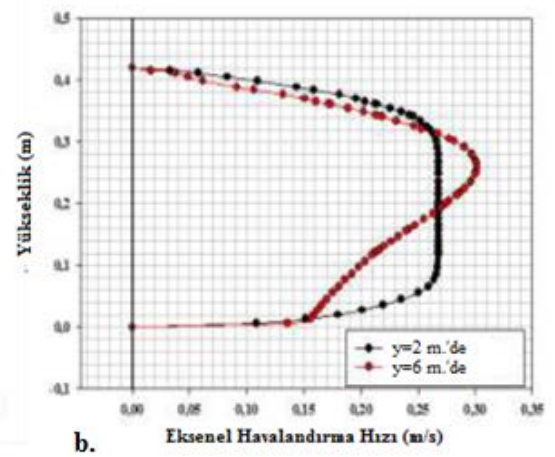
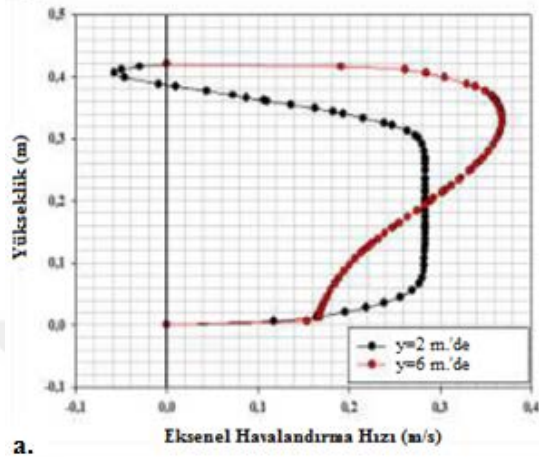
EKLER

EK 1 Referans çalışmada 10 MW ısı salımı için mesh yapısına bağlı olarak elde edilen aksel havalandırma hız profilleri [14]

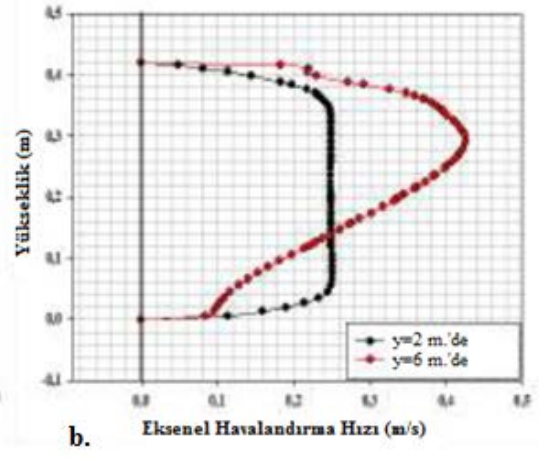
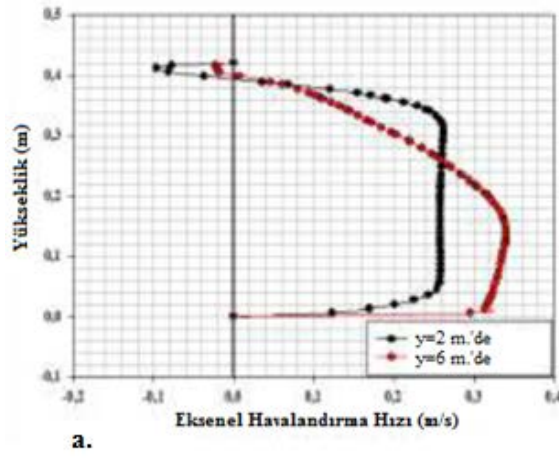


EK 2 Referans makalede yer alan, i) 10 MW'lık yangın için, ii) 50 MW'lık yangın için yapılan analizlerden elde edilen havalandırma hızı profilleri: a) Havalandırma sistemi devreye girdikten 15 s sonra, b) Havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonra [14]

