

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TİP METRO İSTASYON MODÜLLERİ İÇİN KONFOR VE ACİL
DURUM ŞARTLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İsmail Ahmet ODABAŞ

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TİP METRO İSTASYON MODÜLLERİ İÇİN KONFOR VE ACİL
DURUM ŞARTLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**İsmail Ahmet ODABAŞ
(301112003)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurdil ESKİN

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF COMFORT AND
EMERGENCY CONDITIONS FOR DIFFERENT TYPES OF METRO
STATION MODULES**

Ph.D. THESIS

**Ismail Ahmet ODABAŞ
(301112003)**

Department of Energy Science and Technology

Energy Science and Technology Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Nurdil ESKIN

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301112003 numaralı Doktora Öğrencisi İsmail Ahmet ODABAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "FARKLI TİP METRO İSTASYON MODÜLLERİ İÇİN KONFOR VE ACİL DURUM ŞARTLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Nurdil ESKİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alihsan KOCA
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2025**
Savunma Tarihi : **18 Haziran 2025**





Eşime, Çocuklarıma ve Aileme,



ÖNSÖZ

Tez süresince bilgi ve tecrübesi ile çalışmalarımı yönlendiren, sonuca dair beni her zaman motive eden kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Nurdil ESKİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel araştırmama bilgi ve deneyimleriyle destek veren değerli tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Özden AĞRA'ya ve Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Doktora programı ders ve yeterlilik aşamalarında desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet DURMAYAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma jüri üyeleri Prof. Dr. Alihsan KOCA'ya ve Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ'a güzel yorumları için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmaya katkı sağlayan değerli arkadaşlarım Yük. Mak. Müh. Ünal ALTINTAŞ'a, Yük. Mak. Müh. Oğuzhan KURT'a, Teknik Öğr. Muhlis ÖZTÜRK'e, Mak. Müh. Cem BULUT'a, Yük. Mimar Nurcan KALKAN'a, Mimar Ebru AKSÖZ'e ve Mak. Müh. Abdurrahman ÜNSAL'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile daima yanımda olan annem Emine ODABAŞ'a, babam Hamit ODABAŞ'a, eşim Dr. Sümeyye SEL ODABAŞ'a, ablalarım Nurdan ODABAŞ'a ve Vildan SEVİNDİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora serüvenim boyunca birlikte geçireceğimiz zamanlardan kısıtığım dünya tatlısı çocuklarım Fatma Rana, Merve Bilge ve Hikmet Yusuf başta olmak üzere tüm aile fertlerime ve dostlarıma teşekkür ederim.

Son olarak gerek saha ölçümlerinin yapılmasında gerekse ihtiyaç duyulan verilerin temininde desteklerinden dolayı Metro İstanbul A.Ş. yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Haziran 2025

İsmail Ahmet ODABAŞ
(Yüksek Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
Alt İndisler	xvi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2 Literatür Araştırması	5
1.2.1 Isıl konfor literatür araştırması.....	5
1.2.2 Acil durum yangın literatür araştırması	12
1.3 Hipotez	20
2. METRO HATTI ÖZELLİKLERİ VE İSTASYON MODÜLÜ	23
2.1 Şişli-Mecidiyeköy İstasyonu	24
2.2 Gayrettepe İstasyonu	25
2.3 Tren	26
2.4 M2 Metro Hattı Havalandırma Sistemleri.....	27
2.5 Metro İstasyon Modülü	29
2.5.1 İstasyon modülü aerodinamik modeli	30
2.5.2 İstasyon modülü termodinamik modeli.....	37
3. ISIL KONFOR İNCELEMELERİ.....	43
3.1 Saha Ölçümleri	43
3.1.1 Şişli-Mecidiyeköy istasyonu saha ölçümleri.....	46
3.1.2 Gayrettepe istasyonu saha ölçümleri.....	49
3.2 Bağlı Sıcaklık İndeksi (RWI) ile Isıl Konfor Değerlendirmesi.....	53
4. ACİL DURUM YANGIN İNCELEMELERİ.....	61
4.1 Yangın Yüğü, Yolcu Tahliye Hesabı ve Yangın Senaryoları	62
4.1.1 Yangın yüğü	62
4.1.2 Yolcu tahliye hesabı.....	64
4.1.3 Yangın senaryoları	67
4.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yangın Analizi Metodolojisi	69
4.2.1 Matematiksel model	70
4.2.2 İstasyon ve tren HAD yangın analizi modelleri.....	72
4.2.3 Yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları.....	74
4.2.4 HAD modelinin çözüm ağ yapısı (mesh).....	75
4.2.5 HAD yangın analizi değerlendirme kriterleri	76
4.2.5.1 Hava hızı	77

4.2.5.2 Sıcaklık.....	77
4.2.5.3 Görüş mesafesi	77
4.3 Şişli-Mecidiyeköy İstasyonu HAD Yangın Analizi Sonuçları.....	78
4.3.1 6 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları.....	79
4.3.2 25 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları.....	89
4.3.3 25 MW yangın yükü çok hızlı yangın büyüme eğrisi için HAD yangın analizi sonuçları.....	100
4.3.4 25 MW yangın yükü basma-egzoz senaryosu HAD yangın analizi sonuçları	112
4.4 Gayrettepe İstasyonu HAD Yangın Analizi Sonuçları.....	114
4.4.1 6 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları.....	116
4.4.2 25 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları.....	129
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	145
5.1 Isıl Konfor İnceleme Sonuçları	145
5.2 Acil Durum Yangın İnceleme Sonuçları	148
KAYNAKLAR.....	151
ÖZGEÇMİŞ.....	159

KISALTMALAR

ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BIM	: Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling)
BS	: Bekleme Süresi
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DIN	: Deutsches Institut für Normung
FDS	: Fire Dynamics Simulator
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HDR	: Isı Açığı Hızı (Heat Deficit Rate)
ISO	: International Organization for Standardization
KH	: Kontrol Hacmi
KY	: Kontrol Yüzeyi
NFPA	: National Fire Protection Association
PAKS	: Peron Ayırıcı Kapı Sistemi (Platform Screen Door)
PMV	: Tahmin Edilen Ortalama Oy (Predicted Mean Vote)
PPD	: Tahmin Edilen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage of Dissatisfied)
RSI	: Relative Strain Index
RWI	: Bağlı Sıcaklık İndeksi (Relative Warmth Index)
SES	: Subway Environment Simulation
THF	: Tünel Havalandırma Fanı
VAV	: Değişken Hava Debisi (Variable Air Volume)
WSN	: Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor Network)



SEMBOLLER

a	: İvme
A	: Alan
c	: Ses hızı
C_1, C_1, C_μ	: Ampirik sabitler
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı
f	: Darcy sürtünme faktörü
E	: Enerji
F	: Kuvvet
F_p	: Basınç kuvveti
F_s	: Sürtünme kuvveti
g_x, g_y, g_z	: Yer çekimi ivmesi bileşenleri
h	: Entalpi
I	: Birleşimde noktalarında gerçekleşen ilave basınç kaybı
I_a	: Hava sınır tabakasının yalıtım etkisi
I_{cw}	: Giysi yalıtımı
k	: Isı iletim katsayısı
K	: Türbülanslı kinetik enerji
k_t	: Girdap iletkenliği
K_{tra}	: Tren arkasında daralmadan kaynaklanan basınç düşümü
$K_{trö}$	: Tren önünde daralmadan kaynaklanan basınç düşümü
L	: Uzunluk
M	: Metabolik hız
m	: Kütle
$\dot{m}$	: Kütlesel debi
Ma	: Mach sayısı
p, P	: Basınç
R	: Radyan ısı
T	: Sıcaklık
Q	: Hacimsel Debi

$\dot{Q}$	: Isıl yük
$\dot{Q}_{kayıp}$	: Yüzeyden ısı transferi ile oluşan kayıp
$\dot{Q}_{konkors}$	: Konkordan gelen ısı yükleri
Q'''_{net}	: Net hacimsel ısı üretimi
$\dot{Q}_{peron}$	: Perondan gelen ısı yükleri
S	: Çevre uzunluğu
t	: Zaman
u, v, w	: Hız bileşenleri
v_b	: Aktivite kaynaklı hız
v_r	: Bağlı hız
V	: Hacim
x, y, z	: Mesafe
α	: Yangın büyüme katsayısı
β	: Blokaj oranı
Δp_a	: Birleşimdeki dönüşlerden kaynaklanan basınç kaybı
Δp_f	: Sürtünme kaynaklı basınç kaybı
Δp_{piston}	: Piston etkisi kaynaklı basınç kaybı veya kazancı
Δp_s	: Basınç kaybı
ε	: Türbülanslı enerji dağılım hızı
Φ	: Viskoz ısı üretimi
μ	: Dinamik viskozite
μ_t	: Girdap viskozitesi
ρ	: Yoğunluk
$\sigma_K, \sigma_\varepsilon$	: Türbülanslı Schmidt sayıları
σ_t	: Türbülanslı Prandtl sayısı
τ	: Kayma gerilimi

Alt İndisler

a	: Hava
$\ç$	: Çıkan
g	: Giren
t	: Tünel, Toplam
tr	: Tren

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : İstanbul raylı sistem ağı hat bazlı yolcu sayılarının yıllara göre değişimi	3
Çizelge 2.1 : Tren Özellikleri	26
Çizelge 3.1 : Ölçüm cihazları teknik özellikleri	44
Çizelge 3.2 : Metabolik hız, giysi yalıtımı ve aktivite kaynaklı hız değerleri.....	54
Çizelge 3.3 : ASHRAE konfor sınıflandırması ve RWI karşılıkları	55
Çizelge 3.4 : RWI hesaplamalarında kullanılan veriler.....	56
Çizelge 4.1 : NFPA 204 yangın sınıflandırması.....	63
Çizelge 4.2 : Yolcu tahliye hesabı referans değerleri	65
Çizelge 4.3 : M2 metro hattı ve istasyon verileri.....	66
Çizelge 4.4 : Yolcuların sıcaktan etkilenmeden tahliye süreleri	77



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2029 vizyonu İstanbul raylı sistemler haritası [1].....	1
Şekil 1.2 : İstanbul'da raylı sistem hatlarını kullanan toplam yolcu sayısının yıllara göre değişimi	2
Şekil 2.1 : M2 metro hattı şematik görünümü	23
Şekil 2.2 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu fotoğrafları	24
Şekil 2.3 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu modeli	25
Şekil 2.4 : Gayrettepe istasyonu fotoğrafları	25
Şekil 2.5 : Gayrettepe istasyonu modeli	26
Şekil 2.6 : Tren ön görünümü	26
Şekil 2.7 : Doğal havalandırma şematik görünümü.....	27
Şekil 2.8 : Tünel havalandırma sistemi çalışma prensibi	28
Şekil 2.9 : İstasyon modülü şematik görünümü	30
Şekil 2.10 : Tünel ve içerisinde hareket eden tren için kontrol hacmi bölgeleri	31
Şekil 2.11 : 4-5 noktaları arası kontrol hacmi.....	32
Şekil 2.12 : Tünele kesitine etki eden kuvvetler.....	33
Şekil 2.13 : Tünel ve shaft birleşim bölgesi	36
Şekil 2.14 : İstasyon kontrol hacimleri.....	38
Şekil 3.1 : Ölçüm cihazları	44
Şekil 3.2 : Saha ölçüm fotoğrafları	45
Şekil 3.3 : Dış hava sıcaklığının ölçüm aylarındaki değişimi	45
Şekil 3.4 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ölçüm noktaları	46
Şekil 3.5 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ilkbahar mevsimi sıcaklık değerleri.....	47
Şekil 3.6 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ilkbahar mevsimi bağıl nem değerleri	47
Şekil 3.7 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yaz mevsimi sıcaklık değerleri	48
Şekil 3.8 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yaz mevsimi bağıl nem değerleri.....	48
Şekil 3.9 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu sonbahar mevsimi sıcaklık değerleri	49
Şekil 3.10 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu sonbahar mevsimi bağıl nem değerleri	49
Şekil 3.11 : Gayrettepe istasyonu ölçüm noktaları	50
Şekil 3.12 : Gayrettepe istasyonu ilkbahar mevsimi sıcaklık değerleri.....	50
Şekil 3.13 : Gayrettepe istasyonu ilkbahar mevsimi bağıl nem değerleri	51
Şekil 3.14 : Gayrettepe istasyonu yaz mevsimi sıcaklık değerleri	51
Şekil 3.15 : Gayrettepe istasyonu yaz mevsimi bağıl nem değerleri	52
Şekil 3.16 : Gayrettepe istasyonu sonbahar mevsimi sıcaklık değerleri	52
Şekil 3.17 : Gayrettepe istasyonu sonbahar mevsimi bağıl nem değerleri	53
Şekil 3.18 : Hava sınır tabakası yalıtım etkisinin toplam hava hızına göre değişimi	55
Şekil 3.19 : Yaz mevsiminde daha serin bir ortam isteyen insanların yüzdesi.....	56
Şekil 3.20 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ilkbahar mevsimi RWI değerleri	57
Şekil 3.21 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yaz mevsimi RWI değerleri	58
Şekil 3.22 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu sonbahar mevsimi RWI değerleri	58
Şekil 3.23 : Gayrettepe istasyonu ilkbahar mevsimi RWI değerleri	59
Şekil 3.24 : Gayrettepe istasyonu yaz mevsimi RWI değerleri.....	59

Şekil 3.25 : Gayrettepe istasyonu sonbahar mevsimi RWI değerleri	60
Şekil 4.1 : DIN 5510 araç yangın büyüme eğrileri [79]	63
Şekil 4.2 : 6 MW yangın büyüme eğrisi	64
Şekil 4.3 : 25 MW yangın büyüme eğrisi	64
Şekil 4.4 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yolcu tahliye güzergahı	66
Şekil 4.5 : Gayrettepe istasyonu yolcu tahliye güzergahı	66
Şekil 4.6 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yangın senaryosu zaman akış şeması	68
Şekil 4.7 : Gayrettepe istasyonu yangın senaryosu zaman akış şeması	68
Şekil 4.8 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu 3 boyutlu HAD yangın analizi modeli	73
Şekil 4.9 : Gayrettepe istasyonu 3 boyutlu HAD yangın analizi modeli	73
Şekil 4.10 : Tren 3 boyutlu HAD modeli	74
Şekil 4.11 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları	74
Şekil 4.12 : Gayrettepe istasyonu yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları	75
Şekil 4.13 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu mesh görünümü	75
Şekil 4.14 : Gayrettepe istasyonu mesh görünümü	76
Şekil 4.15 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu düşey düzlem konumları	76
Şekil 4.16 : Gayrettepe istasyonu düşey düzlem konumları	76
Şekil 4.17 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi	79
Şekil 4.18 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi	81
Şekil 4.19 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi	82
Şekil 4.20 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi	83
Şekil 4.21 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi	84
Şekil 4.22 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi	85
Şekil 4.23 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi	86
Şekil 4.24 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi	87
Şekil 4.25 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi	87
Şekil 4.26 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi	88
Şekil 4.27 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi	88
Şekil 4.28 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi	89
Şekil 4.29 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi	89
Şekil 4.30 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi	91
Şekil 4.31 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi	92
Şekil 4.32 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi	93
Şekil 4.33 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi	94
Şekil 4.34 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi	96
Şekil 4.35 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi	97
Şekil 4.36 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi	97
Şekil 4.37 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi	98
Şekil 4.38 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi	99
Şekil 4.39 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi	99
Şekil 4.40 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi	100
Şekil 4.41 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi	101
Şekil 4.42 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi	102
Şekil 4.43 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi	103
Şekil 4.44 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi	105
Şekil 4.45 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi	106
Şekil 4.46 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi	107
Şekil 4.47 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi	109
Şekil 4.48 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi	109

Şekil 4.49 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi...	110
Şekil 4.50 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi	110
Şekil 4.51 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi.....	111
Şekil 4.52 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi ...	112
Şekil 4.53 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi	113
Şekil 4.54 : Şişli-Mecidiyeköy istasyon geneli sıcaklık değişimi	113
Şekil 4.55 : Gayrettepe istasyonu peron, konkors ve A-A düzlemi 480. s sıcaklık görselleri	114
Şekil 4.56 : Gayrettepe istasyonu mimari tasarım revizyon önerisi	115
Şekil 4.57 : Gayrettepe istasyonu peron katı hava hızı değişimi	116
Şekil 4.58 : Gayrettepe istasyonu peron katı sıcaklık değişimi	118
Şekil 4.59 : Gayrettepe istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi.....	119
Şekil 4.60 : Gayrettepe istasyonu konkors katı hava hızı değişimi	121
Şekil 4.61 : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi	122
Şekil 4.62 : Gayrettepe istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi.....	124
Şekil 4.63 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi	125
Şekil 4.64 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi	126
Şekil 4.65 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi.....	126
Şekil 4.66 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi	127
Şekil 4.67 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi	127
Şekil 4.68 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi	128
Şekil 4.69 : Gayrettepe istasyonu peron katı hava hızı değişimi	129
Şekil 4.70 : Gayrettepe istasyonu peron katı sıcaklık değişimi.....	131
Şekil 4.71 : Gayrettepe istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi.....	132
Şekil 4.72 : Gayrettepe istasyonu konkors katı hava hızı değişimi	134
Şekil 4.73 : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi	135
Şekil 4.74 : Gayrettepe istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi.....	137
Şekil 4.75 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi	139
Şekil 4.76 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi	139
Şekil 4.77 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi.....	140
Şekil 4.78 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi	141
Şekil 4.79 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi	141
Şekil 4.80 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi	142



FARKLI TİP METRO İSTASYON MODÜLLERİ İÇİN ISIL KONFOR VE ACİL DURUM ŞARTLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

İstanbul, Avrupa ve Asya kıtalarının birleştiği, yüksek nüfus yoğunluğu ve trafik sıkışıklığı ile bilinen büyük bir metropoldür. Şehirde özel araç sayısının ve trafiğin günden güne artması merkezi konumlarda ulaşım sürelerinin uzamasına ve emisyon kaynaklı hava kirliliğine sebep olmaktadır. Karbon emisyonlarının azaltılması, küresel ısınmayla mücadele ve gelecek nesiller için daha yaşanabilir bir dünya sağlamak adına temel hedeflerden biridir. Bu bağlamda, şehir merkezlerinde özel araçlardan kaynaklanan emisyonların azaltılması büyük önem taşımaktadır. Şehrin yaşam standardını yükseltmek ve çevreyi korumak için toplu taşımanın, özellikle raylı sistemlerin geliştirilmesi ve kullanımının artırılması gerekmektedir. Raylı sistem hatlarının kullanımını teşvik etmek için; bu hatların erişimi kolay, hızlı, konforlu, güvenilir, emniyetli ve diğer ulaşım modlarıyla iyi entegre olacak şekilde planlanması gerekmektedir. Şehrin topografik yapısından dolayı İstanbul'daki metro istasyonları çoğunlukla derin olmaktadır. Bu durum, hem yürüme mesafelerini hem de yolcuların istasyonda geçirdikleri süreyi artırmaktadır. Yolcuların istasyonda kalma süresi uzadıkça, istasyon içinde yeterli düzeyde ısı konfor ve emniyet şartlarının sağlanması yolcu memnuniyeti ve sağlığı açısından daha önemli hale gelmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, İstanbul'un en yoğun metro hattı olan M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonlarında saha ölçümleri ve Bağlı Sıcaklık İndeksi (RWI) hesaplamalarıyla ısı konfor, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleriyle acil durum yangın konuları incelenmiştir. Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları M2 metro hattı üzerinde art arda gelmektedir ve peron katları farklı yapım teknikleri kullanılarak inşa edilmiştir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunun peron katı delme tünel, konkors katı ise aç-kapa yöntemiyle inşa edilmiştir. Gayrettepe istasyonunun tamamı aç-kapa yöntemiyle

inşa edilmiştir. HAD analizleri için istasyonların ve hatta kullanılan trenin 3 boyutlu katı modeli oluşturulmuştur.

Isıl konfor incelemelerinde, Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları peron ve konkors katlarından ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri boyunca her gün sıcaklık ve bağıl nem verileri toplanmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri istasyonlarda 2,5 m yükseklikte eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda peron katında 15, kuzey ve güney konkors katlarında 2'ser olmak üzere toplam 19 noktada, Gayrettepe istasyonunda ise peron katında 13, konkors katında 4 olmak üzere toplam 17 noktada ölçümler yapılmıştır. Hava hızı verileri RWI hesaplamalarında kullanılmak üzere istasyonlarda farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir.

Isıl konfor incelemelerinde, istasyonların peron ve konkors katlarında ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin yüksek olduğu ve genel itibariyle literatürde bulunan ısı konfor şartlarının istasyonlarda sağlanmadığı belirlenmiştir. Ortalama RWI değerleri, ilkbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu hariç incelenen tüm mevsimlerde 2 istasyonda da ASHRAE konfor sınıflandırması açısından ısı konfor şartlarının sağlanmadığını göstermiştir. Ortalama RWI değerleri karşılaştırıldığında ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinin tamamında aç-kapa tip Gayrettepe istasyonunda delme tünel tip Şişli-Mecidiyeköy istasyonuna kıyasla ısı konfor şartlarının daha kötü olduğu sonucuna varılmıştır. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda yolcuların yoğunluğunun ve Gayrettepe istasyonunda da hemen hemen tamamının özellikle yaz ayında daha serin bir ortam istediği ortaya çıkmıştır. İstasyonlarda ölçülen sıcaklık ve hesaplanan RWI değerlerinin, yakın konumdaki meteorolojik hava ölçüm istasyonundan temin edilen dış hava sıcaklığı verileri ile mevsimsel bazda benzer değişim trendleri gösterdiği belirlenmiştir.

Acil durum yangın incelemelerinde, istasyonda tren yangını olayı için farklı senaryolar oluşturularak acil durum havalandırması ve yolcu tahliyesi konuları araştırılmıştır. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda yolcuların peron katını 5,36 dakikada (322 s), istasyonu ise 8,53 dakikada (512 s), Gayrettepe istasyonunda yolcuların peron katını 4,21 dakikada (253 s), istasyonu ise 7,22 dakikada (433 s) tahliye ettiği hesaplanmıştır.

Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda HAD analizleri sonucunda 6 MW yangın yükü için 4 adet 50 m³/s ve 25 MW yangın yükü için 4 adet 90 m³/s debili tünel havalandırma fanlarının en az tahliye süresi boyunca NFPA 130 standardında belirtilen hava hızı,

sıcaklık ve görüş mesafesi kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü orta hızda yangın büyüme eğrisi için uygun sonuç alınan senaryo, aynı tünel havalandırma fan debisi (4 adet 90 m³/s) kullanılarak çok hızlı yangın büyüme eğrisine sahip 25 MW yangın yükü senaryosu için tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda sıcak hava ve dumanın daha fanlar devreye girmeden kısa sürede peronu kapladığı ve yolcu tahliyesi açısından risk oluştuğu görülmüştür. Bu sonuç işletmede kullanılacak tren ile HAD analizlerinde kullanılan trenin yangın özellikleri açısından aynı veya benzer olmasının önemini göstermiştir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için tüm tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırıldığında uygun sonuç alınan senaryo (4 adet 90 m³/s), kuzey yönde olan fanlar basma (2 adet 90 m³/s) ve güney yönde olan fanlar egzoz (2 adet 90 m³/s) modunda çalıştırılarak tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda sıcak hava ve dumanın yolcu tahliye güzergahında ilerleyerek merdiven bölgesine ve akabinde konkors katına ulaştığı görülmüştür. Analiz edilen egzoz-basma senaryosunun yolcu tahliyesi açısından risk oluşturduğu belirlenmiştir.

Gayrettepe istasyonunda HAD analizleri sonucunda 6 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma fanlarının tahliye süresi boyunca NFPA 130 standardında belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. 25 MW yangın yükü için sadece tünel havalandırma fanlarının çalıştığı senaryolarda başarılı sonuçlar alınamadığı için senaryolara peron altı egzoz fanları da dahil edilmiştir. İlave fanlarla yapılan analizlerin sonuçlarında iyileşme olmakla birlikte dumanın konkors katına ulaşması engellenememiştir. Bu sonuçlar mimari tasarımda bazı iyileştirmeler yapılmasını gerekli kılmıştır. Mimari tasarımda yapılan revizyonla, konkors katının uç noktalarına ve ortadaki merdivenlerin etrafına duvar örülmüştür. İlave olarak merdiven üzerindeki bölümlere tavan kotundan 1 m aşağısına kadar duvar eklenmiştir. Revize edilen mimari tasarım kullanılarak yapılan HAD analizi sonucunda 25 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma ve 2 adet 55 m³/s debili peron altı egzoz fanlarının en az tahliye süresi boyunca NFPA 130 standardında belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterlerini sağladığı belirlenmiştir.



EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THERMAL COMFORT AND EMERGENCY CONDITIONS FOR DIFFERENT TYPES OF METRO STATION MODULES

SUMMARY

Istanbul is a large metropolis where Europe and Asia meet, known for its high population density and traffic congestion. The increasing number of private vehicles and traffic in the city causes longer commute times in central locations and air pollution caused by emissions. Reducing carbon emissions is one of the main goals for combating global warming and ensuring a more livable world for future generations. In this context, reducing emissions from private vehicles in city centers is of great importance. In order to raise the city's standard of living and protect the environment, it is necessary to develop and increase the use of public transportation, especially rail systems. To encourage the use of rail lines, these lines should be planned to be easy to access, fast, comfortable, reliable, safe and well-integrated with other modes of transportation. Due to the topography of the city, metro stations in Istanbul are often deep. This increases both walking distances and the time passengers spend at the station. As the time passengers spend in the station increases, ensuring adequate thermal comfort and emergency conditions becomes increasingly important for passenger satisfaction and health.

Within the scope of this thesis, thermal comfort with field measurements and Relative Warmth Index (RWI) calculations and emergency fire issues with Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses were investigated at Şişli-Mecidiyeköy and Gayrettepe stations on the M2 Yenikapı-Hacıosman metro line, the busiest metro line in Istanbul. Şişli-Mecidiyeköy and Gayrettepe stations are consecutive on the M2 metro line, and the platform levels were built using different construction techniques. The platform level of Şişli-Mecidiyeköy station was constructed by bored tunnel and the concourse level was constructed by cut-and-cover method. The entire Gayrettepe station was constructed with the cut-and-cover method. For CFD analysis, a 3D solid model of the stations and the train used on the line were drawn.

In the thermal comfort research, air velocity, temperature and relative humidity data were collected from the platform and concourse levels of Şişli-Mecidiyeköy and Gayrettepe stations every day during spring, summer and autumn seasons. Temperature and relative humidity measurements were performed simultaneously at a height of 2.5 m at the stations. At Şişli-Mecidiyeköy station, measurements were made at a total of 19 points, 15 on the platform level and 2 each on the north and south concourse levels, and at Gayrettepe station, measurements were made at a total of 17 points, 13 on the platform level and 4 on the concourse level. Air velocity data were collected at different periods at the stations to be used in RWI calculations. The data were then subjected to comparative analysis and evaluation with the RWI scale. The RWI method was selected to evaluate passenger thermal comfort due to its development for transient environments such as metro stations.

In thermal comfort studies, it was determined that the temperature and relative humidity values measured on the platforms and concourse levels of the stations were elevated, and that the thermal comfort conditions commonly defined in the literature were not achieved. Mean RWI values showed that thermal comfort conditions were not met in terms of ASHRAE comfort classification in all researched seasons except Şişli-Mecidiyeköy station in the spring season. When the mean RWI values are compared, it is concluded that the thermal comfort conditions are worse at the cut-and-cover type Gayrettepe station than the bored tunnel type Şişli-Mecidiyeköy station in all spring, summer and autumn seasons. After 235 seconds of exposure at the platform level, a decrease in RWI values was observed due to a reduction in the metabolic rate. It was found that most passengers at Şişli-Mecidiyeköy station and almost all passengers at Gayrettepe station wanted a cooler environment especially in summer. These results demonstrate the detrimental effects of the prevailing thermal environment on passengers.

Measurements indicate that the indoor air velocity values at Gayrettepe station are almost half those observed at Şişli/Mecidiyeköy station. This result can be attributed to the lower train-induced air velocity in cut-and-cover type stations with large cross-sectional areas. This leads to the RWI values being calculated as higher at the cut-and-cover type station.

It was determined that the measured temperature and calculated RWI values at the stations showed similar seasonal trends with the outdoor air temperature data obtained from the nearby meteorological weather station.

Water leaks from the tunnel walls, climatic conditions, and passengers contribute to the remarkably high humidity levels measured at the stations. Although there is no upper limit value for relative humidity in the current versions of internationally accepted standards, high relative humidity is known to increase the perceived temperature, especially at high ambient temperatures. particularly at high ambient temperatures. This situation affects passengers' thermal comfort and creates a suitable environment for bacterial growth, negatively impacting passenger health.

In emergency fire studies, various scenarios were developed for a train fire incident at the station to investigate emergency ventilation and passenger evacuation strategies. At Şişli-Mecidiyeköy station, passengers evacuated the platform level in 5.36 minutes (322 s) and the station in 8.53 minutes (512 s), while at Gayrettepe station, passengers evacuated the platform level in 4.21 minutes (253 s) and the station in 7.22 minutes (433 s).

As a result of CFD analysis at Şişli-Mecidiyeköy station, it was determined that 4 tunnel ventilation fans with a flow rate of 50 m³/s for 6 MW fire load and 4 tunnel ventilation fans with a flow rate of 90 m³/s for 25 MW fire load met the air velocity, temperature and visibility criteria specified in the NFPA 130 standard for at least the evacuation period. The scenario that obtained appropriate results for the 25 MW fire load at Şişli-Mecidiyeköy station for the medium fire growth curve was repeated for the 25 MW fire load scenario with a fast fire growth curve using the same tunnel ventilation fan flow rate (4 units of 90 m³/s). As a result of the analysis, it was seen that hot air and smoke covered the platform level in a short time before the fans were activated and there was a risk for passenger evacuation. This result showed the importance of the train to be used in operation and the train used in CFD analysis to be the same or similar in terms of fire characteristics. For a fire load of 25 MW at Şişli-Mecidiyeköy station, the scenario (4 units of 90 m³/s) was repeated by operating the northbound fans in push mode (2 units of 90 m³/s) and the southbound fans in pull mode (2 units of 90 m³/s). As a result of the analysis, it was observed that hot air and smoke traveled along the passenger evacuation route and reached the staircase area

and then the concourse level. It was determined that the push-pull scenario analyzed poses a risk for passenger evacuation.

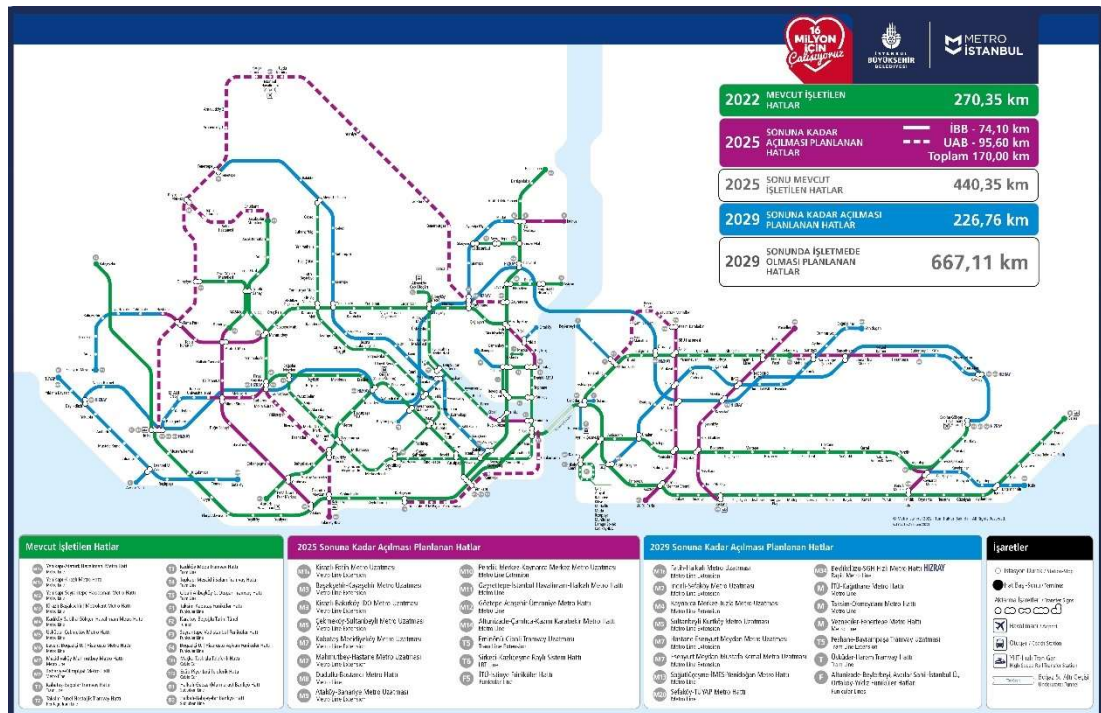
As a result of CFD analysis at Gayrettepe station, it was determined that 4 tunnel ventilation fans with a flow rate of $120 \text{ m}^3/\text{s}$ for 6 MW fire load met the air velocity, temperature and visibility criteria specified in the NFPA 130 standard for at least the evacuation period. For 25 MW fire load, since successful results were not obtained in the scenarios where only tunnel ventilation fans worked, under platform exhaust fans were included in the scenarios. Although there was an improvement in the results of the analysis with additional fans, smoke could not be prevented from reaching the concourse level. These results necessitated some improvements in the architectural design. As an architectural design revision, walls were built around the end points of the concourse level and around the stairs in the middle. In addition, walls were added to the sections above the stairs up to 1 m below the ceiling level. As a result of CFD analysis using the revised architectural design, it was determined that for a fire load of 25 MW, 4 tunnel ventilation fans with a flow rate of $120 \text{ m}^3/\text{s}$ and 2 under platform exhaust fans with a flow rate of $55 \text{ m}^3/\text{s}$ met the air velocity, temperature and visibility criteria specified in the NFPA 130 standard for at least the evacuation period.

1. GİRİŞ

Gelişmiş şehirlerde insanların yaşam kalitesini artırmak amacıyla erişimi kolay, hızlı, konforlu, güvenilir, emniyetli ve iyi entegre edilmiş toplu taşıma sistemlerinden oluşan ulaşım ağı oluşturulmaktadır. Şehir içi ulaşım ağının merkezinde etkin ve kalıcı çözüm getirmesi açısından raylı sistemler bulunmaktadır.

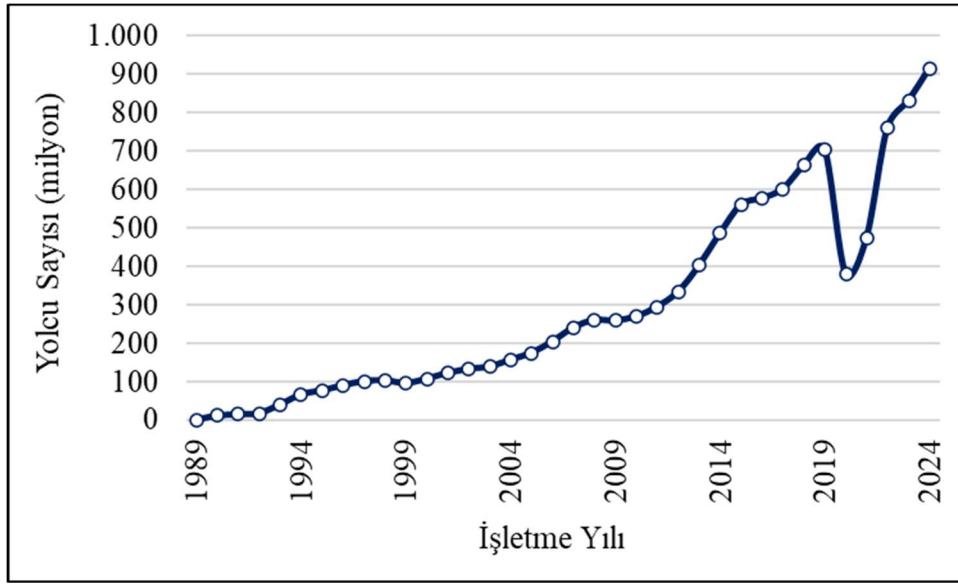
Ülkemizde son yıllarda raylı sistem yatırımları hız kazanmıştır. Özellikle İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa gibi şehirlerde belediye bütçelerinin önemli bir bölümü raylı sistemlere ayrılmaktadır. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı da bazı şehir içi raylı sistem hatlarının yapımını üstlenmekte ve raylı sistem hatlarının yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır.

İstanbul için 2029 yılı sonunda ulaşılması hedeflenen raylı sistemler haritası Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Planlanan projeler dikkate alındığında 2029 yılı itibarıyla İstanbul, toplamda 667,11 km uzunluğunda raylı sistem ağı ile dünyada en uzun raylı sistem ağına sahip şehirler arasında üst sıralara yerleşecektir.



Şekil 1.1 : 2029 vizyonu İstanbul raylı sistemler haritası [1]

Raylı sistem hatlarının birbirleri ile entegre olarak yaygınlaşması ve merkezi lokasyonlara ulaşım imkanı sunması yolculuk sayılarına da pozitif yansımaktadır. İstanbul’da raylı sistem hatlarını kullanan toplam yolcu sayısının yıllara göre değişimi Şekil 1.2’de gösterilmiştir. İstanbul’da ulaşım için raylı sistem kullanan toplam yolcu sayısının, COVID-19 pandemisi ve kısıtlamaların olduğu 2020 ve 2021 yılları verileri ihmal edilirse, yeni hatlarında açılmasıyla genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. 2024 yılında toplam 915.314.407 yolcu İstanbul’da ulaşım için raylı sistem hatlarını tercih etmiştir [1].



Şekil 1.2 : İstanbul’da raylı sistem hatlarını kullanan toplam yolcu sayısının yıllara göre değişimi

Çizelge 1.1’de son 6 yıl için yıllık hat bazlı yolcu sayıları görülmektedir [1]. Hat kodlamalarında metro için M, tramvay için T, fönüküler için F ve teleferik için TF harfleri kullanılmıştır. Yolcu verisi girilmeyen yıllarda ilgili hat henüz işletmeye açılmamıştır. Yolcu sayıları COVID-19 pandemisi ve kısıtlamaların etkisiyle 2020 ve 2021 yıllarında tüm hatlarda azalmıştır. 2022 yılında pandeminin bitmesiyle yolcu sayılarında bir önceki yıla göre ciddi bir artış olmuştur. 2024 yılına gelindiğinde bazı hatlarda hala 2019 yılı yolculuk sayılarına ulaşamadığı görülmektedir. Toplam yolcu sayısındaki artış göz önüne alındığında bu azalmanın sebebi olarak bazı mevcut yolcuların yeni açılan hatları tercih ettiği yorumu yapılabilir. Yolculuk verileri incelendiğinde son yıllarda en fazla kullanılan raylı sistem hattının M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattı olduğu görülmektedir.

Çizelge 1.1 : İstanbul raylı sistem ağı hat bazlı yolcu sayılarının yıllara göre değişimi

Hat Kodu	2019	2020	2021	2022	2023	2024
M1	149.529.832	83.132.243	92.395.201	134.078.763	134.833.143	130.704.355
M2	161.097.785	76.712.205	93.671.790	158.302.324	158.990.555	163.149.116
M3	23.677.667	16.607.307	15.641.215	20.284.977	27.113.756	50.808.656
M4	88.645.327	41.167.618	47.600.844	82.360.846	99.989.572	109.675.299
M5	66.529.620	38.703.767	48.071.741	80.007.671	88.989.137	107.217.696
M6	6.072.982	2.408.894	2.605.635	5.265.206	5.889.909	6.027.799
M7	-	3.555.154	22.542.300	57.955.493	74.568.900	79.987.624
M8	-	-	-	-	15.716.371	23.030.376
M9	-	-	2.415.083	6.136.986	6.362.590	18.253.659
T1	141.650.223	79.604.960	99.619.825	138.551.053	132.040.477	127.915.030
T3	1.128.361	487.196	515.102	998.988	1.107.025	1.230.483
T4	58.501.235	36.318.557	42.159.199	61.507.500	64.715.074	65.562.655
T5	-	-	3.735.697	7.580.561	12.770.679	23.148.546
F1	6.024.841	1.996.457	2.534.237	5.337.210	5.072.731	5.307.317
F4	-	-	-	235.824	1.183.870	1.299.109
TF1/TF2	1.895.352	631.336	1.063.611	2.021.841	1.953.679	1.996.687

İstanbul raylı sistem ağına planlanan genişleme ve mevcut hatlarla taşınan toplam yolcu sayısının günden güne artması dikkate alındığında sistemin yeterli seviyede konfor şartları ve acil durum tedbirlerini barındırması yolcu sağlığı, güvenliği ve kullanım tercihi açısından önem arz etmektedir.

Metro hatları için konfor şartları dikkate alındığında, iç hava kalitesi (sıcaklık, nem, kirletici partikül miktarı), tren hareketinden (piston etkisi) veya cebri havalandırma sisteminden kaynaklı hava hızları, tren içindeki veya peron katındaki ses seviyesi, yolculuk süresi ve titreşim konuları ön plana çıkmaktadır.

Metro hatları için acil durum şartları dikkate alındığında sinyal sistemi, tünel, peron ve istasyon tahliye süreleri, acil kaçış yollarının sayısı ve konumu, yangınla mücadele ve duman egzoz sistemleri, Peron Ayırıcı Kapı Sistemleri (PAKS), acil durum aydınlatma, anons, telefon ve bas konuş sistemleri ön plana çıkmaktadır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında, İstanbul M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonlarında, uzun süreli saha ölçümleri (hava hızı, sıcaklık ve bağıl nem) ve Bağıl Sıcaklık İndeksi (RWI) hesaplamaları ile ısı konforu, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile acil durum yangın konuları detaylı olarak incelenmiştir.

Seçilen istasyonlar M2 metro hattı üzerinde art arda gelmektedir ve peron katları farklı yapım teknikleri kullanılarak inşa edilmiştir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunun peron katı delme tünel, konkors katı ise aç-kapa yöntemiyle inşa edilmiştir. Gayrettepe istasyonunun tamamı aç-kapa yöntemiyle inşa edilmiştir. Buna bağlı olarak istasyonlar farklı mimari özelliklere sahiptir. İncelenen istasyonlar ve tüneller için lazer tarama yöntemi kullanılarak gerçekle uyumlu 3 boyutlu mimari modelleri oluşturulmuştur.

Isıl konfor incelemesi çerçevesinde istasyonlarda ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri boyunca uzun süreli sıcaklık ve bağlı nem ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler istasyonların peron ve konkors katlarında 2,5 m yükseklikte, çeşitli noktalarda eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler 1 dakikalık periyotlarda kaydedilmiş ve işletme saatleri dikkate alınarak sabah saat 06:00 ile akşam saat 23:59 aralığında filtrelenmiştir. Hava hızı verileri RWI hesaplamalarında kullanılmak üzere istasyonlarda farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Farklı tipte 2 istasyon için ölçüm verileri kullanılarak RWI değerleri hesaplanmış ve yolcuların ısıl konforları mevsim bazlı olarak değerlendirilmiştir. Delme tünel ve aç-kapa tip istasyonlarda oluşan ısıl konfor şartları karşılaştırılmıştır.

Acil durum yangın incelemesi çerçevesinde istasyonda tren yangını olayı için farklı senaryolar oluşturularak acil durum havalandırması ve yolcu tahliyesi konuları araştırılmıştır. Olası bir tren yangınında yolcuların güvenli ve uygun ortam şartlarında istasyondan tahliye edilebilmesi için havalandırma sisteminin yeterliliği önem arz etmektedir. Farklı tipte 2 istasyon için HAD analizleri yapılarak tren yangını olayında yolcu tahliye süresi boyunca ortam şartları incelenmiştir. HAD analizleri için istasyonların ve hatta kullanılan trenin 3 boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde, tünel havalandırma fanlarının debileri değiştirilerek hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, tren yangın yükü parametresi varyasyon göstererek sıcaklık dağılımı ve duman yayılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, tünel havalandırma fanı kapasitesi ile yangın yükü parametrelerinin sistematik olarak değiştirilmesiyle parametrik bir analiz yürütülmüştür.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla, mevcut ve yeni yapılacak metro hatlarında yolcu ısıl konfor ve emniyet seviyelerinin iyileşmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Metrolarda ısı konfor ve acil durum yangın konuları birbirinden bağımsız ele alınmaktadır. Bu bölümde literatürde bulunan çalışmalar ısı konfor ve acil durum yangın çalışmaları olarak 2 farklı başlık altında derlenmiştir.

1.2.1 Isı konfor literatür araştırması

Yeni raylı sistem hatlarının tasarım sürecinde, tasarımların yolcuların sağlığı ve memnuniyeti üzerindeki etkilerini dikkate almak gerekmektedir. Yolcular metro istasyonu ortamına kısa bir süre maruz kalsalar da, olumsuz koşullar sağlıklarını ya da ısı konforlarını etkileyerek rahatsızlığa veya başka olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir [2]. Isıl çevre, hava kalitesi, hava hızı, gürültü seviyeleri, seyahat süresi ve titreşim gibi faktörler yolcu sağlığı ve memnuniyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüze kadar birçok araştırmacı yer altı raylı sistem hatları için hava kalitesi konularını incelemiştir [3-12]. Son zamanlarda ısı konfor üzerine yapılan araştırmalar artış gösterse de, çalışmaların büyük çoğunluğu ofis, konut, okul ve hastane gibi yer üstü yapılara odaklanmıştır [13].

Metro sistemlerinde işletme devam ederken önemli miktarda ısı üretilmekte ve bu da tünel ve istasyonlarda sıcaklıkların belirgin şekilde artmasına neden olmaktadır. Yeterli soğutma sağlanmadığında bu durum, özellikle sıcak havalarda yolcu rahatsızlığına yol açabilmektedir [14]. Tren motorlarından, aydınlatmalardan ve yolcuların vücutlarından kaynaklanan ısı, gerekli ısı konfor seviyelerinin ötesinde aşırı sıcaklıklara neden olabilmektedir. Ayrıca, tren vagonlarına klima cihazlarının yerleştirilmesi tüneller içinde önemli bir ısı kaynağı oluşturmaktadır [15]. Metro istasyonlarının ısı konforu çeşitli metotlar kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Metro istasyonları süreksiz bir ortama sahiptir. Bu nedenle doğru değerlendirme yapabilmek için uygun ısı konfor indeksinin seçilmesi önemlidir. Literatür incelemesi sonucu metro istasyonlarında ısı konfor değerlendirmesi için iki farklı yöntem ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemlerden biri, süreksiz ortamlar veya metro sistemleri için özel olarak geliştirilmiş olan Bağlı Sıcaklık İndeksi RWI ve Isı Açığı Hızı (Heat Deficit Rate - HDR) gibi termal indeksleri içermektedir [16,17]. Diğer yöntem ise kararlı ortamlar için geliştirilen Tahmin Edilen Ortalama Oy (Predicted Mean Vote - PMV) ve Tahmin Edilen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD) indekslerini içermektedir [18,20].

Birçok araştırmacı farklı şehirlerdeki metro istasyonlarında ısı çevre ve konfor üzerine teorik ve pratik çalışmalar yapmıştır. Ordódy [21], Budapeşte metrosunda kullanılmakta olan havalandırma sisteminin temel özelliklerini tanımlayarak yolcu ve işletme alanlarında PMV ve PPD indekslerini kullanıp iklimsel koşullar ve ısı konforu incelemiştir. Bu çalışma deneysel veriler ve önceki araştırmalar temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Abbaspour ve diğ. [22], Tahran'da bulunan 1 ve 2 numaralı hatlarda metro istasyonları ve trenlerde ısı konforu araştırmıştır. Bu çalışmada sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı değerleri farklı konum ve zamanlarda ölçülmüştür. Isı konfor RWI yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Marzouk ve Abdelaty [23], Kahire metrosundaki ısı koşulları incelemek için Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling - BIM) ile birlikte Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor Network - WSN) kullanmıştır. WSN hava sıcaklığı ve nem verilerini toplamış ve bu veriler BIM tabanlı bir model ile görselleştirilmiştir. Sui ve diğ. [24], Xi'an'daki 2 metro istasyonunda yaz aylarında saha ölçümleri ve anket çalışması ile ısı çevre ve yolcu ısı konforunu değerlendirmiştir. Araştırmada RWI ve değiştirilmiş bir versiyonunu kullanarak tahmin edilen sonuçların ve anket verilerinin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

Cao [25] tez çalışması kapsamında metro çevresel kontrolünü belirlemek için aerodinamik, sıcaklık, nem, ısı deposu ve hava şartlandırma modelleri oluşturmuştur. Hesaplama metodu ve Subway Environment Simulation (SES) yazılımı kullanılarak ShenZhen metrosunun çevresi kısa ve uzun dönemli simüle edilmiştir. Çalışmalar sonucunda mevcut istasyon için çevresel kontrol sistemi, tünel havalandırma sistemi, iklimlendirme sistemi, farklı işletme senaryoları vb. optimizasyon önerileri yapılmıştır. Xiong [26] metrolarda çevresel alan kontrol sistemi üzerinde çalışma yapmıştır. Çalışmada piston etkisi, sıcaklık profili ve hava dağılımı için teorik analiz ve sayısal simülasyon yapılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Wang [27], metro havalandırmasında HAD simülasyonlarının genelde peron ısı şartlarından ziyade acil durum havalandırma sistemleri için yapıldığını ve bu sebeple peron ısı şartları için yapılan simülasyonların olması gerekenden az olduğunu ifade etmiştir. Aslında optimizasyon sonucu tasarlanacak havalandırma sistemiyle ilk yatırım maliyeti ve enerji tüketiminin azalacağını ve yolcu güvenliği ile konforun artacağını savunmuştur. Böylelikle tüm metro sistemi daha verimli olarak inşa edilecek ve işletilecektir. Çalışmada Tianjin metrosu kenar peron havalandırma

sistemi değerlendirmesi ve optimizasyonuna odaklanmıştır. Tezde mevcut ve önerilen sistemler için 3 boyutlu modeller geliştirilmiştir. Simölasyon sınır şartlarını elde etmek ve hava hızı değerlerini teyit etmek için saha ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda: simölasyonla elde edilen sıcaklık değerlerinin yapılan bazı ön kabullerle kabul edilebilir mertebede olduğu belirlenmiştir. Gerçekte ölçülen hava hızının simölasyondan elde edilene kıyasla daha kompleks olduğu görölmüştür. Diğer taraftan bu çalışma sonucu Tianjin metrosu için yeni bir havalandırma tasarımı önerilmiştir.

Huang [28], tren hareketi sonucu tünel ve istasyonlarda oluşan akış karakteristikleri sayısal metot ve CFdesign8.0 yazılımını kullanarak incelemiştir. Simölasyonlarda, trenin oluşturduğu piston etkisinin tünel içindeki hava akışı üzerindeki belirleyici rolü gösterilmiş, tek yönlü ve iki yönlü tünellerde tren hızı ve tünel blokaj oranının etkileri incelenmiştir. Ayrıca, istasyonlardaki üç boyutlu ve zamana bağlı türbölanslı hava hareketleri beş farklı tren hareket senaryosu altında değerlendirilmiş, bu durumlarda istasyon içindeki hız ve basınç dağılımları ayrıntılı olarak ortaya konmuştur. Simölasyon sonuçları, trenlerin doğal havalandırmaya olan katkısını göstermekte ve istasyon içi hava kalitesiyle ısı konfor koşullarının değerlendirilmesinde önemli bilgiler sunmaktadır. Metro sistemlerinde iç ısı kaynaklarından salınan ısıнын etkisi ve sıcaklık-zaman ilişkisi de ısı dengesi denklemleriyle analiz edilerek istasyon sıcaklığını tahmin etmeye yönelik bir model önerilmiştir.

Kim ve Kim [29], tünel içerisinde trenden kaynaklanan 3 boyutlu kararsız akışı deneysel ve teorik çalışmalar yaparak analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda 1:20 ölçekli tünel modeli kullanılarak zamana bağlı hava hızı ve basınç değişimleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmayla aynı geometri oluşturularak daldırılmış katının hareketli sınırı için keskin ara yüz kullanılarak 3 boyutlu kararsız sayısal analiz yapılmıştır. Model ile deney sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü belirlenmiştir.

Yuan ve You [30], kenar peron istasyonlarda hız ve sıcaklık alanlarını elde etmek ve havalandırma sistemiyle ilgili optimizasyon yapmak amacıyla gerçek hal ve optimize edilmiş hal için 3 boyutlu modeller oluşturmuştur. Fiziksel model olarak 2-bağıntılı türbölans modeli ve saha ölçümlerinden elde edilen sınır şartlar kullanılarak HAD simölasyonu yapılmıştır. Çalışma sonucunda 2-bağıntılı türbölans modelinin bazı ön kabuller yapılarak hız ve sıcaklık alanı belirlemede kullanılabileceği belirlenmiştir. Son olarak optimize edilmiş bir havalandırma senaryosu öne sürölmüştür.

Lin ve diğ. [31], metro tünellerinde by-pass şaftları ve piston etkisi etkileşimi üzerine çalışma yapmışlardır. Tip Taipei metro istasyonunda yaz ve kış şartlarında saha ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm verilerine göre şaftlarda maksimum hava hızı 2 m/s ve ortalama hava hızı aralığı 0,7-1,1 m/s olarak belirlenmiştir. Çalışmada piston etkisi kaynaklı tünel havalandırma verimiyle ilgili bir indeks tanımlanmıştır. Bu indeks farklı şaft uzunlukları ve kesit alanları için kullanılabilmektedir. Ölçüm sonuçları piston etkisinin belli şaft uzunluğu ve işletme şartları için efektif olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada şaft kesit alanı arttıkça hava debisinin de arttığı belirlenmiştir. Ancak debi artış oranı kesit artış oranına göre daha az olmaktadır.

Na [32] çalışmasında saha ölçümleri ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır. Metrolarda hava dağılımları ve sıcaklık alanları üzerinde türbülans modeli etkilerini analiz etmiştir. Kullanılacak meshlerin belirlenmesinin hesap sonuçları üzerinde çok etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada optimum meshler verilmiştir. Çalışmada kış şartlarında orta peronda oluşan hava dağılımı ve sıcaklık alanı HAD metodu kullanılarak simüle edilmiştir. Ayrıca izin verildiği ölçüde deneysel veri toplanıp güvenilirliği sağlamak amacıyla simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada yaz şartları içinde seçilen bazı istasyonlara ait HAD simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre optimum havalandırma tabloları oluşturulmuştur. Yangın durumunda oluşabilecek hava dağılımı ve sıcaklık alanlarını belirlemek için HAD çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucu birtakım yazılımlar geliştirilmiştir.

Yang [33], peron şartlarının iyileştirilmesinin sadece tren beklenirken güvenli ve konforlu bir ortam oluşturmayıp yatırım ve işletme maliyetleri açısından da önem arz ettiğini belirtmiştir. Bu doğrultuda çalışmasında Taijin metrosunda bulunan Kuzey-Batı istasyonunu seçmiş ve 3 boyutlu bir model oluşturmuştur. Tezde gerçek şartlara göre yapılan ısı yükü hesabı ile sınır şartları doğrulanıp ısı ve nem yükü ve dağılımları için elde edilen simülasyon verileri doğrultusunda kabul edilebilir bir havalandırma sistemi önerilmiştir. Kaliteli gridler elde edildikten sonra fiziksel özellikler ayrıştırılmış ve sıcaklık ve hız alanları standart model HAD teknikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada besleme hava sıcaklığının tasarımı, peronda piston etkisi, bölgesel egzoz ve Değişken Hava Debisi (Variable Air Volume - VAV) sisteminin uygulanabilirliği konularına odaklanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda: standart modelin bazı makul varsayımlar altında istasyondaki akışları ve ortaya çıkan hız ve sıcaklık alanlarını öngörmek için kullanılabileceği, piston etkisinin tünel

yapısına göre değişkenlik gösterdiği, sıcaklığın ısı yükünün dağılımıyla ilişkili olduğu, VAV sistemlerin enerji tasarrufu açısından avantaj sağlamakla birlikte hava debisi belirli bir seviyeye kadar azaltıldığında, verilen hava sıcaklığının artırılması veya hava miktarının çoğaltılması gibi değişiklikler yapılması gerektiği belirlenmiştir.

Kang [34], tek hatlı bir tünelde 1 boyutlu model oluşturarak piston etkisi ile oluşan hava hızını belirlemiştir. Elde edilen model ile HAD hesap metodu birleştirilerek yeni tek boyutlu bir hava hızı hesaplama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde tren hızı ile tünel ve tren geometrisi kullanılarak elde edilen blokaj oranı dikkate alınmaktadır. Yöntemle tam veya yarım boy PAKS kullanıldığı takdirde oluşabilecek etkiler belirlenebilmektedir.

Li [35] tezinde istasyon çevresel havalandırma sistemi tasarımının iyileştirilmesini ve enerji tasarrufu sağlamayı amaçlamıştır. Çalışmada PAKS olan veya olmayan bazı istasyonlarda ölçümler yapılmış ve teorik çalışma için metronun ısıl çevresiyle ilgili veri toplanmıştır. Ayrıca sistem verimini düşüren bazı hususlar belirlenmiştir. Çalışma istasyon tasarımında kullanılan metotları, saha ölçümlerinin analizlerini, iklimlendirme yük hesaplama konularını içermektedir.

Pflitsch ve diğ. [36], Newcastle’da bulunan farklı metro hatlarında hava hızı, sıcaklık ölçümleri yapmış ve termal görüntüleme gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, tünellerdeki hava akışının tren hareketlerinden bağımsız olan güçlü bir arka plan akışı tarafından baskın şekilde yönlendirildiğini göstermektedir. Ancak sistemin ana aktarma istasyonundaki akış yapısı oldukça karmaşıktır; burada katmanlı ve ters akımlar gözlemlenmiştir. Havalandırma sisteminin doğal hava akışı üzerindeki etkisi, metro sistemi inşa edilirken yer altı iklimi konusundaki bilgi eksikliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, metro sistemindeki hava akışını ve bunun yer üstü iklimiyle etkileşimini tam olarak anlamak adına uzun vadeli ve kapsamlı bir izleme çalışması yapılması önerilmiştir. Böyle bir çalışma yapılarak, metro içinde toksik gaz salınımı veya yangın gibi acil durumlarda yolcular ve acil müdahale ekipleri için oluşabilecek risklerin ortadan kaldıracağı belirtilmiştir.

Camelli ve diğ. [37], metro tünel ve istasyonlarında hava akışını modellemek için daha gerçekçi bir HAD modeli geliştirmişlerdir. Bu model çok vagonlu trenlerin birbirine komşu istasyonlardan gerçek hızlarda kalkış ve varış etkilerini dikkate almaktadır. Ayrıca istasyonlardaki ısı kaynakları da dikkate almaktadır. Yeni yaklaşım deneysel

veriler ve gerçek istasyon geometrisi kullanılarak yapılan sayısal simülasyonlarla örtüşmüştür. İncelenen istasyonlardaki hava akış dinamikleri kirletici maddelerin yayılma ve taşınmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Büyükkşirin [38] tez çalışması kapsamında İstanbul M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy istasyonuna PAKS eklenmesi halinde yolcu ısı konforunun ne şekilde etkileneceğini ve istasyondaki hava hareketlerini incelemiştir. Farklı boydaki PAKS sistemleri analiz edilmiştir. İstasyona ait ısı kazançlar standartlar çerçevesinde hesaplanmış ve istasyonun 3 boyutlu modeli hazırlanarak HAD analizleri yapılmıştır. Modelin zamana bağlı olarak çözümlenmesi Autodesk Simulation CFD (CFDesign) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Analizler PAKS olmayan, farklı tipte PAKS olan, farklı dış ortam sıcaklıkları ve farklı işletme koşulları için tekrarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda istasyona uygulanabilecek en uygun PAKS tipiyle ilgili önerilerde bulunulmuştur.

Han ve diğ. [39], Seul metrosunda iç ortam koşulları ve yolcu konforu ile ilgili araştırma yapmışlardır. Çalışma kapsamında seçilen 6 metro istasyonunda 3 mevsim (yaz, sonbahar ve kış) ölçümler yapılmış ve toplam 5282 yolcu ile görüşülmüştür. Isıl konfor, iç hava kalitesi, aydınlatma ve genel konfor şartları için incelemelerde bulunulmuştur. Çalışma yapılan metroda mevsimlere göre hava sıcaklıklarında ciddi farklılıklar bulunduğu ve iç ortam kalitesinin ölçümlerde yeterli seviyede olduğu belirlenmiştir. Anket yapılan yolcuların çoğunluğu çok düşük sıcaklıklarda bile kendilerini doğal veya konforlu hissettiklerini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda konfor aralıkları konkors katı için 16,1-31,2 °C ve peron katı için 15,9-31,5 °C olarak belirlenmiştir. Konfor değerleri başka ülkelerde yapılan araştırmaların sonucuna göre daha geniş bir aralıkta çıkmıştır.

Assimakopoulos ve Katavoutas [40], Atina metrosu peronlarında saha ölçümleri yaparak, uluslararası standart ısı konfor kriterleriyle karşılaştırılmasını ve çevresel parametrelerin peronlar ile dış ortam arasındaki ilişkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Yaz mevsiminde, farklı derinlik ve tasarım özelliklerine sahip iki istasyonun peron katında ölçümler yapılmıştır. Termal konfor değerlendirmesinde PMV modeli ve PPD indeksi kullanılmıştır. Sonuçlar, her iki istasyonda da sıcaklığın, geleneksel durağan hava konfor bölgelerinden oldukça uzak olduğunu ortaya koymuştur. Hava hareketinin 1,2 m/s seviyesinde olduğu ve kullanıcıların hava hızını yerel olarak kontrol edebildikleri durumda, en derin istasyonda yapılan ölçümlerin %20,3'ü üst sınırı

aşmamıştır. Ayrıca, en sığ derinliğe sahip istasyon peronundaki hava sıcaklığı değişiminin %64'ü dış ortam sıcaklığı sebebiyle oluşurken, bu oran en derin istasyonda %29 olmuştur. Yolcuların özellikle sığ istasyonda, perondan iklimlendirilmiş tren vagonlarına geçerken ya da tersi yönde ani hava sıcaklığı ve PMV değişimi yaşadıkları belirlenmiştir.

Ma ve diğ. [41], Çin'in soğuk bölgelerinde artan metro inşaatlarını dikkate alarak soğuk bölgelerde bulunan metro istasyonlarının ısı çevreleri ile ilgili analizler yapmışlardır. Bu bölgelerde kış aylarında ortalama sıcaklık -10°C 'den daha düşüktür. Bu çalışmada gerçek bir metro hattı IDA Tünel simülasyon yazılımı kullanılarak 1 boyutlu olarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca kontrol grubundaki tipik bir metro istasyonunun ısı çevresi için 2 geleneksel optimizasyon ölçümü ve 1 yeni metot araştırılmıştır. Çalışmalar kış aylarındaki ısı kaybının büyük oranda piston etkisi ile girişlerden gelen soğuk havadan kaynaklandığını göstermiştir. Araştırmada girişlere eklenecek hava perdesi veya kesit daraltmalarının çok verimli olmayacağı belirtilmiştir. Ek olarak, piston etkisi prensibini kullanan yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemle soğuk rüzgarın etkili bir şekilde önleneceği ve metro istasyonunun sıcaklığını iyileştirmek için tren frenleme enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılacağı belirtilmiştir.

Sinha ve Rajasekar [42], ajan bazlı modelleme yaklaşımı kullanarak New Delhi'de bulunan bir metro istasyonunun ısı konfor koşullarını değerlendirmişlerdir. Metro istasyonunun farklı bölgelerinin ısı özellikleri gerçek zamanlı saha ölçümleri ve anket yoluyla değerlendirilmiştir. Yolcuların maruz kalma süresi, metronun yoğun ve yoğun olmayan dönemlerinde yürüme hızı, süreç aktiviteleri için harcanan süre ve stokastik olaylar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ajan bazlı model, maruz kalma süresi, metabolik hızlar ve giysi yalıtımı dinamiklerini yakalamak için geliştirilmiştir. Isı konfor RWI indeksi kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen RWI değerleri yolcularla yapılan anketler kullanılarak doğrulanmıştır.

Pan ve diğ. [43], metrodaki ısı duyumları araştırmak için dinamik bir ısı konfor yöntemi kullanmışlardır. Saha çalışması, Mayıs 2016 ve Haziran-Temmuz 2017 tarihlerinde Pekin'de bulunan 2 metro istasyonunda ve toplamda 628 örnekle yürütülmüştür. Isı duyum ve ısı konfordaki değişimler analiz edilmiştir. Sonuçlar, metro yolcularının ısı duyumlarının tüm süreç boyunca sıcak-soğuk arasında önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Konkors ve peronda sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin

"Çin Metro Tasarım Kodu" (GB50157-2013) standardında belirtilen aralığın dışında olmasına karşın yolcular koşulları kabul edilebilir bulmuşlardır. Çalışma aynı zamanda metro yolcuları için konforlu bir ısı ortam yaratmak amacıyla havalandırma ve iklimlendirme sistemleri tasarımı ve işletimi için temel veriler sağlamaktadır.

Passi ve diğ. [44], yolcuların konfor algısını belirlemek için Chennai kentindeki metro istasyonu peronlarında ve trenlerde ısı konfor seviyelerini değerlendirmişlerdir. 7 farklı metro istasyonunda yaz ve kış mevsimlerinde saha ölçümleri yapılmıştır. Yolcuların ısı konforu çevresel parametreler ölçülerek ve anketler yapılarak araştırılmıştır. Sonuçlara göre metro peronlarındaki PPD aralığı %36,7-%98,8 iken, trenlerin içinde %12'den azdır. Bu, tren içi iklimlendirme sistemlerinin metro peronlarına kıyasla verimliliğini göstermektedir. Isıl konfor hesaplamaları ve yolcuların konfor algısı arasında iyi bir uyum bulunmuştur. İşletme sıcaklığı ile PPD arasında doğrusal ve çok güçlü bir pozitif korelasyon bulunmuştur. Metro istasyonlarının iç ve dış ısı koşulları arasında ilişki bulunamamıştır. Böylece, istasyonların işleyişi, metro trenlerinin işletilmesi ve yolcu yoğunluğunun yüksek olması gibi içsel faktörlerin iç ısı üretimine önemli katkısı olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki mevsimde de tüm metro istasyonlarındaki ısı koşulların ASHRAE 55 ve ISO 7730 yönergelerini aştığı görülmüştür. Isıl koşullara ve ASHRAE tavsiyelerine dayalı olarak, metro istasyonlarında PPD değerinin %40'a kadar makul bir ısı konfor ölçüsü olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir.

1.2.2 Acil durum yangın literatür araştırması

Metro hatlarında tünel veya istasyon bölgelerinde oluşacak bir yangın yolcular ve personel açısından ciddi sonuçlara yol açabilmektedir. Geçmişte farklı şehirlerde bulunan metro hatlarında birçok yangın felaketi yaşanmış ve bazı yangınlar ölüm ve yaralanmalara sebep olmuştur [45]. 1997 yılında Londra metrosu King Cross istasyonunda meydana gelen yangında 32 kişi hayatını kaybetmiştir [46]. 1995 yılında Bakü metrosu Ulduz ve Neriman Nerimanov metro istasyonları arasında çıkan yangında 289 kişi hayatını kaybetmiştir [47]. Yangın sonucu oluşan duman, zehirleyici olmasının yanında tahliye sürecinde görüş mesafesini azaltmakta ve ciddi yaralanmalara sebep olabilmektedir [48]. Yangın sonucu tünel veya istasyon bölgelerinde biriken dumanın dış ortama atılması için acil durum havalandırma sistemi tasarlanmalıdır. Acil durum havalandırma sistemi yardımıyla duman en kısa sürede dış

ortama atılmalı ve tahliye için uygun ortam şartları sağlanmalıdır. Acil durum havalandırma sistemi tasarlanırken en kritik durum istasyon veya tünel bölgelerinde oluşabilecek tren yangını olayıdır [49]. Dumanın toplanmasını önlemek ve sıcak dumanı istenen yönde harekete zorlamak için gerekli minimum hava hızına “kritik hız” denir [50]. Kritik hızın belirlenmesi için günümüzde farklı bağıntılar kullanılmakla birlikte yaygın olarak Kennedy denklemi tercih edilmektedir [51]. Bu bağıntılarda kritik hız genel olarak tünel geometrisine, yüksekliğine, kesit alanına, yangın yüküne, eğime, ortam sıcaklığına, hava yoğunluğuna, duman sıcaklığına ve havanın ısı kapasitesine göre değişim göstermektedir. Tünel yangınlarında acil durum havalandırma fan debilerinin belirlenmesi açısından kritik hızı doğru hesaplamak çok önemlidir. Kritik hız kavramının geçerli olmadığı, duman hareketlerinin 3 boyutlu olduğu istasyon yangınlarında ise, HAD analizleri ile duman hareketleri tespit edilmeye çalışılmaktadır [52].

Shi [53], metro istasyonlarında yangın sırasında yolcuların güvenli şekilde tahliyesi ve itfaiye erişiminin sağlanmasının, hem işletmeci hem de itfaiye ekipleri için büyük zorluk teşkil ettiğini ve yangın risk değerlendirmesi ile tahliye süreçlerinin incelenmesi gerektiğini belirtmiştir. Çalışmada metro istasyonlarındaki farklı yangın maddelere göre başlıca risk kaynakları analiz edilmiştir. Yangın senaryolarının aşamalarına göre metro istasyonları için bir yangın risk değerlendirme sistemi yapısı oluşturulmuş ve çok katmanlı bir değerlendirme modeli geliştirilerek yangın risk değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, Jishuitan metro istasyonundaki her yangın aşaması için güvenliği etkileyen risk unsurlarına göre yangın risk seviyeleri belirlenmiş ve her bir aşama için risk seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca hidrolik modele dayalı ampirik formüller ve Simulex yazılımı kullanılarak, peron yangını ve araç yangını gibi senaryolarda gerekli güvenli tahliye süresi hesaplanmıştır. Bu değerler, FDS (Fire Dynamics Simulator) yazılımı ile simüle edilen mevcut güvenli tahliye süresi ile karşılaştırılmış ve Jishuitan istasyonunun yangın anında tahliye açısından yüksek emniyet seviyesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak, mevcut istasyon durumuna göre değerlendirmedeki bazı zayıf noktalar için öneriler sunulmuştur.

Zhao [54], sayısal simülasyonların düşük maliyet, hız ve detaylı bilgi sağlama özellikleriyle öne çıktığını belirtmiştir. Uygun türbülans modeli seçiminin, başarılı mesh oluşturulmasının ve makul yakınsama kriterlerinin hesaplamaların doğruluğu

açısından kritik olduğunu ifade etmiştir. HAD analizi sonuçlarının uygulama öncesi doğrulanması gerektiği belirtilmiştir. Yangın hadisesi için sahada ölçüm muhtemel olmamaktadır. Bu sebeple modeller kullanılmaktadır. Bu çalışmada model üzerinde deneyler yapılarak hesaplama sonuçları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Araştırmalarda ölümlerin genelde zehirli gazlar ve sıcak dumandan olduğu belirlenmiştir. Çalışmada yanma ürünleri arasında en zehirli olan karbon monoksitin yoğunluk alanı çözülmüştür. Buna hız ve sıcaklık verileri de eklenerek farklı duman kontrol tabloları elde edilmiş ve emniyet sisteminin performansı değerlendirilmiştir.

