

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bir Karayolu Tünelinde Olası Bir Yangın Durumu İçin Yangın Tahliye Sistemlerinin  
Sayısal Olarak İncelenmesi

Songül SOLMAZ

EYLÜL 2019

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında** Songül SOLMAZ tarafından hazırlanan BİR KARAYOLU TÜNELİNDE OLASI BİR YANGIN DURUMU İÇİN YANGIN TAHLİYE SİSTEMLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylım.

Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İbrahim UZUN  
Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN  
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BİLGİLİ

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## ÖZET

### BİR KARAYOLU TÜNELİNDE OLASI BİR YANGIN DURUMU İÇİN YANGIN TAHLİYE SİSTEMLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**Songül SOLMAZ**

Kırıkkale Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi  
Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN  
2019, 85 Sayfa

Günümüz dünyasında ulaşım süresini kısaltması ve kolaylaştırması, ulaşımın mümkün olmadığı yerlerde ise ulaşımına imkan vermesi sebebiyle karayolu tünellerinin sayısının giderek arttığı görülmektedir. Bu duruma paralel olarak, artan nüfus ve artan taşıt yoğunluğu sebebiyle, karayolu tünellerinde gerçekleşen kaza sayısında artış söz konusudur. Karayolu tünellerinde sık gerçekleşen ve en tehlikeli olan kaza tipi ise taşıt kaynaklı yangınlardır. Literatür incelendiğinde karayolu tünellerinde meydana gelen yangınları inceleyen birçok bilimsel çalışma yapıldığı ve yapılmaya da devam ettiği görülmektedir. Fakat halen tüneller içerisinde yanma sonucu oluşan tehlikeli gazların tahliyesi ve yüksek sıcaklıkların güvenli seviyelere indirilmesi amacıyla yapılacak çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu amaçla bu çalışma kapsamında 8x8x200 m boyutlarında bir model tünel ele alınmıştır. Bu tünele, tünel girişinden 50 m, 100 m ve 150 m uzaklıklarda olmak üzere toplamda 3 adet aksiyel jet fan yerleştirildiği düşünülmüştür. 5 MW ve 50 MW olmak üzere iki farklı yangın yükü ve tünel girişinden 25 m, 75 m, 125 m ve 175 m uzaklıkta olmak üzere 4 farklı yangın konumu için, olası bir yangın kaynağı, tünel içerisine yerleştirilerek farklı yangın modelleri oluşturulmuştur. Tüm bu yangın modelleri için, tünel içerisine yerleştirilmiş olan 3 adet jet fanın farklı fan hızları ve farklı açıklık kapalılık durumları için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Böylelikle yangın boyutunun, yangın konumunun, fan diziliminin ve fan hızının yangın kaynaklı dumanın hareketine, tünel içi sıcaklık, CO ve O<sub>2</sub> değerlerine etkisi ayrı ayrı

incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, diğer tüm parametreler sabit iken, artan yangın yükünün tünel içerisinde gerçekleşen sıcaklık, duman ve CO seviyesini artırdığı, O<sub>2</sub> seviyesini ise azalttığı belirlenmiştir. Artan fan hızı ise tam ters etki yaparak O<sub>2</sub> seviyesini artırırken, duman, sıcaklık ve CO seviyesini azaltmıştır. Tünelin girişine yakın bölgelerde çıkan bir yangında tünel içerisindeki sıcaklık ve duman dağılımının, tünel çıkışına yakın bölgelerde çıkan bir yangına göre daha yoğun olduğu belirlenmiştir. Fanların açıklık ve kapalılık durumunun ise, tünel içerisindeki sıcaklık ve duman dağılımlarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tünel Yangınları, Boyuna Havalandırma Sistemi, Duman Kontrolü

## **ABSTRACT**

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF FIRE DISCHARGE SYSTEM FOR A POSSIBLE FIRE SITUATION IN A HIGHWAY TUNNEL**

**Songül SOLMAZ**

Kırıkkale University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering Program  
Master of Science Thesis  
Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN  
2019, 85 Pages

In today's world, it is seen that the number of road tunnels is gradually increasing due to shortening and facilitating transportation time and providing transportation in places where transportation is not possible. Parallel to this situation, there is an increase in the number of accidents in road tunnels due to the increasing population and increasing vehicle density. The most dangerous and most dangerous type of accident in road tunnels is vehicle-borne fires. When the literature is examined, it is seen that many scientific studies have been done and continue to be done in the road tunnels. However, there is still a need to carry out works for the evacuation of dangerous gases caused by combustion in tunnels and to reduce high temperatures to safe levels.

For this purpose, a 8x8x200 m model tunnel was investigated in this study. It is thought that a total of 3 axial jet fans were installed in this tunnel, 50 m, 100 m and 150 m from the tunnel entrance. Different fire models were created by placing a possible fire source in the tunnel for two different fire loads, 5 MW and 50 MW, and 4 different fire locations 25 m, 75 m, 125 m and 175 m from the tunnel entrance. For all these fire models, numerical analyzes were repeated for different fan speeds and different opening and closing conditions of 3 jet fans installed in the tunnel. Thus, the effect of fire size, fire position, fan arrangement and fan speed on the movement of fire-induced smoke, in-tunnel temperature, CO and O<sub>2</sub> values were investigated

separately. As a result of the analyzes, while all other parameters were constant, it was determined that the increased fire load increased the temperature, smoke and CO levels in the tunnel and decreased the O<sub>2</sub> level. Increasing fan speed increased the O<sub>2</sub> level with the opposite effect and decreased the smoke, temperature and CO level. In a fire near the entrance of the tunnel, it was determined that the temperature and smoke distribution in the tunnel was more intense than a fire near the exit of the tunnel. On the other hand, it was observed that the openness and closeness of the fans significantly affected the temperature and smoke distributions in the tunnel.

**Anahtar Kelimeler:** Tunnel Fires, Longitudinal Ventilation System, Smoke Control



## TEŐEKKÖR

Tezimin hazırlanması boyunca bana her zaman destek olan, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına ışık tutan kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN' a, her zaman yanımda olduklarını bildiğim tez çalışmam boyunca da beni hep yüreklendiren annem, babam ve aileme teşekkür ederim.





## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	iiiv
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vi
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xix
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ</b> .....	3
2.1. Literatürde Yer Alan Sayısal Çalışmalar .....	3
2.2. Literatürde Yer Alan Deneysel Çalışmalar .....	10
2.3. Literatürde Yer Alan Sayısal ve Deneysel Çalışmalar .....	14
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	17
3.1. Temel Olarak Yangın .....	17
3.1.1. Yangının Gelişim Eğrisi .....	18
3.2. Tünel Havalandırma Sistemleri .....	18
3.2.1. Doğal Havalandırma .....	20
3.2.2. Mekanik Havalandırma .....	21
3.3. Tünellerde Yaşanan Kazalara Örnekler .....	24
3.4. Tünellerde Yangın Güvenliği .....	26
3.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği .....	26
3.5.1. Fire Dynamics Simulator (FDS) Programının Özellikleri ve Avantajları .....	27
3.6. Tünel Yangınları ile Alakalı Genel Hususlar .....	31
3.6.1. Kritik Hız .....	31
3.6.2. Geri Katmanlaşma .....	32
3.6.3. Isı Salım Hızı .....	34
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	36
4.1. Referans Çalışmada Yer Alan Sayısal Analizin Sonuçlarının Doğrulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi .....	37

4.2. Bu Çalışmada Geliştirilen Yangın Senaryolarının Sayısal Analizi ve	
Sonuçların Değerlendirilmesi.....	42
4.2.1. Yangın Boyutu 5 MW İçin Yapılan Analizler .....	43
4.2.2. Yangın Boyutu 5 MW İçin Yapılan Analizler.....	43
4.2.3.Tünelin Geometrik Özellikleri.....	44
4.2.4.Simülasyon Yaklaşımı ve Mesh Yapısı .....	46
4.2.5. Analizlerde Değerlendirilen Parametreler .....	48
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>92</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>94</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Yangının evreleri	18
Şekil 3.2. Eksene dik havalandırma sisteminin şematik gösterimi	22
Şekil 3.3 Yarı eksene dik havalandırma sisteminin şematik gösterimi	23
Şekil 3.4. Fanların kullanıldığı aksenel havalandırma sistemi	23
Şekil 3.5. Fan ve şaft kullanılan aksenel havalandırma sistemi	24
Şekil 3.6. Kritik hız- havalandırma hızı ilişkisi	31
Şekil 3.7. Isı salım hızı-zaman ilişkisi	33
Şekil 4.1. Bu çalışmada ele alınan model tünelin şematik gösterimi	34
Şekil 4.2. Farklı alanlardaki ortalama görünürlüğün karşılaştırılması	36
Şekil 4.3. Tünelin 0-195 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması	37
Şekil 4.4. Tünelin 195-250 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması	37
Şekil 4.5. Tünelin 250-300 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması	38
Şekil 4.6. Tünelin 300-350 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması	38
Şekil 4.7. Tünelin 350-400 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması	39
Şekil 4.8. Tünel geometrisi izometrik görünümü	42
Şekil 4.9. Tünel geometrisi ekipmanlı izometrik görünümü	43
Şekil 4.10. Tünel geometrisi giriş görünüm	43
Şekil 4.11. Model mesh yapısı izometrik görünümü	45
Şekil 4.12. Model mesh yapısı ekipmanlı izometrik görünüm	45
Şekil 4.13. Model mesh yapısı önden görünüm	45
Şekil 4.14. Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s	47

- Şekil 4.15.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki duman dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s 47
- Şekil 4.16.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki CO dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s 48
- Şekil 4.17.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki O<sub>2</sub> dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s 49
- Şekil 4.18.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 50
- Şekil 4.19.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 50
- Şekil 4.20.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 51
- Şekil 4.21.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 52
- Şekil 4.22.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 52
- Şekil 4.23.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 53
- Şekil 4.24.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 54
- Şekil 4.25.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi 54
- Şekil 4.26.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 55

- Şekil 4.27.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 56
- Şekil 4.28.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 56
- Şekil 4.29.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 57
- Şekil 4.30.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 57
- Şekil 4.31.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 58
- Şekil 4.32.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 59
- Şekil 4.33.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi 59
- Şekil 4.34.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 60
- Şekil 4.35.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 61
- Şekil 4.36.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 61
- Şekil 4.37.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 62
- Şekil 4.38.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 62

- Şekil 4.39.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 63
- Şekil 4.40.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 64
- Şekil 4.41.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 64
- Şekil 4.42.** 5 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda, t=120 sn için farklı yangın konumlarındaki sıcaklık dağılımları; a)t=25 m, b)t=75 m, c)t=125 m, d)t=175 m 65
- Şekil 4.43.** 50 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda, t=120 sn için farklı yangın konumlarındaki sıcaklık dağılımları; a)25 m, b)75 m, c)125 m, d)175 m 66
- Şekil 4.44.** 5 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda, t=120 sn için farklı yangın konumlarındaki duman dağılımları; a)25 m, b)75 m, c)125 m, d)175 m 67
- Şekil 4.45.** 50 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda, t=120 sn için farklı yangın konumlarındaki duman dağılımları; a)25 m, b)75 m, c)125 m, d)175 m 67
- Şekil 4.46.** Farklı yangın konumları için, 5 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda sıcaklığın tünel boyunca değişimi 68
- Şekil 4.47.** Farklı yangın konumları için, 50 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda sıcaklığın tünel boyunca değişimi 68
- Şekil 4.48.** Farklı yangın konumları için, 5 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda CO'nun tünel boyunca değişimi 69
- Şekil 4.49.** Farklı yangın konumları için, 50 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda CO'nun tünel boyunca değişimi 69
- Şekil 4.50.** Farklı yangın konumları için, 5 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 70
- Şekil 4.51.** Farklı yangın konumları için, 50 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi 71
- Şekil 4.52.** Yangın 25 m'de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi 71

- Şekil 4.53.** Yangın 75 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi 71
- Şekil 4.54.** Yangın 125 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi 72
- Şekil 4.55.** Yangın 175 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi 72
- Şekil 4.56.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, 30 m/s fan hızı, t=360 s için sıcaklık dağılımı, a)Tüm fanlar kapalı, b)Sadece 1. fan açık, c)Sadece 2. fan açık, d)Sadece 3. fan açık, e)Tüm fanlar açık 73
- Şekil 4.57.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, 30 m/s fan hızı, t=360 s için duman dağılımı, a)Tüm fanlar kapalı, b)Sadece 1. fan açık, c)Sadece 2. fan açık, d)Sadece 3. fan açık, e)Tüm fanlar açık 74
- Şekil 4.58.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s, t=360 sn için sıcaklığın tünel boyunca değişimi 75
- Şekil 4.59.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s, t=360 sn için CO’nun tünel boyunca değişimi 75
- Şekil 4.60.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s, t=360 sn için O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi 76
- Şekil 4.61.** Farklı fan hızları için, yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve t=360 s için tünel içerisindeki sıcaklık dağılımı a)30 m/s, b)50 m/s, c)70 m/s 77
- Şekil 4.62.** Farklı fan hızları için, yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve t=360 s için tünel içerisindeki duman dağılımı a)30 m/s, b)50 m/s, c)70 m/s 77
- Şekil 4.63.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, tüm fanlar açık ve t=360 s için sıcaklığın tünel boyunca değişimi 78
- Şekil 4.64.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, tüm fanlar açık ve t=360 s için CO’nun tünel boyunca değişimi 78
- Şekil 4.65.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, tüm fanlar açık ve t=360 s için O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi 79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 3.1.</b> Farklı standartlarda tünel havalandırma gerekliliği.....	21
<b>Çizelge 3.2.</b> Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünel yangınları örnekleri.....	24
<b>Çizelge 3.3.</b> Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünel yangınları örnekleri devamı.....	25
<b>Çizelge 3.4</b> Taşıt türüne göre maksimum ISH değerleri.....	33
<b>Çizelge 4.1.</b> Referans makalede yer alan analiz giriş parametreleri.....	36
<b>Çizelge 4.2.</b> Simülasyonlarda kullanılan analiz parametreleri .....	40
<b>Çizelge 4.3.</b> 5 MW yangın gücü için yürütülen analiz isimlendirmeleri.....	41
<b>Çizelge 4.4.</b> 50 MW yangın gücü için yürütülen analiz isimlendirmeleri .....	41



## KISALTMALAR DİZİNİ

HAD	Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği
NIST	National Institute Of Standards (Ulusal Standartlar Enstitüsü)
PM	Partikül Madde
ISH	Isı Salım Hızı
FDS	Fire Dynamics Simulator (Yangın Hareketleri Simülatörü)
HRR	Heat Release Rate (Isı Salım Hızı)
CO	Karbonmonoksit
NO	Azotmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
O <sub>2</sub>	Oksijen
MW	Megawatt
KW	Kilowatt
m	Metre
s	Saniye

## 1.GİRİŞ

Artan nüfusa bağlı olarak artan trafik ve ölkemizin engebeli olması karayolu ulaşımında yer üstü ve yer altında tünellerin önemini gün yüzüne çıkarmaktadır. Ulaşımın süresini kısaltması ve ulaşımı kolaylaştırması sebebiyle karayolu ulaşımında tünellerin sayısı giderek artmaktadır.

Fakat artan nüfus ve taşıt sayısı, tünellerin kapalı konstrüksiyona sahip olması tünel trafiğinde karmaşıklığı ve bir takım zorlukları beraberinde getirmektedir. Örnek olarak, taşıt sayısındaki yoğunluk egzoz gazlarının ve kirli havanın tünel içerisinde birikmesine sebep olmakta ve insan sağlığını tehlikeye attığından ötürü tünel boyunun fazlaca uzun olduğu tünellerde uygun bir havalandırma sisteminin seçilmesini zorunlu kılmaktadır.

Avantajları olmasına rağmen geçtiğimiz yıllarda ölkemizde ve tüm dünyada yaşadığımız tünel yangınları, yangın anı ve sonrasında verdiği tahribatlarla tünel içerisinde ve çevresinde ciddi oranda can ve mal kaybına sebep olabilmektedir.

Bu sebeple karayolu tünellerinde çıkan yangın pek çok araştırmacının ilgi odağı ve pek çok araştırmanın konusu olmuştur.

Karayolu tünellerinde yangını oluşturan ve yangın sonucunu etkileyen pek çok parametre olduğundan dolayı; tünellerde yangını, yangın kaynaklı dumanın hareketini, yangın sonucu meydana gelen zehirli gazların konsantrasyonunu incelemek için deneysel çalışma yapmayı uygulanabilirlik, maliyet ve güvenilirlik açısından zorlaştırmaktadır.

Yukarıdaki sebeplerden ötürü karayolu tünellerinde olası yangın çıkması durumunda meydana gelebilecek durumları öngörmek, tedbir almak, can ve mal kaybını korumak amaçlı bilim insanları pek çok yangın simölasyonu yaparak sayısal analiz yapmış ve uygun havalandırma sistemi seçmişlerdir.

Bu çalışmada da FDS (Fire Dynamics Simulator) programında öncelikle literatürden bir referans çalışma ele alınmış [1] ve çalışmada yapılan analizler verilen giriş parametreleri doğrultusunda analizler yapılmış ve bulunan sonuçlar referans çalışma ile kıyaslanarak referans çalışmada bulunan sonuçlar ile uyumlu sonuçlar bulunduğu görölmüştür. Referans çalışma ile uyumlu sonuçlar bulunduğu göröldükten sonra çeşitli yangın senaryoları oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır.

Geçmiş yıllarda meydana gelen kazalar ve literatürdeki deneysel-sayısal çalışmalar incelendiğinde tünel yangınlarında yangın sonucunu etkileyen en önemli parametrenin yangın yükü olduğu görölmüştür.

Bu sebeple yapılan bu çalışmada ağırlıklı olarak simölasyon senaryolarında tüm şartlar sabit tutulmak koşuluyla yangın yükü değiştirilerek sonuçlara etkileri incelenmiş, bununla beraber yangın konumu, fan hızı, fan konumu, fanların açıklık kapalılık durumu gibi pek çok parametre incelenmek üzere çeşitli senaryolar

oluşturulmuş ve FDS paket programında Pyrosim ara yzünde analizler yzrtrlmş ve sonuqlar Smokeview grrnttleme programında grrnttlenmiştir.

Analizler zamana bağlı olarak yangın anı ve sonrası tnel iqlerisindeki insanların tneli terk edebilmesi iqlin literatrde de rnelmi bir srre sayılan 360 s boyunca yzrtrlmş ve elde edilmiştir.

Can ve mal gvnenliği aqlısından qok rnelmi olan bu konuyla ilgili yapılan qeşitli deneysel ve sayısal literatr qalışmasına aşağıda yer verilmiştir.



## 2.LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde yer edinmiş çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların karayolu tünellerinde yangınları konusunda; gerçek boyutta veya ölçeklendirilmiş tünelleri kullanarak, yangın kaynaklı dumanın akış hareketi ve karakteristiği, uygun duman tahliye yönteminin belirlenmesi, tünellerde havalandırma metotları gibi hususlar üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yürüttüğü görülmüştür. Bu çalışmalardan aşağıda bahsedilmiştir.

### 2.1.Literatürde Yer Alan Sayısal Çalışmalar

Jun ve diğerleri, boyuna havalandırma sistemine sahip tünellerde yangınlarında kritik hız üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla 400m x 10m x 10m boyutlarında bir tüneller ve tüneller girişinden 200m uzaklıkta 1m x 1m boyutunda düzenli bir yangın kaynağı olduğunu düşünmüşlerdir. Tünellerin havalandırılabilmesi için tüneller girişine jet fan yerleştirildiği belirtilmiştir. 10 MW ve 100 MW aralığındaki 10 farklı yangın gücündeki tüneller yangınları, 1000 s süresince simüle edilmiştir. Analizler sonucunda, tüneller içerisindeki sıcaklık, hız ve görünebilirlik dağılımları elde edilmiştir. Sonuç olarak kritik hızın tüneller yangınlarında kurtarıma ve boşaltılmasında önemli rol oynadığını belirtmişlerdir.[1]

Kayı ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmada, tüneller yangınları ile diğer kapalı alan (kompartman) yangınları arasındaki fark ve benzerliklerden bahsedilmiş, tünellerde yangın sırasında güvenlik amaçlı kullanılan yangın havalandırma sistemlerinin çeşitleri ve özellikleri incelenmiştir. Tünellerde kullanılacak olan havalandırma sistemini seçerken, tünellerin uzunluğuna, eğimine, yangın ısıl gücüne (yüküne), çevre şartlarına ve uluslararası standartlarda belirtilen kriterlere uygun seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır.[2]

Ünal çalışmasında, İstanbul'da Beykoz ve Kavacık ilçelerini birbirine bağlayan yatayda 690 m uzunluğuna sahip, 7,55 m tüneller yüksekliğine ve 10,6 m genişliğe, %1,5 eğime, ayrıca 5 çift aksiyel jet fan yerleştirilerek boylamasına havalandırma sistemine sahip bir şehir içi karayolu tünellerinde, yangın olması durumunda bölgedeki

hava koşullarının tünel havalandırmasına etkisini sayısal olarak incelemiştir. Bu amaçla bir petrol tankerinin yanması durumunda 200 MW'lık bir ısı çıkardığı varsayılarak, tünel çıkışında rüzgar hızının 4 m/s ve 10 m/s olması durumları için 2 farklı senaryo Ansys CFX programında analiz edilmiş karşı rüzgar etkisinin tünel havalandırmasına etkisi incelenmiş, tünel zemininden 1,7 m yükseklikte (yaklaşık insan boyu) görüş mesafesi ve zehirli gaz değerleri belli zaman aralıklarında incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Rüzgar hızının 10 m/s olması durumundaki verilere göre; görüş mesafesinin çok daha düşük, zehirli gaz konsantrasyon değerlerinin fazla olduğu ve ayrıca tünel içerisindeki duman dağılımını da daha olumsuz olarak etkilediği görülmüştür.[3]

Bilgin çalışmasında, hava kirliliği, yanma reaksiyonları ve yanma sonucu meydana gelen zararlı gaz emisyonları, bu emisyonların çevreye ve insan sağlığına zararlarını ele almıştır. Bu emisyon faktörlerinin Avrupa'daki standartlarından ve etkilerinden bahsetmiştir. Tünellerin yapım şekilleri, işlevleri ve AB standartları belirtilmiştir. AB standartlarında binek araçların emisyon değerleri belirtilmiş, AB'deki tünel güvenliği konusundaki çalışmalardan bahsedilmiştir. Karayolu tünellerindeki havalandırma esasları, çeşitleri, ne gibi parametrelere bağlı olduğu ve yangın güvenliği üzerinde durulmuş, örnek bir tünel havalandırma sistemi tasarımı yapılmış, verileri Karayolları Genel Müdürlüğü'nden alınan örnek tünel için PIARC 1991'deki tablolardan faydalanılarak CO, NOx, duman ve yangın için ihtiyaç duyulan temiz hava debileri hesaplanmış, buradan hareketle jet vantilatör hesabı yapılmış ve bu örnek tünel için kaç adet jet fan kullanılması gerektiği öngörülmüştür. Sonuç olarak, karayolu tünellerinde tünel güvenliğinin bir sistem olarak ve AB mevzuatına uygun olarak ele alınması gerektiği kanaatine varılmıştır.[4]

Karaaslan ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada, at nalı kesitine sahip 8,7x8,2x300 m (en x yükseklik x boy) boyutlarında bir tünel içerisine her biri 3 adet fan içeren 3 adet jet fan grubunun yerleştirilmiş olduğu bir karayolu tünelini incelemiştir. Bu amaçla 2. ve 3. Fan grupları arasına 1,54x2,3x7 m (en x yükseklik x boy) boyutlarında bir yangının çıkması durumu için simülasyonlar yapılmıştır. Bu çalışmada amaçlanan yangın durumunda en iyi hava tahliyesini yapabilmek için, 10 MW ve 50 MW'lık iki farklı yangın ve farklı senaryolarda

çalıştırılan jet fanlar için CFD analizleri yapılmıştır. Sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla ve Memorial Tünel Test sonuçları ile kıyaslanmış, CFD programının güvenilir bir araç olduğu kanaatine varmışlardır. Sonuç olarak tünel içi kritik hız değeri 2,46 m/s olarak ölçülmüş ve bu hızın 11m/s limitini aşmadığı belirtilmiştir.[5]

Alpgiray'ın yapmış olduğu çalışmada enine havalandırma sistemine sahip 20x5.8x10 m (en x yükseklik x boy) boyutlarında bir karayolu tüneline 10 MW ısı yayılım oranında olan bir yangın havuzu oluşturulmuş ve emme-basma fan grupları tünelin girişine, merkezine ve çıkışına yerleştirilerek inceleme yapılmıştır. Tünelin yangın havuzunun ve sınır şartlarının değerleri 1/20 oranında küçültülerek çalışmalar yapılmıştır. Alpgiray, çalışmasında yangının konumunu, fanların çalışma sırasını değiştirerek farklı yangın senaryoları oluşturmuş ve bu senaryoları 5, 10, 15, 25, 35, 40, 50 s gibi ayrı ayrı sürelerde Ansys Fluent programında, enine havalandırma sistemine sahip bir karayolu tüneline zamana bağlı olarak, simüle ederek analiz etmiştir. Analizler k-ε türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu analizde yangının 5 farklı konumdaki durumu için sıcaklık ve hız dağılımları incelenmiştir. Analiz sonuçlarından fan gruplarının çalışma sırası, havalandırma türü, tünelin geometrisi, ısı yayılım oranı gibi parametrelerin duman tahliyesi üzerinde çok önemli parametreler olduğu ve ayrıca yangının her 3 fanın da çalışması durumunda 40. s' sinde hız dağılımları incelendiğinde akışın hidrodinamik olarak tam geliştiği ve kararlı olduğu kanaatine varılmıştır.[6]

Sturm ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada, bir tünelde yangın çıkması durumu için yangın havalandırma yöntemlerini sensörlere, kontrol sistemlerine ve metodolojilere dayandırarak incelemişlerdir. Bu çalışmada öncelikle yangın havalandırmasının öneminden bahsedilmiş daha sonra boyuna havalandırma sistemi, enine havalandırma sistemi ve yangın havalandırması için gerekli sensörlere değinilmiştir. Boyuna havalandırma sistemlerinde ana konunun fanların aktivasyon sıralamasının ve üretilen havanın hızı olduğu vurgulanmıştır. Kritik hız ya da düşük hız tercihi hakkında karşıt tercihlerin olduğu belirtilmiş, kritik hızın dumanın geri tabakalaşma olmaması adına önemli olduğu ve tek yönlü trafik yoğunluğunun az olduğu tüneller için uygun olduğu sebepleriyle birlikte anlatılmıştır. Düşük hız felsefesinin ise PIARC ve birçok havalandırma kılavuzları tarafından da

desteklendiği ve çoğu durumda yangının yakınlarındaki trafik durumu bilinmediği için en uygun felsefe olduğu belirtilmiştir. Enine havalandırma sisteminin ise uzunlamasına havalandırmanın yasak olduğu 3000 m'den daha uzun ve iki yönlü trafiği olan tüneller için uygun olduğuna değinilmiştir. Duman kontrolü için havalandırma sistemlerinden bahsedildikten sonra tünel içindeki yangın yerinin tespiti, hava-duman hareketinin doğru bir şekilde ölçümü ve yangının hızlı bir şekilde tespiti için sensörlerin kullanılması gerektiği anlatılmıştır. Sonuç olarak; yangın havalandırmasının olayın başlangıcında durumu iyileştirme imkanı sağladığı, çoğu durumda düşük hız felsefesinin en uygun olduğu, sistemde kullanılan sensörlerin kontrol edilmesi gerektiği, yol trafik alt yapısında teknik alt yapının eskiye göre karmaşıklaşması sebebiyle ya sistemlerin basitleştirilmesi ya da güvenlik donanımını test etmek için daha fazla çaba sarf edilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır.[7]

Wang ve arkadaşları yürüttükleri çalışmada, yarı enine duman tahliye sistemi olan bir tünel yangını üzerinde, duman egzoz açıklıklarının duman yayılma performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, tam ölçekli bir tünelde gerçekeşebilecek bir yangın üç boyutlu bilgisayar modeli FDS ile simüle edilmiş, tünelin sıcaklık ve duman dağılımını incelenmiştir. İncelenen bu tünel yarı dairesel model, 1000 m boyunda ve 14,5 m çapında olup, yarı enine havalandırma sistemine ve 5 adet duman egzoz açıklığına sahiptir. Duman egzoz havalandırması 2 m boy ve 5 m yüksekliğe sahiptir. Yangın senaryosu için kullanılacak yangın ise 20 MW ısı salım hızına sahiptir. Bu yangın ve tünel boyutlarının olduğu çalışmada yangın 5 adet egzoz açıklığına göre konumlandırılarak 6 farklı senaryo hazırlanmış, bu senaryolar Large Eddy Simulation (LES) yöntemiyle FDS programında simüle edilerek analiz edilmiştir. Bu senaryolar 300 s, 600 s ve 900 s aralıklarında incelenecek duman sıcaklık dağılımını ve duman katman değişimini grafiksel olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak; duman geri katmanlaşma tabakasının egzoz açıklıklarından önemli derecede etkilendiği kanaatine varılmıştır.[8]

Yuan ve diğerleri tarafından yapılmış olan bir çalışmada ise doğal havalandırması olan bir tünel yangınında yangın bölgesinin duman sıcaklık dağılımını üzerine olan

etkisini bulmak amaçlanmıştır. Çalışmaya konu olan tünel, genel çift hatlı metro tünelidir. Tünelin kesit boyutları 9,3x4,8 m'dir. Tüneldeki tren boyutu ise 120mx2.8mx2.7m, vagon uzunluğu ise 20m'dir. 2 adet, boyutu 10x2,5x4 m olan doğal havalandırma şaftı mevcut olan bu tünelde, iki şaft arası 70m'dir. Yangın kaynağı ise 10 MW ısı salım hızına sahiptir. Bu tünelde tren vagonu içinden çıkan yangının, lokasyonunun değişiminin tünel-sıcaklık dağılımı üzerine olan etkisi FDS programında, farklı lokasyonlarda yangının çıkması üzerine oluşturulan senaryolarla sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda bütün kapı ve pencerelerin yangın kaynağını içeren bölgede olduğunda, tavan duman sıcaklığı üzerinde etkisi olmadığını, ancak bazı kapı veya pencerelerin yangın kaynağının olduğu bölge sınırının gerisinde kaldığında sıcaklıkların düştüğünü belirtmişlerdir. Dolayısıyla vagonun içinde yangın yerinin önemli bir etkisinin olmadığı kanaatine varmışlardır.[9]

Lin ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada, tünel yangınlarında yarı enine duman kontrol sistemi performansında taşıt blokajının etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla uzunluğu 500m, 6m yükseklik ve 10m genişliğindeki tünelde gerçekleşebilecek olası yangın boyutu 40 MW ve sabit olarak belirlenmiştir. Tünel tavanının altında 8 adet 2mx4m boyutlarında pencere açıklığı konumlandırılmıştır. Bütün katı yüzeyler çevre sıcaklığı olarak sabitlenmiş ve 20 °C olarak alınmıştır. Yakıt materyali olarak 45 MJ/kg yakıt ısısına sahip C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> kullanılmıştır. Sayısal analiz için iki farklı CFD programı olan FDS ve Ansys Fluent programlarında ortak bir simülasyon çalışması yapılmış ve sonuçlar iki farklı program sonuçlarının kıyaslanmasıyla doğrulanmıştır. Öncelikle tünel tabanından 2 m yükseklikte, 8mx4m boyutlarında, tünelin merkezindeki yangın kaynağından ise 150 m uzaklıkta bir blokaj analiz edilmiştir. Blokaj yangın kaynağının sağ tarafında bulunduğu için simetrik duman dağılımının bozulduğu görülmüştür. Kütle akış hızının sağ tarafta 102 kg/s'den 67 kg/s'ye azaldığı, sol tarafta ise kütle akış hızı 102 kg/s'den 154 kg/s'ye çıktığı görülmüştür. Aynı senaryo bu kez 2 m yükseklik yerinde 4m yükseklikteki blokaj için simüle edilmiş, daha sonra ise merkezdeki yangın kaynağının her iki tarafında da simetrik olarak bulunan blokajlar ve bu blokajların 2 m ve 4 m yükseklikte olması durumu için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu simetrik blokaj durumunda duman tahliye sistemi performansının azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç



olarak taşıt blokajının tünellerde duman kontrolü için faydalı olan kritik hızı düşürdüğü, blokaj olan tarafta toplu kütle akış hızının azaldığı ve bu tarafta boşaltımın mümkün olmadığı belirtilmiştir. [10]