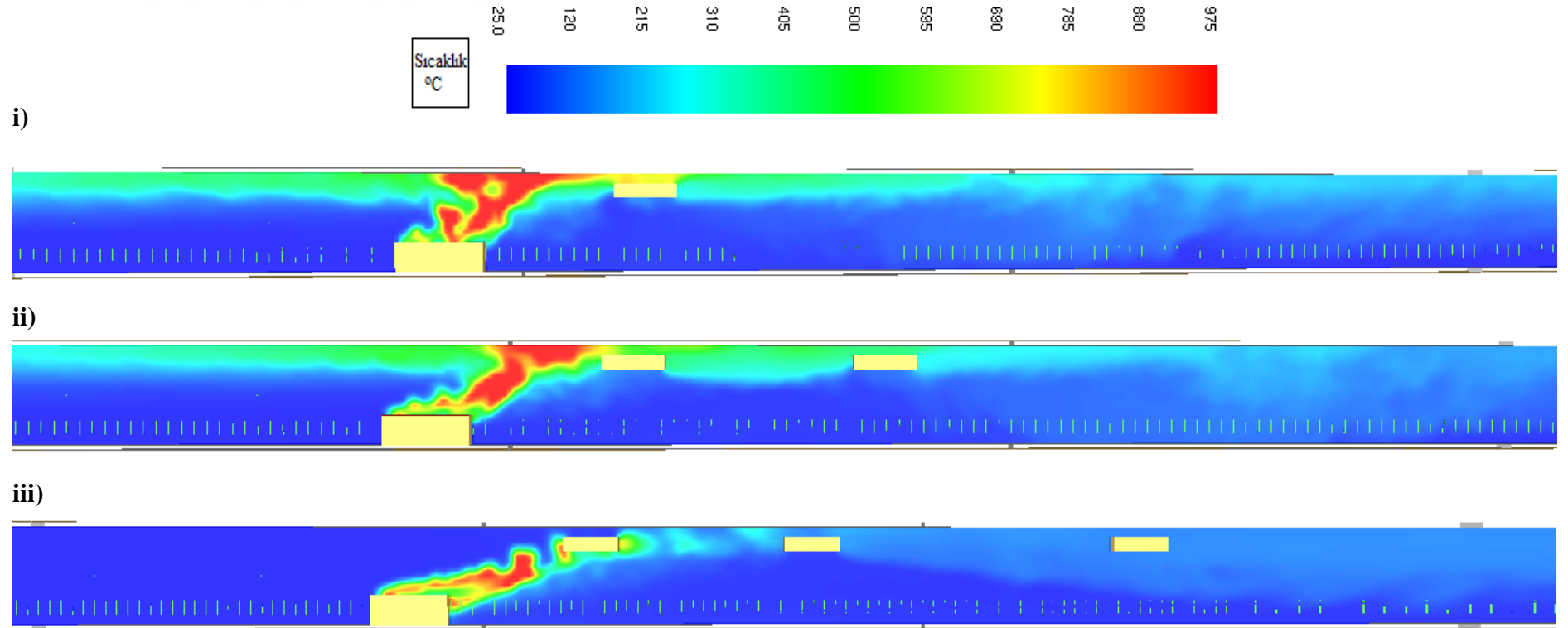
i)

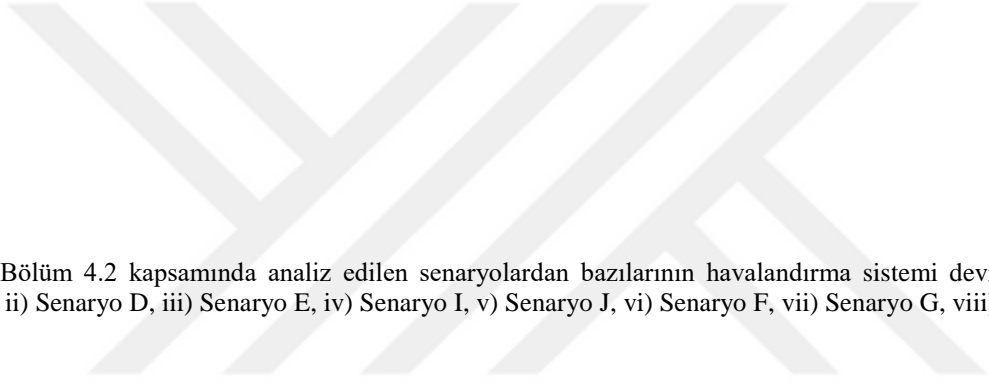


ii)



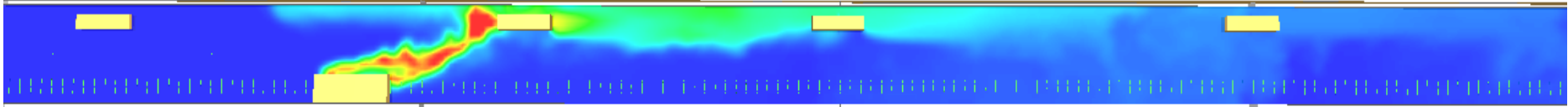
EK 3 Bölüm 4.2 kapsamında analiz edilen senaryolardan bazılarının havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonraki sıcaklık dağılımları: i) Senaryo C, ii) Senaryo D, iii) Senaryo E, iv) Senaryo I, v) Senaryo J, vi) Senaryo F, vii) Senaryo G, viii) Senaryo M, ix) Senaryo N 'nin analizinden elde edilmiştir.