Musluoğlu [55], trenlerde yangın gelişimini ve yayılımını FDS yazılımını kullanarak yaptığı simülasyonlarla incelemiştir. Tren yapısı ve geometrisinin, tren içerisindeki yangın gelişimi ve duman yayılımı üzerindeki etkisini incelemek üzere birbirinden fiziksel olarak ayrılan veya ayrılmayan vagonlardan oluşan iki farklı tren modeli oluşturulmuştur. Simülasyonlarda, düşük güce sahip bir kundaklama ve yüksek güce sahip bir bagaj yangını olmak üzere iki farklı ateşleme kaynağı kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda, tünelin geometrisi, havalandırma ve yolcu tahliyesi stratejileri ve yanıcı madde özellikleri gibi birçok değişkenin yangın gelişimi üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen tren içerisindeki yangının yayılma alanı ve ortaya çıkan ısı güç değerleri raporlanmıştır. FDS yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar farklı simülasyon programları ile karşılaştırılıp doğrulanmıştır.

Roh ve diğ. [56], metrolarda tren yangını olayında PAKS ve havalandırmanın sistemlerinin can güvenliği üzerindeki etkisini belirlemek için yangın ve yolcu tahliye simülasyonları yapmışlardır. Yangın sırasında duman yayılımını ve güvenli tahliye süresini belirlemek için FDS kodu kullanılmıştır. Tren yangını nedeniyle metro istasyonunun tahliyesi, tahliye için gereken süreyi ve yoğunluğun bir fonksiyonu olarak seyahat hızını belirlemek için simüle edilmiştir. Simülasyonlar sonucunda PAKS ve havalandırma sistemi bulunan perondaki yolcuların, PAKS ve havalandırma sistemi bulunmayan duruma kıyasla yaklaşık 350 s daha fazla kullanılabilir zamana sahip olduğu görülmüştür. Metro turnikelerinin çıkışlara doğru çalışmadığı durumlarda tahliye için gereken sürenin önemli ölçüde arttığı ve tren yangınında yolcuların can güvenliğini tehlikeye attığı belirlenmiştir.

Meng ve diğ. [57], bir metro istasyonunda tren yangını durumunda farklı havalandırma modlarının etkinliğini araştırmak üzere FDS yazılımı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Tam boy üstü kapalı veya yarım boy PAKS bulunan metro

istasyonları için çeşitli havalandırma modlarının performansını karşılaştırmak amacıyla sıcaklık ve görüş mesafesi dağılımları hesaplanmıştır. Sonuçlar, hava besleme sisteminin uygun şekilde çalıştırılmasının duman kontrolünde havalandırma sisteminin etkinliğini artırabileceğini, aksi durumda ise verimliliğin azalacağını göstermiştir. En iyi sonuç, konkors hava besleme sisteminin aktif hale getirilmesi ve peron hava besleme sisteminin kapatılmasıyla elde edilmiştir. Duman egzoz sistemlerinden, peron egzoz sistemi ile hat üstü egzoz sisteminin çalıştırılması ve peron altı egzoz sisteminin devre dışı bırakılması önerilmiştir. Tam boy üstü kapalı PAKS olan istasyonlar için önerilen havalandırma modu optimizasyon stratejisi, yarım boy PAKS içinde olumlu sonuç vermiştir.

Weng ve diğ. [58], tam ölçekli modelde deneyler yapmışlardır. Bu modeller metro hattının bir bölümüdür ve tünelinin bir tarafı metro istasyonuna diğer tarafı da dış ortama bağlanmaktadır. Deneylerde 1,35 MW, 3 MW ve 3,8 MW ısı açığa çıkartan havuz tipi yangınlar üretilmiştir. Tünel boyunca tavan altında sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Aynı zamanda aynı sınır şartları için FDS yazılımı kullanılarak HAD analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda ölçüm ve simülasyon sonuçlarının örtüştüğü belirlenmiştir.

Zhang ve diğ. [59], bir metro istasyonunda güvenli tahliye için duman kontrolü üzerindeki egzoz hızının etkisini analiz edilerek en uygun egzoz hızını belirlemişlerdir. Metro peron yangınında duman egzoz sisteminin etkisini değerlendirmek amacıyla tam ölçekli deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, duman kontrol etkisi FDS yazılımı ile sayısal olarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak uygun parametreler doğrulanmıştır. Çalışmada, peron yangınında damperlerdeki en uygun egzoz hızının yaklaşık 8 m/s olduğu bulunmuştur.

Meng ve diğ. [60], bir trenin yangın nedeniyle metro istasyonunda durması durumunda tünel tavanının altındaki duman akış sıcaklığını incelemişlerdir. Deneyler, tam boy üstü kapalı PAKS ve tam boy üstü açık PAKS için, tünel tavanı altındaki maksimum duman sıcaklığı ve boyuna sıcaklık dağılımını incelemek için küçültülmüş ölçekli (1:10) bir metro istasyonu modelinde yapılmıştır. Tünel tavanı altındaki maksimum sıcaklık için, tam boy üstü kapalı PAKS ve tam boy üstü açık PAKS için sırasıyla 3,65 ve 2,92 güç yasası fonksiyonlarıyla, ısı salınım hızı ile boyutsuz bir şekilde iyi korelasyon sağlandığı bulunmuştur. Tünel tavanı boyunca uzunlamasına sıcaklık dağılımı için, her iki senaryo için de iyi bir korelasyon elde edilmiştir. Tam boy üstü

açık PAKS olduğunda maksimum sıcaklık daha düşük bulunmuş ve boyuna sıcaklık daha hızlı bir şekilde düşmüştür. Bunun nedeni, tam boy üstü açık PAKS olduğunda tünel tavanının etkili genişliğinin artması ve bu sayede duman akışından tavana daha fazla ısı kaybı olması olarak açıklanmıştır.

Liu ve diğ. [61], metro istasyonu içindeki yangında tavan sıcaklığı, duman tabakası kalınlığı ve sıcaklık dağılımını incelemek amacıyla tam ölçekli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yangın kaynağı merdiven yakınında konumlandığında, duman egzoz sistemi ile merdivenlerdeki hava akış hızının duman akışı üzerindeki etkisi, bir dizi FDS sayısal simülasyonu ile araştırılmıştır. Tam ölçekli deneyler sonucu sprinkler sisteminin devreye girmesi halinde sıcaklık artışının sınırlanabildiği görülmüştür. Aynı zamanda, mekanik duman egzoz sisteminin çalıştırılması durumunda duman yayılımının etkili şekilde kontrol altına alınabileceği kanıtlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, duman ilk aşamada hızla peron katına yayılmış, egzoz sistemi bulunmadığı durumda daha sonra merdiven boşluklarına girmiştir. Egzoz ve hava besleme sistemleri çalışıyor olsa dahi, girişte aşağı yönlü hava akışı yoksa dumanın merdivenler boyunca yayılabileceği belirlenmiştir. Aşağı yönlü hava akışı mevcut ise, duman egzoz sistemi devre dışı olduğunda dumanın yine de etkili biçimde uzaklaştırılmadığı görülmüştür.

Long ve diğ. [62], çift ada perona sahip bir metro istasyonunda duman hareketi ve kontrolü ile ilgili tam ölçekli yangın deneyleri gerçekleştirmişlerdir. İstasyonda, hem konkors hem de peron katında olmak üzere dört farklı yangın senaryosu tasarlanmış ve yolculu alanlara çok sayıda termokupl yerleştirilmiştir. Araştırmada analiz edilen temel yangın parametreleri arasında dikey sıcaklık dağılımı, boyuna sıcaklık dağılımı, duman tabakası yüksekliği ve duman varış zamanı yer almıştır. Ayrıca, acil durum egzoz sisteminin etkinliği de değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, farklı yangın senaryolarında duman akışı farklılık göstermiştir. Doğal havalandırma altında, yangın kaynağına yakın maksimum sıcaklık artışı konkors yangın senaryosunda 18 °C, peron yangın senaryosunda ise 21 °C olarak gözlemlenmiştir. Sıcaklık, yangın noktasından uzaklaştıkça boyuna yönde kademeli olarak azalmıştır. Ayrıca, duman tabakası yüksekliği konkors yangınında 4,0 m, peron yangınında ise 2,8 m'yi aşmıştır. İstasyon B ucundaki egzoz sistemi devreye alındıktan sonra, duman tabakası yüksekliğinde artış ve sıcaklık artışında azalma olduğu görülmüştür. Dumanın yayılma hızı ise yangın yeri ve havalandırma koşullarına bağlı olarak değişmiştir. Deneysel verilere

göre, duman yayılma hızı konkorsta 0,11–0,18 m/s, peronda ise 0,21–0,35 m/s olarak belirlenmiştir.

Li ve diğ. [63], duman egzoz sisteminin etkisini analiz etmek amacıyla 1:20 ölçekli bir çapraz tip metro aktarma istasyonu modelinde bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Tam ölçekli aktarma istasyonunda uygulanan farklı mekanik duman kontrol stratejilerini değerlendirmek için FDS kodu kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve istasyon peronundaki hava sıcaklığı dağılımına ilişkin deneysel verilerin simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğunu görülmüştür. Araştırma, farklı duman kontrol sistemlerinin, Pekin'deki 10 numaralı hattın peronunda meydana gelen bir yangının oluşturduğu dumanın sınırlandırılması üzerinde farklı etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Aynı duman kontrol stratejisi altında, aktarma istasyonundaki merdivenlerde hava hızı tam boy PAKS olduğunda yarım boy PAKS olması durumuna göre daha yüksek bulunmuştur.

Qiu ve diğ. [64], duman yayılımını incelemek amacıyla bir metro istasyonu tüneline tam ölçekli yangın deneyleri gerçekleştirmiş ve üç tipik havalandırma koşulu tasarlamışlardır. PAKS açık konumdayken, yakıt haznesi tünelin ortasına yerleştirilmiş ve sıcaklık profili, sahada yerleştirilen bir dizi termokupl ile ölçülmüştür. Dikey sıcaklık dağılımı, boyuna sıcaklık dağılımı ve duman tabakası yüksekliği, ölçülen veriler temelinde analiz edilmiştir. Sonuçlar, yangın kaynaklı duman yayılımının boyuna hava akışı tarafından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Doğal havalandırma altında, yangın bölgesine yakın sıcaklıklar görece düşüktür ve duman tabakası yüksekliği mesafeye göre fazla değişiklik göstermemiştir. Mekanik havalandırma altında ise, hat üstü egzoz sistemi etkinleştirilmiş ve tünel havalandırma fanı sisteminin modu değiştirilmiştir. Tünel havalandırma sistemi, A ucundan taze hava verip B ucundan egzoz modundayken, duman $X = -38,5$ ile $-5,5$ m arasında dağılım göstermiştir. $X = -38,5$ m konumunda duman tabakası yüksekliği yaklaşık 2 m olup tahliyeyi etkilemiştir. Tünel havalandırma sistemi her iki uçta egzoz modundayken, duman tüneline her iki ucunda toplanmış ve duman tabakası yüksekliği 4,7 m olmuştur. Bu nedenle, üçüncü havalandırma koşulu, daha stabil duman tabakası ve daha düşük sıcaklık sağlaması nedeniyle en iyi performansı göstermiştir.

Xu ve diğ. [65], metro istasyonlarındaki peron ve atriyum tavan yüksekliğinin mekanik duman egzoz sistemleriyle duman kontrolü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla üç tam ölçekli deney ve bir dizi sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Duman sıcaklığı

değişimi, maksimum sıcaklık dağılımı ve duman tabakalaşması ele alınmıştır. Sonuçlar, atriyumun özellikle duman yayılımının erken aşamasında dumanı depolama kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Peron ve atriyum tavan yüksekliğindeki artış duman egzoz verimliliğini düşürmüş ve etkili bir duman egzoz hızına ulaşmak dumanın uzaklaştırılması açısından kritik öneme sahip olmuştur. Sayısal simülasyonla en uygun duman egzoz hızı araştırılmış ve daha yüksek perona sahip metro istasyonlarında bu optimal hız altında duman yayılım alanının belirgin şekilde daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, metro peron yüksekliğiyle ilişkili olarak optimal duman egzoz hızını öngören bir tahmin modeli önerilmiştir.

Chen ve diğ. [66], sayısal simülasyon çalışmalarıyla yan havalandırmanın metro istasyonlarındaki uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Hem menfezlerin havalandırma kanallarının alt kısmında bulunduğu geleneksel havalandırma sistemi hem de menfezlerin yanlarda olduğu önerilen yan havalandırma sistemi çalışılmış ve karşılaştırılmıştır. Sıcaklık, karbonmonoksit konsantrasyonu ve duman tabakası yüksekliği gibi parametreler, farklı havalandırma planlarının duman kontrol etkisini niteliksel olarak incelemek için kullanılmıştır. Havalandırma verimliliği ve fraksiyonel etkili doz gibi parametreler ise farklı havalandırma planlarının performansını sayısal olarak modellemek için kullanılmıştır. Simüle edilen tüm senaryo gruplarında, yan havalandırma planında daha iyi duman kontrolü performansı, daha yüksek havalandırma verimliliği ve daha düşük fraksiyonel etkili doz değeri elde edilmiştir.

Liu ve diğ. [67], metro peronunda yangın meydana geldiğinde dumanı kontrol etmek için kullanılan pasif bir yöntem olan duman perdelerinin kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada dumanın peron katından konkors katına yayılmasını önlemek için gereken en uygun duman perdesi derinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda tam ölçekli bir deney gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, kullanılan hesaplamalı uygulamaların doğruluğunu teyit etmiştir. Ayrıca, kuramsal analizle birlikte daha fazla sayısal hesaplama yapılmış; yangının ısı salınım hızı ile duman egzoz hacminin, peron tavanındaki duman tabakası kalınlığı üzerindeki etkisi detaylı biçimde incelenmiştir. Farklı modeller kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, ısı salınım hızı ve duman egzoz hacminin bir fonksiyonu olarak minimum duman perdesi derinliğini ortaya koymuştur.

Lan ve diğ. [68], baca etkisinin duman yayılımı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla 1:8 ölçekli bir metro istasyonu modelinde 3 boyutlu sayısal simülasyonlar

gerçekleştirilmişlerdir. Duman yayılım davranışı üzerindeki şaft kesit alanı, yangın yeri ve şaft yüksekliğinin etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, baca etkisinin duman hareketi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Sol ve sağ şaftların yükseklikleri 1 m olduğunda ve yangın holün ortasında konumlandığında, küçük kesit alanının büyük alana oranı 0,4 veya daha fazla olduğunda, duman küçük kesitli şafttan tahliye olduğu; aksi halde büyük kesitli şafttan çıktığı görülmüştür. İki şaftın kesit alanları eşit ve yükseklikleri 1 m veya daha fazla olduğunda, duman yangına daha yakın olan şafttan tahliye olmuştur. İki şaftın yüksekliği 1 metreden az olduğunda ise, hem sol hem sağ şaftlardan aynı anda yukarı yönlü duman ve aşağı yönlü hava akışı gerçekleşmiştir. Kararlı akış aşamasında baca etkisi, kesit alanının azalması ve şaft yüksekliğinin artmasıyla birlikte artmış ve yangın yerinin değişiminden etkilenmemiştir.

Long ve Zhong [69], büyük bir metro istasyonunda ısı salınım hızı ve yangın yerlerini değiştirerek, tavan sıcaklık profillerini araştırmak için deneyler ve sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Deneysel verilerin tekrarlanabilirliği doğrulanmış ve sayısal model ölçüm verileriyle doğrulanmıştır. Büyük bir alanda yangın meydana geldiğinde, tavanın altındaki duman hareketi, radyal ve tek boyutlu akış olarak ikiye ayrılmış ve bu akışların tahmin modelleri, yangın kaynağının merkezde olduğu durum için önerilmiştir. Bu temel üzerine, radyal sıcaklık profilinin yangın kaynağının konumundan bağımsız olduğu bulunmuştur. Öte yandan, tek boyutlu sıcaklık dağılımı modeli, yangın yerinin etkisi dikkate alınarak düzeltilmiştir.

Chen ve diğ. [70], metro istasyonlarında duman egzoz menfezlerinin etki aralığını incelemiş ve güvenli tahliye yolları oluşturmak için duman egzoz sisteminden nasıl yararlanılabileceğine dair bir strateji geliştirmişlerdir. Çalışmada anlık ve kümülatif çevre iyileştirme etkisini nicelleştirmek için boyutsuz sıcaklık oranı ve fraksiyonel etkili doz oranı önerilmiştir. Önerilen yöntemin ve boyutsuz parametrelerin, özellikle düşük duman yoğunluğuna sahip tahliye alanlarında duman egzoz menfezinin etki alanı ve yoğunluğunu tahmin etmede başarılı olduğu görülmüştür. Bir duman egzoz menfezinin etki alanı, ısı salınım hızı, menfez uzunluğu ve duman egzoz hızı gibi çalışılan parametreler göz önünde bulundurulduğunda, boyuna 2 m - 4 m ve enine -3 m - 3 m arasında bulunmuştur. Yangın ölçeğinin küçülmesi ve duman egzoz hacminin artması, menfez etki alanı içinde çevre iyileştirme etkisini hafifçe artırmıştır. Önerilen bölgesel yoğunlaştırılmış menfez planı, merdiven ile çıkış arasındaki rotada 5 m

aralıklarla, konkors zemininde kesintisiz bir tahliye kanalı oluşturarak fraksiyonel etkili doz değeriinde % 20'den fazla azalma sağlamıştır.

1.3 Hipotez

İstanbul'daki metro istasyonları gerek derinlik ve gerekse yolcu yoğunluğu açısından yurt dışındaki emsalleri ile farklılıklar göstermektedir. Şehrin topografik yapısından dolayı İstanbul'daki metro istasyonları çoğunlukla derin olmaktadır.

Metro istasyonları farklı yapım metotlarıyla inşa edilebilmektedir. Hangi metodun kullanılacağına istasyonun derinliği, yüzeyde yeterli inşaat alanın olup-olmaması, kamulaştırma maliyetleri, yapım maliyetleri ve yapım hızı gibi parametreler dikkate alınarak karar verilmektedir. Ancak istasyon tipinin ısı konfor ve acil durum açısından etkisi de göz ardı edilmemelidir. Çalışma kapsamında farklı tip 2 istasyon, saha ölçümleri ve RWI hesaplamaları yapılarak ısı konfor, HAD analizleri yapılarak acil durum açısından değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Literatürde farklı tip metro istasyonları için gerek ısı konfor gerekse acil durum açısından böyle bir karşılaştırma bulunmamaktadır.

Literatür incelendiğinde metro istasyonlarında ısı konfor çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen saha ölçümlerinin çok kısıtlı olduğu görülmektedir. Isı konfor araştırmalarında istasyonlarda birkaç noktada saatlik veya günlük ölçümler yapılarak tüm mevsim için yorumlar yapılmıştır. Sınırlı veri kullanılarak tüm mevsimin yorumlanması doğru bir yaklaşım değildir ve hatalara sebep olabilmektedir. İstasyonlarda ısı konfor şartları yorumlanırken sefer sıklığı (headway), tren konfigürasyonu, farklı saatlerdeki yolcu yoğunlukları, istasyon içinde farklı bölgelerdeki yolcu dağılımları ve dış hava şartları önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde 9 ay boyunca her gün 24 saat süreyle Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 19 noktada ve Gayrettepe istasyonunda 17 noktada eşzamanlı olarak sıcaklık ve bağıl nem ölçümü yapılmış ve veriler dakikalık olarak kaydedilmiştir. RWI hesaplamalarında kullanılmak üzere İstasyonların peron ve konkors katlarında hava hızı ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca saha ölçümleri süresince istasyonlara yakın bir konumda bulunan meteorolojik hava ölçüm istasyonundan dış hava ile ilgili veriler temin edilmiş ve istasyon içi verilerle birlikte yorumlanmıştır.

Acil durum yangın çalışmaları kapsamında istasyonlar geometrik olarak birebir ölçekli şekilde modellenmiş ve farklı yangın yüklerinin farklı istasyon tipinde oluşturduğu etkiler HAD analizleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Analizlerde trenin orta kısmındaki bir vagona yangın olduğu varsayılmış ve istasyonun her iki ucunda yer alan tünel havalandırma fanları ve ihtiyaç halinde peron altı egzoz fanları devreye alınmıştır. Alternatif senaryolar kapsamında, tünel havalandırma fanları bir taraftan basma diğer taraftan egzoz yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Bu çalışmanın diğer amacı; mevcut istasyonların güvenli tahliye açısından performansını değerlendirerek planlanan metro hatları için acil durum havalandırma senaryolarının oluşturulmasına altlık sağlamaktır. Analizler kapsamında tren yangın yükü, fan kapasitesi ve çalışma senaryolarının (egzoz-egzoz veya basma-egzoz) etkinliği değerlendirilmiştir. Oluşturulan farklı senaryolarla işletme aşamasında sorun oluşmaması adına tasarımlarda kullanılan yangın yükü değerinin gerçek durumla uyumlu olması gerektiği ortaya konulmuştur. Özelikle aç-kapa istasyon tipi için mimari tasarımda alınacak pasif yangın koruma tedbirlerinin tren yangını sonrası oluşan sıcak hava ve dumanın konkors katına ilerlemesini engelleyebildiği gösterilmiştir.

Bu tezin gerçekleştirilmesi ile metro istasyonlarının yolcular açısından daha konforlu ve emniyetli olacak şekilde tasarlanması hedeflenmiştir. Ayrıca yapılacak doğru tasarımlarla acil durum havalandırma fan kapasitelerinde, teknik alan boyutlarında ve ilk yatırım/işletme maliyetlerinde azalma gerçekleşecektir.



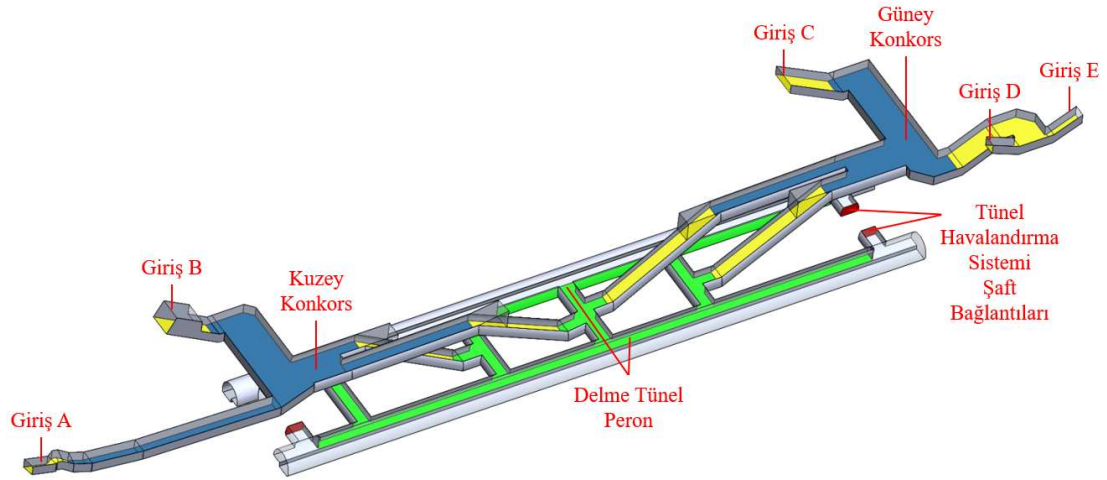
Tez çalışması kapsamında M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattında bulunan, farklı yapım teknikleriyle inşa edilmiş Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe metro istasyonları seçilmiş ve bu istasyonlarda saha ölçümleri ve HAD analizleri yapılmıştır. Seçilen 2 istasyon art arda bulunmaktadır ve aralarında 1,6 km mesafe vardır. İstasyonlar benzer yolcu yoğunluğu ve dış iklim şartlarına sahiptir. HAD analizleri için, istasyonların ve hat tünellerinin 3 boyutlu lazer tarama yöntemi ile elde edilen nokta bulutu verisi kullanılarak gerçekte uyumlu mimari modelleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan istasyon nokta bulutu verisi, 2 boyutlu çizimler, yolculuk sayıları, tren özellikleri vb. metro hattıyla ilgili gerekli tüm veriler işletmeci firma tarafından sağlanmıştır.

2.1 Şişli-Mecidiyeköy İstasyonu

Şişli-Mecidiyeköy istasyonu, peron katı olarak delme tünel konkors katı olarak ise aç-kapa metodu ile inşa edilmiştir. İstasyon peronu yüzeyden 28 m derinliğindedir ve 5 adet giriş-çıkışı vardır. İstasyon kuzey ve güney olmak üzere 2 konkors yapısına sahiptir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonu fotoğrafları Şekil 2.2’de, 3 boyutlu lazer tarama yöntemi ile elde edilen nokta bulutu verisi kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu istasyon modeli Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



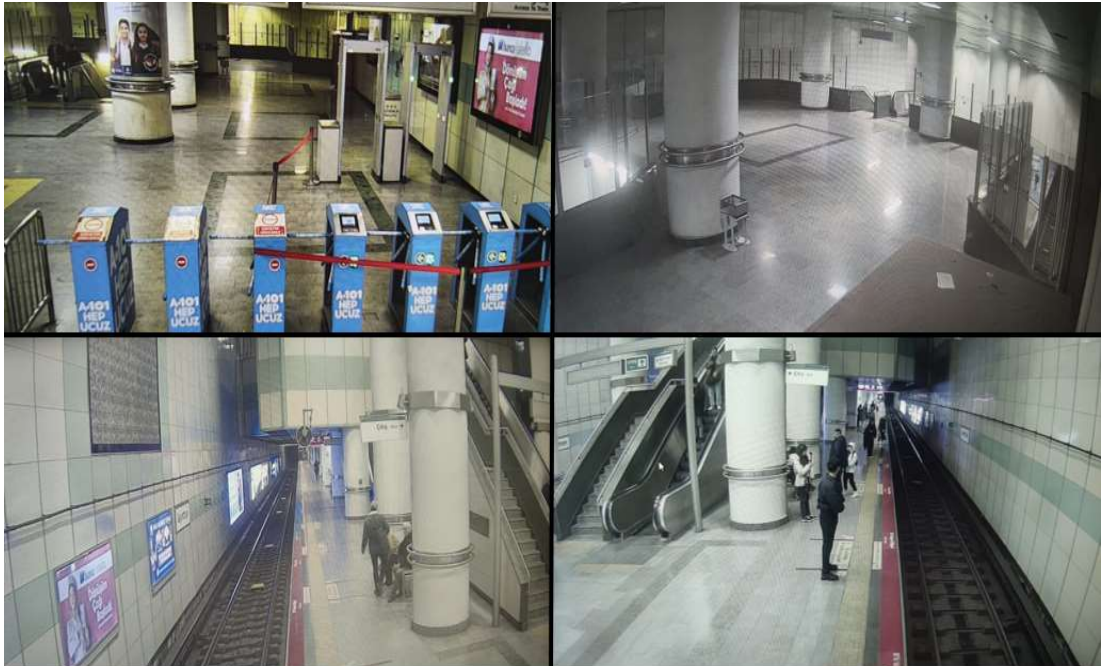
Şekil 2.2 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu fotoğrafları



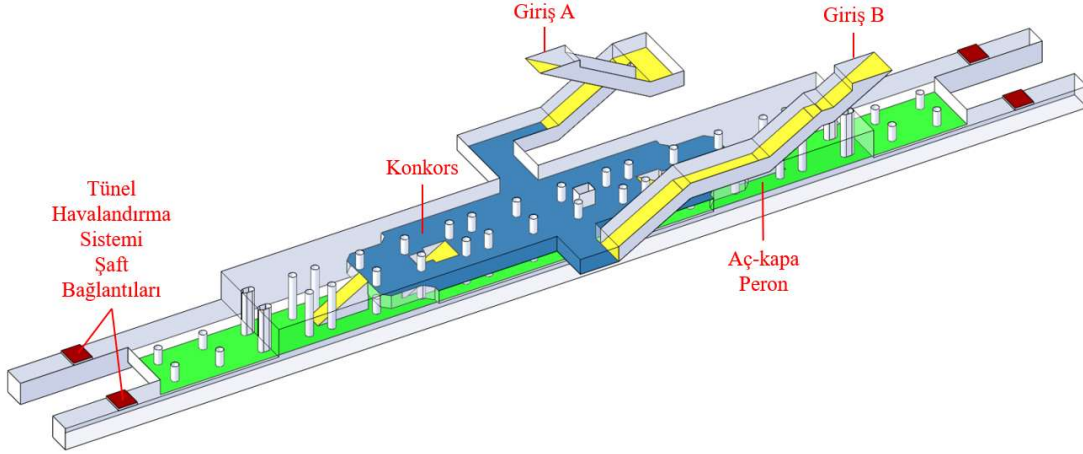
Şekil 2.3 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu modeli

2.2 Gayrettepe İstasyonu

Gayrettepe istasyonunun tamamı aç-kapa metoduyla inşa edilmiştir. İstasyon peronu yüzeyden 25 m derinliğindedir ve 2 adet giriş-çıkışı vardır. İstasyonda 1 adet konkors yapısı vardır. Konkors katının uç kısımları duvar vb. bölücü ile kapatılmamış olup aşağıya bakıldığında peron, tren ve hatlar rahatlıkla görülebilmektedir. Gayrettepe istasyonunu fotoğrafları Şekil 2.4'te, 3 boyutlu lazer tarama yöntemi ile elde edilen nokta bulutu verisi kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu istasyon modeli Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



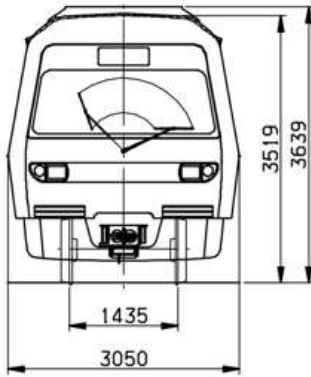
Şekil 2.4 : Gayrettepe istasyonu fotoğrafları



Şekil 2.5 : Gayrettepe istasyonu modeli

2.3 Tren

M2 metro hattında 8 ve 4 vagonlu trenlerin karma işletmesi söz konusudur. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde 8 vagonlu trenler kullanılmıştır. Hatta kullanılan Rotem marka trenin ön kısmına ait görseller Şekil 2.6’da gösterilmiştir. 8 vagonlu tren özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [71].



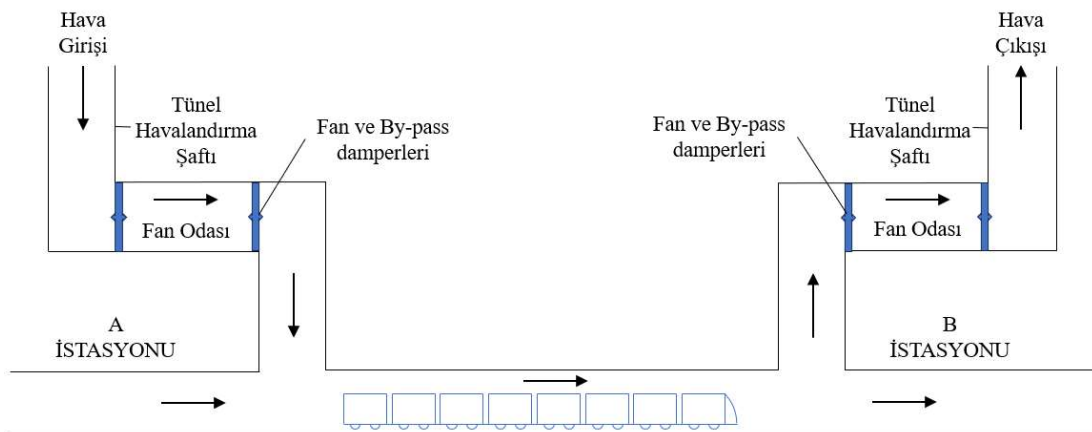
Şekil 2.6 : Tren ön görünümü

Çizelge 2.1 : Tren Özellikleri

Parametre	Birim	Değer
Uzunluk	m	173
Genişlik	m	3,05
Yükseklik	m	3,64
Ön Yüzey Alanı	m ²	10,73
Maksimum Hız	km/h	80
Hızlanma İvmesi	m/s ²	1,1
Frenleme İvmesi	m/s ²	1,1
Acil Frenleme İvmesi	m/s ²	1,1
3. Ray Gerilimi	V	750
Klima Soğutma Gücü	kW	448

2.4 M2 Metro Hattı Havalandırma Sistemleri

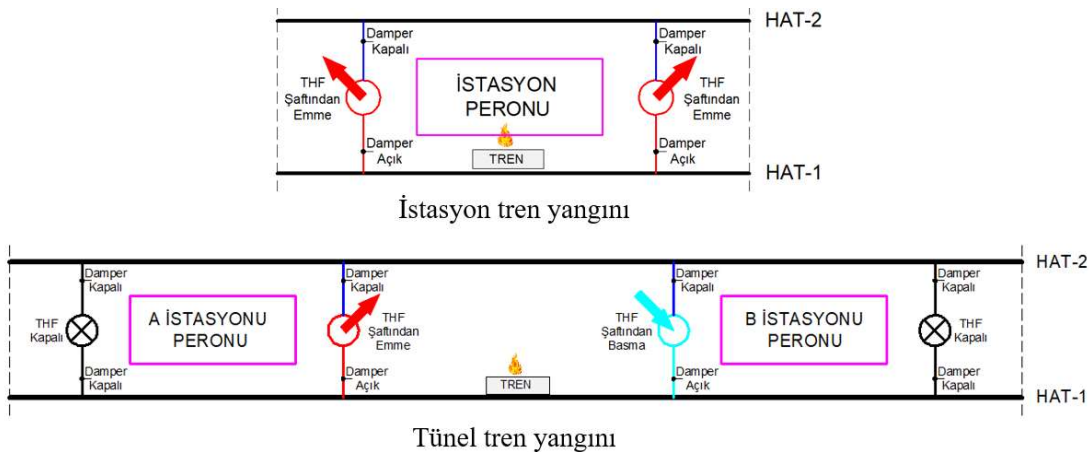
Metro hatlarında havalandırma sistemleri doğal ve cebri olarak iki başlıkta değerlendirilmektedir. Doğal havalandırma tünel içerisinde tren hareketi ile oluşan hava akışı sonucu meydana gelmektedir ve bu hadise piston etkisi olarak isimlendirilmektedir. Tren hareket yönü doğrultusunda, aynı silindir içerisinde doğrusal hareket eden piston gibi, havayı tünel boyunca iterken trenin arka tarafında oluşan düşük basınç sonucu meydana gelen vakum ile de yine hava hareket yönünde çekilir. Tren hareketleri ile oluşan bu doğal hava akışı herhangi bir cebri havalandırma sistemi çalışmadan tünel ve istasyonlar için gerekli taze hava ve soğutmaya katkı sağlayabilmektedir. Hattın derinliği, tren kesit alanı ile tünel kesit alanı arasındaki fark, tren hızı, işletme sıklığı, istasyon mimari tasarımı ve piston şaftlarının özellikleri piston etkisinin verimliliğini etkilemektedir. Tam boy PAKS olmayan istasyonlarda yolcular tren istasyona gelirken ve istasyondan ayrılırken oluşan hava hareketini rahatlıkla hissedebilmektedirler. Piston etkisiyle oluşan doğal havalandırmaya ait şematik görünüm Şekil 2.7’de gösterilmiştir. İşletme devam ederken tünel havalandırma fan damperleri kapalı, by-pass damperleri açık konumdadır ve bu sayede piston etkisiyle oluşan hava akışı şaftlardan içeriye veya dışarıya doğru hareket eder. Tünel havalandırma fanları devreye gireceği zaman fan damperleri açılır ve by-pass damperleri kapanır. M2 metro hattında ilgili damperler pnömatrik sistemle kontrol edilmekle birlikte yeni hatlarda yaygın olarak elektrik motorlu damperler kullanılmaktadır. Piston etkisiyle oluşan hava akışının minimum direnç ile karşılaşarak dış ortama ulaşması ve bu sayede doğal havalandırma verimliliğinin artması amacıyla, sunulan şematik görünümünden farklı olarak havanın fan odasından geçmediği veya bağımsız piston şaftı olan tasarımlar da yapılmaktadır.



Şekil 2.7 : Doğal havalandırma şematik görünümü

M2 metro hattı istasyonlarında yolculu alanlara hitap eden 3 farklı cebri havalandırma sistemi vardır. İstasyonların kuzey ve güney bölgelerinde ikişer adet tünel havalandırma, egzoz ve taze hava fanları bulunmaktadır. Tünel havalandırma fanları tünel/istasyon bölgelerinde oluşabilecek sıcaklık artışı ve tren yangını olaylarına karşı kullanılmaktadır. Tünel havalandırma fanları oluşturulan senaryolara göre egzoz veya basma modunda çalıştırılmaktadır ve minimum 250 °C'ye 1 saat dayanım sağlayacak özelliktedir. Tünel havalandırma fanları sistemde bulunan damperler yardımıyla Hat-1 veya Hat-2 ye yönlendirilebilmektedir. İstasyonda acil durum yangın senaryolarında tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırılarak oluşan negatif basınç etkisiyle yüzeye açılan merdivenlerden taze hava girişi sağlanmaktadır. Bu sayede sıcaklık ve dumanın bilet holü katına sirayet etmesi engellenmeye/geciktirilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca yolcuların yüzeyden gelen temiz havayı hissederek tahliye güzergahına yönlennmeleri de sağlanmaktadır. Tünel tren yangınlarında ise sıcak hava ve dumanın bir yönden dışarı atılıp yolcuların da diğer yönden tahliye edilmeleri kurgulandığı için tünelin bir ucundaki fanlar egzoz diğer ucundaki fanlar basma modunda çalıştırılmaktadır. Yangının tüneldeki konumuna ve hangi vagona olduğuna göre duman ve yolcu tahliye yönlerine karar verilip ilgili senaryo manuel olarak çalıştırılmaktadır. Tünel havalandırma sisteminin istasyon ve tünel tren yangın senaryolarında çalışma prensibini anlatan şematik görünüm Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Egzoz fanları istasyondaki kirli ve sıcak havanın dışarı atılması için kullanılmakla birlikte peron ve konkors katlarında meydana gelebilecek bavul yangınında ortaya çıkacak dumanın tahliyesi içinde kullanılmaktadır. Egzoz fanları kullanılarak peron altından, peron tavanından ve konkors tavanından egzoz yapılabilir. Taze hava fanları kullanılarak peron ve/veya konkors tavanından üfleme yapılabilir.



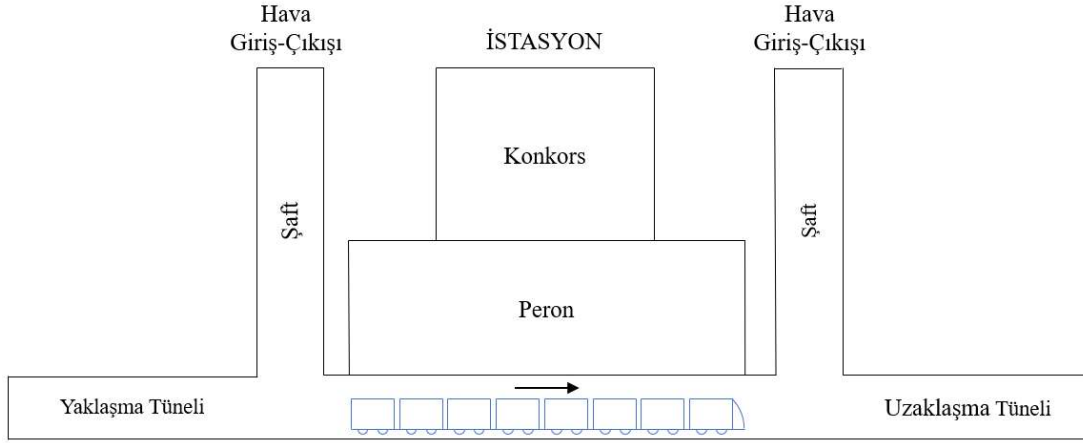
Şekil 2.8 : Tünel havalandırma sistemi çalışma prensibi

Cebri havalandırma sistemlerinin kontrolü peron ve konkors bölgelerine yerleştirilen ve belli değerlere set edilen sıcaklık sensörleri vasıtasıyla yapılmaktadır. Peron ve konkors katları için “yüksek” ve “aşırı yüksek” olmak üzere 2 farklı sıcaklık set değeri girilmektedir. İlk set değeri aşılsa egzoz fanları çalışarak peron ve konkors katlarından egzoz yapılmaktadır. Bu durumda tamamlama havası tünellerden ve istasyon yolcu girişlerinden gelmektedir. Eğer sıcaklık ikinci set değerini de aşarsa, bu sefer ilgili bölgeye taze hava fanları ile ayrıca taze hava beslemesi yapılmaktadır. Bu şekilde daha hızlı bir hava sirkülasyonu sağlanarak istasyon sıcaklığının düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu senaryo dış hava sıcaklığının istasyon sıcaklığını aşmadığı durumlar için geçerlidir. Konkors katında aynı anda taze hava beslemesi ve egzoz yapılabilmesi için tavanda ayrı ayrı kanal tesisatı vardır. Peron katında ise taze hava ve egzoz fanları aynı kanal tesisatına bağlanmıştır ve tavandan aynı anda sadece taze hava beslemesi veya egzoz yapılabilir. Normal işletme senaryosunda sensör ikinci set değerinin aşılmasıyla egzoz fanları için peron üstü damperler kapanır ve peron altı damperler açılır. Böylece peron tavanından hava beslemesi yapılırken, peron altından da egzoz yapılır. Bu şekilde tavandan besleme ve peron altından egzoz yapılması perondaki hava kalitesini artırmaktadır. Çünkü oluşturulan havalandırma kurgusuyla tünel içinden piston etkisiyle taşınan demir tozları vb. havadan ağır kirletici partiküller insanların soluma yüksekliğine çıkmadan peron altından emilmektedir. Aynı zamanda dış ortamdan alınan taze hava filtrelenerek ortama verilmektedir. İstasyonlarda yolculu alanlar için herhangi bir iklimlendirme sistemi bulunmamaktadır.

2.5 Metro İstasyon Modülü

Metro istasyonları aerodinamik ve termodinamik olarak hat tünelleri ve tünel havalandırma şaftlarıyla doğrudan etkileşim halindedir. Tren hareketiyle oluşan piston etkisi, tünel içindeki hava akışını ve basınç değişimlerini etkileyerek şaft ve istasyonlardaki hava hareketlerini belirler. Tren, tünel ve istasyonlardaki ısı ve nem kaynakları, termodinamik süreçleri etkileyerek sıcaklık ve nem dağılımını değiştirir. Tam boy PAKS bulunmayan tüm istasyonlarda bu etkileşim kaçınılmazdır. Bu sebeple istasyonlar ısı konfor açısından değerlendirilirken trenler ve hat tünelleri ile birlikte dikkate alınmalıdır. İstasyon girişinde ve çıkışında bulunan yaklaşma ve uzaklaşma tünellerinin belli uzunlukta istasyona eklenmesi ile oluşan yapı istasyon modülü olarak

isimlendirilmektedir. İstasyon modülü şematik görünümü Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Yaklaşma ve uzaklaşma tüneli uzunlukları, trenin ilgili istasyona gelirken ulaştığı en yüksek hızdan yavaşlamaya başladığı mesafe ve sonraki istasyona giderken en yüksek hıza ulaştığı mesafe olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.9 : İstasyon modülü şematik görünümü

2.5.1 İstasyon modülü aerodinamik modeli

Piston etkisi sonucu oluşan hava akışını etkileyen başlıca 3 faktör bulunmaktadır. Bu faktörler: blokaj oranı, tren hızı ve tren uzunluğunun tünel uzunluğuna oranıdır. Tren ön yüzey alanının (A_{tr}) tünel kesit alanına (A_t) bölünmesiyle elde edilen blokaj oranı (β) boyutsuz bir sayıdır. Blokaj oranı formülü denklem 2.1’de verilmiştir.

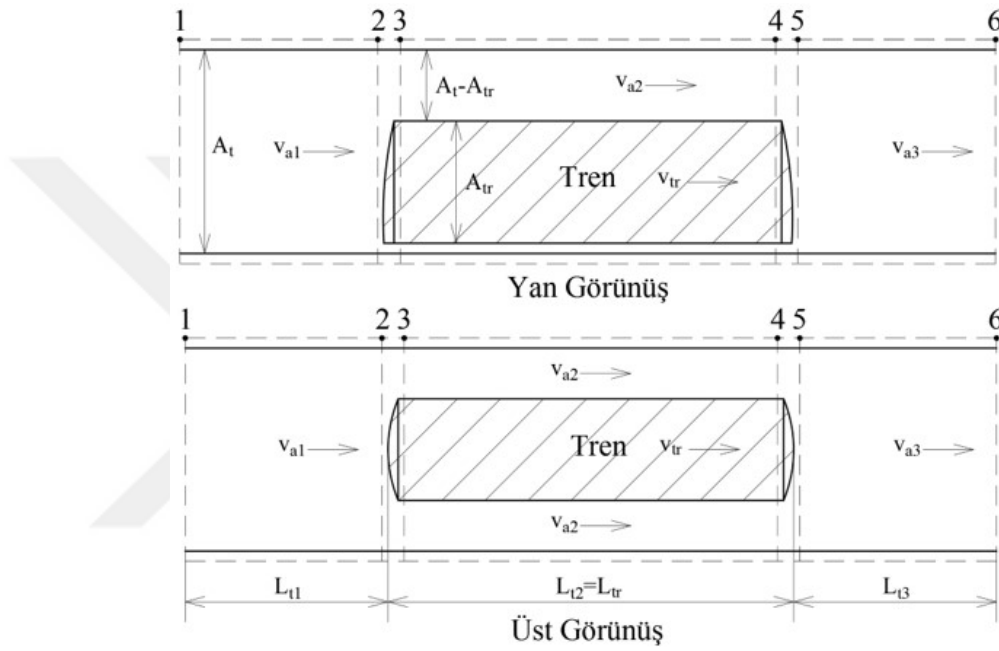
$$\beta = \frac{A_{tr}}{A_t} \quad (2.1)$$

Mach sayısı 0,3 değerinden düşük olduğunda akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilmektedir [72]. Tünelde gerçekleşebilecek maksimum hava hızının (v_a) ses hızına (c) bölünmesiyle edilen Mach sayısı (Ma) boyutsuz bir sayıdır ve formülü denklem 2.2’de verilmiştir. Tünelde oluşabilecek en yüksek hava hızının maksimum tren hızına (80 km/h) eşit olduğu kabulü yapılırsa bile Mach sayısı 0,065 olarak hesaplanmıştır.

$$Ma = \frac{v_a}{c} \quad (2.2)$$

Oluşturulan model 1 boyutlu, sıkıştırılamaz ve zamana bağlı bir modeldir. Tünelde uzunluğun hidrolik çapa göre çok büyük olduğu durumlarda analizlerde 1 boyutlu modeller kullanılabilmektedir [73]. Metro tenlerinin sefer sıklığı (headway) olarak isimlendirilen belirli zaman aralıklarıyla hareket etmesinden ve hızlarının zamana

bağlı olarak değişmesinden dolayı akış sürekli rejimde olmamaktadır. Bu bölümde oluşturulan matematiksel model ve çizilen görseller SES yazılımında kullanılan model üzerine temellendirilmiştir [17,74]. Piston etkisiyle oluşan hava hızını hesaplamak için süreklilik, lineer momentum ve Bernoulli denklemleri kullanılmakta olup denklemler sırasıyla denklem 2.3, denklem 2.11 ve denklem 2.19’da verilmiştir. Tünel ve içerisinde hareket eden tren için kontrol hacmi bölgelerinin yan ve üst görünüşleri 2.10’da gösterilmiştir. Burada sabit kesit alanına sahip tünel ve içerisinde hareket eden tren için kontrol hacmi bölgeleri bulunmaktadır.

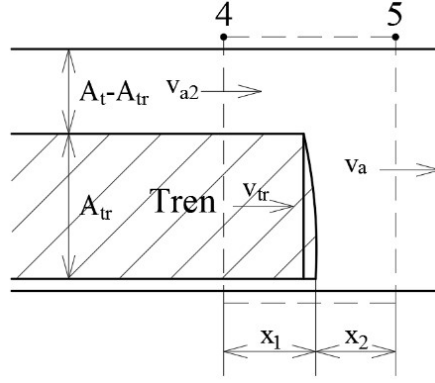


Şekil 2.10 : Tünel ve içerisinde hareket eden tren için kontrol hacmi bölgeleri

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{KH} \rho dV + \int_{KY} \rho (v_r \cdot n) dA = 0 \quad (2.3)$$

Burada $v_r \cdot n$ birim normal n doğrultusunda kontrol hacmi sınırı boyunca akışkanın dışı doğru olan bağıl hız bileşenini ifade etmektedir. Tünel kesit alanı (A_t) sabittir ve tünel hacmi tünel uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Tren ön alanı (A_{tr}) sabit alınmıştır. Trenin önünde ve arkasında oluşan hava hızlarının eşit olduğu kabul edilmiştir ($v_{a1} = v_{a3} = v_a$). Şekil 2.10’da görülen 4-5 noktaları arasındaki kontrol hacminin detayı Şekil 2.11 de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : 4-5 noktaları arası kontrol hacmi

4-5 noktaları arası için yazılan süreklilik denklemi denklem 2.4'te verilmiştir. Burada x_1 ve x_2 mesafeleri zamana bağlıdır. Tren hızına bağlı olarak zamanla x_1 artacak ve x_2 azalacaktır. x_1 ve x_2 mesafelerinin formülleri ve türevleri denklem 2.5 ve denklem 2.8 arasında verilmiştir.

$$\frac{d}{dt}(\rho(A_t - A_{tr})x_1 + \rho A_t x_2) + (\rho A_t v_a - \rho(A_t - A_{tr})v_{a2}) = 0 \quad (2.4)$$

$$x_1 = v_{tr}t \quad (2.5)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = v_{tr} \quad (2.6)$$

$$x_2 = -v_{tr}t \quad (2.7)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -v_{tr} \quad (2.8)$$

Denklem 2.4'ün tamamı ρ 'ya bölünüp denklem 2.6 ve denklem 2.8 yerine yazılarak denklem 2.9 elde edilmiştir. Denklem 2.9 kendi içinde düzenlenerek tren hızında oluşan hava hızını (v_{a2}) veren denklem 2.10'a ulaşılır.

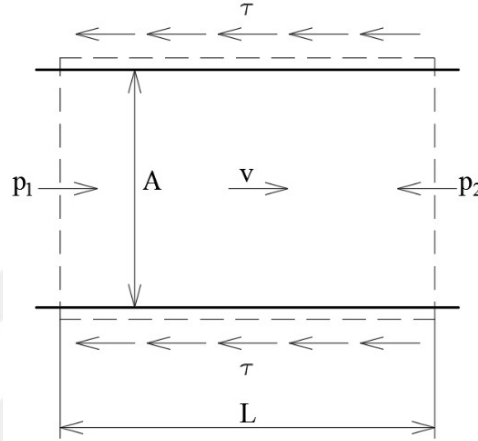
$$(A_t - A_{tr})v_{tr} - A_t v_{tr} + A_t v_a - (A_t - A_{tr})v_{a2} = 0 \quad (2.9)$$

$$v_{a2} = \frac{A_t v_a - A_{tr} v_{tr}}{A_t - A_{tr}} \quad (2.10)$$

Lineer Momentum Denklemi:

$$\sum F = ma = \frac{d}{dt}(mv) = \frac{d}{dt} \int_{KH} \rho v dV + \int_{KY} \rho v (v_r \cdot n) dA \quad (2.11)$$

Sabit kesit alanına sahip tünele etki eden kuvvetler Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Tünelin 2 ucunda içeri yönlü basınç oluşurken kayma gerilimi akış yönünün tersine doğru etki etmektedir. Şekil 2.12 de verilen tünel kesitine etkiyen basınç (F_p) ve sürtünme (F_s) kuvvetlerinin toplamı denklem 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 : Tünel kesitine etki eden kuvvetler

$$\sum F = F_p + F_s = \int_{KY} p(-n) dA - LS\tau = (p_1 - p_2)A - LS\tau \quad (2.12)$$

Burada p basınç, A kesit alanı, L uzunluk, S çevre ve τ yüzeye paralel olarak gerçekleşen kayma gerilimidir. Kayma gerilimi denklem 2.13 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde f Darcy sürtünme faktörü olup viskozite, yüzey pürüzlülüğü ve hıza bağlı olarak hesaplanır.

$$\tau = \frac{\rho f |v| v}{8} \quad (2.13)$$

Denklem 2.11, denklem 2.12 ve denklem 2.13 birlikte kullanılarak denklem 2.14 elde edilir.

$$\begin{aligned} \sum F = ma &= \frac{d}{dt}(mv) = \frac{d}{dt}(\rho A L v) = \rho A \frac{d}{dt}(L v) \\ &= (p_1 - p_2)A - \frac{\rho f L S |v| v}{8} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'te p_1 yalnız bırakılıp Şekil 2.10'da gösterilen içinde tren bulunmayan 1-2 ve 5-6 numaraları arasında kalan kontrol hacimleri için uyarlandığında denklem 2.15 ve denklem 2.16 elde edilir.

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho f_t L_{t1} S_t |v_a| v_a}{8A_t} + \rho L_{t1} \frac{dv_a}{dt} \quad (2.15)$$

$$p_5 = p_6 + \frac{\rho f_t L_{t3} S_t |v_a| v_a}{8A_t} + \rho L_{t3} \frac{dv_a}{dt} \quad (2.16)$$

Denklem 2.14'te p_1 yalnız bırakılıp Şekil 2.10'da gösterilen içinde tren bulunan 3-4 numaraları arasında kalan kontrol hacimleri için uyarlandığında denklem 2.17 elde edilir.

$$p_3 = p_4 + \frac{\rho f_t L_{t2} S_t |v_{a2}| v_{a2}}{8(A_t - A_{tr})} + \frac{\rho f_{tr} L_{t2} S_{tr} |v_{a2} - v_{tr}| v_{a2} - v_{tr}}{8(A_t - A_{tr})} + \rho L_{t2} \frac{dv_{a2}}{dt} \quad (2.17)$$

Denklem 2.10'da verilen tren hızında oluşan hava hızı denkleminin zamana bağlı türevi denklem 2.17'de yerine yazılarak denklem 2.18 elde edilir.

$$p_3 = p_4 + \frac{\rho f_t L_{t2} S_t |v_{a2}| v_{a2}}{8(A_t - A_{tr})} + \frac{\rho f_{tr} L_{t2} S_{tr} |v_{a2} - v_{tr}| (v_{a2} - v_{tr})}{8(A_t - A_{tr})} + \rho \frac{A_t L_{t2}}{A_t - A_{tr}} \frac{dv_a}{dt} - \rho \frac{A_{tr} L_{t2}}{A_t - A_{tr}} \frac{dv_{tr}}{dt} \quad (2.18)$$

Bernoulli Denklemi:

Şekil 2.10'da gösterilen 2-3 ve 4-5 numaraları arasındaki alan değişimi olan bölgede meydana gelen basınç düşümünü hesaplamak için denklem 2.19'da verilen Bernoulli denklemi kullanılır.

$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta p \quad (2.19)$$

Yukarıdaki denklemde Δp terimi akış yönüne bağlı olarak, alandaki daralma veya genişlemeden kaynaklanan ilave basınç kaybını ifade etmektedir. Denklem 2.19, 2-3 ve 4-5 numaralı kontrol hacimleri için tren hızının piston etkisiyle oluşan hava

hızından büyük olduğu kabulü ($v_{tr} > v_a$) ile tekrar düzenlendiğinde denklem 2.20 ve denklem 2.21 elde edilir.

$$p_4 = p_5 - \frac{\rho}{2}(v_{a2}^2 - v_a^2) + \frac{\rho}{2}K_{tr\ddot{o}}(v_{tr} - v_a)^2 \quad (2.20)$$

$$p_2 = p_3 + \frac{\rho}{2}(v_{a2}^2 - v_a^2) + \frac{\rho}{2}K_{tra}(v_{tr} - v_a)^2 \quad (2.21)$$

Yukarıdaki denklemlerde $K_{tr\ddot{o}}$ tren önünde daralmadan kaynaklanan basınç düşümü ve K_{tra} tren arkasında daralmadan kaynaklanan basınç düşümü parametreleridir. Denklem 15, denklem 16, denklem 18, denklem 20 ve denklem 21 kullanılarak 1-6 noktaları arası için basınç değişimini veren denklem 2.22 elde edilir.

$$\begin{aligned} p_1 - p_6 = & \frac{\rho}{2}(v_{tr} - v_a)^2(K_{tr\ddot{o}} + K_{tra}) + \frac{\rho f_t(L_{t1} + L_{t3})S_t|v_a|v_a}{8A_t} \\ & + \frac{\rho f_t L_{t2} S_t |v_{a2}|v_{a2}}{8(A_t - A_{tr})} \\ & + \frac{\rho f_{tr} L_{t2} S_{tr} |v_{a2} - v_{tr}|(v_{a2} - v_{tr})}{8(A_t - A_{tr})} \\ & - \rho \frac{A_{tr} L_{t2}}{A_t - A_{tr}} \frac{dv_{tr}}{dt} + \rho \left(L_{t1} + L_{t3} + \frac{A_t L_{t2}}{A_t - A_{tr}} \right) \frac{dv_a}{dt} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Denklem 2.22 adi diferansiyel denklem olarak düzenlendiğinde denklem 2.23 elde edilir. Elde edilen adi diferansiyel denklem kullanılarak tünel içerisinde tren ilerlerken piston etkisiyle oluşan hava hızı hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned} & \rho \left(L_{t1} + L_{t3} + \frac{A_t L_{t2}}{A_t - A_{tr}} \right) \frac{dv_a}{dt} \\ & = -\frac{\rho}{2}(v_{tr} - v_a)^2(K_{tr\ddot{o}} + K_{tra}) \\ & \quad - \frac{\rho f_t(L_{t1} + L_{t3})S_t|v_a|v_a}{8A_t} - \frac{\rho f_t L_{t2} S_t |v_{a2}|v_{a2}}{8(A_t - A_{tr})} \\ & \quad - \frac{\rho f_{tr} L_{t2} S_{tr} |v_{a2} - v_{tr}|(v_{a2} - v_{tr})}{8(A_t - A_{tr})} \\ & \quad + \rho \frac{A_{tr} L_{t2}}{A_t - A_{tr}} \frac{dv_{tr}}{dt} + p_1 - p_6 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Düz tünel bölgesine ilave olarak tünelin shaft ve istasyon birleşim bölgelerinde meydana gelecek olan hava dağılımlarının da hesaplanması gerekmektedir. Bu

Şekil 2.13 : Tünel ve şaft birleşim bölgesi

$$\rho \frac{L_b}{A_b} \frac{dQ_b}{dt} = \Delta p_s + p_g - p_{\zeta}$$

Yukarıdaki denklemde L_b ve A_b ilgili bölüm uzunluğu ve alanını, Q_b ilgili bölüme giriş ve çıkıştaki akı, Δp_s , p_g ve p_{ζ} ilgili bölüme giriş ve çıkıştaki basınçları göstermektedir. Tünel ve şaft birleşim bölgesinde meydana gelen kayıplar olup denklem 2.25’te verilmiştir.

$$\rho \frac{L_b}{A_b} \frac{dQ_b}{dt} = \Delta p_s + p_g - p_\zeta \quad (2.24)$$
$$\Delta p_s = \Delta p_f + \Delta p_a + \Delta p_{piston} \quad (2.25)$$
$$\rho \frac{L_1}{A_1} \frac{dQ_1}{dt} = \Delta p_{s1} + p_1 - p_2 \quad (2.26)$$

$$Z_1 \frac{dQ_1}{dt} = \Delta p_{s1} + p_1 - p_2 \quad (2.28)$$

Denklem 2.28 bölüm 2 ve bölüm 3 için yazıldığında denklem 2.29 ve denklem 2.30 elde edilir.

$$Z_2 \frac{dQ_2}{dt} = \Delta p_{s2} + p_2 - p_3 \quad (2.29)$$

$$Z_3 \frac{dQ_3}{dt} = \Delta p_{s3} + p_2 - p_4 \quad (2.30)$$

Bölüm 1 ve bölüm 2 debileri bilinirse bölüm 3 debisi denklem 2.31 kullanılarak kolayca hesaplanabilir. Döngü 1 için denklem 2.28 ve denklem 2.30 toplanarak denklem 2.32 elde edilir. Döngü 2 için denklem 2.29 ve denklem 2.30 toplanarak denklem 2.33 elde edilir.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (2.31)$$

$$Z_1 \frac{dQ_1}{dt} + Z_3 \frac{dQ_3}{dt} = \Delta p_{s1} + \Delta p_{s3} + I_{31} + p_1 - p_4 \quad (2.32)$$

$$Z_2 \frac{dQ_2}{dt} - Z_3 \frac{dQ_3}{dt} = \Delta p_{s2} - \Delta p_{s3} + I_{32} + p_4 - p_3 \quad (2.33)$$

Burada I terimi birleşim noktalarında gerçekleşen ilave basınç kayıplarını temsil etmektedir. Döngü debilerindeki değişim oranları denklem 2.34'te verilen matris sistemi içerisinde hesaplanarak her bir bölümün debisi belirlenmektedir. Matris yazılırken denklem 2.32 ve denklem 2.33'te Q_3 yerine denklem 2.31'deki ifade yazılmıştır.

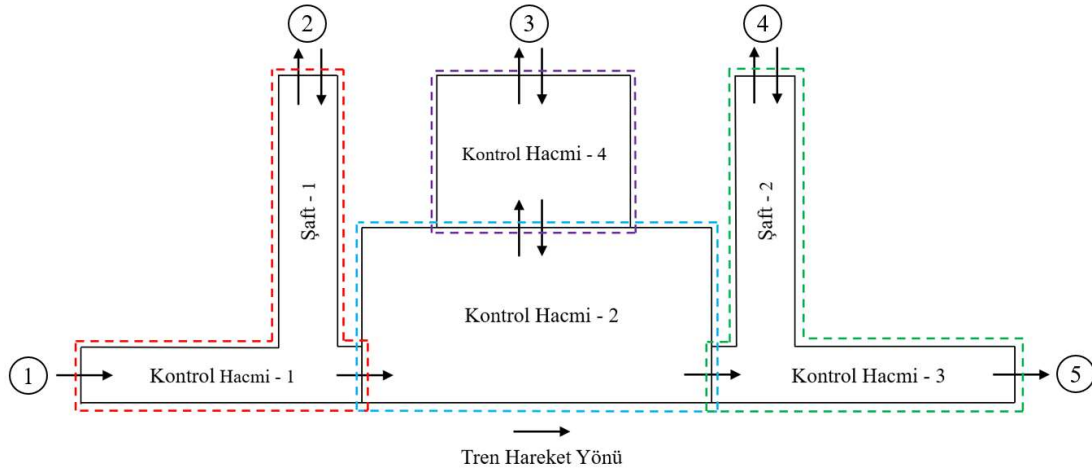
$$\begin{pmatrix} (Z_1 + Z_3) & -Z_3 \\ -Z_3 & (Z_2 + Z_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dQ_1}{dt} \\ \frac{dQ_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta p_{s1} + \Delta p_{s3} + I_{31} + p_1 - p_4 \\ \Delta p_{s2} - \Delta p_{s3} + I_{32} + p_4 - p_3 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Hava dağılımları belirlendikten sonra istasyon modüllerinde oluşturulacak kontrol hacimleri için süreklilik ve enerji denklemlerinin çözülmesi mümkün hale gelmektedir.

2.5.2 İstasyon modülü termodinamik modeli

İstasyon modülü 4 farklı kontrol hacmine ayrılmış ve tüm kontrol hacimleri için süreklilik ve enerji korunum denklemleri yazılmıştır. Denklemler yazılırken akışın

sürekli rejimde olduğu ve hava yoğunluğunun sabit olduğu kabulü yapılmıştır. Oluşturulan kontrol hacimleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : İstasyon kontrol hacimleri

Süreklilik Denklemi:

Sürekli rejimde sıkıştırılamaz akış olduğu varsayımı yapılan kontrol hacmi için süreklilik denkleminin genel ifadesi denklem 2.35'te verilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{g,KH} - \sum \dot{m}_{\zeta,KH} = 0 \quad (2.35)$$

Kontrol hacmi 1 için süreklilik denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.36 ve denklem 2.37'de verilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{g,KH-1} - \sum \dot{m}_{\zeta,KH-1} = 0 \quad (2.36)$$

$$\dot{m}_{g,1} + \dot{m}_{g,2} - \dot{m}_{\zeta,2} - \dot{m}_{\zeta,KH-2} = 0 \quad (2.37)$$

Kontrol hacmi 2 için süreklilik denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.38 ve denklem 2.39'da verilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{g,KH-2} - \sum \dot{m}_{\zeta,KH-2} = 0 \quad (2.38)$$

$$\dot{m}_{g,KH-1} + \dot{m}_{g,KH-4} - \dot{m}_{\zeta,KH-3} - \dot{m}_{\zeta,KH-4} = 0 \quad (2.39)$$

Kontrol hacmi 3 için süreklilik denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.40 ve denklem 2.41'de verilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{g,KH-3} - \sum \dot{m}_{\zeta,KH-3} = 0 \quad (2.40)$$

$$\dot{m}_{g,KH-2} + \dot{m}_{g,4} - \dot{m}_{\zeta,4} - \dot{m}_{\zeta,5} = 0 \quad (2.41)$$

Kontrol hacmi 4 için süreklilik denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.42 ve denklem 2.43'te verilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{g,KH-4} - \sum \dot{m}_{\zeta,KH-4} = 0 \quad (2.42)$$

$$\dot{m}_{g,KH-2} + \dot{m}_{g,3} - \dot{m}_{\zeta,KH-2} - \dot{m}_{\zeta,3} = 0 \quad (2.43)$$

Enerji Denklemi:

Sürekli rejimde sıkıştırılamaz akış olduğu varsayımı yapılan kontrol hacmi için enerji denkleminin genel ifadesi denklem 2.44'te verilmiştir. Denklemden $\dot{Q}$ terimi ısı yükleri temsil etmekte olup ve açılımı denklem 2.45'te verilmiştir.

$$\sum \dot{E}_{g,KH} - \sum \dot{E}_{\zeta,KH} + \dot{Q} = 0 \quad (2.44)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_{peron} + \dot{Q}_{konkors} + \dot{Q}_t - \dot{Q}_{kayıp} \quad (2.45)$$

Denklem 2.45'te; $\dot{Q}_{tr}$ trenden kaynaklanan ısı yükler (frenleme, ivmelenme, klima vb.), $\dot{Q}_{peron}$ peronda bulunan insan ve ekipmanlardan kaynaklanan ısı yükler (yürüyen merdiven, asansör, aydınlatma vb.), $\dot{Q}_{konkors}$ konkorsta bulunan insan ve ekipmanlardan kaynaklanan ısı yükler (yürüyen merdiven, asansör, aydınlatma vb.), $\dot{Q}_t$ tünelde bulunan ekipmanlardan kaynaklanan ısı yükler (3. ray, jet fan, aydınlatma vb.) ve $\dot{Q}_{kayıp}$ toprak temaslı yüzeylerden ısı transferi ile oluşan ısı kaybı terimleridir.

Kontrol hacmi 1 için enerji denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.46 ve denklem 2.47'de verilmiştir.

$$\sum \dot{E}_{g,KH-1} - \sum \dot{E}_{\zeta,KH-1} + \dot{Q} = 0 \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}
& \left[\dot{m}_{g,1} * \left(h_{g,1} + \frac{v_{g,1}^2}{2} \right) \right] + \left[\dot{m}_{g,2} * \left(h_{g,2} + \frac{v_{g,2}^2}{2} \right) \right] \\
& - \left[\dot{m}_{\varsigma,2} * \left(h_{\varsigma,2} + \frac{v_{\varsigma,2}^2}{2} \right) \right] \\
& - \left[\dot{m}_{\varsigma,KH-2} * \left(h_{\varsigma,KH-2} + \frac{v_{\varsigma,KH-2}^2}{2} \right) \right] + \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_t \\
& - \dot{Q}_{kayıp} = 0
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Kontrol hacmi 2 için enerji denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.48 ve denklem 2.49'da verilmiştir.

$$\sum \dot{E}_{g,KH-2} - \sum \dot{E}_{\varsigma,KH-2} + \dot{Q} = 0 \tag{2.48}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\dot{m}_{g,KH-1} * \left(h_{g,KH-1} + \frac{v_{g,KH-1}^2}{2} \right) \right] \\
& + \left[\dot{m}_{g,KH-4} * \left(h_{g,KH-4} + \frac{v_{g,KH-4}^2}{2} \right) \right] \\
& - \left[\dot{m}_{\varsigma,KH-3} * \left(h_{\varsigma,KH-3} + \frac{v_{\varsigma,KH-3}^2}{2} \right) \right] \\
& - \left[\dot{m}_{\varsigma,KH-4} * \left(h_{\varsigma,KH-4} + \frac{v_{\varsigma,KH-4}^2}{2} \right) \right] + \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_{peron} \\
& - \dot{Q}_{kayıp} = 0
\end{aligned} \tag{2.49}$$

Kontrol hacmi 3 için enerji denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.50 ve denklem 2.51'de verilmiştir.

$$\sum \dot{E}_{g,KH-3} - \sum \dot{E}_{\varsigma,KH-3} + \dot{Q} = 0 \tag{2.50}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\dot{m}_{g,KH-2} * \left(h_{g,KH-2} + \frac{v_{g,KH-2}^2}{2} \right) \right] + \left[\dot{m}_{g,4} * \left(h_{g,4} + \frac{v_{g,4}^2}{2} \right) \right] \\
& - \left[\dot{m}_{\varsigma,4} * \left(h_{\varsigma,4} + \frac{v_{\varsigma,4}^2}{2} \right) \right] - \left[\dot{m}_{\varsigma,5} * \left(h_{\varsigma,5} + \frac{v_{\varsigma,5}^2}{2} \right) \right] \\
& + \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_t - \dot{Q}_{kayıp} = 0
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Kontrol hacmi 4 için enerji denkleminin genel ifadesi ve açılımı sırasıyla denklem 2.52 ve denklem 2.53'te verilmiştir.

$$\sum \dot{E}_{g,KH-4} - \sum \dot{E}_{\varsigma,KH-4} + \dot{Q} = 0 \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} & \left[\dot{m}_{g,KH-2} * \left(h_{g,KH-2} + \frac{v_{g,KH-2}^2}{2} \right) \right] + \left[\dot{m}_{g,3} * \left(h_{g,3} + \frac{v_{g,3}^2}{2} \right) \right] \\ & - \left[\dot{m}_{\varsigma,KH-2} * \left(h_{\varsigma,KH-2} + \frac{v_{\varsigma,KH-2}^2}{2} \right) \right] \\ & - \left[\dot{m}_{\varsigma,3} * \left(h_{\varsigma,3} + \frac{v_{\varsigma,3}^2}{2} \right) \right] + \dot{Q}_{konkors} - \dot{Q}_{kayıp} = 0 \end{aligned} \quad (2.53)$$



3. ISIL KONFOR İNCELEMELERİ

İstanbul, Karadeniz ile Akdeniz iklimi arasında değişken bir iklime sahip olup kışları soğuk ve yağışlı, yazları ise sıcak ve nemlidir [75]. Şehirde yıl içerisinde 4 mevsim özellikleri görülebilmektedir. ASHRAE el kitabında şehrin ısıtma ve soğutma hesap sıcaklıkları sırasıyla -1,4 °C ve 32,1 °C olarak verilmiştir [76]. Ancak son yıllarda küresel ısınmanın da etkisiyle şehirde yaz aylarında sıcaklık 40 °C değerine kadar ulaşabilmektedir. Dış havanın yüksek sıcaklık ve bağıl nem değerlerine ulaşması metrolardaki ısıl konforu olumsuz etkilemektedir.

