GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

VİRAJLI BİR KARAYOLU TÜNELİ İÇİNDE YANGIN SENARYOLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Betül DEMİRCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Betül DEMİRCİ

27/12/2022

VİRAJLI BİR KARAYOLU TÜNELİ İÇİNDE YANGIN SENARYOLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Betül DEMİRCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Karayolu ve demiryolu taşımacılığının önemli unsurlarından birisi olan tünel kavramı araştırmacılar tarafından oldukça sık incelenmektedir. Ulaşımı kolaylaştıran tüneller incelenirken içinde yaşanabilecek her türlü senaryo gerek deneysel gerekse bilgisayar programlarının sağladığı analizler yardımıyla ele alınmaktadır. Bu çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün hazırlamış olduğu teknik şartnameye uyarak tasarlanmış 1,5 km uzunluğundaki virajlı bir tünelin analitik hesaplamaları ve nümerik çözümlemeleri yapılmıştır. Analitik çözümler PIARC'ın hazırlamış olduğu denklemlerle sağlanırken, nümerik çözümler bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü olan Ansys/FLUENT yardımıyla yapılmıştır. Bu tez çalışmasının temel amacı geleneksel jet fan kullanarak havalandırılan virajlı bir tünelin farklı lokasyonlarında ortaya çıkan yangın senaryosunun etkilerini araştırmaktır. HAD analizleri yapılmadan türbülans modeli seçimi, jet fan sayısı ve havalandırma metodu gibi özellikler geniş bir literatür çalışmasıyla araştırılmıştır. Elde edilen veriler aracılığıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı lokasyonlara göre yapılan yangın analizlerinin sonuçları FLUENT programının sağlamış olduğu konturlerle ve grafiklerle gösterilmiştir. Yangın kaynağının çıkış portalına yaklaştığı durumlarda tünel içi sıcaklık dağlımının daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Giriş portalına yakın olan yangın kaynağında ise duman hızlı bir şekilde tahliye edilmediğinden dolayı içerdeki ısıyı hemen dışarı atamaz ve tünel içi sıcaklık dağılımında artış meydana gelir. Jet fanlardan yayılan hava akımı Coanda etkisiyle iç bükey duvara yapışmaktadır ve yüksek sıcaklığa sahip dumanın dış bükey duvara doğru yönlenmesine neden olur. Bu nedenle yangın bölgesine yakın alanlarda tünelin dış bükey kısmındaki sıcaklık değerlerinin iç bükey duvar kısmındaki sıcaklık değerlerinden daha yüksek olduğu görülür. Ayrıca yangın bölgesine yakın yerlerde, artan sıcaklık etkisiyle genleşen gazların hızının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91411
Anahtar Kelimeler	:	Tünel yangını, havalandırma sistemi, Froude sayısı, viraj, ölçek modeli, jet fan
Sayfa Adedi	:	126
Danışman	:	Doç. Dr. Nureddin DİNLER

NUMERICAL INVESTIGATION OF FIRE SCENARIOS IN A CURVED HIGHWAY TUNNEL

(M. Sc. Thesis)

Betül DEMİRCİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

The concept of the tunnel, which is one of the important elements of road and rail transport, is frequently examined by researchers. While examining the tunnels that facilitate transportation, all kinds of scenarios that can be experienced in them are handled with the help of both experimental and computer programs. In this study, analytical calculations and numerical analysis of a 1.5 km long curved tunnel designed according to the technical specifications prepared by the General Directorate of Highways were made. While analytical solutions were made with the equations prepared by PIARC, numerical solutions were made with the help of Ansys/FLUENT which is a computational fluid dynamics solver. The main purpose of this thesis is to investigate the effects of the fire scenario that occurs in different locations of a curved tunnel ventilated using a conventional jet fan. Features such as turbulence model selection, number of jet fans, and ventilation method were investigated with a large literature study without CFD analysis. Analyses were carried out through the obtained data. The results of the fire analyses made according to different locations are shown with the contours and graphics provided by the FLUENT program. It was observed that the temperature distribution in the tunnel was lower in cases where the fire source approached the exit portal. In the fire source close to the entrance portal, since the smoke is not evacuated quickly, the heat inside cannot be discharged immediately and an increase in the temperature distribution in the tunnel occurs. The air flow emanating from the jet fans adheres to the concave wall with the Coanda effect and causes the high-temperature smoke to be directed towards the convex wall. For this reason, it is seen that the temperature values in the convex part of the tunnel are higher than the temperature values in the concave wall part in the areas close to the fire area. In addition, it has been observed that the velocity of the gases expanding with the effect of increasing temperature is higher in places close to the fire area.

Science Code	:	91411
Key Words	:	Tunnel fire, ventilation system, Froude number, curvature, scaled model, jet fans
Page Number	:	126
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Nureddin DİNLER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince olumlu tutumuyla beni cesaretlendiren, bilim insanı olmanın verdiği sorumlulukla çalışmalarımı yönlendiren ve kıymetli bilgelerini hiçbir zaman esirgemeden paylaşan değerli danışmanım Doç. Dr. Nureddin DİNLER' e, çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan babam Mevlüt DEMİRCİ'ye ve annem Rabia DEMİRCİ'ye teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. KARAYOLLARI TÜNELLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ 13

2.1. Tünel Güvenliği 14

2.1.1. Koruyucu önlemler 15

2.1.2. Hafifletici önlemler 15

2.1.3. Kendini kurtarma 16

2.1.4. Acil müdahale 16

3. KARAYOLU TÜNEL HAVALANDIRMASI 19

3.1. Doğal Havalandırma 19

3.2. Mekanik Havalandırma 20

3.2.1. Boyuna havalandırma 20

3.2.2. Enine havalandırma 21

3.2.3. Yarı enine havalandırma 21

4. EMİSYON STANDARLARI VE EMİSYON DEĞERLERİ 23

4.1. Emisyon Oranı 23

Sayfa

4.1.1. Karbonmonoksit (CO) 24

4.1.2. Nitrojen dioksit NO_2 25

4.1.3. Partikül madde ve görünürlük 25

5. KARAYOLU TÜNELLERİNDE EMİSYON MİKTARININ VE TAZE HAVA GEREKSİMİNİN HESAPLANMASI 27

5.1. Tünel İçerisindeki Araç Sayısının Belirlenmesi 30

5.2. Araç Başına Düşen Emisyon Miktarının Belirlenmesi 30

5.2.1. Araçlar için emisyon oranı 31

5.2.2. Zaman faktörü (ft) 39

5.2.3. Kütle faktörü (fm) 40

5.2.5. Partikül madde emisyon miktarı 41

6. AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ 43

6.1. Korunum Denklemleri 43

6.2. Türbülans Metotları ve Türbülans Modeli Seçimi 44

6.2.1. Doğrudan sayısal simülasyon (DNS) 45

6.2.2. Büyük girdap simülasyonu (LES) 45

6.2.3. Reynolds ortalaması alınmış navier stokes simülasyonu (RANS) 45

6.3. Tür Denklemleri 47

7. DOĞAL HAVALANDIRMALI ÖLÇEKLİ BİR TÜNELDE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SAYISAL ÇALIŞMA İLE DOĞRULANMASI 49

8. YANGIN TASARIMI 55

9. HAVALANDIRMA TASARIMINDA KULLANILAN VERİLER VE HESAPLAMALAR 57

9.1. Yangın Yükü 58

9.2. Kritik Hız ve Maksimum Duman Sıcaklığı Hesabı 58

9.3. Emisyon Miktarının Belirlenmesi 63

Sayfa

9.3.1. CO hesapları 65

9.3.2. NOx hesapları 66

9.3.3. Partikül madde hesapları 67

9.4. Jet Fan Seçimi İçin Basınç Hesabı 68

10. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ METODUYLA HESAPLAMALAR 75

10.1. Ölçek Modelin Belirlenmesi 75

10.2. Sınır Şartları 76

10.3. Çözüm Ağı Sayısının Belirlenmesi ve Analizin Doğrulanması 77

11. ANALİZ SONUÇLARI 83

11.1. Sıcaklık Konturları 85

11.2. Hız Konturları 91

12. SONUÇ VE ÖNERİLER 115

KAYNAKLAR 117

EKLER 123

EK-1. Deney değerleri 124

EK-2. KGM tarafından belirlenen tahmini YOGT verileri 125

ÖZGEÇMİŞ 126

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Tünel yangınları nedenleri ve etkileri 3

Çizelge 1.2. Geri katmanlaşmayı engelleyecek hız değerleri 8

Çizelge 2.1. Tünel kesiti avantaj ve dezavantajları 14

Çizelge 4.1. CO için işletme değerleri 25

Çizelge 4.2. Görünürlük durumu ve sönümleme katsayısı 26

Çizelge 4.3. Görünürlük için tasarım ve işlem değerleri 26

Çizelge 5.1. Benzinli binek araçlar için CO emisyon oranı 32

Çizelge 5.2. Benzinli binek araçlar için NOx emisyon oranı 32

Çizelge 5.3. Benzinli binek araçlar için partikül madde miktarı 33

Çizelge 5.4. Dizel binek araçlar için CO emisyon oranı 33

Çizelge 5.5. Dizel binek araçlar için NOx emisyon oranı 34

Çizelge 5.6. Dizel binek araçlar için partikül madde miktarı 34

Çizelge 5.7. Benzinli hafif ticari araçlar için CO emisyon oranı 35

Çizelge 5.8. Benzinli hafif ticari araçlar için NOx emisyon oranı 35

Çizelge 5.9. Benzinli hafif ticari araçlar için partikül madde miktarı 36

Çizelge 5.10. Dizel hafif ticari araçlar için CO emisyon oranı 36

Çizelge 5.11. Dizel hafif ticari araçlar için NOx emisyon oranı 37

Çizelge 5.12. Dizel hafif ticari araçlar için partikül madde miktarı 37

Çizelge 5.13. Dizel ağır yük araçları için CO emisyon oranı 38

Çizelge 5.14. Dizel ağır yük araçları için NOx emisyon oranı 38

Çizelge 5.15. Dizel ağır yük araçları için partikül madde miktarı 39

Çizelge 5.16. Binek araçlar için zaman faktörü 39

Çizelge 5.17. Hafif yük araçları için zaman faktörü 40

Çizelge 5.18. Ağır yük araçları için zaman faktörü 40

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.19. Ağır yük taşıtları için kütle faktörü 40

Çizelge 5.20. 2000 m üzerindeki yerler için yükseklik faktörü 41

Çizelge 5.21. Binek araçlar ve hafif ticari araçları için partikül madde miktarı 42

Çizelge 5.22. Ağır yük araçları için partikül madde miktarı 42

Çizelge 7.1. Sınır şartları 52

Çizelge 8.1. Farklı ülkelerde yangın boyutları 56

Çizelge 9.1. Tünel geometrik özellikleri 57

Çizelge 9.2. Araç türüne göre maksimum birim zamandaki ısı salınımı oranı 58

Çizelge 9.3. Kullanılan yakıt türüne göre araç yüzdeleri 63

Çizelge 9.4. 2035 yılına ait araç/saat sayısı ve araç yüzdeleri 64

Çizelge 9.5. Binek araçlar için emisyon faktörleri 65

Çizelge 9.6. Hafif ticari araçlar içim emisyon faktörleri 65

Çizelge 9.7. Ağır yüklü araçlar emisyon faktörleri 65

Çizelge 9.8. Binek araçlar için emisyon faktörleri 66

Çizelge 9.9. Hafif ticari araçlar içim emisyon faktörleri 67

Çizelge 9.10. Ağır yüklü araçlar emisyon faktörleri 67

Çizelge 9.11. Binek araçlar için emisyon faktörleri 67

Çizelge 9.12. Hafif ticari araçlar içim emisyon faktörleri 67

Çizelge 9.13. Ağır yüklü araçlar emisyon faktörleri 68

Çizelge 9.14. Jet fan özellikleri 72

Çizelge 10.1. Froude ölçek faktörü 76

Çizelge 10.2. 1/25 Ölçek modele göre sınır şartları 77

Çizelge 10.3. 1/25 Ölçeğe göre tünel, fan ve araç boyutları 79

Çizelge 10.4. Çözüm ağı türü, boyutu ve eleman sayısı 80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Tünel kesitleri a) at nalı kesitli b) dikdörtgen kesitli c) dairesel kesitli..... 13

Şekil 9.1. Yangın bölgeleri (Tünel üst görünüş)..... 57

Şekil 9.2. Analizi yapılan tünelin kesiti..... 57

Şekil 9.3. Yangın esnasında tünel içerisindeki duman ilerleyişi 59

Şekil 9.4. Kritik hız-birim zamandaki ısı salınımı oranı grafiği..... 60

Şekil 9.5. Standartlaştırılmış yangın karakteristik eğrileri 62

Şekil 10.1. Birinci çözüm hacmi..... 77

Şekil 10.2. İkinci çözüm hacmi 78

Şekil 10.3. Üçüncü çözüm hacmi 78

Şekil 10.4. Çözüm ağı bölgeleri..... 80

Şekil 10.5. Yangın bölgesi etrafındaki çözüm ağı dağılımı..... 81

Şekil 11.1. Tünel içerisinde 180. saniye sonunda oluşan dumanın sıcaklık dağılımı... 83

Şekil 11.2. Kırk ikinci saniyedeki maksimum tavan sıcaklığı..... 83

Şekil 11.3. Virajlı tünelde iç bükey duvar ve dış bükey duvar gösterimi..... 84

Şekil 11.4. Birinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn) 85

Şekil 11.5. İkinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn). 87

Şekil 11.6. Üçüncü yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn) 88

Şekil 11.7. Yangın sonunda oluşan maksimum tavan sıcaklığı grafiği..... 89

Şekil 11.8. Yangın kaynağı üzerindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı..... 90

Şekil 11.9. İkinci jet fan grubundan farklı uzaklıktaki hız konturları..... 91

Şekil 11.10. Üçüncü jet fan grubundan farklı uzaklıktaki hız konturları..... 93

Şekil 11.11. Dördüncü jet fan grubundan farklı uzaklıktaki hız konturları 94

Şekil 11.12. 2. jet fan grubu ve 3. jet fan grubu arasındaki maksimum hız grafiği..... 95

Şekil **Sayfa**

Şekil 11.13. 2. jet fan grubu ve 4. jet fan grubu arasındaki maksimum hız grafiği 96

Şekil 11.14. 3. jet fan grubu ve 4. jet fan grubu arasındaki maksimum hız grafiği 97

Şekil 11.15. x=8,8 m'deki hız dağılımları 98

Şekil 11.16. x=12,8 m'deki hız dağılımları 98

Şekil 11.17. x=14 m'deki hız dağılımları 99

Şekil 11.18. x=17,6 m'deki hız dağılımları 99

Şekil 11.19. x=19,37 m'deki hız dağılımları 100

Şekil 11.20. x=20,57 m'deki hız dağılımları 100

Şekil 11.21. x=25,6 m'deki hız dağılımları 101

Şekil 11.22. x=26,8 m'deki hız dağılımları 101

Şekil 11.23. x=29,8 m'deki hız dağılımları 102

Şekil 11.24. Birinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları 103

Şekil 11.25. İkinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları 104

Şekil 11.26. Üçüncü yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları 104

Şekil 11.27. Jet fan etrafındaki basınç dağılımı 105

Şekil 11.28. Farklı konumlardaki yangın senaryoları için basınç düşüşü grafiği 106

Şekil 11.29. Jet fanların çalışmadığı durumda birinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn) 107

Şekil 11.30. Jet fanların çalışmadığı durumda ikinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn) 108

Şekil 11.31. Jet fanların çalışmadığı durumda üçüncü yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn) 110

Şekil 11.32. Jet fanların çalışmadığı durumda maksimum tavan sıcaklığı grafiği 111

Şekil 11.33. Birinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı (jet fanlar aktif değildir) 112

Şekil 11.34. İkinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı (jet fanlar aktif değildir) 113

Şekil **Sayfa**

Şekil 11.35. Üçüncü yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı (jet fanlar aktif değildir) 113

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. Kaliforniya tünel yangını 2

Resim 2.1. Sabuncu Tüneli'nde yangın ve kaza tatbikatı 17

Resim 3.1. Boyuna havalandırma 20

Resim 3.2. Enine havalandırma 21

Resim 3.3 .Yarı enine havalandırma 22

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a_{cat}	Araç türlerine göre yüzde
a_{HGV}	Ağır yük taşıt yüzdesi
a_{LCV}	Hafif yük taşıtı yüzdesi
a_{PC}	Binek araç yüzdesi
A_{HGV}	Ağır yük taşıtı kesit alanı (m^2)
A_{LCV}	Hafif yük taşıtı kesit alanı (m^2)
A_{PC}	Binek araç kesit alanı (m^2)
A_{tu}	Tünel kesit alanı (m^2)
C_{adm}	Kabul edilebilir konsantrasyon hacmi (g/m^3)
C_{amb}	Taze havadaki kirlilik hacmi (g/m^3)
C_D	Sürüklenme katsayısı
c_p	Özgül ısı kapasitesi (kJ/kgK)
D	Trafik yoğunluğu
D_{PCU}	Bir kilometreye karşılık gelen toplam binek araç sayısı
D_{veh}	Bir kilometreye karşılık gelen toplam araç sayısı
Fr	Froude sayısı
f_{HGV}	Binek araç sayısına karşılık gelen ağır yük araç sayısı
f_h	Yükseklik faktörü
f_m	Kütle faktörü
f_t	Zaman faktörü
G_{tun}	Tünel içerisindeki toplam emisyon miktarı ($g/s\text{-}m^2/s$)
G_{sec}	Bir şeritteki toplam emisyon miktarı
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
g_{cat}	Birim araç kategorisine karşılık gelen emisyon oranı
g_{fac}	Emisyon oranı faktörü
K_{adm}	Kabul edilebilir görünürlük seviyesi (m^{-1})

Simgeler	Açıklamalar
K_{amb}	Görünürlük için kabul edilebilir seviye (m^{-1})
L	Tünel uzunluğu (m)
L_{fan}	Fan uzunluğu (m)
N	Toplam araç sayısı
N_{lane}	Toplam şerit sayısı
N_{sec}	Toplam bölüm sayısı
n_{LCV}	Hafif yük araç sayısı
n_{HGV}	Ağır yük araç sayısı
n_{PC}	Binek araç sayısı
n_{top}	Toplam jet fan sayısı
M^*	Gerekli taze hava debisi m^3/s
$\dot{m}_{gaz}$	Gaz debisi (kg/s)
$\dot{m}_{hava}$	Hava debisi (kg/s)
$\dot{m}_{yakıt}$	Yakıt debisi (kg/s)
p	Basınç (Pa)
Q	Yangın yükü (MW)
Q^*	Boyutsuz yangın yükü (MW)
Ri	Richardson sayısı
Ri_c	Kritik Richardson sayısı
T	Sıcaklık (K)
T_f	Yangın sıcaklığı (K)
T_0	İlk sıcaklık
t	Zaman (s)
V_c	Kritik hız (m/s)
V_{wind}	Rüzgar hızı (m/s)
Δ	İki değer arasındaki fark
η_i	Jet fan kurulum faktörü
η_m	Jet fan montaj verimi
θ	Eğim gradyanı
β	Eğim gradyanı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)

Simgeler	Açıklamalar
ρ_0	İlk yoğunluk (kg/m^3)
ϑ	Duvar sürtünme kayıp katsayısı
ζ	Tünel giriş geometrisine göre kayıp katsayısı
ξ_{wind}	Rüzgar faktörü
λ	Froude ölçek faktörü

Kısaltmalar	Açıklamalar
EDC	Eddy Dissipation Rate
DNS	Direct Numerical Simulation
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LCV	Light Commercial Vehicles
LES	Large Eddy Simulation
NFPA	National Fire Protection Association
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HGV	Heavy Goods Vehicles
HRR	Heat Release Rate
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
PC	Passenger Cars
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
YOGT	Yıllık Ortalama Günlük Trafik

1. GİRİŞ

Tüneller, zorlu ve karmaşık jeolojiye sahip engellerin aşılmasına yardımcı olan, giriş-çıkış bölümleri açık yapılardır. Tüneller kullanım alanlarına göre trafik tünelleri ve taşıma tünelleri olmak üzere iki alt başlıkta toplanmaktadır. Taşıma tünelleri su, kanalizasyon tünelleri, hidroelektrik tesis tünelleri ve endüstri tesis tünelleri olarak incelenirken, trafik tünelleri ise yaya tünelleri, metrolar, demiryolu ve karayolu tünelleri olarak incelenmektedir.

Trafik tünelleri büyüyen teknoloji ve ekonomi ile ivmelenerek gelişmektedir. Bu gelişimi desteklemek için tünel içerisinde meydana gelebilecek kazaların, kaza sonrası veya diğer sebeplerle oluşabilecek yangınların etkisini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Tünellerde meydana gelen yangının büyüklüğü, yanma şartını sağlayan en önemli unsur olan hava sayesinde kısa sürede çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Meydana gelen yüksek sıcaklıktaki yangınlar ve yangın sonucunda oluşan zehirli gazlar insan hayatında ölüme kadar varabilecek olumsuz etkilere neden olmaktadır. Oluşabilecek tüm olumsuz etkileri en aza indirebilmek amacıyla tünel içerisindeki zehirli gazların belirli bir hızda tahliye edilmesi gerekir. Ayrıca tünel yangınları tünel mimarisinde de yıkıcı sonuçlara sebep olup insan hayatını etkileyebilir. Bu ve benzeri nedenlerden dolayı tünel yangınları her geçen gün daha kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Son 20 yıl içerisinde gerçekleşmiş tahribat etkisi büyük tünel yangınlarından bir tanesi 12 Ekim 2007 tarihinde Los Angeles şehrinde yaşanmıştır. Golden State otoyolundaki virajlı tünelde, yağan yağmurun etkisiyle, meydana gelen kazada tünel girişinde araçlar çarpışmıştır. 3 kişinin ölümüyle sonuçlanan kazada bir kamyon yanmıştır. Ölümle sonuçlanan bu feci kaza, 2 gün boyunca yolun kapanmasına neden olmuştur. Maliyet açısından da kayıplara sebebiyet veren kazanın, temizlik ve onarım çalışmaları 17 milyon doları bulmuştur (NBC News, 2008).

Resim 1.1. Kaliforniya tünel yangını (NBC News, 2008)

Literatür Çalışmaları

Karayolu tünel yangınları, teknik hatalar ve kaza kaynaklı olmak üzere iki temel nedenden meydana gelmektedir. Genellikle teknik hataların sebep olduğu yangınlar oldukça yavaş gelişir, bu yüzden araç kazasında ulaşılabilecek en yüksek birim zamandaki ısı salınımı oranına göre yaklaşık olarak 15 ile 25 dakika daha geç ulaşılır. Yangının hızla büyümesinin nedeni kazalardan sonra dökülen benzindir. Yangın bölgesinde bulanan diğer araçlar da hemen hemen aynı hızda yanmaya başlar (Peter, 2009). Tünel yangınlarının nedenleri ve etkileri Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Tünel yangınları nedenleri ve etkileri (Peter, 2009)

Yıl	Tünel	Uzunluk (m)	Tüp Sayısı	Nedeni	Yaralanma	Hasar
1949	Hollanda Tüneli, Amerika	2 600	2	Kamyon yangını (Karbon disülfür)	66 kişi zehirlendi	10 kamyon, 13 araba
1968	Moorfleet Tüneli, Almanya	243		Kamyon yangını (14t Polietilen) Fren arızası		1 kamyon-römork
1975	Guadarroma Tüneli, İspanya	3345	2	Kamyon yangını, Çam reçinesi		1 kamyon
1978	Velsen Tüneli, Hollanda	768	2	Çarpışma	5 kişi öldü, 4 kişi yaralandı	2 kamyon, 4 araba
1979	Nihonzoka Tüneli, Japonya	2 045	2	Çarpışma	7 kişi öldü, 2 kişi yaralandı	87 araba, 102 kamyon
1982	Caldecott Tüneli, Amerika	1 028	3	Çarpışma, tank yangını	7 kişi öldü, 2 kişi yaralandı	2 kamyon, 1 otobüs, 1 araba
1984	Gotthard Tüneli, İsviçre	16 321	1	Kamyon yangını,		1 kamyon
1984	Felbertauern Tüneli, Avusturya	5 130	1	Otobüs, fren arızası		1 otobüs
1988	Herzogberg Tüneli, Avusturya	2 007	1	Kamyon yangını		1 kamyon
1987	Gumefens Tüneli, İsviçre	340	2	Çarpışma 3 kamyon, 5 araba;dökülen benzin	2 kişi öldü, 5 kişi yaralandı	3 kamyon, 5 araba
1995	Pfänder Tünel, Avusturya	6 750	1	Çarpışma, 1 kamyon, 1 minibüs, 2 araba	3 kişi öldü	1 kamyon, 1 minibüs, 2 araba
1998	Gleinalm Tüneli, Avusturya	8 320	1	Otobüs		1 otobüs
1999	Mont-Blanc Tüneli, Fransa	11 600	1	Teknik hatalar	39 kişi öldü	23 kamyon, 11 araba, 2 itfaiye aracı
1999	Tauern Tüneli, Avusturya	6 041	1	Çarpışma	12 kişi öldü	24 araba, 16 kamyon

Tünellerde meydana gelen yangın durumlarında boylamasına havalandırmaya karşı yayılan dumanı bastırmak için gerekli olan minimum hava hızına kritik hız denir (Klote ve Milke, 1992:89). Kritik hızın belirlenmesinde yangın gücü ve tünel geometrisi iki önemli etkendir (Wu ve Bakar, 2000).

Thomas (1968) yeraltı tünelleri ile ilgili çalışmasında Froude sayısı teorisini temel alarak havalandırma hızının yangın üzerindeki etkilerini incelemiştir. Farklı ölçeklerdeki modelleri kullanarak yangın sonrası oluşan gaz dumanını incelemiş ve Froude sayısının bire eşit olduğunu varsayarak kritik hız kavramı için genel bir görüş ortaya koymuştur. Çalışmaları sonucunda Eş. 1.1'de belirtilen formülü elde etmiştir.

$$V_c = \left(\frac{gQ_cH}{\rho_0 C_p T_f A}\right)^{1/3} \tag{1.1}$$

Kritik hız diğer çalışmacılar tarafında da kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

Hinkley (1970), Thomas ile aynı teoriyi kullanarak bir alışveriş merkezi tavanı boyunca yayılan sıcak gazların hızı ile birim zamandaki ısı salınımı oranı arasında Thomas'ın elde ettiği formüle benzer bir formül elde etmiştir.

$$V_c = K' \left(\frac{gQT}{q_0 C_p T_a^2 W} \right)^{1/3} \tag{1.2}$$

Hedelsen (1976), Hinkley'in yapmış olduğu çalışmayı geliştirerek yeni bir formül elde etmiştir. Kritik hızı hesaplayabilmek için kullanılan temel formüllere ek olarak, otomobiller ve ağır yük taşıyan araçlar için ısı yayma oranlarını tahmin etmiştir. Elde ettiği formül, Glasgow'daki büyük ölçekli testler için sınırlı bir veri setinden çıkarılan sabitleri içermektedir (Heselden, 1976).

$$V_c = CK \left(\frac{gQT}{q_0 C_p T_a^2 W} \right)^{1/3} \tag{1.3}$$

Li ve Ingason (2010), kritik hızın geri katmanlaşma üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla deneysel ve teorik araştırmalar yapmıştırlar. Deneysel çalışmalar, boyuna havalandırma sistemine sahip iki farklı modelde gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla tam ölçekli tünel yangın testi verileri kullanılmıştırlar. Boyutsuz birim zamandaki ısı salınımı oranı ile boyutsuz hız ilişkilendirilmiş olup, test verilerinin önerilen formülle uyumlu olduğu görülmüştür. Kritik hız sürekli olarak arttığını ancak boyutsuz birim zamandaki ısı salınımı oranı 0,15 değerine yaklaştıkça bu artış yavaşlayıp boyutsuz birim zamandaki ısı salınımı oranından bağımsız hale geldiğini görmüşlerdir.

$$V_c = \begin{cases} 0{,}81 Q^{*1/3}, & Q^* \leq 0{,}15 \\ 0{,}43, & Q^* > 0{,}15 \end{cases} \tag{1.4}$$

Burada;

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p \; T_0 \; g^{1/2} H^{5/2}} \tag{1.5}$$

$$V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \tag{1.6}$$

Araştırmacıların elde ettiği çoğu eşitliğe kritik Froude sayısı kullanılarak ulaşılmıştır. Kritik Froude sayısına ek olarak kritik Richardson sayısı da tünel içindeki kritik hızı belirlemede kullanılmaktadır.

$$Ri_c = \frac{\Delta\rho g H}{\rho_f V_c^2} \tag{1.7}$$

Paris metro hattında çıkabilecek yangın sonucu oluşan dumanın hareketlerini incelemek amacıyla Vantelon, Guelzim, Quach, Son, Gabay ve Dallest (1991), döneminin son lazer teknolojisini kullanarak ölçekli modeller oluşturmuşturlar. Deneylerinde havalandırma hızının ve birim zamandaki ısı salınımı oranının geri katman üzerindeki etkilerini incelemiştirler. Vantelon ve diğerleri, Richardson sayısını yaptıkları deneyler sayesinde yeniden tanımlamıştırlar.

$$Ri' = \frac{g\dot{Q}}{\rho_0 T_0 c_p u_0^3 H} \tag{1.8}$$

Deberteix, Gabay ve Blay (2001), 0,163 m yüksekliğindeki Paris metrosu modelindeki çalışmalara devam edip geri katman uzunluğu üzerinde oldukça detaylı çalışmışlardır. Ayrıca geri katmanlaşma uzunluğunu bir Richardson sayısıyla ilişkilendirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda kritik Richardson sayısı birin altına düştüğünde geri katmanın oluşmadığını öne sürmüşlerdir. Birim zamandaki ısı salınımı oranı sıfır olduğu zaman geri katmanlaşma uzunluğunun negatif değer aldığı sonucuna varmışlardır. Ulaştıkları sonucun herhangi bir fiziksel kanun ile tutarlı olmadığını gözlemlemişlerdir.

$$l^* = 7{,}5\left(Ri^{1/3} - 1\right) \tag{1.9}$$

Tünel geometrisinin kritik hız üzerindeki etkileri de araştırmalara konu olmuştur.

Wu ve Bakar (2000), genişlik/yükseklik oranları 0,5'ten 4'e kadar değişen bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada hidrolik çap kullanmışlardır. Genişlik/yükseklik oranı 1 ile 2 arasında olduğu zaman kritik hızdaki ortalama farkın %1,

1 ile 4 arasında ise ortalama farkın %7 olduğunu deneysel verilerden ulaşmışlardır. Kritik hızdaki ortalama farkın çok yüksek olmamasından dolayı tünel genişliğinin kritik hızdaki etkilerinin ihmal edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Vauquelin ve Wu (2006), Bakar ve Wu'nun 2000 yılında yaptıkları testlerin sonuçlarını kullanarak analizlerini yapmışlardır. Genişlik/yükseklik oranı birden büyük olduğunda artan genişliğin etkisiyle kritik hızın azaldığını görmüşlerdir. Uygun birim zamandaki ısı salınımı oranı için genişlik/yükseklik oranı birden küçük olduğunda ise kritik hızın arttığı gözlemlenmiştir.

Ingason, Li ve Lönnemark (2015), yaptıkları deneysel çalışmada tünel yangınında tavan altındaki maksimum sıcaklığı incelemişlerdir. Ayrıca farklı havalandırma sistemlerinin ve hızlarının etkilerini analiz etmişlerdir. Deneysel verilere dayanarak maksimum sıcaklık için bir eşitlik önermişlerdir. Deney verileri model içerisinde iki farklı konumdan alınmıştır. Maksimum sıcaklık değerinin 1350 °C'ye kadar ulaştığını gözlemlenmiştir. Elde edilen maksimum sıcaklık değerinin büyük ölçekli modeller için uygun olduğunu ifade etmiştirler.

Bugüne kadar inşa edilmiş olan birçok tünel coğrafik şartlardan dolayı belli bir eğime sahiptir. Eğimli tünellerde yangın sonrası oluşan duman, eğimin etkisiyle sıkışabilir. Atkinson ve Wu (1996), eğimi 0° ile 10° arasında değişen farklı tünel modellerinde deney yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda kritik hızın eğime bağlı eşitliğini formülüze etmişlerdir. Yapıkları çalışmayla yokuş aşağı eğimi olan tünellerde, eğimsiz tünellere göre kritik hızın daha büyük olduğunu sonucuna varmışlardır.

$$\frac{V_{c,\theta}}{V_{c,0}} = 1 + (0{,}0014\theta) \qquad (1.10)$$

Yi, Xu ve Wu D. (2011), negatif ve pozitif eğimlere sahip 1/10 ölçekli tünel modellerinde metanol yangın havuzu oluşturarak deneylerini yapmışlardır. Havalandırma metodu olarak boyuna havalandırma kullanmışlardır. Tünel içerisindeki sıcaklık ve kritik hız dağılımını incelemişlerdir. Deney verilerine dayanarak tünel eğimi ve kritik hız arasında bir formül oluşturmuşlardır.

$$\frac{V_{c,\beta}}{V_{c,0}} = 1 + (0{,}033\beta) \tag{1.11}$$

Atkinson, Wu ve Yi gibi çalışmacılara ek olarak Ko, Kim ve Ryou (2010), tünel eğiminin kritik hız üzerindeki etkisi hakkında deney yapmışlardır. 1/20 ölçekli, Froude ölçek modeli kullanarak deney modeli oluşturmuşlardır. Yangın havuzu içerisinde metanol, oktan ve n-heptan gibi yanıcı maddeler kullanılıp, 1,11 kW'dan 15,6 kW'a kadar 6 farklı birim zamandaki ısı salınımı oranı kullanılmıştır. 0°, 2°, 4°, 6° ve 8° gibi farklı açı değerlerinin etkileri üzerinde analizler gerçekleştirmişlerdir. Belli bir açıya sahip olan tünel ile eğimsiz tünel arasında bir ilişki oluşturmuşlardır.

$$\frac{V_{c,\theta}}{V_{c,0}} = 1 + (0{,}033\theta) \tag{1.12}$$

Weng, Lu, Liu, Shi ve Yu (2015) yılında yaptıkları deneysel çalışmada ise kritik hız ve geri katman uzunluğu gibi özelliklerin üzerinde durulmuştur. Deneysel çalışmalar 1/10 ölçekli modeller üzerinde yapılmıştır. Bir tünel kesit sabiti ($\zeta=A/H^2$) tanımlanıp, bu sabitin kritik hız üzerindeki etkilerine bakılmıştır.

$$\frac{V_{c,\beta}}{V_{c,0}} = \begin{cases} 1+1.008\beta, & \zeta \geq 1 \\ 1+2{,}355\beta, & \zeta < 1 \end{cases} \tag{1.13}$$

Fan, Ji ve Sun (2016), farklı boylardaki baca yardımıyla yapılan doğal havalandırmanın etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Metanol ve n-heptan olmak üzere iki farklı yanıcı madde ile çalışmışlardır. Kullanılan iki yakıt türü içinde yanma hızının baca boyunun değişmesinden belirgin bir şekilde etkilenmediği gözlemlenmiştir. Baca etkisiyle bir miktar duman tahliye edilmiştir. Fakat bu durum, yanma davranışı üzerinde hissedilir seviyede etki oluşturmadığı kaydedilmiştir.

Yuan ve Lei (2015), yangın kaynaklı sıcaklık dağılımı ve baca yakınındaki duman dağılımını incelemek amacıyla Froude modelleme tekniği kullanarak 1/15 ölçeğinde küçültülmüş tünel modeli kullanmıştırlar. Yakıt olarak propan kullanılmıştır. Tünel içerisindeki sıcaklık dağılımı tünel tavanı altına yerleştirilmiş K tipi ısıl çiftler aracılığıyla yapılmıştır. Bir boyutlu teori ve deneysel verilere bağlı kalarak, tünel yangın analizlerinde

kullanılmak üzere sıcaklık dağılımı ve doğal havalandırma bacasından çıkan dumanın kütlesini tahmin edebilmek için ampirik formüller elde etmişlerdir.

$$m_{nref} = m_{ref}(1-cH^{*-1}\Delta T_{ref}^{*-1/3}e^{-k(S-x_{ref}).(\frac{1}{3})}) \quad (1.14)$$

$$\Delta T_{nref}^{**} = \Delta T_{nref}^{*}/(\Delta T_{nref}^{*}e^{-k(x_{nref}-x_{ref})}) \quad (1.15)$$

Se, Lee ve Lai (2012) hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle tünel içerisindeki kararlı akış için analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 5 MW büyüklüğündeki yangın değeri için farklı konumlara yerleştirilmiş fanların akış ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Aktif fan grubunun yangın kaynağından uzaklığı ve yukarı yönlü akış arasında teorik bir denklem ilişkisi ortaya koymuşlardır. Aktif fan grubunun araç yangınından 200 m ve daha uzağında bir konumda olması durumunda yukarı yönlü akışın sabit kaldığını gözlemlemişlerdir.

$$V_c = (1/a + bL_{fan} + cL_{fan}^2) \quad (1.16)$$

Çizelge 1.2'de bazı ülkelerdeki tünel yangınları için geçerli geri katmanlaşmayı engelleyecek kritik hız değerleri verilmiştir.

Çizelge 1.2. Geri katmanlaşmayı engelleyecek hız değerleri (Se, Lee ve Lai, 2012)

Ülke	Gerekli olan kritik hız değeri
Almaya	2,3-3,6 m/s
Fransa	Kırsal kesim için 3 m/s Kent içinde 1,2 m/s
Birleşik Krallık	3 MW araba yangını için 1,3 m/s 25 MW kamyon yangını için 3 m/s
Avusturya	Tek yönlü ve çift yönlü trafik için 1 m/s< V_{critic}<1,5 m/s
Norveç	Tek yönlü tüneller için en fazla 10 m/s Çift yönlü tüneller için en fazla 7 m/s
Japonya	2 m/s

0° ile 20° arasında değişen açılar da yerleştirilmiş fanların etkisini incelemek için C. Lee, S. Lee ve J. Lee (2013), hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu kullanarak analizlerini gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri analiz sonuçlarına göre jet fandan olan basınç kayıplarının en düşük olduğu yerde yani jet fanın hava akışını en yüksek olduğu durumdaki açı değeri 0°'dir. Fakat tüneldeki hava akışı en iyi 6°'de gerçekleşmiştir. Bunun sebebi jet fanın

eğim açısı düşük olduğunda ($\propto = 0°$) tünel tavanında sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybıdır. Lee yaptığı çalışma ile tünel içerisine jet fan yerleştirilirken fanların konumuna dikkat edilmesi gerektiğini analiz yöntemiyle vurgulamıştır.

Jet fanların hızı Khieu, Lee, Kim, ve Ryou (2020), tarafından yapılan çalışmanın konusu olmuştur. Khieu ve diğerleri yaptığı çalışmada jet fan hızı, birim zamandaki ısı salınımı oranı ve en boy oranının duman hareketine etkisini incelemiştir. Jet fan hızı 6,25 m/s; 12,5 m/s; 18,75 m/s ve 25 m/s olmak üzere dört farklı değer seçilmiştir. Birim zamandaki ısı salınımı oranı 3,9 MW; 6 MW ve 16 MW gibi değerler seçilirken en boy oranı ise sırasıyla 0,6; 1 ve 1,5 seçilmiştir. Jet fan hızı ne kadar düşükse duman geri katman uzunluğunun o kadar fazla olduğunu numerik çalışmalarında görmüşlerdir. Hızın yüksek olması durumunda ise dumanın daha çabuk tünel dışına çıkmaya çalıştığı görülmüştür ancak bu durum da tünel çıkışına doğru geri katmanlaşmaya sebebiyet verebilir. Yaptıkları çalışmada ifade ettikleri bilgilere göre tünel çıkışında meydana gelen geri katmanlaşma görünürlüğü etkiler ve insanların tahliyesini zorlaştırır. Yüksek ısı yayma oranlarında, düşük ısı yayma oranlarına göre yangın daha çabuk hareket eder ve daha uzun geri katmanlaşma meydan gelir. Yüksek en boy oranında ise geri katmanlaşma daha uzundur ve katma kalınlığı daha geniştir.

Li, Y. Li, Feng ve Huang (2018) jet fan sayısının duman tahliyesi üzerindeki etkileri incelemek için FDS kullanarak analizlerini yapmışlardır. Üçlü fan grubuyla analizler yapıldığında geri katmanlaşmanın olduğunu gözlemlemişlerdir. Dörtlü jet fan grubu kullanıldığında ise geri katmanlaşmanın ortadan kalktığını analiz etmişlerdir. Böylece modelledikleri metro tünelinde dörtlü fan grubu kullanmanın daha yararlı olabileceği sonucuna varmışlardır.

Alexsander Krol ve Malgarzota Krol (2018) , 3 farklı fan modelini Ansys/FLUENT kullanarak incelemişlerdir. Farklı özelliklere sahip fanları A, B ve C olarak isimlendirmişleridir. A tipi fan modelinin Ansys/FLUENT ile daha iyi modellenip makul bir çözüm yöntemine sahip olduğu görülmüştür. İncelenen tüm türbülans modelleri, tam gelişmiş akışlar için nerdeyse benzer sonuçlar vermiştir. Fakat Reynolds stres türbülans modelinin (RSM), büyük girdap simülasyonuna (LES) göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda fan çıkışına yakın yerlerde özellikle karmaşık yapıya sahip akışlar göz önüne alındığında uygun olmaya türbülans modelinden kaçınmak

için derin bir ön analiz yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca tünellerdeki akışlar için dış rüzgarın ve baca etkisinin önemi üzerinde durulmuştur.

Blanchard, Boulet, Desanghere, Vantelon ve Garo (2014), boylamasına havalandırmalı bir tünelde su sisi, sıcak gazlar ve havalandırma arasındaki etkileşimini deneysel çalışmalarına ek olarak, sayısal yöntemlerle de incelemişlerdir. Öncelikle analizler su sisi ve su buharı olmadan yapılmıştır. Daha sonra ise su sisi etkin hale getirilmiştir. Su sisinin etkin hale gelmesiyle yangın sonucu ortaya çıkan ısının belli bir miktarı su damlacıkları tarafından emilir. Damlacıklar tarafından ısının %73'ü emilirken, kalan ısının %9'ü ışınım ile %18 ise tünel yüzeyi soğumasıyla kaybolduğunu görmüşlerdir.

Wang, Nie, Fang ve Tang (2018), su sisi bölgesi ve tünel yangını arasındaki ilişkiyi incelemek için hesaplamalı akışkanlar metodunu kullanmışlardır. Analizlerinde 1/3 ölçekli tünel kullanmıştırlar. Su sisi bölgesinin uzamasıyla aşağı yöndeki akışın sıcaklığının azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca boylamasına havalandırma altında su basıncı artıkça belirgin bir değişimin olmadığı gözlemlenmiştir.

Zhao, Quyang, Ran, Chen, Xu, Zou ve Fan (2021) Alplerde bulunan bir vadideki tüneli, 1/25 ölçek kullanarak modelleyip, deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmanın amacı rüzgârın geri katman uzunluğu ve kritik hız üzerindeki etkilerini incelemektir. Yaptıkları çalışmada aşağı yönlü akış rüzgar etkisi altındayken boylamasına havalandırma sistemi yukarı yönlü akış tarafına yerleştirilmiştir. Duman hareketi, rüzgâr hızı ve boylamasına havalandırma hızı değiştirilerek incelenmiştir. Yaptıkların çalışma sonucuna göre boylamasına havalandırma hızı artıkça, geri katmanlaşma uzunluğu azalmıştır. Rüzgâr hızının artırılması durumda gerek kritik hız gerekse geri katmanlaşma uzunluğu artmıştır. Aşağı yönlü akışın yayılma uzunluğu ise rüzgar hızının artmasıyla azalmıştır.

Karaaslan, Dinler ve Yücel Ansys/FLUENT programı kullanarak gerçek boyutlarda bir yeraltı raylı taşıma sistemi istasyon modelinin simülasyonlarını, farklı türbülanslı akış çözümleri kullanarak yapmışlardır. Yaptıkları simülasyon sonucunda akış modelini en iyi temsil eden türbülans modelinin SST k-ω türbülans modeli olduğunu belirtmiştirler.