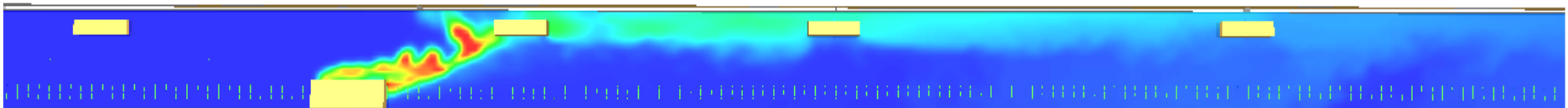


EK 3 Bölüm 4.2 kapsamında analiz edilen senaryolardan bazılarının havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonraki sıcaklık dağılımları (devamı): i) Senaryo C, ii) Senaryo D, iii) Senaryo E, iv) Senaryo I, v) Senaryo J, vi) Senaryo F, vii) Senaryo G, viii) Senaryo M, ix) Senaryo N 'nin analizinden elde edilmiştir.

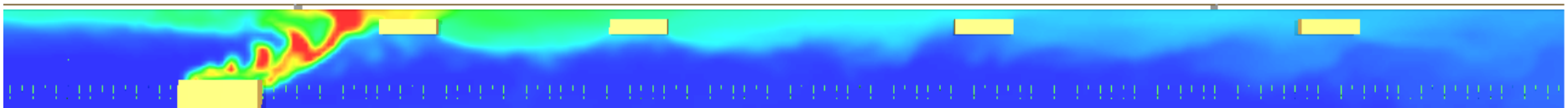
iv)

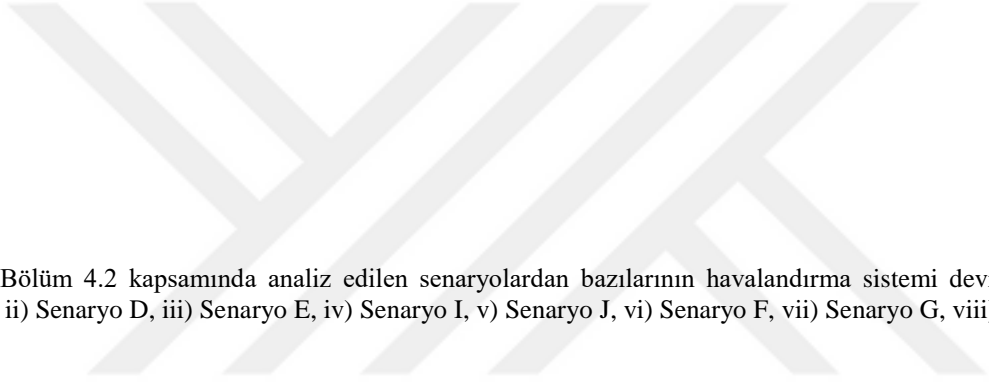


v)



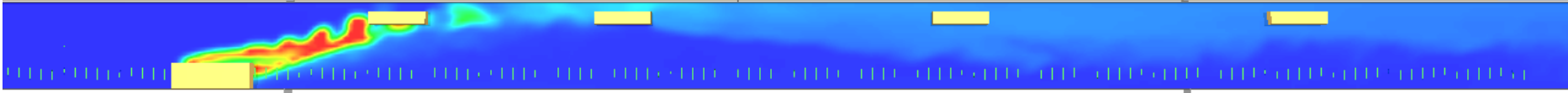
vi)



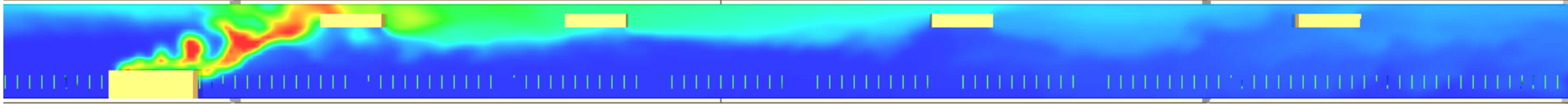


EK 3 Bölüm 4.2 kapsamında analiz edilen senaryolardan bazılarının havalandırma sistemi devreye girdikten 30 s sonraki sıcaklık dağılımları (devamı): i) Senaryo C, ii) Senaryo D, iii) Senaryo E, iv) Senaryo I, v) Senaryo J, vi) Senaryo F, vii) Senaryo G, viii) Senaryo M, ix) Senaryo N ‘nin analizinden elde edilmiştir.

