

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METRO İSTASYONLARI VE TÜNELLERİNDE**  
**YANGIN VE TEDBİRLERİNİN ANALİZİ**

**ÖMER YAZICI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**

**2013**

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METRO İSTASYONLARI VE TÜNELLERİNDE**  
**YANGIN VE TEDBİRLERİNİN ANALİZİ**

**ÖMER YAZICI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**YRD. DOÇ. DR. İLYAS KANDEMİR**

**GEBZE**  
**2013**



GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ  
ENSTİTÜSÜ

## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/06/2013 tarih ve 2013/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/07/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan **Ömer YAZICI**'nin tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Alaattin Metin KAYA

### ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Bu çalışmada metro istasyonları ve tünellerinde olabilecek yangın durumları ve önleyici tedbirler incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında yangın hakkında genel bilgi verilmiş, yangınların özellikleri ve gelişme safhalarından bahsedilmiştir. Metro istasyonu ve tünel yangınlarının tarihçesi hakkında kısaca bilgi verilmiş, bu yangınların nedenleri ve sonuçları üzerinde durulmuş, havalandırmanın öneminden bahsedilmiş ve bununla ilgili uluslararası standartlarda belirtilen tasarım kriterleri ile ilgili bilgi verilmiştir.

İkinci aşamada Ümraniye Metrosuna ait örnek bir istasyon model alınarak bu istasyon ve istasyona bağlı tünellerde olabilecek yangın durumlarının ayrı ayrı senaryoları oluşturulmuş ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS CFX programı yardımıyla çözümlenmiştir. Simülasyon çalışmalarında yangın acil durum havalandırma sistemi kritiğe tabi tutulmuş, istasyon ve tünel geometrisinin yangına etkisi incelenmiştir. Zamana bağlı yapılan simülasyonlarda ise yangının zamanla gelişimi incelenmiştir. Çalışmanın neticesinde istasyon geometrisine yapılan basit bir ilavenin (yangın perdeleri gibi), fan kapasitesini artırmaya nazaran yangının ilerlemesini önlemede daha etkili olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler: Metro Yangınları; Acil Durum Havalandırma Sistemi; Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, ANSYS CFX**

## SUMMARY

In this study, fire cases and fire fighting measures in subway stations and tunnels are studied. At first stage of the study, general information about fires are given, properties of fires and development stages of fire are mentioned. Short informations are given about history of subway stations and tunnel fires, dwelled on causes and results of these fires, mentioned about importance of ventilation and information given about criterias regarding designing mentioned in international standarts.

At second stage, a subway station which is a part of Ümraniye Subway is taken as an example model, different fire scenarios are created for this station and tunnels connected to this station and analyzed with assistance of ANSYS-CFX program which has Computational Fluid Dynamics (CFD) software. In simulation studies, fire emergency ventilation system is criticized, the effect of the geometry of a station and tunel effect on fire is studied. In time dependent simulations related to time, evolutions of fires with time are observed. In the end of the study, it was observed that, a simple addition (like a fire screen) to the geometry of a station is much more effective than increasing the ventilation capacity to stop the propagation of a fire.

**Keywords: Subway Fires; Emergency Ventilation System; Computational Fluid Dynamics; ANSYS CFX**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca her türlü desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR'e ve saygıdeğer bölüm hocalarıma teşekkürlerimi arz ederim.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım A.Ş.'ye ve bu kurumda Kontrol Şefi olarak görev yapan Sayın İbrahim Halil PAKİŐ'e bilgilerini ve deneyimlerini paylaştığı için teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Anadolu Yakası Park ve Bahçeler Müdürlüğü Kalite Kontrol Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarında yöneticimiz olarak görev yapan Sayın Ahmet YÜZBAŐIOĞLU'na ve beraber çalıştığımız mesai arkadaşlarıma da teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca varlığımın sebebi olan Anneme ve Babama, tüm aileme, bana her zaman destek olan kıymetli eşim Ayőe YAZICI'ya ve hayatımızı renklendiren oğlum Faruk Said YAZICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. YANGIN KAVRAMI VE ÖZELLİKLERİ	3
1.1. Yangın Kavramı	3
2.2. Yangın Sırasında Meydana Gelen Isı Transfer Türleri	4
2.2.1. Taşınım (Konveksiyon )	4
2.2.2. Işınım (Radyasyon)	5
2.2.3. İletim (Kondüksiyon)	6
2.3. Yangın Oluşum Evreleri	7
2.3.1. Gelişmekte Olan Yangın Evresi	8
2.3.2. Tam Gelişmiş Yangın Evresi	8
2.3.3. Sönmekte Olan Yangın Evresi	9
2.4. Yangının İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri	9
2.4.1. Sıcaklık	9
2.4.2. Duman	10
2.4.3. Zehirli Gazlar	10
3. METRO YANGINLARI VE HAVALANDIRMA	12
3.1. Metro Yangınlarına Genel Bir Bakış	12
3.2. Metro Yangınlarının Tarihçesi	13
3.3. Literatür Araştırması	15
3.4. Metro İstasyonlarında Havalandırma	16

3.4.1. Doğal Havalandırma	16
3.4.2 Mekanik (Zorlanmış) Havalandırma	17
3.4.3. Acil Durum Havalandırması	19
3.4.4. Sıcaklık Kriteri	20
3.4.5. Hız Kriteri	21
3.4.6. Zehirli Gaz Kriteri	21
3.5. Yangın Modeli Oluşturma ve Sayısal Çözüm	22
3.5.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	24
4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	25
4.1. Zamandan Bağımsız Simülasyon Çalışmaları	27
4.1.1. Hücre Sayısı Analizi	28
4.1.2. İterasyon Sayısı Analizi	33
4.1.3. Fan Kapasitesi Analizi	36
4.1.4. Farklı Çıkış Koordinatlarına Sahip Yangın Yayılımı Analizi	39
4.1.5. Yangın Yükünün Değişiminin Yangın Yayılımına Etkisi	40
4.1.6. Yangın Damperlerinin Performansı Analizi	42
4.1.7. Trenin Yangın Yayılımına Etkisi Analizi	46
4.1.8. Yangın Perdesi Kullanıldığında Yangın Yayılımı Analizi	48
4.1.9. Tünelde Yangın Durumunda Kritik Hız Analizi	51
4.1.10. Hava Giriş Hızlarının Yangın Yayılımına Etkisi	54
4.2. Zamana Bağlı Simülasyon Çalışmaları	56
4.2.1. Zamana Bağlı Yangın Yayılımı Analizi	56
4.2.2. Zamana Bağlı Modelde Fan Kapasitesi Analizi	61
5. SONUÇLAR	66
6. ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	72

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
cm	: Santimetre
°C	: Santigrat derece
dP	: Basınç değişimi
k	: Türbülans Kinetik Enerjisi
°K	: Kelvin derece
kg	: Kilogram
kW	: Kilowatt
m	: Metre
MW	: Megawatt
ppm	: Milyonda bir kısım
Q	: Yangın yükü
Q <sub>v</sub>	: Hacimsel debi
s	: Saniye
t	: Zaman
W	: Watt
$\alpha$	: Yangın Gelişme Faktörü
$\epsilon$	: Türbülans Dağılım Oranı
CFD	: Computational Fluid Dynamics
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
NFPA	: National Fire Protection Association
RNG	: Renormalization Group

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Şekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Yanma üçgeni	3
2.2: Taşınım ile ısı transferi	5
2.3: Işınım ile ısı transferi	6
2.4: İletimle ısı transferi	6
2.5: Yangın evreleri	7
3.1: Kaprun faciasının şematik gösterimi	14
3.2: Tünel acil durum havalandırma sistemi çalışma prensibi	16
3.3: İki istasyon ve tüneller için havalandırma düzeneği	17
3.4: Boylamasına havalandırma çeşitleri	18
3.5: Yangın durumunda boylamasına havalandırma	19
3.6: Jet Fan uygulama örneği	19
3.7: Acil durum havalandırma sistemi çalışma prensibi	20
3.8: Kritik hız etkisi	21
3.9: 1 Boyutlu yangın modeli	23
3.10: 3 Boyutlu yangın modeli	23
4.1: İstasyon modelinin genel görünümü	25
4.2: İstasyonun detayları (üst)	26
4.3: İstasyonun detayları (alt)	27
4.4: Tam gelişmiş yangın durumunda ısı güç	28
4.5: Yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 145374	29
4.6: Yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 882185	29
4.7: Yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 1682321	29
4.8: Düşey kesit sıcaklık, hücre sayısı: 145374	30
4.9: Düşey kesit sıcaklık, hücre sayısı: 882185	30
4.10: Düşey kesit sıcaklık, hücre sayısı: 1682321	30
4.11: Yatay kesit hız, hücre sayısı: 145374	31
4.12: Yatay kesit hız, hücre sayısı: 882185	31
4.13: Yatay kesit hız, hücre sayısı: 1682321	31

4.14: Tünelde yangın durumu, yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 154316	32
4.15: Tünelde yangın durumu, yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 927313	32
4.16: Yatay kesit sıcaklık, iterasyon sayısı: 100	34
4.17: Yatay kesit sıcaklık, iterasyon sayısı: 300	34
4.18: Yatay kesit hız, iterasyon sayısı: 100	35
4.19: Yatay kesit hız, iterasyon sayısı: 300	35
4.20: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 80 m <sup>3</sup> /s	36
4.21: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 120 m <sup>3</sup> /s	36
4.22: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	37
4.23: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 200 m <sup>3</sup> /s	37
4.24: Yatay kesit hız, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	38
4.25: Yatay kesit hız, fan kapasitesi: 200 m <sup>3</sup> /s	38
4.26: Yatay kesit sıcaklık, yangın koordinatları: 13.47; 1; -40 m	39
4.27: Yatay kesit sıcaklık, yangın koordinatları: 13.47; 1; 10 m	39
4.28: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 3 MW	40
4.29: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 6 MW	41
4.30: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 12 MW	41
4.31: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 24 MW	42
4.32: Yangın damperi	43
4.33: Yatay kesit sıcaklık, yangın damperi yok	44
4.34: Yatay kesit sıcaklık, yangın damperi var	44
4.35: İstasyon birinci kat sıcaklık, yangın damperi yok	45
4.36: İstasyon birinci kat sıcaklık, yangın damperi var	45
4.37: Yatay kesit sıcaklık, tren ilaveli, fan kapasitesi: 80 m <sup>3</sup> /s	46
4.38: Yatay kesit sıcaklık, tren ilaveli, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	46
4.39: Yatay kesit hız, tren ilaveli, fan kapasitesi: 80 m <sup>3</sup> /s	47
4.40: Yatay kesit hız, tren ilaveli, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	47
4.41: Yangın perdesi	48
4.42: Sıcaklık, yangın perdesi yok	49
4.43: Sıcaklık, yangın perdesi var	49
4.44: İstasyon birinci kat sıcaklık, yangın perdesi yok	50
4.45: İstasyon birinci kat sıcaklık, yangın perdesi var	50

4.46: Tünel düşey kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 1.5 m/s	51
4.47: Tünel düşey kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 2.5 m/s	51
4.48: Tünel yatay kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 1.5 m/s	52
4.49: Tünel yatay kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 2.5 m/s	52
4.50: Tünel yatay kesiti hız, hava giriş hızı: 1.5 m/s	53
4.51: Tünel yatay kesiti hız, hava giriş hızı: 2.5 m/s	53
4.52: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 0 m/s	54
4.53: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 0.75 m/s	54
4.54: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 1.5 m/s	55
4.55: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 2.5 m/s	55
4.56: Zamana bağlı yangın yayılımı, 1. dakika	56
4.57: Zamana bağlı yangın yayılımı, 2. dakika	57
4.58: Zamana bağlı yangın yayılımı, 3. dakika	57
4.59: Zamana bağlı yangın yayılımı, 4. dakika	58
4.60: Zamana bağlı yangın yayılımı, 5. dakika	58
4.61: Zamana bağlı yangın yayılımı, 6. dakika	59
4.62: Zamana bağlı yangın yayılımı, 7. dakika	59
4.63: Zamana bağlı yangın yayılımı, 8. dakika	60
4.64: Zamana bağlı yangın yayılımı, 9. dakika	60
4.65: Zamana bağlı yangın yayılımı, 10. dakika	61
4.66: Zamana bağlı model, 3. dakika, fan kapasitesi: 80 m <sup>3</sup> /s	62
4.67: Zamana bağlı model, 3. dakika, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	62
4.68: Zamana bağlı model, 7. dakika, fan kapasitesi: 80 m <sup>3</sup> /s	63
4.69: Zamana bağlı model, 7. dakika, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	63
4.70: Zamana bağlı model, 10. dakika, fan kapasitesi: 80 m <sup>3</sup> /s	64
4.71: Zamana bağlı model, 10. dakika, fan kapasitesi: 160 m <sup>3</sup> /s	64

## TABLULAR DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Yangının farklı büyüme oranları için $\alpha$ değerleri	8
2.2. Yangın tiplerinin karşılaştırılması (gelişme faktörü = $1 \text{ W/s}^2$ )	9
3.1: Metro yangınlarına neden olan etkenler	13

# 1. GİRİŞ

Büyük şehirlerde her geçen gün artan nüfus ve trafik yoğunluğu alternatif toplu taşıma yöntemlerine ihtiyaç doğurmuştur. Bu yöntemlerin en önemlilerinden biri metro taşımacılığıdır. Metro sistemlerinin yoğun olarak kullanılması bu sistemlerde gerekli olan yolcu konforu ve güvenliğine verilmesi gereken önemi artırmıştır. Metro istasyonlarında ve tünellerinde olası yangınlar güvenlik tedbiri alınması gereken konuların en önemli kısmını oluşturmaktadır. Tünel içerisinde oluşabilecek bir yangın durumunda, yolcuların treni en kısa zamanda terk ederek güvenli bir bölgeye ulaşmaları gerekir. Bunun için metro istasyonlarında havalandırma sisteminin yeterli ve tünel geometrisinin elverişli olması gerekir. Metro sistemlerinde tasarım aşamasında havalandırma sisteminin ve olası bir yangında havalandırma stratejilerinin üzerinde ehemmiyetle durulması gerekir.

Metro istasyonlarında yangın analizi için 2 yöntem mevcuttur. Birincisi deneysel yöntem, ikincisi ise sayısal simülasyon yöntemidir. İkinci yöntem için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları kullanılarak simülasyonlar yapılmaktadır. HAD yöntemi, deneysel çalışmalara kıyasla birçok avantaja sahiptir. Deneysel şartları oluşturmanın maliyeti, gerçek şartları deney düzeneğine taşımanın zorluğu, deneylerin sınırlı sayıda yapılabilmesi gibi etkenler deneysel çalışmaları zorlaştırmaktadır. Özellikle de metro istasyonu ve tünel yangını gibi büyük hacimlerde çalışıldığında deneysel koşulları oluşturmak bir çok güçlüğü de beraberinde getirmektedir. Bunun yerine daha az maliyetli ve daha kolay bir metot olan HAD yöntemi ile yangın simülasyonları yapılmaktadır.

Bugün gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde çok sayıda HAD yazılımı ortaya çıkmıştır. Bu yazılımlar sayesinde, uzun zaman gerektiren HAD hesaplamaları artık kolayca yapılabilmektedir. Bu sayede daha tasarım aşamasında bir sistem hakkında birçok öngöründe bulunulabilmekte ve tasarım parametreleri eniyilenebilmektedir.

Bu çalışmada Ümraniye Metrosuna bağlı örnek bir istasyon model alınarak yangın analizi yapılmakta ve metro geometrisi, fan kapasitesi ve çalıştırma yönü, yangın yükü gibi parametrelerin yangın yayılımına olan etkisi incelenmektedir. Çalışmaların neticesinde metro istasyonu ve tünellerinde oluşabilecek bir yangın

durumunda can ve mal kayıplarını en aza indirebilmek için gerekli tedbirlerin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu çalışma ANSYS CFX yazılımı kullanılarak İstanbul Ümraniye Metrosu üzerinde yapılan ilk çalışma olma niteliği taşımakta ve bundan sonra yapılabilecek araştırmalara zemin hazırlamaktadır.

Çalışmanın 2. bölümünde yangın hakkında genel bilgi verilmiş, yangın evrelerinden bahsedilmiş ve yangının insan sağlığı üzerindeki etkilerine değinilmiştir. 3. bölümde metro istasyon ve tünel yangınları ele alınmış, tünel yangınlarının tarihçesi hakkında kısa bilgi verilmiş ve metro yangınlarında havalandırmanın önemi üzerinde durulmuştur. Aynı zamanda uluslararası standartlarda belirtilen havalandırma kriterleri incelenmiştir. 4. bölümde Ümraniye metrosu bünyesinde bulunan örnek bir metro istasyonu model alınarak yangın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde istasyon ve tünel kısımlarında olabilecek yangın durumları için ayrı ayrı simülasyonlar yapılmış, her defasında bir parametre değiştirilerek diğerleri sabit kalmak suretiyle farklı değişkenlerin yangın yayılımı ve hava hızı dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiş, sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 5. bölümde ise simülasyonlar sonucu elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

## 2. YANGIN KAVRAMI VE ÖZELLİKLERİ

### 1.1. Yangın Kavramı

Yangın fiziksel ve kimyasal bir olaydır. Isı, yakıt ve oksijenin uygun oranda bir araya gelmesi ile başlayan reaksiyona “yanma”, yanma olayının kontrol dışı gelişimine de “yangın” denir. Yanmanın başlaması için yanıcı maddenin, oksijenin ve tutuşmayı sağlayacak bir enerji kaynağının varlığı gerekmektedir. Bu üç unsur “yanma üçgeni” olarak adlandırılmaktadır[1],[2].



Şekil 2.1: Yanma üçgeni.

Bu üç şartı ele alırsak;

**Yakıt:** Yanma olayının başlaması için yanıcı maddenin gaz fazında bulunması gerekir. Katı ve sıvı fazlarda yanma meydana gelmez. Isıl enerjiye maruz kalan bir maddenin tutuşma sıcaklığına gelerek yanması için yakıt ve havanın uygun oranlarda bir arada olması gerekir[2].

**Oksijen:** Normal şartlarda havada % 21 Oksijen, % 78 Azot ve % 1 diğer gazlar mevcuttur. Yanma olayının gerçekleşmesi için en düşük oksijen oranı % 13, görünür bir alevin oluşması için oksijen oranı ise % 15 değerinde olmalıdır[2].

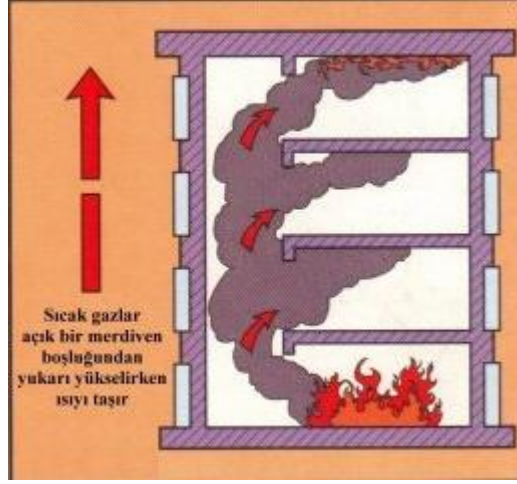
Isı: Belirli sıcaklıktaki bir sistemin sınırlarından, daha düşük sıcaklıktaki bir sisteme, sıcaklık farkı nedeniyle transfer edilen enerjidir. Bir cismin ısısı o cismin sıcaklığı ile orantılıdır. Isı termal bir enerjidir ve depo edilemez, ancak geçiş halinde iken belirlenebilir. Bir maddenin yanmaya başlaması için, yoğunlukla ısıya ihtiyaç vardır. Yanmanın şiddeti, yaydığı ısı ile ölçülmektedir. Yanmanın yayılma hızı 10 cm/s'yi geçerse bu olay "patlama" olarak isimlendirilmektedir[2],[3].

## **2.2. Yangın Sırasında Meydana Gelen Isı Transfer Türleri**

Yangın ısı veren (egzotermik) bir tepkimedir ve yanma esnasında sürekli olarak ısı üretimi gerçekleşmektedir. Yanma devam ettiği sürece zincirleme olarak çevrede bulunan maddeler tutuşma sıcaklığına ulaşmakta ve bu maddeler de yanmaya başlamaktadır. Yangın sırasında ısı yayılımı üç değişik şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar; taşınım, ışınlama ve iletimdir[4].

### **2.2.1. Taşınım (Konveksiyon )**

Akışkan hareketi ile ısı enerjisinin bir yerden başka bir yere aktarımı "taşınım" olarak tanımlanır. Sıvı veya gaz ortamlarda akışkan hareketi ile ısı enerjisi bir bölgeden diğer bir bölgeye sıcaklık farkından dolayı transfer edilmektedir. Akışkanın sıcaklığındaki değişmeden dolayı yoğunluğunun değişmesi nedeniyle oluşan hareket sonucu ısı taşınıyorsa bu olay doğal taşınım, akışkan hareketi pompa veya fanla sağlanıyorsa bu olay da zorlanmış taşınım olarak isimlendirilmektedir[1],[3].



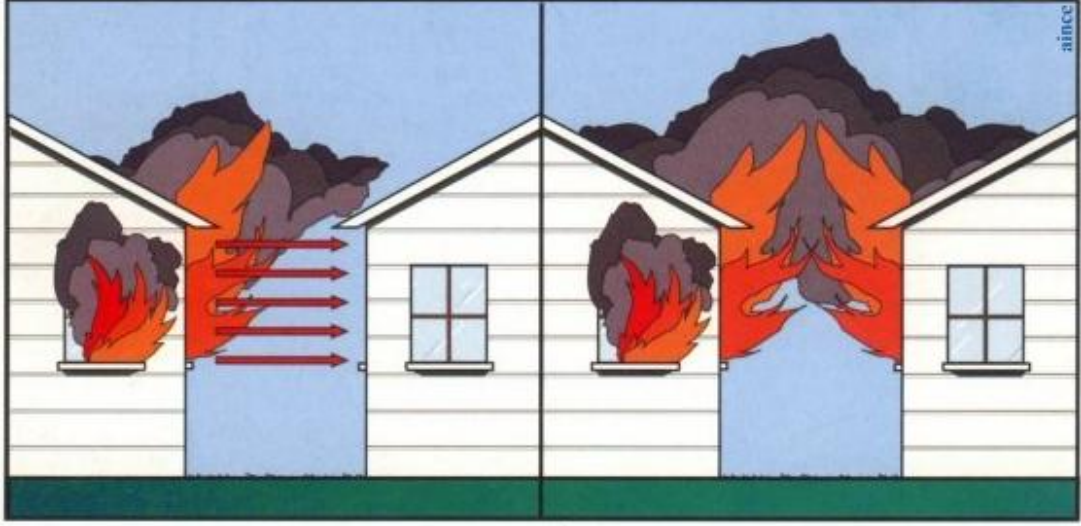
Şekil 2.2. Taşınım ile ısı transferi.

Taşınım ile ısı transferi, yangının yayılmasında en etkin ısı transferi mekanizmasıdır. Yangın olayında açığa çıkan enerjinin yaklaşık % 80'i bu şekilde yayılmaktadır. Bir yangın durumunda sıcak gazlar genellikle buldukları yerin tavanına doğru yükselmekte ve tavan bölgesinde birikmektedir. Bu nedenle tavana yakın kısımlar daha sıcak alt kısımlar daha serindir. Taşınım olayının verimi aşağıdakilere bağlıdır:

- Akışkanın dinamik viskozitesi,
- Akışkanın sıcaklığı,
- Sıcak yüzeye temas eden akışkan tabakanın hareket hızı[4].

### 2.2.2. Işınım (Radyasyon)

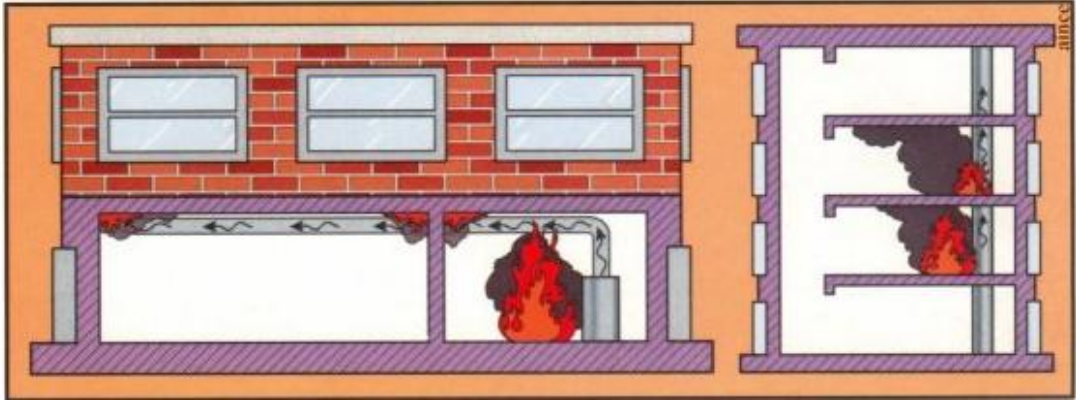
Işınım olayında ısı, elektromanyetik dalgalar (ya da fotonlar) ile taşınır. Işınımın diğer ısı transferi mekanizmalarından farkı, ısı enerjisini içinden nakledilebileceği bir ortama gereksinim duymamasıdır. Yani mutlak vakum ortamında hiçbir maddenin bulunmadığı bir ortam içinden geçerek transfer edilebilir[1].



Şekil 2.3: Işınım ile ısı transferi.

### 2.2.3. İletim (Kondüksiyon)

Isı iletimi; katı, sıvı veya gaz bir ortam içerisinde bulunan bölgeler arasında doğrudan fiziki temas durumunda meydana gelir. Yani atom ve moleküllerin herhangi bir yer değiştirmesi olmaksızın bunların doğrudan teması sonucu meydana gelen ısı yayılımı işlemidir[1].

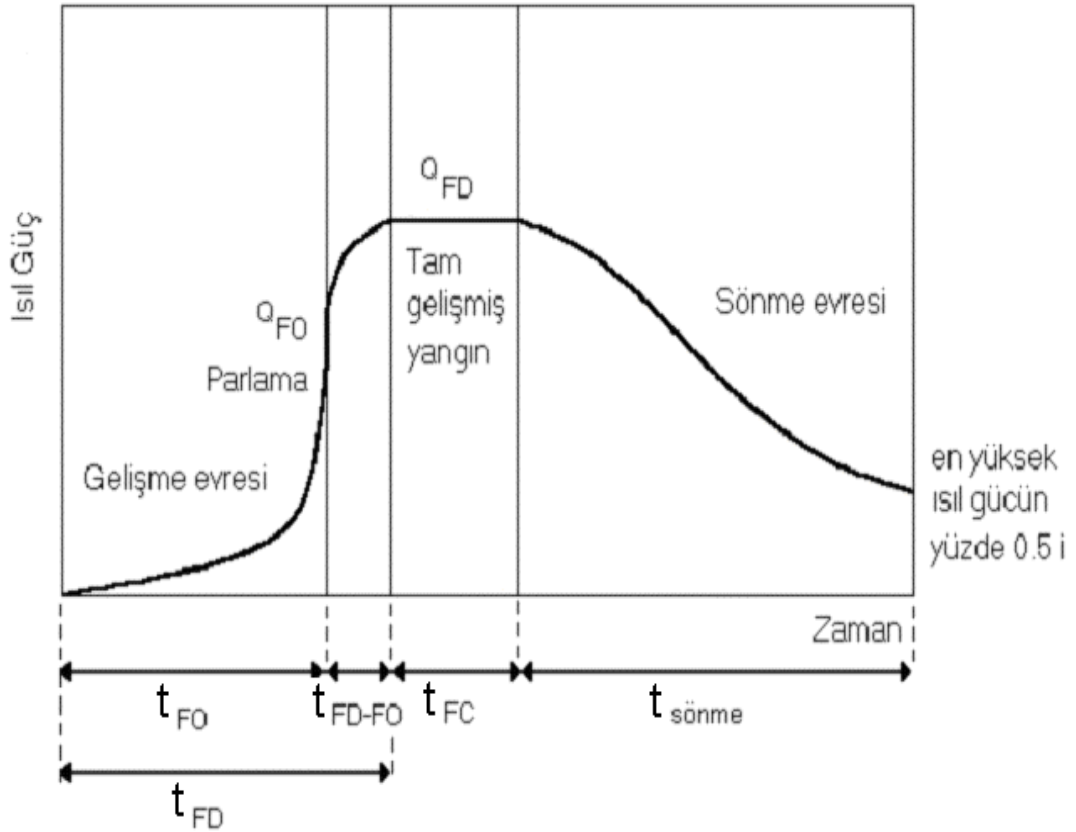


Şekil 2.4: İletimle ısı transferi.

Bir bölgede moleküllerin ortalama kinetik enerjisi bitişik bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinden fazla ise enerjileri fazla olan moleküller bu enerjilerini komşu olan moleküllere iletmektedirler. Katılarda ısı, elektron hareketi ve kafes titreşimleri ile komşu bölgelere iletilmektedir[4].

## 2.3. Yangın Oluşum Evreleri

Yangın, temel olarak 3 evreye ayrılabilir. Bunlar; gelişmekte olan yangın, tam gelişmiş yangın ve sönmekte olan yangın evreleridir. Normal bir yangında bu 3 evrenin de gözlenmesi muhtemeldir. Bu evrelerin her birinde yangının davranışı farklı olduğundan her bir evre ayrı ayrı incelenmelidir[5].



Şekil.2.5: Yangın evreleri.

$t_{FO}$  : Parlama evresine kadar geçen süre

$t_{FD}$  : Tam gelişmiş yangın evresine ulaşıncaya kadar geçen süre

$t_{FC}$  : Tam gelişmiş yangın evresinin süresi

$t_{sönme}$  : Tam gelişmiş yangın evresinden yangının sönmeye kadar geçen süre

$Q_{FO}$  : Parlama evresinin başlama anında açığa çıkan ısı gücü

$Q_{FD}$  : Tam gelişmiş yangın evresinde açığa çıkan ısı gücü

### 2.3.1. Gelişmekte Olan Yangın Evresi

Bu evre yangının başladığı andan, tam gelişmiş yangın evresine kadar geçen süreç olarak kabul edilir. Yangının gelişme hızının çok hızlı veya yavaş olması gelişme faktörünü belirler. Yangının nerede başladığı, yanan malzemelerin özellikleri, ortamdaki oksijen miktarı ve yanan bölgenin çevresiyle olan ilişkisi gelişme faktörünü belirleyen özelliklerdir. Gelişmekte olan bir yangın zamanın bir fonksiyonu olarak NFPA-204M’de tanımlanmıştır[5],[6].

$$Q = \alpha \cdot t^2 \quad (2.1)$$

Bu denklemde Q; yangın yükünü,  $\alpha$ ; yangının gelişme faktörünü ve t; yangının başladığı andan itibaren geçen zamanı belirtmektedir[6].