Li ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, birleşim kavşağı olan karayolu tünellerinde duman kontrol stratejileri ve parametrelerinin sayısal değerlendirmesi FDS programında yapılmıştır. Bunun için ana tünel 8,75mx5mx200m (en x yükseklik x boy) ve birleşim kavşağı tüneli 5mx5mx100m (en x yükseklik x boy) boyutlarında belirlenmiş ve iki tünel arasındaki iraksama açısı ise 30 °C olarak alınmıştır. Ayrıca simülasyon senaryolarında tünel eğimsiz, %3, %6 ve %9 eğimli olarak incelenmiş ve senaryolarda 5 MW, 10 MW, 20 MW ve 30 MW yangın büyüklükleri kullanılmıştır. Kavşak tüneli ana tünele orta noktasından bağlanmış ve yangın bu noktadan 20 m uzağa yerleştirilmiştir. Bu amaçla, iki farklı senaryo hazırlanmış ve bunlardan ilkinde farklı yangın gücü altındaki ana tünelde duman kontrolü için kritik hız kullanılarak ve farklı eğimlere sahip olan rampa tüneline duman kontrolü olmadan simülasyonlar yapılmıştır. İkinci senaryoda ise ana tünelde duman kontrolü için yine kritik hız kullanılmış ve rampa tüneline de havalandırma kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Birinci senaryo sonucuna göre dumanın ana tünelde iyi kontrol edildiği, fakat rampa tüneline yığın etkisinden dolayı dumanın tünel içerisine dağıldığı ve hatta büyük yangın gücü altındaysa eğer tamamen tüneli kapladığı görülmüştür. Ayrıca kritik hız ile boyuna duman kontrolünün birleşim kavşağı olan tünellerde; ana tünelde duman geri akışının engellenebildiği fakat birleşim kavşağında duman kontrolü iyi sağlanamadığından tehlike arz edebileceği belirtilmiştir. [11]

Altay tarafından yapılan çalışmada, at nalı kesitinde 8,7x8,2x300 m (en x yükseklik x boy) boyutlarına ve 0,005 m et kalınlığına sahip, içerisinde her biri 3 adet fan içeren jet fan gruplarının yerleştirildiği bir karayolu tüneline, tüneline simetri eksenine yerleştirilmiş 1,54x2,3x7 m (en x yükseklik x boy) boyutlarındaki yangın havuzu modeli üzerinde otomobil veya minivandan kaynaklanan yangınlarda meydana gelen 10 MW ısı salım hızı ve kamyon ve tankerlerden kaynaklanan yangınlardan meydana gelen 50 MW ısı salım hızı için yangın senaryoları oluşturmuştur. Altay, yangın ve duman karakteristik özelliklerini saptamaya ve bu özelliklerden hareketle optimum

konum ve debilerde çalıştırılan jet fanların kullanıldığı bir tünel havalandırma sistemi dizayn etmeye çalışmış, ısı salım hızı değişiminin duman karakteristiğine etkisini, ayrıca aksel havalandırma sisteminin yangın kaynaklı duman hareketine ve sıcaklık dağılımına etkisinin ayrı ayrı olarak FDS (Fire Dynamics Simulator) programının Pyrosim ara yüzünü kullanarak analiz etmiş ve Smokeview programında sonuçları görselleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde 50 MW ısı salım hızına sahip yangınlarda uygun bir duman tahliyesinin oldukça zor olduğu ve uygun duman tahliyesinin ancak fan gruplarının tünel çıkışına daha yakın bir yerde olmasıyla mümkün olabileceği kanaatine varılmıştır. 10 MW'lık yangın kaynağında dumanın 1. Fan grubuna 10 s'de, 50 MW'lık yangında ise 20 s'de ulaştığı gözlemlenmiş ve fanlar sırasıyla 20. ve 10. s'den sonra devreye konulmuştur.[12]

Liu ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, karayolu tünel yangınlarında duman geri katmanlaşmasını kontrol etmek amacıyla sayısal olarak analizler yapmışlardır. Yangın modülleri, yangın boyutları, tünel gradyanı, yangın yeri, duman tahliye yeri ve toplam açık duman çıkarma damperi sayısı gibi tasarım parametrelerini incelemişlerdir. 200 m uzunluk, 10mx5,4m genişlik ve yüksekliğe sahip bir model tünel geometrisi belirlemişlerdir. Bu model tünelin giriş ve çıkışı açık olarak tanımlanmış, araç hareket yönünde -%4 eğim, devamında ise +%1,6 eğim olduğu varsayılmıştır. Tünelde 100 MW'lık bir yangının çıktığı düşünülmüştür. Sonuç olarak genişliği 10 m'den fazla olmayan tünellerde dikey yan duvar amortisörleri ile yatay çatıya monte edilen amortisörlerin duman geri tepmesini önlemek ve tünel boyunca yayılımını önlemek için eşit yetenekler geliştirdiği belirtilmiştir. Tünel eğiminin %4 olan kısmında 2,5m/s bir kritik hıza ihtiyaç duyulurken % 1,6 eğime sahip olan kısmında ise 2 m/s'lik bir kritik hıza ihtiyaç duyduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca amortisör sayısının 3 veya 4 olmasının kritik hız üzerinde bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.[13]

Yuan ve diğerleri, uzunlamasına havalandırma sistemi kullanımının bir tünelin yangın algılama sistemi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla tünel içerisinde 20 MW'lık bir yangın olduğunu varsayarak 500s'lik bir süreci gözlemlemişlerdir. Farklı havalandırma hızlarında, yangın algılama sistemlerinin

performanslarını gözlemlemek ve alarm noktalarının tepki sürelerini incelemek için 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 m/s hava akış hızları için analizler yapmışlardır. Uzunlamasına havalandırmanın tünel yangın tespiti üzerindeki etkisini incelemek için farklı yangın durumları ve boylamsal hız ile birçok yangın senaryosunu ele almışlardır. Sonuç olarak yangın algılama sisteminin tepki süresinin boylamasına hızın büyümesiyle arttığı, uzunlamasına hızın havalandırma talebini karşılamanın mümkün olduğu kadar düşük olduğu bir hızda olması gerektiği, 3m/s değerinin referans değer olarak optimum olabileceği kanaatine varıldığını belirtmişlerdir.[14]

Palazzi ve diğerleri birlikte yürüttükleri bir çalışmada ise, eğimli tünellerde kritik havalandırma hızını hesaplamak amacıyla bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu model aracılığı ile problemin; kütle, momentum ve enerji denklemlerini çözmüşlerdir. Çalışmalarının sonucunda, boyuna havalandırma sisteminin küçük ve orta uzunluktaki tüneller için tünel kazalarında meydana gelen dumandan insanları korumak için en iyi yöntem olduğunu gözlemlemişlerdir. Geri katmanlaşmadan kaçınmak için çok küçük bir havalandırma hızı gereklidir. Fakat aşağı yönde bir eğim olduğunda teorik olarak uzunlamasına havalandırmanın kullanışsız olduğunu belirtmişlerdir.[15]

## **2.2. Literatürde Yer Alan Deneysel Çalışmalar**

Ingason ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada, boyuna havalandırma sistemine sahip bir tünel yangınında kritik hızı ve geri katmanlaşma tabakasının uzunluğu üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla deneysel testler ve teorik analizler yapmışlardır. Deneysel 2 adet boyuna havalandırma sistemine sahip tünelde yapılmıştır. Tünellerde A olarak adlandırılan model 250mmx250mm (en x yükseklik) ve 12 m boya sahipken, B olarak adlandırılan tünel modeli 393mm yüksekliğe, 450 mm geniş çapa ve 380mm küçük çapa sahip olup 12m boyunda ve at nalı kesindedir. A model tünel içerisinde araç olmadan analiz edilirken, B model tünelin içerisinde 0,2mx0,15mx8m (yükseklik x en x boy) boyutlarındaki bir araç simetrik olarak konumlandırılmıştır. Bu model araç engel olarak sunulmuştur ve tünelin %20'sini kaplamıştır. Ayrıca iki

tünelde de belli aralıklarla ısı çiftler (termocouple) yerleştirilmiştir. Kritik hız, kritik Froude sayısı ve kritik Richardson sayısı deneysel bilgiler kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan küçük model tünel testlerinin sonuçları literatürdeki büyük ölçekli test sonuçlarıyla kıyaslanmış ve uyumlu olduğu belirtilmiştir. Boyutsuz kritik hız ve boyutsuz ısı salım oranı, kritik Froude sayısı ve Boyutsuz HRR, kritik Richardson sayısı ve boyutsuz HRR arasındaki ilişkiler grafiksel olarak sunulmuştur. Yapılan analiz sonuçlarında, kritik hızın, boyutsuz ısı salım oranının 0,15 değerine yaklaşırken meydana geldiği belirtilmiştir. Kritik Froude sayısının, ısı salım oranı (HRR) 0,15'e yaklaşırken neredeyse sabit ve 1,15 değerinde olduğu ve HRR'in 0,15'in üzerine çıktığında Froude sayısının lineer olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Geri katmanlaşma derinliğinin ısı salım oranı 0.15'in altındayken neredeyse boyutsuz ısı salım oranından bağımsız olduğu ve daha yüksek oranlarda iken sadece havalandırma hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.[16]

Tian ve diğerleri, uzunlamasına havalandırma tam ölçekli bir tünelde metanol-benzin karışımı olan çeşitli yakıtlarla gerçekleşen yangın kaynaklı dumanın, tünel içerisindeki sıcaklık dağılımını deneysel olarak farklı rüzgar koşulları altında incelenmiştir. Yapmış oldukları deneylerde, uzunluğu 52 m olan kesitine bakıldığında üst yarısı 1,6m yarıçapa sahip bir yarım daire, alt yarısı 1.6mx3,2m (yükseklik x genişlik) ölçülerine sahip bir tünel kullanılmıştır. Deneylerde metanol oranının %0, 15, 35, 50, 65 ve 85 olduğu 7 farklı metanol-benzin karışımı kullanılmıştır. Tünelde 3 çeşit havalandırma modeli ele alınmıştır. 1. modelde havalandırma rüzgâr hızı sıfır olacak şekilde kapatılmış, 2. ve 3. modellerde ise havalandırmalar aksiyel jet fanlar ve havalandırma kapıları tarafından oluşmaktadır. 7 farklı yakıt karışımı ve 3 farklı havalandırma modelinden meydana gelen 21 farklı senaryo için tünel merkezinde yangın kaynağı olarak kullanılan döküm tavanın yakılmasıyla deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, ışığında yürütülen deney sonucunda yangın kaynağının ısı yayma oranı ve tüneldeki rüzgâr hızının, maksimum tavan sıcaklığının konumunu büyük ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca; aynı havalandırma koşulları için daha büyük ısı yayma oranının maksimum tavan sıcaklığını, ateş kaynağına yaklaştırdığı belirtilmiştir. Metanol oranının artması ile ise duman konsantrasyonunun azaldığı gözlemlenmiştir.[17]

Sun ve diğerkleri tarafından yapılan çalışmada, dikey şaftlı doğal havalandırma sistemine sahip karayolu tünellerinde dikey şaft ve CO yoğunluğu, duman ısısı ve hızı, duman boşaltma etkinliğinin duman boşaltma verimliliğine etkisini ölçmek için deneysel olarak inceleme yapılmıştır. Deneyler 6mx2mx0,88m (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarında 1:6 ölçek oranına sahip bir model tünelde gerçekleştirilmiştir. şaft, tünelin sol girişinden 4,2m ileride, mil kesiti 30cm x 30 cm'dir. Tünel tavanına ve şaft dibine belli aralıklarla K tipi termocouple ve 3 adet anemometre yerleştirilmiştir. Tünelde doğal havalandırması olan ve olmayan hallerde şaftın açıklığında veya tünel tavanının altında bir CO konsantrasyon ölçüm noktası belirlenerek CO konsantrasyon gaz analizörü ile ölçümler yapılmıştır. Model tünelin sol ucundan 1,4m uzaklıkta, bütanın yakıt olarak kullanıldığı farklı boyutlarda yangınlar oluşturularak, doğal havalandırması olma ve olmama durumları için farklı deneyler yapılmıştır. Bu deneyler ışığında farklı senaryolar sonucunda, tünel içerisindeki sıcaklık ve hız dağılımları elde edilmiştir. şaftlar kullanılarak doğal havalandırmayla hava sürüklenme modunun araştırıldığı bu çalışmada şaft içindeki istif etkisinin, sıcak duman tabakası ve soğuk hava üzerinde bir karıştırma etkisi yarattığı, sürüklenen havanın bir kısmının şafttan aşağı doğru duman tabakasına karıştığı bunun da yetersiz bir duman tahliyesine yol açtığı kanaatine varılmıştır. [18]

Gao ve diğerklerinin yapmış olduğu bir çalışmada, karayolu tünellerinde olası bir yangın durumunda enine duman sıcaklık dağılımı ve uzunlamasına duman sıcaklık dağılımı arasındaki farkı incelemek için 6mx2mx0,88m (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarında 1:6 ölçekli doğal havalandırmaya sahip bir tünelde deneysel bir dizi çalışmalar yapılmıştır. Deneylerde duman sıcaklık dağılımlarını enine ve boyuna incelemek için yangın kaynağının yeri değiştirilerek farklı senaryolar hazırlanmıştır. Yangının yan duvarlardan farklı mesafelerde olması durumunda tünelde boyuna ve enine sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Sonuç olarak tünel yan duvarlarının bloke edici etkisi nedeniyle sıcaklık artışının enine bozulma oranının uzunlamasına olandan daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.[19]

Yuan ve diğeri, 1:5 oranında küçültülmüş doğal havalandırılmalı bir tünel yangınında duman yayılım özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapmış oldukları bu çalışmada tünel içerisinde ısı yayılım oranı, şaft mesafesi, şaft boyutu, tren tıkanıklığı ve duman perdesi gibi bazı faktörlerin etkisi araştırılmıştır. 15m uzunluğunda 0,7m genişliğinde ve 0,32 m yüksekliğinde bir model tünel kullanılmış, tünelin her iki yan cidarı 5mm kalınlığında sertleştirilmiş camdan yapılmış, tünel tabanı 5cm kalınlığında betondan ve tavanı 2mm kalınlığında çelikten yapılmıştır. Tünel tabanında 0,158m çaplı yakıt olarak propan gazının kullanıldığı gözenekli yatak brülörü kullanılmış olup, HRR'in duman yayılımına etkisini incelemek için 5,74 KW ve 11,48 KW değerinde iki farklı HRR kullanılmıştır. Ayrıca 4 farklı şaft boyutu incelenmiş olup, 7mx0,187mx0,18m (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarında bir model tren, tren tıkanıklığını incelemek için kullanılmıştır. Farklı senaryolarla bir dizi deneysel çalışma yapılmış ve sonucunda yangın büyüklüğü ve tren blokajının şaft mesafesinin ve şaft büyüklüğünün tüneldeki boyutsuz tavan sıcaklığı dağılımları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, tünelin yangın olmayan bölümünde şaft mesafesinin azalması veya şaft büyüklüğünün artmasıyla tavan sıcaklıklarının azaldığı, duman perdesinin dumanın tahliye kanalına yayılmasını önlediği, şaftlardaki boyutsuz duman sıcaklıkları, şaft mesafesi veya şaft boyutunun artmasıyla azaldığı, şaftlar arasındaki boyutsuz duman hacminin şaft mesafesinin azalması veya şaft büyüklüğünün artmasıyla arttığı belirtilmiştir.[20]

### **2.3. Literatürde Yer Alan Sayısal ve Deneysel Çalışmalar**

Zhao ve diğeri tarafından yapılan çalışmada tünellerde eğimin kritik hız üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal analiz için kullanılan model tünel 8,5mx200mx5m (en x boy x yükseklik) boyutlarına sahip olup, eğim tünelin orta noktasında 6mx1,8mx1m (boy x en x yükseklik) boyutlarında konumlandırılmıştır. Eğim ve yangın gücünün kritik hız üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla FDS programında; %3, %5, %7 ve %9 eğimlerinde ve 5 MW, 10 MW, 15 MW, 20 MW, 25 MW ve 30 MW yangın gücü değerleri için farklı senaryolar hazırlanmıştır. Bu senaryoların simüle edilmesi sonucu görülmüştür ki yangın gücü arttıkça kritik hız artmış, aynı yangın gücü altında ise tünel eğiminin

artışıyla kritik hızın arttığı görülmüştür. Deneysel inceleme yapabilmek için 1:8 ölçekli 7 adet 2m'lik segmentlerden oluşan totalde 14m uzunluğunda 1,063mx0,625m enine kesit boyutlarında maksimum %7 eğime sahip bir tünel yapılmıştır. Yakıt olarak doğalgaz kullanılmıştır. Deneyselerde ortam sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır. Deneyselerde %3, %5 ve %7'lik eğimler kullanılmış olup yangın gücü tam ölçekli tüneldeki 5 MW, 10 MW, 15 MW ve 18 MW' a tekabül eden 27,62 KW, 55,24 KW, 82,86 KW ve 99,44 KW olarak alınmıştır. Deneyselerden elde edilen sonuçlara göre eğim arttıkça kritik hızın arttığı ve düşük yangın gücü altında sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir.[21]

Ryou ve diğerleri en-boy oranının boyuna havalandırma sistemine sahip tünel yangınlarında duman hareketi üzerine etkisi sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla küçültülmüş ölçekli bir deneysel çalışma ve FDS programında nümerik bir çalışmayı birlikte yapmışlardır. Deneysel çalışma için gerçek uzunluğu 208m olan tünel için 1:20 oranında küçültülmüş olarak 10,4 m boyunda bir tünel kullanılmıştır. Bu tünelde 5 farklı en x boy oranı ve yakıt olarak da ethanol kullanılmıştır. Tünel tavanına termocouple yerleştirilmiş ve içerideki sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu verilen özelliklerdeki tünel için aynı zamanda FDS programında 200 s süreliğine 517000 adet mesh ile sayısal simülasyonlar farklı yangın güçleri için yapılmıştır. Yapılan analiz ve deneyselerden sıcaklık ve hız dağılımları elde edilmiş, en-boy oranının tünel yangınlarında dumanın büyüme ve gelişmesini etkilediği ve ayrıca deneysel ve nümerik sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmüş ve FDS programının tünel yangınlarını izlemede kullanılabilir güvenliğe olduğunu belirtmişlerdir.[22]

Wu ve Bakar tarafından yürütülen çalışmada, boyuna havalandırma sistemine sahip bir tünelde yangının ısı yayılım oranı ile tünel kesit geometrisinin kritik havalandırma hızı üzerine etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemektedir. Deneysel testler aynı yüksekliğe, fakat farklı kesit geometrisine sahip 5 adet küçük ölçekli tünel kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tünel akışının üç boyutlu simülasyonları ise Fluent programında standart k-ε türbülans modeli kullanılarak yürütülmüş, sonrasında deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel testler yapılırken yangın kaynağı olarak tünel zemininde bir yatak brülörü ve yakıt

olarak propan gazı kullanılmıştır. 1,4-28 KW'lık yangınlar üretilmiştir. Tünel ölçek boyutlarına bakıldığında 5m çaplı gerçek bir tünelde 2,5-50 MW'lık yangınlara karşılık geldiği ve bu nedenle de tipik araç yangınlarını temsil ettiği görülmüştür. Düşük ısı yayılım oranlarında, kritik hız HRR'in 1/3 gücü kadar değiştiği, ısı yayma oranının çok yüksek değerlere ulaştığında ise, kritik hızın bu orandan bağımsız hale geldiği ve kritik hızın belirlenmesinde kullanılmaması gereken bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Tünel içerisindeki hız profilleri ise beş farklı ısı yayılım oranında (1,5 KW-3 KW- 4,35 KW – 7,50 KW - 15 KW), Lazer Dopler Velosimetri (LDV) kullanılarak ölçülmüş ve hava hızı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu, yangına yaklaştıkça hava hızının arttığı, hava hızının neredeyse kritik hıza eşit olduğu sonucuna varılmıştır. Bütün bu deneylerin yanı sıra duman akışının simülasyonları Fluent ile gerçekleştirilirken, hız profillerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüş ancak sıcaklık tahmininin doğrulanması gerçekleştirilirken simülasyonlarda alev bölgesinin deneysel verilerden daha yüksek sıcaklıklar gösterdiği, sadece sürekli alevi tahmin edemediği, gerçek yangında olan aralıklı alevleri tahmin edemediği belirtilmiştir.[23]

Lou ve Qiu birlikte yürüttükleri çalışmada, yarı enine havalandırma sistemine sahip karayolu tünellerinde duman boşaltılmasında tünel eğiminin etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmalarında yangın simülasyonu nümerik olarak yapılırken FDS programı ve LES modeli kullanılmıştır. Bunun için 10mx0,9mx0,5m (boy x en x yükseklik) boyutlarında bir model tünel test için belirlenmiştir. Tünel içerisinde %3 ve %6 eğim olması durumunda sıcaklık dağılımları hesaplanmış, deneysel ve nümerik sonuçlar grafiksel olarak verilmiş ve uyumlu olduğu belirtilmiştir. 30 MW gücünde bir yangın çıkması durumunda tünel tavanına eşit aralıklarla yerleştirilen 3mx3m boyutlarındaki duman havalandırma fanları ile yapılacak olan yangın modeli incelenmiştir. Bu model tünelde %0, %1, %1,5, %2, %3 ve %5 'lik eğim olması durumları ve farklı fan havalandırma debileri için farklı senaryolar oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda tünel içerisindeki duman dağılımları elde edilmiştir. Eğimli tünelde iki yönlü dengeli duman egzoz stratejisi dumanın yayılmasını engellemediği, tünel eğiminin %1,5 'ten büyük olduğunda tek taraflı duman egzoz stratejisinin fanların enerji tüketimini azalttığı belirlenmiştir.[24]



Bu tez çalışması kapsamında ise yangın tahliye sisteminin sayısal olarak incelenebilmesi için 8x8x200 m boyutlarında bir karayolu tüneli ele alınmıştır. Bu tünelde 5 MW ve 50 MW olmak üzere 2 farklı yangın gücü, tünel girişinden 25 m, 75 m, 125 m ve 175 m uzaklıkta olmak üzere 4 farklı konumda konumlandırılarak simüle edilmiştir. Söz konusu tünelde tünel girişinden 50 m, 100 m ve 150 m uzaklıklarda olmak üzere toplamda 3 adet aksiyel jet fan yerleştirilmiştir. 30 m/s, 50 m/s, 70 m/s fan hızları; bütün fanlar kapalı, sadece 1. fan açık, sadece 2. fan açık, sadece 3. fan açık ve bütün fanlar açık olacak şekilde farklı 120 adet senaryo oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır.

Hazırlanan yangın senaryoları ile yürütülen analiz sonuçlarında karayolu tüneli içerisinde meydana gelen yangının ve yangın kaynaklı dumanın can ve mal güvenliği için olumsuz olabilecek etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Bu amaçla yangın boyutu, yangın konumu, fan hızı ve fanların açıklık-kapalılık durumu incelenmiş olup, tünel içerisindeki sıcaklık, duman, CO ve O<sub>2</sub> dağılımı görüntülenmiş ve tünel içerisinde belli konumlara yerleştirilen sıcaklık, CO ve O<sub>2</sub> ölçerlerden alınan verilere göre sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak optimum tahliye sistemi elde etmek amaçlanmamış olup durum analiz çalışması yapılmıştır. Ayrıca diğer çalışmalara oranla sonuçları etkileyebilecek daha fazla parametre incelenmiştir.

### **3.MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1.Temel Olarak Yangın**

Isı, yakıt (yanıcı madde) ve oksijenin uygun oranda bir araya gelmesiyle başlayan reaksiyona yanma; yanma olayının kontrol dışı gelişen haline yangın denir. Yangın sırasında alevin, yakıtın ve çevresinin birbirleriyle etkileşimi çoğunlukla doğrusal değildir. Kapalı bir ortam içinde malzeme yanıyor, yangın gücüne ve yanma hızına etkili olan başlıca iki parametre vardır. İlki, sıcak gazların tavan kısmında birikmesi sonucunda tavanın ve duvarların ısınması; dolayısıyla bu yüzeylerin ve sıcak gaz katmanının yakıt yüzeyine doğru ışınım yoluyla ısı transferi yaparak yanma hızını arttırmasıdır.

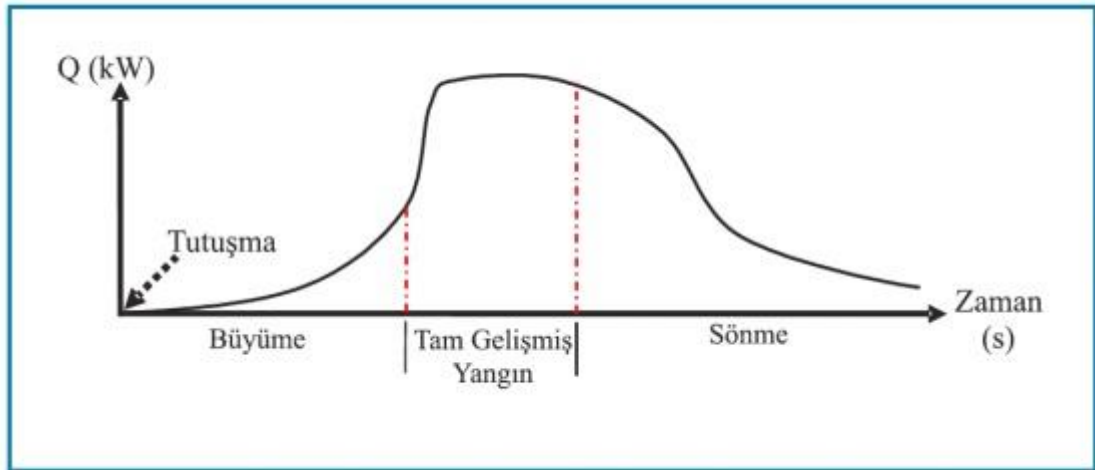
İkinci etken ise, ortamdaki havanın giriş yapabileceği kısımların kısıtlı olması sonucunda yanma için gerekli olan oksijen miktarının elde edilebilirliğinin sınırlanmasıdır. Bu nedenle malzemelerin yanma hızı ve çevreye yaydıkları ısı gücü azalmakta ve yanmayan gazların oranları artmaktadır. “Kapalı hacim yangını” terimi yangının bir oda veya buna benzer şekilde etrafı çevrelenmiş bir alanda çıkması durumunda kullanılan bir terimdir. Tünelde meydana gelen yangınlar, kapalı hacim yangınları olarak sınıflandırılırlar. Fakat tünel yangınında yolcu tahliyesi için gerekli olan acil durum havalandırma sistemi, yanma için gerekli olan oksijen miktarından fazlasını sağlamaktadır. Araştırmalar sonucunda, tünelin içindeki bir yangının ısıl gücünün (yangın yükü) aynı malzemelerin kullanıldığı açık hava yangınının ısıl gücünden dört kat fazla olduğu tespit edilmiştir.[2]

##### **3.1.1.Yangının Gelişim Eğrisi**

Yangın, dört evreden oluşmaktadır. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yangın sırasıyla; tutuşma, büyüme, tam gelişmiş yangın ve sönme evrelerinden oluşmaktadır.

Tutuşma, yangının başlaması için gerekli olan enerjinin verilmesi sonucunda yanma reaksiyonunun başlaması olayıdır. Tutuşma bir alev kaynağından olabileceği gibi ortamdaki sıcaklığın yükselmesiyle de olabilir. Yangının büyüme evresinde ise

yangın gelişimi; yanan malzemelerin özelliğine, ortamdaki oksijenin miktarına, ortam konfigürasyonuna ve yanma tipine bağlı olarak hızlı veya yavaş olabilir. Çevredeki malzemelerin ortamdaki ısı transferi sonucunda sıcaklıkları artarak yanmaya başlarlar. Sıcaklığın artması sonucunda öyle bir an gelir ki ortamdaki cisimlerin birçoğu tutuşma sıcaklığına ulaşarak aniden yanmaya başlar. Bu ani reaksiyon parlama (flashover) olarak tanımlanır. Bu evreyi takip eden tam gelişmiş yangın evresinde ise, ortamdaki tüm yanıcı maddelerin yanmaya başladığı düşünülür. Bu evrede yangının ısı gücü en yüksek değere ulaşır ve ortamdaki oksijen miktarı azdır. Tam gelişmiş yangın evresinde, yangının büyümesi oksijen miktarı ile sınırlıdır. Sönme evresinde ise ortamdaki yanan malzeme tükenmesi sonucunda yangın ısı gücü azalmaktadır. Bu evrede yangın yakıt kontrollü bir yangın durumundadır.[4]



Şekil 3.1. Yangının evreleri [6]

### 3.2. Tünel Havalandırma Sistemleri

Günümüzde artan nüfus, gelişen ekonomi, malların taşınması ihtiyacı sebebiyle taşıt sayısındaki artıştan ve karayolu mesafelerini dolayısıyla ulaşım sürelerini kısaltmak ihtiyacından dolayı ulaşım yer altından tünel adı verilen kapalı alanlardan yapılmaktadır. Tüneller kapalı hacimlere sahip olmaları sebebiyle havalandırmaya ihtiyaç duymaktadırlar.

Tünel havalandırması;

- Günlük Havalandırma
- Acil Durum Havalandırması

Olmak üzere 2'ye ayrılır.

Günlük havalandırmada amaç, tünel içerisinde bulunan hareket halindeki araçlardan meydana gelen egzoz gazlarının (CO, NO<sub>x</sub> vb.) ve PM (partikül maddeler; is, kum vb.) tünel havasını olumsuz etkilemesi sebebiyle tünel içerisinden seyreltilmesi ve uzaklaştırılmasıdır.

Acil durum havalandırması ise tünelde yangın çıkması durumunda tünelde meydana gelen dumanın geri katmanlaşmasını ve yayılmasını engellemek, zehirli gazların ve dumanın tünel çıkışından dışarıya atılmasını sağlamak amacıyla yapılan havalandırmadır. Tünelde yangın çıkması durumunda oluşan dumanın sıcak ve zehirli gazlar içermesi sebebiyle tünel içerisinde yayılması durumunda insan hayatını önemli derecede tehlikeye atabilmektedir.

Tünel havalandırma sistemlerinde genel amaç tünel içerisindeki havayı kirleten maddeleri, tünel içerisine temiz hava vererek seyreltmek, yangın durumunda oluşan dumanın kontrolünü sağlayarak sağlığa zararlı dumanı azaltmak, aynı zamanda görüş mesafesini de arttırmaktır.

Tünellerde yukarıda bahsi geçen amaçları karşılayabilmek için tünel boyu, tünel eğimi, trafik yoğunluğu, trafik tipi, çevre şartları vb gibi faktörler göz önüne alınarak maksimum faydayı sağlayabilecek tünel havalandırma sisteminin seçilmesi gerekmektedir.

Tünellerde havalandırma sistemi tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlardan aşağıda bahsedilmiştir.[6]

Tünel uzunluğu, tüp sayısı ve tünelin şehir veya kırsal kesimde olması; [6]

- Normal ve özel trafik durumlarında taze hava gereksinimi
- Tünel portallarında izin verilen kirli hava miktarı
- Yangın güvenliği faktörleridir.
- Normal çalışma tasarım hali için aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır.

Normal çalışma tasarım hali için aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır; [6]

- Trafiğin yönü (tek yönlü, çift yönlü, dur-kalk trafiği vb.)
- Tünelin durumu (uzunluk, rampa, viraj, olası kaçış rotası vb.)

Tünelde yangın tasarımı için aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır; [6]

- Kaçış yollarının durumu
- Tehlikenin potansiyeli

Tünel havalandırma sistemleri Doğal Havalandırma ve Mekanik Havalandırma olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

### **3.2.1. Doğal Havalandırma**

Mekanik havalandırmaya gerek duyulmayan, tünel boyunun çok uzun olmadığı, yoğun trafik akışına sahip olup araçların piston etkisiyle ısı ve atık gazları tünel çıkışından kendileriyle birlikte akış yönünde sürüklediği dolayısıyla tünel içerisindeki ısı ve atık gaz konsantrasyonunu düşürmede yeterli gelebilen tünel içerisindeki hava hareketi sonucu oluşan havalandırma dır.

Doğal havalandırma genellikle günlük havalandırma için belli tünel kriterlerinde uygun görülmektedir. Bu kriter çok büyük oranda tünel uzunluğudur. Doğal havalandırma için müsaade edilen tünel uzunluğu ülkeden ülkeye değişmekte olup, çeşitli ülkeler için müsaade edilen değerler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

**Çizelge 3.1.** Farklı standartlarda tünel havalandırma gerekliliği [25]

STANDART	HAVALANDIRMA GEREKLİLİĞİ
France/Circ2000-63A2	Şehir içinde 300 m ve şehir dışında 500 m'den kısa tünellerde yapılmaktadır
Germany/RABT	600 m'den daha kısa tünellerde doğal havalandırma yapılmaktadır.
UK/BD78/99	300 m uzunluğa kadar piston etkisinin yeterli havalandırma yapacağı öngörülmektedir.
Netherlands/NL-Safe	250 m'den kısa tünellerde doğal havalandırma yapılabilmektedir.

Karayolları proje kriterlerinde trafik yoğunluğu 2000 araç/şerit ve uzunluğu 1000 m'den büyük tünellerde mekanik havalandırma zorunludur. Tünel, 5 km veya daha fazla boya sahip çok uzun bir tünel olsa dahi, trafik hacmi günde en çok 100 – 200 araç arasında ise, tünel mekanik havalandırma olmaksızın çalıştırılabilir.[4]

### 3.2.2 Mekanik Havalandırma

Tünellerde yangın çıkması durumunda meydana gelen duman, ısısı yüksek olduğu için ısınan hava yükselir prensibine bağlı olarak tünel tavanına doğru yükselir. Tünel tavanına gelen duman, duvarlar ve çevresel etkenler sebebiyle ısı kaybına uğrayarak soğuk havayla karışarak tekrar tünel tavanına doğru inmeye ve tünel içerisinde yayılmaya başlar.

Yangın durumunda uzun tünellerde dumanın tünel çıkış portalında meydana getirdiği istif etkisi sebebiyle insanların tünelden kaçışı mümkün olmayabilmektedir. Böyle bir durumda doğal havalandırma dumanın ve zararlı gazların atılması için yeterli gelmemekte, insan güvenliğini tehlikeye atmaktadır.