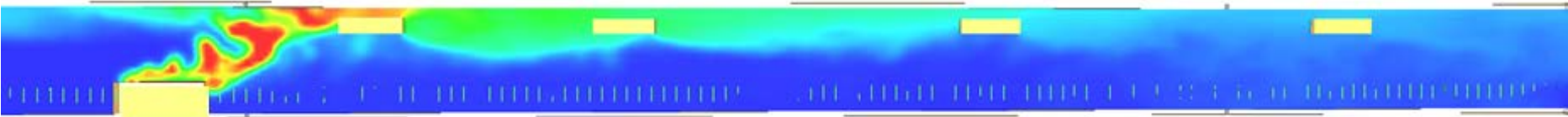
vii)

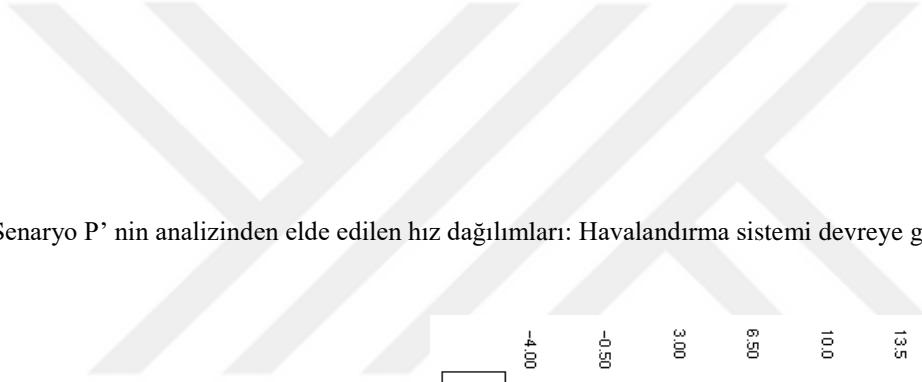


viii)

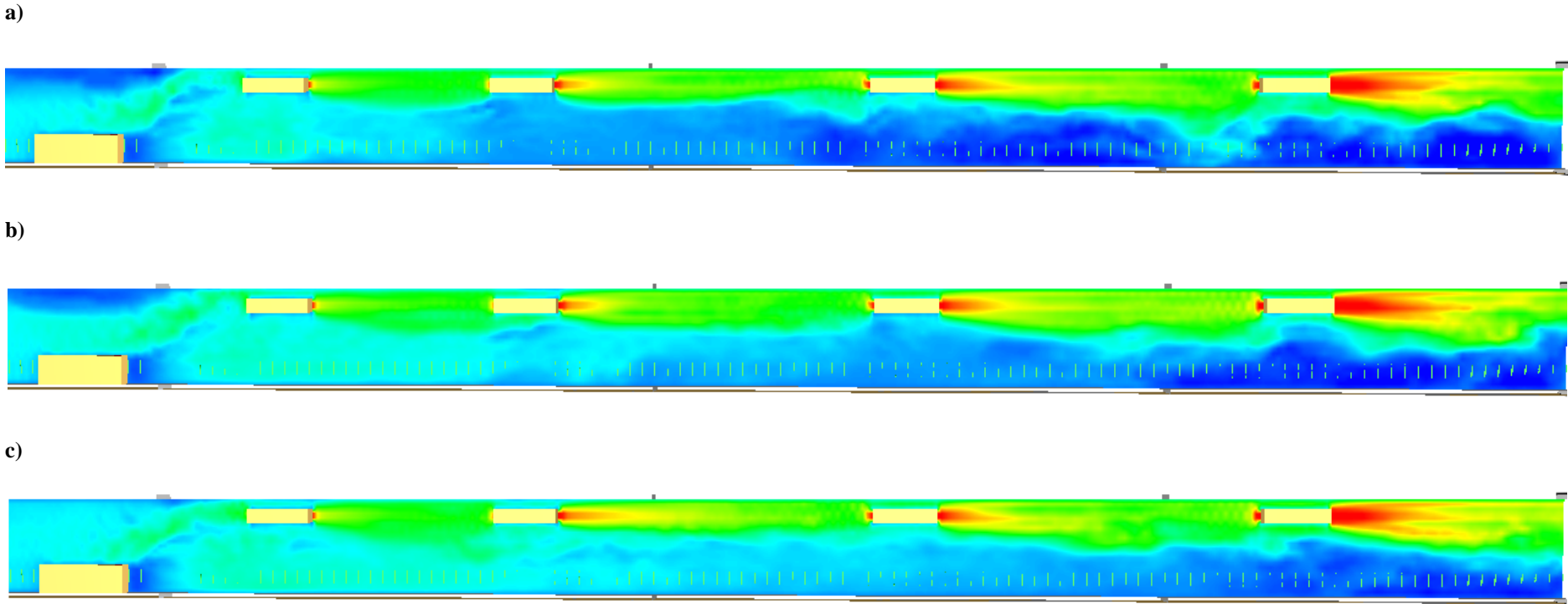
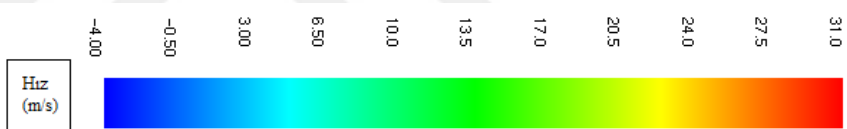