Tablo 2.1: Yangının farklı büyüme oranları için  $\alpha$  değerleri.

YANGIN HIZI	GELİŞME FAKTÖRÜ (kW/s <sup>2</sup> )
Çok hızlı	0.190
Hızlı	0.047
Orta	0.012
Yavaş	0.003

### 2.3.2. Tam Gelişmiş Yangın Evresi

Tam gelişmiş yangın evresi ortamdaki tüm yanıcı maddelerin yangına karıştığı varsayılan evredir. Bu evrenin uzunluğu yanmakta olan maddelerin sahip oldukları enerjilere bağlı olarak değişir. Açığa çıkan ısı güç tüm yangın boyunca en yüksek değerine ulaşır ve bu evre sonuna kadar sabit olarak o değerinde kaldığı kabul edilir[5],[7].

### 2.3.3. Sönmekte Olan Yangın Evresi

Bu evre yanıcı maddelerin tamamının yandığı ve artık ısı gücün zamanla azaldığı evredir. Bu evrenin başlangıcı, sıcaklığın yangın bölgesinde hissedilen en yüksek sıcaklığın % 80'ine düştüğü an olarak kabul edilir. Yangının tamamen söndüğü an ise ısı gücün, yangın olayı boyunca açığa çıkan en yüksek ısı gücü değerinin % 0.5'ine düştüğü an olarak kabul edilmektedir[5].

Tipik bir metro treni yangınında bu üç evrenin zamanla değişimi Tablo 2.2'de sunulmuştur[5].

Tablo 2.2. Yangın tiplerinin karşılaştırılması (gelişme faktörü =  $1 \text{ W/s}^2$ ).

	Yolcu vagonunda çıkan yangın	Vagonun altında çıkan yangın	Sürücü kabininde çıkan yangın
$Q_{FO}$	2.28 MW	5.79 MW	0.38 MW
$Q_{FD}$	9.16 MW	12.33 MW	1.11 MW
$t_{FO}$	25 dakika	40 dakika	10 dakika
$t_{FD}$	50 dakika	58 dakika	17 dakika
$t_{FC}$	42 dakika	48 dakika	14 dakika
$t_{sönme}$	133 dakika	155 dakika	46 dakika
$t_{toplam}$	226 dakika	262 dakika	78 dakika

## 2.4. Yangının İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

### 2.4.1. Sıcaklık

Yangın sırasında sıcaklık çok hızlı bir şekilde yükselir. Yangın başladıktan 5 dakika sonra sıcaklık  $555 \text{ }^\circ\text{C}$ , 10 dakika sonra  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ , yarım saat sonra  $820 \text{ }^\circ\text{C}$ , bir saat sonra  $927 \text{ }^\circ\text{C}$  olmaktadır. En büyük sıcaklık artışı ilk beş dakikada olmaktadır ve bu nedenle yangınlarda ilk dakikalar hatta saniyeler çok önemlidir. Yüksek sıcaklık insan vücudunda onarılmaz yaralar açar. Derinin yanması ile derinin altında bulunan

ter bezleri tahrip olup vücutta bulunan zehirli maddeler ter yoluyla dışarı atılamazsa kan zehirlenmesi meydana gelir ve hayat sona erer. İnsan vücudu 65 °C sıcaklığa sınırlı bir süre, 120 °C sıcaklığa 15 dakika ve 177 °C sıcaklığa ise 1 dakika dayanabilir[1].

### **2.4.2. Duman**

Duman; havada taşınan katı, sıvı parçacıkları ve yanma sonucu oluşan gazlarla havadan meydana gelen bir karışımdır. Yanma ürünleri genellikle partiküller, su buharı, karbondioksit, karbon monoksit ve diğer zehirleyici ve tahriş edici gazları içerir. İstatistiksel verilere göre yangınlarda ölümlerin % 90'ından fazlasına zehirli dumanın neden olduğu belirtilmektedir. Dumanın bir diğer olumsuz etkisi de özellikle kapalı alan yangınlarında görüş mesafesini sınırlandırmasıdır[8].

### **2.4.3. Zehirli Gazlar**

Yangın yerinde meydana gelen ölümlerin çoğu zehirli gazlardan olur ve bu gazlar çoğunlukla geç fark edilirler. Zehirli gazlar tesirlerine göre 3'e ayrılır:

Birinci Grup Zehirli Gazlar: Kendisi bizzat zehirli olmadığı halde buldukları ortamlarda oksijen konsantrasyonunu azalttıkları için boğulmaya neden olurlar. Havadaki oksijen oranı % 16'nın altına düştüğü zaman insan için tehlike oluşturur. Bu nedenle oksijenin dışındaki bütün gazlar zehirli kabul edilir. Su buharı, azot, asal gazlar (helyum, neon, argon v.b.), hidrojen, metan gibi gazlar bu gruba örnek verilebilir[1].

İkinci Grup Zehirli Gazlar: Asidik ve bazik gazlar bu grubu oluşturur. Nefes yolları, göz ve deriyi tahriş ederler. Hidroklorik asit, nitrik asit, asetik asit, klor, kızgın hava, amonyak, kükürt dioksit bu gruba örnek gösterilebilir[1].

Üçüncü Grup Zehirli Gazlar: Doğrudan zehirleyici etkileri vardır. Kana, sinir sistemine ve hücrelere tesir ederler. Karbon monoksit, kükürt dioksit, hidrojen sülfür ve hidrojen siyanür gibi gazlar bu gruba girer. Karbon monoksit hemen her yangında ortaya çıkar ve kokusuz olduğundan fark edilmez. Karbon monoksit

akciğerlerden hücrelere oksijen taşıyan hemoglobinle birleşerek kompleks oluşturur ve kandaki oksijen taşıyıcı sistemi etkisiz hale getirir. Yangınlarda ölüm sebeplerinin kabaca % 50'sinin karbon monoksit zehirlenmelerinden, diğer yarısının ise yanma, yüksek basınç ve diğer zehirleyici gazlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir[1],[8]. Karbon monoksit 12800 ppm konsantrasyonunda en fazla 3 dakika içinde ölüm tehlikesi oluşturur[9]. Kükürt dioksitin ise tehlike sınırı 5 ppm olup ortamdaki konsantrasyonu 500 ppm değerine ulaştığında bir saat içinde ölüm tehlikesi vardır[10].

## 3. METRO YANGINLARI VE HAVALANDIRMA

### 3.1. Metro Yangınlarına Genel Bir Bakış

Metro istasyonlarında meydana gelen yangınlar, kapalı alan yangını olarak nitelendirilmektedir. Kapalı alan yangınlarında yangın gücüne ve yanma hızına etki eden başlıca iki parametre vardır. Birincisi, sıcak gazların tavan kısmında birikmesi sonucu tavanın ve duvarların ısınması ile bu yüzeylerin ve sıcak gaz katmanının yakıt yüzeyine doğru ışınım yoluyla ısı transferi yaparak yanma hızını artırmasıdır. İkincisi ise havanın giriş yapabileceği kısımların sınırlı olması sonucu yanma için gerekli olan oksijen miktarının sınırlanmasıdır. Oksijenin eksik olması durumunda malzemelerin yanma hızı ve çevreye yaydıkları ısı azalmakta ve yanmayan gazların miktarında artış olmaktadır. Metro istasyonlarında çıkan yangınlarda ise kapalı alan yangınlarından farklı olarak yolcu tahliyesi için gerekli olan acil durum havalandırma sistemi, yanma için gerekli olan oksijen miktarından fazlasını sağlamaktadır. Araştırmalar sonucunda, tünel içindeki bir yangının ısıl gücünün aynı malzemelerin kullanıldığı açık hava yangınının ısıl gücünden dört kat fazla olduğu tespit edilmiştir[11].Tünel yangınları aşağıda sıralanan dezavantajlara sahiptir:

- Yangınlar genellikle uzun sürer.
- Patlamalar olabilir.
- Sıcaklık yüksektir.
- Ortamda zehirli gazlar birikir.
- Görüş mesafesi kısıtlıdır[12].

Yapılan araştırmalarda metro tünellerinde meydana gelen yangınların çıkış nedeni olarak çeşitli sebepler gösterilmektedir. Bunlardan biri Tablo 3.1'de sunulmuştur[13].

Tablo 3.1: Metro yangınlarına neden olan etkenler.

Yangın Nedenleri	Yüzdeler
Elektrik Hataları	% 34
İstasyon Özellikleri	% 17
Sabotaj (Terörist Saldırı)	% 13
Mekanik Nedenler	% 13
Sigara	% 10
Diğer Nedenler	% 13

Tünel yangınlarının nedenlerini araştırmaya yönelik yapılan çalışmalarda birbirinden farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak ana hatlarıyla yangın çıkış sebepleri 3 başlık altında toplanabilir:

- Dış Müdahaleler (Kundaklama, sabotaj, terör saldırısı v.s.),
- Elektrik hataları,
- Mekanik Hatalar (Trenin raydan çıkması ya da bir çarpışma nedeniyle kısa devre oluşumu v.s.)[14].

### 3.2. Metro Yangınlarının Tarihçesi

Bu güne kadar dünyanın çeşitli yerlerinde ölümlü ve maddi hasarlı çok sayıda tünel yangını meydana gelmiştir. Bunlardan en önemlileri özetlenirse:

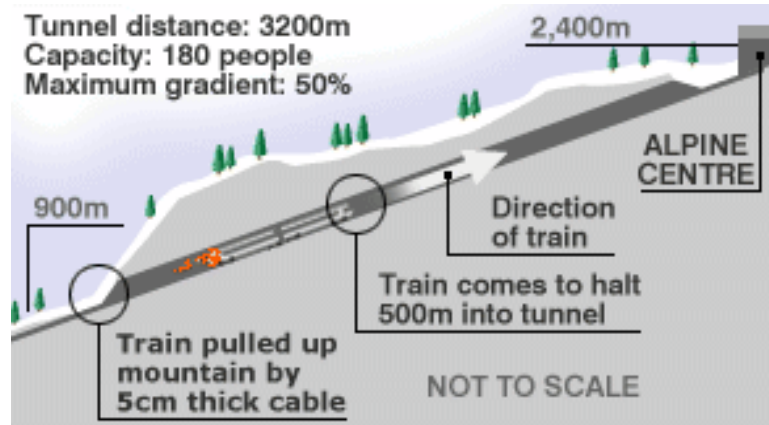
1987'de 31 kişinin ölmesiyle sonuçlanan King Cross yangını, araştırmalar sonucunda hendek etkisi kavramının ilk olarak ortaya konduğu felaket olarak karşımıza çıkmaktadır. Hendek etkisi, yürüyen merdivenlerin mekanizma boşluğu gibi kısımları (makine yağı ve zamanla birikmiş pisliklerden oluşan yanıcı maddeler) içinde yangın alevinin hendek boyunca ilerlemesi olayını ifade eder[15].

1995 yılında Bakü (Azerbaycan) metrosunda meydana gelen yangında yaklaşık 300 kişi hayatını kaybetmiş, 265 kişi de yaralanmıştır. Yangının yüksek gerilim hattında meydana gelen kopmadan meydana geldiği varsayılmakla birlikte sabotaj olma olasılığı da bulunmaktadır. Bu yangın dünyanın en fazla ölüme sebebiyet

veren metro faciasıdır. Bu durumun sebepleri arasında havalandırma sisteminin yeterli olmaması, yanıcı malzemelerin kullanıldığı eski tip vagonların kullanılması, kısaca tedbirlerin yeterli olmaması gösterilmektedir[8],[16].

1999 yılında Fransa'yı İtalya'ya bağlayan Mont Blanc tüneline meydana gelen yangında 39 kişi hayatını kaybetmiş, sıcaklık 1000 °C'ye ulaşmış ve yangın 53 saat boyunca devam etmiştir[17].

2000 yılında Avusturya'nın Kaprun kayak merkezi yakınlarında yolcuları kayak merkezine taşımakta olan dağ metrosunda meydana gelen yangında 155 kişi hayatını kaybetmiş ve sadece 12 yolcu kaçmayı başarabilmiştir. Tren % 30 eğimli yolda yukarı doğru hareket halinde iken trenin arka kısmında bulunan bir elektrikli ısıtıcının kablolarının alev almasıyla başlayan yangın, hidrolik fren yağını taşıyan mekanizmanın erimesi ve son derece yanıcı olan fren yağının alev almasıyla birlikte bütün kompartımanları sarmıştır. Trenin kontrol merkezi ile bağlantısı kesilmiş, kapı ve pencereler kilitlemiş ve yolcular içerde hapsolmuştur. Sıcak dumanın yukarı doğru hareket etmesi sonucu yolcuların çoğu zehirli dumana maruz kalarak hayatını kaybetmiştir[8],[18],[19].



Şekil 3.1: Kaprun faciasının şematik gösterimi.

2003'te bir terörist saldırı sonucu gerçekleşen Daegu (Güney Kore) Metrosu yangınında en modern yangın engelleme ve söndürme sistemlerinin varlığına rağmen 197 kişi hayatını kaybetmiş ve 147 kişi de yaralanmıştır[20].

2008'de Manş Tünelinde, bir vagondaki kimyasal madde yüklü kamyonda patlama sonucu oluşan yangın yaklaşık 7 saat sürmüş, yangın merkezinde sıcaklık 1000 °C'ye ulaşmış, 46 metrelik kısımda ciddi, toplam 500 metrede hasar oluşmuş, yangından sonra tünel 6 ay süreyle kapalı kalmış, 200 milyon Euro ekonomik kayıp meydana gelmiştir. Yolcular olay sırasında panikle camları kırıp havalandırma sisteminin devreye girmesini beklemedikleri için zehirli dumana maruz kalmışlardır[12].

### **3.3. Literatür Araştırması**

Metro istasyon ve tünel yangınları alanında daha önce ortaya konulmuş birçok çalışma mevcuttur. Aşağıda bunlardan birkaç tanesinden bahsedilmiştir:

2005 yılında Serkan Kayılı'ya ait bir yüksek lisans tezinde yer altı toplu taşıma sistemindeki bir istasyonda yangın durumunda en güvenli kaçış senaryosunun belirlenmesi amacıyla HAD yazılımı olan CFDesign 7.0 ile yangın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu modeller üzerinde zamandan bağımsız ve zamana bağlı analizler yapılmıştır[21].

2008 yılında Muhammed İlter Berberoğlu'na ait bir yüksek lisans tezinde Ankaray Metro İstasyonu örnek alınarak kapalı bir hacimde akış ve yanma incelenmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında küçük ölçekli ateşe dayanıklı bir yarım istasyon modeli üzerinde çeşitli yanma deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise küçük ölçekli model bilgisayar ortamına aktarılmış ve HAD yazılımı olan FLUENT programı yardımıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uygunluğu incelenmiştir[15].

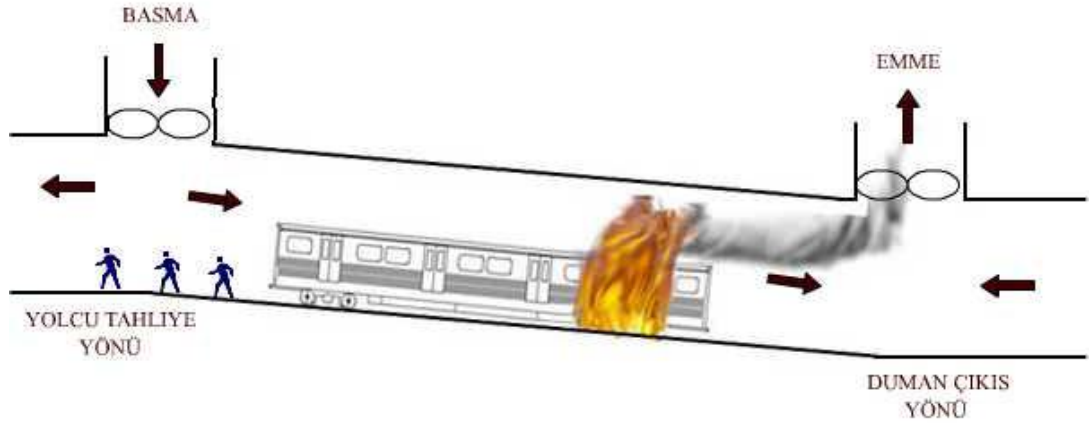
2009 Eren Musluoğlu'na ait bir doktora tezinde düşük güce sahip bir kundaklama ve yüksek güce sahip bir bagaj yangını durumunda tren içerisinde yangın gelişimi ve duman yayılması incelenmiştir. Yangın simülasyonları HAD yazılımı olan FDS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir[14].

2010 yılında Salih Karaaslan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada gerçek boyutlarda bir istasyon modeli oluşturulmuş ve FLUENT programında yanma

simülasyonu gerçekleştirilmiştir. 10 MW ve 50 MW ısı yayılım oranına sahip yakıt havuzunun istasyon merkezinde konumlandırıldığı tünel giriş hızları 1, 3, 5 ve 7 m/s olan durumlar için yangın senaryoları ayrı ayrı incelenmiştir[22].

### 3.4. Metro İstasyonlarında Havalandırma

Metro istasyonlarında ve tünellerinde insanlar için konfor ve güvenlik havalandırma sistemi ile sağlanmaktadır. Konfor denince ortama kaliteli hava sağlama, güvenlik denince de yangın akla gelmektedir. Meydana gelebilecek herhangi bir yangın olayı acil durum olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda havalandırma sistemi dumanın tahliyesini, tünelin soğutulmasını, dumanı yolcu tahliye yönünden aksi yöne iterek yolculara güvenli bir kaçış yolunu sağlamalıdır ve havalandırma için kullanılacak fanların kapasiteleri de buna göre seçilmelidir[5].



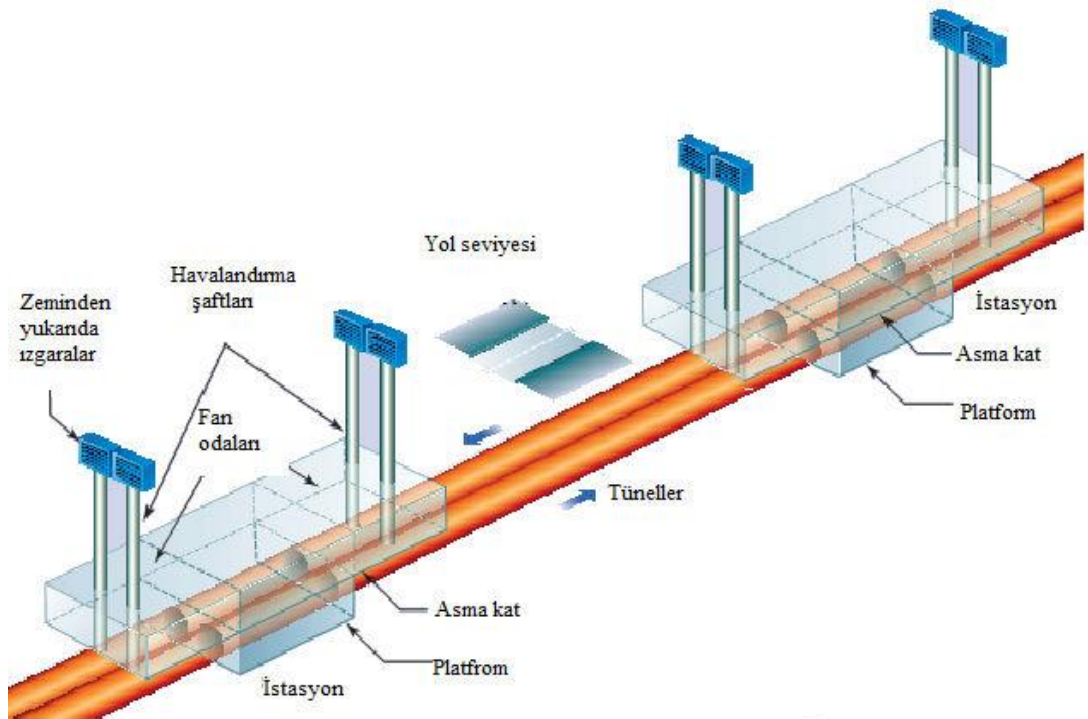
Şekil 3.2: Tünel acil durum havalandırma sistemi çalışma prensibi.

Metro istasyonları ve tünellerde havalandırma; doğal ve mekanik havalandırma olarak ikiye ayrılır:

#### 3.4.1. Doğal Havalandırma

Metro sistemlerinde doğal havalandırma, genel olarak sızdıran bir piston benzetilebilir. Tünel içerisinde hareket eden tren yolun büyük bir kısmını

doldurmakta ve önüne kattığı havayı tren hareketi yönünde ittiirmektedir. İstasyonların iki ucunda dış havaya açık havalandırma şaftları bulunmaktadır (Şekil 3.3). İstasyona yaklaşan trenin önünde oluşan pozitif basınç; sıcak ve kirli havayı en yakın şaft, istasyon giriş çıkışları ve diğer açıklıklardan dışarı atmaktadır. İstasyondan hareket eden trenin arkasında oluşan negatif basınç ise aynı açıklıklardan temiz havanın içeri alınmasını sağlamaktadır. Yangın esnasında araç hareketleri durdurulacağı için piston etkisi ortadan kalkmaktadır[11],[23].



Şekil 3.3: İki istasyon ve tüneller için havalandırma düzeni.

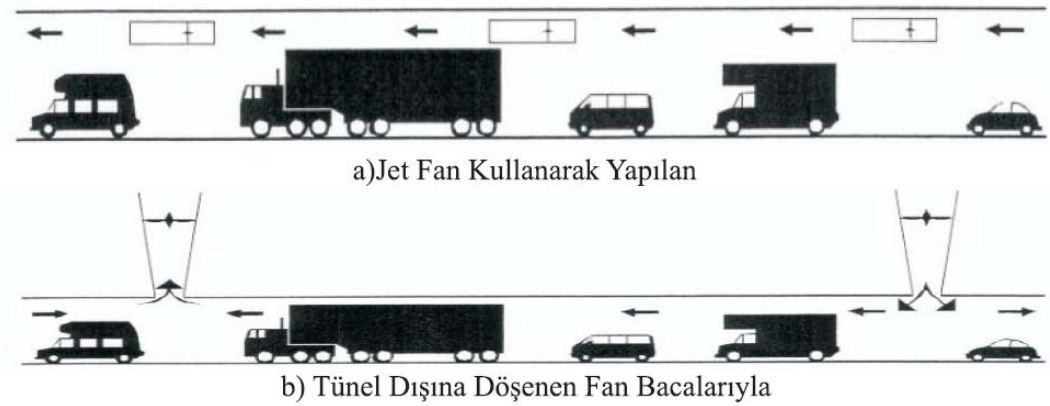
### 3.4.2 Mekanik (Zorlanmış) Havalandırma

Mekanik havalandırma için fanlardan yararlanır. Metro sistemlerinde mekanik havalandırmanın başlıca görevleri:

- Doğal havalandırmayı desteklemek ve tamamlamak,
- Sıcak ortam havasını sistemin dışına atmak,
- Temiz dış ortam havasını sisteme almak,

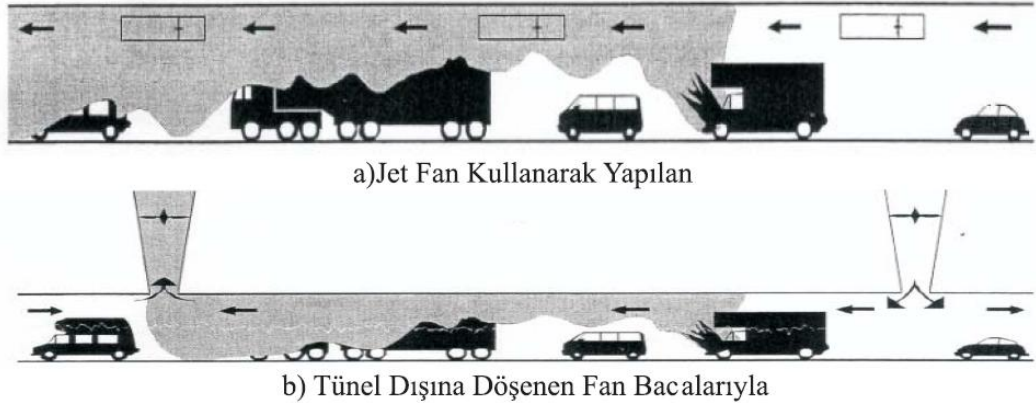
- Herhangi bir yangın durumunda sıcak hava ve duman tahliyesini sağlamak şeklinde sıralanabilir[23].

Tünelde kullanılan mekanik havalandırma sistemleri; boylamasına ve dikine havalandırma olarak sınıflandırılabilir. Boylamasına havalandırma sisteminde, tünel bir hava kanalı olarak görev yapar ve ayrıca bir havalandırma kanalı kullanılmaz. Havalandırma için; tünel içine kurulan jet fanlar veya tünel dışına kurulan fanlar kullanılır (Şekil 3.4). Dikine havalandırmada ise tünel boyunca döşenen havalandırma kanallarından yararlanır[11].



Şekil 3.4: Boylamasına havalandırma çeşitleri.

Tünelde yangın durumunda yangın sonucu oluşan sıcak havayı ve dumanı bir yöne doğru yönlendirerek yangın hattının diğer tarafında dumansız bir bölge oluşturmak için mekanik havalandırma kullanılır (Şekil 3.5). Mekanik havalandırma çeşitlerinden jet fanların montajı için ilave bir mekanizmaya gerek yoktur (Şekil 3.6). Bu sistemin kurulumu kolay olup diğer havalandırma sistemlerine göre daha az maliyetlidir. Fakat jet fanların montajı için tünel kesitinin geniş olması gerekmektedir. Ayrıca çok sayıda jet fanın kullanılması bakım ve işletme maliyetlerini artırmaktadır[11],[24].



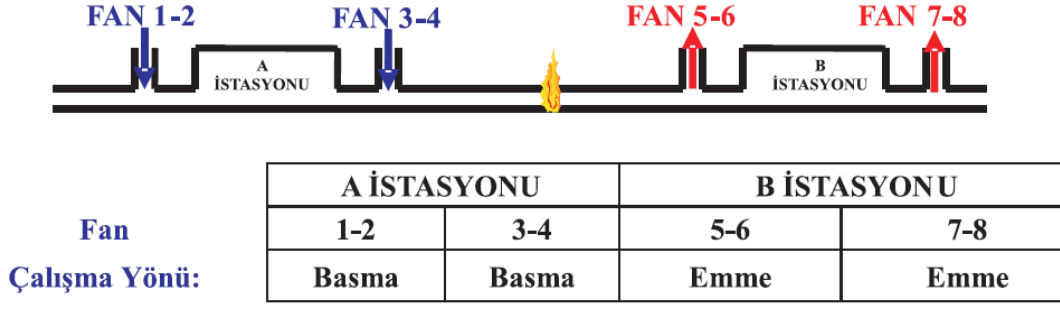
Şekil 3.5: Yangın durumunda boylamasına havalandırma.



Şekil 3.6: Jet Fan uygulama örneği.

### 3.4.3. Acil Durum Havalandırması

Acil durum havalandırma sistemleri genellikle emme ve basma prensibini kullanarak duman tahliyesini sağlamaktadır (Şekil 3.7). Tünelde yangın durumunda, yangın hattının bir tarafındaki istasyonda bulunan fanlar emme, diğer taraftaki fanlar ise basma durumunda çalıştırılır[11].



Şekil 3.7: Acil durum havalandırma sistemi çalışma prensibi.

Acil durum havalandırma fanları, istasyon ve tünel içerisinde yangının ortaya çıkabileceği her nokta için yeterli bir havalandırma sağlayabilmelidir. Metro istasyonlarında acil bir durum ile karşılaşıldığı zaman aşağıdaki adımlar uygulanır:

- Durum değerlendirmesi yapılır.
- Kontrol merkezi ile iletişime geçilir.
- Trenin bulunduğu yer tespit edilir.
- Duman kontrolünü sağlamak için emme veya basma yönünde çalıştırılacak fanlar belirlenir[23].

#### 3.4.4. Sıcaklık Kriteri

Metro istasyonları ve tünellerinde olası bir yangın durumu için tasarım kriterleri NFPA-130 standartlarına bağlı olarak belirlenir. NFPA-130 standartlarında; acil bir durum için yürüme yollarındaki hava sıcaklığı 60 °C'yi geçmeyecek şekilde sistemin tasarlanması gerektiği belirtilmektedir. Bu sıcaklık değeri yolcuların baş seviyesinin biraz yukarısındaki yani platform seviyesinden 2,5 m yükseklikteki kesit alanı boyunca sağlanması gerekmektedir. Ayrıca yangın durumunda havalandırma sisteminin çalışmaya devam etmesi için acil durum fanlarının hava akımına maruz kalan bütün parçalarının 250 °C ortam sıcaklığına en az bir saat dayanabilecek şekilde tasarlanması gerektiği belirtilmektedir[25].

### 3.4.5. Hız Kriteri

NFPA-130 standartlarına göre olası bir yangın durumunda tünel içerisinde olması gereken en düşük hava hızı değeri 2.5 m/s'dir. Bu değer yapılan çalışmalar neticesinde insanların hava akımını hissedebileceği en düşük hız olması nedeniyle elde edilmiştir. Yangın haricinde ise tünel içerisinde olması gereken en düşük hız değeri 0.75 m/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca insanların en fazla 11 m/s olan hava akımına karşı yürüebilecek olmalarından dolayı acil bir durumda tünel içerisinde olması gereken en yüksek hava hızı değeri 11 m/s olarak belirlenmiştir[25].

İstasyon veya tünel içerisinde yanmakta olan bir trenden duman ve zehirli gazlar tüm tünele yayılacak şekilde dağılacaktır. Eğer havalandırma sistemi bu duman ve zehirli gazları tünel içerisinde bir yöne doğru yönlendirmede yeterli olamazsa bu gazlar tüm tüneli sararak yolcu güvenliğini tehdit edecektir. Bu durumda "Kritik Hız" olarak ifade edilen; trenden yayılan duman ve zehirli gazları tünel içerisinde bir yöne doğru yönlendirmek için gerekli olan en düşük hava hızı değeri sağlanmalıdır(Şekil 3.8). Bu sayede diğer yönde yolcular için güvenli bir kaçış yolu sağlamak mümkün olacaktır[5],[26].



Şekil 3.8: Kritik hız etkisi.