Doğal havalandırmanın yeterli gelmediği durumlarda kullanılması gereken havalandırma sistemi mekanik havalandırma sistemidir. Mekanik havalandırma sistemleri

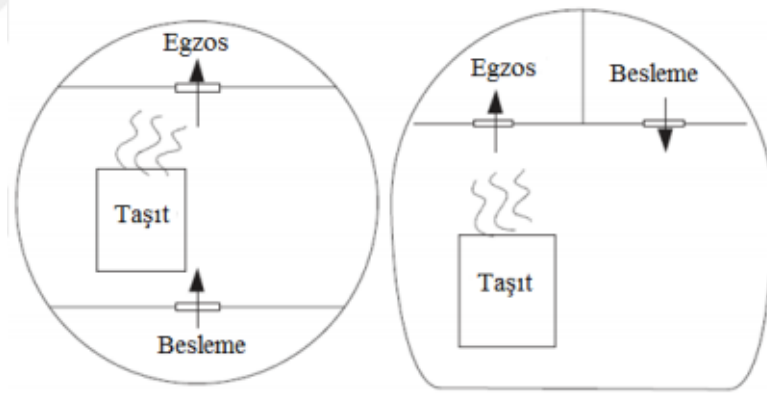
havalandırma menfezleri, jet veya normal fanlar, hava bacası (shaft) gibi havalandırma elemanlarından oluşmaktadır. Mekanik havalandırma sistemi genellikle çok uzun tünellerde kullanılmaktadır.

Mekanik havalandırma sistemleri;

- Eksene Dik (Enine) Havalandırma Sistemi
- Yarı Eksene Dik (Yarı Enine) Havalandırma Sistemi
- Eksenel (Boyuna) Havalandırma Sistemi

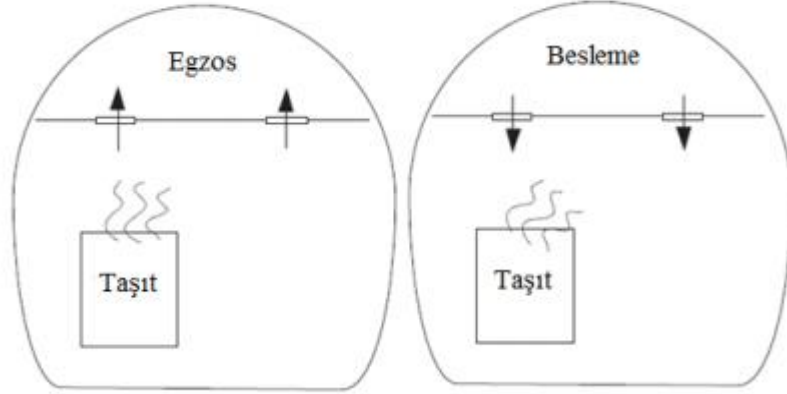
Olmak üzere 3'e ayrılmaktadır.

**Eksene Dik (Enine) Havalandırma Sistemi:** Tünel içerisinde genellikle tünel tabanına ve tavanına yerleştirilen menfezlerden oluşan havalandırma sistemidir. Tabana yerleştirilen besleme kanalı ve tavana yerleştirilen egzoz kanalı vasıtasıyla hava akışı eksene dik olarak gerçekleştirilir.[12] Eksene dik havalandırma sistemi örneği Şekil 3.2'de verilmiştir.



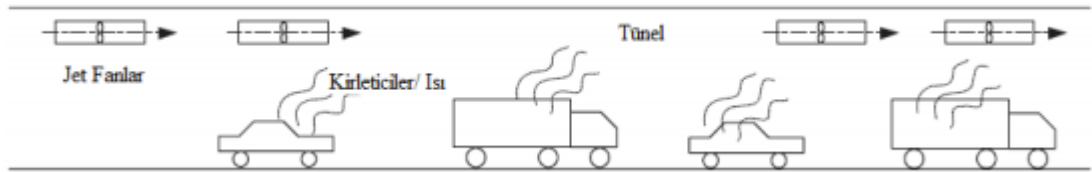
**Şekil 3.2.** Eksene dik havalandırma sisteminin şematik gösterimi [12]

**Yarı Eksene Dik (Yarı Enine ) Havalandırma Sistemi:** Eksene dik havalandırma sisteminden çok fazla farkı olmamakla birlikte aynı anda hem taze hava besleme kanalı hem de egzoz kanalı aktif olmayıp bunlardan sadece bir tanesi aktif konumda olabilmektedir.[12] Yarı eksene dik havalandırma sistemi örneği şekil 3.3' de verilmiştir.



**Şekil 3.3.** Yarı eksene dik havalandırma sisteminin şematik gösterimi [12]

**Eksenel (Boylamasına) Havalandırma Sistemi:** Genellikle jet fanlar veya normal fanlar ya da hava bacası (shaft) kullanılarak havalandırmanın gerçekleştirildiği sistemlerdir. Uzun tünellerde tercih edilen bir sistem olmakla birlikte tünel içerisinde tek yönlü homojen bir hava akışı meydana getirmeyi amaçlamaktadır. Jet fanlar birbirlerinin çalışmasını engellemeyecek şekilde aralarında mesafe olarak ve tünel geometrisinin gerektirdiği sayıda tünel tavanına ve nadiren yan duvarlara konumlandırılır.[12] Jet fanların kullanıldığı eksenel havalandırma sistemine ait şematik gösterim Şekil 3.4’ de verilmiştir.

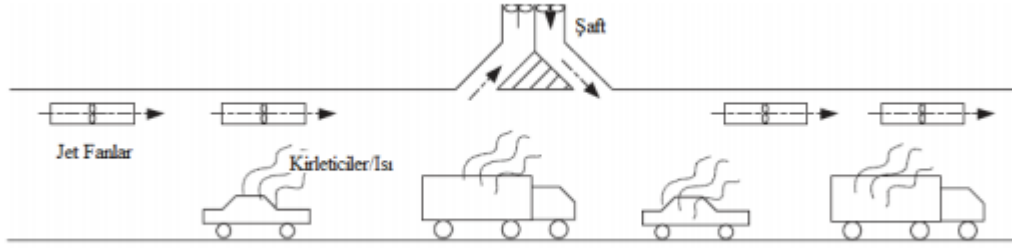


**Şekil 3.4.** Fanların kullanıldığı eksenel havalandırma sistemi [12]

Eksenel havalandırma sistemiyle yangın sonucu meydana gelen duman tünel boyunca tünel çıkışına doğru itici bir akış gerçekleştirir. Fakat çok uzun tünellerde tünel çıkış portalına yakın konumda duman istif etkisi söz konusu olabilir. Bu sebeple tünelin genellikle orta bölümünde konumlandırılan ya da uygun bir yerine



uygulanan hava bacası (shaft) kullanılmaktadır.[12] Hava bacasının kullanıldığı havalandırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Fan ve shaft kullanılan aksel havalandırma sistemi [12]

### 3.3 Tünellerde Yaşanan Kazalara Örnekler

Geçmişte karayolu tünellerinde birçok kaza meydana gelmiş ve kaza sonucu meydana gelen yangından dolayı can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Yaşanan önemli kazalardan bazıları aşağıda Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünel yangınları örnekleri [12]

Yıl	Tünel Adı/ Uzunluğu	Yer	Yangın Nedeni	Süre	Sonuçları		
					İnsan	Araç	Yapı
6 Ağustos 2011	Gleinalm/ L=8320 m	Avusturya	Kamyon ve Otomobilin Önden Çarpışması		5 Ölü 4 Yaralı	1 Ağır Yük Araç 1 Otomobil	
24 Ekim 2001	St. Gotthart L=16322 m	İsviçre	Çarpışma	2 Gün	11 Ölü	13 Ağır Yük Araç 10 Otomobil	Ağır Hasar
4 Haziran 2005	Frejus L=12900 m	Fransa/ İtalya	Motor Yangını		2 Ölü 21 Yaralı	4 Ağır Yük Araç	10 km' lik Onarılması Gerekli Ekipman

**Çizelge 3.3.** Tüm dünyada son yıllarda yaşanan büyük çaplı karayolu tünellerde yangınları örnekleri devamı [12]

16 Eylül 2006	Viamala L=700 m	İsviçre	Çarpışmada İki Otomobil ve Bir Otobüs		9 Ölü 5 Yaralı	Yangının Diğer Araçlara Sıçraması	Tünel Duvarında Hasar
23 Mart 2007	Bumley L=3400 m	Avustralya	Ağır Yük Aracı ve Otomobilin Ön ve Arka Çarpışma	1 Saat	3 Ölü 2 Yaralı	3 Kamyon 4 Otomobilde Çoklu Araç Hasarı	Hasar Yok
12 Ekim 2007	Newhall L=167 m	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=900 m	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	

### 3.4 Tünellerde Yangın Güvenliği

Yukarıdaki kaza örnekleri tünellerde yangın güvenlik önlemlerinin önemini gözler önüne sermektedir. Yaşanan kazalardaki ölümler tünel içerisindeki yangından kaynaklanan dumanın tünel içerisini kaplamasıyla görünürlük seviyesini düşürerek insanların kaçış yolunu kapatması ve tünelden kaçamayan insanların tünellerde oluşan

insan güvenliğini tehlikeye sokacak konsantrasyon oranındaki zehirli gaz ile zehirlenmesinden kaynaklanmıştır.

Bu sonuçlar demek oluyor ki tünellerde yangın çıkma ihtimaline karşı olumsuz kaza sonuçlarını en aza indirmek için tünellerde acil durum havalandırması çok önemlidir. Bu sebeple tünellerde yukarıda verilen seçim kriterlerine göre ve yine yukarıda bahsedilen havalandırma yöntemlerinden uygun olan havalandırma sistemi seçilmeli ve tünellerde uygulanmalıdır. Uygun havalandırma sistemi seçilerek olası bir yangın durumunda zehirli gaz konsantrasyonu temiz hava ile seyreltilerek en aza indirgenmeli ve dumanın tünel içerisinde yayılarak tüneli kaplaması engellenerek insanlar için uygun kaçış alanları sağlanmalıdır.

Bu bağlamda literatür özetleri bölümünde de bahsedildiği gibi karayolu tünellerinde uygun duman tahliye sistemlerinin belirlenmesi amacıyla pek çok deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmalar uygulama bakımından zorluğu ve bazen mümkün olmayışı sebebiyle araştırmacıları daha çok nümerik çalışmalara itmiştir.

### **3.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği**

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akışkan hareketini, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve ilgili olayların sayısal metotlarla bilgisayar yardımıyla çözülmesidir.[6]

Nümerik çalışmalar yapılırken Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları araştırmacıların işini kolaylaştırmıştır. HAD sayesinde analitik olarak çözülmesi mümkün olmayan ya da çok uzun zaman alan karmaşık akış problemleri kolaylıkla çözümlenmektedir.

HAD, akış problemlerinde süreklilik ve momentum denklemlerini aynı zamanda problemde ısı transferi ile ilgili bir olay bulunuyorsa enerji denklemlerini; incelenmek istenen yapıyı küçük ve çok sayıdaki hücrelere bölerek (mesh)

iterasyonlarla akış için gerekli kısmi diferansiyel denklemleri kolaylıkla çözümlenmektedir.

HAD'ın bahsedilen avantajlarından ötürü literatürde optimum duman tahliye sistemini belirlemede nümerik çalışmalar deneysel çalışmalara kıyasla sayıca daha fazladır.

Karayolu tünellerinde yangın konusu baz alınacak olursa tünel içerisindeki yangın HAD yazılımları tünel içerisindeki hava akışı ve dumanın tünel içerisinde yayılımı simülasyonlar yapılarak analiz edilir.

Bu yazılımlar sayesinde araştırmacılar birden fazla tünel geometrisinde farklı farklı parametrelerle optimum tahliye sistemini belirlemeye çalışırken deneysel olarak araştırılması mümkün olmayan çok sayıda analiz yapma şansına sahip olurlar.

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 nümerik modellemelerde gerçeğe oldukça yakın sonuçlar ışığında optimum duman tahliye sistemi geliştirilmeye çalışıldığı görülmektedir.[12]

### **3.5.1 Fire Dynamics Simulator (FDS) Programının Özellikleri ve Avantajları**

Bu çalışmada yangın ve duman yayılma durumlarını analiz etmek amacıyla yangın durumuna özel olarak geliştirilen, literatürde deneysel çalışmalarla güvenilirliği test edilmiş olan, Fire Dynamics Simulator (FDS) programı kullanılarak simülasyon senaryoları oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde Pyrosim paket programının deneme sürümü kullanılmıştır.

Bir CFD ( Computational Fluid Dynamic) programı olan FDS; türbülans, yanma, termal radyasyon, piroliz ve su spreyinin modellenbildiği bir yangın simülasyon programıdır. Bu çalışmada karayolu tünellerinde çıkabilecek olası yangın durumları

için önceden tahminlerde bulunabilmek ve önlem alabilmek amacıyla farklı geometrilerdeki tüneller ve farklı havalandırma koşulları için analizler yapılmıştır. FDS programı yangın dumanı yayılma karakteristiklerini, sıcaklık dağılımını, duman yoğunluğu ve diğer yangın tehlikelerini inceleme ve görselleştirme fırsatı sunar.

Pyrosim programı ise model geometrinin çizilmesine olanak tanıyan FDS için üretilmiş bir grafik ara yüz programıdır ve yangının modellenmesini sağlamaktadır. Analizler yapıldıktan sonra ise FDS içinde bir yardımcı program olan Smokeview ile sonuçlar görselleştirilmiş ve sunulmuştur.

FDS programı akışı modellemek için Large Eddy Simulation (LES) yöntemini, yanmayı modellemek için ise Karışım Kesri Modeli'ni (Mixture Fraction Model) kullanmaktadır. LES ve Karışım Kesri modellerini kullanması FDS' yi diğer birçok programdan avantajlı hale getirmiştir.

Yanma modeli, olarak Karışım Kesri Modeli'ni kullanması ise yangını bir yanma olayı varmışçasına simüle ettiğini gösterir. Diğer programlara bakıldığında yangın bir kütle olarak algılanır. Bu sebeple FDS bu açıdan da diğer programlara kıyasla bizlere daha gerçekçi sonuçlar vererek avantaj sağlamaktadır.

$$Z = \frac{sY_f - (Y_o - Y_{o\infty})}{sY_f + Y_{o\infty}} \quad (1)$$

Akış alanında herhangi bir noktadaki yakıt kaynaklı gaz bileşenlerinin kesirleri (the fraction of gas) aşağıdaki gibi tanımlanır. 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. [12]

Akışlar edilerle karakterize edilir. Edilerin fazla olması ise analiz süresini çok fazla uzatmaktadır. LES yani Büyük Edi Simülasyonu model üzerinde sadece büyük edileri simüle eder çünkü akışta sadece büyük ediler problemle alakalıdır. Küçük ediler akıştan bağımsız olduğu için sadece modellenir.

Bu amaçla küçük ediler için momentum korunum denkleminin "alt grid 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; [25]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{\partial C T}{\partial x_j} + \rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \rho H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (4)$$

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

$$\sigma_{ij} \equiv \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır.

### 3.6 Tünel Yangınları ile Alakalı Genel Hususlar

Tünel yangınları bir çok dinamik akış parametresinin birlikte yer aldığı bir konudur. Bu sebeple optimum duman tahliye sistemini belirlemeye çalışırken tek bir doğrudan karar kılmak oldukça zordur. Ayrıca çok fazla parametrenin olması sebebiyle aynı şartlardaki iki tünelde aynı yangınlar çıktığında da aynı sonuçlar doğmayabilir. Fakat tünel yangınları incelenirken dikkat edilmesi gereken temel parametreler vardır. Bu parametreler tünellerdeki olası yangın durumları için optimum tahliye sistemi belirlerken; yangın kaynaklı dumanın karakteristik özelliklerini ve tünel içerisinde

yayılmasını, yangın büyüklüğünü ve tehlikelerini belirlemede en temel hususlardır. Bunlardan bazıları; tünelin fiziksel modeli, tünel eğimi, tünel içerisindeki kritik hız ve yangın kaynağından salınan ve yangının büyüklüğünü belirleyen ısı salım hızıdır.

Yukarıda sayılan parametrelerden kritik hız duman tahliye sistemi belirlemek için en kilit tasarım kriteridir. Bu sebeple aşağıda daha detaylı olarak bahsedilmiştir.

### 3.6.1 Kritik Hız

Tünel içerisindeki hem hava akışına yön vermek hem de dumanın akış yönünün tersi yönde katmanlaşmasını (ters katmanlaşma) engellemek amacıyla yangın üzerinden akması gereken en düşük hava hızı değeridir. Kritik hız; tünel yüksekliği, kesit alanı ve eğimi, hava sıcaklığı ve özkütlesi, yangının ısı gücü (yükü) gibi parametrelere bağlıdır.[2]

Tünel içerisindeki yangın durumunda optimum havalandırma ve tahliye sistemi için çok önemli bir tasarım kriteri olan kritik hız, uygun havalandırma sisteminin seçilmesiyle uygun bir değerde tutularak duman ve atık sıcak gazların tüneldeki akış yönünde yönlendirilmesini sağlayarak insanlar için uygun bir kaçış yolu ve tehlike sınırında olmayan temizlikte bir hava sağlamaya yardımcı bir kriterdir.

Literatürde yapılan deneysel ve nümerik çalışmalara dayanılarak pek çok kritik hız teoremi geliştirilmiştir.

$$V_c = K \cdot K_g \cdot \left( \frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho \cdot C_p \cdot A \cdot T_f} \right)^{1/3} \quad (6)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot A \cdot V_c} + T \quad (7)$$

$$K_g = 1 + 0,0374(\text{eğim})^{0,8} \quad (8)$$

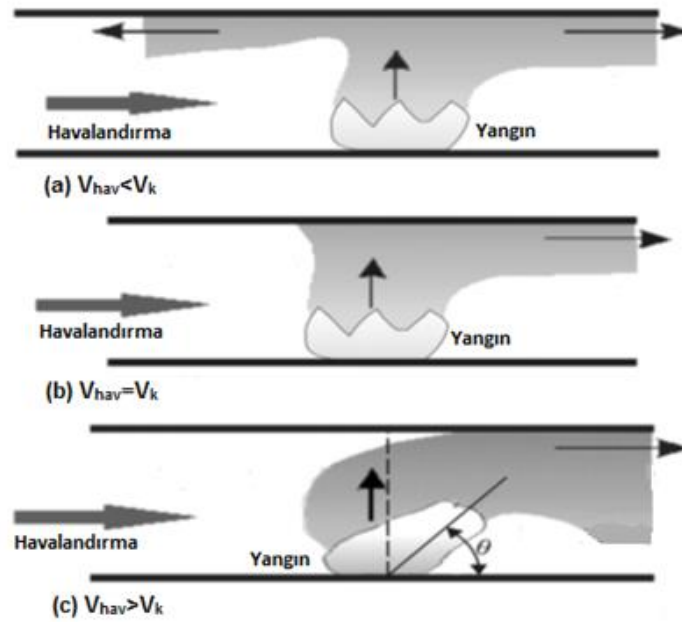
Yukarıda verilen kritik hız hesaplama formülü Kennedy tarafından geliştirilen bir formülüdür.  $V_c$  kritik hız [m/s],  $H$  tünel yüksekliği [m],  $Q$  yangın ısı gücü [W],  $g$  yerçekimi ivmesi [ $\text{m/s}^2$ ],  $\rho$  dış havanın özkütlesi [ $\text{kg/m}^3$ ],  $C_p$  havanın sabit basınçtaki

ısı sığası [J/kgK], A tünel kesit alanı [m<sup>2</sup>] olarak gösterilmiştir. T<sub>f</sub> duman sıcaklığı [K], K Froude sayısı faktörü 0,61 [ ], K<sub>g</sub> eğim doğrulama faktörü [ ], T<sub>a</sub> dış hava sıcaklığı [K] ve eğim % eğim değerinin mutlak değeri olarak gösterilmiştir. [2]

Karayolu tünellerinin tasarım kriterlerinin yer aldığı NFPA 502 standartlarına göre [27]; tünellerde havalandırma hızı kritik hızdan daha yüksek veya eşit olmalı aynı zamanda 11 m/s'den düşük olmalıdır. Böylelikle duman ve atık gazlar hava akışının olduğu tarafa doğru yönlendirilmiş olacaktır. Aksi halde duman, tüneldeki hava akışının tersi yönde geri katmanlaşacak (ters katmanlaşma) ve insanların yangın durumunda tünelden kaçışını zorlaştıracaktır.

### 3.6.2.Geri Katmanlaşma

İyi bir havalandırma sistemine sahip karayolu tüneline tünele verilen temiz hava akış hızı kritik hızdan düşük olmamalıdır. Düşük olduğu takdirde duman akış yönünün tersi yönde yayılacak ve istiflenecektir. Buna geri katmanlaşma denilmektedir. Geri katmanlaşmanın yaşanması tünelde iyi bir havalandırma sisteminin olmadığı anlamına gelmektedir. Aşağıda verilen Şekil 3.6'da bu durum görsel olarak anlatılmıştır.



Şekil 3.6. Kritik hız- havalandırma hızı ilişkisi [25]



Şekil 3.6.a'da havalandırma hızının kritik hızdan düşük olma durumu örneklendirilmiş ve duman tahliyesinin zor olduğu ve dumanın tünel içerisinde akışın tersi yönde yayıldığı, Şekil 3.6.b'de kritik hızın havalandırma hızına eşit olduğu ve böylelikle dumanın geri katmanlaşma yapmadan akış yönünde yönlendiği görülürken, Şekil 3.6.c'de ise havalandırma hızının kritik hızdan büyük olmasıyla beraber dumanın iyi bir şekilde tüneli terk etmeye yöneldiği açıkça görülmüştür. Tünel havalandırma sistemi tasarımında kritik hız ve geri katmanlaşma kriterlerinin çok önemli olduğu aşıkarken, bir diğer önemli parametre ise Isı Salım Hızı (HRR)'dir. Bu yüzden Isı Salım Hızı daha detaylı olarak incelenecektir.

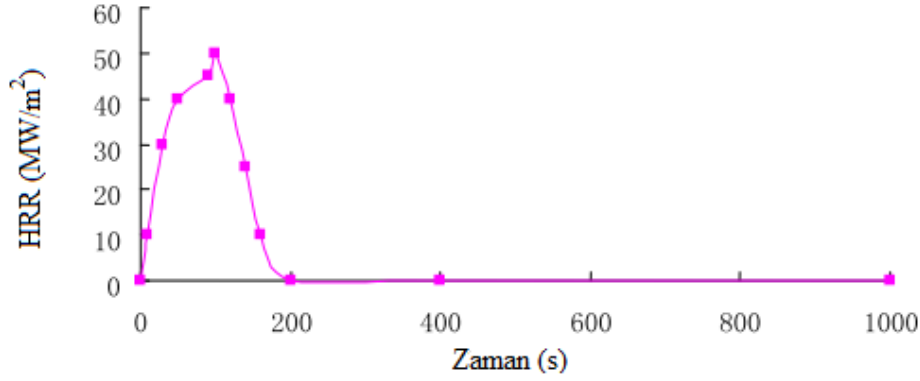
### 3.6.3 Isı Salım Hızı

Tünel yangınlarında; yangının büyüklüğü ve sonuçlarında en önemli kilit parametrelerden birisi de Isı Salım Hızı (Heat Release Rate-HRR) 'dır. ISH yangın kaynaklı duman ve atık sıcak gazlar ile yakıtın yanma hızı arasındaki ilişkinin bir göstergesidir. Genellikle MW olarak ifade edilir.

Tünellerde yangınlar çoğunlukla içerisindeki taşıtlardan kaynaklanır. Yangına sebebiyet veren aracın büyüklüğü, içerdiği yanıcı madde cinsi ve miktarı elbette ki yangının büyüklüğünü yani yangının ısı yükünü (gücünü) belirlemede çok önemlidir. Literatürdeki pek çok deneysel çalışma ile taşıt cinsine göre araçların ISH değerleri, olası yangın durumunda müdahale için öngörü olması açısından belirlenmeye çalışılmıştır.

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.[12]

ISH, yangın sürecinde enerji salınımının değişim sürecini açıklar. Bu nedenle yangın, sıcaklık, hız, basınç, alev uzunluğu, radyasyon, alev yayılımı, yangın süresi gibi diğer önemli parametreler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, aynı zamanda yangın faktörlerinin de kararlıdır. Rickard Hansen tarafından ölçülen malzeme yanma eğrisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. [1]



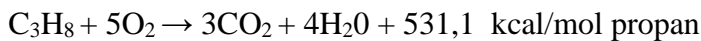
Şekil 3.7. Isı salım hızı-zaman ilişkisi [1]

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen, taşıt cinsine göre araçların yaydığı Isı Salım Hızı değerleri Çizelge 3.4’de gösterilmiştir. [11]

Çizelge 3.4 Taşıt türüne göre maksimum ISH değerleri [11]

Taşıt Türü	Max. Sıcaklık (°C)	Max. ISH(MW)
Otomobil	400-500	3-5
Otobüs ya da Raylı Araç	700-800	15-20
Büyük Kamyon ya da Tanker	1000-1200	50-100

Karayolu tünellerinde meydana meydana gelen taşıt kaynaklı yangınlar için yürütülen analizler incelendiğinde, literatürde modellenen yangınların bir kısmında da propan havuzu ele alınmıştır. Bu sebeple aşağıda propan için stokiyometrik yanma denklemi ve yanma sonucu açığa çıkan yanma ısısına yer verilmiştir.

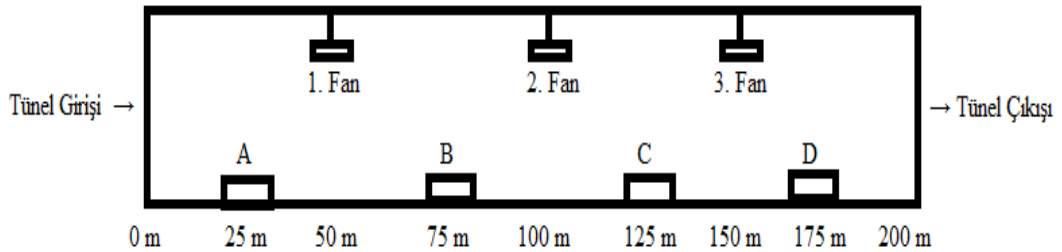


#### 4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında yangın tahliye sisteminin sayısal olarak incelenebilmesi için 8x8x200 m boyutlarında duvar kalınlığı 50 cm olan bir karayolu tüneli ele alınmıştır. Bu tünelde 5 MW ve 50 MW olmak üzere 2 farklı yangın gücü, tünel girişinden 25 m, 75 m, 125 m ve 175 m uzaklıkta olmak üzere 4 farklı konumda konumlandırılarak simüle edilmiştir. Tünel girişinden 50 m, 100 m ve 150 m uzaklıklarda olmak üzere toplamda 3 adet aksiyel jet fan yerleştirilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan model tünele ait şematik gösterim Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekilde verilen uzunluklar ölçekli olmayıp, gösterim amaçlıdır. Tünel içerisindeki yangın konumları aşağıda belirtildiği şekilde isimlendirilmiştir.

- Yangın 25 m’de iken konum: A
- Yangın 75 m’de iken konum: B
- Yangın 125 m’de iken konum: C
- Yangın 175 m’de iken konum: D



**Şekil 4.1.** Bu çalışmada ele alınan model tünelin şematik gösterimi

Fan hızının tünel içerisindeki duman ve sıcaklık dağılımına etkisini incelemek, yangın sonrasında insanların tüneli tahliye edebilecek görünürlük düzeyine erişebilmesini sağlayıp sağlamadığını analiz edebilmek amacıyla 30 m/s, 50 m/s, 70 m/s fan hızları; bütün fanlar kapalı, sadece 1. fan açık, sadece 2. fan açık, sadece 3. fan açık ve bütün fanlar açık olacak şekilde farklı 120 adet senaryo oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır. Bu senaryolarda yangının ilk 360 s’si zamana bağımlı olarak incelenmiştir.

Hazırlanan yangın senaryoları ile yürütülen analiz sonuçlarında karayolu tüneli içerisinde meydana gelen yangının ve yangın kaynaklı dumanın can ve mal güvenliği için olumsuz olabilecek etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Bu amaçla yangın boyutu, yangın konumu, fan hızı ve fanların açıklık-kapalılık durumu incelenmiş olup, tünel içerisindeki sıcaklık, duman, CO ve O<sub>2</sub> dağılımı görüntülenmiş ve tünel içerisinde belli konumlara yerleştirilen sıcaklık, CO ve O<sub>2</sub> ölçerlerden alınan verilere göre sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Yürütülen analizler yangın tahliye sistemleri için optimum sonucu bulmaya çalışmayı amaç edinmemiş olup, yalnızca karayolu tünellerinde olası yangın durumunda meydana gelebilecek yangın kaynaklı duman ve zehirli gazların hareketini incelemek, yangın gücünün ve konumunun bu izlenime etkisini görmek, aksiyel jet fanların hızının, konumunun, sayılarının yangın kaynaklı duman tahliyesini kolaylaştırmada ve zehirli gaz konsantrasyonunu düşürmede rolünü incelemek üzere yapılmış çalışma olup bir durum (case-study) çalışmasıdır.

#### **4.1.Referans Çalışmada Yer Alan Sayısal Analizin Doğrulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi**

Bu çalışmada ele alınan sayısal yöntemin güvenilirliğini test etmek amacıyla literatürde bulunan başka bir çalışma [1] referans olarak belirlenmiştir. Bu amaçla Jun ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma seçilmiş ve o çalışmadaki tüm geometrik boyutlar ve tüm sınır şartları aynı alınarak simülasyonlar yapılmış, elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla, Jun ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada incelenen 10x10x400 m boyutlarında ve girişine yerleştirilen bir adet fan ile boyuna havalandırma sistemine sahip bir karayolu tüneli ele alınmıştır. Tünel girişinden 200 m uzaklıkta 1x1 m boyutlarında meydana gelen 50 MW gücündeki yangın simüle edilerek, yangın başlangıcından itibaren ilk 1000 s için analiz yapılmıştır.

Yapılan analizlerin sonucunda tünel içerisindeki duman, sıcaklık, hız ve görünürlük dağılımları elde edilmiştir. Bu elde edilen veriler aracılığı ile, 400 m uzunluğa sahip

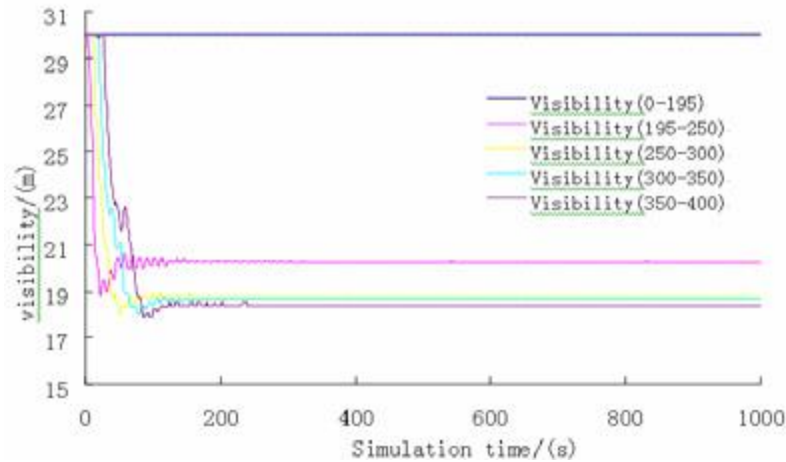
olan tünelin, 0-195 m, 195-250 m, 250-300 m, 300-350 m, 350-400 m aralıkları için görünürlüğün zamana bağlı grafikleri çizilmiştir.

Referans makalede kullanılan analiz için tünel boyutları ve bazı hesaplama parametreleri değerleri aşağıda verildiği gibidir.[1]

**Çizelge 4.1.**Referans makalede yer alan analiz giriş parametreleri [1]

Parametreler		Değerler
Tünel Boyutu		400m x10m x10m
Hava	P	28.96kg/kmol
	$\mu$	$1.81 \times 10^{-5}$ kg/m.s
	C	1006J/kg.K
	A	0.2637W/m.K
Kati	$\rho$	2300kg/m <sup>3</sup>
	$\mu$	840 J/kg.K
	C	1.6 J/kg.K

Yukarıda verilen boyutlar ve parametre değerleri kullanılarak 50 MW gücündeki yangının sebep olduğu dumanın 1000 saniyelik süre içerisinde, 0-195 m, 195-250 m, 250-300 m, 300-350 m ve 350-400 m tünel uzunlukları için, ortalama görünürlüğün zamana bağlı grafiği aşağıda Şekil 4.2' de verilmiştir.