Metrolarda ısıl konfor yolcu sağlığı ve memnuniyeti açısından dikkat edilmesi gereken bir konudur. İklim şartları, işletme sıklığı, istasyonda kurulu elektromekanik sistemler, piston etkisi ile gerçekleşen doğal havalandırmanın verimliliği, tren kaynaklı ısı, PAKS olup olmaması, yolcu sayısı vb. hususlar ısıl konforu etkilemektedir. Yolcuların metro hatlarını tercih etmeleri ve konforlu bir şekilde seyahat edebilmeleri için istasyon ve trenlerde ısıl konfor şartlarının sağlanması gerekmektedir.

Bu bölümde M2 Hacıosman-Yenikapı metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe metro istasyonları peron ve konkors katlarında ısıl konfor incelemeleri kapsamında saha ölçümleri ve RWI hesaplamaları yapılmıştır. Çalışma çerçevesinde istasyonlarda ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri boyunca uzun süreli sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri yapılmıştır. Hava hızı verileri RWI hesaplamalarında kullanılmak üzere istasyonlarda farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Farklı tipte istasyonlar için yolcuların ısıl konforları mevsim bazlı olarak değerlendirilmiştir.

3.1 Saha Ölçümleri

M2 Hacıosman-Yenikapı metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları peron ve konkors katlarından ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri boyunca her gün sıcaklık ve bağıl nem verileri toplanmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri istasyonlarda 2,5 m yükseklikte eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm cihazları, ara bağlantı elemanları kullanılarak belirlenen kolanlara ve tavana

monte edilmiştir. Sıcaklık ve bağıl nem verileri 3 mevsim boyunca her gün 1 dakikalık zaman aralığıyla ana bilgisayara kaydedilmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler işletme saatleri dikkate alınarak sabah saat 06:00 ile akşam saat 23:59 aralığında filtrelenmiş ve kutu grafikler kullanılarak görselleştirilmiştir. Kutu grafiklerde yeşil kutular peron katındaki ölçüm noktalarını mavi kutularda konkors katındaki ölçüm noktalarını belirtmektedir. Hava hızı verileri RWI hesaplamalarında kullanılmak üzere istasyonlarda farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık ve bağıl nem ölçümlerinde Testo 480 çok fonksiyonlu ölçüm cihazı ve Testo Saveris H2E entegre sıcaklık ve nem problemleri kullanılmıştır. Saveris H2E entegre sıcaklık ve nem problemlerine ethernet kabloları ile hem enerji sağlanmış hem de veriler aynı kablo üzerinden ana cihaza ve oradan da bilgisayara aktarılmıştır. Hava hızı ölçümlerinde Testo 410 anemometre kullanılmıştır. Ölçüm cihazlarının fotoğrafları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [77].



Şekil 3.1 : Ölçüm cihazları

Çizelge 3.1 : Ölçüm cihazları teknik özellikleri

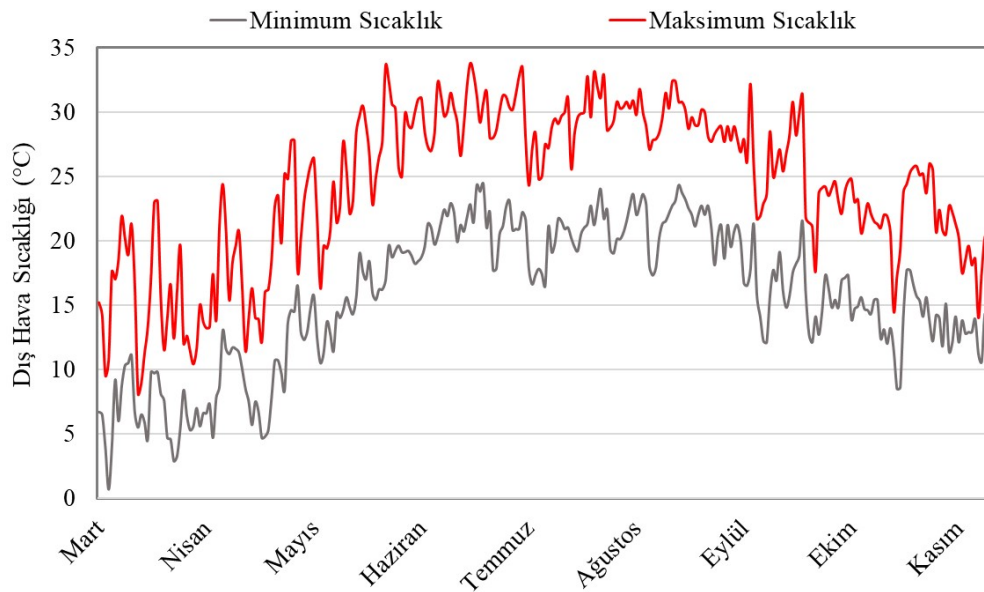
Parametre	Sıcaklık	Bağıl Nem	Hava Hızı
Ölçüm Aralığı	-20 ile +70 °C	% 0 ile 100	0,4 ile 20 m/s
Ölçüm Hassasiyeti	±0,5 °C	25 °C’de ±% 2 (RH ≤ % 90 için) 25 °C’de ±% 3 (RH > % 90 için)	±(0.2 m/s + % 2 ölçüm değeri)
Çözünürlük	0,1 °C	% 0,1 RH	0,1 m/s

Saha ölçümleri kapsamında Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonlarına yerleştirilen cihazlara ait birkaç fotoğraf Şekil 3.2 de gösterilmiştir. Ölçüm sürecinde düzenli saha ziyaretleri yapılarak cihazlar kontrol edilmiştir. Özellikle tünellerden piston etkisi sonucu gelen kirletici partiküllerin ölçüm hassasiyetini etkilemesini önlemek amacıyla sensör başlığı ara ara temizlenmiştir.



Şekil 3.2 : Saha ölçüm fotoğrafları

Doğal havalandırma ve cebri havalandırma sistemlerinin çalışması sonucu istasyon içi ve dış ortam arasında hava sirkülasyonu gerçekleşmektedir. İstasyon iç ortam şartlarının sağlıklı değerlendirilebilmesi için dış hava şartlarının da bilinmesi önemlidir. Bu sebeple saha ölçümleri süresince istasyonlarla aynı bölgede bulunan meteorolojik hava ölçüm istasyonundan dış hava şartlarıyla ilgili veriler temin edilmiştir. Ölçüm yapılan aylar için en düşük ve en yüksek dış hava sıcaklıkları Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Dış hava verisi incelendiğinde en düşük sıcaklığın 0,70 °C olarak mart ayında, en yüksek sıcaklığın 33,80 °C olarak haziran ayında gerçekleştiği görülmektedir. En sıcak mevsim beklenildiği üzere yaz mevsimi olurken sonrasında sırasıyla sonbahar ve ilkbahar mevsimleri gelmektedir.

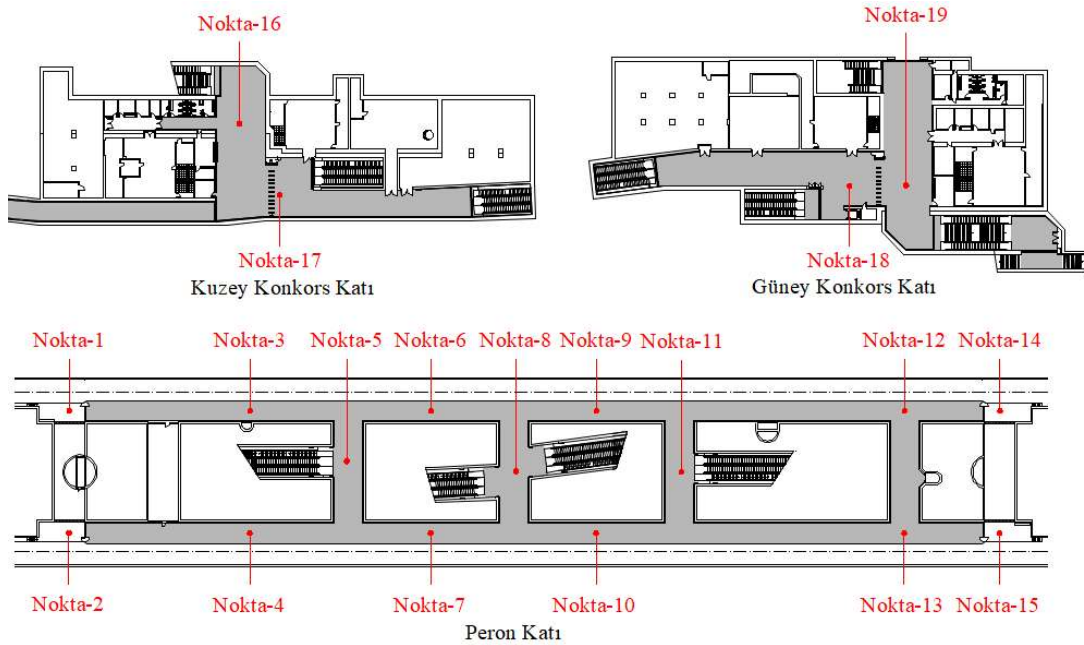


Şekil 3.3 : Dış hava sıcaklığının ölçüm aylarındaki değişimi

3.1.1 Şişli-Mecidiyeköy istasyonu saha ölçümleri

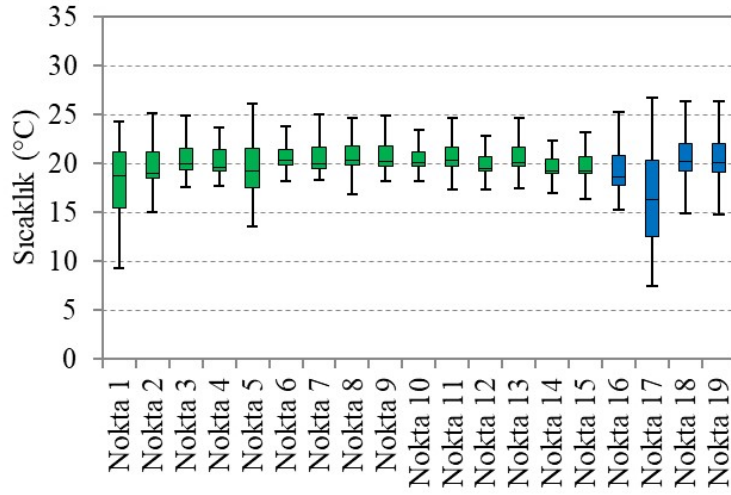
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda peron katında 15, kuzey ve güney konkors katlarında 2'şer olmak üzere toplam 19 noktada sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm noktaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Şekil 3.4'te gri renk ile belirginleştirilmiş alanlar yolcuların bulunduğu alanları göstermektedir. Ölçüm noktalarından 1, 2, 14 ve 15 numaralı olanlar yolculu alanlar dışında olup peron başı ve sonundaki tünel havalandırma şaft bölgelerine denk gelmektedir. Bu noktalara ölçüm cihazı yerleştirilerek piston etkisi sonucu oluşan doğal havalandırma ile şaftlardan ve tünellerden istasyona giren ve çıkan havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri ölçülmüştür.

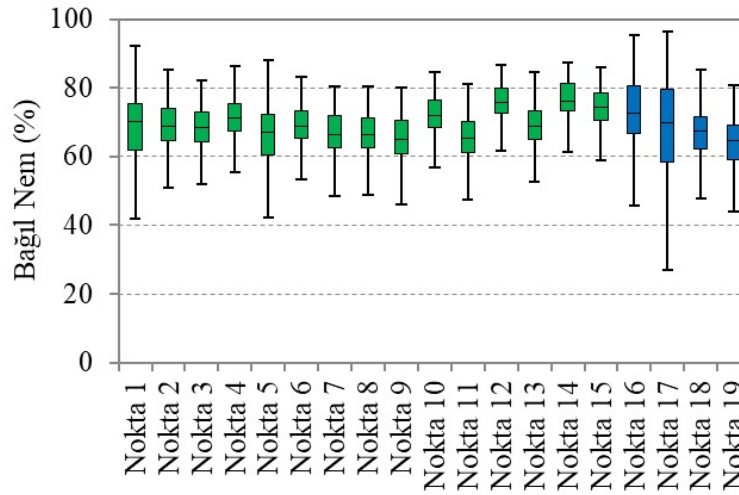


Şekil 3.4 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ölçüm noktaları

İlkbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu için çizdirilen sıcaklık ve bağıl nem kutu grafikleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İstasyon yolculu alanlarında ilkbahar mevsiminde en yüksek sıcaklık değerleri peron katında 26,09 °C olarak 5 numaralı noktada, konkors katında 26,68 °C olarak 17 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanlarında ilkbahar mevsiminde en yüksek bağıl nem değerleri peron katında % 88,21 olarak 5 numaralı noktada, konkors katında % 96,49 olarak 17 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanları için ilkbahar mevsiminde ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri peron katında 20,43 °C ve % 68,69, konkors katında 19,37 °C ve % 67,73 olarak hesaplanmıştır.

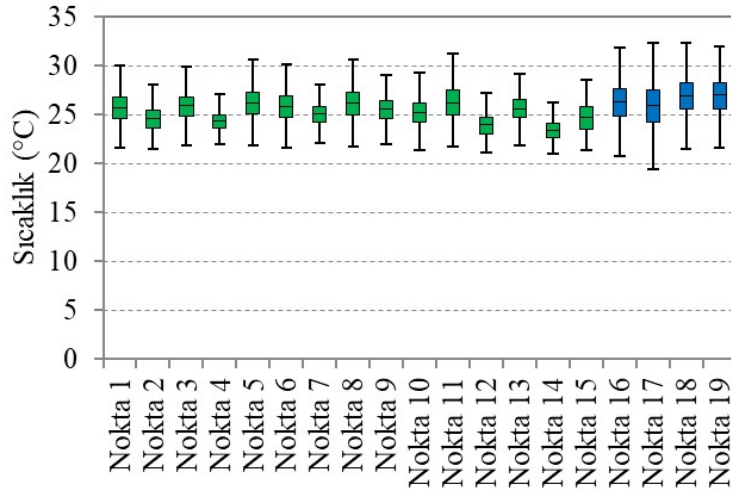


Şekil 3.5 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ilkbahar mevsimi sıcaklık değerleri

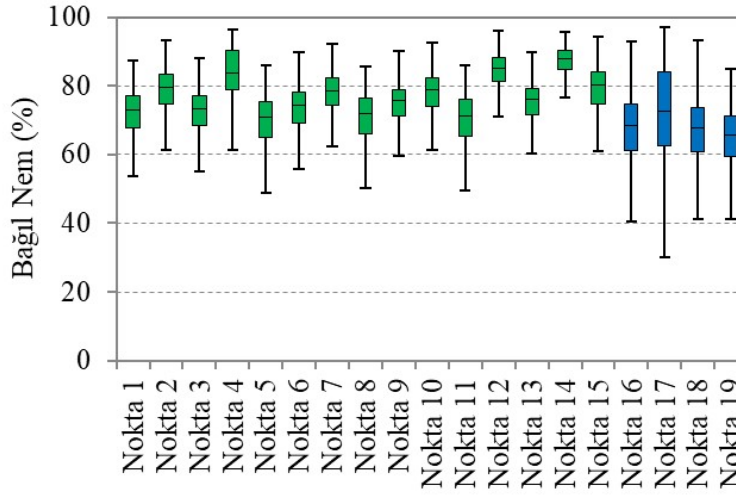


Şekil 3.6 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ilkbahar mevsimi bağıl nem değerleri

Yaz mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu için çizdirilen sıcaklık ve bağıl nem kutu grafikleri Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmiştir. İstasyon yolculu alanlarında yaz mevsiminde en yüksek sıcaklık değerleri peron katında 31,23 °C olarak 11 numaralı noktada, konkors katında 32,36 °C olarak 17 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanlarında yaz mevsiminde en yüksek bağıl nem değerleri peron katında % 96,32 olarak 12 numaralı noktada, konkors katında % 97,26 olarak 17 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanları için yaz mevsiminde ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri peron katında 25,42 °C ve % 75,47, konkors katında 26,48 °C ve % 67,97 olarak hesaplanmıştır.

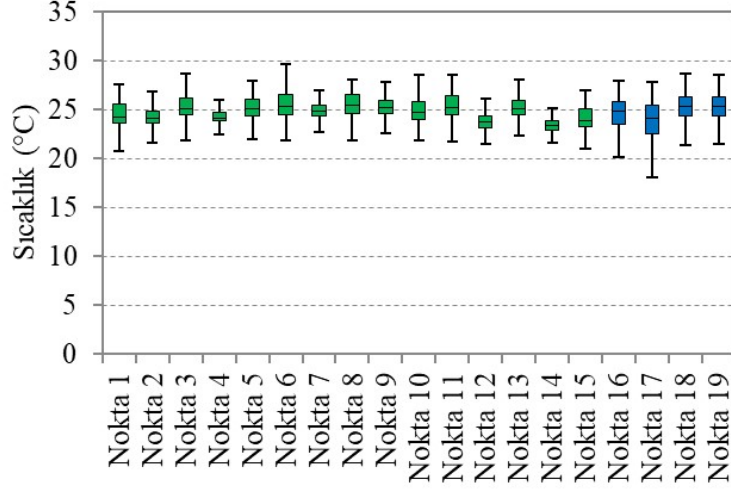


Şekil 3.7 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yaz mevsimi sıcaklık değerleri

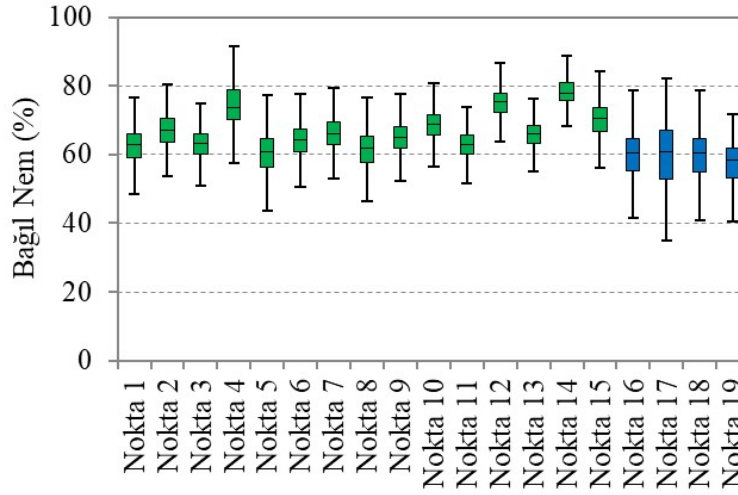


Şekil 3.8 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yaz mevsimi bağıl nem değerleri

Sonbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu için çizdirilen sıcaklık ve bağıl nem kutu grafikleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilmiştir. İstasyon yolculu alanlarında sonbahar mevsiminde en yüksek sıcaklık değerleri peron katında 29,67 °C olarak 6 numaralı noktada, konkors katında 28,72 °C olarak 18 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanlarında sonbahar mevsiminde en yüksek bağıl nem değerleri peron katında % 91,56 olarak 4 numaralı noktada, konkors katında % 82,15 olarak 17 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanları için sonbahar mevsiminde ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri peron katında 24,96 °C ve % 65,96, konkors katında 24,66 °C ve % 59,52 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu sonbahar mevsimi sıcaklık değerleri

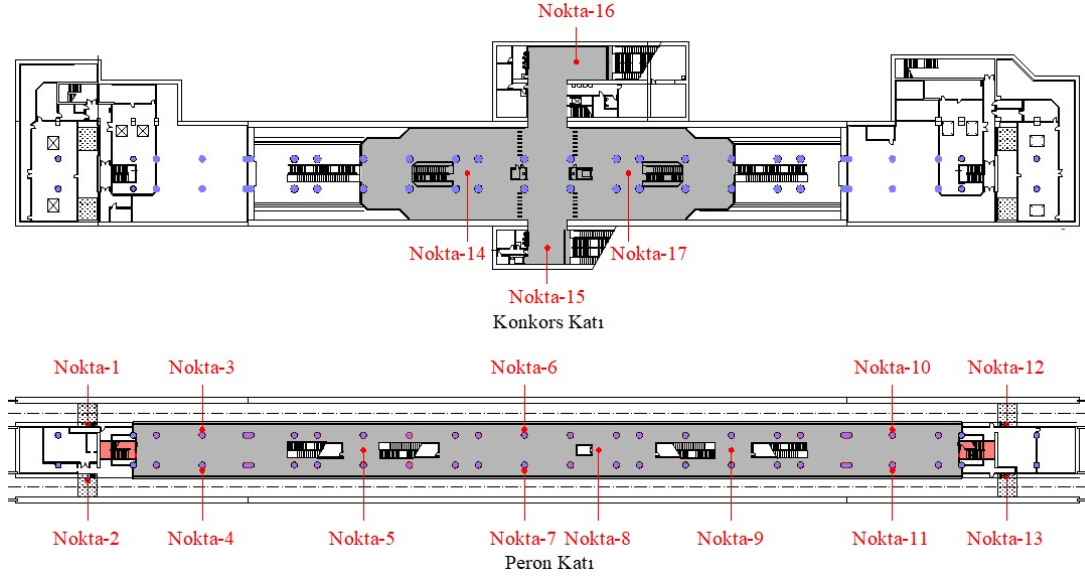


Şekil 3.10 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu sonbahar mevsimi bağıl nem değerleri

3.1.2 Gayrettepe istasyonu saha ölçümleri

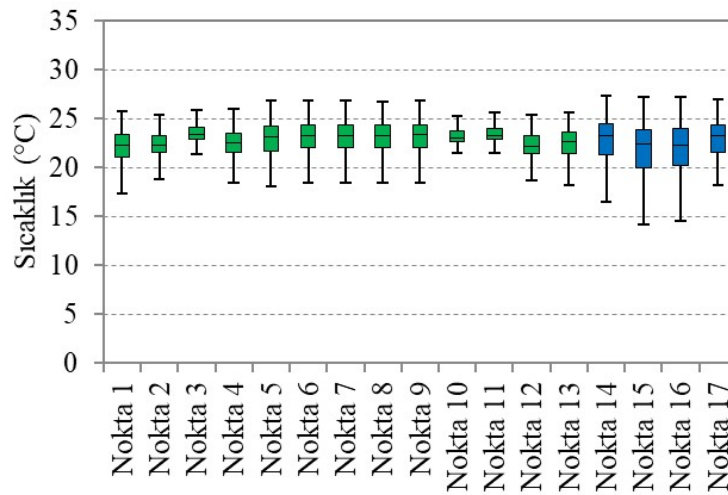
Gayrettepe istasyonunda peron katında 13, konkors katında 4 olmak üzere toplam 17 noktada sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm noktaları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

Şekil 3.11’de gri renk ile belirginleştirilmiş alanlar yolcuların bulunduğu alanları göstermektedir. Ölçüm noktalarından 1, 2, 12 ve 13 numaralı olanlar yolculu alanlar dışında olup peron başı ve sonundaki tünel havalandırma shaft bölgelerine denk gelmektedir. Bu noktalara ölçüm cihazı yerleştirilerek piston etkisi sonucu oluşan doğal havalandırma ile shaftlardan ve tünellerden istasyona giren ve çıkan havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri ölçülmüştür.

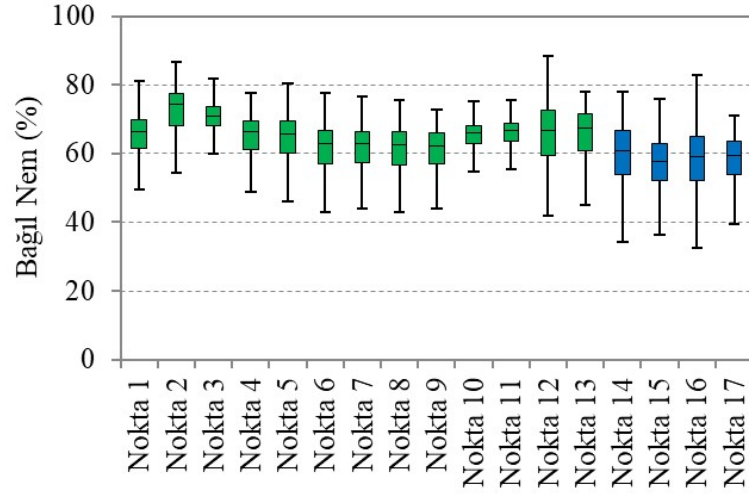


Şekil 3.11 : Gayrettepe istasyonu ölçüm noktaları

İlkbahar mevsiminde Gayrettepe istasyonu için çizdirilen sıcaklık ve bağıl nem kutu grafikleri Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir. İstasyon yolculu alanlarında ilkbahar mevsiminde en yüksek sıcaklık değerleri peron katında 26,90 °C olarak 9 numaralı noktada, konkors katında 27,30 °C olarak 14 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanlarında ilkbahar mevsiminde en yüksek bağıl nem değerleri peron katında % 80,50 olarak 5 numaralı noktada, konkors katında % 82,80 olarak 16 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanları için ilkbahar mevsiminde ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri peron katında 23,21 °C ve % 64,18, konkors katında 22,53 °C ve % 58,51 olarak hesaplanmıştır.

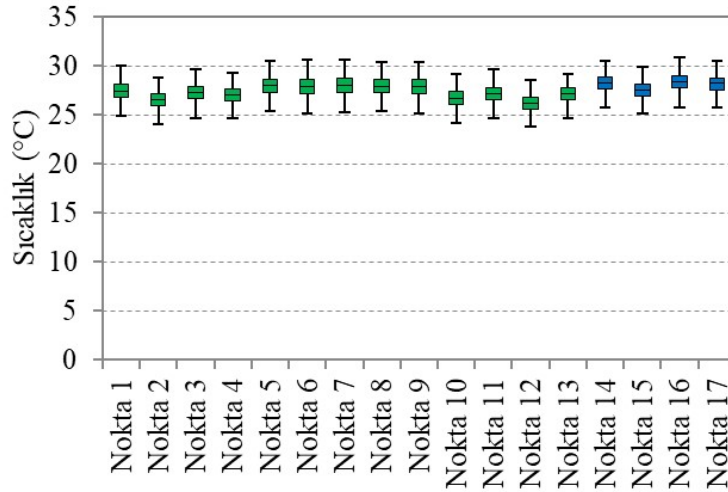


Şekil 3.12 : Gayrettepe istasyonu ilkbahar mevsimi sıcaklık değerleri

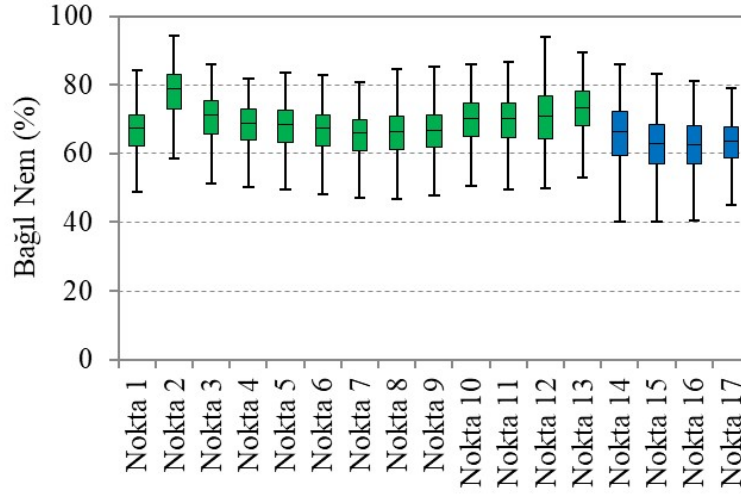


Şekil 3.13 : Gayrettepe istasyonu ilkbahar mevsimi bağıl nem değerleri

Yaz mevsiminde Gayrettepe istasyonu için çizdirilen sıcaklık ve bağıl nem kutu grafikleri Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te gösterilmiştir. İstasyon yolculu alanlarında yaz mevsiminde en yüksek sıcaklık değerleri peron katında 30,60 °C olarak 6 ve 7 numaralı noktalarda, konkors katında 30,90 °C olarak 16 numaralı noktada “değerleri peron katında % 86,80 olarak 11 numaralı noktada, konkors katında % 86,10 olarak 14 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanları için yaz mevsiminde ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri peron katında 27,44 °C ve % 67,89, konkors katında 27,98 °C ve % 63,35 olarak hesaplanmıştır.

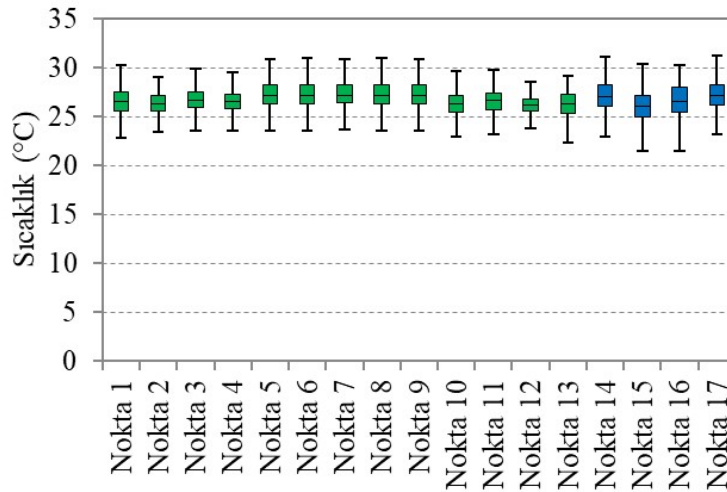


Şekil 3.14 : Gayrettepe istasyonu yaz mevsimi sıcaklık değerleri

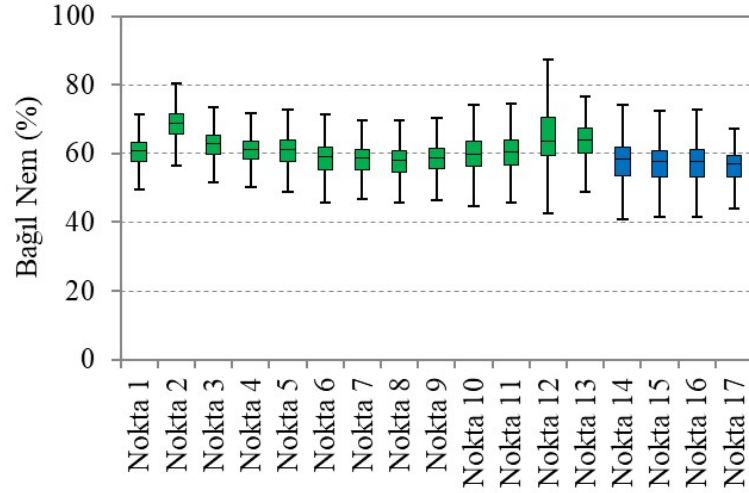


Şekil 3.15 : Gayrettepe istasyonu yaz mevsimi bağıl nem değerleri

Sonbahar mevsiminde Gayrettepe istasyonu için çizdirilen sıcaklık ve bağıl nem kutu grafikleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilmiştir. İstasyon yolculu alanlarında sonbahar mevsiminde en yüksek sıcaklık değerleri peron katında 31,00 °C olarak 6 ve 8 numaralı noktalarda, konkors katında 31,20 °C olarak 17 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanlarında sonbahar mevsiminde en yüksek bağıl nem değerleri peron katında % 74,70 olarak 11 numaralı noktada, konkors katında % 74,40 olarak 14 numaralı noktada ölçülmüştür. İstasyon yolculu alanları için sonbahar mevsiminde ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri peron katında 26,87 °C ve % 59,30, konkors katında 26,69 °C ve % 56,36 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.16 : Gayrettepe istasyonu sonbahar mevsimi sıcaklık değerleri



Şekil 3.17 : Gayrettepe istasyonu sonbahar mevsimi bağıl nem değerleri

3.2 Bağıl Sıcaklık İndeksi (RWI) ile Isıl Konfor Değerlendirmesi

RWI metrolarda ısı konforu değerlendirme yapmak için kullanılan bir indekstir. RWI metro gibi sürekli çevreler için Relative Strain Index (RSI) kullanılarak geliştirilmiştir. RSI orijinal haliyle metrolarda ısı konforu değerlendirme için uygun bir ölçek değildir. RSI ve ASHRAE sponsorluğunda yapılan konfor testi deney sonuçları bir araya getirilerek RWI geliştirilmiştir. RWI değerleri farklı nem şartları için denklem 3.1 ve denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır [17].

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6,42(T - 35) + RI_a}{65,21(5858,45 - P)/1000} \text{ for } P > 2268,88 \text{ Pa} \quad (3.54)$$

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6,42(T - 35) + RI_a}{234,07} \text{ for } P \leq 2268,88 \text{ Pa} \quad (3.55)$$

Metabolik hız (M) sağlık durumu, cinsiyet, fiziksel aktivite ve bulunulan çevreye göre değişiklik göstermektedir. Metabolik hız devam eden aktivite boyunca sabit kalırken, aktivite değiştiğinde metabolik hız da değişmektedir. Aktivite geçişlerindeki metabolik hızlar oksijen eksikliği testi ile belirlenmektedir. Ortalama oksijen tüketim hızı değişimi 6 dakikada gerçekleşmektedir ve metabolik hız değişiminin de 6 dakikada gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Geçiş süreçlerinde ara metabolik hız değerleri denklem 3.3 kullanılarak, ilk (M_1) ve son (M_2) aktivitedeki metabolik hız değerleri arasında lineer lineer interpolasyon ile belirlenmiştir [17].

$$M = M_1 - \frac{t}{6}(M_1 - M_2) \quad (3.56)$$

Giysi yalıtımı (I_{cw}) ıslak kumaş kabulüne dayanmaktadır. Islak kumaş kabulü giyicinin aktivite seviyesine bağlı olarak giysinin yalıtım etkisindeki değişimleri dikkate almaktadır. Daha yüksek aktivite seviyelerinde, algılanamayan ter, kumaşın daha nemli olmasına ve yalıtım özelliklerinin azalmasına neden olmaktadır. Giysi yalıtım değerlerinin, metabolik hızlardaki değişim için 6 dakikalık varsayıma uygun olarak, 6 dakikada değişeceği varsayılmaktadır. Geçiş süreçlerinde ara giysi yalıtım değerleri denklem 3.4 kullanılarak, ilk (I_{cw1}) ve son (I_{cw2}) aktivitedeki giysi yalıtımı değerleri arasında lineer interpolasyon ile belirlenmiştir [17].

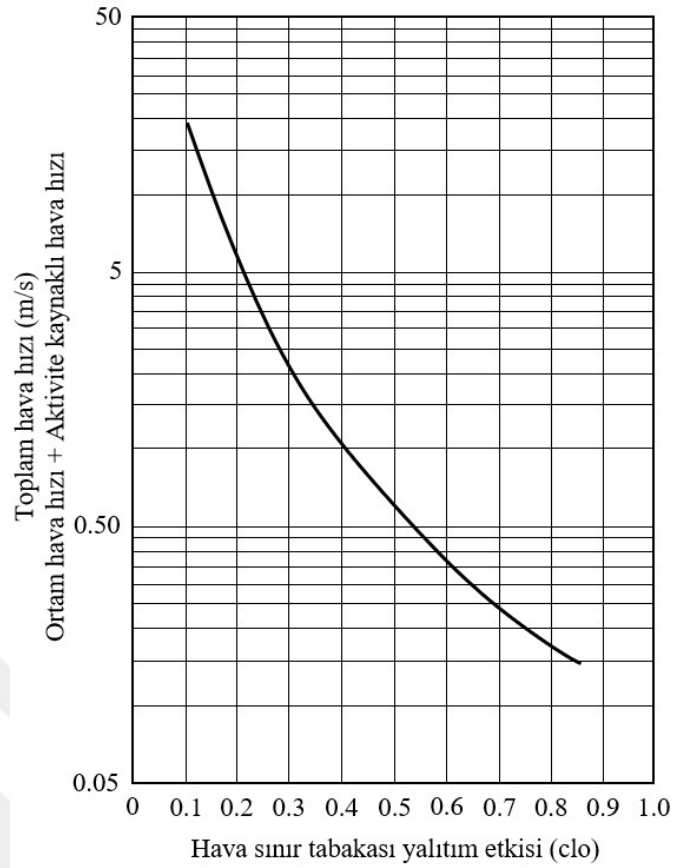
$$I_{cw} = I_{cw1} - \frac{t}{6}(I_{cw1} - I_{cw2}) \quad (3.57)$$

Çeşitli aktivite seviyeleri için metabolik hız, giysi yalıtımı ve aktivite kaynaklı hızı değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir [17]. RWI hesaplamaları için literatürle uyumlu olarak yolcuların konkors katında 4,8 km/h hızında yürüdüğü ve peron katına ulaştıktan sonra ayakta durduğu veya ara sıra dolaştığı kabulü yapılarak Çizelge 3.2’den metabolik hız, giysi yalıtımı ve aktivite kaynaklı hız değerleri alınmıştır.

Çizelge 3.2 : Metabolik hız, giysi yalıtımı ve aktivite kaynaklı hız değerleri

Aktivite	Metabolik Hız (W/m ²)	Giysi Yalıtımı (clo)	Aktivite Kaynaklı Hız (m/s)
Bazal	47,32	0,6	0
Oturarak dinlenme	63,09	0,6	0,1
Ayakta durma veya dolaşma	123,03	0,4	0,51
Yürüme - 3,2 km/h	123,03	0,4	1,02
Yürüme - 4,8 km/h	170,35	0,35	1,52
Yürüme - 6,4 km/h	223,98	0,3	2,03

Hava sınır tabakasının yalıtım etkisi (I_a), ortam hava hızının (v_a) aktivite kaynaklı hıza (v_b) eklenmesiyle belirlenen toplam hava hızına (v_t) göre değişmektedir. Toplam hava hızı ile hava sınır tabakasının yalıtım etkisi arasındaki ilişki Şekil 3.18’de gösterilmiştir [17]. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi, hava sınır tabakasının yalıtım etkisi toplam hava hızı azaldıkça artmaktadır.



Şekil 3.18 : Hava sınır tabakası yalıtım etkisinin toplam hava hızına göre değişimi

Ortalama radyan ısı (R) genellikle güneş radyasyonundan kaynaklanmaktadır. Ancak metro ortamlarında güneş radyasyonu olmadığından ortalama radyan ısı da bulunmamaktadır. Yer üstü ortamlarda, ortalama radyan ısı değeri yaklaşık $31,55 \text{ W/m}^2$ olup, aşırı koşullarda $141,96 \text{ W/m}^2$ 'ye kadar çıkabilmektedir [17].

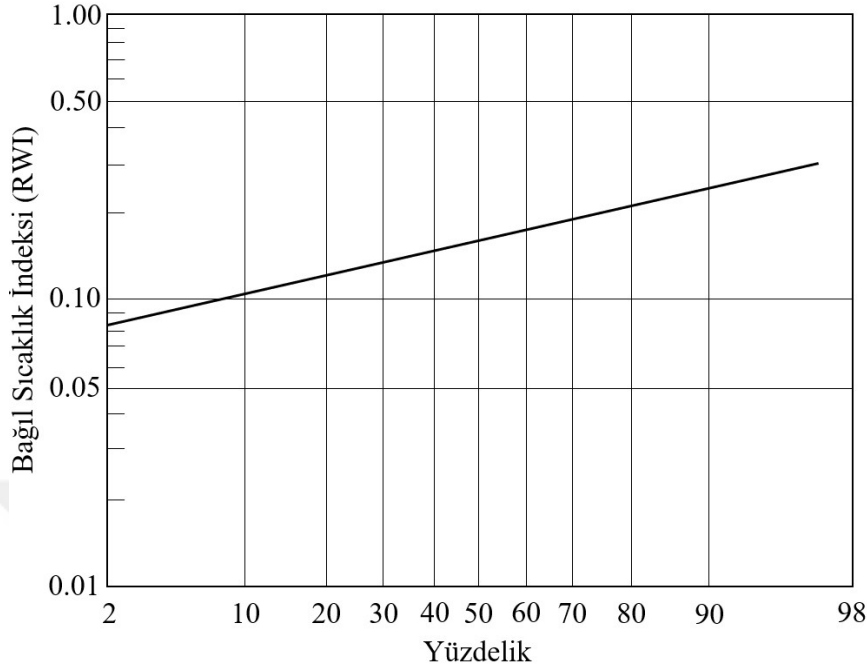
ASHRAE konfor sınıflandırmasını ve buna karşılık gelen RWI değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir [17]. Burada sıcaklık seviyeleri dört farklı kategoriye ayrılmıştır. Bu sayede sıcaklık seviyesi, çeşitli aktivite ve koşul kombinasyonları için niceliksel olarak ifade edilebilmektedir.

Çizelge 3.3 : ASHRAE konfor sınıflandırması ve RWI karşılıkları

ASHRAE Konfor Sınıfı	RWI
Sıcak	0,25
Ilık	0,15
Konforlu	0,08
Serin	0,00

ASHRAE konfor sınıflandırması, frekans dağılımı ve RWI arasındaki nicel ilişki Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Burada farklı RWI değerlerinde kendini konforsuz hisseden ve daha serin bir ortamı isteyen insanların yüzdelik oranının görülmektedir [17]. Şekil

3.19'daki veriler, RWI değerleri arttıkça daha serin bir ortam isteyen insanların yüzdesinin de arttığını göstermektedir.



Şekil 3.19 : Yaz mevsiminde daha serin bir ortam isteyen insanların yüzdesi

Tez çalışması kapsamında denklem 1 ve denklem 2 ile verilen RWI hesaplamalarında kullanılan veriler Çizelge 3.4'te verilmiştir. Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonlarında, ortam hava hızı (v_a) ve buna bağlı olarak hava sınır tabakasının yalıtım etkisi (I_a) değerleri birbirinden farklıdır. Bu değerler Çizelge 3.4'te sırasıyla Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları için aynı hücre içinde verilmiştir.

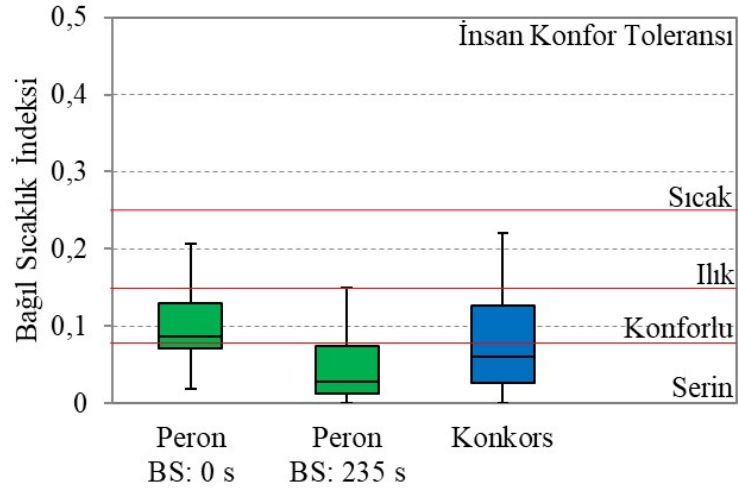
Çizelge 3.4 : RWI hesaplamalarında kullanılan veriler

Aktivite	Yürüme - 4,8 km/h	Ayakta durma veya dolaşma	
Parametre	Konkors Katı	Peron Katı	
		Ulaşılan Anda	235 s Sonrasında
M (W/m ²)	170,35	170,35	139,46
v_a (m/s)	1,0 / 0,5	1,0 / 0,5	1,0 / 0,5
v_b (m/s)	1,52	0,51	0,51
I_a (clo)	0,27 / 0,31	0,34 / 0,41	0,34 / 0,41
I_{cw} (clo)	0,35	0,35	0,38
R (W/m ²)	0	0	0

Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları için ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri için ölçüm verileri ve Çizelge 3.4'te verilen parametreler kullanılarak RWI değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan RWI değerleri kutu grafikler kullanılarak görselleştirilmiştir. Hesaplamalarda işletme saatleri dikkate alınarak sabah saat 06:00

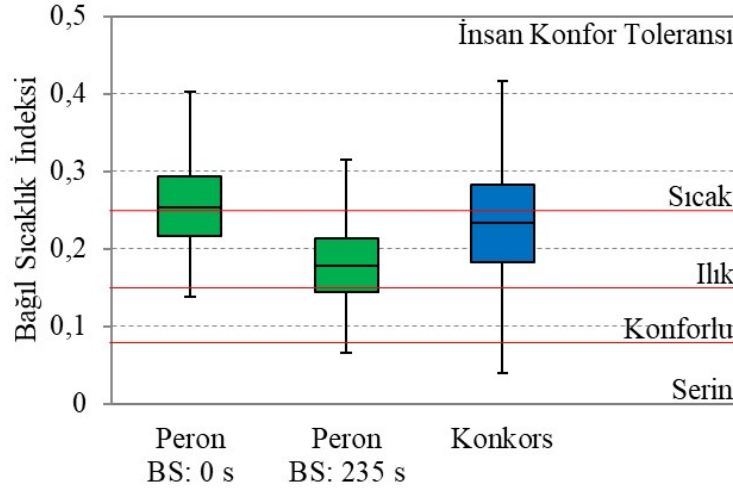
ile akşam saat 23:59 aralığında elde edilen hava hızı, sıcaklık ve bağıl nem verileri kullanılmıştır. Kutu grafiklerde yeşil kutular peron katındaki RWI değerlerini mavi kutular konkors katındaki RWI değerlerini belirtmektedir. Peron katı için 2 farklı senaryo oluşturulmuş ve senaryolar için ayrı ayrı RWI değerleri hesaplanmıştır. İlk senaryoda yolcunun perona iner inmez kapısı açık olan trene yetiştiği ve peronda hiç beklemediği kabulü yapılmıştır. Bu durumda bekleme süresi sıfır saniye olmaktadır (BS: 0 s). İkinci senaryoda yolcunun perona indiği anda trenin kapıları yeni kapanmış ve yolculuk için bir sonraki treni bekleyeceği kabulü yapılmıştır. Bu durumda bekleme süresi 235 s olmaktadır (BS: 235 s). Peron katı RWI hesaplamalarında ilk senaryo için kullanılan metabolik hız ve giysi yalıtımı değerleri konkors katındaki ile aynı olurken ikinci senaryo için yolcuların peronda bekleme süresi dikkate alınarak farklı değerler hesaplanmıştır.

İlkbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu için çizdirilen RWI kutu grafikleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için ortalama RWI değeri 0,1 olarak, peronda 235 s tren beklediği senaryo için ortalama RWI değeri 0,04 olarak hesaplanmıştır. Konkors katı için ortalama RWI değeri 0,08 olarak hesaplanmıştır.



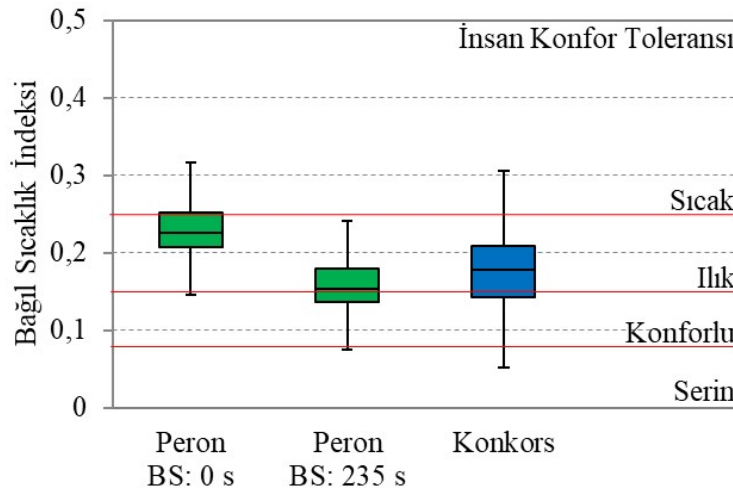
Şekil 3.20 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu ilkbahar mevsimi RWI değerleri

Yaz mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu için çizdirilen RWI kutu grafikleri Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için ortalama RWI değeri 0,26 olarak, peronda 235 s tren beklediği senaryo için ortalama RWI değeri 0,18 olarak hesaplanmıştır. Konkors katı için ortalama RWI değeri 0,23 olarak hesaplanmıştır.



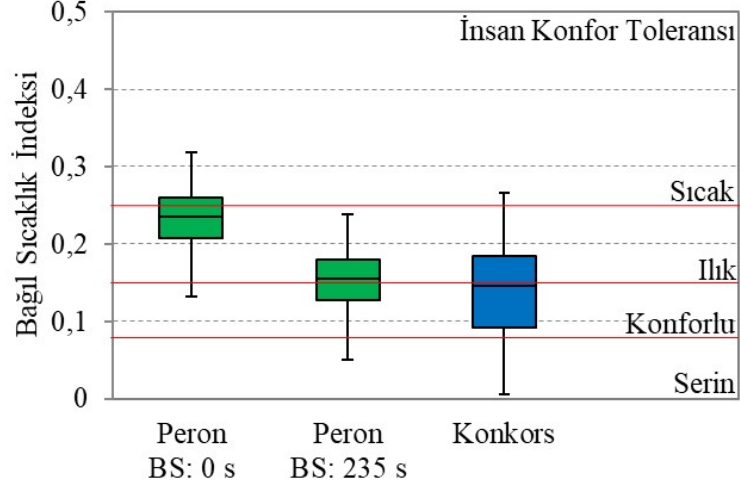
Şekil 3.21 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yaz mevsimi RWI değerleri

Sonbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu için çizdirilen RWI kutu grafikleri Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için ortalama RWI değeri 0,23 olarak, peronda 235 s tren beklediği senaryo için ortalama RWI değeri 0,16 olarak hesaplanmıştır. Konkors katı için ortalama RWI değeri 0,18 olarak hesaplanmıştır.



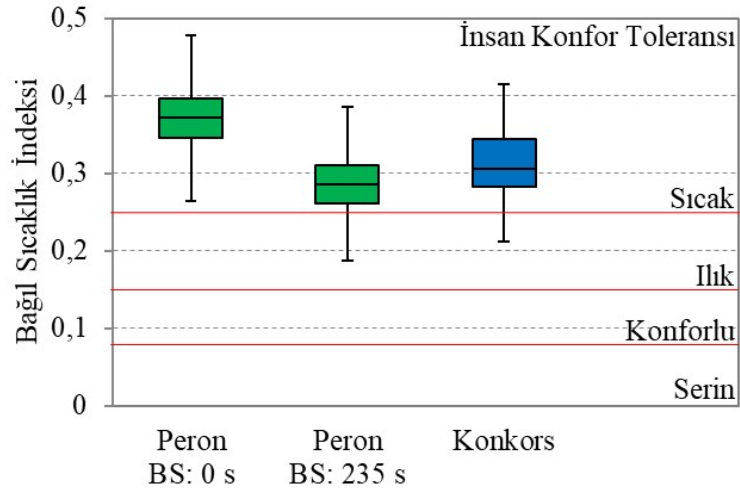
Şekil 3.22 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu sonbahar mevsimi RWI değerleri

İlkbahar mevsiminde Gayrettepe istasyonu için çizdirilen RWI kutu grafikleri Şekil 3.23’te gösterilmiştir. Yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için ortalama RWI değeri 0,24 olarak, peronda 235 s tren beklediği senaryo için ortalama RWI değeri 0,16 olarak hesaplanmıştır. Konkors katı için ortalama RWI değeri 0,14 olarak hesaplanmıştır.



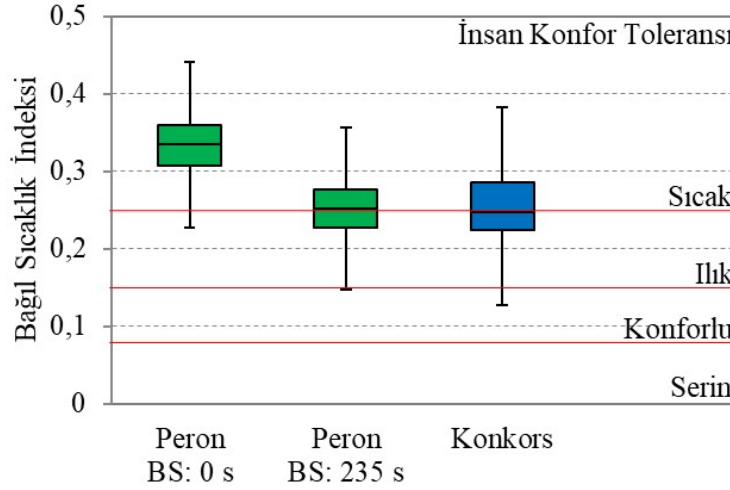
Şekil 3.23 : Gayrettepe istasyonu ilkbahar mevsimi RWI değerleri

Yaz mevsiminde Gayrettepe istasyonu için çizdirilen RWI kutu grafikleri Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için ortalama RWI değeri 0,37 olarak, peronda 235 s tren beklediği senaryo için ortalama RWI değeri 0,29 olarak hesaplanmıştır. Konkors katı için ortalama RWI değeri 0,31 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.24 : Gayrettepe istasyonu yaz mevsimi RWI değerleri

Sonbahar mevsiminde Gayrettepe istasyonu için çizdirilen RWI kutu grafikleri Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için ortalama RWI değeri 0,34 olarak, peronda 235 s tren beklediği senaryo için ortalama RWI değeri 0,25 olarak hesaplanmıştır. Konkors katı için ortalama RWI değeri 0,26 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.25 : Gayrettepe istasyonu sonbahar mevsimi RWI değerleri

İstasyonlarda peron ve konkors katları için hesaplanan ortalama RWI değerleri incelendiğinde ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinin tamamında aç-kapa tip Gayrettepe istasyonunda ortalama RWI değerlerinin delme tünel tip Şişli-Mecidiyeköy istasyonuna göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu farkın ortaya çıkmasının sebeplerinden bir tanesi Gayrettepe istasyonunda ölçülen hava hızı değerinin Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda ölçülenin yarısı mertebesinde olmasıdır. Aç-kapa tip istasyonların kesit alanları genellikle delme tünel tip istasyonlardakine göre daha büyüktür ve piston etkisi sonucu oluşan hava hızı istasyon bölgesinde kesit alanı arttıkça azalmaktadır.

İlkbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu dışında incelenen tüm mevsimlerde 2 istasyonda da ASHRAE konfor sınıflandırması açısından arzu edilen ısı konfor değerlerinin sağlanamadığı belirlenmiştir. Yolcuların peronda 235 s beklemesi sonucu metabolik hızda meydana gelen düşüşe bağlı olarak RWI değerlerinde de azalma olmuştur. Hesaplanan ortalama RWI değerleri ve Şekil 3.19’da sunulan grafik birlikte değerlendirildiğinde Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda yolcuların çoğunluğunun ve Gayrettepe istasyonunda da hemen hemen yolcuların tamamının özellikle yaz ayında daha serin bir ortam istediği ortaya çıkmıştır.

4. ACİL DURUM YANGIN İNCELEMELERİ

Metrolarda acil durum şartları genel olarak trenlerin durması veya aşırı seviyede yavaşlaması, istenmeyen dış etkenler neticesinde iç hava kalitesinin bozulması ve yangın gibi olağanüstü durumların ortaya çıkması olarak tanımlanabilir. İstasyonlarda ve tünellerde meydana gelecek acil durumlar personel ve yolcular açısından ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Olası bir tren yangınında yolcuların güvenli ve uygun ortam şartlarında istasyondan tahliye edilebilmesi için acil durum havalandırma sisteminin yeterliliği önem arz etmektedir.

Bu bölümde M2 Hacıosman-Yenikapı metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe metro istasyonları peronlarında vagon başına 6 MW ve 25 MW yangın yüküne sahip trenlerde çıkan yangın için Autodesk CFD yazılımı kullanılarak HAD analizleri yapılmıştır. Analizlerde farklı havalandırma stratejileri (egzoz-egzoz, egzoz-basma) ve debileri için istasyon içerisindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerleri incelenmiş ve yolcuların güvenli olarak tahliye edilebilmesi için uygun acil durum havalandırma fan debileri belirlenmiştir.

İstasyonlarda 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet tünel havalandırma fanı bulunmaktadır. Tünel havalandırma şaftlarında bulunan motorlu yangın damperleri vasıtasıyla yangın olan taraftan egzoz veya basma yapılabilir. İstasyon yangın senaryolarında ortaya çıkan sıcak hava ve dumanın ortama fazla yayılmadan hızlıca dışarı atılması için tüm fanların egzoz modunda çalışması tercih edilmektedir. Bu durum istisnai istasyon mimari tasarımları hariç çoğu senaryoda daha olumlu sonuçlar vermektedir. Analizlerde istasyonlardaki mevcut fan özellikleri ve tasarımda kabul edilen yangın yükü (18 MW ve konvektif ısı kesiri 0,8) dikkate alınmamıştır. Çalışmanın amacı mevcut tasarımın sorgulanması veya doğrulanması değildir. Bu sebeple mevcut sistemlerden bağımsız olarak 6 MW ve 25 MW yangın yükleri için değerlendirme kriterleri çerçevesinde optimum fan debileri belirlenmiştir. Analizlerde 40-120 m³/s aralığındaki tünel havalandırma fan debileri için birçok analiz yapılmış ve mümkün olan en düşük kapasiteli fanlar kullanılarak gerekli ortam şartlarının sağlandığı analiz sonuçları çalışmada verilmiştir. Şişli-

Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü orta hızda yangın büyüme eğrisi için uygun sonuç alınan senaryo, aynı tünel havalandırma fan debileri kullanılarak çok hızlı yangın büyüme eğrisine sahip 25 MW yangın yükü senaryosu için tekrarlanmıştır. Yine Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için tüm tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırıldığında uygun sonuç alınan senaryo, kuzey yönde olan tünel havalandırma fanları basma güney yönde olan tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırılarak tekrarlanmıştır. Gayrettepe istasyonunda 25 MW yangın yükü için yapılan analizlerde istasyon mimari tasarımı sebebiyle tünel havalandırma fan debileri artırılrsa da dumanın konkors katına gitmesi engellenememiştir. Bu sebeple tünel havalandırma fanlarına ilave olarak peron altı egzoz sistemi de devreye sokulmuştur. Yapılan çalışmalara ilave olarak mimari tasarımda bazı revizyon önerileri yapılarak dumanın konkors katına ilerlemesi engellenip, tahliyenin daha güvenli hale getirilebileceği öngörülmüştür. Mimari tasarımda revizyon olarak konkors katının uç noktalarına duvar örölüp daha kritik olan 25 MW yangın yükü için analiz tekrarlanmıştır.

Analizlerde istasyondaki bir tren yangınında; en az yolcuların tahliye edilme süresi boyunca, acil durum havalandırma sisteminin yeterliliği incelenmiştir. Çalışmada yolculara güvenli tahliye yollarının ve itfaiye personeline yangına ilk müdahale edebilme imkanının sağlandığı NFPA 130 standardında yer alan performans kriterleri çerçevesinde gösterilmiştir. NFPA 130 standardına göre peron katı 4 dk ve istasyon 6 dk süre içerisinde tahliye edilmelidir. Bu süreler sağlanamadığı zaman hesaplanan tahliye süresi boyunca tahliye yollarının tahliyeye uygunluğu mühendislik analizleri ile kanıtlanmalıdır [49].

HAD analizleri için istasyonların 3 boyutlu katı modelleri oluşturulmuştur. Peronda tren yangını senaryosu için tren istasyon içine yerleştirilmiştir. Tren yangının başlaması ve fan gruplarının devreye girmesi ile ortaya çıkan hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesine ait değerlendirmeler yapılmıştır.

4.1 Yangın Yükü, Yolcu Tahliye Hesabı ve Yangın Senaryoları

4.1.1 Yangın yükü

Analizlerde yangın yükü olarak, DIN 5510 standardına uygun olan ve olmayan araçlar için hazırlanan ve Şekil 4.1’de gösterilen grafikten yola çıkılarak 6 MW ve 25 MW

değerleri alınmıştır [78,79]. Bu sayede yangın yükü açısından en düşük ve en yüksek değerlerin oluşturacağı etkiler ortaya konacaktır.

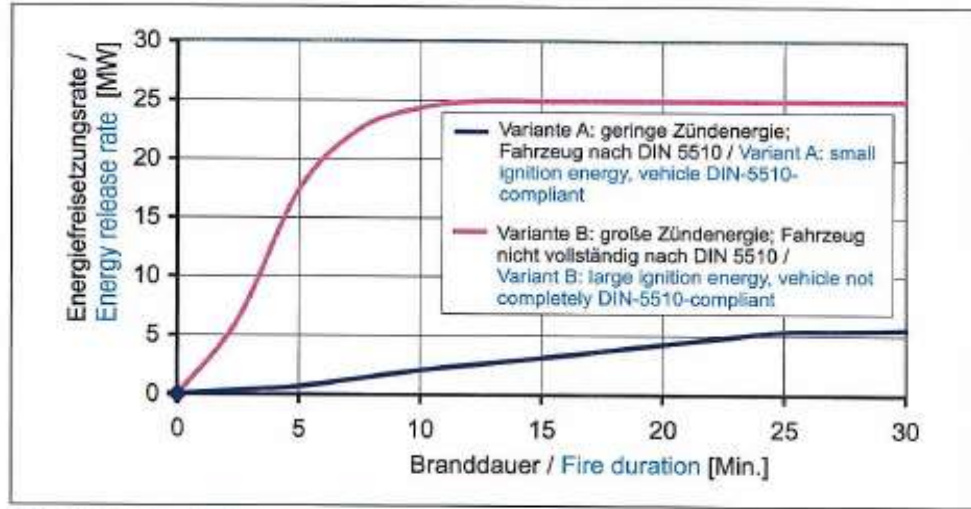


Bild 1/4: Bandbreite der Energiefreisetzungsrate bei Fahrzeugbränden [7a/2] [6a/9] (aus [6a/11])

Figure 1/4: Range of energy release rates in vehicle fires [7a/2] [6a/9] (from [6a/11])

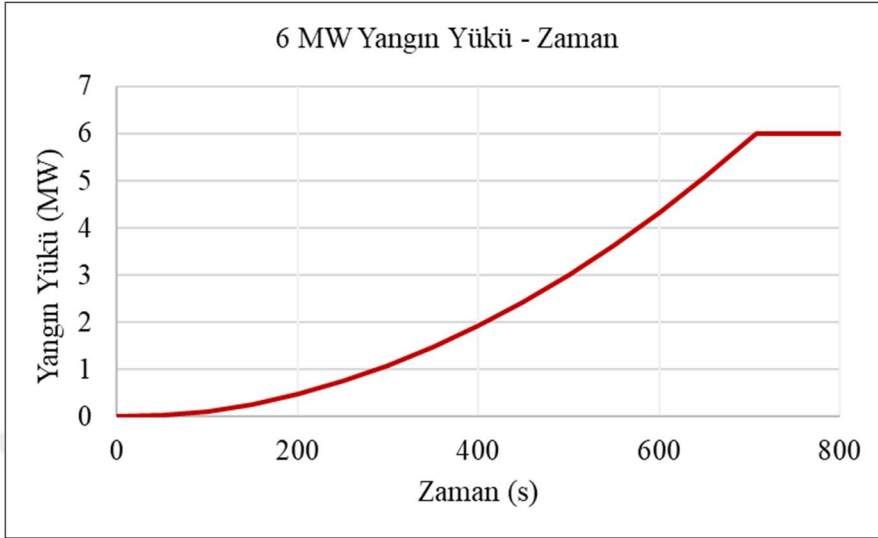
Şekil 4.1 : DIN 5510 araç yangın büyüme eğrileri [79]

Yangının zamana göre gelişimini simüle etmek amacıyla “ $\alpha-t^2$ ” yangın modeli kullanılmıştır. Yangın büyüme katsayısı olan α değeri NFPA 204 standardında belirtilen ve Çizelge 4.1’de verilen yangın yükünün 1000 kW değerine ulaşma süresi dikkate alınarak belirlenmiştir [80]. Burada yangın 1000 kW değerine 0-75 s aralığında ulaşıyorsa çok hızlı, 75-150 s aralığında ulaşıyorsa hızlı, 150-300 s aralığında ulaşıyorsa orta hızlı ve 300-600 s aralığında ulaşıyorsa yavaş gelişen yangın olarak kategorize edilmiştir. Analizlerde orta sınıfta gelişen yangın için $\alpha=12 \text{ W/s}^2$ olarak seçilmiştir. İlave olarak ortaya çıkacak sonuçların görülmesi açısından Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda çok hızlı sınıfta gelişen yangın senaryosu için analiz yapılmıştır. Bu analizde Şekil 4.1’de gösterilen ve DIN 5510 standardına uygun olmayan araç için geçerli olan yangın büyüme eğrisi kullanılmıştır. Analizlerde yangın esnasında ortaya çıkan enerjinin tamamının taşınım yoluyla çevreye iletildiği kabulü yapılmıştır.

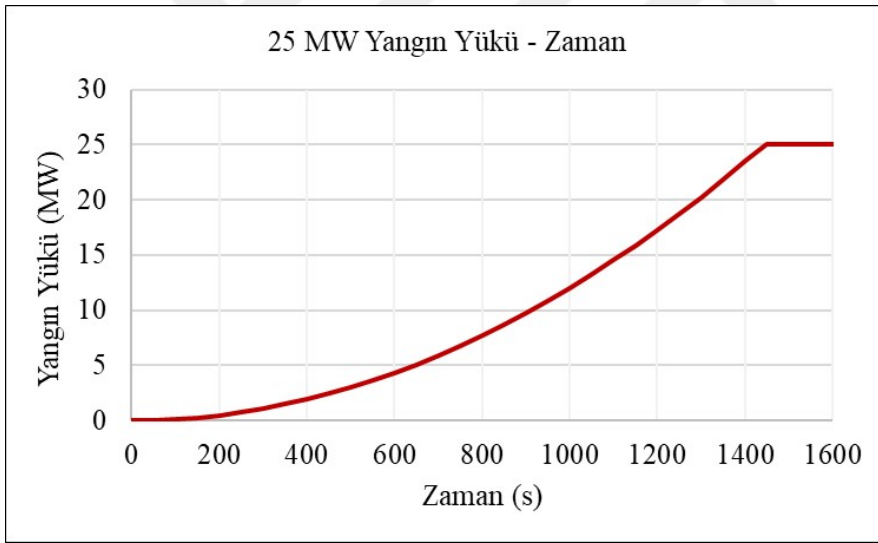
Çizelge 4.1 : NFPA 204 yangın sınıflandırması

Yangın Sınıfı	1000 kW’a Ulaşma Süresi (s)
Çok Hızlı	75
Hızlı	150
Orta	300
Yavaş	600

Yangın yükü ve $\alpha=12 \text{ W/s}^2$ yangın büyüme katsayısına bağlı olarak olası bir tren yangınında ortaya çıkan enerji miktarını gösteren yangın büyüme eğrileri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : 6 MW yangın büyüme eğrisi



Şekil 4.3 : 25 MW yangın büyüme eğrisi

4.1.2 Yolcu tahliye hesabı

NFPA 130 standardında acil durumlarda metro istasyonlarında yolcuların peron katını ve istasyonu ne kadar sürede tahliye edeceğine yönelik hesap yöntemi detaylı olarak anlatılmaktadır [49]. Standartta acil durumlarda yolcuların peron katını 4 dk veya daha kısa sürede tahliye etmesi ve perondaki en uzak noktadan güvenli bir alana 6 dk veya daha kısa sürede ulaşması gerektiği belirtilmektedir. Konkors katı, peron katında meydana gelen bir yangının etkilerinden mesafe, geometrik düzenleme, yangın bölümlemesi veya uygun bir acil durum havalandırma sistemi ile korunuyorsa güvenli

alan olarak kabul edilebilmektedir. Standartta geçen tahliye süreleri ve yolculuk mesafeleri, malzeme ısı salınım hızları, istasyon geometrisi, yangın koruma sistemleri ve acil durum havalandırma sistemleri gibi tahliye sürelerini ve yaşanabilirliği etkileyen faktörleri değerlendiren bir mühendislik analizi yapılması sonucunda değiştirilebilir.

Yolcu tahliye hesaplamalarında kullanılan referans değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Hesaplamalar için gerekli M2 metro hattına ve istasyonlara ait özellikler Çizelge 4.3’te verilmiştir.