### 3.4.6. Zehirli Gaz Kriteri

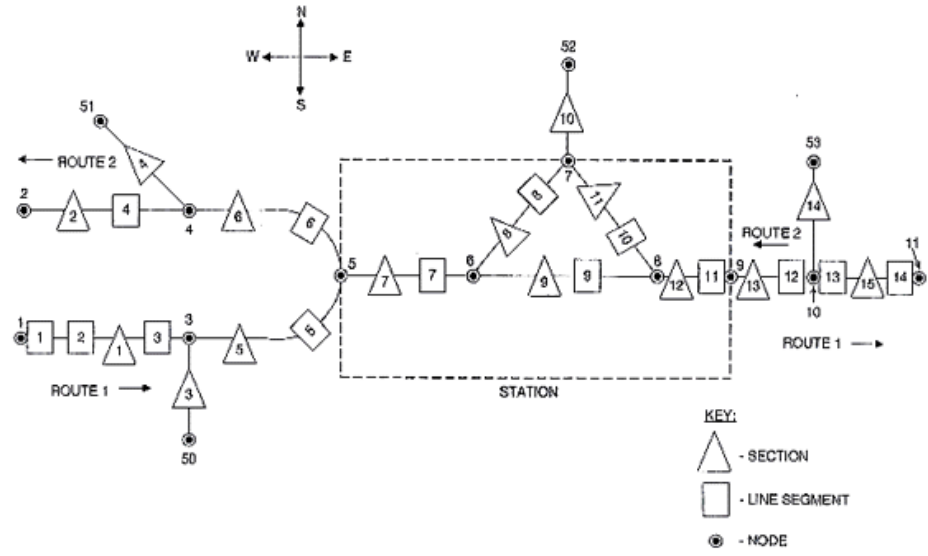
Metro sisteminde bir yangın esnasında oluşabilecek en tehlikeli gaz karbon monoksittir. Acil durum havalandırma sistemi tasarımı aşamasında Karbon monoksitin yangın sırasında en fazla bulunabileceği limit değerleri NFPA-130 standartlarında belirtilmektedir. Bu değerler ppm karbon monoksit olarak aşağıda verilmiştir:

- İlk birkaç saniye içinde maksimum : 2000 ppm
- İlk 6 dakika için ortalama : 1150 ppm
- İlk 15 dakika için ortalama : 450 ppm
- İlk 30. dakika için ortalama : 225 ppm
- Geri kalan zamanda ortalama : 50 ppm

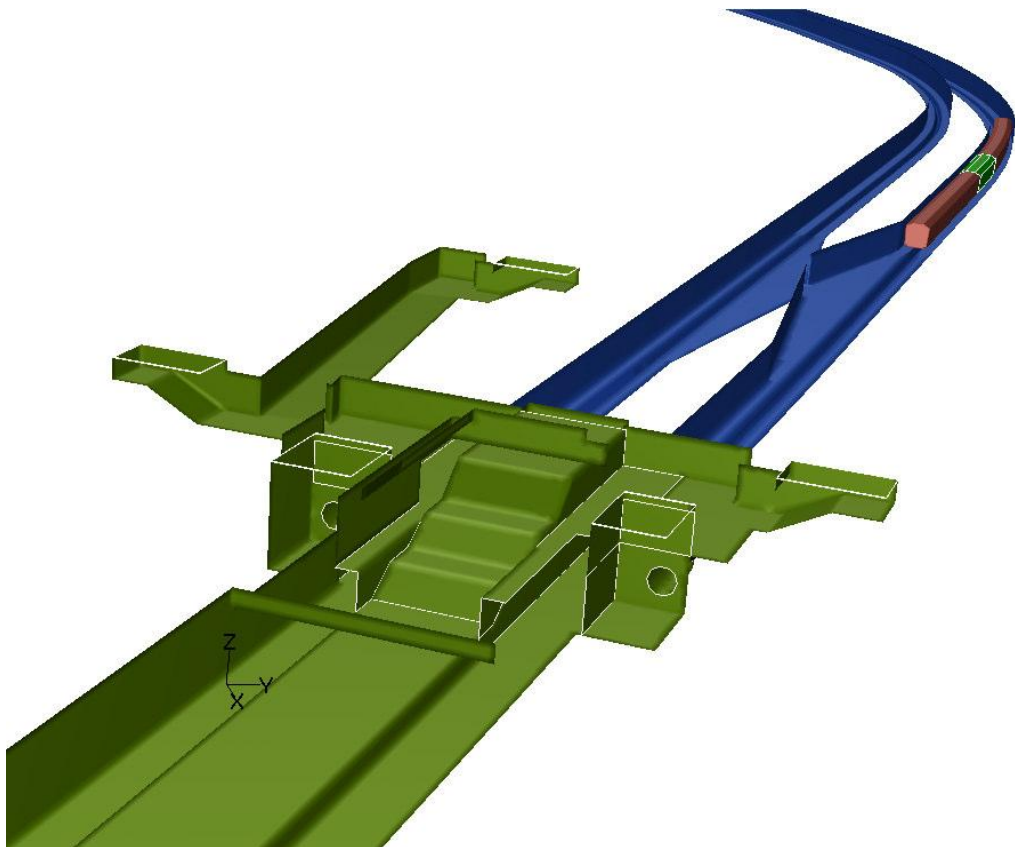
Bu değerler 1000 m'den yüksek olan rakımlar için o rakımın hava şartlarına göre ayarlanır[25].

### 3.5. Yangın Modeli Oluşturma ve Sayısal Çözüm

Metro istasyonlarında yangın modeli oluşturmak için iki yöntem mevcuttur. Birincisi, normal boyutlu veya küçük ölçekli bir model oluşturulup burada yangın çıkarılarak deneysel inceleme yapılmasıdır. Bu yöntem oldukça maliyetli ve uygulanması zor bir yöntemdir. İkinci yöntem ise HAD yazılımları yardımıyla yangın modellerinin bilgisayar ortamında simülasyonudur. HAD yöntemi ile yapılan çözümler ise ikiye ayrılmaktadır. Bunlar 1 boyutlu modelleme (Şekil 3.9) ve 3 boyutlu modellemedir (Şekil 3.10). Geçmiş senelerde 1 boyutlu yazılımlar daha sık kullanılırken, bilgisayar özelliklerinin iyileşmesi sayesinde 3 boyutlu yazılımlar daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. 3 boyutlu HAD yazılımlarının 1 boyutlu yazılımlara olan üstünlüğü; gerçek geometrinin birebir modellenebilmesi, akış denklemlerini sadeleştirmeden çözmesi ve bunların sonucu olarak çok daha gerçekçi ve hassas sonuçların elde edilmesidir[27].



Şekil 3.9: 1 Boyutlu yangın modeli.



Şekil 3.10: 3 Boyutlu yangın modeli.

### 3.5.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

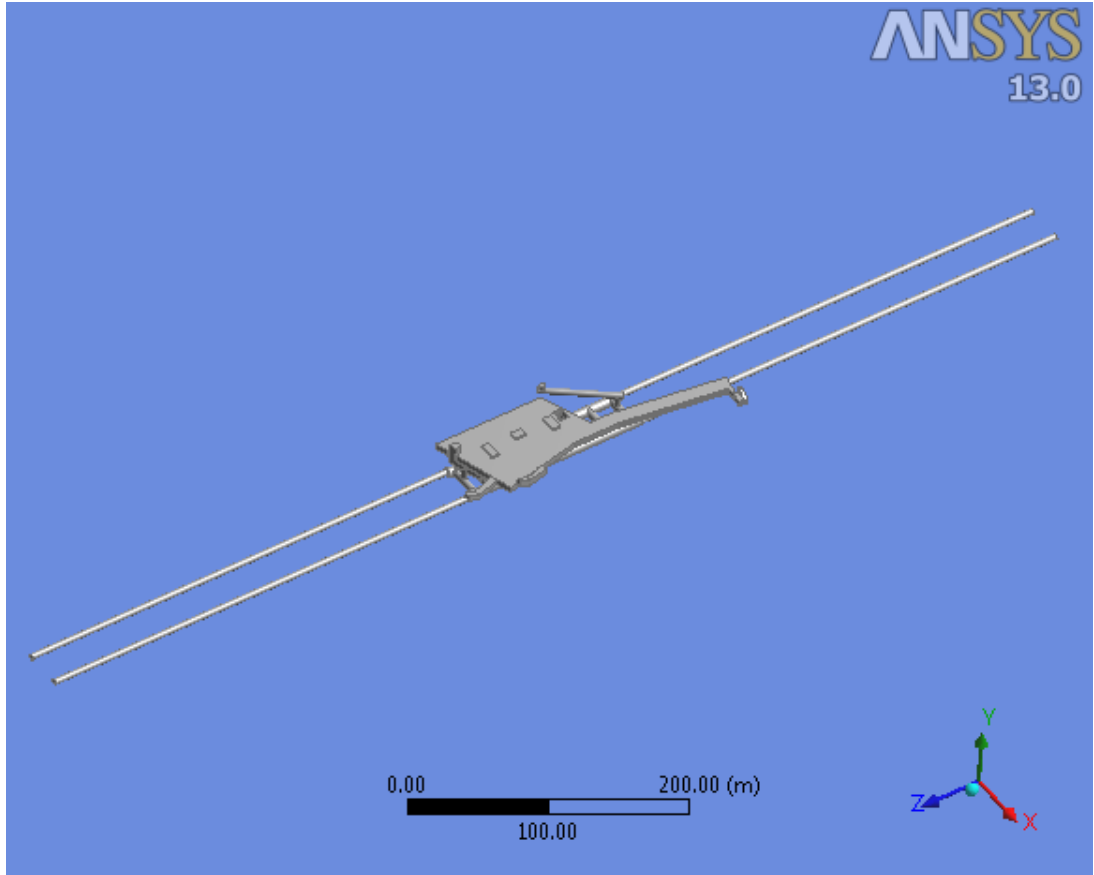
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi; sıvı veya gaz fazındaki herhangi bir akışkan modelin binlerce bazen milyonlarca küçük parçaya (hücreye) bölünmesi ve bölünen her parça için Navier-Stokes denklemlerinin veya bu denklemlerin sadeleştirilmiş formlarının gerçeğe en yakın çözümünün sanal ortamda yapılmasıdır. HAD yönteminde model büyüdükçe çözüm zamanı ve hesaplama gücü ihtiyacı artmaktadır[27].

HAD yönteminde öncelikle yangın ortamının geometrik modeli oluşturulur. Oluşturulan bu model çok sayıda kontrol hacmine (hücreye) bölünür. Uygun fiziksel modellerin ve sınır koşullarının seçilmesi ile parçaların her biri için kütle korunumu, enerjinin korunumu, momentumun korunumu, ısı transferi denklemleri ve ortam koşullarına bağlı olarak diğer denklemler bilgisayar yardımıyla hep birlikte çözülür. Yangın modelinde; yangının koordinatları ve yükü, türbülans modeli, yerçekimi etkisi gibi girdiler sisteme girilmelidir[28],[29],[30].

Bu çalışmada türbülans modeli olarak RNG  $k-\varepsilon$  modeli seçilmiştir. Türbülanslı akışlarda girdap etkisini hesaplaması, prandtl sayıları için analitik bir formül sağlaması, standart standart  $k-\varepsilon$  modeline göre daha hassas sonuçlar vermesi gibi nedenlerle RNG  $k-\varepsilon$  modeli tercih edilmiştir[31],[32].

## 4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

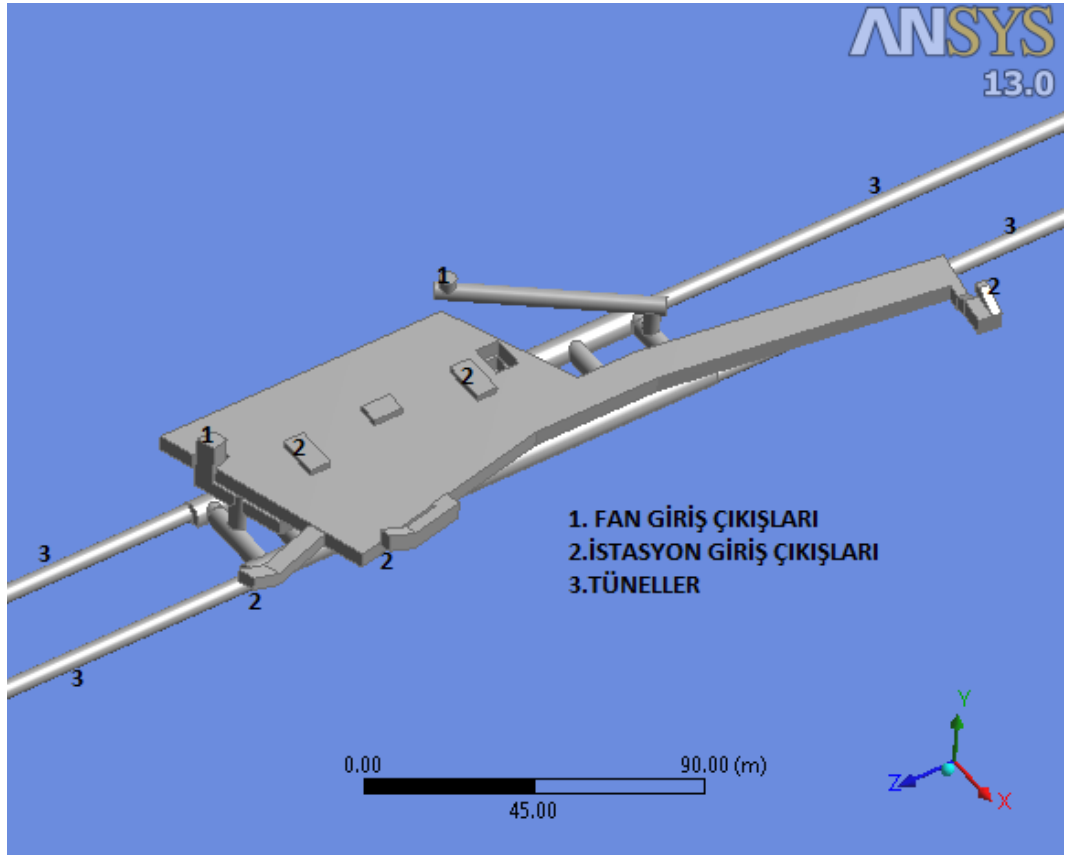
Bu çalışmada ANSYS CFX yazılımı kullanılarak Ümraniye metrosuna ait örnek bir istasyona (Şekil 4.1) ait 3 boyutlu yangın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. İstasyon modeli oluşturulurken gerçek boyutlar kullanılmıştır. Analizlere başlamadan önce çözümü kolaylaştırmak için bazı kabuller öngörülmüştür. İstasyon ve tünel giriş çıkışlarının atmosfere açık olduğu kabul edilerek, basınç değişimleri ihmal edilmiştir. İstasyon ve tünel duvarlarının adyabatik yani ısı izolasyonuna sahip olduğu kabul edilmiştir. Dış ortam sıcaklığının 25 °C (298 °K) ve basıncının 1 atmosfer (101325 Pascal) olduğu kabul edilmiştir. Sisteme tren ilave edildiği durumlarda, trenin içi boş bir kutu olduğu kabul edilerek duvarlarından oluşabilecek ısı ve kütle geçişi ihmal edilmiştir.



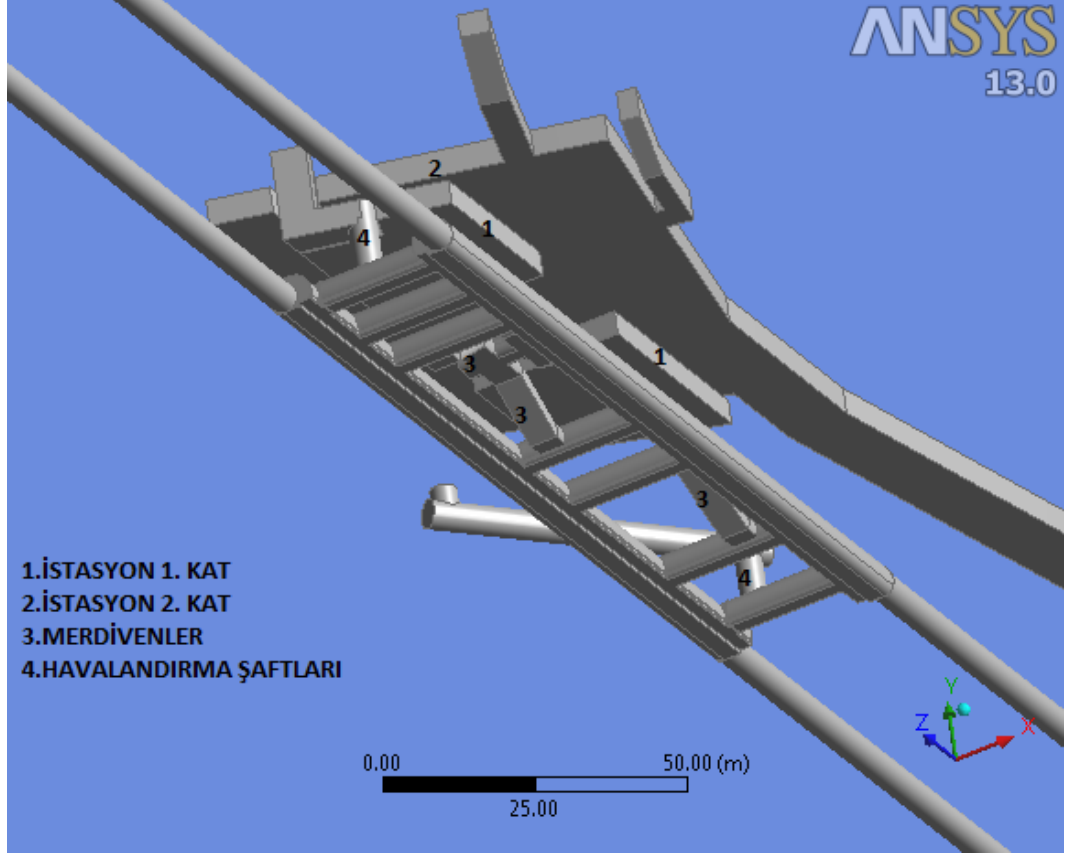
Şekil 4.1: İstasyon modelinin genel görünümü.

Sistem; 1 istasyon ve istasyona bağlı 4 tünelden oluşmaktadır (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Tünellerin en uç kısmının ve istasyona ait 5 adet çıkış kısmının her birinin atmosfere açık olduğu kabul edilerek her iki yönde hava giriş ve çıkışı olabileceği varsayımıyla sınır şartı "açık" olarak sisteme girilmiştir. İstasyonunun her iki başında bulunan 2 adet fanın çift yönlü ve farklı debilerde çalışmasına bağlı olarak sınır şartları sisteme girilmiştir. Havanın yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır. Zamandan bağımsız ve zamana bağlı analizler ayrı ayrı yapılmış ve yangın tahliyesi için en iyi senaryo belirlenmeye çalışılmıştır.

Simülasyonlar için Intel Core i3-370M 2.4 GHz İşlemci, 2 GB DDR3 Ram, 320 GB Hard Disk özelliklerine sahip bilgisayar kullanılmıştır.



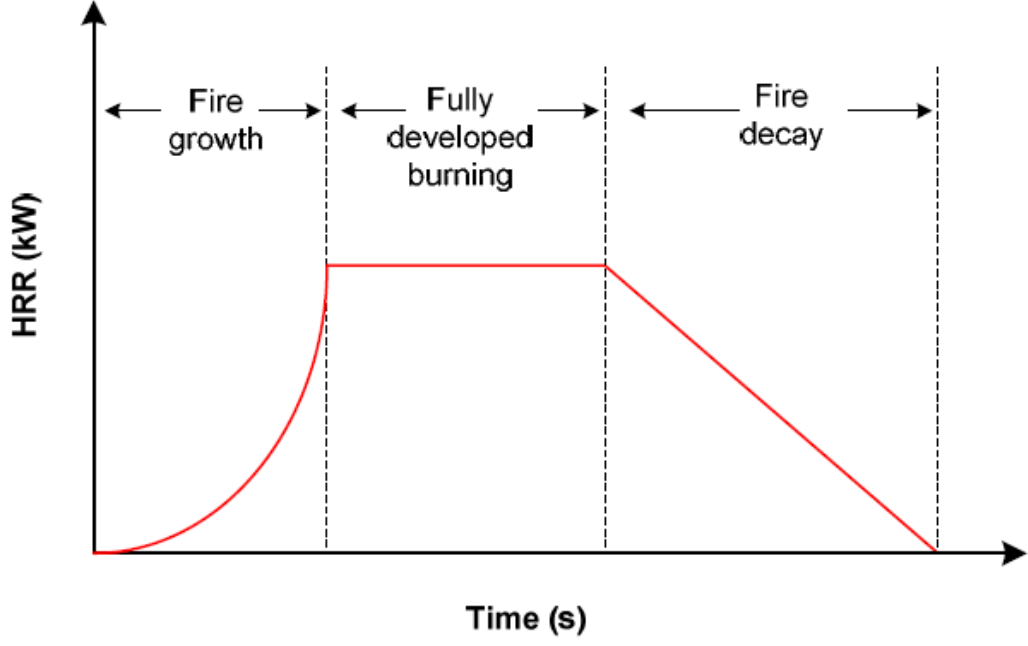
Şekil 4.2: İstasyonun detayları (üst).



Şekil 4.3: İstasyonun detayları (alt).

#### 4.1. Zamandan Bağımsız Simülasyon Çalışmaları

Yangın ısı yükünün en üst seviyeye ulaştığı “tam gelişmiş yangın evresi” göz önüne alınarak analizler yapılmıştır (Şekil 4.4). Tam gelişmiş evre boyunca yangın yükünün sabit olduğu ve zamanla değişmediği kabul edilmektedir[5],[7]. Analizler için daha önce yapılan çalışmalar göz önüne alınarak 12 MW yangın yükü seçilmiş ve bu ısı gücünün % 20’lik kısmının radyasyon ve iletim ile duvarlardan kaybolduğu ve % 80’lik kısmının taşınım ile ortama yayıldığı kabul edilerek 9.6 MW efektif ısı gücü kullanılmıştır. Simülasyon sonucu grafikler oluşturulurken, NFPA-130 standartlarında belirtilen sıcaklık için 60 °C sınırı göz önüne alınarak 10 °C de güvenlik payı bırakılmış ve 50 °C (323 °K) üst limit olacak şekilde sıcaklık dağılım grafikleri oluşturulmuştur.

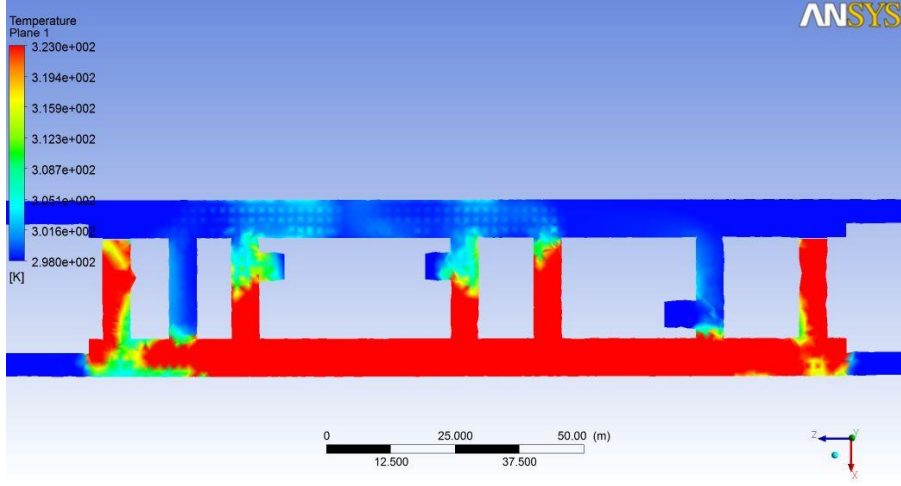


Şekil 4.4: Tam gelişmiş yangın durumunda ısı gücü.

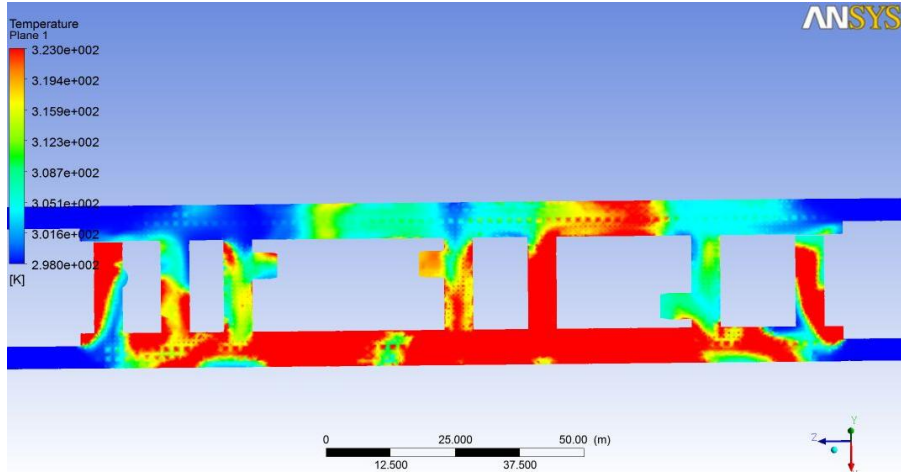
Yangın bölgesi koordinatları, fan kapasiteleri ve çalışma şekilleri, yangın damperleri ve perdeleri, tren ilavesi gibi değişkenlerde çeşitli varyasyonlar denenerek simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

#### 4.1.1. Hücre Sayısı Analizi

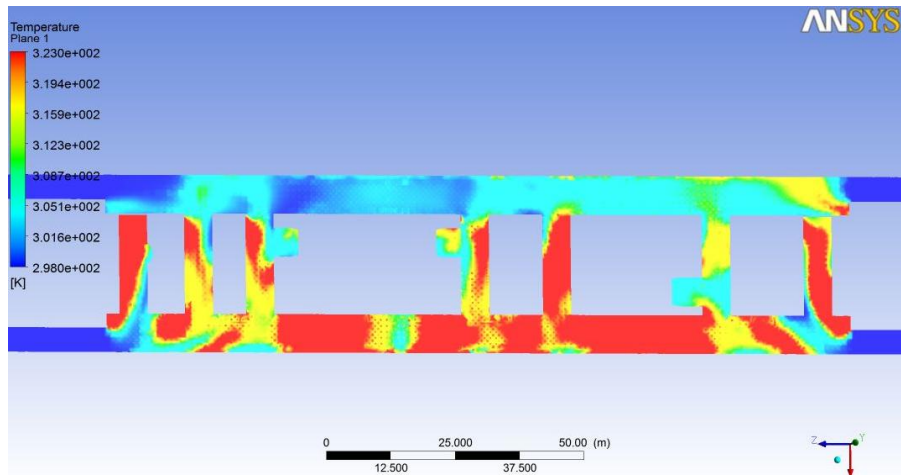
İstasyonda Yangın Durumu İçin Hücre Sayısı Analizi: İstasyonun her iki baş kısmında bulunan fanlar emme modunda  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 1; 75 m, hücre sayısındaki değişiminin sonuca etkisi incelenmektedir.



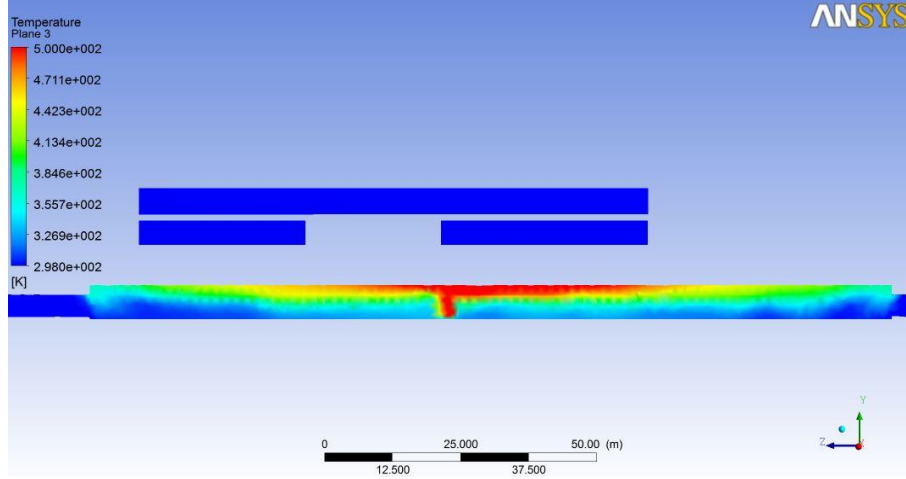
Şekil 4.5: Yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 145374.



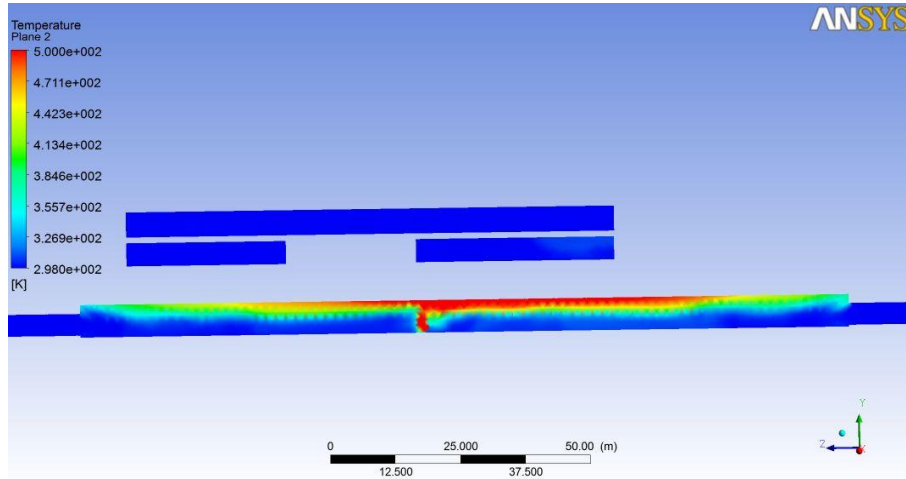
Şekil 4.6: Yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 882185.