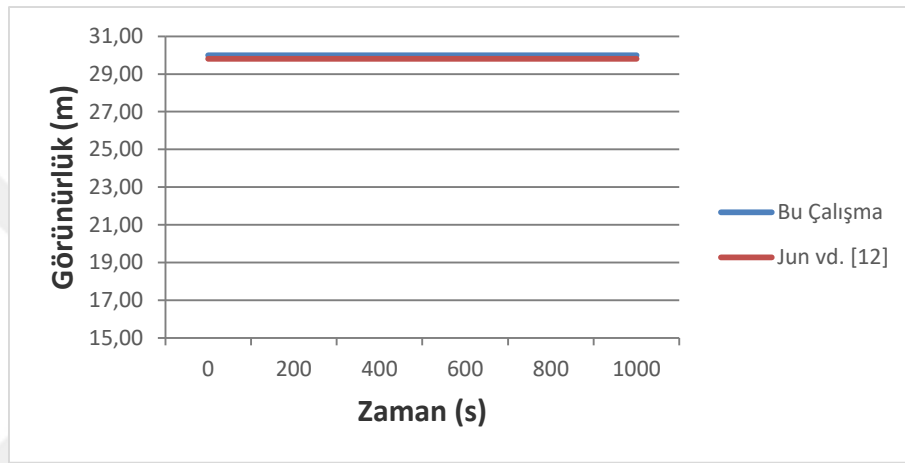


**Şekil 4.2.** Farklı Alanlardaki Ortalama Görünürlüğün Karşılaştırılması [1]

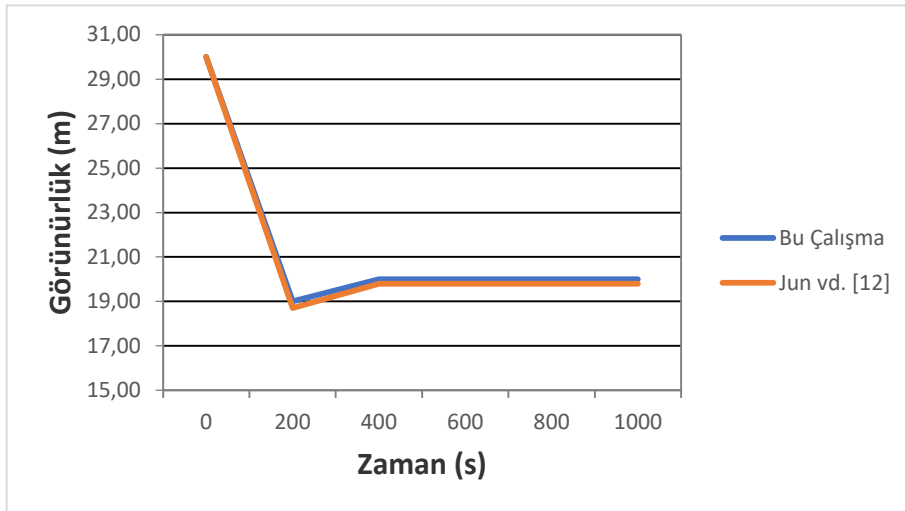
Şekil 4.2'de verilen grafikte de görüldüğü üzere tünelin girişinden 195 m. kadar olan bölümünde görünürlük düzeyi yüksektir. Bu da bu alanın insanların tüneli terk

edebilmesi için uygun olduğunu göstermektedir. Fakat 195-250 m, 250-300 m, 300-350 m, 350-400 m. yangın başladıktan sonra ilk 200 s içerisinde tünel içerisindeki görünürlük düzeyinin yüksek olduğu fakat 200 s.'den sonra görünürlük düzeyinin düştüğü ve tüneli boşaltmak için imkânları zorlaştırdığı görülmektedir.

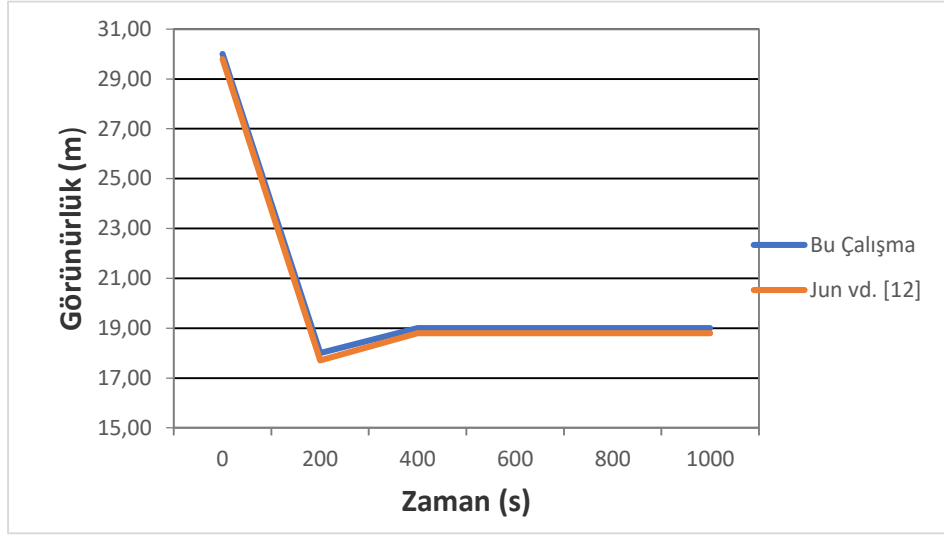
Bu çalışmada ve referans çalışmada elde edilen veriler için, tünel içerisinde ki aynı bölgeler için görünürlüğün zamana bağlı değişimi Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da birlikte verilmektedir.



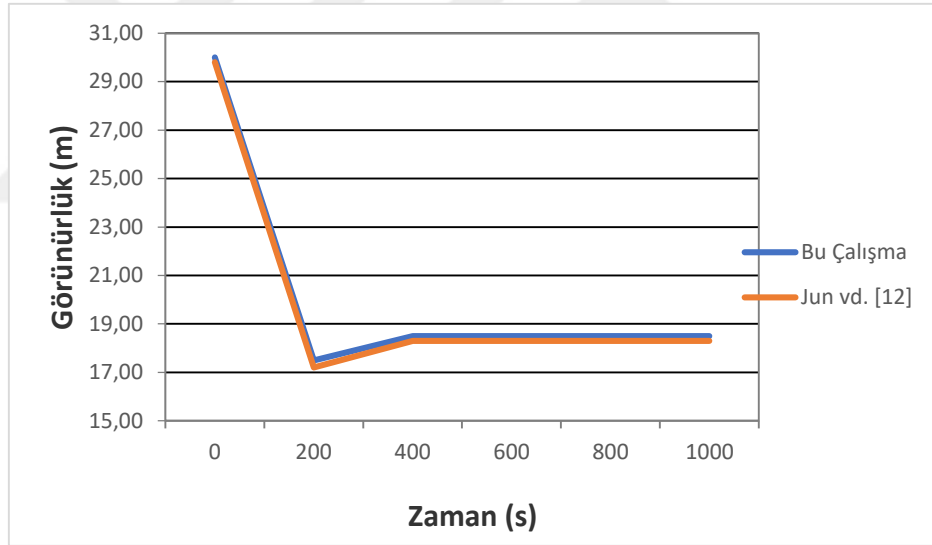
**Şekil 4.3.** Tünelin 0-195 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması



**Şekil 4.4.** Tünelin 195-250 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması

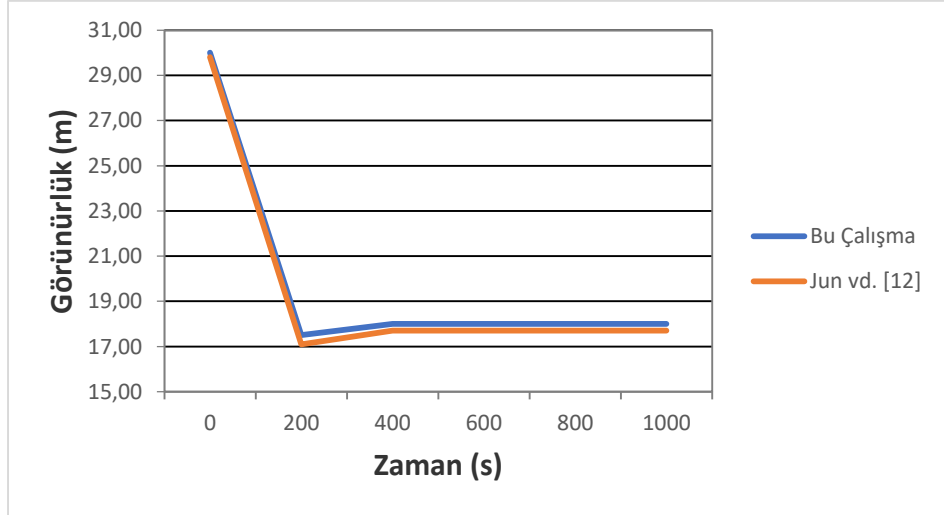


**Şekil 4.5.** Tünelin 250-300 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması



**Şekil 4.6.** Tünelin 300-350 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması

Şekillerden de anlaşılacağı üzere referans çalışmada verilen sonuçlar ve bu çalışma kapsamında yapılan doğrulama analizi sonucu elde edilen sonuçlara göre çizilen, tünel içindeki görünürlüğün zamana bağlı değişimini ifade eden eğrilerin oldukça uyumlu ve benzer olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.7.** Tünelin 350-400 m'sinin görünürlüğün zaman ile değişiminin literatür ile kıyaslanması

Şekillerden de görüldüğü üzere, her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar birbirleri ile oldukça uyumlu çıkmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada ele alınan sayısal yöntem ve kabullerin güvenilir seviyede olduğu söylenebilir.

#### **4.2 Bu Çalışmada Geliştirilen Yangın Senaryolarının Sayısal Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi**

Bu tez çalışması kapsamında yangın tahliye sisteminin sayısal olarak incelenebilmesi için 8x8x200 m boyutlarında duvar kalınlığı 50 cm olan bir karayolu tüneli ele alınmıştır. Bu tünelde 5 MW ve 50 MW olmak üzere 2 farklı yangın gücü, tünel girişinden 25 m uzaklıkta, 75 m, 125 m ve 175 m uzaklıkta olmak üzere 4 farklı konumda konumlandırılarak simüle edilmiştir. Tünel girişinden 50 m, 100 m ve 150 m uzaklıklarda olmak üzere toplamda 3 adet aksiyel jet fan yerleştirilmiştir.

Fan hızının tünel içerisindeki duman ve sıcaklık dağılımına etkisini incelemek, yangın sonrasında insanların tüneli tahliye edebilecek görünürlük düzeyine erişebilmesini sağlayıp sağlamadığını analiz edebilmek amacıyla 30 m/s, 50 m/s, 70 m/s fan hızları; bütün fanlar kapalı, sadece 1. fan açık, sadece 2. fan açık, sadece 3. fan açık ve bütün fanlar açık olacak şekilde farklı 120 adet senaryo oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır. Bu senaryolarda yangının ilk 360 s'si zamana bağımlı olarak incelenmiştir.



Hazırlanan yangın senaryoları ile yürütülen analiz sonuçlarında karayolu tüneli içerisinde meydana gelen yangının ve yangın kaynaklı dumanın can ve mal güvenliği için olumsuz olabilecek etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Bu amaçla yangın boyutu, yangın konumu, fan hızı ve fanların açıklık-kapalılık durumu incelenmiş olup, tünel içerisindeki sıcaklık, duman, CO ve O<sub>2</sub> dağılımı görüntülenmiş ve tünel içerisinde belli konumlara yerleştirilen sıcaklık, CO ve O<sub>2</sub> ölçerlerden alınan verilere göre sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan senaryolarda kullanılan tünelin geometrik özellikleri, yangın boyutları, fan konumları ve özellikleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Simülasyonlarda kullanılan analiz parametreleri

Tünel Boyutu : 8x8x200 m
Tünel Duvar Kalınlığı:50 cm
Yangın Boyutu:5 MW ve 50 MW
Yangın Konumu:25 m, 75 m, 125 m ve 175 m' de
Fan Konumu:50 m, 100 m, 150 m
Fan Hızı:30 m/s, 50 m/s, 70 m/s
Fan Açık/Kapalı Durumu: Hepsi Kapalı, Sadece 1 açık, Sadece 2 açık, Sadece 3 açık, Hepsi Açık

Ayrıca yapılan simülasyonlar için hazırlanan senaryolarda analizler birbirleriyle karıştırılmaması için aşağıda olduğu gibi isimlendirilmişlerdir.

Yangın çıkış konumunun 25 m olduğu durum için yapılan analiz: A

Yangın çıkış konumunun 75 m olduğu durum için yapılan analiz: B

Yangın çıkış konumunun 125 m olduğu durum için yapılan analiz: C

Yangın çıkış konumunun 175 m olduğu durum için yapılan analiz: D

Simülasyon isimlendirmelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için senaryolar 5 MW ve 50 MW olmak üzere iki farklı yangın boyutu üzerinden gruplandırılmıştır.

#### 4.2.1. Yangın Boyutu 5 MW İçin Yapılan Analizler

Karayolu tüneline meydana gelen yangının Isı Yayılım Oranı yani HRR değeri 5 MW olması durumunda yapılan analizler yangın konumuna göre (A.1), (B.1), (C.1) ve (D.1) olarak isimlendirilmiştir.

(A.1), (B.1), (C.1) ve (D.1) olarak isimlendirilen 4 analiz grubunun her biri ayrı ayrı olarak farklı fan hızlarında simüle edilmiştir. Fan hızının 30 m/s, 50 m/s ve 70 m/s olması durumuna göre isimlendirilen analizler Çizelge 4.3' de verildiği gibidir.

**Çizelge 4.3.** 5 MW yangın gücü için yürütülen analizlerin isimlendirmeleri

Fan hızı 30 m/s ise yapılan analizler	(A.1.1), (B.1.1), (C.1.1), (D.1.1)
Fan hızı 50 m/s ise yapılan analizler	(A.1.2), (B.1.2), (C.1.2), (D.1.2)
Fan hızı 70 m/s ise yapılan analizler	(A.1.3), (B.1.3), (C.1.3), (D.1.3)

#### 4.2.2. Yangın Boyutu 50 MW İçin Yapılan Analizler

Karayolu tüneline meydana gelen yangının Isı Yayılım Oranı yani HRR değeri 50 MW olması durumunda yapılan analizler ise yangın konumuna göre (A.2), (B.2), (C.2) ve (D.2) olarak isimlendirilmiştir.

(A.2), (B.2), (C.2), (D.2) olarak isimlendirilen 4 analiz grubunun her biri ayrı ayrı olarak farklı fan hızlarında simüle edilmiştir. Fan hızının 30 m/s, 50 m/s ve 70 m/s olması durumuna göre isimlendirilen analizler Çizelge 4.4' de verildiği gibidir.

**Çizelge 4.4.** 50 MW yangın gücü için yürütülen analizlerin isimlendirmeleri

Fan hızı 30 m/s ise yapılan analizler	(A.2.1), (B.2.1), (C.2.1), (D.2.1)
Fan hızı 50 m/s ise yapılan analizler	(A.2.2), (B.2.2), (C.2.2), (D.2.2)
Fan hızı 70 m/s ise yapılan analizler	(A.2.3), (B.2.3), (C.2.3), (D.2.3)

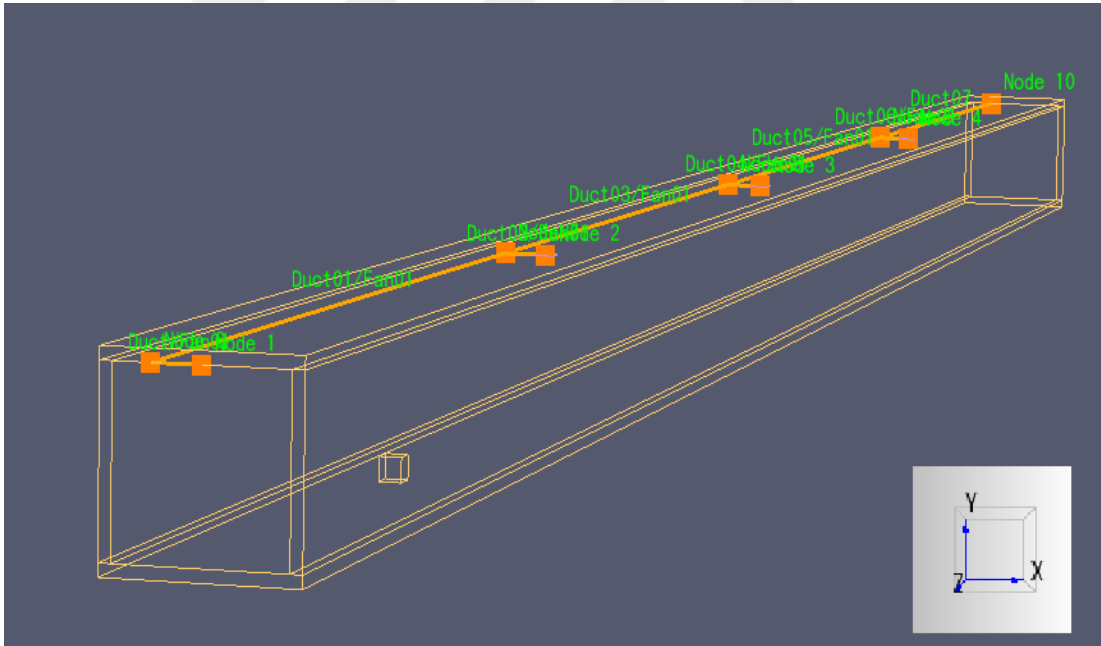
Yukarıda isimlendirilen, analizler için hazırlanan 24 adet yangın senaryosunun her biri; fanların hepsinin kapalı, fanların hepsinin açık, sadece 1 numaralı fanın açık, sadece 2 numaralı fanın açık, sadece 3 numaralı fanın açık ve bütün fanların açık

olduğu 5 farklı fan açıklık-kapalılık durumuna göre ayrı ayrı analiz edilerek toplamda 120 adet analiz yapılmıştır.

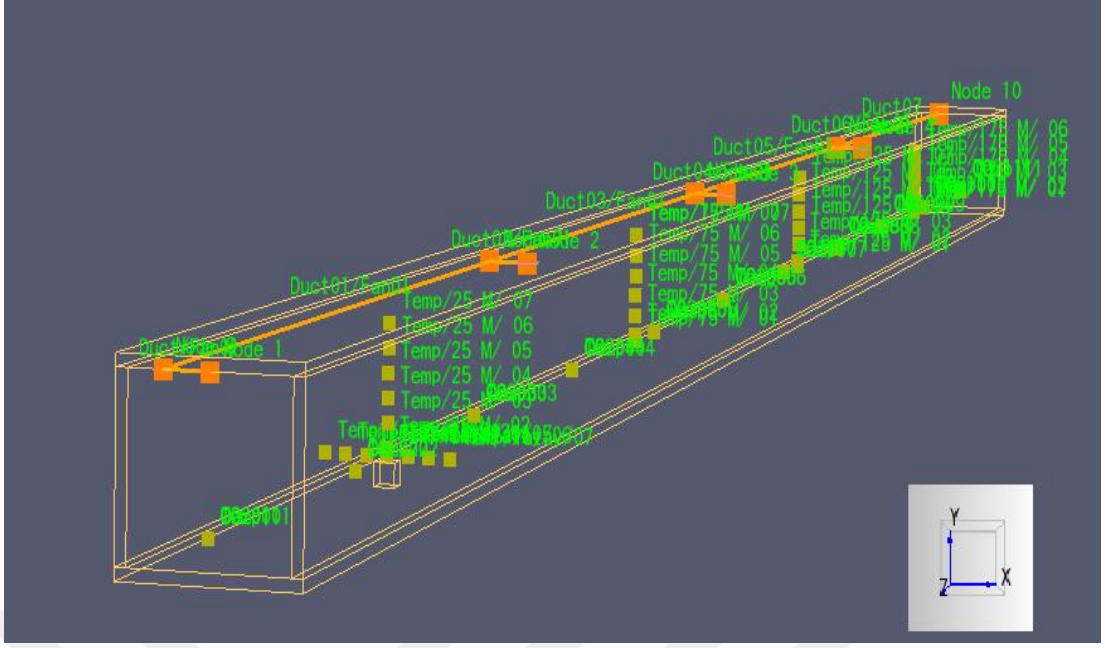
Bu analizlerden elde edilen veriler aracılığı ile, bir karayolu tünellerinde meydana gelebilecek olası yangın durumu için; açığa çıkan zehirli gaz yoğunluğunun ve yangın kaynaklı dumanın tünel içerisindeki hareketinin, tünel içerisinde meydana gelen sıcaklık artışının, yangın büyüklüğünün tünel içerisinden insanların tahliyesine olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

### 4.2.3 Tünelin Geometrik Özellikleri

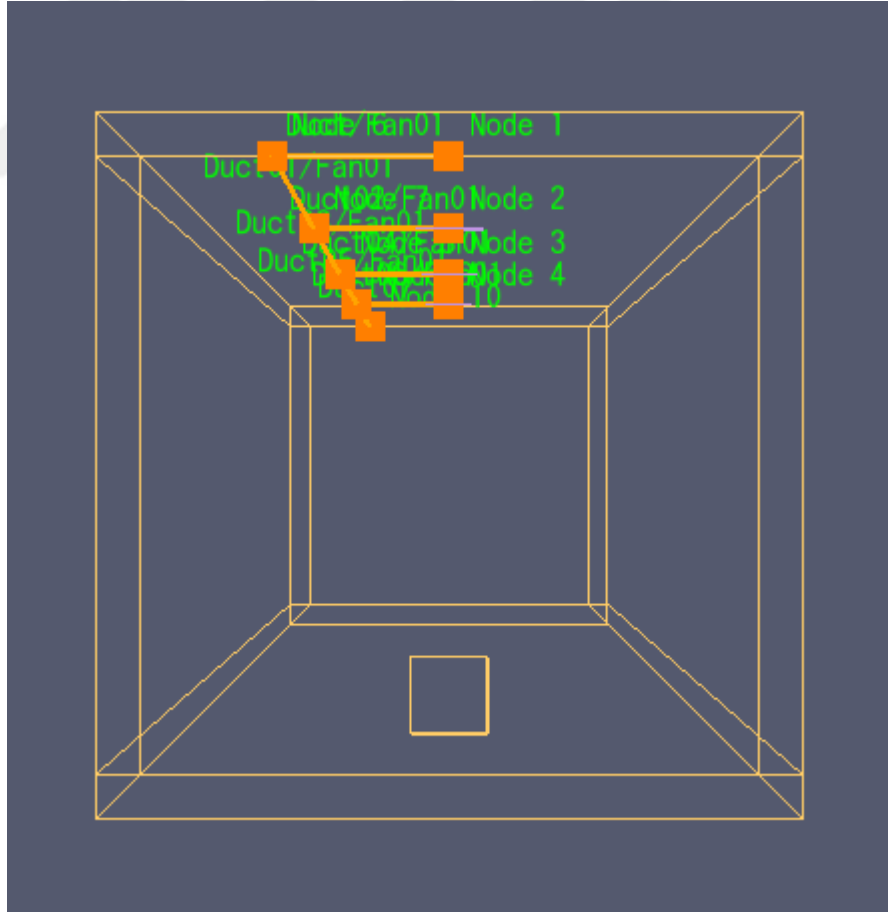
Bu çalışmada, 8x8x200 m boyutlarında duvar kalınlığı 50 cm olan bir karayolu tüneli ele alınmıştır. Söz konusu tünele ait geometrik görünüm Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.8. Tünel geometrisi izometrik görünümü



**Şekil 4.9.** Tünel geometrisi ekipmanlı izometrik görünümü



**Şekil 4.10.** Tünel geometrisi giriş görünüm

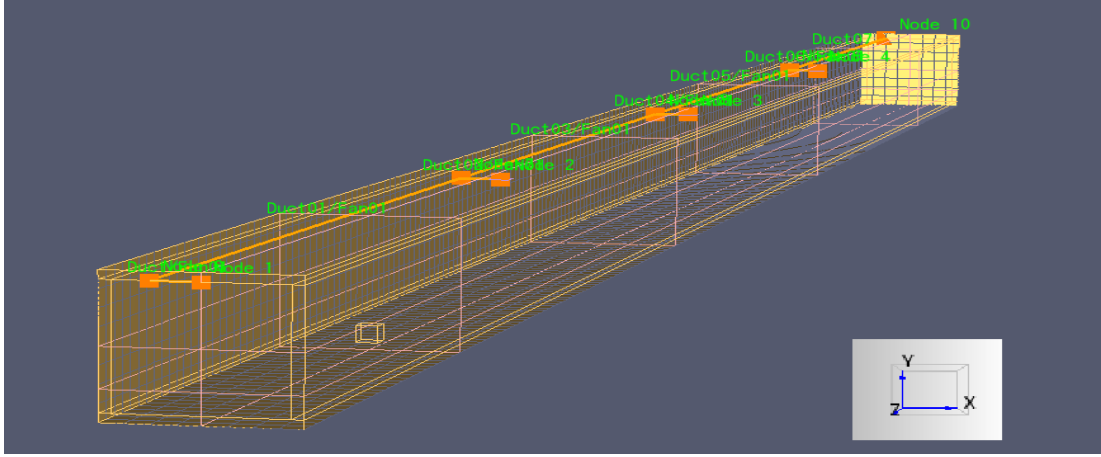
#### 4.2.4 Sayısal Yaklaşımı ve Optimum Mesh Yapısı

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, bu çalışma kapsamında yürütülen analizler FDS (Fire Dynamics Simulator) programında, Pyrosim arayüzünde ve Smokeview görüntüleyici yardımcı programında çalışılmıştır. Analizler programın deneme sürümü kullanılarak yapılmıştır.

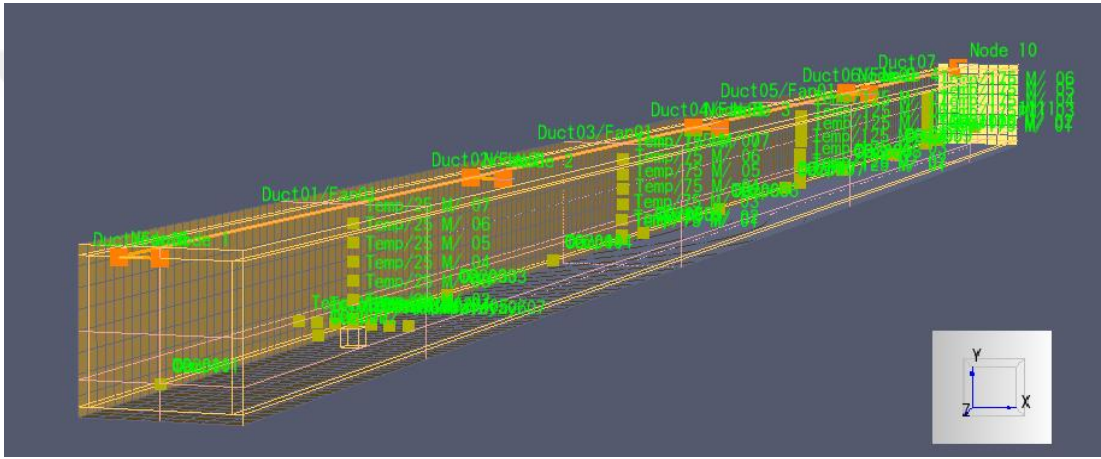
Söz konusu çalışmada yangın kaynağının incelenmesi amacıyla Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde zamana ve mekana bağlı algoritma kurulmuş olup, türbülans modeli olarak Large Eddy Simulation (LES) metodu seçilmiş ve bu yöntemle büyük ediler direkt olarak çözülürken küçük ediler alt grid ölçek gerilmesi bileşeni olarak modellenmiştir.

Oluşturulan model tünelin ağ yapısında kaba, orta ve sık mesh yapıları denenmiş olup, mesh sayısına göre analiz sonuçları hassasiyetinin değiştiği, kaba mesh sayısı verilerek yapılan analizlerde analiz sonuçlarının hassasiyet oranının daha düşük olduğu, mesh sayısı arttıkça yapılan analizlerin sonuçlarının deneysel verilere daha yaklaştığı gözlemlenmektedir. Fakat mesh sayısı arttıkça analiz süreleri oldukça uzamakta ve oluşturulan senaryoların her birinin analiz edilmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi düşünüldüğünde her bir analizin çok fazla vakit alacağı aşikârdır.

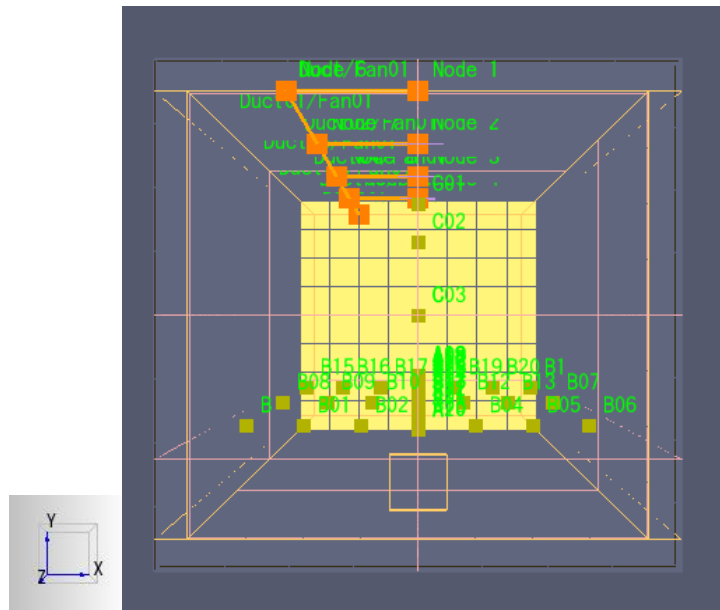
Bu sebeplerden ötürü bu çalışma kapsamında zaman ve hassasiyet faktörü göz önüne alınarak orta sıklıkta mesh yapısı kullanılmış olup, yapılan deneme çözümleri sonucu optimum mesh yapısı oluşturulmuştur. Bu modelin mesh yapısı oluşturulmuş görüntüsü izometrik ve tünel giriş görünümü olmak üzere Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Model mesh yapısı izometrik görünümü



Şekil 4.12. Model mesh yapısı ekipmanlı izometrik görünü



Şekil 4.13. Model mesh yapısı önden görünüm

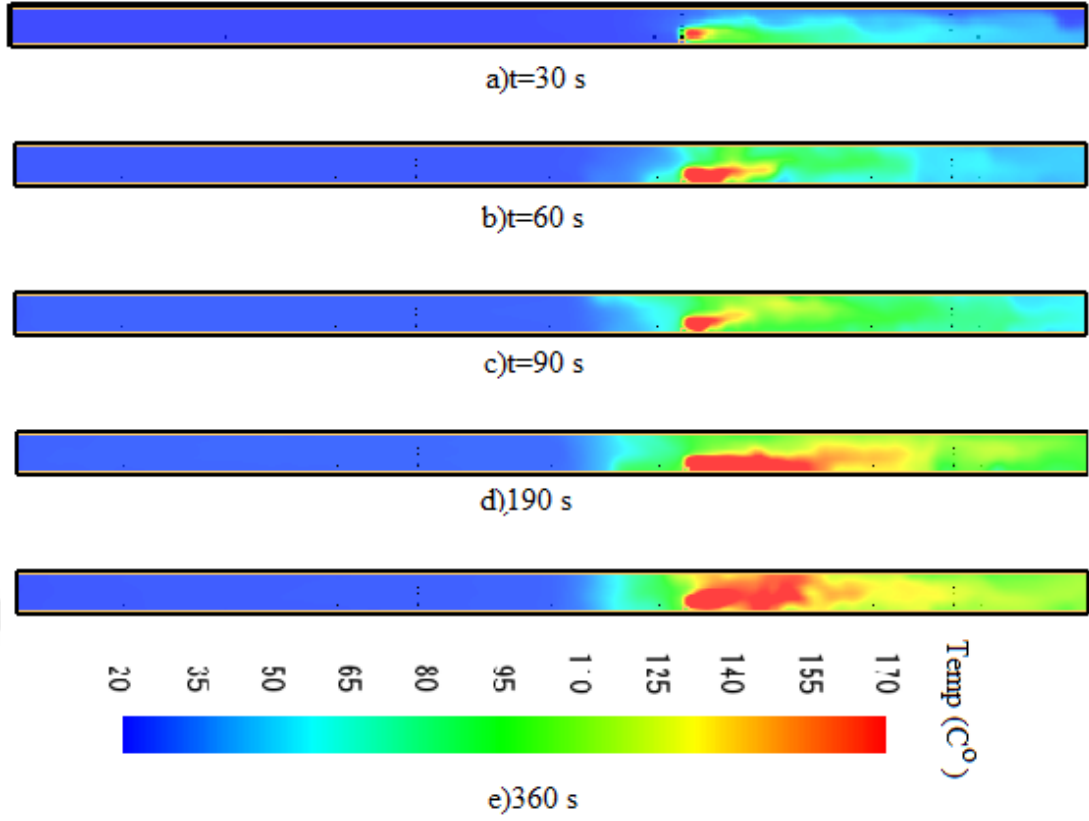
#### 4.2.5 Analizlerde Değerlendirilen Parametreler

Bu çalışma kapsamında literatürde de sıklıkla kullanılan bir tünel boyutu olan 8 m x 8 m x 200 m boyutlarında 50 cm duvar kalınlığına sahip bir model geometrisi ele alınmıştır. Bu model geometrisi için, tünel boyutları sabit tutularak yangın boyutu, yangın konumu, fan sayısı, fan hızı, fanların çalışma sıraları değiştirilerek zamana bağlı olarak 360 s boyunca analizler yürütülmüş ve sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.