Tüneller kapalı hacimlere sahip olduğu için tünel içerisinde meydana gelen yangınlar açık karayollarında meydana gelen yangınlara göre daha tahrip edici özelliğe sahiptir. Tünel

tasarımı yapılırken yaşanabilecek yangın gibi olumsuz durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Olumsuz durumların önceden değerlendirilebilmesi için deneysel ve sayısal çalışmaların yapılması gereklidir. Deneysel çalımalar sayısal çalışmalara kıyasla oldukça maliyetlidir ve yangın deneysel çalışması bazı durumlarda tehlikeli olabilir. Bu nedenlerden dolayı yangın analizleri genel olarak sayısal yöntemlerle yapılmaktadır. Sayısal analizler genellikle zaman açısından tasarruf sağlamak amacıyla belirli ölçekte küçültülmüş tünel modelleri üzerinde yapılmaktadır. Ayrıca analizlerde eğimli ya da düz tüneller kullanılmaktadır. Tünel yangını ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde viraja (kavis) sahip tünel modeli sayısı oldukça azdır.

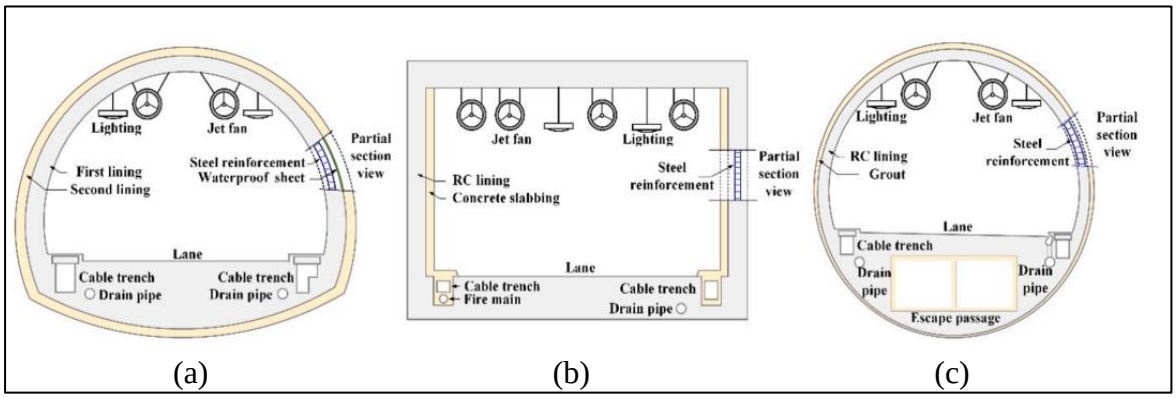
Bu çalışmada 1500 m uzunluğuna sahip, boyuna havalandırma metoduyla havalandırılan virajlı bir tünel tasarımının analizleri yapılmıştır. Havalandırma için gerekli jet fanların hesabı için tünelin tüm uzunluğu dikkate alınırken, analizlerde sadece 900 m uzunluğundaki virajlı kısmı dikkate alınmıştır.

Tünel içi yangın günümüzde fazlasıyla ilgi geçen bir konudur. Yapılan çalışmaların birçoğu eğimli, düz veya içerisinde blokaj bulunan tüneller için yapılmaktadır. Ayrıca kritik hız değeri büyüklüğü, yangının meydana geldiği konum, fanların konumu veya yangının büyüklüğü gibi konular ele alınmaktadır. Bu çalışmada ise literatürde oldukça az rastlanan virajlı tünel incelenmiştir. Virajlı tüneli incelemek amacıyla yapılan bu çalışmada, meydana gelen yangın sonucunda maksimum duman sıcaklığı, basınç ve hız dağılımları gibi durumlar karşılaştırılıp, değerlendirilecektir. Virajlı meydana gelen yangının ve bu kısmında hangi önlemlerin alınması gerektiğinin irdelenmesi karayolu tünelleri için oldukça önemlidir.

Tam ölçekli modellerin deneysel ve sayısal analizlerini yapmak daha kesin sonuçlar vermektedir. Fakat tam ölçek üzerinde çalışmak maliyetli bir iştir. Küçük ölçekli modeller için deneysel çalışmalar yapmak ise tehlikeli olabilir ve tam ölçekte olduğu gibi net sonuçlar vermeyebilir. Maliyetten kaçınmak ve tehlikeleri en aza indirmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi bu çalışmada esas alınmıştır.

2. KARAYOLLARI TÜNELLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Ulaşım insanoğlu var olduğu ilk günden bugüne kadar en temel ihtiyaç kavramı olarak görülmüştür. Bireylerin, eşyaların, bilginin, ısınma amaçlı kullanılan gazların ve suyun bir bölgeden başka bir bölgeye aktarılması ulaşımın konusu içerisine girmektedir. Ulaşım havayolu, denizyolu, karayolu, demiryolu ve boru hatları yöntemiyle gerçekleşebilir. Dünya karmaşık bir topografyaya sahip olduğu için ulaşım bu durumdan olumsuz şekilde etkilenmektedir. Yeryüzünün engebeli, eğimli ve dağlık olması bölgeler arası geçişi zorlaştırır. Bu olumsuz etkileri en aza indirmek, ulaşım maliyetini azaltmak ve trafiğin daha düzenli akmasını sağlamak amacıyla karayolu tünelleri inşa edilir. Tüneller şehir içi veya şehir dışı konumlardaki ihtiyaca göre farklı model ve farklı havalandırma sistemine sahip olarak tasarlanabilir. Bir karayolu tüneli ana gövde ve tünel portalı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Şekil 2.1'de görüldü gibi tünel portalı, giriş ve çıkış aynı olacak biçimde, at nalı kesitli, dairesel ve dikdörtgensel kesitli olabilir (Cheng, 2021).



Şekil 2.1. Tünel kesitleri a) at nalı kesitli b) dikdörtgen kesitli c) dairesel kesitli (Cheng, 2021)

Coğrafi koşullara bağlı olarak tünel kesitlerini avantajları ve dezavantajları vardır. Bu avantaj ve dezavantajlar göre Çizelge 2.1'de belirtildiği gibi uygulanabilirlik koşulları değişmektedir.

Çizelge 2.1. Tünel kesiti avantaj ve dezavantajları (Cheng, 2021)

Kesit şekli	Avantaj	Dezavantajları	Uygulanabilir koşullar
Dikdörtgensel	İç mekan kullanım oranı yüksek	Düşük dayanıklılık ve çevresindeki basınca karşı düşük direnç	Düşük statik basınçlara sahip sığ toprak tabakası
Dairesel	Orta dayanıklılık ve alçak zemin yerleşimi	İç mekan kullanım oranı düşük	Yoğun binaların yakınında sığ gömülü toprak, derin gömülü toprak ve yüksek üst ve yan basınçlara sahip kaya kütlesi
At nalı kesitli	Orta düzeyde iç kullanım oranı ile orta düzeyde dayanım	Çevresindeki yan basınca karşı düşük direnç	Yüksek üst basınçlara ve orta veya düşük yan basınçlara sahip derin gömülü toprak ve kaya kütlesi

İlk tünellerin açılmasında tüm büyük antik uygarlıkların etkisi olduğu düşünülmektedir. Babil'de kraliyet sarayını tapınağa bağlamak için Fırat Nehri'nin altında yaklaşık MÖ 2180 ila 2160 arasında yaklaşık 900 metre uzunluğunda tuğla döşeli bir yaya geçidi inşa edildi (Maden Türk, 2000). Uygarlıkların birbirinden etkilenmesi ve her dönem gelişen teknolojinin etkisiyle çeşitli özelliklere sahip tüneller tasarlanmıştır.

Ülkemizde 1950'li yıllara kadar dönemin teknolojisinin sağladığı imkânlarla karayolları için çalışmalar yapılmıştır. Türkiye'de 1950'lerden sonra karayolları yapımına ağırlık verilmiş ve bu durum ülkenin sanayi ile tarım ürünlerinin sistematik bir şekilde dağıtılmasına imkân vermiştir. Sistematik bir dağıtım ağının oluşturulması ulusal ekonominin gelişmesine kayda değer bir katkı sağlamıştır (Karluk, 2014). Türkiye'de gerek yol ağlarını kısaltmak gerekse olumsuz coğrafik koşulların etkisini azaltmak çeşitli tüneller yapılmaya devam edilmektedir. Ülkemizde 2003 yılına kadar 50 km uzunluğuna sahip 83 tünel mevcut iken, 2021 yılı Karayolları Genel Müdürlüğü tünel envanter bilgilerine göre 221 adet tek tüp, 125 adet çift tüp tünel olmak üzere toplamda 346 tane karayolu tüneli bulunmaktadır (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2021).

2.1. Tünel Güvenliği

Artan taşıt sayısı, büyüyen ekonomi ve gelişen teknolojinin etkisiyle her geçen gün tünel sayısı artmaktadır. Tünel sayısındaki artış tünel kazası haberlerini de beraberinde getirmiştir. Karayolu tünellerindeki kazalar açık yollardaki kazalara göre daha az sayıda olmasına rağmen, bu kazaların daha çok tahrip edici etkisi vardır. Tünellerin daha güvenli bir şekilde inşa edilebilmesi için yönergeler bulunmaktadır. Bu yönergeler tünel içinde

yaşanan kazalar ve teknik arızalardan elde edilen deneyimle yeniden düzenlenebilir. Tünellerdeki güvenlik önlemleri 4 kategoride sınıflandırılır (PIARC, 2007);

- Koruyucu önlemler
- Hafifletici önlemler
- Kendini kurtarma
- İlk yardım

2.1.1. Koruyucu önlemler

Tehlike oluşturabilecek senaryoları önceden yapılmış deneysel ve sayısal çalışmaların sonucuna göre değerlendiren önlemler bütünüdür. Tünel içinde meydana gelebilecek en büyük tehlikelerden bir tanesi yangın olduğu için koruyucu önlemlerin birçoğu yangın konusu üzerinde olmuştur. Tünelin kapalı bir hacme sahip olması, tünel içinde meydana gelen yangınların olumsuz sonuçlarını tetikler. Tünel içerisinde meydana gelen yangınlar çarpışmalar, tünel içerisindeki teknik hatalar ve elektrik arızaları gibi nedenlerden kaynaklanabilir.

Tünel ekipmanlarının bakımları cihaz firması tarafından belirtilen tarihlerde düzenli bir şekilde yapılmalıdır. Tünel içerisindeki ışıklandırma sistemi sürücünün gözünü yoracak renklerden oluşmamalıdır. Havalandırma sistemlerinde hava hızı, literatürde belirtildiği gibi belli bir kritik hız değerine göre yapılmalıdır. Gereken durumlarda araçların hızlarını ne kadar azaltıp ya da artıracağına dair dinamik uyarı işaretleri kullanılmalıdır. Karayolları Genel Müdürlüğünün yönetmeliğine göre tünel içerisindeki en fazla hız 80 km\saat olmalıdır ve takip mesafesi 40 metreyi aşmamalıdır (Resmi Gazete, 2015). Ağır yük taşıyan vasıtaların tünel içerisine girişi tehlikeli durumlara sebep olabileceği için yasaklanmalıdır.

2.1.2. Hafifletici önlemler

Meydana gelen kazaların tahrip etkisini azaltmak amacıyla alınan önlemlerin tümüdür. Sensörler, sabit yangın söndürme cihazları, doğrulama cihazları ve çeşitli kurallar hafifletici önlemler arasında sıralanır. Doğrulama cihazları ve trafik yönetimi yöntemleri,

tünel operatörlerinin bir olayı hızlı bir şekilde teyit etmesine, ikincil çarpışmaları önlemek için şeritleri sistematik olarak kapatmak veya trafiği yeniden yönlendirmek için olay müdahale senaryoları uygulamasına ve bir yangın durumunda belirtilen yollarla kullanıcıların güvenli ve verimli tahliyesini gerçekleştirmesine olanak sağlayan bilgi ve iletişimden oluşmaktadır (PIARC, 2007).

2.1.3. Kendini kurtarma

Kendi kendine kurtarma, bir tünel kazasına karışan kişilerin kendi inisiyatifleri ve uygun davranışlarıyla bir tehlike kaynağından uzaklaşma yeteneğini olarak tanımlanır (PIARC, 2007). Tünel kazaları sonucunda meydana gelen yangınların insan üzerinde en olumsuz etkilerinden bir tanesi dumandır. Duman kaynağından güvenilir bir şekilde tahliye hem insani reflekslerin hem de genel koruma prensiplerinin birleşmesiyle gerçekleşir. Tünel yangınlarında tahliyeyi kolaylaştırmak için tünel içerisinde güvenli bölgeler oluşturulmalıdır. Güvenli bölgeler özellikle çok uzun tüneller için oldukça gereklidir. Her durumda, erken ve hızlı tahliye etmek önemlidir. Bu nedenle güvenli bir yere acil durum rotası sağlamanın yanı sıra, insanların hızlı tepki vermesini ve acil çıkışlardan erken tahliye edilmesini sağlamak için önlemler alınması gerekmektedir (PIARC, 2007).

2.1.4. Acil müdahale

Herhangi bir kaza veya yaşamı tehlikeye düşüren bir durumda, sağlık görevlilerinin yardımı sağlanıncaya kadar, hayatın kurtarılması ya da durumun kötüye gitmesini önleyebilmek amacı ile olay yerinde, tıbbi araç gereç aranmaksızın, mevcut araç ve gereçlerle yapılan ilaçsız uygulamalar ilk yardım olarak tanımlanır (Sağlık Bakanlığı, 2011). Tüm önlemlere rağmen tünelde meydana gelebilecek kazaların negatif etkilerini en aza indirebilmek için ilk yardım uygulamaları elzemdir. Ayrıca tünelde meydana gelen yangınlarda acil müdahale gerektirir. Acil durum müdahale önlemleri, güvenlik prosedürleri ve tünel güvenlik ekipmanlarının yanı sıra tünel kullanıcıları, tünel operatörleri ve acil durum organizasyonlarını içeren insan davranışları ile etkileşime girdiği için karmaşıktır (PIARC, 2007). İnşa edilmiş her tünel için önceden hazırlanmış bir acil durum tatbikatı yapılmalı ve oluşturulmuş her senaryo için gerekli önlemler alınmalıdır. 2019 yılında Manisa ilinde bulunan Sabuncu Tüneli'nde temsili olarak bir yangın ve kaza senaryosu yapılmıştır (Resim 2.2). Çalışmaya katılan ekipler gerçek bir

yangın olayını aratmayan bir mücadele ile tatbikat çalışmalarında aktif şekilde rol almışlardır. Bu ve benzeri uygulamalar tünel içinde güvenliği sağlamada oldukça önemlidir (Ray Haber, 2019).

Resim 2.1. Sabuncu Tüneli'nde yangın ve kaza tatbikatı (Ray Haber, 2019)

3. KARAYOLU TÜNEL HAVALANDIRMASI

Dünya nüfusunun hızla artması beraberinde ulaşım problemlerini de getirmiştir. Ulaşım problemini en aza indirmek amacıyla yapılan tünellerde, taşıt kaynaklı kirleticilerin konsantrayonları önemlidir. Bir kilometreden daha uzun karayolu tünellerinde ve virajlı tünellerde hava sirkülasyonu oldukça zordur. Tünel kullanıcıları için gerekli taze havayı sağlamak, araçların neden olduğu karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_X) ve kurum (partiküller önemli) gibi zararlı emisyonlarını tünel ortamından uzaklaştırmak için havalandırma sistemleri kullanılır. Havalandırma sistemine en fazla ihtiyaç duyulan an tünel içi yangının meydana geldiği durumlardır. Havalandırma sistemi, yangın durumunda duman ve ısının yayılmasını kontrol etmek için yeterli hız ve yönlendirmeyi sağlayacak şekilde tasarlanmalı ve boyutlandırılmalıdır (Systemair, 2019). Karayolu tüneli projeleri tasarlanırken havalandırma sistemleri için uluslararası kabul gören standartlar vardır:

- PIARC : Uluslararası Daimi Yol Konseyi, Karayolu Tünelleri Konseyi Uluslar arası Daimi Birliği taşıt emisyonları, hava talebi, çevre, boylamsal havalandırma esasları
- Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 29 Nisan 2004 gün ve 2004/54/EC sayılı ‘Trans Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri İçin Minimum Güvenlik Gereksinimleri’
- NFPA :Amerikan Ulusal Yangın Koruma Birliği, Karayolu Tünelleri, köprüler ve diğer erişim kontrollü otoyollar için standart.
- CETU :Fransa Tünel Çalışmaları Merkezi, Ventilation adlı yayın
- Avusturya Planlama Kılavuzu RVS Kodları

Tünel özelliklerine bağlı olarak; doğal havalandırma ve mekanik havalandırma olmak üzere iki tip havalandırma sitemi mevcuttur. Karayolu tünel havalandırma sistemlerinin seçimi; uzunluk, trafiğin tek veya çift yönlü olması, eğim, enine kesit, pik trafik akışı, yangın büyüklüğü, vs. gibi temel unsurlara bağlıdır (PIARC R02EN, 2019).

3.1. Doğal Havalandırma

Bir tünelde mekanik havalandırma sistemi olmadan, baca etkisi veya tünel giriş-çıkış bölgelerindeki basınç farkının neden olduğu hava hareketinin sonucunda meydana gelen havalandırma yöntemidir. Mekanik havalandırma sisteminin oldukça verimli bir yöntem

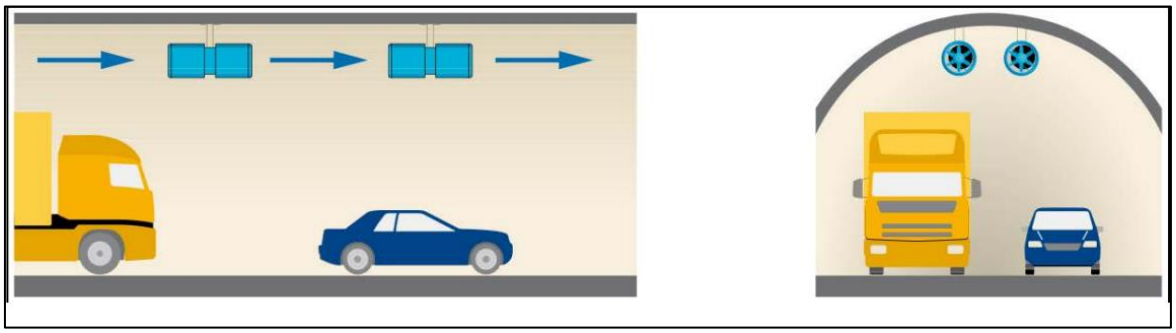
olduğu bilinmektedir. Mekanik havalandırma sistemi etkili bir yöntem olmasına rağmen fazla enerji tüketimine neden olduğu için özellikle kısa tünellerde kullanılmamaktadır.

3.2. Mekanik Havalandırma

Tünel içerisinde mekanik cihazlar (fan vb.) kullanarak hava hareketi sağlayan havalandırma yöntemidir. Mekanik havalandırma aracılığıyla yangın gibi istenmeyen durumlarda tünel içindeki yolculara dış ortam havası sağlanabilir. Doğal havalandırmanın yeterli olmadığı durumlarda, mekanik havalandırma yönteminin kullanılması zorunludur. Karayolu tünellerinde boyuna, enine ve yarı enine havalandırma sistemi olmak üzere 3 farklı mekanik havalandır metodu kullanılmaktadır.

3.2.1. Boyuna havalandırma

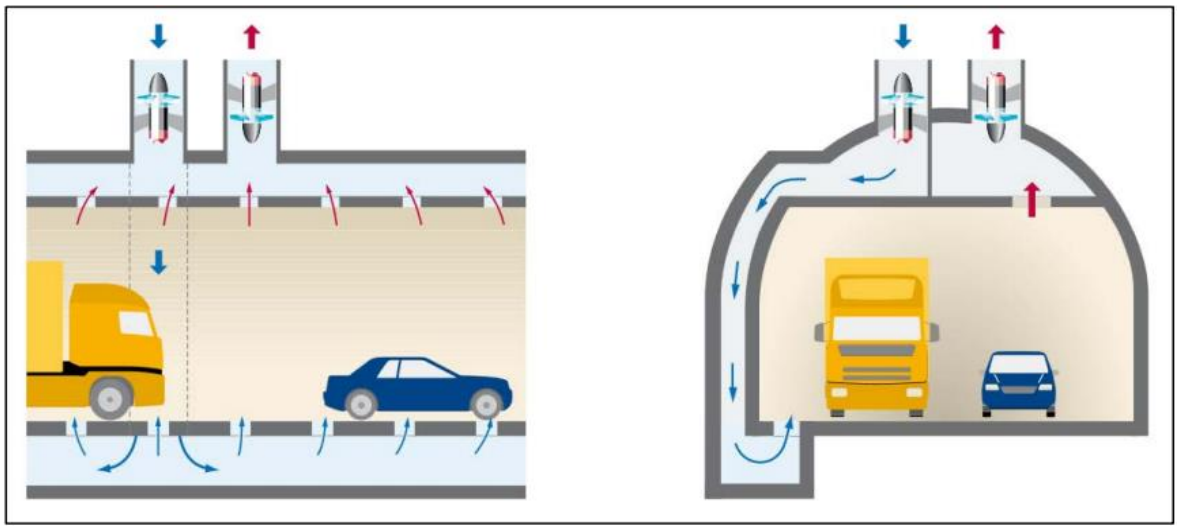
Boyuna havalandırma tünelde bulunan havanın belli bir kısmını jet fanlalar yardımıyla hızlandıran, istenilen yönde hava hareketi sağlayan havalandırma metodudur (Systemair, 2021). Tünellerde kullanılan en basit havalandırma sistemi olup, hava akımı tünel boyunca ayrı havalandırma kanalları olmaksızın, ana tünel kesit alanı içerisinde, tünelin bir ucundan diğer ucuna doğru hareket eder. Mekanik havalandırma ekipmanı olarak tünel boyunca belirli aralıklarla yerleştirilen jet fanlar ya da tünel kesitine dik şekilde açılmış olan havalandırma şaftlarına bağlanan ve TVF adı verilen tünel havalandırma fanları kullanılır. Boyuna havalandırma uygulama alanına göre girişten çıkışa, girişten şafta veya şafttan şafta şeklinde olabilir (Toprak, 2014). Boyuna havalandırma yöntemi sahip olduğu basit yapısından dolayı mekanik havalandırma yöntemlerinden en ucuzudur. Resim 3.1'de boyuna havalandırma sisteminin ön ve yan kesitteki görüntüleri gösterilmiştir.



Resim 3.1. Boyuna havalandırma (Toprak, 2014)

3.2.2. Enine havalandırma

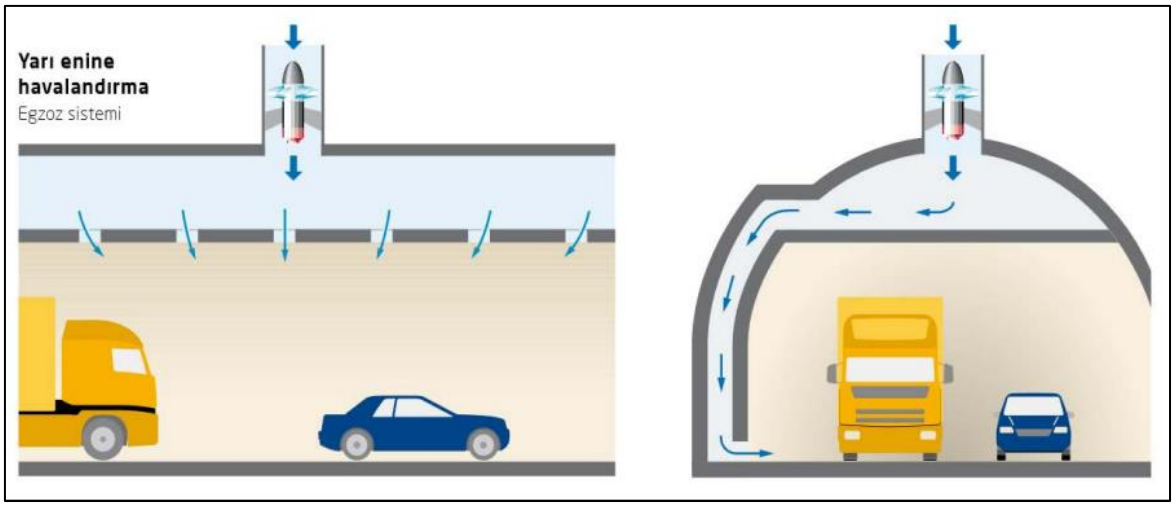
Enine havalandırma sistemi, egzoz ve taze hava şaftını aynı anda içinde barındırır. Taze hava girişi için temiz hava kanalı kullanılırken, egzoz çıkışı içinse ayrı bir kanal bulunmaktadır (Resim 3.2). İşletme maliyeti ve ilk yatırım maliyeti gibi problemler enine havalandırmanın temel problemleri arasında sıralanabilir. Enerji masrafı, havalandırma kanalının uzunluğunun küpüyle orantılı olarak artmaktadır. Yapım maliyetinin oldukça yüksek olması sebebiyle tercih edilmeyebilir. Yapım maliyetinin yanı sıra bakım ve temizlik problemleri de tercih edilmesinde engel olarak görülmektedir (Kaçan, 2019).



Resim 3.2. Enine havalandırma (Toprak, 2014)

3.2.3. Yarı enine havalandırma

Yarı enine havalandırma sisteminde taze hava ve egzoz gazları karışımı fanlar vasıtasıyla homojen olarak tünel içerisinde dağılır. Yangın durumunda veya herhangi bir sebepten dolayı içerde zehirli gazların birikmesi durumunda, gazların kolay atılmasını sağlamak için fanlar ters yönde çalışarak emme işlemi yapar. Resim 3.3'de görüldüğü gibi yarı enine havalandırma sistemi yüksek tavana ihtiyaç duyar. Bu nedenle yapım maliyetleri yüksektir. Yarı enine havalandırma sistemi çift yönlü tüneller için kullanılır (PIARC, 2007) .



Resim 3.3 .Yarı enine havalandırma (Toprak, 2014)

4. EMİSYON STANDARLARI VE EMİSYON DEĞERLERİ

Emisyon standartları A, B ve C olmak üzere üç farklı teknolojik sınıfa ayrılır. A sınıfı teknoloji Batı Avrupa ve Kuzey Amerika ülkelerinde kullanılırken, B sınıfı teknoloji Euro standartlarını kabul eden ülkelerde kullanılır. C sınıfı emisyon standardı ise araçların herhangi bir emisyon kontrolüne tabi tutulmadığı ülkelerde ülkeler için geçerlidir (PIARC R02EN, 2019). Ülkemizde B sınıfı emisyon standartları kullanıyor olup, binek araçlar için emisyon kontrolleri iki yılda bir yapılırken diğer motorlu taşıtlar için emisyon kontrolleri senede bir yapılmaktadır.

Tünel içerisinde bulunan araçlar zararlı emisyonlar bırakır. Kapalı hacimde biriken egzoz gazları trafik sıkışıklığı yaşanması halinde insanlar üzerinde olumsuz etkiler bırakabilir. Ayrıca bu gazlar zaman içerisinde görüntüyü engelleyecek kadar çoğalabilir. Tünel kullanıcılarının güvenli bir şekilde seyahat edebilmeleri için zararlı gaz emisyonların belli bir değerin altında tutulması gerekir. Karayolu tünellerinde CO emisyonu, NO_x emisyonları ve partiküller maddelerin belli bir sınır değerde olması gerekir.

4.1. Emisyon Oranı

Emisyon oranı trafik durumu, araç tipi ve çeşitli partiküllere bağlıdır. Taze hava gereksinimini belirleyebilmek için tünel içerisindeki emisyon oranın bilinmesi önemlidir. Emisyon oranı, aşağıdakileri içeren çeşitli faktörlerin bir fonksiyonudur (PIARC R02EN, 2019):

- Araç sayısı ve türü
- Aracın kayıtlı olduğu emisyon standardı
- Sıkışık veya akan trafiği içeren araç hızı
- Yol eğimi

Ulusal düzenlemeler gibi net düzenlemelerin olmadığı durumlarda, emisyon için tavsiye edilen sınır değerlere göre işlemler yapılmalıdır. Üç farklı işlem bulunmaktadır:

Normal işlemler: Tünel içerisindeki emisyon oranını belirlemek için eşik değerinin kullanıldığı işlemlerdir (PIARC R02EN, 2019).

Bakım İşlemleri: Sağlığın ve güvenliğin sağlanması amacıyla belirli sınır seviyelerin sağlandığı işlemlerdir (PIARC R02EN, 2019).

Kapatma Durumu: Tünel kullanıcılarının sağlığı ve güvenliği için gerekli olan eşik değeri aşıldığında tünel kapatılmak zorundadır (PIARC R02EN, 2019).

4.1.1. Karbonmonoksit (CO)

Yanma veya tam yanmama sonucu açığa çıkan inorganik yapıdaki karbonmonoksit, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Havadaki karbonmonoksit yoğunluğunun artması durumunda, hemoglobin proteinine oksijenden daha hızlı yapışır. İnsan hücrelerine yeterli miktarda oksijen gitmemesi durumunda hücre ölümü başlar. Dünya sağlık örgütünün verilerine göre bir insanın karbonmonoksite maruz kalma süresi zamana bağlı olarak değerlendirilir:

- 15 dakika için 90 ppm
- 30 dakika için 50 ppm
- 60 saat için 25 ppm
- 8 saat için 10 ppm

Karbonmonoksit değerinin kapalı hacimler için insan sağlığını etkilemeyecek seviyede olması gerekmektedir. Çizelge 4.1’de işletme değerleri referans alınarak üst eşik değer belirlenir. İşletme değerinin temeli trafik durumuna bağlı olarak değişmektedir. Sıkışık trafik durumunda dizayn değeri en yüksek (90 ppm) seviyededir. Buna bağlı olarak işlem limiti de 200 ppm gibi yüksek seviyelere çıkar. Trafiğin normal düzeyde olduğu durumlarda ise işlem limiti 100 ppm değerine yaklaşmaktadır.

Çizelge 4.1. CO için işletme değerleri (PIARC R02EN, 2019)

Trafik durumu	Dizayn değeri	İşlem durumu	İşlem limiti
Serbest akışlı en yoğun trafik 50-100 km/h	70 ppm	Normal işlem	<100 ppm
Günlük sıkışık trafik	70 ppm	Trafik altında bir tünelde planlı bakım çalışması	20 ppm
Olağanüstü sıkışık trafik	90 ppm	Kapalı tünel için eşik değeri	200 ppm

4.1.2. Nitrojen dioksit (NO_2)

Yanma işlemi sonrasında nitrojen oksit ve nitrojen dioksit gibi yanma ürünleri meydana gelir. Yayılan nitrojen oksitlerin çoğu ortamda buluna oksijenle birleşerek nitrojen dioksite dönüşür. Birçok Avrupa ülkesinde karayolu tünellerinde NO_2 yoğunluğu, NO_x yoğunluğunun yaklaşık %20 ile %30'unu oluşturur. Yalnızca dizel motora sahip otomobillerin olduğu tünellerde NO_2 yoğunluğunun %10'un altına düşmesi beklenir. NO bileşiği tek başına zararlı kabul edilmez. NO_2 haline dönüşmesi durumunda ciğerleri tahriş edip, solunum yolu hastalıklarına karşı direnci azaltır. Tünel tasarımı sırasında havalandırma sistemlerinin NO_2 değerlerine baz alınarak boyutlandırılmasında, PIARC'ın 2000 yılında yayımlanan raporuna göre tasarım değeri olarak herhangi bir zamanda tünel uzunluğu boyunca ortalama 1 ppm NO_2 yoğunluğu önerilmiştir. Bu değer ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Fransa'da bu değer 0,4 ppm iken, Avusturalya'da 0,5 ppm'dir. Ayrıca kentsel yerleşim yerlerinde NO_2 yoğunluğu sıcaklığa, mevsime ve gün içerisindeki zamana göre değişir (PIARC R02EN, 2019).

4.1.3. Partikül madde ve görünürlük

Egzoz emisyonları ve egzoz dışı emisyonlar olmak üzere iki çeşit partikül madde bulunmaktadır. Yakıtın yanması sonucunda egzoz borusundan çıkan maddeler egzoz emisyonları olarak adlandırılırken, egzoz dışı emisyonlar ise lastik aşınması ve yol yüzeyi aşınması gibi etkilerden oluşur. Havada asılı kalan partikül maddeler görünürlüğü önemli ölçüde etkiler. Partikül maddeler ışığı emer. Emilen ışık miktarı partikül maddenin cinsine, çapına ve yoğunluğuna bağlıdır. Bir tünelde görünürlüğü ölçmenin prensibi, bir ışık huzmesinin havadan geçerken yoğunluğunun azalması gerçeğine dayanır. Işın bozunması meydana gelir. Bozunma seviyesi havanın opaklığını belirlemek için kullanılır ve sönümleme katsayıyı (K) olarak ifade edilir. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi tünel

içerisindeki sönümleme katsayısı ve ışık hüzmesinin uzunluğu puslu/sisli olması durumuna bağlı olarak değişmektedir. Görünürlük tasarım kriterleri belirlenirken trafiğin durumu temel alınır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.2. Görünürlük durumu ve sönümleme katsayısı (PIARC R02EN, 2019)

Görünürlük durumu	Sönümleme katsayısı (K)	Işık hüzmesini uzunluğu (L)
Biraz puslu	0,003 m^{-1}	536 m
Puslu	0,007 m^{-1}	230 m
Sisli	0,009 m^{-1}	179 m
Rahatsız edici	0,012 m^{-1}	134 m

Çizelge 4.3. Görünürlük için tasarım ve işlem değerleri (PIARC R02EN, 2019)

Trafik durumu	Tasarım değeri	İşlem durumu	İşlem limiti
Serbest akışlı en yoğun trafik 50-100 km/h	0,005 m^{-1}	Normal	0,003 - 0,007 m^{-1}
Günlük sıkışık trafik	0,007 m^{-1}	Trafik altında bir tünelde planlı bakım çalışması	0,003 m^{-1}
Olağanüstü sıkışık trafik	0,009 m^{-1}	Kapalı tünel için eşik değeri	0,012 m^{-1}

5. KARAYOLU TÜNELLERİNDE EMİSYON MİKTARININ VE TAZE HAVA GEREKSİMİNİN HESAPLANMASI

Karayolu tünellerinde gerekli havalandırma sistemlerinin belirlenmesi için başlıca faktörler bulunmaktadır. Tünel uzunluğu, tünel geometrisi, tünelin bulunduğu coğrafyanın özellikleri, şerit sayısı ve tünel içerisine biriken emisyon miktarı gibi faktörler havalandırma sistemi seçiminde oldukça önemlidir. Bir havalandırma sistemi tasarımı yapılmadan önce gerekli olan taze hava miktarı belirlemek için normal ve sıkışık trafik durumu, yangın meydana gelmesi halinde duman ve sıcak gazların kontrolü dikkate alınmalıdır.

Tünel içi havalandırma sisteminin tasarımında önemli bir parametre olan emisyon TMMOB tarafından ele alınmış ve şu şekilde tanımlanmıştır: Herhangi bir kirletici kaynaktan yayılan ve çevre için zararlı etkileri olan her türlü katı, sıvı ve gaz atık emisyon olarak adlandırılır (TMMOB, 1999:80). Bu çalışma kapsamında bakıldığındaysa karayolu taşıtının tünelden geçerken bıraktığı kirletici maddelerin miktarı emisyon oranı olarak tanımlanabilir. CO, partikül madde ve NO_x (NO ve NO_2) emisyonları araçların temel emisyon kaynakları olarak kabul edilir. Çevresel etkenler göz önüne alındığında, başta NO_2 olmak üzere emisyon miktarı belirli bir sınır değerde olmalıdır (PIARC R02EN, 2019).

Tünellerdeki bacalar ve fanlar tünelden geçen araçların yaydığı emisyon miktarlarının seyreltilmesi amacıyla kullanılırlar. Dizel araçlardan yayılan patiküller ve duman görüş mesafesini etkilerken, benzinli araçlardan yayılan CO ve NO insan sağlığını oldukça olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Emisyon seyreltmek için gerekli taze hava debisi, tüneldeki toplam emisyon miktarının kirli konsantrasyonundaki izin verilen değere bölünmesiyle elde edilir (PIARC R02EN, 2019).

$$M^* = \frac{G_{tun}}{C_{adm} - C_{amb}} \tag{5.1}$$

M^*= Gerekli taze hava debisi m^3/s

G_{tun}= Tünel içerisinde biriken toplam emisyon miktarı; partikül maddeler için m^2/s, gazlar için g/s,

C_{adm}= Kabul edilebilir konsantasyon hacmi g/m^3

C_{amb}= Tünel içerisine giren taze havadaki kirlilik hacmi g/m^3
Partikül maddeler için;
K_{adm} =Kabul edilebilir görünürlük seviyesi m^{-1}
K_{amb} =Ortamdaki görünürlük için kabul edilebilir seviye m^{-1}

Tünellerdeki emisyon miktarı; araç türü, araç hızı, tünel içerisindeki araç yoğunluğu ve tünelin dizayn edildiği yıl gibi pek çok parametreden etkilenmektedir (PIARC R02EN, 2019).

Araç Türü: Tünel içerisinde biriken emisyon miktarının hesaplanabilmesi için tünel içerisindeki araç türünün ve bu araçlarda kullanılan yakıt türlerinin bilinmesi gerekir. Bu bilgi kapsamında araçlar üç farklı grupta incelenir.

Binek Araçlar (PC): Günümüzde kullanılan binek araçlarda dizel ve benzin olmak üzere iki farklı yakıt türü kullanılmaktadır. İki yakıt türünün de birbiri üzerinde hem avantajı hem de dezavantajı bulunmaktadır.

Hafif Ticari Araçlar (LCV): Avrupa Birliği'nin araçlar üzerinde yapmış olduğu tanımlamaya göre brüt ağrılığı 3,5 tonun altında olan araçlar hafif ticari araçlar olarak kabul edilir. Hafif ticari araçlar yolcu taşıma amacıyla kullanılmasının yanı sıra yük taşıma amacıyla da kullanılmaktadırlar.

Ağır Yük Araçları (HGV): Römorklar, kamyonlar ve otobüsler ağır yük araçları sınıfında yer alırlar. Ağır yük araçlarında genel olarak dizel yakıt kullanılır.

Binek araç sayısı hesabı (PCU): Tünel içerisindeki toplam araç başına düşen otomobil sayısı bir PCU olarak ifade edilir. Tünel içerisinde kamyon ve otobüs gibi araçlarında olduğu düşünüldüğünde bu tip araçların 3 otomobil (binek araç) kadar yer kapladığı var sayılır (PIARC R02EN, 2019).

Ağır yük araçı (HGV) , binek araç sayısının fonksiyonu olarak ifade edilebilir (PIARC R02EN, 2019) :

$$n_{PCU}=(1-a_{HGV})n_{veh}+ a_{HGV}f_{HGV}n_{veh} \quad (5.2)$$

Trafik hızı $\leq$ 10 km/s f_{HGV} =3

Trafik hızı $\geq$ 10 km/s f_{HGV} =2

n_{PCU} = Binek araç sayısı

a_{HGV} = Ağır yük taşıt sayısı

n_{veh}= Toplam binek araç, hafif ticari araç ve ağır yük aracı sayısı

f_{HGV}= Binek araç sayısına karşılık gelen ağır yük araç sayısı

Emisyon Kanunları : Ülkelerin emisyon kuralları farklılık gösterebilir. Ülkemizde araç emisyonlarının denetimi Çevre ve Şehircilik Bakanlığına bağlı birimler tarafından gerçekleştirilmektedir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından onaylanan Egzoz Gazı Emisyonu Kontrolü Yönetmeliği aracılığıyla çevreyi ve canlıları emisyon gazlarının olumsuz etkilerinden korumak amaçlanmıştır. Tünel içerisinde biriken emisyon gazları havalandırma hesabının da temelini oluşturur.

Tünel Dizayn Yılı : Gelişen teknolojiyle birlikte son dönemlerde araçlardan yayılan emisyon miktarı azalma eğilimine geçmiştir. Emisyon kanunlarında yeni düzenlemelerin yapılması ve bu düzenlemelerin devam ettiği düşünülerek, havalandırma tasarımı yapılırken tünelin açıldığı yıldaki emisyon durumuna göre yapılmalıdır (PIARC R02EN, 2019).

Trafik Yoğunluğu (D) : Herhangi bir anda bir şeritte bulunan araç sayı trafik yoğunluğuna neden olur. Trafik yoğunluğu "Eş.5.3" aracılığıyla hesaplanabilmektedir (PIARC R02EN, 2019).

$$D_{PCU} = D_{veh} [(1 - a_{HGV}) + a_{HGV}f_{HGV}] \quad (5.3)$$

D_{PCU} = Bir kilometreye karşılık gelen toplam binek araç sayısı PCU/km

D_{veh}= Bir kilometreye karşılık gelen toplam araç sayısı veh/km

Sıkışık / Durgun Trafik : Araç hızının yaklaşık 10 km/s olduğu durumlardaki trafik sıkışık/durgun trafik olarak isimlendirilir. Sıkışık/durgun trafik hali havalandırma gereksinimin artmasına sebep olur (PIARC R02EN, 2019).

Senaryo Hızı : Seyahat halindeyken binek otomobillerin ulaşabileceği hız olarak tanımlanır (PIARC R02EN, 2019).

Zirve Trafik Saati : Gün içerisinde belirli saatlerde bir şeritte meydana gelen maksimum trafik yoğunluğunun oluştuğu saat pik trafik saatidir (KGM, 2019). Ülkemizde zirve trafik saatleri iş saatleri aralığında oluşmaktadır.

Tünel Eğimi : Trafiğin yönüne bağlı olarak eğimin etkisi emisyon oranını etkiler. Çift yönlü trafik durumunda her iki yönde dikkate alınmalıdır (PIARC R02EN, 2019).

5.1. Tünel İçerisindeki Araç Sayısının Belirlenmesi

Araçlardan yayılan emisyon miktarı; aracın türüne ve araçta kullanılan yakıta bağlı olarak değişmektedir. Yeni nesil araçlarda filtre kullanılmasına rağmen bu filtrelerin düzenli bakımı yapılmadığında çevre için istenilen performansta taze hava sağlanamaz. Tünel içerisindeki araç kategorisi trafik koşulları, trafik yoğunluğu ve şerit uzunluğu gibi parametrelere bağlıdır (PIARC R02EN, 2019).

$$n_{cat} = D \cdot L_{sec} \cdot a_{cat} \tag{5.4}$$

n_{cat} = Belirli bir kategorideki araç sayısı

D = Trafik yoğunluğu (araç/km)

L_{sec}= Şerit uzunluğu (km)

a_{cat}=Belirli kategorideki araç yüzdesi

5.2. Araç Başına Düşen Emisyon Miktarının Belirlenmesi

Bir araçtan yayılan emisyon miktarı zaman faktörü, kütle faktörü ve yükseklik faktörü gibi birçok parametreye bağlıdır (PIARC, 2020). Her araç kategorisindeki emisyon oranı PIARC tarafından faktörlü emisyon oranı olarak tanımlanmış ve g_{fac} olarak ifade edilmiştir. "Eş. 5.5" ile birim araç başına düşen faktörlü emisyon oranı hesaplanabilir.

$$g_{fac} = g_{cat} \; f_t \; f_m \; f_h + g_{non\text{-}ex} \tag{5.5}$$

g_{fac}= Emisyon oranı faktörü

g_{cat}= Birim araç kategorisine karşılık gelen emisyon oranı

f_t= Zaman faktörü

f_m=Kütle faktörü

f_h= Yükseklik faktörü

$g_{non\text{-}ex}$=Partikül madde emisyon miktarı

5.2.1. Araçlar için emisyon oranı

Emisyon oranı g_{cat}, ortalama araç hızı ve yol eğiminin bir fonksiyonu olarak belirli bir araca özgü egzoz emisyonunu tanımlar. Emisyon oranı, benzinli ve dizel yakıtlı araçlar için farklılık gösterir (PIARC R02EN, 2019). PIARC tarafından 2019 yılında yayımlanan rapora göre benzinli binek araçlar için CO emisyon oranı belirlenirken Çizelge 5.1 kullanılırken, NO_x emisyon oranı Çizelge 5.2 ile partikül madde miktarı ise Çizelge 5.3 ile belirlenir. Dizel binek araçlar için CO emisyon oranı Çizelge 5.4, NO_x emisyon oranı Çizelge 5.5 ve partikül maddeler için Çizelge 5.6 kullanılarak bulunur. Benzinli hafif ticari araçlar için CO emisyon oranı belirlenirken Çizelge 5.7 kullanılırken, NO_x emisyon oranı Çizelge 5.8 ile partikül madde miktarı ise Çizelge 5.9 ile belirlenir. Dizel hafif ticari araçlar için CO emisyon oranı belirlenirken Çizelge 5.10 kullanılırken, NO_x emisyon oranı Çizelge 5.11 ile partikül madde miktarı ise Çizelge 5.12 ile belirlenir. Ağır yük araçlarında benzin kullanılmamaktadır. Bu neden emisyon oranı çizelgeleri sadece dizel yakıt türüne göre verilmiştir. Dizel ağır yük araçları için CO emisyon oranı Çizelge 5.13, NO_x emisyon oranı Çizelge 5.14 ve partikül maddeler için Çizelge 5.15 kullanılarak bulunur.