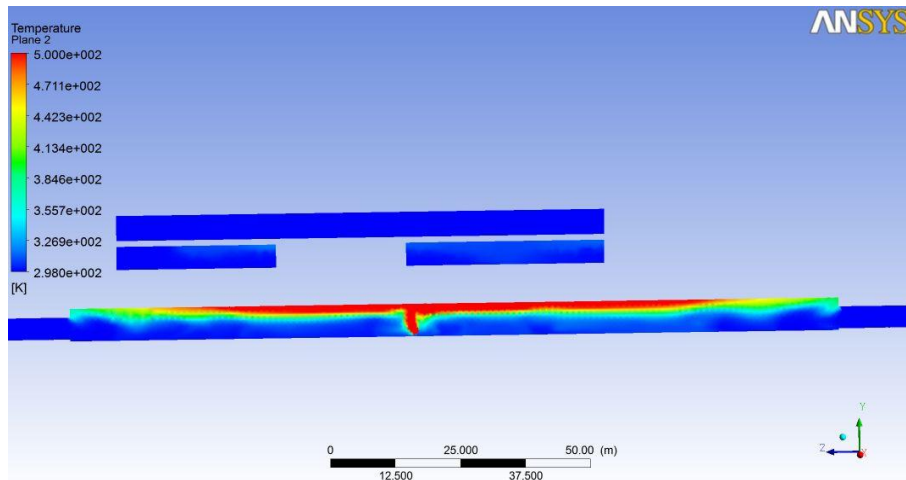
Şekil 4.7: Yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 1682321.



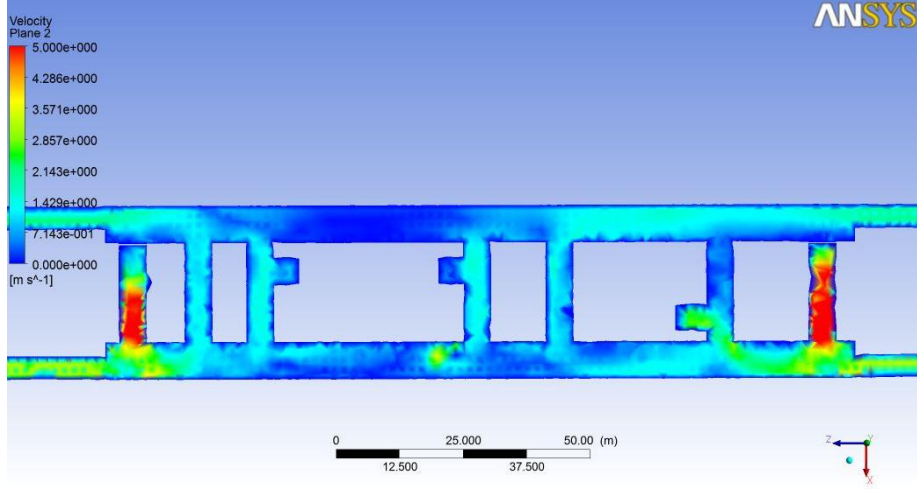
Şekil 4.8: Düşey kesit sıcaklık, hücre sayısı: 145374.



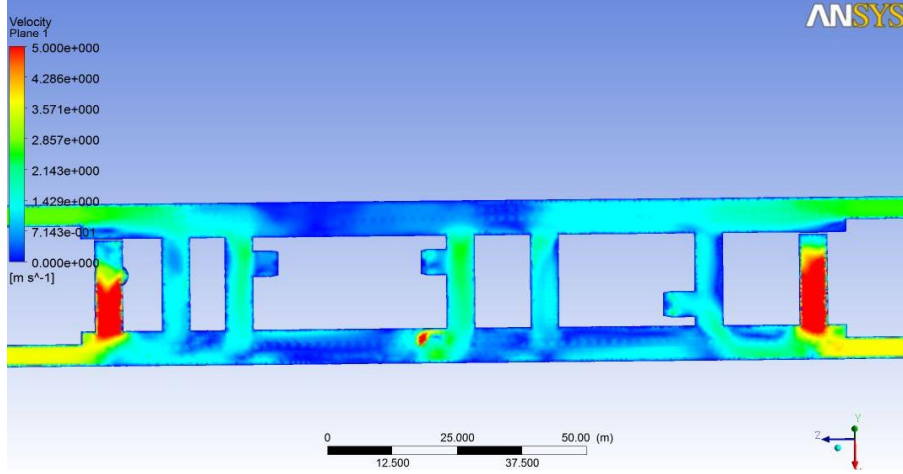
Şekil 4.9: Düşey kesit sıcaklık, hücre sayısı: 882185.



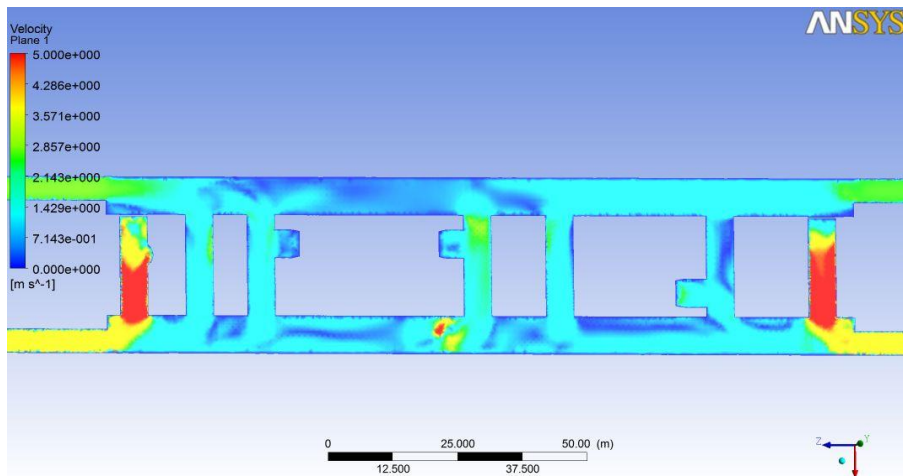
Şekil 4.10: Düşey kesit sıcaklık, hücre sayısı: 1682321.



Şekil 4.11: Yatay kesit hız, hücre sayısı: 145374.

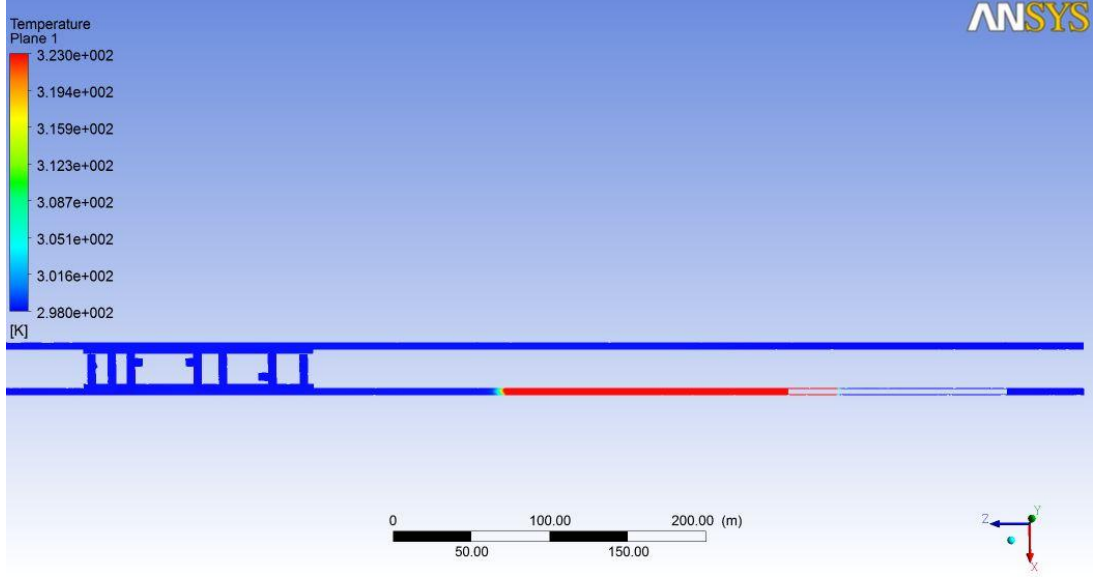


Şekil 4.12: Yatay kesit hız, hücre sayısı: 882185.

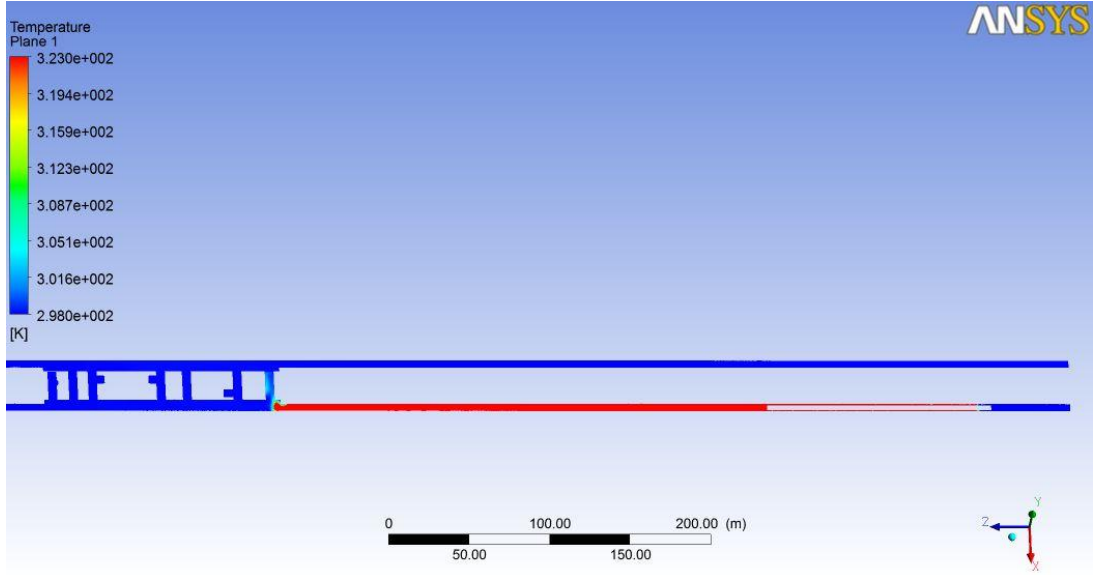


Şekil 4.13: Yatay kesit hız, hücre sayısı: 1682321.

Tünelde Yangın Durumu İçin Hücre Sayısı Analizi: Fanlar emme modunda 160 m<sup>3</sup>/s kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatları: 14.85; 1; -309 m, tren ilavesi var, tünelde yangın durumunda hücre sayısındaki değişimin sonuca etkisi incelenmektedir.



Şekil 4.14: Tünelde yangın durumu, yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 154316.



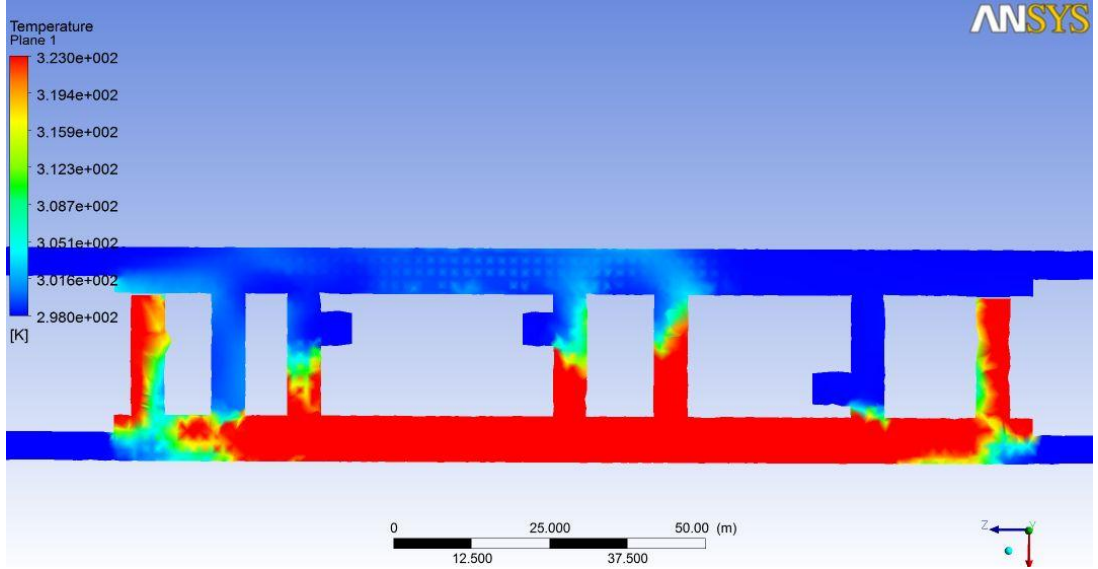
Şekil 4.15: Tünelde yangın durumu, yatay kesit sıcaklık, hücre sayısı: 927313.

İstasyonda yangın durumunda; hücre sayıları birbirinden farklı 3 model için yapılan analizlerin neticesinde sıcaklık dağılımları incelendiğinde, yaklaşık olarak birbirine yakın değerlerin elde edildiği görülmektedir. Aynı şekilde hız dağılımları da incelendiğinde birbirine çok yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Hücre sayısı arttıkça çözüm için gerekli zaman da artmakta olduğundan çözümü etkilemeyecek şekilde en düşük hücre sayısının tercih edilmesi zamandan tasarruf sağlayacaktır. İstasyon kısmı için yapılacak analizlerde 145374 hücre sayısının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.

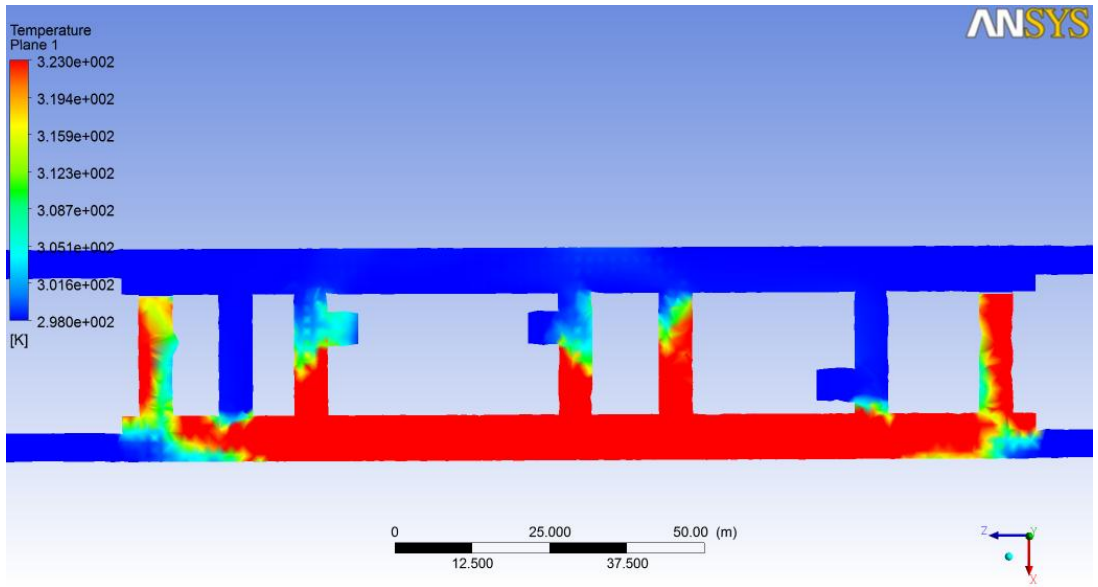
Tünelde yangın durumunda; hücre sayıları birbirinden farklı 2 model için yapılan analizlerde, sıcaklık dağılımları incelendiğinde, hücre sayısının artırılması ile yangının (sıcak havanın) kapladığı alanın önemli oranda arttığı görülmektedir. İstasyon kısmından farklı olarak, tünellerde yapılacak çalışmalarda daha hassas hücre sayısının (927313) tercih edilmesinin daha doğru sonuç vereceği kanaatine varılmıştır.

#### **4.1.2. İterasyon Sayısı Analizi**

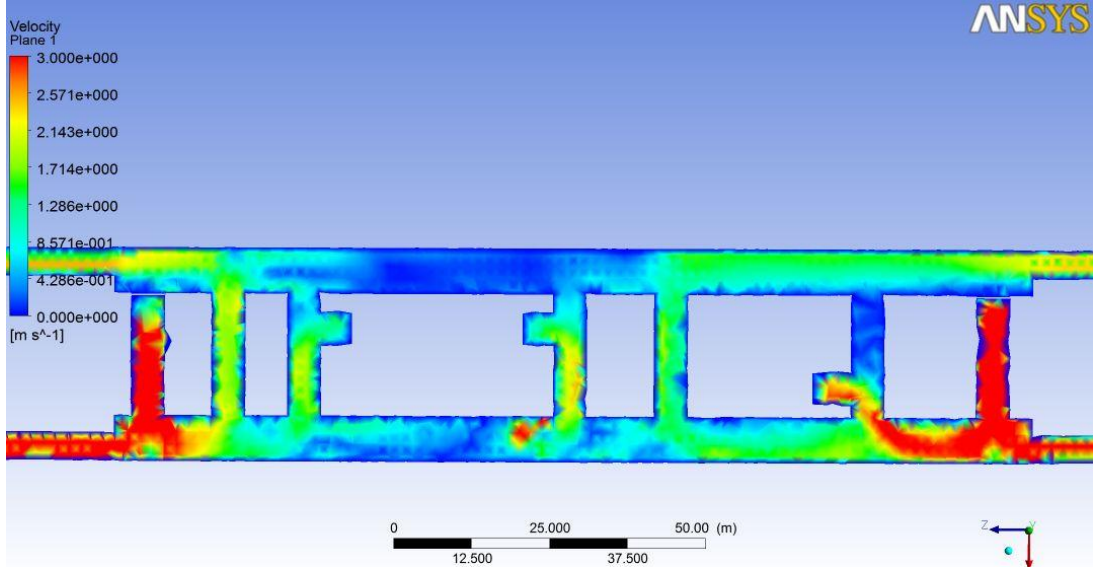
2 fan emme modunda  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 1; 75 m, iterasyon sayısındaki değişimin sonuca olan etkisi incelenmektedir. Bunun için diğer parametreler değişmemek üzere iterasyon sayıları sırasıyla; 100 ve 300 olan modeller için analizler yapılmıştır.



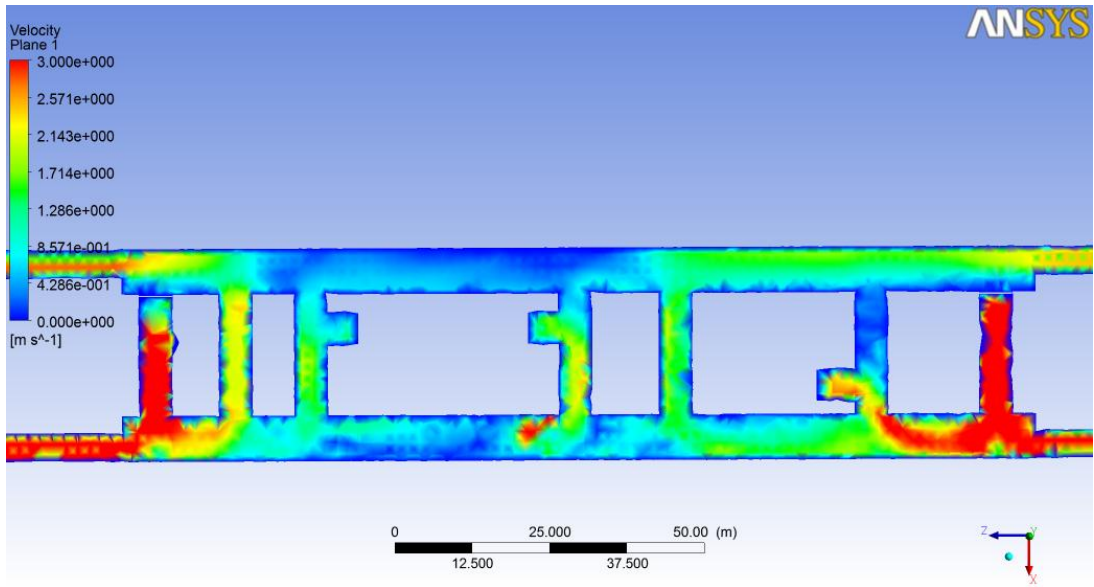
Şekil 4.16: Yatay kesit sıcaklık, iterasyon sayısı: 100.



Şekil 4.17: Yatay kesit sıcaklık, iterasyon sayısı: 300.



Şekil 4.18: Yatay kesit hız, iterasyon sayısı: 100.

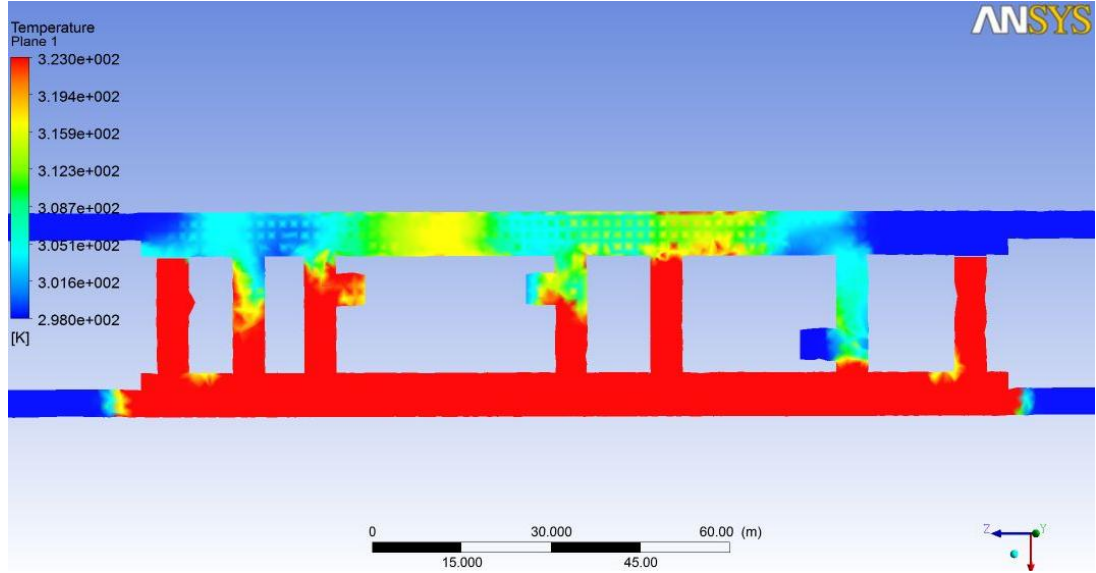


Şekil 4.19: Yatay kesit hız, iterasyon sayısı: 300.

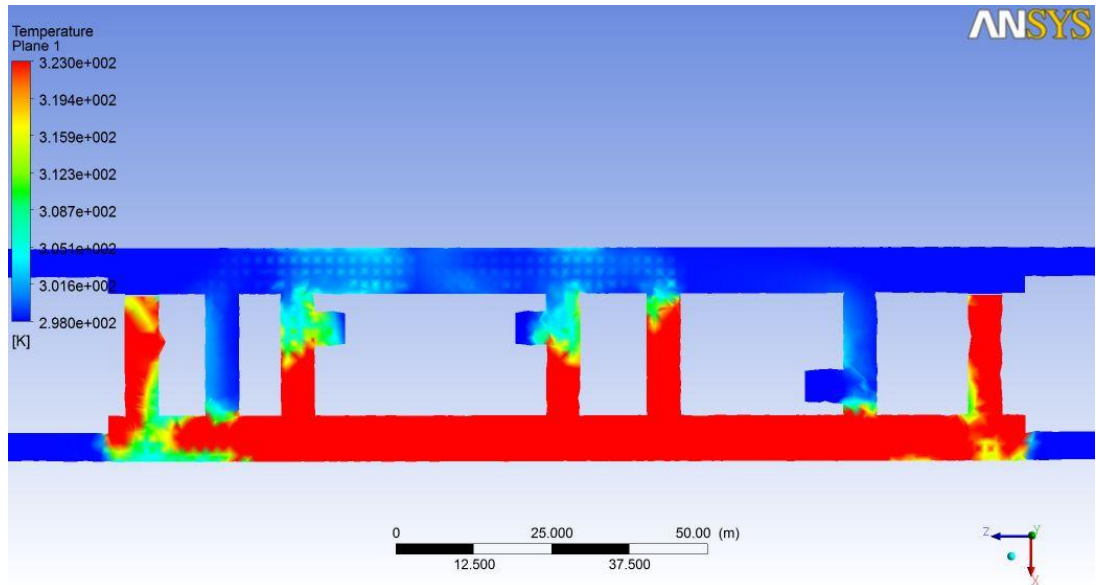
Sıcaklık ve hız dağılımları incelendiğinde iterasyon sayısının 100 değerinden 300 değerine çıkarılmasının sonucu etkilemediği görülmüştür. Bu nedenle simülasyon çalışmalarında iterasyon sayısının değeri 100 olarak yeterli görülmüştür.

### 4.1.3. Fan Kapasitesi Analizi

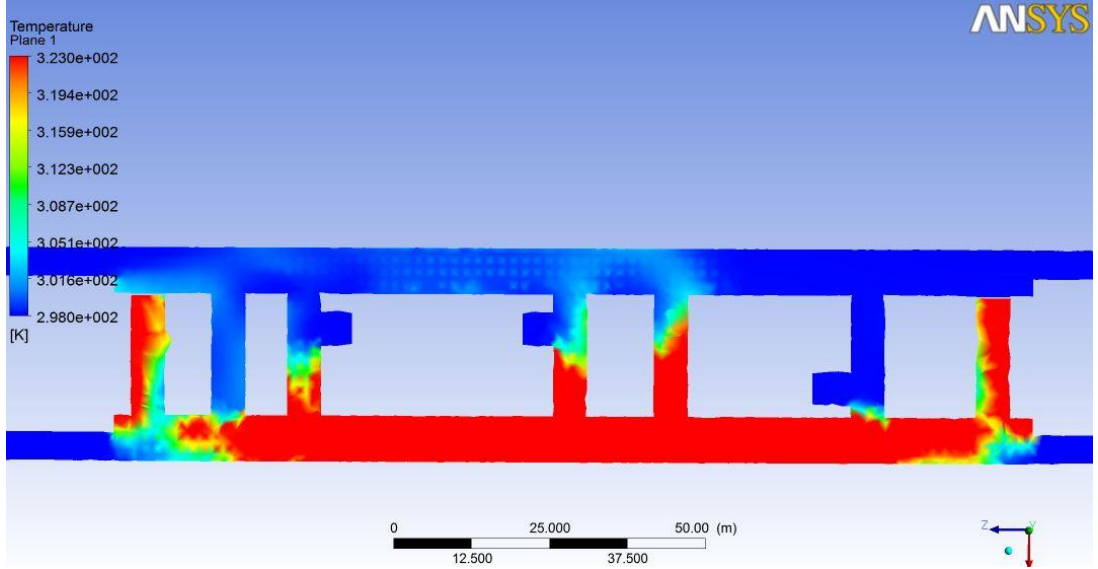
2 fan emme modunda çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 1; 75 m, fan kapasitelerindeki değişimin yangın yayılımına olan etkisi incelenmektedir.



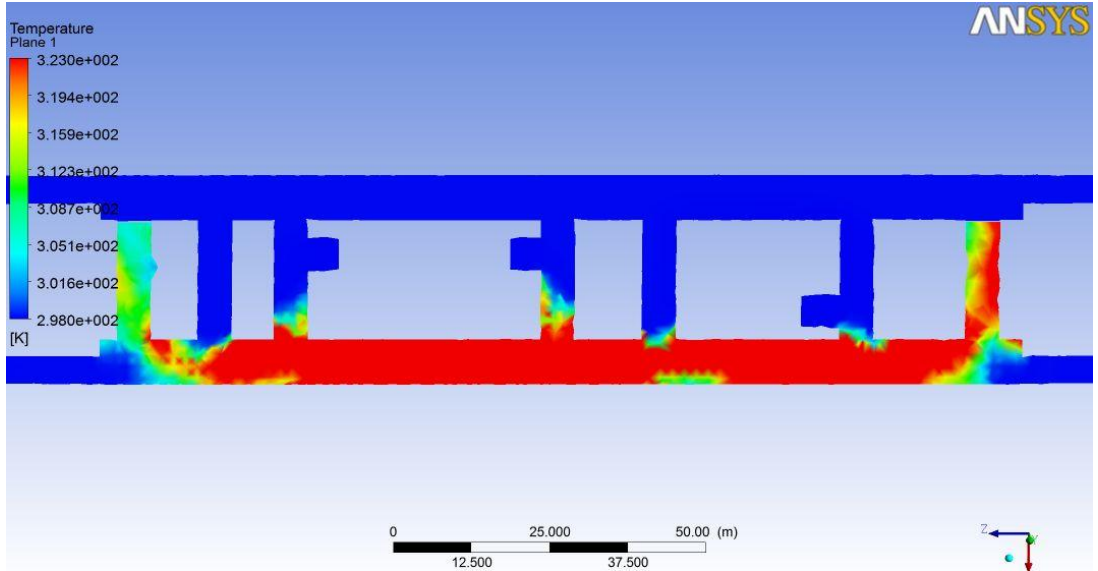
Şekil 4.20: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.



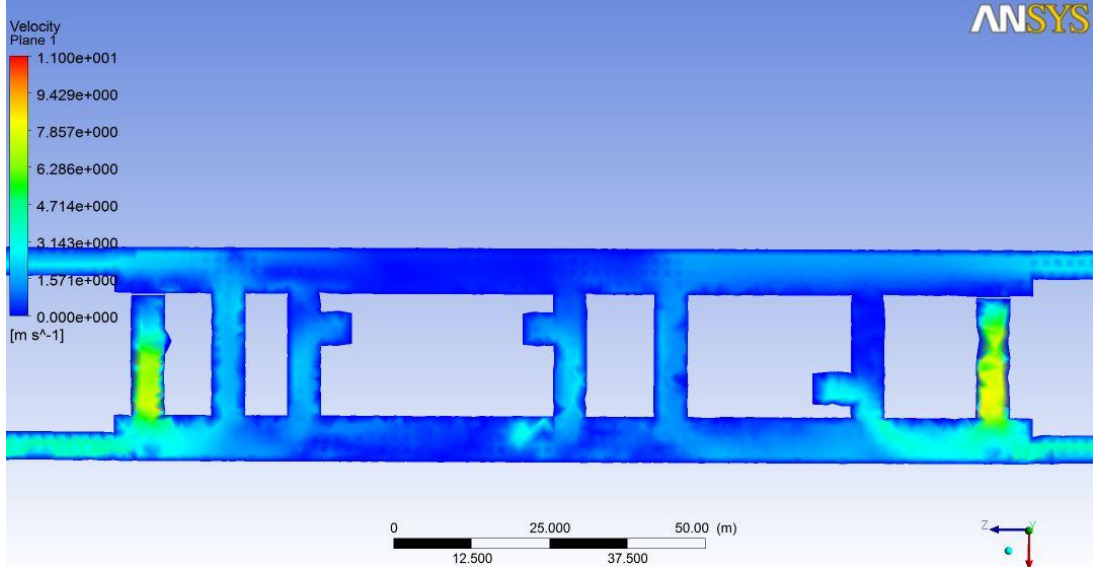
Şekil 4.21: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 120 m<sup>3</sup>/s.