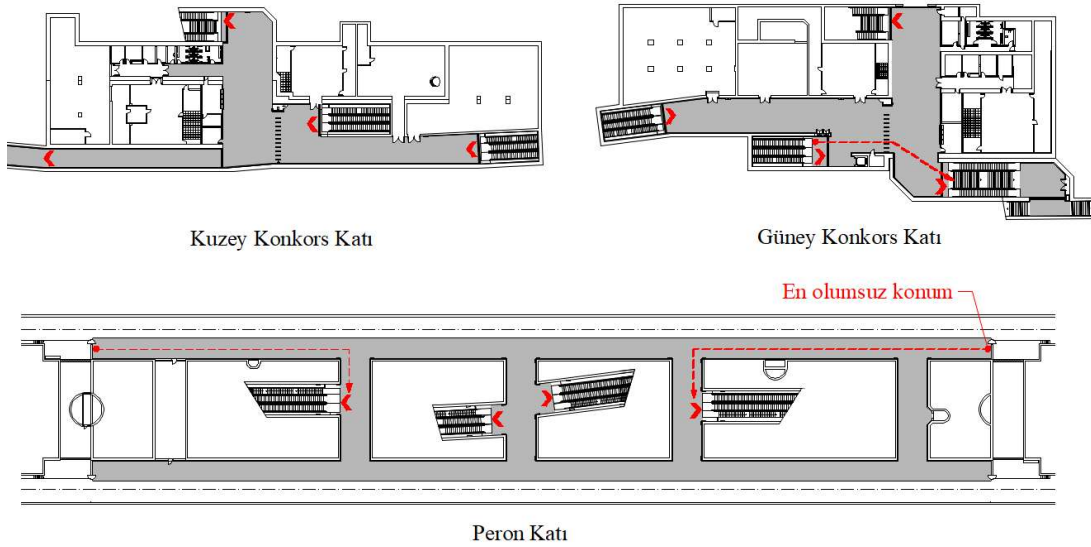
Çizelge 4.2 : Yolcu tahliye hesabı referans değerleri

Parametre	Birim	Değer	Referans
Büyütme Faktörü	katsayı	1	[81]
Pik Saat Faktörü	katsayı	1,25	[81]
Kaçırılan Dizi Süre Aralığı Faktörü	katsayı	2	[81]
Merdiven Kapasitesi (normal işletme)	kişi/0,60m-dk	40	[81]
Merdiven Kapasitesi (acil durum)	kişi/dk/m	56	[49]
Yürüyen Merdiven Kapasitesi (normal işletme) (0,65 m/s)	kişi/dk-1m genişlik	120	[82]
Yürüyen Merdiven Kapasitesi (NFPA 130, A.5.3.5.3 şartları sağlanır ise)	kişi/m-dk	75	[49]
Turnike Kapasitesi - Giriş (normal işletme)	kişi/dk	30	[81]
Turnike Kapasitesi - Çıkış (normal işletme)	kişi/dk	40	[81]
Turnike Kapasitesi (kapı tipi) (acil durum)	kişi/dk	50	[49]
Turnike Kapasitesi (kollu) (acil durum)	kişi/dk	25	[49]
Turnike Acil Kaçış Kapısı	kişi/dk	60	[81]
Peron Kapasitesi (normal işletme)	m ² /kişi	0,5	[81]
Peron Kapasitesi (izdiham)	m ² /kişi	0,28	[49]
Bilet Holü Kapasitesi	m ² /kişi	1	[83]
Yürüme Hızı (peron-yatay) (acil durum)	m/dk	37,7	[49]
Yürüme Hızı (konkors-yatay) (acil durum)	m/dk	61	[49]
Yürüme Hızı (yukarı merdiven) (acil durum)	m/dk	14,6	[49]
Peron, Koridor ve Rampa Kapasitesi (yatayda) (acil durum)	kişi/dk/m	82	[49]
Kapı ve Geçitler Çıkış Kapasitesi (acil durum)	kişi/dk	60 tek kanat, 82 çift yön çok kanat	[49]

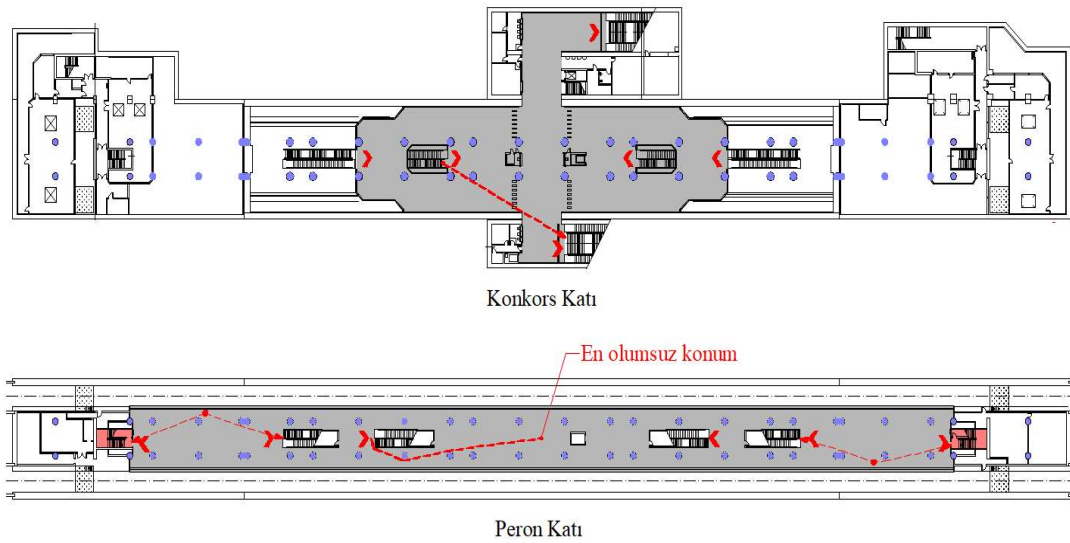
Çizelge 4.3 : M2 metro hattı ve istasyon verileri

Parametre	Birim	Şişli-Mecidiyeköy	Gayrettepe
Sefer Sıklığı (headway)	s	235	235
Peron Boyu	m	180	180
Peron Eni (Brüt) - Orta	m	8,1	12,6
Uyarı Bandı	m	0,5	0,5
Vagon Sayısı	adet	8	8
Araç Kapasitesi	kişi/araç	234	234

Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları için peron katındaki en olumsuz konumdan istasyon dışına ulaşana kadar yolcunun takip edeceği güzergahlar belirlenmiş olup sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Yolcuların konkors katına ulaştıktan sonra en yakın çıkışı tercih edeceği kabulü yapılmıştır.



Şekil 4.4 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yolcu tahliye güzergahı



Şekil 4.5 : Gayrettepe istasyonu yolcu tahliye güzergahı

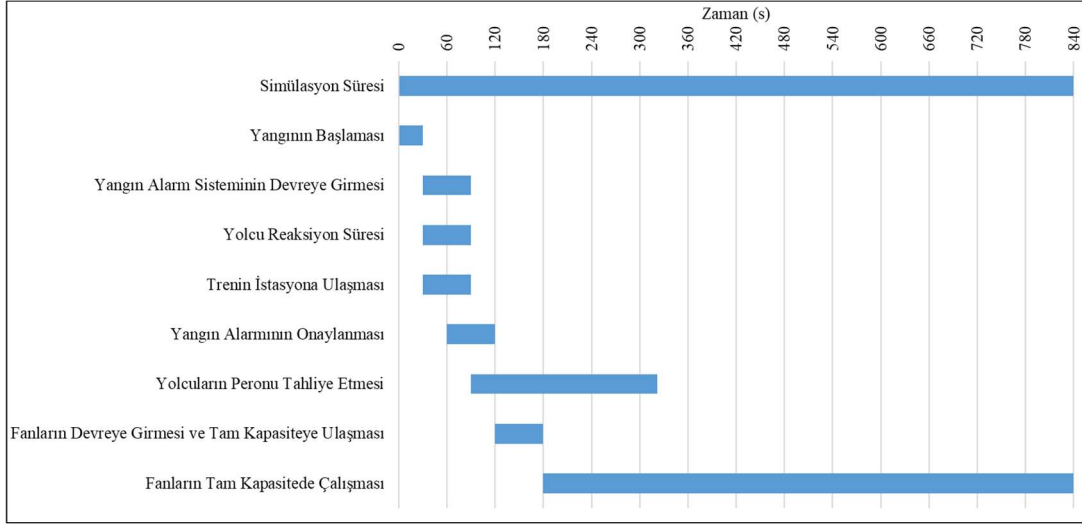
NFPA 130 standardına göre yapılan hesaplamalar sonucunda Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 5,36 dakikada (322 s), Gayrettepe istasyonunda 4,21 dakikada (253 s) yolcuların peron katını tahliye ettiği belirlenmiştir. Peron katında en uzak noktada olan bir yolcunun, güvenli bir alana çıkıncaya kadar izlediği yolda geçirdiği süre Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 8,53 dakika (512 s), Gayrettepe istasyonunda 7,22 dakika (433 s) olarak hesaplanmıştır.

Hesaplamalar yatay ve düşey yürüme mesafeleri, yürüme hızları ve son yolcunun peron çıkışındaki bekleme süresi dikkate alınarak yapılmıştır. Yolcu tahliye hesaplamaları istasyonların NFPA 130 standardında belirtilen 4 dk ve 6 dk kriterlerini sağlamadığını ortaya koymuştur. Bu kapsamda mühendislik analizleriyle hesaplanan yolcu tahliye süresi sonuna kadar istasyonlarda ortam şartlarının tahliyeye imkan tanıdığı kanıtlanmalıdır.

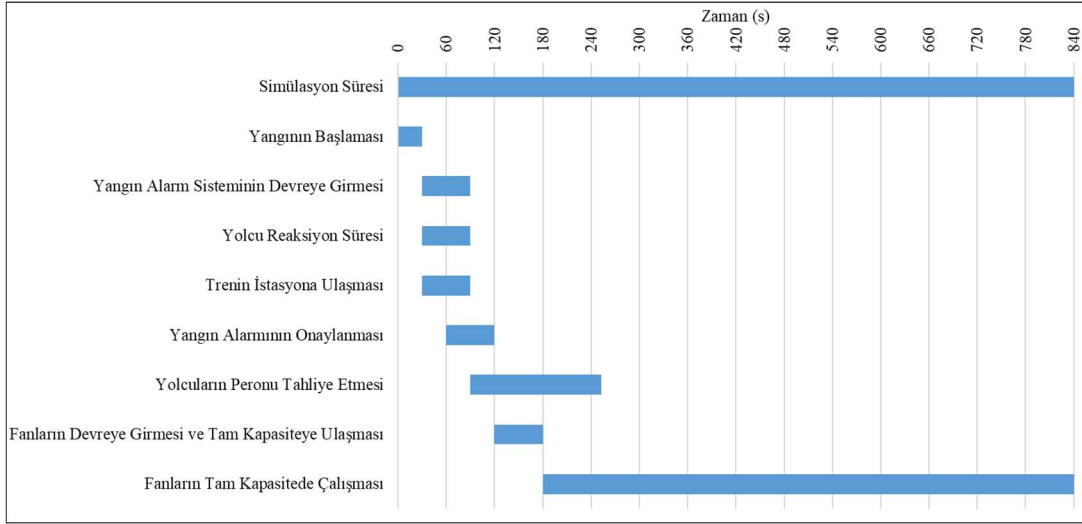
4.1.3 Yangın senaryoları

Analizlerin gerçekle uyumlu olması ve doğru yorumlanabilmesi için öncelikle tutarlı bir senaryo oluşturulmalıdır. Meydana gelebilecek hadise ve olaylar dizisi $t=0$ anından itibaren kurgulanmalı ve akış şeması oluşturulmalıdır. İstasyonlar için oluşturulan yangın senaryosu zaman akış şemaları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Burada tren yangınının tünelde başladığı düşünülmekte ve yanan trenin ilerlemeye devam ederek en yakın istasyona gelebildiği varsayılmaktadır.

İstasyonlar arası mesafe dikkate alınarak trenin en yakın istasyona 60 s gibi kısa bir süre içinde ulaştığı ve akabinde yolcu tahliyesi başladığı öngörülmüştür. Fanlar yangının başlamasından 120 s sonra devreye girecek olup, 180. saniyede tam kapasiteye ulaşacak şekilde ayarlanmıştır. NFPA 130 standardına göre yapılan hesaplamalar doğrultusunda Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 5,36 dakikada (322 s), Gayrettepe istasyonunda 4,21 dakikada (253 s) yolcuların peron katını tahliye ettiği belirlenmiştir. Analizler yangın yükünün maksimum seviyeye ulaştığı süre boyunca devam etmiş ve hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.6 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yangın senaryosu zaman akış şeması



Şekil 4.7 : Gayrettepe istasyonu yangın senaryosu zaman akış şeması

Metro hattı istasyon ve tünellerinde bulunan tüm sistemler, hat için oluşturulan özel bir kontrol merkezinden kumanda edilebilmektedir. Ayrıca istasyonlardaki ekipmanlar ilgili istasyonda bulunan kontrol odalarından da kumanda edilebilmektedir. Sistemlerin tamamı tanımlanan farklı senaryolar için senkronize çalışabilmekte ve gerekiyorsa kapalı duruma geçebilmektedir. Elektromekanik sistemlerle ilgili peron tren yangını senaryoları için yapılan genel kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Asansörlerin konkors katına hareket etmesi ve konkors katında beklemesi, görevli harici kullanılamaması (yalnızca kartla veya şifre ile hareket etme),
- Yürüyen merdivenlerin peron yönüne doğru çalışanlarının önce durdurulması akabinde mümkünse ters yönde çalıştırılması,

- Tüm turnikelerin çıkış yönünde geçişe uygun hale gelmesi veya serbest moda geçmesi,
- Senaryo gereği çalışması gereken tünel havalandırma fanları ve peron altı egzoz fanları hariç tüm fanların ve iklimlendirme sistemlerinin kapalı moda geçmesi,
- Piston etkisi by-pass damperlerinin kapalı konuma geçmesi.

Senaryolarda;

- İstasyonda bulunan aydınlatma, yürüyen merdiven, asansör vb. ekipmanlardan kaynaklanan ısı yükleri,
- İnsanlardan kaynaklanan ısı yükleri,
- Tren kaynaklı ısı yükleri

ihmal edilmiş olup,

- Tren dışında istasyonda bulunan kaplama, pano vb. hiçbir materyalin tutuşmadığı,
- Yangının sadece bir vagona çıktığı ve diğer vagonlara sıçramayacağı,
- Peron altında yer alan egzoz boşluklarından eşit miktarda havanın emildiği,
- Fanların arıza moduna geçmeyeceği

kabulleri yapılmıştır.

4.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yangın Analizi Metodolojisi

HAD analizi yapılarak akışkanlar için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri bilgisayar yardımı ile simüle edilerek çözülebilmektedir. Çalışma kapsamında incelenen acil durum senaryoları özelinde HAD analizleri yapılmasının amacı hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana bağlı değişimini takip etmek ve istenen ortam şartlarının oluşup oluşmadığını belirlemektir. Tünel havalandırma sistemleri, yolcu tahliyesi süresince ve itfaiye müdahalesi başlangıcında, tahliye yollarını ve itfaiye erişim güzergahlarını duman ve sıcak havadan arındırmaya yetecek kapasitede olmalıdır. Yapılan analizlerle öngörülen havalandırma stratejisinin geçerliliği ve seçilen fan debilerinin yeterliliği test edilir.

4.2.1 Matematiksel model

Matematiksel model, bir süreci ya da sistemin davranışını matematiksel olarak temsil eden denklemler takımıdır. Modelin çözülmesi yoluyla gerçek sistemin davranışı incelenebilir ya da sistemden istenen sonuçların alınabilmesi için gereken koşullar belirlenebilir. Akışkan akışı ve ısı transferi için ana denklemler süreklilik, Navier-Stokes momentum, enerji ve ısı taşınım denklemleri denklem 4.1 ile denklem 4.7 arasında verilmiştir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

X-Momentum Denklemi:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Y-Momentum Denklemi:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Z-Momentum Denklemi:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Enerji Denklemleri:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{net}''' \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$Q_{net}''' = \Phi + \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Yukarıdaki denklemlerde Q_{net}''' net hacimsel ısı üretimi ve Φ viskoz ısı üretimi terimleridir. Yangın analizlerinde problemin çözümü için yukarıda verilen denklemlere ek olarak türbülans modeli denklemleri kullanılmaktadır. Autodesk CFD yazılımı tarafından kullanılan türbülans modellerinin birçoğu, girdap viskozitesini ve girdap iletkenliği değişkenlerini belirlemek için iki denklemlilik bir model kullanır. İki denklem türbülanslı kinetik enerji ve türbülanslı enerji dağılımını tanımlar. Girdap viskozitesi (μ_t) ve girdap iletkenliği (k_t) denklem 4.8 ve denklem 4.9 kullanılarak hesaplanır.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad (4.9)$$

Yukarıdaki denklemlerde C_μ ampirik sabit, ρ yoğunluk, K türbülanslı kinetik enerji, ε türbülanslı enerji dağılım hızı, C_p sabit basınçta özgül ısı ve σ_t genellikle 1,0 olarak alınan türbülanslı Prandtl sayısıdır.

Çalışmada HAD analizlerinde k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. K-epsilon türbülans modeli denklemleri denklem 4.10 ve denklem 4.11’de verilmiştir.

Türbülanslı Kinetik Enerji (TKE) Denklemi:

$$\begin{aligned}
 & \rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho u \frac{\partial K}{\partial x} + \rho v \frac{\partial K}{\partial y} + \rho w \frac{\partial K}{\partial z} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \varepsilon \\
 &+ \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right. \\
 &\left. + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Türbülanslı Enerji Dağılımı (TED) Denklemi:

$$\begin{aligned}
 & \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] \\
 &- C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K} C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{K} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right. \\
 &\left. + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Yukarıdaki denklemlerde σ_K ve σ_ε türbülanslı Schmidt sayıları, C_1 ve C_2 ampirik sabitlerdir.

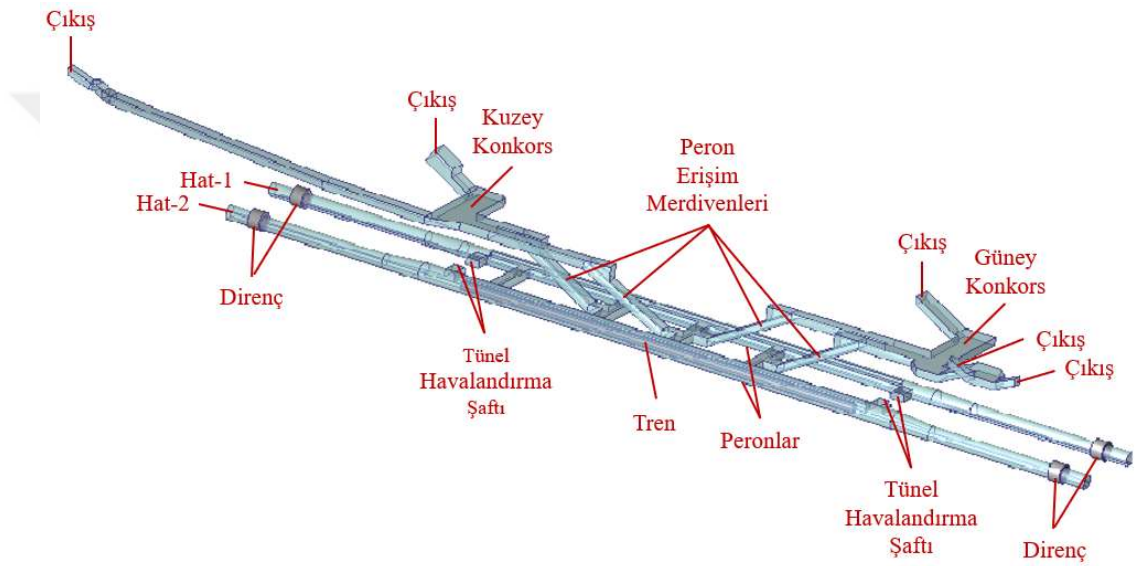
4.2.2 İstasyon ve tren HAD yangın analizi modelleri

İstasyonların ve tren HAD yangın analizi modelleri hazırlanırken gerçek mimari tasarımlara göre bazı optimizasyonlar yapılmıştır. Bu optimizasyonlar kullanılan analiz programında çözüm kolaylığı sağlayabilmek açısından önem arz etmektedir. Bu sayede çözüm ağı oluştururken meydana gelecek keskin köşe, yüzey örtüşmemesi gibi problemlerin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Şişli-Mecidiyeköy, Gayrettepe istasyonlarının ve trenin HAD yangın analizi için oluşturulan 3 boyutlu modelleri sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

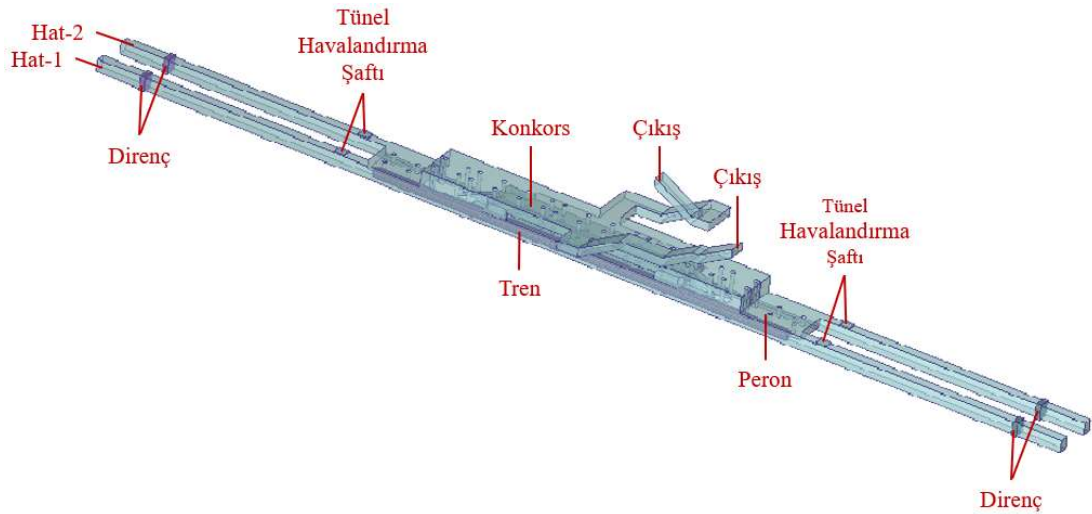
HAD yangın analizi modelleri hazırlanırken yapılan kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Yürüyen merdiven basamakları ayrıntılı olarak çizilmemiş, eğimli düz bir yüzey olarak oluşturulmuştur.

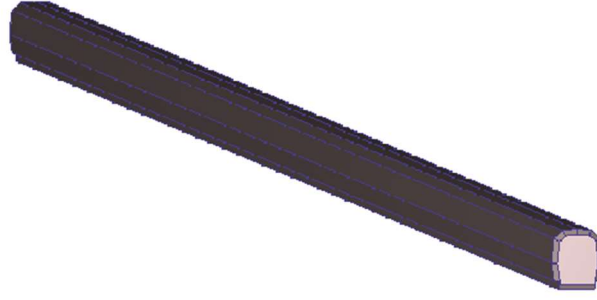
- Yaklaşma ve uzaklaşma tünelleri modele eklenmiştir.
- Her iki yönde de belirli uzunluklarda tünel devamlılığını temsil edecek şekilde direnç tanımlanmıştır.
- Tünel havalandırma şaftlarının sadece hatta bağlantısı modellenmiştir.
- Gayrettepe istasyonunda konkors katının üstünde bulunan ve yüzeye çıkış merdivenlerindeki sahanlıklardan erişim sağlanan ilave katlar ihmal edilmiştir.
- Tren modellenirken dış ölçüleri dikkate alınıp kapı ve cam bölgelerindeki girinti/çıkıntılar ihmal edilmiştir.



Şekil 4.8 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu 3 boyutlu HAD yangın analizi modeli



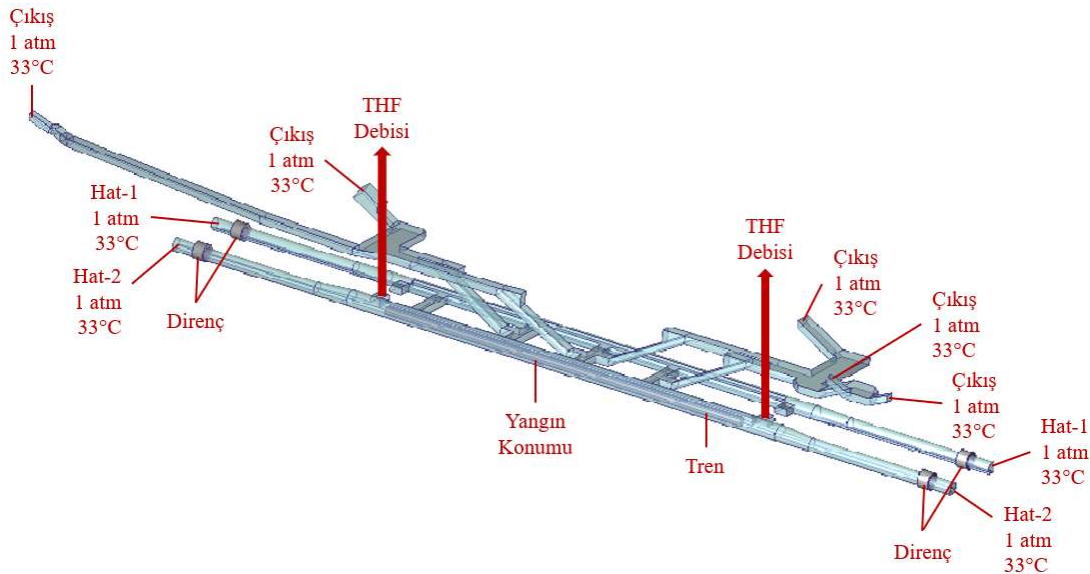
Şekil 4.9 : Gayrettepe istasyonu 3 boyutlu HAD yangın analizi modeli



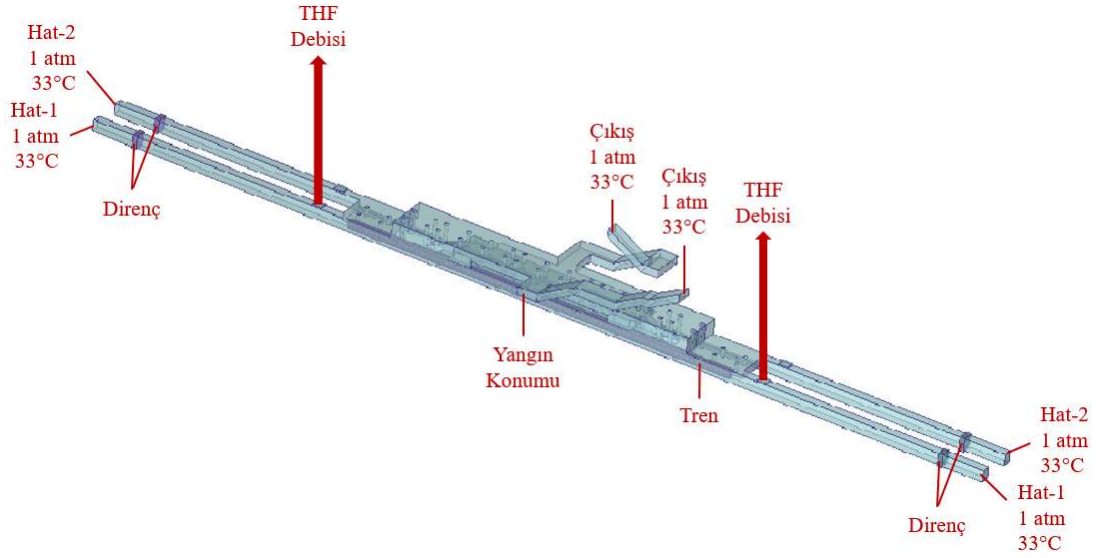
Şekil 4.10 : Tren 3 boyutlu HAD modeli

4.2.3 Yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları

HAD analizinde yangının, peronda yer alan 8'li bir tren dizisinin ortasına yakın bir konumda vagonun alt kısmında bulunan bogi sisteminde meydana geldiği varsayılmıştır. Yangının tek vagona çıktığı ve diğer vagonlara yayılmayacağı kabulü yapılmıştır. Başlangıç koşulu olarak tüm hacimlerde ortam sıcaklığı 33 °C ve gösterge basıncı 0 Pa olarak kabul edilmiştir. Duvarlara kaymaz sınır koşulu uygulanmıştır. Modelin tüm giriş-çıkış yüzeylerine sınır şartı olarak 0 Pa gösterge basıncı tanımlanmıştır. Farklı yangın yükleri için hazırlanan yangın eğrileri yazılıma girilmiştir. Tünel havalandırma şaftlarından yanan aracın olduğu hatta istasyonda tahliye için uygun ortam şartlar sağlanana kadar farklı miktarlarda hava debileri girilerek egzoz yapılmıştır. Komşu istasyona kadar devam eden tüneller boyunca oluşacak dirençler hesaplanarak modele direnç olarak eklenmiştir. Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları HAD yangın analizi yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



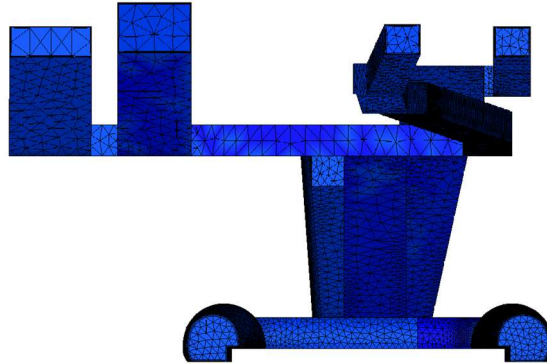
Şekil 4.11 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları



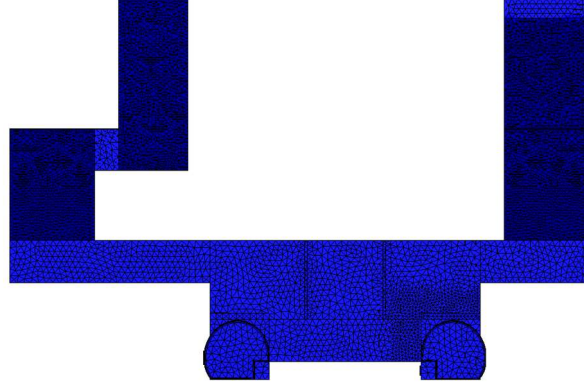
Şekil 4.12 : Gayrettepe istasyonu yangın konumu, başlangıç ve sınır koşulları

4.2.4 HAD modelinin çözüm ağ yapısı (mesh)

HAD analizlerinin doğruluğu ve güvenilirliği, büyük ölçüde kullanılan mesh'in kalitesine bağlıdır. Mesh, modelin geometriye uygun bir şekilde bölünmesi ve elemanlara ayrılmasıyla oluşur. Bu süreç, analizlerin doğruluğunu artırmak için hassas bir şekilde tasarlanmalıdır. Eleman boyutlarının büyük olması analiz hassasiyetini düşürürken gereğinden küçük olması da analiz süreçlerinin çok uzamasına ve muhtemel hesap hatalarının artmasına sebep olmaktadır. Autodesk CFD yazılımı CAD modelleri için geometrik analiz yaparak en uygun mesh boyutunu ve dağılımını belirleyebilmektedir. Ön analizler yapılarak elde edilen sonuçlara dayalı olarak mesh yapısının kademeli iyileştirilmesi, çözüm doğruluğunu artırmaktadır. Yapılan ön analizler sonucunda istasyonlar için optimum sonlu eleman sayısının 3-3,5 milyon mertebesinde olmasının yeterli olduğu belirlenmiştir. Meshlerde 4 köşeli ve üçgen yüzeyli tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonlarına ait mesh görüntüleri sırasıyla Şekil 4.13 v3 4.14'te gösterilmiştir.



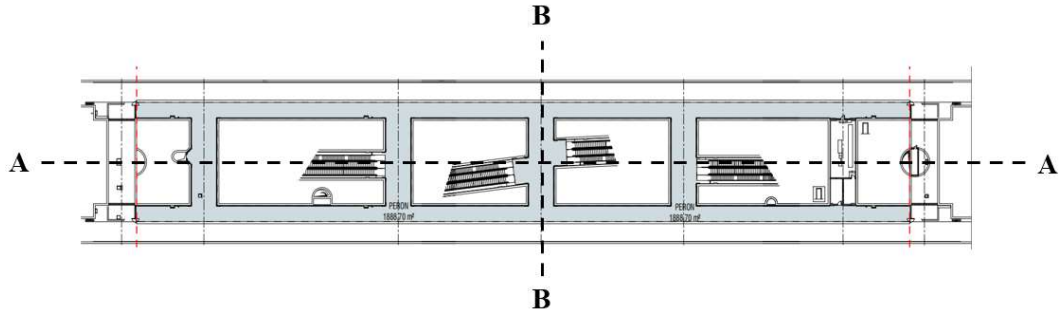
Şekil 4.13 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu mesh görünümü



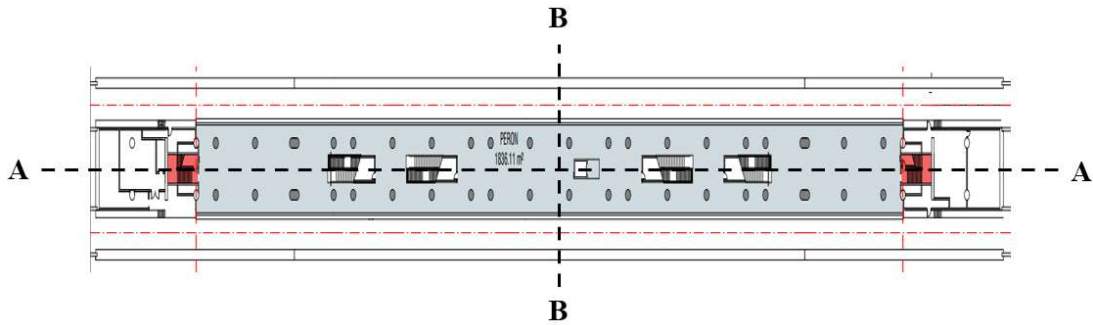
Şekil 4.14 : Gayrettepe istasyonu mesh görünümü

4.2.5 HAD yangın analizi değerlendirme kriterleri

HAD yangın analizleri sonucunda elde edilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerleri NFPA 130 standardında belirtilen limitlere göre değerlendirilmiştir [49]. Analizlerde yanan vagonun yakınında oluşan yüksek sıcaklık ve düşük görüş mesafesi değerleri dikkate alınmamıştır. Sonuçlar NFPA 130 standardına uygun olarak peron ve konkors katlarında zeminden 2 m yükseklikte incelenmiştir. Ayrıca peron katından konkors katına duman geçişi olup olmadığının belirlenmesi için düşey doğrultuda da düzlemler oluşturulmuştur. Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları için düşeyde oluşturulan düzlemler sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu düşey düzlem konumları



Şekil 4.16 : Gayrettepe istasyonu düşey düzlem konumları

4.2.5.1 Hava hızı

Yolculu alanlarda NFPA 130 standardı gereğince hava hızı, yolcunun taze havayı hissedebilmesi için 0,75 m/s den küçük olmamalı ve 11 m/s değerini aşmamalıdır [49]. Yolcuların tahliye süresi boyunca hareket kabiliyetine olumsuz yönde etki edebilecek bir direnç ile karşılaşmalarını engellemek için 11 m/s üst sınır olarak konulmuştur.

4.2.5.2 Sıcaklık

İstasyonda tren yangını sırasında ortaya çıkan ısı miktarının tahliye süresi boyunca yolcuları etkilememesi için limit koşullar belirlenmiştir. Yolcular için oluşan bu riskli durumda, yolcuların maksimum 50 °C sıcaklığa maruz kalarak tahliye olduğu durum sınır kabul edilmiştir. Ancak yangın noktasına yakın bölgelerde sıcaklığın hızla artması engellenemeyeceği için bu bölgelerde NFPA 130 standardında belirtilen ve Çizelge 4.2’de verilen yolcuların farklı sıcaklıklara maruz kaldığında olumsuz etkilenmeden dayanabildiği süreler dikkate alınabilmektedir [49].

Çizelge 4.4 : Yolcuların sıcaktan etkilenmeden tahliye süreleri

Maruz Kalınan Sıcaklık (°C)	Dayanma Süresi (dk)
80	3,8
75	4,7
70	6,0
65	7,7
60	10,1
55	13,6
50	18,8
45	26,9
40	40,2

4.2.5.3 Görüş mesafesi

Tren yangını esnasında oluşan yoğun yanma ürünleri, hızla istasyon içine ve tünellere doğru yayılma eğilimi göstermektedir. İstasyonların kapalı bir alan olması sebebiyle oluşan yoğun yanma ürünleri ve zehirli gazlar önemli ölçüde görüş mesafesini azaltmakta ve yolcular için tahliyenin imkansız hale gelmesine sebep olmaktadır. Yangın esnasında oluşan zehirli gazlara maruz kalan yolcuların, dumandan etkilenmeden hızlı tahliye olabilmesi için görüş mesafesi önem kazanmaktadır. NFPA 130 standardı gereğince güvenli tahliye için minimum 10 m’lik görüş mesafesinin sağlanması zorunludur [49].

4.3 Şişli-Mecidiyeköy İstasyonu HAD Yangın Analizi Sonuçları

Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda farklı debilere sahip fanlar kullanılarak yapılan HAD analizleri sonucunda 6 MW yangın yükü için 4 adet 50 m³/s ve 25 MW yangın yükü için 4 adet 90 m³/s debili tünel havalandırma fanlarının analiz süresi boyunca gerekli ortam şartlarının sağlanması açısından yeterli olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın ve dumanın istasyona yayılmasını engellemek ve dumanı hızlı bir şekilde dışarı atmak amacıyla fanların hepsi egzoz modunda çalıştırılmıştır. NFPA 130 standardına göre yapılan tahliye hesaplamaları sonucunda Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda yolcuların peron katını 5,36 dakikada (322 s) istasyonu ise 8,53 dakikada (512 s) tahliye ettiği hesaplanmıştır. Değerlendirmelerde NFPA 130 da belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterleri dikkate alınmıştır [49]. Ayrıca analiz süresi boyunca sıcak hava ve dumanın konkors katına çıkan merdiven hizasına erişmemesi ve üst kata doğru ilerlememesi şartı aranmıştır. Değerlendirme yapılırken yangın bölgesine çok yakın peron bölgelerinde oluşan yüksek sıcaklık ve düşük görüş mesafesi değerleri dikkate alınmamıştır.

6 MW yangın yükü için 4 adet 50 m³/s debili tünel havalandırma fanları kullanılarak elde edilen sonuçlarda 120-600 s zaman aralığındaki görsellere bakıldığında hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi verilerinin istenen kriterleri sağladığı görülmektedir. Sadece yangın olan vagonun yakınında sıcaklıklar biraz yükselmekte ve görüş mesafesi düşmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur ve bu bölge için kriterler kapsam dışı tutulmuştur. Analiz süresi boyunca gerek yatay gerekse düşey düzlemler incelendiğinde sıcak hava ve dumanın konkors katına çıkan merdiven hizasına erişmediği ve üst kata doğru ilerlemediği görülmektedir.

25 MW yangın yükü için 4 adet 90 m³/s debili tünel havalandırma fanları kullanılarak elde edilen sonuçlarda 120-600 s zaman aralığındaki görsellere bakıldığında hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi verilerinin istenen kriterleri sağladığı görülmektedir. Sadece yanan vagonun yakınında sıcaklıklar biraz yükselmekte ve görüş mesafesi düşmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur ve bu bölge için kriterler kapsam dışı tutulmuştur. Analiz süresi boyunca gerek yatay gerekse düşey düzlemler incelendiğinde sıcak hava ve dumanın konkors katına çıkan merdiven hizasına erişmediği ve üst kata doğru ilerlemediği görülmektedir.

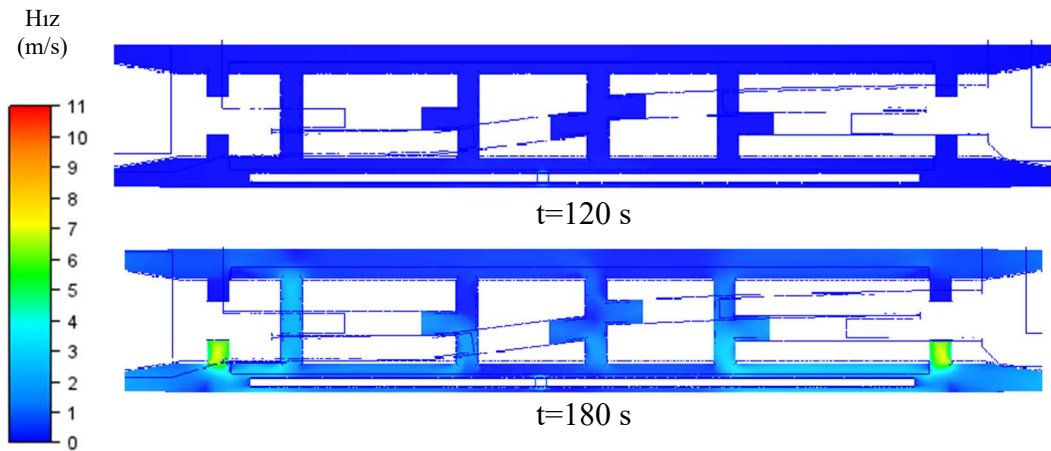
25 MW yangın yükü orta hızda yangın büyüme eğrisi için uygun sonuç alınan senaryo, aynı tünel havalandırma fan debileri kullanılarak çok hızlı yangın büyüme eğrisine sahip 25 MW yangın yükü senaryosu için tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda çok hızlı yangın büyüme eğrisi için sıcak hava ve dumanın fanlar devreye girene kadar peronu kapladığı ve yolcu tahliyesi açısından risk olduğu görülmüştür. Bu sonuç işletmede kullanılacak tren ile HAD analizlerinde kullanılan trenin yangın özellikleri açısından aynı veya benzer olmasının önemini ortaya koymaktadır.

Bu bölümde son olarak 25 MW yangın yükü için tüm tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırıldığında uygun sonuç alınan senaryo, kuzey yönde olan fanlar basma güney yönde olan fanlar egzoz modunda çalıştırılarak tekrarlanmıştır. Egzoz-basma senaryosu ile yapılan analiz sonucunda istasyon içerisinde sıcak hava ve dumanın merdiven bölgesine ve akabinde merdiven boşluklarından ilerleyerek konkors katına ulaştığı ve yolcu tahliyesi açısından risk olduğu görülmüştür.

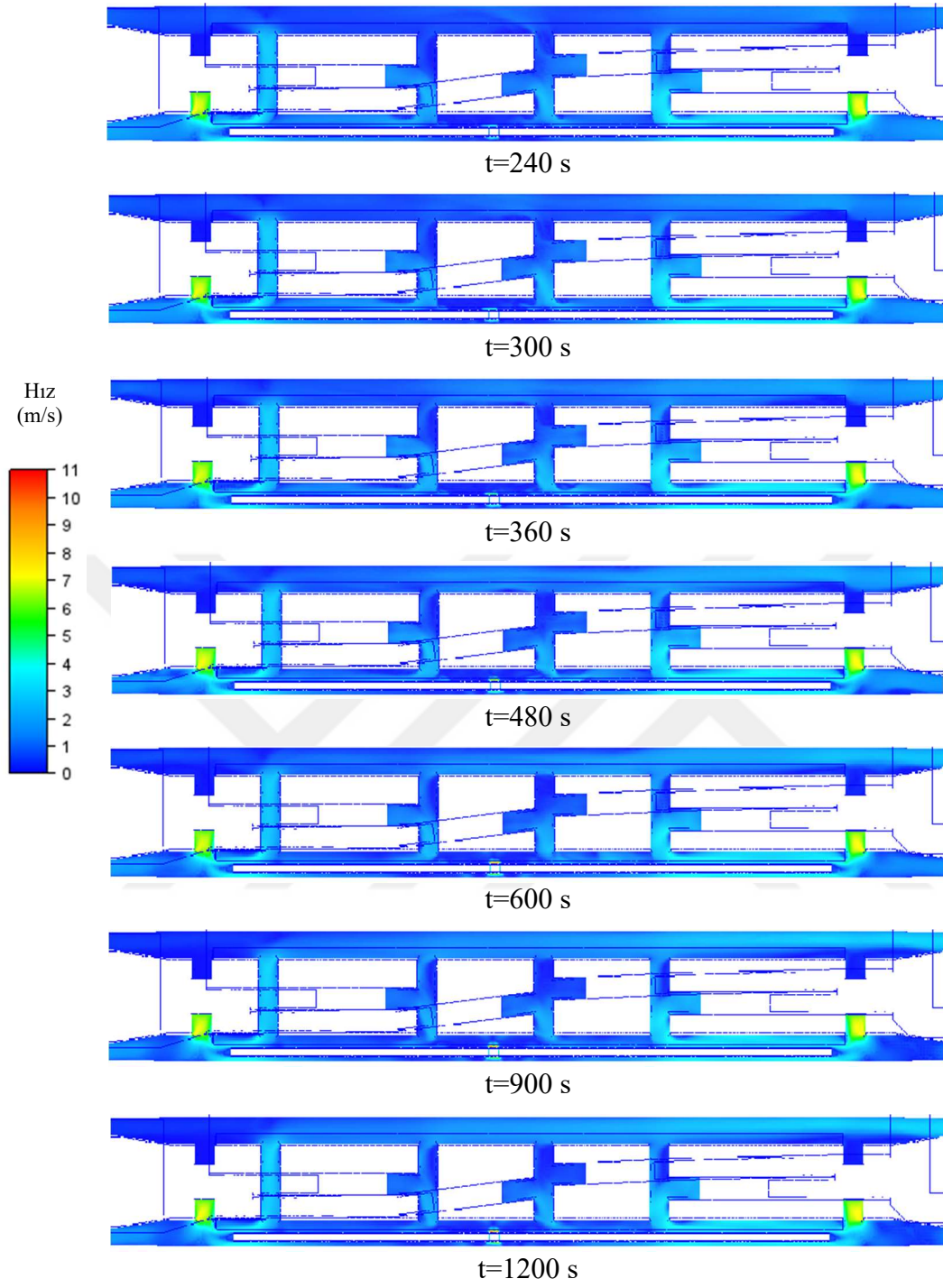
4.3.1 6 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları

Bu bölümde, Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 6 MW yangın yükü için 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet her biri 50 m³/s debiye sahip tünel havalandırma fanlarının egzoz modunda çalıştırıldığı analiz sonuçları verilmektedir. Analiz 1200 s boyunca sürdürülmüştür.

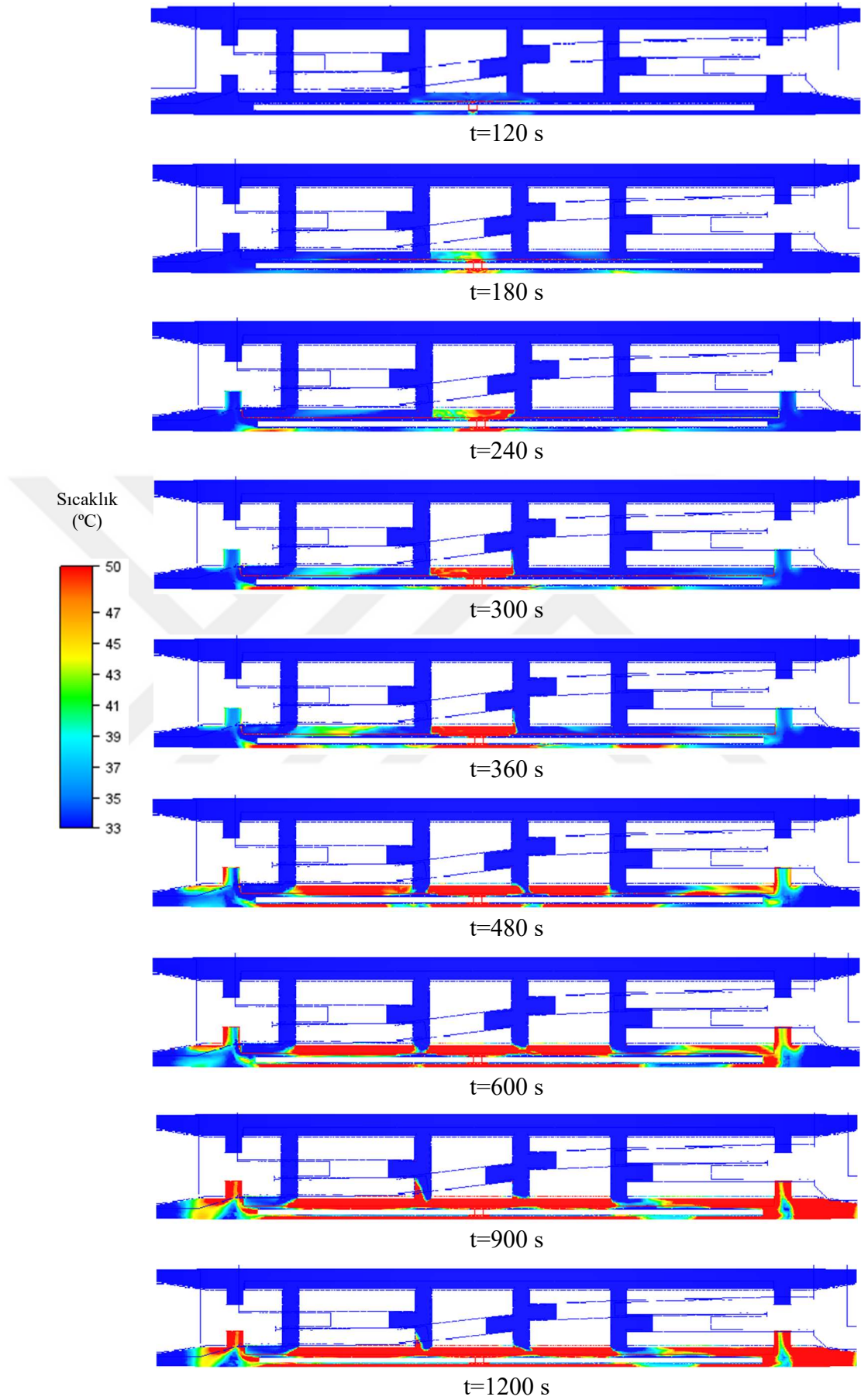
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 6 MW yangın yükü için peron seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



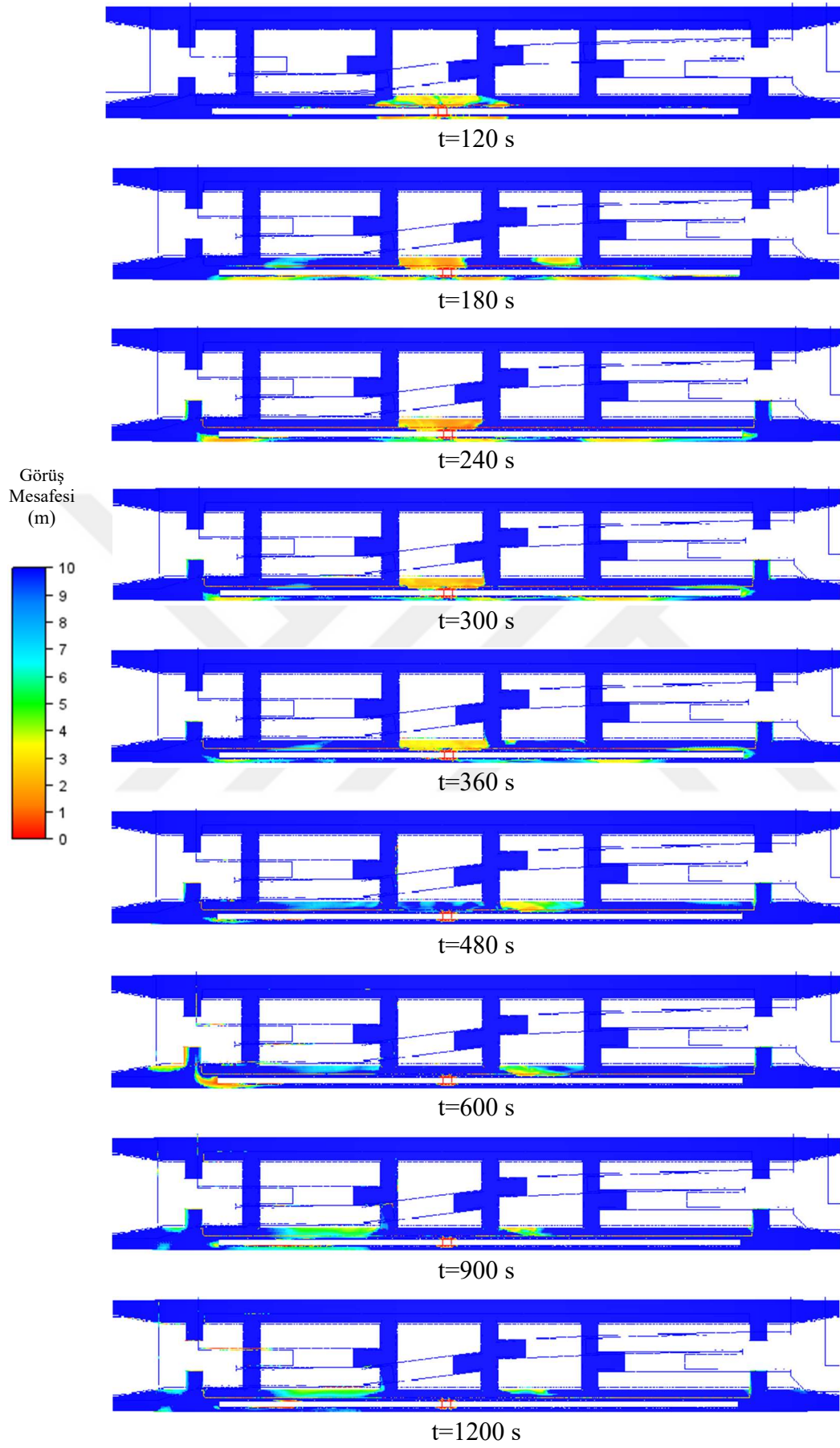
Şekil 4.17 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi



Şekil 4.17 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi

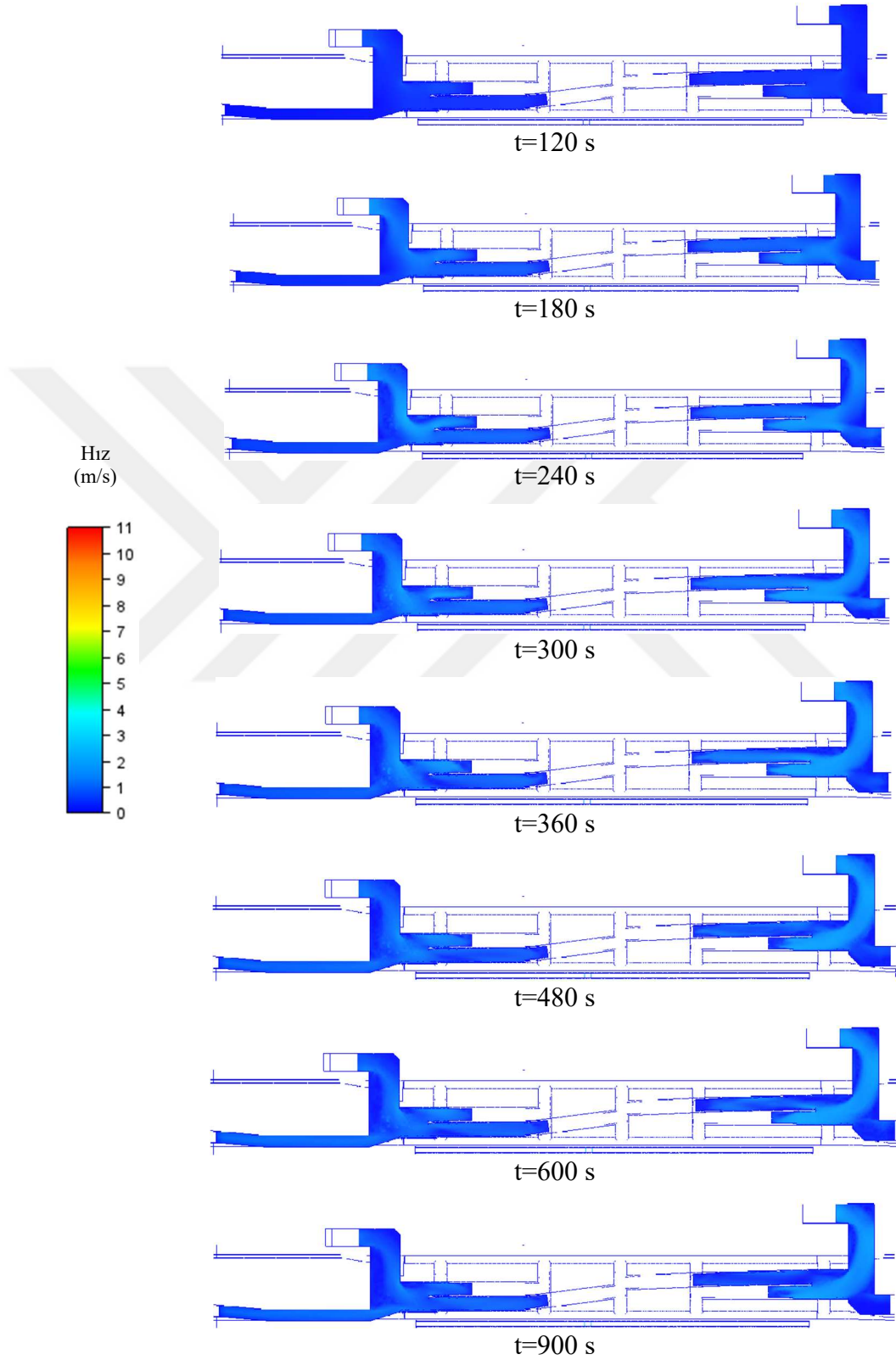


Şekil 4.18 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi

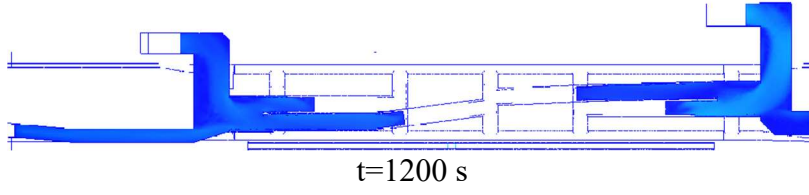


Şekil 4.19 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

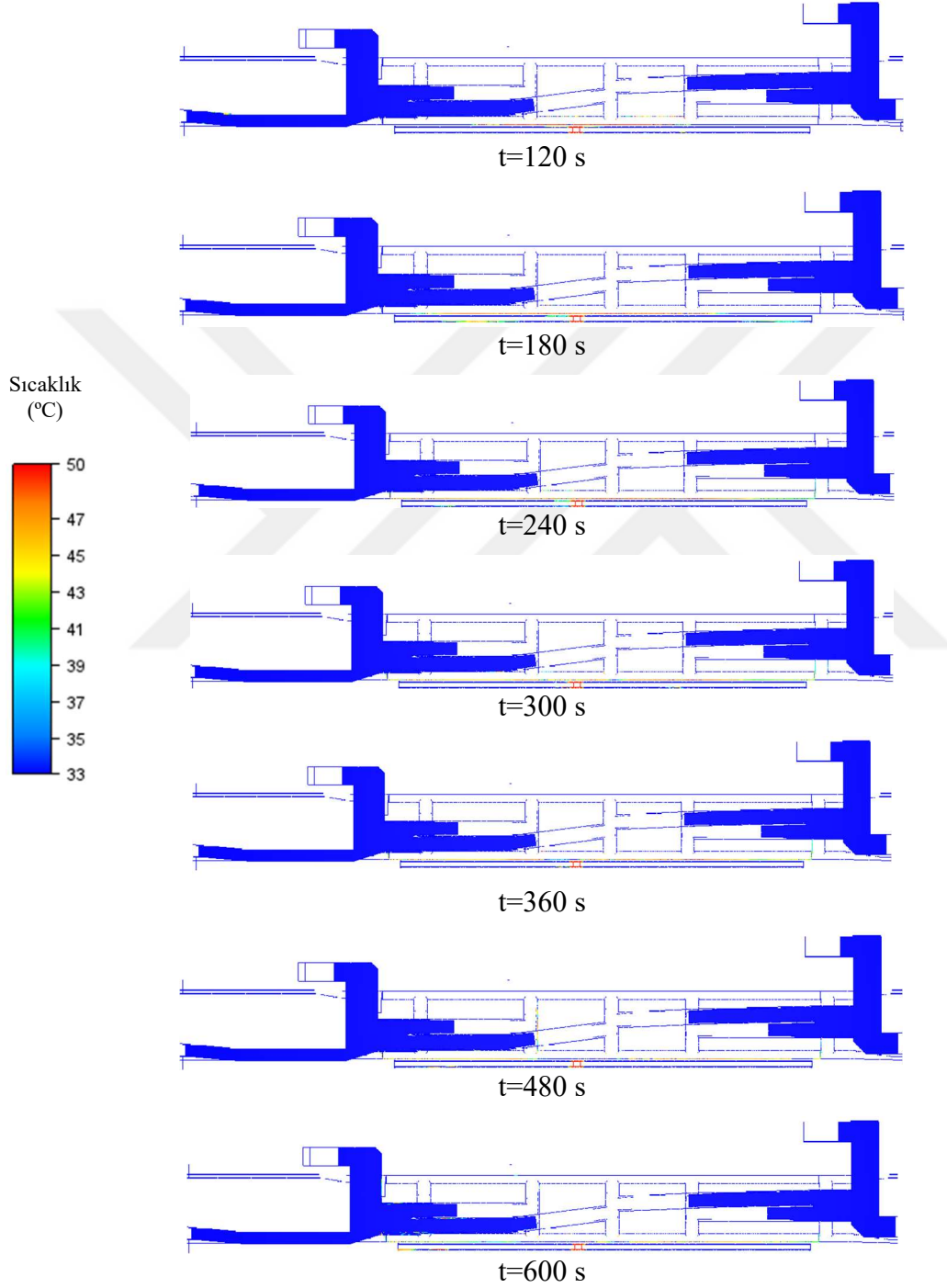
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 6 MW yangın yükü için konkors seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



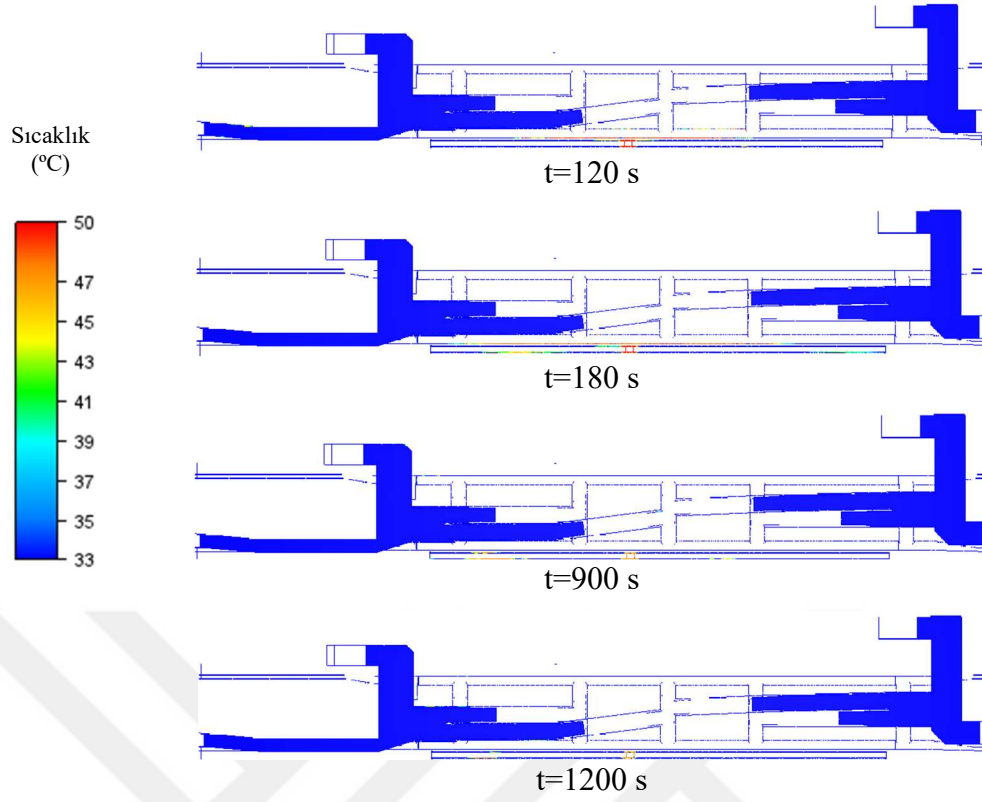
Şekil 4.20 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



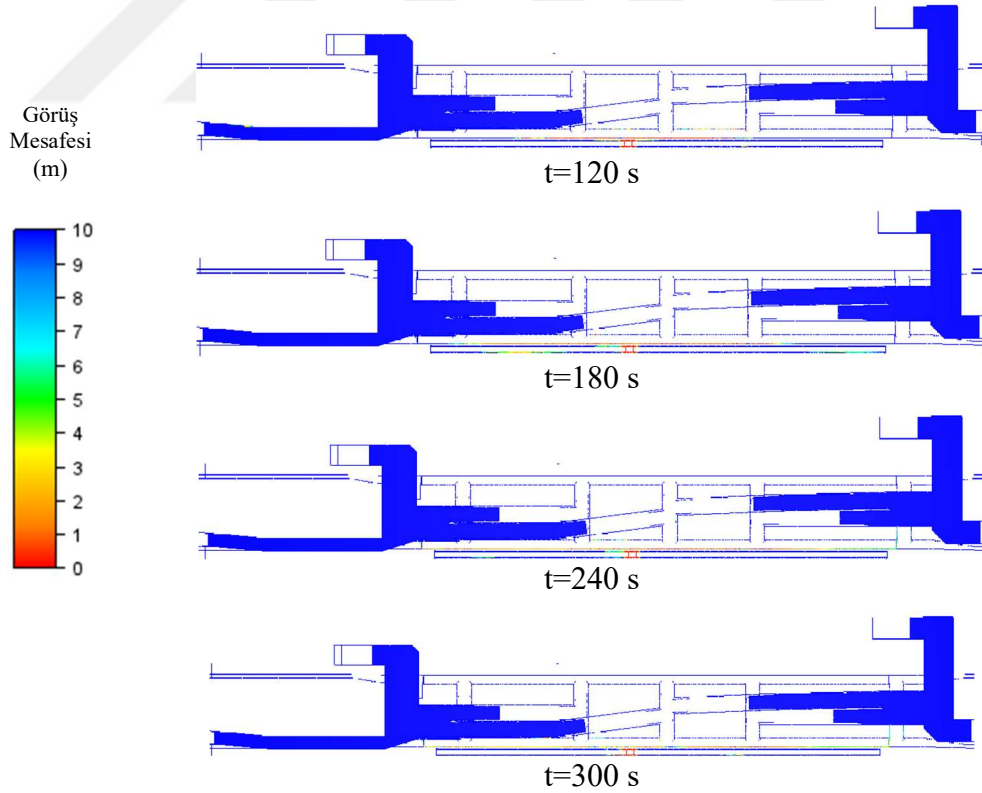
Şekil 4.20 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



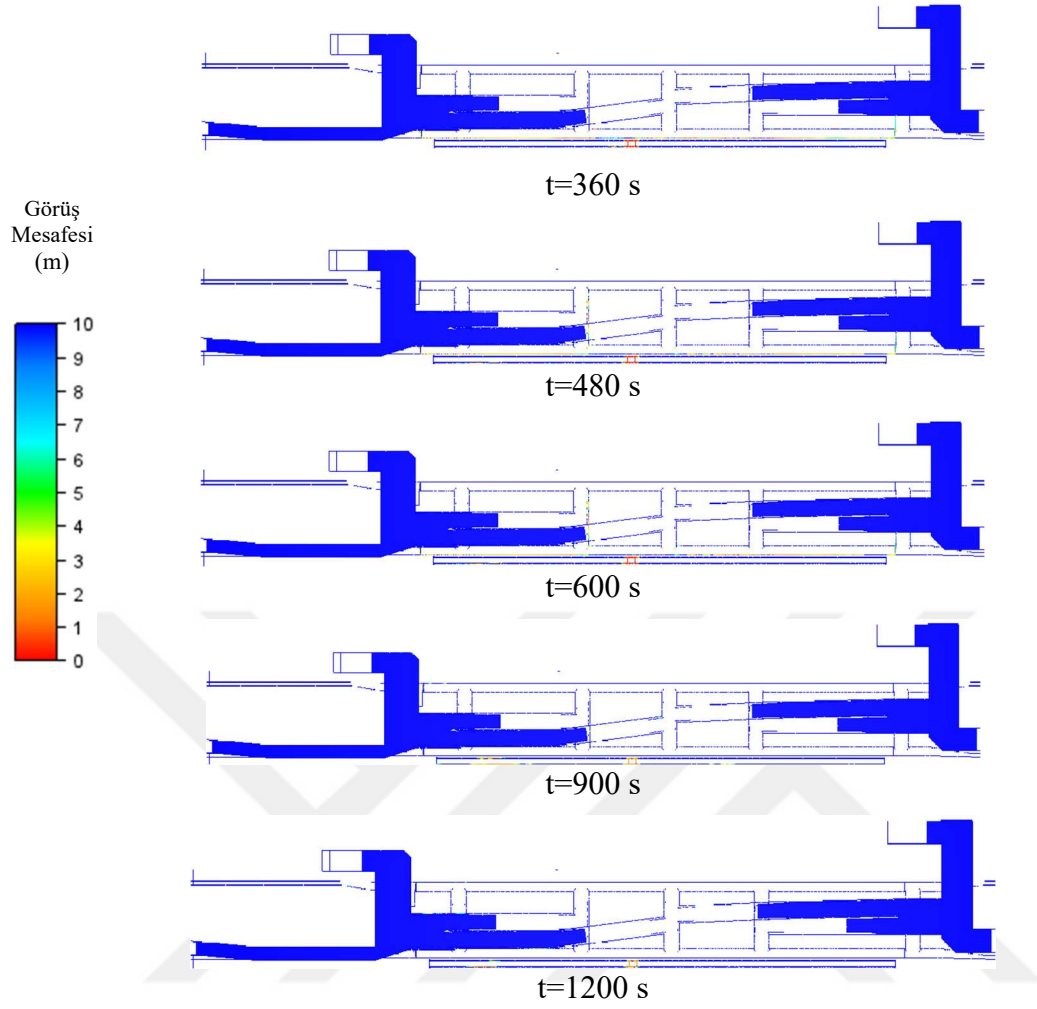
Şekil 4.21 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.21 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi

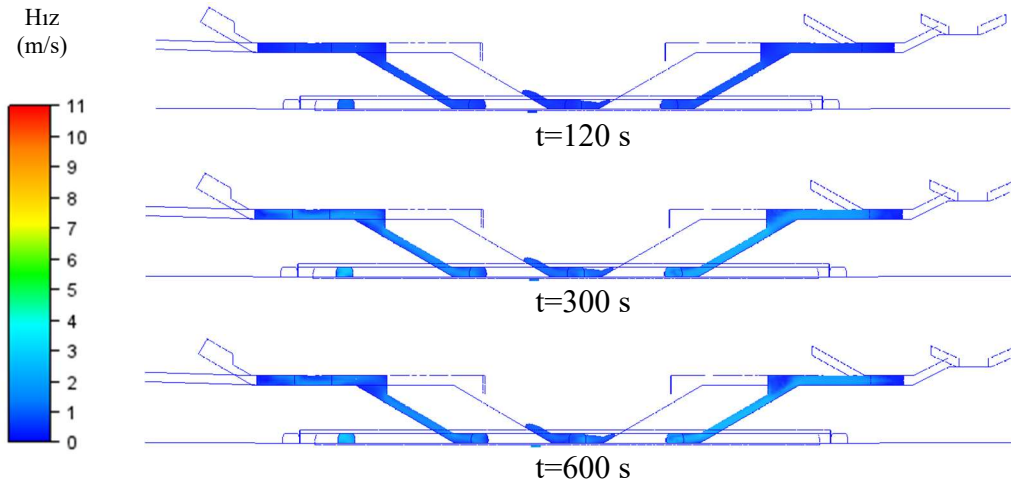


Şekil 4.22 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

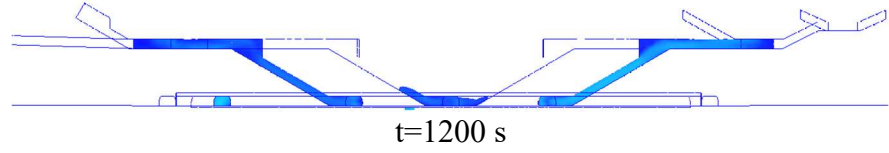


Şekil 4.22 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

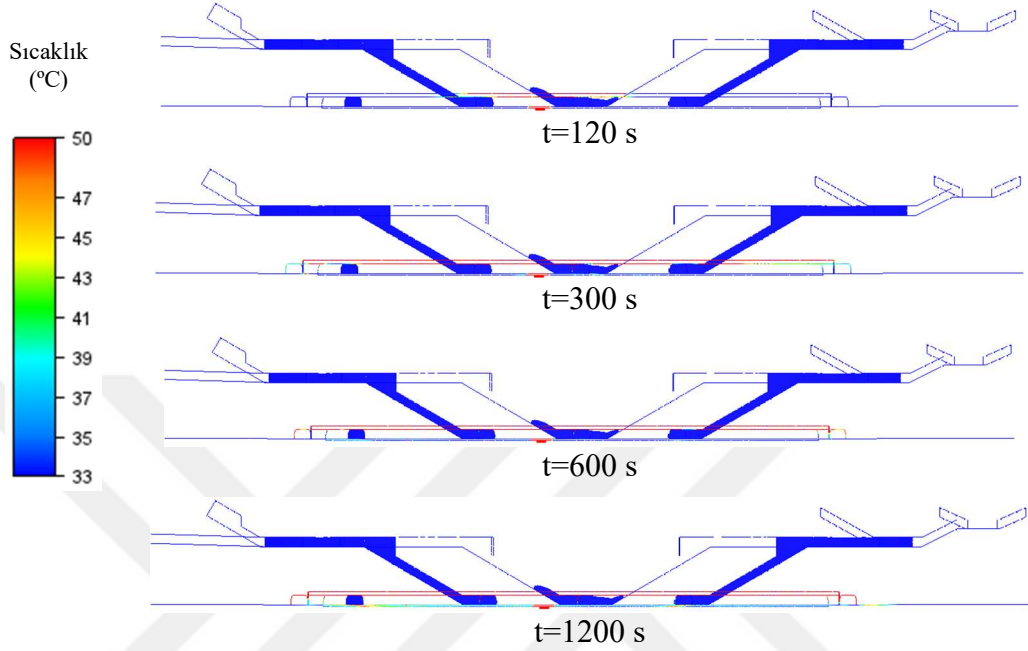
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 6 MW yangın yükü için A-A düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