Binek araçlar için emisyon oranı çizelgeleri;

Çizelge 5.1. Benzinli binek araçlar için CO emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

Benzinli binek araç CO [g/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
10	7,7	8,8	9,7	11,0	12,0	14,1	16,6
20	8,4	10,2	12,6	15,5	22,7	35,4	50,2
30	7,7	9,3	11,1	13,7	17,3	22,8	31,1
40	8,3	10,3	12,9	16,4	22,3	33,2	48,9
50	8,9	11,8	14,0	18,2	23,8	33,1	46,7
60	8,5	11,4	13,3	18,2	25,3	37,8	59,2
70	9,9	13,3	17,9	25,6	36,4	60,4	109,0
80	12,5	16,2	21,1	31,0	49,8	89,1	166,2
90	11,7	15,7	22,7	35,6	67,5	146,1	264,3
100	15,5	20,9	31,6	50,4	85,9	209,4	415,7
110	26,7	33,2	47,4	78,1	148,6	326,2	791,2
120	47,2	54,9	74,1	130,7	259,8	604,4	1506,2
130	85,3	106,2	142,2	236,6	504,3	1318,7	2568,7

Çizelge 5.2. Benzinli binek araçlar için NO_x emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

Benzinli binek araç NO_x [g/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
10	1,2	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6
20	1,3	1,6	2,0	2,4	2,9	3,4	4,2
30	1,3	1,6	2,1	2,7	3,4	4,3	5,4
40	1,4	1,8	2,4	3,1	4,1	5,1	6,2
50	1,3	1,7	2,3	3,2	4,3	5,5	7,1
60	1,3	1,8	2,5	3,6	5,1	6,9	8,6
70	1,3	1,9	2,7	4,0	5,9	8,3	10,1
80	1,4	2,1	3,2	5,2	7,4	9,8	12,3
90	1,6	2,4	3,7	6,4	9,9	11,8	14,6
100	1,9	3,0	4,4	7,7	12,1	15,3	17,8
110	2,6	3,8	6,0	9,2	13,9	18,3	22,5
120	3,4	5,0	8,2	12,2	16,3	21,7	26,4
130	4,4	7,2	13,0	17,9	19,8	24,7	29,7

Çizelge 5.3. Benzinli binek araçlar için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

Benzinli binek araç partikül madde miktarı [m²/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
20	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
30	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4
40	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6
60	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9
70	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,9	1,5
80	0,2	0,3	0,3	0,5	0,8	1,3	2,4
90	0,3	0,3	0,3	0,6	1,2	2,1	3,8
100	0,5	0,3	0,4	0,7	1,5	2,9	4,9
110	0,7	0,6	0,7	1,1	2,0	3,7	6,2
120	1,0	0,9	1,3	2,0	3,3	5,0	8,0
130	1,3	1,6	2,3	3,7	5,8	7,9	10,4

Çizelge 5.4. Dizel binek araçlar için CO emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

Dizel binek araç CO [g/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
10	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0
20	0,9	1,0	1,3	2,8	3,3	3,6	4,1
30	0,9	1,2	1,4	2,4	3,0	3,5	3,9
40	0,9	1,2	1,4	2,0	2,7	3,2	3,7
50	1,0	1,1	1,4	1,8	2,6	3,1	3,6
60	1,0	1,1	1,2	1,6	2,4	3,0	3,6
70	1,0	1,1	1,2	1,6	2,1	2,8	3,4
80	0,9	1,1	1,2	1,6	2,1	2,4	3,2
90	0,9	1,0	1,2	1,5	1,9	2,1	2,9
100	1,0	1,1	1,2	1,3	1,6	1,9	2,7
110	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,7	2,5
120	1,3	1,3	1,2	1,4	1,8	2,0	2,8
130	1,4	1,4	1,2	1,4	2,0	2,4	2,9

Çizelge 5.5. Dizel binek araçlar için NO_x emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

Dizel binek araç NO_x [g/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
10	7,7	9,0	10,3	12,2	14,5	16,9	19,9
20	7,9	9,5	11,6	14,7	18,4	23,1	28,4
30	8,0	10,1	12,8	17,3	22,4	29,3	36,9
40	8,0	10,2	13,5	19,0	25,8	34,8	45,8
50	8,0	10,4	14,2	20,6	29,2	40,2	54,7
60	8,4	11,3	16,2	23,9	35,2	51,0	71,6
70	8,7	12,4	18,7	28,9	43,6	63,0	87,8
80	7,6	11,9	20,0	34,0	56,7	88,8	126,6
90	8,3	13,3	24,5	43,9	70,0	108,6	171,6
100	9,6	14,2	27,0	50,9	86,7	131,1	204,2
110	13,3	21,9	37,9	68,5	114,3	178,8	247,4
120	19,3	32,4	53,2	86,2	142,7	239,2	316,1
130	25,4	47,9	77,1	120,9	191,6	291,5	373,4

Çizelge 5.6. Dizel binek araçlar için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

Dizel binek araç partikül madde miktarı [m²/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0
20	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,7
30	1,1	1,4	1,6	2,0	2,3	2,7	3,1
40	1,2	1,4	1,8	2,3	2,8	3,4	4,0
50	1,2	1,5	2,0	2,7	3,4	4,2	4,8
60	1,3	1,6	2,1	2,8	3,8	4,9	6,0
70	1,3	1,8	2,5	3,2	4,3	5,3	7,0
80	1,3	1,9	2,8	3,8	5,3	6,6	8,6
90	1,5	2,2	3,2	4,6	6,5	8,2	9,7
100	2,0	2,6	3,8	5,6	7,6	9,4	10,6
110	2,7	3,5	4,7	6,6	8,9	10,5	11,7
120	3,4	4,6	6,3	7,9	9,6	11,2	12,5
130	4,3	6,2	8,1	9,9	11,1	12,6	14,1

Hafif ticari araçlar (LCV) için emisyon oranı çizelgeleri;

Çizelge 5.7. Benzinli hafif ticari araçlar için CO emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

LCV Benzinli CO [g/h] 2018							
	Tünel Eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
10	35,3	38,1	41,7	45,5	50,2	55,9	61,8
20	35,9	40,1	46,8	51,7	58,3	67,8	83,4
30	36,5	42,2	51,9	57,9	66,5	79,7	105,1
40	37,8	43,2	57,4	67,8	86,2	116,5	123,2
50	39,5	44,2	57,6	70	90	124	141,3
60	40,8	47,1	61,2	69,3	93,8	131,6	204,7
70	44,0	51,8	71,9	90,8	126,5	193,5	381,1
80	52,1	61,6	81,3	98,3	164,5	272,5	645,7
90	52,3	67,8	99,1	118,4	237,1	581,9	1380,3
100	68,8	94,8	137	148	329,6	953,7	2194,7
110	108,9	150	203,1	238,1	609,9	1709,1	3479
120	174,1	240,8	323,1	468,3	1164,6	2709,5	4329,6
130	246,5	329,6	514,5	1073,3	2406,5	3959,4	4641,6

Çizelge 5.8. Benzinli hafif ticari araçlar için NO_x emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

LCV Benzinli NO_x [g/h] 2018							
	Tünel Eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	1,7	2,1	2,7	3,4	4,3	5,4	6,4
20	1,8	2,2	3	4,7	6,2	8,8	10,4
30	1,9	2,1	3,1	5,7	8,0	10,7	13,1
40	1,8	2	3,3	6	9,1	12,7	16,1
50	1,4	1,6	3,6	6	9,9	14,2	18,7
60	0,9	1,7	3,9	7,5	12,3	14,7	21,2
70	0,8	1,9	4,7	9,1	14,6	18,1	24,3
80	0,7	2,0	5,7	12,3	19,1	21,6	25,5
90	1,1	2,7	7,8	15,2	23,6	24,7	26,8
100	2,0	3,9	10,1	19,2	27,9	27,8	27,9
110	3,4	6,7	15,2	26,8	33	30,9	28,9
120	4,5	9,8	21,6	33,8	36,1	32,1	29,8
130	5,9	13,5	26,6	36,2	36,7	32,7	30,8

Çizelge 5.9. Benzinli hafif ticari araçlar için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

LCV Benzinli Partikül Madde Miktarı [g/h] 2018							
	Tünel Eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8
40	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,1
50	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,8	1,5
60	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	1,2	2,4
70	0,2	0,2	0,3	0,6	1,2	2,4	5,1
80	0,5	0,5	0,7	0,9	2	4,3	9,6
90	0,8	0,9	1	1,2	3,1	7,1	13,6
100	1,1	1,2	1,4	2	5,2	9,5	18,8
110	1,4	1,8	2,2	3,9	7,3	14,6	26,1
120	1,7	2,3	3,0	5,2	9,4	22	32,7
130	2,3	2,9	3,9	6,5	13,8	30,2	40,4

Çizelge 5.10. Dizel hafif ticari araçlar için CO emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

LCV Dizel CO [g/h] 2018							
	Tünel Eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	0,9	1,0	1,2	1,5	1,6	1,8	2,1
20	1,0	1,2	1,5	1,8	1,9	2,1	2,3
30	1,0	1,3	1,6	2	2,2	2,4	2,6
40	1,1	1,3	1,7	2	2,3	2,5	2,9
50	1,1	1,4	1,7	2,1	2,5	2,8	3
60	1,0	1,4	1,7	2,1	2,7	3	3,4
70	1,1	1,6	1,8	2,3	3	33	3,8
80	1,4	1,7	1,9	2,5	3,3	3,6	4,2
90	1,7	2	2,1	2,6	3,5	3,9	5,1
100	2,0	2,3	2,2	2,8	3,9	4,6	5,7
110	2,4	2,6	2,5	3	4.4	5,4	6,2
120	2,8	3,0	3,4	4,2	5,4	6,0	6,6
130	2,9	3,6	4,2	5,1	6	6,4	6,8

Çizelge 5.11. Dizel hafif ticari araçlar için NO_x emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

LCV Dizel NO_x [g/h] 2018							
	Tünel Eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	5,2	6	7,3	9	11,3	13,7	16
20	5,3	6,6	8,7	11,7	15,9	27,7	34,9
30	5,4	7,2	10,1	14,4	20,4	34	44,6
40	4,9	6,9	10,2	15,7	23,8	40,2	54,3
50	4,5	6,5	10,4	17,1	27,2	41,4	58,6
60	4	7,7	10,7	18,5	37,9	57,5	81,5
70	4,5	9	16,6	29,6	48,6	73,6	104,4
80	4,9	9,4	20	43,2	75,6	108,6	146,2
90	8,5	1,8	30,4	58	102,4	144,9	181,8
100	12,2	2,8	43,1	76,3	122,2	169,6	210,5
110	20,1	4,2	68,9	11,5	156,2	199,6	235,1
120	32,8	6,3	101,1	147,1	192,1	227,7	252,9
130	54,7	9,5	136,9	183,3	224,2	245,3	258,7

Çizelge 5.12. Dizel hafif ticari araçlar için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

LCV Dizel Partikül Madde Miktarı [g/h] 2018							
	Tünel Eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
10	1,8	2	2,2	2,6	2,9	3,3	3,6
20	20	2,3	2,8	3,3	3,8	4,6	5,5
30	2	2,3	2,9	3,5	4,7	5,9	7
40	2,1	2,8	3,3	4,2	5,4	7,2	8,5
50	2	2,7	3,7	4,8	6,1	8,8	9,4
60	2,3	3	4,2	5,9	7,2	10,5	11,9
70	2,5	3,3	4,6	6,9	9,8	12,2	14,3
80	3,9	4,6	6,4	9,1	12,3	14,8	17,3
90	5,7	6,7	8,3	11,3	14,6	17,4	20,4
100	7,7	9,1	11	13,3	16,5	19,8	22,7
110	9,2	11,1	13,2	16	19	22,3	25,1
120	10,8	13,2	15,5	18	21,5	24,8	26,9
130	12	14,7	17,2	20,5	24,2	26,7	27,6

Ağır yük araçları (HGV) emisyon oranı çizelgeleri;

Ağır yük taşıtları yüksek torka ihtiyaç duymaktadır. Dizel yakıt ile çalışan motorların torku yüksektir. Dizel yakıtların torkunun yüksek olması ve ekonomik olması sebebiyle ağır yük araçlarında tercih edilmektedir.

Çizelge 5.13. Dizel ağır yük araçları için CO emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

HGV Dizel CO [g/h] 2018							
	Tünel eğimi[%]						
V[km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
10	11,7	14,1	17,3	21,0	24,3	28	31,3
20	10	11,4	17,8	22,3	26,2	30,6	35,2
30	8,7	10,1	18,3	23,9	30,6	37,8	42,3
40	5,8	8,7	18,8	26,9	37,3	48,1	55,1
50	4,1	6,2	19,3	29,4	43,2	56,8	64,8
60	3,5	6,1	19,8	34,9	53,3	62,3	67,7
70	3,6	6,1	20,3	40,3	63,1	67,8	70,6
80	3,6	6,1	20,7	45,8	73,3	77,2	76,6
90	3,6	6,1	22,2	47,0	75,7	83,1	82,4
100	3,6	6,1	22,3	49,6	78,1	88,6	88

Çizelge 5.14. Dizel ağır yük araçları için NO_x emisyon oranı (PIARC R02EN, 2019)

HGV Dizel NO_x [g/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
10	54,2	65,7	77,2	86,5	92,7	98,4	103,8
20	41	55,3	76,2	88,7	98,8	104,1	111,7
30	32,4	48,5	75,2	92,7	103,1	111	127,6
40	23,9	41,6	69,3	105,3	119,2	141,2	174,9
50	20	33,1	64,2	111,8	129,8	167,1	211,7
60	16,2	24,5	62,2	122,9	182	247,5	301,9
70	12,3	16,3	57,5	134	234,2	328	392,1
80	12,3	16,3	57,5	145,1	286,5	408,4	482,3
90	12,3	16,3	57,5	146,6	294,6	419,5	485,4
100	12,3	16,3	57,5	151,7	304,6	428,6	488,5

Çizelge 5.15. Dizel ağır yük araçları için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

HGV Dizel Partikül madde miktarı [m²/h] 2018							
	Tünel eğimi [%]						
V [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
10	4,3	4,9	5,6	6,3	7,1	7,9	8,6
20	3,7	4,3	5,6	6,5	7,4	8,5	9,6
30	3,5	4,1	5,6	6,8	8,4	9,9	11,3
40	3,3	3,9	5,8	8	10,5	12,9	15
50	3,1	3,7	5,8	8,6	11,9	14,9	17,5
60	3,1	3,7	6	9,3	14,3	19,3	22,6
70	3,1	3,8	6,3	10,1	16,7	23,6	27,7
80	3,3	3,7	6,6	12,3	19,4	28	32,8
90	3,5	3,9	6,6	14,4	21,7	28,5	33,1
100	3,5	3,9	6,8	15	23	29,4	33,3

5.2.2. Zaman faktörü (f_t)

Zaman faktörü, 2019 yılında PIARC tarafından yayımlanan rapora göre emisyon verileri 2018 yılı temel alınarak türetilmiştir. Bir aracın ömrü boyunca emisyon miktarlarında meydana gelebilecek emisyon değişimlerini hesaba katan bir katsayıdır. Binek araçlar için zaman faktörü bulunurken Çizelge 5.16 , hafif yük taşıtları için Çizelge 5.17 ve ağır yük araçları için Çizelge 5.18 kullanılarak bulunur.

Çizelge 5.16. Binek araçlar için zaman faktörü (PIARC R02EN, 2019)

ft	CO		NOx		Partikül Madde Mikarı	
	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel
2018	1	1	1	1	1	1
2020	0,91	0,92	0,85	0,87	0,98	0,76
2025	0,78	0,80	0,62	0,51	0,95	0,44
2030	0,71	0,74	0,50	0,32	0.93	0,33
2035	0,69	0,72	0,46	0,26	0,92	0,31

Çizelge 5.17. Hafif yük araçları için zaman faktörü (PIARC R02EN, 2019)

f_t	CO		NOx		Görünürlük	
LCV	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel
2018	1	1	1	1	1	1
2020	0,8	0,77	0,7	0,82	0,92	0,75
2025	0,57	0,43	0,32	0,49	0,82	0,38
2030	0,49	0,26	0,2	0,34	0,79	0,21
2035	0,48	0,25	0,19	0,29	0,78	0,17

Çizelge 5.18. Ağır yük araçları için zaman faktörü (PIARC R02EN, 2019)

Yıl	CO	NO_x	Görünürlük
2018	1	1	1
2020	0,89	0,71	0,96
2025	0,76	0,34	0,92
2030	0,72	0,22	0,91
2035	0,72	0,22	0,91

5.2.3. Kütle faktörü (f_m)

Kütle faktörü ağır yük taşıyan araçlar için kullanılan bir faktör olup, ortalama ağırlığı 23 ton olan araçlar referans alınarak oluşturulan bir katsayıdır. Çizelge 5.19'da da görüldüğü gibi 23 t ağrılığındaki araçlar için kütle faktörü 1'dir. Kamyonlar, otobüsler ve römorklar için kullanılır. Bu katsayı 23 tondan daha hafif veya daha ağır araçlar için interpolasyon yöntemiyle hesaplanarak bulunabilir (PIARC R02EN, 2019).

Çizelge 5.19. Ağır yük taşıtları için kütle faktörü (PIARC R02EN, 2019)

Tür	CO	NOx	Görünürlük
15 t (otobüs ve kamyon)	0,9	0,9	0,9
23 t (ortalama)	1	1	1
32 t (Kamyon, römork)	1,2	1,2	1,2

5.2.4. Yükseklik faktörü (f_h)

Yükseklik faktörünün etkisi motor tipine bağlı olarak araçlardan yayılan egzoz miktarını etkilemektedir. Tüm araç kategorileri için uygun yükseklik faktörünü belirleyecek veri bulunmamaktadır (PIARC R02EN, 2019). PIARC'ın önerdiği değerler temel veri olarak

kullanılmalıdır. Deniz seviyesinden 1000 metre yüksekliğe kadar yükseklik faktörü 1 olarak kabul edilmektedir. Çizelge A'daki veriler 2000 m ve üzerindeki yükseklikler için geçerlidir (PIARC R02EN, 2019). Ağır yük araçları için yükseklik faktörü bulunmamaktadır. Çizelge 5.20'de de belirtildiği gibi 2000 m ve üzerindeki yerler için yükseklik faktörü dikkate alınır. En etkili değer benzinli binek araçlar için karbonmonoksittirç

Çizelge 5.20. 2000 m üzerindeki yerler için yükseklik faktörü (PIARC R02EN, 2019)

fh	CO		NOX		Görünürlük
Binek araçlar	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Dizel
2018	2	1	1	1	1
2020	1,6	1	1	1	1
2025 and later	1	1	1	1	1

5.2.5. Partikül madde emisyon miktarı

Genellikle havada asılı duran 10 µm çapından daha küçük parçacıklar partikül madde olarak tanımlanmaktadır (Perrino, Marcovecchio, Tofful and Canepari, 2015). Tünel içerisinde, lastik aşınması ve tünel portlarından içeri nüfus eden parçacıklar zamanla birikerek egzoz kaynaklı olmayan partikül maddeleri oluşturur. Ağır yük araçlarının bıraktığı partikül madde miktarı binek araçların oluşturduğu partikül madde miktarından oldukça fazladır. Hafif ticari araçları için veri yetersiz olduğu için binek araçlar için kullanılan veriler referans alınır (Çizelge 5.21). Ağır yük araçları için partikül madde miktarı Çizelge 5.22'de de görüldüğü gibi hız değeri artıkça yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Çizelge 5.21. Binek araçlar ve hafif ticari araçları için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

PC Partikül Madde Miktarı [m²/h]		
V [km/h]	Çift Yönlü	Tek Yönlü
0	0	0
10	1,1	0,7
20	2,2	1,3
30	3,4	2
40	4,5	2,6
50	5,6	3,3
60	6,7	3,9
70	7,8	4,6
80	9	5,3
90	10,1	5,9
100	11,2	6,6
110	12,3	7,2
120	13,4	7,9
130	14,6	8,6

Çizelge 5.22. Ağır yük araçları için partikül madde miktarı (PIARC R02EN, 2019)

HGV Partikül Madde Miktarı [m²/h]		
V [km/h]	Çift Yönlü	Tek Yönlü
0	0	0
10	5,1	4,4
20	10,1	8,8
30	15,2	13,3
40	20,2	17,7
50	25,3	22,1
60	30,3	26,5
70	35,4	30,9
80	40,4	35,3
90	45,5	39,8
100	50,6	44,2

6. AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ

Akışkan hareketi sayısal, deneysel ve teorik olmak üzere üç faklı yöntemle incelenebilir. Kompleks yapıya sahip problemlerin çözümünde teorik yöntemler kullanmak fazlasıyla zordur. Deneysel yöntemler ise hem zaman alıcı hem de maliyetli bir uygulamadır. Bu sebeplerden dolayı, son zamanlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi sayısal yöntemlerin kullanımı oldukça popülerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi uçak ve araçların aerodinamiği, güç santralleri, biyomedikal mühendisliği ve meteoroloji gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi, akışkan davranışlarını içeren problemleri sayısal metot ve algoritmalarla, akışkanlar mekaniğinde kullanılan ana denklemlere dayanarak çözdüren analizlerin tümüdür. Sıvı ve gaz akışını ele alan bütün problemlerin analizi; akışkan kütlesinin korunumu, termodinamiğin birinci yasasına bağlı olan enerjinin korunumu ve Newton'un ikinci yasası olan momentumun korunumu prensibine dayanmaktadır.

6.1. Korunum Denklemleri

Kütlenin Korunumu : Kütlenin korunumu yasası, kimyasal bir reaksiyonda kütlenin yoktan vardan da yok edilemediğini ifade eder. Kömür havayla birleşip yanma reaksiyonuna girdiğinde kömürde bulunan karbon atomu gaz halindeki karbondioksite dönüşür. Bu dönüşüm sırasında reaksiyona giren maddelerin fiziksel halleri değişirken kütle korunur. Kütlenin korunumu yasası akış için düşüldüğünde değişken kesite ve geometriye sahip bir akış alanı içerisinde değişen geometrinin etkisine bağlı olarak akışkanın hızı ve yoğunluk gibi özellikleri değişebilir. Fakat akışkan, işlem gördüğü hacim içerisinde yok olmaz. Akış alanına dahil olan akışkan belli bir kaynaktan gelir ve akış alanı içerisinde varlığını sürdürür. Akış alanı içerinde varlığını sürdüren maddenin korunumu matematiksel denklemlerle ifade edilir. Bu matematiksel denklemler süreklilik denklemi olarak da bilinir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_M \tag{6.1}$$

Kütlenin korunumunun temel denklemi olan "Eş. 6.1" sıkıştırılamayan akışkanlar ve sıkıştırılabilir akışkanlar için kullanılmaktadır. "Eş. 6.1"'de ifade edilen S_M terimi kaynak

terimi olup akışa eklenen veya akıştan ayrılan kütleyi ifade etmektedir (FLUENT Theory Guide, 2009).

Momentumun Korunumu : Newton'un ikinci yasasını baz alan momentumun korunumu ilkesine göre bir akışkan parçacığına etki eden toplam kuvvet, parçacığın kütlesi ve ivmesinin çarpımında eşittir.

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla\cdot p + \nabla\cdot\mu[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{v}\,\mathrm{I}] + \rho\,\vec{g} + \vec{F} \tag{6.2}$$

"Eş. 6.2"'de p terimi statik basıncı, $\rho\vec{g}$ ifadesi yerçekimi kuvvetini ve $\vec{F}$ ise dış kuvvetleri gösteren terimlerdir. I ile ifade edilen terim birim tensörü gösterir.

Enerjinin Korunumu : Termodinamiğin birinci yasasından türetilen enerjinin korunumu denklemi enerjideki değişimin, akışkan üzerine yapılan işin ve akışkana aktarılan ısının toplamına eşit olduğunu ifade eder.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla\cdot(\vec{v}(\rho E + \mathrm{p})) = \nabla(k_{eff}\nabla\mathrm{T}) + S_E \tag{6.3}$$

Akışkanlar dinamiği modellemelerinde enerji (E) ve sıcaklık (T) kütle ortalamalı değişkenler olarak ele alınmaktadır. k_{eff} terimi efektif termal iletkenliği ifade ederken, S_E kaynak terimi radyasyona ek olarak hacimsel ısı kaynaklı katkıların hepsini içeren kaynak terimini ifade etmektedir.

6.2. Türbülans Metotları ve Türbülans Modeli Seçimi

Akışkan hareketi yüksek hızlarda rastgele ve düzensiz üç boyutlu vortisitelerle karakterize edilmesi türbülanslı akış olarak tanımlanır. Türbülanslı akış ısı transferi, sürüklenme ve ısı yayılması gibi diğer olayları etkiler. Türbülans modeli, ana akış denklemlerini daha kapsamlı bir alanda çözdüremeye olanak sağlayan prosedürdür. Literatürde türbülans akış hesaplamaları için en yaygın şekilde kullanılan üç farklı metot vardır:

- Doğrudan sayısal simülasyon (Direct simulation method-DNS)
- Büyük girdap simülasyonu (Large eddy simulation-LES)

- Reynolds ortalaması alınmış Navier Stokes simülasyonu (Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation-RANS)

6.2.1. Doğrudan sayısal simülasyon (DNS)

Doğrudan sayısal simülasyon (DNS), verilen bir uygulama ile ilgili bütün konumsal ve zaman temelli ölçeklerin yeterli derecede çözüldüğü hesaplamalara karşılık gelmektedir. Bu açıdan geçerli bir simülasyon, viskozitenin aktif olduğu en küçük ölçekler dahil olmak üzere tüm uzunluk ölçülerini kapsamaktadır (Tu, Yeoh ve Liu, 2007:390) Bu yöntemde çözümlerin yapılması için türbülans modeline ihtiyaç duyulmaz. Ancak türbülanslı akışın en küçük yapısının çözülmesi gerekir ve bu nedenle daha çok ağ yapısına ihtiyaç duyar. Ağ yapısındaki fazlalık çözüm süresinin uzamasına neden olur ve hesaplama maliyetleri oldukça yüksektir. Karmaşık yapıdaki akış için zorlayıcı bir yöntemdir.

6.2.2. Büyük girdap simülasyonu (LES)

Büyük girdap simülasyonu, büyük ölçekli hareketi doğrudan çözen ancak küçük ölçekli hareket için tahminde bulunan bir simülasyon tekniğidir. Akış alanı içerisinde bulunan küçük ölçekli girdaplar Gauss eliminasyon yöntemiyle filtrelenebilir, böylece geriye sadece büyük girdaplar kalır. Filtre boyutu genellikle oluşturulan ağ (mesh) boyutu alınır. Filtreleme işlemi sonrasında yapılan değişikliklerden dolayı ortaya bilinmeyen terimler çıkar. Bu terimleri çözdürebilmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir (Tu, Yeoh ve Liu, 2007:393).

6.2.3. Reynolds ortalaması alınmış navier stokes simülasyonu (RANS)

Reynolds 1985 yılında türbülans için yaptığı çalışmalar sonucunda ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini elde etmiştir. Türbülanslı akış girdaplı yapıya sahip olduğu için denklemlere bağlı hesaplanması neredeyse imkansızdır. Çalkalanan akışın hız değeri zamanla değiştiğinden dolayı hız büyüklüğünü tahmin etmek oldukça zordur. Bu sebepten ötürü Reynolds hız değerini bulurken, daimi ortalama hız ile anlık değişimleri ayrıştırılarak ifade edilebileceğini ve iki değerin toplamının alınabileceğini öne sürer. RANS, ortalama akışa ve türbülansın ortalama akış özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanır. Çeşitli türbülanslı dalgalanmalar arasındaki etkileşimler nedeniyle zaman ortalamalı (veya

Reynolds ortalamalı) akış denklemlerinde fazladan terimler görünür. Bu ekstra terimler klasik türbülans modelleri ile modellenmiştir. En yaygın RANS türbülans modelleri, RANS akış denklemleriyle birlikte çözülmesi gereken ek taşınım denklemlerinin sayısına göre sınıflandırılır (Versteeg ve Malalasekara, 1995:66).

Bu tez çalışmasında literatür araştırmasına dayanarak Realizable k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Realizable k-ε modeli çoğunlukla doğru sonuçlar verdiği için mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu türbülans modeli türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans yutulma hızı (ε) olmak üzere iki ayrı denklem içerir.

Türbülans kinetik enerjisi;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho k\vec{v}) = \nabla\cdot[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\nabla \mathrm{k}]+G_k - G_b - \rho\eta + Y_M \tag{6.4}$$

Eşitlik 6.4'deki σ_k türbülans kinetik enerjisi için Prandtl sayısını temsil etmektedir. σ_k sayısının değeri 1'dir. G_k terimi ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu ifade etmekteyken, G_b terimi kaldırma kuvvetinin etkisiyle türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade etmektedir. Y_M ifadesi ise türbülanslı akıştaki dalgalı genişlemenin genel yayılma hızına oranını ifade etmektedir (FLUENT Theory Guide, 2009).

Türbülans yutulma hızı;

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\varepsilon\vec{v}) = \nabla\cdot[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\nabla\varepsilon] +\rho C_1 S_\varepsilon -\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{6.5}$$

Burada C_1 =max[0,43 , $\frac{\eta}{\eta+5}$]

C_2, $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ model sabitleri olup değerleri sırasıyla 1,9; 1,44; 0,3'dür. σ_ε türbülans yutulma hızı için Prandtl sayısını temsil etmektedir. σ_ε sayısının değeri 1,2'dir (FLUENT Theory Guide, 2009).

6.3. Tür Denklemleri

Eddy Dissipation-Concept (EDC) modeliyle tanımlanan tür taşıma denklemi:

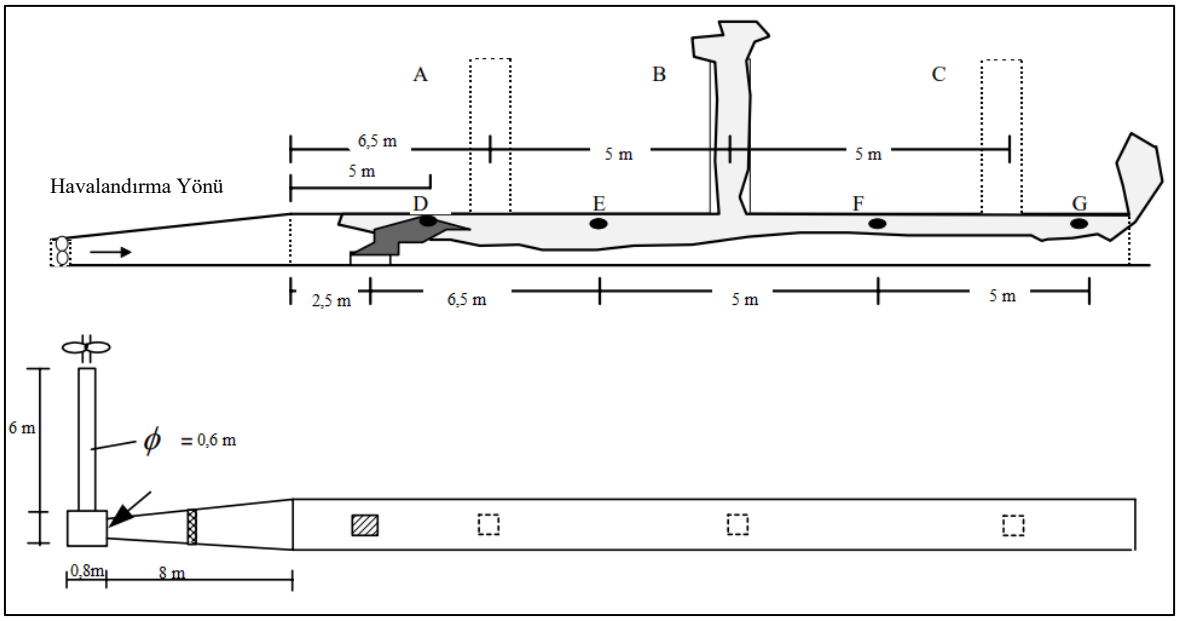
$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i v) = \nabla \cdot (J_i) + R_i + S_i \tag{6.6}$$

eşitliğiyle ifade edilir**.**

Bu denklemde Y_i her bir tür (i^{th}) için kütle kesrini teslim etmektedir. J_i difüzyon akışıdır ve R_i kimyasal reaksiyonla gerçekleşen net üretim hızını göstermektedir. S_i ise kaynak terimidir (FLUENT Theory Guide, 2009).

7. DOĞAL HAVALANDIRMALI ÖLÇEKLİ BİR TÜNELDE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SAYISAL ÇALIŞMA İLE DOĞRULANMASI

Bu tez çalışmasında virajlı bir karayolu tüneli yangınında sayısal hesaplamalar ile analitik hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında belirtilen tünel modelinin simülasyonlarından önce Haukur Ingason ve Fredic Seco (2005) tarafından yapılmış deneysel çalışma Ansys/FLUENT programı yardımıyla doğrulanmıştır. H. Ingason ve F. Seco (2005), yaptıkları deneysel çalışmada 2 m genişliğinde, 1 m yüksekliğinde ve 20 m uzunluğundaki ölçekli bir tünel modelinin duman yayılımını gözlemlemek için deneyler yapmışlardır.

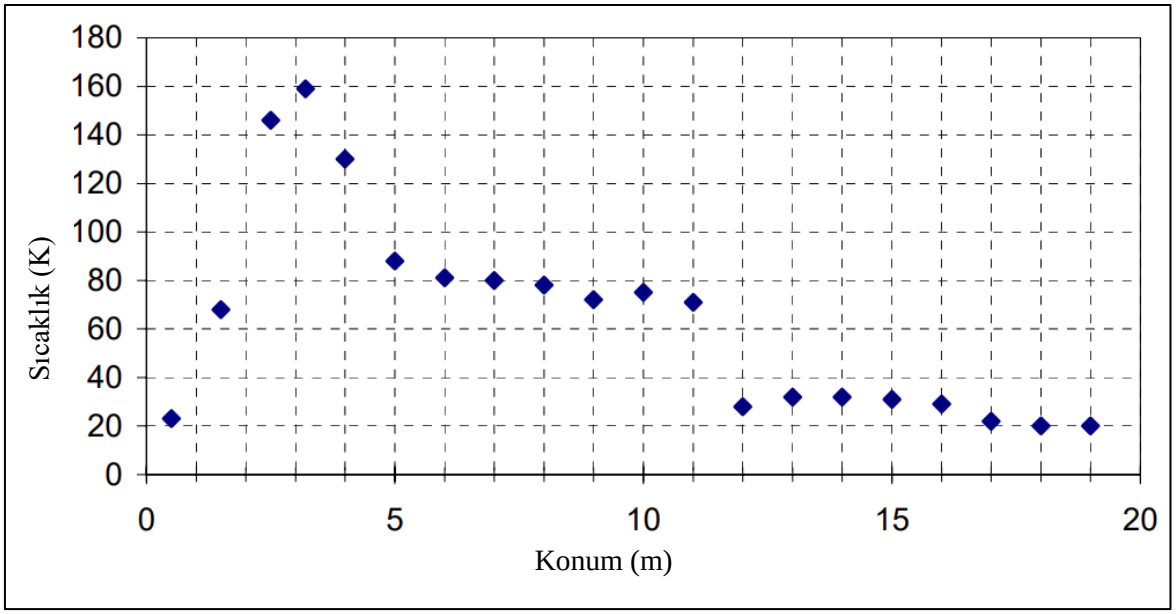


Şekil 7.1. Deney düzeneğinin yan ve üst kesit teknik çizimi (H. Ingason ve F. Seco, 2005)

Deney düzeneği oluşturulurken yan duvarlardan bir tanesi, duman yayılımını gözlemlemek amacıyla 5 mm kalınlığındaki yanmaz cam malzeme ile kapatılmıştır. Zemin, tavam ve cam duvar dışında kalan yan duvar ise 12 mm kalınlığındaki promatek malzeme ile kapatılmıştır. Deneylerde yanmanın neden olduğu araç yangın havuzu olarak tasarlanmış ve tünel girişinden 2,5 m uzağa yerleştirilmiştir. Yakıt olarak ise petrol türevi olarak bilinen ve halk dilinde gazyağı olarak tanımlanan kerosen kullanılmıştır. Yangın havuzu sırasıyla 0,33 x 0,33 m ve 0,4 x 0,4 m olmak üzere iki farklı boyutta kullanılmıştır. Şekil 7.1'de görüldüğü gibi tünel boyunca A, B ve C konumlarında farklı sayıda termal şaft

monte edilmiştir. Deneyler sırasında B şaftı aktif şekilde kullanılmıştır. Tünel girişindeki enine kesit üzerinde üniform bir akış oluşturmak için tünelin bir ucuna özel olarak tasarlanmış huni şeklinde bir havalandırma sistemi bağlanmıştır (Şekil 7.1). Havalandırma amacıyla kullanılan fandan yayılan akışın düzgün ve kararlı hale gelmesini sağlamak amacıyla; 6 m uzunluğunda, 0,6 m çapında dairesel bir boruya bağlanmışlardır ve bu boruyu da 1,2 m x 0,8 m ölçülerinde ve 1,4 m yüksekliğinde kapalı bir ahşap kutuya bağlamışlardır. Huni daha sonra (tüple göre 90 derecelik bir açıyla) bu kutuya zemin seviyesinde 0,5 m x 0,5 m'lik bir açıklıktan bağlanmıştır. Petek desenli bir alüminyum alaşımlı akış düzenleyici kutudan yaklaşık 4 m uzağa yerleştirilmiştir. Böylece fanın oluşturduğu girdap hızı kutuda ve 8 m uzunluğundaki hunide eşitlenmiştir. Tünelin çıkış kısmı ise tamamen açıktır. D, E, F ve G konumlarına termal çiftler yerleştirilerek sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Farklı havalandırma hızları, şaft yüksekliği , farklı yangın kaynağı boyutları ve yangın yükleri kombinasyonlarını kullanarak 36 farklı deney yapmışlardır. Ek-1'de tüm deney değerleri verilmiştir.

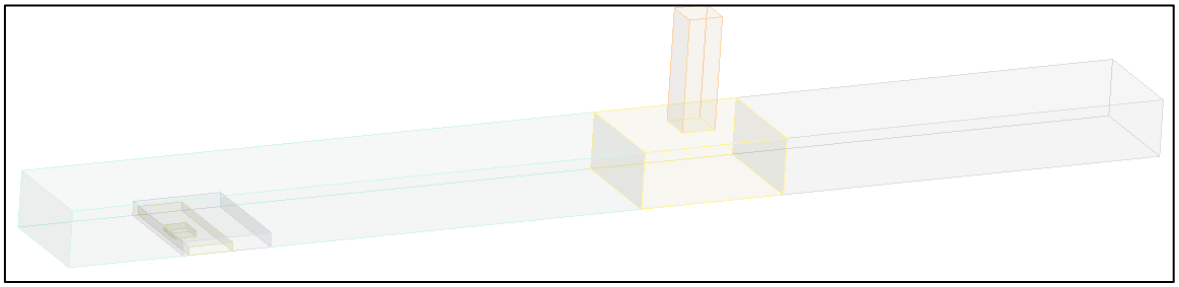
Ek-1'de gösterilen 29 numaralı test verileri kullanılarak elde edilen değerlere göre tavandan 0,1 m aşağıdaki sıcaklık dağılımı Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Deneysel verilere göre tünel boyunca tavandan 0,1 m aşağıdaki sıcaklık değerleri (Ingason ve Seco, 2005)

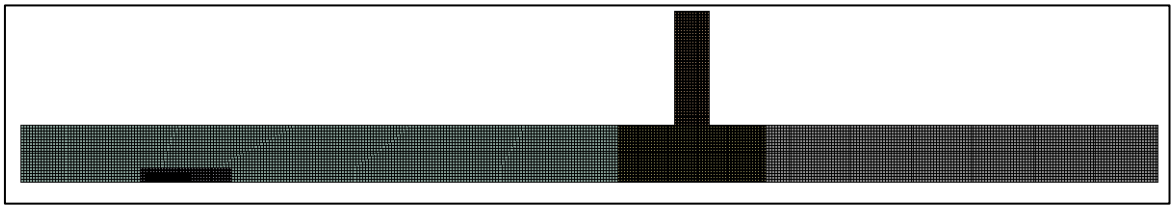
Maksimumum tavan sıcaklığı değerinin 160 °C'ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık değeri, ateşin merkezinden belli bir miktarda kaydığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, alev ucunun akış yönünde eğen boylamasına havalandırmadır. Ateş ve şaft arasındaki sıcaklığın nispeten yavaş düştüğü gözlemlenirken tünel çıkışına doğru sıcaklık hızlı bir şekilde düşmüştür.

H. Ingason ve F. Seco (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmanın simülasyon çalışmalarını yapabilmek için deney sonuçları açıkça verilen 29 numaralı test değerleri kullanılmıştır. Tünel yangın bölgesi, yangın çevresi (2 farklı blok) ve baca olmak üzere 4 bloğa ayrılmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. Çözüm hacmi blokları

Yangın bölgesi ve baca etrafında daha fazla çözüm ağı kullanarak Şekil 7.4'de gösterilen hexagonal yapıdaki çözüm ağı oluşturulmuştur. 917 711 adet eleman kullanılmıştır.



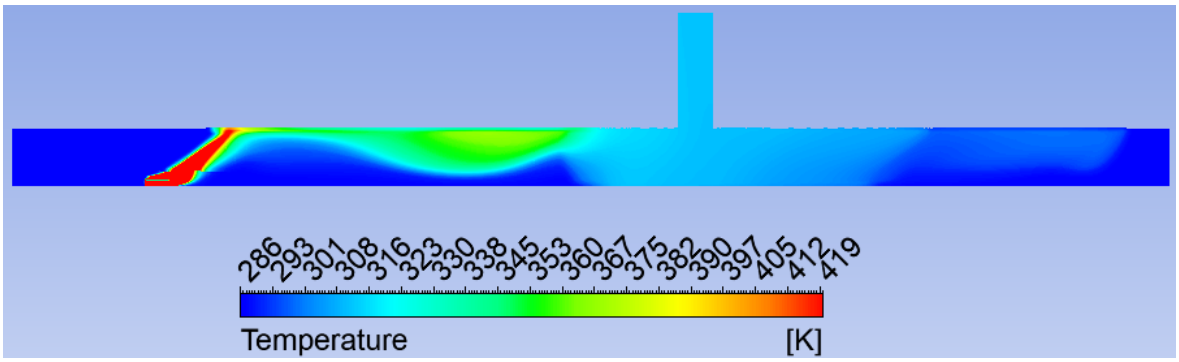
Şekil 7.4. Tünel hacmindeki çözüm ağı dağılımı

Simülasyondaki sınır şartları değerleri deneysel veriler kullanılarak oluşturulmuştur (Çizelge 7.1). Simülasyonlarda standart k-ε türbülans modeli ve standart duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Çözümlerde ise SIMPLE algoritması kullanılmıştır.