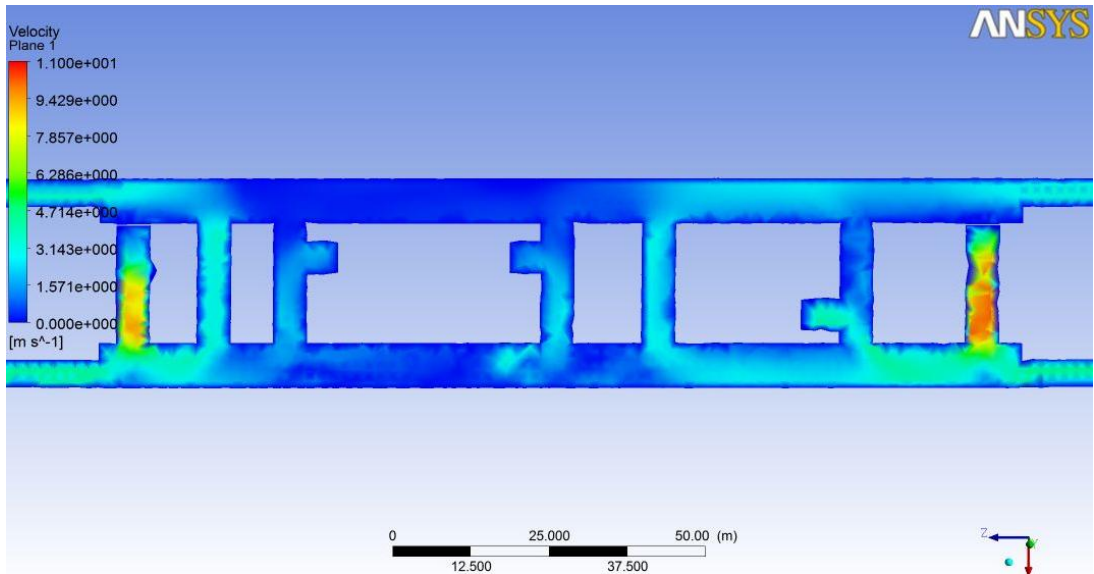
Şekil 4.22: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 160 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.23: Yatay kesit sıcaklık, fan kapasitesi: 200 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.24: Yatay kesit hız, fan kapasitesi: 160 m<sup>3</sup>/s.

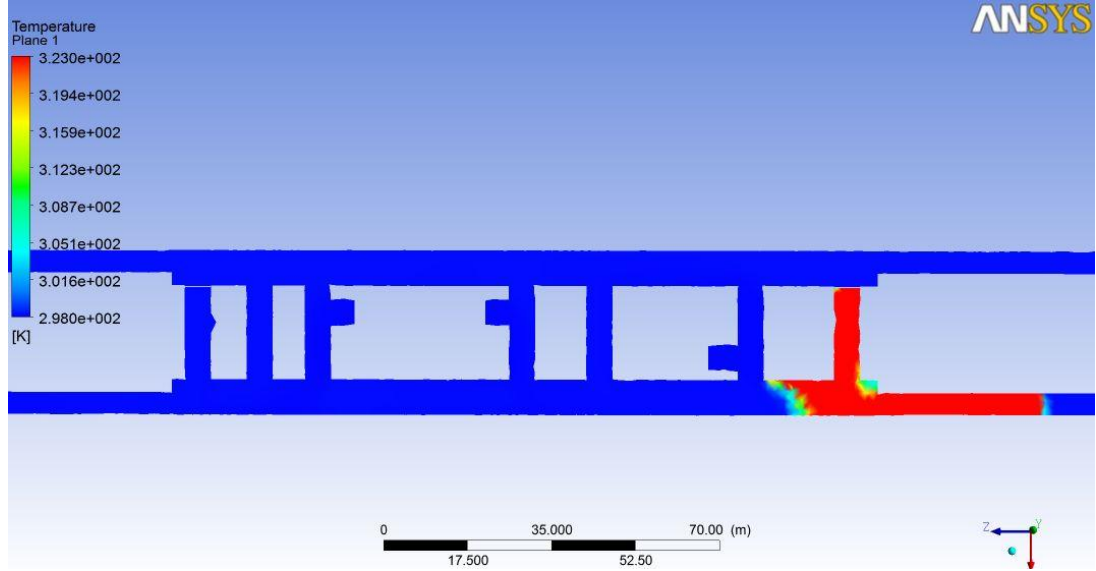


Şekil 4.25: Yatay kesit hız, fan kapasitesi: 200 m<sup>3</sup>/s.

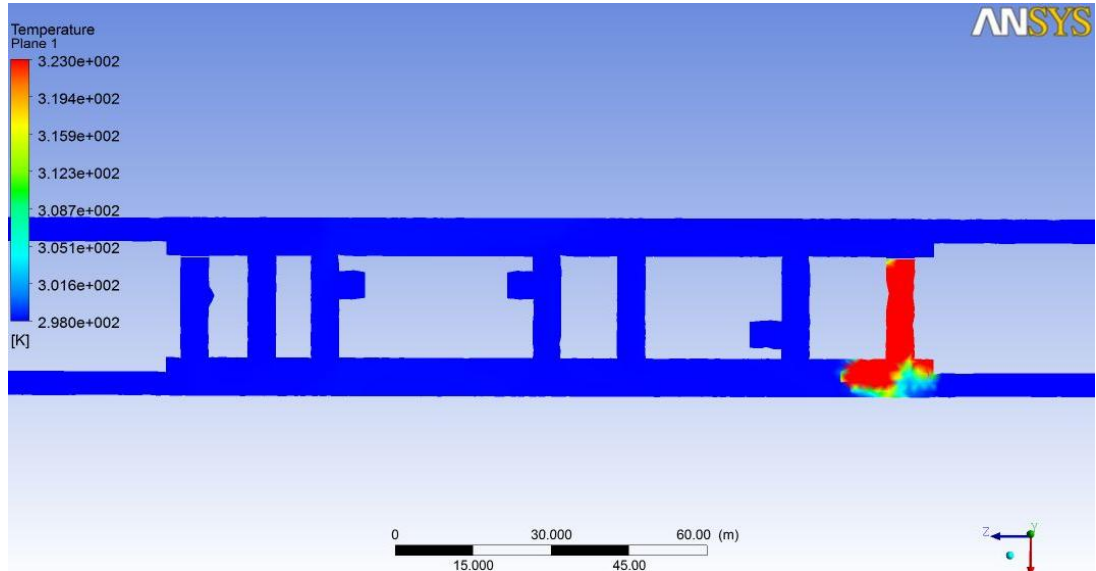
Sıcaklık dağılımları incelendiğinde 200 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fan kullanıldığı durumda sıcak havanın havalandırma hattının dışına taşmadan tahliye edildiği görülmektedir. 160 m<sup>3</sup>/s ve 120 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların kullanıldığı durumda ise sıcak havanın havalandırma hattının dışına kısmen taşıdığı ancak yolcu merdivenlerine ulaşmadığı görülmektedir. Hız dağılımları incelendiğinde ise 11 m/s maksimum hız limitinin geçilmediği, dolayısıyla hız kriterinin sağlandığı görülmektedir.

#### 4.1.4. Farklı Çıkış Koordinatlarına Sahip Yangın Yayılımı Analizi

2 fan emme modunda  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatlarındaki değişimin yangın yayılımına olan etkisi incelenmektedir.



Şekil 4.26: Yatay kesit sıcaklık, yangın koordinatları: 13.47; 1; -40 m.

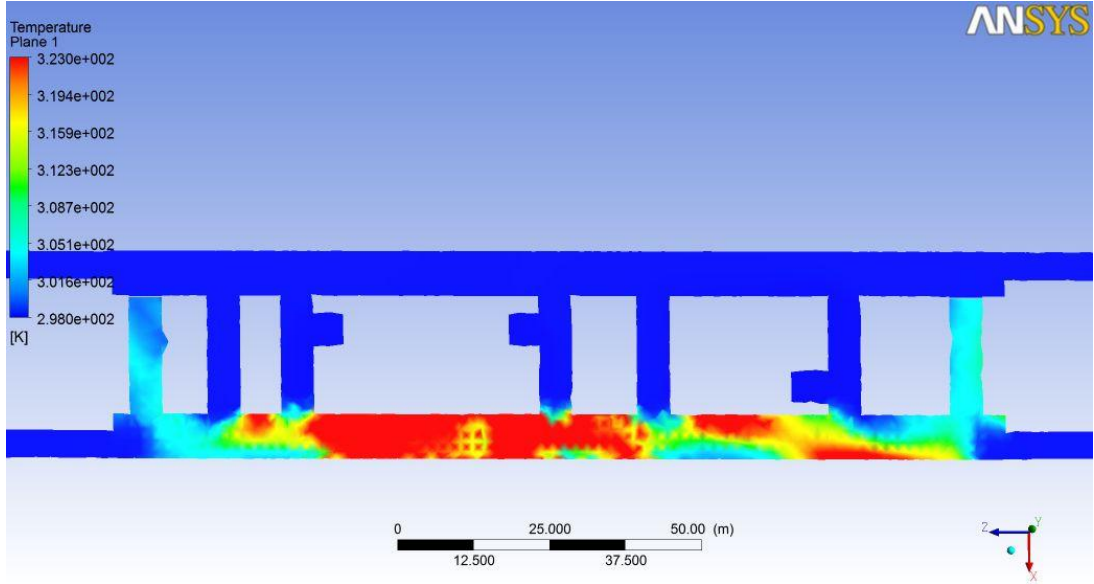


Şekil 4.27: Yatay kesit sıcaklık, yangın koordinatları: 13.47; 1; 10 m.

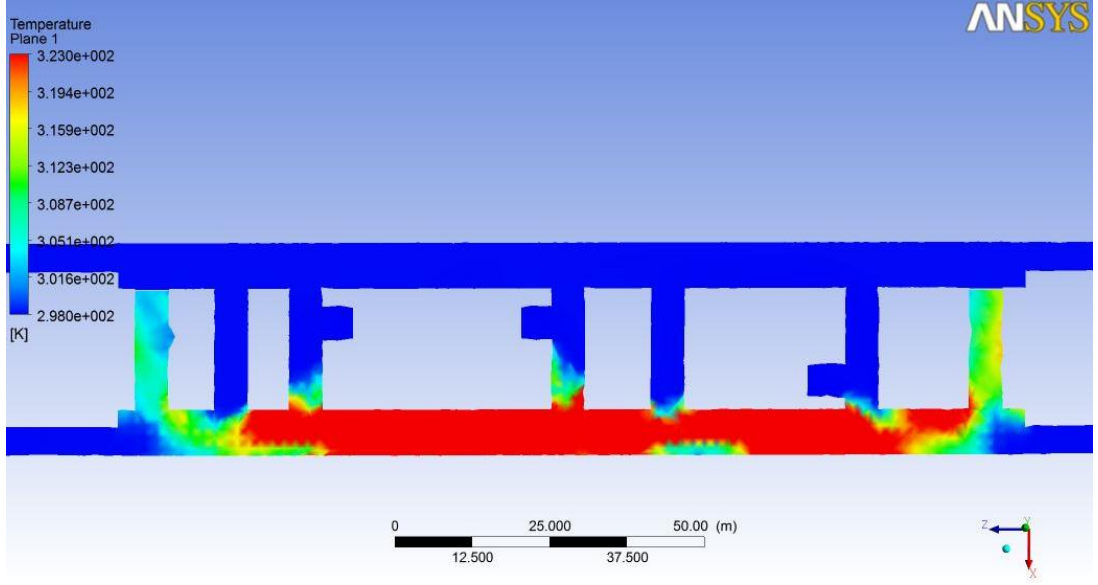
Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, özellikle fanın bulunduğu konuma yakın bölgelerde oluşabilecek yangınlarda sıcak hava tahliyesinin kolaylıkla sağlandığı ve yangın yayılımının oldukça sınırlı bir bölgede kaldığı görülmektedir. Bu nedenle fanlardan uzaklaştıkça olası yangınlar daha kritik bir durum oluşturmaktadır.

#### 4.1.5. Yangın Yükünün Değişiminin Yangın Yayılımına Etkisi

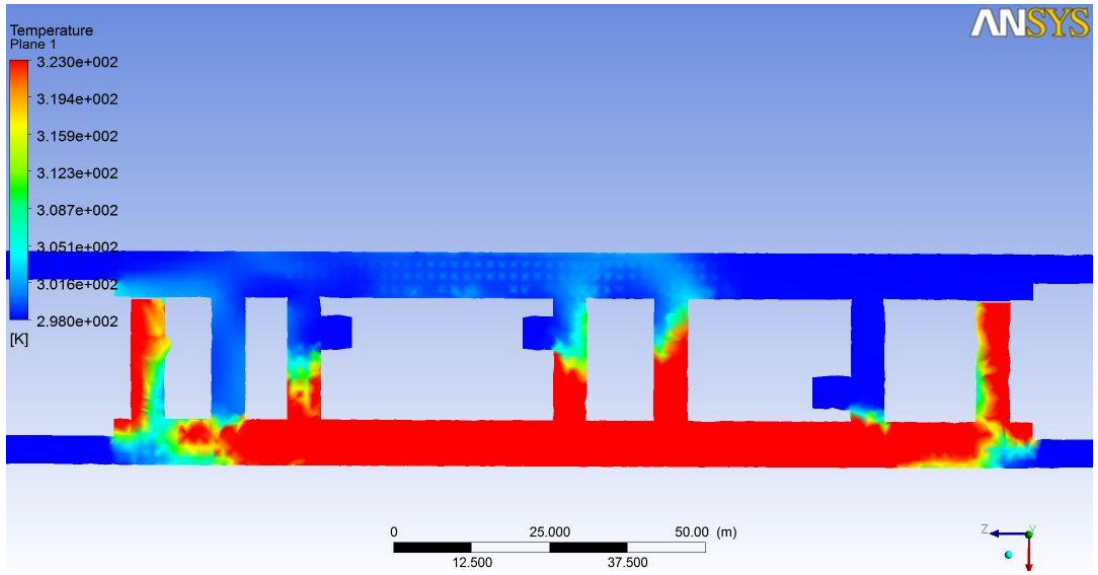
2 fan emme modunda  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 1; 75 m, yangın yükündeki değişimin yangın yayılımına olan etkisi incelenmektedir.



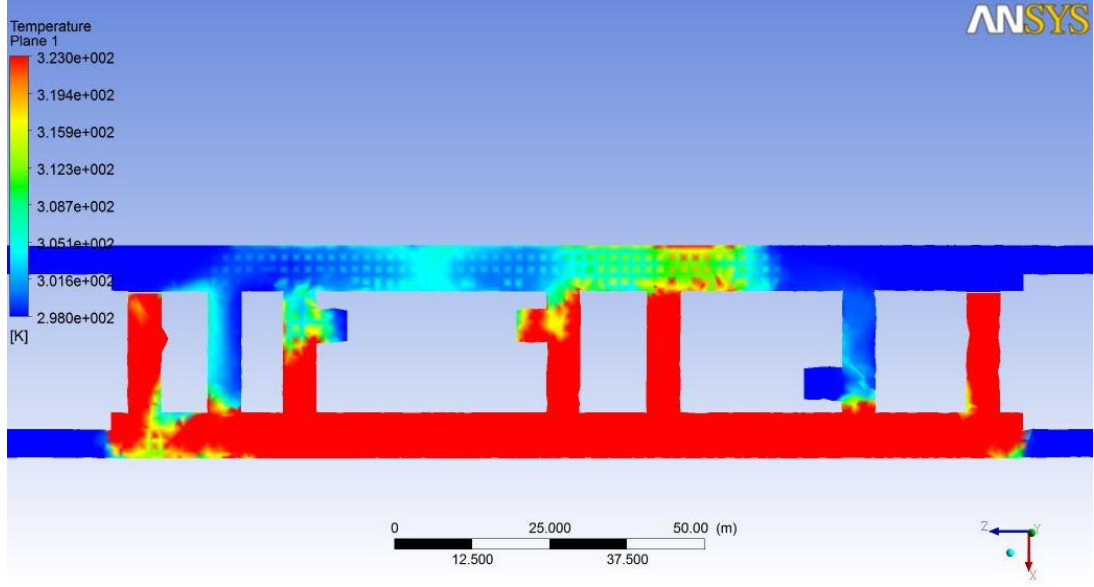
Şekil 4.28: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 3 MW.



Şekil 4.29: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 6 MW.



Şekil 4.30: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 12 MW.



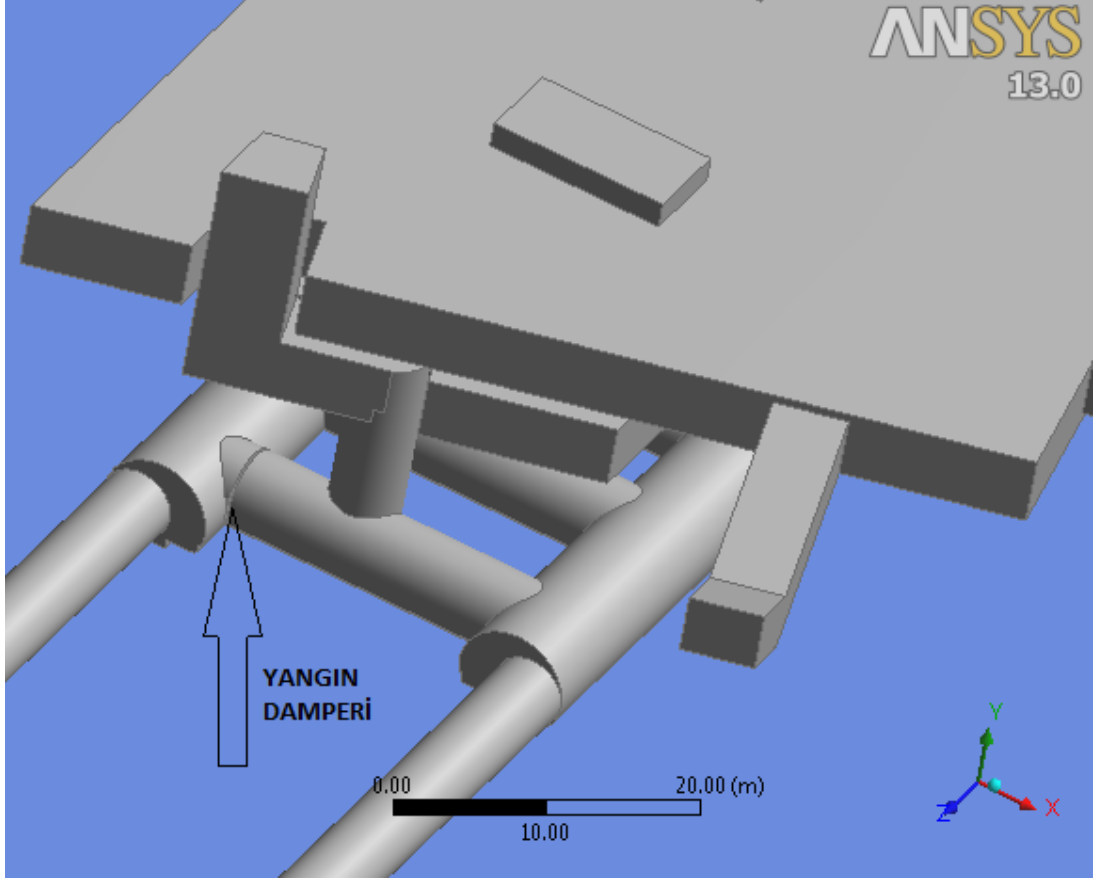
Şekil 4.31: Yatay kesit sıcaklık, yangın yükü: 24 MW.

Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 24 MW yangın yükü durumunda sıcak havanın havalandırma hattının dışına taşıdığı ve yolcu merdivenlerine kadar ulaştığı, 12 MW yangın yükü durumunda sıcak havanın havalandırma hattının dışına biraz taşıdığı fakat yolcu merdivenlerine ulaşmadığı görülmektedir. 6 MW ve 3 MW yangın yükü durumlarında ise sıcak havanın havalandırma hattının dışına taşmadığı ve iyi bir havalandırma sağlandığı görülmektedir.

#### 4.1.6. Yangın Damperlerinin Performansı Analizi

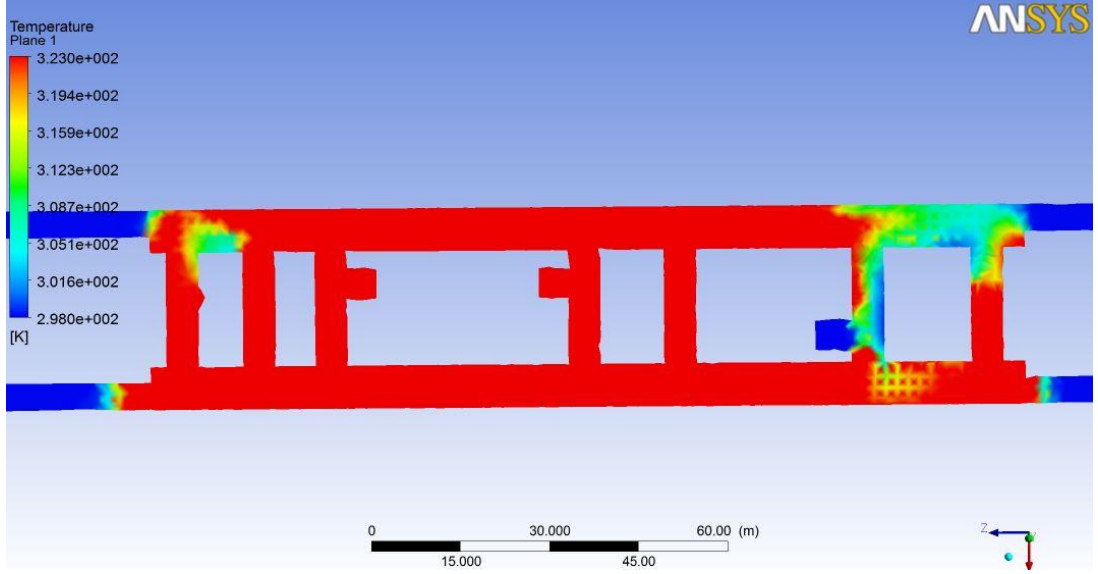
Yangın damperi; yangın esnasında hava geçişini kapatarak yangının komşu bölgelere sıçramasını önleyen kontrol elemanıdır. Galvaniz kaplı sacdan imal edilen yangın damperleri, direk olarak hava kanallarına veya duvar geçişlerine monte edilirler[33].

İstasyonun her iki başında bulunan fanların bağlı olduğu, iki tüneli birbirine bağlayan kanalların tünellerle bağlantı kısımlarında yangın damperleri bulunmakta olup yangının çıktığı konuma bağlı olarak diğer taraftaki damperler kapanmakta ve fanların yangınsız bölge ile bağlantıları kesilmektedir. Böylece tek taraflı emiş yapılarak daha verimli sıcak hava tahliyesi gerçekleştirilmektedir(Şekil 4.32).

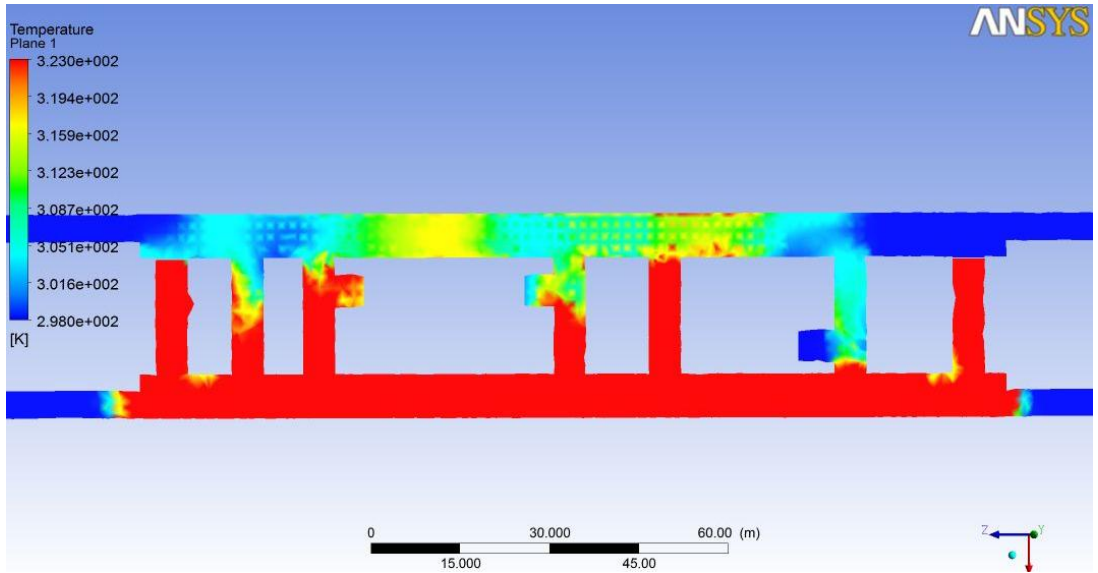


Şekil 4.32: Yangın damperi.

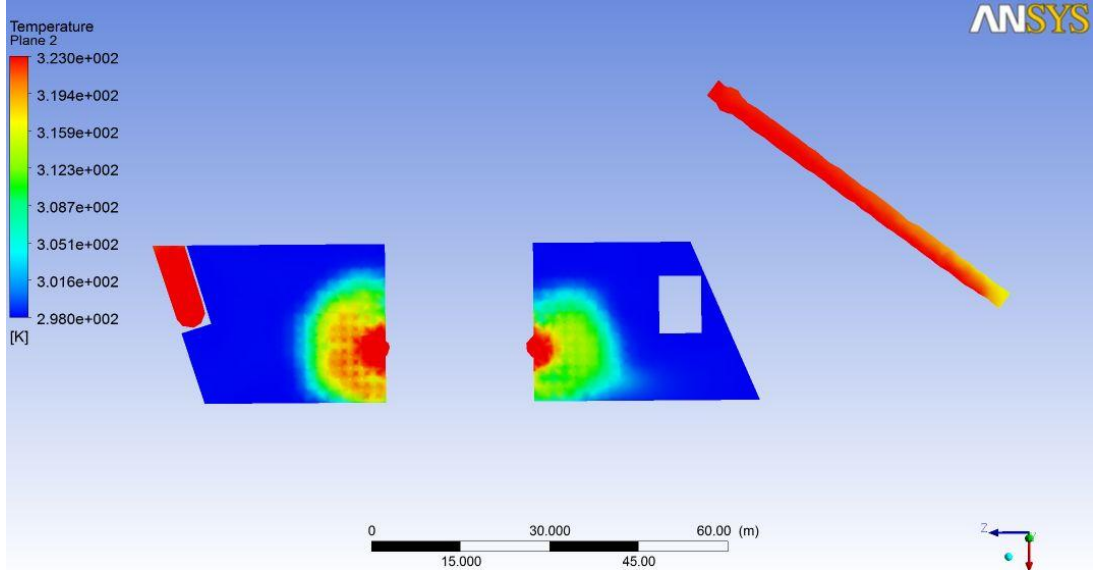
Aşağıdaki modelde 2 fan emme modunda  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 1; 75 m, yangın damperleri bulunan ve bulunmayan durumlar için yangın yayılımı incelenmektedir. Yangın damperinin bulunduğu yerde hava geçişini tam olarak engellediği kabul edilerek buradan oluşabilecek ısı ve kütle transferi ihmal edilmiştir.



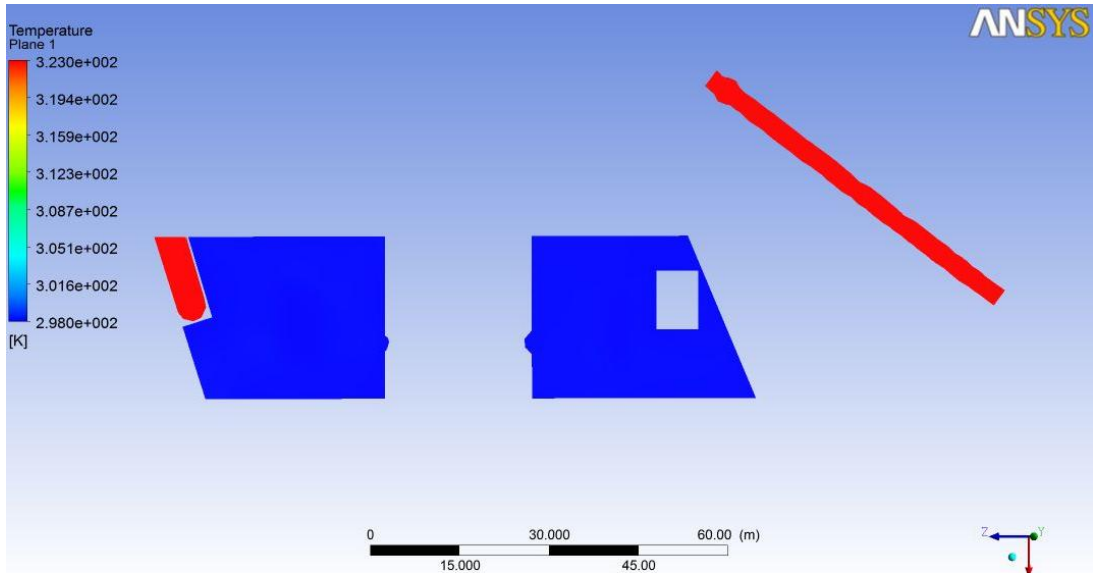
Şekil 4.33: Yatay kesit sıcaklık, yangın damperi yok.



Şekil 4.34: Yatay kesit sıcaklık, yangın damperi var.



Şekil 4.35: İstasyon birinci kat sıcaklık, yangın damperi yok.