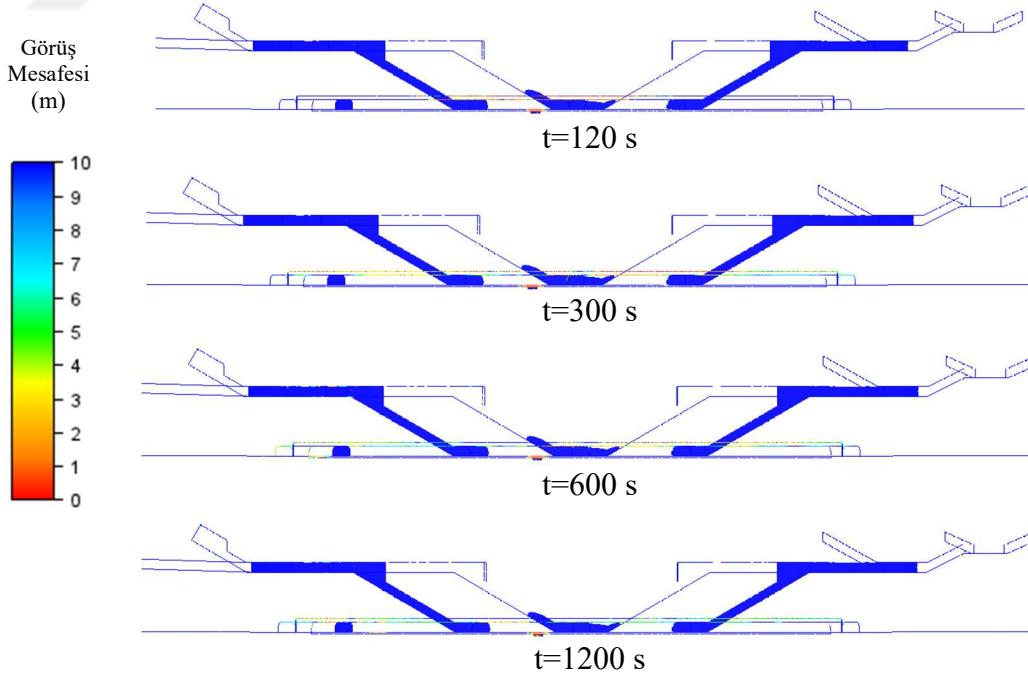
Şekil 4.23 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.23 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi

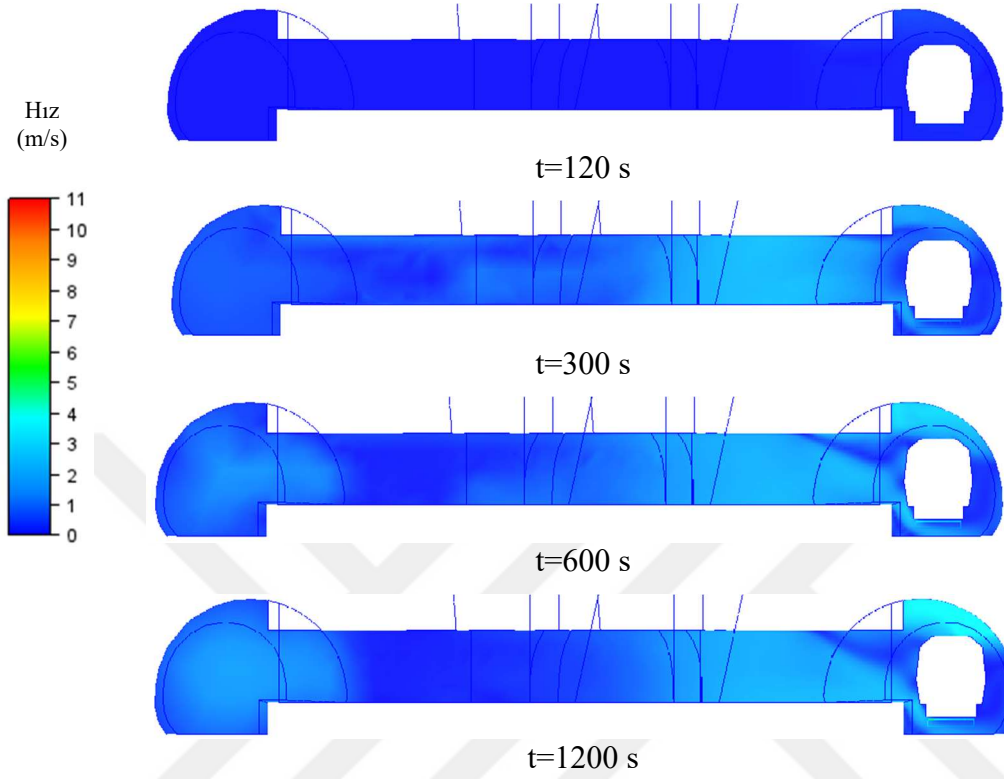


Şekil 4.24 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

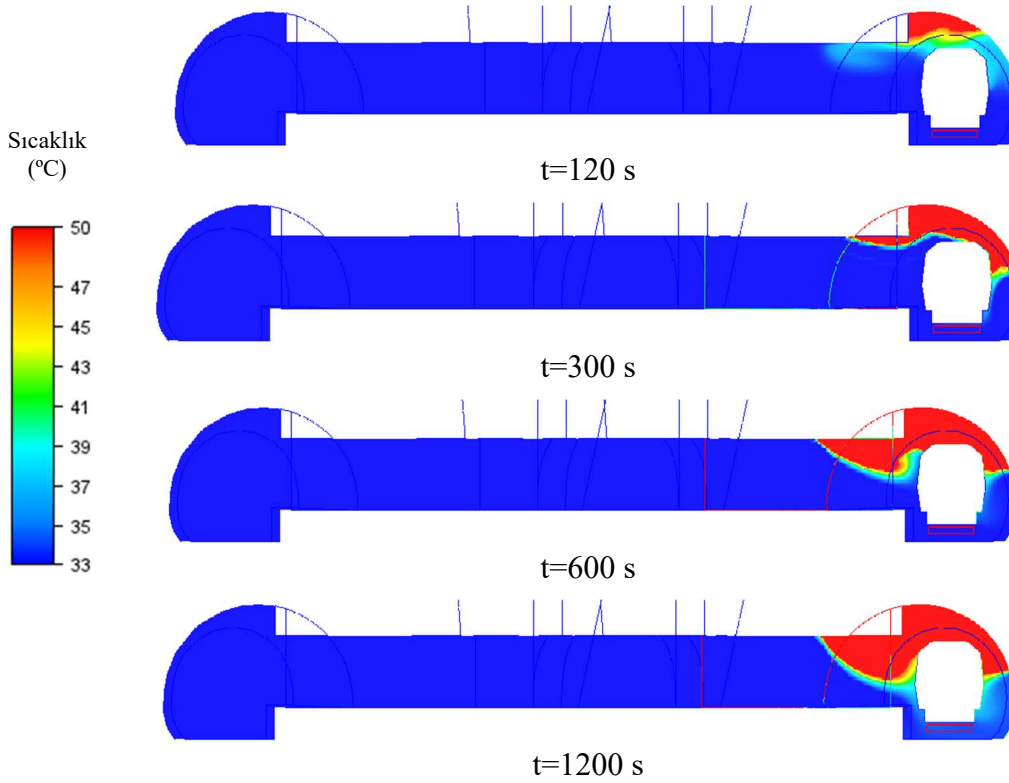


Şekil 4.25 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi

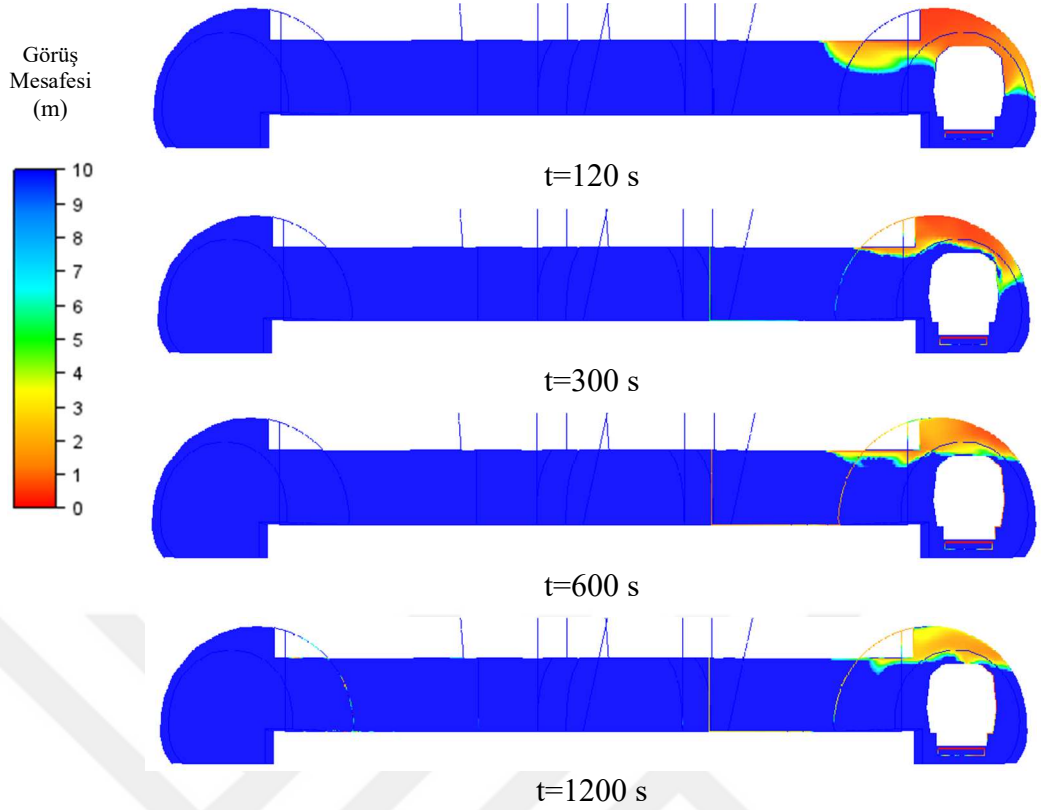
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 6 MW yangın yükü için B-B düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.27 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi

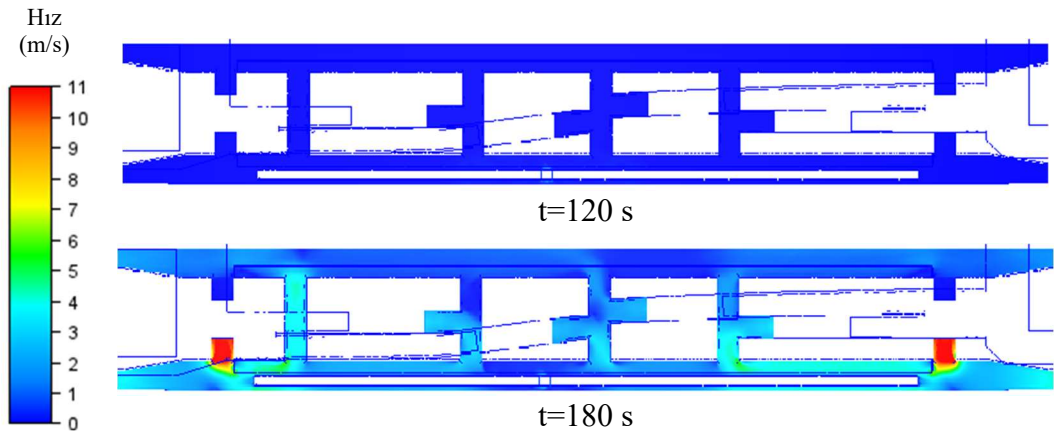


Şekil 4.28 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi

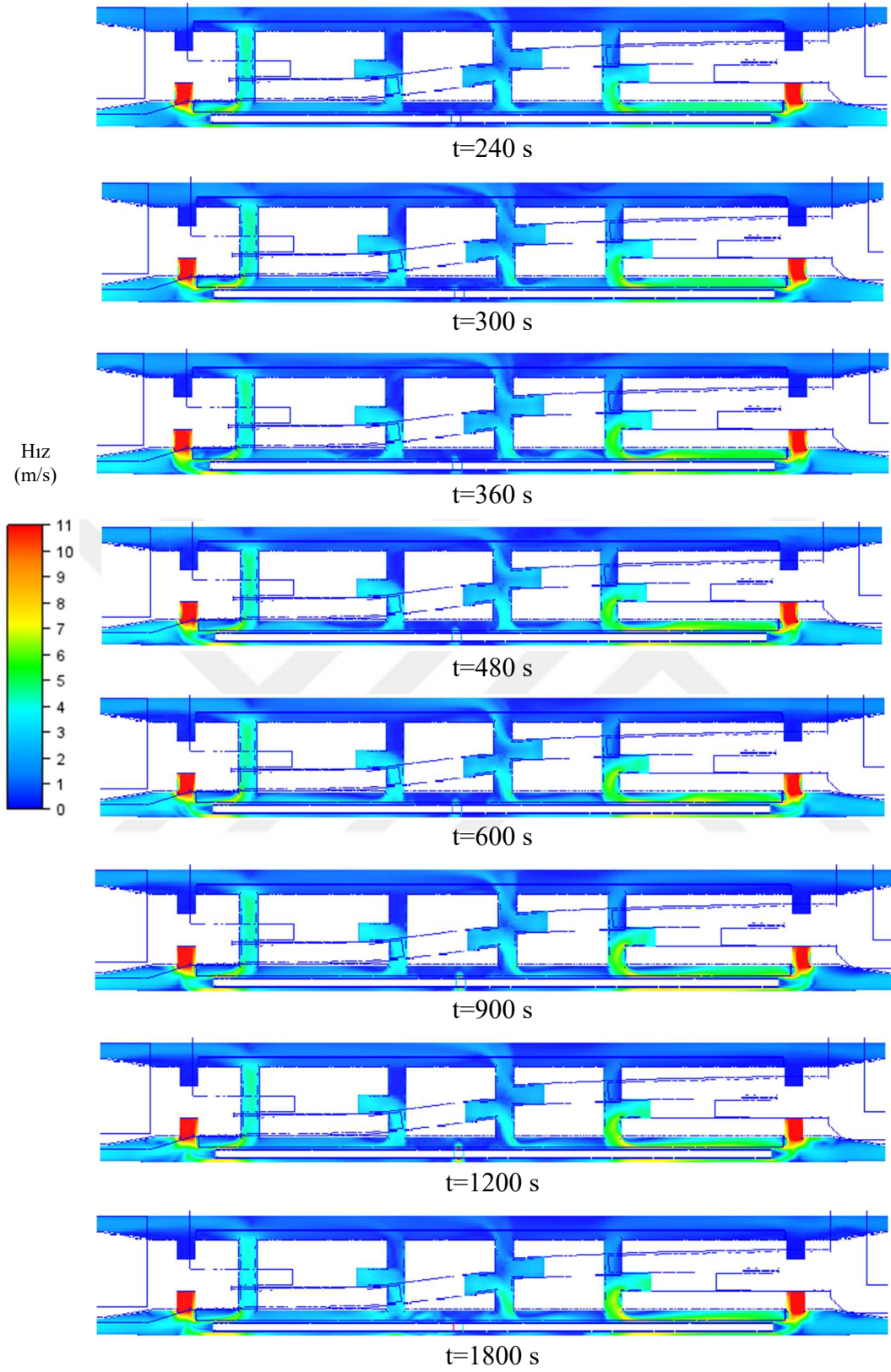
4.3.2 25 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları

Bu bölümde, Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet her biri $90 \text{ m}^3/\text{s}$ debiye sahip tünel havalandırma fanlarının egzoz modunda çalıştırıldığı analiz sonuçları verilmektedir. Analiz 1800 s boyunca sürdürülmüştür.

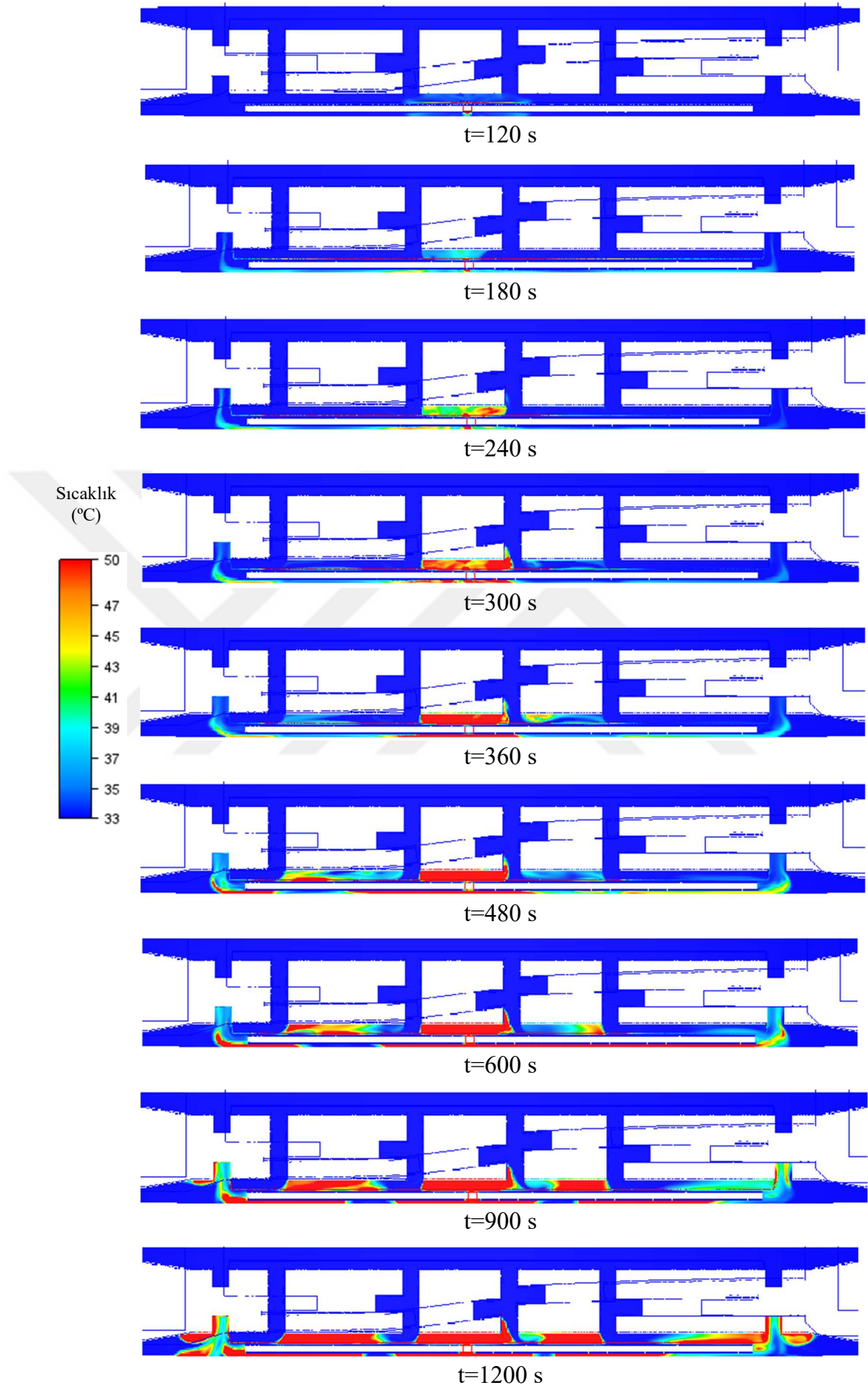
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için peron seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



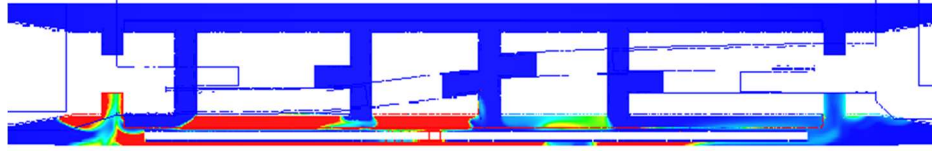
Şekil 4.29 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi



Şekil 4.29 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi

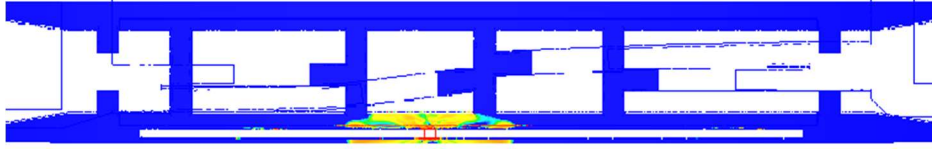


Şekil 4.30 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi

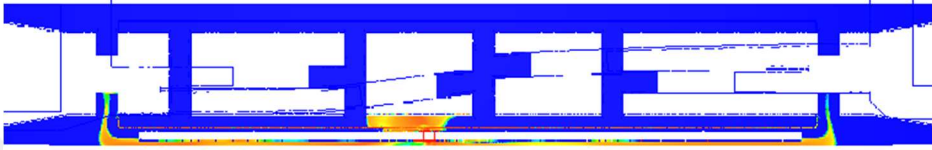


t=1800 s

Şekil 4.31 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi

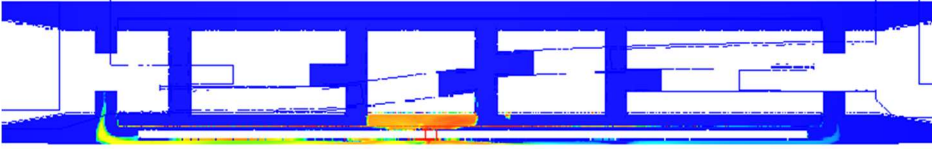
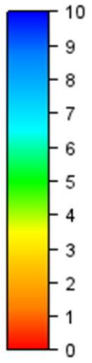


t=120 s

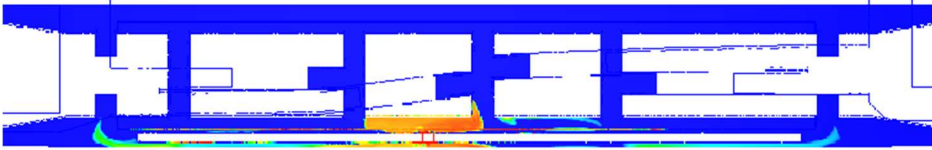


t=180 s

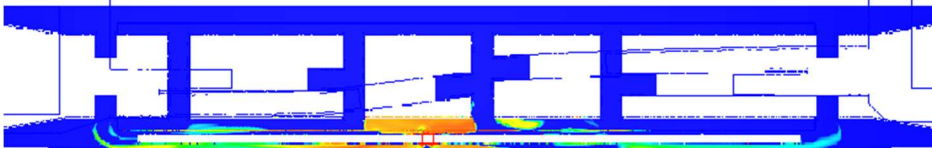
Görüş
Mesafesi
(m)



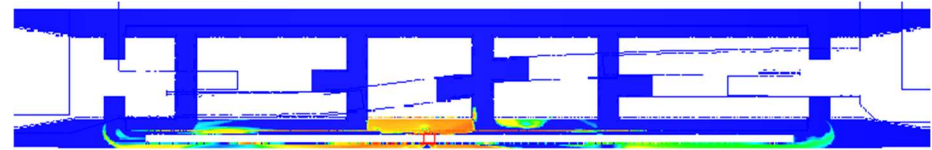
t=240 s



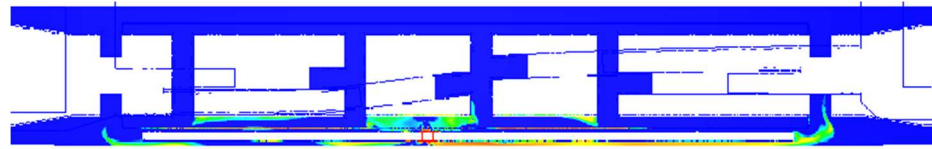
t=300 s



t=360 s

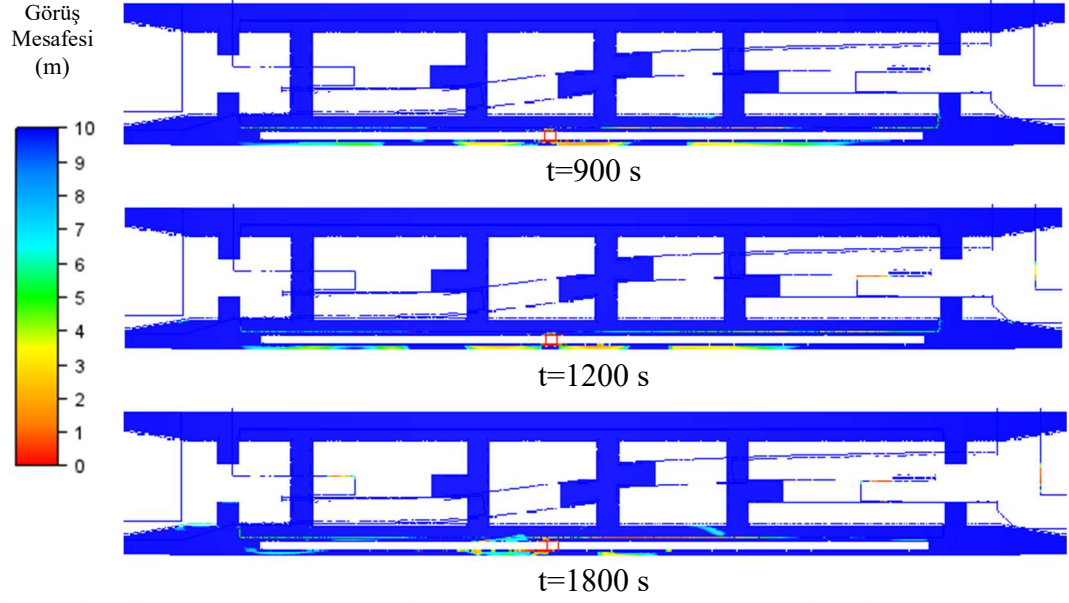


t=480 s



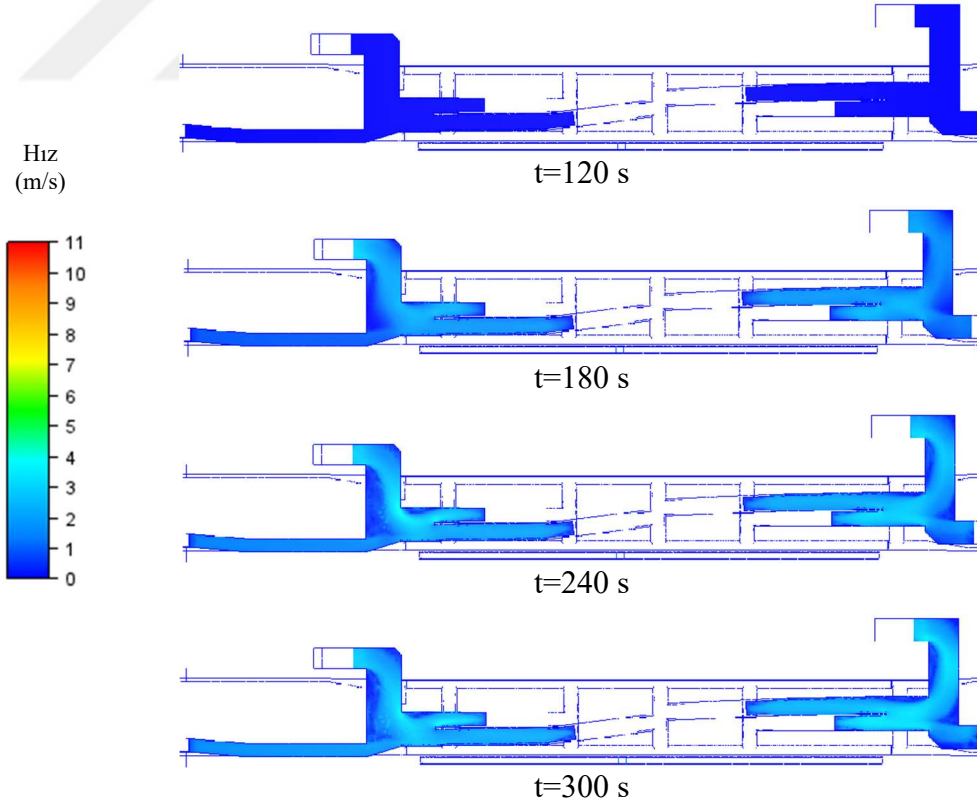
t=600 s

Şekil 4.31 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

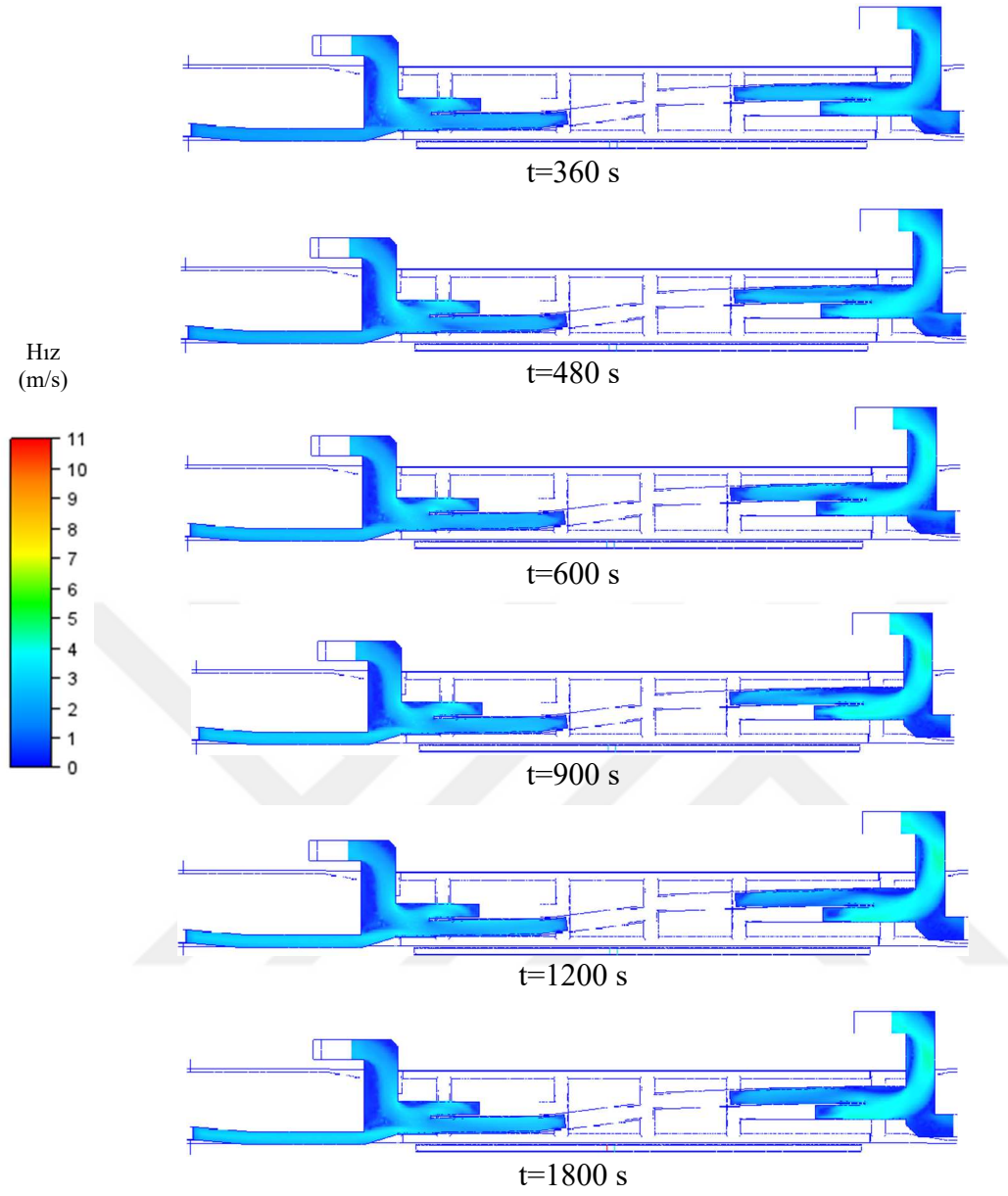


Şekil 4.31 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

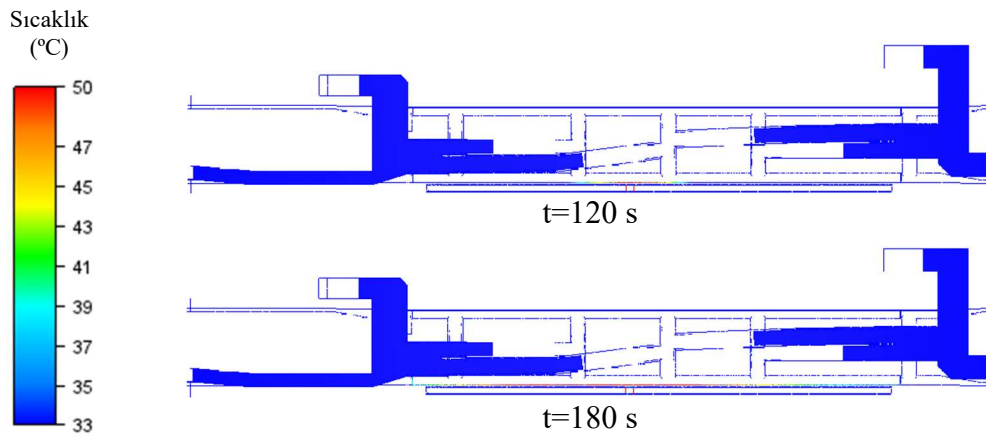
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için konkors seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



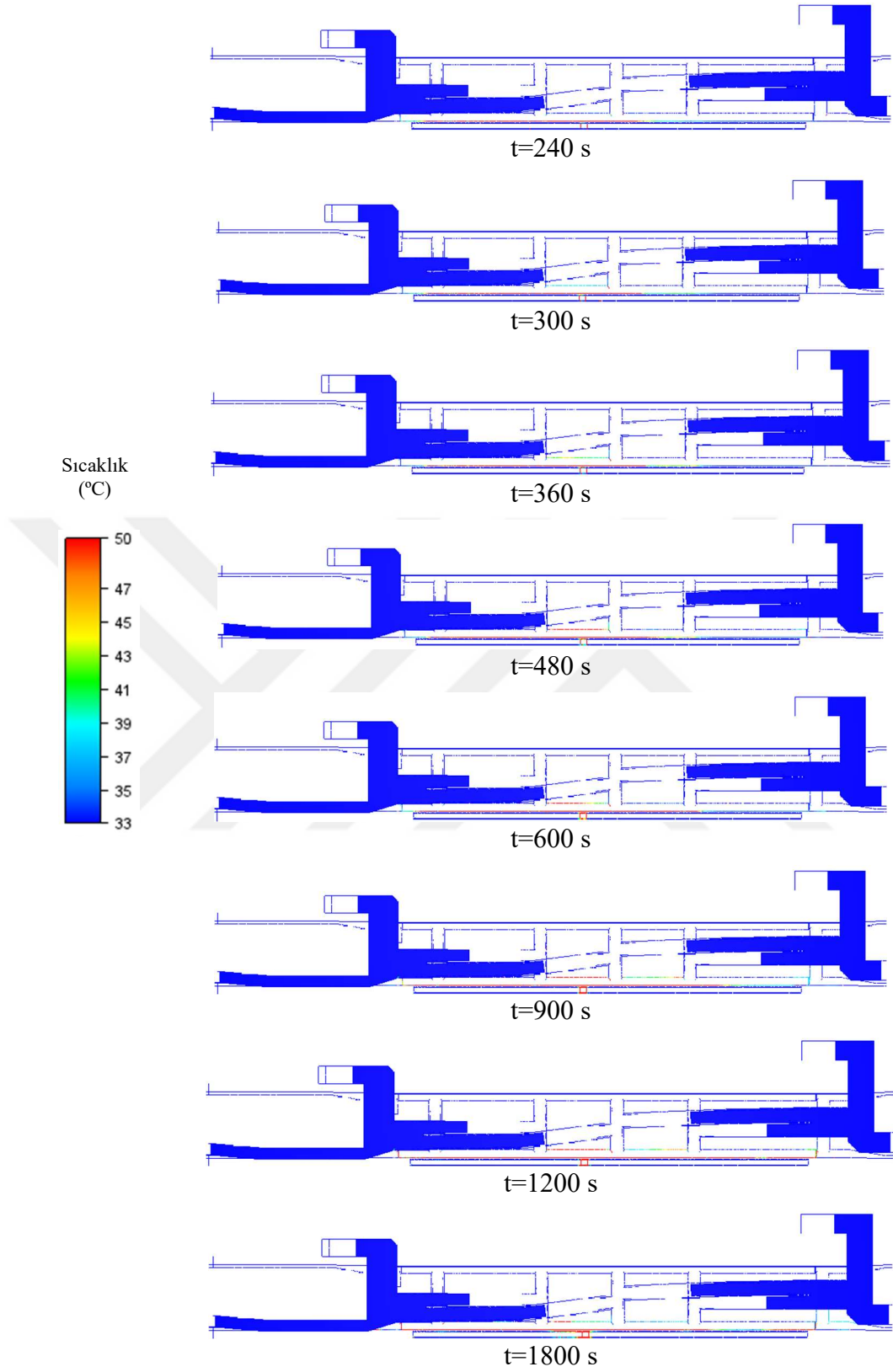
Şekil 4.32 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



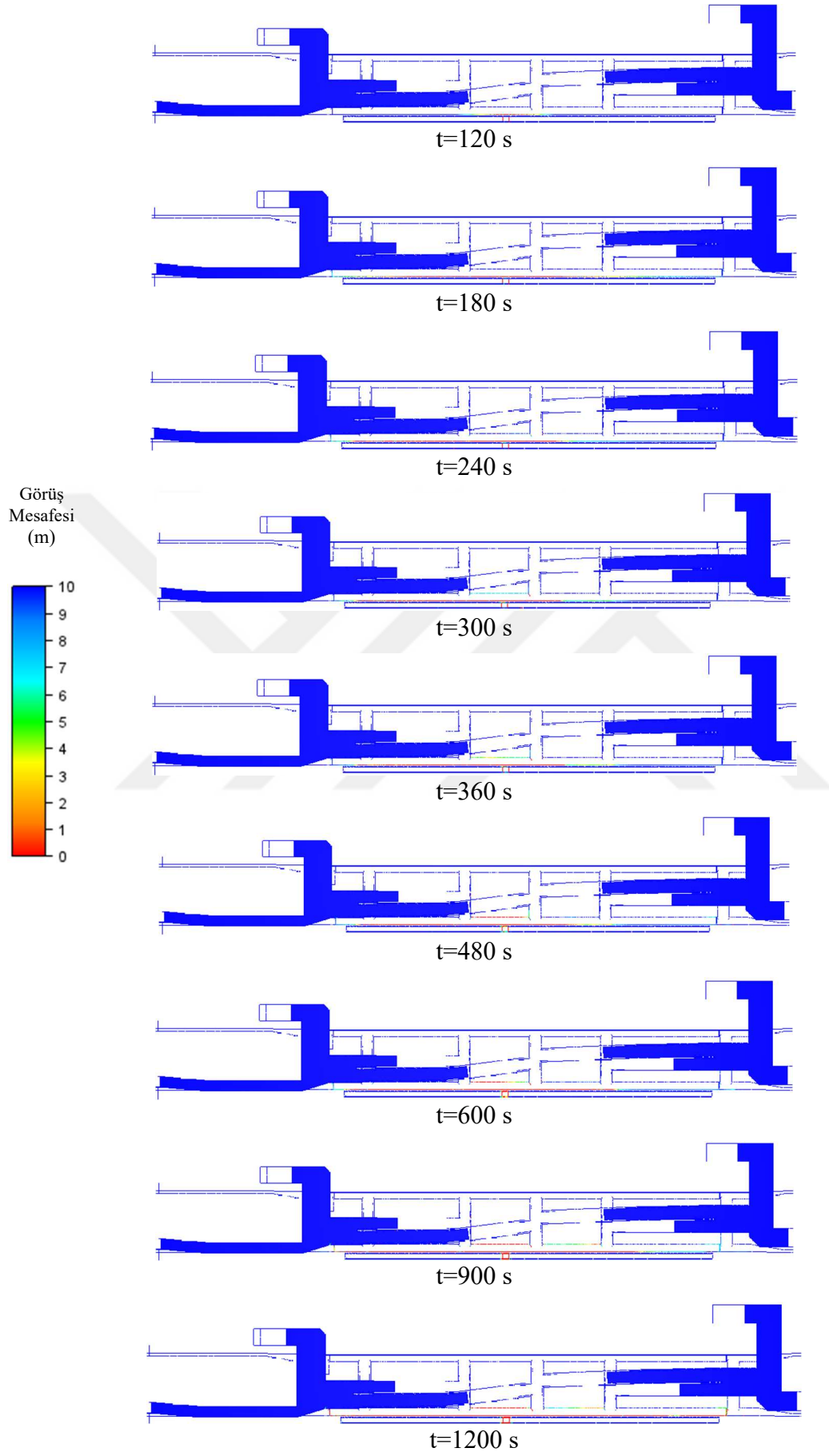
Şekil 4.32 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



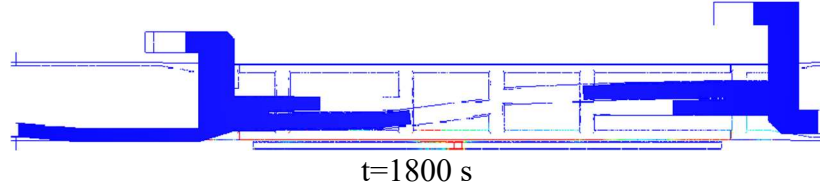
Şekil 4.33 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.33 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi

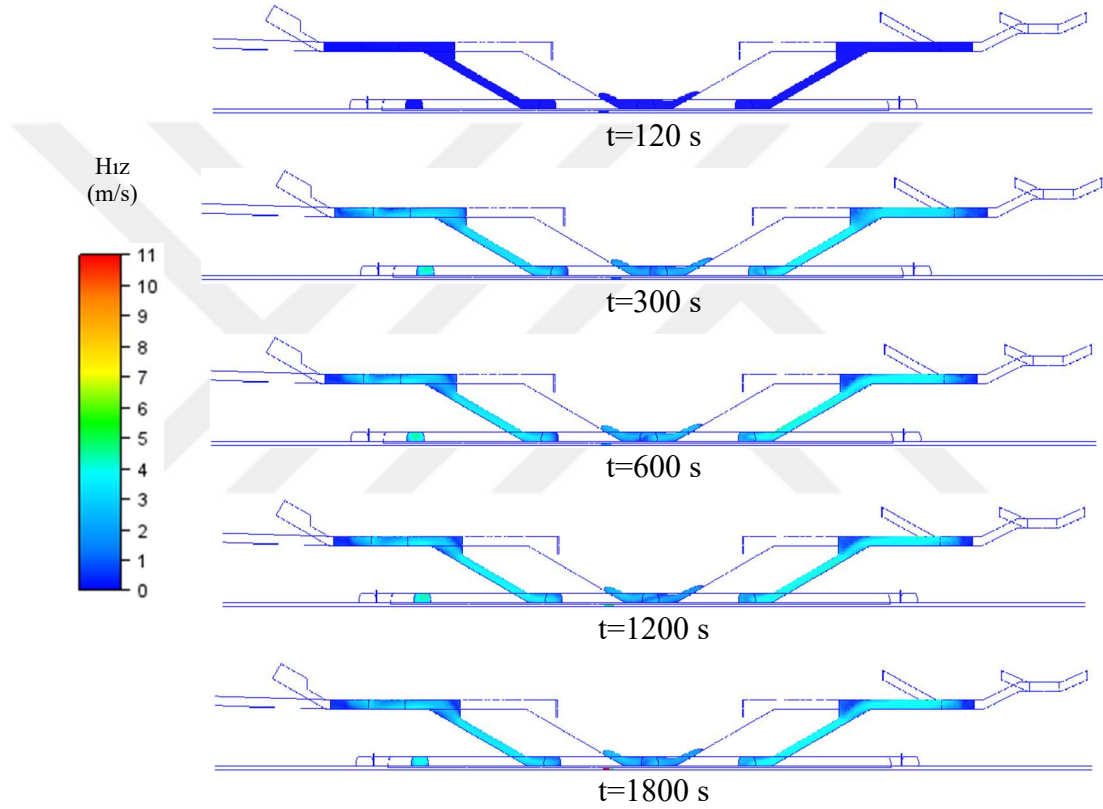


Şekil 4.34 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

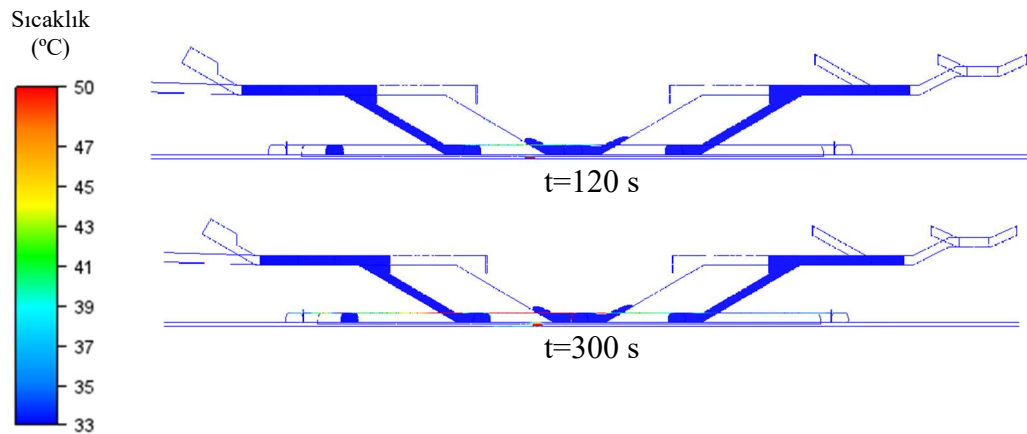


Şekil 4.34 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

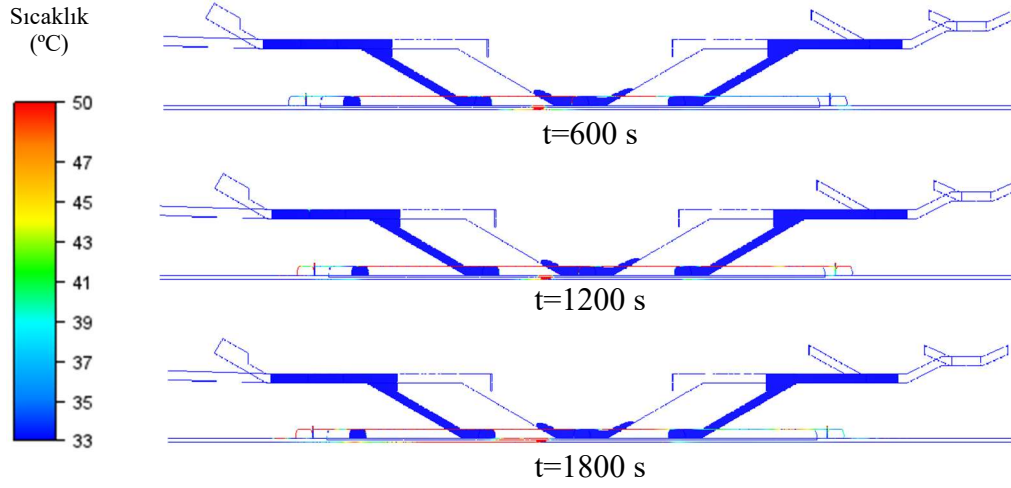
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için A-A düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



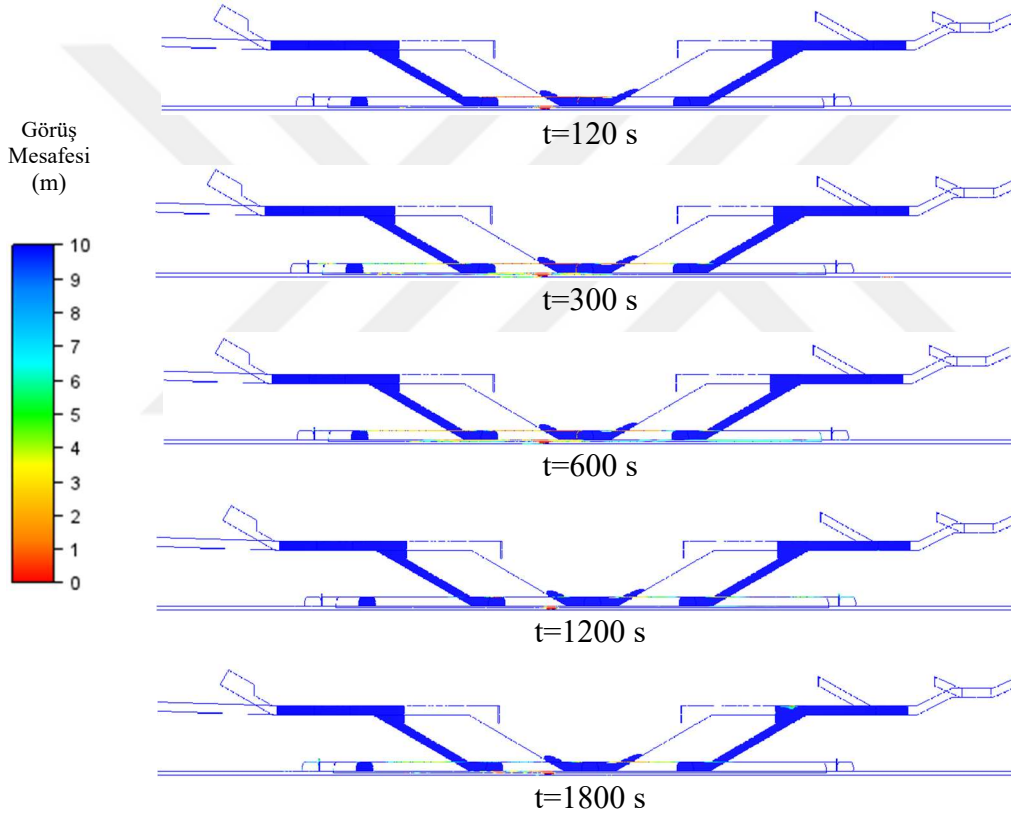
Şekil 4.35 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.36 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

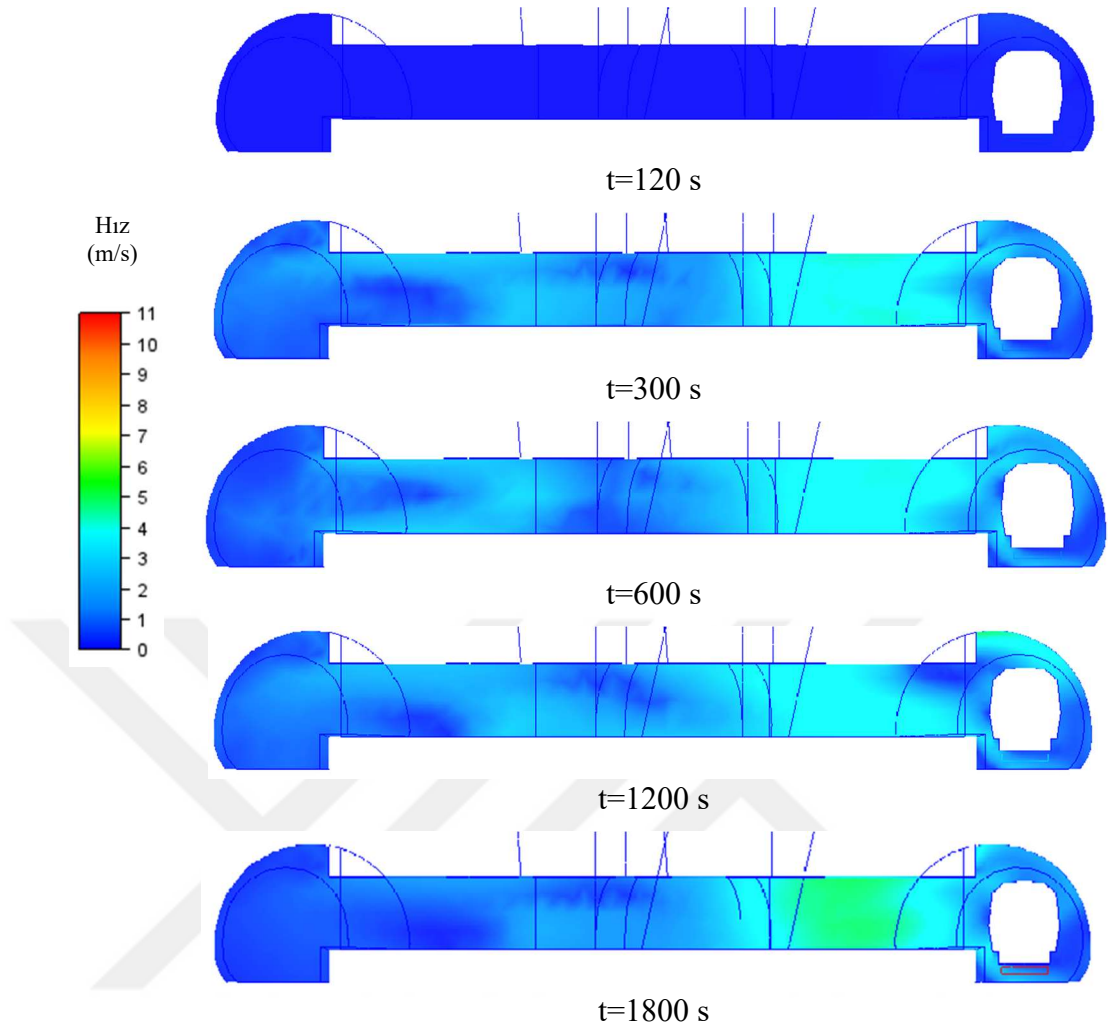


Şekil 4.36 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

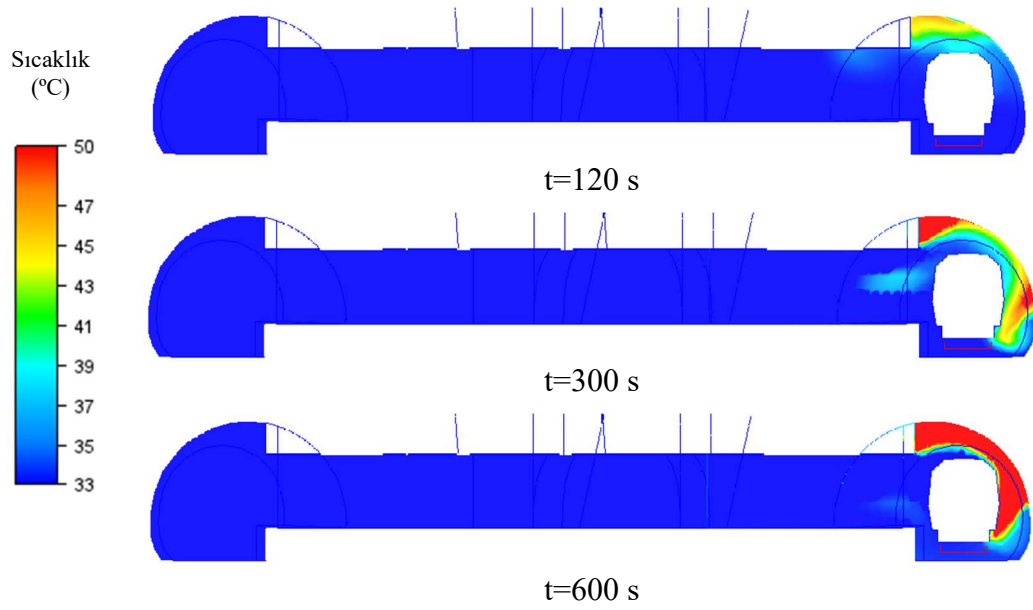


Şekil 4.37 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi

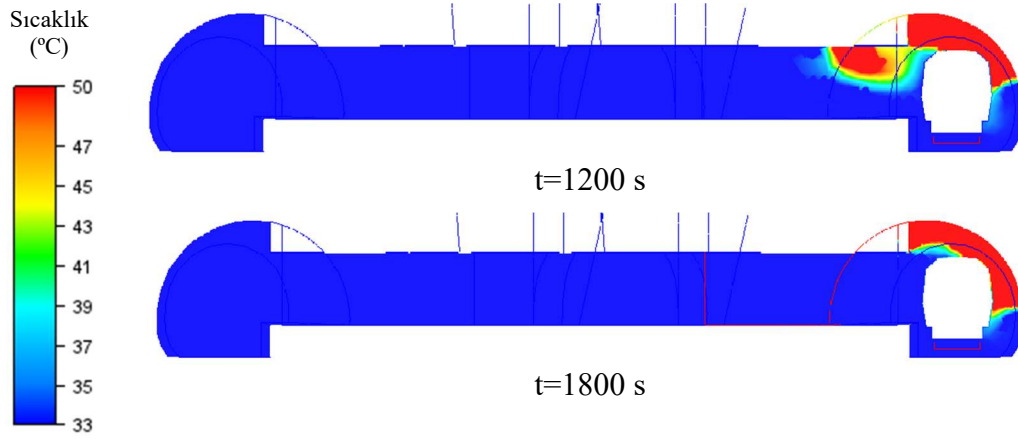
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için B-B düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



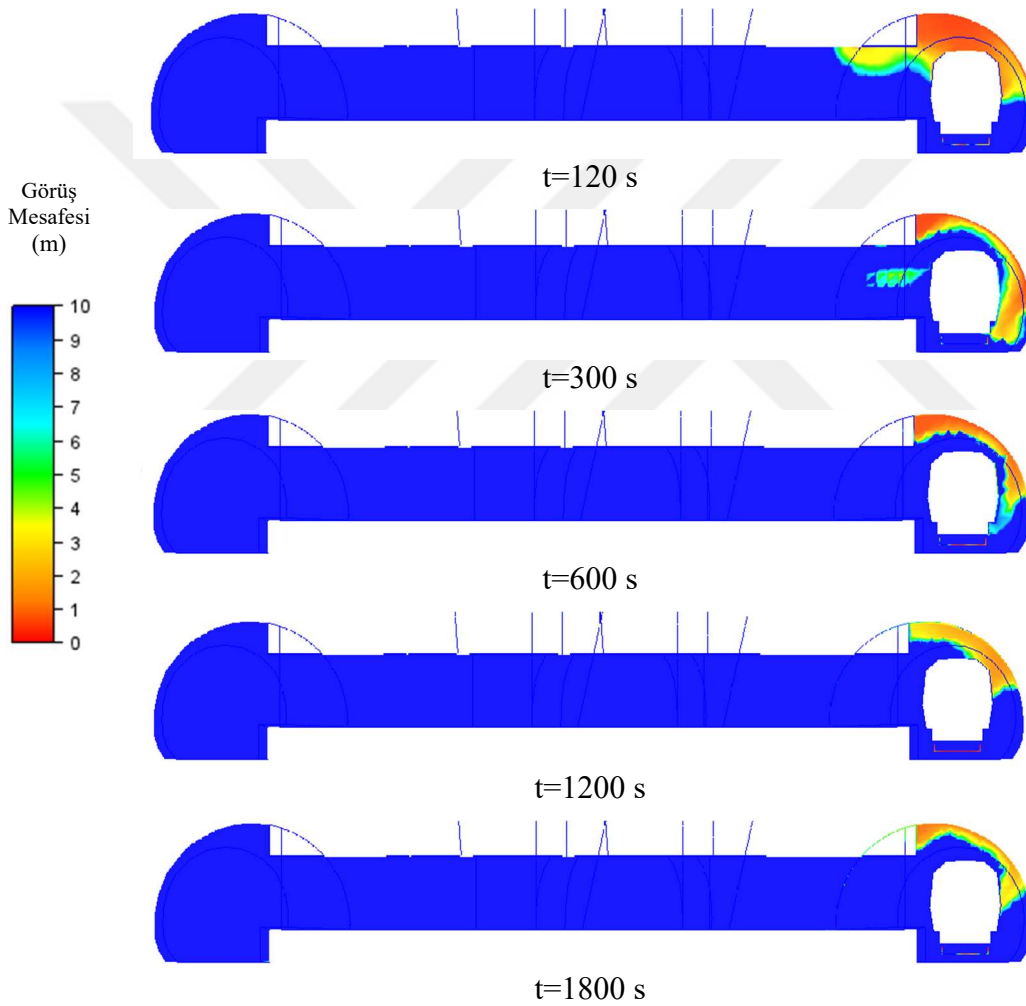
Şekil 4.38 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.39 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi



Şekil 4.39 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi



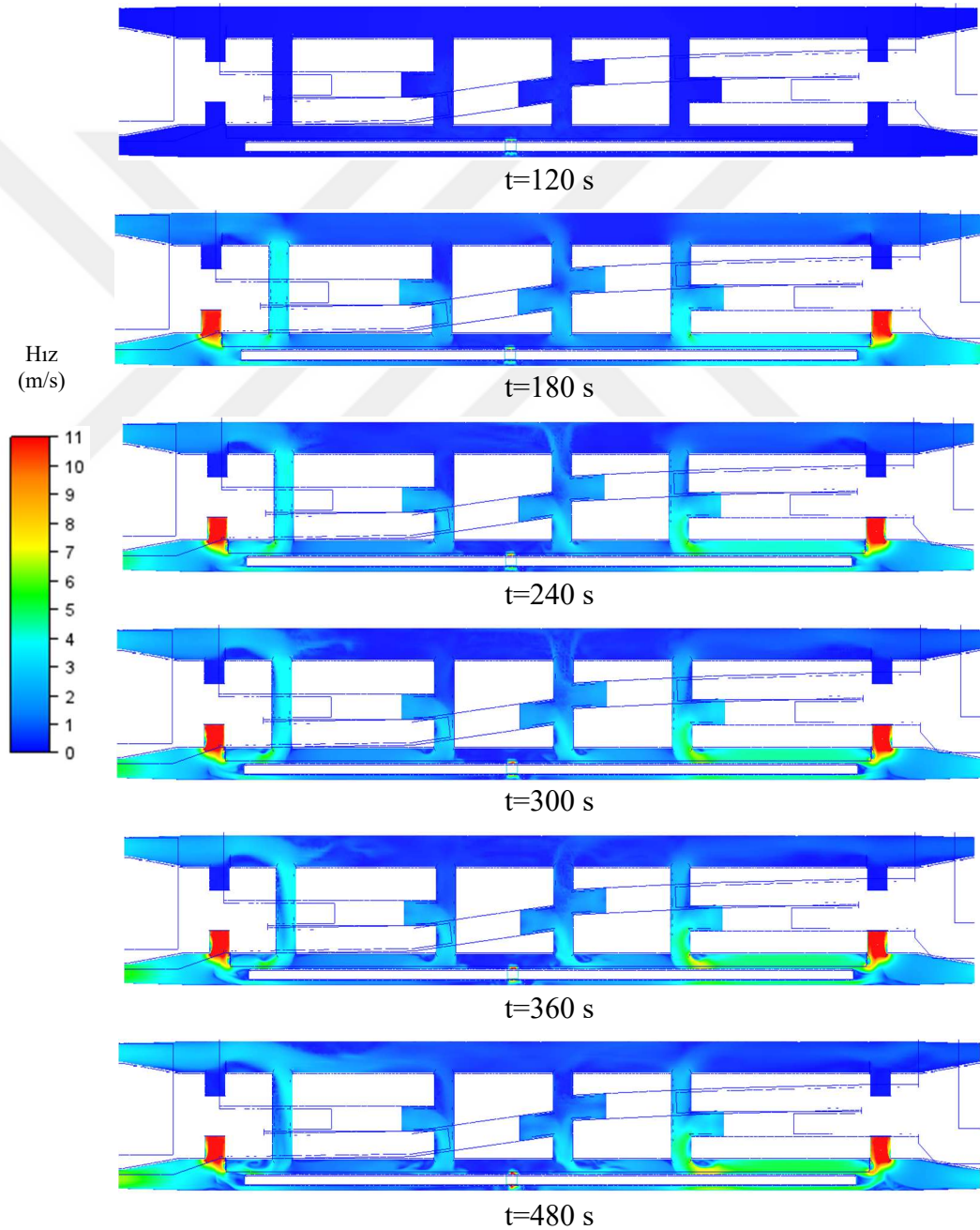
Şekil 4.40 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi

4.3.3 25 MW yangın yükü çok hızlı yangın büyüme eğrisi için HAD yangın analizi sonuçları

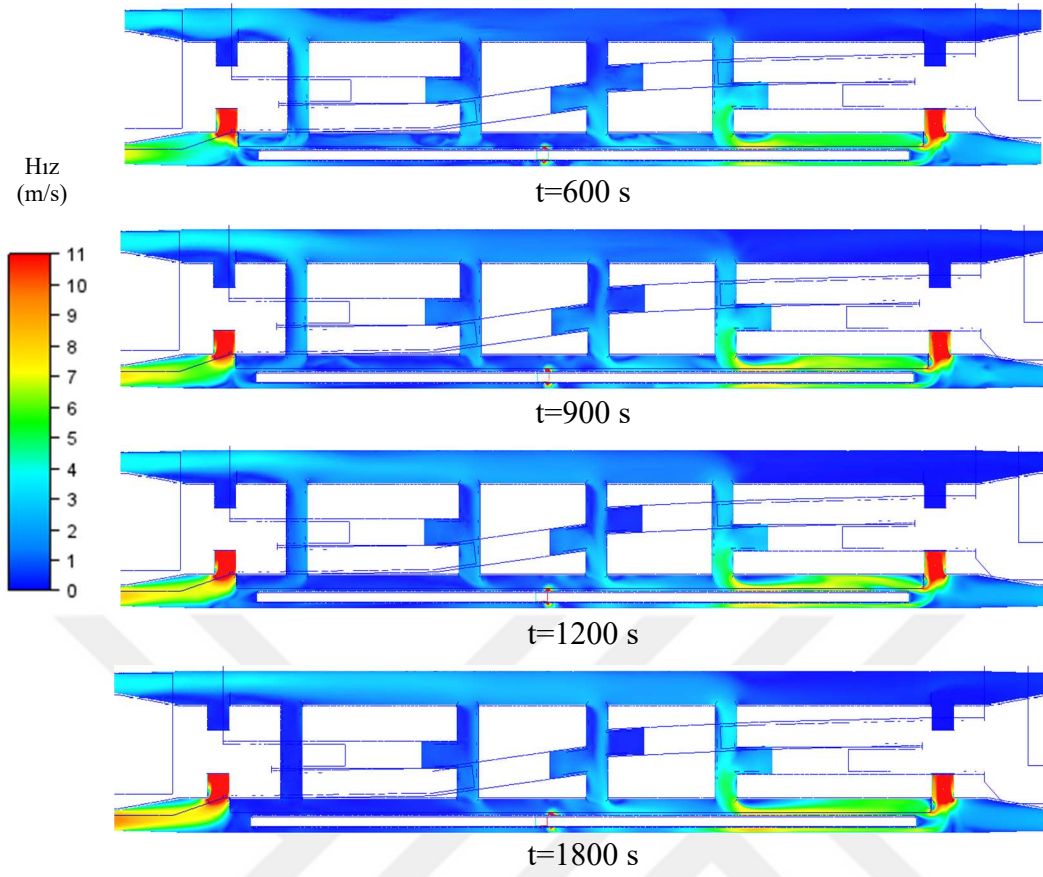
Bu bölümde, Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü orta hızda yangın büyüme eğrisi için uygun sonuç alınan senaryo, aynı tünel havalandırma fan debileri

kullanılarak çok hızlı yangın büyüme eğrisine sahip 25 MW yangın yükü senaryosu için tekrarlanmıştır. 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet her biri 90 m³/s debiye sahip tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırılmıştır. Analiz 1800 s boyunca sürdürülmüştür.