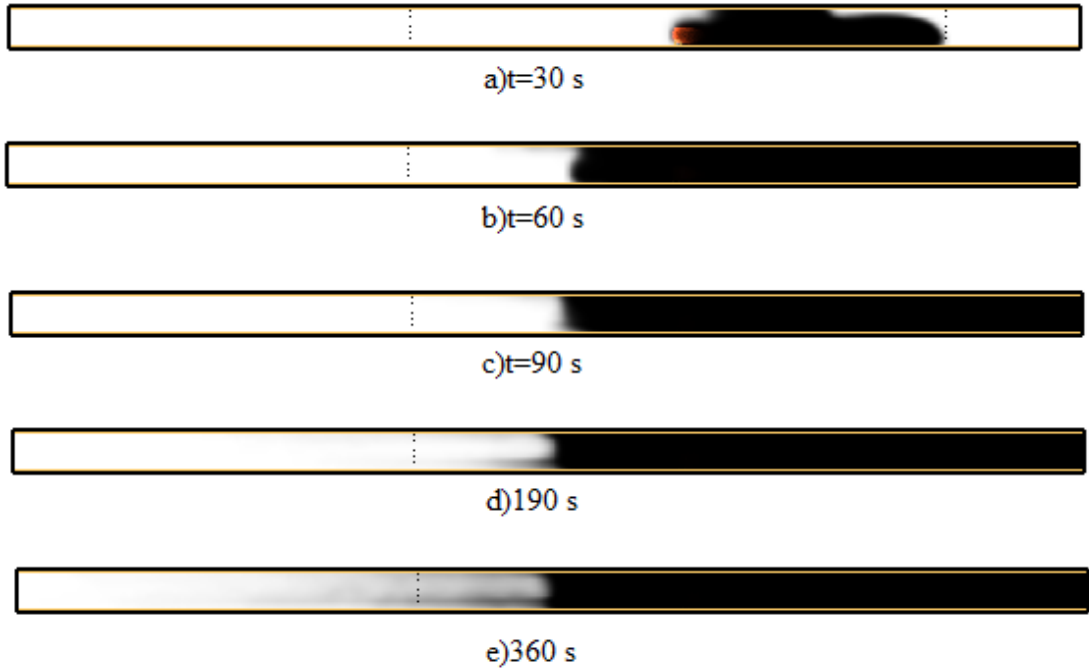
Yürütülen analizler sonucunda; yangın boyutunun, yangının tünel içerisindeki konumunun, tünel tavanına eşit aralıklarla yerleştirilen fanların açıklık kapalılık durumlarının ve fanların çalışma hızının, tünel içerisindeki sıcaklık, duman, CO ve O<sub>2</sub> dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, incelenen tüm bu değişik parametreler için toplam 120 adet zamana bağımlı analiz yapılmıştır. Tüm bu analizlerden elde edilen sonuçlar için çizilen grafiklerin burada verilmesi büyük yer kaplayacağı ve karışıklığa sebep olabileceği düşünülerek, seçilen bazı önemli analizlerden elde edilen grafikler aşağıda verilerek irdelenmiştir.

Buradan hareketle yukarıda Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te isimlendirmeleri verilen senaryolardan (B.1.1) olarak isimlendirilen yangın senaryosu; yani 8 m x 8 m x 200 m tünel boyutunda, 5 MW yangın gücünde, 30 m/s fan hızında, bütün fanların açık olması durumunda, tünel girişinden 75 m uzaklıkta konumlandırılan 1x1 m boyutlarında yangın için yapılan analiz sonucunda elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan, tünel boyunca sıcaklık, duman, CO, O<sub>2</sub> dağılımlarına ait görünüm ve grafikler aşağıda verilmiş olup, değerlendirmeler yapılmıştır. İlgili analiz sonucunda elde edilen tünel boyu sıcaklık dağılımı Şekil 4.14'de verilmiştir.

Şekil 4.14 incelendiğinde, tünel girişinden 75 m uzaklıkta 5 MW büyüklüğünde gerçekleşen bir yangın için, yangın başlangıcından itibaren zaman ilerledikçe, tünel içerisinde gözlemlenen sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir. Tünel içerisinde gerçekleşen yüksek sıcaklıkların ilk 90 s için yangının başladığı konumda gözlemlendiği, fakat bu andan itibaren tünelin çıkışına doğru yayıldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, incelenen bu durum için yangına müdahalede ilk 90 saniyenin oldukça önemli olduğu söylenebilir.



**Şekil 4.14.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s

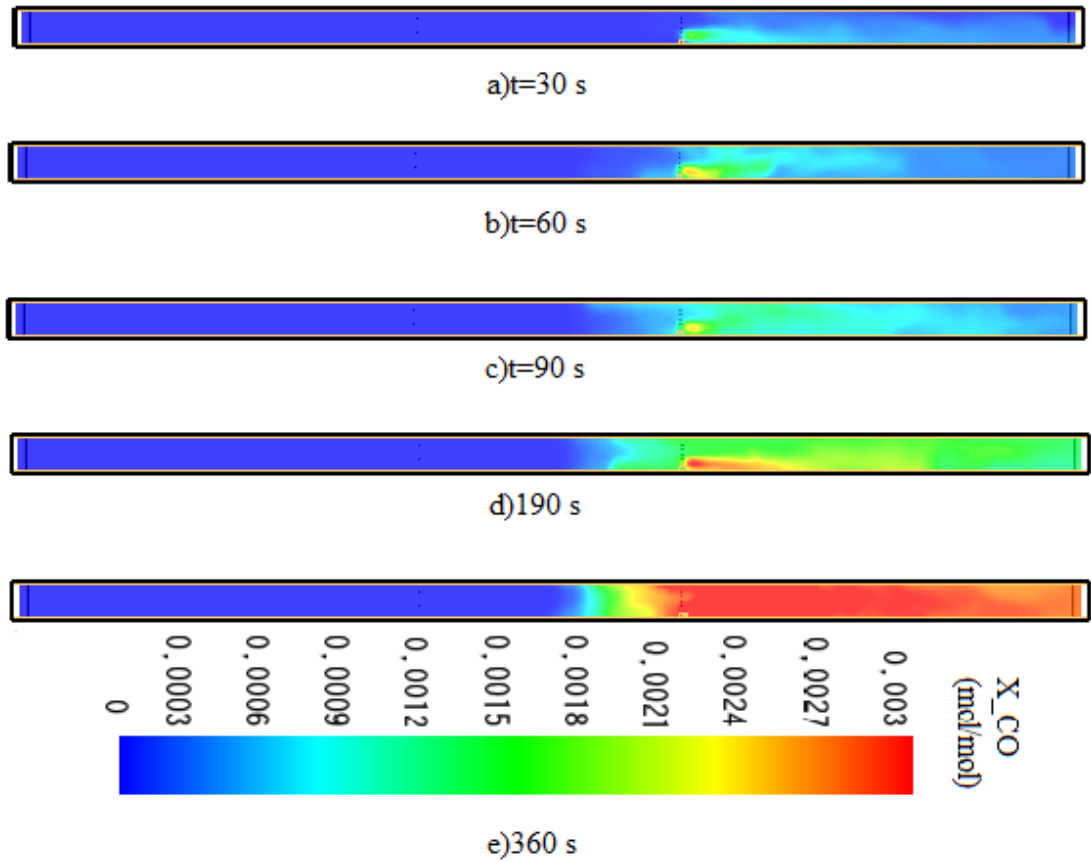


**Şekil 4.15.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki duman dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s



Tünelin 75. m'sinde çıkan 5 MW'lık bir yangın için, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durumda (B.1.1), tünel boyunca elde edilen duman dağılımlarının zamanla değişimi şekil 4.15'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde, yangın başladıktan sonra ilk 30 sn içerisinde yangın kaynaklı dumanın tünel içerisinde yayılmaya başladığı, fakat görünürlük düzeyini henüz çok fazla düşürmediği görülmektedir. Fakat zaman ilerledikçe dumanın tünel içerisine yayıldığı, görünürlük düzeyini fazlasıyla düşürdüğü ve havalandırmanın yeterli gelmediği görülmektedir.

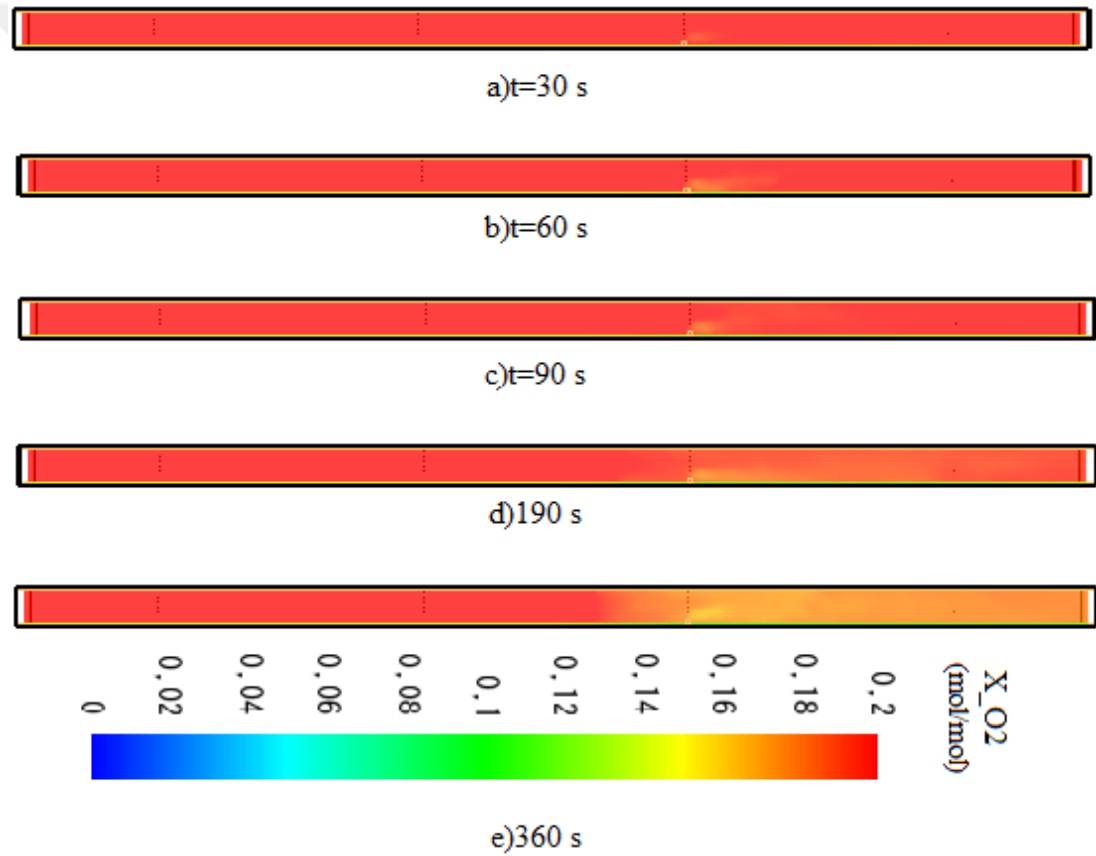
Tünelin 75. m'sinde çıkan 5 MW'lık bir yangın için, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durumda (B.1.1), tünel boyunca elde edilen CO dağılımlarının zamanla değişimi ise Şekil 4.16'da verilmektedir.



**Şekil 4.16.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki CO dağılımının zamanla değişimi; a)t=30 s, b)t=60 s, c)t=90 s, d)t=180 s, e)t=360 s

Şekil 4.16'da görüldüğü üzere tünel içerisinde yangın kaynaklı CO meydana gelmiştir. Yangının gerçekleştiği 75 m' de daha yoğun diğer bölgelerde daha az meydana gelen CO ilerleyen zamana bağlı olarak arttığı görülmüştür. Özellikle ilk 90 s için CO değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu, fakat bu andan itibaren tünel içerisinde hızla yayılarak insan sağlığı için tehlikeli seviyelere ulaştığı görülmektedir.

Tünelin 75. m'sinde çıkan 5 MW'lık bir yangın için, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durumda (B.1.1), tünel boyunca elde edilen O<sub>2</sub> dağılımlarının zamanla değişimi şekil 4.17'de verilmektedir.

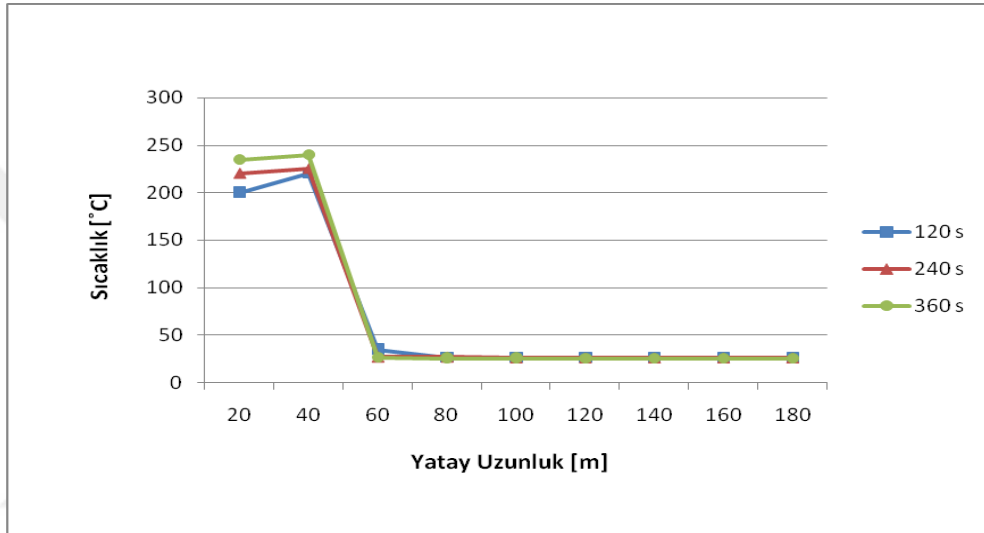


**Şekil 4.17.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için, tünel içerisindeki O<sub>2</sub> dağılımının zamanla değişimi; a) t=30 s, b) t=60 s, c) t=90 s, d) t=180 s, e) t=360 s

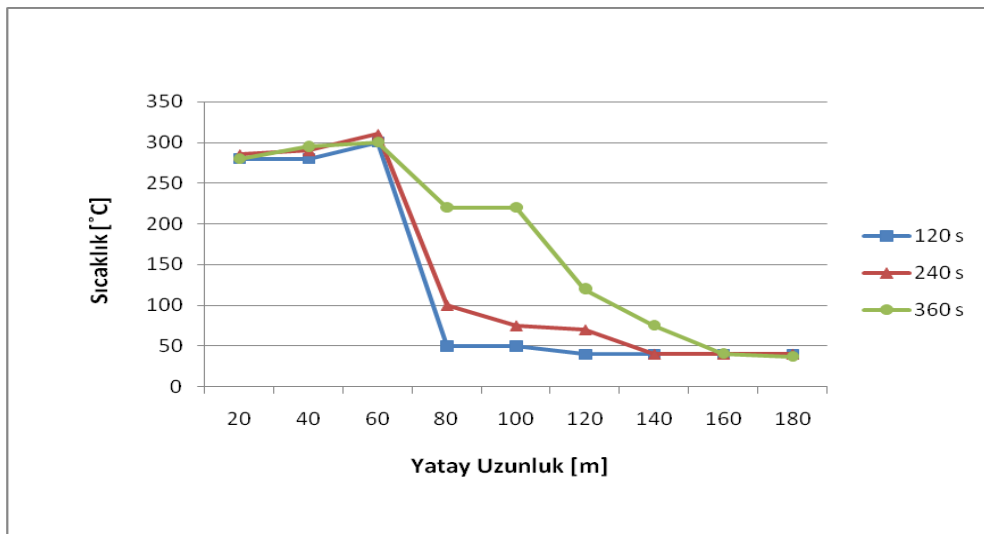
Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, ilerleyen zamana bağlı olarak O<sub>2</sub> oranı gittikçe düşmekte fakat insan hayatını tehlikeye atacak yoğunluk değerlerine

ulaşmamaktadır. Ayrıca  $O_2$  oranının özellikle yangın bölgesinde daha düşük diğer bölgelerde daha yüksek olduğu da görülmektedir.

Yangının 25 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki sıcaklığın tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.18.’de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.19.’da ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için sıcaklığın yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.



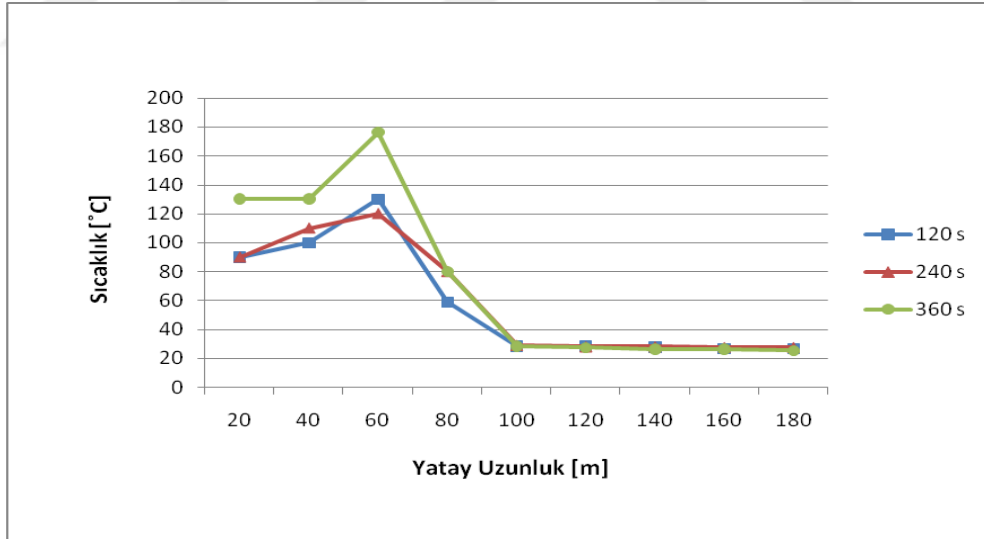
**Şekil 4.18.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi



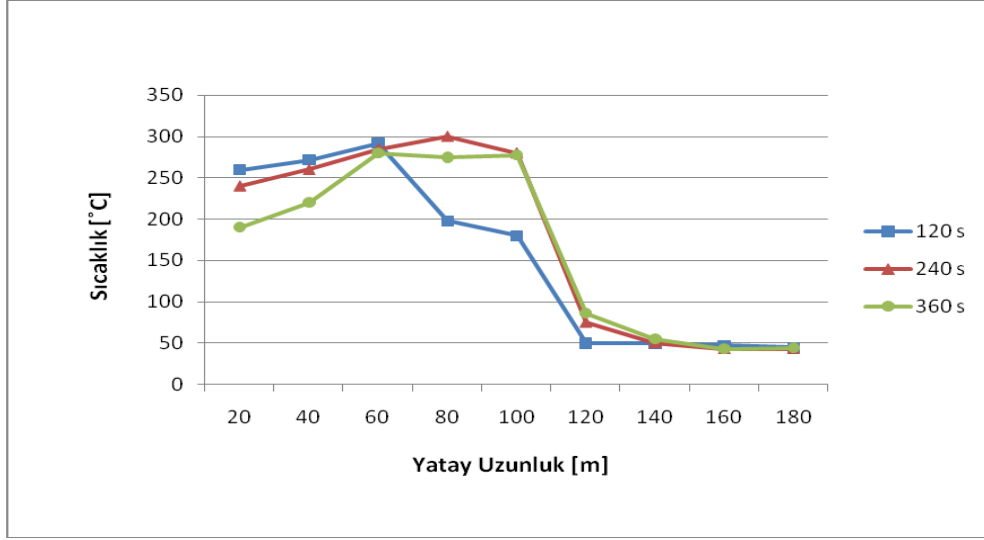
**Şekil 4.19.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 incelendiğinde, 25 m’de gerçekleşen yangın bölgesinde sıcaklık değerlerinin zamanla ani olarak yükseldiğini tünel boyunca ilerlediğimizde zamana bağlı olarak sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmektedir. 5 MW’lık yangın için, tünelin ilk 60 metresinden sonra tün yangın süresi boyunca düşük sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Fakat 50 MW’lık yangında, ilk 120 s için tünelin ilk 80 metresinden sonra düşük sıcaklıklar gözlemlenirken, zamanın ilerlemesi ile bu bölgelerde belli bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Özellikle 360. saniye sonunda, tünelin büyük bir bölümünde yüksek sıcaklıkların oluştuğu belirlenmiştir.

Benzer olarak, yangının 75 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki sıcaklığın tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.20’de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.21’de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için sıcaklığın yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.

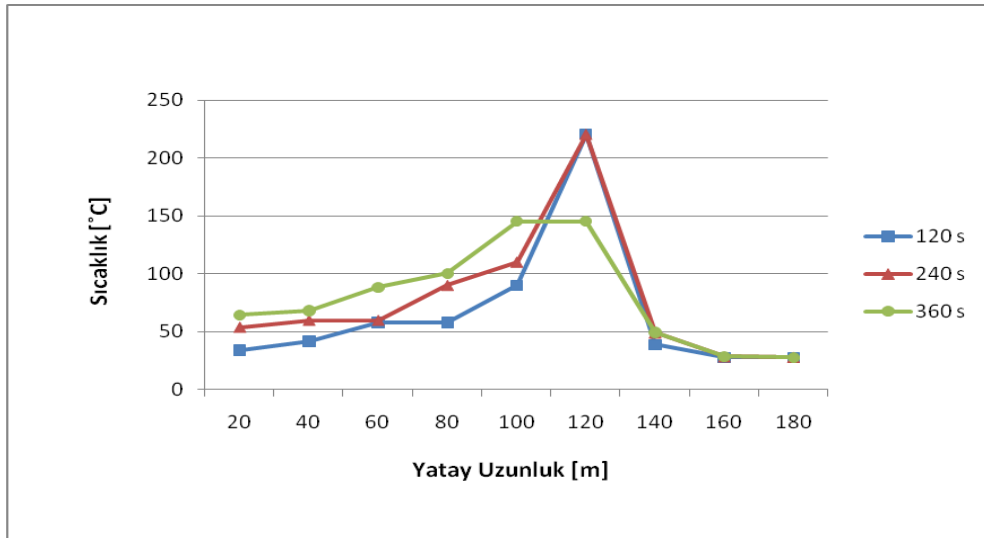


**Şekil 4.20.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi

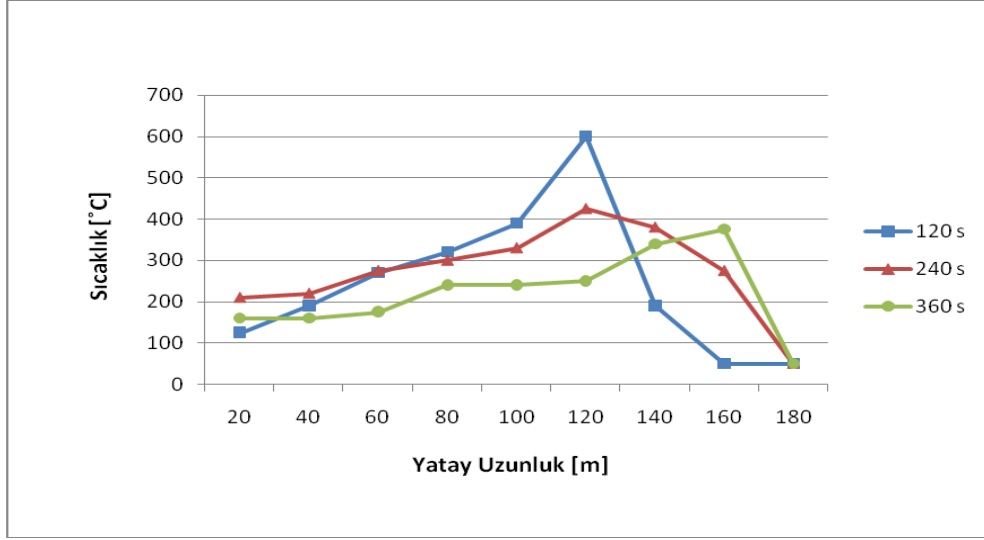


**Şekil 4.21.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 incelendiğinde, yangının meydana geldiği 75 m’de tünel içi sıcaklık değerlerinin en yüksek değerlerine ulaştığı, tünel sonuna yaklaştıkça ise düşük sıcaklık değerlerine ulaştığı görülmektedir. Her iki durumda da tünelin ilk yarısında yüksek sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Özellikle yangın büyüklüğünün 50 MW olduğu durumda, tünelin ilk 120 metrelik bölümü yangından kaçmak ve/veya gerekli müdahaleyi yapabilmek için gerekli olan güvenli sıcaklıkların üzerindedir.



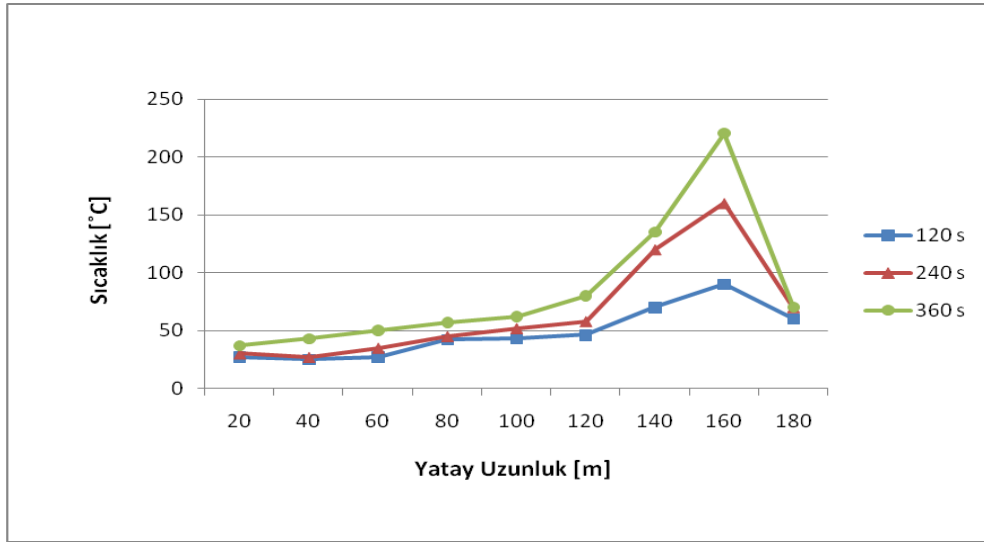
**Şekil 4.22.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi



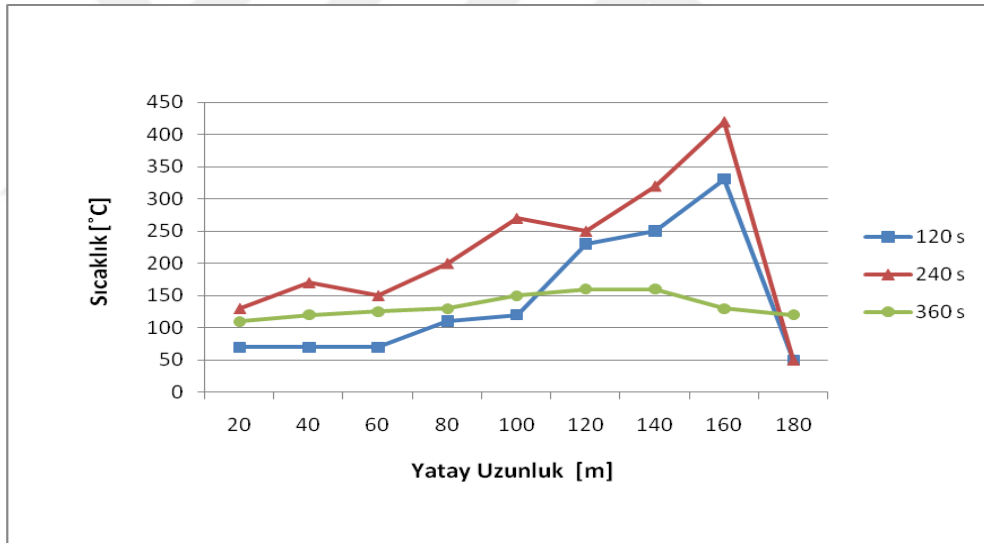
**Şekil 4.23.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Yangının 125 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki sıcaklığın tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.22’de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.23’de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için sıcaklığın yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir. Şekiller incelendiğinde, her iki yangın büyüklüğü içinde, yangının gerçekleştiği 125 m’de tünel içi sıcaklık değerlerinin bütün zaman dilimleri içerisinde en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. 125 m’de gerçekleşen olası bir yangında, neredeyse tünelin tamamında oldukça yüksek sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Tünelin büyük bir kısmının güvenli sıcaklıkların üzerinde olduğu, dolayısıyla bu yangın konumu için, kullanılan jet fanların tünel içerisini güvenli sıcaklıklarda tutmada yetersiz kaldığı söylenebilir.

Yangının 175 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki sıcaklığın tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.24’de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.25’de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için sıcaklığın yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.



**Şekil 4.24.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.1.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi

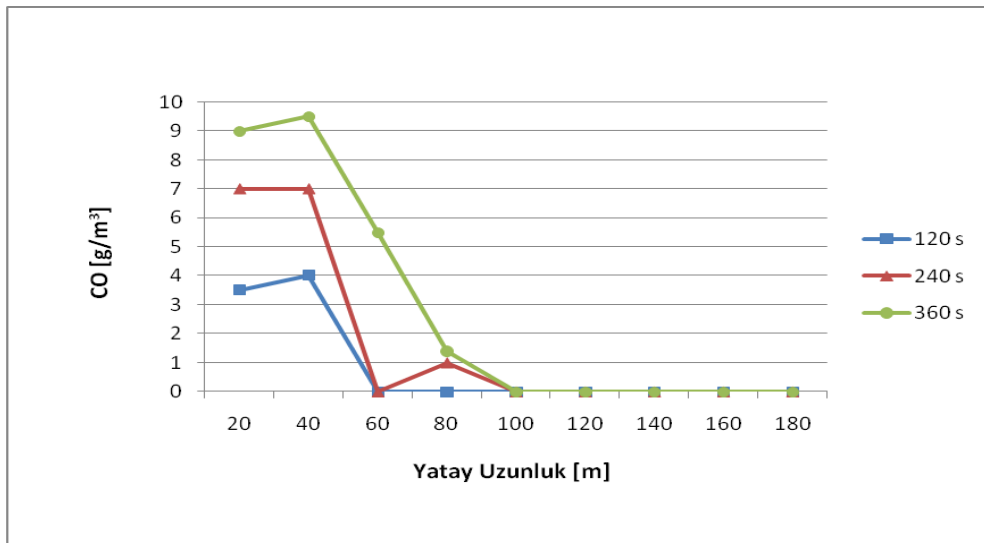


**Şekil 4.25.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.2.1), farklı zaman anlarındaki sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Yukarıda verilen grafiklerden elde edilen verilere göre 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar kıyaslandığında, diğer tüm durumlar aynı iken 50 MW boyutundaki bir yangının gerçekleştiği tünelde 5 MW boyutundaki yangına göre, tünel içi sıcaklık değerlerinin daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir.

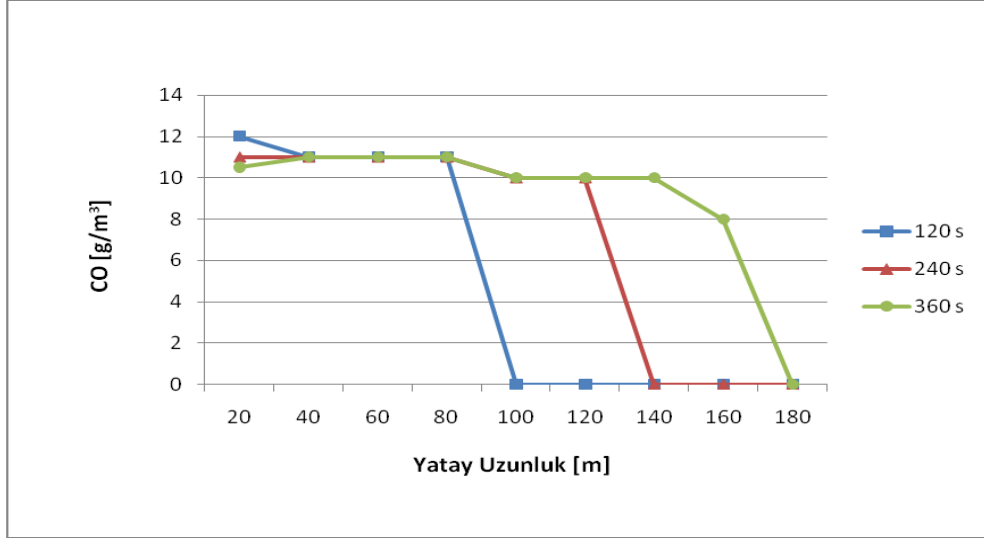
Ayrıca analizler için belirlenen, insanların tüneli tahliye edebilmesi için kritik olabilecek bir süre olan 360 s simülasyon süresi tamamlandığında da tünel içi sıcaklık değerlerinin tünel çıkışına doğru normale döndüğü görülmektedir. İncelenen 360 s için, 4 farklı model arasında yangının 125 m’de çıktığı durumun, tünel içerisinde gözlemlenen sıcaklık dağılımları açısından en olumsuz senaryo olduğu söylenebilir. Bu model için, diğer modellere oranla, yüksek sıcaklıkların tünelin daha büyük bir kısmında gözlemlendiği söylenebilir.

Yangının 25 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki CO değerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.26’da 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.27’de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için CO’nun yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 incelendiğinde, 5 MW’lık yangın için CO seviyesinin, tünelin ilk yarısında oldukça yüksek değerlere ulaştığı, diğer yarısında ise güvenli düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Fakat 50 MW’lık yangın durumunda ise, ilk 360 saniyelik zaman diliminin sonunda, CO seviyesinin tünelin büyük bir kısmında oldukça yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. 50 MW’lık yangın durumu için, eksik yanma sonucu meydana gelen CO’nun seviyesinin insan hayatını tehlikeye atacak değerlere ulaştığı söylenebilir.