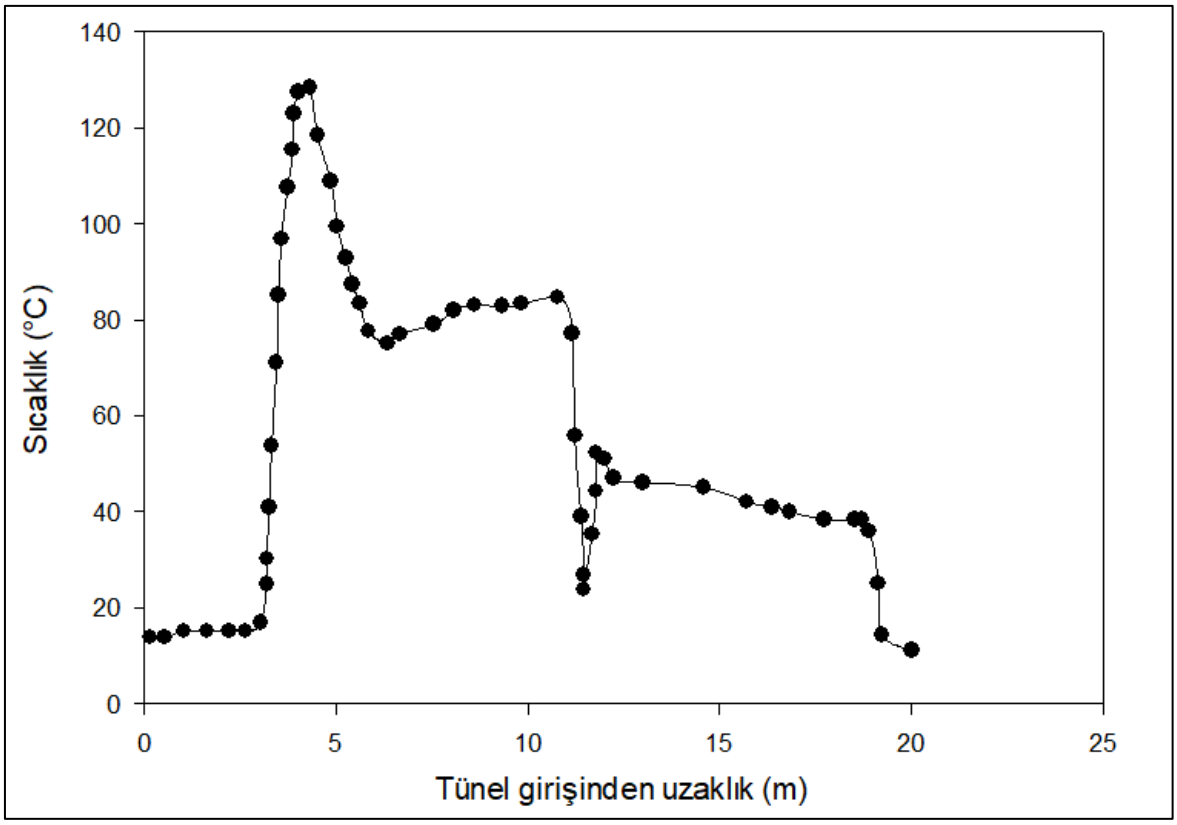
Çizelge 7.1. Sınır şartları

Sınır Şartları	Ölçekli Model
Birim zamandaki ısı salınımı oranı	59,64 kW
Akışkan sıcaklığı	286 K
Kritik havalandırma hızı	1 m/s
Kerosen kütlesi	1,51 g/s
Şaft debisi	2,7 m^3/s
Gösterge basıncı	0 Pa
Zaman	Zamandan bağımsız (Steady)

Deneysel çalışmaları Ingason ve Seco (2005) tarafından yapılmış çalışmanın simülasyonu incelendiğinde tünel içerisindeki sıcaklık dağılımın Şekil 7.5'deki gibi olduğu görülmektedir. Baca altındaki sıcaklık değerinin düştük değerlerde olduğu görülmektedir. Sıcak gazlar tünel içerisinde beklemeden baca etkisiyle terk etmektedir. Tünel içerisindeki duman dağılımı, deneylerde de gözlemlenen duman dağılımına büyük ölçüde benzerdir.



Şekil 7.5. Tünel merkezindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 7.6. Deneysel verilere göre tünel boyunca tavandan 0,1 m aşağıdaki sıcaklık değerleri (Ingason ve Seco, 2005)

Sayısal ve deneysel sonuçlar niteliksel olarak benzerdir ancak sonuçlarda bazı yerel farklılıklar vardır. Şekil 7.2 ve Şekil 7.6 incelendiğinde sonuçların benzer olduğu görülmektedir. Şekil 7.2'de tünel giriş portalına yakın kısımlardaki sıcaklık değerinin 60 °C değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer simülasyonlarda gözlemlenmemiştir. Bunun temel nedeni deneyde kullanılan termal çiftlerin yangın etkisiyle zamanla sıcaklığının artmasıdır. Bu etki simülasyonlarda gözlemlenmemiştir.

8. YANGIN TASARIMI

Yanma türbülanslı akış, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar, radyasyon ve diğer karmaşık olayları içeren önemli bir olaydır (Versteeg ve Malalasekara, 1995:343). Yanma karakteristiğinin incelenmesi son dönemlerde çeşitli bilgisayar programı aracılığıyla kolaylaşmıştır. Yanıcı madde, yakıcı madde ve sıcaklığın birleşmesiyle meydana gelen kontrolsüz yanma olayı yangın olarak adlandırılır. Yangın; tutuşma, büyüme, tam gelişme ve sönme olmak üzere dört evreden oluşur. Bir alev kaynağı etkisiyle ya da ortam sıcaklığının yükselmesiyle elde edilen enerji sonucu yanmanın başlama evresi tutuşma olayıdır. Büyüme evresinde ise ortamdaki oksijen miktarı, yanan malzemelerin özelliği ve yanma tipi gibi parametreler yangın gelişimini hızlı veya yavaş olarak etkileyebilir. Tam gelişme evresinde, ortamda bulunan tüm yanıcı malzemeler yanar. Yangının son evresi olan sönme evresinde ise yangının ısıl gücü yanan malzemelerin tükenmesiyle azalmaktadır. (KGM, 2016:274,275)

Yangın, özellikle kapalı hacimlerde meydana geldiğinde daha tahrip edici özelliğe sahiptir. Karayolu tünellerinde meydana gelebilecek yangınların etkisini en aza indirebilmek için yangın tasarımını yapılması gereklidir. Ayrıca havalandırma tasarımı ve yangın algılama tasarımının gerçekleştirilebilmesi için yangının ne kadar hızlı büyüyeceği, duman ve sıcaklığın yayılmasının nasıl olacağı bilinmesi gereklidir. Yangın tasarımı, birim zamandaki ısı salınımı oranı referans alınarak yapılmaktadır. Tünel yangınlarında can güvenliğini sağlamak için belli bir tasarım değeri bulunmaktadır. 1990 yılından itibaren Avrupa karayollarında yapılan çalışmalara bakıldığında farklı araç türlerinin oluşturabileceği yangın riskinin ve yangın boyutunun farklı olduğu görülmüştür (Çizelge 8.1). Bazı ülkeler tünele giren ağır yüklü ve tehlikeli araçların yangın çıkarması sonucunda oluşan etkileri göz önünde bulundurarak tasarım değer aralığını geniş tutmuştur. Yalnızca boylamasına havalandırma sistemi kullanan ülkelerde birim zamandaki ısı salınımı oranı daha yüksek değerde seçilmiştir. Boylamasına havalandırma sisteminin kullanıldığında birim zamandaki ısı salınımı oranının daha yüksek seçilmesinin nedeni bu havalandırma sisteminin daha yüksek ısı yayma oranlarında daha makul bir maliyet ortaya çıkarmasıdır. Enine havalandırma sistemi gibi diğer havalandırma sistemlerinin kullanılması durumunda ise tünel inşasında ve ekipman seçiminde daha fazla maliyet gerektirir (PIARC R01EN, 2017).

Çizelge 8.1. Farklı ülkelerde yangın boyutları (PIARC R01EN, 2017)

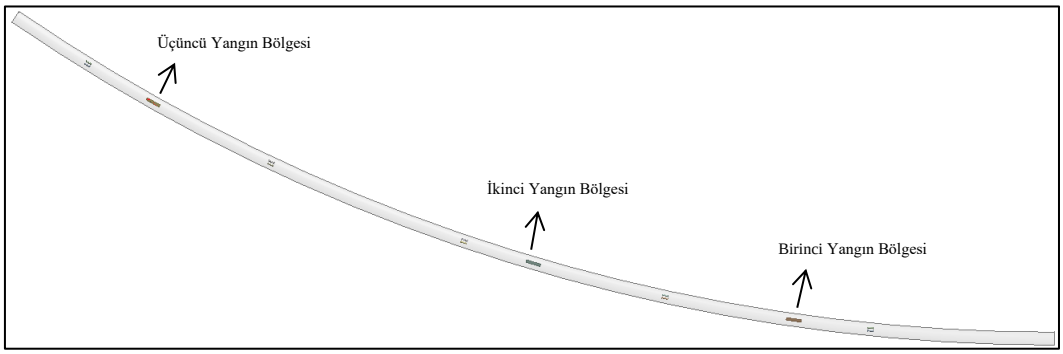
Ülke	Yangın Tasarımı(MW)	Notlar
Amerika	30-300	Tehlikeli madde taşınmasına izin verilirse 300 MW
Almanya	30-100	Tünel uzunluğu ve HGV'ye bağlı
Avusturya	30	Yüksek risk kategorisi:50 MW
Avustralya	50	Sadece havalandırma için
Fransa	30-200	200 MW, tehlikeli maddelerin taşınmasına izin verildiğinde ancak sadece boylamasına havalandırma kullanıldığında
Norveç	20-100	Risk sınıfına bağlı olarak genelikle boylamasına havalandırma
İngiltere	30-100	
İspanya	≥30	
İsveç	100	Boylamasına havalandırma
İsviçre	30	Duman tahliyesi 3,3-4 m/s
İtalya	20-200	
Japonya	30	
Hollanda	100-200	Tankerlere izin verilmemesi durumunda 100 MW, diğer durumlarda 200 MW
Portekiz	10-100	Trafik durumuna bağlı
Rusya	50-100	
Singapur	30-200	İzin verilen araç tipine bağlı olarak
Yunanistan	100	Boylamasına havalandırma

9. HAVALANDIRMA TASARIMINDA KULLANILAN VERİLER VE HESAPLAMALAR

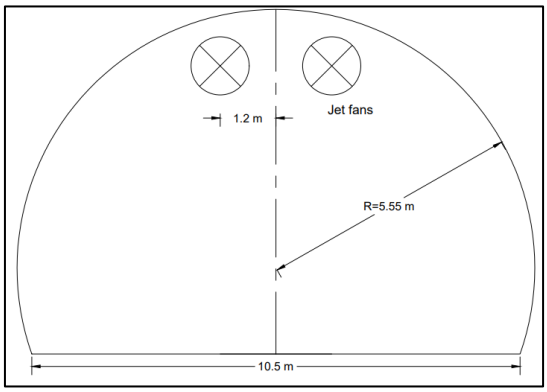
Bu çalışma kapsamında 1500 m uzluğunda, çift yönlü, eğimsiz ve virajlı bir D şeklinde kesite sahip tünelin (Şekil 9.2), sadece virajlı kısmının analizleri yapılmıştır. Tünelin 600 metrelik kısmı düz(virajsız), 900 metrelik kısmı ise 1500 metrelik yarıçapa sahiptir. Çalışmanın temel amacı 3 farklı konumda (Şekil 9.1) gerçekleşen yangının etkisini gözlemlemektir. Çizelge 9.1'de tünelin geometrik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 9.1. Tünel geometrik özellikleri

Tünel uzunluğu	1500 m
Tünel viraj yarıçapı	1500 m
Tünel eğimi	0
Tünel yüksekliği	7,4 m
Tünel genişliği	10,5 m
Tünel kesit alanı	68,9 m^2
Tünel hidrolik çapı	8,69 m
Tünel şerit sayısı	2



Şekil 9.1. Yangın bölgeleri (Tünel üst görünüş)



Şekil 9.2. Analizi yapılan tünelin kesiti

9.1. Yangın Yükü

Tünel tasarımı yapılırken tüneldeki havalandırma ekipmanlarının belirlenmesi ve acil durum kaçış planı oluşturabilme için öncesinde yangın yükünün belirlenmesi gerekir (PIARC R01EN, 2017). Yangın yükü, zamanın bir fonksiyonu olan birim zamandaki ısı salınımı oranı (Heat Release Rate, HRR) olarak ifade edilir (PIARC R01EN, 2017). Birim zamandaki ısı salınımı oranı tünel havalandırma sistemlerini tasarım parametrelerinin en önemli değişkenidir ve bu parametrenin bilinmesi sıcaklık, duman dağılımı gibi özellikler hakkında fikir sunar. Birim zamandaki ısı salınımı oranı yangının meydana neden olduğu yakıt cinsi, araç cinsi ve benzeri birçok nedene bağlı olarak değişmektedir. Tünellerde ise yangın seçimi tünelde geçine izin verilen araç türüne bağlıdır. Çizelge 9.2'de araç türüne göre maksimum birim zamandaki ısı salınımı oranını göstermektedir.

Çizelge 9.2. Araç türüne göre maksimum birim zamandaki ısı salınımı oranı (PIARC R01EN, 2017)

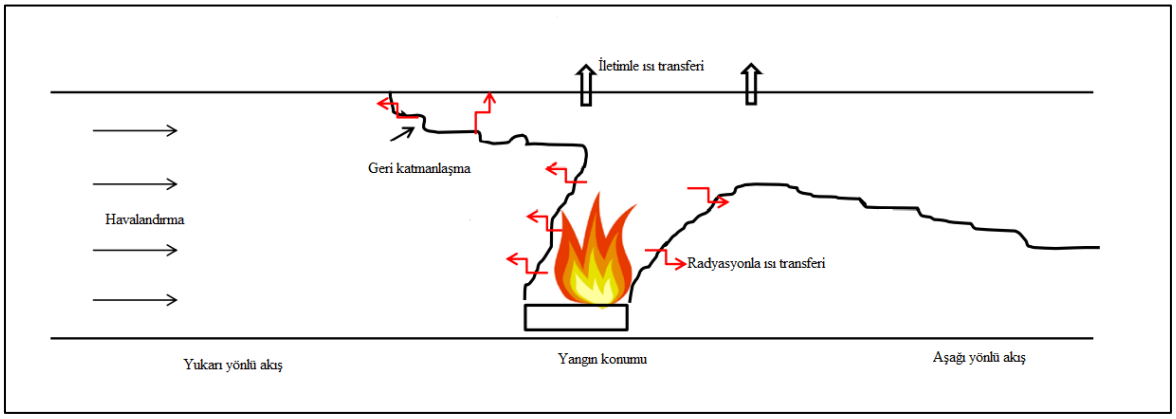
Araç türü	Maksimum birim zamandaki ısı salınımı oranı (MW)
Otomobil (PC)	5-10
Hafif ticari araç	15
Otobüs	20
Kamyon (25 tona kadar)	30-50
Ağır vasıta (25 ton ve 50 ton arasında)	70-150
Petrol tankerleri	200-300

Karayollarında meydana gelecek yangınların sonuçlarını öğrenebilmek için yapılan deney ve analiz çalışmalarında genellikle yangın gelişimin tek bir araçtan kaynaklandığı varsayılır. Bu çalışmada da yangının bir otobüste meydana geldiği ve birim zamandaki ısı salınımı oranının 20 MW değerinde olduğu kabulü yapılmıştır.

9.2. Kritik Hız ve Maksimum Duman Sıcaklığı Hesabı

Tünelde meydana gelen olası yangın durumlarında havalandırma hızı yeterli değilse, gelişen yangın dumanı boyuna havalandırmaya direnir. Boyuna havalandırmaya direnen duman kütlesi yukarı yönlü hareket eder ve geri katmanlaşmaya neden olur. Bu durum daha genel bir ifadeyle boyuna havalandırma hızının hesaplanan kritik hızdan daha düşük olmasıyla gerçekleşir. Kritik hız belirlenen değerinden az veya çok olmamalıdır. Dumanın

akış kontrolünü de sağlayan kritik hız kavramının tünel içerisindeki gösterimi Şekil 9.3'deki gibidir.



Şekil 9.3. Yangın esnasında tünel içerisindeki duman ilerleyişi

Kritik hız kavramı Çizelge 1.2'de belirtildiği gibi ülkelere göre değişiklik göstermektedir.

Tünelde geri katmanlaşmayı engelleyen kritik hız "Eş. 1.1" yardımıyla hesaplanmaktadır. "Eş. 1.1"'deki T_f değeri ;

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 c_p A V_c} + T_0 \tag{9.1}$$

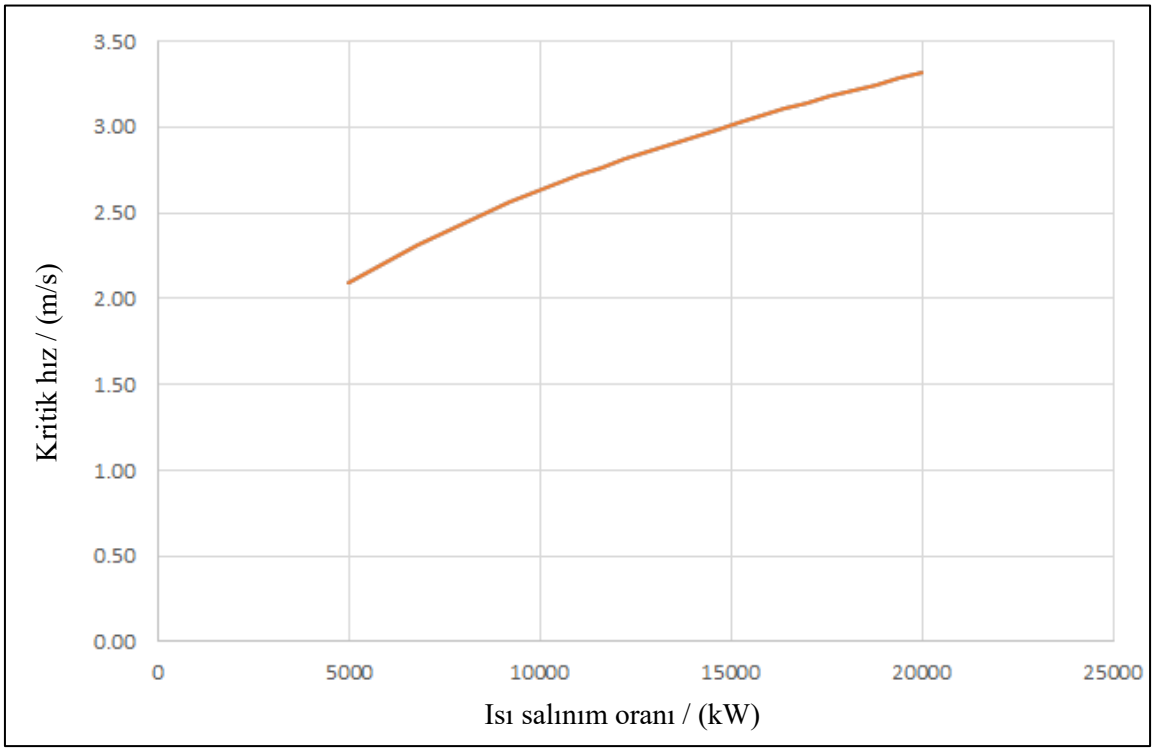
"Eş. 9.1" yardımıyla hesaplanır.

Kritik hız tünel kesit alanı, tünel yüksekliği, tünel eğimi, yoğunluk, ısıl yük ve ortam sıcaklığı gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Kritik hız hesaplanırken kullanılan değerler;

- Isı yayınım oranı 20 MW'dır.
- Tünelin bulunduğu ortamın yoğunluğu (ρ_0) 1,225 kg/m^3'dür.
- Tünel yüksekliği 7,4 m'dir.
- Tünel kesit alanı 68,9 m^2'dir.
- Tünelde eğim bulunmamaktadır.
- Tünelin bulunduğu ortam sıcaklığı 15 °C'dir.

Ulusal yangından koruma derneğinin (NFPA) 2020 yılında hazırlamış olduğu kritik hız hesaplama yazılımı kullanılarak kritik hız değeri 3,3 m/s bulunmuştur (Şekil 9.4).



Şekil 9.4. Kritik hız-birim zamandaki ısı salınımı oranı grafiği

Tünel yangınları hakkında yapılan deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında yangın kütlesini bilmek oldukça önemlidir. Özellikle HAD analizlerini daha da basitleştirmek için yakıtın tamamen yandığı kabulü yapılır. Yanma reaksiyonları genel ifadeyle yüksek oranda karbon (C) ve hidrojen içeren hidrokarbonların oksidasyonudur (Versteeg ve Malalasekara, 1995:343) Tam yanma reaksiyonlarında C atomlarının hepsi CO_2 bileşiğine dönüşürken, H atomları H_2O bileşiğine dönüşür. Yanma sonucu oluşan diğer yanıcı elementlerin ise O_2 ile birleştiği kabulü yapılır.

Tünel geometrisi, tünel kesit alanı gibi parametreler yangın gelişimini etkilediği gibi boyuna havalandırma da yangın gelişimini ve birim zamandaki ısı salınımı oranını etkiler (PIARC R01EN, 2017). Bu nedenle tüneller hakkında yapılmış çalışmalarda test sonuçları referans alınır. Benelux, EUREKA ve Runehamar test sonuçları en yaygın kullanılan testlerdir. Runehamar Test 1 sonucuna göre 3 m/s boyuna havalandırma hızının olduğu durumlarda yangının ortalama birim zamandaki ısı salınımı oranı 20,1 MW'dır (PIARC R01EN, 2017).

Tam yanma olayı için yakıtın havaya oranı, stokiyometrik hava/yakıt oranı ile hesaplanabilir. Havanın hacimce %79'unu N_2 oluşturduğu kabul edilirken, %21'lik kısmını ise O_2 oluşturur. Havada 1 mol O_2 için 3,76 mol N_2 vardır. Havanın moleküler ağırlığı 29 kg/kmol'dür. Kütlesel olarak ele alındığında %23,3'ü O_2, geriye kalan %76,7 ise N_2'dir.

Bu çalışmada yanıcı maddenin $C_{10}H_{22}$ (dekan) olduğu düşünülmüştür. Yanma denklemi;

$$C_{10}H_{22} + 15{,}5(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow 10\,CO_2 + 11H_2O + 15{,}5 \times 3{,}76N_2$$

Hava yakıt oranı "Eş.9.2" ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} = \frac{MW_{hava} \times O_2 \text{ mol sayısı} \times 1 \text{ mol } O_2 \text{ başına hava mol sayısı}}{MW_{yakıt} \times \text{yakıt mol sayısı}} \tag{9.2}$$

$\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}}$=15,07 kg hava/ kg yakıt olarak bulunur.

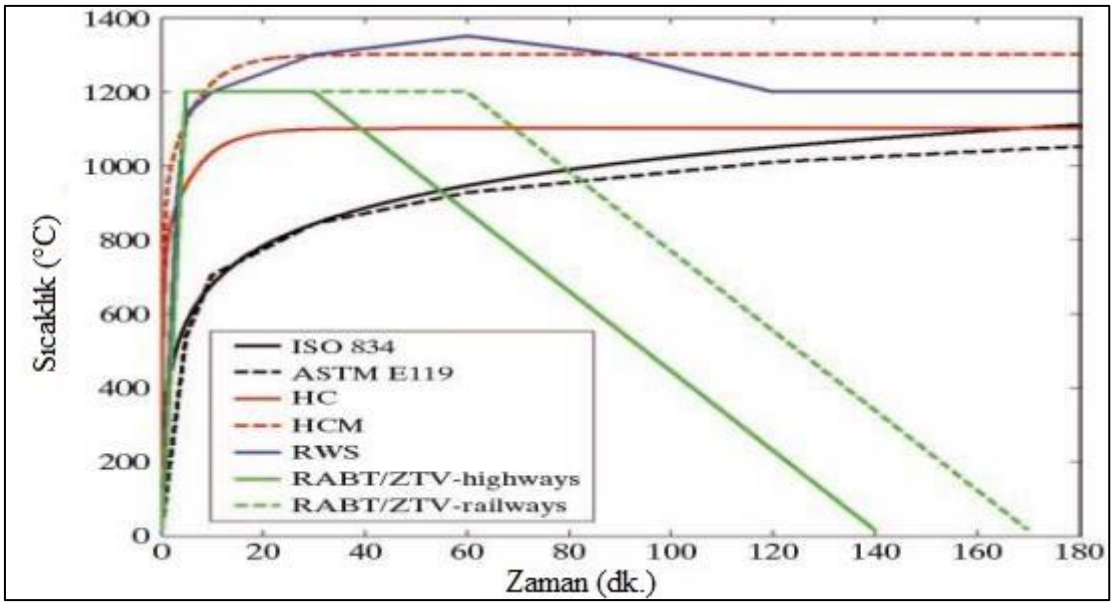
Yangın sırasında etrafa dağılan dumanın kütlesel debisi yanan maddenin miktarı ve tüketilen hava miktarının toplamıdır.

$$\dot{m}_{gaz} = \dot{m}_{yakıt} + \dot{m}_{hava} \tag{9.3}$$

$\dot{m}_{gaz}$ =16,07 kg/s

Deneysel çalışmaların yapıldığı tam ölçekli testlerde yangın süresi 30-40 dakika arasında sürerken, gerçek kazalarda bu süre artar. Yanmanın ilk evresi tutuşmayla başlar, sürekli yayılan ateş büyür ve içerdeki oksijen miktarına bağlı olarak gelişir. En son evresinde ise yanıcı maddenin azalması ve oksijen seviyesinin alt seviyelere inmesiyle sönme evresine girer, böylece yangın sonlanır.

Tünel tasarımı yapılırken yangın olması durumunda her bir malzemenin ayrı ayrı ısısını hesaplamak yerine, ortalama bir yangın ısısı belirlemek amacıyla karakteristik sıcaklık-zaman eğrileri oluşturulmuştur (Fehérvári, 2008).



Şekil 9.5. Standartlaştırılmış yangın karakteristik eğrileri (Fehérvári, Characteristic of Tunnel Fires, 2008)

Şekil 9.5'deki grafikte farklı renkteki eğrilerle ifade edilen her bir çizgi çeşitli araştırmalar, yanıcı malzeme standartları, ulusal standartlar ve test sonuçlarına göre hazırlanmıştır (Fehérvári, 2008).

ISO Standard: Genellikle bina tasarımında kullanılır.

$$\delta T = 20 + 345\log(8t + 1) \tag{9.4}$$

Hidrokarbon: Hidrokarbonlar daha hızlı tutuştuğu için daha yüksek sıcaklıklara daha çabuk ulaşırlar. Bu nedenle ISO eğrisine göre eğri karakteristiği farklıdır.

$$\delta T = T_0 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.625e^{-2.5t}) \tag{9.5}$$

Modifiye (Değiştirilmiş) Hidrokarbon: Sıcak değerinin 1300 °C üzerine çıkabildiği eğridir. Özellikler karayolu yangınlarında referans alınan eğridir.

$$\delta T = T_0 + 1280(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.625e^{-2.5t}) \tag{9.6}$$

RABT-ZTV : Karakteristik eğri Almaya'da yapılmış büyük ölçekli testler sonucunda elde edilmiştir. Bu eğriler ifade etmek için denklem kullanılmazken kırılma noktaları referans alınır.

Bu çalışmada tünel tasarımlarında oldukça sık kullanılan modifiye hidrokarbon formülü ("Eş. 9.6") kullanılmıştır. Sıcaklığın en yüksek değere 4. dakika ulaştığı kabulü yapılmıştır. Tünelin ilk sıcaklığı 15 °C 'dir, böylece;

$\delta T = 15 + 1280(1 - 0.325e^{-0.167\times4} - 0.625e^{-2.5\times4}) = 1081{,}7$ ° C olarak bulunur.

9.3. Emisyon Miktarının Belirlenmesi

Tünelin dizayn yılı 2021'dir. 2021 yılında yayımlanan TÜİK raporuna göre ülkemiz genelinde 3 461 663 benzinli otomobil, 5 143 268 dizel araç bulunmaktadır. Bu rakamlar dikkate alındığında binek araçların yaklaşık %40'nın benzinli, %60'nın ise dizel araçtır. Hafif ticari araçlarda ve ağır yük taşıtlarında daha çok dizel yakıt kullanıldığı bilindiğinden hafif ticari araçlarının %30'u benzinli, %70'ı dizel , ağır yük araçlarının ise %100'nun dizel yakıt olduğu kabulü yapılmıştır (Çizelge 9.3).

Çizelge 9.3. Kullanılan yakıt türüne göre araç yüzdeleri

Yakıt	Binek Araç(PC)	Hafif TicariAraç(LCV)	Ağır Yük Taşıtları(HGV)
Benzin	%40	%30	-
Dizel	%60	%70	%100

Havalandırma hesaplarının yapılabilmesi için tünelin dizayn yılından en az 10 yıl sonrası referans alınmalıdır (PIARC R02EN, 2019). Tez kapsamında güvenli bölgede kalabilmek için 2035 yılı temel alınmıştır. KGM'nin yıllık ortalama trafik verilerine göre 2035 (Ek-2.) yılındaki araç sayıları hesaplamalarda temel alınmıştır. Günlük ortalama trafik yoğunluğunun %10'u pik trafik yoğunluğunu oluşturur (PIARC R02EN, 2019). Çizelge 9.4'de 2035 yılına ait araç/saat sayısı ve araç yüzdeleri verilmiştir.

Çizelge 9.4. 2035 yılına ait araç/saat sayısı ve araç yüzdeleri

Yakıt	Binek araç (PC)	Hafif ticari araç(LCV)	Ağır yük aracı(HGV)
Benzin	484 araç/saat	14 araç/saat	-
Dizel	726 araç/saat	32 araç/saat	264 araç/saat

Çizelge 9.4'deki araç türlerine ve yakıta göre araç yüzdesi a_{cat};

Benzili binek araç oranı: 0,32

Dizel binek araç oranı :0,48

Benzinli hafif ticari araç oranı:0,01

Dizel hafif ticari araç oranı :0,02

Dizel ağır yük aracı oranı:0,17 olarak hesaplanır.

Tünelin bir şeridindeki araç sayısı "Eş. 5.4" yardımıyla hesaplanmaktadır. Tünel içerisindeki havalandırma tasarımı yapılırken trafiğin durağan olduğu durum ya da trafik hızının 10 km/h olduğu duruma göre hesaplamalar yapılır.

$$n_{PC,benzin}=\frac{1520\ \text{araç/sa}}{10\ \text{km/sa}} \times 1{,}5\ \text{km} \times 0{,}32 = 72{,}96\ \text{araç}$$

$$n_{PC,dizel}=\frac{1520\ \text{araç/sa}}{10\ \text{km/sa}} \times 1{,}5\ \text{km} \times 0{,}48= 109{,}44\ \text{araç}$$

$$n_{LCV,benzin}=\frac{1520\ \text{araç/sa}}{10\ \text{km/sa}} \times 1{,}5\ \text{km} \times 0{,}01= 2{,}28\ \text{araç}$$

$$n_{lcv,benzin}=\frac{1520\ \text{araç/sa}}{10\ \text{km/sa}} \times 1{,}5\ \text{km} \times 0{,}02=4{,}56\ \text{araç}$$

$$n_{HGV,benzin}=\frac{1520\ \text{araç/sa}}{10\ \text{km/sa}} \times 1{,}5\ \text{km} \times 0{,}17=38{,}76\ \text{araç}$$

"Eş. 5.1"'deki G_{tun} taşıtlardan kaynaklanan toplam emisyon oranının şerit sayısıyla çarpılmasıyla elde edilir.

$$G_{sec} = \sum_{i=1}^{N_{cat}} g_{fac,i} \times n_{veh,i} \qquad (9.7)$$

G_{sec}= Bir şeritteki toplam emisyon miktarı

$n_{veh,i}$= araç sayısı

$$G_{tun}=\sum_{i=1}^{N_{lane}} \sum_{j=1}^{N_{sec}} G_{sec,j} \qquad (9.8)$$

G_{tun}= Toplam emisyon miktarı

N_{lane}= Toplam şerit sayısı

9.3.1. CO hesapları

Gelişen sanayi sektörünün getirdiği kontrolsüz baca gazları ve atıklar, enerji talebinin ivmelenmesi ve artan araç kullanımına bağlı egzoz gazı etkisi karbon emisyonlarının da artmasında sebep olmuştur. Tünel içerisinde de araçların bıraktığı egzoz gazları ve yangın bir karbon emisyonu olan CO miktarını artırır.

CO emisyon oranı faktörünü hesaplamayabilmek için "Eş. 5.5" kullanılır. Binek araçlar için zaman faktörü Çizelge 5.16, kütle faktörü Çizelge 5.19 ve yükseklik faktörü Çizelge 5.20 kullanılarak elde edilir. Benzinli binek araçlar için emisyon oranı Çizelge 5.1 yardımıyla 11 g/h olarak bulunurken, dizel binek araçlar içinse Çizelge 5.4 kullanılarak 1,3 g/h bulunur. Ticari araçlar için zaman faktörü Çizelge 5.17 ve yükseklik faktörü için Çizelge 5.20 kullanılır. Benzinli ticari araçlar için emisyon oranı Çizelge 5.7. kullanılarak bulunurken, dizel ticari araçlar için ise Çizelge 5.10 kullanılarak bulunur. Ağır yüklü taşıtlar için ise kütle faktörü Çizelge 5.19 ve zaman faktörü için Çizelge 5.18 kullanılır. Ağrı yüklü taşıtlar için emisyon oranı Çizelge 5.13 yardımıyla bulunmaktadır.

Çizelge 9.5. Binek araçlar için emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Benzin	11 g/h	0,71	-	1	-	7,81g/h
Dizel	1,3 g/h	0,74	-	1	-	0,962g/h

Çizelge 9.6. Hafif ticari araçlar içim emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Benzin	45,5 g/h	0,49	-	-	-	22,3g/h
Dizel	1,5 g/h	0,26	-	-	-	0,39g/h

Çizelge 9.7. Ağır yüklü araçlar emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Dizel	21	0,72	1	-	-	15,12g/h

Tüneldeki toplam CO emisyon oranı "Eş. 9.1" ve "Eş. 9.2" yardımıyla bulunur.

G_{sec}=7,81×72,96+0,962×109,44+22,3×2,28+0,39×4,56+15,12×38,76=1313,8 g/h

G_{tun}= 2×1313,8 =2627,52 g/h

"Eş. 5.1" yardımıyla CO emisyonunu ortamdan uzaklaştıracak taze hava miktarı bulunur. "Eş.5.1"'deki $C_{adm} - C_{amb}$ değeri 0,084 g/m³'dur.

$M^* = \frac{2627{,}52\ g/h}{0{,}084\ g/m^3}$ = 3180 m³/h = 8,7 m³/s

9.3.2. NO_x hesapları

Fosil kökenli yakıtların yanması sonucunda atmosfere yayılan önemli azot oksit bileşikleri azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) olarak bilinmektedir. NO_x emisyonlarının az bir kısmını azot dioksitler oluştururken, büyük kısmını da azot monoksiteler oluşturur. Azot monoksitler oksijen ile tepkimeye girerek ozon tabakasına zarar verir (Aytaç ve İlkılıç, 2019) .

NO_x emisyon oranı faktörünü hesaplamayabilmek için "Eş. 5.5" kullanılır. Binek araçlar için zaman faktörü Çizelge 5.16, kütle faktörü Çizelge 5.19 ve yükseklik faktörü Çizelge 5.20 kullanılarak elde edilir. Benzinli binek araçlar için emisyon oranı Çizelge 5.2 kullanılarak bulunurken, dizel binek araçlar için Çizelge 5.5 kullanılır. Ticari araçlar için zaman faktörü Çizelge 5.17 ve yükseklik faktörü için Çizelge 5.20 kullanılır. Emisyon oranını bulmak amacıyla benzinli ticari araçlar için Çizelge 5.8 kullanılırken, dizel ticari araçlar için Çizelge 5.11 kullanılmaktadır. Ağır yüklü taşıtlar için ise kütle faktörü Çizelge 5.19 ve zaman faktörü için Çizelge 5.18 kullanılır. Ağrı yüklü taşıtlar için emisyon oranı Çizelge 5.14 yardımıyla bulunmaktadır.

Çizelge 9.8. Binek araçlar için emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Benzin	1,8 g/h	0,5	-	1	-	0,9 g/h
Dizel	12,2 g/h	0,32	-	1	-	3,9 /h

Çizelge 9.9. Hafif ticari araçlar içim emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Benzin	3,4 g/h	0,2	-	-	-	0,68 g/h
Dizel	9 g/h	0,34	-	-	-	3,07/h

Çizelge 9.10. Ağır yüklü araçlar emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Dizel	86,5	0,22	1	-	-	19,03g/h

Tüneldeki toplam NO_x emisyon oranı "Eş. 9.1" ve "Eş.9.2" yardımıyla bulunur.

G_{sec}=0,9×72,96+3,9×109,44+0,68×2,28+3,07×4,56+19,03×38,76=1246,03 g/h

G_{tun}= 2×1246,03 =2492,06 g/h

"Eş. 5. "1 yardımıyla NO_x emisyonunu ortamdan uzaklaştıracak taze hava miktarı bulunur. "Eş. 5.1"'deki $C_{adm} - C_{amb}$ değeri 0,0019 g/m³'dur.

$M^* = \frac{2627{,}52\ g/h}{0{,}0019\ g/m^3}$ = 1311604,8 m³/h = 364,34 m^3/s

NO_x emisyonlarının %40'nı NO_2 emisyonunun oluşturduğu kabul edilirse;

M^*=145,73 m^3/s olarak bulunur.

9.3.3. Partikül madde hesapları

Çizelge 9.11. Binek araçlar için emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Benzin	0,1m^2/h	0,93	-	1	0,7	0,79 m^2/h
Dizel	1,5m^2/h	0,33	-	1	0,7	1,2m^2/h

Çizelge 9.12. Hafif ticari araçlar içim emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Benzin	0,1m^2/h	0,79	-	-	0,7	0,78m^2/h
Dizel	2,6m^2/h	0,21	-	-	0,7	1,25m^2/h

Çizelge 9.13. Ağır yüklü araçlar emisyon faktörleri

Yakıt Türü	g_{cat}	f_t	f_m	f_h	g_{non-ex}	g_{fac}
Dizel	6,3m^2/h	0,91	1	-	4,4	10,13m^2/h

Partikül madde miktarını hesaplamayabilmek için "Eş. 5.5" kullanılır. Benzinli binek araçlar için partikül madde miktarı Çizelge 5.3 yardımıyla bulunur. Dizel binek araçlar için ise emisyon oranı Çizelge 5.6 yardımıyla bulunur. Binek araçlar için zaman faktörü Çizelge 5.16, kütle faktörü Çizelge 5.19 ve yükseklik faktörü Çizelge 5.20 kullanılarak elde edilir. Emisyon oranı benzinli ticari araçlar için Çizelge 5.9 ile bulunurken, dizel ticari araçlar için Çizelge 5.12 ile bulunur. Ticari araçlar için zaman faktörü Çizelge 5.17 ve yükseklik faktörü için Çizelge 5.20 kullanılır. Ağır yüklü taşıtlar için ise kütle faktörü Çizelge 5.19 ve zaman faktörü için Çizelge 5.18 kullanılır. Ağır yüklü taşıtlar için partikül emisyon oranı Çizelge 5.15 ile bulunmaktadır.

G_{sec}=0,79×72,96+1,2×109,44+0,78×2,28+1,246×4,56+10,13×38,76=588,85 g/h

G_{tun}= 2×588,85 =1177,7 m^2/h

Eş. 5.1'deki $K_{adm} - K_{amb}$ değeri 0,007 1/m'dir.

$M^* = \frac{1177{,}7\ m^2/h}{0{,}007\ 1/m} = 168243{,}15\ m^3/h = 46{,}73\ m^3/s$

Tasarımı yapılacak tünelde taze hava gereksinimin belirlenebilmesi için öncelikle kapalı hacim içerisinde ne kadar emisyon birikeceğini belirlemek gerekmektedir. Emisyon miktarları belirlenirken CO, NO_X ve partikül madde miktarı referans alınır (PIARC R02EN, 2019). Bölüm 9.1, 9.2 ve 9.3'de yapılmış olan emisyon madde miktarları hesaplarına göre en yüksek emisyon madde miktarı NO_2 bileşiğine ait çıkmıştır. Jet fan seçimi yapılırken en yüksek emisyon madde miktarı dikkate alınır ve jet fan debisinin içerideki emisyonu tahliye etmesi beklenir (PIARC R02EN, 2019).

9.4. Jet Fan Seçimi İçin Basınç Hesabı

Yeraltı otoparkları, tüneller ve otopark gibi alanlarda kullanılan jet fanlar, önündeki hava kütlesini itecek yüksek momentuma sahip olmaları nedeniyle kapalı hacimlerde havalandırma amacıyla kullanılmaktadırlar. Havalandırma amacının yanı sıra herhangi bir

yangın anında oluşan dumanın tahliye edilmesine yardımcı olurlar ve ortamdaki zehirli gazların temiz hava ile seyreltilmesini sağlarlar.

Kapalı hacimlerde kullanılan jet fanlar 2 saat boyunca yaklaşık 200 °C sıcaklığa dayanacak şekilde tasarlanmaktırlar. Tünellerde boyutsal farklılıklar olduğu için günümüzde 400 °C sıcaklığa kadar dayanabilme direncine sahip jet fanların kullanımı da yaygınlaşmıştır (PIARC R01EN, 2017).

Jet fanlar genellikle tünel tavanına yakın yerlere monte edilir. Jet fandan kaynaklanan hava akışı, jet fan tavan duvarına yakın olduğu için tünel yüzeyine yapışır. Bu etki Coanda etkisiyle açıklanabilir (Chen, Zhou, Lu, Li, Xu ve Wang, 2021). Coanda etkisiyle duvardaki kesme kuvvetleri artar, bu durum jet fanlardaki itme kuvvetinde azalmaya neden olarak momentumu azaltır. Jet fandan ayrılan yüksek momentuma sahip akış tünel boyunca azalır ve basıncı en yüksek seviyeye getirene kadar tüm momentum aktarılır. Daha geniş bir ifadeyle jet fanların temel amacı tünel içerisinde meydana gelen basınç düşüşünü engelleyecek itme kuvveti oluşturmaktır.

Tünel içerisindeki toplam basınç kaybı "Eş.9.9" ile hesaplanır.

$$\sum \Delta p = \Delta p_{veh} + \Delta p_{tu} + \Delta p_{mt} + \Delta p_{th} + \Delta p_{fire} + \Delta p_{ch} \tag{9.9}$$

Δp_{veh} = Durgun haldeki araçların kaynaklanan basınç kaybı

Δp_{tu} =Tünel giriş, çıkışlarındaki ve duvar sürtünmeden kaynaklı basınç kaybı

Δp_{mt} =Meteorolojik etkilerden kaynaklanan basınç kaybı

Δp_{th} =Termal etkilerden kaynaklanan basınç kaybı

Δp_{fire} =Yangının neden olduğu basınç kaybı

Δp_{ch} =Eğimli tünellerde bacaların neden olduğu basınç kaybı

Durgun haldeki araçların neden olduğu basınç kaybı yalnızca yangının aşağı yönlü akışında durgun halde trafik olduğu durumlarda hesaba katılmaktadır. Fakat emisyon seçimi yapılırken tünel içerisindeki tüm araçlara göre hesaplama yapıldığı için jet fan seçimi yapabilmek amacıyla bu etki dikkate alınmıştır.