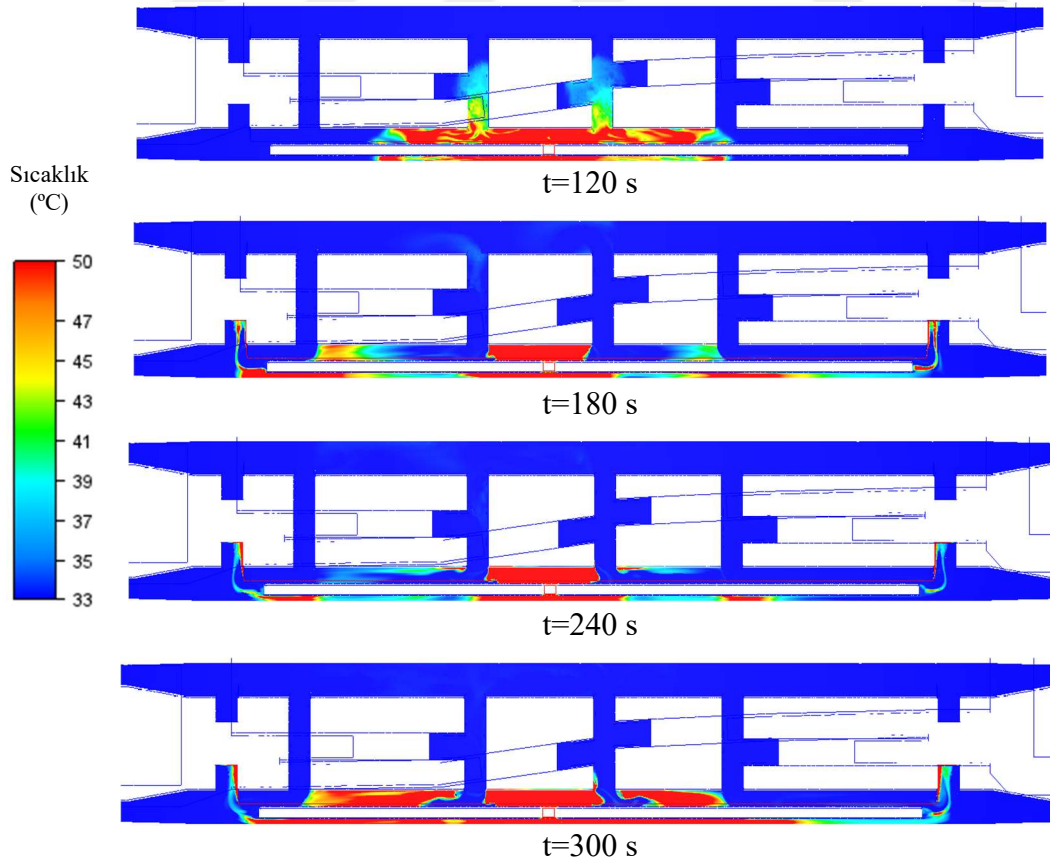
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü çok hızlı yangın büyüme eğrisi için peron seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



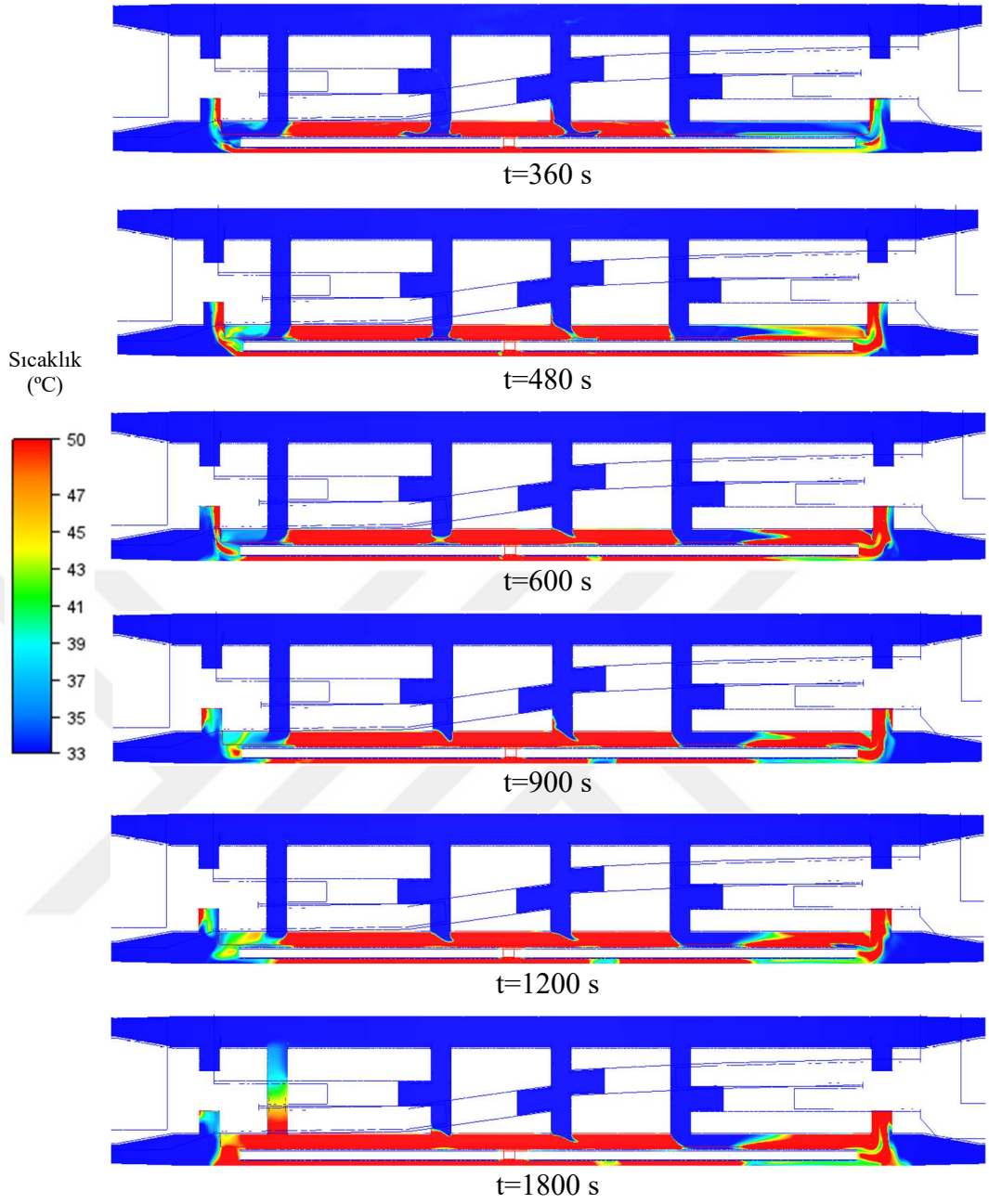
Şekil 4.41 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi



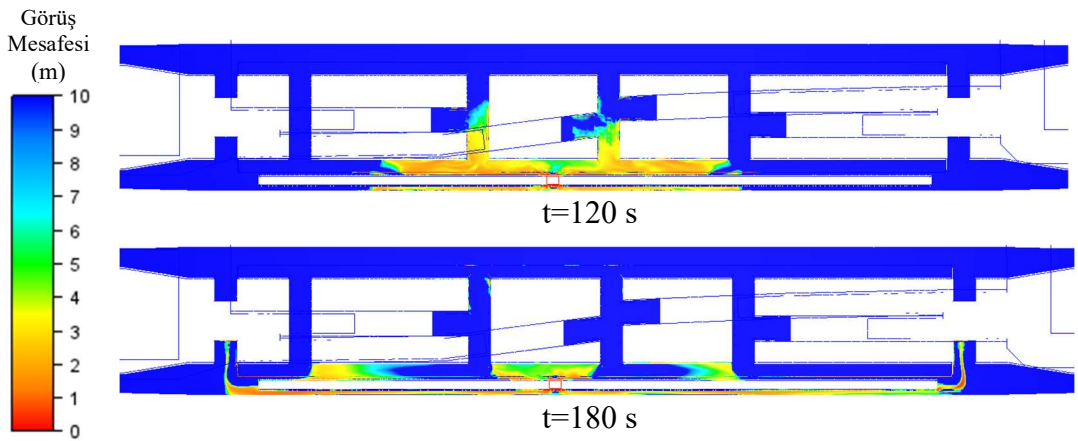
Şekil 4.41 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı hava hızı değişimi



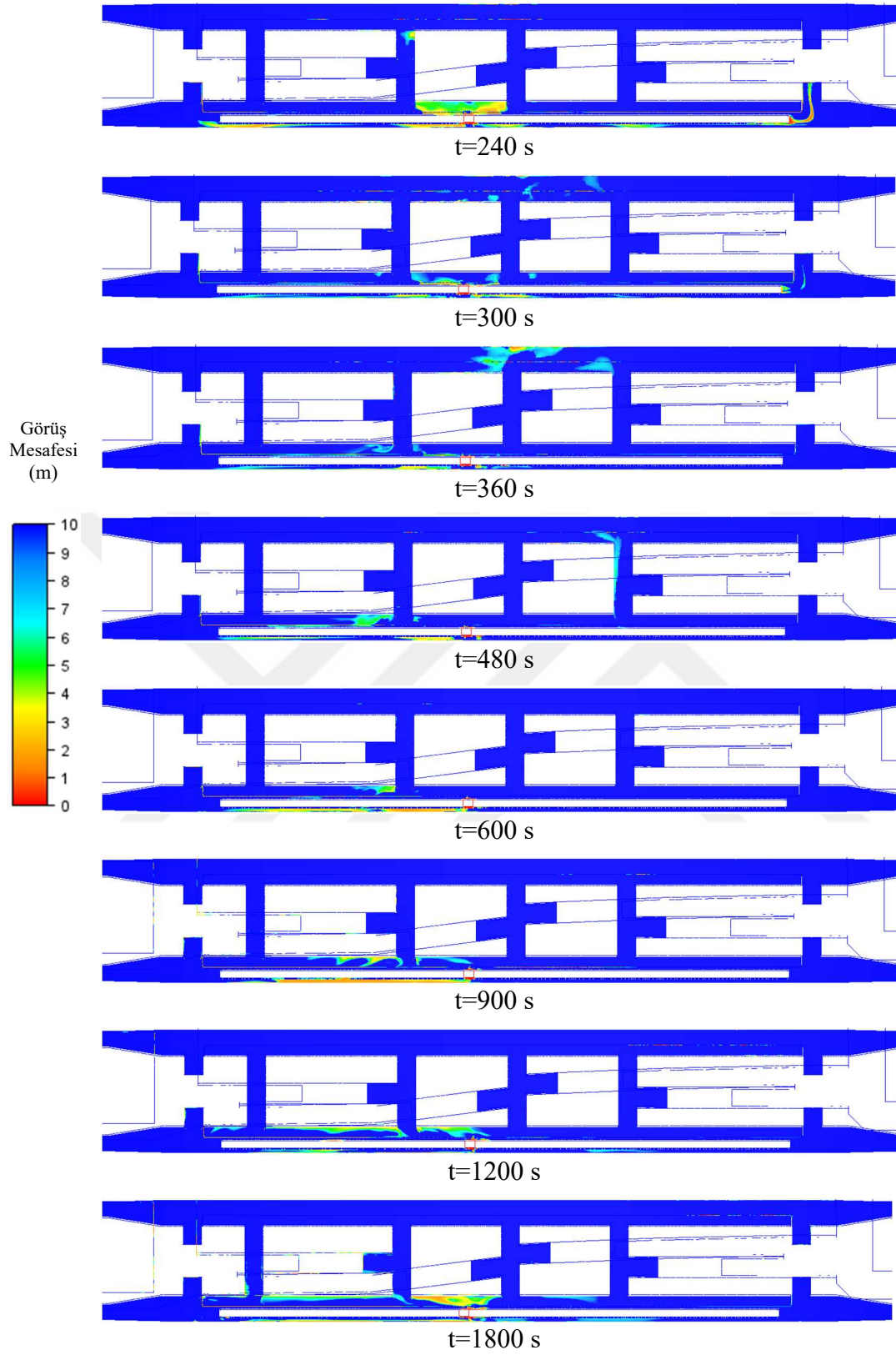
Şekil 4.42 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.42 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi

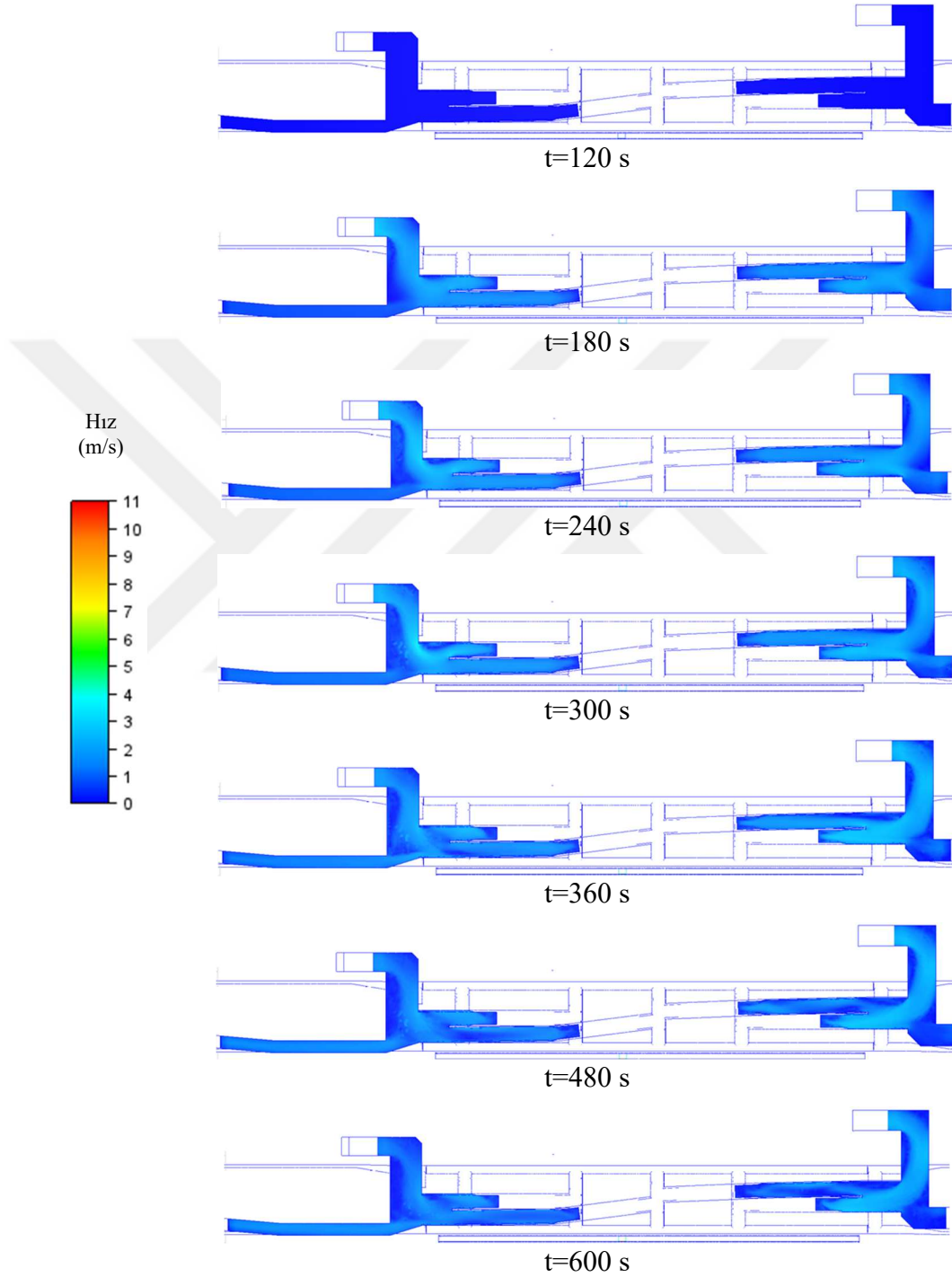


Şekil 4.43 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

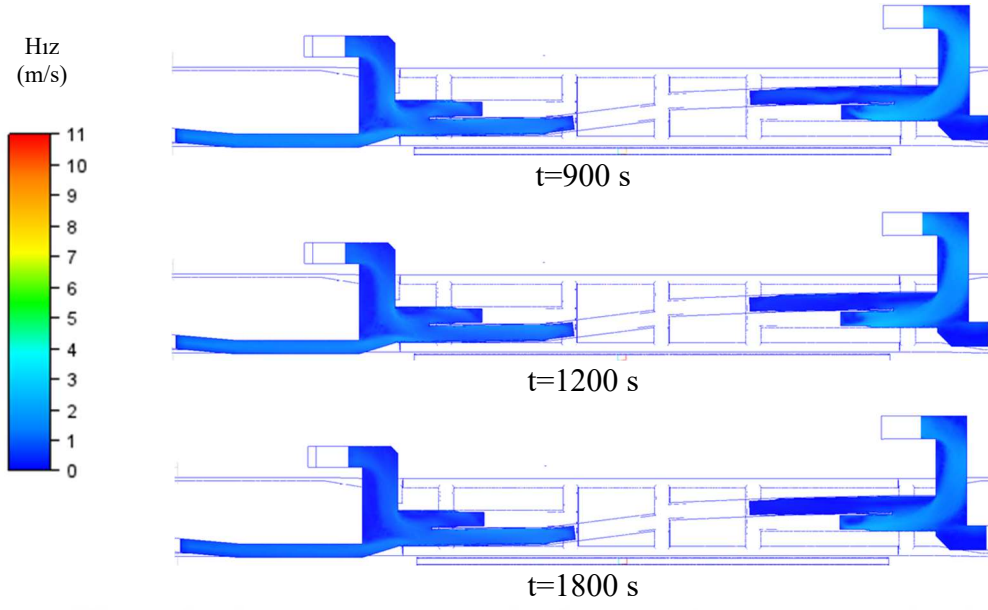


Şekil 4.43 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

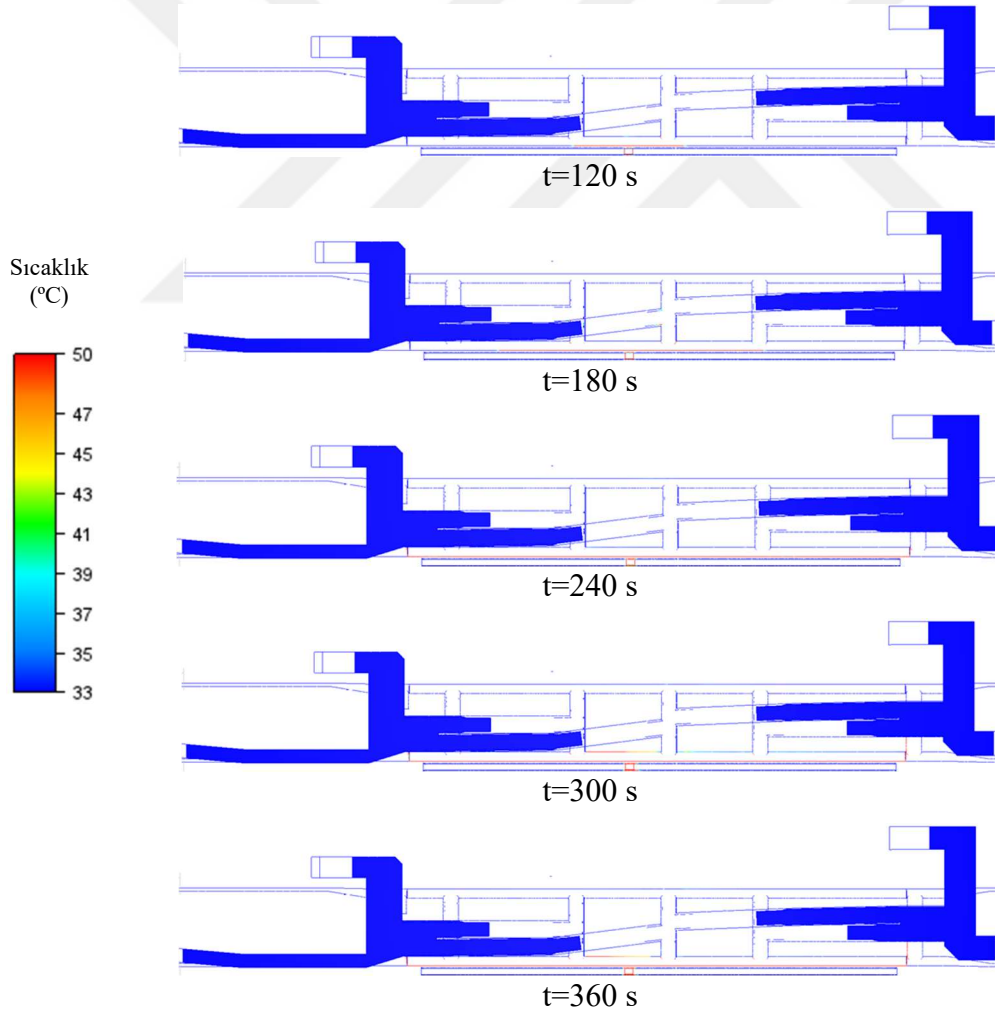
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü çok hızlı yangın büyüme eğrisi için konkors seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da gösterilmiştir.



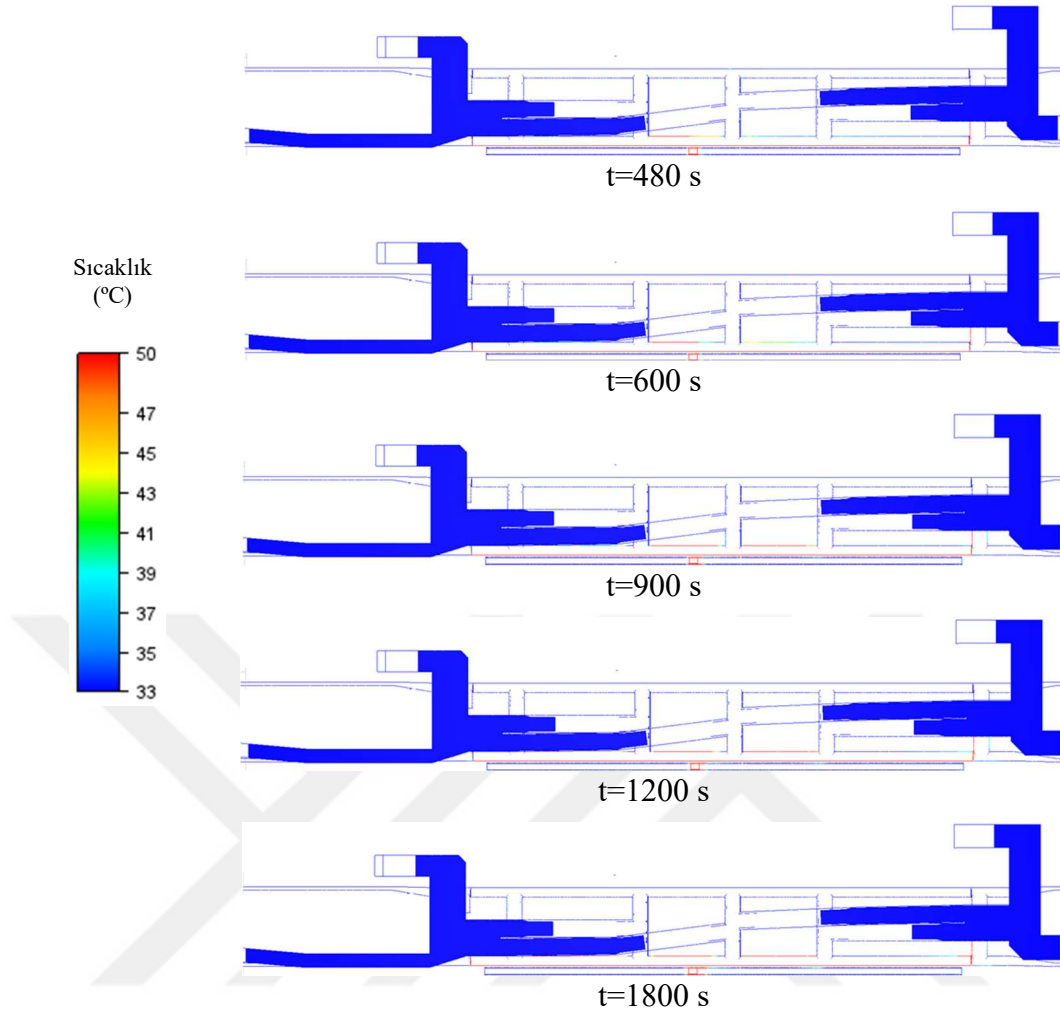
Şekil 4.44 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



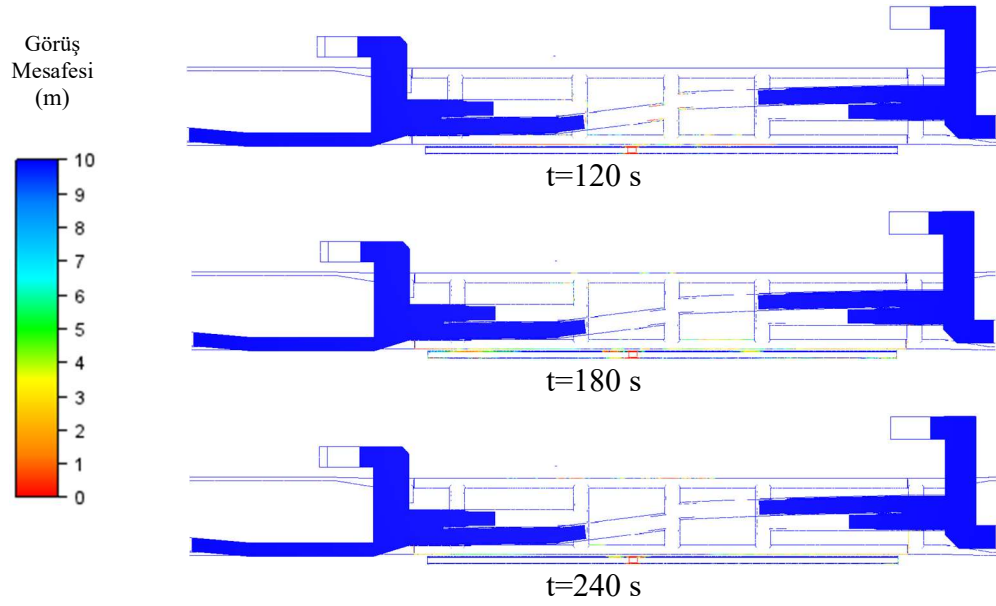
Şekil 4.44 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



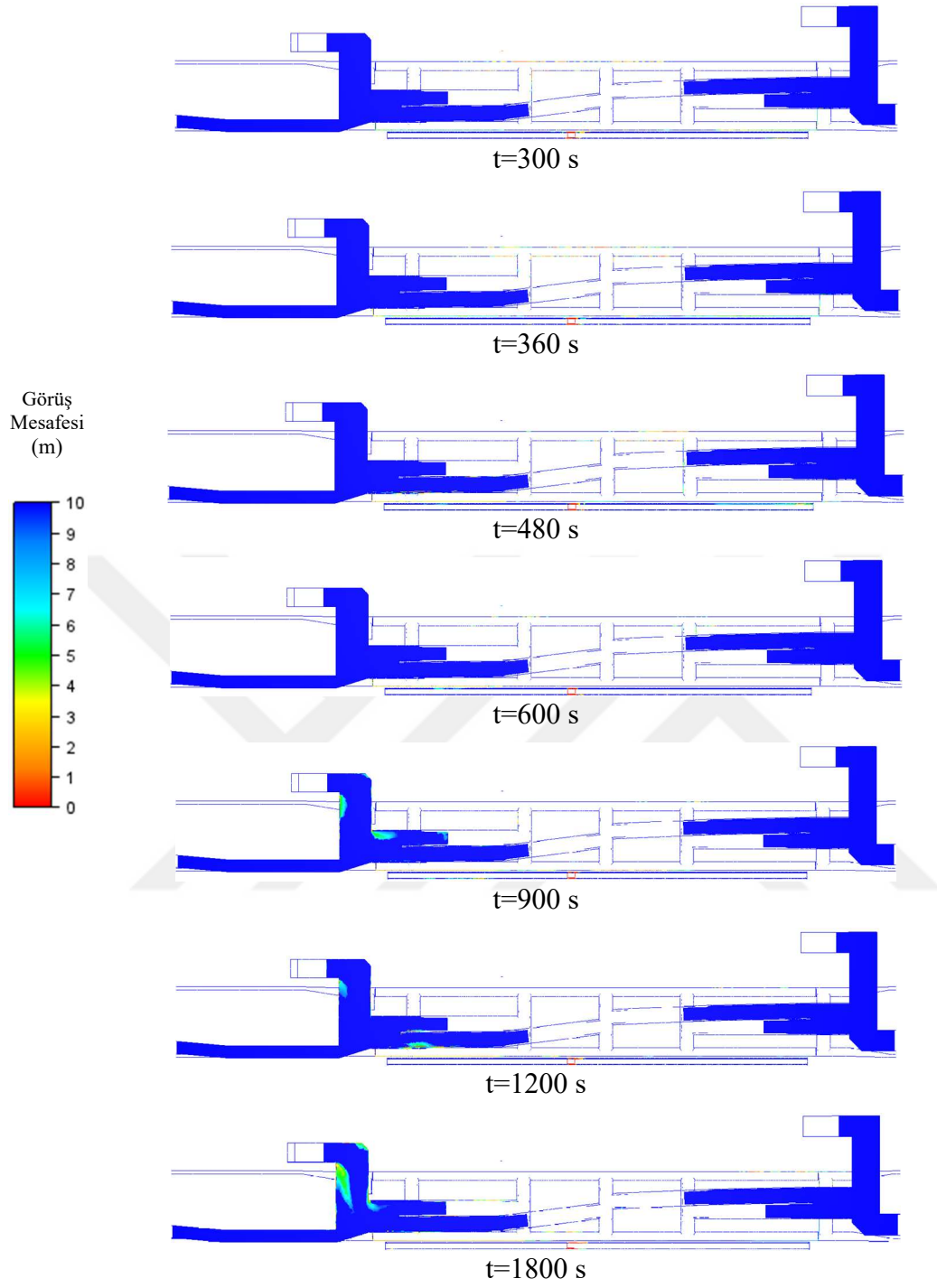
Şekil 4.45 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.45 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi

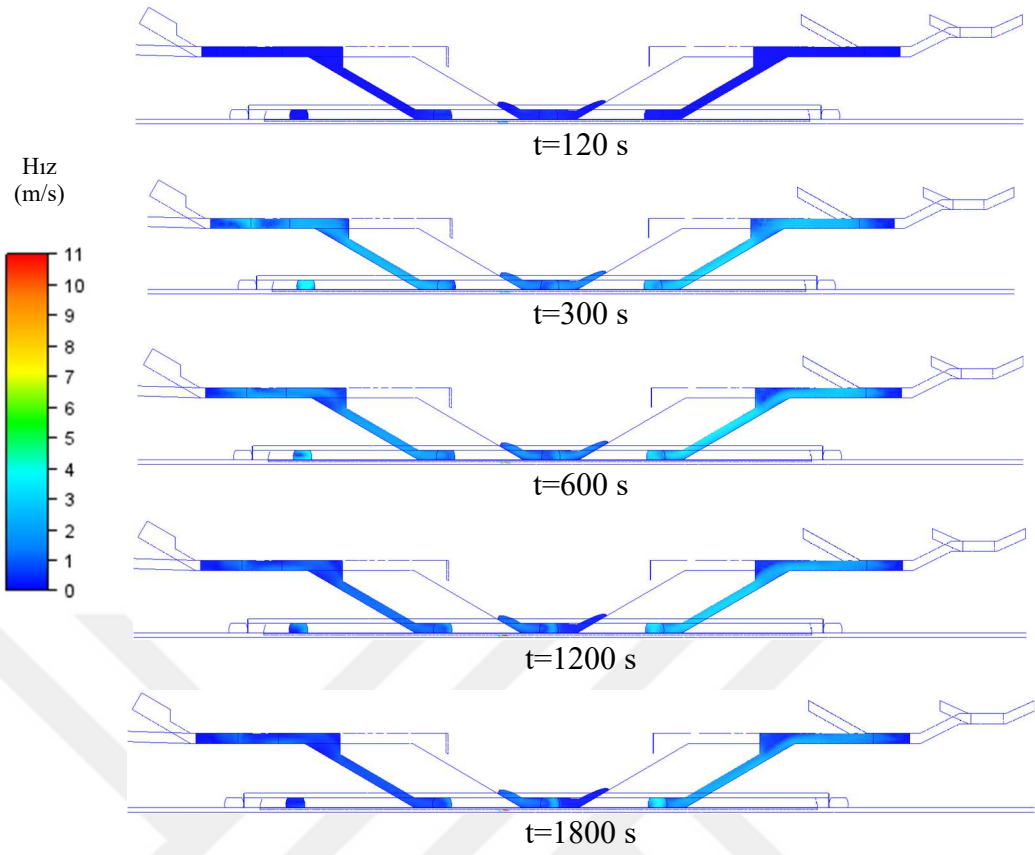


Şekil 4.46 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

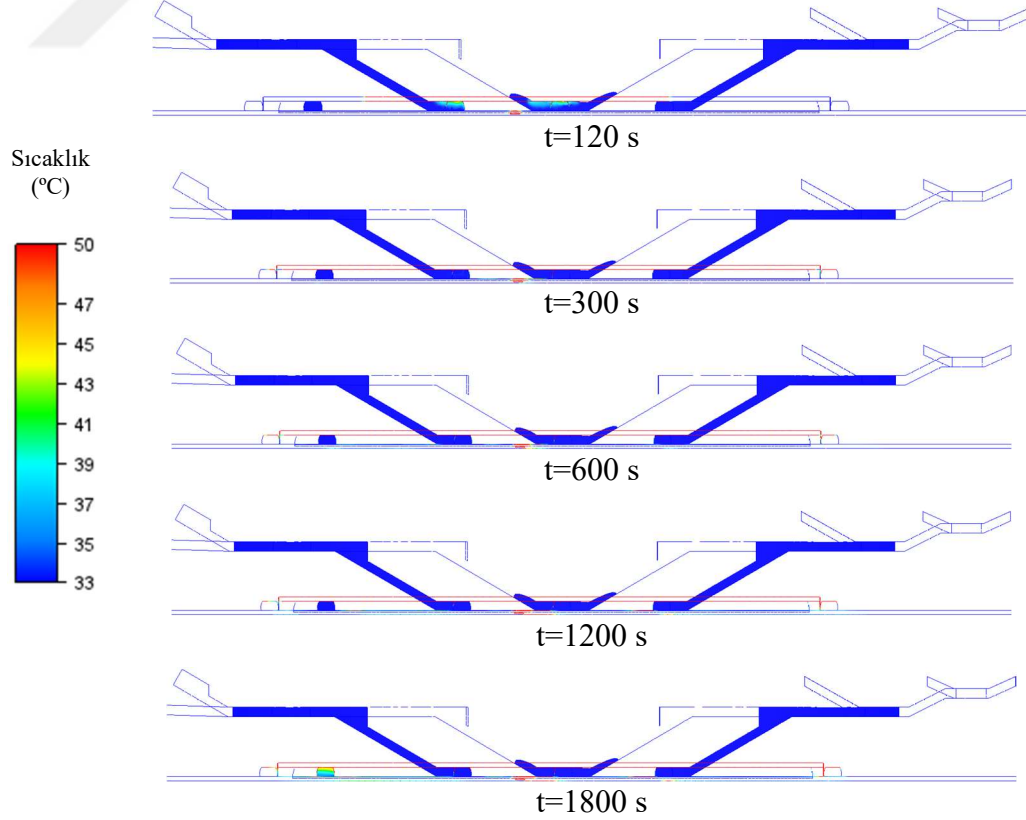


Şekil 4.46 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

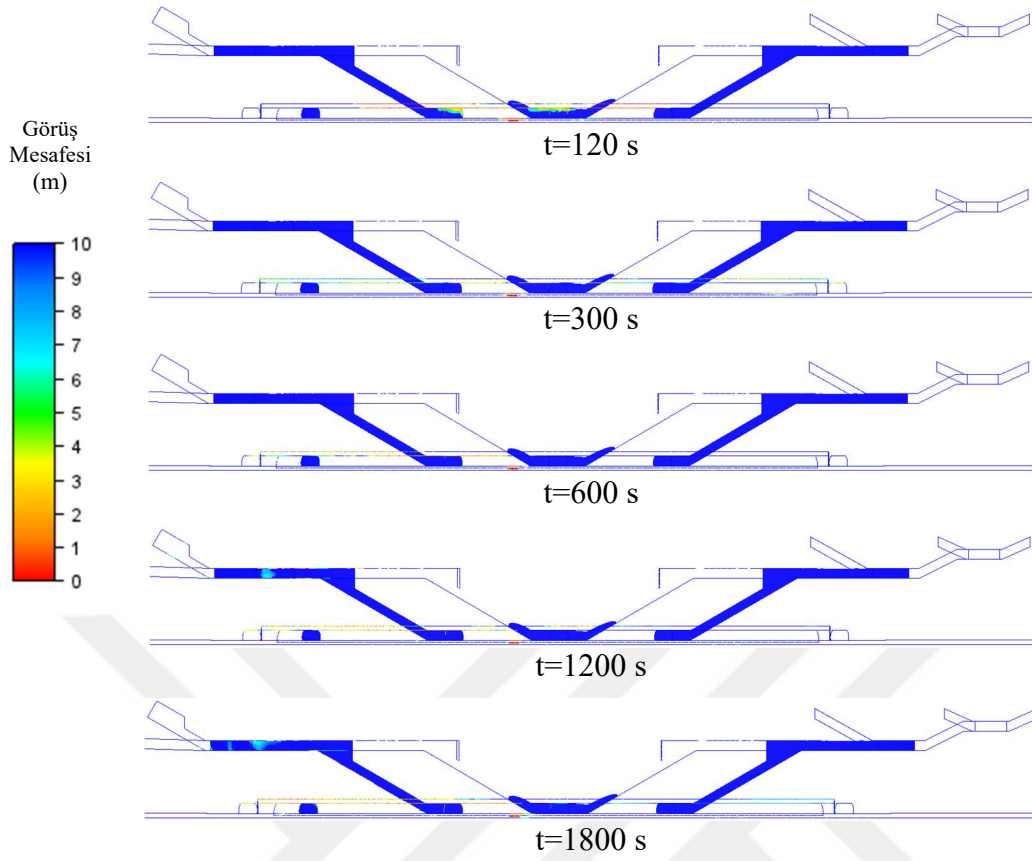
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü çok hızlı yangın büyüme eğrisi için A-A düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da gösterilmiştir.



Şekil 4.47 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi

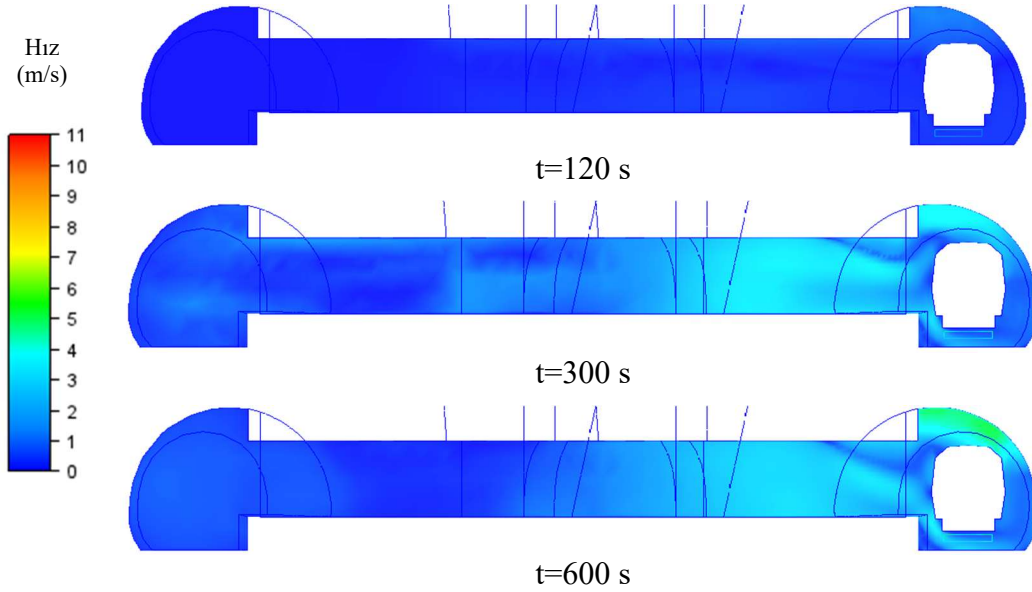


Şekil 4.48 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

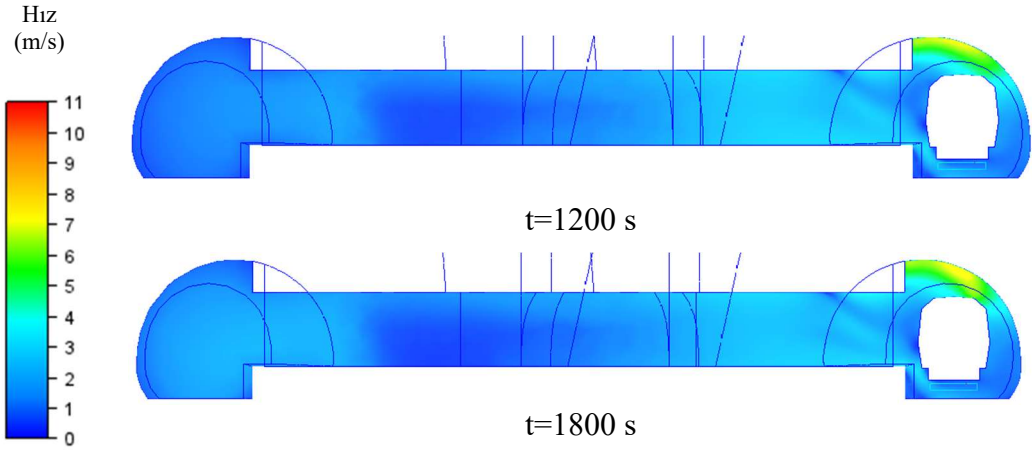


Şekil 4.49 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi

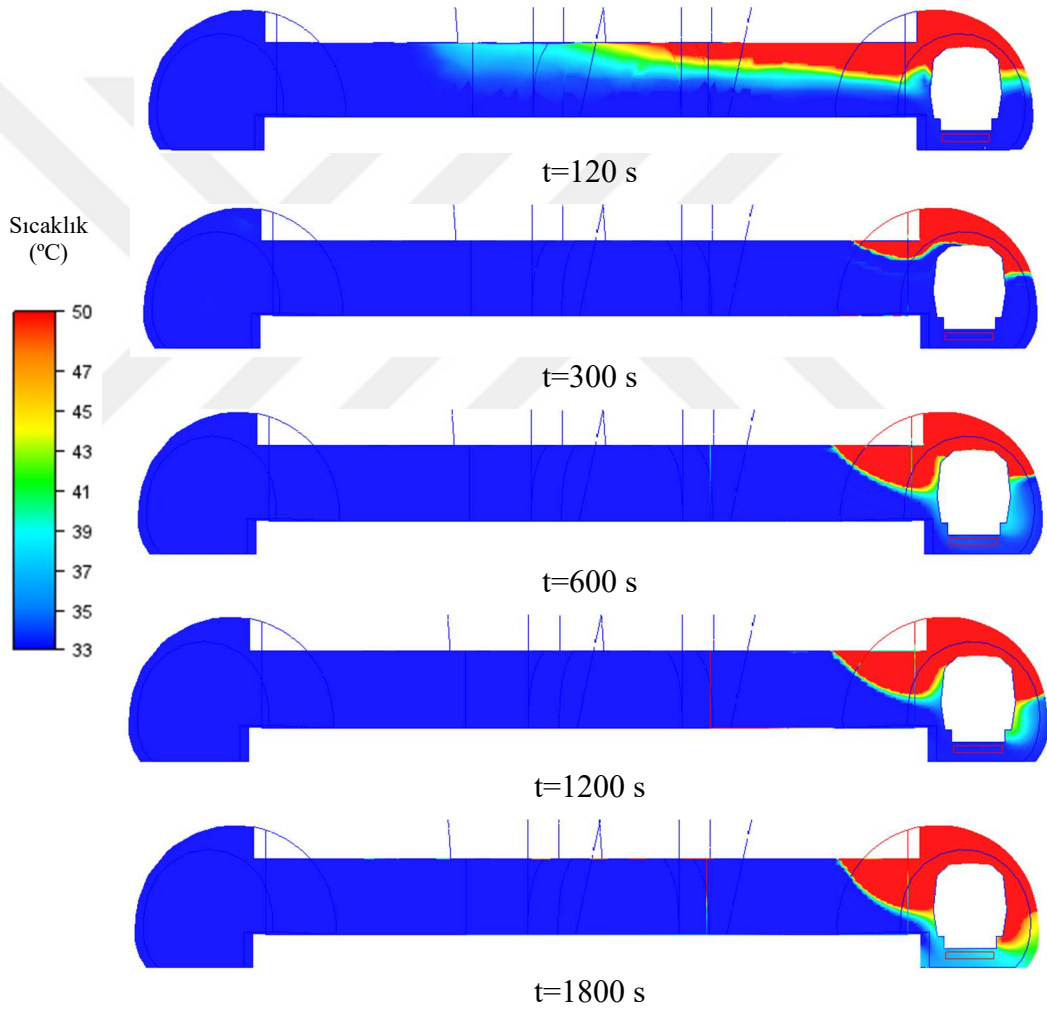
Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü çok hızlı yangın büyüme eğrisi için B-B düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.50, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de gösterilmiştir.



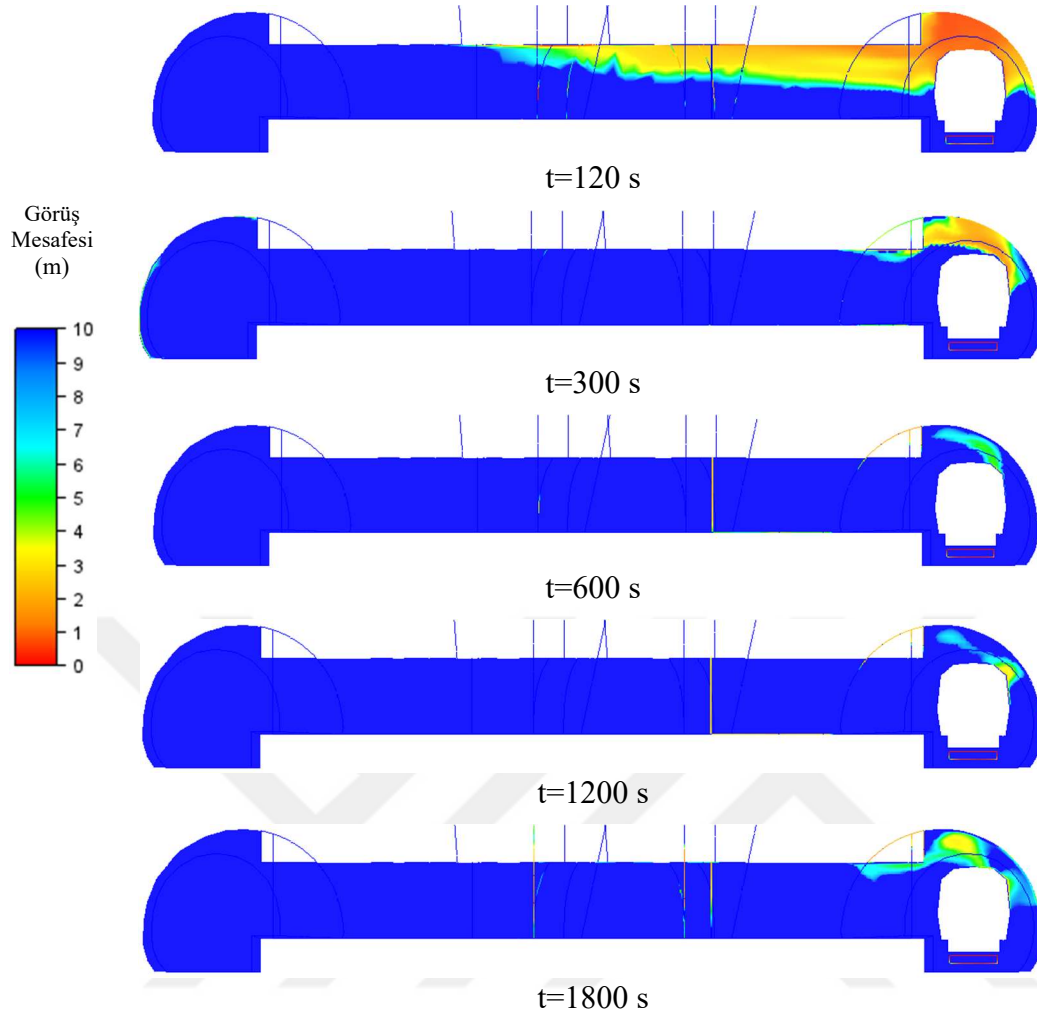
Şekil 4.50 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.50 (devam) : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.51 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi



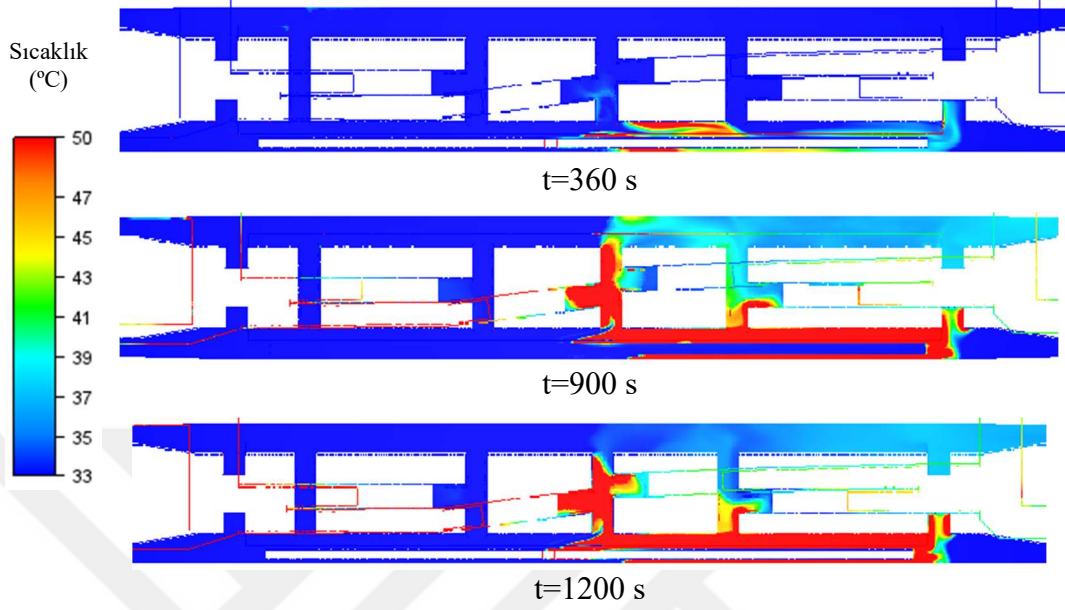
Şekil 4.52 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi

4.3.4 25 MW yangın yükü basma-egzoz senaryosu HAD yangın analizi sonuçları

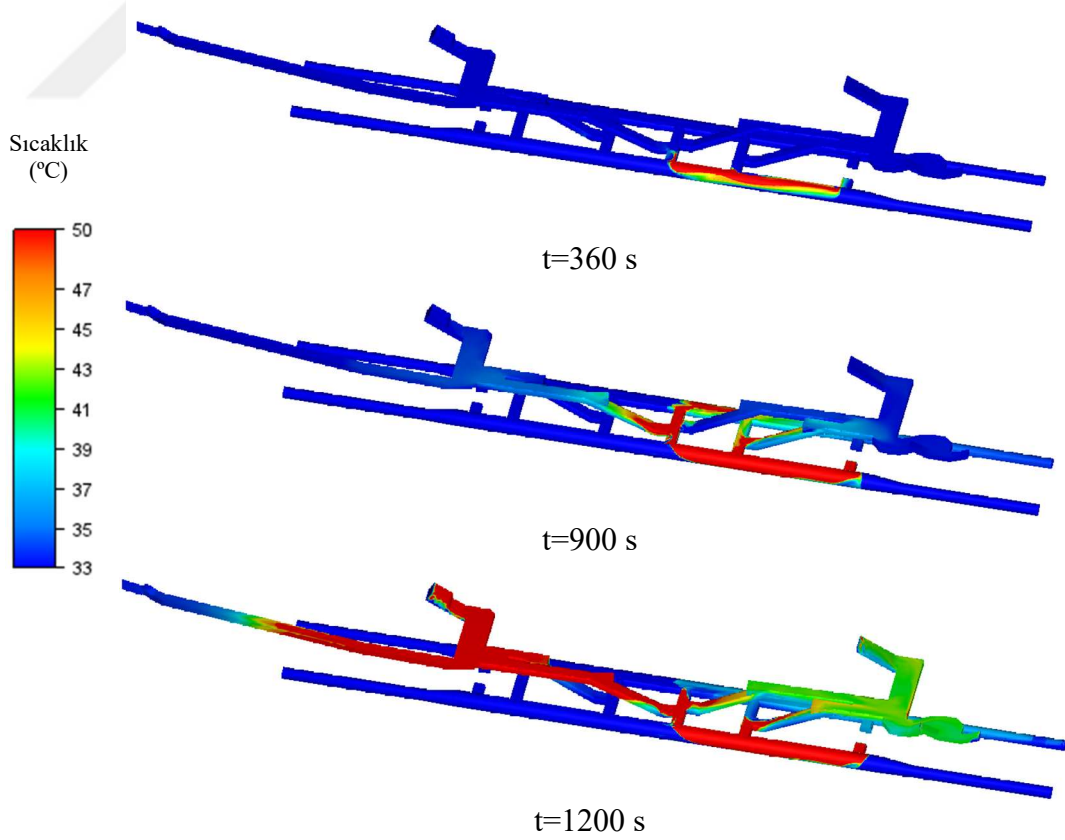
Bu bölümde, Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için tüm fanlar egzoz modunda çalıştırıldığında uygun sonuç alınan senaryo, kuzey yönde olan fanlar basma güney yönde olan fanlar egzoz modunda çalıştırılarak tekrarlanmıştır. Analizde 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet her biri $90 \text{ m}^3/\text{s}$ debiye sahip tünel havalandırma fanı kullanılmıştır. Analiz 1200 s boyunca sürdürülmüştür.

Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü egzoz-basma senaryosu için peron seviyesinden 2 m yükseklikte ve istasyon genelinde oluşan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te gösterilmiştir. Egzoz-basma senaryosu ile yapılan analiz sonucunda istasyon içerisinde sıcak hava ve dumanın merdiven bölgesine ve akabinde merdiven boşluklarından ilerleyerek konkors katına ulaştığı belirlenmiştir. Aynı debiye sahip fanların tamamının egzoz modunda çalıştığı senaryoda merdiven hizasına sıcak hava ve dumanın gitmediği

dikkate alındığında egzoz-basma senaryosunun genelde tercih edilmemesinin sebebi ortaya çıkmaktadır. Aksi halde uygun ortam şartlarının sağlanması için ilave tedbirler almak gerekecektir.



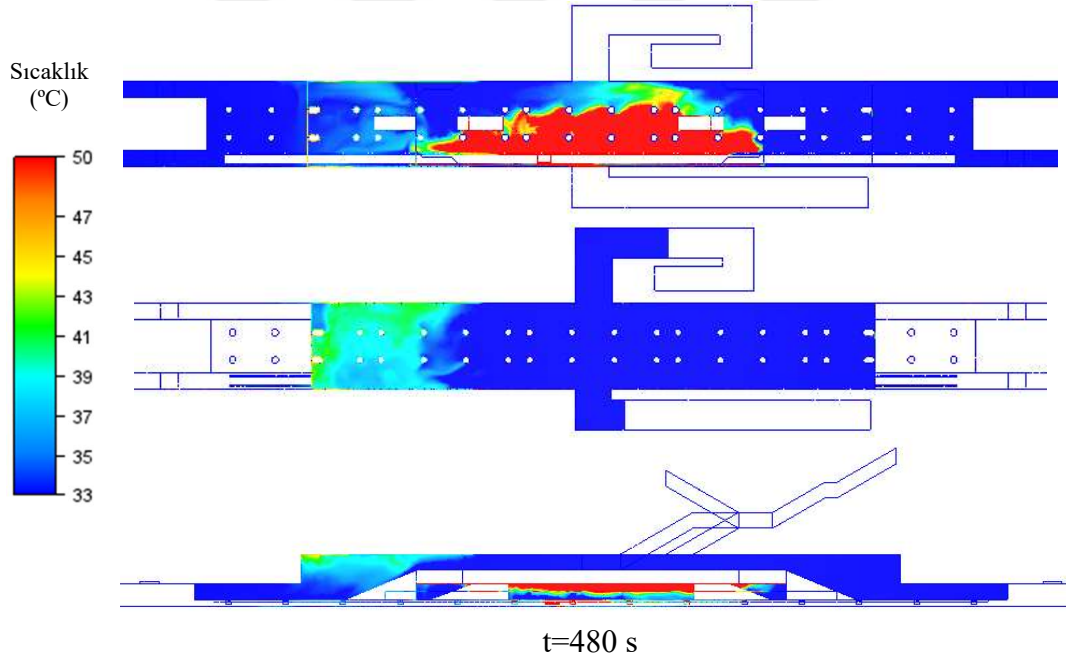
Şekil 4.53 : Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.54 : Şişli-Mecidiyeköy istasyon geneli sıcaklık değişimi

4.4 Gayrettepe İstasyonu HAD Yangın Analizi Sonuçları

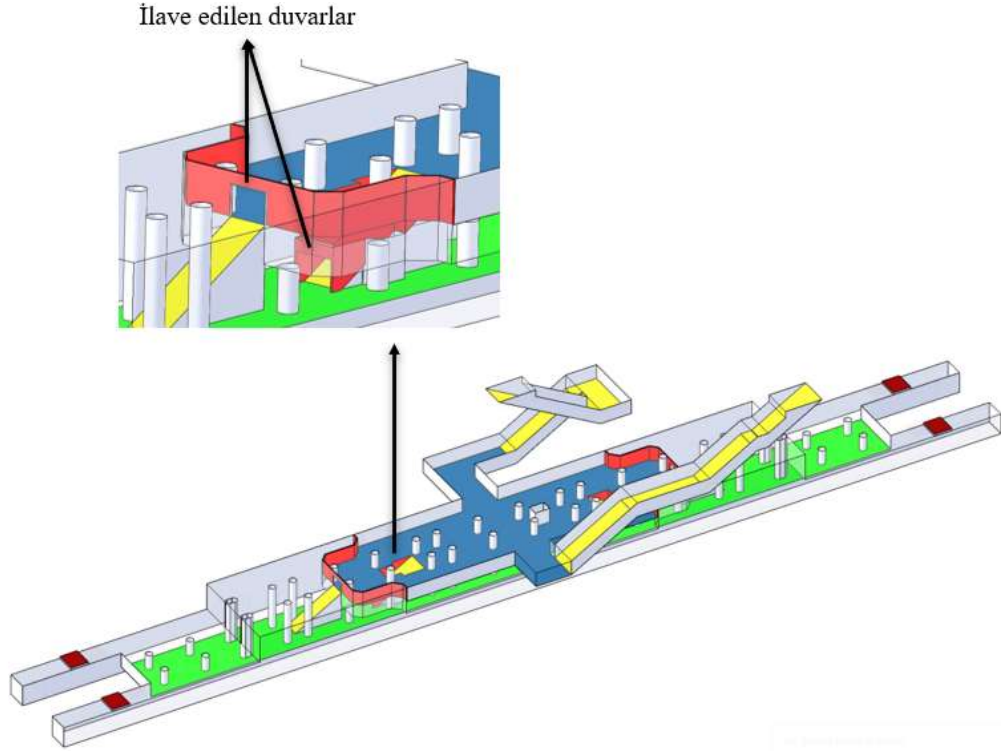
Gayrettepe istasyonunda farklı debilere sahip fanlar kullanılarak yapılan HAD analizleri sonucunda 6 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma fanlarının analiz süresi boyunca gerekli ortam şartlarının sağlanması açısından yeterli olduğu belirlenmiştir. 25 MW yangın yükü için sadece tünel havalandırma fanlarının çalıştığı senaryolarda sıcak hava ve dumanın kısa süre içerisinde perona yayıldığı ve sonrasında konkors katına ilerlediği belirlenmiştir. Bu sebeple senaryolara peron altı egzoz fanları da dahil edilmiştir. İlave fanların çalışması sonuçlarda iyileşme sağlamakla birlikte bir süre sonra dumanın konkors katına ulaşmasına engel olamamıştır. 25 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma ve 2 adet 55 m³/s debili peron altı egzoz fanlarının çalıştırıldığı senaryo sonucunda Şekil 4.55'te görüldüğü üzere analiz başladıktan 480 saniye sonra sıcak hava ve duman konkors katına doğru ilerlemektedir.



Şekil 4.55 : Gayrettepe istasyonu peron, konkors ve A-A düzlemi 480. s sıcaklık görselleri

Yapılan değerlendirmeler sonucunda mimari tasarımda bazı revizyon önerileri yapılarak dumanın konkors katına ilerlemesi engellenip, tahliyenin daha güvenli hale getirilebileceği öngörülmüştür. Mimari tasarımda revizyon olarak konkors katının uç noktalarına ve ortadaki merdivenlerin etrafına duvar örülmesi önerilmiştir. İstasyon için önerilen mimari tasarım revizyonu Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Peron katından konkors katına geçiş bölgelerine duvar örülürken merdiven bölgelerinden de duman

geçişini engellemek amacıyla merdiven üzerindeki bölüme tavan kotundan 1 m aşağıya kadar duvar eklenmiştir.



Şekil 4.56 : Gayrettepe istasyonu mimari tasarım revizyon önerisi

Revize edilen mimari tasarım kullanılarak yapılan analiz sonucunda 25 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma ve 2 adet 55 m³/s debili peron altı egzoz fanlarının yeterli olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın ve dumanın istasyona yayılmasını engellemek ve dumanı hızlı bir şekilde dışarı atmak amacıyla 6 MW ve 25 MW senaryolarında fanların hepsi egzoz modunda çalıştırılmıştır.

NFPA 130 standardına göre yapılan tahliye hesaplamaları sonucunda Gayrettepe istasyonunda yolcuların peron katını 4,21 dakikada (253 s) istasyonu ise 7,22 dakikada (433 s) tahliye ettiği hesaplanmıştır. Değerlendirmelerde NFPA 130 da belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterleri dikkate alınmıştır. Ayrıca analiz süresi boyunca sıcak hava ve dumanın konkors katına çıkan merdiven hizasına erişmemesi ve üst kata doğru ilerlememesi şartı aranmıştır. Değerlendirme yapılırken yangın bölgesine çok yakın peron bölgelerinde oluşan yüksek sıcaklık ve düşük görüş mesafesi değerleri dikkate alınmamıştır.

6 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma fanları kullanılarak elde edilen sonuçlarda 120-480 s zaman aralığındaki görsellere bakıldığında hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi verilerinin istenen kriterleri sağladığı görülmektedir.

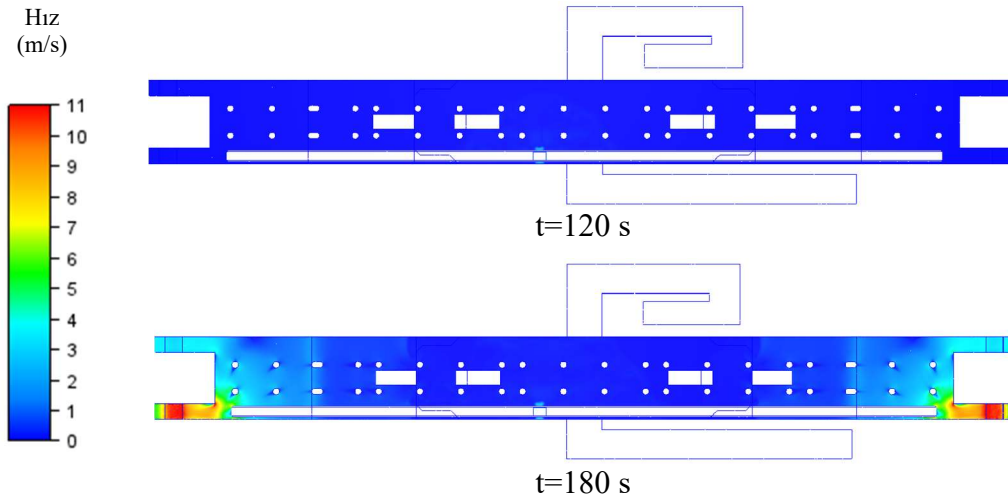
Sadece yangın olan vagonun yakınında sıcaklıklar biraz yükselmekte ve görüş mesafesi düşmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur ve bu bölge için kriterler kapsam dışı tutulmuştur. Analiz süresi boyunca gerek yatay gerekse düşey düzlemler incelendiğinde sıcak hava ve dumanın konkors katına çıkan merdiven hizasına erişmediği ve üst kata doğru ilerlemediği görülmektedir.

Revize mimar tasarım ile 25 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma ve 2 adet 55 m³/s debili peron altı egzoz fanları kullanılarak elde edilen sonuçlarda 120-480 s zaman aralığındaki görsellere bakıldığında hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi verilerinin istenen kriterleri sağladığı görülmektedir. Sadece yangın olan vagonun yakınında sıcaklıklar biraz yükselmekte ve görüş mesafesi düşmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur ve bu bölge için kriterler kapsam dışı tutulmuştur. Analiz süresi boyunca gerek yatay gerekse düşey düzlemler incelendiğinde sıcak hava ve dumanın konkors katına çıkan merdiven hizasına erişmediği ve üst kata doğru ilerlemediği görülmektedir.

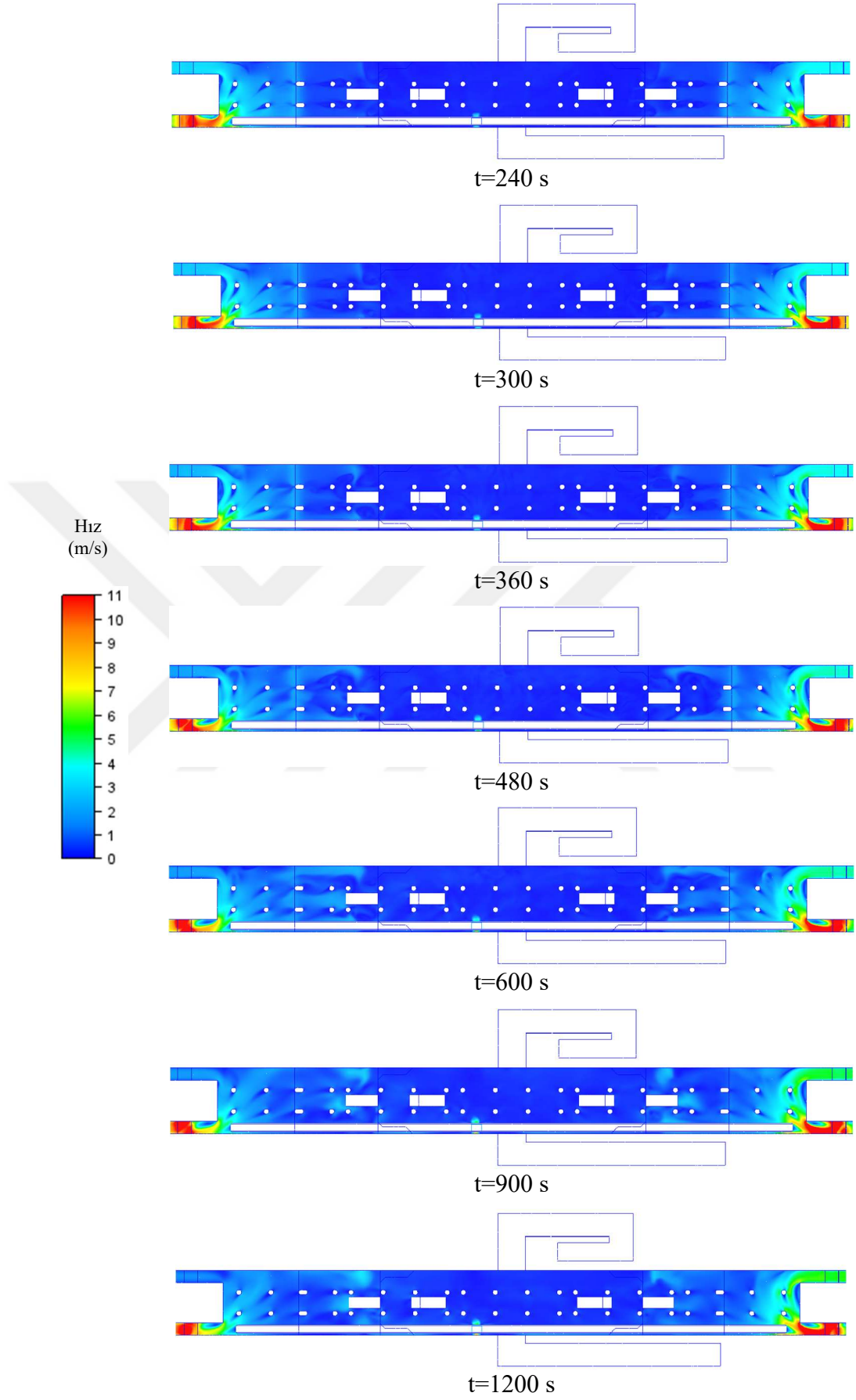
4.4.1 6 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları

Bu bölümde, Gayrettepe istasyonunda 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet her biri 120 m³/s debiye sahip tünel havalandırma fanlarının egzoz modunda çalıştırıldığı analiz sonuçları verilmektedir. Analiz 1200 s boyunca sürdürülmüştür.

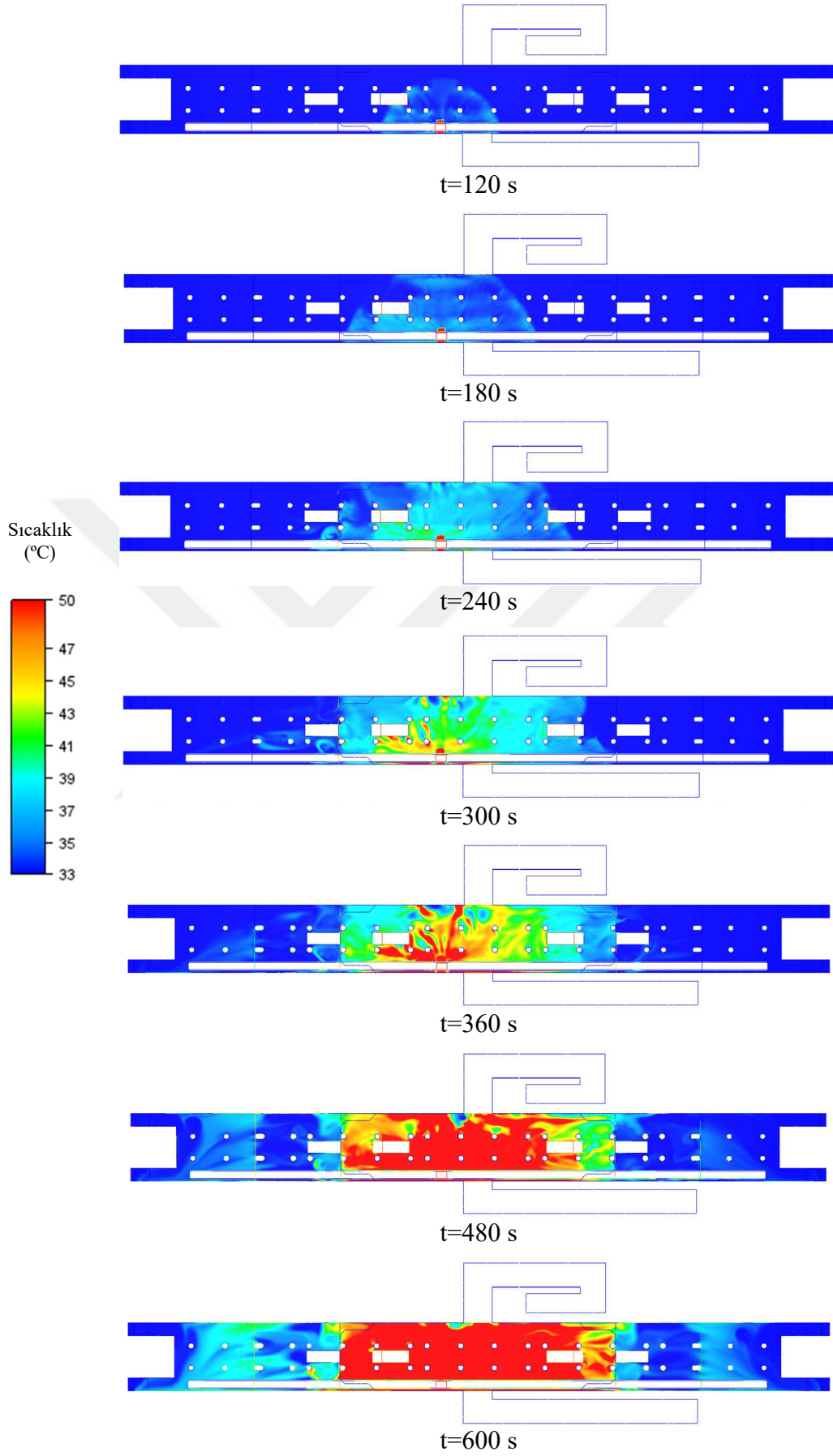
Gayrettepe istasyonunda 6 MW yangın yükü için peron seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da gösterilmiştir.