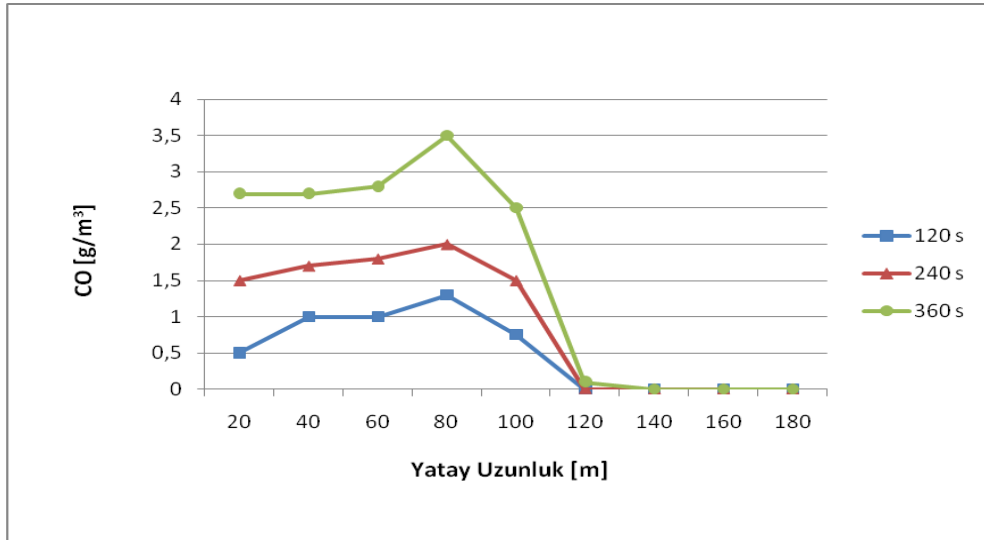
**Şekil 4.26.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.1.1), farklı zaman anlarındaki CO’nun tünel boyunca değişimi



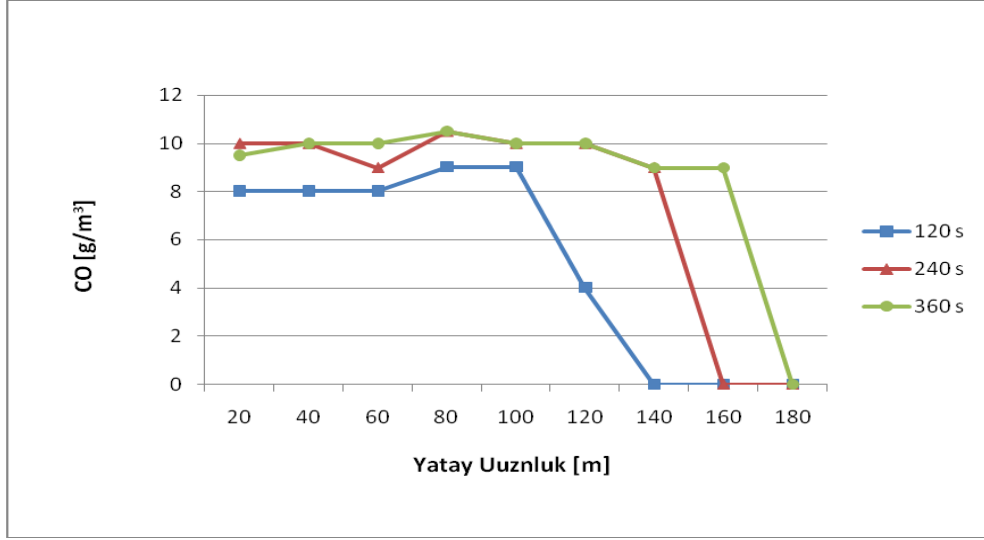


**Şekil 4.27.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi

Yangının 75 m'de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki CO değerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.28'de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.29'da ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için CO'nun yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.

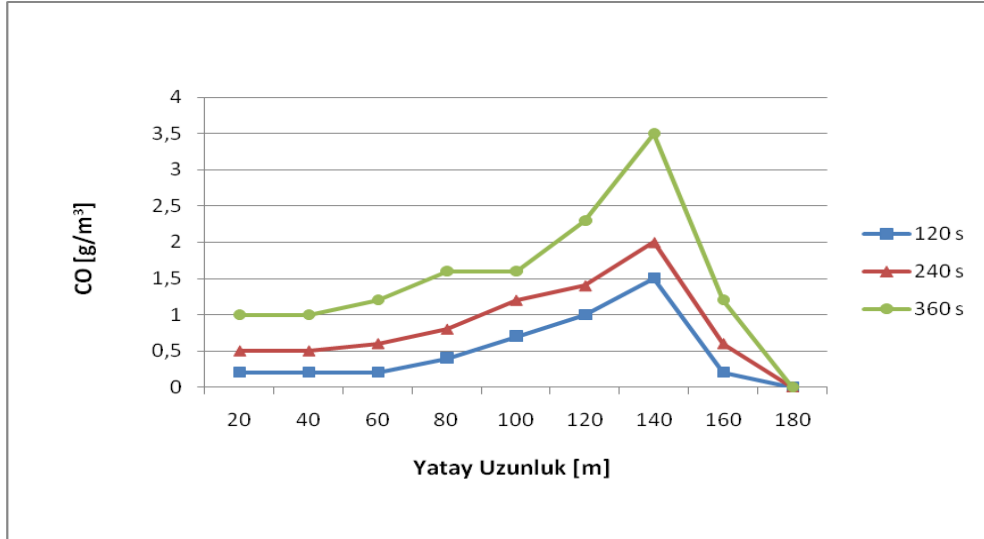


**Şekil 4.28.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi

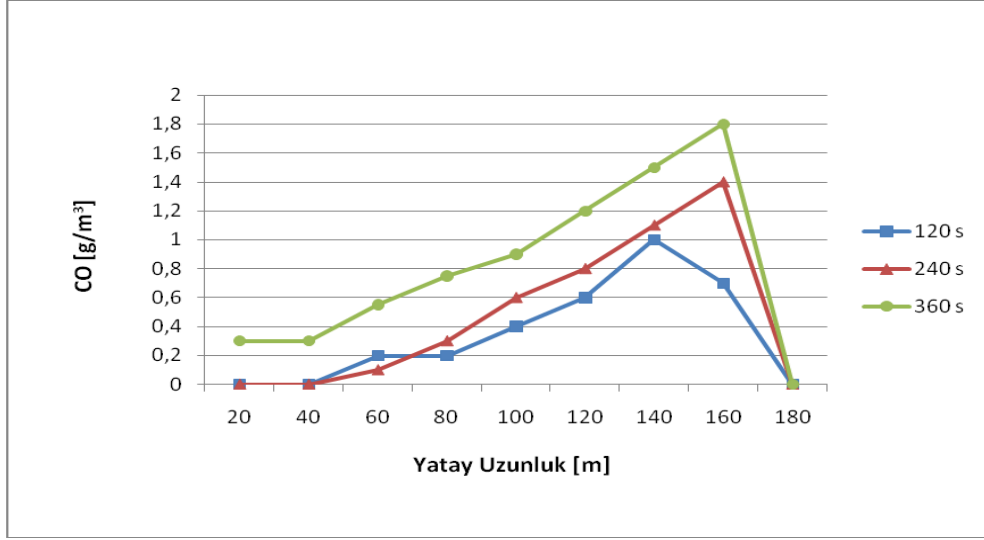


**Şekil 4.29.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 incelendiğinde, tünelin 75. metresinde çıkan olası bir yangın için, CO seviyesinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. İncelenen ilk 360 s için, 5 MW boyutundaki yangında gerçekleşen CO seviyesinin 50 MW boyutundaki bir yangına kıyasla insan hayatı için güvenli sınırlarda kaldığı görülmektedir.



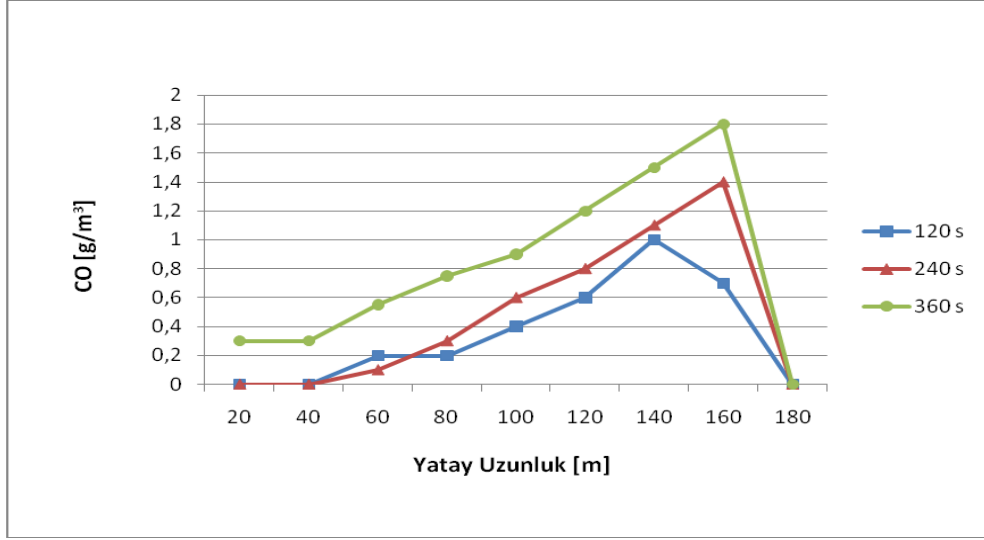
**Şekil 4.30.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi



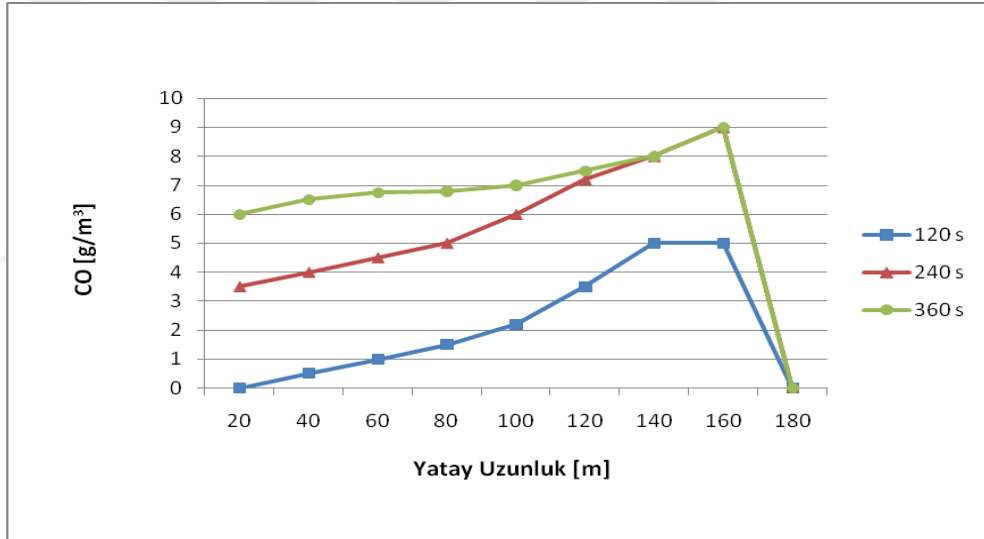
**Şekil 4.31.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi

Yangının 125 m'de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki CO değerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.30.'da 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.31.'de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için CO'nun yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 incelendiğinde yangının gerçekleştiği 125 m ve ilerisinde CO değerlerinin yüksek seviyelere çıktığı ve tünel çıkışına doğru azaldığı gözlemlenmiştir. 5 MW lık bir yangında gözlemlenen CO seviyesinin insan sağlığı için yeterli seviyede olduğu söylenebilir.

Yangının 175 m'de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki CO değerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.32.'de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.33'de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için sıcaklığın yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.



**Şekil 4.32.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.1.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi



**Şekil 4.33.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.2.1), farklı zaman anlarındaki CO'nun tünel boyunca değişimi

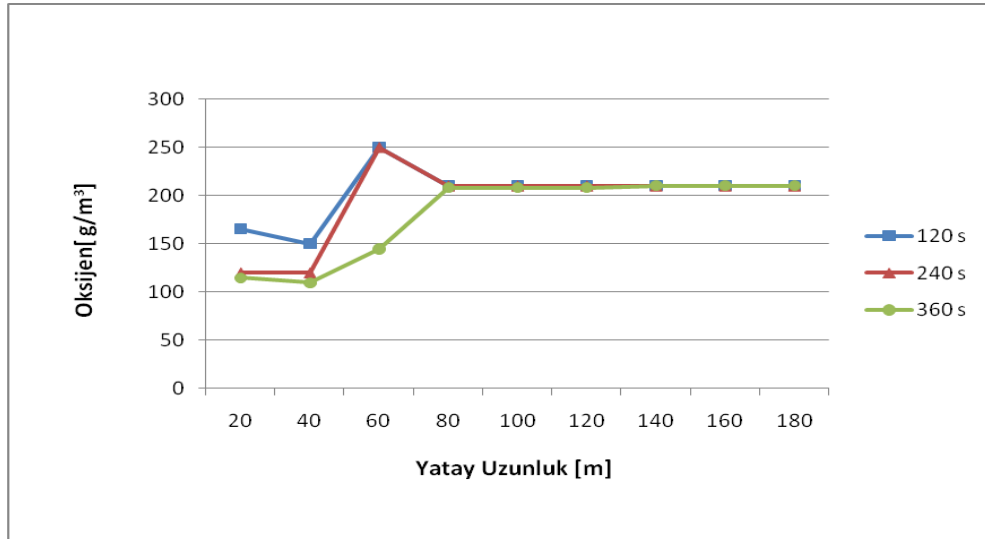
Yukarıda verilen grafiklerden görüldüğü üzere tünel içerisindeki A,B,C ve D konumlarında çıkan yangınlarda CO miktarı yangının meydana geldiği konuma yakın bölgelerde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Yangın konumundan uzaklaşıldığında CO miktarının zamanla azaldığı görülmektedir.

Ele alınan yangınlarda yangın boyutunun 5 MW ve tüm fanların açık olması sebebiyle CO miktarı insan sağlığını tehlikeye atacak sınır değer olan  $10 \text{ g/m}^3$

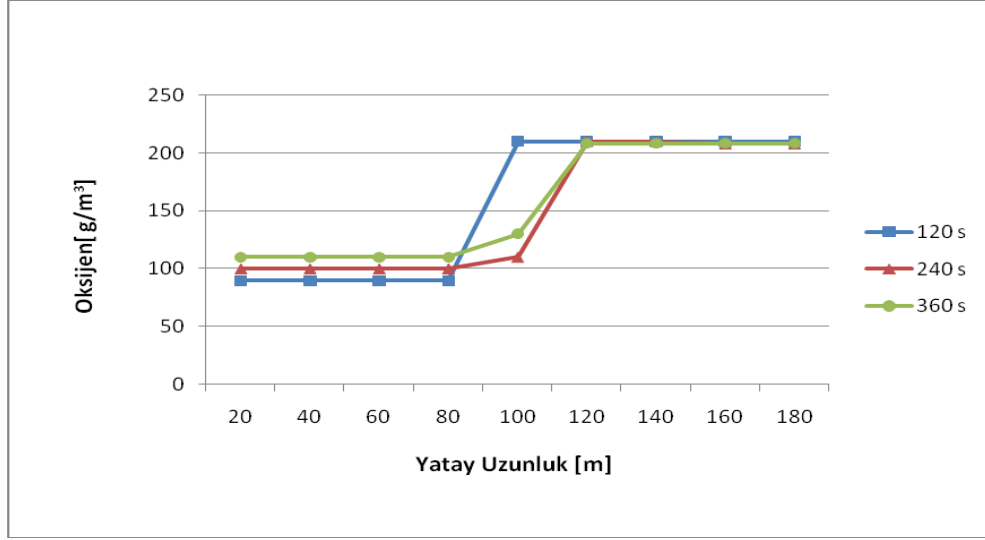
değerini geçmediğinden dolayı güvenli sınırlar içerisinde kaldığı kanaatine varılmıştır. Bununla birlikte 50 MW boyutundaki bir yangında CO seviyesinin insan sağlığını tehlikeye atacak değerlere ulaştığı görülmektedir.

Yangının 25 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki O<sub>2</sub> değerlerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.34’de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.35.’de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için O<sub>2</sub>’nin yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 incelendiğinde 25. m’deki yangın konumunda, incelenen her iki yangın büyüklüğü içinde, tünel içerisinde ki O<sub>2</sub> seviyesinin yaklaşık olarak tünelin ilk yarısında oldukça düştüğü, tünelin diğer yarısının ise yangın durumundan pek etkilenmeyerek yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. En düşük O<sub>2</sub> seviyelerinin, 5 MW’lık yangın durumunda yangının çıktığı konuma yakın bölgelerde gözlemlendiği, 50 MW’lık yangında ise tünelin ilk yarısının tamamında gözlemlendiği belirlenmiştir.

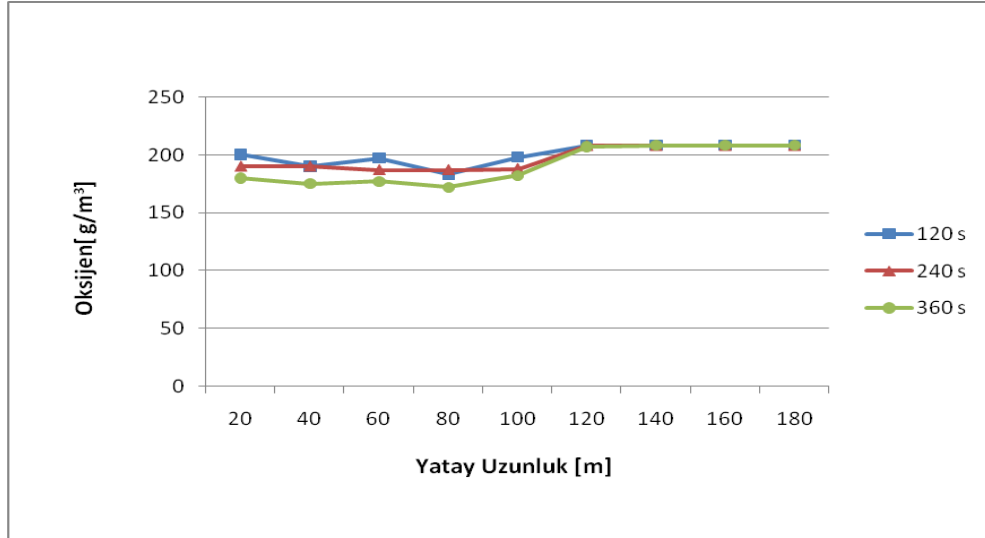


**Şekil 4.34.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi

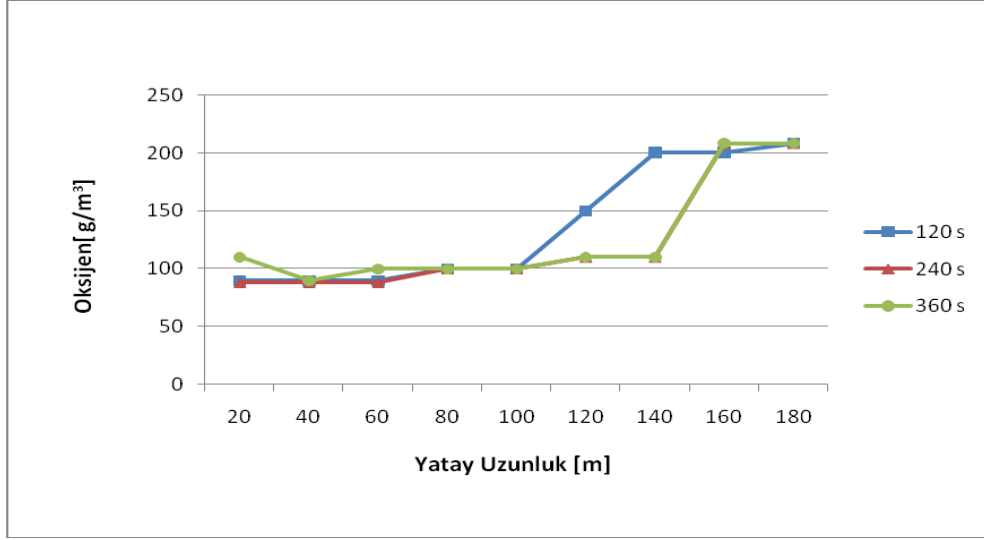


**Şekil 4.35.** Yangın konumu 25 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (A.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi

Yangının 75 m’de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki O<sub>2</sub> değerlerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.36’da 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.37’de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için O<sub>2</sub>'nin yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.

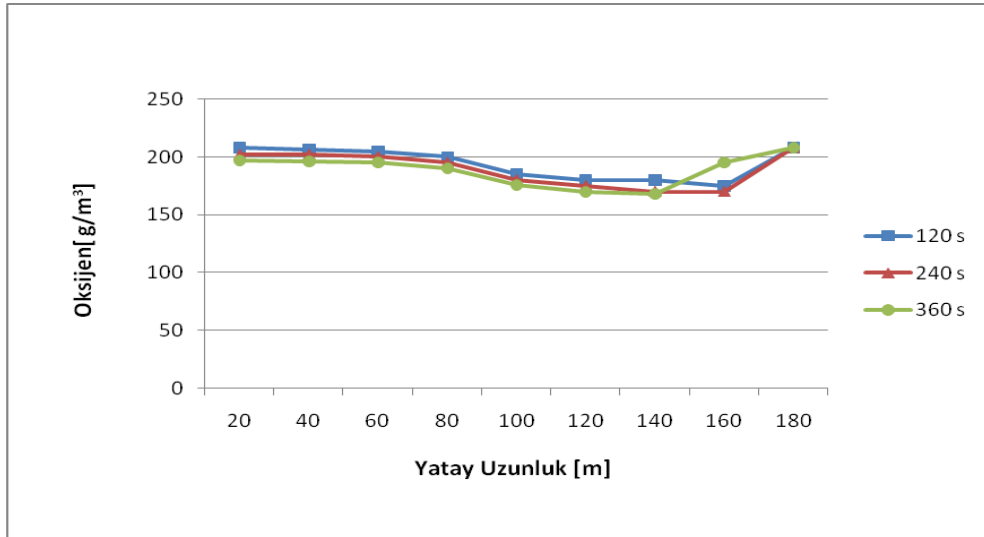


**Şekil 4.36.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi

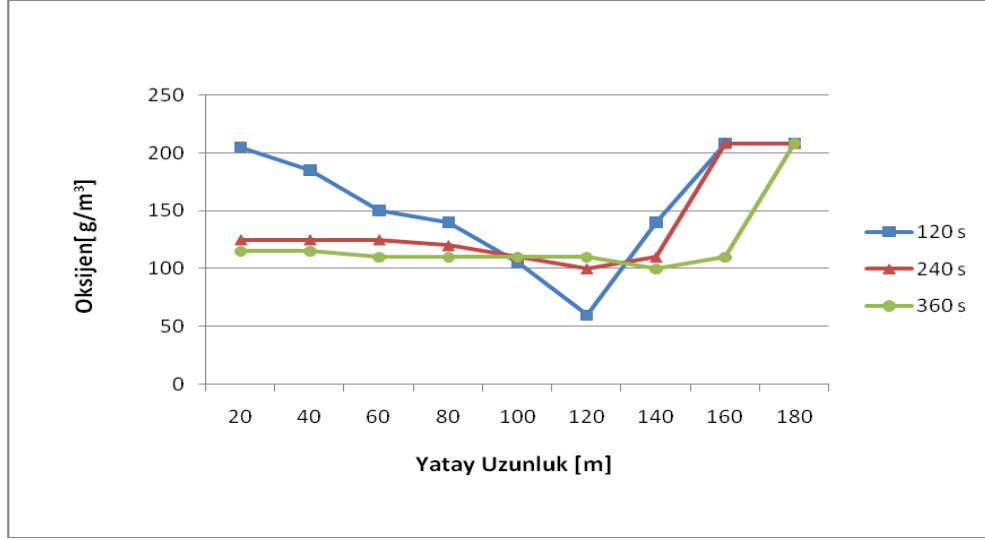


**Şekil 4.37.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (B.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi

Şekiller incelendiğinde, 75 m'deki yangın konumu için, 5 MW yangında, O<sub>2</sub> seviyesinin pek düşmediği, tünel boyunca benzer seviyelerde kaldığı görülmektedir. 50 MW'lık yangında ise, O<sub>2</sub> seviyesinin tünelin ilk üçde ikilik bölümünde oldukça düşük seviyelerde olduğu, tünel çıkışına doğru ise arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 50 MW boyutundaki yangında O<sub>2</sub> seviyesinin 5 MW boyutundaki yangına göre çok daha düşük seviyelerde olduğu söylenebilir.



**Şekil 4.38.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi

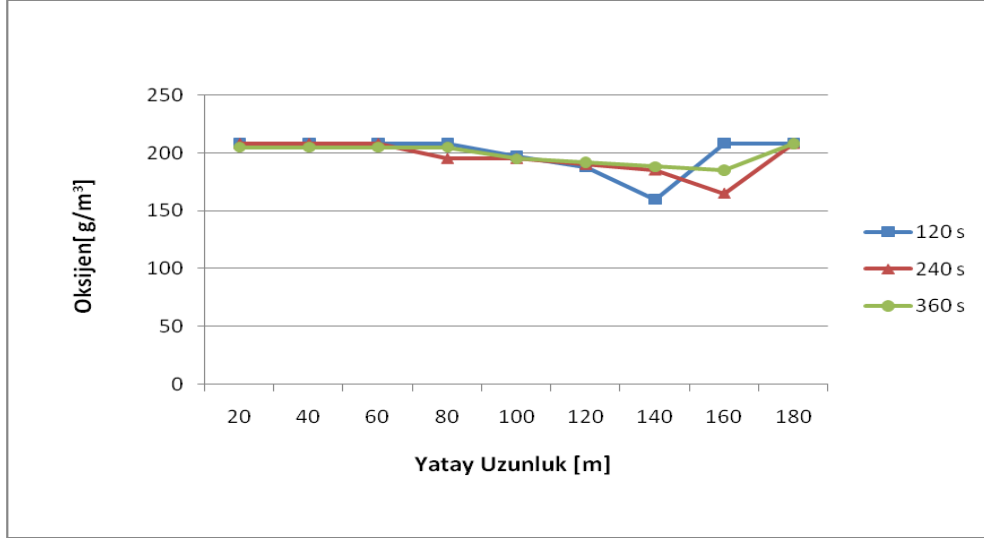


**Şekil 4.39.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (C.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi

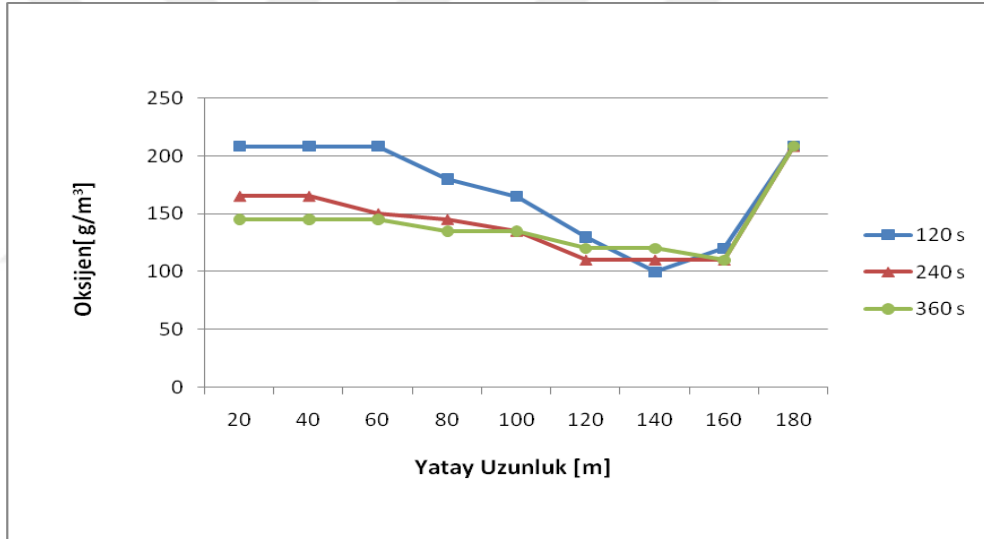
Yangının 125 m'de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki O<sub>2</sub> değerlerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.38'de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.39'da ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için O<sub>2</sub>'nin yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir. Şekiller incelendiğinde, ilk 360 saniyenin sonunda, 5 MW'lık yangın durumunda O<sub>2</sub> seviyesinin tünel boyunca yeterli seviyelerde kaldığı, 50 MW'lık yangında ise yine tünel boyunca çok düşük seviyelere indiği görülmektedir. Ayrıca, 50 MW'lık yangın için, yangın başlangıcından itibaren 120. saniyede O<sub>2</sub> seviyesinin oldukça düştüğü ve insan sağlığını tehlikeye atabilecek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Yangının 175 m'de çıktığı durumda, fan hızlarının 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durum için zeminden 2 m yükseklikteki O<sub>2</sub> değerlerinin tünel boyunca tünel çıkışına göre değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.40'de 5 MW büyüklüğündeki bir yangın için, Şekil 4.41'de ise 50 MW büyüklüğündeki bir yangın için O<sub>2</sub>'nin yatay uzunlukta değişimi farklı zaman anları için birlikte verilmektedir.





**Şekil 4.40.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.1.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi



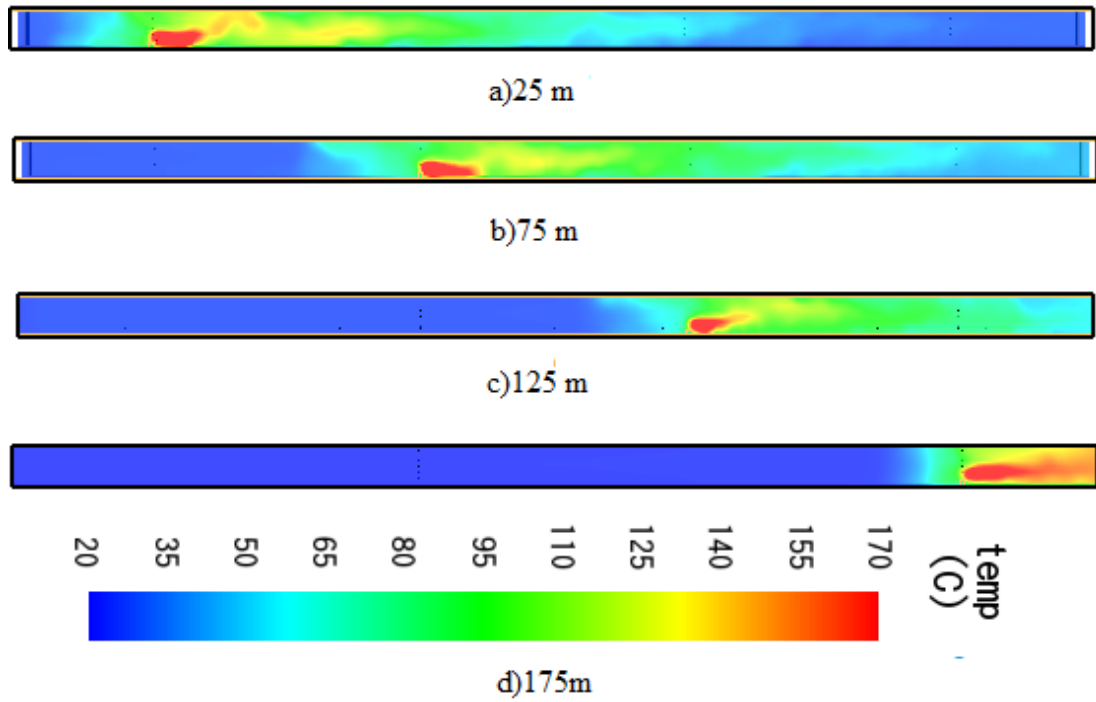
**Şekil 4.41.** Yangın konumu 175 m, yangın büyüklüğü 50 MW, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durum için (D.2.1), farklı zaman anlarındaki O<sub>2</sub>'nin tünel boyunca değişimi

Karayolu tünellerinde meydana gelen yangınlarda, yangın sonucunda meydana gelen yangın kaynaklı duman ve zehirli gaz konsantrasyonunun oluşmasında en büyük parametre yangın gücü, yani Isı Salım Hızı bir diğer deyişle HRR (Heat Release Rate)'dir. Daha önce bahsedildiği gibi tünel içerisinde bir otomobilden kaynaklı yangının çıkması durumunda 5 MW gücünde bir ISH değeri, bir otobüs veya minibüs kaynaklı yangın çıkması durumunda 15-20 MW değerinde bir ISH değeri meydana

gelmektedir. Tünel içerisinde kamyon veya petrol yüklü tanker kaynaklı yangın çıkması durumunda 50 MW'a varan ISH değeri meydana gelmektedir.