Otomobil için (PC);

$$\Delta p_{PC} = C_D \times \frac{A_{PC}}{A_{tu}} \times \frac{\rho}{2} \times (V_{cr})^2 \times N \times L \tag{9.10}$$

Aracın sürüklenme katsayısı (C_D) 0,3'dür (Hassan, Islam, Ali ve Islam, 2014). Hesaplamaları kolaylaştırmak için araç kesit alanı 2 m^2 olarak alınmıştır.

$$\Delta p_{PC} = 0{,}3 \times \frac{2}{68{,}9} \times \frac{1{,}225}{2} \times 3{,}3^2 \times 182 \times 1{,}5$$

$$\Delta p_{PC} = 15{,}9 \text{ Pa}$$

Hafif ticari araçlar (LCV) için;

$$\Delta p_{LCV} = C_D \times \frac{A_{LCV}}{A_{tu}} \times \frac{\rho}{2} \times (V_{cr})^2 \times N \times L \tag{9.11}$$

Aracın sürüklenme katsayısı (C_D) 0,4'dür (Chowdhury, Juwono, Zaid, Islam, Loganathan ve Alam, 2019). Hesaplamaları kolaylaştırmak için araç kesit alanı 3 m^2 olarak alınmıştır.

$$\Delta p_{LCV} = 0{,}4 \times \frac{3}{68{,}9} \times \frac{1{,}225}{2} \times 3{,}3^2 \times 6{,}84 \times 1{,}5$$

$$\Delta p_{LCV} = 1{,}2 \text{ Pa}$$

Ağır yük araçları (HGV) için;

$$\Delta p_{HGV} = C_D \times \frac{A_{HGV}}{A_{tu}} \times \frac{\rho}{2} \times (V_{cr})^2 \times N \times L \tag{9.12}$$

Aracın sürüklenme katsayısı (C_D) 0,7'dür (Chowdhury, Juwono, Zaid, Islam, Loganathan ve Alam, 2019). Hesaplamaları kolaylaştırmak için araç kesit alanı 7 m^2 olarak alınmıştır.

$$\Delta p_{LCV} = 0{,}7 \times \frac{7}{68{,}9} \times \frac{1{,}225}{2} \times 3{,}3^2 \times 38{,}76 \times 1{,}5$$

$$\Delta p_{LCV} = 27{,}6 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{veh} = \Delta p_{PC} + \Delta p_{LCV} + \Delta p_{HGV}$$

$$\Delta p_{veh} = 15{,}9 + 1{,}2 + 27{,}6$$

Δp_{veh}=44,7 Pa

Tünelin girişinde meydana gelen basınç kaybı tünelin giriş kesitindeki geometriye bağlı olarak değişmektedir. Tünele giren temiz hava çıkışa doğru ilerler. Bu ilerleme sırasında duvar sürtünmesini etkisiyle basınçta azalmalar meydana gelir. Tünel çıkışında da basınç kaybı gözlemlenir.

$$\Delta p_{tu} = \Delta p_g + \Delta p_ç + \Delta p_s \tag{9.13}$$

Tünel girişinde basınç kayıp katsayısı 0,4'dür (PIARC, 2007)

$$\Delta p_g = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times \zeta \tag{9.14}$$

$$\Delta p_g = \frac{1}{2} \times 1{,}225 \times 3{,}3^2 \times 0{,}4 = 2{,}67 \text{ Pa}$$

Tünel çıkışında basınç kayıp katsayısı 1'dir.

$$\Delta p_ç = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \tag{9.15}$$

$$\Delta p_ç = \frac{1}{2} \times 1{,}225 \times 3{,}3^2 \times 1 = 6{,}7 \text{ Pa}$$

Tünel duvarlarının sürtünme katsayı 0,02'dir (PIARC, 2007).

$$\Delta p_{wall} = \vartheta \times \frac{1}{D_h} \times \frac{1}{2} \times V^2 \tag{9.16}$$

$$\Delta p_{wall} = 0{,}02 \times \frac{1500}{8{,}69} \times \frac{1}{2} \times 3{,}3^2 = 23 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{tu} = 2{,}67 + 6{,}7 + 23 = 32{,}37 \text{ Pa}$$

Tünelin bulunduğu ortamın rüzgarlı olmasından kaynaklı basınç kayıpları ve tünel portalları arasındaki kot farkından kaynaklanan barometrik basınç kayıpları meteorolojik basınç kayıplarının temelini oluşturur. Bu çalışmada atmosferik basınç farkı 50 Pa kabul edilmiştir (PIARC, 2007). Ayrıca tünelin bulunduğu ortam rüzgarlı olarak kabul edilmişdir. Rüzgar hızı 10,8 m/s'dir. Rüzgarın neden olduğu basınç kaybı "Eş 9.17" yardımıyla hesaplanır.

$$\Delta p_{wind} = \frac{1}{2} \times \xi_{wind} \times \rho \times V_{wind} \quad (9.17)$$

ξ_{wind} değeri rüzgar faktördür ve değeri 1'dir (PIARC, 2007).

$$\Delta p_{wind} = \frac{1}{2} \times 1 \times 1{,}225 \times 10{,}8^2$$

$$\Delta p_{wind} = 71{,}44 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{atm} = 50 \text{ Pa}$$

Tünel içerisinde gerçekleşen yangın akışkan hızının artmasına neden olur. Artan akışkan hızıyla birlikte tünelde türbülans artar. Hızın artması basıncın düşmesine sebep olur. 30 MW'a kadar ısı yayabilen yangınlarda basınç kayıpları 10-20 Pa arasında değişmektedir. 200 MW'a ısı yayılımına sahip yangınlarda ise basınç kayıpları 40-100 Pa arasında değişmektedir. Bu çalışmada ısı yayınım oranı 20 MW olduğu için basınç düşüşü 10 Pa kabul edilmiştir.

$$\Delta p_{fire} = 10 \text{ Pa}$$

Tünel tasarımında baca bulunmamaktadır. Bu yüzden baca etkisi ihmal edilmiştir.

$$\sum \Delta p = 44{,}7 + 32{,}37 + 71{,}44 + 10 + 50 = 208{,}44 \text{ Pa}$$

Tünel içerisindeki basınç düşüşü 208,44 Pa bulunmuştur. Seçilecek olan jet fanın bu basıç düşüşünü yenebilecek itki gücüne sahip olması gerekir. Bu nedenle itme kuvveti 1662 N ve şaft gücü 51 kW olan jet fan tünel tasarımında kullanılmak üzere seçilmiştir.

Çizelge 9.14. Jet fan özellikleri

İtki kuvveti	1662 N
Şaft gücü	51 kW
İç çapı	1,25 m
Uzunluğu	4,71 m
Montaj verimi	0,9
Kurulum faktörü	0,6
Dayanabileceği maksimum sıcaklık	400 °C, 120 dakika
Akışkan çıkış hızı	34 m/s
Jet fan debisi	38,2 m^3/s

Tünel içerisinde kullanılacak jet fan sayısı "Eş. 9.18" ile hesaplanır.

$$F_{fan} \times \eta_i \times \eta_m \times n_{top} = \sum \Delta p \times A_{tu} \quad (9.18)$$

$$1662 \times 0{,}6 \times 0{,}9 \times n_{top} = 208{,}44 \times 68{,}9 \qquad n_{top} = 16$$

Tasarımı yapılan tünelde kullanılacak jet fan sayısı 16 çıkmıştır. Güvenli bölgede kalabilmek için jet fan sayısı 2 artırılmalıdır (MOSEN, 2017). Bu nedenle tünel içerisinde 18 adet jet fan kullanılmıştır. Mosen firmasını 2017 yılında yayımladıkları havalandırma hesaplarına göre jet fanlar arasındaki minimum yatay mesafe 87 m olmalıdır. Tünel havalandırmaları hakkında yapılan çalışmalar incelediğinde yatay mesafenin 300 metreye kadar ulaştığı görülmektedir (Yin, 2021). Bu çalışmada iki jet fan grubu arasındaki mesafe 170 m olarak belirlenmiştir.

10. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ METODUYLA HESAPLAMALAR

Bu çalışmada, sayısal çözüm yöntemlerini temel alan hesaplamalı akışkanlar dinamiği metoduyla çözüm yapan Ansys/FLUENT programı kullanılmıştır. Karmaşık problemlerin çözülmesinde oldukça geniş çözüm ağına sahip olan FLUENT programı yanma tepkimelerinin analizinde de başarılı sonuçlar verir.

10.1. Ölçek Modelin Belirlenmesi

Makine mühendisliği, inşaat mühendisliği ve kimya mühendisliği gibi pek çok mühendislik disiplininde ölçek model kullanılmaktadır. Büyük ölçekli modellerin analizlerde kullanılması çok çekirdekli işlemciler de dahil olmak üzere zorlayıcıdır (Liu, Wim, Eyerman, Akram ve Eeckhout, , 2021). Bu çalışmada 1/25 ölçekli Froude modeli kullanılmıştır. Tünel içerisinde meydana gelen yangınlarda dumanın tavana doğru yukarı yönlü hareketi, atalet kuvveti ve sıcaklık değişiminin neden olduğu yoğunluk değişime bağlı olarak gerçekleşen termal kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle gerçekleşir. Termal kaldırma kuvvetlerinin artışı katmanlaşmayı artırırken, atalet kuvvetlerindeki artış ise katmanlaşmanın azalmasına yardımcı olabilir (Poreh, Marshall ve Regev, 2008). Froude ölçek modeli "Eş. 10.1" ile ifade edilen Froude sayısının korunmasına ilkesine dayanmaktadır (Musto ve Rotondo, 2015). Thomas (1968) tarafından tanımlanan Froude ölçek modeli, yangın durumunda havalandırmanın etkisini iyi bir şekilde analiz ettiği için bu çalışmada tercih edilmiştir.

$$\mathrm{Fr}=\frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{kaldırma kuvveti}}=\frac{V^2}{gL} \tag{10.1}$$

Froude metoduna ölçeklendirilmiş hesaplama hacmiyle gerçek model arasında geometrik, kinematik ve dinamik açıdan benzerlik olmak zorundadır (Cascetta, Musto ve Rotondo, 2016). Bu çalışmada ölçek model λ ile sembolize edilmiştir ve küçültülmüş ölçeğin gerçek ölçeğe oranını ifade eder.

Çizelge 10.1. Froude ölçek faktörü

Fiziksel parametre	Ölçek Faktörü
Uzunluk (m)	λ
Alan(m/s)	λ^2
Kütle (kg)	λ^3
Yoğunluk (kg/m^3)	λ^0
Debi (kg/s)	$\lambda^{5/2}$
Birim zamandaki ısı salınımı oranı (kg/s)	$\lambda^{5/2}$
Sıcaklık (K)	λ
Basınç (N/m^2)	λ
Kuvvet (N)	λ^3
Hız (m/s)	$\lambda^{1/2}$
Zaman (s)	$\lambda^{1/2}$

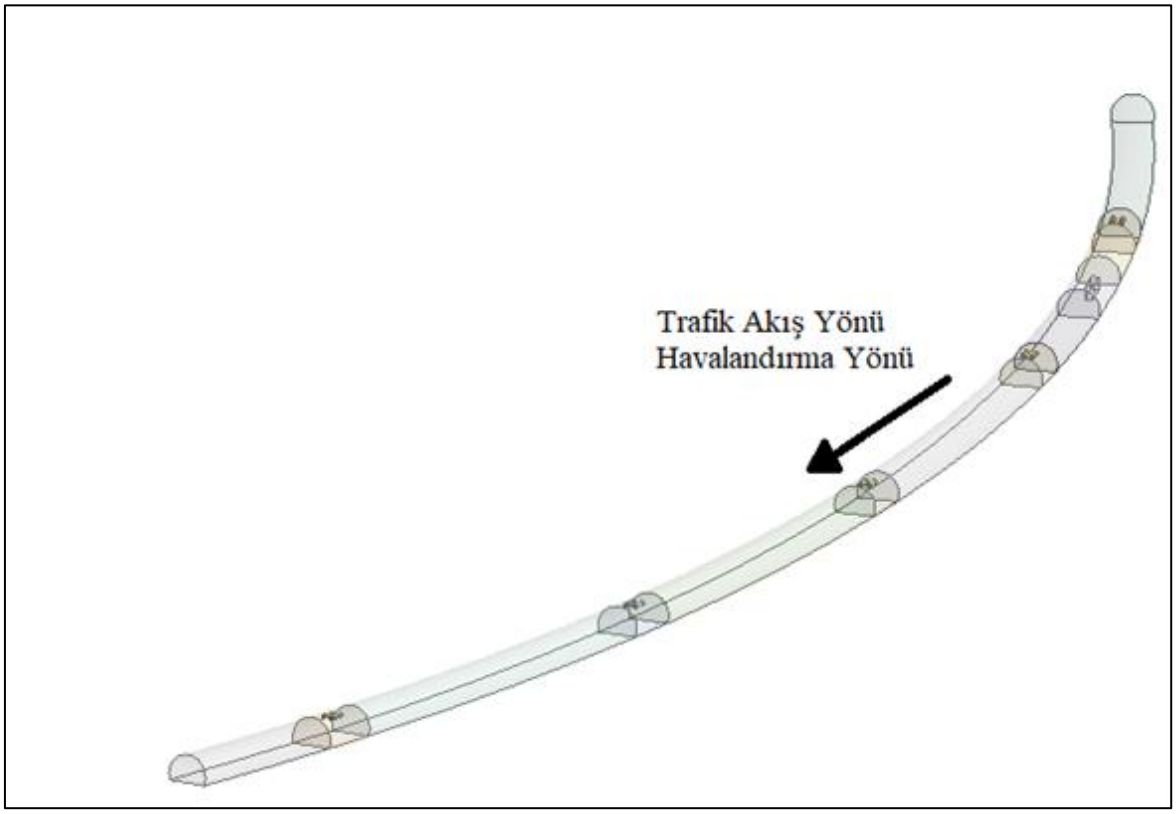
10.2. Sınır Şartları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle yapılan çalışmalarda doğru sonuçlar elde edebilmek için girilen sınır şartlarının gerek hesaplanan değerlere gerekse deneysel verilere uygun olması gerekmektedir. Bu çalışmada analizler zamana bağlı gerçekleştirilmiş olup, sınır şartları Çizelge 10.2'de liste halinde verilmiştir. Tünelin sadece virajlı kısmının analizleri yapılmış olup, yangının tünel girişinden ölçekli modele göre yatay mesafede 8,5 m; 17,3 m ve 29,5 m uzaklığındaki noktalarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.1). Yangının neden olduğu otobüs yangın kaynağı olarak tanımlanmıştır. Tünel içerisinde kullanılan jet fanlar ise momentum kaynağı olarak tanımlanmıştır. Tünel içerisindeki jet fanlar, giriş portalından başlayarak 1. jet fan grubu, 2. jet fan grubu, 3. jet fan grubu, 4. jet fan grubu ve 5. jet fan grubu olarak isimlendirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında jet fanlar aktif olarak çalıştırılırken, ikinci aşamasında jet fanlar etkisiz haldedir. Analizlerde Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Launder (1974) and Shih (1995) tarafından önerilen Realizable k-ε türbülans modeli uzun hesaplama süresi nedeniyle HAD analizi uygulamalarındaki en gerçekçi sonucu verir. Ayrıca jet fanlardan çıkan akışın yayılma hızını tahmin eden Realizable k-ε türbülans modeli akış dönüşü ve akış sapmaları hakkında en doğru sonucu verir (FLUENT Theory Guide, 2009).

Çizelge 10.2. 1/25 Ölçek modele göre sınır şartları

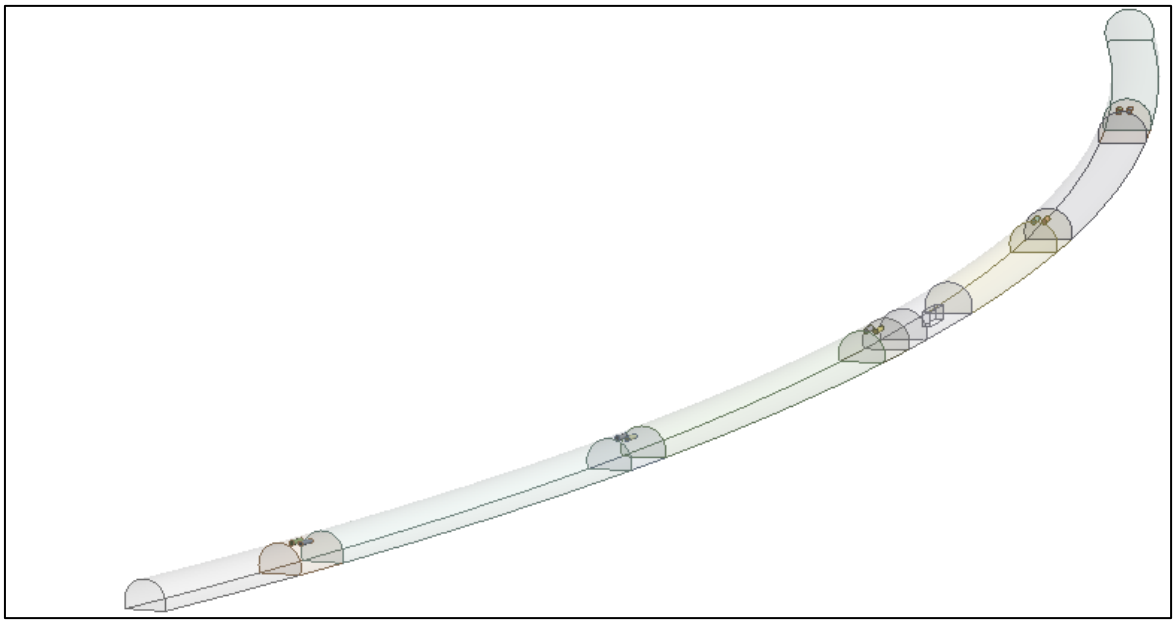
Sınır Şartları	Tam Ölçekli Model	1/25 Ölçekli Model
Isı yayınım oranı	20 MW	6,4 KW
Akışkan sıcaklığı	288 K	288 K
Kritik havalandırma hızı	3,3 m/s	0,66 m/s
Kütlesel debi	0,67 kg/ m^2s	0,2 kg/ m^2s
Basınç kaybı	75 Pa	3 Pa
Gösterge basıncı	0 Pa	0 Pa
Jet fan itki kuvveti	1662 N	0,107
Zaman	15 dakika	180 sn

10.3. Çözüm Ağı Sayısının Belirlenmesi ve Analizin Doğrulanması



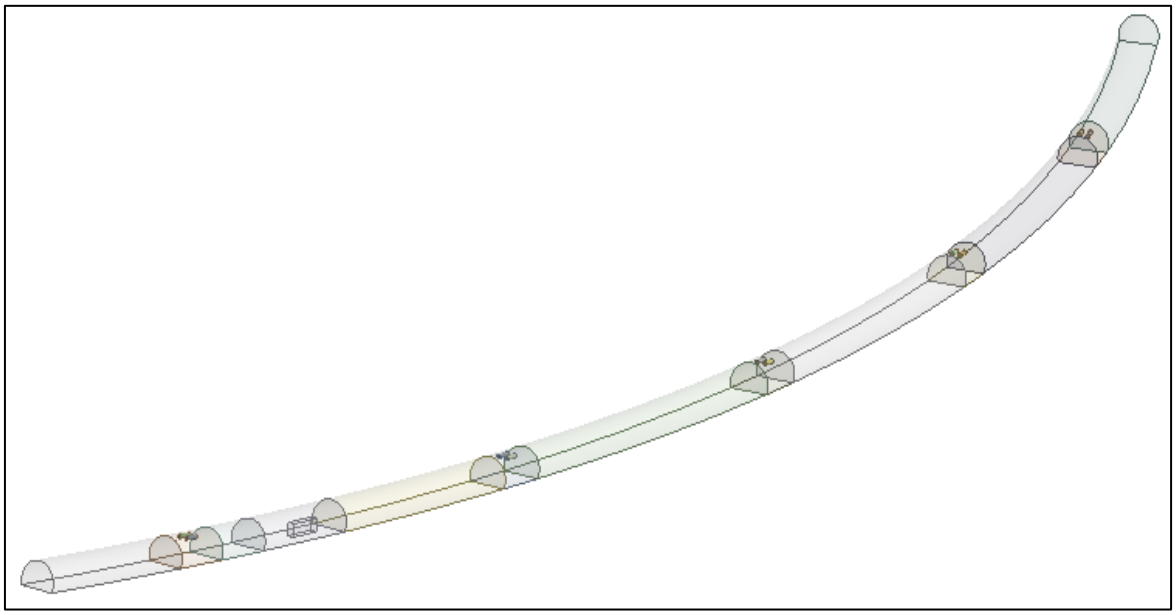
Şekil 10.1. Birinci çözüm hacmi

Birinci çözüm hacminde (Şekil 10.1) yangın kaynağı giriş portalından yatayda 8.5 m mesafe uzaklığına konumlandırılmıştır. 2. jet fan grubu ile 3. jet grubu aktif olarak çalışmaktadır.



Şekil 10.2. İkinci çözüm hacmi

İkinci çözüm hacminde (Şekil 10.2) yangın kaynağı giriş portalından yatayda 17.3 m mesafe uzaklığına konumlandırılmıştır. 2. jet fan grubu ile 4. jet grubu aktif olarak çalışmaktadır.



Şekil 10.3. Üçüncü çözüm hacmi

Üçüncü çözüm hacminde (Şekil 10.3) yangın kaynağı giriş portalından yatayda 29.5 m mesafe uzaklığına konumlandırılmıştır. 3. jet fan grubu ile 4. jet grubu aktif olarak çalışmaktadır.

Ansys/FLUENT programının sahip olduğu Design Modeler çizim programı yardımıyla çizilen tünel hacimleri Şekil 10.1, Şekil 10.2 ve Şekil 10.3'deki gibidir. Daha iyi sonuçlar alabilmek için tünel hacmi oldukça basit bir şekilde tasarlanmış olup, karmaşık geometrilerden uzak durulmuştur.

Çizelge 10.3. 1/25 Ölçeğe göre tünel, fan ve araç boyutları

Geometrik özellikler	Prototip Model	λ =1/25 ölçekli model
Hesabı yapılan tünel uzunluğu	900 m	36 m
Tünel yüksekliği	7,4 m	0,296 m
Tünel genişliği	10,5 m	0,42 m
Tünel duvar kalınlığı	0,4 m	0,016 m
Tünel kesit alanı	68,9 m^2	0,11 m^2
Tünel hidrolik çapı	8,7 m	0,348 m
Şerit sayısı	2	2
Otobüs boyutları(w× l × h)	2 m ×12 m ×3,5 m	0,08m ×0,48 m×0,14 m
Jet fan uzunluğu	4,7 m	0,188 m
Jet fan çapı	1,25 m	0,05 m
Jet fan kesit alanı	1,23 m^2	0,002 m^2
Jet akış hızı	34 m/s	6,8 m/s

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği metoduyla yapılan analizlerinde sıkça kullanılan hexagonal çözüm ağı (mesh) daha az hesaplama zamanı ve daha az depolama hafızası gerektirir. Hexagonal çözüm ağı, özellikle tünel içi yangın çalışmalarında araştırmacılar tarafından fazlasıyla tercih edilmesine rağmen karmaşık geometrili hacimlerde ağ örgüsünü düzgün bir şekilde hazırlamak zorlayıcı olabilir. Bazı karmaşık yapılı problemlerde hexagonal çözüm ağlarını kullanmak daha fazla ağ kullanımına sebep olabilir. Bu nedenlerden dolayı tetrahedral çözüm ağlarına ihtiyaç duyulur.

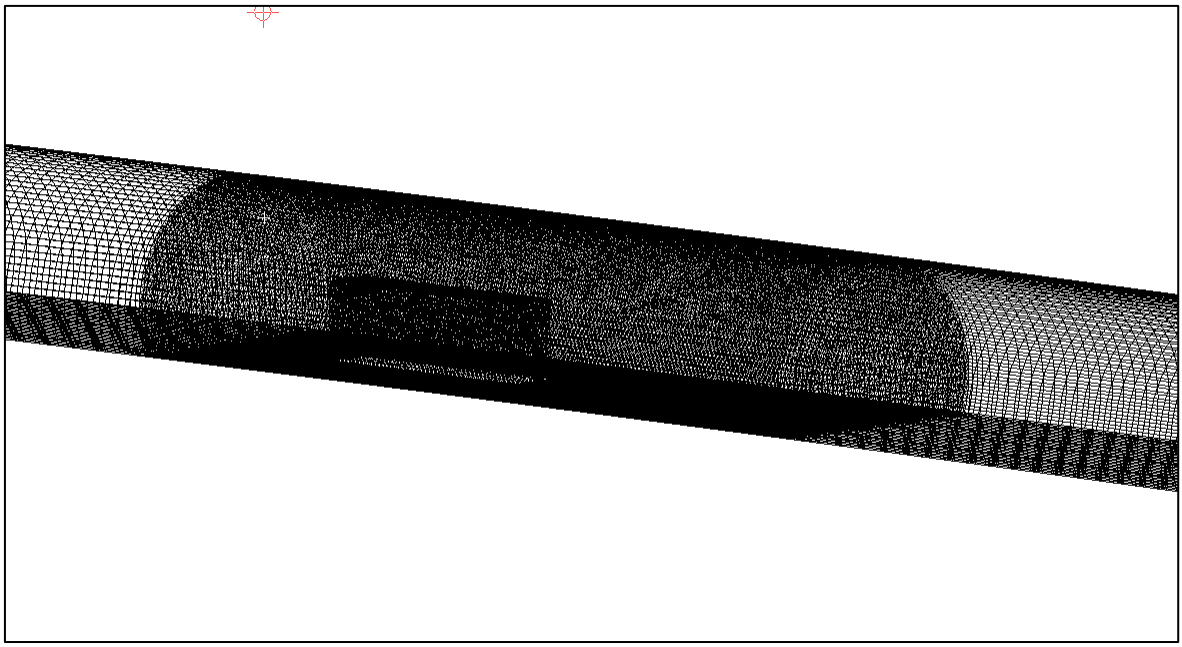
Bu çalışmada fanların yerleştirildiği bölgeler hesaplama hacminde karmaşıklığa sebep olmaktadır. Bu karmaşıklık çözüm ağı oluşturma da zorluğa neden olmaktadır. Çözüm ağını uygun bir biçimde oluşturmak amacıyla hesaplama hacmi jet fanlar, yangın bölgesi ve kalan hacimler için ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 10.4'de görüldüğü 3 farklı blok oluşturulmuştur. Tünel giriş, çıkış hacimleri ve arada kalan hacimler A blokları ile ifade edilmiştir ve bu hacimler aynı sayıda elemana sahiptir. Jet fanların aktif olarak çalıştığı hacimler B2 bloğuyla ifade edilmiş olup, çalışmayan hacimlerdeki jet fanlar ise B2 bloğula gösterilmiştir. Jet fanların aktif olduğu bölgelerde yüksek hıza sahip bölgelerdir ve ani hız değişimleri meydana gelir. Hız değişimi gradyan değişime neden olmaktadır. Gradyan

değişiminin olduğu hacimlerde değişimi yakalayabilmek için daha fazla eleman kullanılır, bu nedenle B2 bloğunda bulunan elaman sayısı B1 bloğundan fazladır. Yangının gerçekleştiği bölge ise C bloğuyla ifade edilmiştir. Türbülans olayının en yoğun olduğu bu bölge en fazla elemana sahiptir (Şekil 10.5). Çizelge 10.4'de kullanılan çözüm ağı türü ve sayısı liste halinde belirtilmiştir.

Şekil 10.4. Çözüm ağı bölgeleri

Çizelge 10.4. Çözüm ağı türü, boyutu ve eleman sayısı

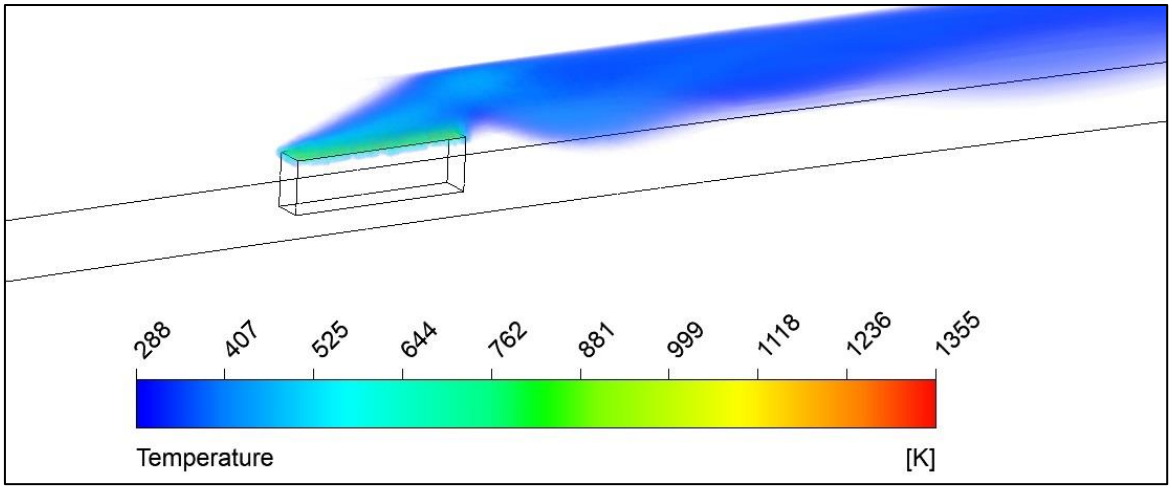
	Hacim	Çözüm ağı türü	Hücre boyutu	Eleman sayısı
Çözüm ağı 1	A	Hexahedral grid	0,06 m	340 734
	B1	Tetrahedral grid	0,06 m	
	B2	Tetrahedral grid	0,3 m	
	C	Tetrahedral grid	0,02 m	
Çözüm ağı 2	A	Hexahedral grid	0,035 m	810 000
	B1	Tetrahedral grid	0,035 m	
	B2	Tetrahedral grid	0,025 m	
	C	Tetrahedral grid	0,015 m	
Çözüm ağı 3	A	Hexahedral grid	0,03 m	2 401 933
	B1	Tetrahedral grid	0,03 m	
	B2	Tetrahedral grid	0,015 m	
	C	Tetrahedral grid	0,01 m	



Şekil 10.5. Yangın bölgesi etrafındaki çözüm ağı dağılımı

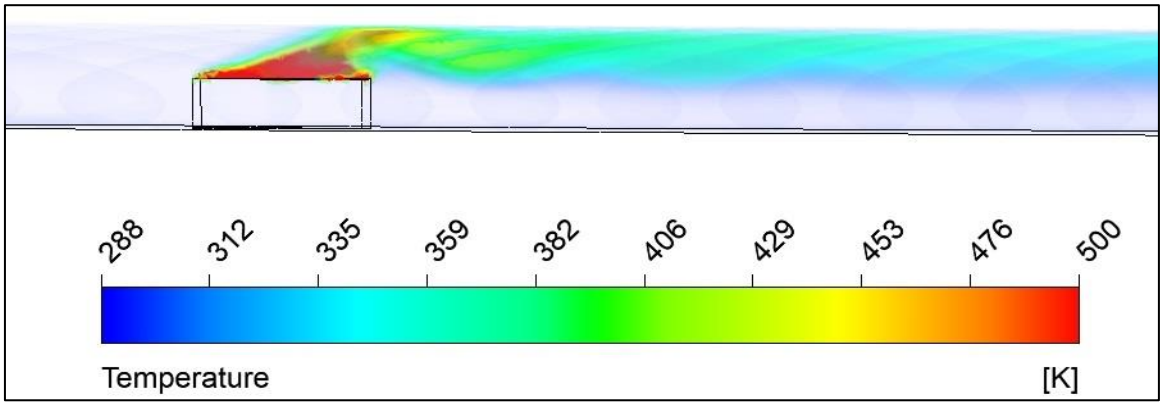
Çözüm ağından bağımsızlığı elde edebilmek için farklı sayılarda elemanlar kullanılarak 3 farklı analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları PIARC'ın 2007 yılında yayımlamış olduğu analitik formüllerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bölüm 9.3'de belirtilen basınç düşüşü hesabı PIARC raporu referans alınarak hazırlanmıştır. Bu hesaplama da tünelin girişinde yangının gerçekleştiği kabulü yapılmıştır. Tünel girişinden uzaklaştıkça basıncın azalması beklenmektedir. Bu çalışmada basınç düşüşünün 75 Pa kadar indiği görülmüştür. Bu değer nümerik yöntemleri temel alan analiz sonucuna göre yaklaşık 2,9 Pa (1/25 ölçek) karşılık gelmiştir. 1/25 ölçekli modele göre düşünüldüğünde elde edilen sonucun uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca jet fan çıkış hızı da ölçekli modele göre 6,8 m/s olması gerekmektedir. Bu değer de analiz sonuçlarında elde edilmiştir.

11. ANALİZ SONUÇLARI



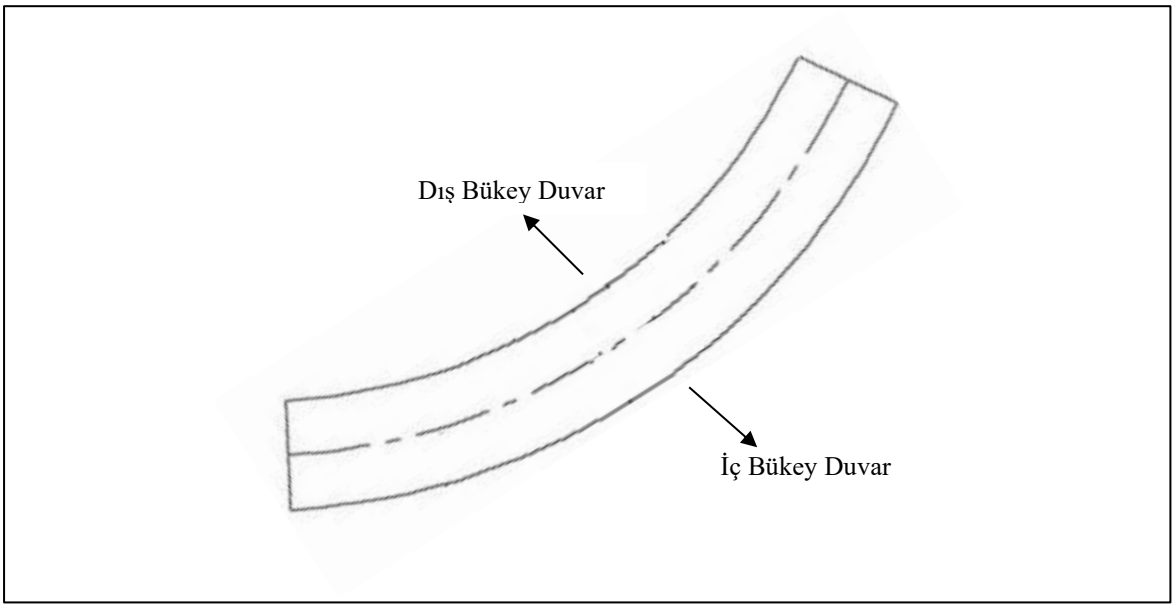
Şekil 11.1. Tünel içerisinde 180. saniye sonunda oluşan dumanın sıcaklık dağılımı

Bu çalışmada, 20 MW büyüklüğünde birim zamandaki ısı salınımı oranına sahip yangının maksimum duman sıcaklığı özelliği kullanılarak 3 farklı konumdaki ısı kaynağının meydana getirdiği duman davranışı incelenmiştir. Boylamasına havalandırma hızına (geri katmanlaşmayı önleyen kritik hız) ek olarak, tünel içerisinde yangın bölgesinde yanan malzemelerin neden olduğu sıcaklık değişiminin etkisiyle meydana gelen kaldırma kuvveti ve jet fanları uygulamış olduğu itme kuvvetinin etkisiyle duman aşağı yönlü harekete geçer (Guo, Cai, Liu ve Yan, 2021) . Yangın bölgesine en yakın hacimlerde yüksek sıcaklık değerleri görülürken, yangın kaynağından uzaklaştıkça bu sıcaklık değeri azalmaktadır. Şekilde 11.1'de tamamlanan yangın sonucunda yayılan dumanın tünel içerisindeki dağlımı gösterilmiştir. Yangın bölgesine en yakın alandaki (yangın kaynağının en üst kesiti) sıcaklık değerinin 1355 K değerine kadar ulaşmaktadır.



Şekil 11.2. Kırk ikinci saniyedeki maksimum tavan sıcaklığı

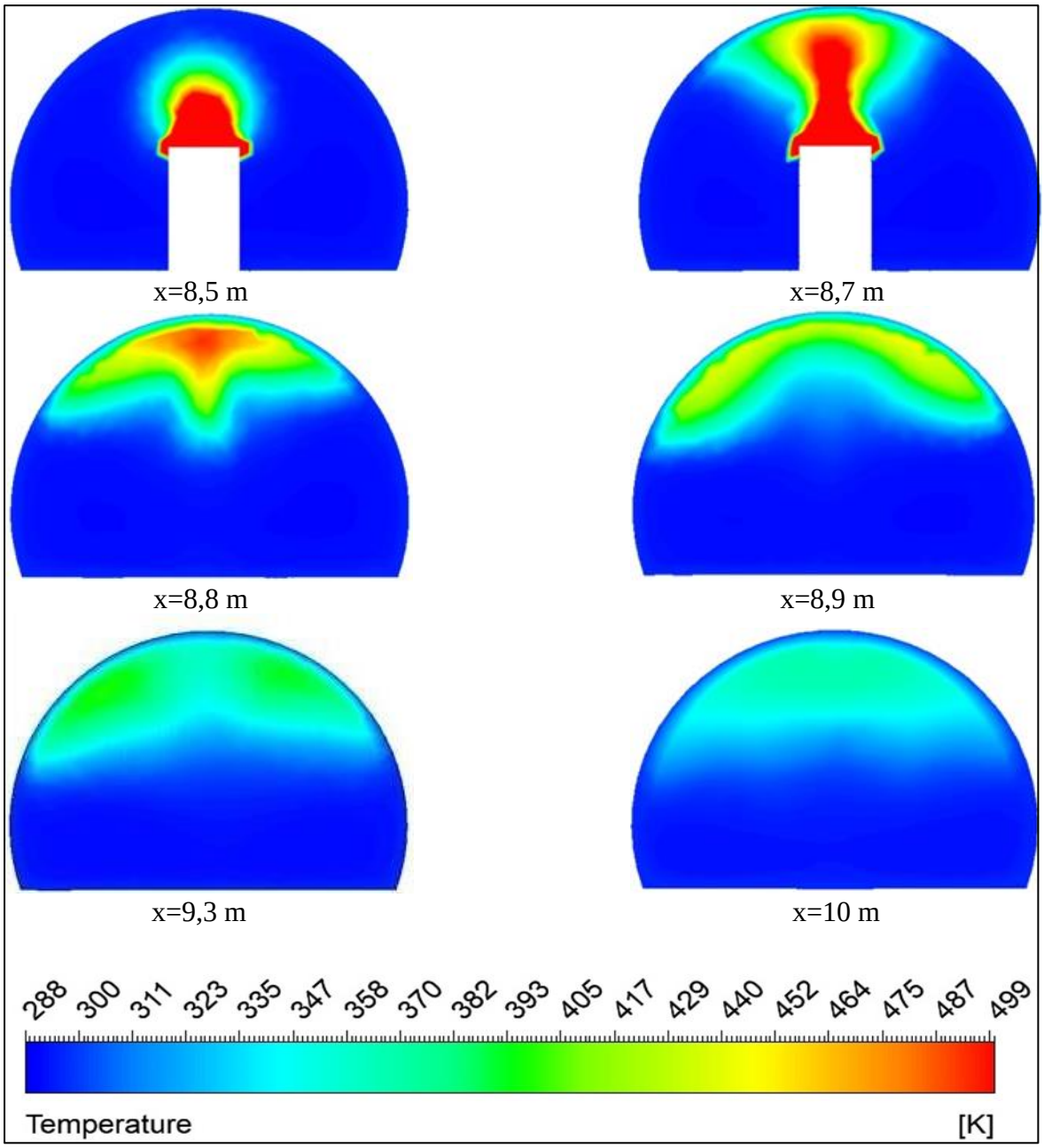
Dumanın karakteristiği hakkında yorum yapabilmek için tavan sıcaklığının maksimum değere ulaştığı ilk an referans alınmaktadır (Liu, Zhu, Pan, Yu ve Liang, 2019). Ölçekli modele göre kırk ikinci saniye içerisinde tavan bölgesine yakın kısımda sıcaklık değerinin 500 K olduğu Şekil 11.2'de görülmektedir. 42. saniyeden sonra yangın 180. saniyeye kadar kararlı devam etmektedir.



Şekil 11.3. Virajlı tünelde iç bükey duvar ve dış bükey duvar gösterimi

Virajlı tünellerde duman dağılımını daha iyi anlayabilmek için iç bükey duvar ve dış bükey duvarın tanımlanması gerekmektedir. Şekil 11.3'de tünel geometrisine bağlı olarak iç bükey duvar ve dış bükeyin duvarın gösterimi yapılmıştır.