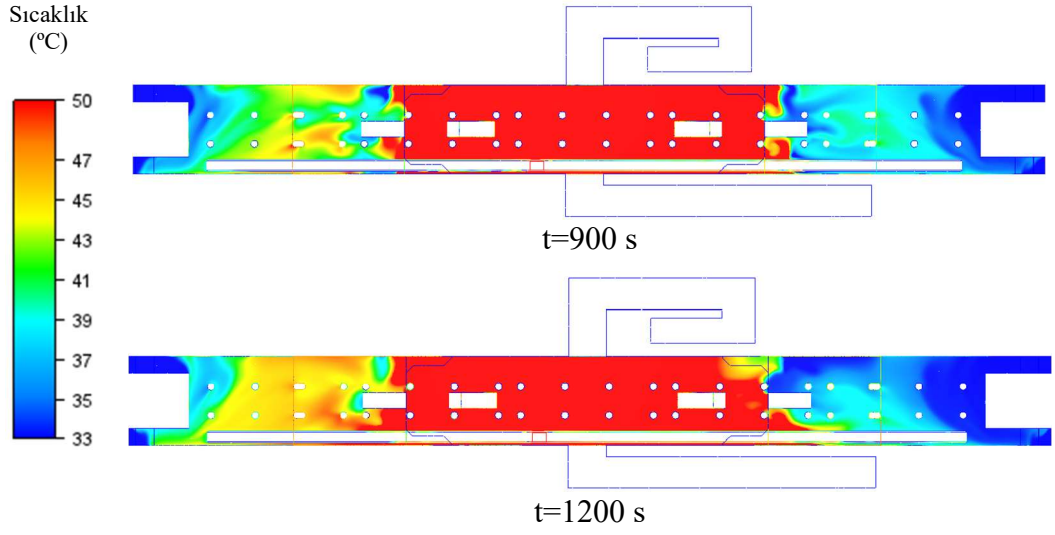
Şekil 4.57 : Gayrettepe istasyonu peron katı hava hızı değişimi



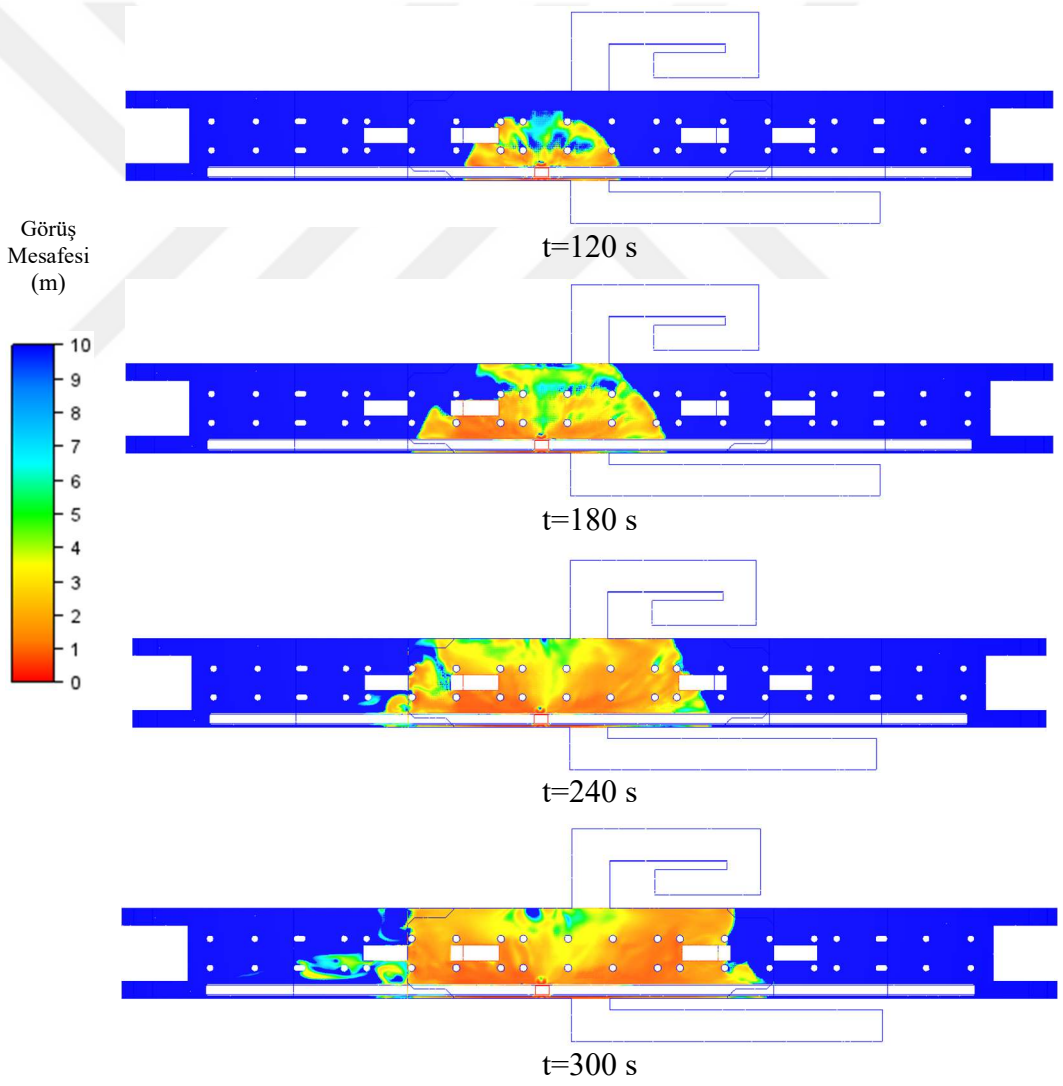
Şekil 4.57 (devam) : Gayrettepe istasyonu peron katı hava hızı değişimi



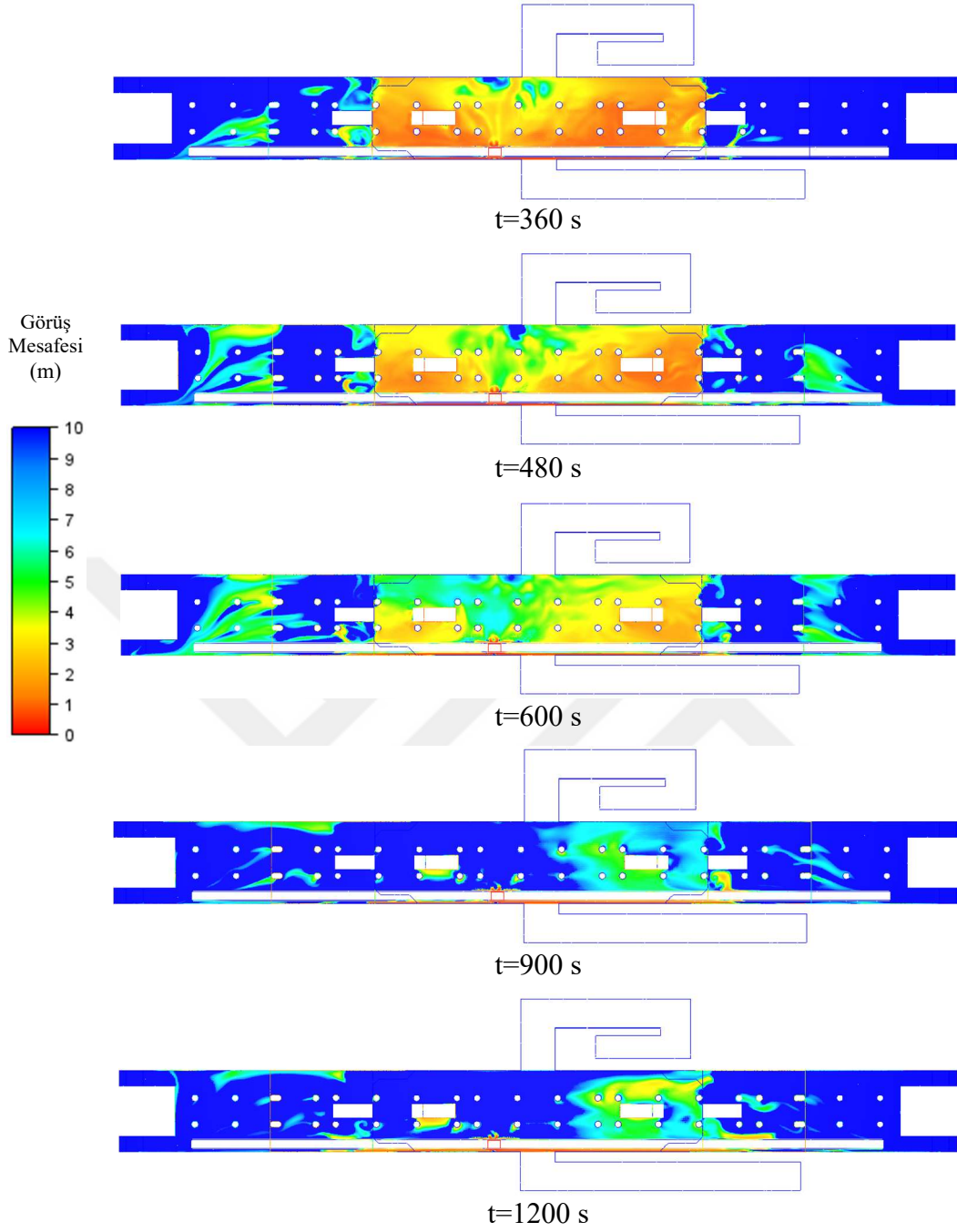
Şekil 4.58 : Gayrettepe istasyonu peron katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.58 (devam) : Gayrettepe istasyonu peron katı sıcaklık değişimi

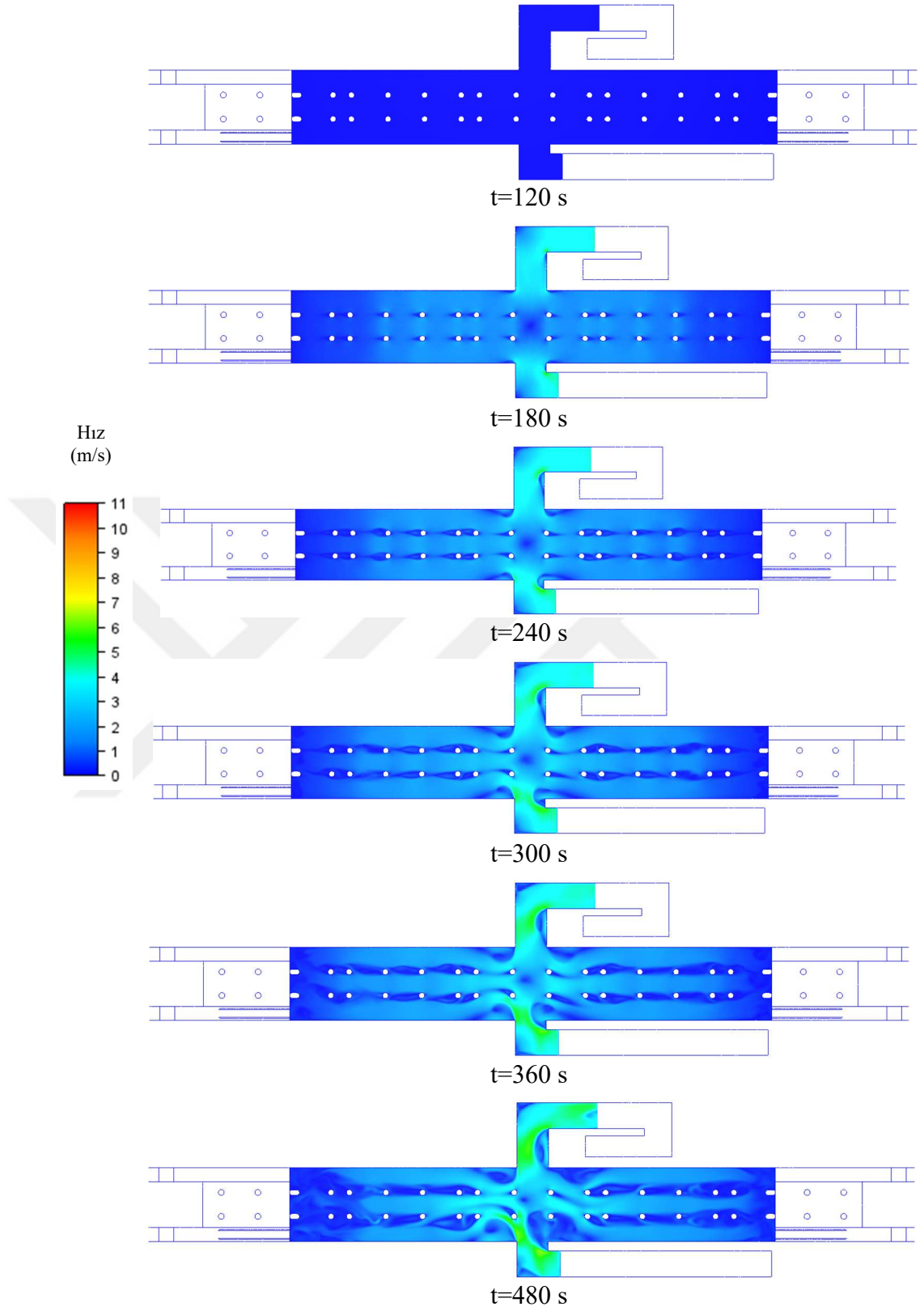


Şekil 4.59 : Gayrettepe istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

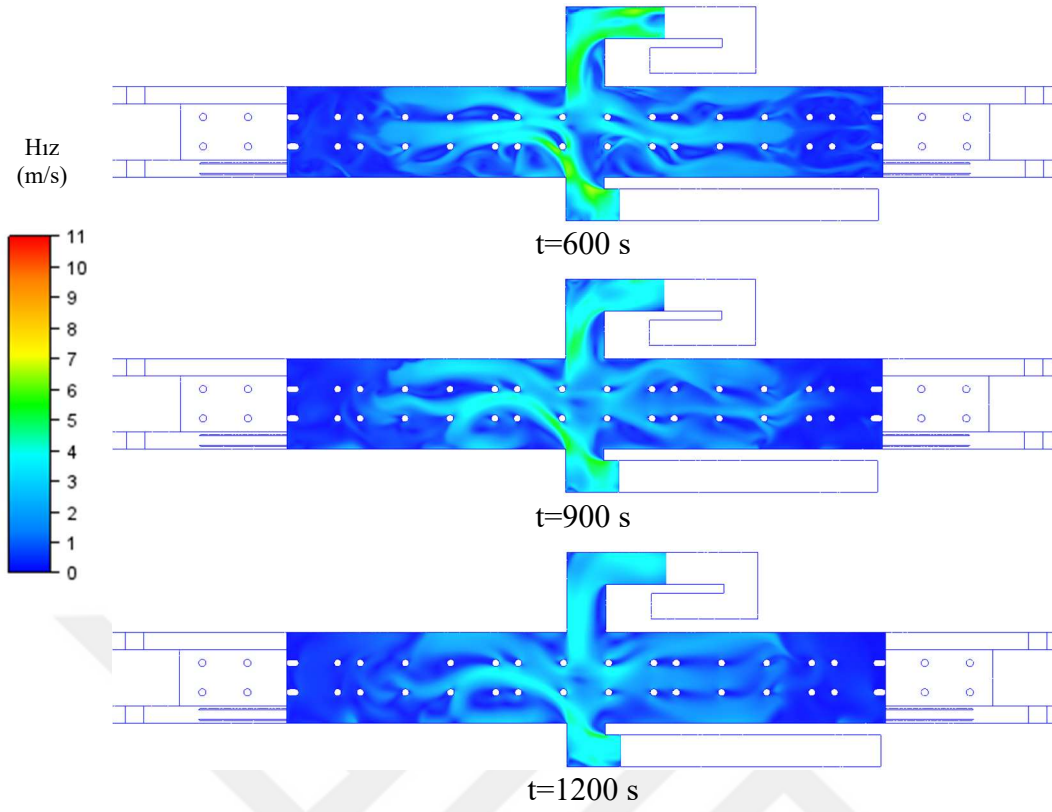


Şekil 4.59 (devam) : Gayrettepe istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

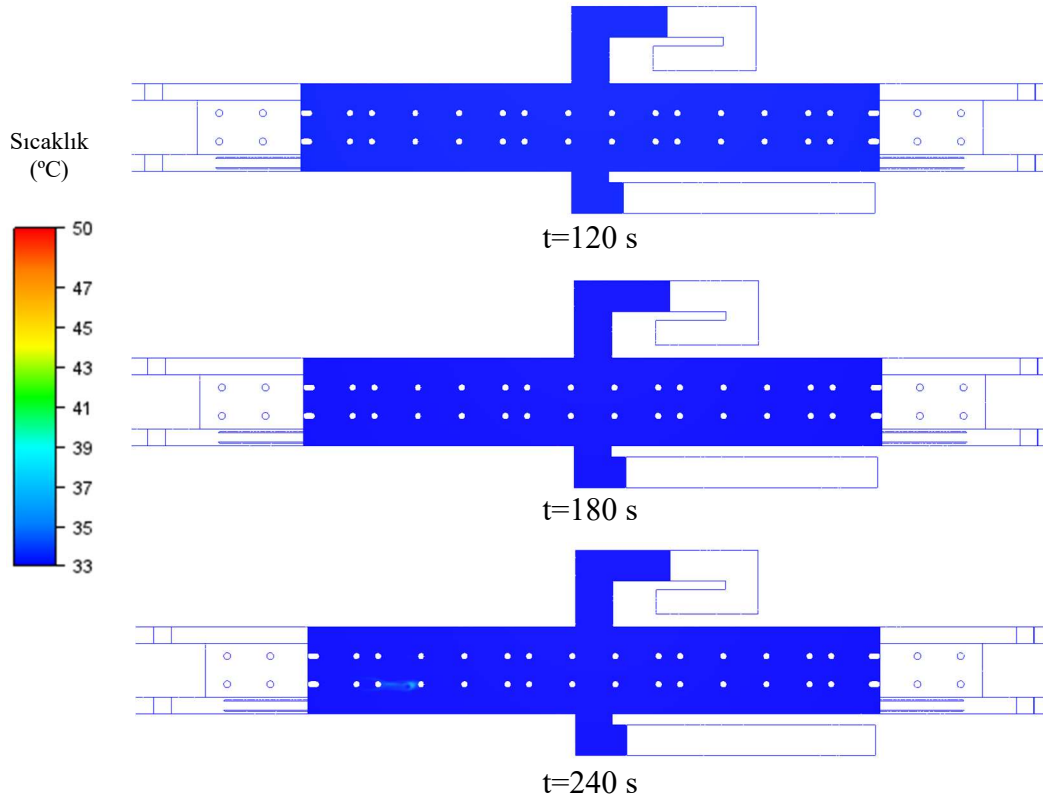
Gayrettepe istasyonunda 6 MW yangın yükü için konkors seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de gösterilmiştir.



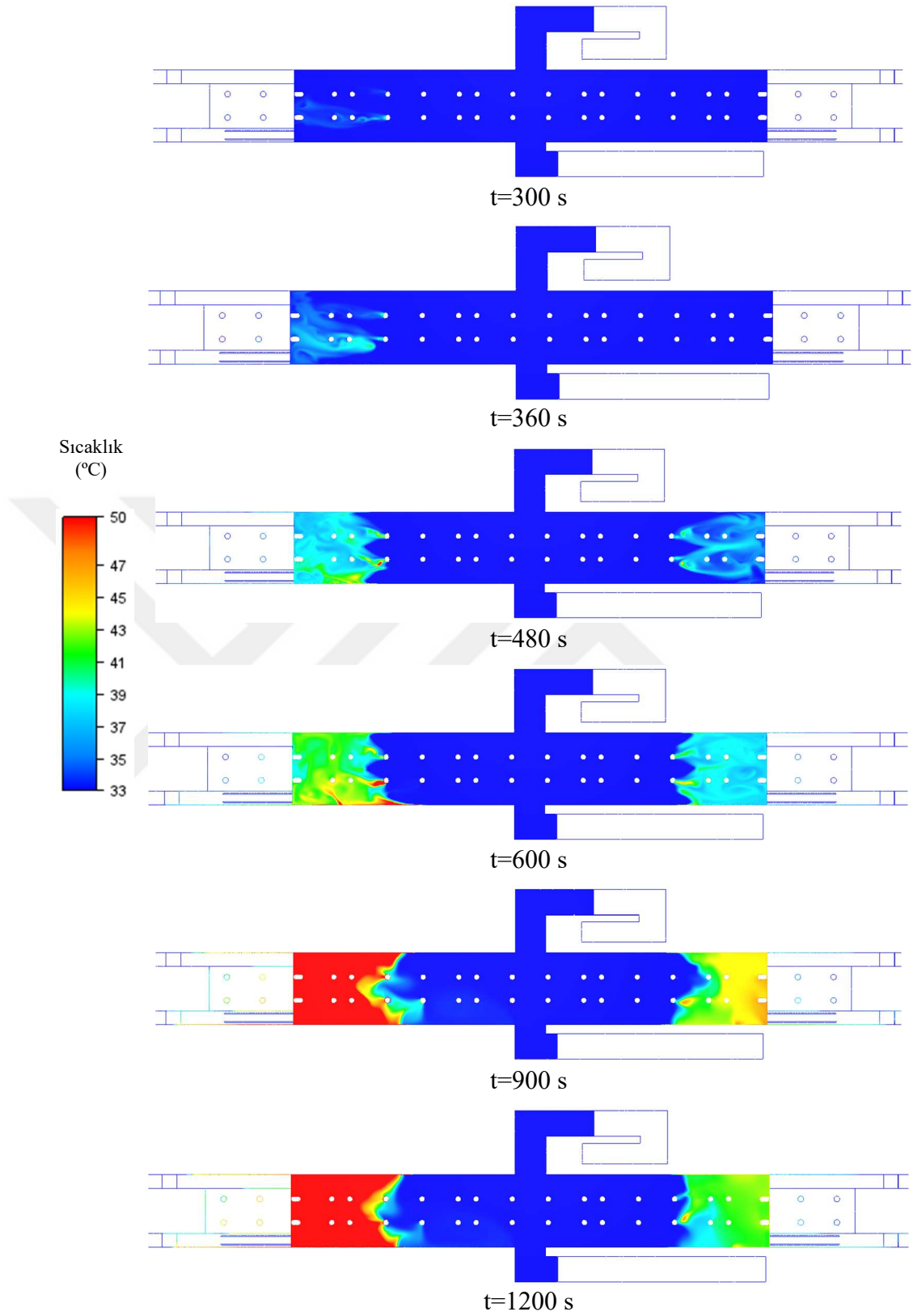
Şekil 4.60 : Gayrettepe istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



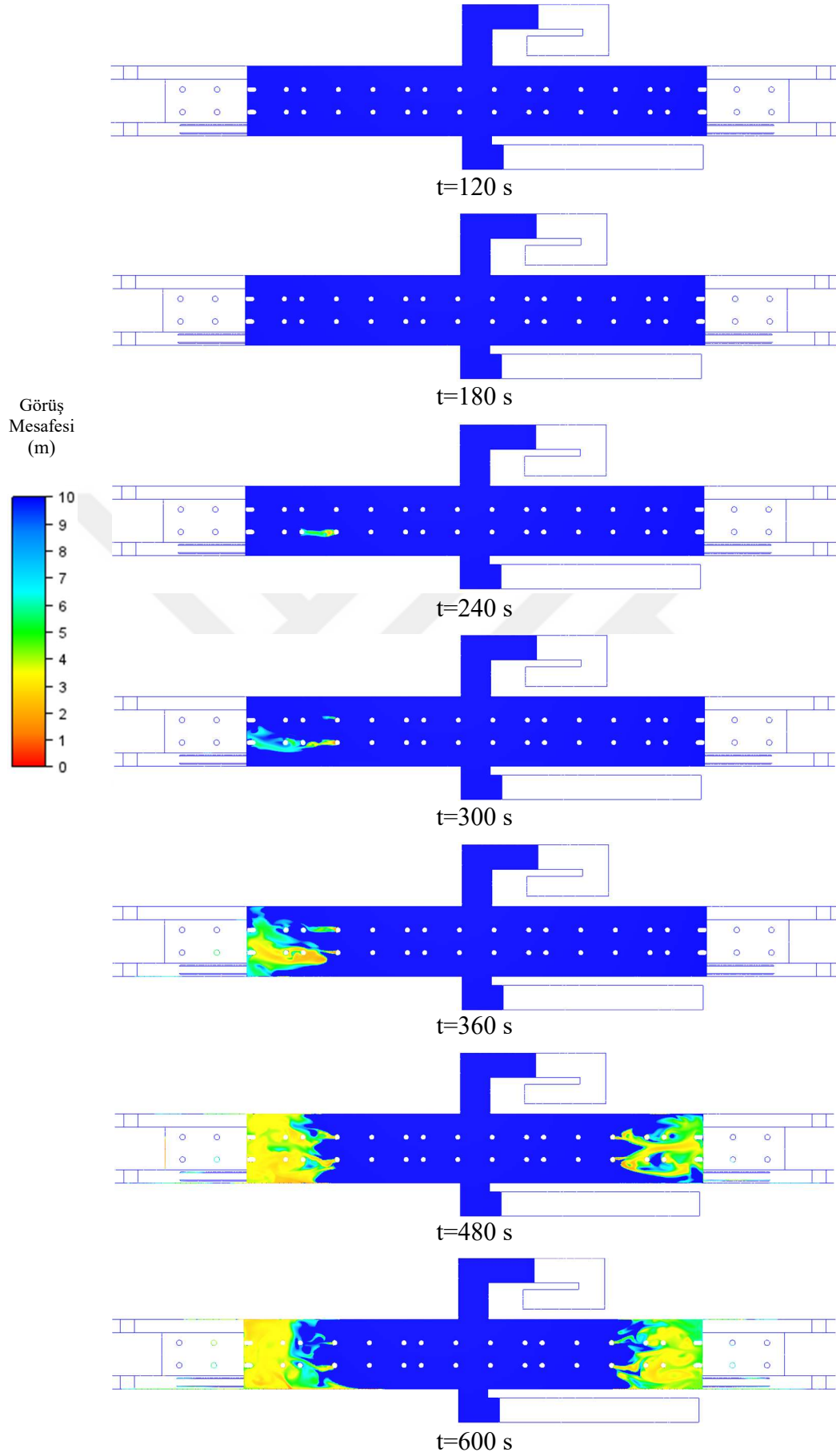
Şekil 4.60 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



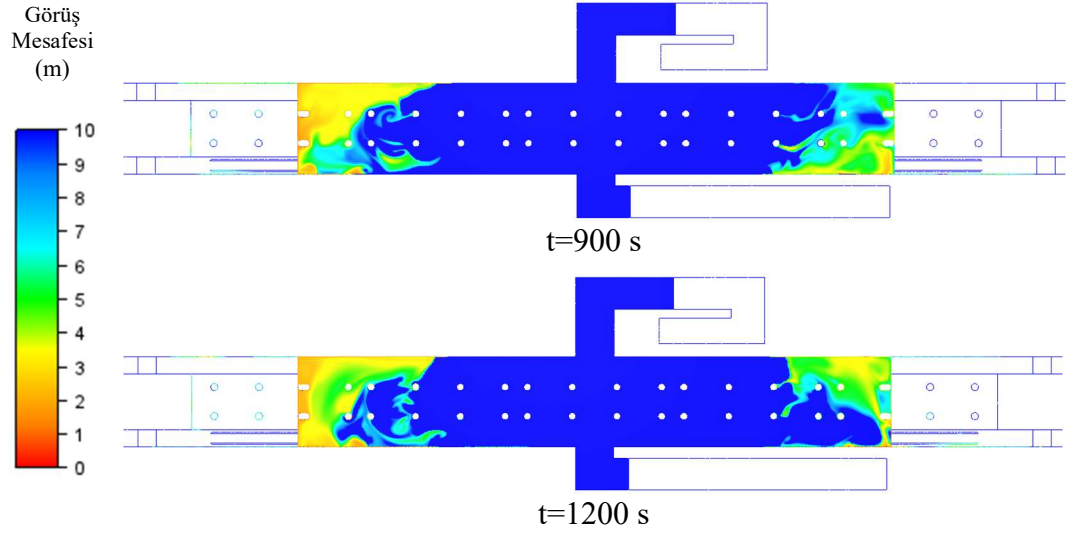
Şekil 4.61 : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.60 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi

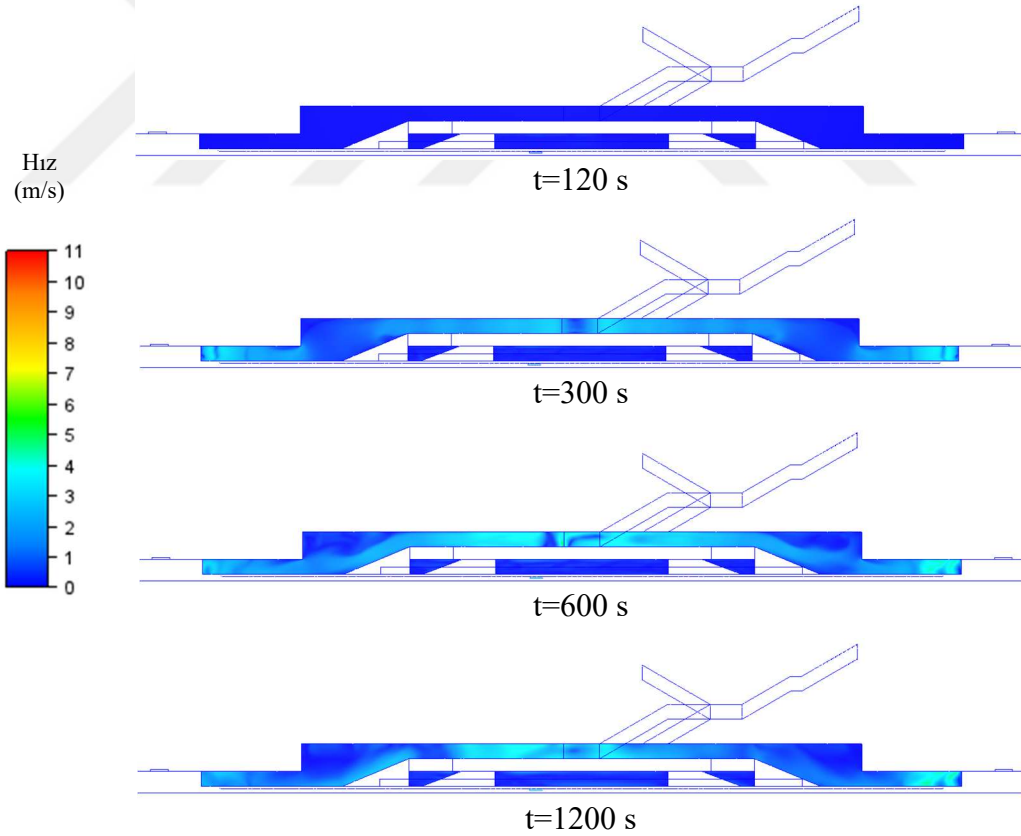


Şekil 4.62 : Gayrettepe istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

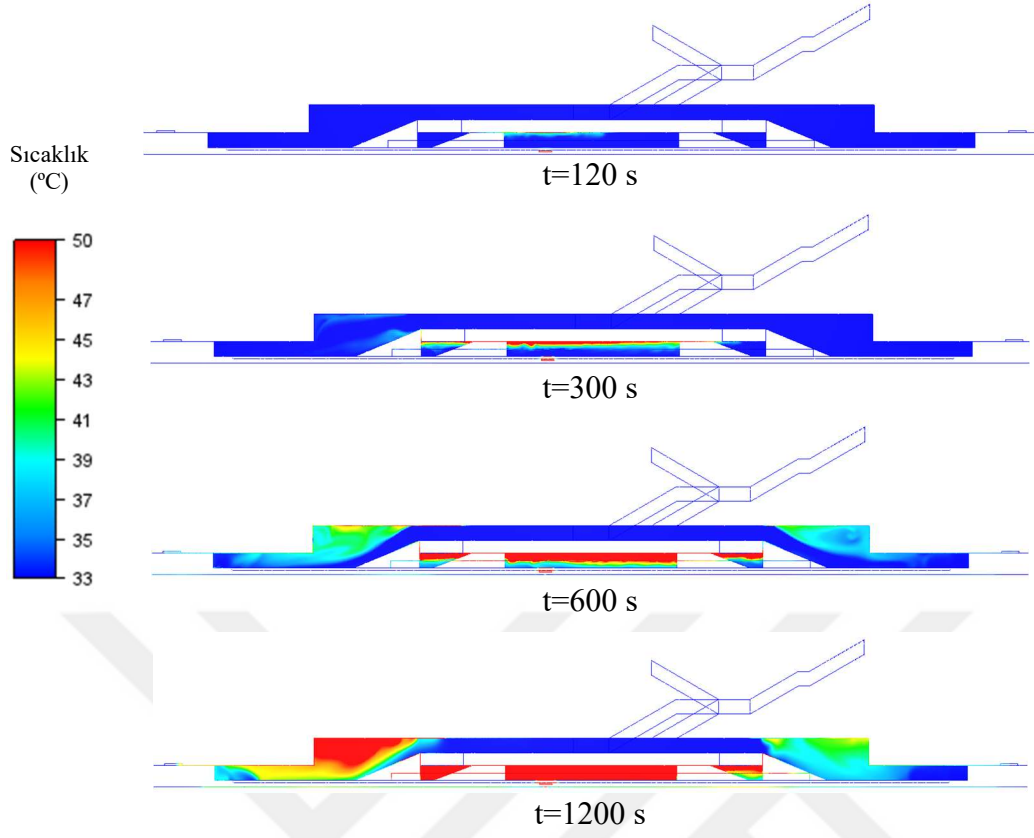


Şekil 4.62 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

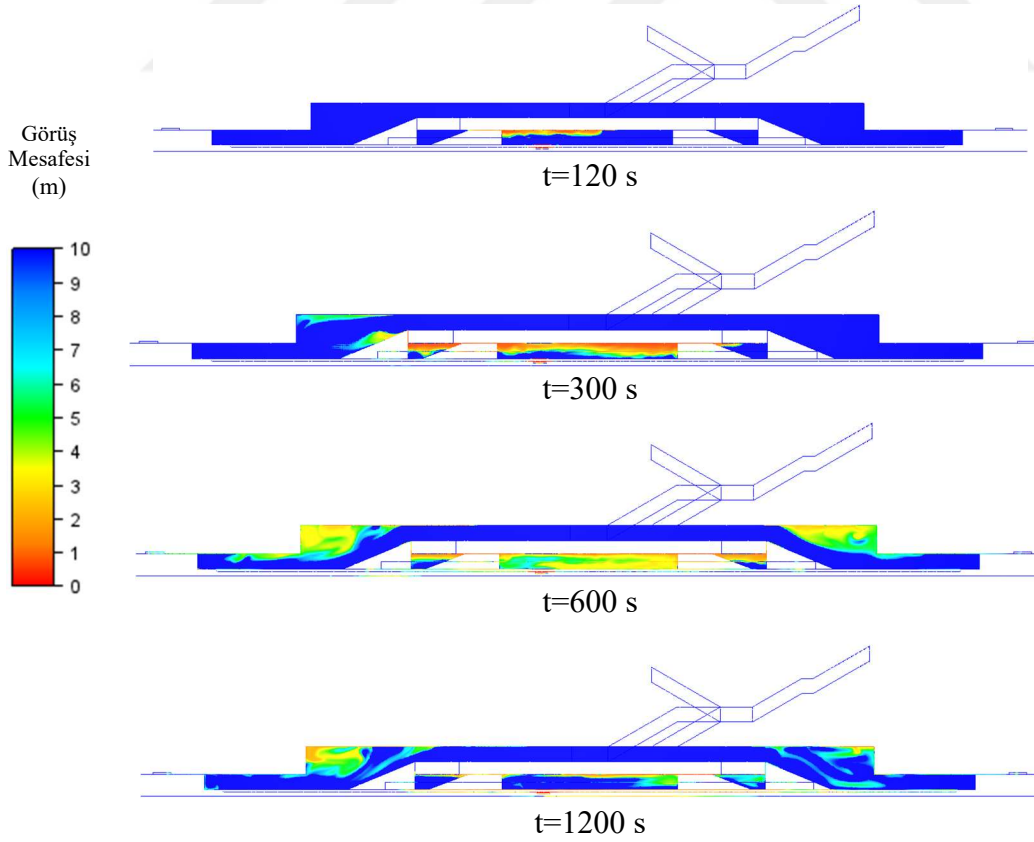
Gayrettepe istasyonunda 6 MW yangın yükü için A-A düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.63, Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te gösterilmiştir.



Şekil 4.63 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi

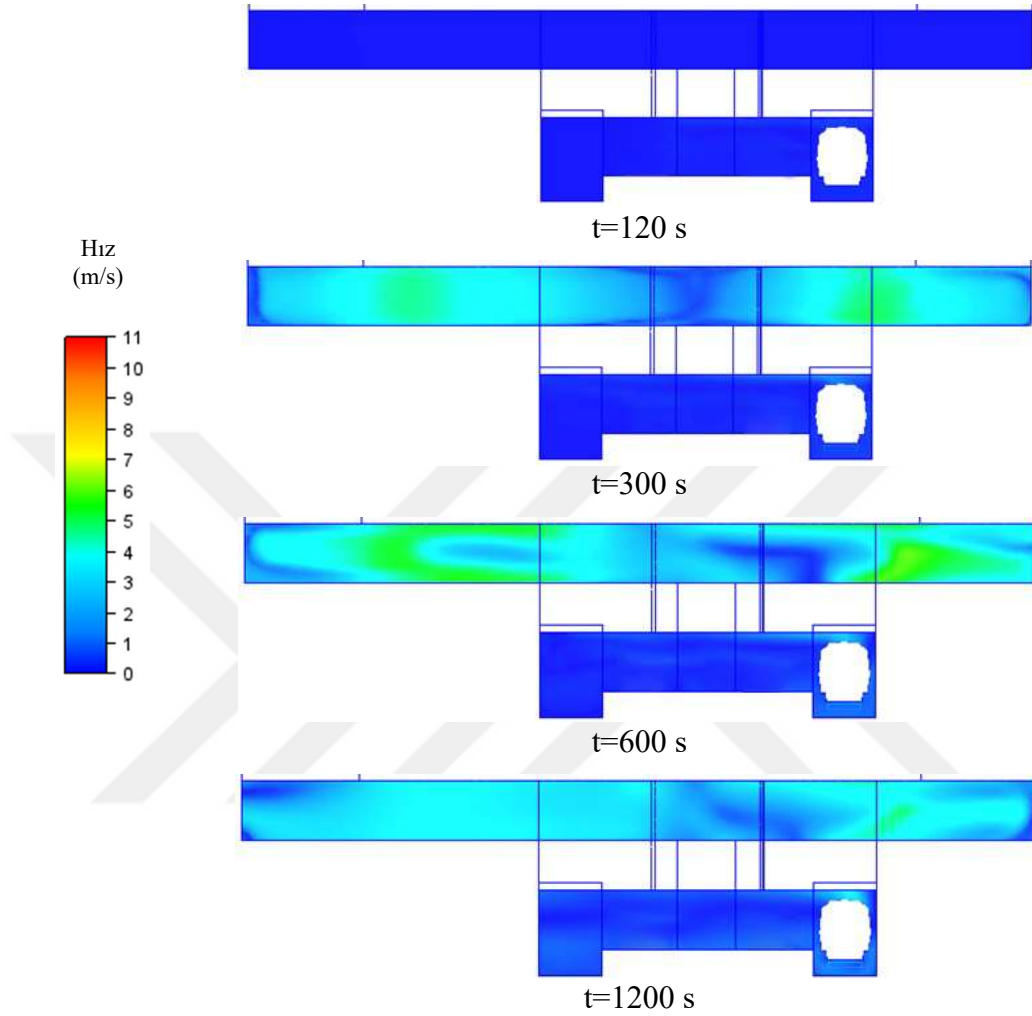


Şekil 4.64 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

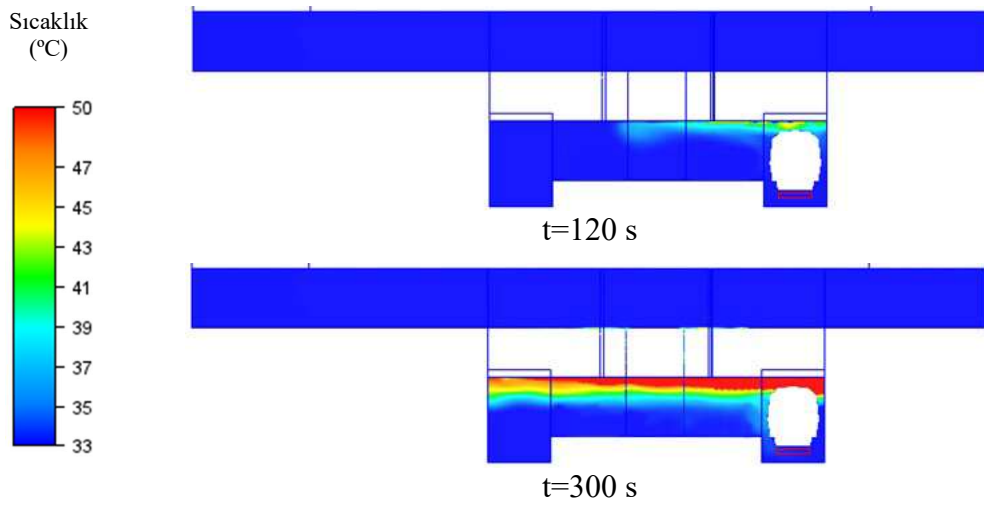


Şekil 4.65 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi

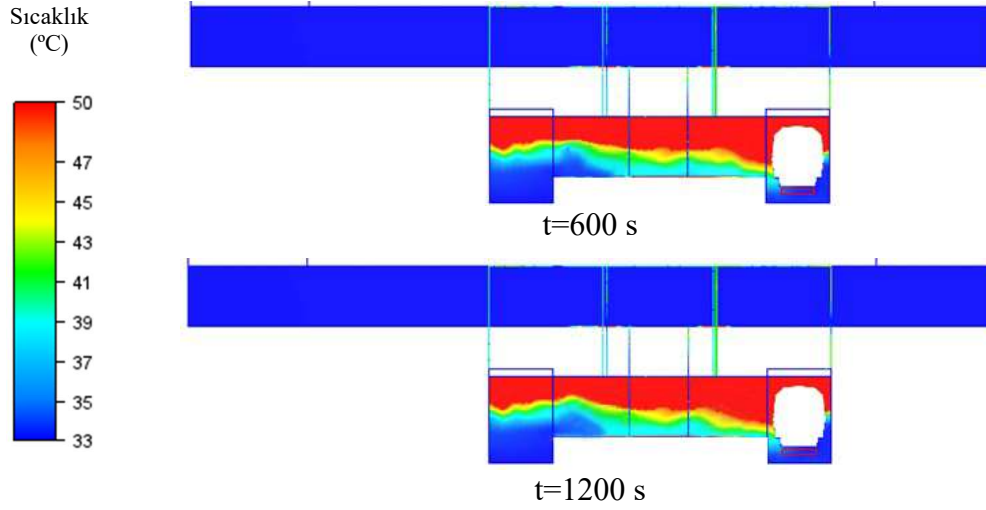
Gayrettepe istasyonunda 6 MW yangın yükü için B-B düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.66, Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de gösterilmiştir.



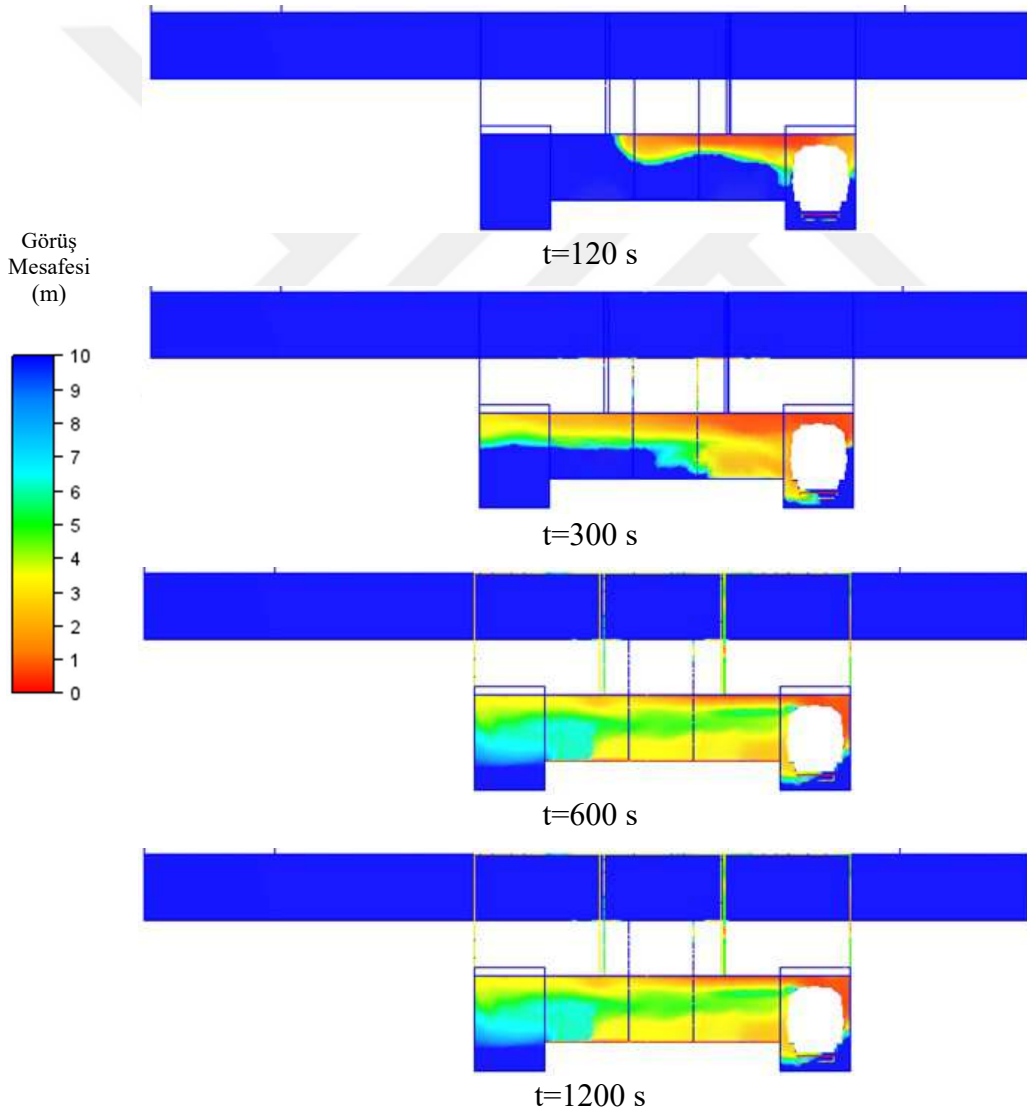
Şekil 4.66 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.67 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi



Şekil 4.67 (devam) : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi

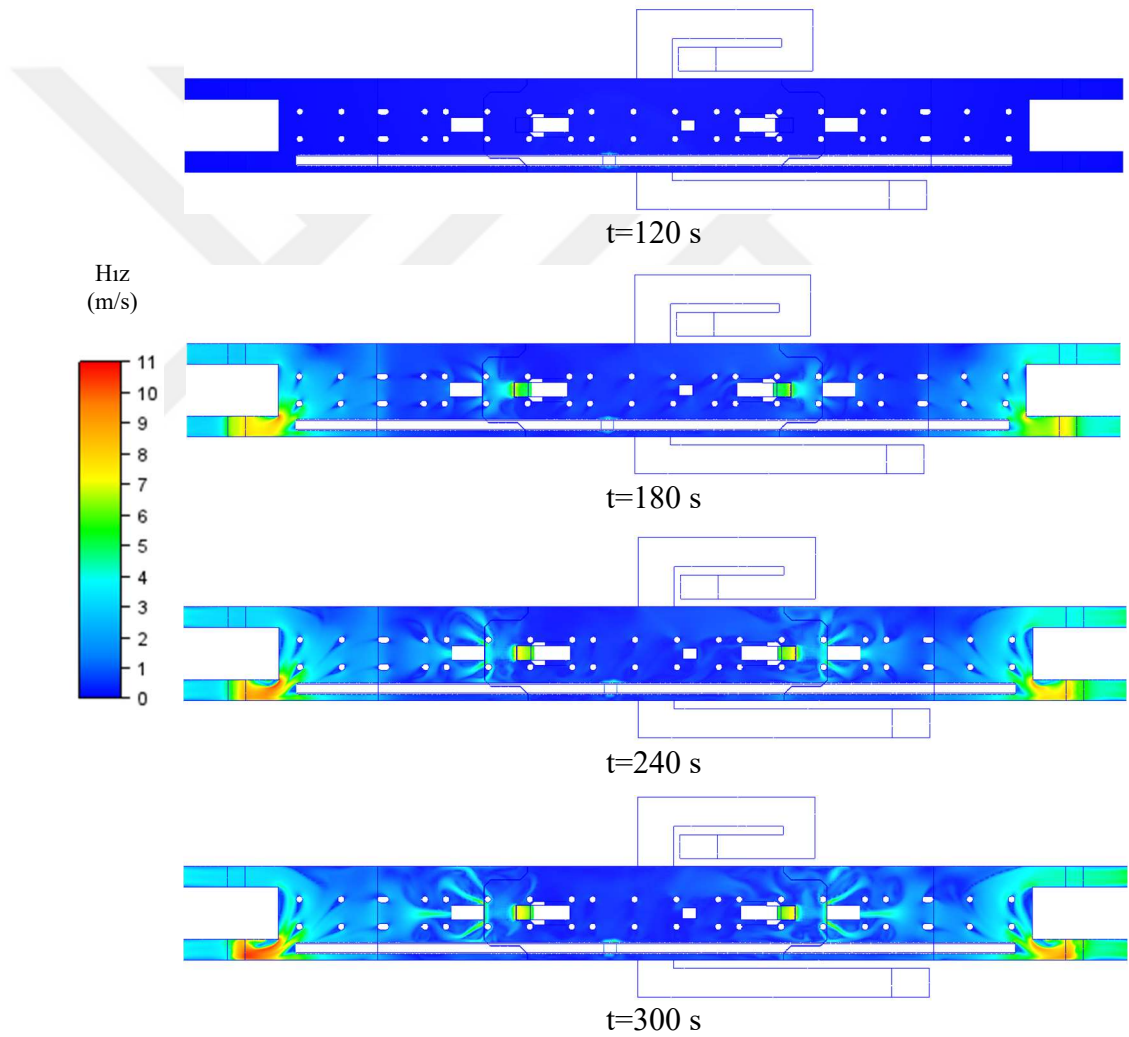


Şekil 4.68 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi

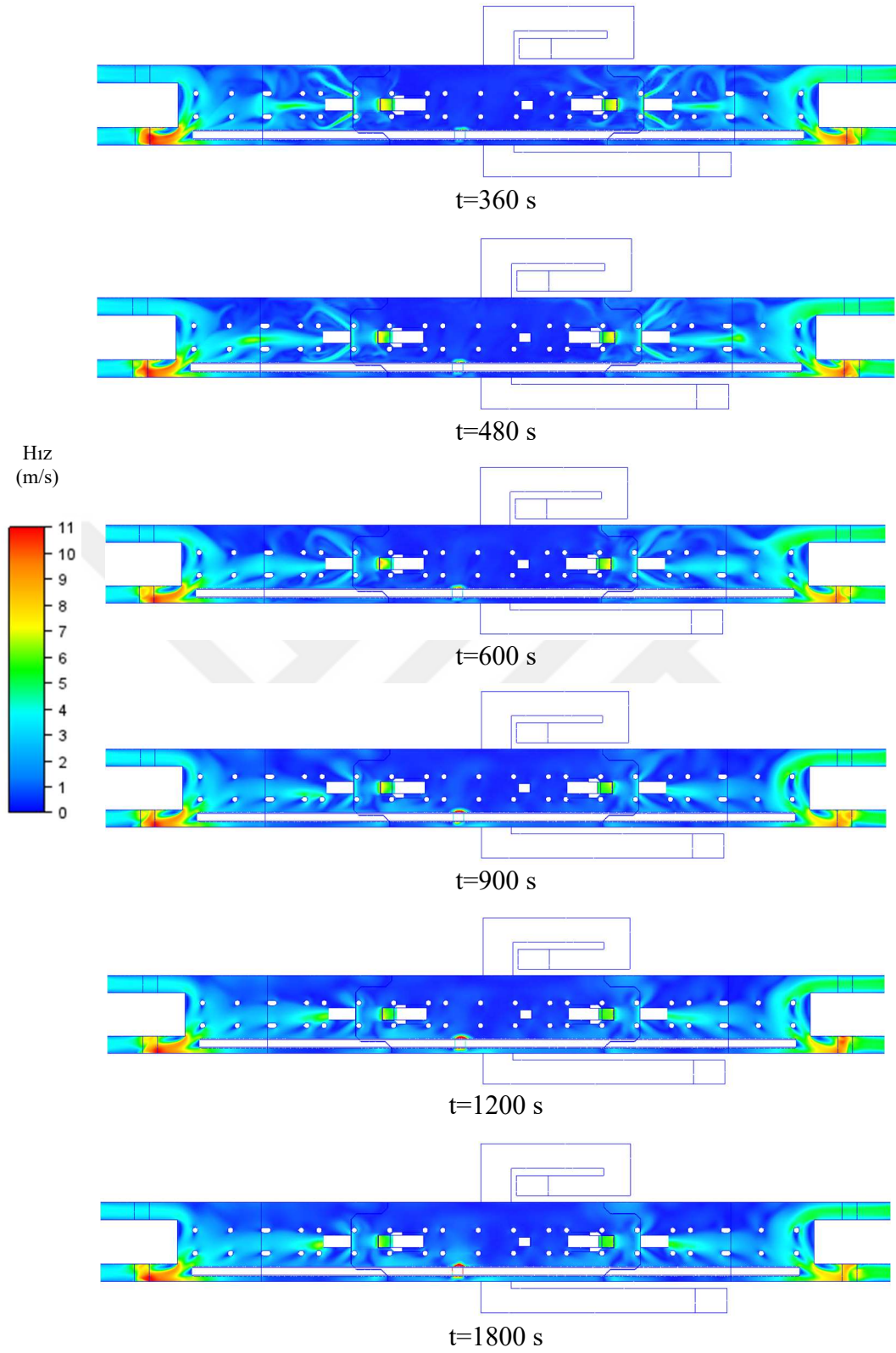
4.4.2 25 MW yangın yükü HAD yangın analizi sonuçları

Bu bölümde, mimari tasarımında birtakım iyileştirmeler yapılan Gayrettepe istasyonunda 2 adet kuzey ve 2 adette güney başta olmak üzere toplam 4 adet her biri 120 m³/s debiye sahip tünel havalandırma ve 2 adet her biri 55 m³/s debiye sahip peron altı egzoz fanlarının egzoz modunda çalıştırıldığı analiz sonuçları verilmektedir. Analiz 1800 s boyunca sürdürülmüştür.

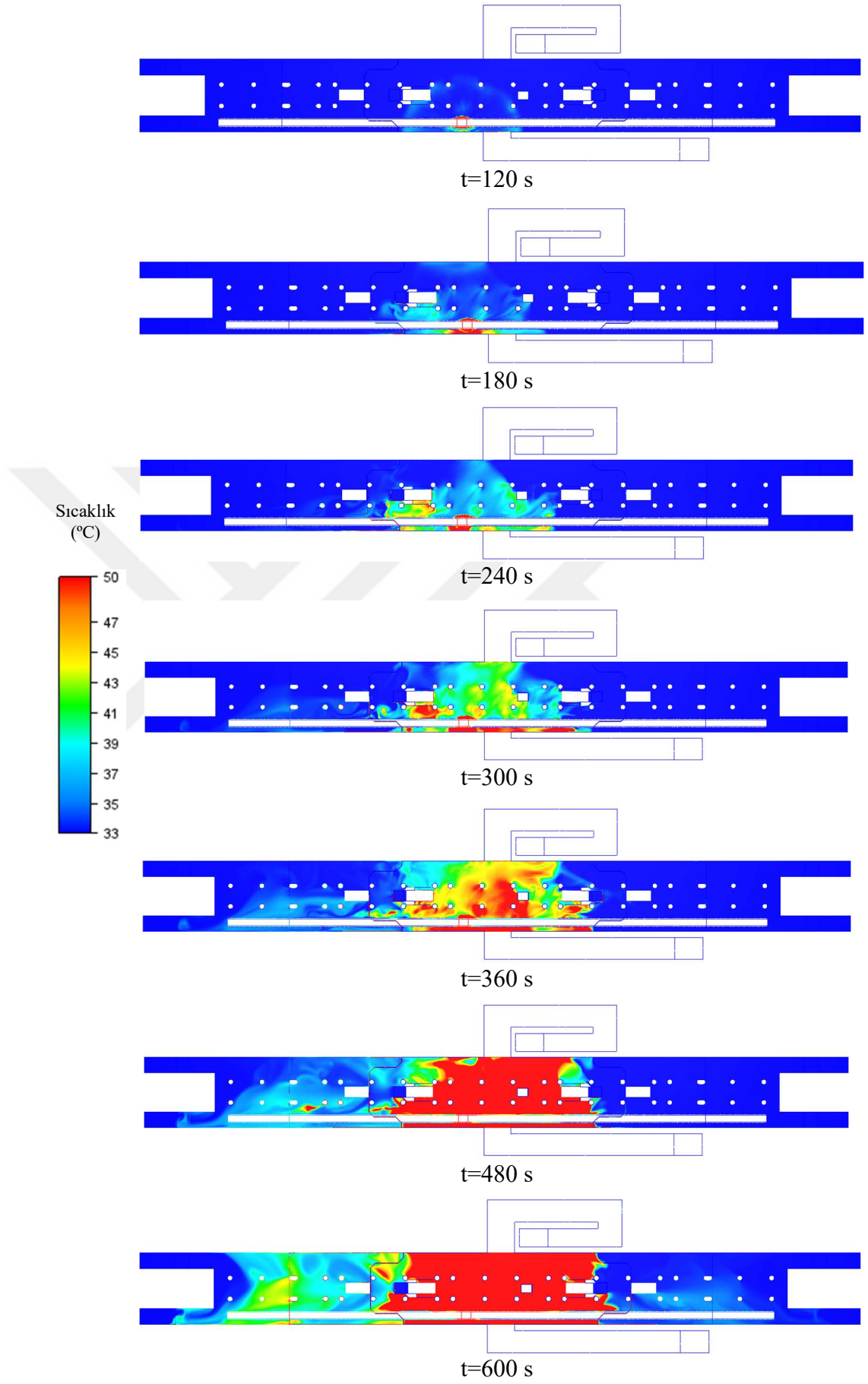
Gayrettepe istasyonunda 25 MW yangın yükü için peron seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.69, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de gösterilmiştir.



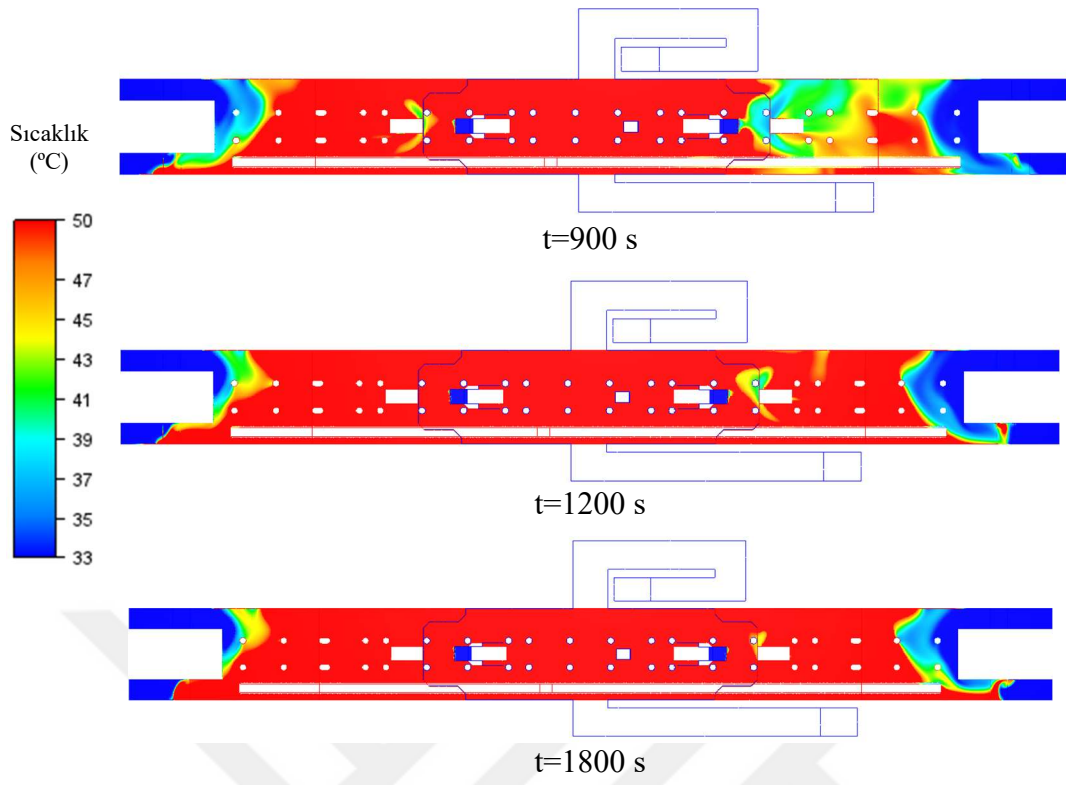
Şekil 4.69 : Gayrettepe istasyonu peron katı hava hızı değişimi



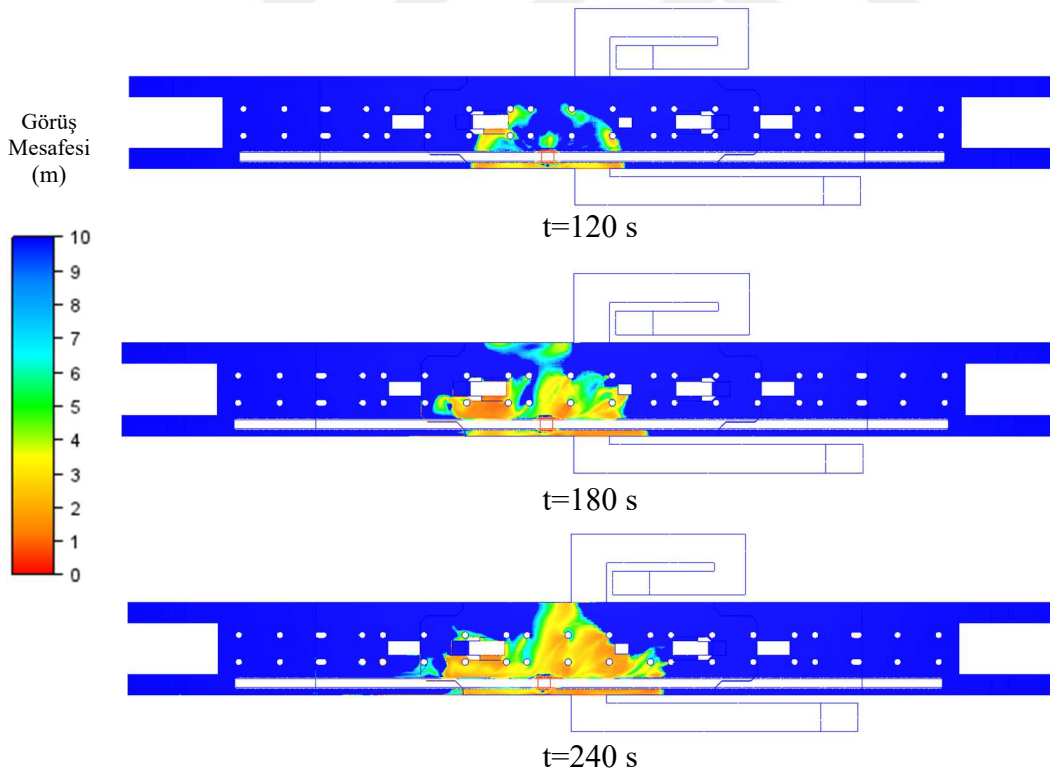
Şekil 4.69 (devam) : Gayrettepe istasyonu peron katı hava hızı değişimi



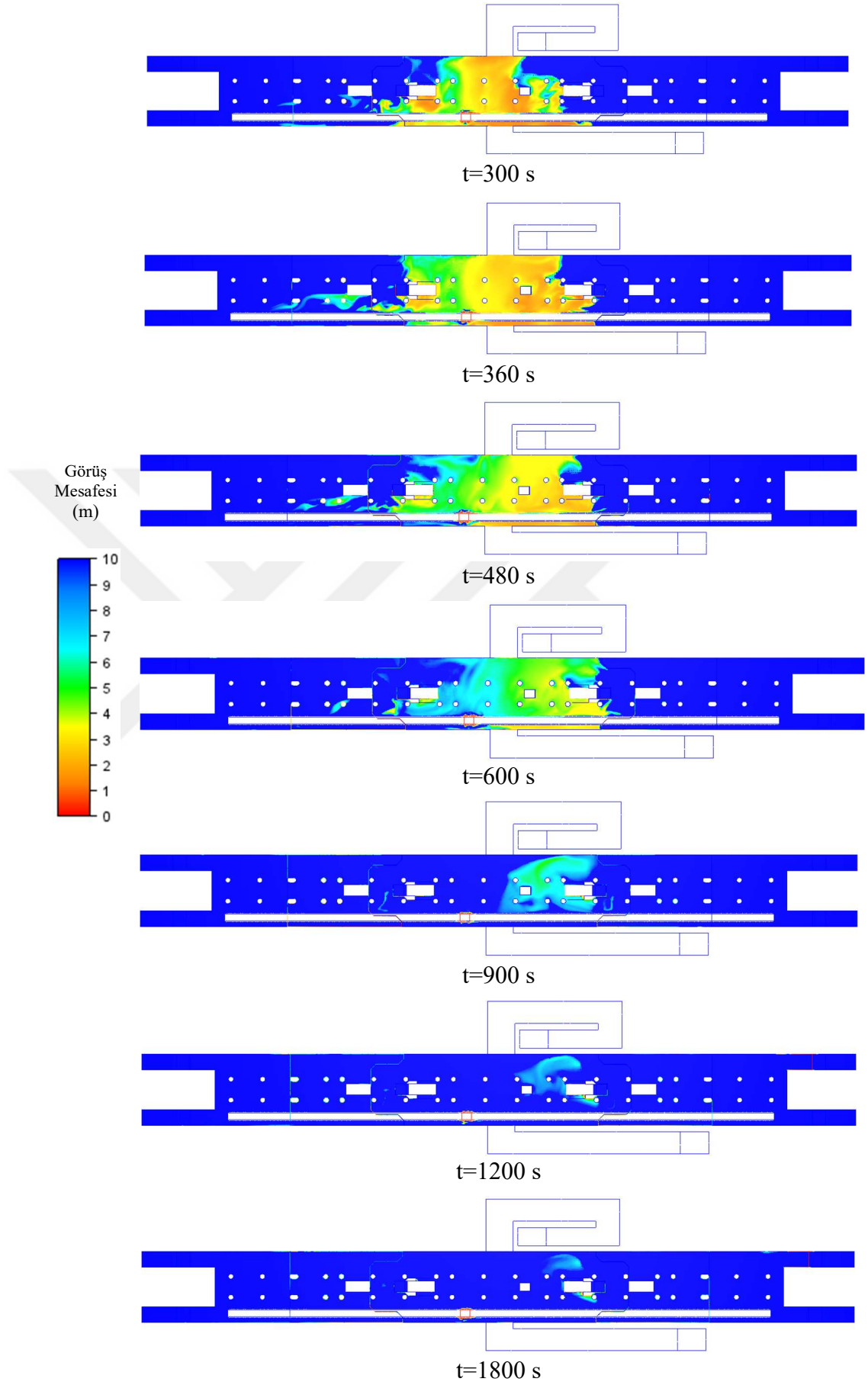
Şekil 4.70 : Gayrettepe istasyonu peron katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.70 (devam) : Gayrettepe istasyonu peron katı sıcaklık değişimi

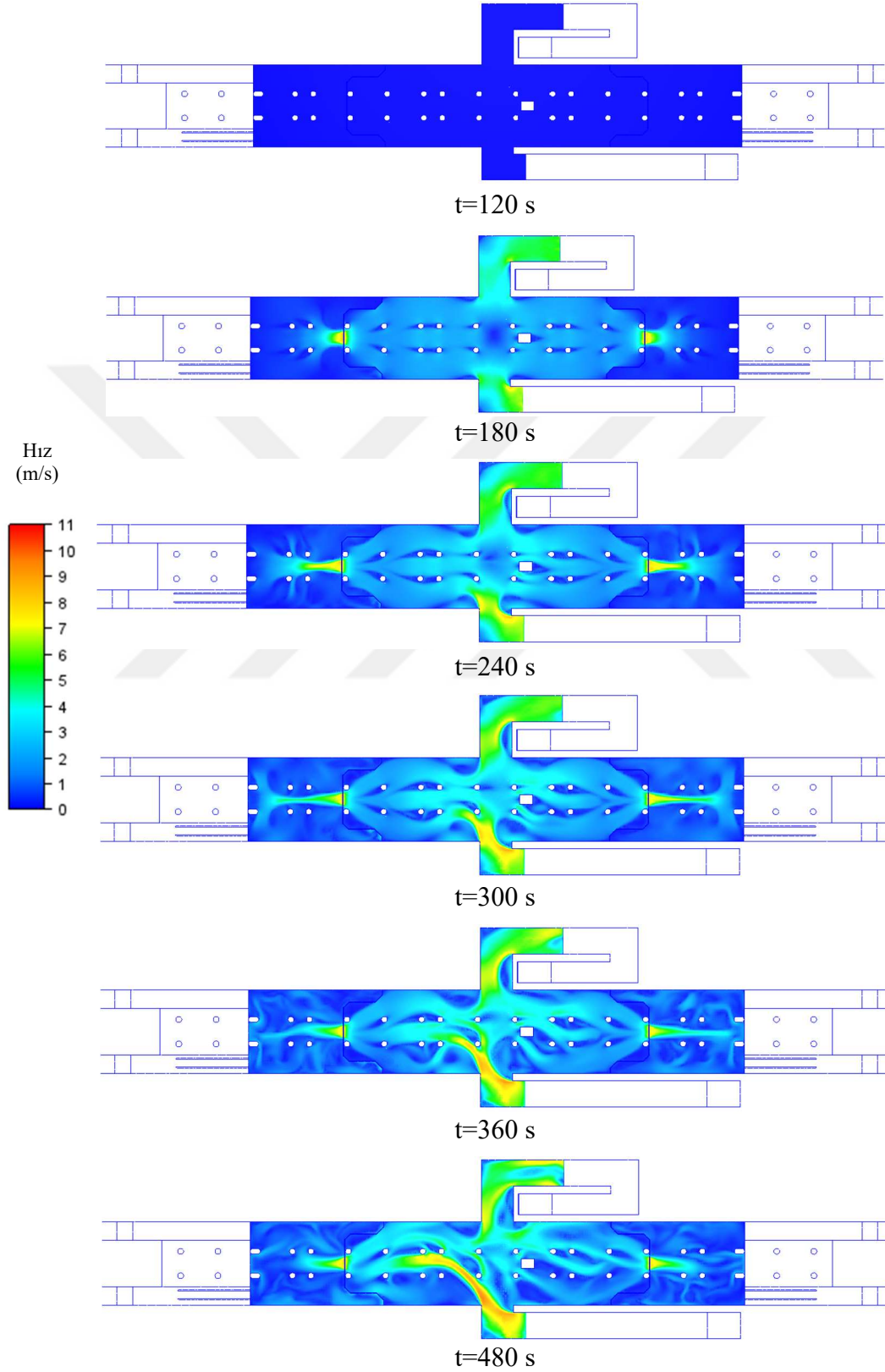


Şekil 4.71 : Gayrettepe istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

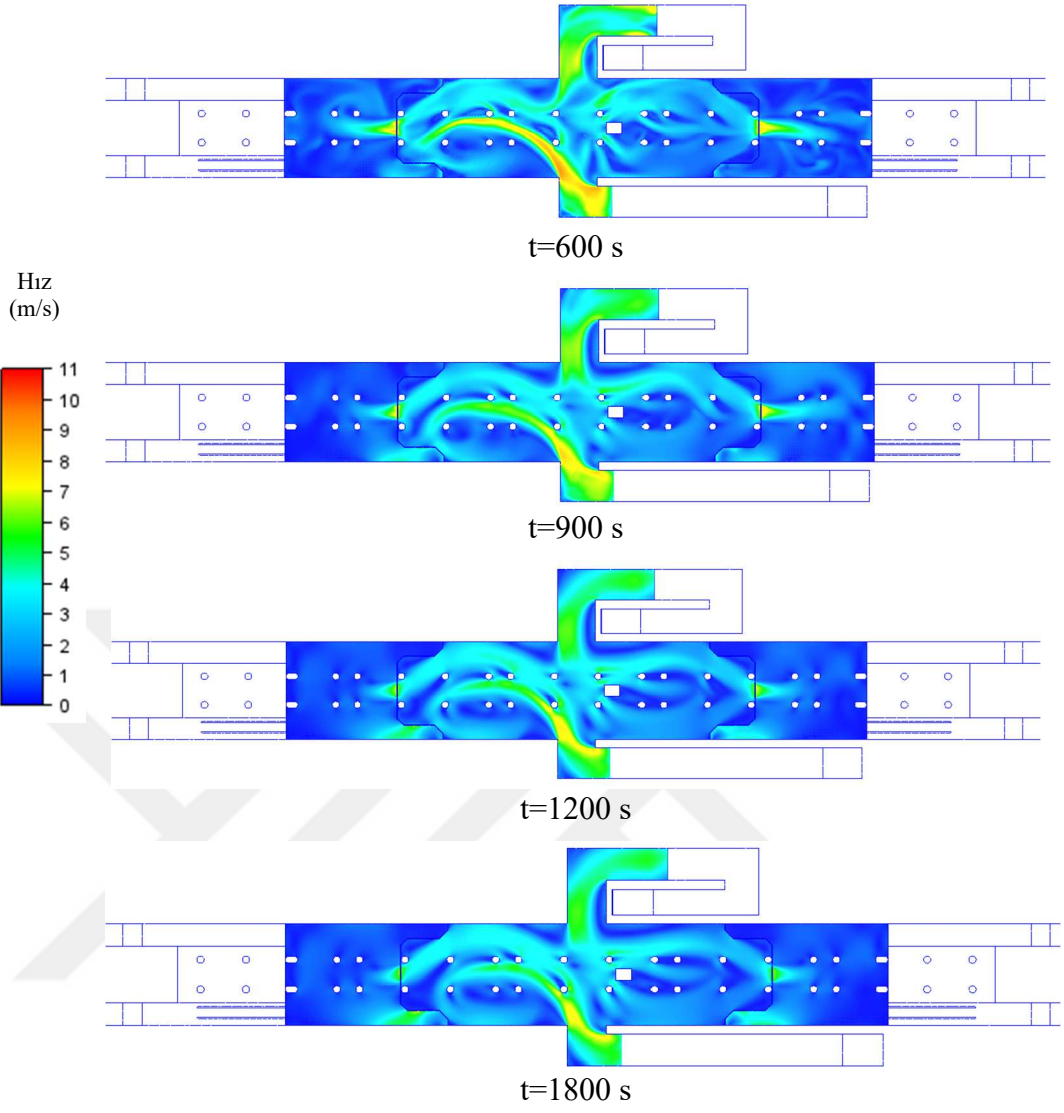


Şekil 4.71 (devam) : Gayrettepe istasyonu peron katı görüş mesafesi değişimi

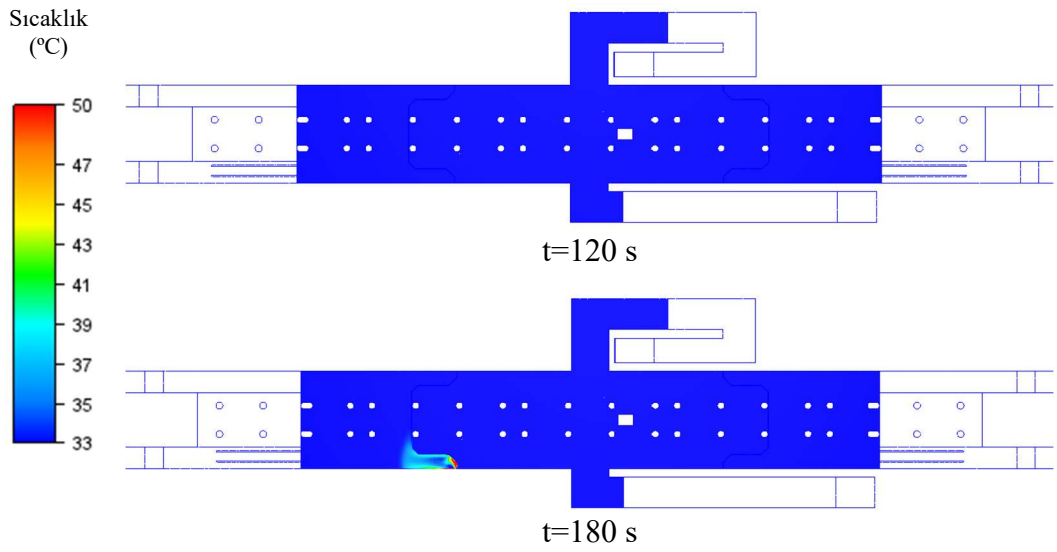
Gayrettepe istasyonunda 25 MW yangın yükü için konkors seviyesinden 2 m yükseklikteki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.72, Şekil 4.73 ve Şekil 4.74’5e gösterilmiştir.