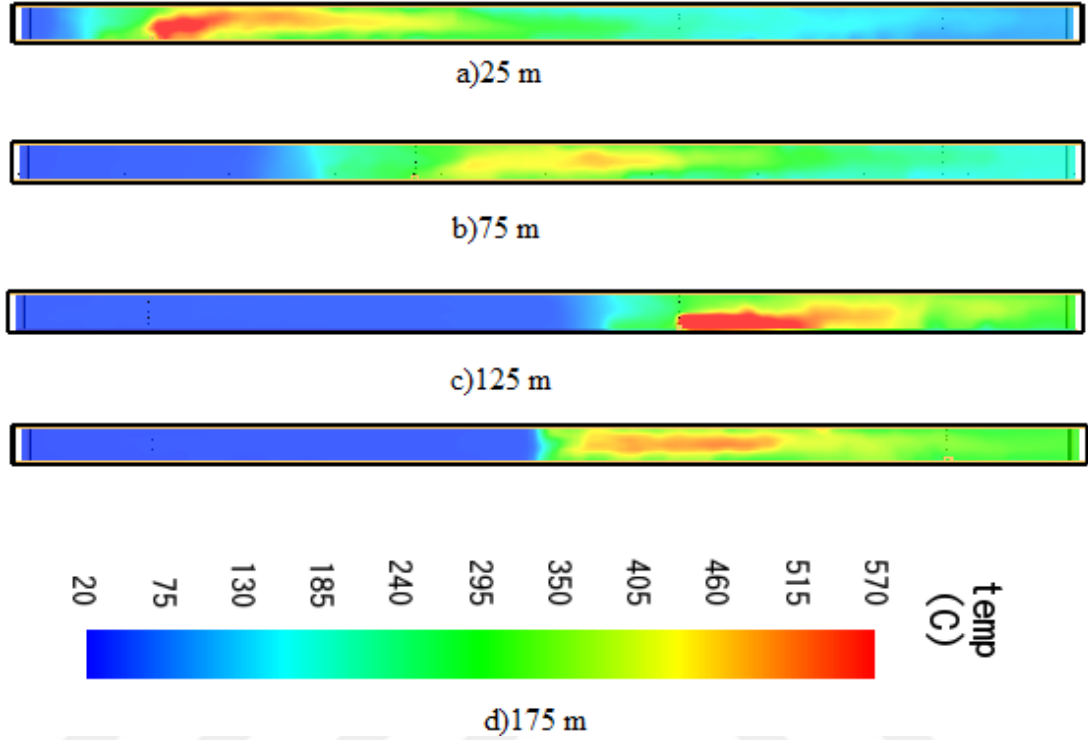
Bu çalışma kapsamında hayatta karşılaşılması muhtemel olabilecek otomobil ve kamyon kaynaklı yangınları modelleyebilmek adına 5 MW ve 50 MW gücünde iki farklı yangın gücü ele alınmıştır. 2 farklı yangın gücünün model tünel içerisinde meydana gelen yangın sonucu meydana gelen dumanın tünel içerisinde dağılımı ve zehirli gaz konsantrasyonları analiz edilerek kıyaslanmıştır. 5 MW ve 50 MW gücündeki yangınlara ait farklı konumlardaki sıcaklık ve duman dağılımı görüntüleri Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'de verildiği gibidir.

Tünelin farklı noktalarında çıkan 5 MW büyüklüğünde bir yangın için fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durumda, yangının başlangıcından itibaren 120 sn. için elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 4.42'de verilmektedir.



**Şekil 4.42.** 5 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda, t=120 sn için farklı yangın konumlarındaki sıcaklık dağılımları; a)t=25 m,b)t=75 m, c)t=125 m, d)t=175 m

Tünelin farklı noktalarında çıkan 50 MW büyüklüğünde bir yangın için fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durumda, yangının başlangıcından itibaren 120 sn. için elde edilen sıcaklık dağılımları ise Şekil 4.43’de verilmektedir.

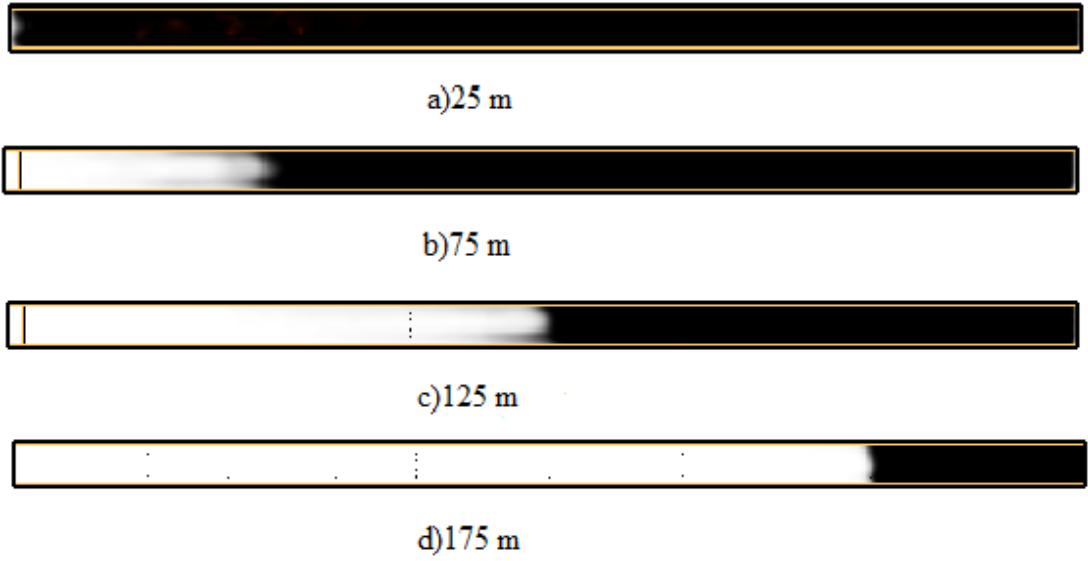


**Şekil 4.43.** 50 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda,  $t=120$  sn için farklı yangın konumlarındaki sıcaklık dağılımları; a)25 m, b)75 m, c)125 m, d)175 m

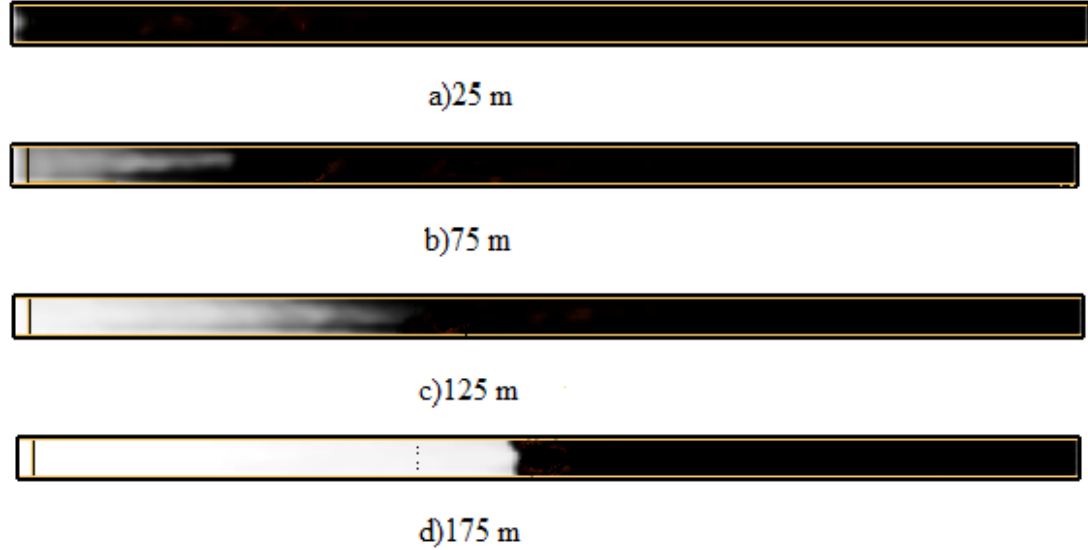
Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’de diğer tüm koşullar aynı iken, yangınların tünel içerisinde farklı konumlardaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 25 m’de meydana gelen yangın sonucu tünel içi sıcaklığın tünel çıkışına doğru arttığı ve insanların tüneli tahliye edebilmesi için uygun olmayan sıcaklık değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Diğer yandan 5 MW boyutundaki yangının gerçekleştiği tünelde 175 m’de meydana gelen yangında ise yangın tünel çıkışına çok yakın bir bölgede gerçekleştiği için tünel içi sıcaklık değerlerinin tünel girişi ile yangın konumu arasındaki bölgede insanlar için güvenli sıcaklık değerleri içerisinde kaldığı görülmektedir.

Tünelin farklı noktalarında çıkan 5 MW büyüklüğünde bir yangın için fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğu durumda, yangının başlangıcından itibaren 120 sn. için

elde edilen duman dağılımları Şekil 4.44.'de, 50 MW büyüklüğünde bir yangın için ise Şekil 4.45'de verilmektedir.

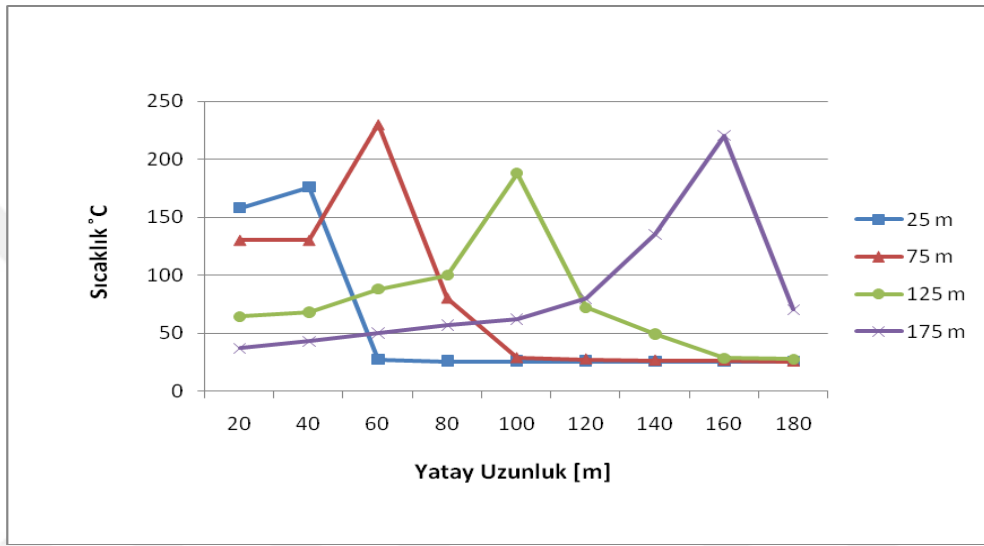


**Şekil 4.44.** 5 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda,  $t=120$  sn için farklı yangın konumlarındaki duman dağılımları; a)25 m,b)75 m, c)125 m, d)175 m

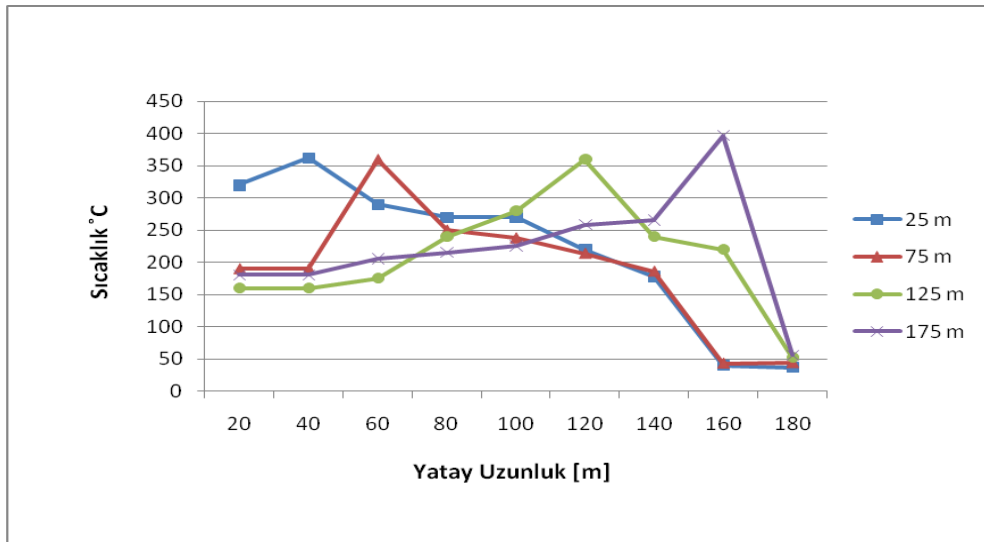


**Şekil 4.45.** 50 MW yangın büyüklüğünde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanlar açık olduğunda,  $t=120$  sn için farklı yangın konumlarındaki duman dağılımları; a)25 m,b)75 m, c)125 m, d)175 m

Yürütülen analizler neticesinde elde edilen Şekil 4.44 ve 4.45’de verilen duman dağılımı görüntüleri göstermektedir ki, 30 m/s fan hızı ve tüm fanların açık olması durumunda 5 MW ve 50 MW boyutundaki iki yangın kıyaslandığında tünel havalandırmasının 5 MW boyutundaki yangında çoğunlukla yeterli geldiği görülmüştür. Bununla birlikte tünel havalandırmasının 50 MW boyutundaki yangın sonrası insanların tüneli tahliye edebilmesi için yeterli gelmediği görülmektedir. Yine benzer sonuçlara aşağıda verilen grafiklerde de ulaşılabilmektedir.

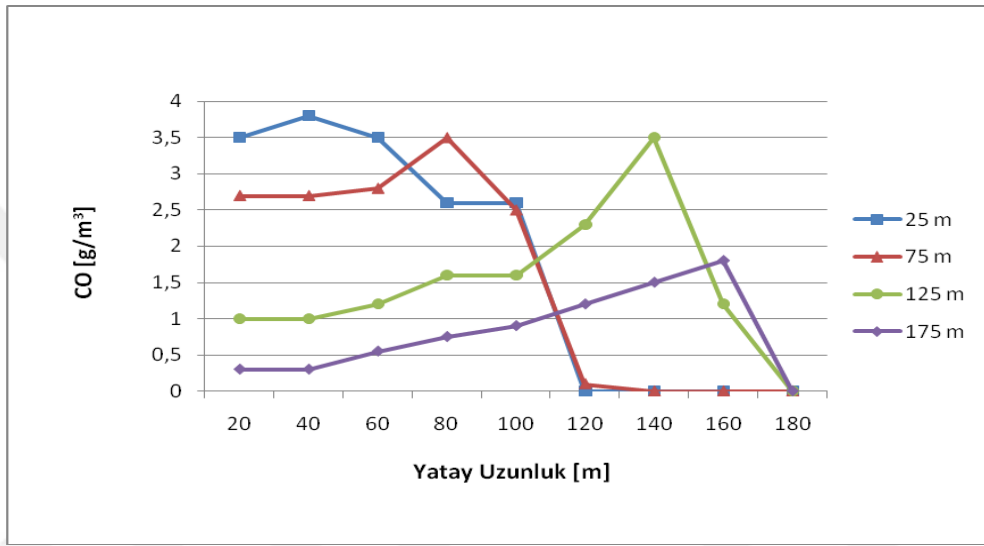


Şekil 4.46. Farklı yangın konumları için, 5 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda sıcaklığın tünel boyunca değişimi

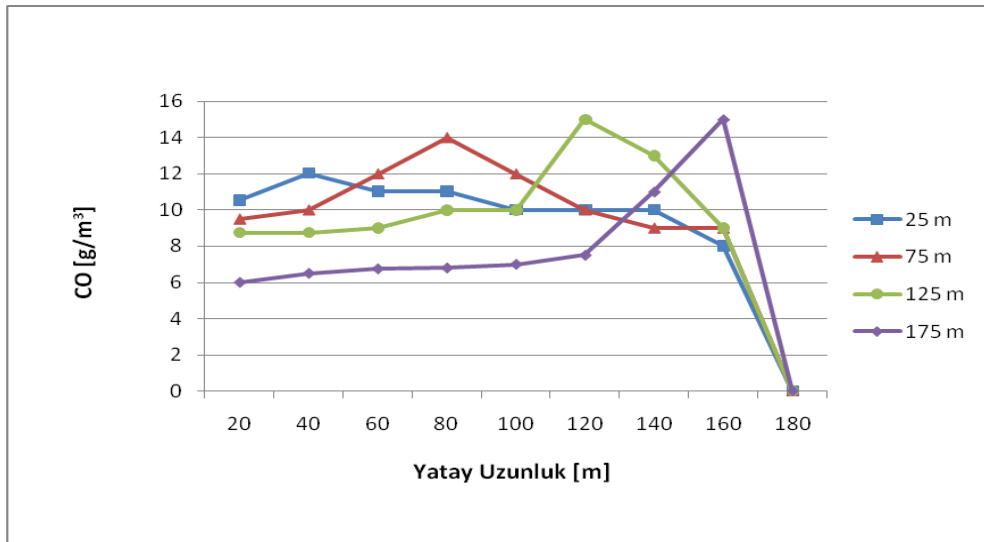


Şekil 4.47. Farklı yangın konumları için, 50 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de sırasıyla 5 MW ve 50 MW yangın büyüklüklerinde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durumda, zeminden 2 m yükseklik için elde edilen sıcaklık değerlerinin tünel boyunca değişimi, farklı yangın konumları için birlikte görülmektedir. Benzer olarak, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’de sırasıyla 5 MW ve 50 MW yangın büyüklüklerinde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durumda, zeminden 2 m yükseklik için elde edilen CO değerlerinin tünel boyunca değişimi, farklı yangın konumları için birlikte görülmektedir.

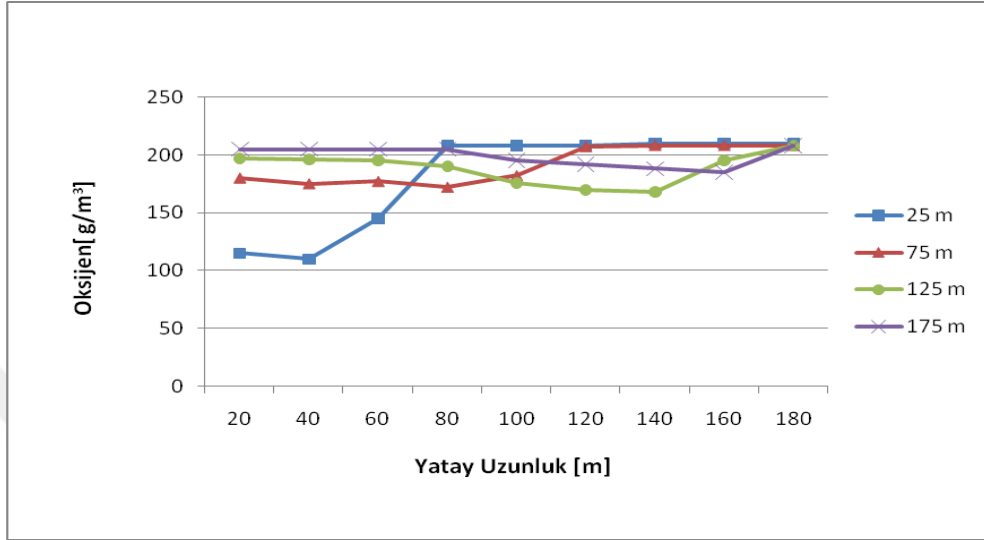


Şekil 4.48. Farklı yangın konumları için, 5 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda CO’nun tünel boyunca değişimi

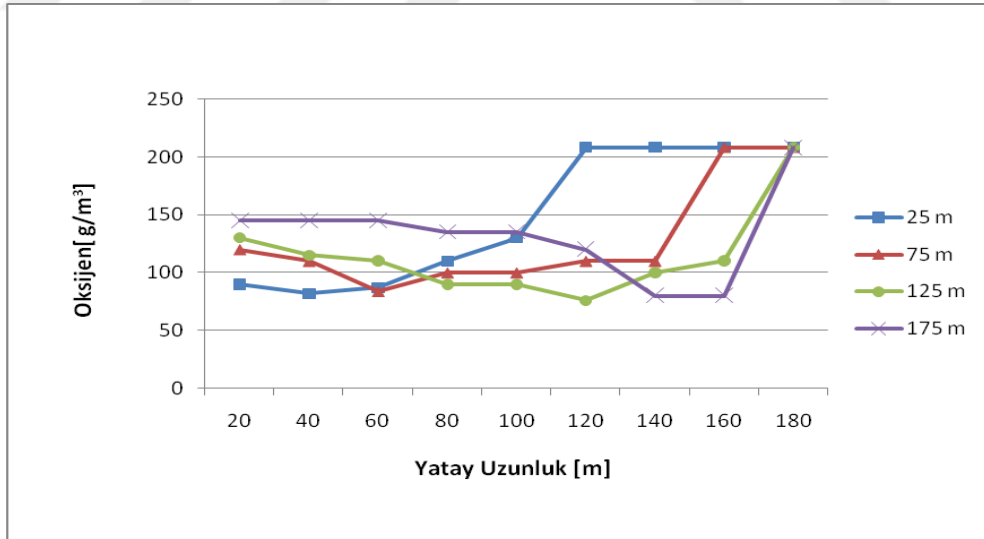


Şekil 4.49. Farklı yangın konumları için, 50 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda CO’nun tünel boyunca değişimi

Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de sırasıyla 5 MW ve 50 MW yangın büyüklüklerinde, fan hızı 30 m/s ve tüm fanların açık olduğu durumda, zeminden 2 m yükseklik için elde edilen O<sub>2</sub> değerlerinin tünel boyunca değişimi, farklı yangın konumları için birlikte görülmektedir.



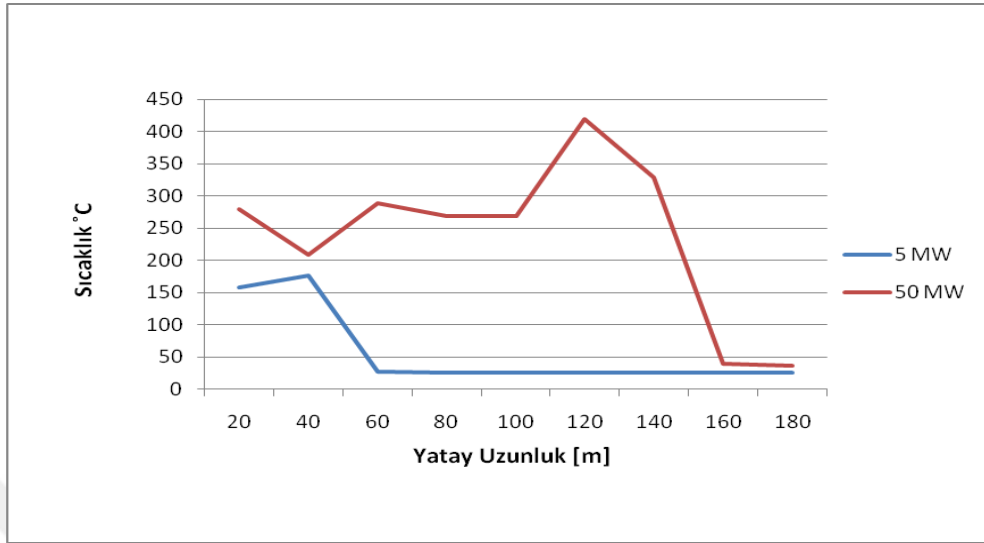
Şekil 4.50. Farklı yangın konumları için, 5 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi



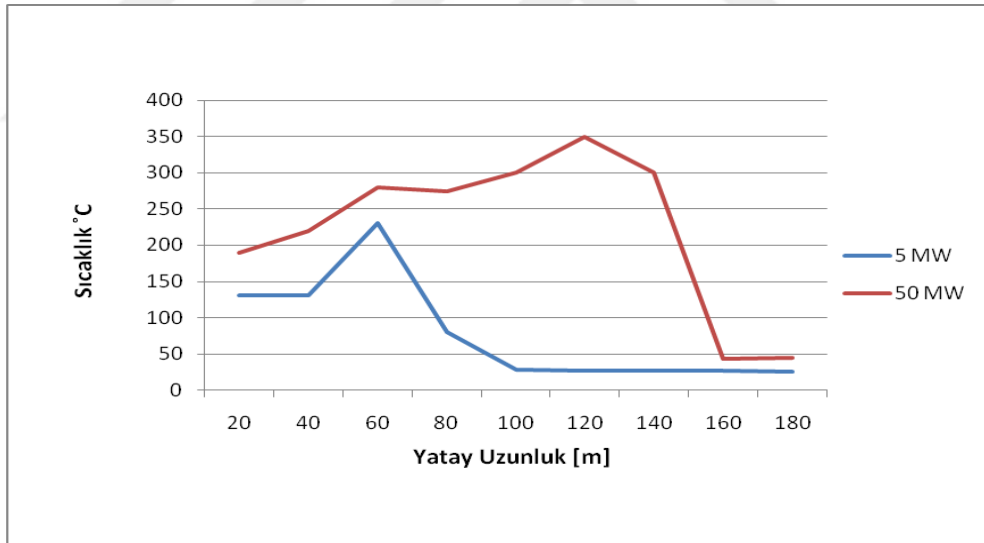
Şekil 4.51. Farklı yangın konumları için, 50 MW yangın büyüklüğü, 30 m/s fan hızı ve tüm fanlar açık olduğu durumda O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi

5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınların arasındaki farkı daha net görebilmek adına A, B, C ve D konumlarındaki yangınların bütün fanlar açık ve fan hızı 30 m/s

iken 120.s sonundaki sıcaklık dağılımı aşağıda verilen şekillerde aynı grafik üzerinde daha belirgin şekilde gösterilmiştir.

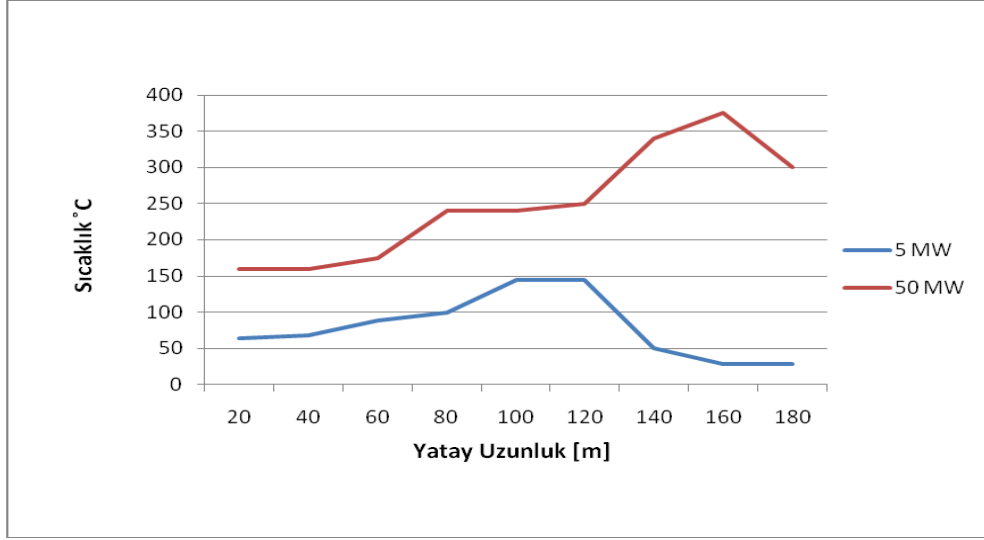


**Şekil 4.52.** Yangın 25 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi

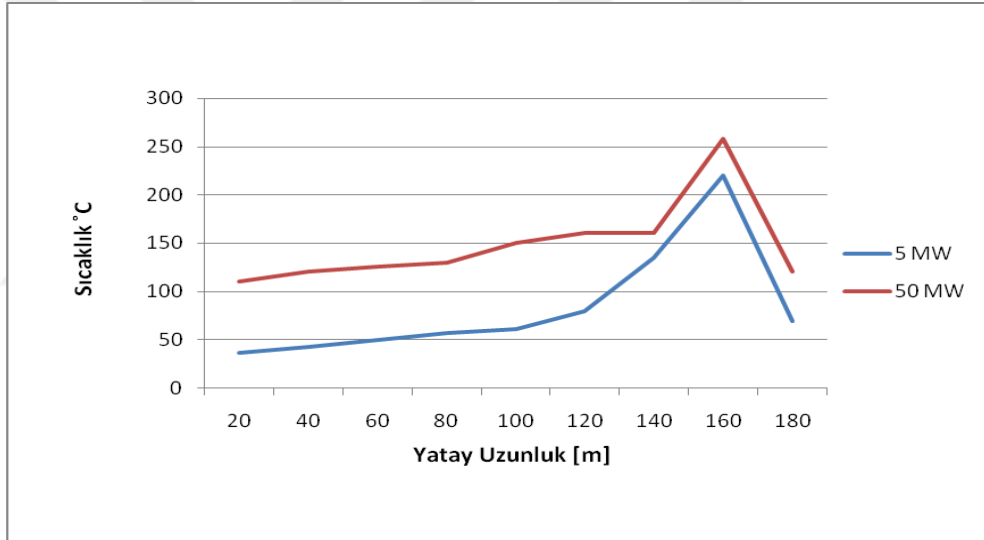


**Şekil 4.53.** Yangın 75 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi





**Şekil 4.54.** Yangın 125 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi



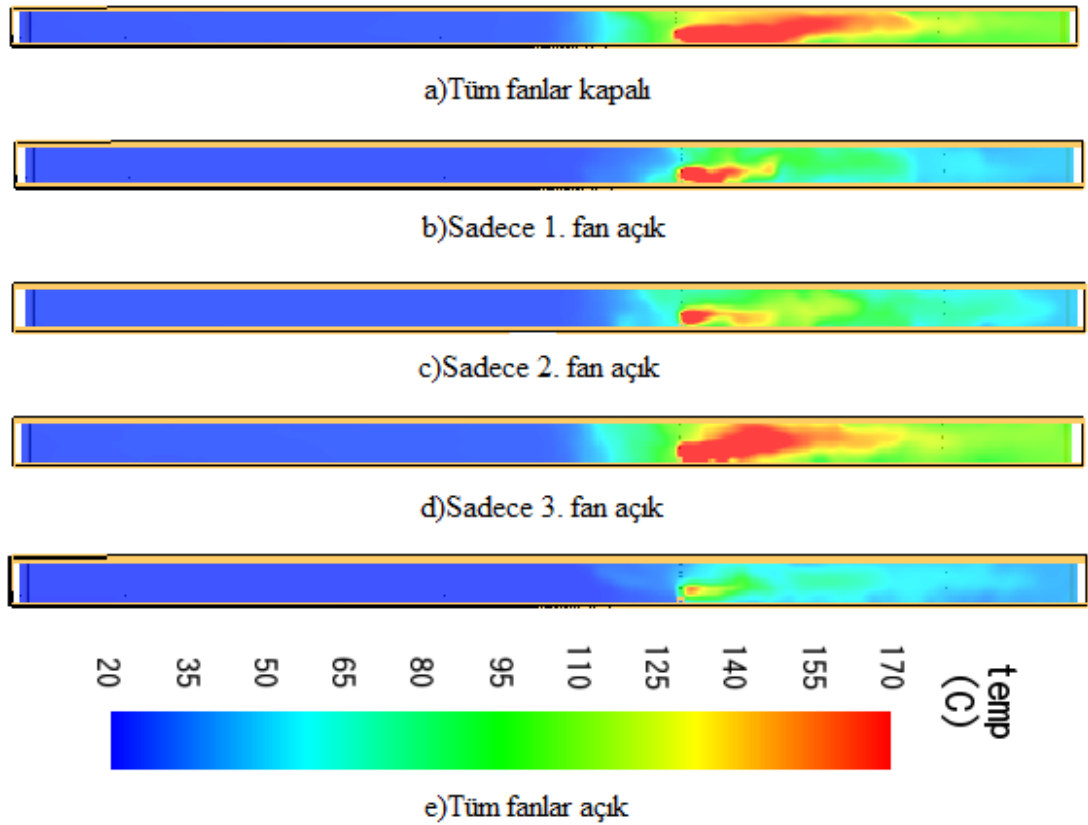
**Şekil 4.55.** Yangın 175 m’de, tüm fanlar açık ve fan hızı 30 m/s iken 120 s sonunda 5 MW ve 50 MW boyutlarındaki yangınlar için sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Şekil 4.52, Şekil 4.53, Şekil 4.54 ve Şekil 4.55 incelendiğinde tünel içerisindeki yangın konumunda sıcaklık değerleri ani olarak yükselmiş, tünel çıkışına doğru uygun değerlere düştüğü görülmektedir. Aynı konumda çıkan 5 MW boyutundaki yangın ile 50 MW boyutundaki yangın kıyaslandığında ise, 50 MW boyutunda tünel için sıcaklık değerlerinin oldukça yükseldiği, 125 m ve 175 m’de meydana gelen yangınlarda fanların tünel çıkışında güvenli sıcaklık değerlerine dönmekte yeterli gelmediği görülmektedir.

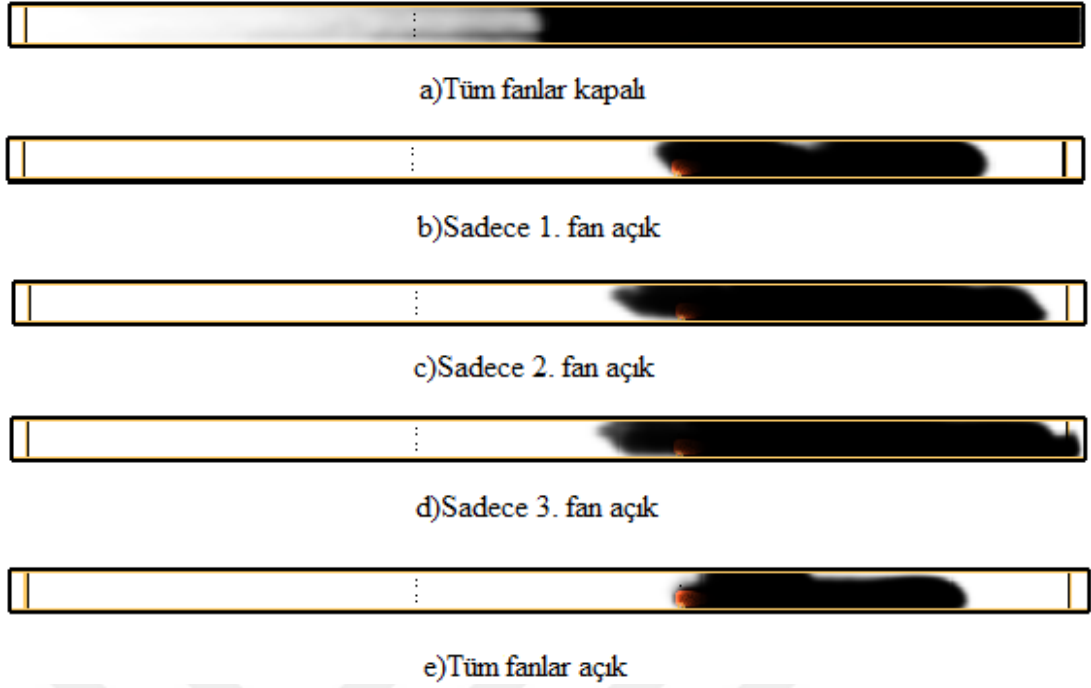
Bu bölüme kadar, karayolu tüneli yangınları incelemesinde değerlendirilen analiz parametrelerinden yangın boyutu ve yangın konumunun önemi, analiz sonucunda elde edilen sıcaklık, duman, CO ve O<sub>2</sub> dağılımı grafikleri aracılığı ile irdelenmiştir.