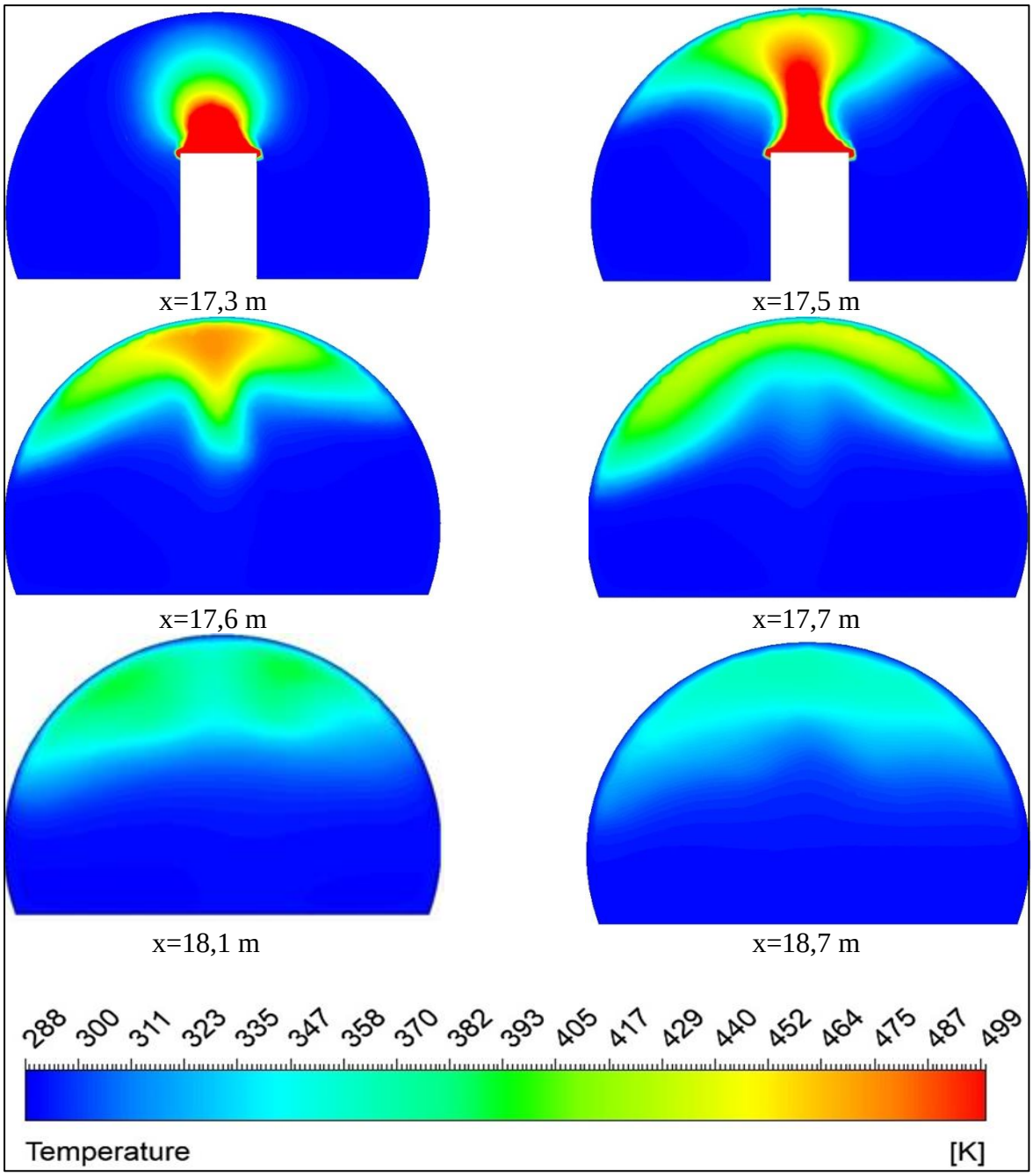
11.1. Sıcaklık Konturları



Şekil 11.4. Birinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn)

Tünel girişinden yatayda 8,5 m mesafede gerçekleşen yangın senaryosu tünel girişine en yakın mesafedir. Bu yangın simülasyonu senaryosunda, yangın kaynaklı oluşan duman 2. jet fan grubu ve 3. jet fan grubunun etkisiyle tünel çıkış portalına doğru yönlendirilmektedir. Isı iletim katsayı (h) ve radyasyon etkileri bu çalışmada ihmal edildiği için en yüksek sıcaklık değerinin yanma bölgesinde olduğu görülmektedir. Yanma bölgesinde değişen sıcaklığın etkisiyle öncelikle duman hareketinde yukarı yönlü bir

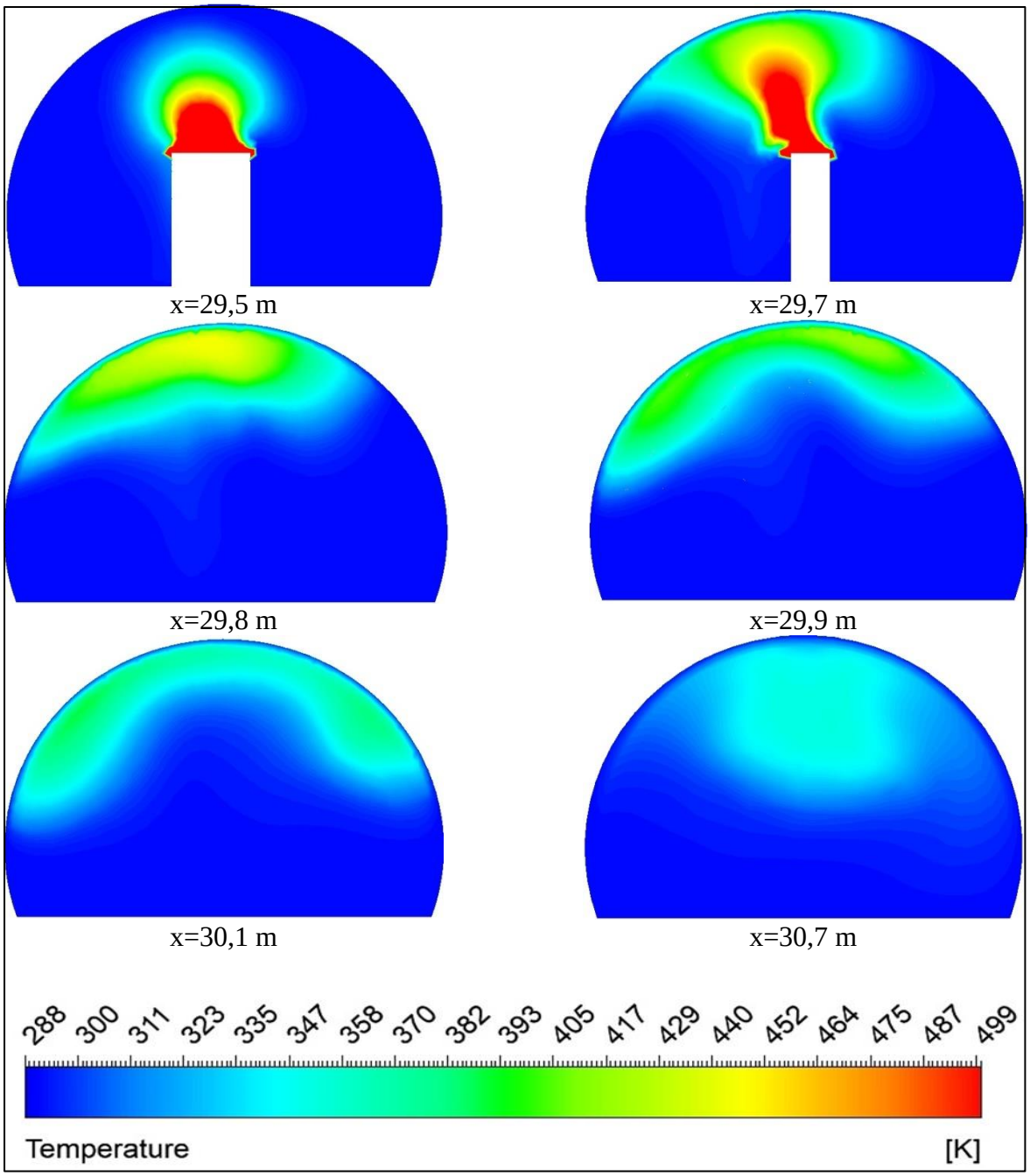
hızlanma görülür. Jet fanların uyguladığı itme kuvveti ve kritik hızın etkisiyle duman hareketinde aşağı akış yönünde ilerleme gerçekleşir. Yangın bölgesinden uzaklaştıkça kritik hızın uyguladığı sürükleme etkisi ve jet fanların uyguladığı ileri yönlü itme kuvvetinin etkisiyle tavan sıcaklığının azaldığı tünel içerisindeki farklık kesitlerde görülmektedir. Ölçekli modele göre 8,7 metrede tavan sıcaklığı en yüksek değere ulaşmaktadır. 8,7 m mesafede yaklaşık 500 K 'ne kadar ulaştığı görülmektedir. PIARC tarafından hazırlanan rapora göre 573 K ’nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde termal etkiler nedeniyle tünel yapısında mukavemetin azalmaya başladığı bilinmektedir (PIARC, 1991). 8,7 m’de sıcaklığın neden olduğu tünel yapısının bozulması ihtimalinden dolayı tehlikeli bölge olarak nitelendirilebilir. D şeklinde kesite sahip olan tünelde, 8,8 m ve 8,9 m’de görüldüğü gibi, dumanın tünel duvarlarında sıcaklık artışına neden olmaktadır. 8,8 m ve 8,9 m’de tünel duvarı sıcaklığının 450 K’ye kadar ulaştığı görülmektedir. Aşağı yönlü yayılan dumanın tünel girişinden yatayda 10 m konumuna geldiğinde tavandan başlayarak düzgün dağılımlı (üniform) sıcaklığa ulaşma eğiliminde olduğu görülmektedir (Şekil 11.4).



Şekil 11.5. İkinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn)

Tünel girişinden yatayda 17,3 m mesafede gerçekleşen yangın senaryosunda, yangın bölgesi 2. jet fan grubu ile 4. jet fan grubu arasındadır. 2. jet fan grubu tünel giriş portalından çektiği taze havayı yangın bölgesi üzerine doğru aktarmaktadır. Jet fandan yayılan hızlı hava akımı Coanda etkisiyle virajlı yol eksenini izlemek yerine duvara yapışmaktadır. Şekil 11.5'de 17,5 m; 17,6 ve 17,7 m'deki kesitlerde 2. jet fan grubundan ayrılan taze hava Coanda etkisiyle tünel duvarının iç bükey kısmına yapışır ve dumanın dış bükey duvar bölgesine doğru dağılmasına neden olur. Böylece duvarın dış bükey bölgesi

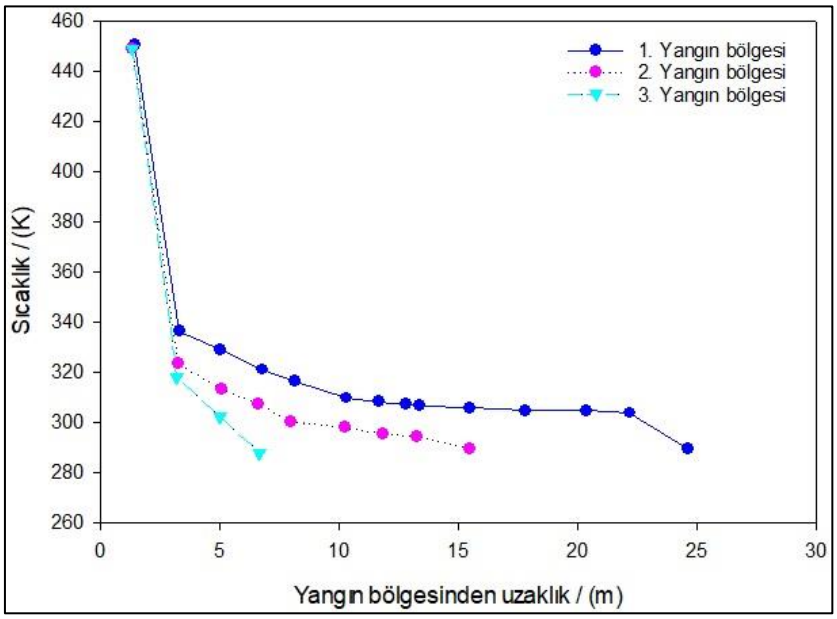
daha hızlı yüksek sıcaklık değerlere ulaşmaktadır. Duman ve taze hava karışımı 4. jet fan grubuna girmeden önce 18,1 m'de itibaren duman sıcaklık dağlımı üniform hale gelmeye başlar.



Şekil 11.6. Üçüncü yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn)

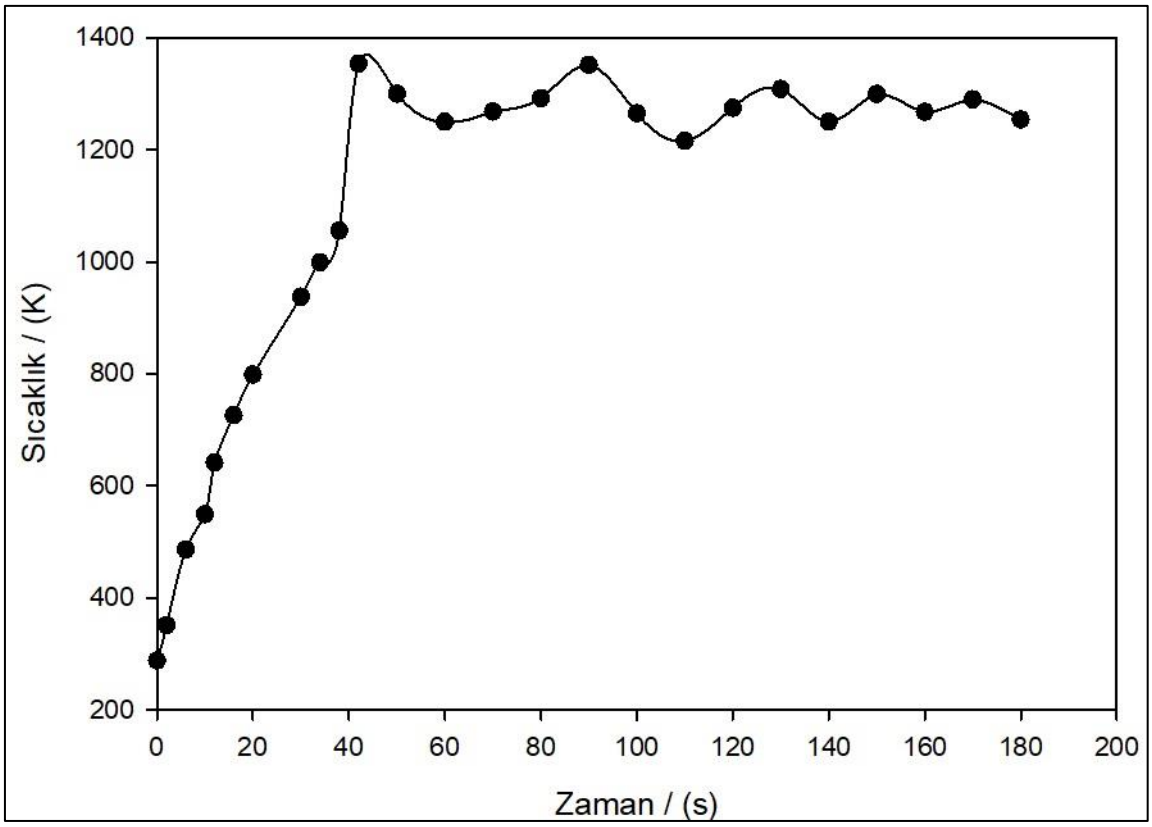
Üçüncü yangın senaryosunda, tünel girişinden yatayda, 29,5 m mesafeye yerleştirilen yangın kaynağının neden olduğu dumana, 3. jet fan grubu ve 4. jet fan grubu tarafından taze hava sağlanmaktadır. 2 jet fan grubunun uygulamış olduğu itme etkisiyle, duman

Şekil 11.6'de görüldüğü gibi daha kuvvetli itmeye maruz kalmıştır ve duman dış bükey bölgeye daha belirgin bir şekilde dağılmıştır. Yangının çıktığı ilk bölgede sıcaklık konturları incelendiğinde sıcaklığın arttığı görülmektedir. Eğrilik nedeniyle jet fanlardan gelen akışkanın hareketi ve Coanda etkisiyle dumanın dış duvara doğru kaydığı görülmektedir (x=29,7 m ; x= 29,8 m; x=29,9 m; x=30,1 m). İlerleyen mesafelerde ise (x=30,7 m) dumanın yayılarak üniform hale geldiği görülmektedir.



Şekil 11.7. Yangın sonunda oluşan maksimum tavan sıcaklığı grafiği

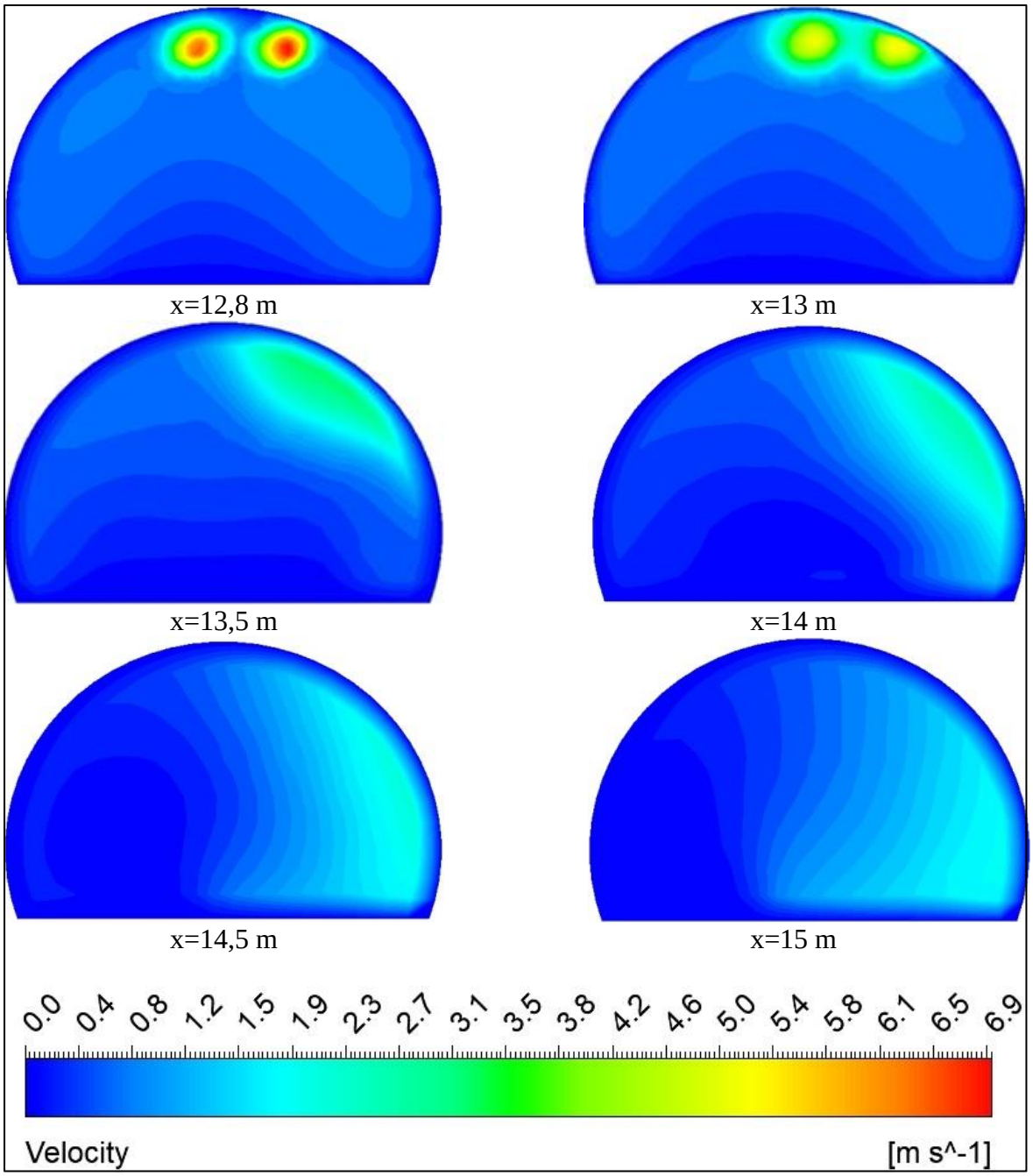
Tünel içerisindeki yangın konumunun tavan sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 11.7'de gösterilmiştir. 3 farklı lokasyonda gerçekleşen yangın senaryolarında sıcaklık dağılımlarının yaklaşık olarak birbirine benzer dağılım gösterdiği Şekil 11.7'deki grafikte görülebilir. Yangın kaynağının konumu tünel çıkış portalına yaklaştıkça sıcaklık değerlerinin daha çabuk azaldığı görülmektedir. Tünel giriş portalına yakın olan yangın kaynağında duman hızlı bir şekilde tahliye edilmeği için tünel içerisinde sıcaklık düşüşü tünel çıkışına yakın olan yangına göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Birinci yangın senaryosunda duman iki jet fan grubuyla çekilip tünel çıkış portalına aktarılmaktadır. İkinci ve üçüncü yangın senaryolarında ise yangın kaynağına yüksek hızda soğuk-temiz hava aktarılmaktadır. İkinci yangın kaynağında bu olay bir jet fan grubu tarafından sağlanırken, üçüncü yangın kaynağına iki jet fan grubu tarafından sağlanmaktadır. Yangın kaynaklarına gelen soğuk ve temiz hava tünel içerisindeki sıcaklık dağılımının düşmesini sağlamıştır.



Şekil 11.8. Yangın kaynağı üzerindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı

Yangın kaynağının üzerindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı incelendiğinde (Şekil 11.8), en yüksek sıcaklık değerine (1355 K) 42. saniyede ulaşıldığı görülmektedir. 42. saniyeden sonra yangının kararlı hale geldiği ve sıcaklık dağılımının 1200 K ile 1300 K arasında değiştiği görülmektedir. 0 ile 42. saniyeler arasında yangın büyüme evresindedir. 42. saniye ile 180. Saniye arasında yangın kararlı haldedir. Yangının kararlı halde olduğu bu evre tam gelişme evresi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 11.8'deki zamana bağlı sıcaklık değişimi grafiği 1. yangın senaryosu içindir. 2. ve 3. Yangın senaryolarında da zamana bağlı sıcaklık dağılımı benzerdir.

11.2. Hız Konturları



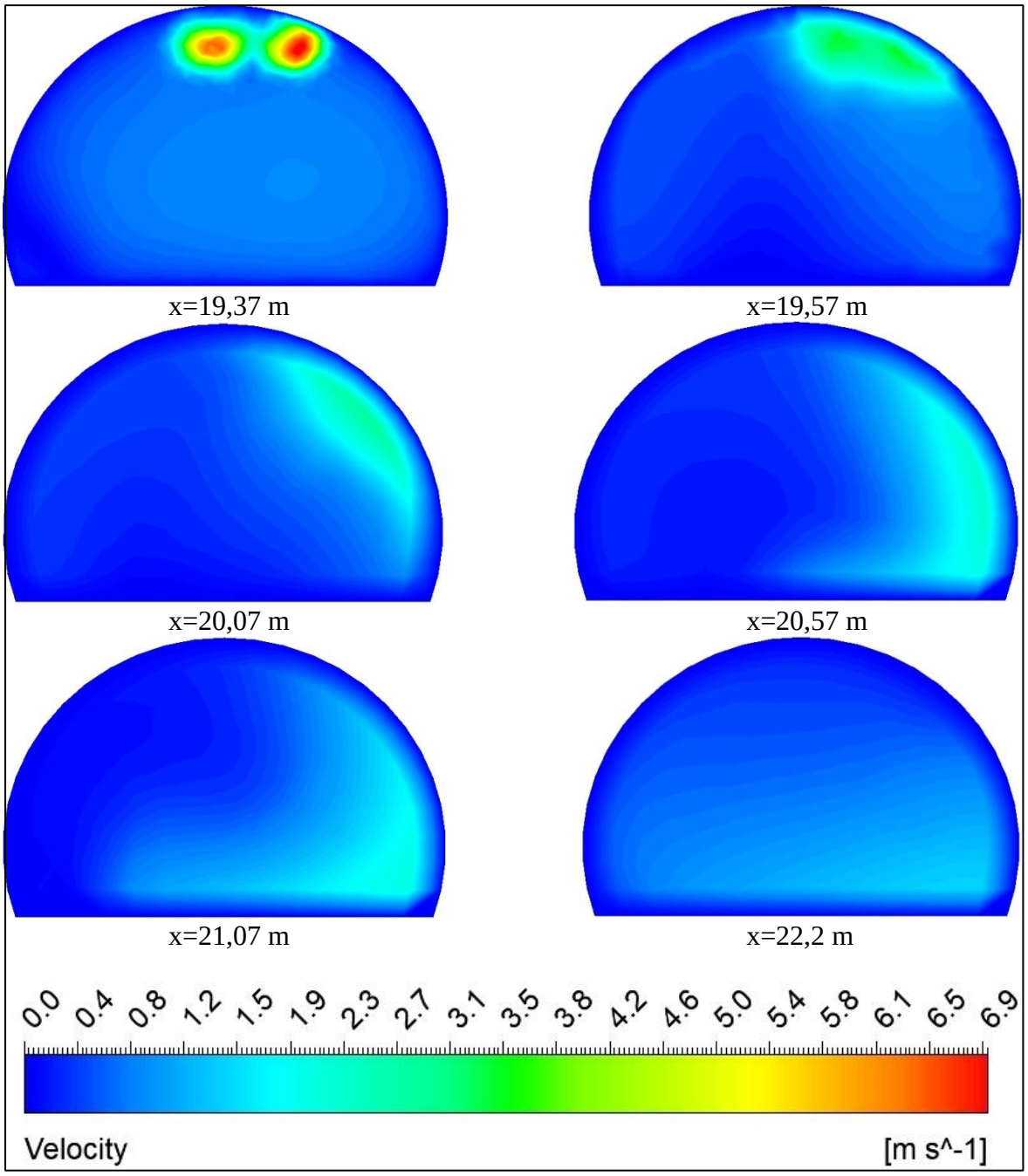
Şekil 11.9. İkinci jet fan grubundan farklı uzaklıktaki hız konturları

2. jet fanın aktif olarak çalıştığı durumlardaki hız konturları Şekil 11.9'da gösterilmiştir. Her bir kontur oluşturulurken tünel girişinden yatay mesafedeki uzaklık dikkate alınmıştır. Jet fandan çıkan maksimum hız değerinin 6,9 m/s'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Tünel içerisinde sıralı halde bulunan jet fan grupları akış alanını bozmaktadır. Bu nedenle hız değerinin sürekli artması veya sabit kalması beklenmez. Bölüm 11.1'de belirtildiği gibi Coanda etkisiyle jet fandan çıkan hava akımı iç bükey duvara yapışmaktadır. Şekil 11.9'da

gösterildiği gibi 2. jet grubundan çıkan hava 13,5 m; 14 m ve 14,5 m mesafelerde iç bükey duvara yapışmıştır. 13,5 m ve 14 m mesafede hız değerlerinin yaklaşık 3 m/s'ye kadar düştüğü görülmektedir. 15 m mesafede ise hız değeri en düşük hale gelmiş ve daha düzgün bir dağılıma sahip olmuştur.

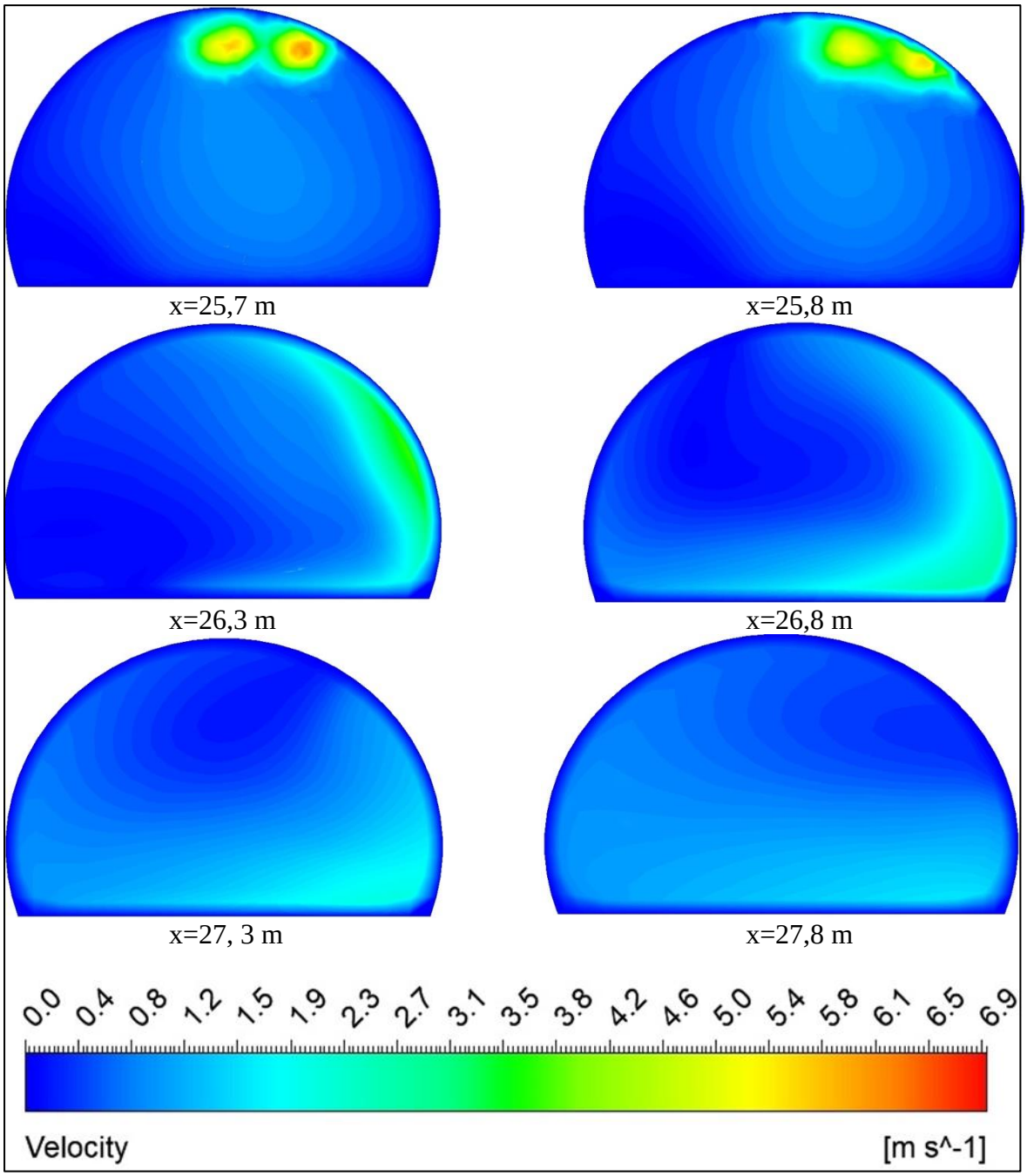
2. jet fan grubu birinci yangın senaryosunda 3. jet fan grubuyla birlikte aktif olarak çalışmaktadır. Şekil 11.11'de görüldüğü gibi 2. jet fan grubuna giren akış hızı değerinin 6,9 m/s değerine kadar ulaştığı görülmektedir.

İkinci yangın bölgesinde ise 2. jet fan grubu 4. jet fan grubuyla birlikte aktif olarak çalışmaktadır. Şekil 11.13'deki hız grafiği incelendiğinde, iki jet fan grubunun ortasında kalan bölgede yangın meydana geldiği için bu bölgede yangın daha hızı daha fazladır. Jet fanlarda ise hızın 6,9 m/s'ye ye kadar çıktığı görülmektedir.



Şekil 11.10. Üçüncü jet fan grubundan farklı uzaklıktaki hız konturları

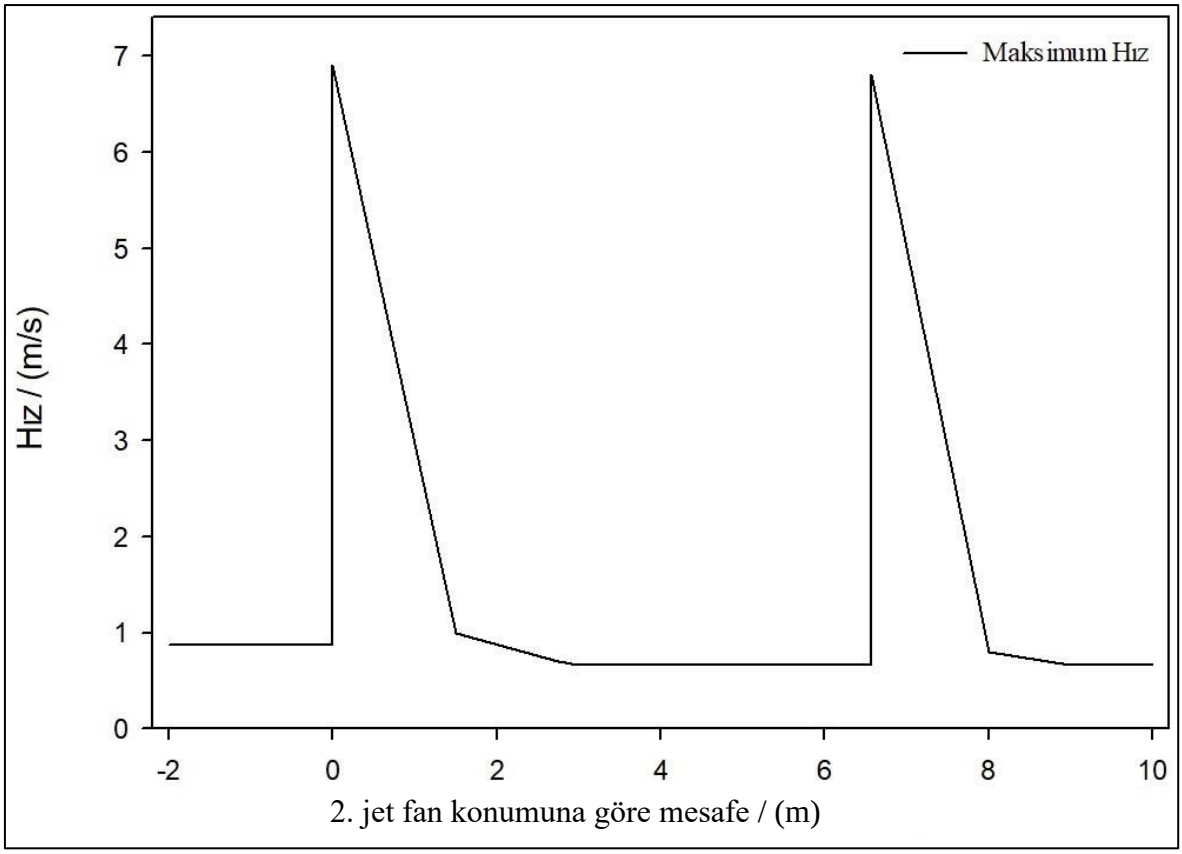
Birinci yangın senaryosunda ve üçüncü yangın senaryosunda aktif olarak çalışan 3. jet fan grubundaki akışkan hareketi incelendiğinde jet fan çıkışına yakın bölgelerde (x=19,37 m) en yüksek hız değerine ulaşıldığı görülmektedir. Eğrilik nedeniyle akış hareketi dış duvara doğru hareketlenmektedir (x=20,57 m). Jet fanlardan çıkan hava duvara yapıştıktan sonra tünel zeminine doğru hareket etmekte ve tünel zeminine ulaştıktan sonra (x=22,2 m) hız dağılımının üniforma yaklaştığı görülmektedir (Şekil 11.10).



Şekil 11.11. Dördüncü jet fan grubundan farklı uzaklıktaki hız konturları

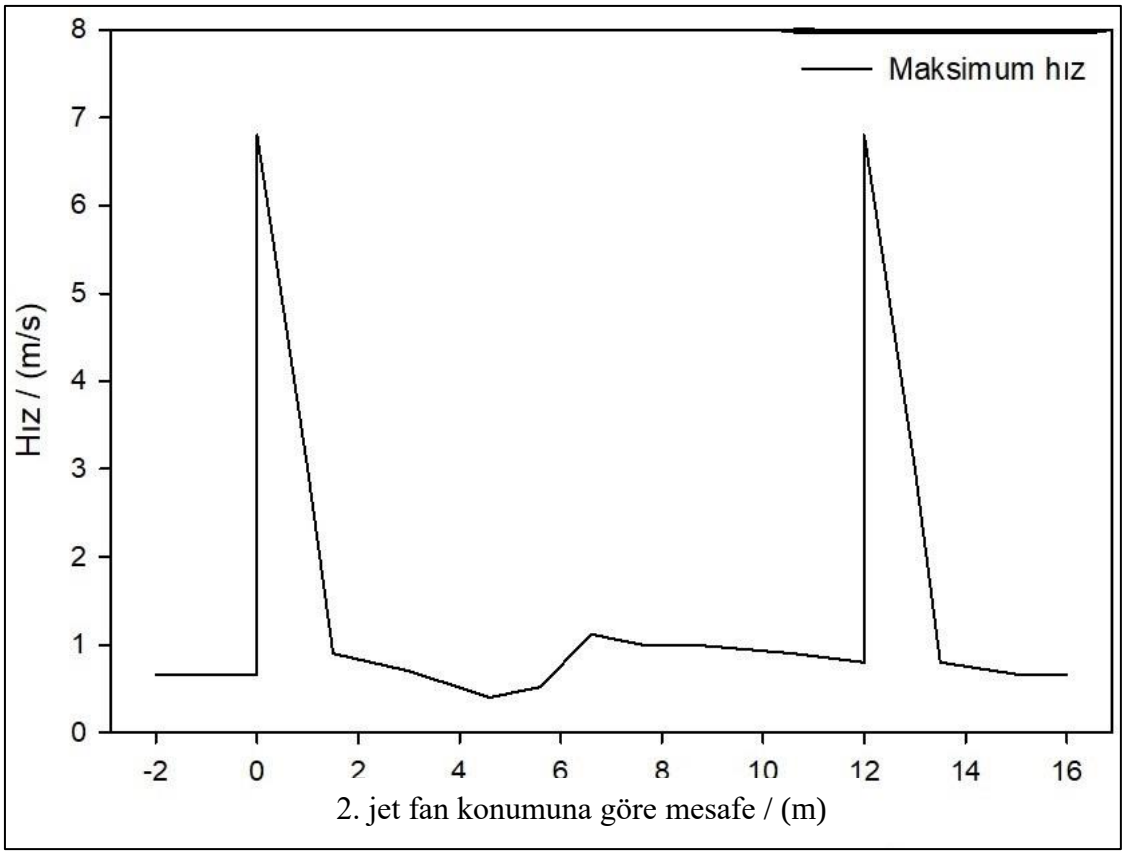
İkinci yangın senaryosu ve üçüncü yangın senaryosunda aktif olarak çalışan 4. jet fan grubundaki akış incelendiğinde akışın jet fan çıkışında en yüksek değerde olduğu görülmektedir (Şekil 11.11). Coanda etkisiyle duvara yapışan jet fan akışı daha sonra merkezcil kuvvetlerin etkisine girerek tünel zeminine doğru ilerler, dönme hareketi yapar (x=26,8 m). Tünel içerisinde zemine doğru hareket eden akışkan x=27,3 m'den itibaren üniform hale gelmeye başlar ve x=27,8 m'de görüldüğü gibi daha düzgün hız dağılımlı konturları oluşur.

4. jet fan grubu ikinci yangın bölgesinde, 2. jet fan grubuyla birlikte aktif olarak çalışmaktadır. Hız değerleri iki jet fan içinde yaklaşık 6,9 m/s olduğu Şekil 11.13'de görülmektedir. Ayrıca 4. jet fan grubu üçüncü yangın senaryosunda 3. jet fan grubuyla ortak olarak çalışmaktadır. 4. jet fandan yaklaşık 2 m uzaklıktaki bir noktada hız değerinin kritik hız değeri üzerinde olmasının temel nedeni yanmanın etkisiyle genleşen gazların daha hızlı hareket etmesidir. Üçüncü yangın bölgesinde oluşan duman jet fanlar aracılığıyla tünel dışına doğru itilmektedir. Şekil 11.14'de görüldüğü gibi iki jet fanın hız davranışı benzerdir. Tünel çıkışına yakın bölgede hız değerinin arttığı Şekil 11.14'de görülmektedir.



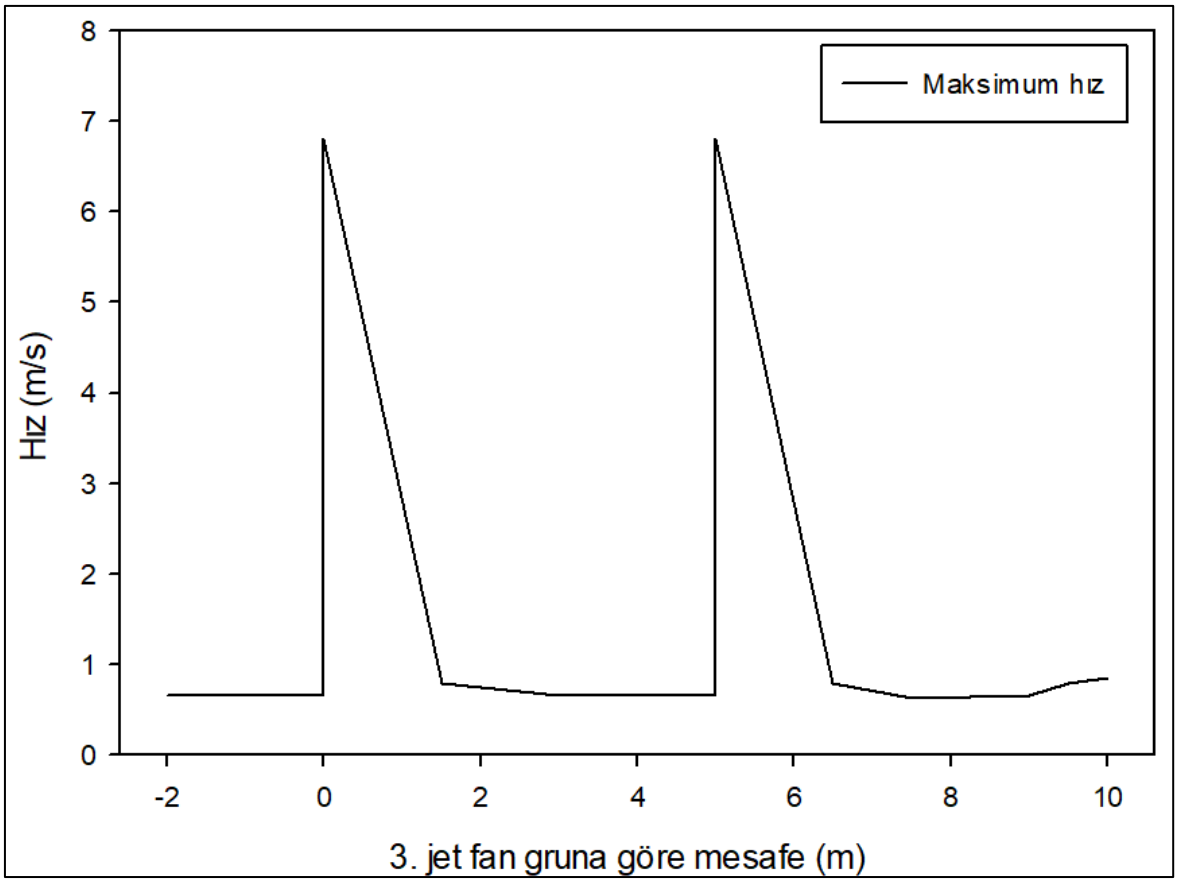
Şekil 11.12. 2. jet fan grubu ve 3. jet fan grubu arasındaki maksimum hız grafiği

Şekil 11.12'deki grafik 2. jet fan grubunun merkezi referans alınarak çizilmiştir. Birinci yangın senaryosunda 2. ve 3. jet fan grupları aktif olarak çalışmaktadır. Yangın kaynağı 2. ve 3. jet fan grubundan önceki bir konuma yerleştirilmiştir. 2. jet fan grubundan önceki kısımda yangının neden olduğu termal genleşmenin etkisiyle gazların sıcaklığı kritik hız değerinden büyük çıktığı, 0.9 m/s'ye kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Yangın bölgesinde yaklaştıkça hız değerinin daha büyük olması beklenmektedir.



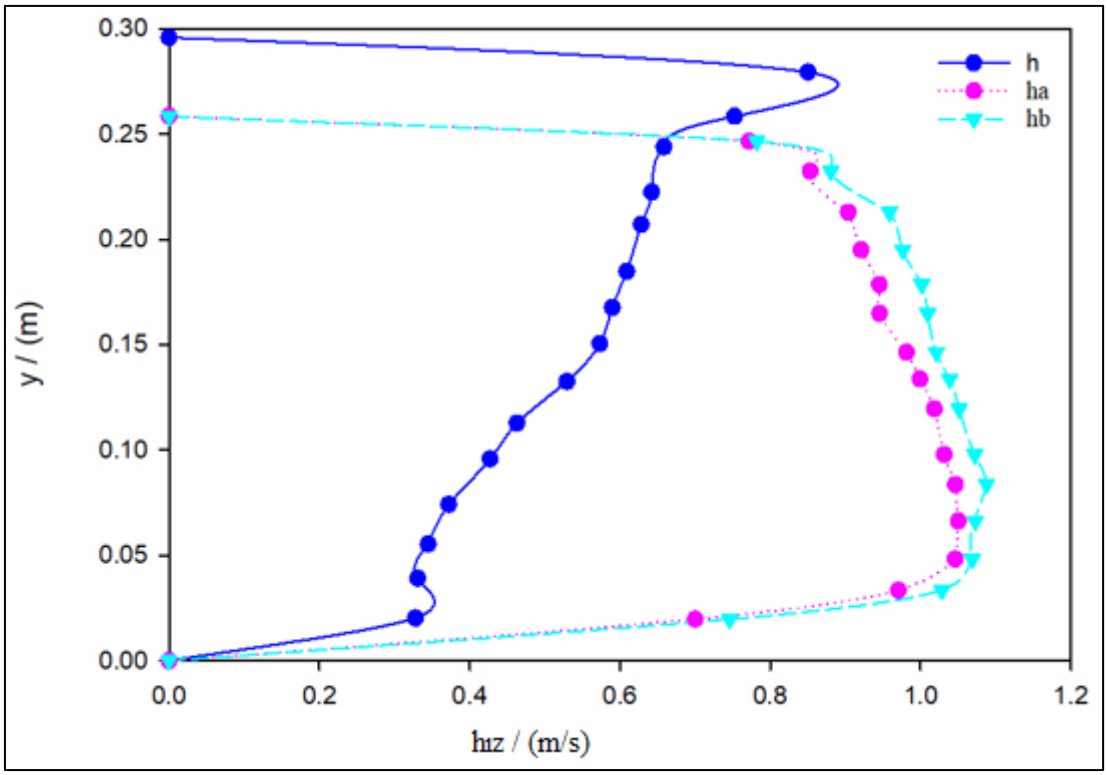
Şekil 11.13. 2. jet fan grubu ve 4. jet fan grubu arasındaki maksimum hız grafiği

Şekil 11.13'deki grafik 2. jet fan grubunun merkezi referans alınarak çizilmiştir. İkinci yangın senaryosunda 2. ve 4. Jet fan grupları aktif olarak çalışmaktadır. Yangın kaynağı 2. ve 4. jet fan grubunun ortasındaki bir konuma yerleştirilmiştir. 2. jet fan grubu ile 3. jet fan grubu arasındaki hız değerinin termal genleşmenin gazlar üzerindeki etkisiyle 1 m/s değerini aştığı görülmektedir.