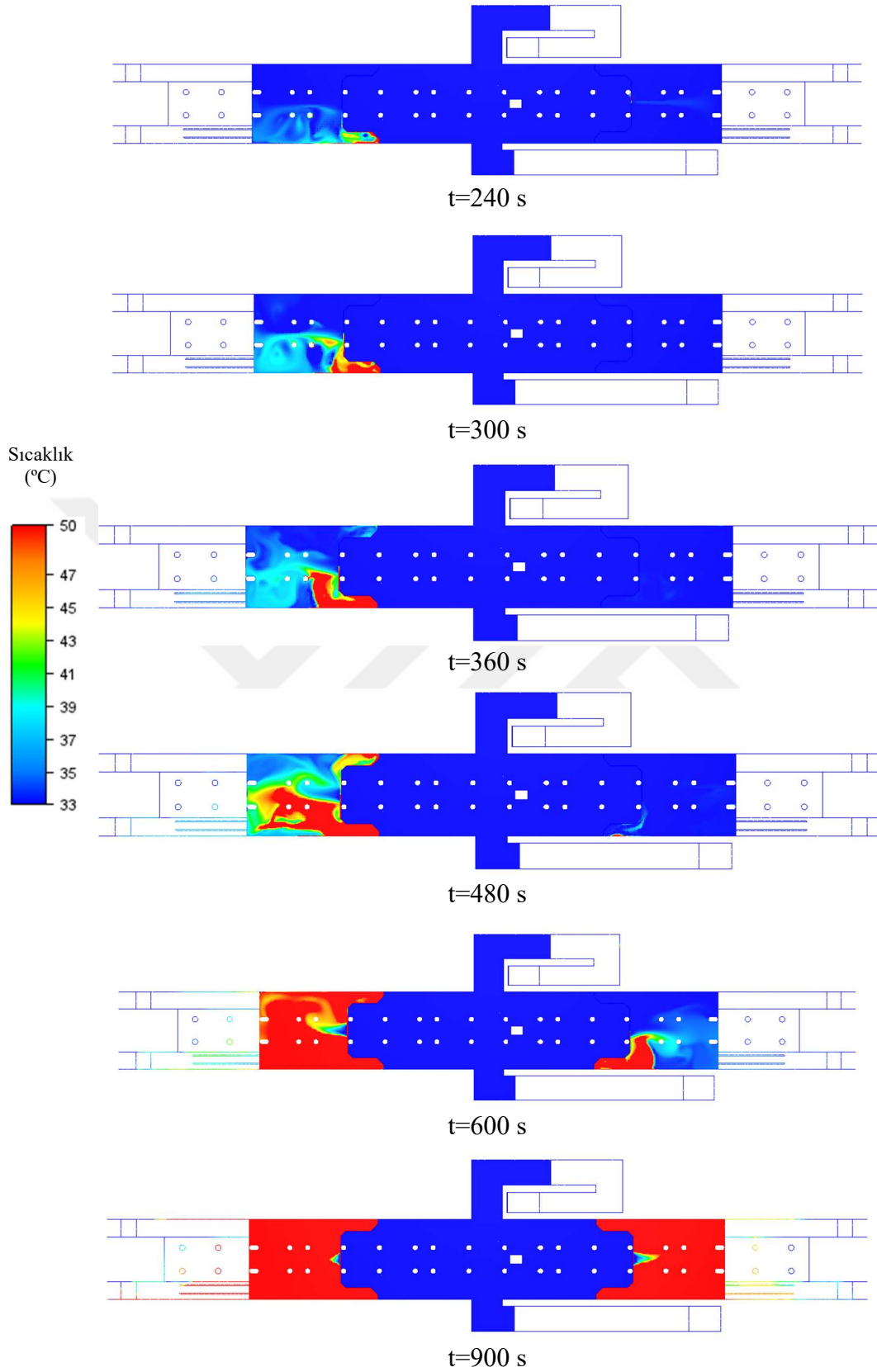
Şekil 4.72 : Gayrettepe istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



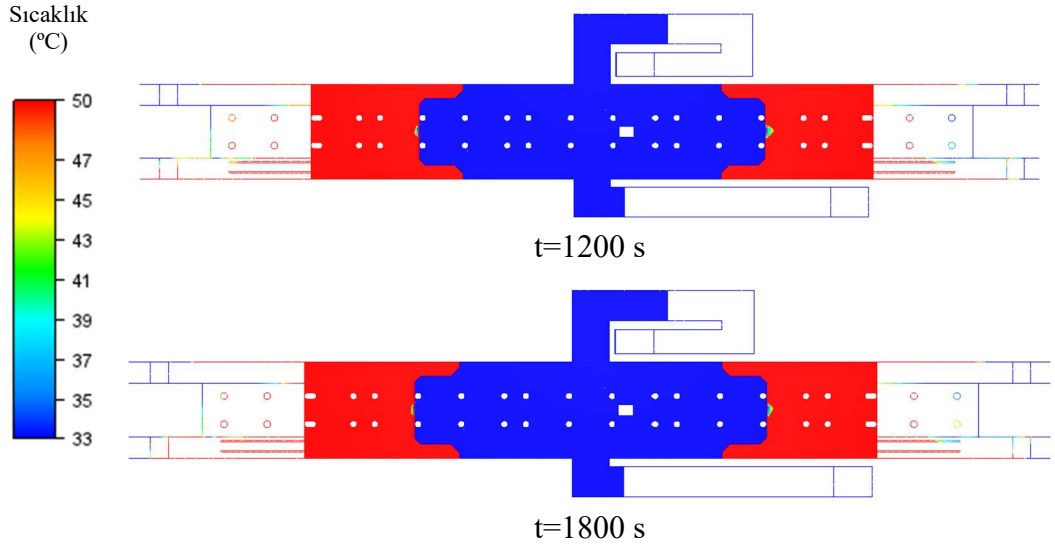
Şekil 4.72 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı hava hızı değişimi



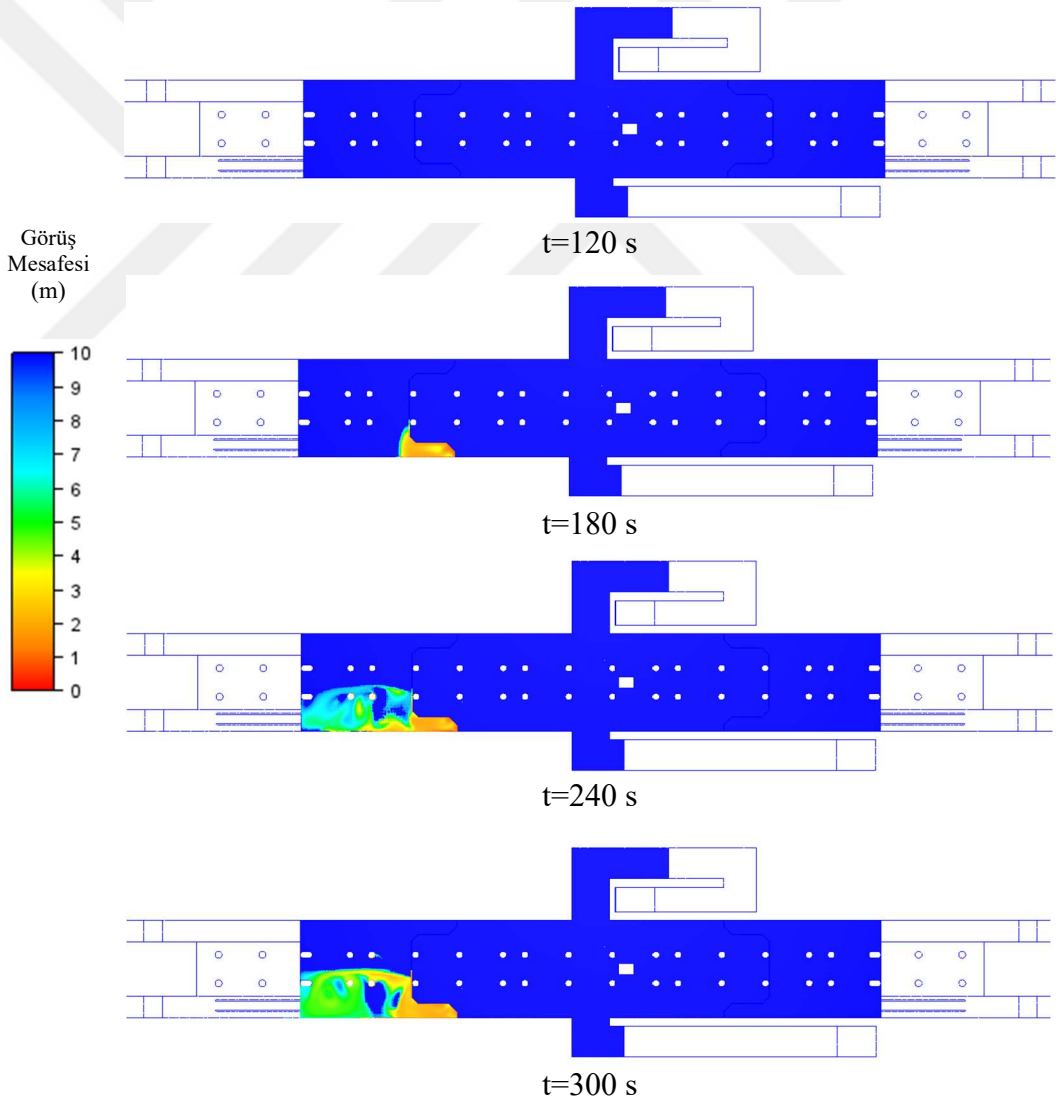
Şekil 4.73 : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi



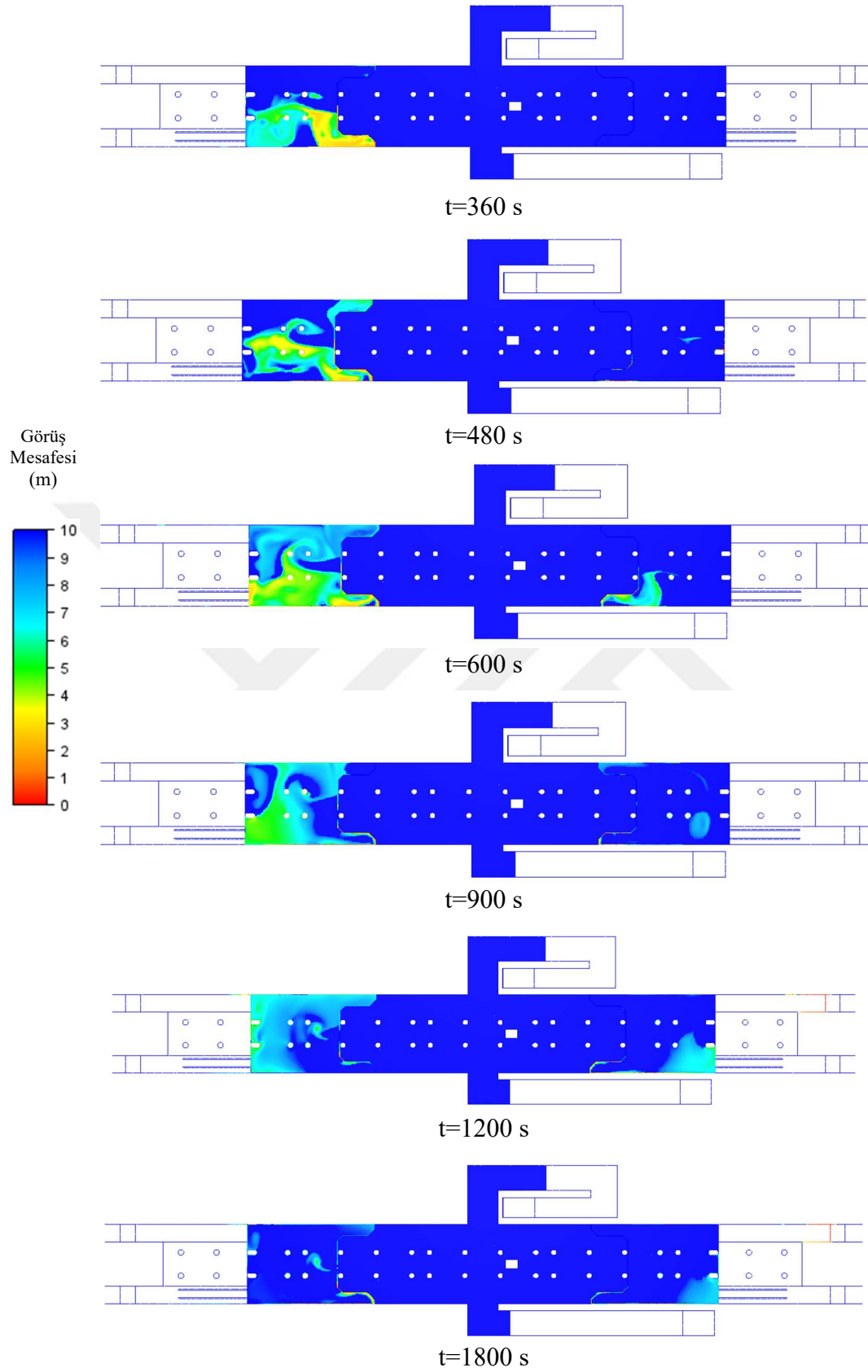
Şekil 4.73 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi



Şekil 4.73 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı sıcaklık değişimi

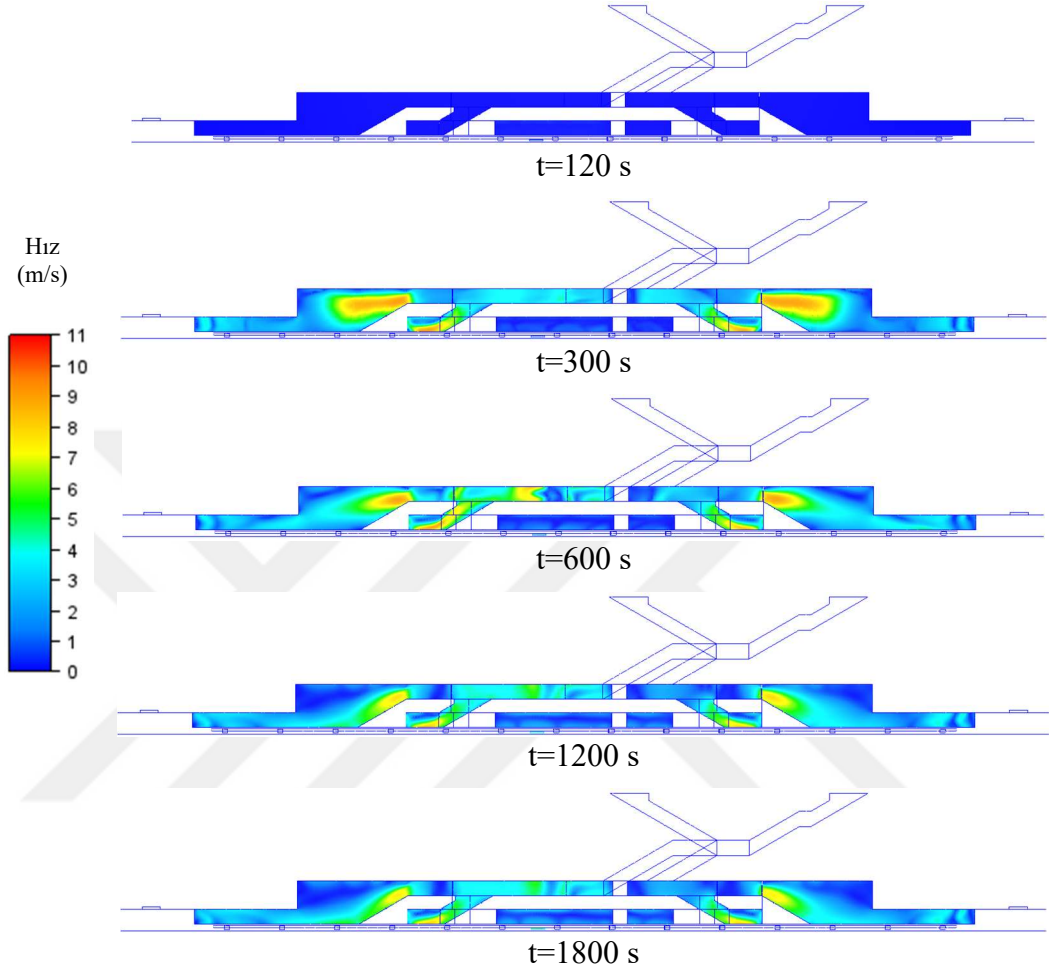


Şekil 4.74 : Gayrettepe istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

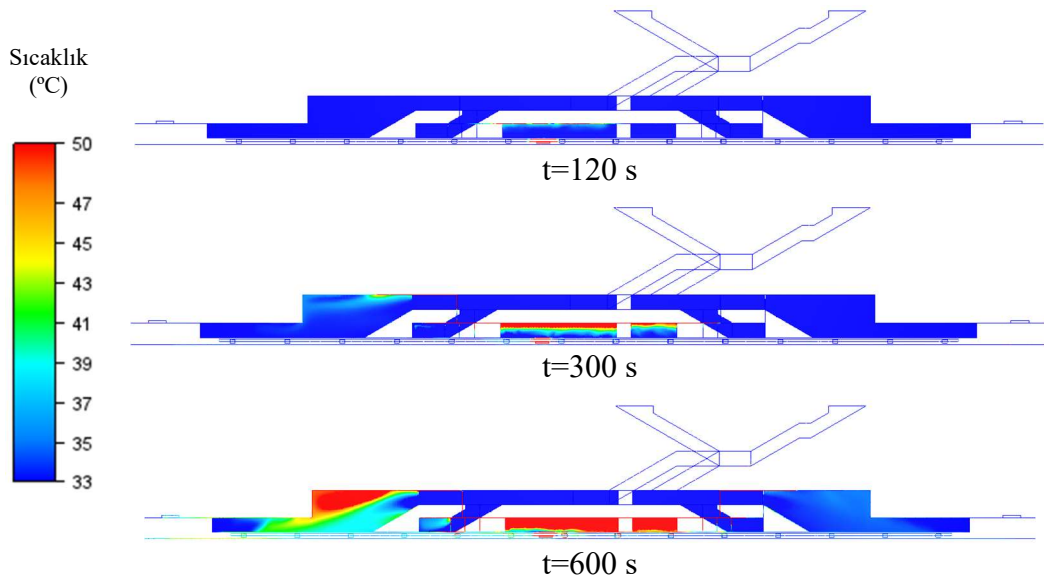


Şekil 4.74 (devam) : Gayrettepe istasyonu konkors katı görüş mesafesi değişimi

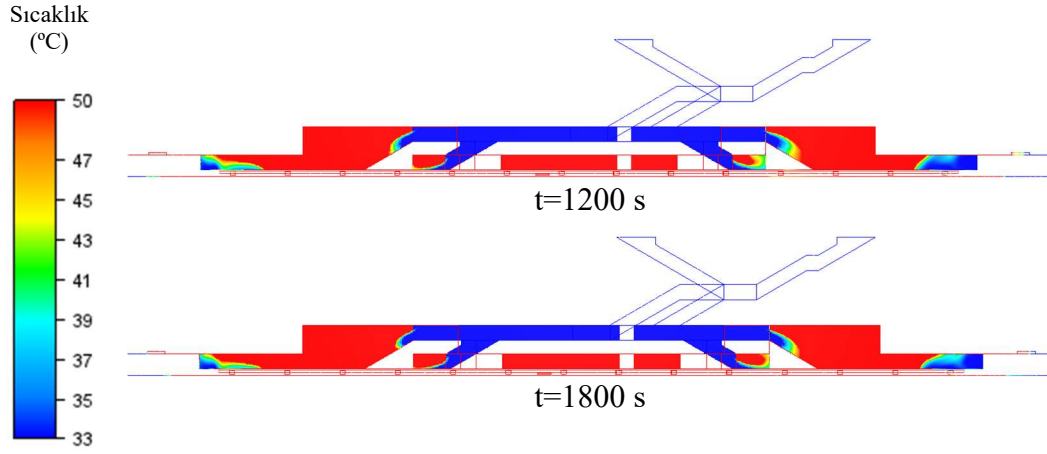
Gayrettepe istasyonunda 25 MW yangın yükü için A-A düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.75, Şekil 4.76 ve Şekil 4.77’de gösterilmiştir.



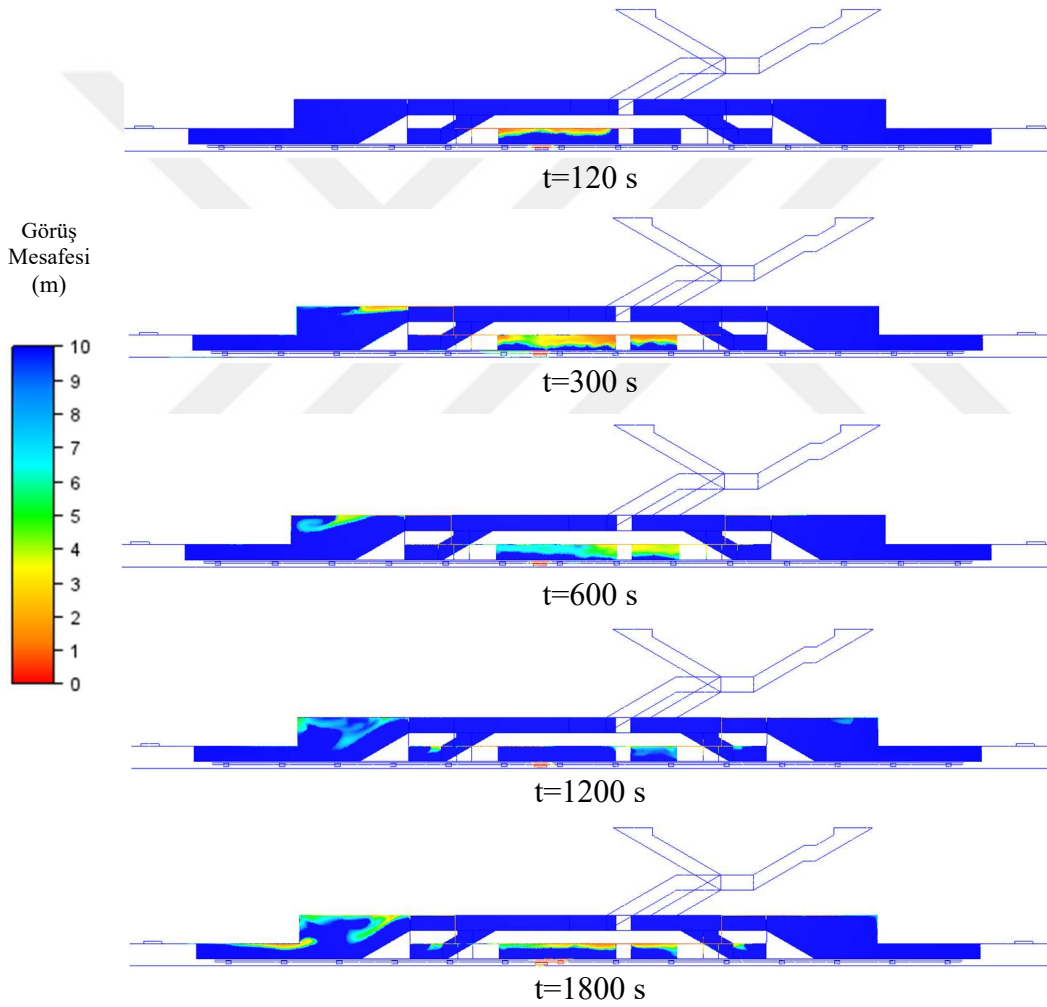
Şekil 4.75 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi hava hızı değişimi



Şekil 4.76 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

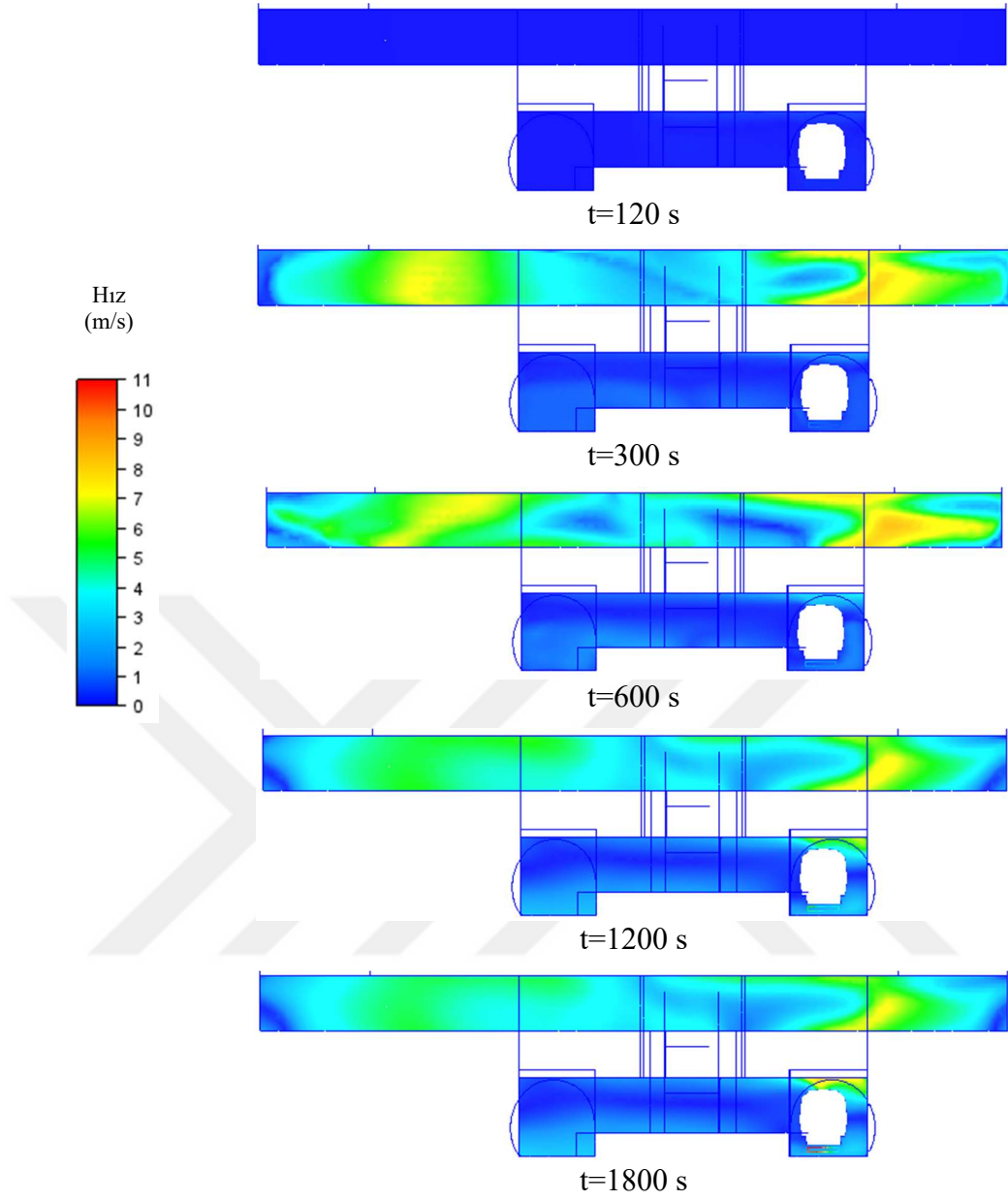


Şekil 4.76 (devam) : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi sıcaklık değişimi

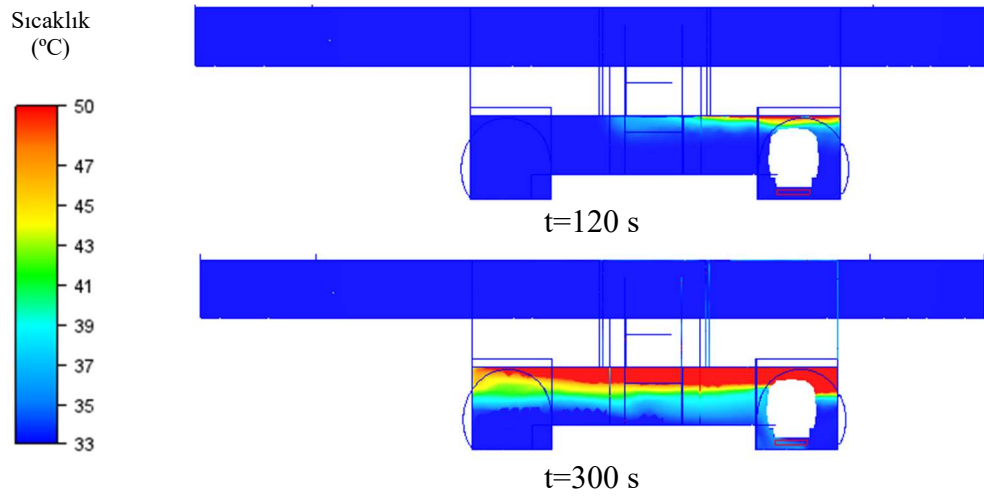


Şekil 4.77 : Gayrettepe istasyonu A-A düzlemi görüş mesafesi değişimi

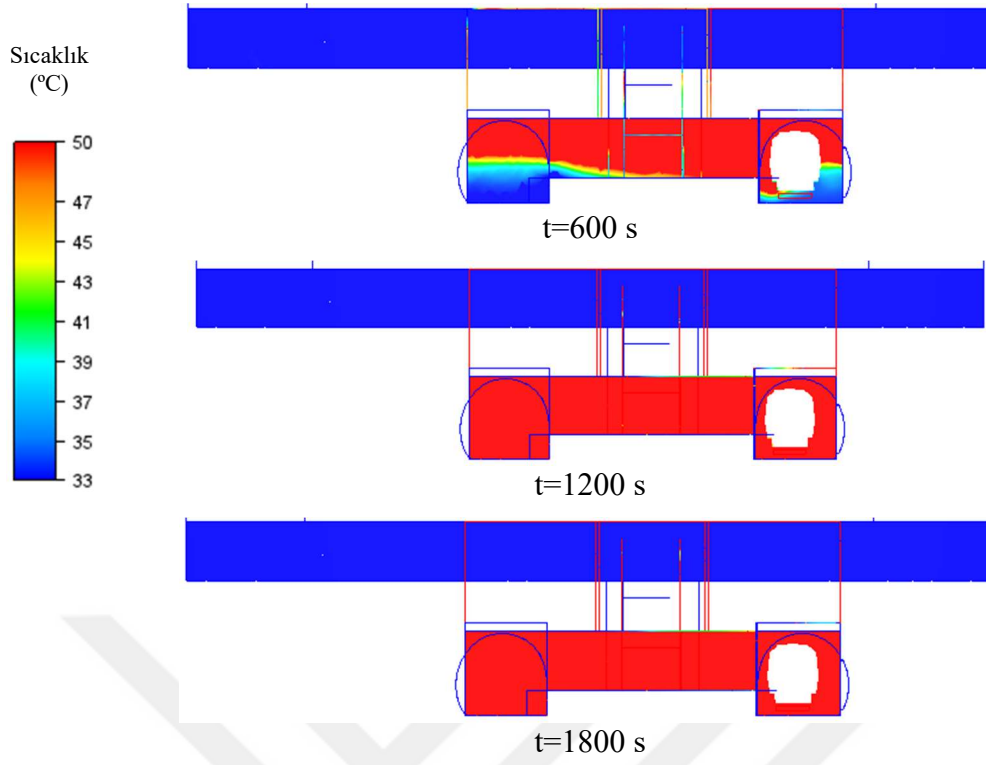
Gayrettepe istasyonunda 25 MW yangın yükü için B-B düzlemindeki hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi değerlerinin zamana göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.78, Şekil 4.79 ve Şekil 4.80’de gösterilmiştir.



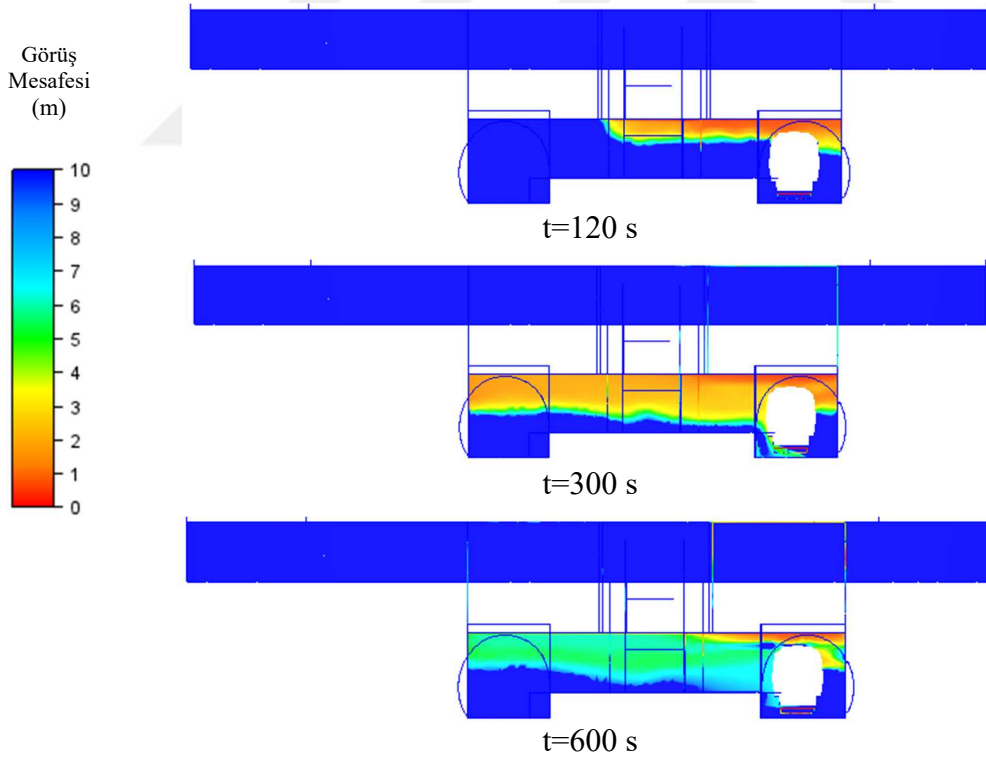
Şekil 4.78 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi hava hızı değişimi



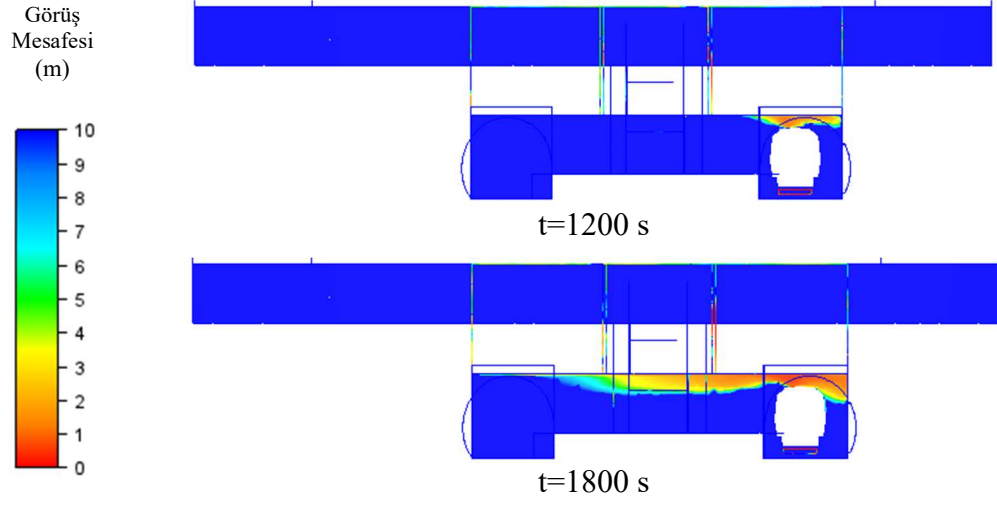
Şekil 4.79 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi



Şekil 4.79 (devam) : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi sıcaklık değişimi



Şekil 4.80 : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi



Şekil 4.80 (devam) : Gayrettepe istasyonu B-B düzlemi görüş mesafesi değişimi



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İstanbul nüfus yoğunluğu ve trafik sıkışıklığı ile dünyada ön plana çıkan şehirlerden birisidir. Şehirde araç sayısının ve trafiğin günden güne artması merkezi konumlarda ulaşım sürelerinin uzamasına ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Bu durumun ortadan kaldırılması için toplu taşıma sistemlerinin ve özellikle raylı sistem hatlarının yaygınlaştırılması ve kullanımının teşvik edilmesi gerekmektedir. Yolcuların raylı sistem hatlarını tercih etmeleri için hatların ısıl konfor ve emniyet seviyelerinin üst düzeyde olması önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, İstanbul'un en yoğun metro hattı olan M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattında bulunan Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonlarında saha ölçümleri ve RWI hesaplamalarıyla ısıl konfor, HAD analizleriyle acil durum yangın konuları incelenmiştir. Şişli-Mecidiyeköy ve Gayrettepe istasyonları M2 metro hattı üzerinde art arda gelmektedir ve peron katları farklı yapım teknikleri kullanılarak inşa edilmiştir. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunun peron katı delme tünel, konkors katı ise aç-kapa yöntemiyle inşa edilmiştir. Gayrettepe istasyonunun tamamı aç-kapa yöntemiyle inşa edilmiştir.

5.1 Isıl Konfor İnceleme Sonuçları

İlkbahar mevsiminde yolculu alanlarda en yüksek sıcaklık değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında 26,09 °C ve konkors katında 26,68 °C, Gayrettepe istasyonu peron katında 26,90 °C ve konkors katında 27,30 °C olarak ölçülmüştür. İlkbahar mevsiminde yolculu alanlarda en yüksek bağıl nem değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında % 88,21 ve konkors katında % 96,49, Gayrettepe istasyonu peron katında % 80,50 ve konkors katında % 82,80 olarak ölçülmüştür. İlkbahar mevsiminde yolculu alanlarda ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında 20,43 °C ve % 68,69, konkors katında 19,37 °C ve % 67,73, Gayrettepe istasyonu peron katında 23,21 °C ve % 64,18, konkors katında 22,53 °C ve % 58,51 olarak hesaplanmıştır.

İlkbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda ortalama RWI değeri yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için 0,1, peronda 235 s tren beklediği senaryo için 0,04 ve konkors katı için 0,08 olarak hesaplanmıştır. İlkbahar mevsiminde Gayrettepe istasyonunda ortalama RWI değeri yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için 0,24, peronda 235 s tren beklediği senaryo için 0,16 ve konkors katı için 0,14 olarak hesaplanmıştır.

Yaz mevsiminde yolculu alanlarda en yüksek sıcaklık değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında 31,23 °C ve konkors katında 32,36 °C, Gayrettepe istasyonu peron katında 30,60 °C ve konkors katında 30,90 °C olarak ölçülmüştür. Yaz mevsiminde yolculu alanlarda en yüksek bağıl nem değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında % 96,32 ve konkors katında % 97,26, Gayrettepe istasyonu peron katında % 86,80 ve konkors katında % 86,10 olarak ölçülmüştür. Yaz mevsiminde yolculu alanlarda ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında 25,42 °C ve % 75,47, konkors katında 26,48 °C ve % 67,97, Gayrettepe istasyonu peron katında 27,44 °C ve % 67,89, konkors katında 27,98 °C ve % 63,35 olarak hesaplanmıştır.

Yaz mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda ortalama RWI değeri yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için 0,26, peronda 235 s tren beklediği senaryo için 0,18 ve konkors katı için 0,23 olarak hesaplanmıştır. Yaz mevsiminde Gayrettepe istasyonunda ortalama RWI değeri yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için 0,37, peronda 235 s tren beklediği senaryo için 0,29 ve konkors katı için 0,31 olarak hesaplanmıştır.

Sonbahar mevsiminde yolculu alanlarda en yüksek sıcaklık değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında 29,67 °C ve konkors katında 28,72 °C, Gayrettepe istasyonu peron katında 31,00 °C ve konkors katında 31,20 °C olarak ölçülmüştür. Sonbahar mevsiminde yolculu alanlarda en yüksek bağıl nem değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında % 91,56 ve konkors katında % 82,15, Gayrettepe istasyonu peron katında % 74,70 ve konkors katında % 74,40 olarak ölçülmüştür. Sonbahar mevsiminde yolculu alanlarda ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri Şişli-Mecidiyeköy istasyonu peron katında 24,96 °C ve % 65,96, konkors katında 24,66 °C ve % 59,52, Gayrettepe istasyonu peron katında 26,87 °C ve % 59,30, konkors katında 26,69 °C ve % 56,36 olarak hesaplanmıştır.

Sonbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda ortalama RWI değeri yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için 0,23, peronda 235 s tren beklediği senaryo için 0,16 ve konkors katı için 0,18 olarak hesaplanmıştır. Sonbahar mevsiminde Gayrettepe istasyonunda ortalama RWI değeri yolcunun perona iner inmez trene bindiği senaryo için 0,34, peronda 235 s tren beklediği senaryo 0,25 ve konkors katı için 0,26 olarak hesaplanmıştır.

İstasyonların peron ve konkors katlarında ölçülen sıcaklık ve bağıl nem verileri incelendiğinde yüksek değerlerin olduğu ve genel itibariyle literatürde bulunan ısıl konfor şartlarının sağlanmadığı belirlenmiştir [84].

Ortalama RWI değerleri, ilkbahar mevsiminde Şişli-Mecidiyeköy istasyonu hariç incelenen tüm mevsimlerde 2 istasyonda da ASHRAE konfor sınıflandırması açısından ısıl konfor şartlarının sağlanmadığını göstermiştir.

Ortalama RWI değerleri karşılaştırıldığında ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinin tamamında aç-kapa tip Gayrettepe istasyonunda delme tünel tip Şişli-Mecidiyeköy istasyonuna göre ısıl konfor şartlarının daha kötü olduğu sonucuna varılmıştır. Yolcuların peronda 235 s beklemesi sonucu metabolik hızda meydana gelen düşüşe bağlı olarak RWI değerlerinde de azalma olduğu görülmüştür.

Aç-kapa tip Gayrettepe istasyonunda peron kesit alanının delme tünel tip Şişli-Mecidiyeköy istasyona göre daha büyük olması sebebiyle piston etkisi kaynaklı hava hızının bu istasyonda düşük seviyede olduğu ve sonucunda yolcular üzerindeki serinleme etkisini azaltarak hesaplanan RWI değerlerini yükselttiği belirlenmiştir.

Ortalama RWI değerleri ve Şekil 3.19’da sunulan grafik birlikte değerlendirildiğinde Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda yolcuların yoğunluğunun ve Gayrettepe istasyonunda da hemen hemen tamamının özellikle yaz ayında daha serin bir ortam istediği ortaya çıkmıştır.

İstasyonlarda ölçülen sıcaklık ve hesaplanan RWI değerlerinin, yakın konumdaki meteorolojik hava ölçüm istasyonundan temin edilen dış hava sıcaklığı verileri ile mevsimsel bazda benzer değişim trendleri gösterdiği belirlenmiştir.

Tünel duvarlarından sızan su, iklim koşulları ve yolcular, istasyonlarda bağıl nem değerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Uluslararası kabul gören standartların güncel versiyonlarında bağıl nem için üst limit değeri bulunmamakla birlikte yüksek bağıl nem değerinin özellikle yüksek sıcaklıklarda hissedilen sıcaklığı artırdığı ve ısı

konforu olumsuz etkilediği bilinmektedir. Ayrıca yüksek nemli ortamlar bakteri üremesi için uygun şartlar oluşturarak yolcu sağlığı üzerinde de olumsuz etkilere yol açabilmektedir.

Yapılan ısı konfor incelemeleri sonucunda, yolcu konforu ve sağlığı açısından İstanbul'da işletme altında olan ve yeni yapılacak metro hatlarında yolculu alanlar için iklimlendirme sistemlerine ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda, farklı işletme senaryoları (headway, tren konfigürasyonu vb.), istasyon derinlikleri, iklim şartları ve PAKS tipleri (tam boy, yarım boy) için saha ölçümleri ve HAD analizleri yapılarak değişkenlerin yolcu ısı konforu üzerindeki etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

5.2 Acil Durum Yangın İnceleme Sonuçları

Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda yolcuların peron katını 5,36 dakikada (322 s), istasyonu ise 8,53 dakikada (512 s) tahliye ettiği hesaplanmıştır. Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda farklı debilere sahip fanlar kullanılarak yapılan HAD analizleri sonucunda 6 MW yangın yükü için 4 adet 50 m³/s ve 25 MW yangın yükü için 4 adet 90 m³/s debili tünel havalandırma fanlarının en az tahliye süresi boyunca NFPA 130 standardında belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterlerini sağladığı belirlenmiştir.

Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü orta hızda yangın büyüme eğrisi için uygun sonuç alınan senaryo, aynı tünel havalandırma fan debisi (4 adet 90 m³/s) kullanılarak çok hızlı yangın büyüme eğrisine sahip 25 MW yangın yükü senaryosu için tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda sıcak hava ve dumanın daha fanlar devreye girmeden kısa sürede peronu kapladığı ve yolcu tahliyesi açısından risk olduğu görülmüştür. Bu sonuç işletmede kullanılacak tren ile HAD analizlerinde kullanılan trenin yangın özellikleri açısından aynı veya benzer olmasının önemini göstermiştir.

Şişli-Mecidiyeköy istasyonunda 25 MW yangın yükü için tüm tünel havalandırma fanları egzoz modunda çalıştırıldığında uygun sonuç alınan senaryo (4 adet 90 m³/s), kuzey yönde olan fanlar basma (2 adet 90 m³/s) ve güney yönde olan fanlar egzoz (2 adet 90 m³/s) modunda çalıştırılarak tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda sıcak hava ve dumanın yolcu tahliye güzergahında ilerleyerek merdiven bölgesine ve akabinde

konkors katına ulaştığı görülmüştür. Analiz edilen egzoz-basma senaryosunun yolcu tahliyesi açısından risk oluşturduğu belirlenmiştir.

Gayrettepe istasyonunda yolcuların peron katını 4,21 dakikada (253 s), istasyonu ise 7,22 dakikada (433 s) tahliye ettiği hesaplanmıştır. Gayrettepe istasyonunda farklı debilere sahip fanlar kullanılarak yapılan HAD analizleri sonucunda 6 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma fanlarının en az tahliye süresi boyunca NFPA 130 standardında belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. 25 MW yangın yükü için sadece tünel havalandırma fanlarının çalıştığı senaryolarda başarılı sonuçlar alınamadığı için senaryolara peron altı egzoz fanları da dahil edilmiştir. İlave fanlarla yapılan analizlerin sonuçlarında iyileşme olmakla birlikte dumanın konkors katına ulaşması engellenememiştir. Bu sonuçlar mimari tasarımda bazı iyileştirmeler yapılmasını gerekli kılmıştır. Mimari tasarımda revizyon olarak konkors katının uç noktalarına ve ortadaki merdivenlerin etrafına duvar örülmüştür. İlave olarak merdiven üzerindeki bölümlere tavan kotundan 1 m aşağıya kadar duvar eklenmiştir.

Revize edilen mimari tasarım kullanılarak yapılan HAD analizi sonucunda 25 MW yangın yükü için 4 adet 120 m³/s debili tünel havalandırma ve 2 adet 55 m³/s debili peron altı egzoz fanlarının en az tahliye süresi boyunca NFPA 130 standardında belirtilen hava hızı, sıcaklık ve görüş mesafesi kriterlerini sağladığı belirlenmiştir.

Yapılan acil durum yangın incelemeleri sonucunda, farklı istasyon tiplerinin, yangın yükü değerlerinin ve yangın büyüme katsayılarının tünel havalandırma fan debisi üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca, tünel havalandırma fan debisi, fan çalışma senaryoları ve tren yangınına ilişkin parametrelerdeki değişimlerin yolcu tahliyesi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Aç-kapa tip istasyonlarda sıcak hava ve duman kontrolünün delme tünel tip istasyonlara göre daha zor olduğu, mimari tasarımların ve oluşturulan yangın senaryolarının tüm bileşenleriyle birlikte bir bütün olarak ele alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, farklı yangın yükleri ve büyüme katsayıları için yangın düzenekleri kurularak saha ölçümleri yapılması ve elde edilen verilerin HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<https://www.metro.istanbul/>>, erişim tarihi 17.03.2025.
- [2] **Ye, X., Lian, Z., Jiang, C., Zhao, Z. & Chen, H.** (2010). Investigation of indoor environmental quality in Shanghai metro stations, China, *Environmental Monitoring and Assessment*, 167 (9), 643-651.
- [3] **Passi, A., Nagendra, S. M. S. & Maiya, M. P.** (2021). Characteristics of indoor air quality in underground metro stations: A critical review, *Building and Environment*, 198, 107907.
- [4] **Kim, M., SankaraRao, B., Kang, O., Kim, J. & Yoo, C.** (2012). Monitoring and prediction of indoor air quality (IAQ) in subway or metro systems using season dependent models, *Energy and Buildings*, 46, 48-55.
- [5] **Barmeparesos, N., Assimakopoulos, V. D., Assimakopoulos, M. N. & Tsairidi, E.** (2016). Particulate matter levels and comfort conditions in the trains and platforms of the Athens underground metro, *AIMS Environmental Science*, 3, 199-219.
- [6] **Tan, S. T., Mohamed, L. C., Ng, L.C. & Aik, J.** (2022). Air quality in underground metro station commuter platforms in Singapore: A cross-sectional analysis of factors influencing commuter exposure levels, *Atmospheric Environment*, 273, 118962.
- [7] **Lin, C., Wu, L., Xia, H., Zhen, M., Shen, C., Zhu, J. & Li, X.** (2022). Characteristics of the thermal environment, air quality, and passenger comfort in the underground transfer space of metro stations in Beijing, *Journal of Building Engineering*, 59, 105093.
- [8] **Yang, J. B., Fan, X. W., Zhang, H., Zheng, W. D. & Ye, T. Z.** (2023). A review on characteristics and mitigation strategies of indoor air quality in underground subway stations, *Science of the Total Environment*, 869, 161781.
- [9] **Passi, A., Nagendra, S. M. S. & Maiya, M. P.** (2023). Occupational exposure and personal exposure to hazardous air pollutants in underground metro stations and factors causing poor indoor air quality, *Air Quality, Atmosphere, and Health*, 15, 1851-1870.
- [10] **Wang, Z., Liu, J., Yao, M., He, M., Shang, W. & Dong, X.** (2024). Indoor air quality and sick-building syndrome at a metro station in Tianjin, China, *Environment International*, 187, 108673.
- [11] **Karim, A.S., Malone, M., Bruno, A., Egger, A. L., Posner, M. A. & Shakya, K. M.** (2024). Assessment of air quality in the Philadelphia, Pennsylvania subway, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 1-9.

- [12] **Oh, H. R., Park, D. S. R., Ko, H. Y., Seo, J., Lee, M. & Choi, W.** (2025). Comprehensive analysis of PM2.5 concentrations in the Seoul metro underground stations: Relationships with indoor sources and outdoor air quality, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 61, 1.
- [13] **Katavoutas, G., Assimakopoulos, M. N. & Asimakopoulos, D. N.** (2016). On the determination of the thermal comfort conditions of a metropolitan city underground railway, *Science of The Total Environment*, 566-567, 877–887.
- [14] **Ampofo, F., Maidment, G. & Missenden, J.** (2004). Underground railway environment in the UK Part 1: Review of thermal comfort, *Applied Thermal Engineering*, 24, 611-631.
- [15] **Ampofo, F., Maidment, G. & Missenden, J.** (2004). Underground railway environment in the UK Part 3: Methods of delivering cooling, *Applied Thermal Engineering*, 24, 647-659.
- [16] **Lee D. H. K. & Henschel, A.** (1963). *Evaluation of Thermal Environment in Shelters*. Washington, DC.: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Division of Occupational Health.
- [17] **United States Department of Transportation** (1976). *Subway Environmental Design Handbook Vol. I: Principles and Applications*. Washington, DC.
- [18] **Fanger, P. O.** (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- [19] **ISO 7730** (2005). *Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- [20] **ASHRAE 55** (2023). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- [21] **Ordódy, P.** (2000). Thermal comfort in the passenger areas of the Budapest metro, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 44 (2), 309-317.
- [22] **Abbaspour, M., Jafari, M. J., Mansouri, N., Moattar, F., Nouri, N. & Allahyari, M.** (2008). Thermal comfort evaluation in Tehran metro using relative warmth index, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5 (3), 297-304.
- [23] **Marzouk, M. & Abdelaty, A.** (2014). Monitoring thermal comfort in subways using building information modeling, *Energy and Building*, 84, 252-257.
- [24] **Sui, X., Chen, S., Han, B. & Yu, S.** (2023). Evaluation of the thermal environment of Xi'an subway stations in summer and determination of the indoor air design temperature for air-conditioning, *Sustainability*, 15 (7), 6111.

- [25] **Cao, J. J.** (2000). *A study on numerical simulation of subway enviromental control*. (Doctoral dissertation). Southwest Jiaotong University, China.
- [26] **Xiong, Y.** (2001). *The simulation and analysis of environmental condition of Beijing subway station*. (Doctoral dissertation). Beijing Jiaotong University, China.
- [27] **Wang, Z. L.** (2003). *A CFD simulation and optimization of the ventilation of the side-platform subway station*. (Doctoral dissertation). Tianjin University, China.
- [28] **Huang, P.** (2004). *Numerical simulation of flow characteristics in subway tunnel and station*. (Doctoral dissertation). Beijing Jiaotong University, China.
- [29] **Kim, J. Y., & Kim, K. Y.** (2007). Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 166-172.
- [30] **Yuan, K., & You, S.** (2007). CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 474-482.
- [31] **Lin, C., Chuah, Y. K. & Liu, C.** (2008). A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system, *Applied Thermal Engineering*, 28, 372-379.
- [32] **Na, L. Y.** (2008). *CFD analog simulation and experiments study on ventilation and fire of subway stations*. (Doctoral dissertation). Tianjin University, China.
- [33] **Yang, J. X.** (2008). *A CFD simulation of the air-conditioning system in the side-platform subway station*. (Doctoral dissertation). Tianjin University, China.
- [34] **Kang, Q. G.** (2009). *Research on the platform screen door impact on subway station environment*. (Doctoral dissertation). Beijing University of Technology, China.
- [35] **Li, J.** (2009). *Subway station air-conditioning load caculation method research based on field measurement*. (Doctoral dissertation). Tsinghua University, China.
- [36] **Pflitsch, A., Bruene, M., Steiling, B., Killing-Heinze, M., Ahnew, B., Irving, M. & Lockhart, J.** (2012). Air flow measurements in the underground section of a UK light rail system, *Applied Thermal Engineering*, 32, 22-30.
- [37] **Camelli, F. E., Byrne, G. & Löhner, R.** (2014). Modeling subway air flow using CFD, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 20-31.
- [38] **Büyükşirin, O.** (2014). *M2 hattı Şişli istasyonu platform ayırıcı kapıların ısıl konfora ve hava hareketlerine etkisinin incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [39] **Han, J., Kwon, S. & Chun, C.** (2016). Indoor environment and passengers' comfort in subway stations in Seoul, *Building and Environment*, 104, 221-231.

- [40] **Assimakopoulos, M. N. & Katavoutas, G.** (2017). Thermal comfort conditions at the platforms of the Athens metro, *Procedia Engineering*, 180, 925-931.
- [41] **Ma, J., Zhang, X., Li, A., Deng, B., Lv, W., Guo, Y., Zhang, W. & Huang, L.** (2018). Analyses of the improvement of subway station thermal environment in northern severe cold regions, *Building and Environment*, 143, 579-590.
- [42] **Sinha, K. & Rajasekar, E.** (2020). Thermal comfort evaluation of an underground metro station in New Delhi using agent-based modelling, *Building and Environment*, 177, 106924.
- [43] **Pan, S., Liu, Y., Xie, L., Wang, X., Yuan, Y. & Jia, X.** (2020). A thermal comfort field study on subway passengers during air-conditioning season in Beijing, *Sustainable Cities and Society*, 61, 102218.
- [44] **Passi, A., Nagendra, S. M. S. & Maiya, M. P.** (2022). Evaluation of comfort perception of passengers in urban underground metro stations, *Energy for Sustainable Development*, 68, 273-288.
- [45] **Yu, H., Wang, Y., Qiu, P., & Chen, J.** (2019). Analysis of natural and man-made accidents happened in subway stations and trains: Based on statistics of accident cases, *ICFMCE 2018. MATEC Web of Conferences* 272, (01031). Abu Dhabi: Khalifa University, November 20-22.
- [46] **Moodie, K.** (1992). The King's Cross fire: Damage assessment and overview of the technical investigation, *Fire Safety Journal*, 18, 13-33.
- [47] **Url-2** <https://en.wikipedia.org/wiki/1995_Baku_Metro_fire>, erişim tarihi 17.03.2025.
- [48] **Fridolf, K., Nilsson, D. & Frantzich, H.** (2016). Evacuation of a metro train in an underground rail transportation system: Flow rate capacity of train exits, tunnel walking speeds and exit choice, *Fire Technology*, 52, 1481-1518.
- [49] **NFPA 130** (2023). *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. Massachusetts, USA: National Fire Protection Association.
- [50] **United States Department of Transportation** (2002). *Subway Environmental Design Handbook, Vol. II: Subway Environmental Simulation Computer Program SES Version 4.1, Part I User's Manual*. Washington, DC.
- [51] **Kennedy, W. D., Gonzales, J. A. & Sanchez, J. G.** (1996). Derivation and application of the SES critical velocity equations, *ASHRAE Transactions*, 102.
- [52] **Koç, G., & Ceylan, Ö. C.** (2015). Metro istasyon ve tünellerinin acil durum havalandırmasında yeni yaklaşımlar ve uygulama esasları, *Tesisat Mühendisliği*, 145, 24-34.
- [53] **Shi, W. B.** (2008). *Study on fire risk assessment and human evacuation of subway stations*. (Doctoral dissertation). Beijing University of Technology, China.

- [54] **Zhao, L. J.** (2008). *Numerical simulation study on emergency ventilation system in subway stations*. (Doctoral dissertation). Tianjin University, China.
- [55] **Musluoğlu, E.** (2009). *A theoretical analysis of fire development and flame spread in underground trains*. (Doctoral dissertation). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- [56] **Roh, J. S., Ryou, H. S., Park, W. H. & Jang, Y. J.** (2009). CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 447-453.
- [57] **Meng, N., Hu, L., Wu, L., Yang, L., Zhu, S., Chen, L. & Tang, W.** (2014). Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 151-159.
- [58] **Weng, M. C., Yu, L. X., Liu, F. & Nielsen, P. V.** (2014). Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening portal, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 96-104.
- [59] **Zhang, J., Li, Y., Dai, B., Li, X. & Huang, Y.** (2018). The effect of exhaust velocity on smoke exhaust in subway platform fire, *Procedia Engineering*, 211, 1018-1025.
- [60] **Meng, N., Wang, Q., Liu, Z., Li, X. & Yang, H.** (2017). Smoke flow temperature beneath tunnel ceiling for train fire at subway station: Reduced-scale experiments and correlations, *Applied Thermal Engineering*, 115, 995-1003.
- [61] **Liu, F., Liu, Y., Xiong, K., Weng, M. & Wang, J.** (2020). Experimental and numerical study on the smoke movement and smoke control strategy in a hub station fire, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 96, 103177.
- [62] **Long, Z., Liu, C., Yang, Y., Qiu, P., Tian, X. & Zhong, M.** (2020). Full-scale experimental study on fire-induced smoke movement and control in an underground double-island subway station, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103508.
- [63] **Li, J., Li, Y., Li, J., Li, X. & Huang, Y.** (2021). Study on smoke control under mechanical exhaust strategy in a cross-type interchange subway station, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 112, 103897.
- [64] **Qiu, P., Long, Z., Liu, C., Yang, Y., Tian, X. & Zhong, M.** (2021). Full-scale experiment on smoke propagation in metro station tunnel fire under opening the platform screen doors, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 107, 103662.
- [65] **Xu, D., Li, Y., Li, J., Zhang, J. & Li, J.** (2021). Investigation on the effect of platform height on smoke characteristics of fire scenarios for subway stations, *Sustainability*, 13, 10584.

- [66] **Chen, J., Long, Z., Liu, C., Cai, S., Xu, B., Cheng, H. & Zhong, M.** (2022). Investigation of the performance of lateral ventilation in subway station fires, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 228, 105133.
- [67] **Liu, Y., Liu, F., Weng, M., Obadi, I. & Geng, P.** (2022). Research on thermal-driven smoke control by using smoke curtains during a subway platform fire, *International Journal of Thermal Sciences*, 172, 107255.
- [68] **Lan, B., Li, Y. R., Li, P. C. & Gong, H. F.** (2022). Numerical simulation of the chimney effect on smoke spread behavior in subway station fires, *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102446.
- [69] **Long, Z. & Zhong, M.** (2024). Predicting smoke temperature distribution beneath ceiling for a large subway station fire, *Journal of Building Engineering*, 98, 111138.
- [70] **Chen, J., Yang, D., Pan, R. & Long, Z.** (2025). The new role of smoke exhaust system in subway station fire: local environment improvement and safe channel creation, *Journal of Building Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112577>.
- [71] **Hyundai Rotem Company** (2009). *Hyundai Rotem Training Manuel*. South Korea.
- [72] **White, F. M.** (1994). *Fluid Mechanics*. New York, NY.: McGraw-Hill.
- [73] **Baron, A., Mossi, M. & Sibilla, S.** (2001). The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, 365-401.
- [74] **Prince, J. A.** (2015). *Coupled 1D-3D simulation of flow in subway transit networks*. (Doctoral dissertation). Imperial College London, England.
- [75] **Ünal, Y. S., Sonuç, C. Y., Incecik, S., Topcu, H. S., Diren-Üstün, D. H. & Temizöz, H. P.** (2020). Investigating urban heat island intensity in Istanbul, *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 175-190.
- [76] **Ünal, Y. S., Sonuç, C. Y., Incecik, S., Topcu, H. S., Diren-Üstün, D. H. & Temizöz, H. P.** (2020). Investigating urban heat island intensity in Istanbul, *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 175-190.
- [77] **Url-3** <<https://www.testo.com/tr-TR>>, erişim tarihi 17.03.2025.
- [78] **DIN 5510** (1988). *Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen*. Berlin, Deutschland: Deutsches Institut für Normung.
- [79] **Blennemann, F., Girnau, G., Grossmann, H., Pütz, R., & Schreyer, J.** (2005). *Brandschutz in Fahrzeugen und Tunneln des ÖPNV*. Berlin, Deutschland: VDV & VDV-Förderkreis.
- [80] **NFPA 204** (2024). *Standard for Smoke and Heat Venting*. Massachusetts, USA: National Fire Protection Association.
- [81] **TS 12127** (1997). *Şehir içi yollar-Raylı Taşıma Sistemleri Bölüm 1: Yeraltı İstasyon Tesisleri Tasarım Kuralları*. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

- [82] **EN 115-1** (2017). *Safety of Escalators and Moving Walks*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- [83] **Transport for London** (2012). *London Underground Station Planning Standards and Guidelines*. London, England: Transport for London.
- [84] **Parker, H.** (1972). Air-conditioning related to passenger environment, *IMechE. Railway Division Conference on Passenger Environment*, (pp.58-63). March 23-24.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İsmail Ahmet ODABAŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2007-2008 yılları arasında Pasifik Mühendislik Taahhüt Sanayi ve Ticaret A.Ş. de Tasarım ve Teklif Mühendisi olarak çalıştı.
- 2008-2020 yılları arasında Metro İstanbul A.Ş. de Tasarım Mühendisi ve Mekanik Sistemler Tasarım Şefi görevlerinde bulundu.
- 2020 yılından itibaren TCDD Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. de Elektromekanik Sistemler Tasarım Müdürü olarak iş hayatına devam etmektedir.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Odabaş, I. A., Eskin, N.** 2024. Investigation Of Train Fire at Bored Tunnel Type Metro Station. *5th International Bursa Scientific Research Congress*, March 01-03, 2024 Bursa, Türkiye.
- **Odabaş, I. A., Eskin, N.** 2025. Evaluation of Passenger Thermal Comfort for Two Different Underground Metro Station Typologies in Istanbul, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 15(2), 152-166.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Odabaş, İ. A., Gengeç, N. E., Öztüzün, B., Durmayaz, A.** 2013. Isıtılmış ve Adyabatik Düşey Borularda Su Buhar Akışı İçin İki Fazlı Akış Sürtünme Çarpanı Korelasyonlarının Homojen Akış Modelinin ve Basınç Düşümü Bileşenlerinin Analizi. *ULIBTK'13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Eylül 09-12, 2013 Samsun, Türkiye.
- **Öztüzün, B., Odabaş, İ. A., Durmayaz, A.** 2013. İki Fazlı Akış Parametreleri İçin Tarama Tablosu Geliştirme Metodolojisi. *ULIBTK'13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Eylül 09-12, 2013 Samsun, Türkiye.

- **Durmayaz, A., Odabaş, I. A., Groeneveld, D. C., Gengec, N. E.** 2011. Assessment of Selected Two-Phase Friction Multiplier Correlations for Steam-Water Flows in Vertical Heated and Unheated Tubes. *20th International Conference on Nuclear Engineering*, July 30-August 3, 2012 California, USA.