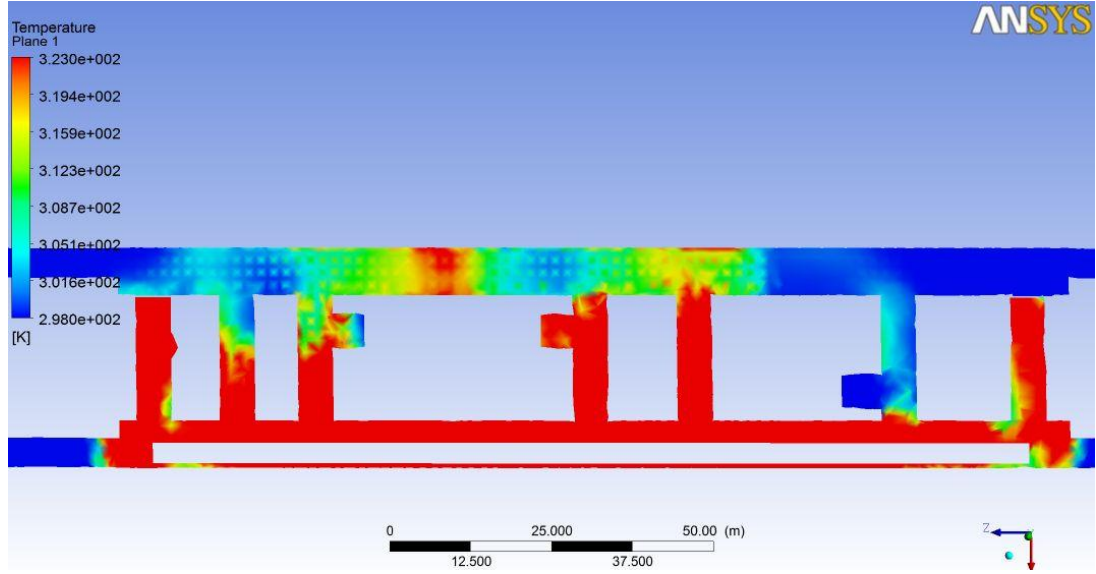


Şekil 4.36: İstasyon birinci kat sıcaklık, yangın damperi var.

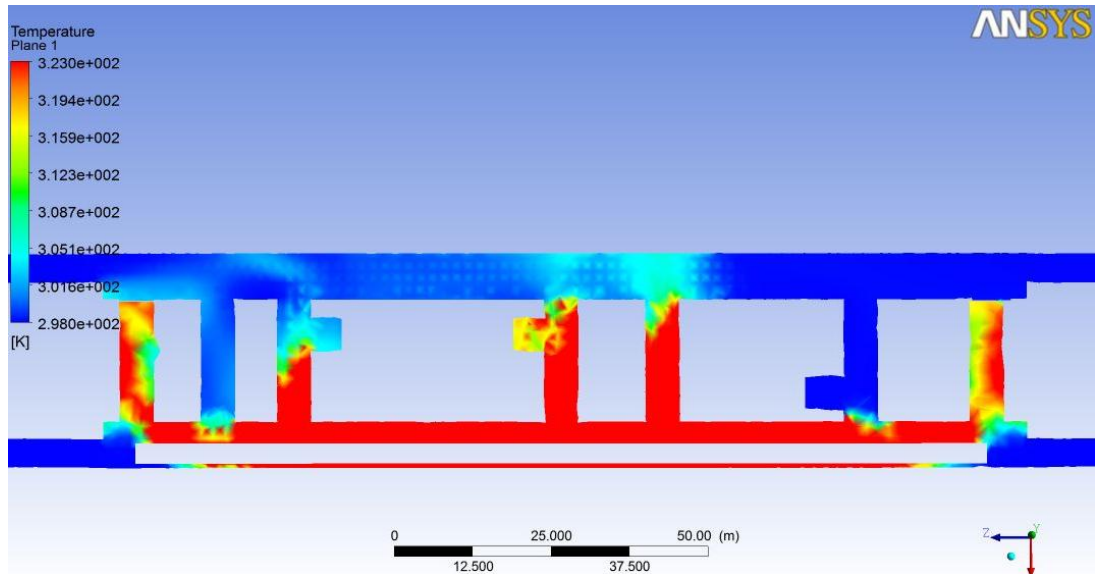
Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, yangın damperleri kullanılmayan durumda sıcak havanın büyük bir alana yayıldığı hatta istasyon birinci katına kadar ulaştığı görülmekte, yangın damperleri kullanıldığı durumda ise yangın yayılımının engellendiği ve sınırlı bir alanda kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla yangın damperlerinin sıcak hava tahliyesini sağlamada çok önemli bir katkısının olduğu görülmektedir.

#### 4.1.7. Trenin Yangın Yayılımına Etkisi Analizi

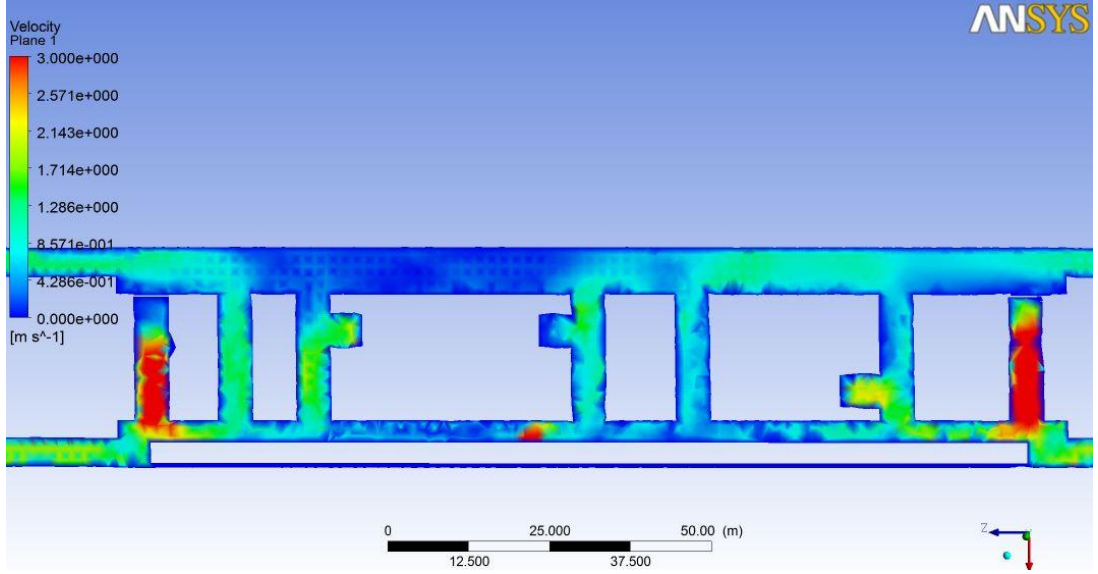
2 fan emme modunda çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 0.6; 75 m, geometriye tren ilave edildiği durumda farklı fan kapasitelerinde yangın yayılımı incelenmektedir.



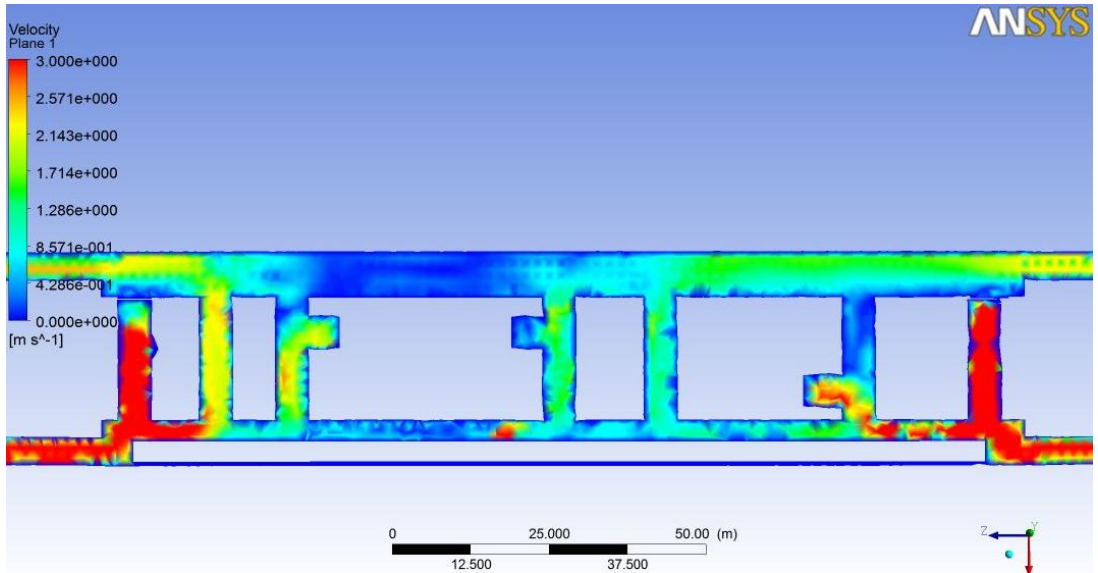
Şekil 4.37: Yatay kesit sıcaklık, tren ilaveli, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.38: Yatay kesit sıcaklık, tren ilaveli, fan kapasitesi: 160 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.39: Yatay kesit hız, tren ilaveli, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.40: Yatay kesit hız, tren ilaveli, fan kapasitesi: 160 m<sup>3</sup>/s.

Geometriye tren ilave edildiği durumda, tren ilavesi olmayan duruma göre sıcak havanın biraz daha fazla yangın hattının dışına taşıdığı gözlemlenmiş, trenin havalandırma kesitini daraltması sonucu bu etkinin oluşabileceği kanaatine varılmıştır.

#### 4.1.8. Yangın Perdesi Kullanıldığında Yangın Yayılmı Analizi

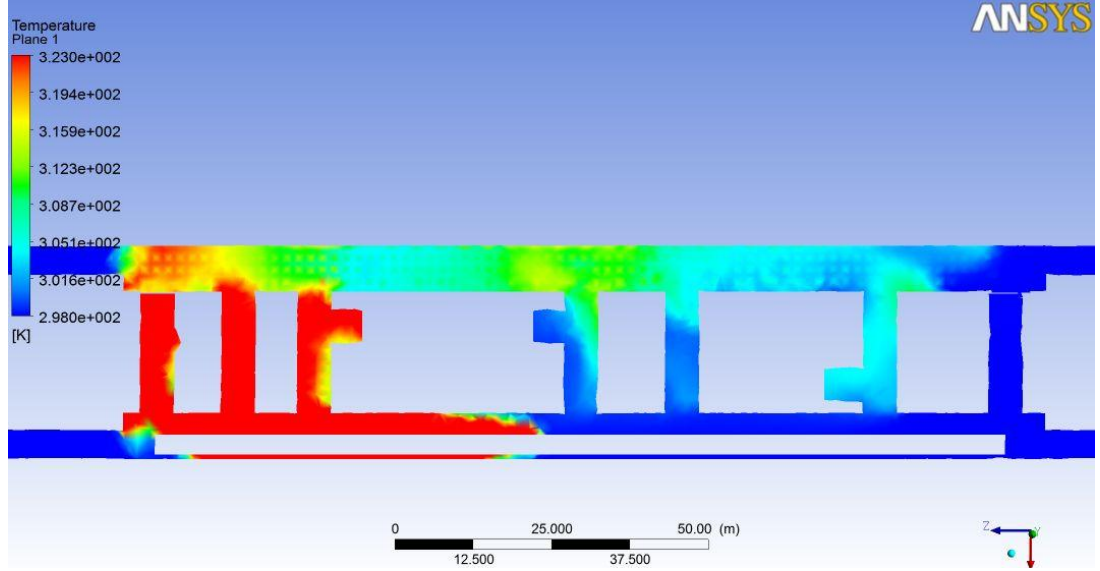
Yangın perdesi, iki tarafı silikon kaplı ve içinde çelik ipler bulunan fiber malzemeden üretilmekte ve yangının bir bölgeden diğer bir bölgeye sıçramasını engellemek için kullanılmaktadır (Şekil 4.41). Özel kumaşı sayesinde 1100 °C sıcaklıkta 180 dakikaya kadar rahat hareket olanağı sağlamaktadır[34].



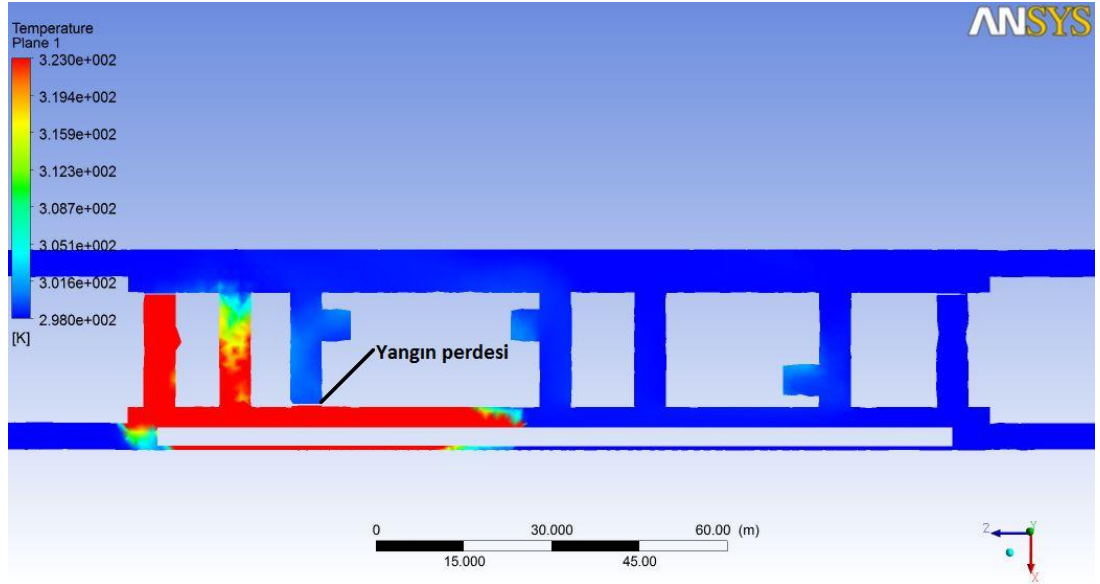
Şekil 4.41. Yangın perdesi.

Yangın damperlerinden farklı olarak yangın perdeleri, fanların buldukları kanalların dışındaki kanallarda kullanılmaktadır. Yani iki tüneli birbirine bağlayan 7 tane kısa bağlantı kanalından 2 tanesinin her iki tarafında yangın damperleri, 5 tanesinin de her iki tarafında yangın perdeleri kullanılmaktadır. Analizlerde, yangın perdesinin iki bölgeyi birbirinden tamamen izole ettiği kabul edilerek buradan meydana gelebilecek ısı ve kütle transferi ihmal edilmiştir. Havalandırma yönündeki 1 yangın perdesinin çalışır durumda olduğu model için simülasyonlar yapılmıştır.

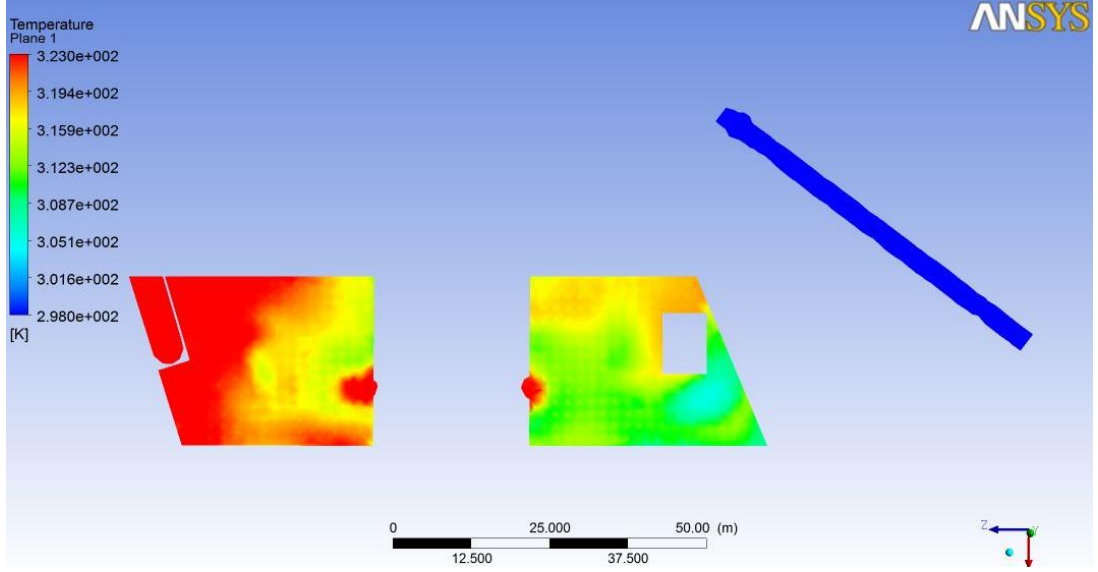
1 fan emme, 1 fan basma modunda 160 m<sup>3</sup>/s kapasite ile çalışıyor, yangın koordinatları: 13.47; 0.6; 75 m, tren ilavesi var, yangın perdesi kullanılmayan ve kullanılan durum için yangın yayılımı incelenmektedir.



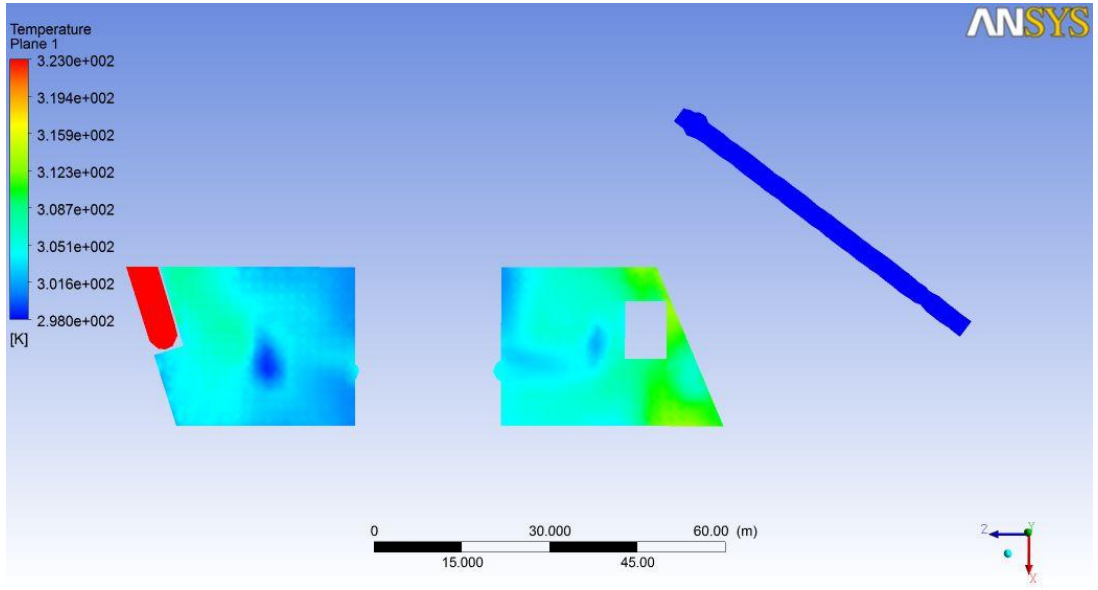
Şekil 4.42: Sıcaklık, yangın perdesi yok.



Şekil 4.43: Sıcaklık, yangın perdesi var.



Şekil 4.44: İstasyon 1. kat sıcaklık, yangın perdesi yok.

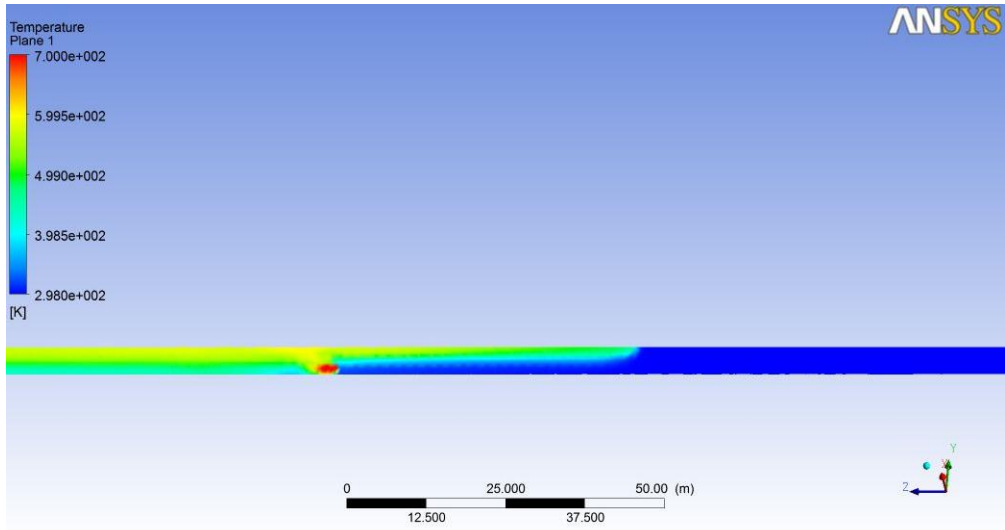


Şekil 4.45: İstasyon 1. kat sıcaklık, yangın perdesi var.

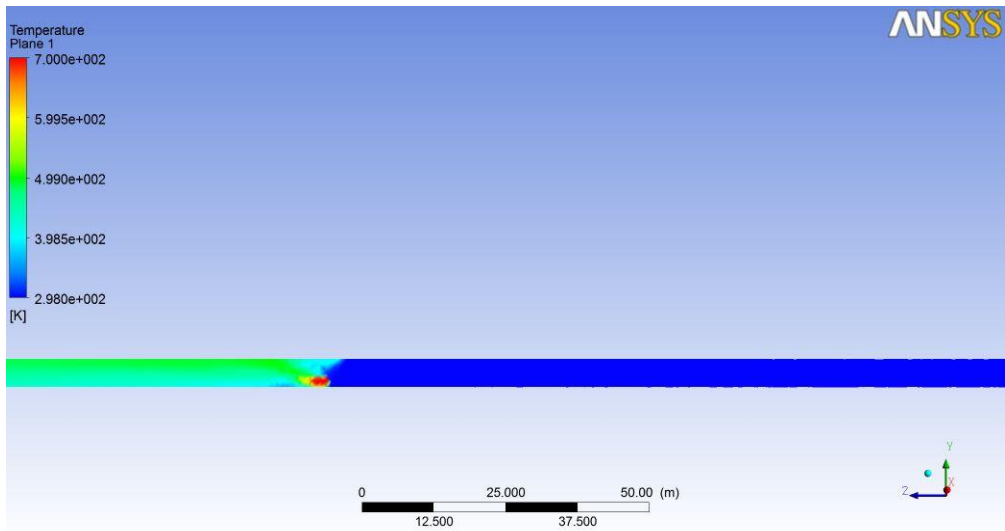
Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 1 fanın emme diğer fanın da basma modunda çalışmasının sıcak hava tahliye yönünün aksi yönde güvenli bir kaçış bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Aynı zamanda yangın perdesi ilavesinin, yangın yayılımını oldukça sınırlandırdığı şekiller incelendiğinde görülmektedir.

#### 4.1.9. Tünelde Yangın Durumunda Kritik Hız Analizi

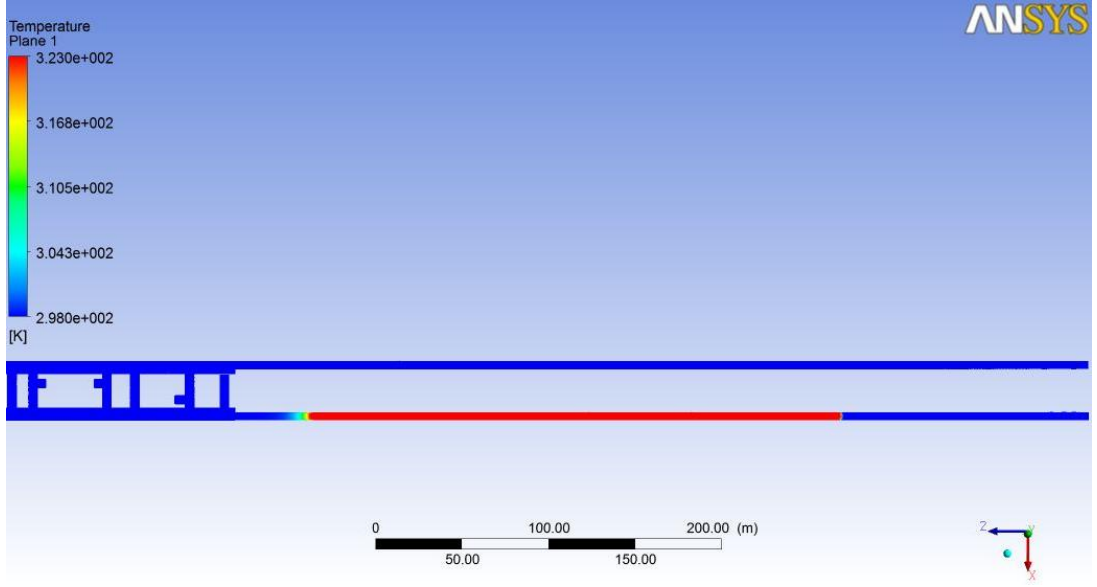
Yangının meydana geldiği tünele ve paralelindeki diğer tünele belli bir hızda hava girişi sağlanarak fanların emme yönünde duman tahliyesi gerçekleştirilmesi, diğer yönde ise yolcu tahliyesi için dumansız bir bölge oluşturulması ve bunun için minimum hava hızı değerinin belirlenmesi (kritik hız) amacıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. 2 fan emme modunda  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor. Yangın koordinatları: 14.85; 1; -310 m.



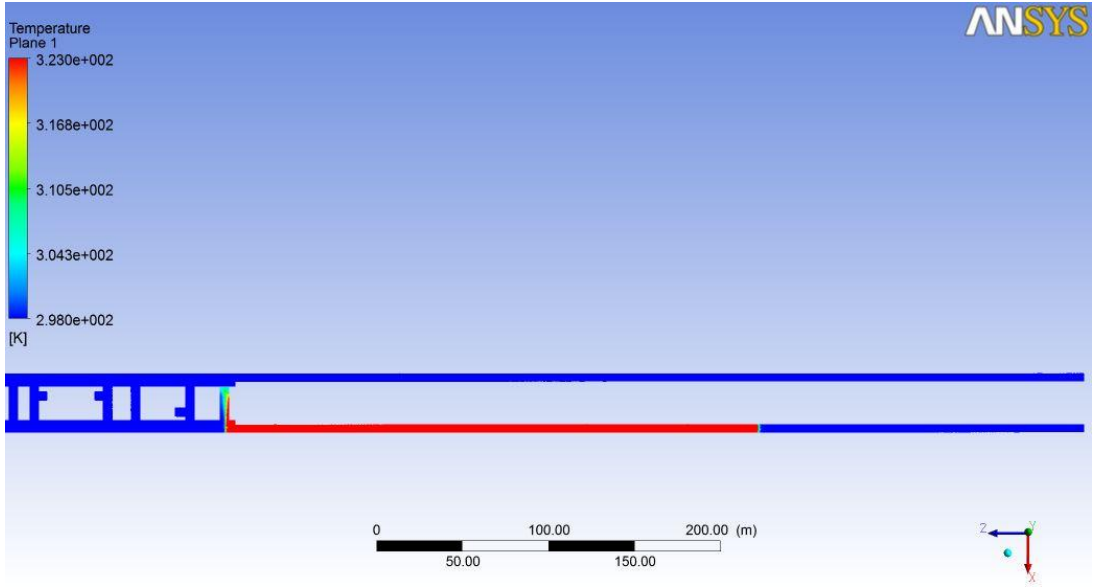
Şekil 4.46: Tünel düşey kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 1.5 m/s.



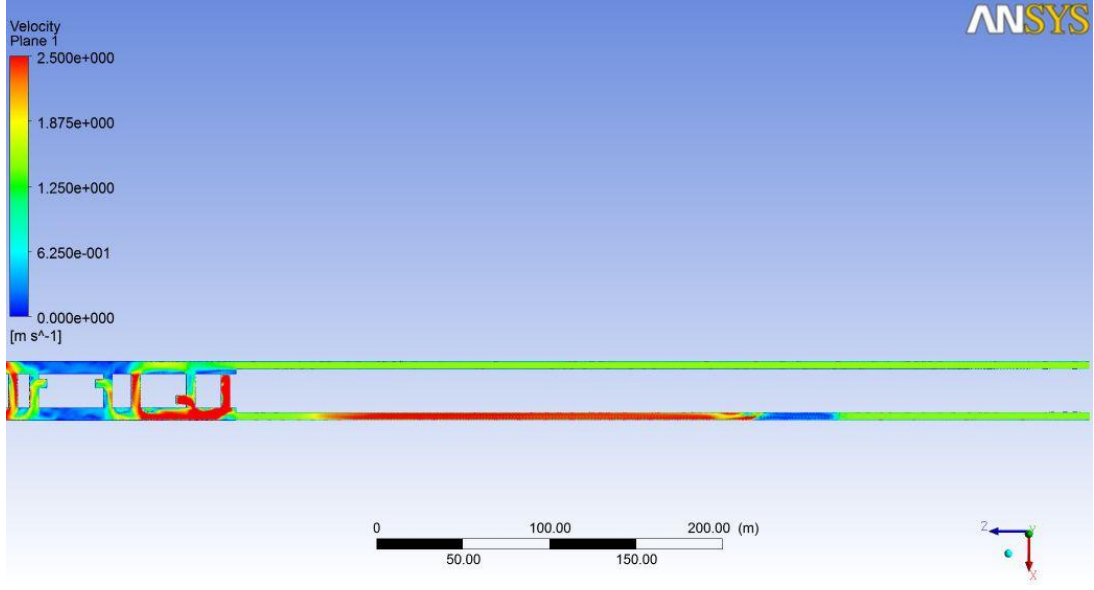
Şekil 4.47: Tünel düşey kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 2.5 m/s.



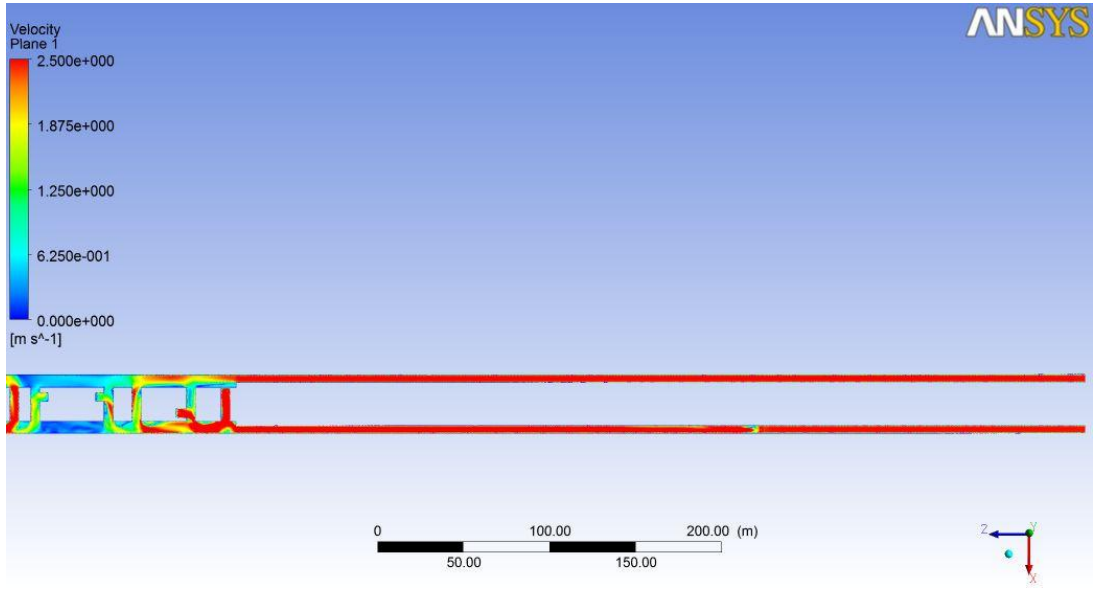
Şekil 4.48: Tünel yatay kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 1.5 m/s.