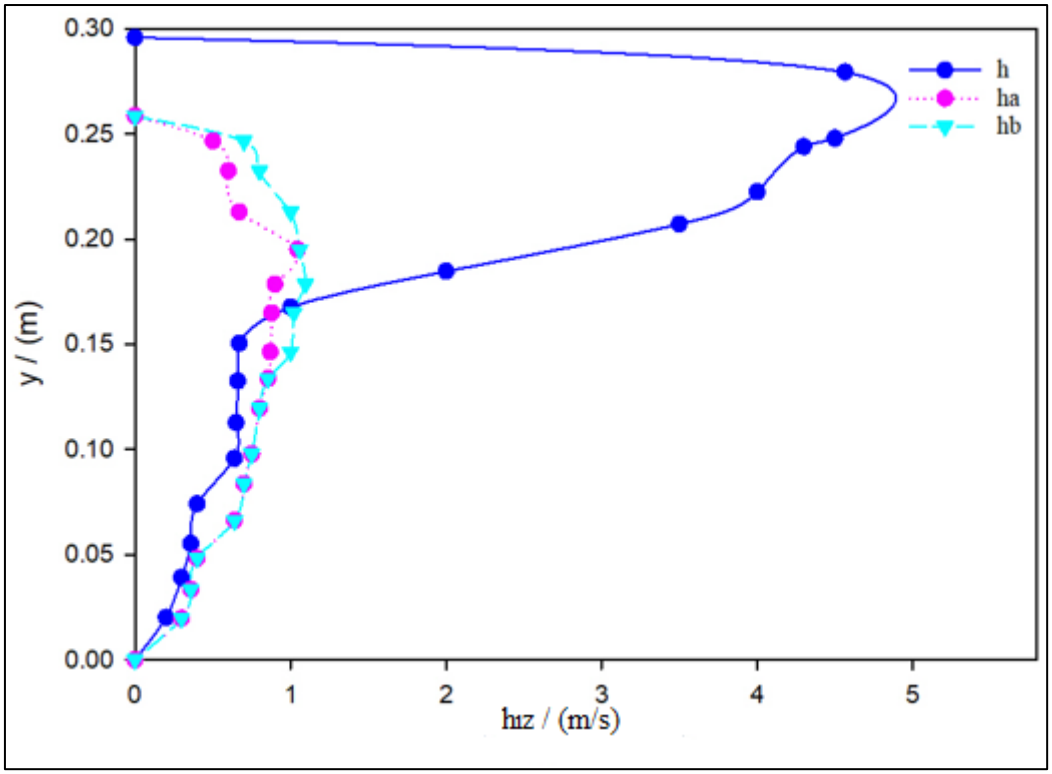


Şekil 11.14. 3. jet fan grubu ve 4. jet fan grubu arasındaki maksimum hız grafiği

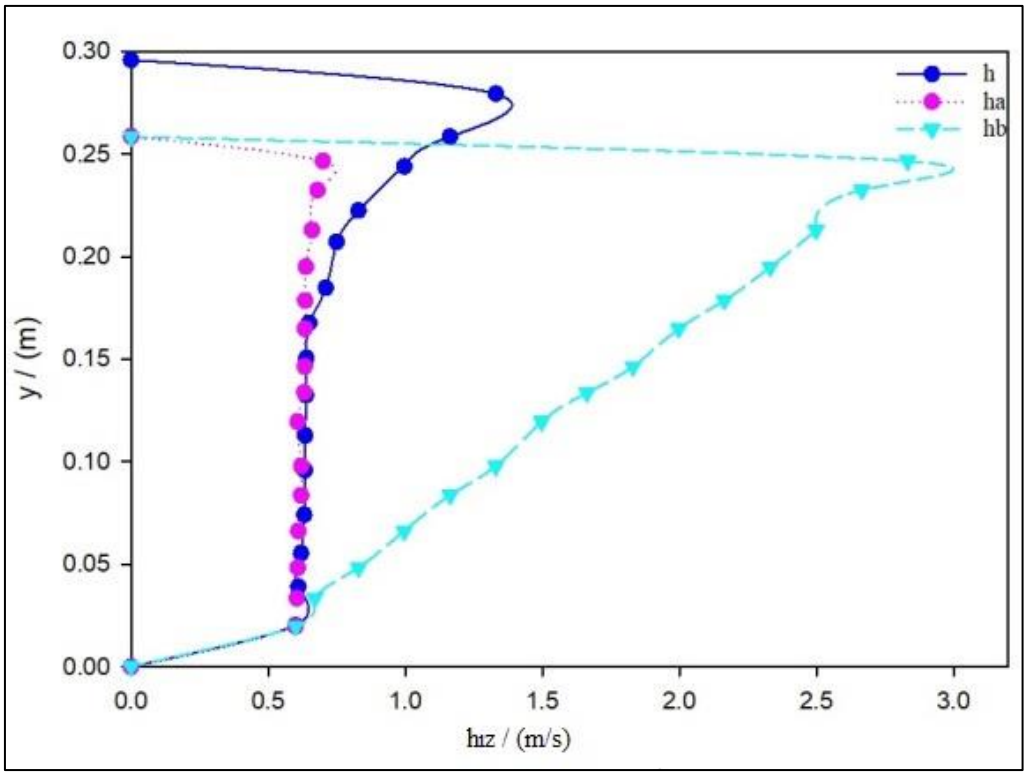
Şekil 11.14'deki grafik 3. jet fan grubunun merkezi referans alınarak çizilmiştir. Üçüncü yangın senaryosunda 3. ve 4. Jet fan grupları aktif olarak çalışmaktadır. Yangın kaynağı 3. ve 4. jet fan grubundan sonraki bir konuma yerleştirilmiştir. 3. jet fan grubu ile 4 jet fan grubu arasındaki hız değerinin benzer olduğu görülmektedir. Şekil 11.14'de yangın kaynağına yaklaştıkça hız değerinin artığı görülmektedir.



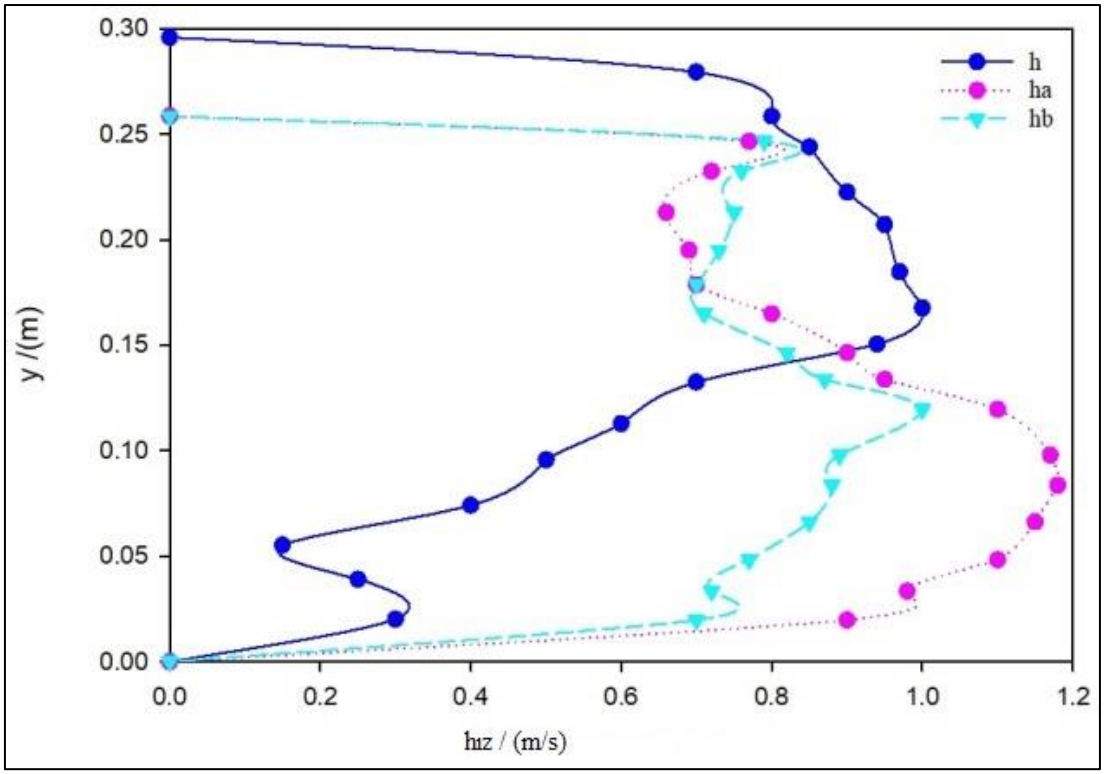
Şekil 11.15. x=8,8 m'deki hız dağılımları



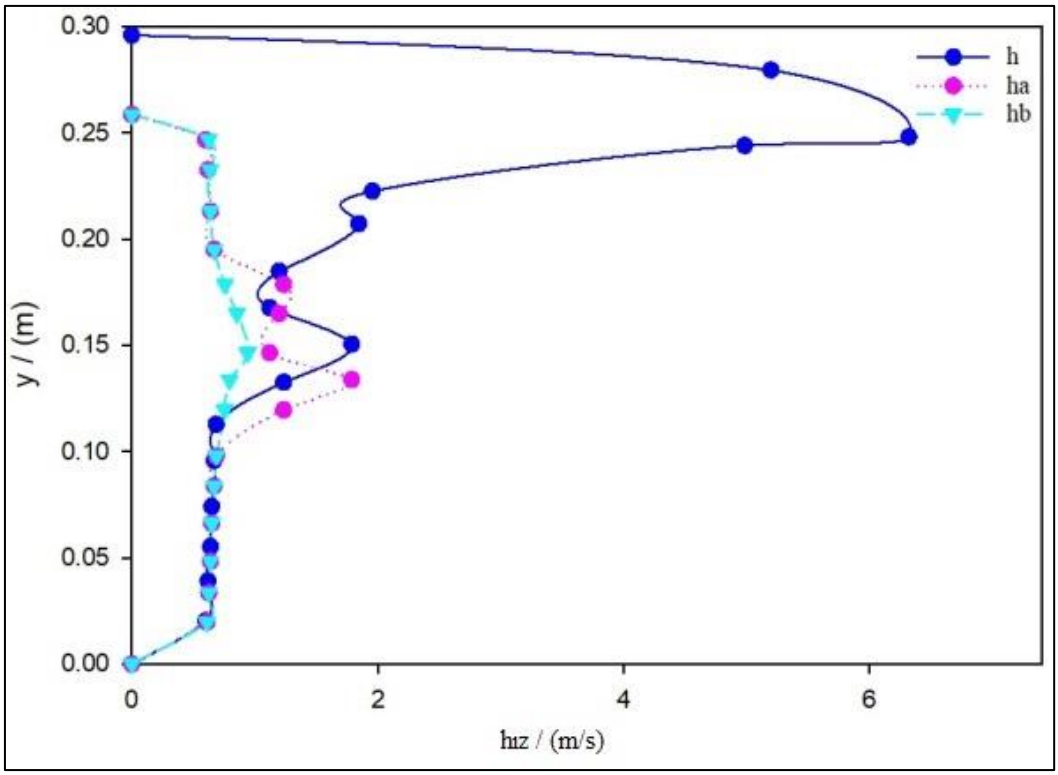
Şekil 11.16. x=12,8 m'deki hız dağılımları



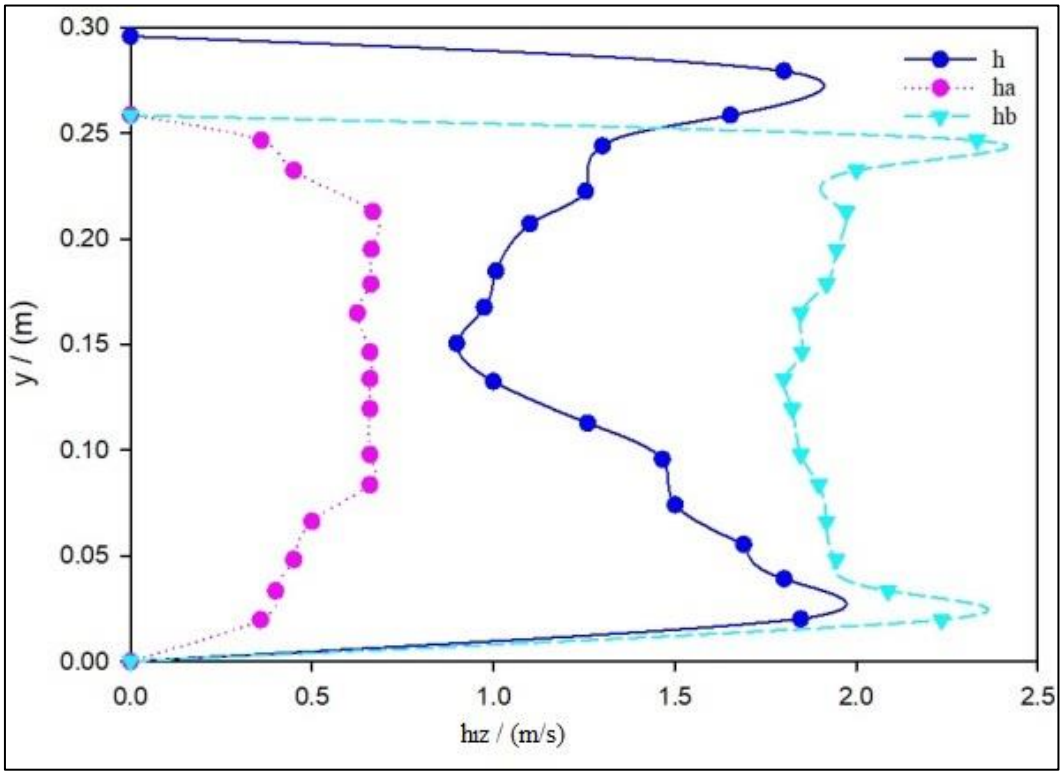
Şekil 11.17. x=14 m'deki hız dağılımları



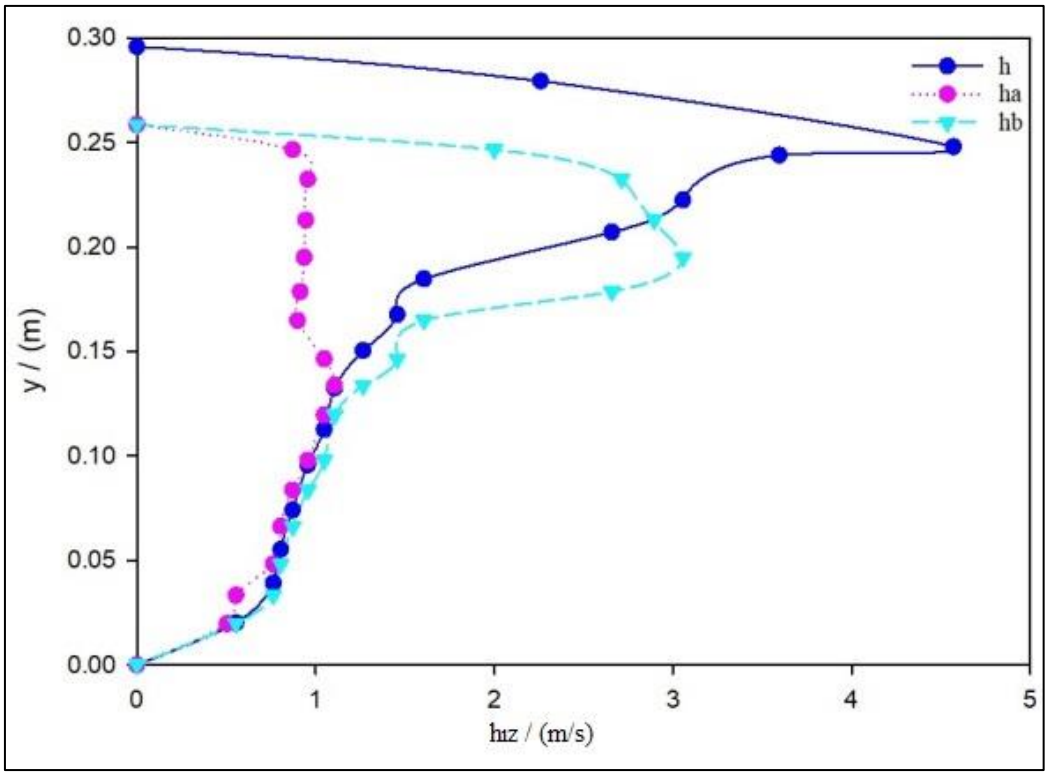
Şekil 11.18. x=17,6 m'deki hız dağılımları



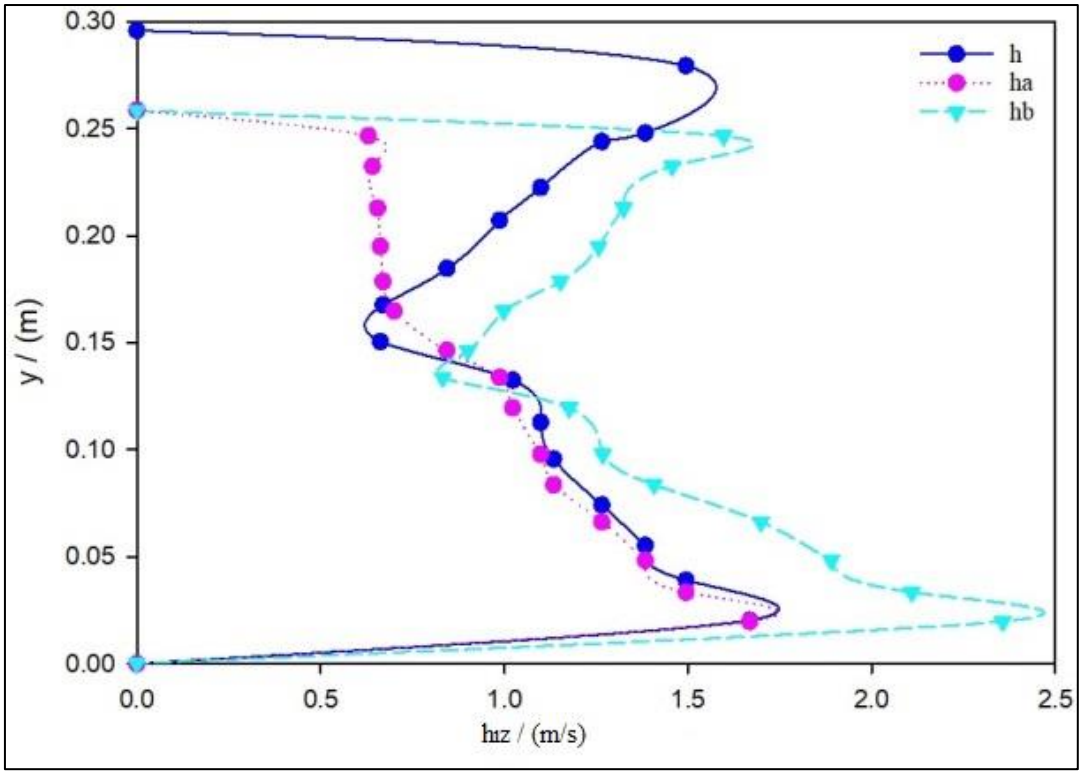
Şekil 11.19. x=19,37 m'deki hız dağılımları



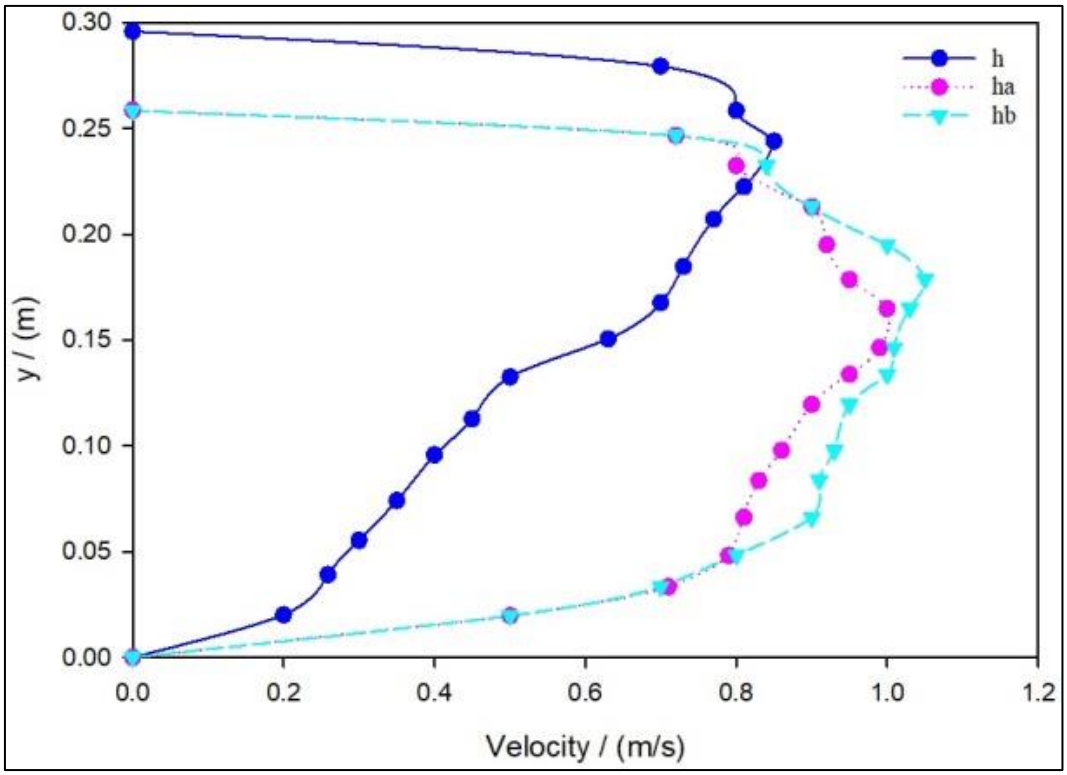
Şekil 11.20. x=20,57 m'deki hız dağılımları



Şekil 11.21. x=25,6 m'deki hız dağılımları

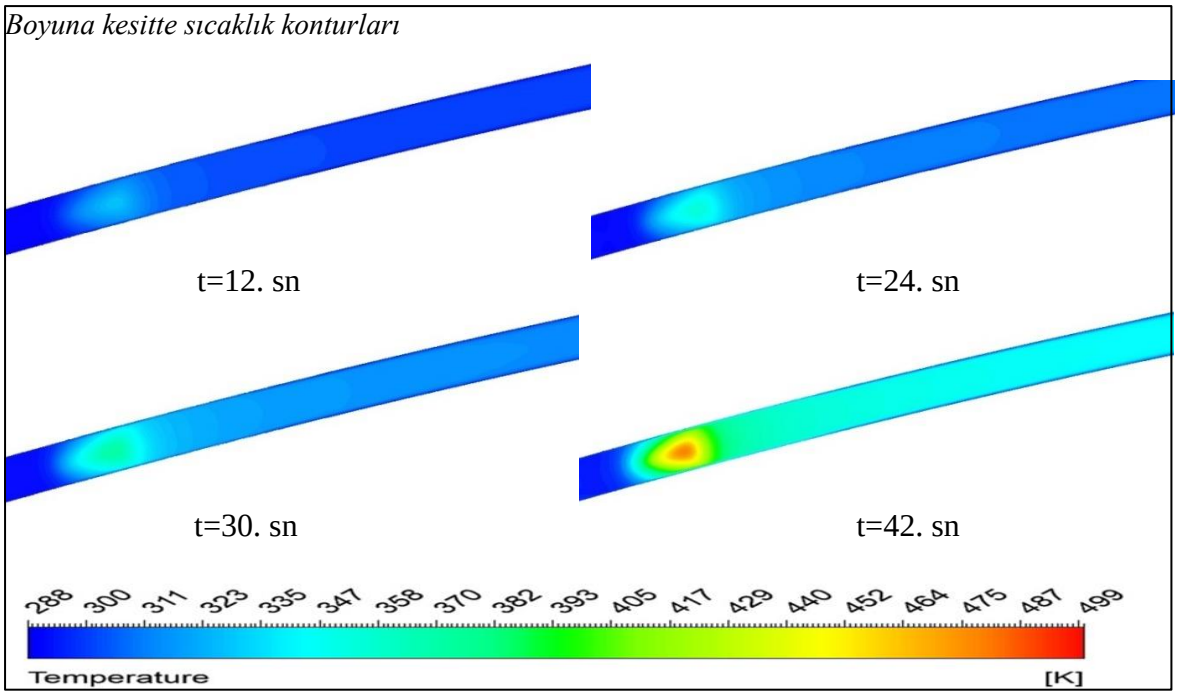


Şekil 11.22. x=26,8 m'deki hız dağılımları



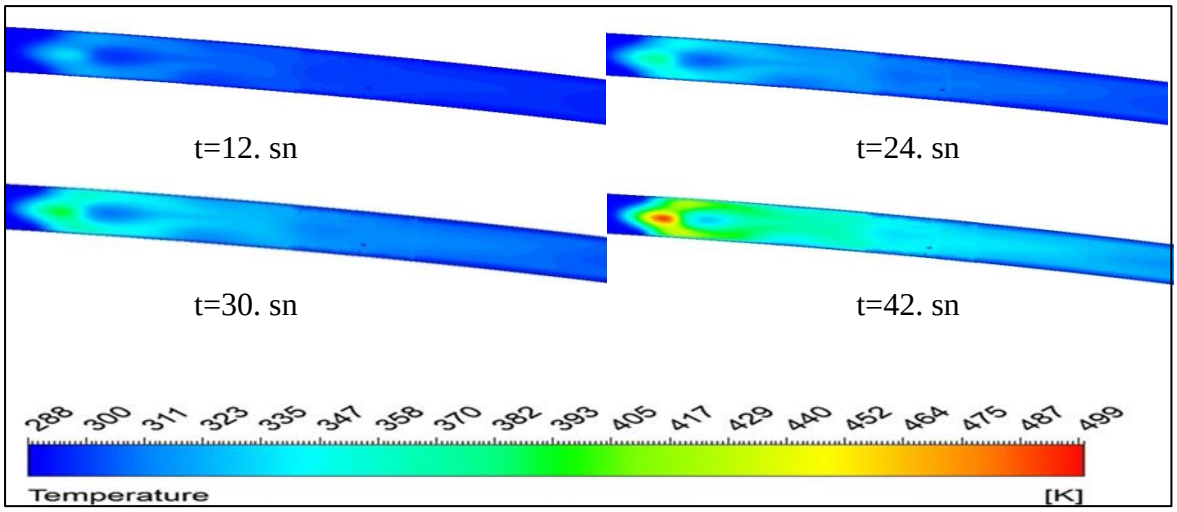
Şekil 11.23. x=29,8 m'deki hız dağılımları

Tünel kesitindeki dikey hız değişimleri Şekil 11.15 ile Şekil 11.23 arasında verilmiştir. Tünel kesit alanında merkezdeki dik hız profili "h" ile ifade edilirken, merkezdeki dik hız profiline soldan ve sağdan 0,125 m uzaklıktaki hız profilleri sırasıyla "ha" ve "hb" olarak isimlendirilmiştir. Yangın bölgesine en yakın alanlardaki hız profilleri incelendiğinde (Şekil 11.15, Şekil 11.16 ve Şekil 11.23), sağdaki ve soldaki hız profillerinin ulaştığı değerin merkezdeki hız profilinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Yangın kaynağının bloke edici etkisi ile tünel içerisinde yangın kaynağının bulunduğu kısımda kesit daralması meydana gelir. Kesit daralmalarının olduğu noktalarda hız değeri artmaktadır. Şekil 11.16'da merkezdeki dik hız profili x=12,8 m'de iki jet fan arasından geçmektedir. Bu noktada hız 4,5 m/s'ye kadar ulaşmaktadır. Coanda etkisi altına giren jet fan akımı duvara yapışarak hareket etmeye başlar. Bu etkiyle iç bükey duvara yakın olan dik hız profilinin değeri Şekil 11.17'de görüldüğü gibi 3 m/s'ye ulaşır. Jet fandan çıkan hava akımı merkezcil kuvvetlerin etkisiyle dönme hareketi yapar. Dönme hareketinin etkisine girdiği kesitlerde tabandaki hız değeri yükselir (Şekil 11.22).



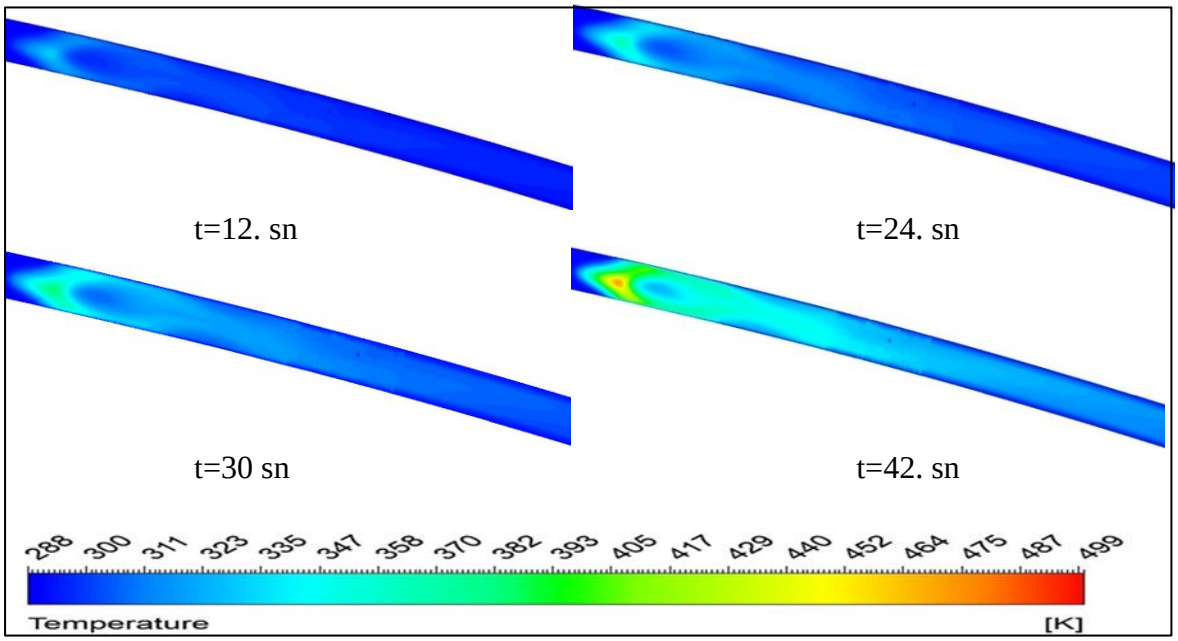
Şekil 11.24. Birinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları

Birinci yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı zeminden 0,248 m yükseklikteki boyuna kesitte farklı saniyeler için Şekil 11.24'de verilmiştir. Birinci yangın senaryosunda yangın sonucu oluşan duman 2. jet fan grubu ve 3. jet fan grubu tarafından çekilmektedir. İki jet fan grubu tarafından emme etkisene maruz kalan dumanın boyuna kesitte sürekli dağılımdadır. Akış çizgelerinde ayrılma meydana gelmemektedir. Yangının gelişme evresinde (t=42. saniyeye kadar), zeminden 0.248 m yükseklikteki enine kesitte, sıcaklık değerinin 340 K kadar çıktığı görülmektedir.



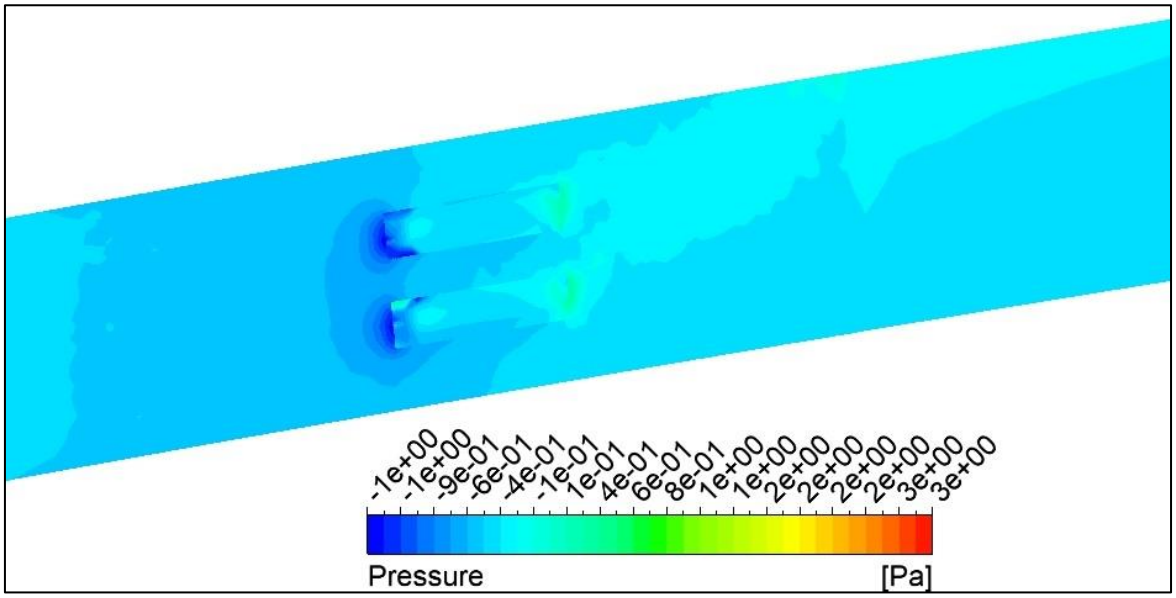
Şekil 11.25. İkinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları

İkinci yangın senaryosunda yangın kaynağının önündeki 2. jet fan grubu tarafından duman itilirken, 4. jet fan grubu tarafından da duman emilmektedir. Şekil 11.25'de görüldüğü gibi akışkanın ayrıldığı noktalarda iç duvar ve dış duvar taraflarında sıcaklık tünel merkezine göre yüksektir. t=24. saniye ve t=30. saniyede akışın ayrıldığı noktalardaki sıcaklığın düşük olduğu görülmektedir. Duman akışı 4. jet fan grubunun uyguladığı emme etkisiyle birleşir. Şekil 11.25'de t=42. saniyede görüldüğü gibi sıcaklık 420 K değerine yaklaşır.



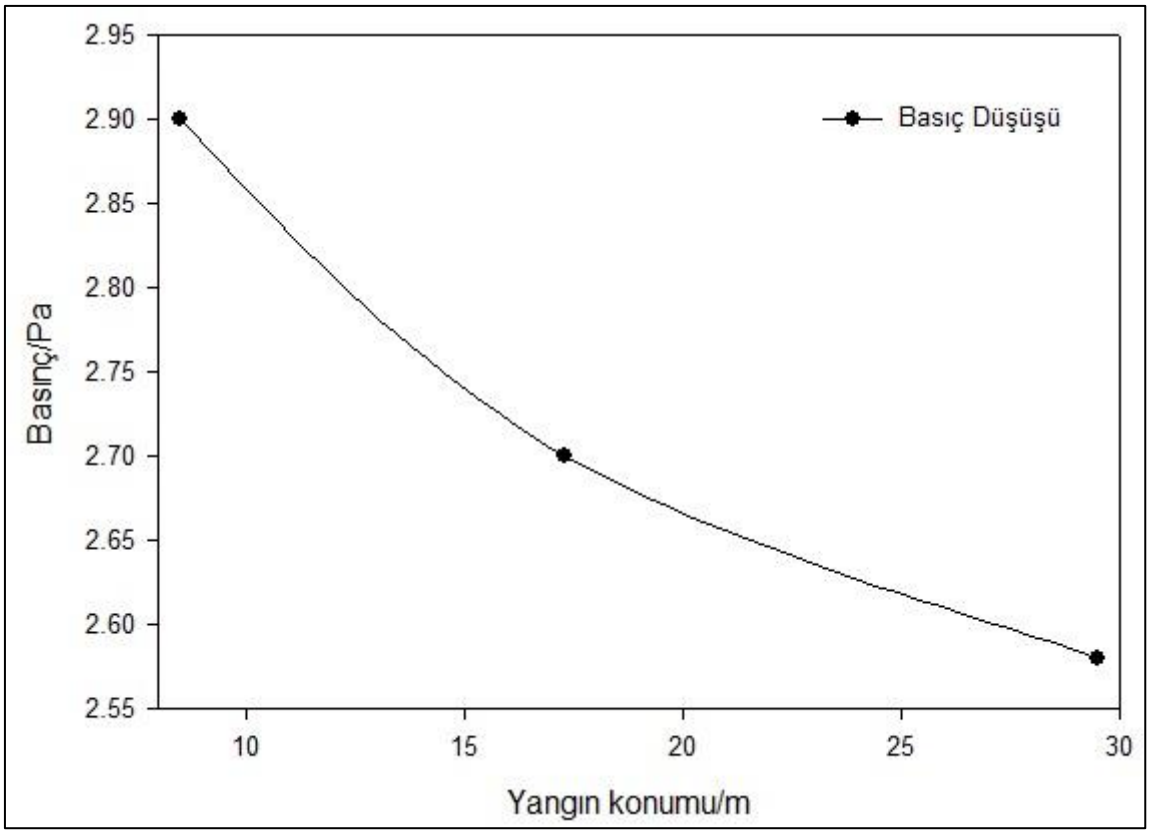
Şekil 11.26. Üçüncü yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları

Tünel içerisinde zeminden 0,248 m yükseklikteki sıcaklık dağılımı Şekil 11.26'da görüldüğü gibi 42. saniyeye kadar 420 K değerini aşmazken, 42. Saniyeden sonra 500 K değerine kadar yükselmiştir.



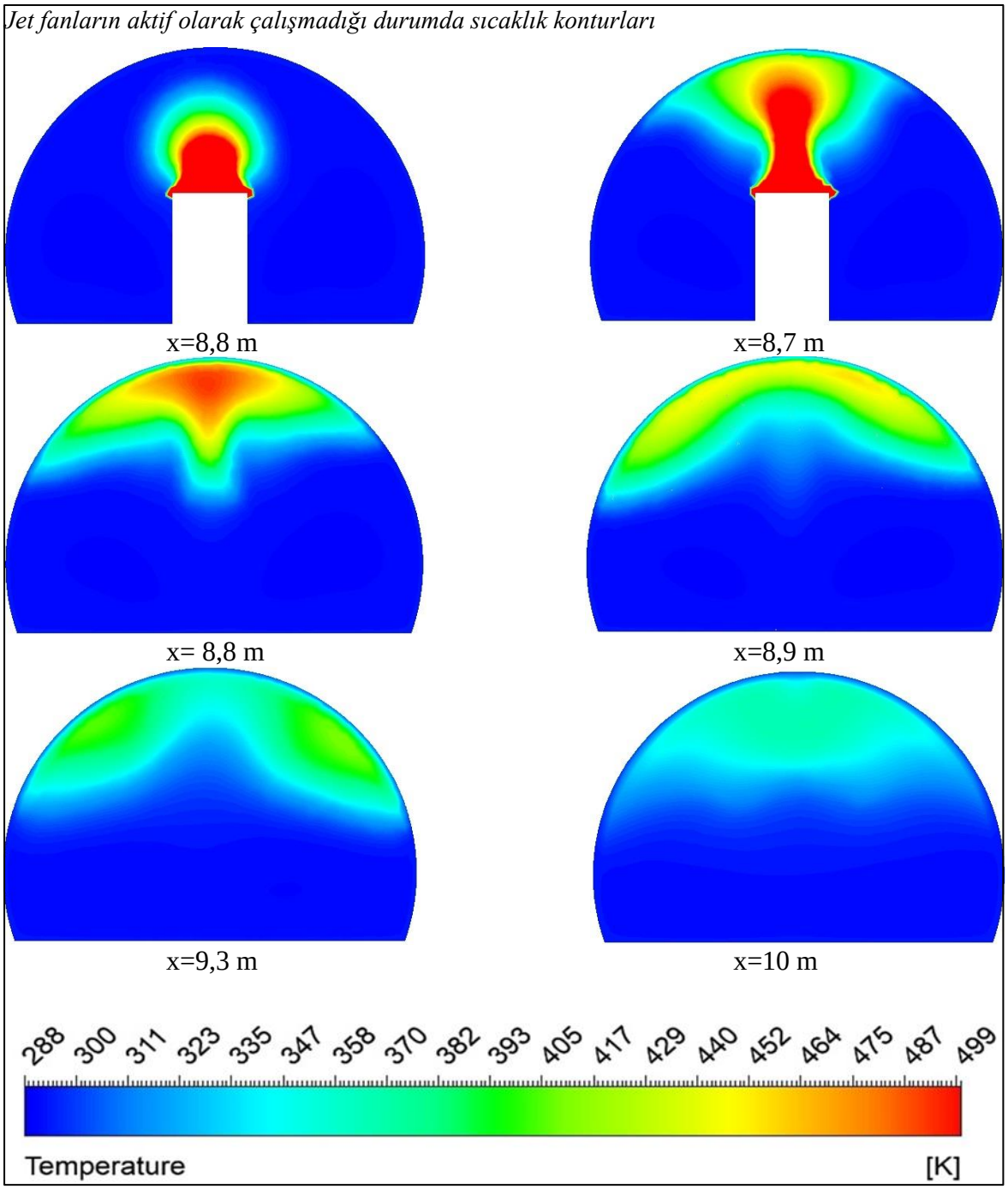
Şekil 11.27. Jet fan etrafındaki basınç dağılımı

Tünel içeresinde akış karakteristiğini yorumlayabilmek için basınç değişimi bilmek oldukça önemlidir. Jet fan giriş bölgesindeki emme etkisinden dolayı basınç değeri düşer. Şekil 11.27'de de görüldüğü gibi jet fan girişinde basınç değeri minimumdur. Jet fanlarda akış düzeni; geçiş aşaması, yayılma aşaması ve gelişmiş aşama olarak üçe ayrılmaktadır (Mutama ve Hall, 1996). Geçiş aşamasında akış çizgileri jet fanların altında birbirinden ayrılır ve havanın bir kısmı jet fanlar tarafından emilir, böylece akım hızı azalır. Yayılma aşamasında basıncı artmaya başlar ve bu artışın hızı gelişmiş aşamaya kadar daha yavaş bir hızda devam eder. Gelişmiş aşamada ise akış üniform hale gelir ve bu noktalarda basınç değerlerinde değişme olması beklenmez.



Şekil 11.28. Farklı konumlardaki yangın senaryoları için basınç düşüşü grafiği

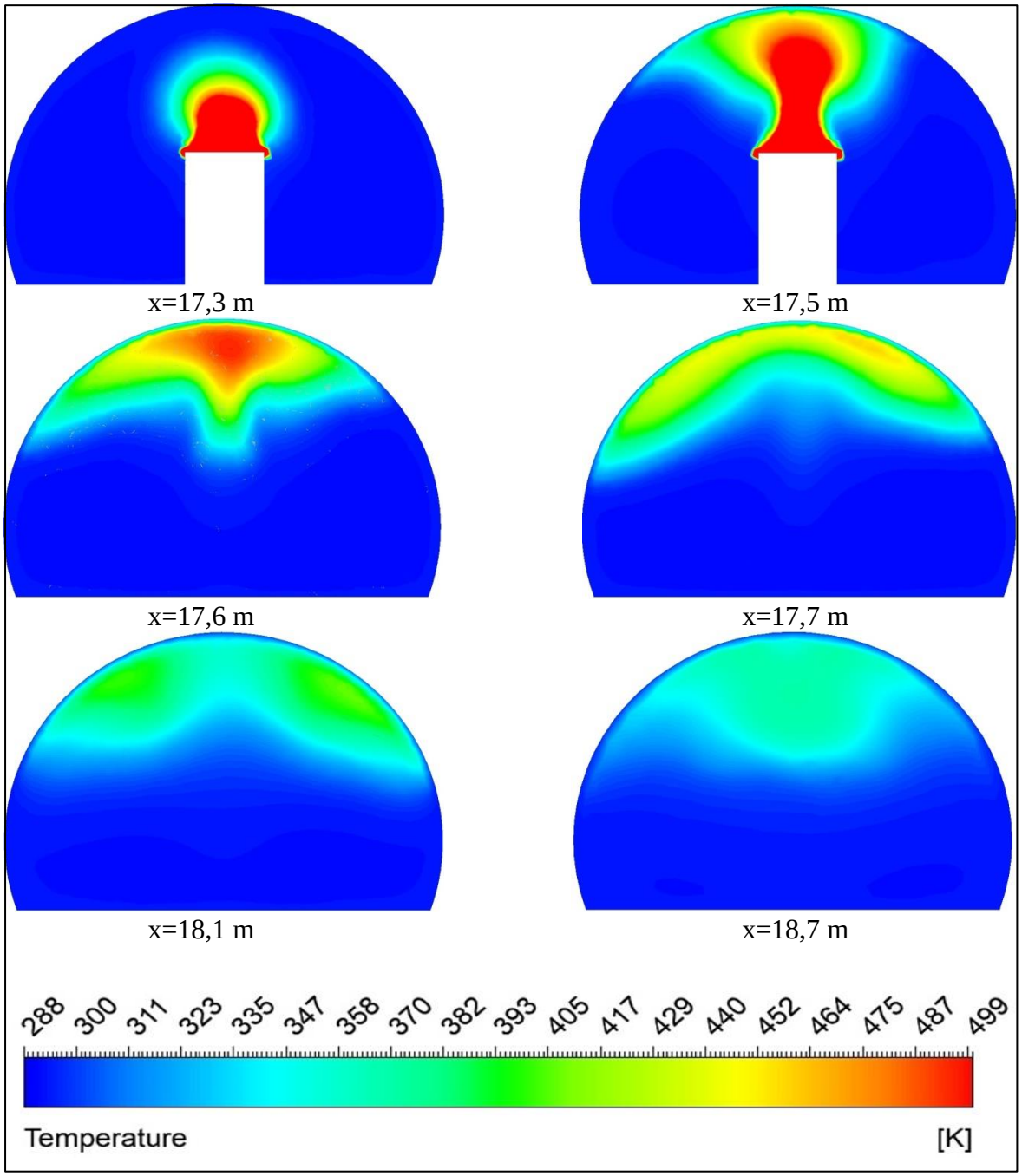
Yangının meydana geldiği birinci yangın senaryosunda basınç düşüşünün en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Şekil 11.28'de, üçüncü yangın konumuna doğru ilerledikçe basınç değerinin 2,6 Pa kadar düştüğü görülmektedir.