ix)

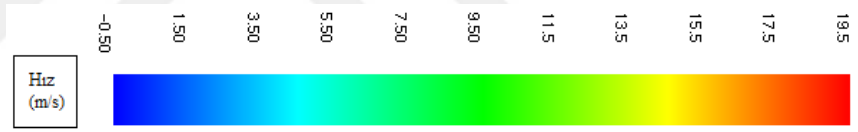




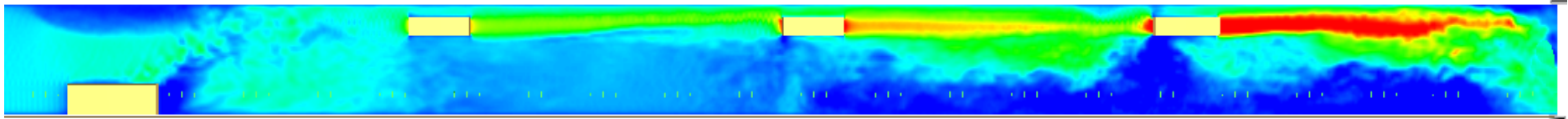
EK 4 Senaryo P' nin analizinden elde edilen hız dağılımları: Halandırma sistemi devreye girdikten: a)15 s, b)30 s, c)180 s sonra



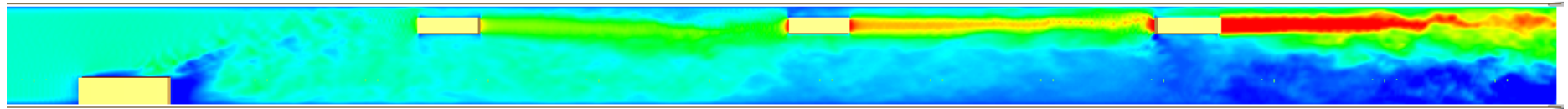
Ek 5 Senaryo T' nin analizinden elde edilen hız dağılımları: Havalandırma sistemi devreye girdikten: a)15 s, b)30 s, c)180 s sonra



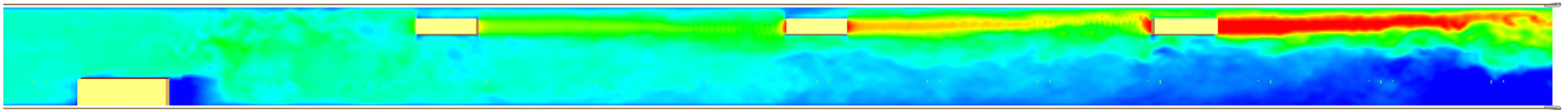
a)



b)



c)



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı SOYADI : Merve ALTAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.12.1989 / BURSA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : merve.altay@btu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

<u>Derece</u>	<u>Alan</u>	<u>Üniversite Adı</u>	<u>Mezuniyet</u>
Lisans	Makine Mühendisliği	Uludağ Üniversitesi	2012

İŞ TECRÜBESİ

<u>Yıl</u>	<u>Firma/Kurum</u>	<u>Görevi</u>
2012-2013	Anadolu Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2014-2016	Bursa Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

BİLİMSEL ÇALIŞMALARI

▪ Bildiri

Altay M., Sürmen A., Numerical Study of The Critical Velocity and Fire Plume Distribution in The Presence of an Obstruction in a Scaled Tunnel, *2nd International Congress on Natural and Engineering Sciences*, Üsküp, 2016.

Sürmen A., Altay M., Çakıcı O., Bina Yangınlarına Karşı Gelistirilen Otomatik Bir Korkuluk Açma Mekanizması ve Çalışma Karakterizasyonu, *13. International Combustion Symposium*, Bursa, 2015.