Benzer olarak, diğer çok önemli iki parametre olan fanların açıklık-kapalılık kombinasyonları ve farklı fan hızlarının, olası bir yangın durumunda tünel içerisinde oluşan sıcaklık, duman, CO ve O<sub>2</sub> dağılımı üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiş, bu analizlere ait görünüm ve grafiklere aşağıda yer verilmiştir.

Yangın merkezi 125 m olduğunda, 5 MW'lık yangın büyüklüğü ve 30 m/s fan hızı için, 360 s sonunda elde edilen tünel içi sıcaklık dağılımları farklı fan açıklık ve kapalılık durumları için Şekil 4.56'da birlikte verilmiştir.



**Şekil 4.56.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, 30 m/s fan hızı, t=360 s için sıcaklık dağılımı, a)Tüm fanlar kapalı, b)Sadece 1. fan açık, c)Sadece 2. fan açık, d)Sadece 3. fan açık, e)Tüm fanlar açık

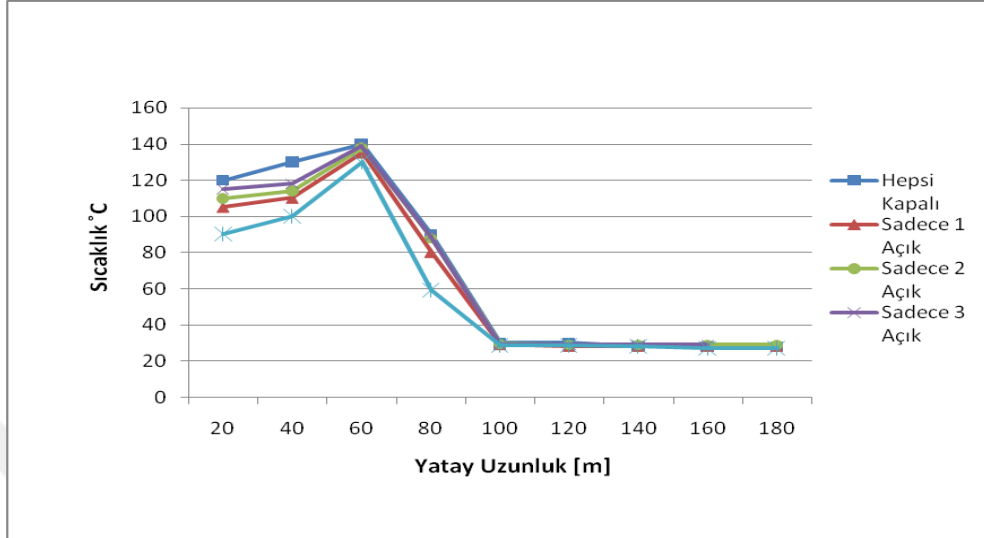


**Şekil 4.57.** Yangın konumu 125 m, yangın büyüklüğü 5 MW, 30 m/s fan hızı,  $t=360$  s için duman dağılımı, a)Tüm fanlar kapalı, b)Sadece 1. fan açık, c)Sadece 2. fan açık, d)Sadece 3. fan açık, e)Tüm fanlar açık

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, incelenen analiz parametreleri için, en kötü senaryonun tüm fanların kapalı olduğu yani tünel içerisinde herhangi bir havalandırma sisteminin bulunmadığı modelde gerçekleştiği söylenebilir. Bu durum için, diğer modellere oranla tünel içerisinde daha yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı, tünelin yarısından büyük bir kısmının ise dumanla kaplandığı görülmektedir.

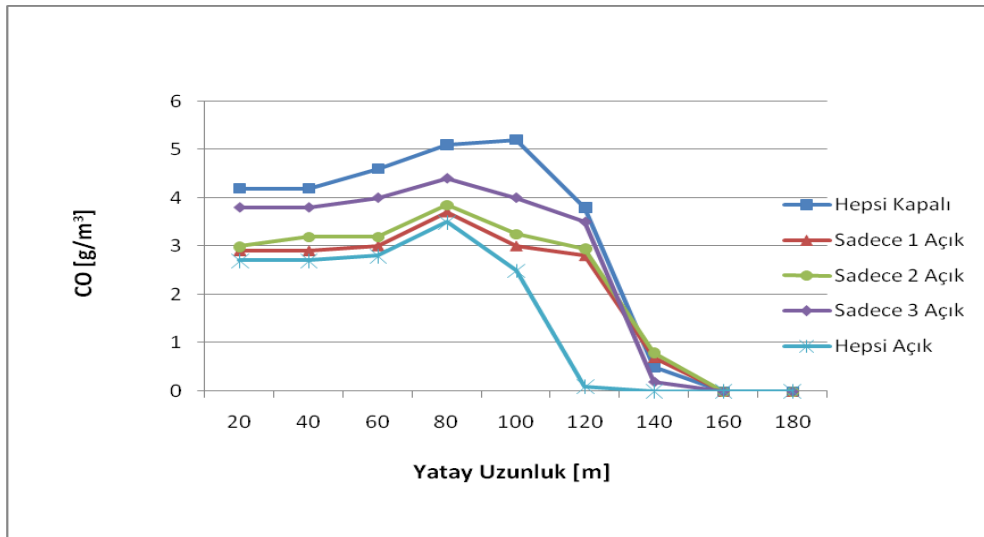
En iyi senaryonun ise tünel içerisindeki tüm fanların açık olduğu modelde gerçekleştiği söylenebilir. Bu durumda ise tünel içerisinde gerçekleşen yüksek sıcaklıkların sadece yangının çıktığı bölge ile sınırlı kaldığı, tünelin diğer bölgelerinde yüksek sıcaklıklar gözlemlenmediği belirlenmiştir. Benzer olarak tünel içerisinde sadece yangın çıkan bölgenin yakın çevresinin duman ile kaplandığı, diğer bölgelerin dumansız olduğu dolayısıyla görünürlüğünün yangından kaçış ve/veya müdahale için yeterli seviyede olduğu söylenebilir. Tünel içerisinde sadece tek bir fan çalıştırılması durumunda ise, sıcaklık ve duman dağılımı açısından en iyi modelin sadece 1. fanın açık olduğu model, en kötü durumun ise sadece 3. fanın açık olduğu model olduğu söylenebilir.

Yangın 75. m’de, 5 MW büyüklüğünde olduğunda, 30 m/s fan hızı için, 360 s sonunda, 2 m yükseklik için elde edilen sıcaklıkların tünel boyunca değişimi farklı fan açıklık ve kapalılık durumları için Şekil 4.58’de verilmektedir.



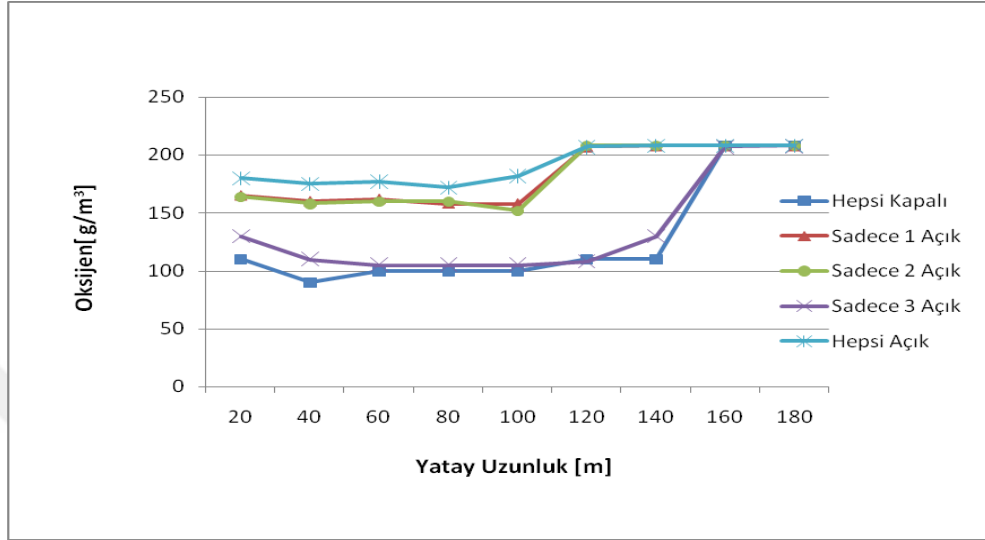
Şekil 4.58. Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s, t=360 sn için sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Yangın 75. m’de, 5 MW büyüklüğünde olduğunda, 30 m/s fan hızı için, 360 sn sonunda, 2 m yükseklik için elde edilen CO’nun tünel boyunca değişimi farklı fan açıklık ve kapalılık durumları için Şekil 4.59’da verilmektedir.



Şekil 4.59. Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s, t=360 sn için CO’nun tünel boyunca değişimi

Yangın 75. m’de, 5 MW büyüklüğünde olduğunda, 30 m/s fan hızı için, 360 sn sonunda, 2 m yükseklik için elde edilen O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi farklı fan açıklık ve kapalılık durumları için Şekil 4.60’da verilmektedir.

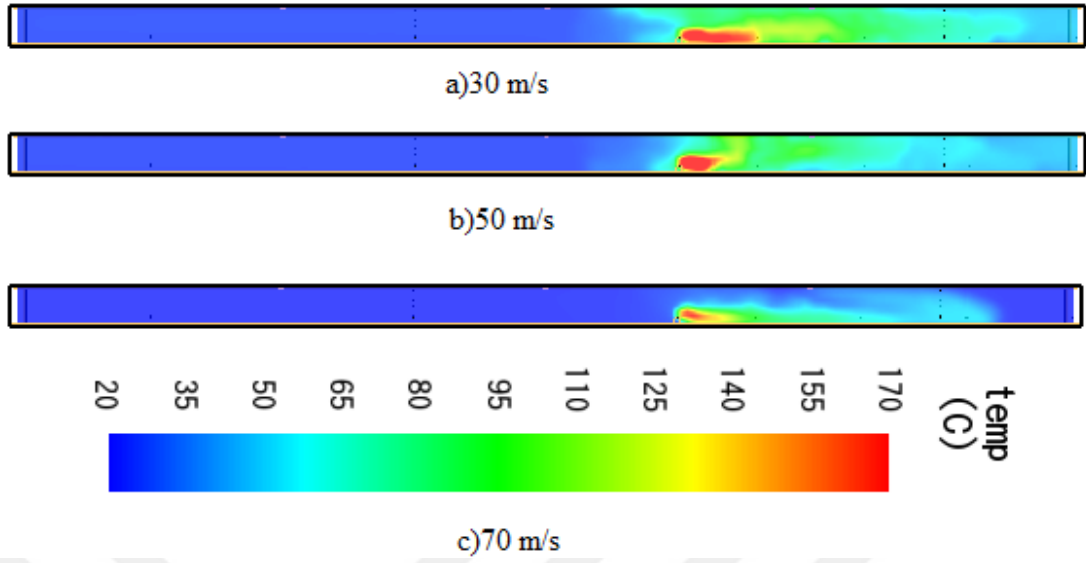


**Şekil 4.60.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s, t=360 sn için O<sub>2</sub>’nin tünel boyunca değişimi

Yukarıda verilen Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60’da görüldüğü üzere fanların hepsinin kapalı olması durumunda tünel içi sıcaklık ve CO değerlerinin en yüksek seviyeye ulaştığı, tünel tahliyesinin gerçekleşebilmesi için görünürlük düzeyinin ve O<sub>2</sub> miktarının ise en alt seviyede olduğu görülmektedir. Sadece 3. fanın açık olması durumunun sonuçlarının neredeyse tüm fanlar kapalı olması durumu ile hemen hemen aynı olduğu, dolayısıyla tünelin havalandırılmasında yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

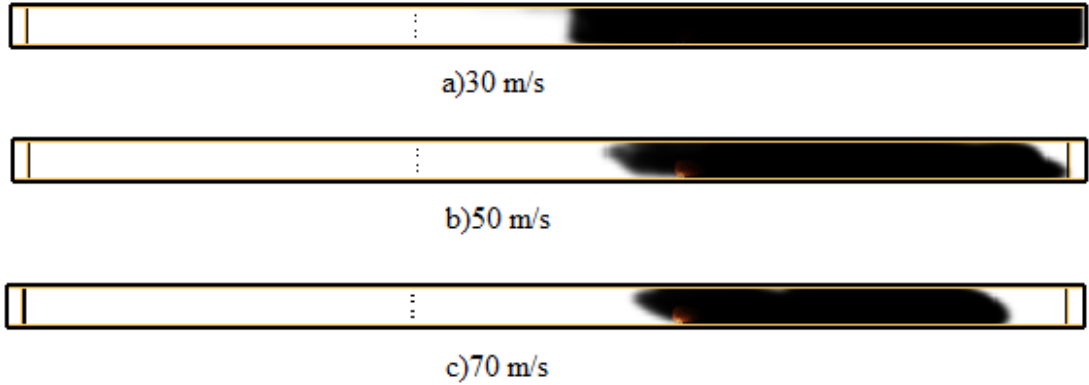
Yapılan incelemeler neticesinde tüm fanların açık olması durumunda optimum sonucun elde edilirken, 2. ve 3. fanın tünel içi şartları iyileştirmede etkisinin yadsınamayacağı aşıkardır.

Tünel analizlerinde çok önemli olan bir diğer parametre ise jet fanların hızıdır. Yangın merkezi 75. m ve yangın büyüklüğü 5 MW olduğunda tüm fanlar açık durumda ve 360 s için tünel içerisindeki sıcaklık dağılımı farklı fan hızları için Şekil 4.61’de birlikte verilmiştir.



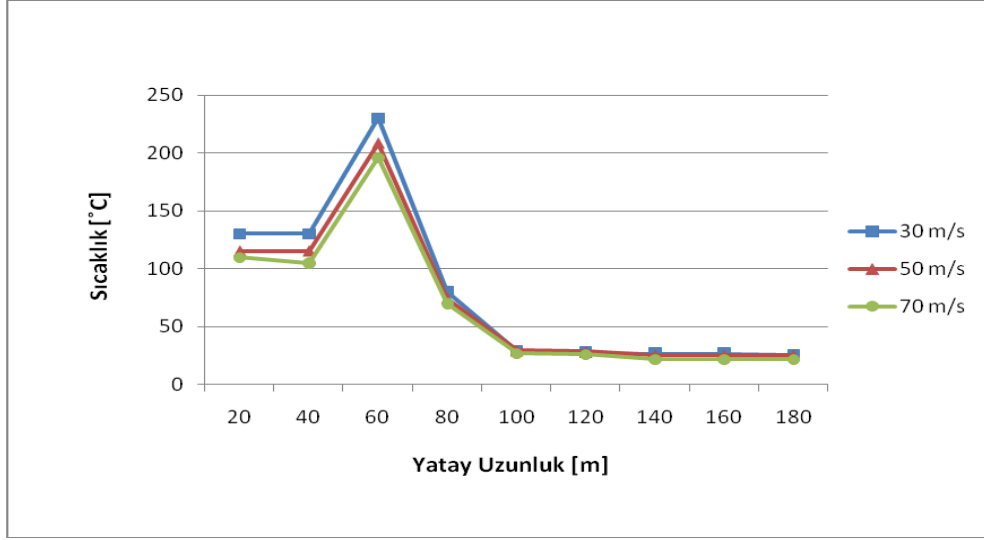
**Şekil 4.61.** Farklı fan hızları için, yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve  $t=360$  s için tünel içerisindeki sıcaklık dağılımı a)30 m/s, b)50 m/s, c)70 m/s

Yangın merkezi 75. m ve yangın büyüklüğü 5 MW olduğunda tüm fanlar açık durumda ve 360 s için tünel içerisindeki duman dağılımı farklı fan hızları için Şekil 4.62’de birlikte verilmiştir.



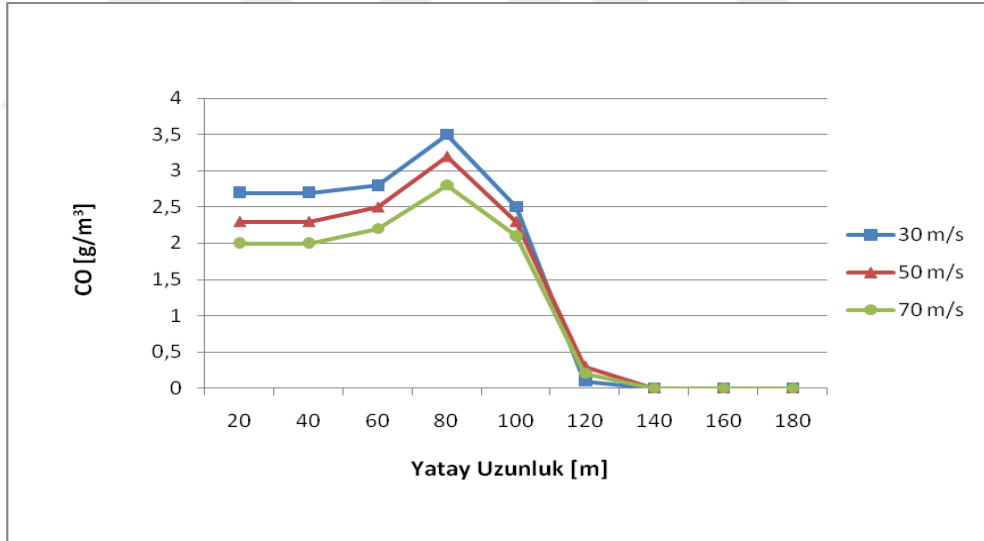
**Şekil 4.62.** Farklı fan hızları için, yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, fan hızı 30 m/s ve  $t=360$  s için tünel içerisindeki duman dağılımı a)30 m/s, b)50 m/s, c)70 m/s

Yangın merkezi 75. m ve büyüklüğü 5 MW olduğunda tüm fanlar açık olduğu konumda, 360 s için zeminden 2 m yükseklikte elde edilen sıcaklık değerinin tünel boyunca değişimi farklı fan hızları için Şekil 4.63’de verilmiştir.



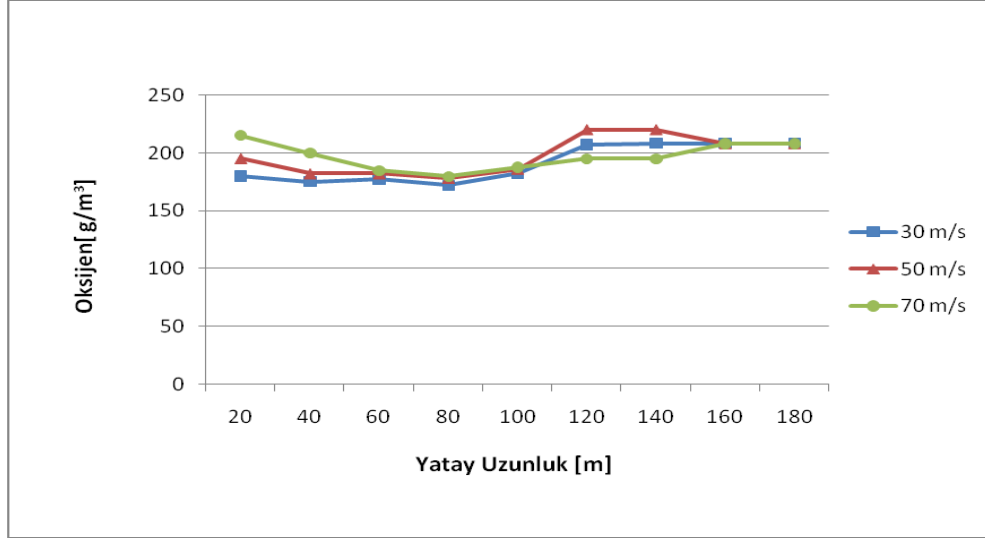
**Şekil 4.63.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, tüm fanlar açık ve  $t=360$  s için sıcaklığın tünel boyunca değişimi

Yangın merkezi 75. m ve büyüklüğü 5 MW olduğunda tüm fanlar açık olduğu konumda, 360 s için zeminden 2 m yükseklikte elde edilen CO değerinin tünel boyunca değişimi farklı fan hızları için Şekil 4.64’de verilmiştir



**Şekil 4.64.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, tüm fanlar açık ve  $t=360$  s için CO’nun tünel boyunca değişimi

Yangın merkezi 75. m ve büyüklüğü 5 MW olduğunda tüm fanlar açık olduğu konumda, 360 s için zeminden 2 m yükseklikte elde edilen  $O_2$ ’nin değerinin tünel boyunca değişimi farklı fan hızları için Şekil 4.65’de verilmiştir



**Şekil 4.65.** Yangın konumu 75 m, yangın büyüklüğü 5 MW, tüm fanlar açık ve  $t=360$  s için  $O_2$ 'nin tünel boyunca değişimi

Jet fanlar dönme hızlarını arttırarak saniyede daha çok hava akışı sağlayarak tünel içi yangın kaynaklı duman ve CO miktarını azalttığı böylelikle ortamdaki  $O_2$  miktarının arttırdığı, tünel içi sıcaklığın azaldığı bir ortam sağladığı ve tünel içerisinde oluşan dumanın daha iyi tahliye edilebildiği yukarıda verilen görünüm ve grafiklerden anlaşılmaktadır. Analiz edilen şartlar içerisindeki optimum fan hızının 70 m/s olduğu kanaatine varılmıştır.



## 5.SONUÇLAR

Bu çalışmada; ülkemizde ve dünyada sayıca fazla olan, ulaşımı kolaylaştıran ve süresini kısaltan fakat kapalı konstrüksiyona sahip olması sebebiyle yangın anında yakıcı özelliği, sonrasındaki zehirli gazlar ve duman sebebiyle insan hayatını tehlikeye atan karayolu tünellerinde meydana gelen olası yangınlar için pek çok senaryo oluşturulmuş ve FDS (Fire Dynamics Simulator) programında analizler yürütülmüştür.

Bu amaçla, öncelikle literatürden referans bir çalışma [1] ele alınmış, referans çalışmada oluşturulan senaryo analiz edilmiş ve sonuçlar kıyaslanarak uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sayede bu çalışmada ele alınan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından bir referans oluşturulmuştur. Daha sonra ise bu çalışma kapsamında çok sayıda yangın senaryoları oluşturulmuş, analizler yürütülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, meydana gelebilirliği açısından hem daha küçük bir taşıt olan otomobil yangını (5 MW) hem de çok daha büyük boyuttaki tanker yangını (50 MW) ele alınmıştır. İki farklı yangın boyutu için 30 m/s, 50 m/s ve 70 m/s fan hızları tünel içerisine yerleştirilen 3 adet jet fanın tümünün kapalı, yalnız 1. fanın açık, yalnız 2. fanın açık, yalnız 3. fanın açık ve tüm fanların açık olması durumları için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ele alınan yangınlar 200 m uzunluğundaki model tünelde, tünel girişinden 25 m, 75 m, 125 m ve 175 m konumlarında incelenmiştir.

Yapılan analizlerde karayolu tünellerinde çıkabilecek olası bir yangın durumunda, yangın boyutunun, yangın konumunun, fan açıklık-kapalılık durumunun ve fanların çalışma hızının tünel içi sıcaklık ve duman dağılımı, CO ve O<sub>2</sub> miktarları üzerindeki etkileri incelenmiş, sonuçlar şekil ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Analiz sonuçları göstermiştir ki yangın sonucunu etkileyen en önemli parametre yangın boyutu yani HRR (Heat Release Rate) olmuştur. 50 MW gücündeki bir yangının meydana gelmesi durumunda ele alınan model tünelde imkânsız olmamakla birlikte insanlar için uygun bir kaçış alanı oluşturmanın çok zor olduğu görülürken 5

MW boyutunda meydana gelen yangında uygun fan dizilimi ve fan hızı kombinasyonu ile yeterli bir duman tahliyesinin yapılabileceği görülmüştür.

Diğer bir yandan yangının tünel içerisindeki konumunun sonuçlara etkisini incelemek amacıyla tünel girişinden x ekseninde 4 m ve z ekseninde 25 m, 75 m, 125 m, 175 m konumlarında çıkabilecek yangınlar analiz edilmiştir. Diğer tüm şartlar sabit tutularak yangın konumun etkisi incelendiğinde tünel girişinden 175. m' de çıkan yangında diğer konumlardaki yangınlara göre duman tahliyesinin daha iyi yapılabildiği, CO seviyesinin daha düşük olduğu görülmüştür.

Aynı yangın gücü, yangın konumu ve fan hızı bakımından değerlendirildiğinde ise analiz edilen 30 m/s, 50 m/s 70 m/s fan hızlarından optimum tahliyenin 70 m/s fan hızında olduğu ve 50 m/s fan hızı ile yakın sonuçlar elde edildiği görülürken özellikle 30 m/s fan hızının 50 MW boyutunda bir yangın kaynaklı dumanı tahliye edemediği ve tünel içi görünürlük seviyesinin çok düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Tünel yangınlarında yangın sonucunu etkileyen bir diğer parametre olan fan dizilimi yani fanların açıklık-kapalılık durumu incelenmiştir. Diğer tüm şartlar sabitken fanların hepsinin açık olması durumunda diğer fan dizilimlerine göre daha iyi sonuçlar elde edildiği, sadece 3. fanın açık olması ve tüm fanların kapalı olması durumunda benzer olarak duman tahliyesinin yapılamadığı ve CO seviyesinin yüksek olduğu sonuçları görülmüştür. Sadece 1. fanın açık olması ve sadece 2. fanın açık olması durumlarında da benzer sonuçlar görülmüş, duman tahliyesinin ve CO seviyesinin tüm fanların kapalı olması ya da sadece 3. fanın açık olduğu duruma göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tüm analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde 5 MW boyutunda, 175 m' de yani D konumunda meydana gelen yangının, fanların hepsinin açık ve fan hızının 70 m/s olması durumunda optimum duman tahliyesinin sağlandığı, düşük CO ve sıcaklık seviyesinin yakalandığı, yüksek O<sub>2</sub> düzeyine ulaşıldığı kanaatine varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Jun, D., Li, M., Zhen-ping, W., Zhen, X., Wei-feng, W., Simulation Study on Critical Velocity of Longitudinal Ventilation Tunnel Fire. *Procedia Engineering* 52, 67 – 71, 2013
- [2] Kayılı, S., Köktürk, T., Eralp, O.C., Tünel yangınlarının ve Yangın Güvenliği İçin Kullanılan Havalandırma Sistemlerinin Özellikleri. *Mühendis ve Makina*, 51(604), 2-8, 2010
- [3] Ünal, E., Acil Durum Tünel Havalandırmasında Bölgesel Faktörlerin Sayısal Olarak İncelenmesi. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Nisan 2015, İzmir, s.677-686, 2015
- [4] Bilgin, F., Karayolu Tünellerinde Araç Emisyonları Havalandırma ve Yangın Önleme Esasları. Yüksek Lisans Tezi. Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2014
- [5] Karaaslan, S., Hepkaya, E., Yücel, N., Cfd Simulation of Longitudinal Ventilation Systems In A Scaled Short Tunnel. *Isı Bilimi ve Teknigi Dergisi*, 33, 1, 63-77, 2013
- [6] Alpgiray, B., Enine Havalandırma Sistemine Sahip Bir Tünelde Yangın Kaynaklı Dumanın Tahliyesinin Sayısal Yöntemle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2016
- [7] Sturm, P., Beyrer, M., Rafiei, M., On The Problem of Ventilation Control In Case of A Tunnel Fire Event. *Case Studies in Fire Safety* 7, 36–43, 2017
- [8] Wang, Q., Tangb, F., Lib, L., Zhangc, X., Fanb, C., Large Eddy Simulation On The Effect Of Smoke Exhaust Openings Arrangement On The Smoke Spread In Tunnel Fires. *Procedia Engineering* 135, 309 – 315, 2016

- [9] Yuan, Z., Leia, B., Bia H., The Effect of Fire Location on Smoke Temperature in Tunnel Fires with Natural Ventilation. *Procedia Engineering* 121, 2119 – 2124, 2015
- [10] Lin, P., Zhang, Y., Li, T., Si, Y., A Numerical Study on the Impact of Vehicles' Blockage on the Performance of Semi-transversal Smoke Control System in Tunnel Fire. *Procedia Engineering* 135, 248 – 260, 2016
- [11] Li, J., Deng, Q., Li, Y., Wang, Z., Numerical Evaluation On The Smoke Control Strategies and Parameters For The Road Tunnel with Converging Junctions. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, Jinan-China, 1858-1863, 2017
- [12] Altay, M., Tünel Yangınlarının Modellenmesi ve Etkin Parametrelerin Modellemedeki Gerçekçiliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, 2016
- [13] Liu, Y., Cassady, S., A Modified Critical Velocity For Road Tunnel Fire Smoke Management with Dedicated Smoke Extraction Configuration. *Case Studies in Fire Safety* 2, 16–27, 2014
- [14] Lia, Q., Fanga, Z., Yuan, J., Tanga, Z., Numerical Simulation on Impacts of Longitudinal Ventilation on Tunnel Fire Detection. *Procedia Engineering* 135, 275 – 280, 2016
- [15] Palazzi, E., Fabiano, B., Pastorino, R., Maschio, G., Tunnel Ventilation Modelling in Sloped Tunnels. *Chemical Engineering Transaction*, Volume 17, 349-354, 2009
- [16] Li, Y., Z., Lei, B., Ingason, H., Study of Critical Velocity and Backlayering Length In Longitudinally Ventilated Tunnel Fires. *Fire Safety Journal* 45, 361–370, 2010

- [17] Tian, X., Zhong, M., Shi, C., Zhang, P., Liu, C., Full-Scale Tunnel Fire Experimental Study of Fire-Induced Smoke Temperature Profiles with Methanol-Gasoline Blends. *Applied Thermal Engineering* 116,233–243, 2017
- [18] Fan, C.G., Ji, J., Gao, Z.H. , Han, J.Y., Sun, J.H., Experimental Study of Air Entrainment Mode with Natural Ventilation Using Shafts in Road Tunnel Fires. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 56, 750–757, 2013
- [19] Fan, C.G., Ji, J., Gao, Z.H. , Han, J.Y., Experimental Study on Transverse Smoke Temperature Distribution in Road Tunnel Fires. *Tunnelling and Underground Space Technology* 37,89–95,2013
- [20] Yuan, Z., Lei, B., Kashef, A., Reduced-Scale Experimental Research on Fires in Tunnels with Natural Ventilation. *The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, 907-915, 2013
- [21] Lia, J., Tian, Y., Lia, Y., Zhao, Y., ve Huang, Y., Numerical and Experimental Study on the Effects of the Slope on the Critical Velocity in Titled Tunnels. *10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, Jinan-China*, 1864–1870, 2017
- [22] Lee, S. R., Ryou, H. S., A Numerical Study On Smoke Movement In Longitudinal Ventilation Tunnel Fires For Different Aspect Ratio. *Building and Environment* 41, 719–725, 2016
- [23] 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* 35,363-390, 2000
- [24] Lou, B., Qiu, Y., Research on the Semi-transverse Ventilation and Smoke Exhaust Strategy in Sloping Tunnels. *International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS )*,South China, 2015

- [25] Aironn İklimlendirme Sistemleri San. ve Taahhüt A.Ş.  
<http://www.aironn.com.tr/karayollari-tunellerinde-dogal-ve-mekanik-havalandirma>,  
Nisan 2018
- [26] Piarc, Road Tunnels: Vehicle Emissions And Air Demand For Ventilation Piarc  
Technical Committee C4 Road Tunnels Operation, 2012
- [27] NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access  
Highways,2017
- [28] National Institute of Standards and Technology (NIST),  
<https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview>, Nisan 2018
- [29] Piarc, Fixed Fire Fighting Systems In Road Tunnels: Current Practise and  
Recommendations
- [30] Systemair HSK Havalandırma End.San.Tic.A.Ş.  
<https://www.systemair.com/contentassets/15b0e983dd47456a8c79613f938eb3f4/tun-el-havalandrmas.pdf>, Nisan 2018
- [31] Aironn İklimlendirme Sistemleri San. ve Taahhüt A.Ş.  
<http://www.aironn.com.tr/upload/files/Kataloglar/Aironn%20Katalog%202016.pdf>,  
Nisan 2018
- [32] Ayhan, H., Kocar, C., Sökmen, C.N., T Birleşim Bölgelerinde Sıcaklık  
Salınımlarının Modellenmesi. X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi,  
418-427, 2009