Şekil 4.49: Tünel yatay kesiti sıcaklık, hava giriş hızı: 2.5 m/s.



Şekil 4.50: Tünel yatay kesiti hız, hava giriş hızı: 1.5 m/s.

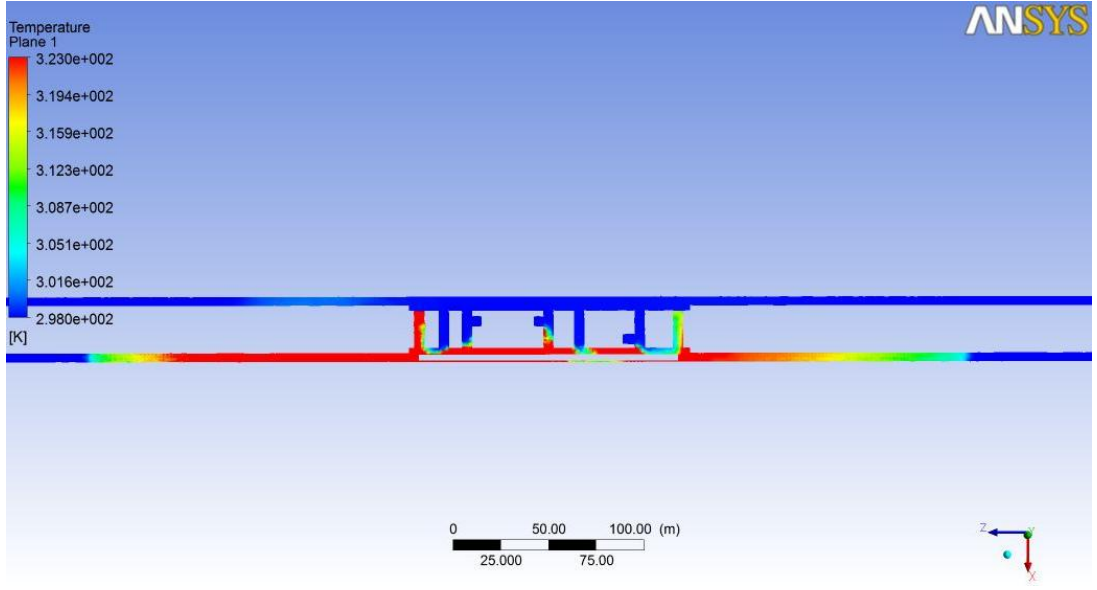


Şekil 4.51: Tünel yatay kesiti hız, hava giriş hızı: 2.5 m/s.

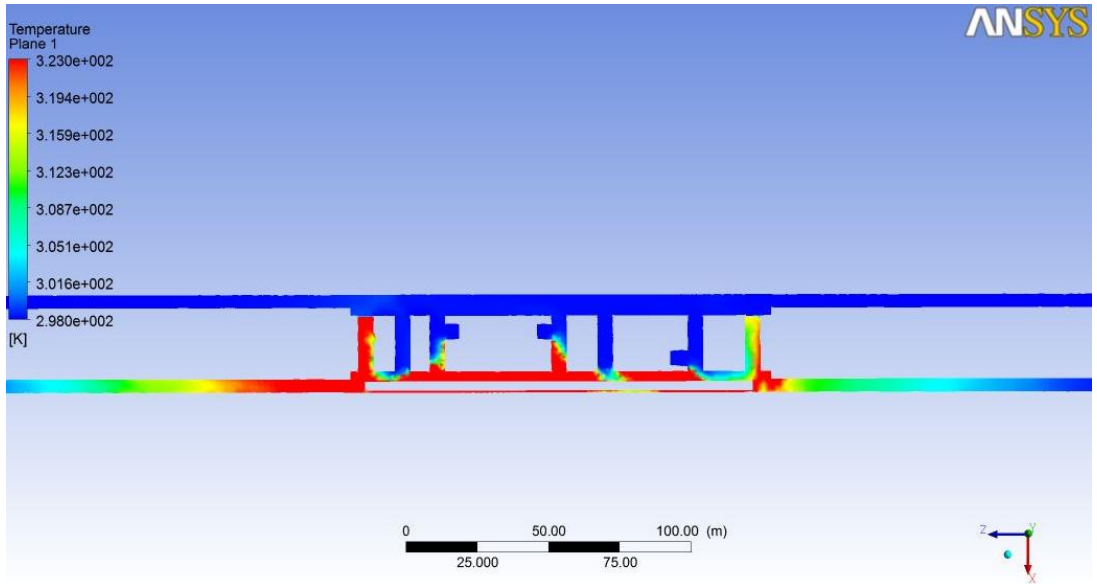
Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 1.5 m/s hava giriş hızının sıcak havayı bir tarafa yönlendirme hususunda yeterli olmadığı, 2.5 m/s hava giriş hızının ise sıcak havayı yangın hattının diğer tarafına taşımadan tahliye hususunda yeterli olduğu görülmektedir. Ayrıca hız dağılımları incelendiğinde, 1.5 m/s hava giriş hızı seçildiği durumda yangın çıkış bölgesine yakın belli bir alanda hava hızının neredeyse sıfır değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu durum ise hız kriterlerine uygunluk göstermemektedir.

#### 4.1.10. Hava Giriş Hızlarının Yangın Yayılımına Etkisi

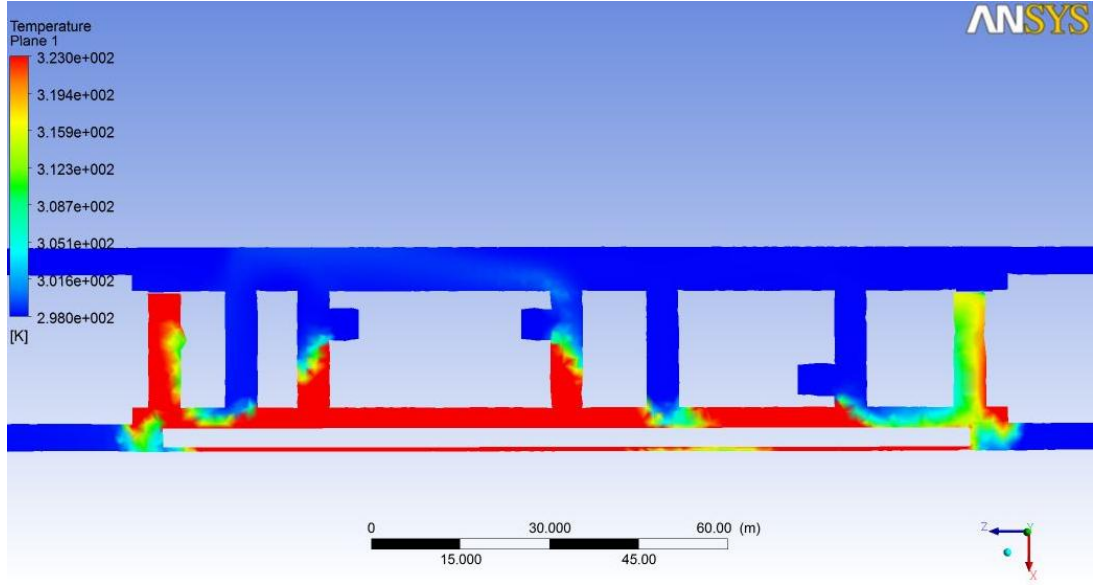
2 fan 160 m<sup>3</sup>/s kapasite ile emme modunda çalışıyor, yangın koordinatları: 13,47; 0.6 ; 75 m, tren ilavesi var, 4 tünelin istasyondan en uzak giriş kısımlarına farklı hava giriş hızı verilmesinin yangın yayılımına etkisi incelenmektedir.



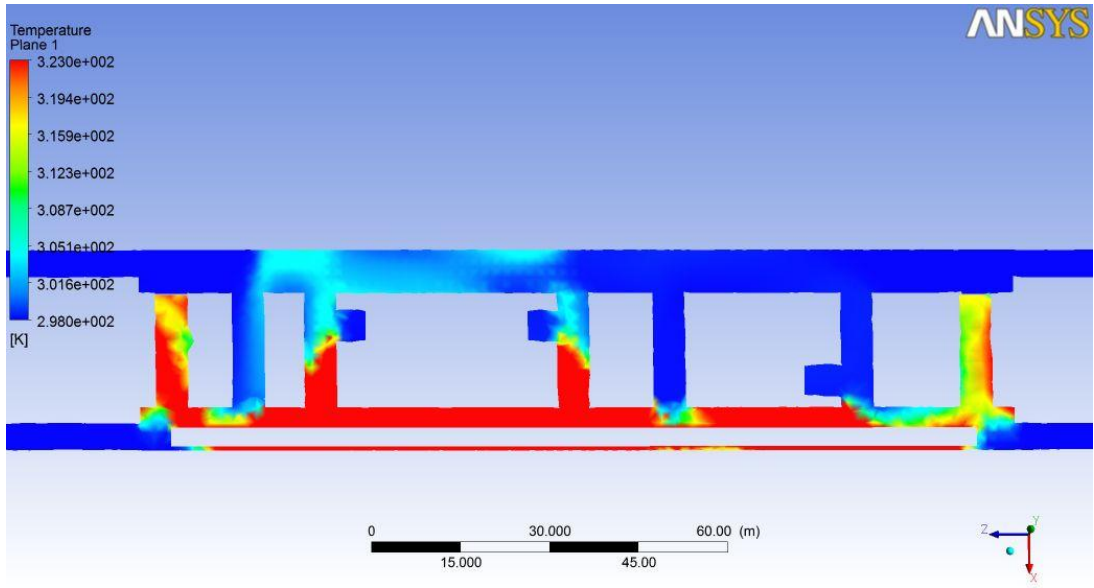
Şekil 4.52: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 0 m/s.



Şekil 4.53: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 0.75 m/s.



Şekil 4.54: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 1.5 m/s.



Şekil 4.55: Yatay kesit sıcaklık, hava giriş hızı: 2.5 m/s.

Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, hava giriş hızları 0 m/s ve 0.75 m/s seçildiği durumda yangın sonucu oluşan sıcak havanın istasyondan tünel kısımlarına doğru taşıdığı, 1.5 m/s ve 2.5 m/s hava hızı seçildiğinde ise sıcak havanın tünel kısımlarına taşmadığı görülmektedir. Buna göre istasyonda yangın durumu için tünellere 1.5 – 2.5 m/s aralığında hava giriş hızı sağlanmasının yeterli olacağı görülmektedir. Ancak tünelde yangın durumu için 1.5 m/s hava hızının yeterli olmadığı bir önceki durumda

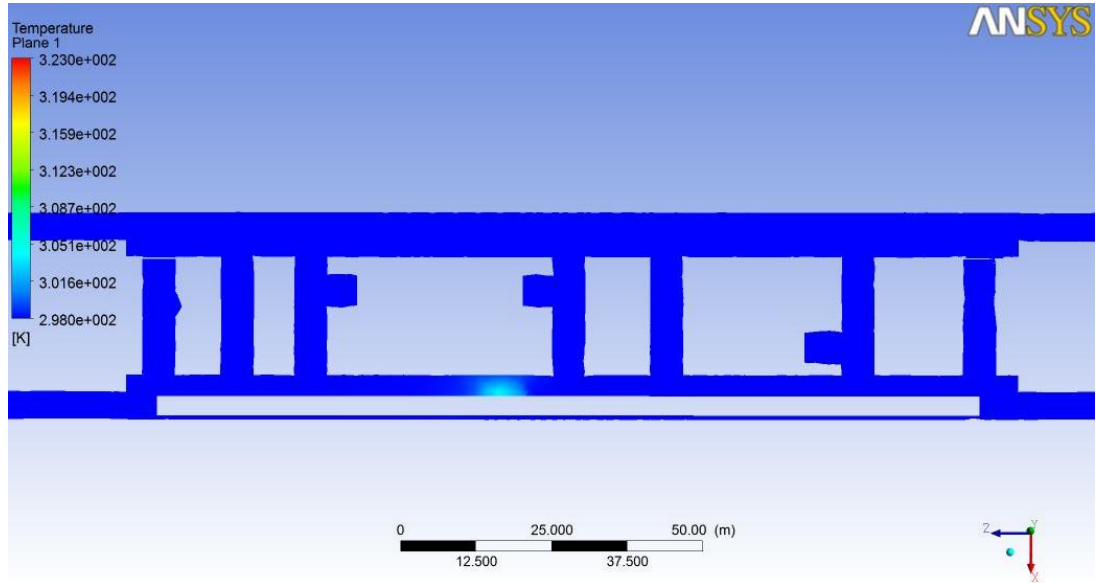
yapılan analizlerde ortaya çıkmıştır. Bu nedenle tünellere hava giriş hızı değerinin 2.5 m/s olarak korunması gerektiği sonucuna varılmıştır.

## 4.2. Zamana Bağlı Simülasyon Çalışmaları

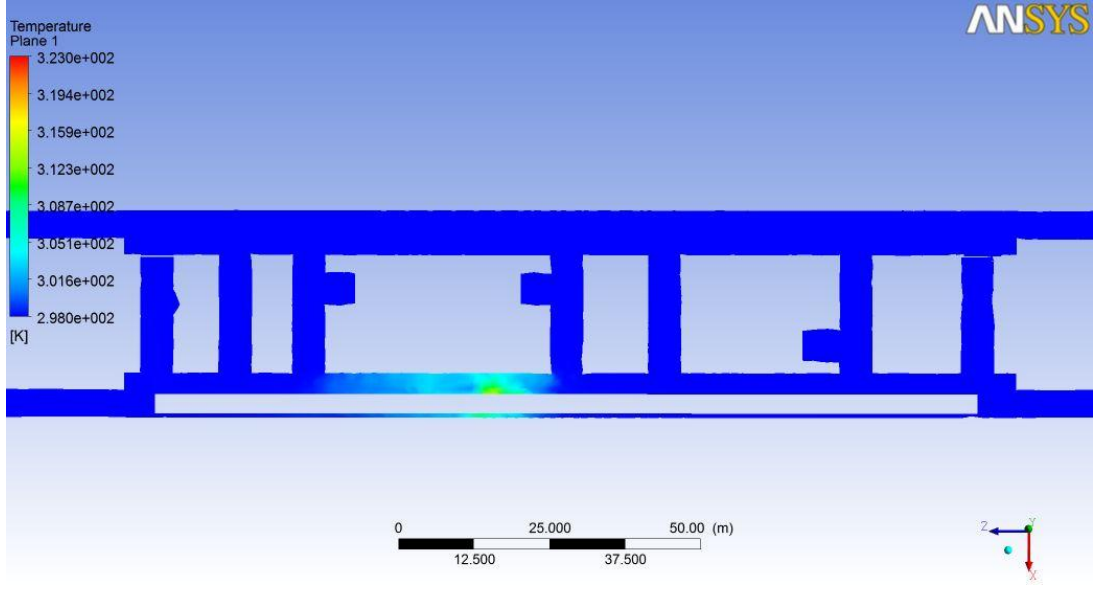
Yangının zamanla değişiminin izlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda gelişmekte olan yangın bölgesi için kullanılan  $Q = \alpha \cdot t^2$  formülüne göre yangın modellenmiştir.  $t=0$  anından,  $t=600$  saniye (10 dakika) anına kadar olan zaman için yangın modellenmiştir. Gelişme faktörü için orta büyüklükte yangınlar için kullanılan  $0.012 \text{ kW/s}^2$  değeri seçilmiştir.

### 4.2.1. Zamana Bağlı Yangın Yayılımı Analizi

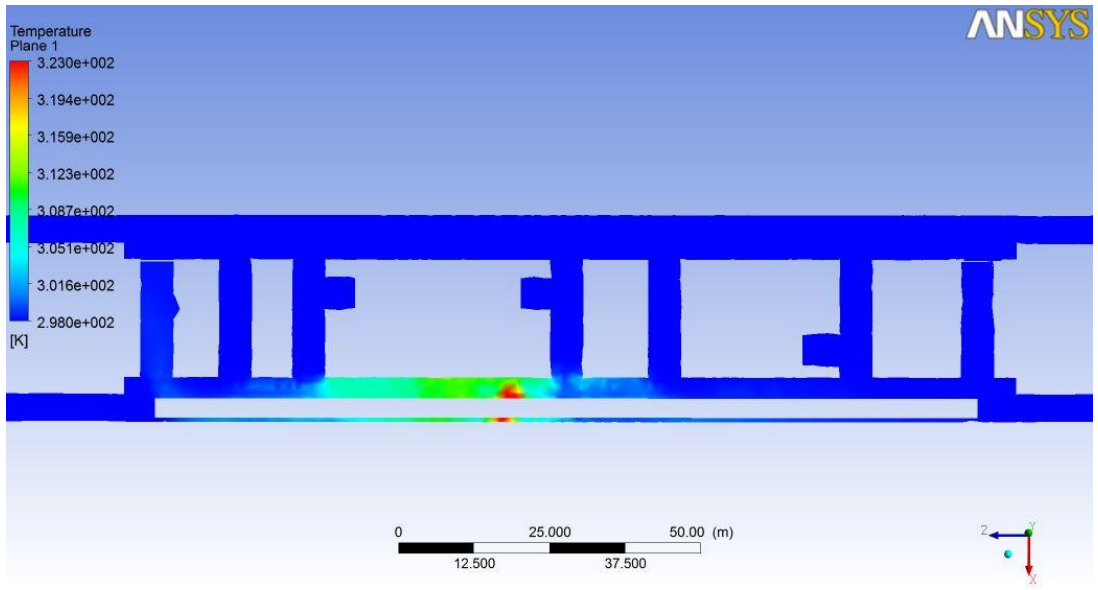
2 fan emme modunda  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  kapasite ile çalışıyor. Yangın koordinatları; 13,47; 0.6 ; 75 m, tren ilavesi var, zamana bağlı yangın yayılımı incelenmektedir.



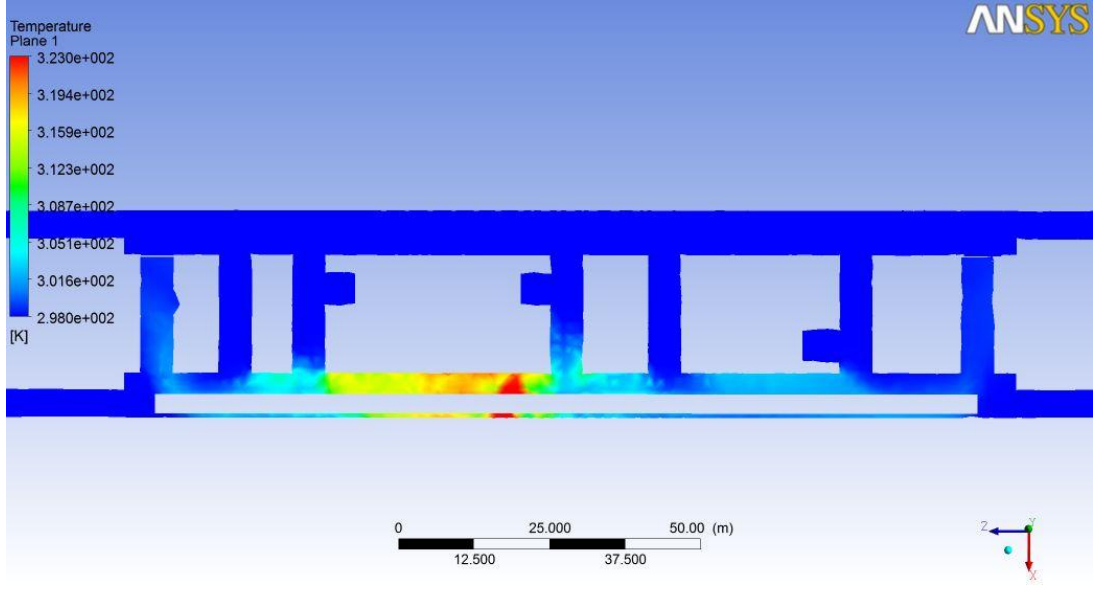
Şekil 4.56: Zamana bağlı yangın yayılımı, 1. dakika.



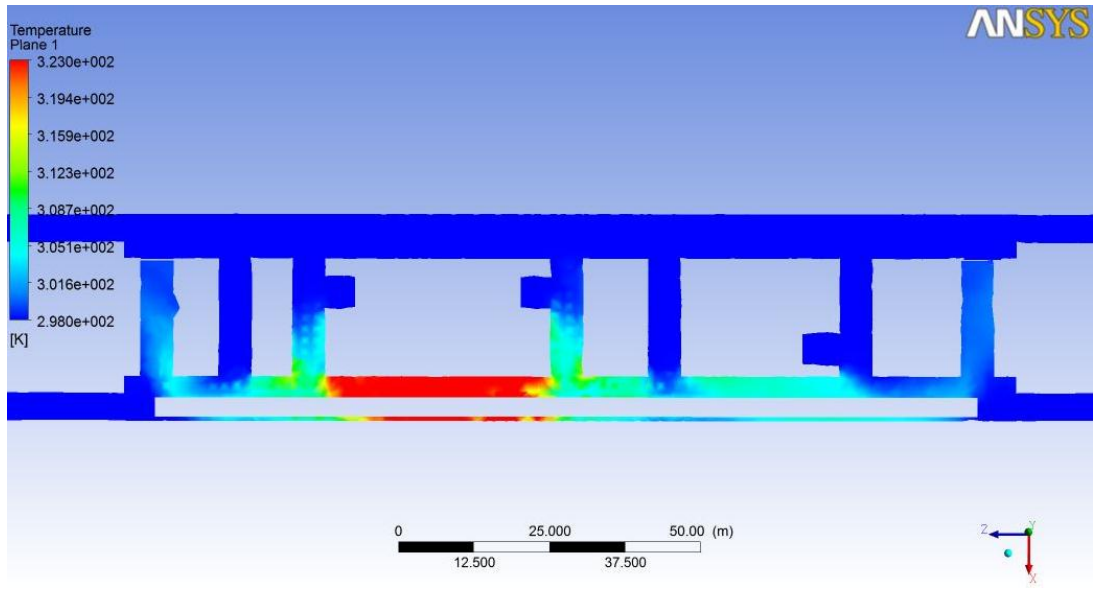
Şekil 4.57: Zamana bağlı yangın yayılımı, 2. dakika.



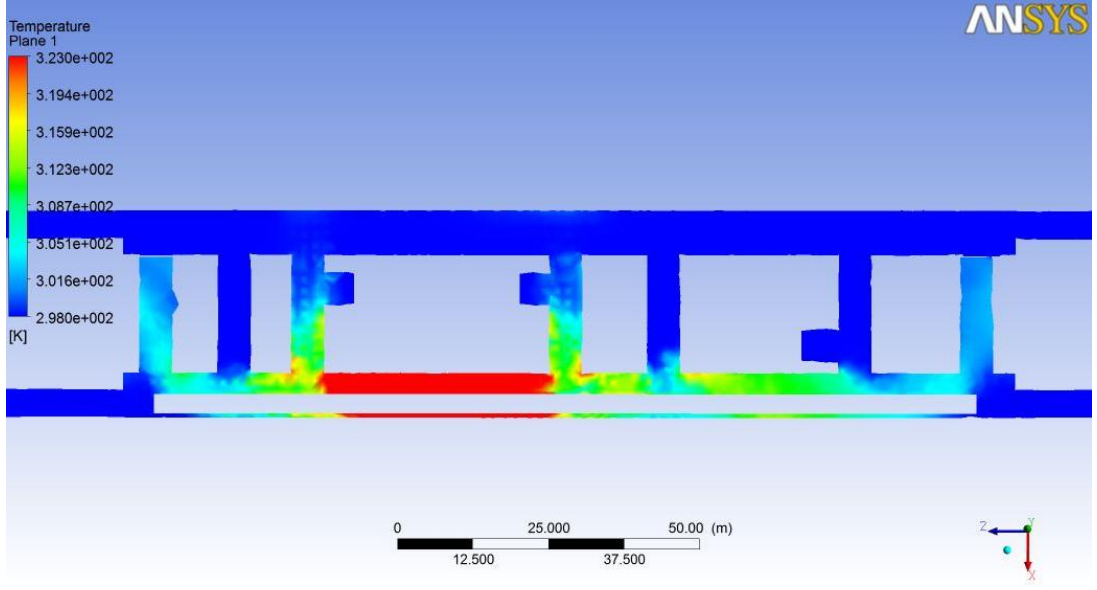
Şekil 4.58: Zamana bağlı yangın yayılımı, 3. dakika.



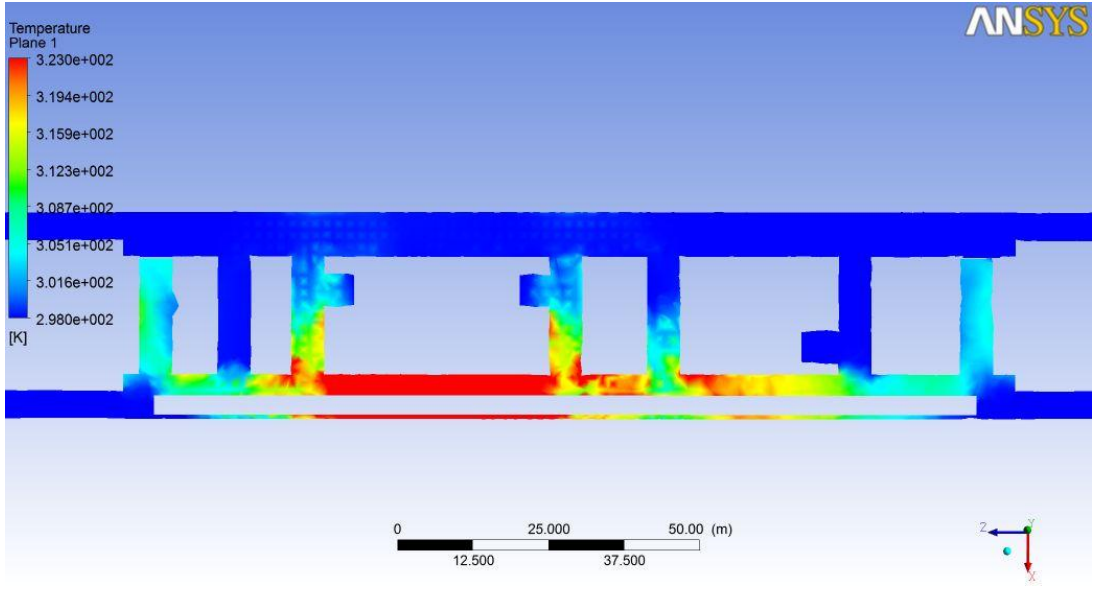
Şekil 4.59: Zamana bağlı yangın yayılımı, 4. dakika.



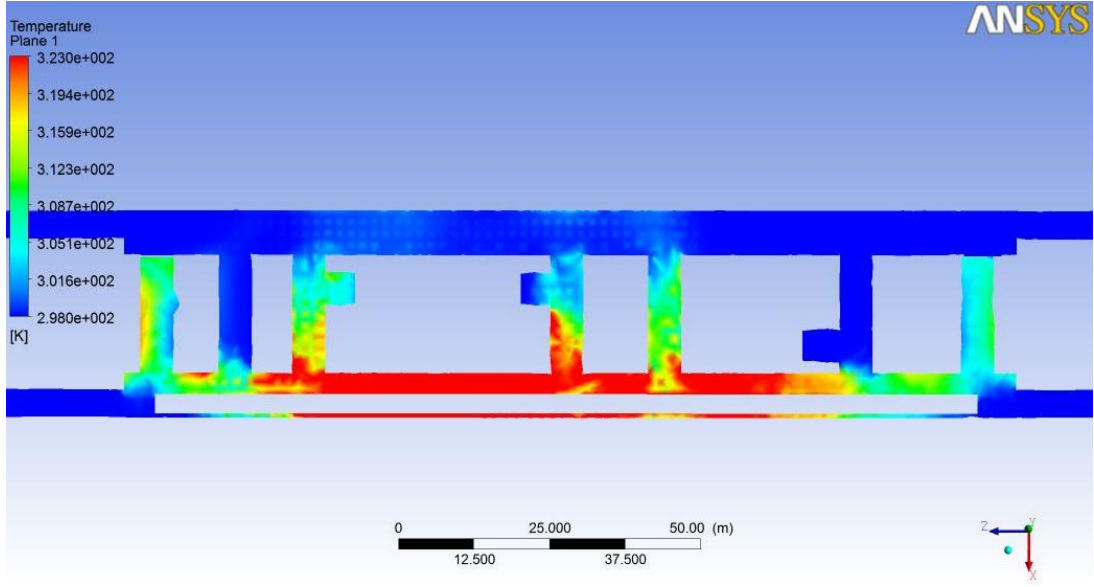
Şekil 4.60: Zamana bağlı yangın yayılımı, 5. dakika.