Şekil 11.29. Jet fanların çalışmadığı durumda birinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn)

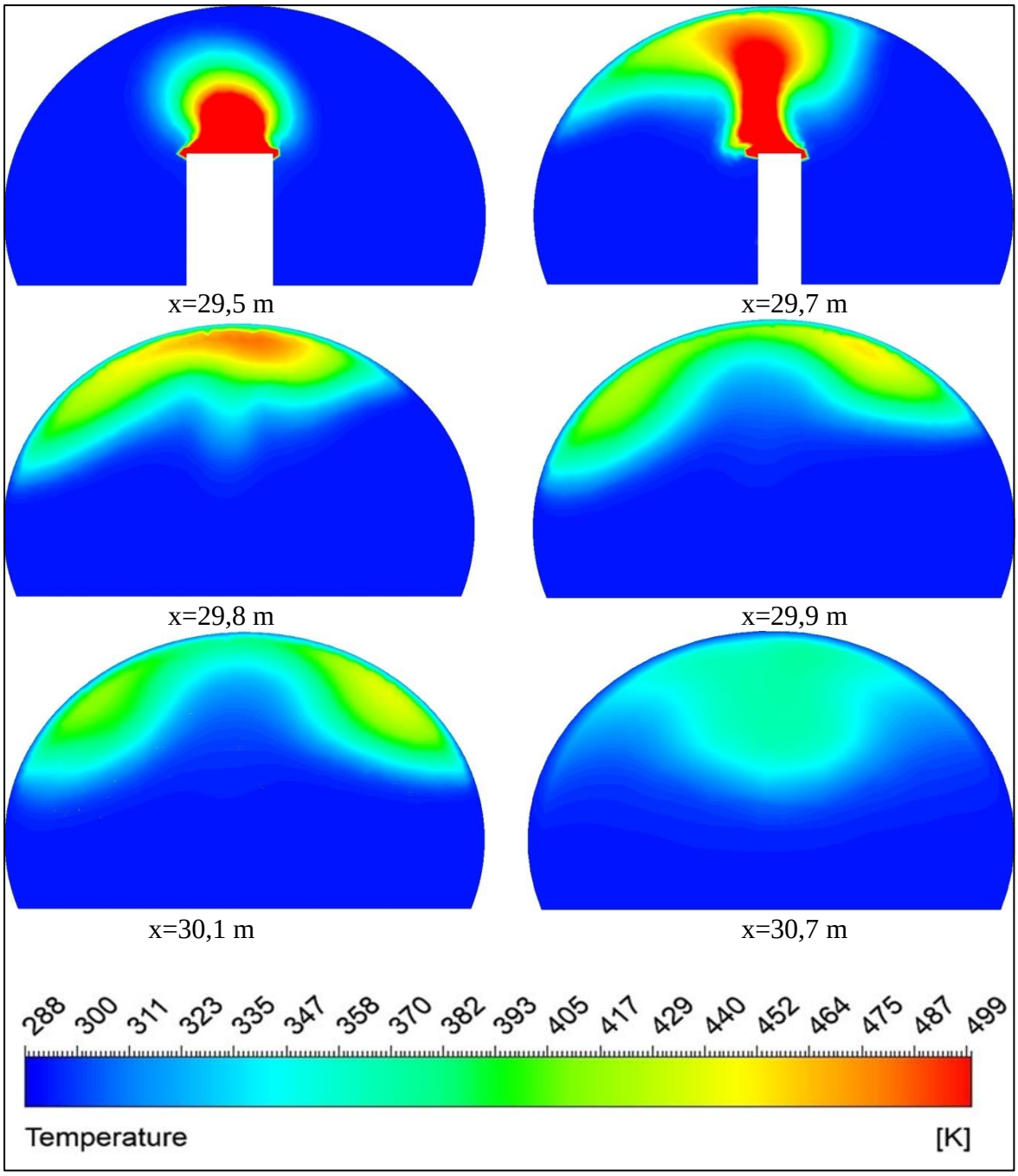
Jet fanların etkisinin ihmal edildiği birinci yangın bölgesinde sıcaklık konturlerine bakıldığında (Şekil 11.29), jet fanların kullanıldığı durumla (Şekil 11.4) oldukça benzer konturlara sahip olduğu görülmektedir. Birinci yangın bölgesinde duman iki jet fan grubu tarafından emildiği için Coanda etkisine maruz kalmamaktadır. Ayrıca birinci yangın bölgesinde yangın kaynağı eğrilik yarıçapının en düşük olduğu konumdadır. Bu gibi nedenlerden dolayı duman dış duvara doğru hareket etmemiştir. x=9,3 m incelediğinde

dumanın iç ve dış duvar yönünde daha fazla yayıldığı görülmektedir. Bu kesitin ortasındaki sıcaklık değeri iç ve dış duvara göre daha düşüktür. Jet fanların kullanıldığı durumda (Şekil 11.4) ise x=9,3 m'de sıcaklık dağılımı tavandan tabana doğru kademeli olarak azalmaktadır.



Şekil 11.30. Jet fanların çalışmadığı durumda ikinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn)

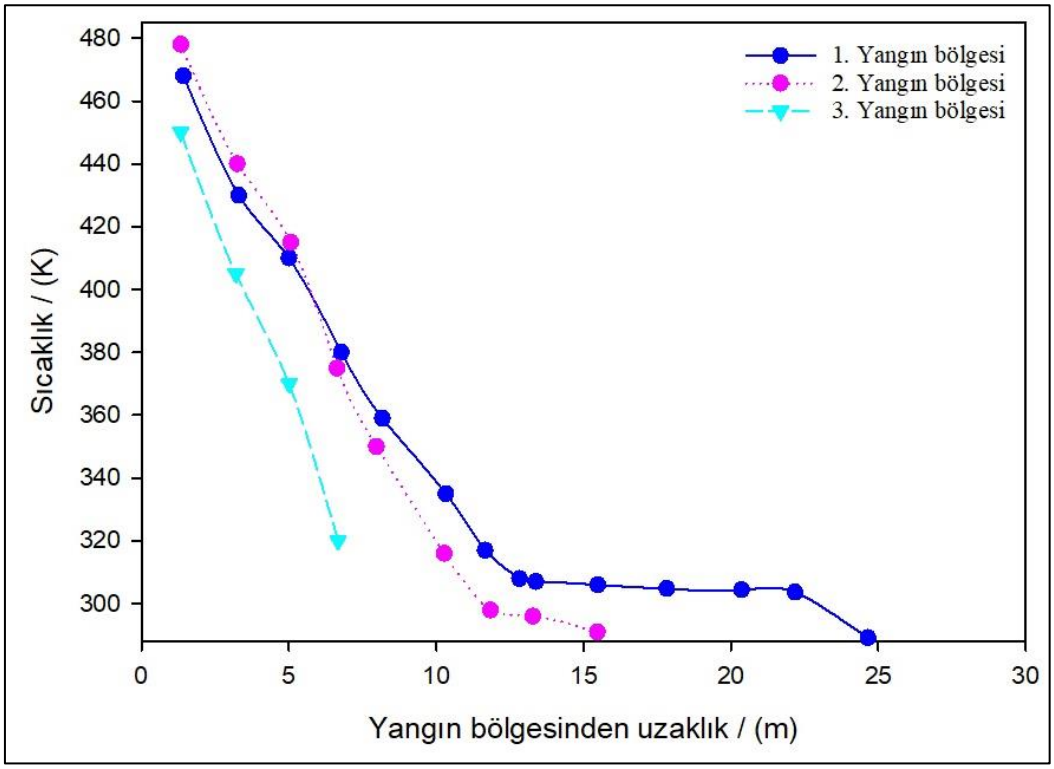
Jet fanların çalışmadığı durumda (Şekil 11.30) ikinci yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde x=17,3 m ve x=17,5 m'deki alevin dış duvar yönüne hareket etmediği görülmektedir. Jet fanların çalıştığı ikinci yangın senaryosunda 2. jet fan grubu yangın üzerine taze hava iletmektedir. İletilen taze hava iç duvar tarafında ilerleyip alevi dış duvara itmiştir. Bu etki jet fanlar kullanılmadığı durumda görülmemiştir. Duman sadece kritik hız tarafından itildiği için tünel tavanı jet fan kullanılan duruma göre daha fazla sürede yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır. Şekil 11.30'da görüldüğü gibi x=17,7 m'de tünel tavanı yaklaşık 475 K değerindedir. x=18,1 m'de iç duvar ve dış duvar tarafına yakın bölgelerde sıcaklık değerleri 417 K değerine yakındır. Jet fan kullanılan duruma göre yangın bölgesine yakın kesitlerde sıcaklık değerleri daha yüksektir. Bunun nedeni jet fanların aktif olarak kullanıldığı durumda, 2. jet fan grubu yangın bölgesine temiz ve soğuk hava iletmektedir. Yangın bölgesi üzerine iletilen soğuk hava dumanın sıcaklığını düşürmektedir. Bu nedenle tünel tavanı üzerindeki sıcaklık dağılımı düşmektedir.



Şekil 11.31. Jet fanların çalışmadığı durumda üçüncü yangın bölgesinden farklı uzaklıktaki sıcaklık dağılımları (42. sn)

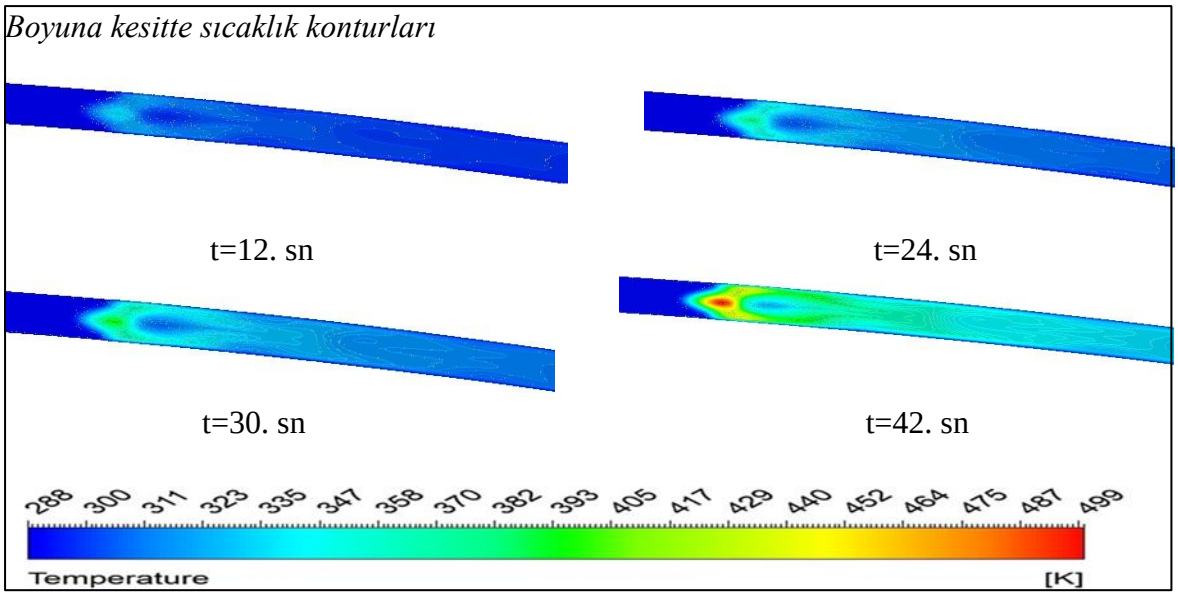
Üçüncü yangın senaryosunda ilk durumda üçüncü ve dördüncü jet fan grubu aktif olarak kullanılırken, üçüncü yangın senaryosunun ikinci durumda ise jet fanların pasif hale getirilmiştir. Jet fanların aktif olarak çalıştığı durumda x=29,5 m'de alev 2 jet fan grubunun itme etkisiyle dış duvar yönüne saparken, bu etki jet fanların kullanılmadığı durumda gözlemlenmemiştir. Üçüncü yangın senaryosu tünel çıkışına yakın bir konumda gerçekleşmiştir. Tünel virajlı bir yapıya sahip olduğu için giriş portalı ve çıkış portalı

arasında z yönünde mesafe vardır. Tünelin virajlı yapısı nedeniyle x=29,7 m'de dış duvar yönünde sapma meydana gelmiştir. Jet fanların aktif olmadığı durumdan alev dik bir şekilde tavana ulaşmıştır (Şekil 11.31).



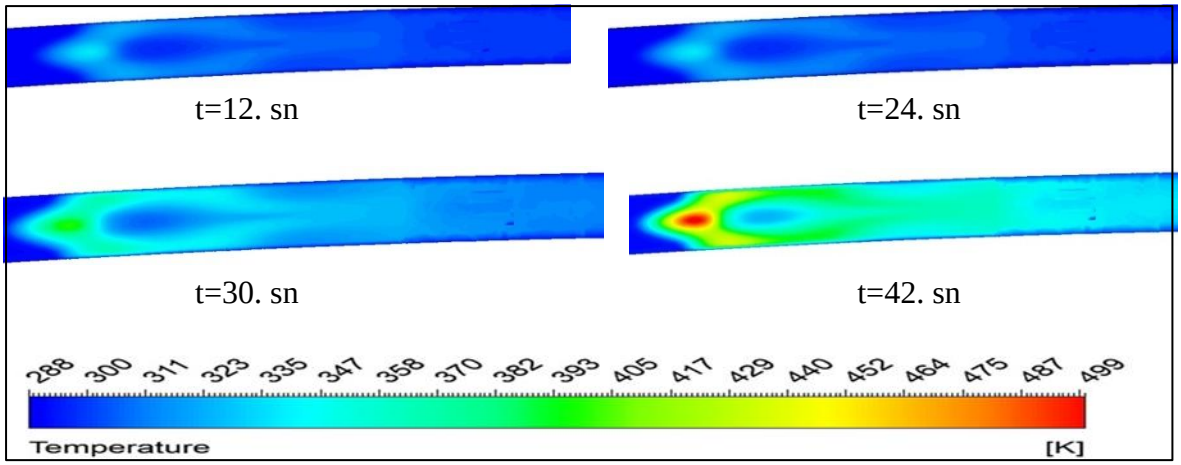
Şekil 11.32. Jet fanların çalışmadığı durumda maksimum tavan sıcaklığı grafiği

Üç farklı bölgede meydana gelen yangınların neden olduğu tavan sıcaklıklarının yangın bölgesinden uzaklığına göre değişimi Şekil 11.32'de verilmiştir. İkinci yangın bölgesindeki ilk sıcaklık değeri birinci yangın bölgesinde daha büyük çıkmıştır. İkinci yangın bölgesinin eğrilik yarıçapının en fazla olduğu noktada meydana geldiği bilinmektedir. Bu noktada sıcak gazların birikmesiyle tavanda daha yüksek değerde sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Eğriliğin maksimum olduğu yerde birinci yangın kaynağından çıkan duman ikinci yangın kaynağındaki duruma benzer şekilde birikme yapmıştır ve bu kesitlerdeki sıcaklık değerleri ikinci yangın senaryosundan daha yüksek çıkmıştır. Üçüncü yangın senaryosunda yangın kaynağı çıkış portalına yakın olması sebebiyle sıcaklık düşüşü diğer durumlara göre daha hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir.



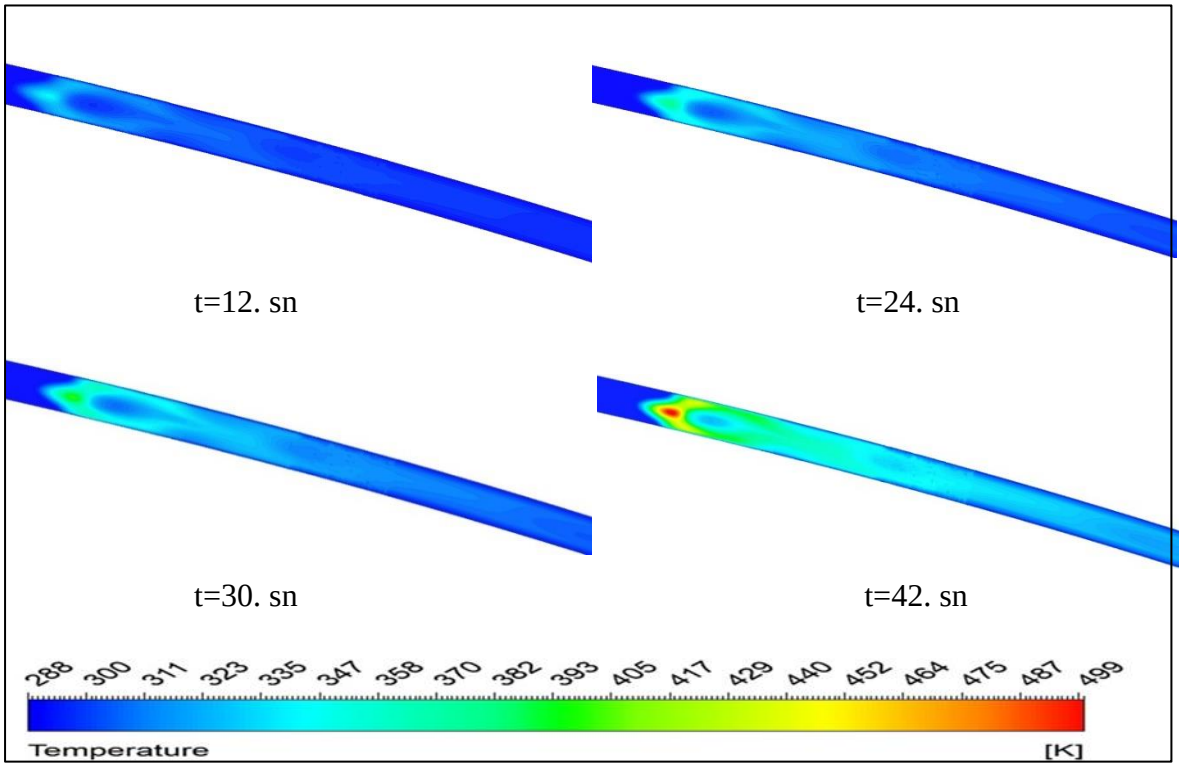
Şekil 11.33. Birinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı (jet fanlar aktif değildir)

Jet fanları aktif olarak çalıştığı birinci yangın senaryosunda duman iki jet fan grubu tarafından emildiği için duman akışında ayırmalar meydana gelmemektedir. Jet fanların aktif olmadığı senaryoda ise duman akışında ayrılmalar meydana gelmiştir. İç ve dış duvar yönünde hareket eden akışkan duvar yüzeylerinde sıcaklığın artmasına neden olmuştur. Şekil 11.33'de görüldüğü gibi t=42. saniyede yangın bölgesine en yakın alanda sıcaklık 450 K değerine kadar çıkmaktadır.



Şekil 11.34. İkinci yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı (jet fanlar aktif değildir)

Jet fanların çalışmadığı ikinci yangın senaryosunda jet fanlara tarafından uygulanan herhangi bir itme veya çekme kuvveti olmadığı için duman tünel duvarlarına doğru yayılmaktadır. t=12. saniyede tavan sıcaklığının (340 K) düşük olduğu görülmektedir. Şekil 11.34'de görüldüğü gibi t=42. saniyede iç duvar ve dış duvarlarda sıcaklık iç bölgeye göre oldukça yüksektir.



Şekil 11.35. Üçüncü yangın senaryosunda zeminden 0,248 m yükseklikte enine kesitte farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı (jet fanlar aktif değildir)

Şekil 11.35’de üçüncü yangın senaryosu için dört farklı zamanda, zeminden 0,248 m yükseklikte, boyuna kesitte sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Yangının gelişme evresinde (t=12. sn, 24. sn, ve 30. sn) dumanının tünel duvarlarına doğru hareket ettiği ayrılmaların daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu bölgelerde sıcaklık da iç bölgelerde daha yüksektir. Çıkış portalına yakın olması nedeniyle enine kesitteki sıcaklık dağılımı aşağı yönlü akışta daha düşüktür.

12. SONUÇ VE ÖNERİLER

Karayollarının bütünleyici bir parçası olan tüneller, aşılması güç yer şekillerinin geçilmesi için oldukça avantajlı yapılardır. Tüneller dağlık bölgelerde ulaşımı kolaylaştırmasının yanı sıra şehir içinde de yoğun trafik yükünü azaltmaktadır. Tünellerin inşa edilme süreci mühendislik problemlerinin temel konuları arasındadır. Tüneller kapalı hacimlere sahip oldukları için açık karayollarına oranla güvenlik konusu daha dikkat çekicidir. Tünel içerisinde zamanla birikecek emisyonun tünel dışına itilmesi veya herhangi bir nedenle tünel içerisinde meydana gelen kaza sonucunda oluşan yangının tahliyesi için tünel havalandırma sistemlerinin ele alınması oldukça önemli konu başlıkları arasındadır.

Giriş kısmında da belirtildiği gibi zorlu coğrafik yapıların daha kolay bir şekilde aşılmasını sağlayabilmek amacıyla virajlı tüneller inşa edilmektedir. Bugüne kadar yapılmış birçok çalışmada araştırmacılar genellikle virajsız (düz) tüneller üzerinde deneysel veya sayısal çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmada 600 m uzunluğunda düz girişe sahip 900 metre uzunluğundaki kısmında ise virajı olan bir tünelin basınç düşüşü, biriken emisyon miktarı analitik hesaplamaları yapılmıştır. Tünelin virajlı kısmında (1500 m yarıçap) meydana gelen 20 MW büyüklüğündeki yangının analizleri yapılmıştır. Analizlerde 1/25 ölçekli model kullanılmıştır ve verilen tüm sonuçlar ölçekli model referans alınarak yazılmıştır. Analizi yapılan tünel içerisinde on adet geleneksel jet fan ikişerli gruplar halinde sıralanmıştır.

Analizler gerçekleştirilirken öncelikli olarak jet fanların aktif olarak çalıştırıldığı durum dikkate alınmıştır. Tünel girişinden yatayda 3 farklı mesafede meydana gelen yangınların etkileri incelenmiştir. Birinci yangın durumunda duman 2 farklı jet fan grubu tarafından emilmektedir. Yangın kaynağından yayılan kirli ve sıcak duman jet fanlar aracılığıyla tünel dışına itilmektedir. Bu senaryoda yangın kaynağı tünelin giriş portalına yakın kısmındadır ve bu nedenle alev dış duvara doğru eğim yapmamaktadır. İkinci yangın senaryosunda 2. ve 4. jet fan grupları arasında yangın meydana gelmektedir. 2. jet fan grubu tarafından yangın kaynağının üzerine soğuk ve temiz hava aktarılırken, 4. jet fan grubu tarafından hem sıcak ve kirli hava çekilir hem de 2. jet fan grubunun sağlamış olduğu soğuk ve temiz hava çekilmektedir. Karışıma uğrayan sıcak hava ve soğuk hava 4. jet fan grubuyla dışarıya iletilirken daha düşük sıcaklık dağılımları elde edilir. Üçüncü yangın

senaryosunda ise yangın kaynağı üzerine iki jet fan grubu tarafından soğuk ve temiz hava sağlanmaktadır. Bu nedenle gerek çıkışa en yakın konumda olması gerekse 2 jet fan grubu tarafından soğuk havaya maruz kalması nedeniyle tünel içerisinde tavan bölgesindeki sıcaklık düşüşü en yüksek olan yangın senaryosudur.

Jet fanların aktif olarak çalıştığı yangın senaryolarında yangın kaynağına yerlerde gazların genleşmesiyle hız değerinin kritik değeri üzerine çıktığı görülmüştür. Ayrıca yangın kaynağına yakın kesitlerde merkezdeki dik hız profillerinin ulaştığı değerin sağdaki ve soldaki hız profillerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu kesitlerde yangın kaynağı blokaj etkisi yapar ve kesitte daralmaya neden olur. Daralmanın meydana geldiği iç duvar ve dış duvar bölgelerinde hız değeri artmaktadır.

Tünel içerisindeki sıcaklık dağılımının 42. saniyede en yüksek seviyeye ulaştığı görülmüştür. 42. saniyeden sonra ise yangının 180. saniyeye kadar kararlı şekilde devam ettiği görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde (Berberoğlu, 2008), sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişiminin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Tünel yangınlarında duman karakteristiği hakkında yorum yapabilmek için gerçekleştirilen analizlerin ikinci kısmında jet fanların çalışmadığı durum ele alınmıştır. Bu analizlerde de 3 farklı yangın bölgesi (jet fan kullanılarak yapılan analizlerdeki aynı bölgeler) ele alınmıştır. Jet fan kullanılan bölgelerde özellikle dumanın çekilmesiyle (emme etkisi) dumanının tavan bölgesi etrafında düzgün yayıldığı gözlemlenirken jet fan etksinin olmadığı yangın senaryolarında dumanın iç duvar ve dış duvar tarafında yayılarak sıcaklık artışına neden olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada geleneksel jet fanlar kullanılmıştır. Bölüm 9.4’de ifade edildiği üzere jet fanlardan çıkan akış Coanda etkisine girer ve kesme kuvvetlerinin artmasına neden olur. Bu kesme kuvvetlerinin olumsuz sonuçlarını engellemek amacıyla farklı eğim açılarına sahip alternatif jet fanların analizi yapılabilir. En uygun eğim açısına sahip alternatif jet fan etkisinde duvar kesme kuvvetlerinin en az seviyede olması beklenir.

Yapılan çalışma sadece sayısal hesaplamaları içermektedir. Çalışmanın mutlaka ölçekli veya ölçeksiz modelde deneysel olarak doğrulanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Atkinson, G. and Wu, Y. (1996). Smoke control in sloping tunnels. *Fire Safety Journal*, 335-341.

Aytaç, Z. ve İlkılıç, C. (2019). *Dizel motorlarında zararlı egzoz emisyonlarının azaltılmasının araştırılması*. 4. International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences, Samsun, 520-528.

Berberoğlu, M. İ. (2008). *Yeraltı raylı taşıma sistemi istasyonu için yangın modellemesi ve simülasyonu.* Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 54-57.

Betta, V., Cascetta, F., Musto, M. and Rotondo, G. (2009). Numerical study of the optimization of the pitch angle of an alternative jet fan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 164-172.

Betta, V., Cascetta, F., Musto, M. and Rotondo, G. (2010). Fluid dynamic performance of traditional and alternative jet fans in longitudinal tunnel ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 164-172.

Blanchard, E., Boulet, P., Desanghere, S., Vantelon, J. and Garo, J. (2014). Experimental and numerical study of the ınteraction between water mist and fire in an ıntermediate test tunnel. *Fire Technology*, 50, 565-587.

Brahim, K., Mourad, B., Afif, E. and Ali, B. (2010). Control of smoke flow in a tunnel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 25(4), 49-60.

Camby, M., Se, E., Lee, W. and Lai, A. (2012). Impact of location of jet fan on airflow structure in tunnel fire. *Tunneling and Underground Space Technology*, 27(1), 30-40.

Cascetta, F., Musto, M. and Rotondo, G. (2016). Innovative experimental reduced scale model of road tunnel equipped with realistic longitudinal ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, 85-98.

Chen, T., Zhou, D., Lu, Z., Li, Y., Xu, Z. and Wang, B. (2021). Study of the applicability and optimal arrangement of alternative jet fans in curved road tunnel complexes. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*,, 108, 1-9.

Chowdhury, H., Juwono, R., Zaid, M., Islam, R., Loganathan, B. and Alam, F. (2019). An experimental study on of the effect of various deflectors used for light trucks in Indian subcontinent. *Energy Procedia*, 160, 34-39.

Deberteix, P., Gabay, D. and Blay, D. (2001). Experimental study of fire-induced smoke propagation in a tunnel in the presence of longitudinal ventilation. *Proceedings of the International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, 23(2), 257-265.

Dinler , N. and Kaçan, Ö. (2020). Emergency simulation in a long highway tunnel. *Journal of Thermal Science and Technology* , 40(2), 319-334.

Fan, C., Ji, J. and Sun, J. (2016). Experimental study on tunnel fire behaviors under natural ventilation using shafts. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 8* , 57-60.

Fehérvári, S. (2008). Characteristic of tunnel fires. *Concrete Structure*, 1, 55-60.

FLUENT Theory Guide. (2009).

Guo, J., Cai, G., Liu, Y. and Yan, J. (2021). Temperature distribution and characteristics induced by fire smoke in L-shaped utility tunnels with small curvature radii. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 1-13.

Hassan, R., Islam, T., Ali, M. and Islam, M. (2014). Numerical Study on aerodynamic drag reduction of racing cars. *Procedia Engineering*, 90, 308-313.

Heselden, A. (1976). *Studies of fre and smoke behaviour relevant to tunnel on the aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels.* Proceedings of the 2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Cambridge, UK.

Hinkley, P. (1970). The flow of hot gases along an enclosed shopping mall a tentative theory. *Fire Safety Science*, 807, 1-6.

Ignason, H., Li, Y.Z. and Lönnermark, A. (2015). Tunnel fire dynamics. *Springer Science Business Media New York*, 1, 372-384.

Ingason, H. and Li, Y. (2010). Maximum ceiling temperature in a tunnel fire. *SP Technical Research Institute of Sweden.* 51, 1-74.

Ingason, H. and Lönnermark , A. (2007). The effect of cross-sectional area and air velocity on the conditions in a tunnel during a fire. *SP Technical Research Institute of Sweden*, 5, 1-94.

Ingason, H. and Seco, F. (2005), Numerical simulation of a model scale tunnel fire test. SP Swedish National Testing and Research Institute, 47, 1-35.

İnternet: Maden Türk URL:http://madenturk.org/forum/index.php?topic=422.0;wap2, Son Erişim Tarihi: 8.07.222.

İnternet: NBC News URL:https://www.nbcnews.com/id/wbna24318492, Son Erişim Tarihi: 8.07.222.

İnternet: Ray Haber URL: https://rayhaber.com/2019/05/sabuncubeli-tunelinde-yangin-ve-kaza-tatbikati/, Son Erişim Tarihi: 8.07.222.

İnternet: Resmi Gazete URL:https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/08/20150804-10.htm, Son Erişim Tarihi: 8.07.222.

İnternet: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM] URL: https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/KopruveTunelBilgileri/kopruenvanterbilgileri.pdf, Son Erişim Tarihi: 8.07.222.

Jiang, X., Liao, X., Chen, S., Wang, J. and Zhang, S. (2018). An experimental study on plug-holing in tunnel fire with central smoke extraction. *Applied Thermal Engineering*, 138, 840-848.

Kaçan, Ö. (2019). *Uzun bir karayolu tünelinde havalandırma sistemi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Karaalan, S., Dinler, N. ve Yücel, N. (2011). Metro istasyonunda farklı yanma modelleri kullanarak yangın simülasyonu. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(3), 533-547.

Karluk, R. (2014). *Türkiye Ekonomisi: Cumhuriyet'in İlanından Günümüze Yapısal Dönüşüm (Birinci Baskı).* İstanbul: Beta Basım Yayım, 38-39.

KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, (1997). *Karayolu Tüneli Uygulama Projesi Teknik Şartnamesi*. KGM Matbaası, Ankara, 1-27.

KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) Tesisler ve Bakım Dairesi Başkanlığı, (2016). *Karayolu Tüneli Uygulama Projesi Teknik Şartnamesi*, KGM Matbaası, Ankara, 274-275.

KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) Tesisler ve Bakım Dairesi Başkanlığı, (2016). *Devlet Yolları Trafik Akımı Özellikleri ve Trafik Parametreleri*, KGM Matbaası, Ankara, 1-68.

Khieu, H., Lee, Y., Kim, J. and Ryou, H. (2020). Numerical study of the effects of the jet fan speed, heat release rate and aspect ratio on smoke movement in tunnel fires. *Energies*, 13(5), 1-16.

Klote, J. and Milke, J. (1992). *Design of smoke managment systems* (First edition). Bellingham: NBS Handbook, 89.

Ko, G. H., Kim, S. R. and Ryou, S. H. (2010). An experimental study on the effect of slope on the critical velocity in tunnel fires. *Fire Science Journal*, 28(1), 27-47.

Król, A. and Król, M. (2018). Study on numerical modeling of jet fans. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 222-235.

Launder, B. and Spalding , D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.

Lee, P. Y. and Tsai, C. K. (2012). Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire. *Fire Safety Journal*, 53, 35-42.

Lee, S. and Ryou, H. (2005). An experimental study of the effect of the aspect ratio on the critical velocity in longitudinal ventilation tunnel fires. *Journal of Fire Science*, 23(2), 119-138.

Lee, S.-C., Lee, S. and Lee, J. (2013). CFD Analysis on ventilation characteristics of jet fan with different pitch angle. *Tunnelling and Underground Space Construction for Sustainable Development*, 18, 812-818.

Li, Y., Li, Y., Feng, X. and Huang, Y. (2018). Influence of arrangement of jet fans on smoke exhaust effect in a tunnel with longitudinal ventilation system. *Procedia Engineering*, 211, 421-426.

Li, Z. Y. and Ingason, H. (2010). Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 45(6-8), 371-384.

Liu, H., Zhu, G., Pan, R., Yu, M. and Liang, Z. (2019). Experimental investigation of fire temperature distribution and ceiling temperature prediction in closed utility tunnel. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 1-6.

Liu, W., Wim, H., Eyerman, S., Akram, S. and Eeckhout, L. (2021). Scale-model simulation. *IEEE Computer Architecture Letters*, 1, 175-178.

Liu, Y., Fang, Z., Tang, Z., Beji, T. and Merci, B. (2020). Analysis of experimental data on the effect of fire source elevation on fire and smoke dynamics and the critical velocity in a tunnel with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 114, 1-16.

Lou, B., Rifu, Q., Hu, E., Jiyun, Q. and Zhenwen, H. (2020). Influence of tunnel curvature on smoke spread in a tunnel fire. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 43(4), 386-396.

MOSEN (2017). *Preliminary tunnel fire ventilation calculations.*

Musto , M. and Rotondo, G. (2014). Numerical comparison of performance between traditional and alternative jet fans in tiled tunnel in emergency ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 114, 52-58.

Musto, M. and Rotondo, G. (2015). CFD analysis of a realistic reduced-scale modeling equipped with axial. *Fire Safety Journal*, 74, 11-24.

Mutama , K. and Hall, A. (1996). The Experimental Investigation of Jet Fan Aerodynamics Using Wind Tunnel Modeling. *Journal of Fluid Enginering ASME*, 118(2), 322-328.

Oka, Y. and Atkinson, G. (1995). Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 25(2), 305-322.

Perrino, C., Marcovecchio, F., Tofful , L. and Canepari, (2015). Particulate matter concentration and chemical composition in the metro system of Rome, Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 9204–9214.

Peter, F. (2009). The causes effects and control of real tunnel fires. *Prüfstelle f. Brandschutztechnik*, 118, 1-14.

PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (1991). *Fire in Road Tunnels: Protection for Civil Engineering Structures, Electrical Circuits and Equipment.* PIARC Committee on Road Tunnels, Paris, 55-68.

PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2007). *Road Tunnels: Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels.* PIARC Technical Committee 3.3 on Road Tunnels Operations, Paris, 258-285.

PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2017). *Road Tunnels: (2017R02EN) Design Fire Characteristics for Road Tunnels.* PIARC Technical Committee 3.3 on Road Tunnels Operations, Paris, 3-64.

PIARC (Permanent International Association of Road Congress). (2019*). Road Tunnels: (2019R02EN) Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation.* PIARC Technical Committee D.5 on Road Tunnels, Paris, 3-61.

Poreh, M., Marshall, N. and Regev, A. (2008). Entrainment by adhered two-dimensional plumes. *Fire Safety Journal* , 43(5), 344-350.

Sağlık Bakanlığı. (2011). *Temel İlkyardım Uygulamaları Eğitim Kitabı.* Ankara: T.C. Sağlık Bakanlığı Genel Müdürlüğü, 7.

Se, C., Lee, E. and Lai, A. (2012). Impact of location of jet fan on airflow structure in tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), 30-40.

Shih, T., Liou, W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu , J. (1995). A new k-e eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Compturers Fluids*, 24, 227-238.

Systemair. (2019). Systemair Product Catalogue, 1-20.

Systemair. (2021).Tunnel Ventilation Business Area Tunnel Fans, 1-28.

Thomas, P.H. (1968). The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, *Fire Research Station Notes*, 1, 719-723.

Tian, X., Zhong, M., Shi, C., Zhang, P. and Liu, C. (2017). Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends. *Applied Thermal Engineering*, 116, 233-243.

TMMOB, Türkiye Mühendis ve Mimar Odalar Birliği (1999). *Bacagazı Emisyon Ölçümü Mühendis El Kitabı.* Ankara:TBMMOB Matbaası, 80-85.

Toprak, A. (2014). *CFD Application of a metro tunnel fire safety and emergency ventilation systems.* Master's Thesis, Marmara University Department of Mechanical Engineering, İstanbul.

Tu, J., Yeoh, G.H. and Liu, C. (2007). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* (Second Edition). Sweden:Elsevier Science, 1-20.

Vantelon, J., Guelzim, A., Quach, D., Son , D., Gabay, D. and Dallest, D. (1991). *Investigation of fire ınduced smoke movement in tunnels and stations: an application to the paris metro*. Edinburg: Fire Safety Science-Proceedings of the Third International symposium., 3, 907–918.

Vauquelin, O. and Wu , Y. (2006). Influence of tunnel width on longitudinal smoke control. *Fire Safety Journal*, 41(6), 420–426.

Versteeg, H., and Malalasekara, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (Second Edition). Edinburgh:Pearson, 66-343.

Wang, F., Wang, M., He , S. and Deng, Y. (2011). Computational study of effects of traffic force on the ventilation in highway curved tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(3), 481-489.

Wang, J., Nie, Q., Fang, Z. and Tang, Z. (2018). CFD Simulations of the ınteraction of the water mist zone and tunnel fire smoke in reduced-scale experiments. *Procedia Engineering*, 211, 726-735.

Weng, M., Lu, X., Liu, F., Shi, X., and Yu, L. (2015). Prediction of backlayering length and critical velocity in metro tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47, 64-72.

Wu, Y. and Bakar, M. (2000). Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity . *Fire Safety Journal* , 35(4), 363-390.

Yi, L., Xu, Q., Xu, Z. and Dexing, X. (2011). An experimental study on critical velocity in sloping tunnel with longitudinal ventilation under fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 198-203.

Yin, M., Hu, H., Wu, K., Wei, Y., Zhang, X. and Zhu, K., (2021). Computational study on effects of jet fans to traffic force in highway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 118, 1-14.

Yu, L., Liu, F., Liu, Y., Weng, M. and Liao, S. (2017). Experimental study on thermal and smoke control using transverse ventilation in a sloping urban traffic link tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 81-93.

Yuan, Z. and Lei, B. (2015). Experimental and theoretical study for tunnel fires with natural ventilation. *Fire Technology*, 51, 691-706.

Zhao, W., Ouyang, R., Ran, Q., Chen, T., Xu, Z. and Zou, M., (2021). An experimental study on smoke back-layering and critical velocity in tunnel fires with canyon cross wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209, 1-13.

EKLER

EK-1. Deney değerleri (H. Ingason ve F. Seco, 2005)

Test no	Hava hızı (m/s)	Şaft Yükseklik/genişlik/uzunluk (m/m/m)	Şaft Sayısı	Yangın Kaynağı (m x m)	Ortalama Kütle m_f (g/s)	Q (kW)
01	0	1/0,4/0,4	3	0,33x0,33	0,97	38,3
02	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,07	42,3
03	0	3/0,4/0,4	--- ” ---	--- ” ---	0,83	32,7
04	0,5	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	0,78	30,9
05	0,75	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	0,76	29,9
06	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,04	40,9
07	0	--- ” ---	--- ” ---	0,4 x 0,4	1,35	53,4
08	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,39	54,9
09	0,75	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,27	50,3
10	0,5	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,18	46,6
11	0,5	3/0,4/0,4	1	--- ” ---	1,23	48,7
12	0,75	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,24	49,0
13	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,49	59,0
14	0	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,82	71,9
15	0,5	3/0,2/0,2	--- ” ---	--- ” ---	1,22	48,3
16	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,77	70,0
17	0	closed	0	--- ” ---	2,01	79,4
18	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,45	57,4
19	0,75	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,25	49,2
20	0,5	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,31	51,8
21	0	--- ” ---	--- ” ---	0,33x0,33	0,86	33,9
22	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,04	41,0
23	0,75	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	0,76	29,9
24	0,5	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	0,77	30,3
25	0,5	3/0,6/0,6	--- ” ---	0,4 x 0,4	1,30	51,3
26	1	--- ” ---	--- ” ---	--- ” ---	1,41	55,9
Test no	Hava hızı (m/s)	Şaft Yükseklik/genişlik/uzunluk (m/m/m)	Havalandırma hızı (m^3/s)	Yangın Kaynağı (m x m)	Ortalama Kütle m_f (g/s)	Q (kW)
27	0	2/0,6/0,6	2	0,4 x 0,4	1,56	61,62
28	0	--- ” ---	2,7	--- ” ---	1,14	45,03
29	1	--- ” ---	2,7	--- ” ---	1,51	59,64
30	1	--- ” ---	1,56	--- ” ---	1,43	56,49
31	1	--- ” ---	2	--- ” ---	1,42	56,09
32	1	--- ” ---	2,3	--- ” ---	1,63	64,39
33	0,5	--- ” ---	2	--- ” ---	1,35	53,33
34	1	--- ” ---	2,7	--- ” ---	1,50	59,25
35	2	--- ” ---	2	--- ” ---	1,89	74,26
36	2	--- ” ---	2,7	--- ” ---	1,87	73,87

EK-2. KGM tarafından belirlenen tahmini YOGT verileri

Yıllar	Otomobil	Hafif Yüklü Ticari Taşıt	Otobüs	Kamyon	Kamyon, Römork, Çekici, Yarı Römork	Toplam
2015	3 187	254	65	528	382	4 416
2016	3 442	262	67	544	458	4 773
2017	3 718	270	69	561	550	5 168
2018	4 015	278	71	577	660	5 601
2019	4 336	286	73	595	792	6 082
2020	4 683	298	75	607	872	6 535
2021	5 056	304	77	619	959	7 015
2022	5 463	313	80	631	1 054	7 541
2023	5 900	322	82	644	1 160	8 108
2024	6 372	332	85	657	1 276	8 722
2025	6 754	342	87	663	1 340	9 186
2026	7 159	352	90	670	1 407	9 678
2027	7 589	363	92	677	1 477	10 198
2028	8 040	374	95	683	1 551	10 743
2029	8 527	385	98	690	1 628	11 328
2030	9 038	396	102	694	1 661	11 891
2031	9 581	408	104	697	1 694	12 484
2032	10 156	420	107	701	1 728	13 112
2033	10 765	433	110	704	1 763	13 755
2034	11 411	446	114	708	1 798	14 477
2035	12 095	455	116	708	1 816	15 190
2036	12 821	464	118	709	1 834	15 946
2037	13 590	473	121	710	1 852	16 746
2038	14 406	483	123	710	1 871	17 593
2039	15 270	492	126	711	1 890	18 489
2040	16 186	502	128	712	1 909	19 437
2041	17 158	512	130	712	1 928	20 440
2042	18 187	523	133	713	1 947	21 503
2043	19 278	533	136	714	1 966	22 627
2044	20 435	544	138	715	1 986	23 818
2045	21 661	555	141	715	2 006	

Gazili olmak ayrıcalıktır