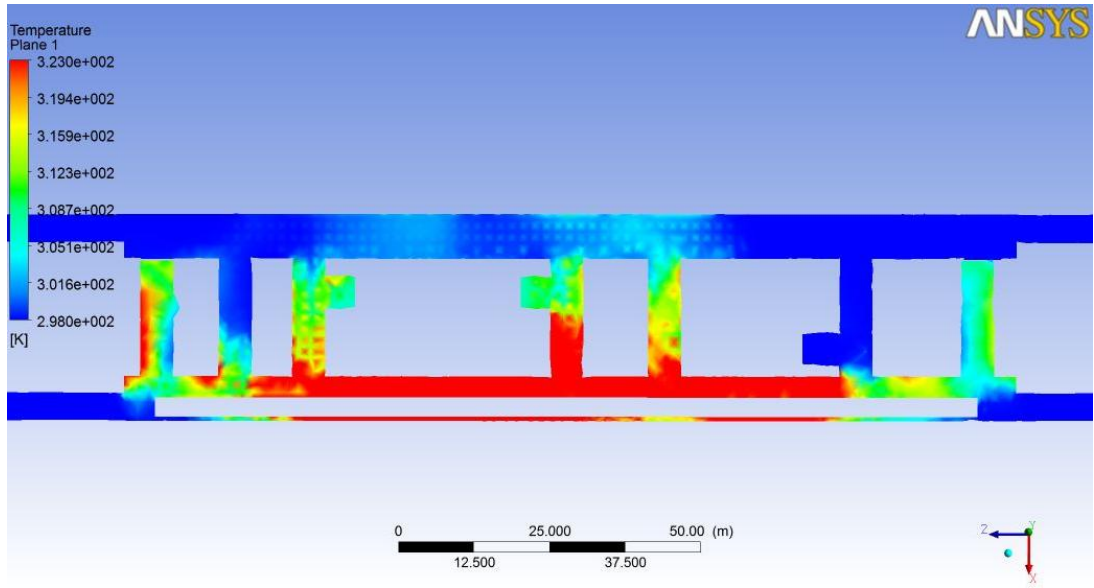
Şekil 4.61: Zamana bağlı yangın yayılımı, 6. dakika.



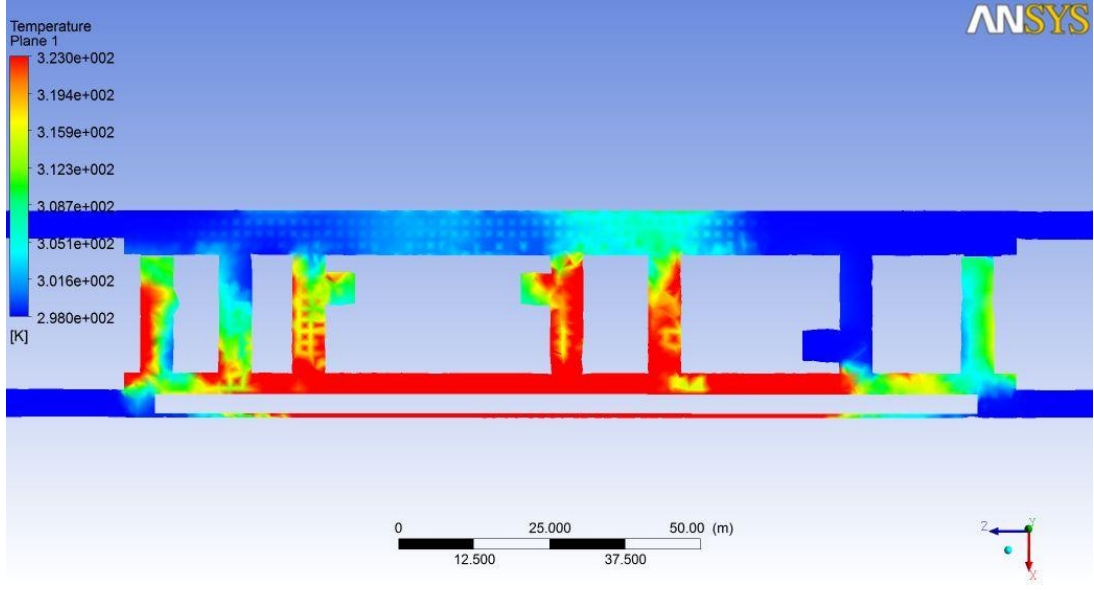
Şekil 4.62: Zamana bağlı yangın yayılımı, 7. dakika.



Şekil 4.63: Zamana bağlı yangın yayılımı, 8. dakika.



Şekil 4.64: Zamana bağlı yangın yayılımı, 9. dakika.

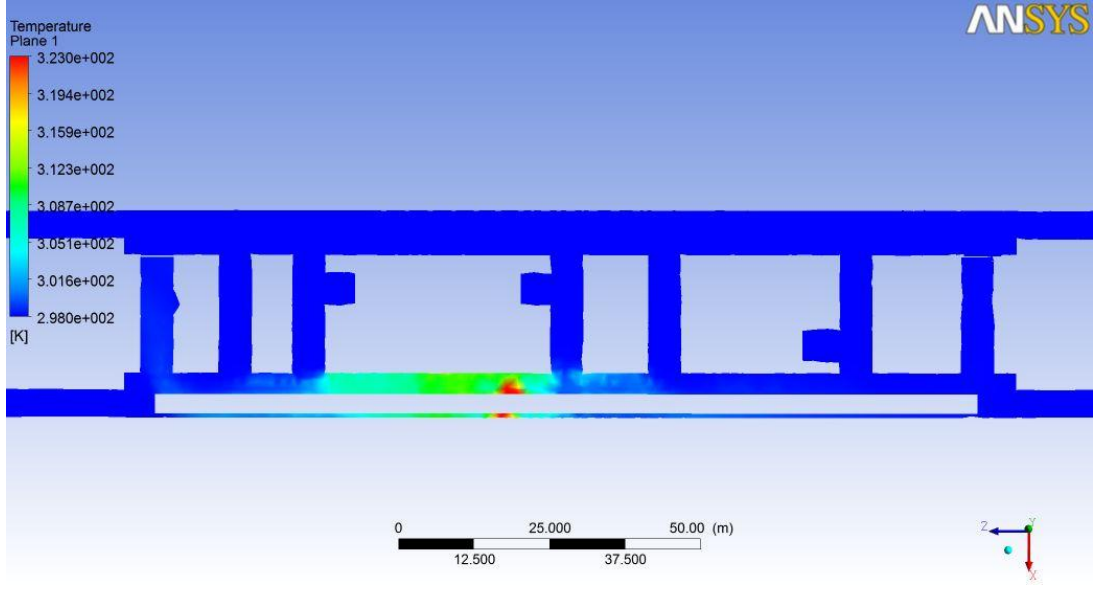


Şekil 4.65: Zamana bağlı yangın yayılımı, 10. dakika.

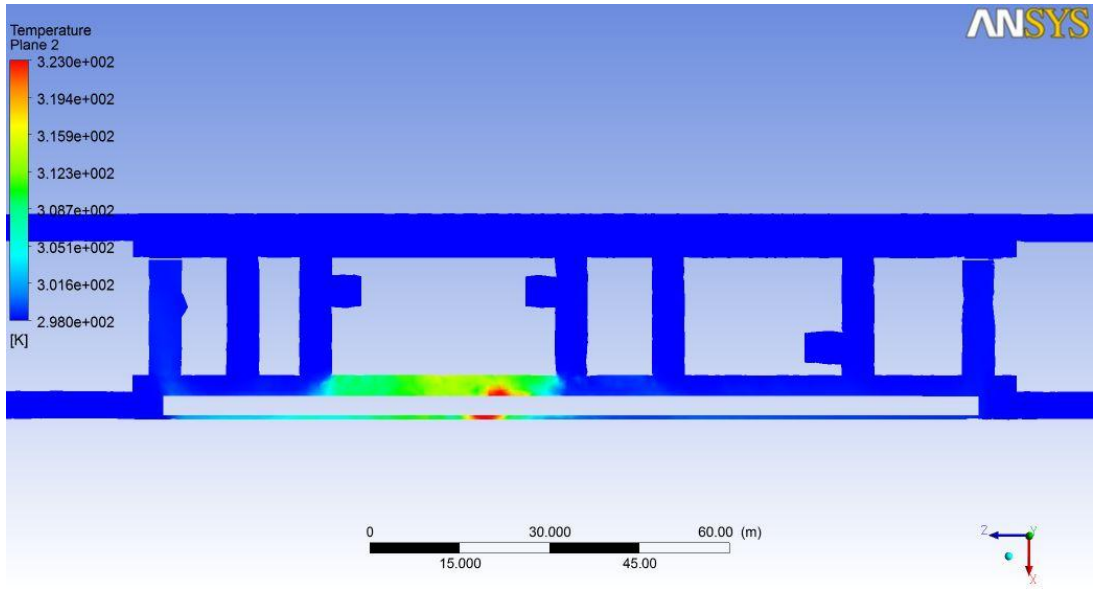
Sıcaklık dağılımları incelendiğinde 7. dakikadan itibaren sıcak havanın havalandırma hattı dışındaki kanallara taşmaya başladığı görülmekte ve bu dakikaya kadar yolcu tahliyesinin sağlanmasının güvenlik açısından uygun olacağı düşünülmektedir.

#### 4.2.2. Zamana Bağlı Modelde Fan Kapasitesi Analizi

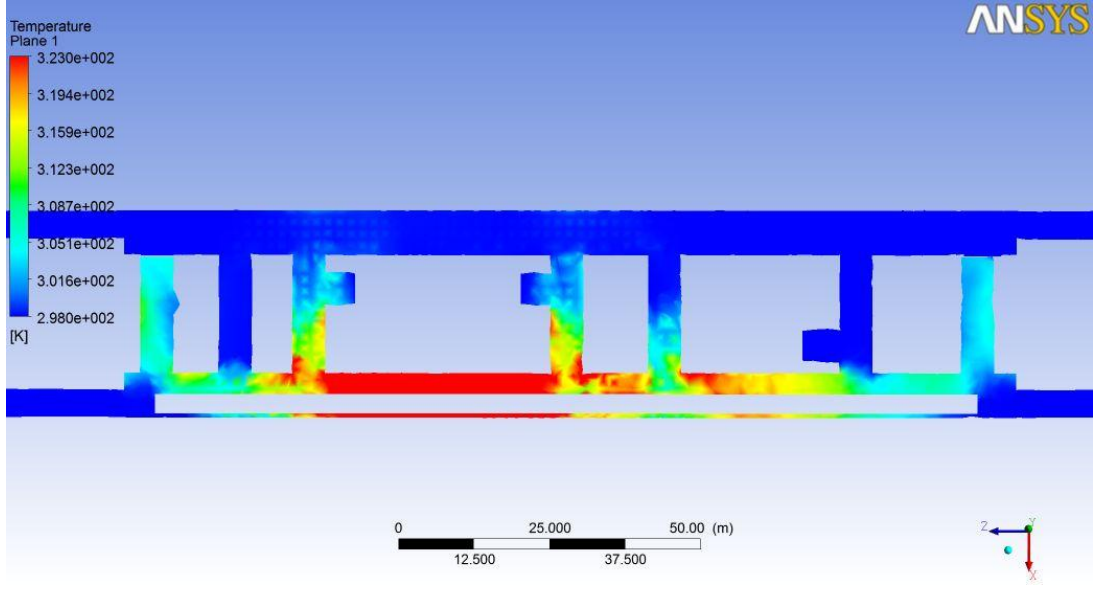
2 fan emme modunda çalışıyor. Yangın koordinatları; 13,47; 0.6 ; 75 m, tren ilavesi var, zamana bağlı modelde fan kapasitelerindeki değişimin yangın yayılımına olan etkisi incelenmektedir.



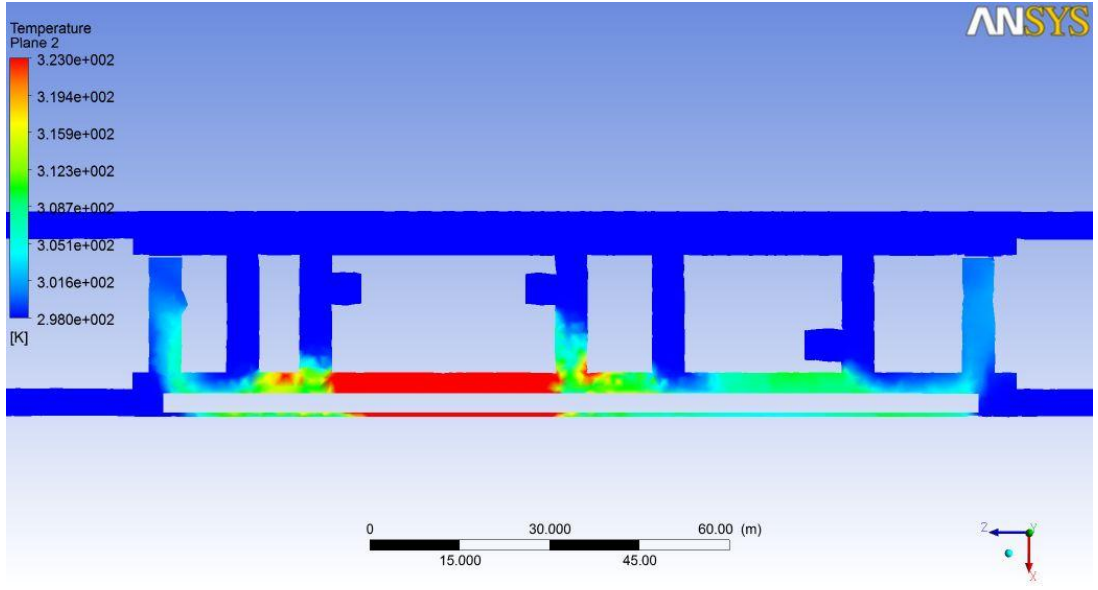
Şekil 4.66: Zamana bağlı model, 3. dakika, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.



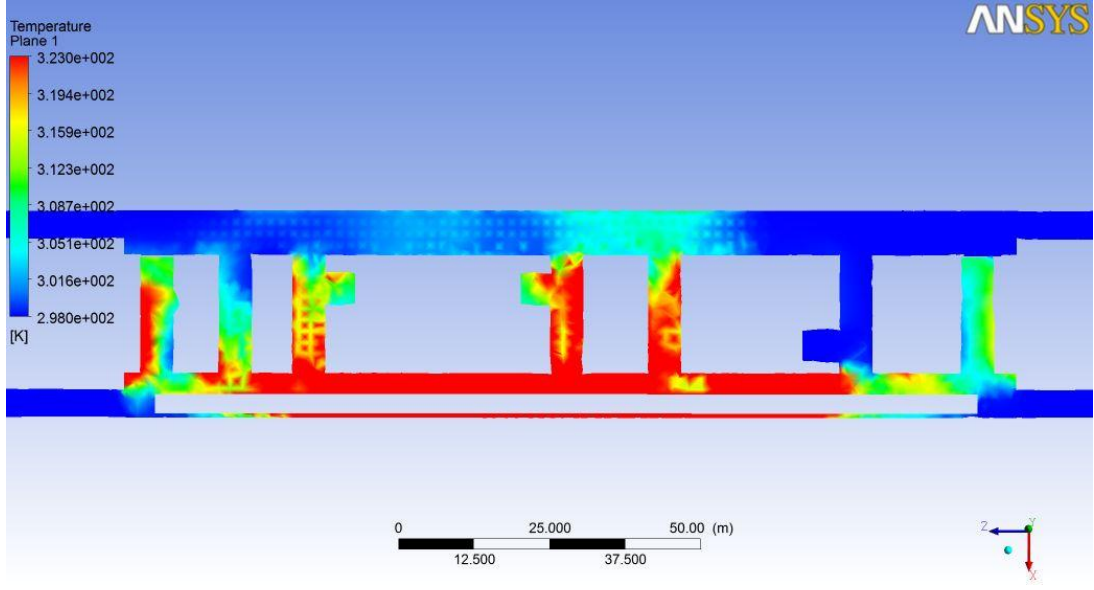
Şekil 4.67: Zamana bağlı model, 3. dakika, fan kapasitesi: 160 m<sup>3</sup>/s.



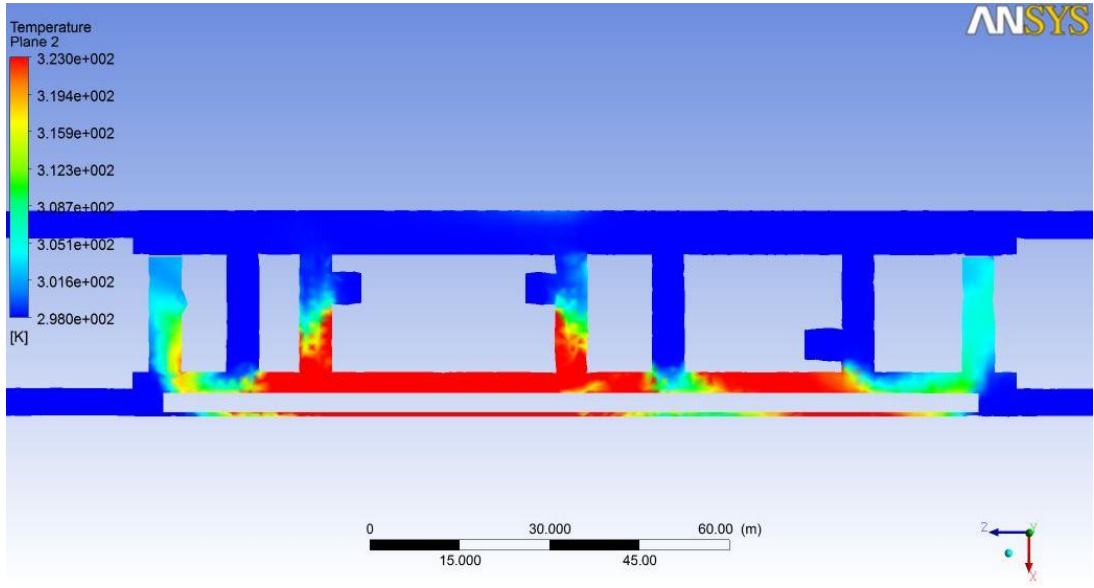
Şekil 4.68: Zamana bağlı model, 7. dakika, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.69: Zamana bağlı model, 7. dakika, fan kapasitesi: 160 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.70: Zamana bağlı model, 10. dakika, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.



Şekil 4.71: Zamana bağlı model, 10. dakika, fan kapasitesi: 80 m<sup>3</sup>/s.

Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, yaklaşık 3. dakika yangının tespit edileceği varsayılabilir. Bu andan itibaren yolcu tahliye süreci başlayacaktır. NFPA-130 standartlarına göre herhangi bir yangın durumunda 4 dakika içinde yolcuların güvenli bir bölgeye tahliyesini sağlayabilecek şekilde metro istasyonlarının tasarlanması gerektiği ifade edilmektedir[25]. Buna kritere göre 7. dakikaya kadar yolcuların yangın hattından güvenli bir bölgeye uzaklaştırılması gerekmektedir. İncelenen modeller içerisinde 160 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların 7. dakika itibarıyla sıcak

hava tahliyesini havalandırma hattının dışına taşırmadan sağlamada başarılı olduğu görülmektedir. 80 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların kullanıldığı durumda ise sıcak havanın havalandırma hattının dışına kısmen taşıdığı görülmektedir.

10. dakika itibariyle ise 80 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların kullanıldığı durumda sıcak havanın geniş bir alana yayıldığı ve yolcu merdivenlerine kadar ulaştığı, 160 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların kullanıldığı durumda da sıcak havanın havalandırma hattının dışına kısmen taşıdığı ancak yolcu merdivenlerine ulaşmadığı görülmektedir. Buna göre 160 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların tercih edilmesi tedbir açısından daha uygundur.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapılan simülasyonlar sonucunda birtakım bulgular elde edilmiş ve bunlar aşağıda özetlenmiştir:

Hücre sayısındaki değişimin sonuca etkisini izlemek amacıyla istasyon kısmında ve tünel kısmında olmak üzere 2 ayrı model üzerinde çalışılmış, bunlardan istasyonda yangın modelinde hücre sayısının artırılmasının sonucu önemli bir oranda etkilemediği fakat tünelde yangın modelinde sonucu etkilediği görülmüştür. Buna göre istasyon kısmındaki modelde kaba hücre sayısı tercih edilmiştir. Tüneldeki modelde ise kesit daralmakta olduğundan kaba hücre sayısı ile çalışmanın hatalı sonuç verebileceği ve dolayısıyla kesit daraldıkça daha hassas hücre sayıları ile çalışılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Yangın damperlerinin performansını izlemek amacıyla yapılan simülasyonlarda, yangın damperlerinin istasyonun her tarafına yangının yayılımını engellediği ve dolayısıyla sıcak hava tahliyesini sağlamada önemli bir katkısının olduğu gözlemlenmiştir. Bu da geometriye basit bir ilavenin sıcak hava tahliyesini sağlamada ve yangın yayılımını engellemede ne derece etkili olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

Fan kapasitelerinin yangın yayılımına etkisini izlemek amacıyla yapılan analizlerde 200 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların sıcak hava tahliyesini sağlamada en iyi performans gösterdiği, ayrıca 160 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların da kısmen iyi bir performans gösterdiği ve sıcak havayı havalandırma hattının dışına çok fazla taşımadan tahliye hususunda başarılı olduğu gözlemlenmiştir. 80 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanların kullanıldığı durumda ise sıcak havanın istasyonunun diğer kısımlarına epey ilerlediği görülmüştür. Dolayısıyla 200 m<sup>3</sup>/s veya 160 m<sup>3</sup>/s kapasiteli fanlar acil durum havalandırması için tercih edilebilir.

Yangın perdeleri kullanmanın havalandırma performansına etkisini izlemek amacıyla yapılan analizlerde 1 fanın emme modunda, diğer fanın basma modunda 160 m<sup>3</sup>/s kapasiteler ile çalıştığı durumda yangın perdesi kullanılmayan ve kullanılan durumlar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yangın perdesi kullanılmayan durum için kötü bir havalandırma oluştuğu, istasyon 1.katına kadar sıcak havanın yayıldığı

görülmüştür. Yangın perdesi kullanıldığı durumda ise yangının istasyonun diğer kısımlarına taşmadığı, çok iyi bir havalandırmanın sağlandığı görülmüştür. Yangın hattına yakın olan fanın emme modunda, diğer fanın ise basma modunda yangın perdesi ile birlikte çalıştırılması, incelenen modeller içerisinde en iyi sıcak hava tahliyesini sağlayan model olarak karşımıza çıkmaktadır. Yangın damperlerinde olduğu gibi yangın perdelerinin de sıcak hava tahliyesini sağlamada ve yangın yayılımını sınırlandırma hususunda ne derece etkili olduğu bu analizler sonucunda ortaya çıkmıştır.

Tünelde yangın durumu için kritik hızı belirlemek amacıyla yapılan analizlerde tünellere hava giriş hızı 1.5 m/s seçildiğinde sıcak havayı yangın hattının diğer tarafına yönlendirmek için bu hız değerinin yeterli olmadığı, ayrıca yangın hattı boyunca belli bir alanda hava hızının neredeyse sıfır değerine yaklaştığı ve bu durumun duman veya gaz birikmesine sebep olacağı için istenmeyen bir durum olduğu sonucuna varılmıştır. Hava hızı değeri 2.5 m/s seçildiğinde ise kritik hız değerinin sağlandığı görülmüştür. Bu değer aynı zamanda NFPA-130 standartlarında belirtilen yangın durumunda olması gereken minimum hız değerine karşılık gelmektedir[25].

Zamana bağlı analizlerde; 10 dakika için yangının gelişimi izlenmiş ve öncelikle 80 m<sup>3</sup>/s fan kapasitesi seçilerek analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda 10. dakika içerisinde sıcak havanın istasyonun büyük bölümüne yayıldığı gözlemlenmiştir. Daha sonra 160 m<sup>3</sup>/s fan kapasitesi seçildiği durum için 10 dakika boyunca yangın gelişimi izlenmiş ve 10. dakika itibariyle sıcak hava yayılımının bir önceki duruma göre sınırlı kaldığı, yolcu merdivenlerine ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Yangın sırasında ilk dakikaların, hatta saniyelerin bile çok önemli olduğu düşünülürse sıcak hava yayılımını sınırlandıran model olarak 160 m<sup>3</sup>/s fan kapasitesi seçilmesi tedbir açısından daha uygun olacaktır.

## 6. ÖNERİLER

Bu ana kadar yapılan çalışmalar ışığında bundan sonra aşağıda belirtilen çalışmalar yapılabilir:

Yangın olayını kimyasal olarak modelleme: Bunun için kimyasal kinetik denklemleri, termodinamik denklemler, ortamdaki yanıcı malzemelerin özellikleri gibi birçok parametrenin hesaba katılması gerekebilir. Yangın esnasında açığa çıkan zehirli gazlar tünel yangınları için önemli bir problem teşkil etmekte olduğundan, zehirli gaz konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik simülasyon çalışmaları yapılması faydalı olacaktır. Yangın esnasında açığa çıkan karbon monoksit gazının konsantrasyonunun belli bir sınırdan tutulmasına yönelik NFPA-130 standartlarında bazı kriterler yer almaktadır[25].

Bu tezde çalışılan modele 1 istasyon daha ilave edilerek 2 istasyonun ve bu istasyonlara bağlı tünellerin yer aldığı geometri için yangın modelleme. Böylece iki istasyon arası en kritik bölge için yani makas kısmına yakın bölgelerde yangın modelleme imkanına sahip olunabilir. Bu durumda geometri daha kompleks hale geleceği için yüksek hızlı bilgisayarlara ihtiyaç duyulabilir.

Bu tez çalışmasında genel olarak istasyon kısmında yangın modelleme yapılmış ve basınç kayıpları ihmal edilmişti. Bundan sonra, özellikle fanlardan uzak tünel kısımlarında yangın modelleme yapıldığında basınç kayıpları hesaba katılarak analizler yapılabilir. Bunun için fan karakteristiği olarak adlandırılan ve debiye karşılık basınç düşüşünü ifade eden  $dP-Q_v$  grafikleri veya denklemleri kullanılarak analizler yapılması farklı yaklaşımlar sağlaması bakımından faydalı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2013), <http://hatira.4mg.com/yangin.htm>, (Erişim Tarihi: 30/05/2013).
- [2] Tanrıverdi Y., (2010), "Petrol Yangınlarında Kullanılan Söndürücü Katkıların, Performansa Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [3] "Isı Transferi", (2009), Milli Eğitim Bakanlığı Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara.
- [4] Kakaç S., (1982), "Isı Transferine Giriş 1: Isı İletimi", Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını, Ankara.
- [5] Eralp O. C. ve Musluoğlu E., (2003), " Yeraltı toplu taşıma sistemlerinde acil durum havalandırması", 6. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.
- [6] NFPA-204M, (2003), Standard for Smoke and Heat Venting, National Fire Protection Association, USA.
- [7] White N., (2010), "Fire Development in Passenger Trains", A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering, Victoria University, Australia.
- [8] Web 2, (2013), <http://www.yangin.org>, (Erişim Tarihi: 30/05/2013).
- [9] NFPA-720, (1988), "Carbonmonoxide Risks at Home", National Fire Protection Association, USA.
- [10] Küçük S., (2001), "Yanma Sırasında Oluşan Yanma Ürünleri ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Olumsuz Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi.
- [11] Kayılı S. vd., (2010), "Tünel Yangınlarının ve Yangın Güvenliği İçin Kullanılan Havalandırma Sistemlerinin Özellikleri", Mühendis ve Makine Cilt:51 Sayı:604.
- [12] İlkışık O. vd., (2008), Manş Tüneli Yangını, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Afet Koordinasyon Merkezi Raporu.
- [13] Poon L. and Lau R., (2005), "Fire Risk in Metro Tunnels and Stations", Hyder Consulting.
- [14] Musluoğlu E., (2009), "A Theoretical Analysis Of Fire Development And Flame Spread In Underground Trains" Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

- [15] Berberoğlu M. İ., (2008), “Yeraltı Raylı Taşıma Sistemi İstasyonu İçin Yangın Modellemesi Ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [16] Web 3, (2013), [http://en.wikipedia.org/wiki/1995\\_Baku\\_Metro\\_fire](http://en.wikipedia.org/wiki/1995_Baku_Metro_fire), (Erişim Tarihi: 30/05/2013).
- [17] Web 4, (2013), [http://en.wikipedia.org/wiki/Mont\\_Blanc\\_Tunnel](http://en.wikipedia.org/wiki/Mont_Blanc_Tunnel), (Erişim Tarihi: 30/05/2013).
- [18] Web 5, (2013), [http://en.wikipedia.org/wiki/Kaprun\\_disaster](http://en.wikipedia.org/wiki/Kaprun_disaster), (Erişim Tarihi: 30/05/2013).
- [19] Web 6, (2013), <http://railsystem.net/kaprun.htm>, (Erişim Tarihi: 03/06/2013).
- [20] Web 7, (2013), [http://en.wikipedia.org/wiki/Daegu\\_metro\\_fire](http://en.wikipedia.org/wiki/Daegu_metro_fire), (Erişim Tarihi: 03/06/2013).
- [21] Kayılı S., (2005), “CFD Simulation Of Fire And Ventilation In The Stations Of Underground Transportation Systems”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [22] Karaaslan S. vd., (2010), “Metro İstasyonunda Farklı Yanma Modelleri Kullanarak Yangın Simülasyonu”, Gazi Üniversitesi.
- [23] Sertel S., (2010), “Metro Tünellerinde ve İstasyonlarında Havalandırma Sistemleri ve Marmaray Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi.
- [24] Web 8, (2013), [http://www.wittfan.de/english/techinf\\_jetfan.php](http://www.wittfan.de/english/techinf_jetfan.php), (Erişim Tarihi: 03/06/2013).
- [25] NFPA-130, (2010), Standard for Fixed Guideway Transit and Passanger Rail Systems, USA.
- [26] O’gorman S., (2010), “Sydney Metro Network Stage 2 Reference Design Section 12 - Tunnel Ventilation Tunnel Ventilation Report”, Sydney.
- [27] Açıkğöz A. vd., (2006), “Metro tünellerinde yangın senaryosu analizleri” Anova Mühendislik, İstanbul.
- [28] ANSYS CFX Tutorials 13.0, (2010), ANSYS Inc, USA.
- [29] ANSYS CFX Solver Modeling Guide 13.0, (2010), ANSYS Inc, USA
- [30] ANSYS CFX Solver Theory Guide 12.0, (2009), ANSYS Inc, USA

- [31] Özkan M., (2011), “Boru İçi Akışın Dirseklerde İncelenmesi ve Mevcut Dirsek Tasarımlarının İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [32] Sülüs A., (2008), “Makine Dairesi Yangınlarına Açıklıkların Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [33] Web 9, (2013), <http://www.ventsan.com/vfd.asp>, (Erişim Tarihi: 10/06/2013).
- [34] Web 10, (2013), <http://www.zetyapi.com.tr>, (Erişim Tarihi: 10/06/2013).

## ÖZGEÇMİŞ

Ömer YAZICI, 1983 yılında Artvin'e bağlı Yusufeli ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Yusufeli'nde tamamladıktan sonra 2001 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitime başladı. 2002 yılında aynı fakültenin Makine Mühendisliği Bölümünde Çift Ana Dal programına başlayıp her iki bölümden 2005 yılında mezun oldu. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümünde 2010 yılında başladığı Yüksek Lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı. 2006 yılından bu yana İstanbul Büyükşehir Belediyesi bünyesinde çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.